



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İSTANBUL METROSU,
AKSARAY - YENİKAPI GÜZERGAHININ
MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ İNCELEMESİ**

Jeo.Müh. İbrahim KUŞKU
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Uygulamalı Jeoloji Programı

Danışman
Prof.Dr. Süleyman DALGIÇ

Aralık, 2006

İSTANBUL

Bu alışma 08/01/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeoloji Mühendisliğı Anabilim Dalı Uygulamalı Jeoloji Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof.Dr. Süleyman DALGIÇ
İstanbul Üniversitesi

Prof.Dr. Okay GÜRPINAR
İstanbul Üniversitesi

Doç.Dr. Ali Malik GÖZÜBOL
İstanbul Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. İbrahim Halil ZARİF
İstanbul Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Okan TEZEL
İstanbul Üniversitesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin T895/26062006 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı Prof.Dr.Süleyman DALGIÇ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Çalışmalarına olanak sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Daire Başkanlığı Raylı Sistem Müdürü Sn. Yalçın EYİĞÜN'e ve bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen başta Sn. Murat HIZEL olmak üzere tüm Anadolu Metro Ortaklığı ve Özgün İnşaat Taah.Harf.Ltd.Şti. çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

ARALIK, 2006

İbrahim KUŞKU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	vi
ÖZET	iv
SUMMARY	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI.....	1
1.2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	1
1.3. İNCELEME ALANI	3
1.3.1. Konum ve Ulaşım	3
1.3.2. Topografya ve Jeomorfoloji	4
1.3.3. Nüfus ve Yerleşim	5
1.3.4. İklim	5
2. MALZEME VE ÇALIŞMA YÖNTEMLERİ	7
3. JEOLOJİ	8
3.1. STRATİGRAFİ	8
3.1.1. Trakya Formasyonu.....	8
3.1.2. Çukurçeşme formasyonu.....	11
3.1.3. Güngören formasyonu	12
3.1.4. Bakırköy Formasyonu	13
3.1.5. Kuşdili formasyonu.....	13
3.1.6. Alüvyon	14
3.1.7. Yapay Dolgular.....	14
3.2. YAPISAL JEOLOJİ VE TEKTONİK	14
3.2.1. Tabakalar.....	16
3.2.2. Kıvrımlar	16
3.2.3. Faylar	16
3.2.4. Eklem Takımları	16
4. BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ	17
5. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ	18
5.1. LİTOLOJİ.....	18
5.2. LABORATUAR DENEYLERİ	20
5.3. KAYA KÜTLESİ SINIFLAMASI (RMR).....	23
5.3.1. Kayacın Basınç Dayanımı.....	23
5.3.2. Kaya Kalitesi Değerleri (RQD)	24
5.3.3. Süreksizlik Aralığı.....	24
5.3.4. Süreksizliklerin Durumu	24
5.3.5. Yeraltısuyu Durumu	25

5.3.6. Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme	25
5.4. RMR KAYA SINIFI VE PUANLARI	26
5.5. RMR İLE DESTEKSİZ KAZI DURAYLILIĞI ARASINDAKİ İLİŞKİ	27
6. KAZI DESTEK SİSTEMLERİ	28
6.1. L VE M TİPİ TÜNEL KAZISI VE DESTEK ÇALIŞMALARI.....	29
6.2. B1 TİPİ TÜNEL KAZISI VE DESTEK ÇALIŞMALARI	35
6.3. KESİŞEN B1 (KB1) TİPİ TÜNEL KAZISI VE DESTEK ÇALIŞMALARI	38
7. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYON ÖLÇÜMLERİ	42
7.1. TÜNEL İÇİ DEFORMASYON (KONVERJANS) ÖLÇÜMLERİ.....	42
7.2. YÜZEY VE BİNA OTURMALARI	43
8. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	45
8.1. LİTOLOJİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ	45
8.2. YAPISAL JEOLJİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ	46
8.3. KAZI KADEMELERİ İLE DEFORMASYONLAR ARASI İLİŞKİ	47
8.3.1. Kazı Kademesi İle Tünel İçi Deformasyonlar Arası İlişki.....	47
8.3.2. Kazı Kademesi İle Yüzey Deformasyonları Arası İlişki	49
8.4. KAYA KÜTLESİ SINIFI (RMR) VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ.....	51
8.5. ÖRTÜ KALINLIĞI VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ	52
8.6. TÜNEL KAZI KESİTİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ	53
8.7. DESTEK SİSTEMİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ	54
8.8. YÜZEY YÜKLERİ İLE DEFORMASYONLAR ARASI İLİŞKİ	55
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
10. KAYNAKLAR	60
11. ÖZGEÇMİŞ	63
EKLER	64

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1:	Yerbulduru haritası.....	4
Şekil 3.1:	İnceleme alanı ve çevresinin jeoloji haritası ve kesitleri.....	9
Şekil 3.2:	Genelleştirilmiş stratigrafi sütun kesiti (Ölçeksiz).....	10
Şekil 5.1:	LRTS hattı örtü yükü değişimi.....	18
Şekil 5.2:	L ve M Tipi tünellerin üst yüzeyinde dolgu ve tarihi eserden görünüm	20
Şekil 5.3:	LRTS hattı RMR değerleri.....	26
Şekil 5.4:	Çeşitli RMR kaya kütleleri sınıflarına göre, desteksiz durma süresi ve tavan açıklığı arasındaki ilişki (Bieniawski, 1989)	27
Şekil 6.1:	L ve M tipi tünellerin özellikleri	29
Şekil 6.2:	İlk sıra çelik hasır montajı.....	31
Şekil 6.3:	Çelik iksa montajı.....	31
Şekil 6.4:	M Tipi tünelde 1., 2. ve 3. kademe kazıları.....	32
Şekil 6.5:	L Tipi tünelde orta duvar uygulaması	32
Şekil 6.6:	L Tipi ve M Tipi tünel kazı destek sistemi.....	33
Şekil 6.7:	M Tipi tünel tavanı, 1. kademe enjeksiyonlu kaya bulonu uygulaması	35
Şekil 6.8:	B1 Tipi tünel özellikleri	36
Şekil 6.9:	B1 Tipi tünel kazı destek sistemi	37
Şekil 6.10:	Kesişen B1 tipi tünel özellikleri	38
Şekil 6.11:	KB1 Tüneli orta duvar imalatı	39
Şekil 6.12:	Üçüncü aşama B1 kazısı ve eski destek sisteminin kırılması.....	39
Şekil 6.13:	KB1 Tipi tünel 1. aşama tünel tavanı çelik iksası	40
Şekil 6.14:	KB1 Tipi tünel kazı destek sistemi	41
Şekil 7.1:	Konverjans ve yüzey deformasyon ölçüm noktaları	42
Şekil 7.2:	LRTS hattı konverjans ölçüm noktaları	43
Şekil 7.3:	Tünel güzergahı boyunca ölçülen en yüksek yüzey deformasyonu değerleri	44
Şekil 8.1:	Yoğun süreksizlik düzlemleri ve oluşan yüzey deformasyonları.....	46
Şekil 8.2:	M Tipi tünel, deformasyon (0+291.40 km. ve 0+294.80 km.) ve kazı ilerleme grafiği	48
Şekil 8.3:	Hat 2 B1 Tipi tünel, deformasyon (0+368.00 km.) ve kazı ilerleme grafiği	49
Şekil 8.4:	Zamana bağlı, yüzey deformasyonu ve kazı ilerleme grafiği.....	50
Şekil 8.5:	Zamana bağlı, yüzey deformasyonu ve kazı ilerleme grafiği.....	51

Şekil 8.6:	RMR ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 1)	52
Şekil 8.7:	RMR ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 2)	52
Şekil 8.8:	Örtü kalınlığı ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 1)	53
Şekil 8.9:	Örtü kalınlığı ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 2)	53
Şekil 8.10:	Kazı kesiti ve yüzey deformasyonu arası ilişki (Hat 1).....	54
Şekil 8.11:	Kazı kesiti ve yüzey deformasyonu arası ilişki (Hat 2).....	54
Şekil 8.12:	M Tipi tünel kazı destek sistemi denemesi	55
Şekil 8.13:	Değişken yapı yükleri altında deformasyonlar.....	56

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1:	Florya Devlet Meteoroloji İstasyonu Verileri (1937-1996).....	6
Tablo 5.1:	İstanbul Metrosu Çalışmaları laboratuvar deney sonuçları	22
Tablo 5.2:	Laboratuvar deney sonuçları (Zemar, 2004).....	23
Tablo 5.3:	Trakya formasyonu kaya kalitesi sınıfları (RMR).....	26
Tablo 6.1:	LRTS hattı tünel tipleri, uzunlukları ve başlangıç mesafeleri.....	28
Tablo 6.2:	Kazı destek elemanlarının özellikleri	33
Tablo 6.3:	L Tipi Tünel destek sistemi uygulama bilgileri	33
Tablo 6.4:	M Tipi Tünel destek sistemi uygulama bilgileri	34
Tablo 6.5:	B1 Tipi tünel kazı destek elemanlarının özellikleri	36
Tablo 6.6:	B1 Tipi Tünel destek sistemi uygulama bilgileri.....	37
Tablo 6.7:	Kesişen B1 Tipi tünel kazı destek elemanlarının özellikleri	41
Tablo 6.8:	KB1 Tipi tünel destek sistemi uygulama bilgileri	41
Tablo 7.1:	Tünel tipleri ve oluşan en büyük deformasyonlar	43

ÖZET

İSTANBUL METROSU, AKSARAY - YENİKAPI GÜZERGAHININ MÜHENDİSLİK JEOLojİSİ İNCELEMESİ

İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışma ile İstanbul Metrosu ikinci aşama kazıları kapsamındaki Aksaray – Yenikapı güzergahında tünel içi ve yüzey deformasyonların kaya kütlesi, örtü kalınlığı, kazı kesiti, kazı kademesi, yüzey yükleri ve destek sistemi özellikleri ile ilgili nedenleri araştırılmıştır.

Aksaray – Yenikapı istasyonlarını birleştirecek olan LRTS hattında L, M, Kesişen B1 (KB1) ve B1 tünelleri kumtaşı, siltaşı ve kıltaşı aralanmasından oluşan Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu içerisinde, ortalama 8 - 12 metrelik çok sık örtü yükü altında açılmaktadır. Bu nedenle, tünel ekseninde ve yakın dolayındaki deformasyon değerlerinin araştırılması, can ve mal güvenliği için önem kazanmıştır.

Elde edilen verilere göre fay ve buna bağlı süreksizlik düzlemlerinin yüzey deformasyonlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Tünel kazı çalışmaları sırasında kullanılan parçalı kazı yöntemi, deformasyonların gelişimini etkilemekte ve 4. kademe kazılarıyla dairesellikten uzaklaşan kazı kesitiyle deformasyonlar ani artışlar göstermektedir. Bununla birlikte birbirine yaklaşık paralel açılan B1 tünel kazıları birbirini etkileyerek deformasyonların artmasına neden olmaktadır. Tünel tavanına enjeksiyonlu kaya bulonu yerine uygulanan boru sürenler ve ayna zemin çivileri yüzey deformasyonu değerlerini 7 – 8 mm ile sınırlamıştır. Tünel güzergahında kesit alanlarının değiştiği bölgelerde yüzey deformasyonu değerlerinin arttığı saptanmıştır. Ayrıca, L ve M tipi tünel eksenlerinde, stabilite şartları sağlanana kadar yıkılmayan donatılı beton duvar uygulaması çalışmaları olumlu yönde etkilemiş ve yüzey deformasyonlarını minimuma indirmede etkin bir parametre olarak saptanmıştır. Kazı çalışmaları sırasında gelişen deformasyonlarda etkin yüzey yükleri tünel kesitinin gerilmelerin az olduğu yönde deformasyona uğramasını sağlamaktadır. Deformasyonların, yüzey yapılarından oluşan yüklerle ilişkilendirilmesi sonucunda destek sistemlerinin oluşturulmasında yapılacak bir yanlışlıkta ve/veya eksiklikte incelemeye konu LRTS hattı gibi sık tünellerde deformasyon değerlerinin kaya kütlesi özelliklerine bağlı kalmaksızın artış göstereceği belirlenmiştir.

SUMMARY

ENGINEERING GEOLOGICAL INVESTIGATION OF YUSUFPAŞA – AKSARAY LINE IN İSTANBUL SUBWAY

The rock mass of inner tunnel and surface deformations, cover thickness, cross-section of the excavation, grade of the excavation, surface weights and properties of support systems of Aksaray – Yenikapı line of Istanbul Subway has been investigated in this study as the Thesis of Master of Science in the Institute of Science of Istanbul University

On the LRTS line that will be conjoined in Aksaray - Yenikapı metro stations L,M, KB1 and B1 tunnels are being excavated under average 8–12 m thickness of very shallow overburden thickness and through Trakya Formation (Carboniferous age) which consist of sandstone, siltstone and claystone consecutively. Therefore, for the security of people and property around the excavation, it is vitally important to investigate the values of deformation along the tunnel axes and its vicinity.

According to the data obtained, surface deformations are highly effected by fault and discontinuity planes related to the fault. Partial excavation method effects development of deformations and the deformations drastically increase with cross-section of the excavation of 4th grade excavations that is getting away from circularity. Together with that, excavations of approximately parallel B1 tunnels increase deformations by effecting each other. The forepoles and face soil nails applied on the tunnel ceiling instead of rock bolts with injection limited the surface deformation values within 7-8 mm. In the segments of the tunnel route where cross-sections change, it has been determined that the surface deformation values increase. Also, in L and M types tunnel cross-sections, equipped wall application that is not destructed till stability gained, has been beneficial and found as a valid parameter to minimize the surface deformation values. A mistake or any lack in forming the support systems after evaluating the relations between the loads of surface structures and deformations it has been determined that the deformation values will rise without depending to the rock mass properties in such shallow tunnels as the LRTS line in this study.

1. GİRİŞ

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada, İstanbul Metrosu ikinci aşama kazıları kapsamındaki Aksaray – Yenikapı güzergahının (LRTS Hattı) litoloji, yapısal jeoloji, kazı kademeleri, kaya kütlesi özellikleri, örtü kalınlığı, yüzey yapıları, kazı kesiti ve destek sistemleri ile oluşan tünel içi ve yüzey deformasyonları arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

1.2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde önce, incelemeye temel oluşturan genel jeoloji konusundaki önceki çalışmalar, sonra tünel mühendisliğinde benzer anlayışların oluşmasına katkıda bulunmuş gelişmeler özetlenmektedir.

Ketin, 1988’de İstanbul bölgesinde Karbonifer Yaşlı Trakya formasyonu’nun Yapısal Özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmada, Trakya formasyonunun geçirdiği tektonik evrim tariflenmiş ve süreksizlik özellikleri ortaya konulmuştur.

Vardar ve Bayraktar, 1993’de İstanbul Metrosu Araştırma Galerisinde in-situ dayanım sınıflaması çalışmaları yapmışlardır. Çalışmada Trakya formasyonu içerisinde açılacak olan yeraltı yapılarının boyutlandırılması ve hesaplanması sırasında dikkat edilmesi gereken kayaç özellikleri ortaya konulmuş ve kaya sınıflama sistemi geliştirilmiştir. Bunun yanında araştırmacılar laboratuarda elde edilen dayanım özelliklerinin, arazide mevcut süreksizliklerin etkisiyle, % 91-96 oranında düşebileceğini belirtmişlerdir.

Eriş ve Vardar tarafından 1994 yılında yapılan İstanbul Metrosu Taksim – 4 Levent güzergahı temel kayaçlarının jeomekanik özellikleri ve duraylılık sorunları üzerinde

yaptığı çalışmada Trakya formasyonuna ait jeomekanik özellikler ortaya konulmuş ve deformasyon ölçümleri değerlendirilmiştir. Araştırmacı, tünellerde ve istasyon kazılarında oluşan deformasyonlara, jeolojik yapının, süreksizlik konumlarının, ortamın kaya kalitesinin, ayrışma ve yeraltı suyu durumunun etkin olduğunu belirtmiştir. Bu etkenlerin yanında kazı geometrisinin, çalışmalar sırasındaki hataların, kazı boyutları ve yöntemi ile ortamda oluşan ikincil gerilmelerin de deformasyonlarda önemli rol oynadığını ortaya koymuştur.

Vardar, 1994'de Metro tünellerinde duraylılığın korunması ve sağlanması için sağlamlaştırma, destekleme ve iyileştirme yöntemlerini ortaya koymuştur.

Biberoğlu ve Dalgıç, 1996'da İstanbul Metrosu kazılarında karşılaşılan fay zonlarının kaya duyarlılığına etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, Trakya formasyonu'na ait birimlerde açılan tünellerde fay zonu ve antiklinal bölgelerinde duraylılık riskinin arttığı ortaya konulmuştur.

Ayaydın, 2001'de İstanbul Metrosu 2. aşama kazıları sırasında 19/09/2001 günü Yenikapı'da meydana gelen göçükle ilgili yaptığı çalışmada olayın sebeplerini ve deformasyon ile destek sistemleriyle olan ilişkisini incelemiştir. Bu çalışmada göçük öncesi yüzey deformasyonlarının T tipi tünel yüzeyinde 28 mm değerine ulaştığı ve göçüğün hemen öncesinde bu değerlerin 6 – 10 mm artarak olayın gerçekleştiği belirtilmiştir. Göçüğe kazılar öncesi bilinmeyen bir su kuyusu ve oluşturduğu olumsuz etkiler sebep olmuş ve kazı aynasının yaklaşık 25 m. gerisinde olay meydana gelmiştir. Araştırmacı, çalışmada önceden bilinmeyen etkenlerin yer altı kazıları için her zaman tehlike oluşturduğunu ve rijit sistemlerinde bu tip olaylar karşısında yetersiz kalabileceğini belirtmiştir.

Dalgıç, 2002 yılında İstanbul Metrosu 1. aşama çalışmaları üzerinde yaptığı araştırmada tahmin edilen ile gerçek tünel davranışını karşılaştırmış ve yerinde yapılan ölçümlerde analitik yöntemlerle hesaplanan deformasyon miktarlarına yakın değerler tespit edilmiştir. Çalışmada, zayıf kaya zonlarında en yüksek konverjans ölçüm sonuçları 58 mm., yüzey deformasyonu değerleri ise 12 mm. olarak ölçülmüştür.

Zemin Mühendisliği ve İnşaat Sanayi, 2004’de inceleme alanı ön araştırmaları kapsamında, araştırma sondajları jeoteknik veri raporu hazırlamıştır. Raporda açılan araştırma sondajlarında karşılaşılan jeolojik birimlerin özellikleri ve Laboratuvar deneyleri çalışma verisi olarak kullanılmıştır.

2005 yılında Ocak tarafından yapılan çalışmada metro tünellerinde, kayaç özelliklerinin yüzey ve tünel içi deformasyonlarına etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, tünel içi deformasyonu en iyi açıklayan kayaç özelliğinin çekme dayanımı, yüzey deformasyonlarını en iyi ifade eden kayaç özelliğinin ise basınç dayanımının çekme dayanımına bölümü ile elde edilen değerler olarak belirtmiştir. Çalışmada deformasyonlara yaklaşım amacıyla bu değerlerin göz önünde tutulabileceği sonucuna varılmıştır.

Volkman ve Schubert, 2006 yılında yaptıkları çalışmada, zayıf kaya ortamında ve sığ derinlikte açılan tünellerde, yüzey deformasyonlarını ve ölçüm sistemlerini değerlendirmiştir. Araştırmacılar, deformasyonların önemli bir kısmının tünel aynasının 20 m. gerisinde ve hemen önünde meydana geldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca deformasyonların daha detaylı yorumlanabilmesi ve ileriye dönük tahminler yapılması için tünel içinden yerleştirilen inklinometrelere ait okumalardan yararlanmışlardır.

1.3. İNCELEME ALANI

1.3.1. Konum ve Ulaşım

İnceleme alanı İstanbul İli, Eminönü Belediyesi sınırları içerisinde olup, güneyde Marmara Denizi, kuzey doğuda Haliç ile sınırlı, tarihi yarımada olarak adlandırılan alanda bulunmaktadır (Şekil 1.1). İncelemeye konu LRTS tüneli, Tarihi Yarımada’da Vatan Caddesi’nde bulunan, hali hazırda mevcut hafif metro sisteminin Aksaray İstasyonu ile Yenikapı sahilinde inşası devam eden Marmaray Projesi Yenikapı İstasyonu arasında inşa edilmektedir. Tünel shaftı, Vatan Caddesi ile Millet Caddesi kesişiminde, Vatan Caddesi – Aksaray Köprülü Kavşağı yanında açılmıştır. Tünel güzergahı, söz konusu iki istasyon arası Namık Kemal Caddesi boyunca devam etmektedir.

İncelemeye konu tünelin bulunduğu güzergahta topografya kotu +13.90 m. ile +6.75 m arasında değişmekte ve bu topografya güneye doğru (Marmara Denizi'ne doğru) %2 değerini geçmeyen yataya yakın bir topografik eğimle deniz seviyesi olan “0” kotuna ulaşmaktadır.

İnceleme alanı yoğun olarak yerleşilmiş bir bölge olduğu için halk ve yönetim tarafından topografyada önemli değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklik özellikle İstanbul'da eski yerleşimin olduğu ve inceleme alanını oluşturan surlar içindeki kısımda yapılmıştır. Arazi düzeltmek amacıyla yapılan bu dolgulara örnek olarak Vatan Caddesi'nin bulunduğu alan verilebilir. Eski akarsu yatağı olan bu alan, Edirnekapı ile Topkapı arasından Yenikapı'ya doğru uzanır ki halen vadi karakterini muhafaza etmektedir. Ayrıca, inceleme alanının güneyinde, Yenikapı sahil şeridinde halen süren arkeolojik kazılarda dolgu kalınlığı yaklaşık 13 m. kalınlığa kadar ulaşmakta ve bu dolgular eski devirlere ait liman yapılarını örterek yatay bir topografya oluşturmaktadır.

1.3.3. Nüfus ve Yerleşim

Metro tünelleri, doğal olarak yerleşimin en yoğun olduğu bölgelerde yer alırlar. İnşa edilme amaçları trafiğin yoğun olduğu alanları rahatlatmak ve bunun yanında ulaşımı kolaylaştırmaktır. İnceleme alanı İstanbul'un yerleşiminin oldukça yoğun olduğu ve tarihi yapıların bulunduğu bir alanı kapsamaktadır. Mevcut yapıların en büyük kısmını ticarethaneler kullanırken, bu amaçla kullanılan yapıların dışındakiler ise otel olarak faaliyet göstermektedir.

1.3.4. İklim

İstanbul ve civarı ortak bir bölgesel iklim tipinin hakimiyeti altında olmamakla beraber gerçekte topografya, yükselti, nispi konum ve bitki örtüsü gibi faktörlerin karakterindeki değişikliklerden dolayı bazı önemli farklarla birbirinden ayrılan belirgin iklim tipleri arz eder.

İstanbul ilinde bulunan istasyonların vermiş olduğu verilere göre yıllık yağış ortalaması 787 mm.dir. İstanbul'da en düşük yağış alan istasyon Florya (641mm) olarak görülmektedir. İnceleme alanına en yakın Florya DMI'a ait veriler Tablo 1.1'de sunulmaktadır. İstanbul'a düşen ortalama yıllık yağışın % 35'i Kış mevsiminde, %23'ü

İlkbahar mevsiminde, % 14'ü yaz mevsiminde, % 28'i Sonbahar mevsiminde meydana gelmiştir. Kar yağışlı gün sayısı 10 günü geçmez.

Tablo 1.1: Florya Devlet Meteoroloji İstasyonu Verileri (1937-1996)

Aylar	Sıcaklık, t (°C)	Yağış, P (mm)	Rüzgar hızı, U (m/sn)	Bağıl nem, RH (%)	Güneşlenme, süresi, n (saat/dak)
1	5.30	90.60	3.9	78	2.47
2	5.5	65.40	3.70	77	3.3
3	6.90	60.30	3.5	76	4.34
4	11.10	44.8	2.9	74	6.26
5	15.90	29.50	2.60	75	8.39
6	20.6	25.80	2.70	71	10.36
7	23.2	20.8	3.30	68	11.3
8	23.10	22.4	3.20	69	10.44
9	19.70	34.40	3	72	8.22
10	19.4	60.00	2.9	75	5.58
11	11.55	86.40	3.10	77	4
12	8.00	102	3.70	78	2.48
Yıllık	13.90	642.4	3.20	74	6.40

Genel olarak Eylül ayında başlayan yağışlı dönem, Mart ayında da devam etmekte ve Mayıs ayından başlayarak Ağustos ayı sonuna kadar uzanan nispeten az yağışlı bir dönem oluşturmaktadır. Yine bu veriler ışığında, bölgesel yağışın ortalaması 717,2 mm, en fazla yağış düşen aylar 86.4 mm ile Kasım, 102 mm ile Aralık ve 90.6 mm ile Ocak ayıdır. En az yağış düşen aylar ise 25.8 mm ile Haziran, 20.8 mm ile Temmuz ve 22.4 mm ile Ağustos aylarıdır.

2. MALZEME VE ÇALIŞMA YÖNTEMLERİ

İncelemeye konu Aksaray – Yenikapı istasyonlarını birleştirecek olan LRTS hattı, L, M, Kesişen B1 ve B1 tünelleri, kumtaşı, siltaşı ve kiltası ardaalanmasından oлуşan Karbonifer yaşı Trakya formasyonu içerisinde açılmaktadır. İnceleme alanında sığ örtü yükünden dolayı yüzey ve tünel içi deformasyon değeri önemli kazanmıştır. Bu amaçla deformasyon değeri ile kaya kütlesi değeri, kazı destek sistemi ve yüzey yükleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Çalışmada, ön araştırmalar, tünel gözlem ve ölçümleri ile yüzey okuma değeri değerlendirilmeye alınmıştır. LRTS hattında oluşturulan 153 noktada yüzey deformasyonu, 89 noktada ise tünel içi deformasyon (konverjans) ölçümleri yapılmış ve çalışma kapsamında değerlendirilmeye alınmıştır. Çalışma verilerinin elde edilmesi amacıyla yapılan uygulamalar İstanbul Metro Çalışmaları sırasında uygulanan yöntemlere paralel bir şekilde yürütülmüştür. Çalışmada, İstanbul Metro Çalışmaları genel özellikleri ile bu çalışmalarda uygulanan yöntemler başlıklar altında ayrıntıları ile verilmiştir.

Elde edilen kaya kütlesi ve destek sistemi özellikleri, yüzey ve tünel içinde yapılan deformasyon ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda LRTS hattının sığ tünel yapısı olması nedeniyle, yüzey yüklerini oluşturan yapılar da değerlendirme kapsamında ele alınmış ve bu tip tünellerde deformasyona etki eden parametreler ve özellikleri ortaya konulmuştur.

3. JEOLojİ

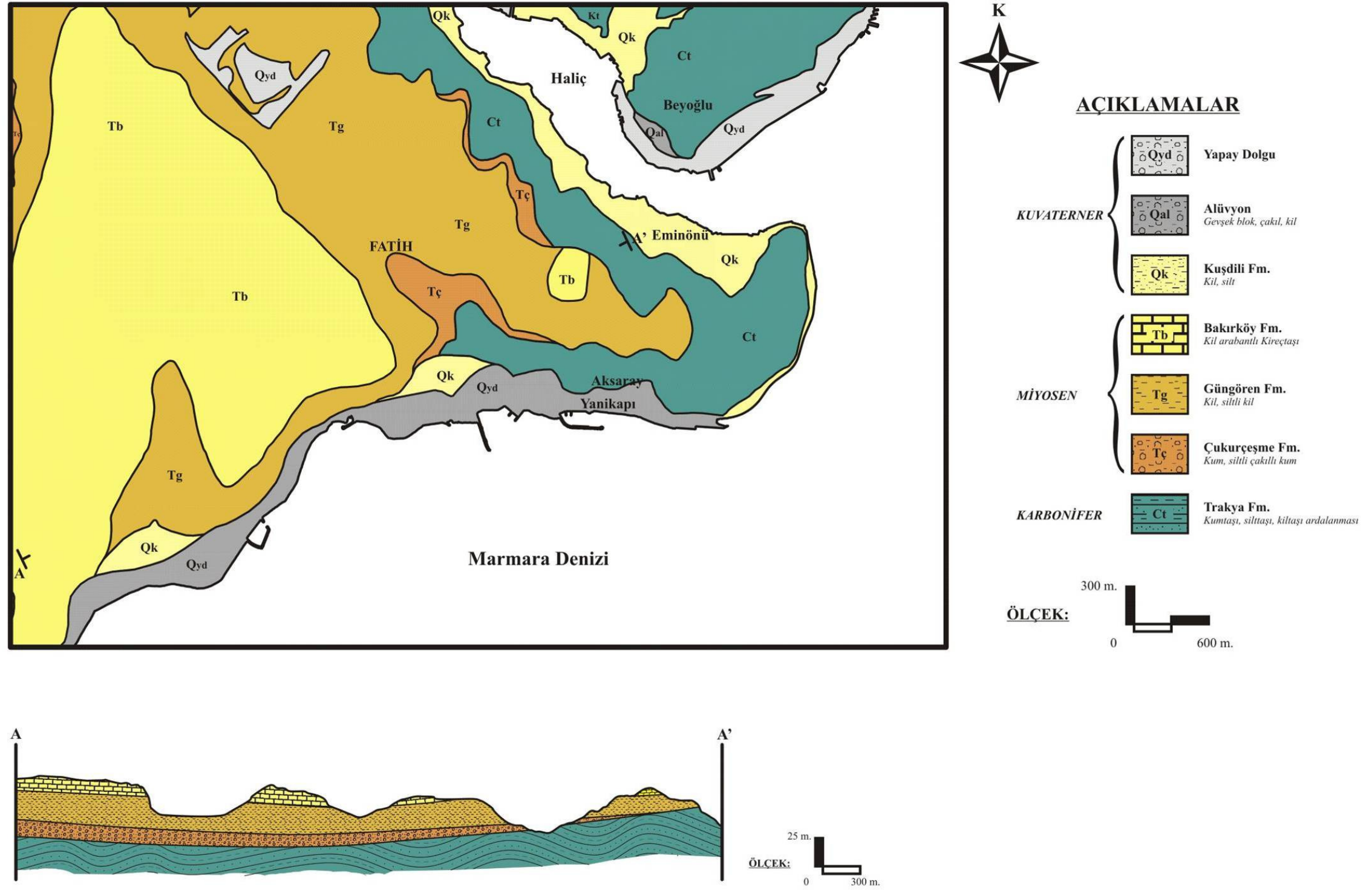
3.1. STRATİGRAFİK JEOLojİ

Bölgesel anlamda jeolojik formasyonlar İstanbul Boğazı doğusundan batısına doğru genelde gençleşen bir yapı sunarlar. İnceleme alanı ve çevresinin jeolojisi, başlıca kahverenkli kumtaşı, silttaşı ve kiltaşından oluşan Alt Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu ile başlamaktadır (, Şekil 3.2). Karbonifer birimleri üzerine açısal uyumsuzlukla tutturulmuş, blok, çakıl, kum ve siltten oluşan akarsu ürünü olan Çukurçeşme formasyonu gelmektedir. Çukurçeşme formasyonu üzerinde geçişli olarak yeşil renkli, ince laminalı, plastik killerden meydana gelen Güngören formasyonu bulunmaktadır. Bu formasyon da tedrici olarak, genelde tatlı su koşullarının egemen olduğu ortam içinde kireçtaşı-marn ardalanması olarak çökelmiş Bakırköy formasyonuna geçmektedir. Tüm bu birimler üzerine Haliç ve Tarihi Yarımada kıyılarında alüvyon ve güncel dolgular altında çakıl, kum ve kilden oluşan Kuşdili formasyonu yer almaktadır. Alüvyonel alanlar ise genellikle vadiler içinde sınırlı kalınlıklardadır. Dolgu malzemesi ise bir çok alanda çeşitli kalınlıklarda gözlenmektedir.

3.1.1. Trakya Formasyonu

İstanbul Boğazı'nın batısında oldukça geniş yayılıma sahip olan birim genellikle koyu gri, yeşilimsi gri ve kahverengi, ince-orta tabakalı, kumtaşı, silttaşı ve kiltaşlarından oluşmaktadır.

Kaya (1973) çalışmalarında birimi "Trakya formasyonu" diye tanımlamıştır. Dayklar genelde fay, eklem ve kırık düzlemlerine paralel sokulmuşlardır. Kumtaşı-kiltası-silttaşı ardalanmalı birim çalkantılı bir akıntıyla oluşmuş türbiditik çökellerdir. Formasyonda kumtaşları, genelde 0.3 - 1.0 m. kalınlığındaki tabakalardan ve köşeli - az köşeli daneli malzemelerden oluşur. Tabaka içerisinde derecelenme yaygın bir sedimenter yapı olarak görülmektedir. Tabakalanma yüzeyleri genellikle keskin, bazen de küçük ölçekte



Şekil 3.1. İnceleme alanı ve çevresinin jeoloji haritası ve kesitleri

Şekil, İ.B.B. ZEMİN VE DEPREM İNCELEME MÜDÜRLÜĞÜ, 2001'den değiştirilerek alınmıştır.

SERİ	FORMASYON	SİMGE	KALINLIK	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
KUVATERNER	YAPAY DOLGU	Q _{yd}	0.5 - 13		Ahşap, tuğla, kremit parçaları, denizel malzemeler ve antik kalıntılar
	ALÜVYON	Q _{al}	0.5 - 12		Gevşek blok, çakıl, kil
	KUŞDİĞİ	Q _k	0.5 - 70		Kil, silt, bentik fosilli, yerel kumlu-çakıllı
MİYOSEN	BAKIRKÖY	T _b	30 - 40		Kireçtaşı - Kil arabantlı, kumlu ve macralı
	GÜNGÖREN	T _g	5 - 120		Kil; sarımsı yeşil, yer yer silt ve kireçtaşı aratabakalı
	ÇUKURÇEŞME	T _ç	15 - 50		Kum, siltli, çakıllı kum, sarımsı kahverenkli, gevşek
KARBONİFER	TRAKYA	C _t	> 1500		Kumtaşı, kilitaşı, silttaşı ardalanması üç üyeden oluşur. Küçükköy kumtaşı üyesi, Çamurluhan şeyl üyesi, Cebeciköy kireçtaşı üyesi

Şekil 3.2: Genelleştirilmiş stratigrafi sütun kesiti (Ölçeksiz)

aşınmalıdır. Açısal uyumsuzlukla Çukurçeşme formasyonuna geçen birim, taze durumda kahverengimsi, gri ve açık yeşil renklerde görülmekle beraber hamurdaki demirin limonite dönüşmesi sonucu açık sarı - kahverengi görülür.

Trakya formasyonu'nu 10-20 cm ile 1-2 m bazende 30-40 m kalınlıkta genellikle çok ayrılmış, bozuşmuş kirli sarımsı kahve andezit ile taze yüzeyleri açık mavimsi yeşilimsi gri, sert, diyabaz daykları kesmektedir. Dayklar genelde fay, eklem ve kırık düzlemlerine paralel sokulmuşlardır. Formasyonda küçük ölçekli çapraz tabakalanma, katmana paralel levhamsı yarıma özellikleri türbidit akıntı çökelleri olduğunu gösterir. Trakya formasyonu'nun alt sınırı Baltalimanı formasyonu ile dar bir geçiş aralığında

tedrici geçişlidir. Kalınlığı 1500 m.yi geçen birim Alt Karbonifer yaşındadır (Kaya, 1971 ve Önal, 1981).

3.1.2. Çukurçeşme formasyonu

Rami kuzeyindeki Çukurçeşme mevkiinde Trakya formasyonu üzerine diskordan oturan ve yaygınca yüzeylenen kumlu litolojilerin tamamı Arıç (1955) tarafından Çukurçeşme formasyonu olarak adlandırılmıştır. Gri, grimsi beyaz, omurgalı fosilli kum ve çakıllardan oluşur. Kum içinde yeşil, kahverenkli kil mercek seviyeleriyle marn seviyeleri olağandır. Çukurçeşme formasyonu, inceleme alanında, Yenikapı kuzeybatısında ve Eminönü batısında gözlenmektedir (İ.B.B. Zemin ve Deprem Araştırma Müd., 2001).

Birim blok, çakıl ve kumdan oluşur. Bu litolojiler birbiriyle aşınmalı yüzeylerle ilişkili - mercekler şeklinde ve büyük ölçekli düzlemsel yada tekne tipi çapraz tabakalıdır. Bazı merceklerin en üst kesimlerinde ince kil tabakaları bulunmaktadır. Karasal örgülü akarsu ortamında çökelmiş, bu kesimde maksimum tane boyu 35 cm.yi bulan çakıltaşları yer alır. Bu örgülü akarsu fasiyesinin kalınlığı ortalama 35-40 m. civarındadır. Fakat yersel olarak büyük farklılıklar gözlenir. Bu fasiyesin üstünde devresel gelişmiş bir diğer akarsu fasiyesi daha mevcuttur. Devreler menderesli akarsularda izlendiği gibi alt yüzleri aşınmalı ve kanallı yaygın olarak büyük ölçekli düzlemsel çapraz tabakalı, kum matriksli çakıl ve bloklarla başlar. Çapraz tabakalanmanın yukarı doğru ölçeği küçülür. Litolojide çakıllı kum halini alır. En üst kesimde mikro çapraz laminalı ince kumlar izlenir. Tane boyunun giderek incilmesi ile kıvrımsı kahverenkli çamurlara geçilir. Bu şekilde bir çok devre birbiri üzerinde görülür. Formasyonun en üst kesiminde mikro çapraz ve paralel laminalı şilt ve killer egemendir. Kumlar genellikle mercekseldir. Sıkı ve çok sıkı zemin özelliğindedir. Kum içerisinde çakıl cepleri de olağandır. Az köşeli, az yuvarlak olan taneler, süt beyaz, kırmızı, yeşilimsi ve kahverenkli. Çakıllar kuvars, kuvarsit, opal, kalsedon, mikalı kumtaşı, andezit, trakit, arkoz ve mikaşittir. Birimin kalınlığı kuzeyden güneye doğru artmaktadır. Birimde tane boyu da kuzeye doğru büyümektedir.

Çukurçeşme formasyonu, Trakya formasyonu üzerine ise açılı uyumsuzlukla gelir. Üzerine gelen Güngören formasyonu ile yanal ve düşey geçişlidir. Kalınlığı

paleotopografyaya göre değişir. Arıç (1955), en fazla kalınlığın 40-50 m.yi bulunduğunu, bazen de 2-3 m. kadar incelendiğini belirtir. Birimin kalınlığı kuzeyden güneye doğru artmaktadır ve ortalama kalınlık 15-20 m.dir (İ.B.B. Zemin ve Deprem Araştırma Müd.,2001).

3.1.3. Güngören formasyonu

Arıç (1955) tarafından Güngören İlçesinde görülen kil ve marnlardan oluşan istife Güngören formasyonu adı verilmiştir. Güngören formasyonu; genellikle yeşil-mavi renkli, üst seviyelerinde grimsi beyaz renkli ve maktralı kireçtaşı ara seviyeli, kum cepli kil ve marnlardan oluşur. Güngören formasyonu, inceleme alanında Yedikule, Kazlıçeşme, Fatih kuzey batısı ve Eyüp güney batısında görülür. Sarımsı esmer-yeşil renkli kil, beyaz renkli marnlar ile bunlar arasında ince düzensiz tabakalı maktralı kalker, beyaz tebeşirimsi kalker seviyelerinden oluşur. Killer içinde ayrıca bitki sap ve yaprak izleri, şilt ve kum merccekleri gözlenir. Güngören formasyonu ayırtlandığı kesimlerde altına gelen Çukurçeşme formasyonu ve üstüne gelen Bakırköy formasyonu ile dereceli geçişlidir. Güngören formasyonu, karadan kaba malzemenin kıt olarak geldiğı, ince-çok ince malzemenin geldiğı gl ortamında çökelmiştir. Bu formasyon eğimli alanlarda yer aldığında ciddi duraylılık sorunlarına yol açabilir. (İ.B.B. Zemin ve Deprem Araştırma Müd., 2001)

Güngören formasyonu Bakırköy formasyonuna geçişte dereceli geçiş yapar. Karbonatlanma artar, killi kireçtaşı-kil ardaalanımı çoğalır. Killer ince tabakalı olup laminalıdır. Ayrıca ilerinde kum merccekleri bulunur. Yzeyeye yakın yerlerde organik madde zenginleşmesiyle kahverengiye dönüşmektedir. Güngören formasyonu ile Çukurçeşme formasyonu geçişinde ise killerde kırıntılı malzeme oranı artar. Ayrıca Çukurçeşme formasyonu içerisindeki bazı kil tabakalan ile Güngören formasyonu benzer özellikler gösterebilir. Bu litolojik benzerlik Güngören-Çukurçeşme sınırını belirlemeyi zorlaştırabilir.

Güngören formasyonu, fasiyes değişimi nedeniyle kendi içerisinde de farklı özellikler gösterebilir. Formasyonun güney tarafı aynı zamanda inceleme alanının güney sınırı Marmara Denizi olduğu için formasyonun güneyde sınır özellikleri belli değildir. Kuzey sınırında formasyonun kalınlığı 5-10 m. arasında değişiklik göstermektedir. Formasyon

kuzey bölgelerde Trakya formasyonu üzerine diskordan olarak çökelmiştir (İ.B.B. Zemin ve Deprem Araştırma Müd., 2001).

3.1.4. Bakırköy Formasyonu

Beyaz, grimsi beyaz renkli, katman araları yeşil renkli ince katmanlı kil ara seviyeli, alt seviyesi kil-kireçtaşı ardalı mactralı kireçtaşlarından oluşur. Formasyon adlaması Arıç (1955) tarafından yapılmıştır. Bakırköy formasyonu Topkapı, Zeytinburnu, Merkezefendi, Esenler, Davutpaşa, Değirmentepe, Bağcılar, Güngören, Bahçelievler, Haznedar, Bakırköy, Mahmutbey, Kocasınan, Yenibosna, Halkalı, Sefaköy, Soğuksu, Kanarya, Şenlikköy ve Yeşilköy civarlarında yüzeyleyir. Ayrıca belirtilen bu alanlar "dışında Bakırköy formasyonu Küçükçekmece ile Büyükçekmece arasındaki sırtlarda, Avcılar, Firüzköy, Esenyurt, Yakuplu, Kavaklı, Gürpınar, Beylikdüzü ve Çakmaklı köylerinde geniş yayılım olarak izlenmektedir.

Bakırköy formasyonu, tabaka araları yeşil killi, genelde değişik kalınlıkta beyaz ve grimsi beyaz renkli mactralı kireçtaşlarından oluşur. İnce tabakalı mactralı kalkerler arasında Melanopsisli ve Helix'li kalker seviyeleri görülür. Bakırköy formasyonu İstanbul'un tarihsel gelişim çağlarından beri taş gereksinimini karşılamıştır. Formasyon tabanda kil ve seyrek grimsi beyaz killi kireçtaşı aralanımı, ile başlayan tatlı su fasiyesli, düzensiz tabakalanmalı, beyaz mikritik bir kireçtaşıdır. Aralarda yer yer yeşil ve mavi renkli killi ve marnlı düzeyler bulunur. İnceden kalına doğru değişen tabakalı boşluklu ve bol kırıklıdır.

Bakırköy formasyonunun alt dokanağı, ayırtlandığı kesimlerde Güngören formasyonu ile yanal ve düşey geçişlidir. Genelde 25-30 m kalınlık gösteren Bakırköy formasyonun kuzeye doğru kalınlığı azalır. Bu kalınlık 10-15 m ye kadar düşer. Formasyon tatlı su göl ortamında çökelmiştir (İ.B.B. Zemin ve Deprem Araştırma Müd., 2001).

3.1.5. Kuşdili formasyonu

Birimin taban kesimi çakıllı ve yanal devamlılıkları değişen kumlar ile gri siyah renkli kil ve çamurlardan oluşur. Haliç ve Tarihi Yarımada kıyılarında alüvyon ve güncel dolgular altında yer alır. Tabanda çakıllı seviye ile başlayan birim üste doğru yanal devamlılığı fazla olmayan kum ve siltlere geçer. Üste doğru siyah renkli bol kavkılı kil

ve çamurtaşları yer alır. Bu birimler arasındaki geçişler düzensiz olup sıklıkla değişir. Birim Avrupa yakasında yer alan diğer birimleri açısız uyumsuzlukla örter. Çalışma alanında güncel dolgular tarafından da örtülür. Meriç ve dig. (1990) tarafından yapılan çalışmada Holosen yaşlı Kuşdili formasyonunu incelemişlerdir. Bu birimin kalınlığı 23.80 m olarak tespit edilmiştir.

3.1.6. Alüvyon

Alüvyonlar Geç Kuvaterner'de İstanbul ve Kocaeli yarımadaalarında mevcut olan çeşitli akarsu yataklarında depolanmış gevşek blok-çakıl-kil'den oluşmuş çökellerdir. Genelde çapraz tabakalı ve devresel çökeller şeklinde olup kalınlıkları ve kendilerini oluşturan malzeme çevrelerine ve akarsuların ve geometrik özelliklerine bağlıdır. Holosen yaşlıdır.

3.1.7. Yapay Dolgular

İnsan eliyle ya da sel ve benzeri gibi diğer tabiat olayları ile doldurulmuş olan yapay dolgular, inceleme alanında görülen birimlerin parçalarının ve çeşitli yerlerden alınmış hafriyat malzemelerinin gelişigüzel bir şekilde atılması ile çeşitli alanları kaplamaktadırlar. Dolgu malzemesinin içinde organik parçalar, ahşap, tuğla, kiremit parçaları, denizel malzemeler ve antik kalıntılar yer almaktadır. Yapay dolguların kalınlıkları iç kesimlerde 3 – 4 m. kalınlığında iken güneyde (Marmara Denizi kıyısında) kalınlıkları artmakta ve sahil şeridini şekillendirmektedir.

3.2. YAPISAL JEOLJİ VE TEKTONİK

İstanbul ve çevresindeki yoğun tektonik hareketin sebebi, kuzeye doğru hareket eden Afrika Levhası ile kuzeydoğuya doğru açılan Arap Levhası arasında oluşan sol yönlü yanal atımlı Ölüdeniz kırık kuşağının uzantısı olan Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ile Avrasya ve Arap Levhalarının bindirmesi sonucu oluşan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) arasında Anadolu Levhasının batıya doğru kaymasıdır.

Sağ yönlü doğrultu atımlı bir hareket sergileyen KAFZ, Erzincan'ın doğusunda, Karlıova'dan batıya doğru 1200 km. uzunlukta, Karadeniz'e hemen hemen paralel bir şekilde devam edip Adapazarı'na kadar uzanarak iki ayrı koldan, Armutlu yarımadasının

kuzey ve güneyinde, İzmit ve Gemlik Körfezlerinden Marmara Denizi'ne girmektedir. Üçüncü bir kolu ise Bursa ovasından geçer. Bu kesimde doğrultu atımlı hareketlerin yanı sıra normal faylanmalar da gözlenmektedir. KAFZ, tarihsel dönemde ve yakın geçmişte büyük depremlerin yaşandığı aktif bir kuşaktır.

Bölge tektonik açıdan birçok kez birbirini kesen deformasyonlara uğramış olup, oldukça karmaşık yapısal özellikler içermektedir. Bunun başlıca belirteci stratigrafik istifte birbirine çok benzeyen birimlerin tekrarlanması, kılavuz düzeylerinin seyrek ve kolay tanınır olmaması, üstlenen orojenik hareketler, çok sayıda faylar ile andezit veya diyabaz dayklarının sokulması olarak sıralanabilir. Ayrıca yerleşim bölgelerindeki örtü veya dolgular da yapısal unsurların izlenmesini güçleştirir. Farklı doğrultulardaki kıvrımlanmayla yatay ve düşey kesitte, oluşan geometri oldukça karmaşıktır. İstanbul Paleozoyik istifleri içerisinde relatif olarak daha dayanımlı birimlerin bulunduğu yerlerdeki kıvrımlar ise daha geniş ve konsantrik olarak görülmektedir. Tersine daha az dayanımlı düzeylerinde ise sıkışık kıvrımlar görülmektedir (Şengör, 1984).

Bölge üzerinde etkili olan Alpin orojenezinde tüm yaşlı birimler, Üst Kretase-Paleosen ve Alt Eosen yaşlı birimler üzerine itilmişlerdir. Bu hareketlerle Paleozoyik yaşlı birimler yeniden, Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşlı birimler ise ilk kez kıvrımlanmışlardır. Alt Eosen sonrasında günümüze kadar gelişen sedimentler alttaki temelin kırılmalarına bağlı olarak açık kıvrımlar oluşturmuşlardır (Şengör, 1984).

Paleozoyik birimlerini açısal diskordansla örten Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri, çoğu yerde az eğik veya yataya yakındır. Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy formasyonları olarak ayırtlanan bu istiflerde genellikle epirojenik hareketler etkili olmuştur. Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri, önemli ölçüde tabandaki Trakya formasyonunun paleojeolojik konumundan etkilenmiştir. Paleo yükselimenin dolaylı havza yönünde, 10-15 derecelik ilksel eğimler ve çökel istifinde kalınlaşma görülmektedir. Pliyosen'den itibaren bölgede izlenen sıyrılma tektoniğine bağlı olarak gelişen Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun neden olduğu deformasyonlarla İstanbul Avrupa Yakası güneyindeki Neojen istifinde açık kıvrımlanmalar ve faylanmalar meydana gelmiştir.

3.2.1. Tabakalar

Yapılan ölçümlerde inceleme alanı içinde tabaka doğrultularının genelde KD-GB yönlü olduğu görülmektedir. Ancak yoğun tektonik faaliyetler nedeniyle formasyonlar çeşitli dayk çıkışlarına da bağlı olarak önemli konum değişimlerine uğramıştır. Tabaka eğimleri ise başta GD olmak üzere KB ve GB yönlüdür. Eğim açıları ise 20°-85° arasında değişmektedir.

3.2.2. Kıvrımlar

Trakya formasyonu, geçirdiği D-B yönlü Hersiniyen orojenezi nedeniyle yaklaşık K-G doğrultusunda kıvrımlanmıştır. Bu kıvrımlar genellikle sıkışık, kapalı, asimetrik ve konsantrik tipte görülmektedir.

3.2.3. Faylar

Metro hattının geçtiği bölgede gelişen fayların büyük bir kısmı eğim atımlıdır. İncelemeye konu LRTS hattında D-B yönlü sıkışmaya bağlı ters faylar belirlenmiştir. Günümüzde İstanbul'da aktif faylar olmamakla beraber, inceleme alanı güneyinden Kuzey Anadolu Fayı (KAF) geçmektedir.

3.2.4. Eklem Takımları

Orojenik etkiler nedeniyle Trakya formasyonu'nda çok sayıda eklem sistemi oluşmuştur. Hemen hemen her yönde olmakla beraber, hakim olan eklem sistemleri en çok KB-GD başta olmak üzere, KD-GB, K-G ve D-B yönlerinde olduğu, eğimlerinin ise çoğunlukla 45°'den büyük olduğu gözlenmektedir. Makaslanma zonları ise genelde, KD-GB ve KB-GD doğrultularında uzanmaktadır.

4. BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ

İstanbul'un Avrupa Yakası, dolayısıyla inceleme alanı, afet riski değerlendirmeleri açısından özellikle depremler konusunda birinci öncelikte öneme sahip bir yerleşim alanıdır. Bu durum 17.08.1999 Körfez Depremi ($M=7.4$) ile yaşanarak gözlenmiştir. İnceleme alanı İstanbul metropolünün zemin açısından sorunlu sayılan çok geniş alanları kaplayan, deprem riski yüksek bölge içinde kalmaktadır.

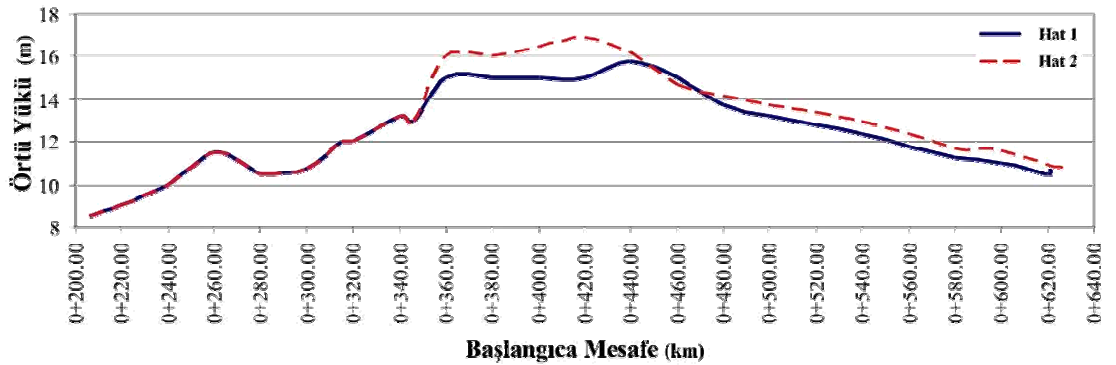
İnceleme alanı ve çevresinde henüz sonuçlanmış mikrodeprem etüdleri bulunmamaktadır. Çalışmada İstanbul ve çevresi için mevcut olan Tarihsel ve Aletsel dönem verilerinden, Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü'nün mikrodeprem verilerinden ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi Zemin ve Deprem Müdürlüğü deprem istasyonu verilerinden yararlanılmıştır.

Kandilli Rasathanesince işletilen MARNET isimli deprem kayıt istasyonları şebekesi tarafından 1976-1988 tarihleri arasında Marmara bölgesinde magnitüdüleri 4.5 dan küçük olan 12000 den fazla deprem kaydedilmiştir. Bu sayılar İstanbul ve çevresinde aletsel dönemde kayda değer bir deprem etkinliği olduğunu göstermektedir. Marmara Denizi içinde yer alan normal ve doğrultu atımlı fayların hareketlerinden kaynaklanan tarihsel deprem aktivitesi ve hasarları (1509, 1766 ve 1894) kayıtlarda yer almaktadır (İ.B.B. Zemin ve Deprem Araştırma Müd., 2001).

Bu çalışmayı oluşturan LRTS tünel hattı kazıları sırasında İstanbul ve yakın çevresinde projeyi etkileyecek bir deprem etkinliği gerçekleşmemiştir. Proje statik ve betonarme hesapları, bugüne kadar İstanbul için öngörülen depremlere göre yapılmış ancak tasarım ivmelerine inşa süresi boyunca maruz kalmamıştır.

5. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

İncelemeye konu olan L, M, Kesişen B1 ve B1 tünelleri, Aksaray ve Yenikapı istasyonlarını birleştirecek olan LRTS hattını oluşturmaktadır. Bu hat, yüzeye 8 m. ile 16 m. arasındaki örtü yükü altında planlanmak zorunda kalmış ve yüzey deformasyonu değerleri önemli konuma gelmiştir (Şekil 5.1, EK-1). Bu nedenle, çalışmada yüzey ve tünel içi deformasyonlar ile litoloji, yapısal jeoloji, kaya kütlesi, kazı destek sistemleri ve kazı kademesi arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla, proje ön araştırmalarına ek olarak tünel içi gözlem, laboratuvar verileri ve yüzey deformasyonu ölçümlerinden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında değerlendirilecek veriler yapımı halen devam eden hattın 0+200.00 – 0+620.00 km.leri arasını kapsamaktadır.



Şekil 5.1: LRTS hattı örtü yükü değişimi

5.1. LİTOLOJİ

LRTS hattı kazıları, İstanbul Paleozoik istifinin en üstünde bulunan kumtaşı, silttaşı ve kila taşı ardalanmasından oluşan Trakya formasyonu içerisinde gerçekleştirilmektedir.

Tünel güzergahı, ön araştırma çalışmaları kapsamında Zemin Mühendisliği İnşaat ve Sanayi Şirketi tarafından derinlikleri 20 m. – 23 m. arasında değişen, 9 adet, toplam 193 m. zemin araştırma sondajı yapılmıştır. Bu sondajlara göre üstte 4,50 m. ile 7,50 m. arasında değişen yapay dolgu bulunmaktadır. Tuğla, moloz ve çeşitli kayaç parçaları

içeren dolgu malzemesi altında, 1-4 m. arasında kalınlıklarda değişen, Trakya formasyonunun tamamen ayrışması ile oluşmuş, kötü derecelenmiş, çakıl – kum birimi saptanmıştır. Tüm bu birimler altında ise Trakya formasyonuna ait kumtaşı, silttaşı, kiltası birimleri ile Trakya formasyonu içerisine sokulmuş diyabaz dayklarına rastlanmıştır.

Trakya formasyonu üzerindeki 1-4 m.lik çok ayrışmış zon, yüzeye yakın olan M ve KB1 tipi tünellerin kazısı sırasında gözlenmemiştir. Ancak, B1 tipi tünellerin üst yarı kazılarının bazı aşamalarında (Hat-1 B1 0+365 – 0+372 km., Hat-2 B1 0+360-0+370 km. / 0+381-0+385 km.) gözlenmektedir. Bu durum, ayrışmanın bölgesel de olsa alt kotlara kadar indiğini göstermektedir.

LRTS tünel güzergahı boyunca yüzeyi örten dolgu malzemesinin, yer yer boşluklu bir yapıya sahip olduğu sondajlarda meydana gelen ani su kaçakları ile saptanmıştır. Sondaj delgisi sırasında oluşan yıkılmalar dolgu zeminin tutturulmamış gevşek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Tünel girişi ile M tipi tünele kadar olan 18 m.lik kesimde, kazı açıklığı üzerinden yüzeye kadar dolgu malzemesi içerisinde tarihi kalıntı gözlenmektedir (EK-1). Bu kesimdeki tarihi kalıntılar önceki dönemlere ait hamam ve çevresindeki yapılarıdır. İnceleme güzergahının başlangıçtan yaklaşık 55 m.lik bu kesiminde, aç-kapa yöntemiyle tünel oluşturulması planlanmasına rağmen, tarihi kalıntıların varlığı nedeniyle İstanbul Metro çalışmalarında yeni bir tünel tipi olan L Tipi tünel tasarlanarak uygulanmıştır. Bu husus projenin maliyetinin artışına ve zaman kaybına yol açmıştır.

İnceleme alanında, Trakya formasyonuna ait, ince – orta tabakalı, kiltası, silttaşı ve kumtaşı birimleri bulunmaktadır. Bu birimlerin fay zonlarına ve daylara yakın kesimlerinde tabaka özellikleri belirsizleşmektedir. Bazı bölgelerde sokulum yönüne bağlı olarak gelişen tabaka uçlarındaki deformasyonlar sonucunda küçük ölçekli kıvrımlar meydana gelmektedir. Trakya formasyonuna ait bu birimlerin, tabaka doğrultuları K 25 - 72 D, K 22 – 85 B arasında değiştiği, eğim yönlerinin GD, KB ve GB gibi çok farklı yönlerde olduğu ve eğimlerinin ise 7 – 85 derece arasında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 5.2: L ve M Tipi tünellerin üst yüzeyinde dolgu ve tarihi eserden görünüm

Tünel güzergahı boyunca iki farklı doğrultuda fay sistemi egemendir. Bu fayların doğrultuları K 4 – 53 D, K 3 – 37 B, eğim yönleri ve dereceleri ise sırasıyla 10 – 78 GD, 39 – 69 KD’ dur. Mevcut fayların yüzeyleri oldukça düz ve kaygan özelliğindedir.

Kazı çalışmaları sırasında Trakya formasyonu’nun değişik konumlara sahip kil ve kalsit dolgulu, birincil ve ikincil süreksizliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Kazı çalışmalarının bazı aşamalarında, kil dolgulu süreksizlik düzlemleri, tabaka doğrultu ve eğimleri ile kalınlıklarına bağlı olarak, blok düşmelerine sebebiyet vermiştir. Süreksizlik düzlemlerinin açıklığı ve dolgu türü ortamın desteksiz kalabilme süresini önemli ölçüde etkilemektedir.

5.2. LABORATUAR DENEYLERİ

Çalışmada kullanılan laboratuvar verileri, İstanbul Metrosu genelinde Trakya formasyonunda elde edilen değerler ve LRTS hattı ön araştırmaları sırasında elde edilen

değerler olmak üzere iki farklı kaynaktan sağlanmıştır (Tablo 5.1, Tablo 5.2). İnceleme alanının tamamını kaplayan ve bölgedeki ana kayayı oluşturan karbonifer yaşlı Trakya formasyonu'nda İstanbul Metro çalışmaları sırasında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre; kayaçların birim hacim ağırlığı $2.62-2.71 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmektedir. Ayırışma sonucu bu değerler $2.54-2.64 \text{ gr/cm}^3$ 'e düşmektedir. Benzer şekilde çok düşük olan su emme (W_a) ve porozite (n) değerleri de ayırışmaya bağlı olarak önemli oranda değişmektedir. Kumtaşı- kilitaşı silttaşı ve şeyl örnekleri üzerinde tabakalaşmaya dik ve paralel olarak yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda $90-1364 \text{ kg/cm}^2$ (Bieniawski 1973; düşük – yüksek dayanımlı) arası tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir.

Trakya formasyonu permeabilite değerleri $K=1.64 \cdot 10^{-7} - 10 \cdot 10^{-6} \text{ cm/sn}$ arasında değişmektedir. İstanbul Metro çalışmaları sırasında yapılan laboratuvar sonuçlarına ait Trakya formasyonu mekanik özellikleri ayrıntılarıyla Tablo 5.1'de verilmiştir.

Ayrıca incelemeye konu tünel güzergahı ön araştırmaları kapsamında yapılan zemin araştırma sondajlarından elde edilen örnekler üzerinde, kayaçların bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, ZEMAR Zemin Mekaniği Laboratuvarı tarafından nokta yükleme deneyleri yapılmıştır (Tablo 5.2). Bu sonuçlara göre kumtaşı ($Is_{50}=33.7 \text{ kg/cm}^2$) seviyelerinin, silttaşı ($Is_{50}=25.1 \text{ kg/cm}^2$) ve kilitaşı ($Is_{50(ort.)}=16.26 \text{ kg/cm}^2$) seviyelerine göre daha yüksek dayanımlı oldukları gözlenirken, genel olarak tünel güzergahındaki Trakya formasyonunun Bieniawski'ye (1976) göre düşük – orta dayanımlı olduğu belirlenmiştir. LRTS hattı ön araştırmaları kapsamında elde edilen dayanım sınıfları (düşük – orta) İstanbul Metrosu genelinde elde edilen değerler (düşük – yüksek) içinde kalmaktadır.

Aynı ön araştırma sondajlarının örnekleri üzerinde yapılan elek analizlerine göre, dolgu ve tamamen ayırışmış Trakya formasyonuna ait birimler Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına göre kötü derecelenmiş, silt – kum, kil – kum, çakıl – kum – silt ve çakıl – kum – kil karışımı olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.1: İstanbul Metrosu Çalışmaları laboratuvar deney sonuçları

KAYA TİPİ	AYRIŞMA DERECESİ	E	σ_b ARALIĞI	σ_b (ORT)	σ_c	PERMABILITE	E_p	C	Φ
	(W)	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	m/sn	kg/cm ²	kg/cm ²	(°)
Diyabaz	W ₁ -W ₂	120000	663-1158	1105	120	10.10 ⁻⁶	2800	-	-
Gri renkli kumtaşı	W ₁ -W ₂	190000	300-1364	691	45	1,92.10 ⁻⁶	2000	110	42
Gri kahve renkli kumtaşı	W ₃ -W ₄	104000	142-673	319	40	5,7.10 ⁻⁷	2200	50	51
Siyah renkli laminar kilaşı-silttaşı	W ₁ -W ₂	80000	145-455	267	37	1,4.10 ⁻⁶	1380	30	48
Gri kahve renkli silttaşı-kilaşı	W ₃ -W ₄	98000	90-375	220	40	1,64.10 ⁻⁷	1600	-	-

Açıklamalar		Sınıflamalar	
a) E: Laboratuvarda bulunan elastisite modülü	d) W: Ayırışma derecesi	a) Permabilite (m/sn)	b) σ_b (kg/cm ²)
b) E_p : pressiometre deneyiyle bulunan elastisite modülü	W1: Taze (bozunmamış) kaya W2: Az bozunmuş W3: Orta derecede bozunmuş W4: Çok bozunmuş	1-10 ⁻² yüksek geçirgen 10 ⁻² -10 ⁻⁵ orta geçirgen 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁹ az geçirgen <10 ⁻⁹ geçirimsiz	0-250: Çok düşük dayanım 250-500: Düşük dayanım 500-1000: Orta dayanım 1000-2000: Yüksek dayanım 2000: Çok yüksek dayanım
c) Permabilite katsayısı, sondajlaraki basınçlı su deneyleriyle bulunmuştur.			

Tablo 5.2: Laboratuvar deney sonuçları (Zemar, 2004)

Numune			Dane Dağılımı (%)		Zemin Sınıfı	Nokta Yükleme İndisi I_{s50} (kg/cm ²)
Numune Cinsi	Sondaj No	Derinlik (m)	Litoloji	+4	-200	
SPT	LRTS-1	3.00	Dolgu	11.50	51.43	
SPT	LRTS-1	4.50	Kil	19.69	45.05	SM-SC
SPT	LRTS-2	3.00	Dolgu	35.26	27.18	SM-SC
SPT	LRTS-2	4.50	Dolgu	1.08	23.79	SM-SC
SPT	LRTS-3	3.00	Dolgu	45.77	18.13	GM-GC
SPT	LRTS-3	6.00-6.45	Kil	4.98	35.12	SM-SC
SPT	LRTS-4	3.00	Dolgu	0.97	66.33	
SPT	LRTS-4	4.50	Dolgu	1.98	1.17	SP
SPT	LRTS-5	4.50	Dolgu	52.87	14.55	GM-GC
SPT	LRTS-5	6.00	Kil	49.07	14.26	GM-GC
Karot	LRTS-5	7.50	Kiltaş			12.6
Karot	LRTS-5	9.40	Kiltaş			20.2
Karot	LRTS-5	9.50	Kiltaş			24.5
SPT	LRTS-6	3.00	Dolgu	27.45	31.73	SM-SC
Karot	LRTS-6	11.0	Kumtaş			33.3
Karot	LRTS-6	18.00	Kiltaş			12.6
SPT	LRTS-7	3.00	Dolgu	2.90	3.37	SP
SPT	LRTS-7	4.50	Dolgu	1.61	2.12	SP
SPT	LRTS-8	3.00	Dolgu	0.00	51.19	
Karot	LRTS-8	19.00	Kiltaş			11.4
Karot	LRTS-8	21.00	Silttaş			25.1
SPT	LRTS-9	3.00	Dolgu	1.59	0.80	SP
SPT	LRTS-9	4.50	Dolgu	17.94	45.51	SM-SC

5.3. KAYA KÜTLESİ SINIFLAMASI (RMR)

Bieniawski (1973, 1974, 1976 ve 1989) tarafından geliştirilen bu sınıflama tünel mühendisliğinde kullanılan en yaygın sınıflama olduğundan tünel güzergahında karşılaşılan kayaçların sınıflandırılmasında da bu sınıflamadan yararlanılmıştır. Sınıflamada kayaç malzemesinin; tek eksenli basınç dayanımı, kaya kalitesi değeri (RQD), ayrışma özellikleri, süreksizlik özellikleri ve yeraltısuyu durumu gözönünde tutulmaktadır.

5.3.1. Kayacın Basınç Dayanımı

İnceleme alanında yapılan zemin araştırma sondajlarından elde edilen örnekler üzerinde yapılan nokta yükleme deneylerine göre kumtaş $I_{s50}=33.7$ kg/cm², silttaş $I_{s50}=25.1$ kg/cm², ve kiltaş $I_{s50(ort.)}=16.26$ kg/cm² değerlerinde olduğu belirlenmiştir. RMR

sınıflaması (Bieniawski, 1989) için en yüksek RMR puanı 7, en düşük RMR puanı 4 olarak belirlenmiştir.

5.3.2. Kaya Kalitesi Değerleri (RQD)

İncelemeye konu LRTS güzergahında yapılan zemin araştırma sondajlarından alınan karotlar yardımı ile Trakya formasyonu'na ait birimlerin kaya kalitesi değerleri belirlenmiştir. Yapılan bu değerlendirmeye göre RQD değerlerinin, tünel kazı kotu üzerinde %0 ile %32, kazı kotunda ise %0 ile %51 arasında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen RQD değerleri derinlikle birlikte değerlendirildiğinde düzenli bir yayılım göstermediği ortaya çıkmıştır. Bu dağılımın sebebinin Trakya formasyonu'nun tabakalanma geometrisinin orojenik hareketler ve daykların etkisiyle ilksel halini birçok farklı yöne değiştirmesi ve oluşan süreksizlik düzlemi özelliklerinden kaynaklandığı belirlenmiş, tünel kazısı sırasında tutulan ayna raporları ile de doğrulanmıştır.

Kaya kütlesi sınıflamasında kazı kotundaki RQD değerleri kullanılmış ve sınıflama için gerekli RMR puanları 3 – 8 arasında alınmıştır.

5.3.3. Süreksizlik Aralığı

LRTS hattında yapılan tünel kazılarında karşılaşılan süreksizlik aralıkları 50 – 150 mm. arasında değişmektedir. Belirlenen süreksizlik aralığına karşılık gelen RMR puanı en düşük 5, en yüksek 8 'dir.

5.3.4. Süreksizliklerin Durumu

İnceleme alanında yapılan sondajlarda kesilen, Trakya formasyonu'na ait, kıltaşı, kumtaşı ve kıltaşı-kumtaşı birimleri orta derecede – tamamen ayrıışmış (W3-W5) olarak belirlenmiştir. Sondajlarda, Trakya formasyonu'na ait birimlerde tektonik evrime bağlı olarak gelişmiş, ezilme, kıvrımlanma ve kırılanma özellikleri, süreksizlik dolguları ve ezilme izleri görülmektedir. Sondajlarda kıltaşlarındaki ayrıışmanın (W3 – W5), kumtaşlarındaki ayrıışmaya (W2 – W5) nazaran daha fazla olduğu ve aynı örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerine göre kıltaşlarının basınç dayanımlarının da kumtaşlarınınkinden daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Kazı çalışmaları sırasında tünel aynasında yapılan gözlemlere göre, tünel kazı kotu için, bu birimler orta derecede – çok fazla ayrılmış olarak belirlenmiştir. Kazı çalışmaları sırasında hazırlanan ayna raporlarına göre kazı eksenini boyunca ayrışma özellikleri önemli sayılabilecek ölçüde değişiklik göstermemesine karşın, başlangıça mesafenin 0+230 – 0+250 km ve 0+280 – 0+290 km olduğu alanlarda süreksizli düzlemlerinin artışına paralel olarak ayrışmada en üst seviyelere (çok fazla ayrılmış) çıkmıştır. Bu litolojilerin süreksizlik uzunluğu bir metreden 20 m.ye kadar olduğu gözlenmiştir. Az – çok pürüzlü olan süreksizlikler en fazla 1 mm. açıklıkta ve mevcut dolguları yumuşak olarak belirlenmiştir. Buna göre, Bieniawski (1989) kaya kütlesi sınıflamasında kullanılan en düşük RMR puanı 10, en yüksek RMR puanı 30 olarak belirlenmiştir.

5.3.5. Yeraltısuyu Durumu

İnceleme alanında açılan zemin araştırma sondajlarında, yeraltısuyu seviyeleri 6 m. ile 11.00 m. arasında derinliklerde değişmektedir. Bu sondajlarında 6.30 m. ile 11.70 m. arası derinliklerde ani su kaçakları olduğu belirtilmiştir. Ani su kaçaklarının olduğu kotların, sondaj sonrası ölçülen yeraltısuyu seviyelerinden daha altta bulunması, inceleme alanında bazı bölgelerde tünek ve yüzey sızıntı sularının varlığını göstermektedir.

Kazı çalışmaları sırasında karşılaşılan birimler kuru veya kuru – nemli olarak belirlenmiştir. LRTS hattı için yapılan kaya kütlesi sınıflamasında tamamen kuru alanlarda RMR puanı 15, nemli ve nemli kuru bölgelerde RMR puanı 10 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Trakya formasyonu permabilite değerleri $K=1.64 \cdot 10^{-7} - 10 \cdot 10^{-6}$ cm/sn arasında değişmektedir. Ancak, Trakya formasyonu'nda gelişen süreksizlik düzlemleri yüzey sularını kazı alanına kadar ulaştırmaktadır. Çalışmalarda yüzey sızıntı suları ile karşılaşmış ve yağmurlu dönemlerde bu sızıntıların arttığı gözlenmiştir. Florya D.M.İ. verilerine göre Kasım, Aralık ve Ocak aylarında sızıntı suların stabiliteye etkilerinden doğabilecek sorunlara karşı önlem alınması gerekmektedir.

5.3.6. Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme

Tünel kazısı sırasında geçilen litolojilerin tabaka doğrultu ve eğimleri kazı yönü ile birlikte değerlendirildiğinde tünel güzergahı boyunca eğim yönünde ilerleme sağlanmaktadır. Ancak L tipi tünelin iki fay arasında kalan yaklaşık 7 metrelik

kesiminde (0+246 – 0+253 km.) eğime karşı yönde ilerleme yapılmıştır. Trakya formasyonuna ait tabaka eğimleri genel olarak 0^0 ile 20^0 arasında değişmektedir. Bu nedenle, kaya kütlesi sınıflamasında, tünel eksenine ile tabaka doğrultularına bağlı kalmaksızın süreksizliklerin eğimi, orta olarak değerlendirilmiş ve RMR puan düzeltilmesi -5 olarak belirlenmiştir.

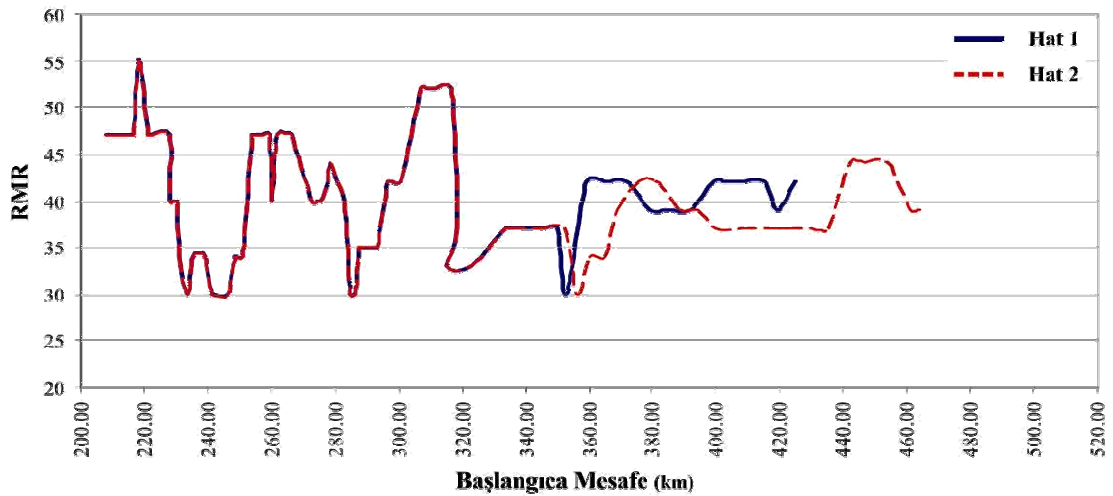
5.4. RMR KAYA SINIFI VE PUANLARI

Bu sınıflamaya göre çalışma alanındaki kazıda bulunan RMR puanları 27 – 55 arasında değişmektedir (Tablo 5.3, Şekil 5.3). Buna göre, Bieniawski (1989) RMR sınıflamasına göre Trakya formasyonuna ait birimler, zayıf – orta kaya sınıfında olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.3: Trakya formasyonu kaya kalitesi sınıfları (RMR)

Sınıflama Parametreleri	Trakya formasyonu		
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama
Kayacın Basınç Dayanımı (kg/cm^2)	33.3 (7)	11.4 (4)	19.95 (4)
Kayaç Kalitesi Değeri, RQD (%)	51 (8)	0 (3)	21 (3)
Süreksizlik Aralığı (mm)	150 (8)	50 (5)	62 (5)
Süreksizliklerin Durumu	Az kaba yüzeyler (22)	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu (10)	Az kaba yüzeyler, yumuşak eklem yüzeyleri (25)
Yeraltı Suyu	Tamamen Kuru (15)	Nemli (10)	Nemli (10)
Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme		Orta (-5)	
RMR Puanı	55	27	42
Kaya Sınıfı	III	IV	III
Tanımlama	Orta Kaya	Zayıf Kaya	Orta Kaya

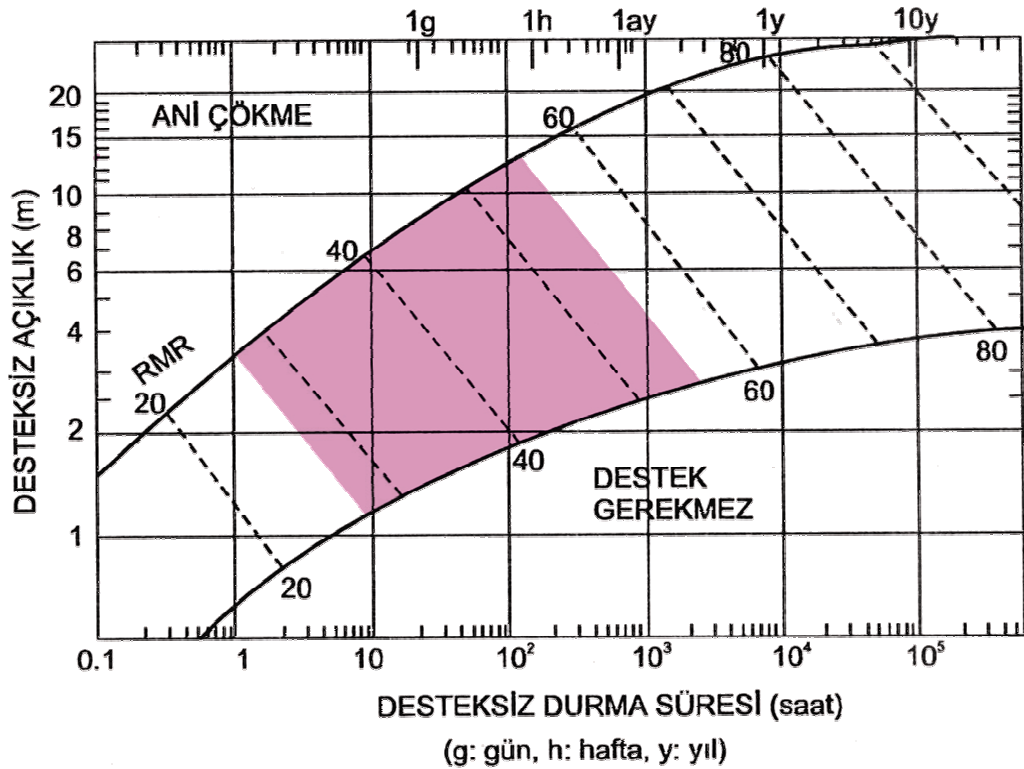
Parametrelere ait puanlar, parantez içinde verilmiştir.



Şekil 5.3: LRTS hattı RMR değerleri

5.5. RMR İLE DESTEKSİZ KAZI DURAYLILIĞI ARASINDAKİ İLİŞKİ

Bieniawski tarafından 1973 yılında geliştirilen ve yine aynı araştırmacı tarafından modifiye edilen (1989) bir yöntem ile desteksiz kazı duraylılığı, RMR kaya kütlesi sınıflamasına bağlı olarak bulunmaktadır. Bu yöntemde kullanılan ve RMR kaya sınıflarına göre desteksiz durma süresi ve tavan açıklığı arasındaki ilişkiyi tanımlayan grafikte, destek gerektirmeyen, ani çökme ve desteksiz durma süresini gösterir bölgeler tanımlanmıştır. Kazı çalışmaları sırasında elde edilen en düşük ve en yüksek (27-55) RMR değerleri bu grafikte ani çökme bölgesi sınırında değerlendirildiğinde 4 – 13 m. tavan açıklığı değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.4). Bu değerler tünel kazısının gerçekleştirildiği Trakya formasyonuna ait birimlerde kademeli kazı yapılması gerekliliğini desteklemektedir.



Şekil 5.4: Çeşitli RMR kaya kütlesi sınıflarına göre, desteksiz durma süresi ve tavan açıklığı arasındaki ilişki (Bieniawski, 1989)

6. KAZI DESTEK SİSTEMLERİ

Aksaray ve Yenikapı istasyonlarını birleştirecek olan tünel kazısı, Vatan Caddesi ile Millet Caddesinin kesişiminde bulunan şafttan başlamaktadır. Namık Kemal Caddesi ile Millet Caddesinin kesişiminde, biri Namık Kemal Caddesi'nin (Hat – 1), diğeri bu caddenin doğusundaki yapıların altından (Hat – 2), birbirine yaklaşık paralel iki ayrı hat halinde Yenikapı İstasyonuna ulaşmaktadır. Hat 1 kazısı uzunluğu 414.5 m., Hat – 2 kazısı uzunluğu 418.5 m.dir. LRTS hattı olarak adlandırılan bu güzergahta L, M, Kesişen B1 (KB1) ve B1 tipi olmak üzere 4 farklı kazı tipi kullanılmıştır. Hat – 1 ve Hat – 2, B1 tipi tünelde birbirine yaklaşık paralel şekilde giden birbirinden bağımsız iki tünel hatlarıdır. Bu iki hat L ve M Tipi tünellerde yan yana bulunurken KB1 Tipi tünelin “T” şeklinde bir taşıyıcı duvarla ikiye ayrılmış olması sebebiyle birbirinden bağımsız hale gelmişlerdir. L, M ve KB1 Tipi tüneller iki hattı da içermelerine rağmen, başlagıca mesafeleri, kazı yönüne göre sağa doğru kurb yapan LRTS hattının bir bölümünü oluşturmaları açısından farklılıklar göstermektedir. Aksaray – Yenikapı güzergahının (LRTS hattı) başlagıca mesafeleri ve buna göre açılan tünel tipleri Tablo 6.1’de ayrıntıları ile verilmiştir.

Tablo 6.1: LRTS hattı tünel tipleri, uzunlukları ve başlagıca mesafeleri

		Başlagıca Mesafe (km.)		Uzunluk (m.)
		Başlangıç	Bitiş	
L	Hat – 1	0+206.50	0+282.41	75.91
	Hat – 2	0+210.02	0+286.33	76.31
M	Hat – 1	0+282.41	0+315.13	32.72
	Hat – 2	0+286.33	0+319.04	32.71
Kesişen B1	Hat – 1	0+315.13	0+345.85	30.72
	Hat – 2	0+319.04	0+349.68	30.64
Hat – 1 B1		0+345.85	0+621.00	275.15
Hat – 2 B1		0+349.68	0+628.50	278.82

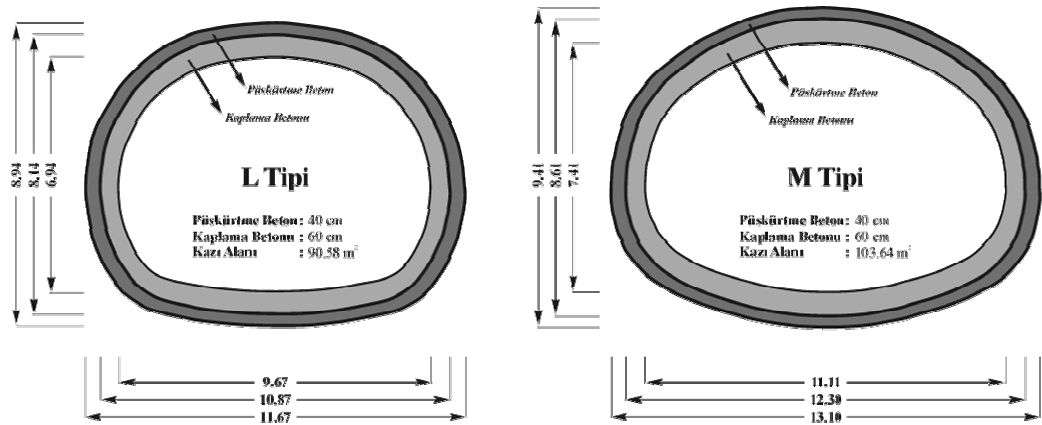
Tünel çalışmalarında, kazı ve kazı destekleme çalışmaları birbiriyle uyumlu olarak sürdürülmesi gereken ayrılmaz bir bütündür. Tünel kesitinin oluşmasını sağlayan, bu çalışmalar bütününe, kazı destek sistemi adı verilmektedir. Çalışmaya konu LRTS

hattını oluşturan tünellerin, kazı destek sistemleri ayrıntıları ile başlıklar halinde anlatılmıştır.

6.1. L VE M TİPİ TÜNEL KAZISI VE DESTEK ÇALIŞMALARI

L ve M tipi tüneller, çalışmaya konu LRTS hattı için İstanbul Metrosu çalışmalarında ilk defa projelendirilmiş bir tüneller tipidir. Bu tipte ayrı bir tüneller dizaynı gereği, hattın ilk proje aşamasında aç-kapa olarak planlanan alanında tarihi kalıntıların bulunması ve bu kalıntıların korunma zorunluluğudur. İlk proje uygulamaları sırasında imal edilen fore kazıkların varlığı, tüneller dizaynında kazı açıklığında oluşacak yanal yükleri ortadan kaldıracak bir yapı olarak değerlendirilmiş ve yan duvarlarıyla söz konusu forekazıklara dayanan bir tüneller tipi olan, L tipi tüneller geliştirilmiştir. M tipi tüneller ise KB1 tipi tüneller ile geçiş aşamasını oluşturan ve fore kazıklar ile iyileştirilmiş alan dışında kalan hatta inşaa edilmiştir.

L ve M tipi tünellerin uzunluğu 108 m.dir. L tipi tüneller 76 m., M tipi tüneller ise 32 m. uzunlukta olup, 6 kademeli kazı yapılarak açılmaktadır. L tipi tüneller 90.58 m² ve M tipi tüneller 103.64 m² kazı alanlarına sahiptir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1: L ve M tipi tünellerin özellikleri

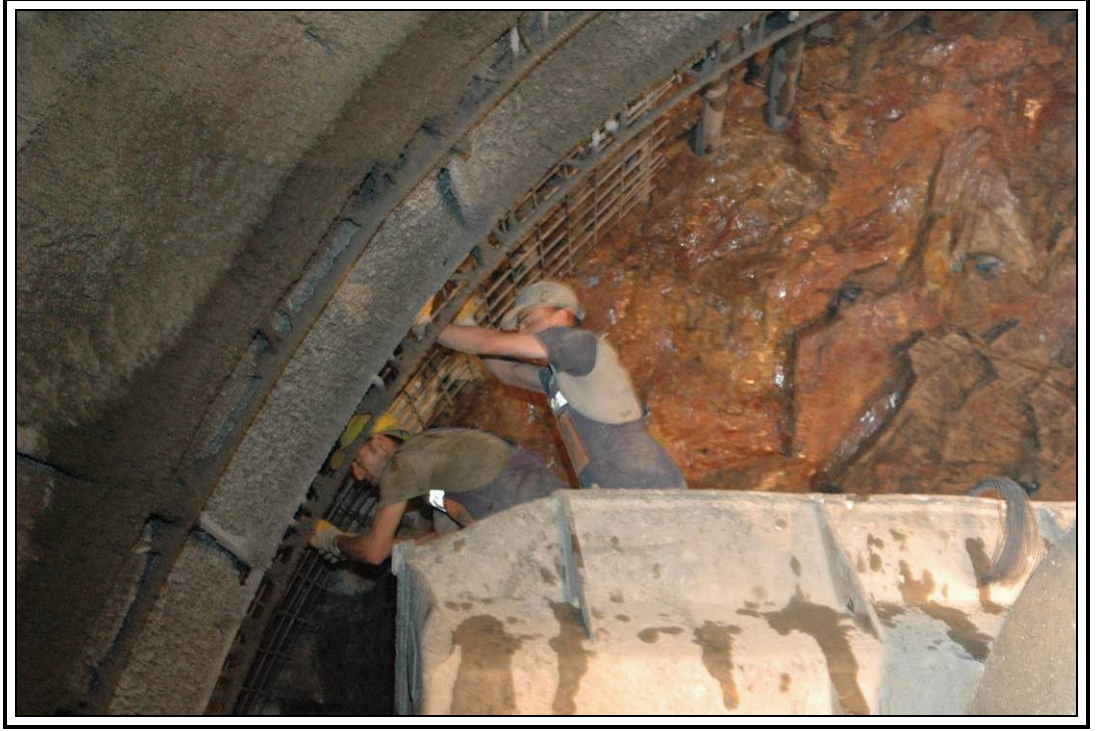
LRTS hattında açılan L Tipi ve M Tipi tünellerin üzerindeki örtü kalınlığı 8 m. ile 12 m. arasında değişmektedir. Tüneller girişi ile M tipi tüneller kadar olan 18 m.lik kesimde, kazı açıklığı üzerinden yüzeye kadar tarihi kalıntı gözlenmektedir. Bu kesimdeki tarihi

kalıntı altında, tamamen ayrıışmış kaya özelliğindeki birimin kalınlığı 0.50 metreye kadar düşmektedir.

İstanbul Metrosu birinci ve ikinci aşama kazılarının tümü Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu ile açılmaktadır. Bu metodun en önemli ilkelerinden biri tüneli çevreleyen kayada kendini destekleyen bir halka oluşturma ilkesidir. Kaya kütlesi özelliklerinde de anlatıldığı üzere LRTS hattı L Tipi ve M Tipi tünel kazılarında, kazı üst kotundaki dolgu ve çok ayrıışmış birimlerin varlığı, bu ilkenin uygulanabilirliğini engellemekte ve kazı destek sistemlerinde yeni mühendislik çözümlere gidilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu nedenle, sol ve sağ yarıda üçer kademeden oluşan toplam altı kademeli kazı yapılmakta olup her iki yarı arasına donatılı betondan oluşan geçici duvar bırakılarak kazılar sürdürülmüştür (Şekil 6.4, Şekil 6.5). Oluşturulan geçici duvar, L tipi tünelde altıncı kademe kazısı bitirilip tünel kesiti sağlandıktan sonra, M tipi tünelde ise üst yapı yükünü artması ve zayıf kaya koşullarının varlığı nedeniyle kazının tümünün tamamlanmasından sonra kaldırılmıştır. Geçici duvarın amacı; tünelde kendi kendini taşıyan zonun oluşturulmasına kadar ortaya çıkabilecek deformasyonların önüne geçmek ve tünel tam kesiti oluşturulana kadar stabiliteyi korumaktır. Bu tünellerde, kazı sonrası yapılan püskürtme beton kalıcı duvarlara 0.40 m., geçici duvarlara ise 0.30 m. kalınlığında olacak şekilde uygulanmış çelik hasır çift sıra kullanılmıştır (Şekil 6.2). İksa aralıkları ise 0.40 m. olarak seçilmiştir (Şekil 6.3).

İncelemeye konu tünellerde Tablo 6.2’de özellikleri ile verilen kazı destek elemanları, tünel kazı tipi ve kazı aşamalarına uygun, farklı sayı ve düzende kullanılarak kazı stabilitesi sağlanmış ve uygulanan sistem ile ilgili ayrıntılar Şekil 6.6 ve Tablo 6.3’de verilmiştir. İksa aralıkları 0.40 m.de bir seçilmesine karşın Tablo 6.3’de de görüleceği üzere iksa ayağına zemin çivileri 0.80 m.de bir uygulanmıştır. Her iksa ayağı yerine iki iksadan sadece birine zemin çivisi uygulanmasının nedeni, tünel duvarlarının dayandığı fore kazıkların arasındaki boşluklara 0.80 m.de bir ulaşılabilmesidir.



Şekil 6.2: İlk sıra çelik hasır montajı



Şekil 6.3: Çelik iksa montajı



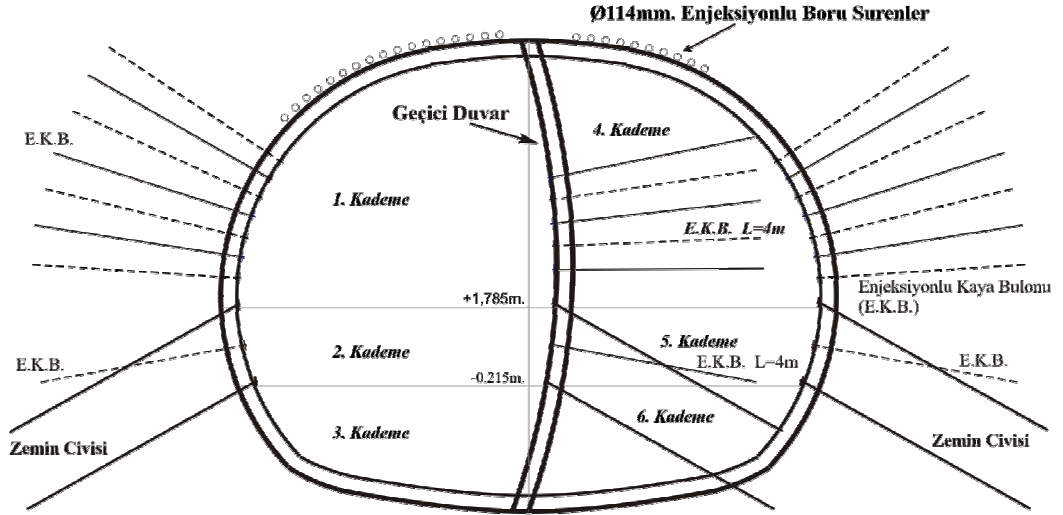
Şekil 6.4: M Tipi tünelde 1., 2. ve 3. kademe kazıları



Şekil 6.5: L Tipi tünelde orta duvar uygulaması

Tablo 6.2: Kazı destek elemanlarının özellikleri

Destek Elemanı	Uzunluk (m)	Çap (mm)	Açıklama
Enjeksiyonlu Boru Süren	9.00	114	4.40 m.de bir uygulanır
Ayna Zemin Çivisi	12.00	14	-
İksa Ayağına Zemin Çivisi	5	14	0.80 m.de bir uygulanır
Enjeksiyonlu Kaya Bulonu	4	26	0.80 m.de bir uygulanır



Şekil 6.6: L Tipi ve M Tipi tünel kazı destek sistemi

Tablo 6.3: L Tipi Tünel destek sistemi uygulama bilgileri

Kazı destek uygulaması	Kazı aşamaları					
	1	2	3	4	5	6
İlerleme adımı (m)	0.40	1.60	1.60	0.40	1.60	1.60
Enjeksiyonlu boru süren (adet)	20	-	-	16	-	-
Ayna zemin çivisi (adet)	10	-	-	9	-	-
İksa ayağı zemin çivisi (adet)*	G:1 K:1	G:1 K:1	-	G:1 K:1	G:1 K:1	-
Enjeksiyonlu kaya bulonu (adet)*	G:2-3 K:3-4	G:1 K:1	-	G:2-3 K:3-4	G:1 K:1	-

(*) "G: geçici duvar, K: kalıcı duvar"

Tablo 6.3 ve Tablo 6.4 de, her iki tip tünel için altı kademedan oluşan kazı aşamalarını ve uygulanan destek elemanları ile sayılarını göstermektedir. L tipi tünelde yapılan birinci ve dördüncü aşama kazılarında ilerleme adımları 0.40 m., diğer dört aşamada ise

1.60 m. iken, M tipi tünelde her kazı aşamasında ilerleme adımı 0.40 m. olarak seçilmiştir.

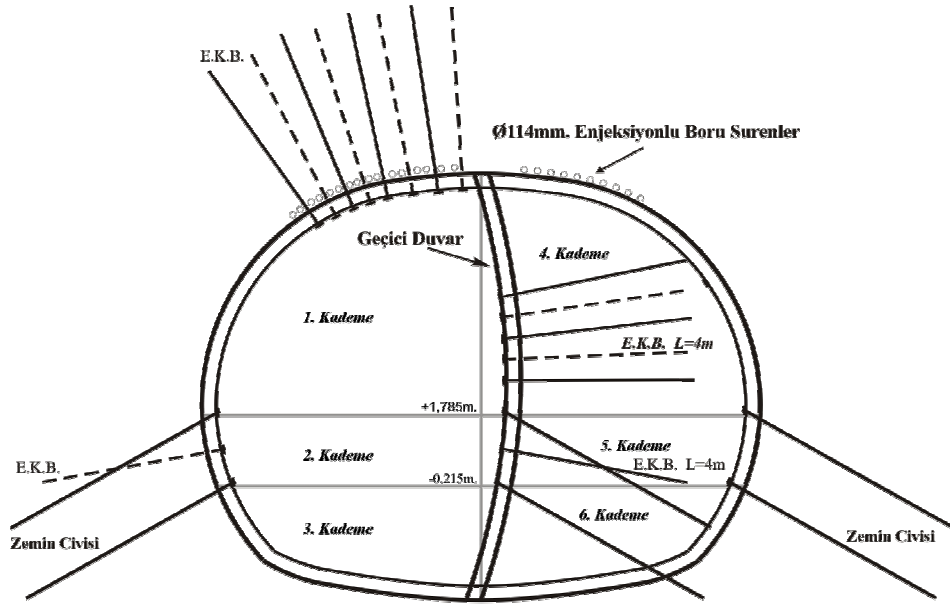
Enjeksiyonlu boru sürenler ve ayna zemin çivileri, her iki tip tünelde birinci ve dördüncü kademelerde uygulanmıştır. M tipinde ise kazı alanının artmasıyla uygulanan ayna zemin çivilerinin sayısı arttırılmıştır. İksa ayağı zemin çivileri kalıcı ve geçici olmak üzere her iki duvarda da 0.40 m.de bir yerleştirilen iksa ayaklarında birer adet uygulanmıştır. Enjeksiyonlu kaya bulonu birinci ile dördüncü kademedede, bir kazı adımında 3 adet, takip eden diğer kazı adımında 4 adet ve farklı kotlarda uygulanmışlardır (Şekil 6.6). Şekil 6.6'da da görüleceği üzere tünel tavanında enjeksiyonlu kaya bulonları uygulanmamıştır. Tünel tavanında tünel kazısı yüzeye yakın (8 – 12 m.) yapılması nedeni ile enjeksiyonlu kaya bulonu uygulaması yapılmamaktadır.

Tünel tavanına enjeksiyonlu kaya bulonu uygulaması, sadece yeterli örtü yükünün ve yüzey yapılaşması açısından uygun şartların sağlandığı M tipi tünel başlangıcında (0+286.20 – 0+295.00 km.) denenmiştir (Şekil 6.7). Ancak, uygulama sonucunda şehir şebeke suyundan oluşan kaçaklardan dolayı aşırı su gelişleri olmuş (5 lt/dk), bunun üzerine uygulamaya son verilmiştir.

Tablo 6.4: M Tipi Tünel destek sistemi uygulama bilgileri

Kazı destek uygulaması	Kazı aşamaları					
	1	2	3	4	5	6
İlerleme adımı (m)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Enjeksiyonlu boru süren (adet)	20	-	-	15	-	-
Ayna zemin çivisi (adet)	14	-	-	10	-	-
İksa ayağı zemin çivisi (adet)*	G:1 K:1	G:1 K:1	-	G:1 K:1	G:1 K:1	-
Enjeksiyonlu kaya bulonu (adet) *	G:2-3 K:3-4	-	-	G:2-3 K:3-4	-	-

(*) "G: geçici duvar, K: kalıcı duvar"

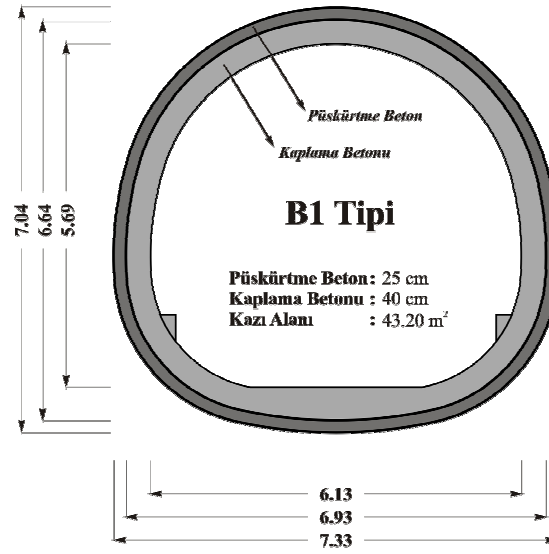


Şekil 6.7: M Tipi tünel tavanı, 1. kademe enjeksiyonlu kaya bulonu uygulaması

6.2. B1 TİPİ TÜNEL KAZISI VE DESTEK ÇALIŞMALARI

LRTS hattı B1 tipi tünel kazıları Hat – 1 ve Hat – 2 olmak üzere iki bağımsız hat şeklinde kazılmıştır. Güzergahı önceki bölümlerde ayrıntıları ile açıklanan tünellerden Hat – 1 Namık Kemal Caddesi, Hat – 2 bu caddenin doğusundaki yapıların altından geçmektedir. Bu çalışma hazırlandığı sırada halen yapımı devam eden (Hat -1: 0+488.00 km., Hat-2: 0+534.00 km.) her iki hattada kazı kademeleri ve kazım şekli değişmezken yapıların altından geçen Hat – 2’de aşağıda ayrıntıları ile açıklanacak olan daha yoğun bir destek sistemi kullanılmıştır.

Hat – 1 B1 tipi tünel uzunluğu 275.15 m., Hat – 2 B1 tipi tünel uzunluğu ise 278.82 m.dir. Çalışma hazırlandığı sırada Hat – 1’de 142.15 m., Hat – 2’de 184.32 m., 43.20 m² kazı alanına sahip B1 tipi tünel kazısı yapılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8: B1 Tipi tünel özellikleri

LRTS hattında açılan B1 tipi tünellerin üzerindeki örtü kalınlığı 10 m. ile 16 m. arasında değişmesine karşın, ilerliyen bölümlerde, çalışma hazırlanırken kazının tamamlanan kısmına ait örtü kalınlığı olan, 14 m. ile 16 m. arası değerler değerlendirmeye alınacaktır.

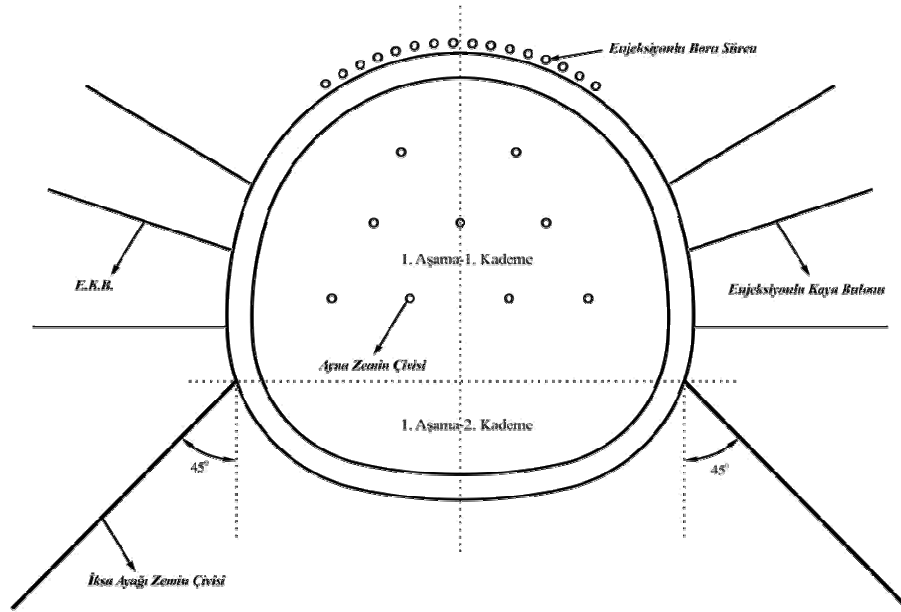
Hat – 1 ve Hat – 2 B1 tünelleri alt ve üst yarı olmak üzere iki kademede kazılmaktadır. A4 tahkimat sistemi seçilen B1 tipi tünellerde, çelik iksalar 1.00 m. aralıklarla uygulanmıştır. Püskürtme beton kalınlığı 0.25 m. olacak şekilde uygulanmış ve çift kat çelik hasır kullanılmıştır.

İncelemeye konu tünellerde Tablo 6.5’de özellikleri ile verilen kazı destek elemanları, tünel kazı tipi ve kazı aşamalarına uygun, farklı sayı ve düzende kullanılarak kazı stabilitesi sağlanmış ve uygulanan sistem ile ilgili ayrıntılar Şekil 6.9 ve Tablo 6.6’da verilmiştir.

Tablo 6.5: B1 Tipi tünel kazı destek elemanlarının özellikleri

Destek Elemanı	Uzunluk (m)	Çap (mm)	Açıklama
Enjeksiyonlu Boru Süren	9.00	114	6.00 m.de bir uygulanır
Ayna Zemin Çivisi	12.00	14	6.00 m.de bir uygulanır
İksa Ayağına Zemin Çivisi	5	26	0.80 m.de bir uygulanır
Enjeksiyonlu Kaya Bulonu	4	26	0.80 m.de bir uygulanır

Tablo 6.6, iki kademededen oluşan kazılarda uygulanan destek elemanları ile sayılarını göstermektedir. Enjeksiyonlu boru sürenler ve ayna zemin çivileri her tünelde 6.00 m.de bir, üst yarı kademe kazılarında uygulanmıştır. İksa ayağı zemin çivileri üst yarı kazısı sonrası yerleştirilen her iki iksa ayağına birer adet olacak şekilde uygulanırken, enjeksiyonlu kaya bulonu her kazı adımı, sağ ve sol duvarlara dörder adet olmak üzere her adımda sekiz adet uygulanmıştır.



Şekil 6.9: B1 Tipi tünel kazı destek sistemi

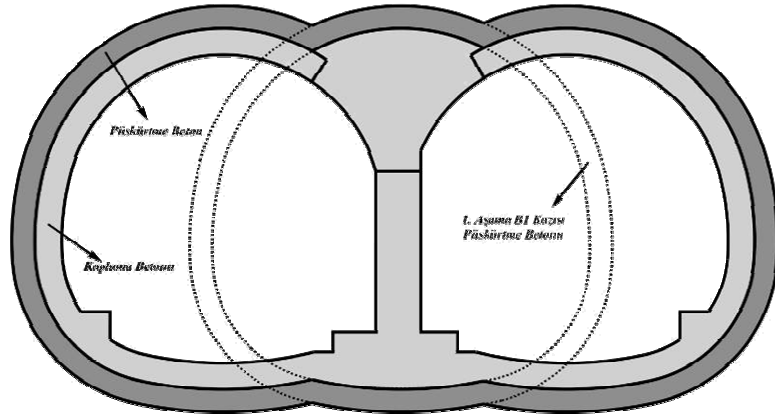
Tablo 6.6: B1 Tipi Tünel destek sistemi uygulama bilgileri

Kazı destek uygulaması	Hat – 1 B1		Hat – 2 B2	
	1	2	1	2
İlerleme adımı (m)	1.00	1.00	1.00	1.00
Enjeksiyonlu boru süren (adet)	20	-	24	-
Ayna zemin çivisi (adet)	10	-	10	-
İksa ayağı zemin çivisi (adet)*	1/1	-	1/1	-
Enjeksiyonlu kaya bulonu (adet) *	4/4	-	4/4	-

(*) (sol duvar) / (sağ duvar) şeklinde adet belirtilmiştir.

6.3. KESİŞEN B1 (KB1) TİPİ TÜNEL KAZISI VE DESTEK ÇALIŞMALARI

Kesişen B1 tipi tünel kesiti, 3 adet birbirini kesen B1 tipi tünel kazısı ile oluşturulmuştur (Şekil 6.10). Söz konusu tünel uzunluğu 30.50 m. uzunluğunda olup 6 kademede açılmaktadır. M tüneli ile birleşim düzleminde, yaklaşık bu tünelin alanına (100 m^2) sahip olan KB1 tüneli, iki ayrı hat şeklinde açılan B1 tünellerine bağlanacağı kazı sonundaki (Hat – 1: 0+345.85 km., Hat – 2: 0+349.68 km.) alanı yaklaşık 115 m^2 'dir.



Şekil 6.10: Kesişen B1 tipi tünel özellikleri

LRTS hattının KB1 tünel tipinde açılan bu kesimi, köprülü kavşak ve tranvay hattı altında bulunması nedeniyle ek önlemlerin alınması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, birinci aşamada 2 kademeli kazı ile B1 tipinde açılan tünelin ortasında, ikinci aşamada taşıyıcı duvar oluşturulmuş, üçüncü ve dördüncü aşamalarda B1 tünelinin sol ve sağ yanında bu tünelle kesişen, iki adet B1 tüneli kazısı yapılmıştır (Şekil 6.11, Şekil 6.12). Oluşturulan orta duvar yüzey yapılarından gelen yükleri taşıyabilecek özelliktedir ve L-M tünellerindeki geçici duvarın aksine yapının kullanım ömrü boyunca işlevini sürdürecektir tarzda tasarlanmıştır.



Şekil 6.11: KB1 Tüneli orta duvar imalatı

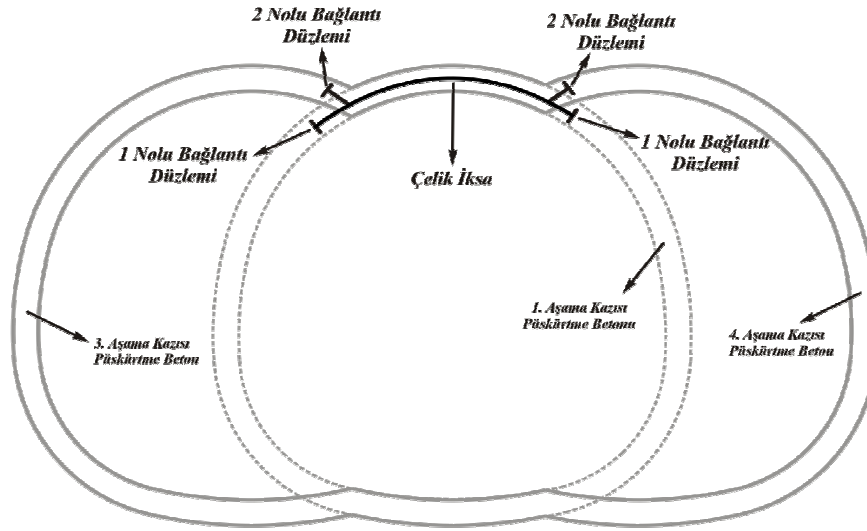


Şekil 6.12: Üçüncü aşama B1 kazısı ve eski destek sisteminin kırılması

KB1 Tipi tüneli oluşturan B1 Tipi tünellerde, iksa aralıkları 1.00 m. olarak seçilmiş, çift sıra çelik hasır kullanılmış ve kazı sonrası yapılan püskürtme beton 0.30 m. kalınlığında olacak şekilde uygulanmıştır. Üçüncü ve dördüncü aşamada yapılan B1 tünelleri

sırasında birinci aşamada yapılan B1 tünelinin sağ ve sol duvar iksaları ve püskürtme betonundan oluşan donatılı duvarları kırılarak ortamdan uzaklaştırılmıştır. Üçüncü ve dördüncü aşamada açılan bu tünellerin alt yarı kazıları, üstyarı kazılarının bitimini takiben yapılmıştır.

Kesişen B1 tipi birinci aşama B1 tipi tünel kazısında, İstanbul Metrosu kazılarında destekleme elemanı olarak kullanılan çelik iksalardan farklı bir iksa şekli geliştirilmiştir. Üçüncü ve dördüncü aşama B1 tipi tünel kazısı sırasında, ilk oluşturulan B1 tünelin tavanında sabit kalacak iksa Şekil 6.13’de de görüleceği üzere iki bağlantı düzlemi olacak şekilde tasarlanmıştır. İlk aşamada 1 nolu düzlemden bağlanarak oluşturulan tünel kesiti üçüncü ve dördüncü aşama tünel kazılarında 2 nolu düzlemler kullanılarak tünel kesiti oluşturulmuştur.



Şekil 6.13: KB1 Tipi tünel 1. aşama tünel tavanı çelik iksası

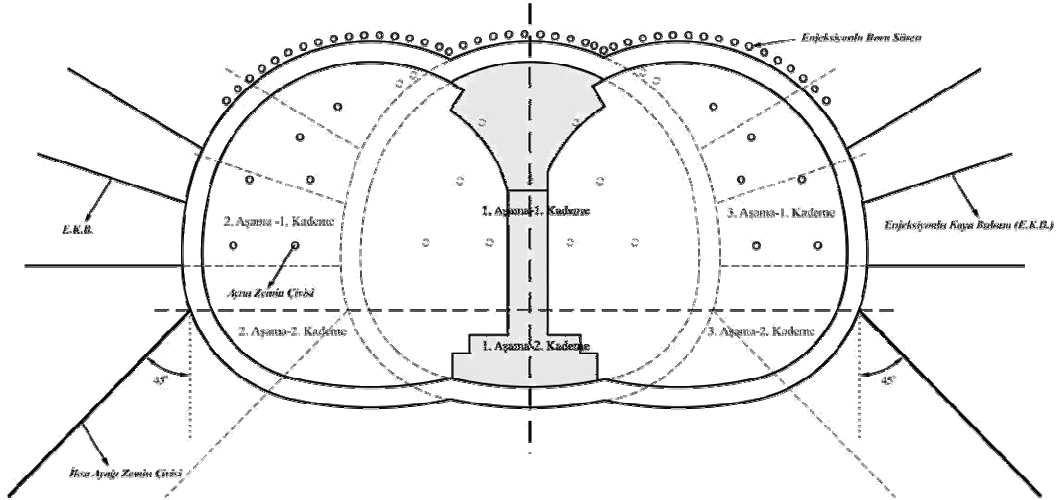
İncelemeye konu tünellerde Tablo 6.7’de özellikleri ile verilen kazı destek elemanları, tünel kazı tipi ve kazı aşamalarına uygun, farklı sayı ve düzende kullanılarak kazı stabilitesi sağlanmış ve uygulanan sistem ile ilgili ayrıntılar Şekil 6.14 ve Tablo 6.8’de verilmiştir.

Tablo 6.8, üç aşama ve altı kademedan oluşan kazılarda uygulanan destek elemanları ile sayılarını göstermektedir. Enjeksiyonlu boru sürenler ve ayna zemin çivileri her tünelde üst yarı kademe kazılarında uygulanmıştır. İksa ayağı zemin çivileri 1. aşamada açılan B1 tüneline her iki iksa ayağına birer adet olacak şekilde uygulanmış, daha sonra bu

zemin çivileri üçüncü ve dördüncü aşama B1 tipi tünel kazıları sırasında kırılarak kazıya devam edilmiştir. İksa ayağına zemin çivileri üçüncü ve dördüncü aşama tünel kazılarında her kazı adımında (1.00 m.) oluşan KB1 tünelin, sağ ve sol iksa ayaklarına birer adet gelecek şekilde uygulanmıştır. Enjeksiyonlu kaya bulonu her kazı adımında, birinci aşama B1 kazısında sağ ve sol duvarlarda olmak üzere üçer adet üçüncü ve dördüncü aşama B1 kazısında dörder adet uygulanmıştır.

Tablo 6.7: Kesişen B1 Tipi tünel kazı destek elemanlarının özellikleri

Destek Elemanı	Uzunluk (m)	Çap (mm)	Açıklama
Enjeksiyonlu Boru Süren	9.00	114	6.00 m.de bir uygulanır
Ayna Zemin Çivisi	12.00	14	–
İksa Ayağına Zemin Çivisi	5	26	1.00 m.de bir uygulanır
Enjeksiyonlu Kaya Bulonu	4	26	1.00 m.de bir uygulanır



Şekil 6.14: KB1 Tipi tünel kazı destek sistemi

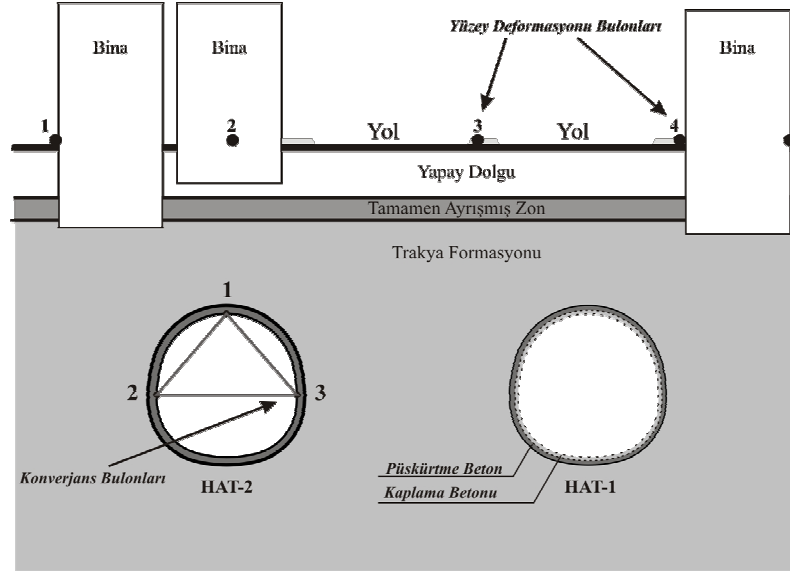
Tablo 6.8: KB1 Tipi tünel destek sistemi uygulama bilgileri

Kazı destek uygulaması	Kazı aşamaları					
	1	2	3	4	5	6
İlerleme adımı (m)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
Enjeksiyonlu boru süren (adet)	16	-	16	-	16	-
Ayna zemin çivisi (adet)	10	-	6	-	6	-
İksa ayağı zemin çivisi (adet)*	1/1	-	1	-	1	-
Enjeksiyonlu kaya bulonu (adet) *	3/3	-	4	-	4	-

(*) (sol duvar) / (sağ duvar) şeklinde adet belirtilmiştir.

7. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYON ÖLÇÜMLERİ

Bu çalışmada, İstanbul Metrosu kazılarında ve incelemeye konu tünellerde, yüzeyde ve tünel içinde yapılan ölçümlerden ikisi olan yüzey oturma ölçümleri ve tünel içi deformasyon (konverjans) ölçümleri incelenmiştir (Şekil 7.1). Güzergahın yoğun yapılaşma alanlarından geçmesi, güvenli çalışma ortamının yaratılması için bu çalışmaları zorunlu kılmaktadır.

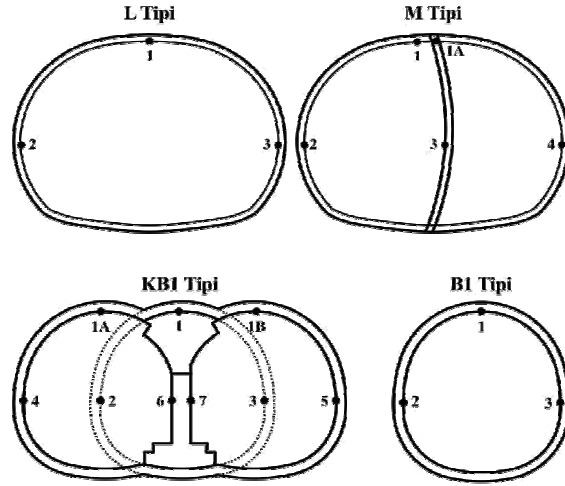


Şekil 7.1: Konverjans ve yüzey deformasyon ölçüm noktaları

7.1. TÜNEL İÇİ DEFORMASYON (KONVERJANS) ÖLÇÜMLERİ

İnceleme hattını oluşturan tünellerde 2.40 – 6.00 m. aralıklarla toplam 89 adet konverjans ölçümü yapılmıştır. Oluşturulan ölçüm noktalarının tünel tiplerine göre konumları Şekil 7.2’de görülmektedir. Belirtilen konumlardaki ölçümlere M Tipi tünellerde 4. kademe kazıları başlarken, ölçümlerin kazıdan etkilenmemesi amacıyla, 6. kademe kazıları bitene kadar ara verilmiştir. Yapılan konverjans ölçümlerde deformasyonlar ± 2 mm. seviyesini, M, Hat – 1 B1 ve Hat – 2 B1 tünellerinde bulunan 9 nokta hariç, geçmemiştir. En büyük tünel içi deformasyon, 1-3 yönünde -10.73 mm., 1-2 yönünde -

10.03 mm., 2-3 yönünde -10.28 mm. ile başlangıca mesafesi 0+291.40 km. olan M tipi tünelde gerçekleşmiştir. Deformasyonların diğer alanlara göre kısmen yüksek olduğu dokuz bölgenin, tünel tipleri ve başlangıca mesafeleri ile birlikte, oluşan deformasyonları Tablo 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.2: LRTS hattı konverjans ölçüm noktaları

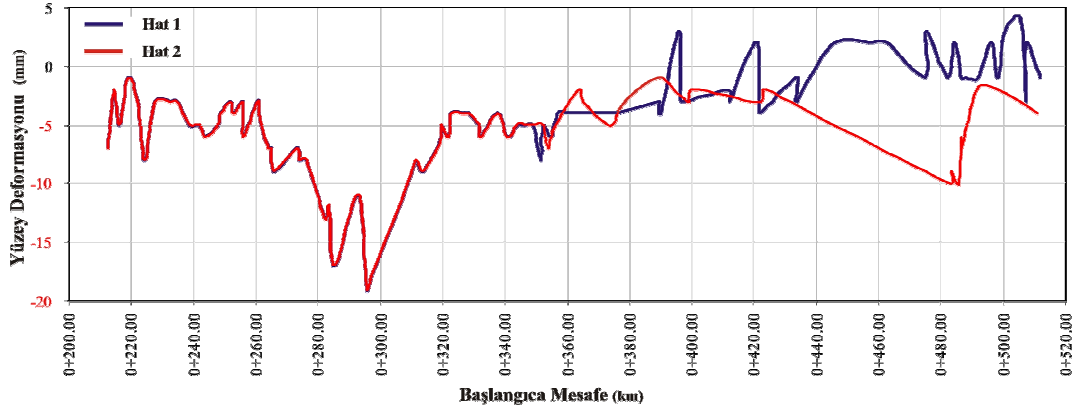
Tablo 7.1: Tünel tipleri ve oluşan en büyük deformasyonlar

Tünel Tipi	Başlangıca Mesafe (km)	Deformasyon (mm)		
		1 – 3	1 – 2	2 – 3
M	0+291.40	- 10.73	- 10.03	- 10.28
M	0+294.80	- 5.53	- 6.47	- 6.58
Hat – 1 B1	0+352.00	- 6.24	- 8.62	- 1.22
Hat – 1 B1	0+424.00	-8.14	-7.27	4.45
Hat – 2 B1	0+368.00	2.70	-4.85	0.39
Hat – 2 B1	0+386.00	2.10	- 3.50	4.46
Hat – 2 B1	0+392.00	0.89	- 3.60	- 5.95
Hat – 2 B1	0+446.00	- 3.45	5.28	2.09
Hat – 2 B1	0+482.00	1.24	- 8.42	3.69

7.2. YÜZEY VE BİNA OTURMALARI

Yüzey deformasyonu okumalarında, tünel kazı aynası ölçüm yapılan noktaya gelmeden başlanan okumalara, tünel kazı aynası ölçüm yapılan noktayı geçip yüzey deformasyonu değerlerinin değişmeyen bir seviyeye ulaşmasına kadar devam edilmiştir. Ölçümler tünel güzergahı boyunca 153 noktada yapılmıştır. Bu ölçüm noktalarının tünel hatları (Hat – 1 ve Hat – 2) üzerinde ve tünele her iki yandan en fazla 10 m. uzaklıkta olan 119

adedi seçilerek başlangıca mesafeleri belirlenmiş, başlangıca mesafe – en yüksek yüzey deformasyonu grafiği oluşturulmuştur (Şekil 7.3). Yapılan değerlendirmeye göre ölçülen yüzey deformasyonu değerlerinin, + 4 ile -19 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Yüzey deformasyonlarındaki +4 mm ve -3 mm.yi geçmeyen değerler, ölçümler sırasında oluşturulan poligon değişimlerinden kaynaklanabileceği için değerlendirmeye alınmamıştır.



Şekil 7.3: Tünel güzergahı boyunca ölçülen en yüksek yüzey deformasyonu değerleri

Şekil 7.3'te de görüleceği üzere yüzey deformasyonu değerleri güzergah boyunca özellikle iki alanda -19 mm ve -10 mm gibi yüksek değerlere ulaşmıştır. LRTS hattında meydana gelen en yüksek deformasyon değeri (-19 mm) M tipi tünel kazısına geçilmesi ile başlamış, diğeri ise Hat – 2 B1 tüneli üst yarı kazısı (0+485.50 km.) ile başlamış olup -10 mm değerine kadar yükselmiştir.

8. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYON SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tünel kazısı süresince sistematik bir izleme, destekleme tipi ve kaya kalitesinin belirlenmesinin yanında, tünel duraylılığının kontrolü içinde büyük önem taşır (Steindorfer ve Schubert, 1997). Tünel kazısı sırasında kaya kütlesinde meydana gelen deformasyonlarla ilgili günümüze değin pek çok kuramsal çalışma yapılmıştır. Kaya deformasyonlarının belirlenmesi ile ilgili olarak, Rabcewicz (1964), özellikle lme ve gözleme dayanan Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi'ni geliştirmiştir. Tünel kazısı deformasyonlarının değerlendirilmesi ve tahmini ile ilgili olarak rneğin, Schubert ve Schubert (1993); Schubert ve Vavrovsky (1994); Schubert ve Steindorfer (1996); Schubert ve Budil (1995); Brox ve Hagedorn (1999); zbek ve diğ. (2003) tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

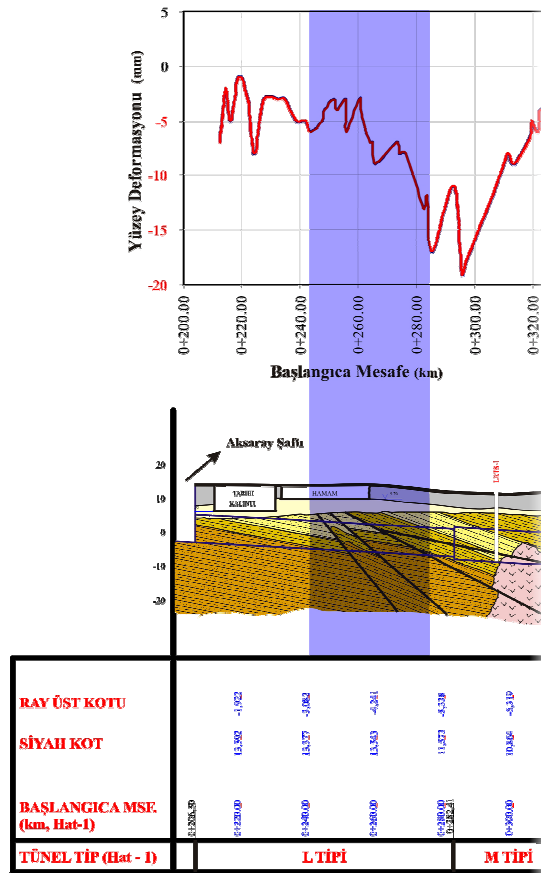
Çalışmanın bu bölümünde tünel güzergahı boyunca litoloji, yapısal jeoloji, kazı kademeleri, kaya kütlesi özellikleri, örtü kalınlığı, yüzey yapıları, kazı kesiti ve destek sistemleri ile oluşan tünel içi ve yüzey deformasyonları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

8.1. LİTOLOJİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİşKİ

Kumtaşı litolojileri, silttaşı ve kiltatşı litolojilerine göre dayanımları daha yüksek olan birimlerdir. Tünel güzergahı jeolojik ortamını oluşturan bu birimler ardalanmalı olarak birbirlerini takip etmekte ve M Tipi tünel sonu ile KB1 Tünel kazılarında kiltatşı birimleri yoğunlaşmaktadır (EK-1, şekil 7.3). Kiltatşlarındaki dayanımın diğer birimlere göre düşük olmasına ve buna bağlı daha yüksek deformasyonlar beklenmesine rağmen yüzey deformasyonları ile litoloji arasında böyle bir ilişki belirlenememiştir.

8.2.YAPISAL JEOLJİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ

İncelenen tünel güzergahında jeolojik kesitten de görüleceği üzere tabaka doğrultu ve eğimlerini etkileyen dört ana fay bulunmaktadır (EK-1, Şekil 7.3). Fayların ve buna bağlı süreksizlik düzlemlerinin yoğunlaştığı (0+240.00 – 0+280.00 km.) alanda yüzey deformasyonları -10 mm seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 8.1). Ayrıca, kazı çalışmaları sırasında tünel aynasında yapılan gözlemlerde stabilitesinin bozulmasında fay zonlarına bağlı ezik zonların varlığı önemli ölçüde etkin olmaktadır. Bu kesimlerdeki kil dolgular stabilizeyi etkilemekte ve uygulanan kazı sisteminde yapılacak bir hatada 2001 yılında yine Yenikapı’da (Ayaydın, 2001) meydana gelen olayda olduğu gibi göçüğe varan büyük yüzey deformasyonlarına yol açabileceği düşünülmektedir. Bu sebeplerden dolayı, sık tünellerde, süreksizlik düzlemlerinin yüzey deformasyonlarını önemli ölçüde etkilediği düşünülmekte ve yapılan ölçümler ile deformasyonlar karşılaştırıldığında süreksizlik düzlemlerinin olumsuz etkileri görülmektedir.



Şekil 8.1: Yoğun süreksizlik düzlemleri ve oluşan yüzey deformasyonları

8.3. KAZI KADEMELERİ İLE DEFORMASYONLAR ARASI İLİŞKİ

LRTS hattında 4 farklı tipte (L, M, KB1, B1) yapılan kazı çalışmalarında kademeler halinde yapılan kazılar ile ölçülen tünel içi ve yüzey deformasyonları arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

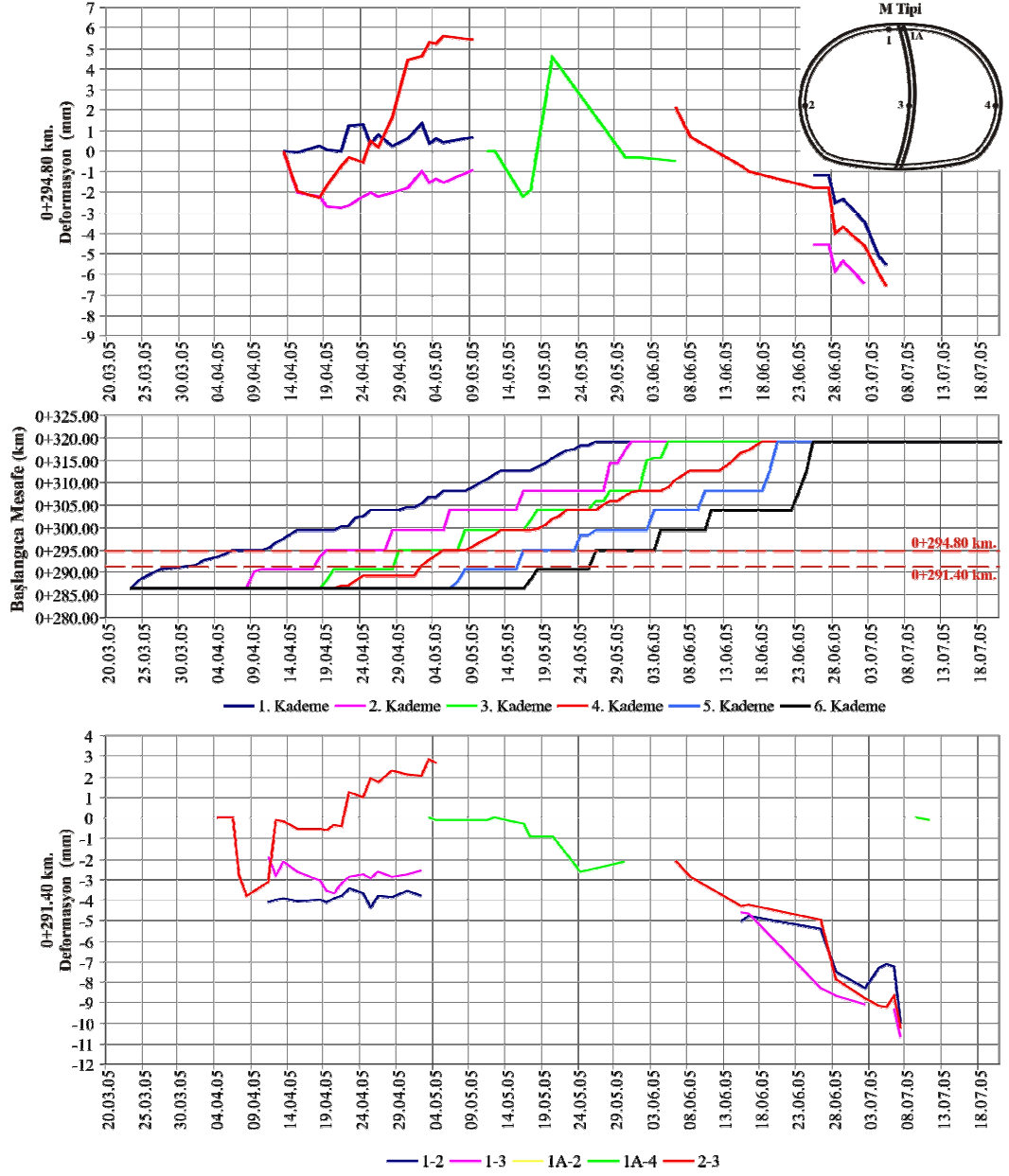
8.3.1. KAZI KADEMESİ İLE TÜNEL İÇİ DEFORMASYONLAR ARASI İLİŞKİ

Çalışmada konverjans ölçümleri zamana bağlı gelişimleri ile birlikte incelendiğinde, L, M ve KB1 tipi tünellerde kazılarının bitimine kadar değişimler gözlenmektedir. B1 Tipi tünellerde ise ilk ölçümün bir ay sonrasında deformasyonlar sabitlenmektedir.

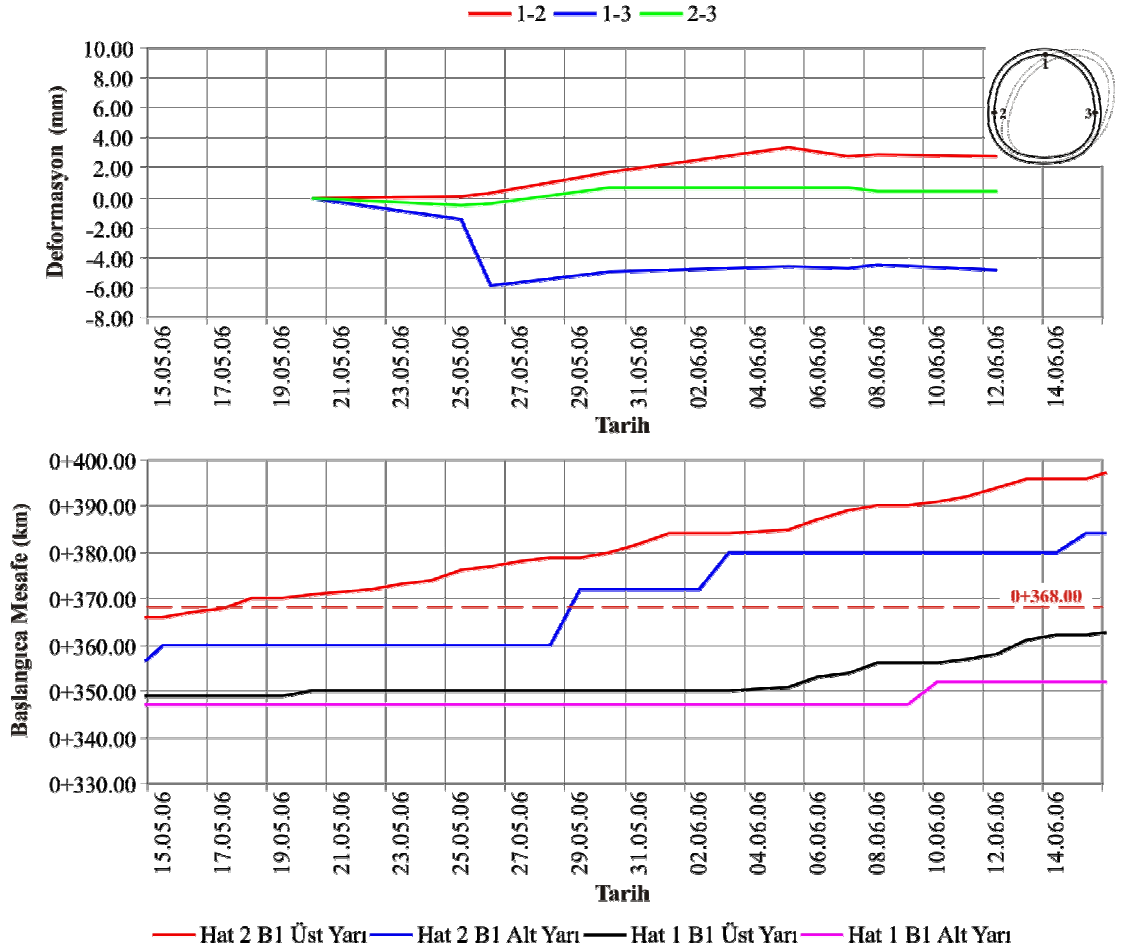
Kazı çalışmaları ile buna bağlı deformasyonların gelişimi, L ve M tipi tünellerde 4. kademe kazılarının yapılması ile önemli ölçüde kendini göstermektedir. Geniş kazı alanlarına sahip (90.58 m^2 - 103.64 m^2) bu tünellerde 4. kademe kazılarından sonra deformasyon ölçümlerinde artışlar ve yönlerinde değişimler gözlenmektedir. Şekil 8.2’de M Tipi tünelde en yüksek konverjans ölçümlerinin kaydedildiği bölgeler (0+291.00 km. ve 0+294.80 km.) kazı ilerlemeleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Her iki ölçüm bölgesinde de 4. kademe kazılarının yapılmasıyla artan deformasyon değerleri görülmektedir. Bu alanlardaki deformasyon değişimleri 6. kademe kazılarının tamamlanması ve tünel kesitinin oluşturulması ile birlikte durağan hale gelmiş ve ölçümler sonlandırılmıştır. Oluşan deformasyon değişimi, 4. kademe kazıları ile dairesellikten sapan tünel kesitindeki gerilme yoğunlaşmalarından kaynaklanmaktadır.

Yoğun yapılaşmanın altında birbirinden 1 – 20 m. arası uzaklıkta açılan B1 tipi tünellerde meydana gelen tünel içi deformasyonlar kazı çalışmaları ile birlikte değerlendirilmiş ve Şekil 8.3’de bir örneği görülen deformasyon ve kazı ilerleme grafikleri oluşturulmuştur. Hat 2 B1 Tipi tünelde yapılan konverjans ölçümüne ait (0+368.00 km.) Şekil 8.3’de görülen grafiklerde M ve L Tipi tünellerde olduğu gibi tünel kazı kesiti tamamlandığında deformasyon artışları durmuştur. Fakat, B1 tipi tünellerde deformasyon değişimlerinde diğer tünellerden (L, M, KB1) farklı olarak ikincil değişimler gözlenmektedir. Kazı çalışmaları Hat 1 B1 Tipi tünele göre daha ileride sürdürülen Hat 2 B1 tünellerinde durağan hale gelen deformasyonlarda, Hat 1 B1 Tipi tünel kazısının ölçüm noktalarına yaklaşmasıyla, tekrardan değişimler

gözlenmektedir. Bu değişim eksenleri arası 12 m. mesafe bulunan Hat 1 kazısının Hat 2 kazısını etkilediğini göstermektedir.



Şekil 8.2: M Tipi tünel, deformasyon (0+291.40 km. ve 0+294.80 km.) ve kazı ilerleme grafiği

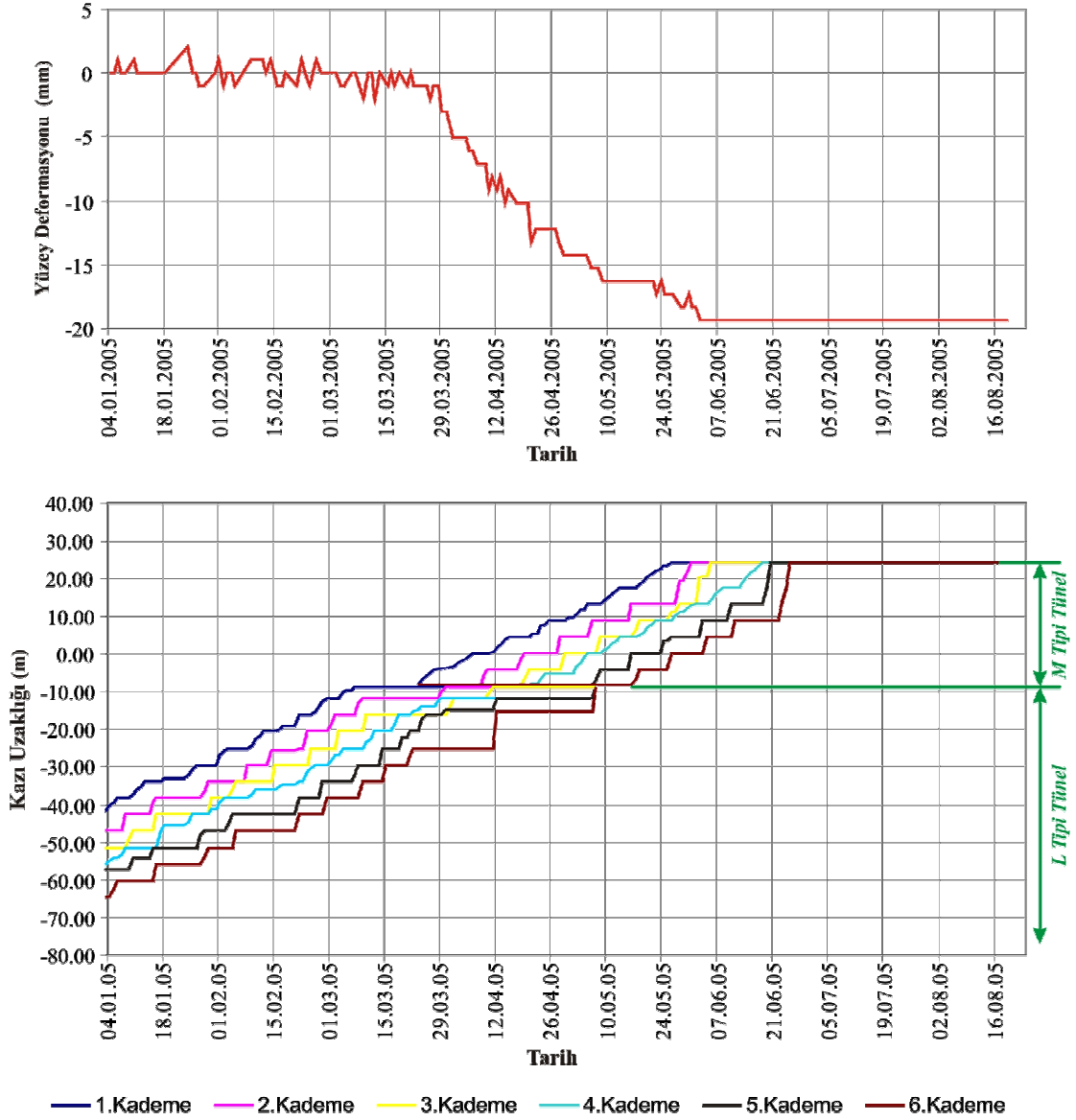


8.3.2. KAZI KADEMESİ İLE YÜZEY DEFORMASYONLARI ARASI İLİŞKİ

Ölçülen yüzey deformasyonlarının gelişimini belirlemek amacıyla, elde edilen değerler oluşum zamanı ve kazı ilerleme verileri ile birlikte değerlendirilmiştir. Buna göre, iki hattın (Hat 1 ve Hat 2) birlikte açıldığı M, L ve KB1 Tipi tünellerde yüzey deformasyonu değerleri 1. kademe kazısının ölçüm noktası altına gelmesi veya bu noktaya 10 m. mesafeye yanaşması ile başlamaktadır. Bu tünellerdeki yüzey deformasyonu artışları, ölçüm noktası altında tünel kesitinin sağlanması ve 10 m. mesafeye kadar bu kesitin oluşturulması ile sonlanmaktadır (Şekil 8.4, Şekil 8.5).

Şekil 8.4'de LRTS hattında ölçülen en yüksek yüzey deformasyonu (-19) ve kazı ilerlemesi zamana bağlı gösterilmektedir. Yüzey deformasyonu, L Tipi tünelin 1.

cademe kazısı sırasında tünel kazısı, ölüm noktasından 10 m. geride iken başlamış ve tünel kesitinin 6. cademe kazısı ile tamamlanmasıyla sona ermiştir.

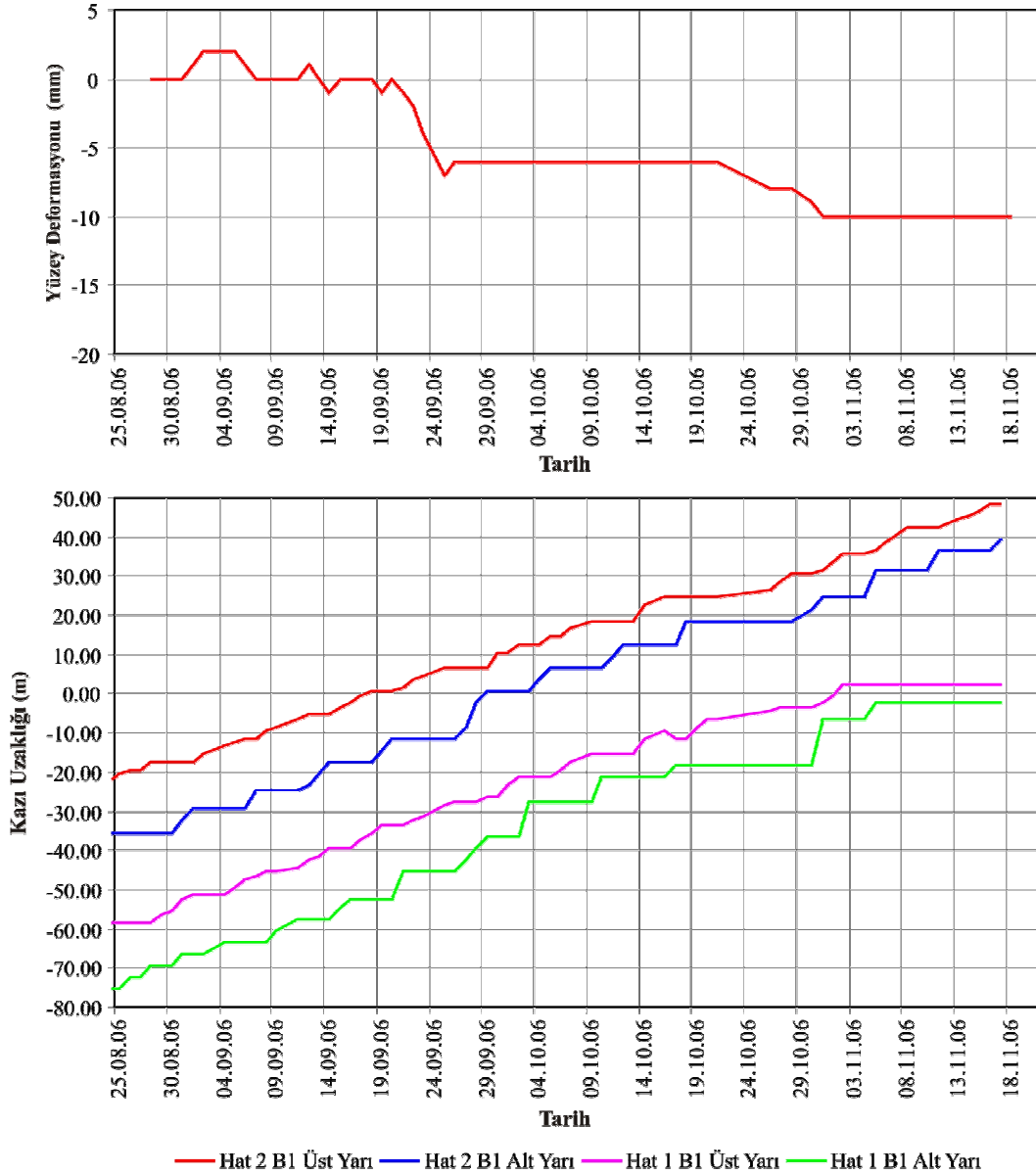


* 9163 nolu yüzey deformasyonu ölüm noktası, başlangıca mesafe 0+295.00 km.

şekil 8.4: Zamana bağlı, yüzey deformasyonu ve kazı ilerleme grafiği

Tünel kazılarında yapılan yüzey deformasyon ölümlerinde en yüksek değerlerin, tünel kazısının ölüm noktasının altına geldiğinde elde edilemesi beklenmektedir. Ancak, alışma alanında birbirinden bağımsız ve yaklaşık paralel açılan B1 Tünel kazılarında Hat 2 B1 tipi tnelinein meydana getirdiği deformasyonlar şekil 8.5’de de görüldüğü gibi Hat 1 B1 kazı çalışmaları sırasında tekrar artış göstererek ölüm noktaları için en

yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu olay birbirinden bağımsız açılan tünellerde kazıların, yakınlığa bağlı olarak, yüzey deformasyonlarını arttırdığını göstermektedir.



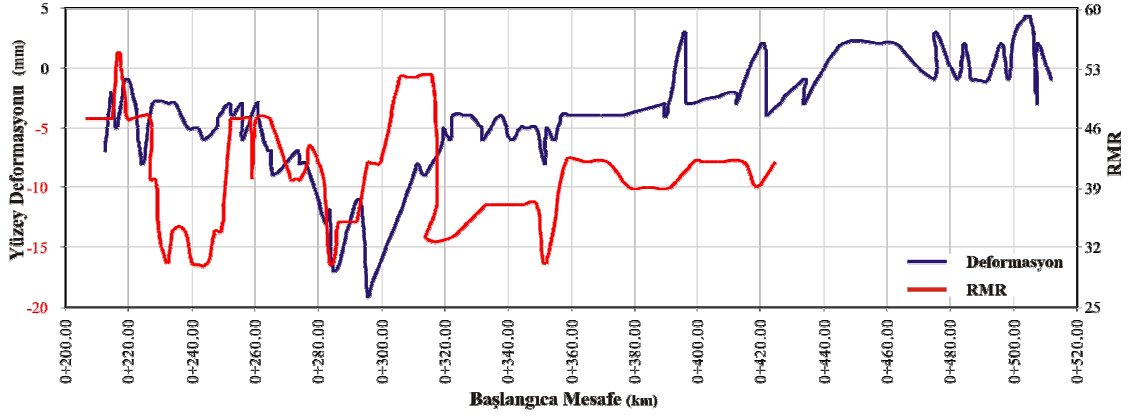
* 9315 nolu yüzey deformasyonu ölçüm noktası, başlangıca mesafe 0+485.50 km.

Şekil 8.5: Zamana bağlı, yüzey deformasyonu ve kazı ilerleme grafiği

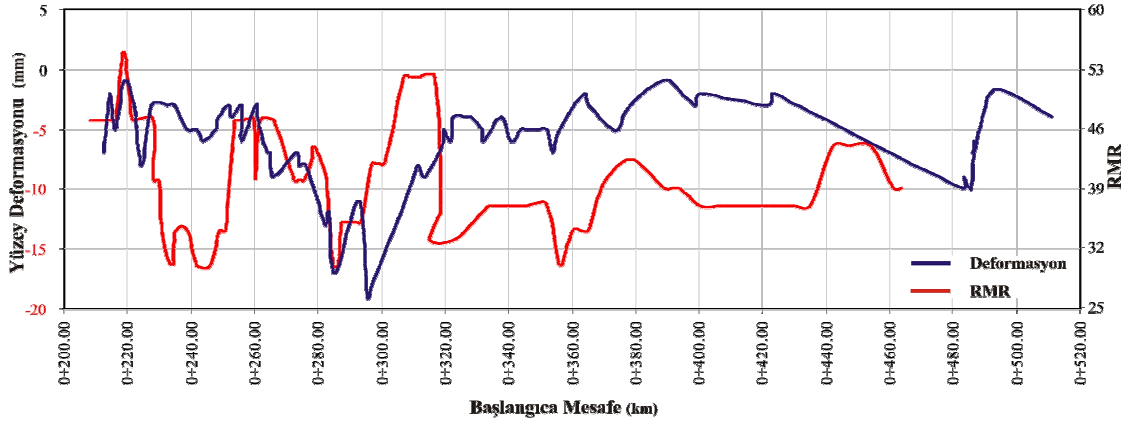
8.4. KAYA KÜTLESİ SINIFI (RMR) VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ

Tünel güzergahı boyunca tespit edilen kaya kütlesi sınıfları ile ölçülen maksimum yüzey deformasyonu değerleri arasındaki ilişki Şekil 8.6 ve Şekil 8.7’de sunulmuştur. Bu şekile göre kaya kütlesi sınıfının (RMR) en yüksek (45 – 55) değerlere ulaştığı

bölgelerde yüzey deformasyonu ölçümleri 6 mm.den düşüktür. RMR değerinin 30 – 35 arasında olduğu kesimlerde ise -17 – -19 mm gibi yüksek yüzey deformasyonu değerleri gözlenmiştir. Genel olarak RMR değerleri düştükçe, yüzey deformasyonu değerleri artmaktadır.



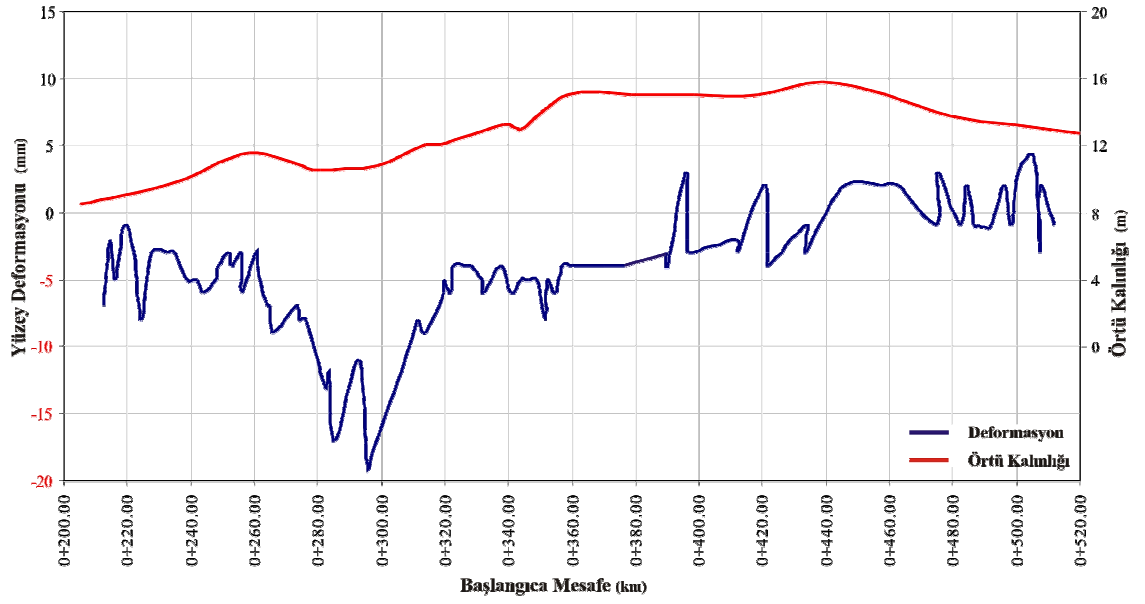
Şekil 8.6: RMR ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 1)



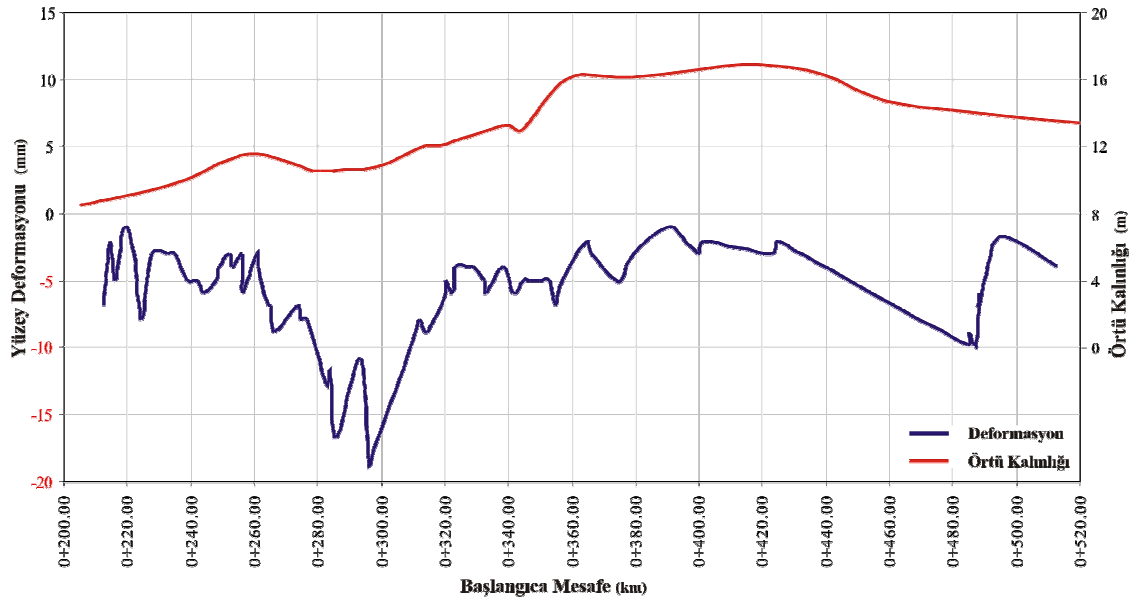
Şekil 8.7: RMR ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 2)

8.5. ÖRTÜ KALINLIĞI VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ

İncelenen tünel hattında örtü kalınlığı ile yüzey deformasyonu değerleri arasında tam bir ilişki belirlenememiştir. Ancak, tünel hattı boyunca, kısmen de olsa, örtü kalınlığı arttıkça yüzey deformasyonu değerleri azalmaktadır (Şekil 8.8, Şekil 8.9). Bu durumun oluşmasına, L ve B1 tipi tünellerin kazısında üst yapı yükleri, M tipi tünelde ise tünel tavanında uygulanan enjeksiyonlu kaya bulonları etkin olmuştur. İlerideki başlıklarda ayrıntıları ile değinilecek olan bu nedenlerden dolayı sık ve yoğun yerleşim alanındaki tünellerde yüzey deformasyonu değerlerinin örtü yükünden başka, uygulanan kazı ve destek sistemlerinin de etkin olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.8: Örtü kalınlığı ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 1)

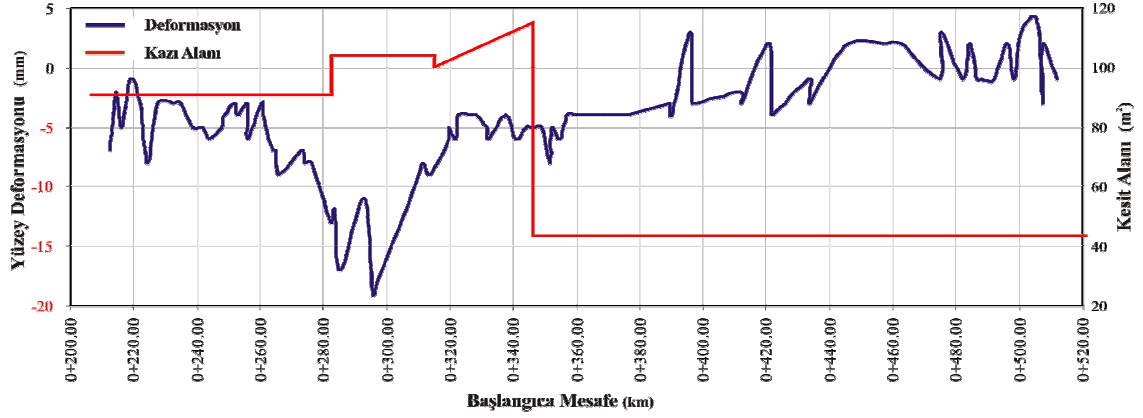


Şekil 8.9: Örtü kalınlığı ve yüzey deformasyonu arasındaki ilişki (Hat – 2)

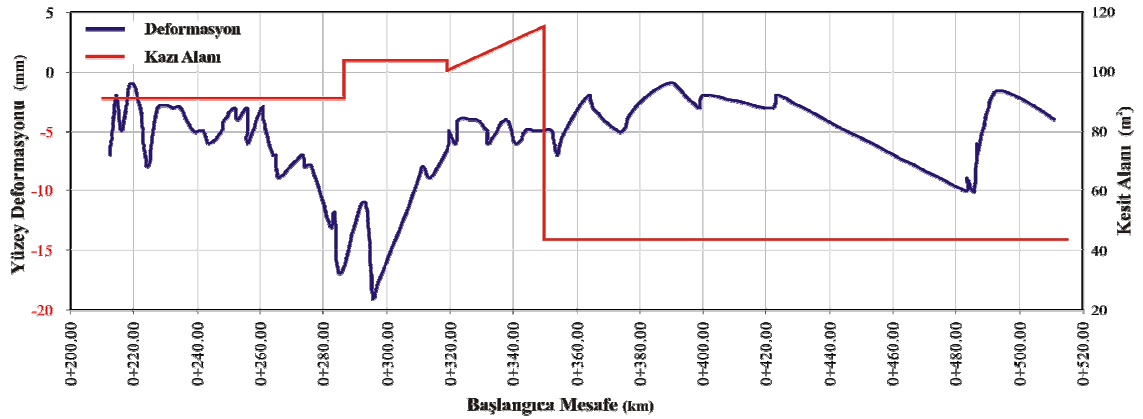
8.6. TÜNEL KAZI KESİTİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ

İncelenen tünellerde L tipi tünel 90.58 m^2 , M tipi tünel ise 103.64 m^2 , B1 Tipi tüneller 43.20 m^2 ve KB1 tipi tüneller 100 – 115 metrekare arası kazı alanlarına sahiptir. Tünel güzergahında kesit alanlarının değiştiği bölgelerde yüzey deformasyonu değerlerinin arttığı saptanmıştır (Şekil 8.10, Şekil 8.11). Yüzey deformasyonu değerlerinin bu alanda

artış göstermesi, olasılıkla kazı kesitlerinin farklı olmasından kaynaklanan gerilme dağılımı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.10: Kazı kesiti ve yüzey deformasyonu arası ilişki (Hat 1)

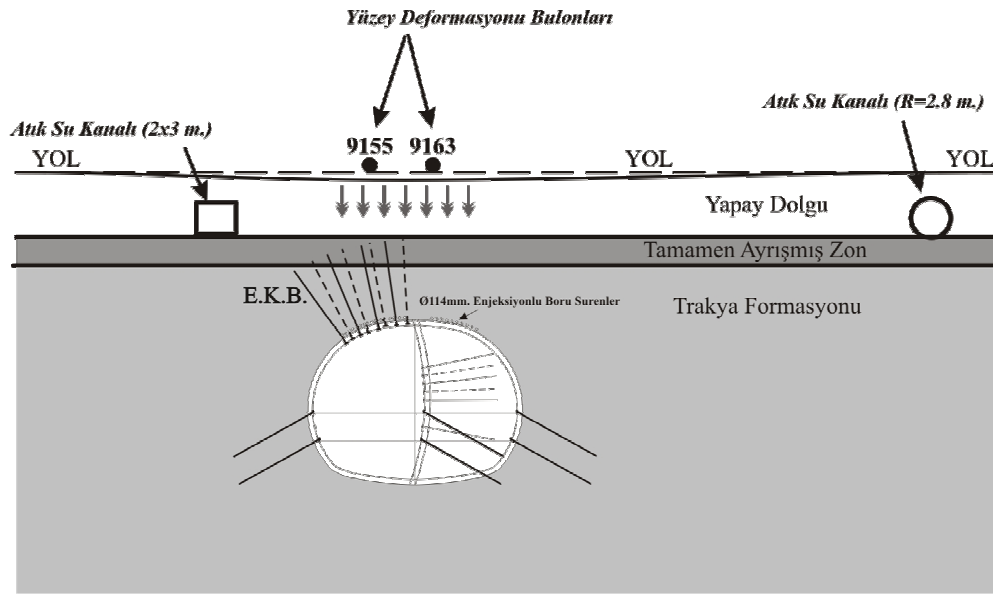


Şekil 8.11: Kazı kesiti ve yüzey deformasyonu arası ilişki (Hat 2)

8.7. DESTEK SİSTEMİ VE YÜZEY DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ

Tünel tavanında tünel kazısı yüzeye yakın (4.50 – 12.00 m.) yapılması nedeni ile enjeksiyonlu kaya bulonu uygulaması yapılmamaktadır. Bu uygulama sadece, yeterli örtü yükünün ve yüzey yapılaşması açısından uygun şartların sağlandığı M tipi tünel başlangıcında (0+286.20 – 0+295.00 km.) denenmiştir. Ancak, uygulama sonucunda şehir şebeke suyundan oluşan kaçaıklardan dolayı aşırı su gelişleri olmuş (5 lt/dak) ve yüzey deformasyonu değerleri maksimum değere (-19 mm) ulaşmıştır. Bu nedenle sonraki aşamalarda tavanda, enjeksiyonlu kaya bulonu uygulamalarından vazgeçilmiştir. Bu sistem yerine enjeksiyonlu boru sürenler ve ayna zemin çivileri, her iki tip tünelde kazının birinci ve dördüncü aşamalarda uygulanmıştır. M tipinde ise kazı

alanının artmasıyla uygulanan ayna zemin çivilerinin sayısı artırılmıştır. Bu önlemler sonucunda yüzey deformasyonu değerleri, -7 – -8 mm arasında kalmıştır. Ayrıca, L ve M tipi tünel eksenlerinde, stabilite şartları sağlanana kadar yıkılmayan donatılı beton duvar uygulaması çalışmaları olumlu yönde etkilemiş ve yüzey deformasyonlarını minimuma indirmede etkin bir parametre olarak saptanmıştır.



Şekil 8.12: M Tipi tünel kazı destek sistemi denemesi

8.8. YÜZEY YÜKLERİ İLE DEFORMASYONLAR ARASI İLİŞKİ

İnceleme alanı yoğun yerleşim alanlarının altından geçmektedir. LRTS hattı M ve KB1 tünelleri köprülÜ kavşak, B1 tünelleri ise işyeri ve otel amacıyla kullanılan yapı yükleri altında açılmıştır. Bu tüneller 2 – 7 kat ve 1 m. ile 9 m. arasında değişen temel derinliklerine sahip yapılar altından geçmektedir.

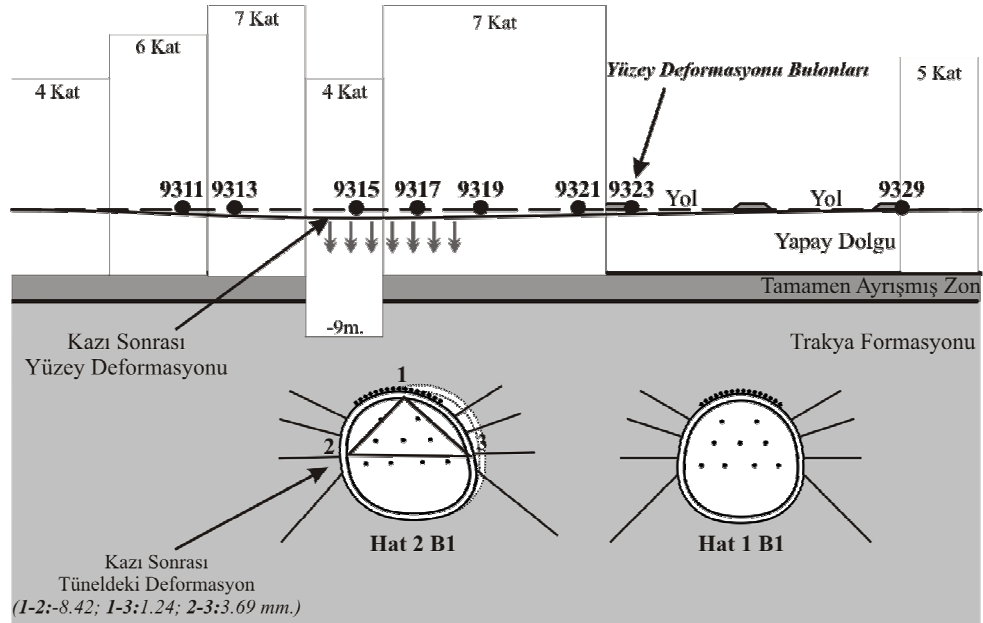
Buna göre yüzey deformasyonları ile yapıların bulunduğu alanlar karşılaştırıldığında, en büyük deformasyon (-19 mm.) köprülülük kavşağının bulunduğu alanda meydana gelmiştir. Bu alanda -19 mm. gibi yüksek deformasyon değerine ulaşılmasının nedeni destek sisteminde yapılan değişiklik olarak görülmüştür.

Hat – 1 B1 tüneli kazısı, Millet Caddedi ile Namık Kemal Caddesi kesişiminde 6 m. temel derinliğinde 7 katlı bir yapıya 5 m. mesafeden geçerek Namık Kemal Caddesi

altında ilerlemektedir. Bu tünel güzergahı boyunca deformasyon değerleri ani artışlar göstermemesine rağmen tünel kazısı söz konusu bina alanında iken, ani artış göstererek – 8 mm. olarak ölçülmüştür.

Hat – 2 B1 tüneli ortalama 1.5 m. temel derinliğinde 2 – 7 katlı yapılar altında açılmaktadır. Şekil 7.3’de görüleceği üzere bu hatta en yüksek yüzey deformasyonu -10 mm. (Hat-2, 0+485 km.) olarak ölçülmüştür. Hat – 2 B1 tüneli boyunca ölçülen en yüksek deformasyon değeri 1 m. temel derinliğinde 7 katlı yapıya bitişik 9.00 m. temel derinliğinde 4 katlı yapıda ölçülmüştür. Buna göre; B1 tüneli destek sistemi yapı yükünün ortalama değerleri geçtiği bölgelerde yetersiz kalmış ve deformasyon değerleri artış göstermiştir.

Deformasyon aynı bölgede konverjans ölçümleri ile de kendini göstermektedir. Tünel kesiti ağır yapı yükünün aksi yönünde deformasyona uğramaktadır. LRTS hattı boyunca bu tip tünel içi deformasyonlarla, yapıların yakınından veya farklı boyutlarda yayıldığı bölgelerden geçildiğinde, karşılaşılmaktadır.



Şekil 8.13: Değişken yapı yükleri altında deformasyonlar

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İstanbul Metrosu ikinci aşama kazıları kapsamındaki Aksaray – Yenikapı güzergahının (LRTS Hattı) kaya kütlesi, destek sistemi özellikleri, kazı kademesi ve yüzey yükleri, tünel içi ve yüzey deformasyonları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda; LRTS hattı ve bu hat gibi sık tünellerde deformasyona etki eden parametreler ve özellikleri ortaya konulmuştur. Buna göre;

İncelemeye konu LRTS hattı kazıları, İstanbul Paleozoyik istifinin en üstünde bulunan kumtaşı, silttaşı ve kilaşı aralanması ve yer yer diyabaz daykları içeren Trakya formasyonu içerisinde gerçekleştirilmektedir. Bu birimi, tuğla, moloz ve çeşitli kayaç parçaları içeren, yapay dolgu malzemesi örtmektedir.

Kilaşlarındaki dayanımın diğer birimlere göre düşük olmasına ve buna bağlı daha yüksek deformasyonlar beklenmesine rağmen yüzey deformasyonları ile litoloji arasında böyle bir ilişki belirlenememiştir.

Fayların ve buna bağlı süreksizlik düzlemlerinin yoğunlaştığı (0+240.00 – 0+280.00 km.) alanda yüzey deformasyonları -10 mm. seviyelerine ulaşmıştır. İnceleme konusu olan LRTS hattı gibi sık tünellerde, süreksizlik düzlemlerinin yüzey deformasyonlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Kazı çalışmaları sırasında 4. kademe kazıları ile dairesellikten sapan kazı kesiti nedeniyle deformasyonlarda artışlar meydana gelmekte ve 6. kademe kazılarının tamamlanması ile yüzey deformasyonları durağan hale gelmektedir.

Birbirinden bağımsız ve yaklaşık paralel açılan tünellerde, ilk hattın açılması ile oluşan deformasyonların, devamında bu kazıya yakın açılan diğer hattın etkisiyle tekrardan artarak en yüksek seviyesine ulaştığı saptanmıştır. Yanyana iki hat şeklinde açılan tünellerde kazı hatlarının birbirlerini etkileyerek deformasyonları arttırdığı saptanmıştır.

LRTS hattı boyunca RMR değerleri ile yüzey deformasyonu değerleri karşılaştırıldığında, RMR değerleri düştükçe yüzey deformasyonu değerlerinin arttığı saptanmıştır.

İncelenen tünel hattında örtü kalınlığı ile yüzey deformasyonu değerleri arasında tam bir ilişki belirlenememiştir. Ancak, tünel hattı boyunca, kısmen de olsa, örtü kalınlığı arttıkça yüzey deformasyonu değerleri azalmaktadır.

Tünel hattı boyunca kazı kesitinin değiştiği bölgelerde deformasyon değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Bu artışlar farklılaşan kazı kesitlerinde gerilme dağılımlarındaki ani değişikliklerden kaynaklanmaktadır.

Tünel tavanına enjeksiyonlu kaya bulonlarının uygulanmasının, LRTS hattı gibi ana kaya kalınlığı az olan tünellerde, dolguda bulunan ve yeraltı hatlarından sızan suları tünel içine getirmesi ve buna bağlı oluşan ani oturmalar nedeniyle, yüksek yüzey deformasyonları (-19 mm) meydana getireceği belirlenmiştir.

Yüzey deformasyonlarının, yüzey yapılarından oluşan yüklerle ilişkilendirilmesi sonucunda destek sistemlerinin oluşturulmasında yapılacak bir yanlışlıkta ve/veya eksiklikte, incelemeye konu LRTS hattı gibi sık tünellerde deformasyon değerlerinin kaya kütlesi özelliklerine bağlı kalmaksızın artış göstereceği belirlenmiştir.

Sol yarı kazılarının bitirilmesi ile oluşan donatılı beton duvar son 3 kazı aşamasında da stabilite şartları sağlanıncaya kadar kırılmayarak tünelin sağ yarı kazılarına devam edilmiştir. Bu uygulama, tünel kazısı çalışmalarını olumlu yönde etkileyip, yüzey deformasyonu değerlerini en az değerlere indirmede etkin diğer bir parametre olarak saptanmıştır.

Yoğun yapılaşmanın altında açılan tünellerde, yüzey yüklerinden oluşan gerilme farklılıklarından dolayı, tünel içi deformasyonların gerilmelerin düşük olduğu bölge yönünde geliştiği ortaya konulmuştur.

Çalışmada, yüzey ve tünel içi deformasyonlarda; litoloji, yapısal jeoloji, kazı kademesi, kaya kütlesi, örtü kalınlığı, tünel kazı kesiti, destek sistemi ve yüzey yükleri etkin parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametreler arasında yapılan karşılaştırmada; litoloji, kaya kütlesi, tünel kazı kesiti ve yüzey yükleri, oluşan deformasyonların gelişimini ve hızını belirlemektedir. Bununla birlikte, yapısal jeoloji, destek sistemi ve kazı kademesi deformasyonları oluşturan ana sebepler olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, zayıf kaya ortamında ve yüzeye yakın açılan tünellerde, ani oturmalarla kaynaklanan yüzey deformasyonlarıyla karşılaşmamak için tünel tavanına bulon uygulaması yerine kazı adımlarının azaltılarak enjeksiyonlu boru süren ve ayna zemin çivilerinin arttırılması daha güvenli bir yöntem olarak önerilmektedir. Ayrıca, tünel kazıları sırasında süreksizlik düzlemlerinin ve buna bağlı ezik zonların yoğunlaştığı bölgelerde destek sistemine ek bir önlem olarak aynada göbek bırakılması ezik zonlarda yapılan ayna kazılarında aşırı sökülme ve bu durumun gelişmesi ile meydana gelebilecek göçüklerle karşılaşmamak için ek bir önlem olarak öngörülmektedir.

LRTS hattı gibi yoğun yerleşim alanlarının altından geçen tünellerde tünel içi ve yüzey deformasyonlarının en düşük seviyede tutulması gerekliliği tartışılmaz bir gerçektir. Bu nedenle iki ayrı hat şeklinde açılan tünellerdeki kazı çalışmalarında eksenler arası mesafenin birbirini etkilemeyecek şekilde projelendirilmesi gerekmektedir. Bu şekilde, tünel kazıları arası etkileşimden dolayı oluşabilecek yüksek deformasyonlar önlenmiş olacaktır.

10. KAYNAKLAR

- ABDÜSSELAMOĞLU, Ş., 1963, Kocaeli Yarımadası'nın Jeolojisi, *M.T.A. Derleme No: 3249*, Ankara.
- ARIÇ, C., 1955, *Haliç-Küçükçekmece Gölü Bölgesinin Jeolojisi*, Doktora, İ.T.Ü. Maden Fakültesi
- AYAYDIN, N., 2001, Tunneling and Trenchless Construction, Istanbul Metro Collapse Investigations [online], Mining Janual Online, <http://www.mjconstruct.com/tunnel/archive/2001/december/Istanbulmetro.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2004]
- BAYKAL, A.,F. VE KAYA, O., 1963, İstanbul Bölgesinde Bulunan Karbonifer'in Genel Stratigrafisi, *M.T.A. Dergisi 61. Sayısı*, 1-11.
- BİBEROĞLU, S., ve DALGIÇ S., 1996, İstanbul Metrosu Kazılarında Karşılaşılan Fay Zonlarının Kazı Duyarlılığına Etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi Cilt 2*, İzmir, 316-324.
- BİENIAWSKI, Z. T., 1973, Engineering Classification Of Jointed Rock Masses, *Trans. South African Inst. Civil Engineering*, 15, 335-344.
- BİENIAWSKI, Z. T., 1974, Geomechanics Classification Of Rock Masses And Its Application İn Tunnelling, *Proc. 3rd Cong. Of Int. Society For Rock Mechanics*, Denver, Vol.2, 27-32.
- BİENIAWSKI, Z.T., 1976, Rock Mass Classification İn Rock Engineering, *Proc. Symp. On Exploration For Rock Engineering*, Cape Town, Balkema, 97-106.
- BİENIAWSKI, Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley and Sons, 237.
- BROX, D., and HAGEDORN, H., 1999, Extreme Deformation and Damage During The Construction Of Large Tunnels, *Tunnelling And Underground Space Technology*, Vol. 14, 23-28.
- DALGIÇ, S., 2002, A Comparison of Predicted and Actual Tunnel Behaviour İn Istanbul Metro, Turkey, *Engineering Geology*, 63, 69-82.
- ERİŞ, İ., ve VARDAR, M., 1994, İstanbul Metrosu Taksim – 4. Levent Güzergahı Temel Kayaçlarının Jeomekanik Özellikleri ve Duraylılık Sorunları, *Ulaşım*

Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 163-178.

İ.B.B. ZEMİN VE DEPREM İNCELEME MÜDÜRLÜĞÜ, 2001, İstanbul'un Avrupa Yakası Güney Bölümü 1/5000 İmar Planlarına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüd Raporu ve Haritası, İstanbul.

KAYA, O., 1971, İstanbul'un Karbonifer Stratigrafisi, T.J.K. Bülteni, 14(2), 143- 191.

KAYA, O., 1973, *Paleozoic of İstanbul (The Devonien and Lower Carboniferous Stratigraphy of the İstinye, Bostancı and Büyükkada subareas)*, E.Ü.F.F. Kitaplar Serisi, İzmir.

KETİN İ., 1988, İstanbul Bölgesi'nde Karbonifer Yaşlı Trakya Formasyonu'nun Yapısal Özelliği, *Mühendislik Jeolojisi Bülteni*, 11, 5-12.

MERİÇ, E., 1990, *İstanbul Boğazı Güneyi ve Haliç'in Geç Kuvaterner (Holosen) Dip Tortulları*, İst.Teknik Üniv. Vakfı, 1-114, 975-7463-00-0.

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

ÖNALAN, M., 1981, İstanbul Ordovisiyen ve Silüriyen İstifinin Çökeltme Ortamları, *İ.Ü.Y.F. Yerbilimleri Dergisi*, 2(3), 161-177.

ÖZBEK, A., TÜRKMEN, S., GÜL, M., 2003, The Deformation Evaluation Of Kızlaç T3A Tunnel (Osmaniye, Turkey), *Engineering Geology*, Vol. 67, Issues 3-4, 309 – 320.

RABCEWICZ, L., 1964., The New Austrian Tunneling Method. *Water Power*, Nov. pp., 453–457.

SCHUBERT, P., VAVROVSKY, G.M., 1994., Interpretation of Monitoring Results, *World Tunneling.*, WT Review, 351– 356.

SCHUBERT, W., BUDİL, A., 1995., The Importance Of Longitudinal Deformation In Tunnel Excavation. Proc., *8th Congress on Rock Mechanics*, A.A. Balkema, Tokyo.

SCHUBERT, W., STEİNDORF, A., 1996., Selective Displacement Monitoring During Tunnel Excavation., *Felsbau* 2, 93– 97 (14).

SCHUBERT, W., STEİNDORF, A., 1997., Advanced Monitoring Data Evaluation For Tunnels In Poor Rock., *8th Congress on Rock Mechanics*, A.A. Balkema, Tokyo.

- STEİNDORF, A., SCHUBERT, W., 1997., Application of New Methods of Monitoring Data Analysis for Short Term Prediction in Tunneling, *Tunnels for People, World Tunnel Kongress.*, A.A. Balkema, Vienna, 65– 69.
- ŞENGÖR, A.M.C., 1984, The Cimmeride Orogenic System and The Tectonics of Eurasia, *Geol. Soc. America Spec.* 75-82.
- VARDAR, M. ve BAYRAKTAR, H., 1993, İstanbul Metrosu Araştırma Galerisi Örneğinde İn-situ Dayanımı ile İTÜ Mühendislik Jeolojisi Kaya Mekaniği Sınıflaması, *Mühendislik Jeolojisi Bülteni*, 14, 1-15.
- VARDAR M., 1994, Metro Tünellerinde Duraylığın Korunması ve Sağlanması Sağlama-İyileştirme, *Ulaşım Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu*, 1-3 Aralık 1994, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 39-48.
- VOLKMANN, G., SCHUBERT, W., 2006, Optimization Of Excavation And Support In Pipe Roof Supported Tunnel Sections, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 404-412.

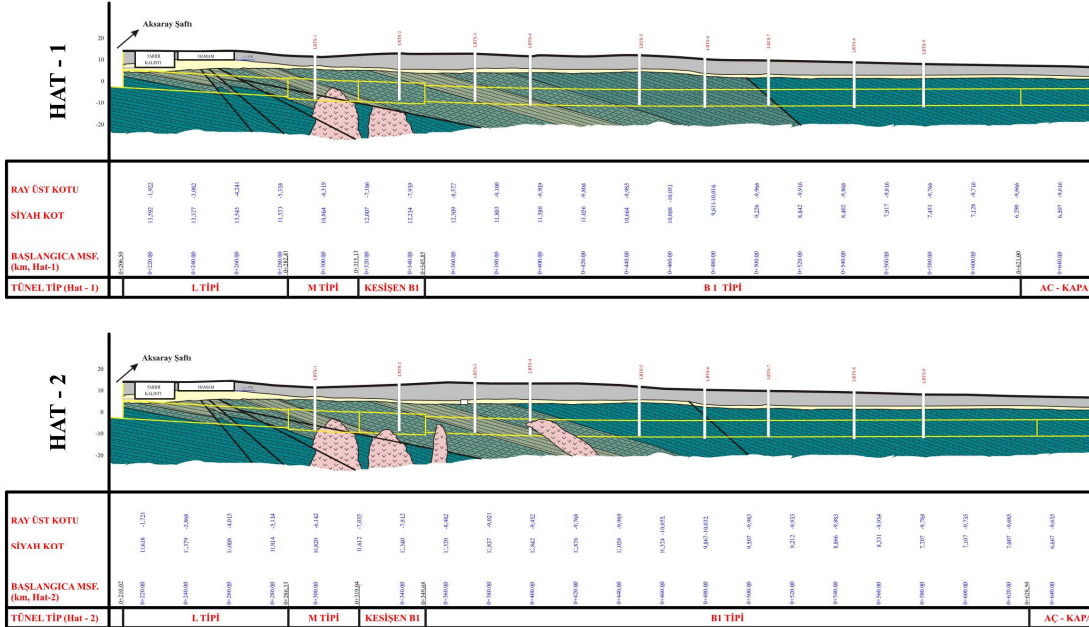
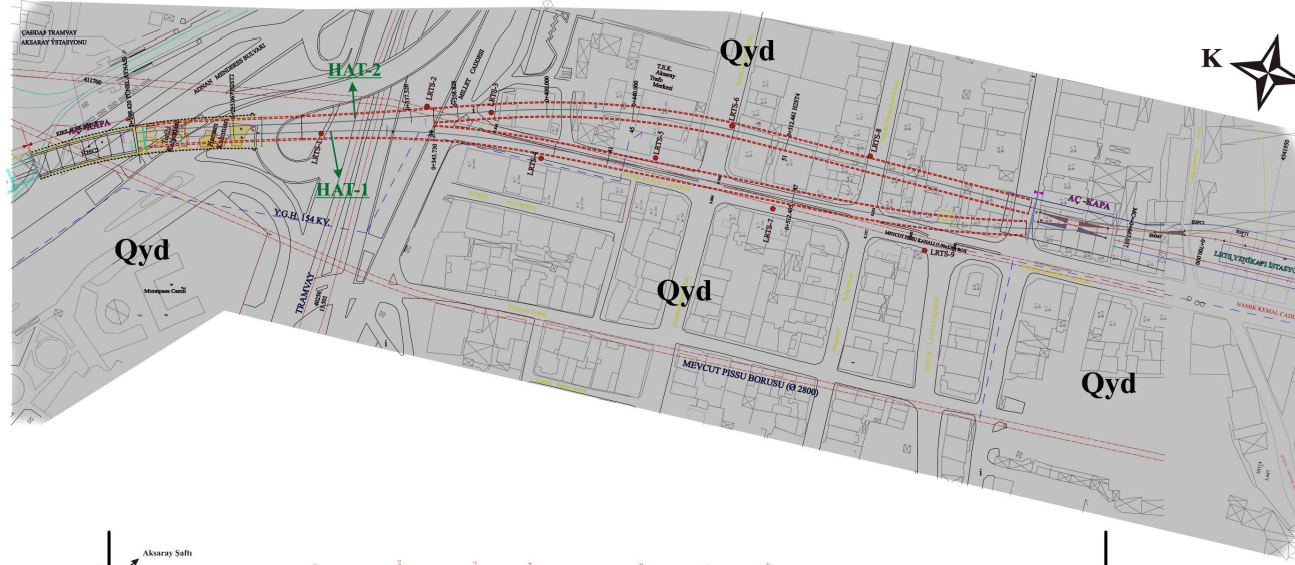
11. ÖZGEÇMİŞ

İbrahim KUŞKU 31.08.1981 yılında İstanbul’da doğdu. Orta ve Lise öğrenimini İstanbul’da yaptı. 1998 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümüne girdi. 2002 yılında aynı bölümden mezun oldu ve 2002-2004 tarihleri arasında Geosound Yerbilimleri Mühendislik Şirketinde jeoloji mühendisi olarak çalıştı. 2002 yılında Fenbilimleri Enstitüsü Jeoloji Anabilim Dalı’na Yüksek Lisans eğitimi için giren İbrahim KUŞKU, 2004 yılında aynı anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

EKLER

**EK-1. TÜNEL GÜZERGAHI JEOLUJİ HARİTASI
VE JEOLUJİ ENİNE KESİTLER**

EK 1- TÜNEL GÜZERGAHI JEOLojİ HARİTASI VE JEOLojİ ENİNE KESİTLERİ



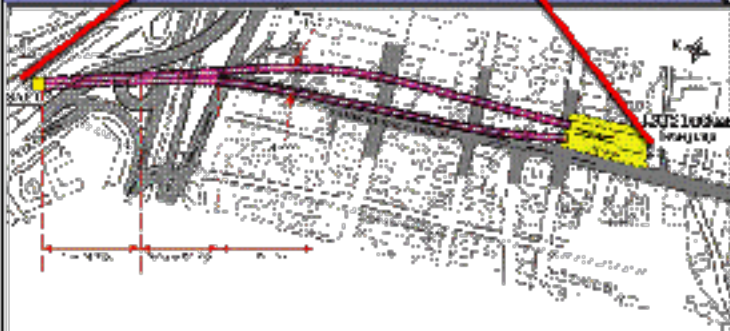
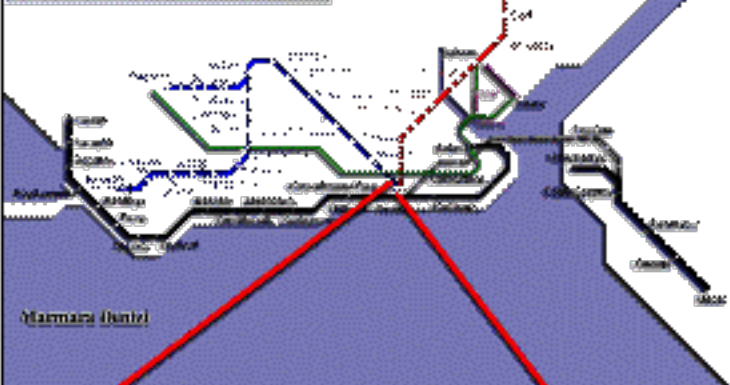
ACIKLAMALAR

- Dolgu
- Blok, Çakıl, Kum (Tamamen Ayrışmış Zon)
- Kumtaşı
- Kilitaşı
- Kumtaşı - Silttaşı
- Dişbaz Daykı
- Fay

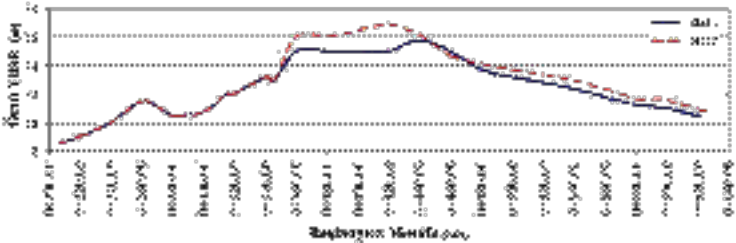
Ölçek: 0 20 m.



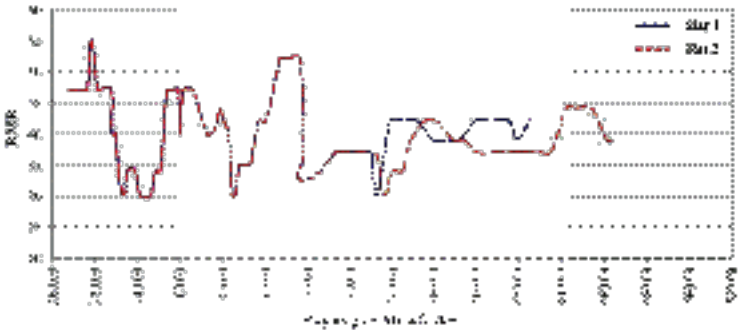
- **İzmir**
- **İzmir**
- **İzmir**
- **İzmir**
- **İzmir**
- **İzmir**
- **İzmir**

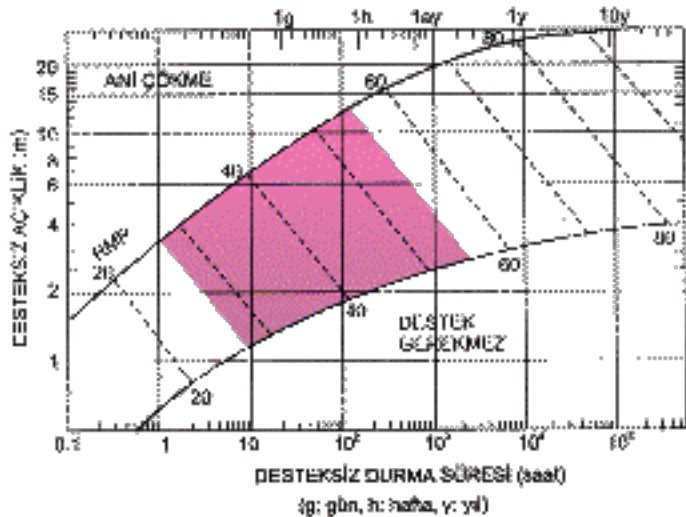


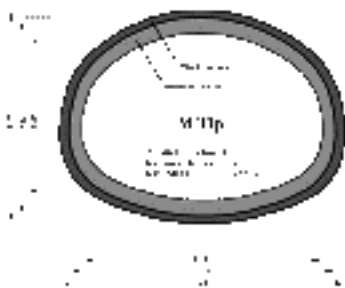
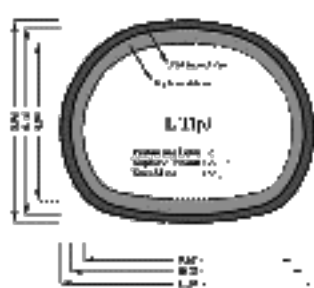
SERİ	FORMASYON	SİMGİ	KALINLIK	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
KUVATERNER	YAPSA BÖLÜŞÜ	Q ₄	0,4 - 0,5		Akçeşme, taşlı, kumlu çakıl, derece taşları ve küçük kaktuslar
	ALÜVİYON	Q _{al}	0,5 - 12		Güçlük Bkz, çakıl, kil
	KÜSÜRLÜ	Q _{ks}	0,5 - 30		Güçlük Bkz
MİYÖSEN	BAKIRGÖV	Tb	30 - 100		Kireytaş - Kİ. omacı, kum ve macra
	GÜNGÖREN	T _g	9 - 120		Kİ; sarımsı yeşil, yer yer kırmızı ve kireçli omacı
	CIKIRÇESME	T _c	15 - 50		Kum, silt, kumlu kum, sarımsı-bordo-sarı, grisek
KARİBONİFER	TRAKYA	Cl	> 1500		Güçlük Bkz Kireytaş, kireçli silt ve macra İç içte çakıl Kireçli kireytaş (yeşil), Çamurlu (yeşil) kireçli, Çeliksiz kireytaş (yeşil)









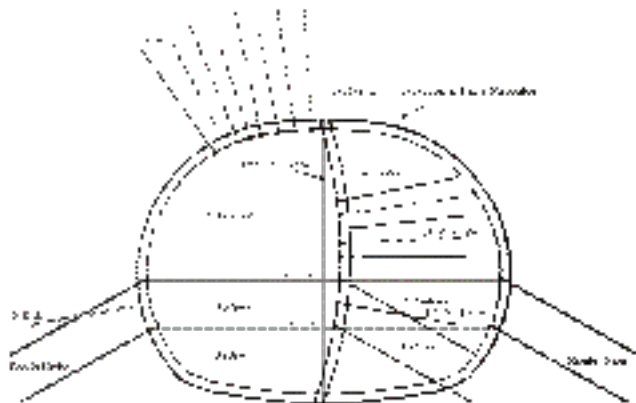


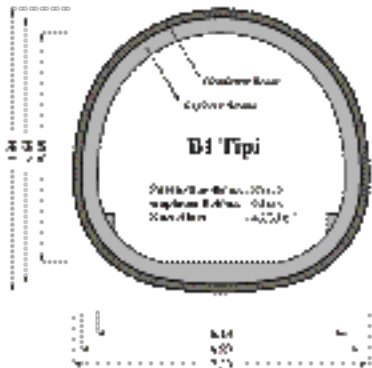


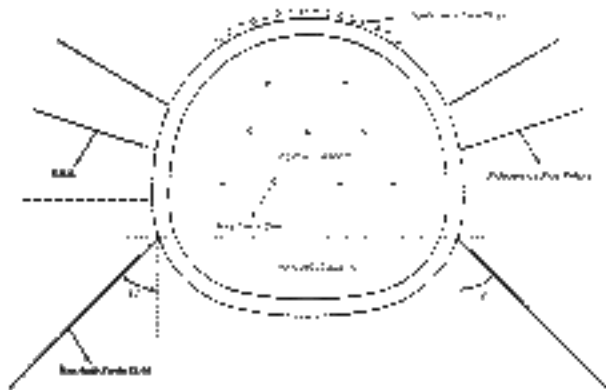


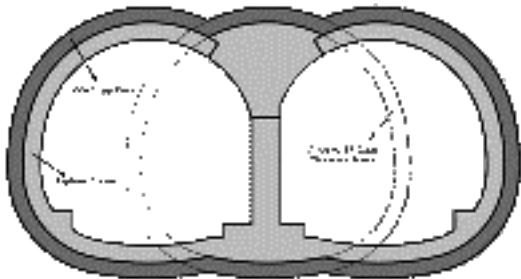






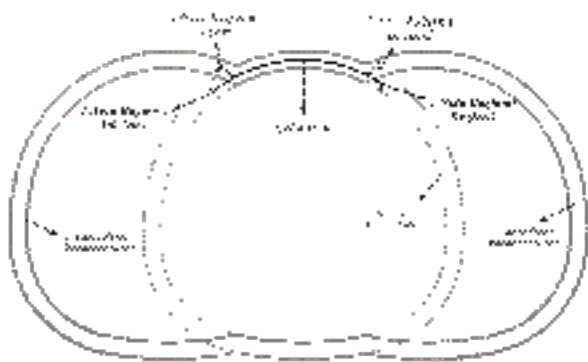


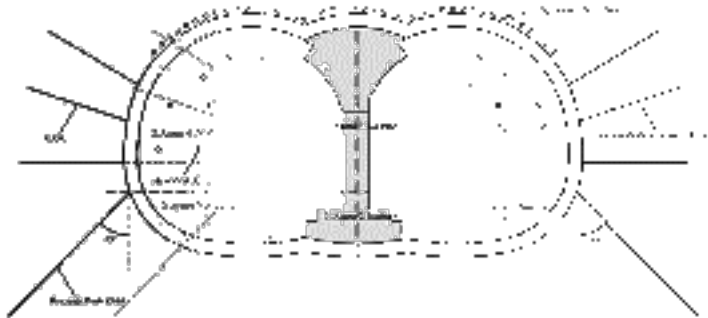


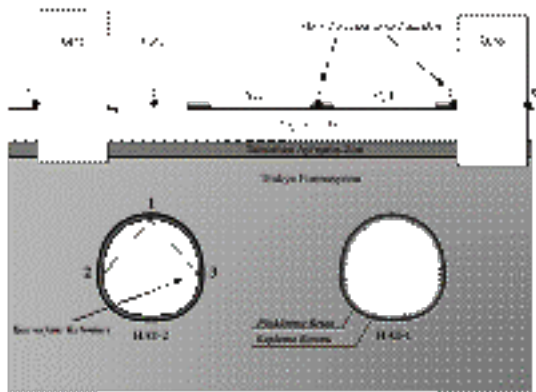




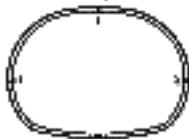




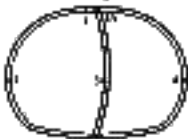




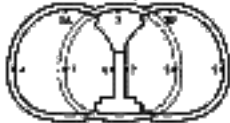
1-Түр



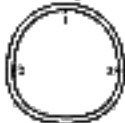
3d Түр



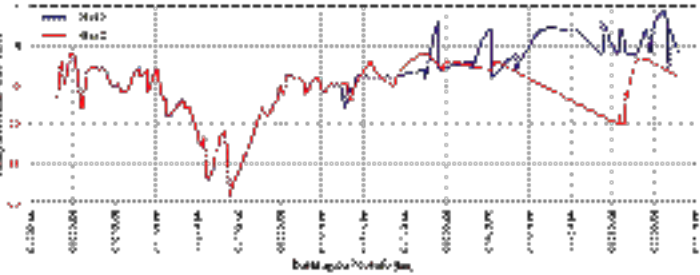
KM Түр

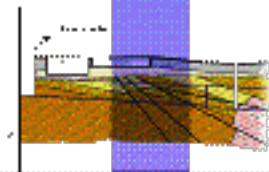
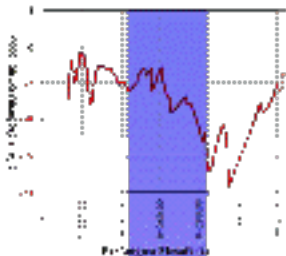


ЕЭ Түр

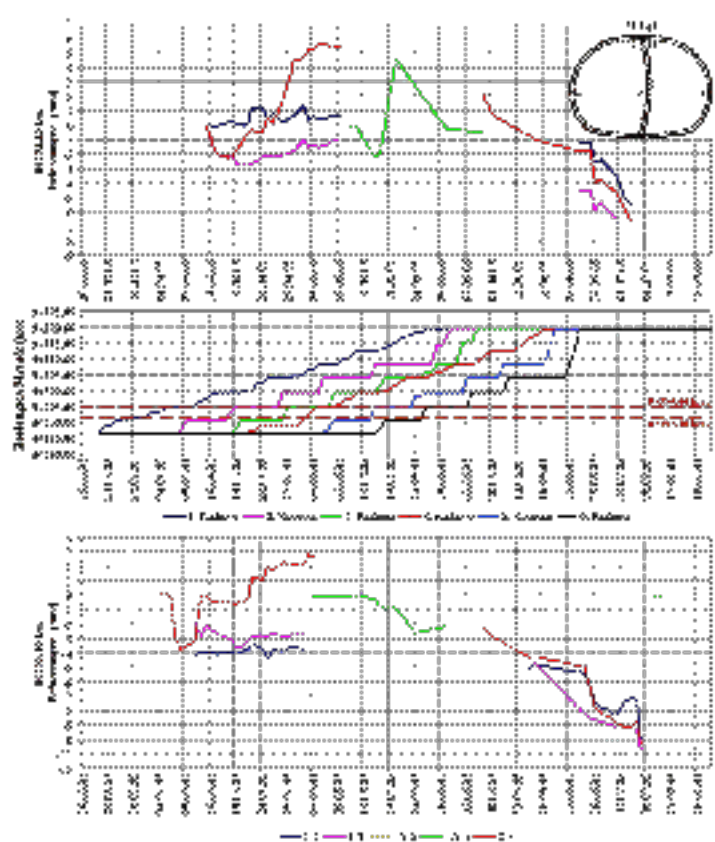


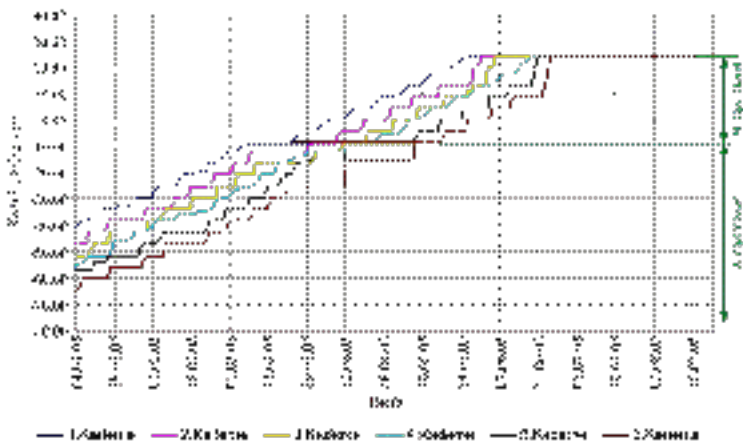
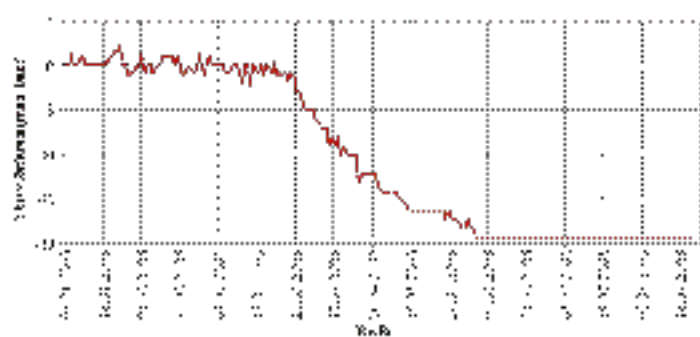
Y-axis: Information Value

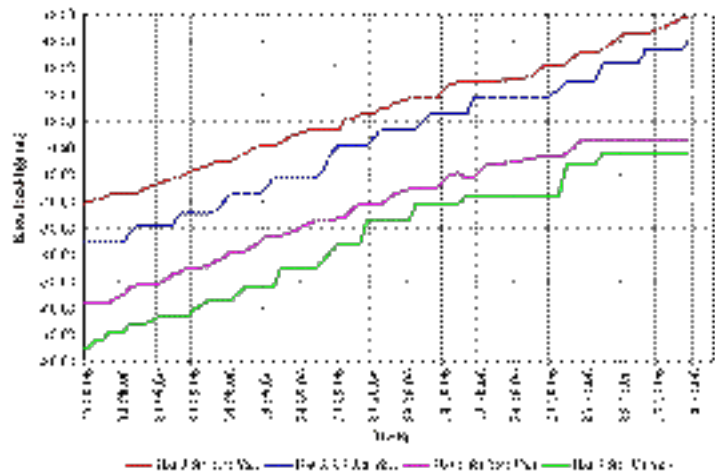
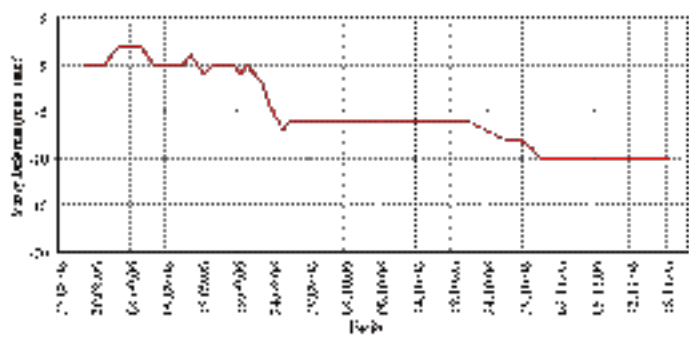


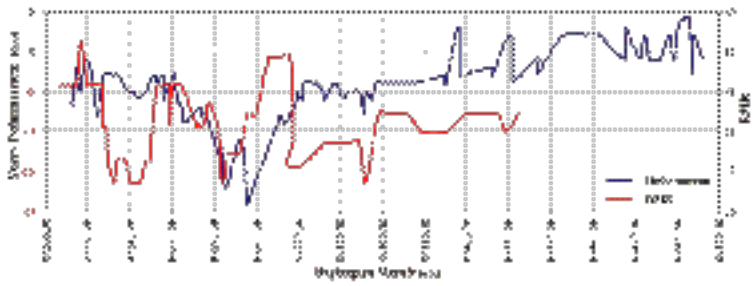


Distance (km)	0	20	40	60	80	100
Blue Shaded Area						
Distance (km)	0	20	40	60	80	100
Blue Shaded Area						
Distance (km)	0	20	40	60	80	100
Blue Shaded Area						
Distance (km)	0	20	40	60	80	100
Blue Shaded Area						









Weighted Decremental Error

1

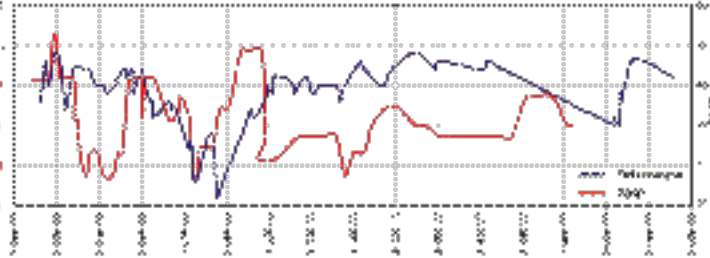
0.5

0

-0.5

-1

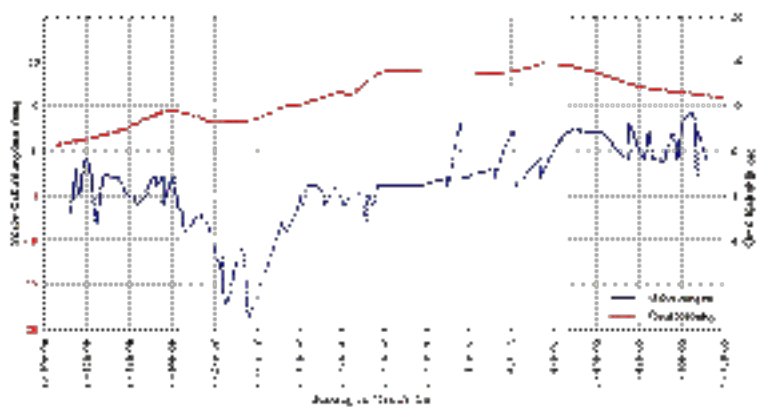
-1.5

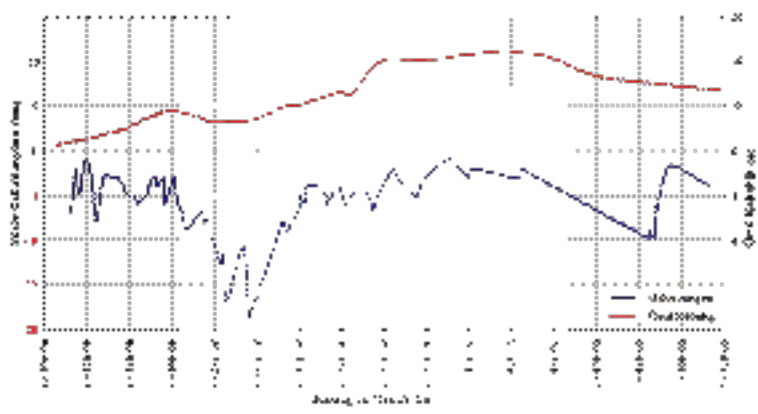


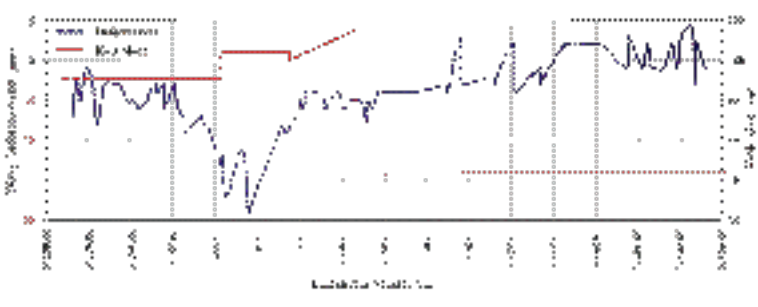
Iteration

Lasso

Ridge







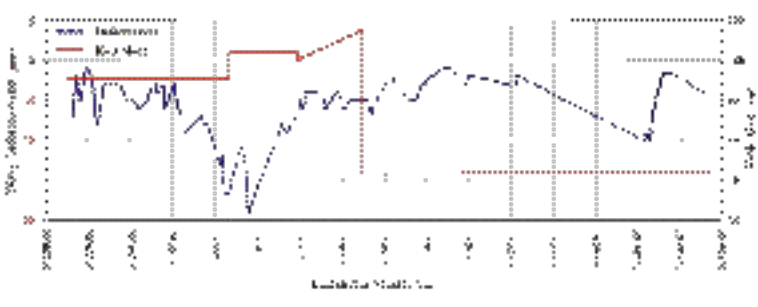
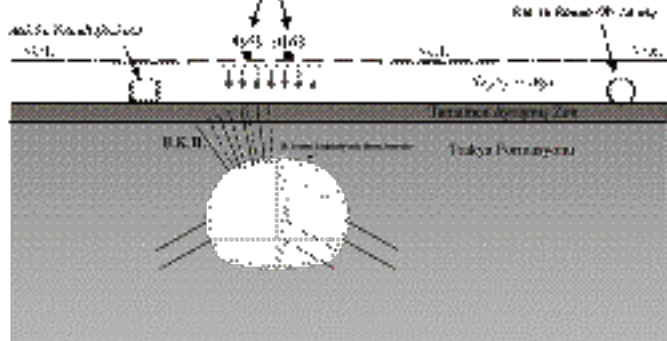


Diagramm zur Darstellung der ...



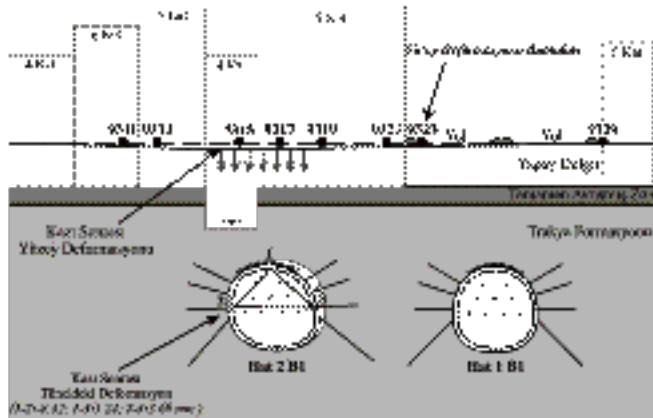


FIG 1- TUNEL GÖZERGATI JEOLÖJİ HARİTASI VE JEOLÖJİ ENİNE KESİTLERİ

