



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS

**MARMARAY PROJESİ SİRKECİ İSTASYONUNUN VE
ÇEVRESİNİN MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ**

**Jeoloji Mühendisi Can TATAR
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Uygulamalı Jeoloji Programı**

**Danışman
Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ**

Temmuz, 2011

İSTANBUL

Bu çalışma 11/07/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir

Tez Jürisi



Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ (Danışman)

İstanbul Üniversitesi



Prof. Dr. Simav BARGU

İstanbul Üniversitesi



Prof. Dr. Ali Malik GÖZÜBOL

İstanbul Üniversitesi



Yard. Doç. Dr. Tülay ÖZKAN KÖKSOY

İstanbul Üniversitesi



Yard. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Lisans, Yüksek Lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım esnasında her türlü yardım ve desteğinden dolayı tez hocam Prof. Dr. Süleyman Dalgıç'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tezimin değerlendirme aşamasında sabırla hatalarımı gösterip yardımcı olan, yol gösteren hocam Prof. Dr. Simav Bargu'ya sonsuz teşekkür ederim.

Bu teze başlamam için olanak sağlayan DLH baş mühendisi Osman ALTUN'a, tüm çalışmalarım boyunca fikirlerini ve desteklerini eksik etmeyen başta Jeoloji Mühendisi Niyazi Şennazlı ve Jeofizik mühendisi Selami IŞIK olmak üzere tüm AVRASYA CONSULT çalışanlarına, veri alımı sırasında her türlü desteği veren başta Tetsuya KANEKO, İSAMU OTSUKA tüm TAİSEİ çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Aynı yolda ilerleyip aynı zorlukları çekerken her koşulda yanımda olan, yardımlarını esirgemeyen tez arkadaşım Jeoloji Mühendisi A.Selen TUFAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tüm süreç boyunca ve her zaman yanımda olan maddi manevi beni destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

TEMMUZ, 2011

Can TATAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	V
TABLO LİSTESİ	VII
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İNCELEMENİN AMACI.....	1
1.2. İNCELEME ALANI	2
1.2.1. İnceleme Alanı Konumu	2
1.2.2. İklim ve Bitki Örtüsü.....	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	8
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	10
4. JEOLojİ.....	11
4.1. STRATİGRAFİK JEOLojİ.....	11
4.1.1. Trakya Formasyonu	11
4.1.2. Güngören Formasyonu.....	14
4.1.3. Bakırköy Formasyonu	14
4.1.4. Kuşdili Formasyonu.....	15
4.1.5. Yapay Dolgu	16
4.2. YAPISAL JEOLojİ	16
4.2.1. Kıvrımlar	16
4.2.2. Faylar	16

4.2.3. Çatlak Takımları.....	17
4.3. TARİHSEL JEOLJİ.....	17
5. DEPREMSELLİK	18
6. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ	21
6.1. LİTOLOJİ	21
6.2. Petrografik Analiz.....	24
6.3. HİDROJEOLJİ	31
6.4. ARAZİ TESTLERİ.....	33
6.4.1. Standart Penetrasyon Testi.....	33
6.4.2. Packer Testi	35
6.5. LABORATUVAR TESTLERİ	36
6.6. KİMYASAL ANALİZ	42
6.7. KAYA KÜTLESİ SINIFLAMASI.....	43
6.7.1. Kayanın Basınç Dayanımı	44
6.7.2. Kaya Kütle Değerleri (RQD).....	44
6.7.3. Süreksizlik Aralığı.....	45
6.7.4. Süreksizlik Durumu	45
6.7.5. Rmr İle Desteksiz Kazı Duraylılığı Arasındaki İlişki.....	45
6.7.6. RMR Kaya Sınıfı, Puanları ve Japon Karayolu Sınıflaması ilişkisi.....	46
6.8. JEOTEKNİK PARAMETRELER.....	53
6.8.1. Yöntem	53
6.8.2. Geçici Desteklerin Dizaynı	53
6.8.3. Tünel Kazısı ile Alakalı Olan Yüzey Zemin Oturmalarının Hesabı	54
6.9. TEHLİKE SEVİYELERİ.....	55
6.10. KAZI.....	57
6.10.1. Batı Havalandırma Şaftı (WVS').....	57
6.10.2. Merkez Yürüme Tüneli	58
6.10.3. Platform Yürüme Tüneli.....	59
6.10.4. Merkez Bağlantı Tüneli.....	61
6.11. DESTEK TİPİ VE SİSTEMLERİ.....	62

6.11.1. Batı Şaftı Destek Tipleri ve Sistemleri	62
6.11.2. Platform Tüneli ve Merkez Yürüme Tüneli Tahkimat Sistemleri	65
7. JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER	73
8. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYONLARININ İNCELENMESİ	76
8.1. LİTOLOJİ ve YÜZEY DEFORMASYON İLİŞKİSİ	76
8.2. KAZI KADEMESİ ve KESİT BOYLARI İLE DEFORMASYON İLİŞKİSİ	78
8.2.1. Kazı Kademesi ve Kesit Boyları İle Tünel İçi Deformasyon İlişkisi	78
8.2.2. Kazı Kademesi ve Kesit Boyları ile Yüzey Deformasyon İlişkisi.....	80
8.3. KAYA KÜTLESİ SINIFI RMR ile DEFORMASYON ARASINDAKİ İLİŞKİ	81
8.4. ÖRTÜ KALINLIĞI ile YÜZEY DEFORMASYON İLİŞKİSİ	83
8.5. SU GELİMİ ve KAZI İLERLEME ile DEFORMASYON İLİŞKİSİ	83
8.6. TÜNEL ETKİ ZONU ve DEFORMASYON İLİŞKİSİ	86
8.7. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYONLARI İLİŞKİSİ	90
8.7.1. Güney Platform Tüneli Tünel içi ve Yüzey Deformasyonları ilişkisi....	90
8.7.2. Kuzey Platform Tüneli Tünel içi ve Yüzey Deformasyonları ilişkisi	93
9. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	98
10. KAYNAKLAR.....	101
11. ÖZGEÇMİŞ.....	103
EKLER.....	104

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	: Marmaray projesi genel planı	1
Şekil 1.2	: Tünelin 3d görünümü	2
Şekil 4.1	: İstanbul bölgesinin stratigrafik kesiti	11
Şekil 5.2	: Depremsellik haritası	19
Şekil 5.3	: Türkiye deprem haritası	20
Şekil 6.1	: Genel jeolojik diagram	22
Şekil 6.2	: Sondaj Lokasyonları	23
Şekil 6.3	: Sirkeci istasyonu kaya ve dolgu zemin arasındaki sınır	24
Şekil 6.4	: BH144A-C24-(60.80 -60.90m)	25
Şekil 6.5	: BH144B-C9-(42,20-44,30m)	26
Şekil 6.6	: BH145B-C6-(39,60-39,70 m)	27
Şekil 6.7	: BH146A-C2-(25,30-25,35 m) Ölçek 1 cm=145µ	28
Şekil 6.8	: BH146A-C7-(26,65- 26,70m)	29
Şekil 6.9	: BH146A-C10-(32,85-32,90m)	30
Şekil 6.10	: BH146-C4-(33,30-33,35m)	31
Şekil 6.12	: Yükseklik ve kuyu numarasına göre yeraltı su seviyesi	33
Şekil 6.13	: Çeşitli RMR kaya kütleli sınıflarına göre, desteksiz durma süresi ve tavan açıklığı	46
Şekil 6.14	: Japon Kaya Sınıflaması ve Güzergah görünümü	48
Şekil 6.15	: Sirkeci İstasyonu Uzunluk-RMR ilişkisi	50
Şekil 6.16	: Sirkeci istasyonu kesit tipleri ve tanımlamaları	53
Şekil 8.1	: Güney Platform Tüneli 0+206 Konverjans ölçümü	76
Şekil 8.2	: SD19 bulonu oturma grafiği	77
Şekil 8.3	: Güney Platform Tüneli 0+190 dayk sokulum gösterimi	77
Şekil 8.4	: Güney Platform Tüneli 0+206 Tavan oturması	78
Şekil 8.5	: Güney Platform Tüneli kazı adımları	79
Şekil 8.6	: Kuzey Platform Tüneli kazı adımları	79
Şekil 8.7	: Kuzey Platform Tüneli 0+175 Tavan oturması	80
Şekil 8.8	: Kuzey Platform Tüneli 0+175 Konverjans değerleri	80
Şekil 8.9	: Kuzey Platform Tüneli ve Güney Platform Tüneli yüzey oturması kıyaslaması	81
Şekil 8.10	: Güney Platform Tüneli yüzey oturması-RMR ilişkisi	82
Şekil 8.11	: Kuzey Platform Tüneli yüzey oturması RMR ilişkisi	82

Şekil 8.12	: Kuzey Platform Tüneli kazı ilerlemesi-su gelimi ilişkisi.....	83
Şekil 8.13	: Güney Platform Tüneli kazı ilerlemesi-su gelimi ilişkisi.....	84
Şekil 8.14	: Sirkeci istasyonu su gelim grafiği	84
Şekil 8.15	: Güney Platform Tüneli su gelimi-max ölçülen yüzey bulonu	
Kıyaslaması.....		85
Şekil 8.16	: Kuzey Platform Tüneli su gelimi- max ölçülen yüzey bulonu	
kıyaslaması.....		85
Şekil 8.17	: Kuzey Platform Tüneli 0+212 yüzey Extansometre ölçümü	87
Şekil 8.18	: Tünel kesiti, Extansometre uzunluğu ve litoloji ilişkisi	88
Şekil 8.19	: Tünel etki zonu diagram gösterimi.....	89
Şekil 8.20	: Güney Platform Tüneli 0+206 Tavan oturması değeri.....	90
Şekil 8.21	: Güney Platform Tüneli 0+190 Konverjans değeri	91
Şekil 8.22	: SD19 bulonu oturma grafiği.....	92
Şekil 8.23	: SD42 bulonu oturma grafiği	92
Şekil 8.24	: Kuzey Platform Tüneli tünel içi ve yüzey deformasyon kıyaslaması ..	93
Şekil 8.25	: SB14 bulonu oturma grafiği	94
Şekil 8.26	: Kuzey Platform Tüneli 0-016 tavan oturması değeri	94
Şekil 8.27	: Kuzey Platform Tüneli 0-005 konverjans değerleri	94
Şekil 8.28	: Kuzey Platform Tüneli 0+175 tavan oturma grafiği	95
Şekil 8.29	: Kuzey Platform Tüneli 0+202 tavan oturması değerleri	95
Şekil 8.30	: Kuzey Platform Tüneli 0+175 konverjans değerleri	96
Şekil 8.31	: Kuzey Platform Tüneli 0+202 konverjans değerleri	96
Şekil 8.32	: Güney Platform Tüneli tünel içi ve yüzey deformasyon kıyaslaması.....	
.....		97

TABLO LİSTESİ

Tablo 6.1	: Yeraltı su seviyesi derinlikleri	32
Tablo 6.2	: Dolgu zemin için SPT değerleri.....	34
Tablo 6.3	: Kuşdili Formasyonu için SPT değerleri.....	35
Tablo 6.4	: Packer test sonuçları	36
Tablo 6.5	: Yapılan deney sayısı ve standartı.....	36
Tablo 6.6	: Trakya Formasyonu mekanik ve fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 6.7	: Dolgu zemin ve Kuşdili Formasyonu mekanik özellikleri	37
Tablo 6.8	: Kayaçların Fiziksel Özellikleri ve Zemin Sınıflaması (Dolgu ve Kuşdili Formasyonu).....	39
Tablo 6.9	: Kayaçların Fiziksel Özellikleri ve Zemin Sınıflaması (Kuşdili ve Trakya Formasyonu).....	40
Tablo 6.10	: Kayaçların Fiziksel Özellikleri ve Zemin Sınıflaması (Kuşdili ve Trakya Formasyonu).....	41
Tablo 6.11	: Su örnekleri için kimyasal analiz değerleri.....	42
Tablo 6.12	: Zemin örnekleri için kimyasal analiz değerleri.....	42
Tablo 6.13	: Kaya kütlesi sınıfları (Japon sınıflaması) için deformasyon ve dayanım özellikleri.....	43
Tablo 6.14	: Sondajlardan alınan Trakya Formasyonu numunelerinin özellikleri... 44	
Tablo 6.15	: Japon kaya sınıflandırması ve RMR ilişkisi	47
Tablo 6.16	: Trakya Formasyonu kaya kalitesi sınıfları (RMR)	49
Tablo 6.17	: Japon Kaya Sınıfı özellikleri.....	51
Tablo 6.18	: Japon Kaya Sınıfı özellikleri.....	52
Tablo 6.19	: Geçici destek için gereken içerikler (Birincil destek).....	54
Tablo 6.20	: Yüzey oturmaları hesabı için zemin parametreleri	54
Tablo 6.21	: Sirkeci İstasyonu için kullanılan Tehlike seviyeleri değerleri	55
Tablo 6.21	: Farklı çimento/su oranında karakteristikler	63
Tablo 7.1	: Platform tünelleri ve Merkez Yürüme Tüneli için yapılan ölçümler... 74	
Tablo 7.2	: Batı shaftı için yapılan ölçümler	75

ÖZET

MARMARAY PROJESİ SIRKECİ İSTASYONUNUN VE ÇEVRESİNİN MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışma ile Marmaray projesi Sirkeci NATM tünelleri için tünel içi ve yüzey deformasyonların kaya kütlesi, örtü kalınlığı, kazı kesiti, kazı kademesi, yüzey yükleri ve destek sistemi özellikleri ile ilgili nedenleri araştırılmıştır.

Genellikle kil içerikli Trakya Formasyonu içerisinde bulunan Tünel güzergahının üzerinde Kuşdili Formasyonu ve dolgu zemin bulunmaktadır. Kuşdili Formasyonu ve dolgu zeminin kalınlıkları 8-12 metre arası güzergah boyunca değişiklik göstermektedir. Bu tünelin tünel içi ve yüzey deformasyonların araştırılması, özellikle yapılaşmanın yoğun olduğu Sirkeci için kritik bir hal almıştır.

Elde edilen verilere göre, tünel içinde bulunan ezik zonlara ve dayk sokulumlarına bağlı olarak, tünel içi deformasyon gelişmiştir. İlk olarak açılan Güney Platform Tünelinin yarattığı zayıf zon, ardından kazısı başlanan Kuzey Platform Tünelini etkilemiş ve bu tünelde oluşan deformasyonları daha da hızlandırmıştır. Tünel güzergahında kesit alanının genişlediği bölgelerde tünel içi ve yüzey deformasyonlarının arttığı gözlenmiştir. Kesit alanının genişlediği bölgelerde arttırılan bulon sayısı ve boyları, yüzey deformasyonları tehlike seviye olan toplam 15 cm limitin altında tutmuştur. Dolgu zeminin çokluğu ve Kuşdili Formasyonunun dolgu zemin gibi çalışması, yüzey deformasyonlarının tünel içi deformasyonlara göre hızını arttırmıştır. Tünel için kullanılan Japon Karayolu Sınıflaması, RMR değerlerine çevrilmiş ve tünel içinde oluşan deformasyonlar RMR ile ilişkilendirilmiştir. RMR değerlerinin düştüğü aralıklarda, tünel içi ve yüzey deformasyonlarda ters orantılı olarak bir artış gözlenmiştir. RMR değerlerinin deformasyonu, güzergah boyunca birinci dereceden etkilediği belirtilmiştir.

SUMMARY

ENGINEERING GEOLOGY OF MARMARAY PROJECT SİRKECİ STATION AND IT'S ENVIRONMENT

The rock mass of inner tunnel and surface deformations, cover thickness, cross-section of excavation, grade of excavation and properties of support systems of Marmaray Project Sirkeci Station has been investigated in this study as Thesis of Master of Science in the Institute of Science of İstanbul University

There are manmade layer and Kuşdili Formation on the Mostly clay contented Trakya Formation that includes Tunnel route inside. Thickness of Manmade layer and Kuşdili Formation are average 8 – 12 meters during tunnel route. Therefore, It's vitally critical to investigate in tunnel and surface deformations for Sirkeci area that surrounded by constructions

According to data obtained, surface and in tunnel deformations are highly affected by dyke intrusion and fault zones. The weak zone created by South Platform Tunnel, which has been excavated first, has affected North platform tunnel and increase its deformation level. At the tunnel route, in tunnel and surface deformations has raised at large cross sectional areas. Increased rock bolt numbers and lengths keeps surface settlements under 15 cm which is alert level limit. Due to wide distribution of manmade layers and existing of Kuşdili Formation which is acting like manmade layer, have made surface settlements values higher than in tunnel deformations. Used classify for his tunnel Japan highway classify, have translated to RMR values and in tunnel deformations associate to that RMR values. At the parts has low RMR values, in tunnel and surface settlements have raised inversely correlated. It has been determined that RMR values have affected deformations for all tunnel route.

1. GİRİŞ

1.1. İNCELEMENİN AMACI

İncelemenin amacı Marmaray Projesi kapsamında raylı taşımaya yönelik NATM yöntemiyle açılmakta olan Sirkeci İstasyonunda, tünel güzergahında karşılaşılan jeoteknik sorunları ve etkilerini değerlendirmektir (Şekil 1.1).

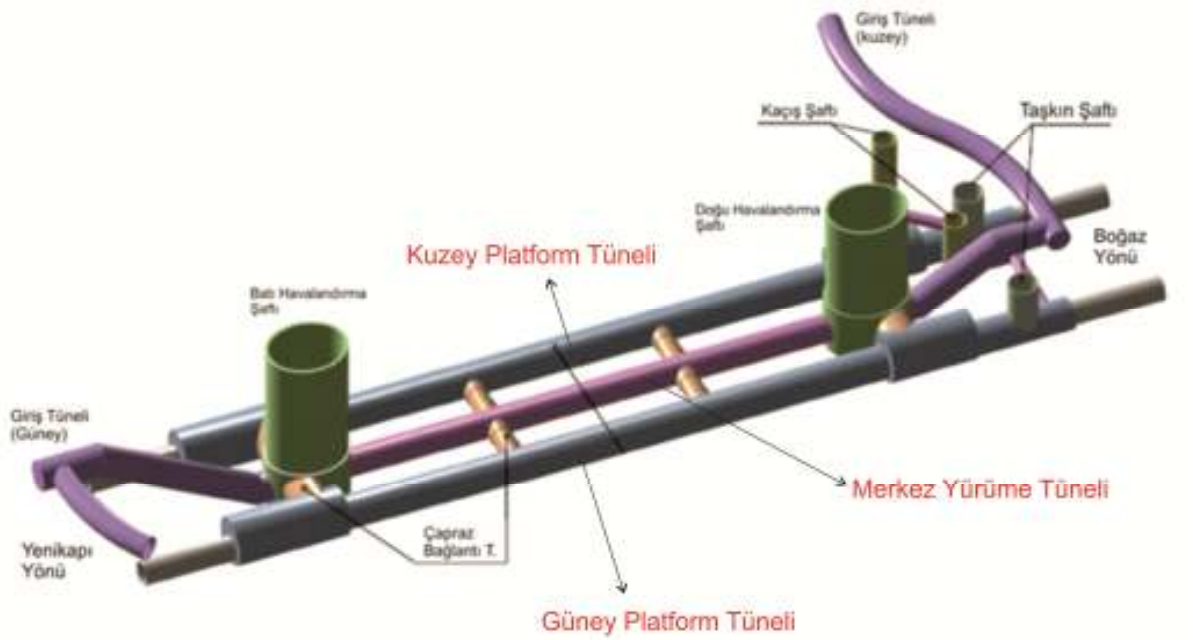


Şekil 1.1: Marmaray projesi genel planı

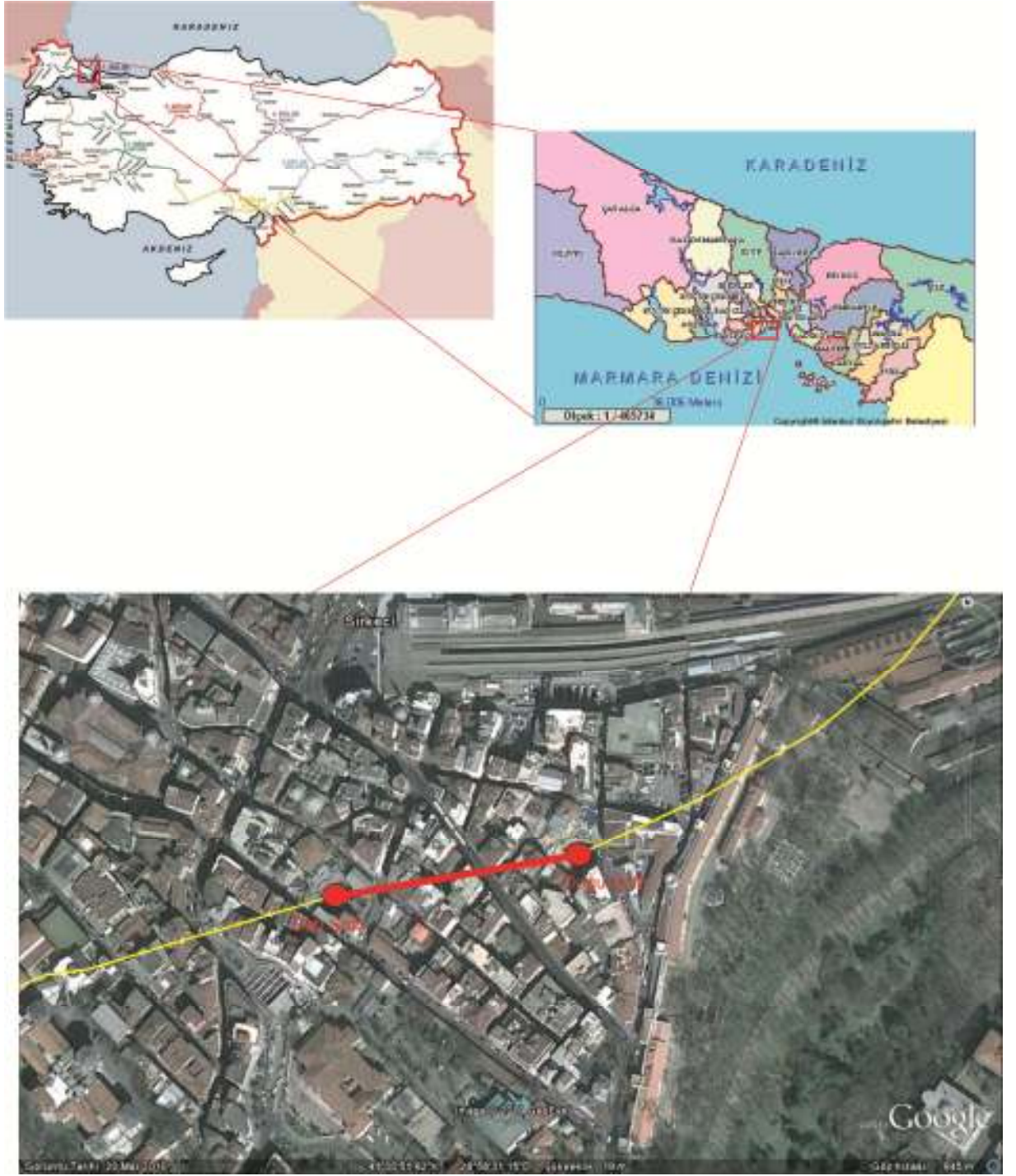
1.2. İNCELEME ALANI

1.2.1. İnceleme Alanı Konumu

Çalışma alanı, İstanbul ilinde yer alan Sirkeci bölgesinde yer almaktadır. Doğu shaftı Sirkeci Tren istasyonunun güneyinde kalmaktadır. Batı shaftı Hocapaşa camisinin güneyinde bulunmaktadır. Bölgeye raylı ulaşım ve karayolu vasıtasıyla ulaşılabilir (Şekil 1.2 ve 1.3).



Şekil 0.2: Tünelin 3d görünümü



Şekil 1.3: Yer bulduru haritası



Şekil 1.4: Sirkeci istasyonu tünelleri havadan görüntüsü

1.2.2. İklim ve Bitki Örtüsü

Bölgede Marmara ve Batı Karadeniz iklimi etkindir. Bu ılıman iklim kuşağında yazları sıcak ve az yağışlı, kışlar ise ılık ve yağışlı geçer. Topografik yapı ve bölgede bulunan göl ve barajlar mevcut iklimi etkilemektedir. Kıyıya paralel olarak ve kıyı boyunca uzanan dağlar Karadeniz'den gelen yağmur bulutlarının iç kesimlere doğru hareketini engellemektedir. Bu nedenle kıyı kesimler iç kesimlere oranla çok daha fazla yağış almaktadır. Bölgede yıllık yağış 500 mm ile 1000 mm arasında değişmektedir. Yıllık ortalama yağış 781 mm dir. Toplam yağışın yaklaşık %85'i Eylül-Mayıs ayları arasında düşmektedir.

Bölgede ortalama sıcaklıklar $6.3^{\circ}\text{C} \sim 13^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Hava sıcaklığının 0°C nin altına düştüğü süreler kısadır. Ocak ayı sıcaklık ortalaması 5.4°C , Ağustos ayı ortalaması 23.4°C olan İstanbul'da yıllık ortalama sıcaklık ise 14°C dir. İstanbul'un Anadolu yakası Rumeli yakasından biraz daha sıcaktır. Florya'da en yüksek sıcaklık 27 derece, Göztepe'de 31 derecedir. Yıllık sıcaklık ortalaması Florya'da $13,6$, Göztepe'de $13,9$ derecedir. İlimizde, yazın genel olarak poyraz, kışın karayel, yıldız karayel ve lodos eser. Kible ve lodos yağış getirir. Lodos, Marmara'da, karayel ve yıldız karayel Karadeniz'de fırtına yapar.

Akdeniz, Karadeniz, Balkan ve Anadolu kara ikliminin tesiri altında bulunur. Kışın Akdeniz'den gelen ılık lodosları, Balkanlar üzerinden gelen soğuk veya Karadeniz'den gelen yağışlı havalar tâkip eder. Yıllık ortalama sıcaklığı 13.5°C 'dir. Yıllık yağış miktarı ise $720-788$ mm'dir. Yağışların % 40'ı kış, % 20'si ilkbahar aylarında olur. Yazın yağış, sonbaharın yarısı kadardır. Genel olarak yazlar sıcak ve kurak, kışlar yağışlı ve ılık geçer. Sıcaklık bir yıl boyunca -14°C ile $+41,5^{\circ}\text{C}$ arasında seyreder. Kar yağışlı gün sayısı normalde 10 günü geçmez.

İstanbul ve çevresinin bulunduğu saha Trakya ve Kocaeli diye bilinen platolardan oluşmaktadır. Bu platolar kuzey ve güneyden deniz ile çevrilidir. Bu platoyu İstanbul Boğazı ikiye ayırır. İstanbul ve civarı ortak bir bölgesel iklim tipinin hakimiyeti altında olmamakla beraber gerçekte topoğrafya, yükselti, nispi konum, bakı ve bitki örtüsü gibi faktörlerin karakterindeki değişikliklerden dolayı bazı önemli farklarla birbirinden ayrılan belirgin iklim tipleri arz eder. İstanbul Boğazı ve çevresi genel olarak Akdeniz ikliminin etkisi altındadır. Bu iklim kıyı bölgelerde iç kesimlerde biraz ayrılık gösterir. Bilindiği gibi Akdeniz ikliminde yazlar sıcak ve kurak, kışlar ılık ve yağışlıdır. İstanbul iklimi; bir yandan Karadeniz'in, bir yandan Balkanlar ve Anadolu kara ikliminin etkisiyle meydana gelen özel bir durum gösterir. Kışın sık sık Balkanlardan gelen soğuk hava etkisini sürdürürken, bir ara Karadeniz'in çisentili, yağışlı üşüten az soğuk havaları başlar. Bu değişik durum kış boyunca birbirini izler. Yazın yağış sonbaharın yarısı kadardır. Genel olarak yazlar sıcak, kışlar yağışlı ve ılık geçer. Kar yağışlı gün sayısı 10 günü geçmez.

Oldukça geniş bir sahaya yayılmış olan İstanbul'da topografyadaki farklılık, deniz etkisi, şehirleşmenin dağınık ve yaygın olması, endüstriyel sahaların sıcaklık üzerine büyük etkisi olduğu bilinmektedir.

Genel olarak İstanbul'daki istasyonların sıcaklık ortalaması 13.8°C dır. Genel olarak İstanbul'un maksimum sıcaklığı 45.2°C Şile istasyonunda kaydedilmiş. Ortalama maksimum sıcaklıklar bakımından da istasyonlar arasındaki farklılaşma Kartal ile Şile arasında görülmektedir. İstanbul'da gece ile gündüz sıcaklıklarının arasındaki farkın en fazla olduğu ay genel olarak Nisan ayıdır. Diğer aylarda gece ile gündüz arasındaki fark pek fazla değildir. İstanbul'un uzun yıllar değerlerine göre ortalama bağıl nem % 76 dır. Çoğunlukla Kasım ve Aralık ayında bağıl nem yükselmeye başlar ve Ocak Şubat ayına kadar devam eder. Genel olarak bağıl nem İstanbul'da kış mevsiminde yüksektir. Bu aylarda bağıl nemde düşme başlar ve minimum değere Temmuz ve Ağustos ayında ulaşır. İstanbul'da genel olarak hava 5.5 oranında kapalı geçer, Karadeniz sahillerinden güneye doğru inildikçe bulutluluk oranı azalır. Bulutluluğun en fazla olduğu aylar kış aylarıdır. En az olduğu ay ise yaz aylarıdır.

İstanbul ilinde bulunan istasyonların vermiş olduğu ortalamalara göre yıllık yağış ortalaması 787 mm'dir. İstanbul'da en düşük yağış 641 mm olarak görülmektedir. İstanbul'a düşen ortalama yıllık yağışın % 35'i Kış mevsiminde, %23'ü İlkbahar mevsiminde, % 14'ü yaz mevsiminde, % 28'i Sonbahar mevsiminde meydana gelmiştir.

İstanbul Karadeniz'in tesiri altında kaldığından birçok merkeze göre daha fazla yağış aldığı görülmektedir. İstanbul'un yağış miktarının fazla olmasının bir sebebi de sahillerde hava kütleleriyle deniz arasındaki bağlantıdır. Bu sahillerde yaz aylarında genelde denizin sıcaklığı ile hava kütlelerinin sıcaklığı hemen hemen aynıdır. Ancak bazı aylarda (Temmuz-Ağustos) hava sıcaklığı denizin sıcaklığından daha yüksek olmaktadır. Sonbahar ve kış aylarında denizin sıcaklığı havadan daha yüksektir. Havaların soğumasıyla Ocak ve Şubat aylarında suların havadan daha sıcak olması yağış karakteri üzerine tesir etmektedir ve kış aylarında yağışların yükselmesine yardımcı olmaktadır. Kar yağışlı gün sayısı 10 günü geçmez.

İstanbul'un hakim rüzgarı kuzeydoğu (poyraz)'dır. Uzun yıllar ortalama rüzgar hızı 3.2 m/s' dir. Rüzgar hızı Karadeniz kıyılarından güneye inildikçe azalır. İstanbul ilinde ölçülen en kuvvetli rüzgar 42.4 m/s olarak Şile istasyonunda kaydedilmiştir. Yazın genel olarak poyraz, kışın karayel, yıldız ve lodos eser. Kible ve lodos yağış getirir. Lodos Marmara'da karayel ve yıldız Karadeniz'de fırtına yapar.

İstanbul bir liman şehri olması dolayısıyla sis oldukça önemli bir konudur. Çoğunlukla alçak yerlerde ve deniz üzerinde sabah erken saatlerde başlayan sis öğle saatlerine doğru sıcaklığın yükselmesi ile sona erer. İstanbul'da sisin en fazla olduğu aylar Mart, Nisan ve Mayıs aylarıdır. Sis en az görüldüğü aylar ise Temmuz ve Ağustos aylarıdır.

İnceleme alanı büyük bir bölümü yerleşim bölgesi olması nedeni ile bitki örtüsü bakımından fakirdir. Çalışma alanındaki mevcut bitki örtüsü park ve bahçelerde çevre düzenlemesi çerçevesinde yetiştirilen bitkilerden meydana gelmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

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

Ketin, (1988) tarafından İstanbul bölgesinde Karbonifer Yaslı Trakya Formasyonunun Yapısal özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmada, Trakya Formasyonunun geçirdiği tektonik evrim tariflenmiş ve süreksizlik özellikleri ortaya konulmuştur.

STFA Mühendislik, (2006) inceleme alanı ön araştırmaları kapsamında, araştırma sondajları ve jeoteknik veri raporu hazırlamıştır. Raporda açılan araştırma sondajlarında karşılaşılan jeolojik birimler ve yapılan deneylerin sonuçları, çalışma verisi olarak kullanılmıştır.

Biberoğlu ve Dalgıç, (1996) İstanbul Metrosu kazılarında karşılaşılan fay zonlarının kaya duyarlılığına etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, Trakya Formasyonu'na ait birimlerde açılan tünellerde fay zonlarında duraylılık riskinin arttığı ortaya konulmuştur.

Biberoğlu (2007), Marmaray Projesi güzergahının genel mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özellikleri ile ilgili sondaj raporlarına dayanarak değerlendirmeler yapmıştır.

Dalgıç ve Aysal, (2005) Marmaray Projesi, Sirkeci İstasyonu çalışmaları üzerine yaptığı petrografik analizde Trakya Formasyonundan alınan numuneleri incelemiştir. Çalışmada güzergah boyunca oluşan deformasyonlara ilişkin, bu kesitlerdeki içeriklerden yararlanılmıştır. Dayanımın düşük olduğu kesitlerin alındığı bölgelerdeki düşük deformasyonlar bu sayede anlamlandırılmıştır.

Tchihatcheff, (1867) bölgedeki ilk çalışmaları yapan isim olmuştur. Araştırmacı; Gebze' nin doğusundaki doğuya eğimli beyaz, Üst Kretase yaşlı kireçtaşlarına değinmiş ve bu kireçtaşının Ereğli' deki Üst Kretase' yi andırdığını söylemiştir. Devoniyen ile Triyas dokanağının da Gebze doğusunda görülebildiğini belirtmiştir. Trakya Formasyonu'nu Trakya serisi olarak isimlendirmiş ve Devoniyen yaşını vermiştir.

Volkanik alanın sınırlarının kabaca Uskumruköy' den ve Yelliköy' den geçtiğini belirlemiştir. Araştırmacıya göre başlıca kayalar tüfler ve çeşitli konglomeralarla bulunan dolerit ve bazaltlardır.

Özbay, (2009) Mühendislik jeolojisi incelemesinde tüm Marmaray güzergahındaki mühendislik özelliklerine değinilmiştir. Sirkeci İstasyonu dahil, bütün güzergahın jeolojisi ve kullanılan kazı yöntemi incelenmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

255 m uzunluğundaki Sirkeci tüneli ve şaftları NATM yöntemiyle kazılmaktadır. Proje kapsamında Sirkeci istasyonuna kadar TBM ile gelinmekte, Sirkeci istasyonundan itibaren TBM ile devam edilmektedir. Sirkeci ve Eminönü bölgesinin tarihi yapısı ve yerleşim düzeni nedeniyle NATM yöntemi tercih edilmiştir.

Klasik NATM yöntemi tünel içerisinde bazı kesimlerde yeterli olmadığından çeşitli kimyasal enjeksiyonlara (Silikon vb.), Şemsiye (Umbrella-Arch) yöntemine ek olarak başvurulmuştur. Tünel inşasının başlamasından önce bölgede yapılan araştırma sondajları ve sismik çalışmalar ile bölgenin jeoteknik parametreleri belirlenmiştir. Bu veriler ışığında laboratuvar analizleri yapılmıştır. Zemin özellikleri ve yer altı suyu ile ilgili diagramlar hazırlanıp, destek sistemi bu sonuçlar süzgecinde tasarlanmıştır.

Haftalık olarak tünel içi konverjans, deformasyonlar, oturmalar izlenmiştir. Yoğun şehirleşme olan bir bölgede tünel çalışmaları sürdürüldüğü için, 200'e yakın bina haftalık olarak gözlenmiştir. Piezometre, İnklinometre, Extansometre ölçümleri periyodik olarak yapılmıştır. Bunun yanı sıra bina çivileri ile oturmalar gözlenmiş olup, gereken yerlerde enjeksiyon ve güçlendirme işlemleri yapılmıştır. Tünel içi donatılı ve donatısız bölgelerde enjeksiyonun kalitesini ölçmek amacıyla Stresscell (Basınç ölçer) ve Strainage (Donatıda Basınç ölçer) ölçümleri yapılmıştır.

Proje kapsamında gerek binalarda, gerekse yüzeyde oluşacak deformasyonlar limitleri zemin ve bina durumuna göre belirlenmiştir. Binalarda oluşacak açısal bozulmaların 1/1000'i geçmemesi hedeflenmiştir.

4. JEOLJİ

4.1. STRATİGRAFİK JEOLJİ

İnceleme alanı ve çevresinde Trakya Formasyonu, Güngören Formasyonu, Bakırköy Formasyonu, Kuşdili Formasyonu ve dolgu zemin vardır. Tünel güzergahında ise Trakya Formasyonu, Kuşdili Formasyonu ve dolgu bulunmaktadır.

Üst Sistem	Sistem	SERİ	FORMASYON	KALINLIK (m)	LİTOLOJİ	FASİYES ÖZELLİKLERİ
SENOZOYİK	KUVATERNER	HOLOSEN	BAKIRKÖY	20-30	Tuğla, Çakıl, Kayaç parçası (Dolgu)	Göl ortamı
					Uyumsuzluk	
	TERSİYER	ÜMYÖSEN	GÜNGÖREN	10-30	Kireçtaşı- Marn: Beyaz krem renkli ince-orta aratabakalı, poröz, Macralı, kil/kum aratabakalı	
					Kil: Koyu gri renkli, Karbonatsız veya az karbonatlı, Siltli, yüksek plastisiteli, orta katı-kalı, mercekssel, bitki artıklı	
PALEZOYİK	KARBONİFER	MİYÖSEN	TRAKYA	>1000	Kum: Sarımsı gri , açık kahverengi, çakıllı ve siltli, Kil aratabakalı, Çapraz tabakalı	Göl Ortamı
					Uyumsuzluk	Delta Ortamı
					Şeyl-Kumtaşı (Grovak)-Silttaşı Diyabaz daykı sokulumlu	Batıyal Ortam

Şekil 0.1: İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Ölçeksiz)

4.1.1. Trakya Formasyonu

Haas (1968) birimi Trakya serisi olarak ayırmış, alttaki mercekli ve kumtaşı istifi radyolaritlerle birlikte Yelkentepe tabakaları olarak tanımlamıştır. Abdüsselamoğlu (1963), Grovak şistleri, Kaya (1973) ve Önalın (1982), Trakya Formasyonu adlarını kullanmışlardır. Kaya (1973) bu birimi alt karbonifer yaşlı olarak belirtmiştir.

Genellikle grovak ve şeyllerden oluşmuştur. Grovaklar çoğunlukla orta-kalın tabakalı olup, bazı kesimlerde şeyllerle aralanmalıdır. Taze yüzeyleri açık yeşilimsi, bozumsu ve kurşuni, aşınma yüzeyleri açık kahve ve kirli sarımsı renkler gösteren çökeller

ineden kalına değişen tabakalanmalıdır. Birimi oluşturan grovak ve Őeyller taze iken orta sertlikte, fakat ayrıştıkları zaman oldukça yumuşaktırlar (Önalın, 1982). Bu formasyondaki kumtaşlarını temsil eden grovaklar genellikle ince, orta kum taneli ve çoğunlukla orta- kötü boylanmıştır. İçerisinde bol miktarda küt köşeli, düzensiz dağılmış düz ve ondüleli sönümlü kuvars taneleri bulunur. Bazı grovaklar ise bol miktarda mika ile çok seyrek olarak çört, kaya kırıntısı ve feldspat da kapsar. Taneler killi ve silisli bir çimento ile tutturulmuştur.

Grovaklar içindeki demirli maddelerin limonite dönüşmesi, özellikle ayrışmış kesimlerde taşa kirli sarımsı bir renk vermiştir. Őeyllerde ise bol miktarda kilden başka, %25-30 civarında rastgele dağılmış, ince kum boyu kuvars tanelerine rastlanır. Bu killi Őeyller bol miktarda serisit de kapsar (Önalın, 1982).

Silttaşı, kiltarı, kumtaşından oluşan istif genelde İstinye sırtları ve Levent'te ağırlıklı olarak, Kongolmeratik taban ise Sarıyer Cebeciköy ile Eyüp civarındadır. Trakya Formasyonu sınırlı da olsa İstanbul'un Anadolu yakasında görölür.

Kumtaşı ve Őeyller taze iken orta sert, ayrıştıkları kesimlerde oldukça yumuşaktır. Kumtaşları orta tane boyutunda olup, kötü boylanmış, küt köşeli kuvars tanelerinden oluşur. Bol miktarda mika seyrek olarak çört ve kaya parçaları içerir. Killi ve silisli çimento ile bağlanmış, hamurdaki demirin bozuşması ile limonit oluşmuş bu sebeple renk kirli sarımsı bir hal almıştır.

Trakya formasyonu'nu 10-20 cm ile 1-2 m bazende 30-40 m kalınlıkta genellikle çok ayrışmış, bozuşmuş kirli sarımsı kahve andezit ile taze yüzeyleri açık mavimsi yeşilimsi gri, sert, diyabaz daykları kesmektedir (Kaya 1973). Dayklar genelde fay, eklem ve kırık düzlemlerine paralel sokulmuşlardır. Formasyonda küçük ölçekli çapraz tabakalanma, katmana paralel levhamsı yarıлма özellikleri türbidit akıntı çökelleri olduğunu gösterir. Önalın (1982) bu birimin yaşını Alt Karbonifer olarak belirlemiştir.

4.1.2. 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.

Birim blok, çakıl ve kumdan oluşur. Bu litolojiler birbiriyle aşınmalı yüzeyle ilişkili mercekler şeklinde ve büyük ölçekli düzlemsel yada tekne tipi çapraz tabakalıdır. Bazı merceklerin en üst kesimlerinde ince kil tabakaları bulunmaktadır. Karasal örgöl akarsu ortamında çökelmiş, bu kesimde maksimum tane boyu 35 cm.yi bulan çakıltaşları yer alır. Bu örgölü 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 baslar. Çapraz tabakalanmanın yukarı doğru ölçeği küçülür. Litolojide akıllı kum halini alır. En üst kesimde mikro çapraz laminalı ince kumlar izlenir. Tane boyunun giderek incilmesi ile kızılımsı kahverenkli çamurlara geçilir. Bu şekilde bir çok devre birbiri üzerinde görülür. Formasyonun en üst kesiminde mikro çapraz ve paralel laminalı silt ve killer egemendir. Kumlar genellikle mercekseldir. Sıkı ve çok sıkı zemin özelliğindedir. Kum içerisinde çakıl cepleri de olağandır. Az köseli, az yuvarlak olan taneler, süt beyaz, kırmızı, yeşilimsi ve kahverenkli. Çakıllar kuvars, kuvarsit, opal, kalsedon, mikali kumtası, andezit, trakit, arkoz ve mikaşisttir. 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 bulduğunu, bazen de 2-3 m. kadar incelendiğini belirtir. Delta ortamında oluştuğunu ve Sarmasiyen yaşlı olduğunu ifade eder.

4.1.3. Güngören Formasyonu

Güngören Formasyonu, Yedikule Kazlıçeşme Osmaniye, Rami, Atışalanı-Esenler arası ve Güngören doğusunda görülür (Arıç, 1955). Ayrıca Şirinevler-Yenibosna-Kocasinan-Mahmutbey sırtının doğu ve batı yamaçlarında Şenlikköy-Sefaköy-Halkalı sırtının doğu ve batı yamaçlarında yüzeyler.

Genellikle yeşil-mavi renkli üst seviyelerinde kirli beyaz renkli Mactra'lı kireçtaşı ara seviyeli, kum cepli kil ve marnlardan oluşur. Sarımsı esmer-yeşil renkli kil, beyaz renkli marnlar ile bunlar arasında ince düzensiz tabakalı Mactra'lı kalker, beyaz tebeşirimsi kalker seviyelerinden oluşur. Killer içinde marnlı kalker topakları vardır. Killer içinde ayrıca bitki sap ve yaprak izleri, silt ve kum mercikleri gözlenir. Killi kireçtaşı-kil ardalanması Bakırköy kireçtaşına geçişte çoğalır. Killer ince tabakalı olup laminalıdır. Ayrıca içlerinde kum mercikleri bulunur. Yüzeye yakın yerlerde organik madde zenginleşmesiyle kahverengiye dönüşmektedir.

Güngören Formasyonu ayırtlandığı kesimlerde altına gelen Çukurçeşme Formasyonu ve üstüne gelen Bakırköy Formasyonu ile dereceli geçişlidir. Güngören Formasyonunun en fazla 30 m kalınlığı bulunmaktadır. Meriç (1990) çalışmasında bu formasyonun göl ortamında oluştuğunu ve Sarmasiyen yaşlı olduğunu ifade eder.

4.1.4. Bakırköy Formasyonu

Arıç (1955) Bakırköy kireçtaşının Topkapı, Zeytinburnu, Merkezefendi, Esenler, Davutpaşa, Değirmenentepe, Bağcılar, Güngören, Bahçelievler, Haznedar, Bakırköy, Mahmutbey, Kocasinan, Yenibosna, Halkalı, Sefaköy, Soğuksu, Kanarya, Şenlikköy ve Yeşilköy civarlarında yüzeylendiğini belirtir. 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.

Beyaz, kirli beyaz renkli, katman araları yeşil renkli ince katmanlı kil ara seviyeli Mactra'lı kireçtaşlarından oluşur. Bakırköy Formasyonu, tabaka araları yeşil killi, genelde değişik kalınlıkta beyaz ve kirli beyaz renkli Mactra'lı kireçtaşlarından oluşur.

İnce tabakalı Mactra'lı kalkerler arasında Melanopsisli ve Helix'li kireçtaşı seviyeleri görülür.

Formasyon tabanda kil ve seyrek kirli beyaz killi kireçtaşı-kil araldanması 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. Bol bol fosil iç kalıplıdır.

Bakırköy Formasyonunun alt dokanağı, ayrıldığı 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. Meriç,(1990) çalışmasında bu formasyonun göl ortamında oluştuğunu ve Üst Miyosen yaşlı olduğunu ifade etmiştir.

4.1.5. Kuşdili Formasyonu

İstanbul'un boğaza açılan büyük akarsuların akış aşağı (mansap) kesiminde kalınlığı yer yer 70-80 metreye varan başlıca killi kum-mil türü ince malzeme kapsayan birikintiler yer alır. İstanbul'un Kadıköy semtinde yer alan Kurbağalı Dere'nin mansap kesiminde Kuşdili Çayırı olarak bilinen bu tür birikintileri kapsayan düzlükte yapılan sondaj verilerini inceleyen Meriç ve diğ. (1990) tarafından, birim Kuşdili Formasyonu adıyla tanımlanmıştır.

Formasyon koyu mavimsi kül rengi, kahverengimsi, yer yer siyahımsı, haliç çökellerinden oluşur. Başlıca kuvars, kuvarsit vb. killi mil-kum boyu malzeme kapsar, tane boylarının oranı yerden yere değişir. Seyrek olarak, yarı köşeli yarı yuvarlanmış çakıl ve çakıllı kum mercek ve ara düzeylerini kapsar. Özgür ve diğ. tarafından incelenen sondajlarda yer yer bitki kırıntılı ya da bunların ayrışmasından oluşan organik kapsamı yüksek siyahımsı killi ince düzeyler kesildiği, Kuşdili Çayırı yöresinde yapılan iki adet sondajın karotlarında, tabanda pirit ve piritleşmiş kavkı parçalarıyla organik kapsamı yüksek olan kesimlerde mollusk kavkı ve kavkı kırıntılarının bulunduğunu belirtilmektedir. Yüzeylemeleri güncel aşınmaya açık olduğundan bilinmemektedir. Yaklaşık 30-40 metre kalınlıkta örtüler oluşturur.

Kurbağalı Dere dolayında Fenerbahçe Stadyumunun batısında DSİ tarafından yapılan sondaj karotlarının fosil kapsamını inceleyen Meriç ve diğ. (1990), formasyon için Geç Holosen yaşını öngörür ve ortamını göl ortamı olarak belirlemişlerdir.

4.1.6. Yapay Dolgu

Tarihsel yarımada başta olmak üzere şehrin değişik kesimlerinde değişik kalınlıklarda dolgular vardır. Uzun bir süre yerleşim alanı olarak kullanılan İstanbul Haliç'te dahil olmak üzere oluşan seller, diğer tabiat olayları ve insan eliyle doldurulmuştur. Dolgu kalınlıkları yer yer 9-16 metreyi bulmaktadır. Tünel güzergahı boyunca bu kalınlık 7-15 metre arasında değişmektedir.

4.2. YAPISAL JEOLJİ

4.2.1. Kıvrımlar

Kaya (1971) çalışmasında Trakya Formasyonunun geçirdiği tektonik evrimler nedeniyle yer yer kıvrımlandığını belirtmiştir. Genellikle D-B yönlü olan bu kıvrımlar çalışma alanında belirgin bir mostra vermemiştir ve gözlenmemiştir.

Tünel güzergahında Kuzey Platform Tüneli 0+190 km'sinde KD yönlü küçük bir antiklinal mevcuttur. Bunun dışında tünel güzergahı içinde kayda değer bir kıvrım belirlenmemiştir. Bu antiklinal tünel içi enine kesitlerde (Ek 2) gözükmemektedir.

4.2.2. Faylar

Bölgede yapılan araştırmalarda aktif olmayan çok sayıda fay tespit edilmiştir. Tespit edilen bu fayların birçoğu düşeye yakın eğimli normal faylardır.

Ancak bugün aktifliği devam eden K.A.F. (Kuzey Anadolu Fay) sistemi İstanbul'un güneyinden geçmektedir. Aktif bir fay olan K.A.F.'in etkileri beklenebilir.

Çalışma alanında bir ana fay sistemi kabul edilir. Bu fay KD-GB yönlü bir faydır ve eğim atımlı fay olup aktif değildir.

4.2.3. Çatlak Takımları

Paleozoik Formasyonları, genel olarak sıkı orta veya sert ve kırılğan birimlerdir. Orojenik etkiler nedeniyle, arkoz, kireçtaşı ve kuvarsitlerde kırık ve çatlak takımları çok belirgindir. Genellikle D-B doğrultulu olan kırık ve eklem takımlarını kahverengi killi, demir oksitli, ince dolgulu malzemeler doldurmuştur.

4.3. TARİHSEL JEOLJİ

Haliç'te temelde yer alan Paleozoik yaşlı Trakya Formasyonu, ile üzerindeki Holosen yaşlı Haliç çökelleri arasında başka bir formasyonun gözlenmemesi Trakya Formasyonunun uzun bir dönemde karasal ortamda kaldığını ve üzerindeki çökelim. değişik formasyonların aşındığını göstermektedir. Kuzey Haliç'te görülen Üst Pliyosen yaşlı çökellerin, bölgenin yükselmesi ile aşınması sonucu Haliç çökellerine temel teşkil etmemesi de, Haliç ve çökellerinin çok genç bir evrede oluştuğuna ve bugünkü morfolojik, konumuna eriştiğine işaret etmektedir. Uzun bir dönem karasal ortamda kalan ve oldukça, aşınan yüksek alanların ortama başlangıçta ancak ince gereç sağladığı yayvan bir topografyada akarsu ve kollarının taşıdığı ince malzemelerin, içine grovak çakıllarının karıştığı zaman diliminin ise günümüzdeki morfolojinin ana hatlarının başlangıç evresini oluşturduğu söylenebilir. Bu başlangıç, evresinde yaygın olarak görülen çakıllı gereç, bölgenin yükselmesi ve fay etkinliğinde gelişmiş sonuçta Haliç'i asılı bir vadi konumuna getirmiştir. Hareketli dönemin yerini giderek sakinleşen ortama bırakması ile deniz Haliç içlerine doğru tedrici şekilde ilerlemiştir.

Bölgede Mesozoik ve Tersiyere ait, birbirlerinden aşınma yüzeyleri ile ayrılmış birimler, Üst Paleozoik üzerinde açılı diskordanslar bulunur.

İstanbul ve çevresinde görülen paleozoyik yaşlı kayalar oluşumundan sonra çeşitli dönemler tektonik deformasyonlara uğramıştır. Tektonik açıdan; İnci zaman içinde, önce Kaledoniyen Orojenezi ile kıvrılmış, sonra Karbonifer'e kadar süren bir kara safhasını takiben yeni bir tortullaşma ve ardından Hersiniyen Orojenezine maruz kalmıştır. Daha sonra yine uzun süren bir kara (aşınma) safhası mevcut olup, Üst

Kretase'de tektonik hareketler, bu devir denizleri içinde geniş bir denizaltı volkanizma faaliyetlerine sahne olmuştur. Yer yer görülen andezit filonları bu faaliyetlerin sonucudur. Daha sonra da Alp Orojenezisi etkisini göstermiştir. Bu etki Üst Kretase yaşında bir şaryaj şeklinde görülür. Şaryaj hattı Ömerli köyü kuzeyinden itibaren doğu-batı doğrultusunda uzanan bir şerit halinde İstanbul Boğazını keserek Zekeriyaköyü batısına kadar uzanır. Şaryaj düzlemi genel olarak güneye eğimli olup, Boğaz suları altından Marmara'ya doğru "V" şeklinde dalmaktadır. Bu nedenle kayaç grupları bindirme ve faylanmalarla taşınmıştır. Formasyonların çoğunun sınırları tektoniktir.

İstanbul ve Kocaeli yarımadası ile Marmara Denizi çevresini etkileyen ve Kuzey Anadolu Fay Zonu bölgede çeşitli deformasyonların oluşumuna neden olmuştur. Marmara denizinin açılımına bağlı olarak İnceleme alanı ve çevresinde kuzey-güney yönlü kompres başlamıştır. Halen güncel olan bu tektonik rejim küçük göl ve akarsu havzaları oluşturmuştur.

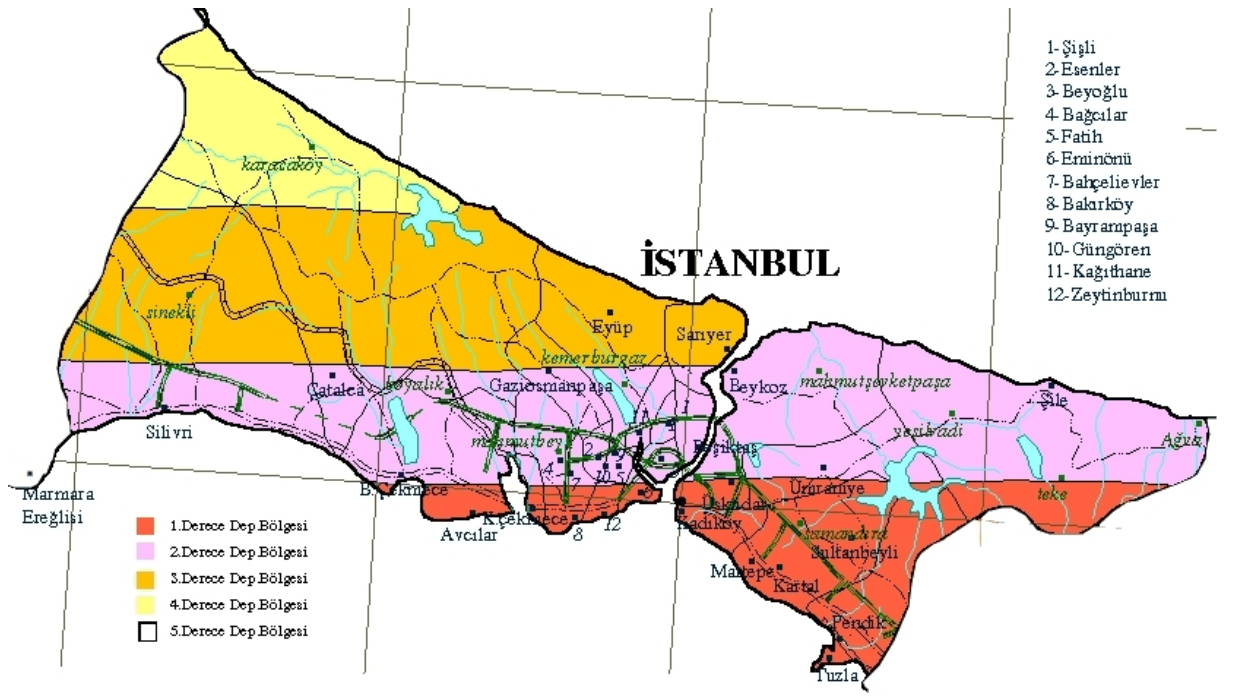
İnceleme alanında birçok döneme ait tektonik veriler bulunmaktadır. Ancak bunların hangi fazlara ait olduğu ve oluşum mekanizması tam olarak bilinmediğinden, güncel tektonik durum tespiti tam olarak yapılamamıştır. Bu konudaki çalışmalar devam etmektedir.

5. DEPREMSELLİK

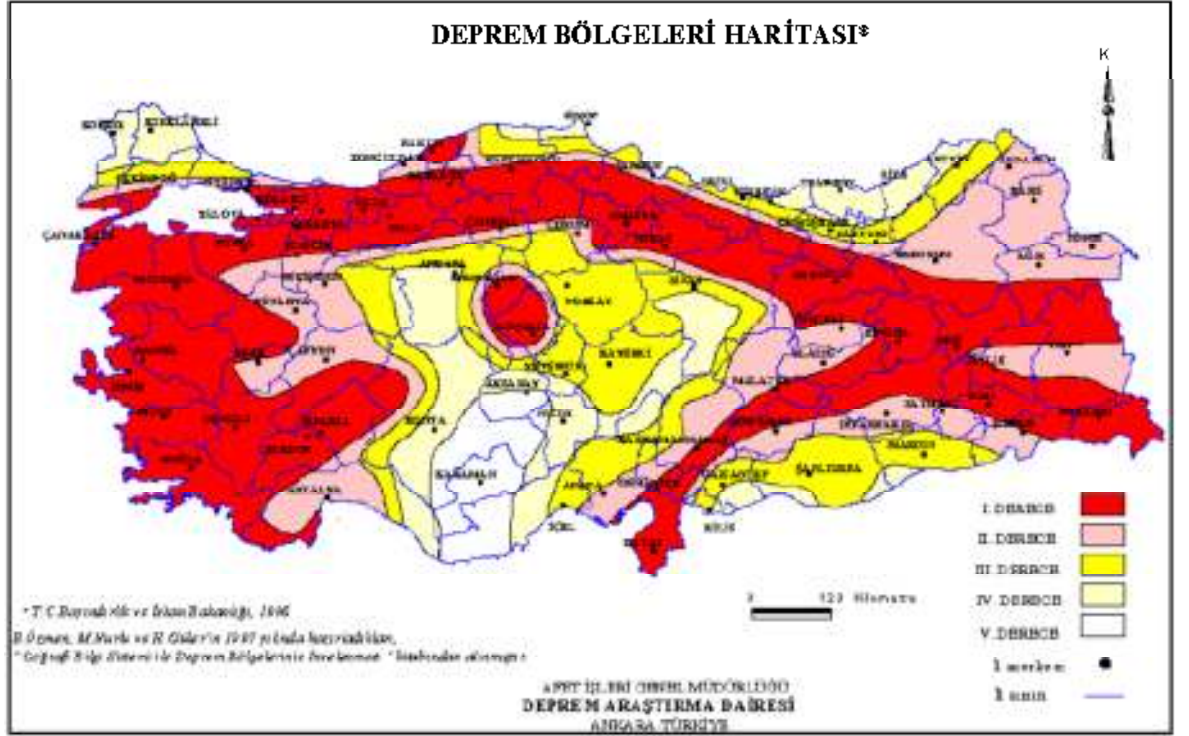
Sirkeci ve çevresindeki yapıların taşıma gücü ve şev stabilitesi bakımlarından durumları kritik olduğundan dolayı depremin ortaya çıkaracağı yer değiştirme, kayma ve hasarın daha büyük olmasına yol açacaktır.

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesinin Marmara Bölgesinde kurmuş bulunduğu deprem kayıt merkezleri ağı ile elde edilen kayıtlarda Sirkeci'yi kapsayan hiçbir deprem odağına rastlanmamıştır. Bununla birlikte bölgede deprem etkinliğinin olmadığını

söylemek mümkün değildir. Tarihsel kayıtların incelenmesinden meydana çıkarılan sonuçlarda, 14.09.1509 da meydana gelen deprem aralıklar ile 45 gün sürmüş 109 camii, 1070 ev yıkılmıştır. Tarihçilerin yazdığına göre bu deprem sırasında oluşan dalgalar Galata surlarını aşarak sokakları doldurmuştur. 17.09.1999 da meydana gelen deprem gösteriyor ki İstanbul ve içi deprem risk bölgesindedir. Bu sebeple Sirkeci bölgesi bu durumdan soyutlanamaz.



Şekil 5.1: Depremsellik haritası



Şekil 5.2: Türkiye deprem haritası

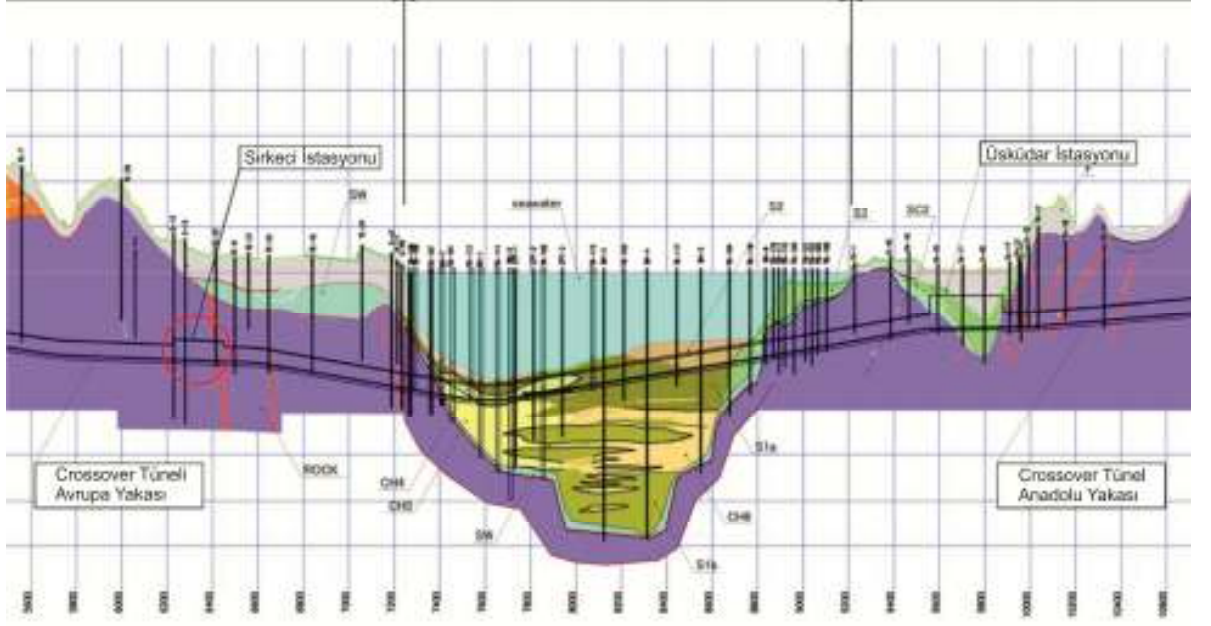
6. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

Sirkeci istasyonu Marmaray projesinin Avrupa yakasında bulunan önemli bir parçasıdır. Metronun çalışacağı bu sistemde Sirkeci istasyonu 255 m uzunluğundadır.

Tünel güzergahı Kuşdili ve Trakya Formasyonunun bulunduğu bölgeden geçmektedir. Şehirleşmenin yoğun olması ve litolojik durum sebebiyle NATM yöntemi seçilmiş ve uygulanmıştır. Bu çalışmanın amacı, NATM kazısı ile yapılan Sirkeci istasyonunun oluşturduğu deformasyon zonunu hesaplamak, RQD-deformasyon ilişkisini anlamlandırmak ve deformasyonların yüzeye etkilerini göz önüne sermektedir.

6.1. LİTOLOJİ

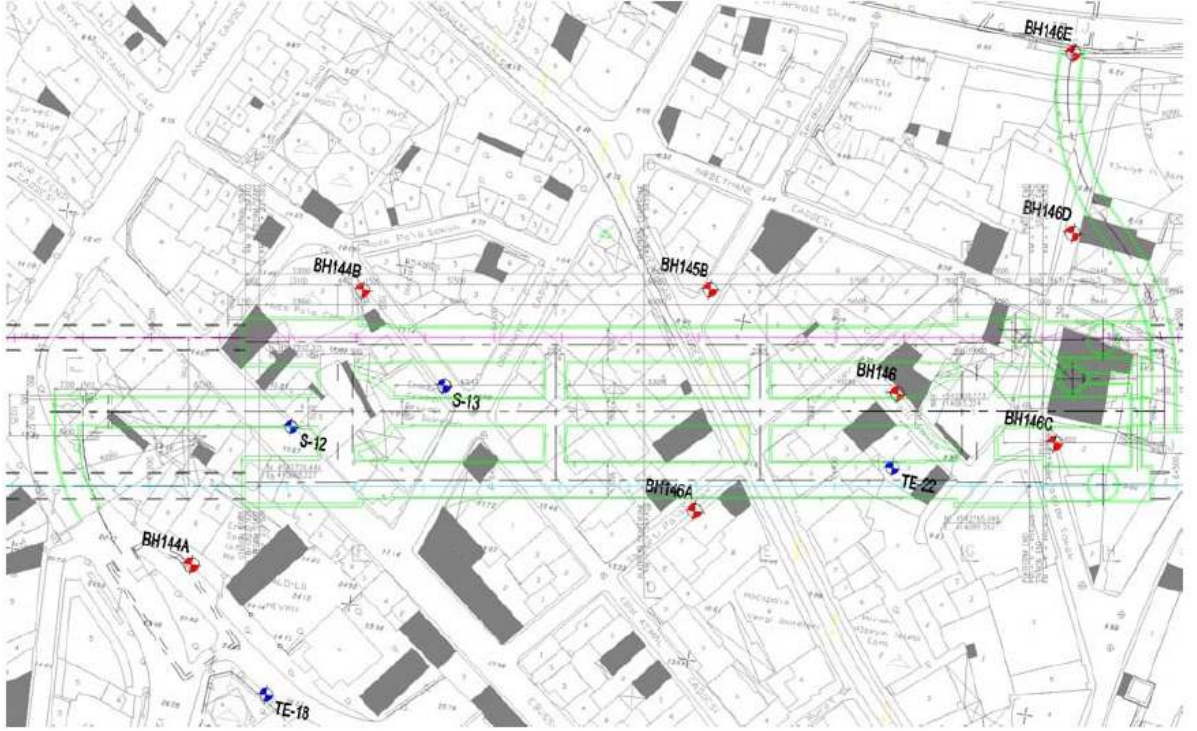
Tünel güzergahında bulunan üç ana birim, (Trakya Formasyonu, Kuşdili Formasyonu, Dolgu zemin) yatay olarak istiflenmiştir. Tünel, sadece Trakya Formasyonundan geçmesine rağmen, Kuşdili Formasyonundan etkilenmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1: Genel jeolojik diagram (Taisei raporu, 2006)

Genel olarak bölgede ikincil olarak egemen birimleri kumtaşı ve çamurtaşı olarak rastlanmıştır. Tüm kaya yatakları alternatif yatak olarak gözükmiştir ve ince tabakalı olarak gözlenmiştir.

Çalışma alanında, STFA mühendislik şirketi tarafından 8 adet sondaj yapılmıştır. Derinlikleri 24-72 metre arasında değişen bu sondajlara göre 8,5- 16,5 m arası değişen dolgu bulunmaktadır. Tuğla, moloz ve çeşitli kayaç parçaları içeren bu dolgu zemin altında 2,5-10 metre arasında değişen, dayanımı düşük Kuşdili Formasyonu bulunmaktadır. Tüm bu birimler altında ise Trakya Formasyonuna ait kumtaşı, siltaşı, kiltası birimleri ile Trakya Formasyonu içerisine sokulmuş diyabaz dayklarına rastlanmıştır.



Şekil 6.2: Sondaj Lokasyonları (Taisei raporu 2006)

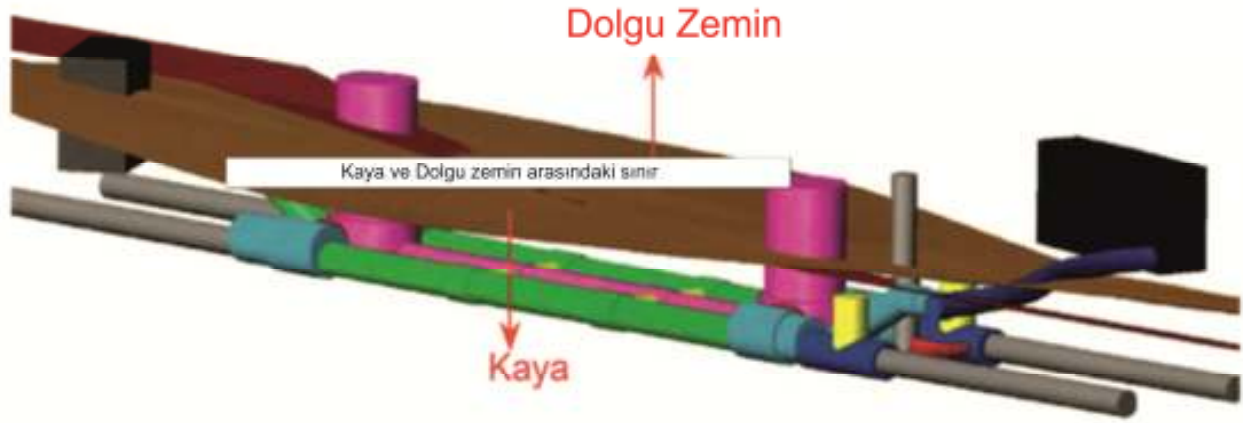
Tünel güzergahı, tamamen Trakya Formasyonu içerisinde bulunmaktadır. Marmaray projesinin diğer bölgelerinde TBM kullanılmıştır. Sirkeci bölgesinde güzergah tamamen Trakya formasyonu içinde olmasına rağmen, üst kısımda bulunan Kuşdili Formasyonunun dolgu zemin gibi davranması nedeniyle NATM kazısı seçilmiştir. Bu durum kazıları yavaşlatmış ve maliyeti arttırmıştır.

İnceleme alanında, Trakya Formasyonuna ait, ince – orta tabakalı, kiltası, silttaşı ve kumtaşı birimleri bulunmaktadır. Bu birimlerin fay zonlarına ve dayklara 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 20 - 72 D, K 20 – 79B arasında değiştiği, eğim yönlerinin GD, KB ve GB gibi çok farklı yönlerde olduğu ve eğimlerinin ise 10-75 derece arasında değiştiği belirlenmiştir.

Bölge uzun yıllar boyunca tektonik etkilere maruz kalmıştır. Örneğin yüzeyde bir jeolojik yapı var ise, bunun yeraltında fay, çatlak vb. şeklinde devam etme olasılığı oldukça yüksektir.

Kazı çalışmalarında, Trakya Formasyonuna ait birimlerde yer yer kalsit ve kil dolgulu ikincil süreksizliklere rastlanmıştır. Bu dolguların kalınlığı ve varlığı, tünelin desteksiz kalabildiği süreyi direkt olarak etkilemiştir.

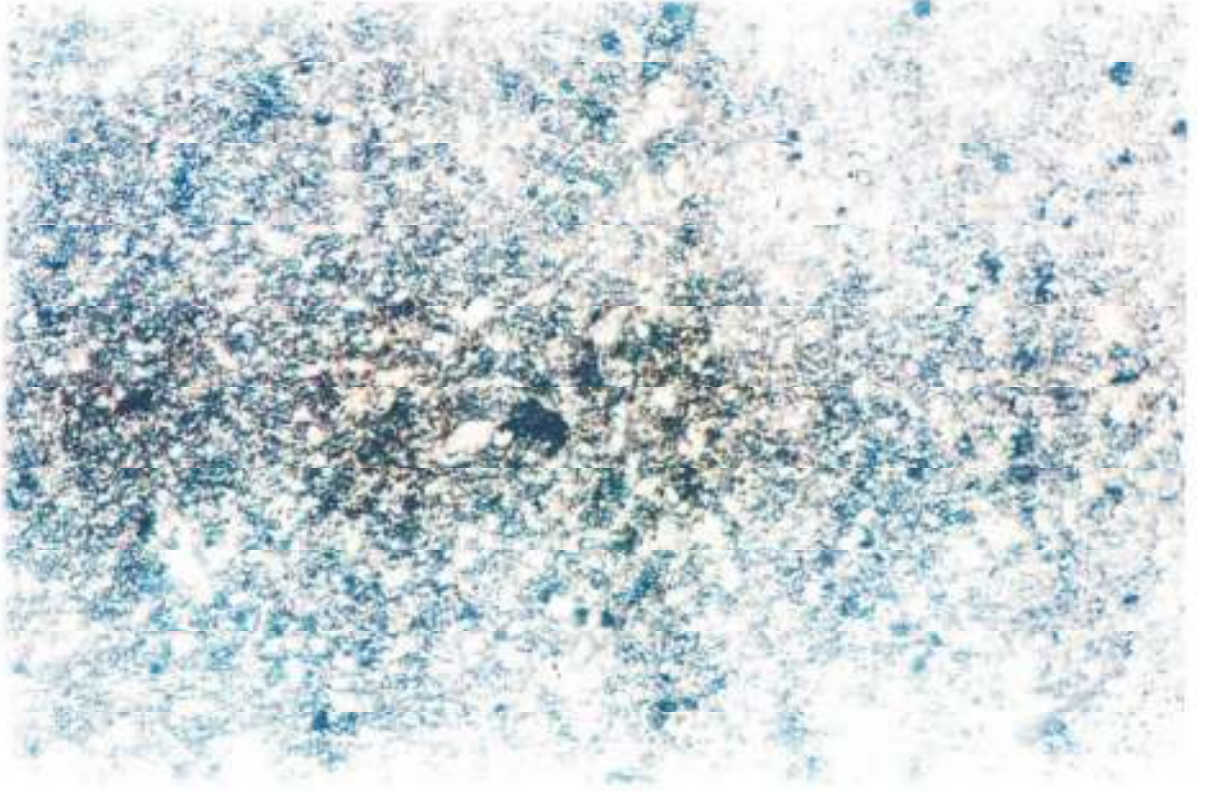
Sirkeci istasyonu için iki ana fay sistemi kabul edilir. KB-GD yönlü fay sistemi ve bunla birleşen KD-GB yönlü deprem fayları belirtilmiştir. Kırmızı çizikli olan kısımlar fay sistemini göstermektedir. Birleşim noktaları tüneli tam ortasında gözükmemektedir.



Şekil 6.3: Sirkeci istasyonu kaya ve dolgu zemin arasındaki sınır (Taisei-Gama-Nurol Ortaklığı Jeoteknik dizayn raporu, 2006)

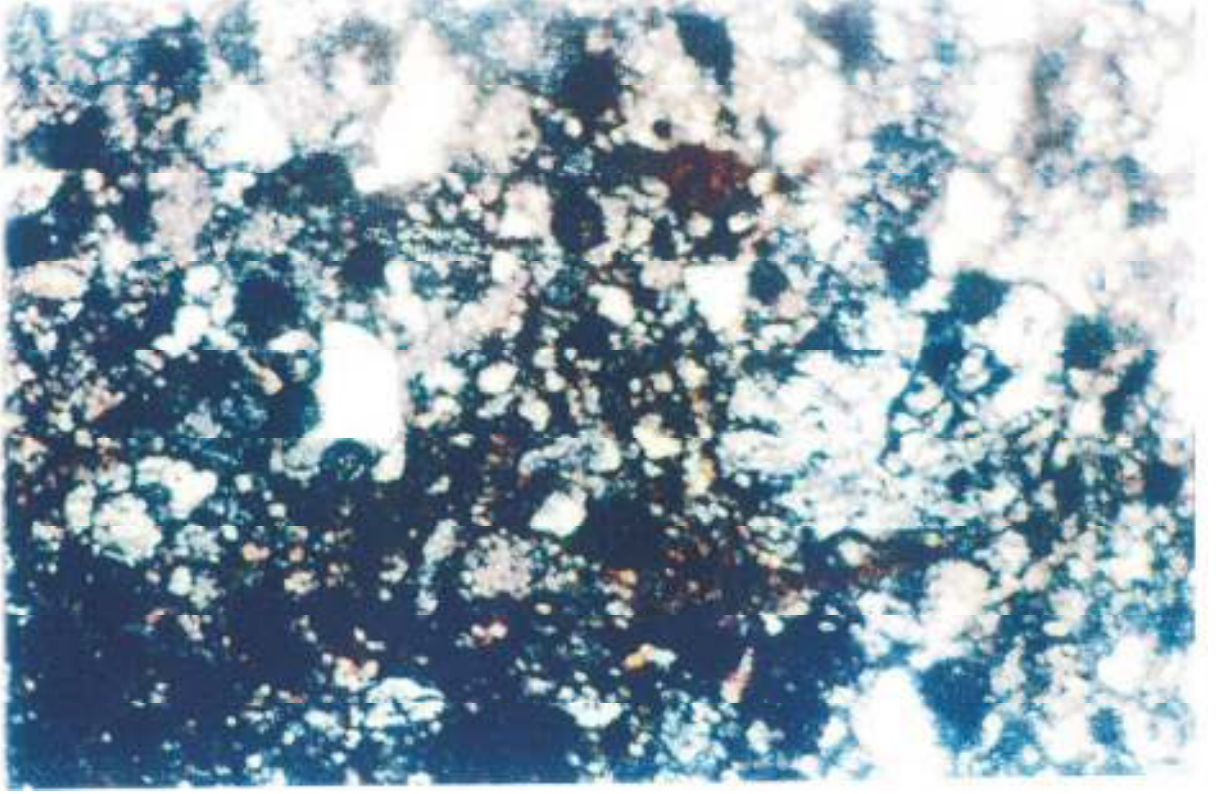
6.2. PETROGRAFIK ANALİZ

Proje kapsamında önce çalışma olarak petrografik analizler, Dalgıç ve Aysal,(2005) tarafından yapılmıştır. Trakya Formasyonundan alınan numuneler ile aşağıdaki deneyler yapılmıştır.



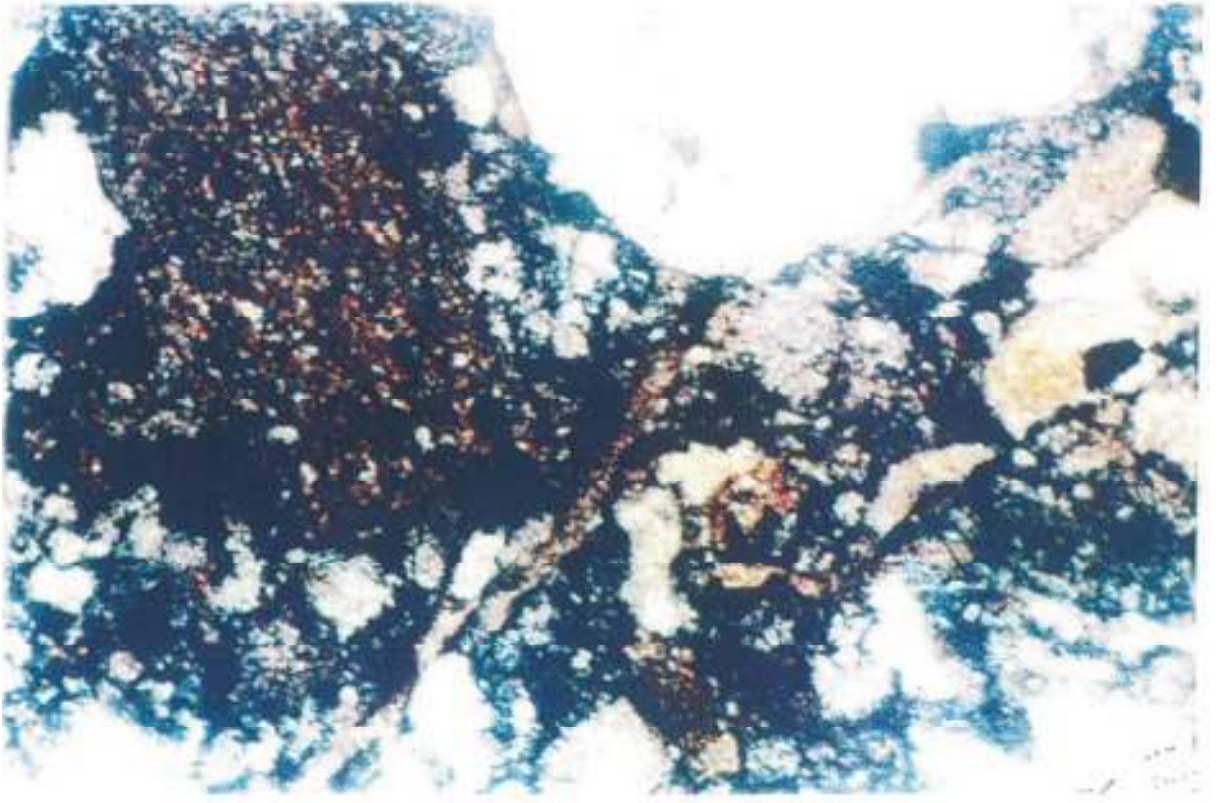
Şekil 6.4: BH144A-C24-(60.80 -60.90m) killi şist. Küçük kuvarslar ve yer yer seritik taneli bol grafit. Görünür lamiasyon. Kuvars+Feldspat+kayaç parçası %50-55 civarı. Ölçek 1 cm=145 μ

BH144A sondaj noktası (Şekil 5.2) tünel güzergahının 10 metre kadar güneybatısında kalmaktadır. Bu bölgedeki grafik ve kuvars içerikleri, bu noktaya en yakın tünel kısmı olan güney platform tünel 0+20 km civarındaki jeolojik durumu desteklemektedir (Şekil 5.4).



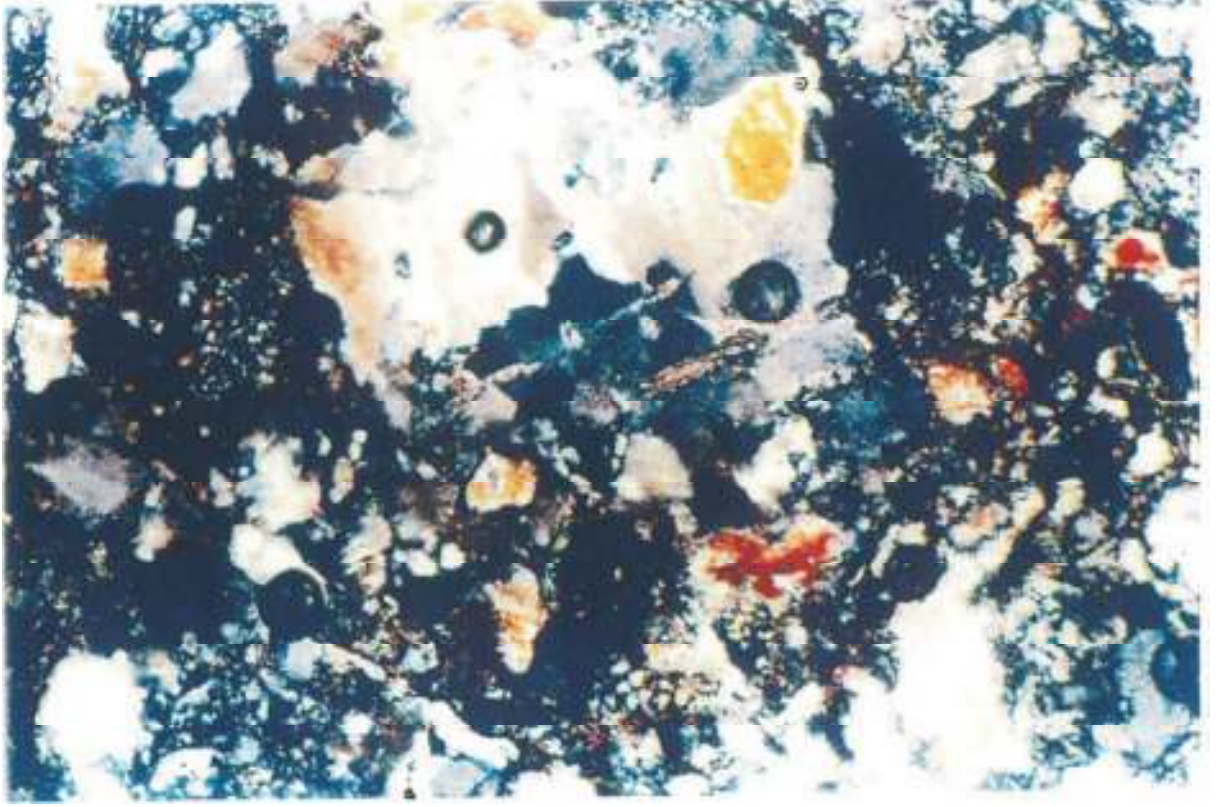
Şekil 6.5: BH144B-C9-(42,20-44,30m) Feldspatik litarenit / litik arkoz. Çimento serisitik. Kuvars+Feldspat+kayaçparçası oranı %70- 80 arası. İkincil olarak çatlaklar kalsit içerir. Opak mineral oranı % 4-5 civarındır. Ölçek 1 cm=145µ

144B sondajı (Şekil 6.2) kuzey platform tünelin 2-3 metre kuzeyinde kalmaktadır. Bu noktada litarenit oranı ve arkoz oranı fazla çıkması, bu bölgedeki nispeten sağlam jeolojik ortamı işaret etmektedir. Ayna haritalarında, özellikle 0+45 km civarında dolgu olarak kalsit gözlenmiştir (Şekil 6.5).



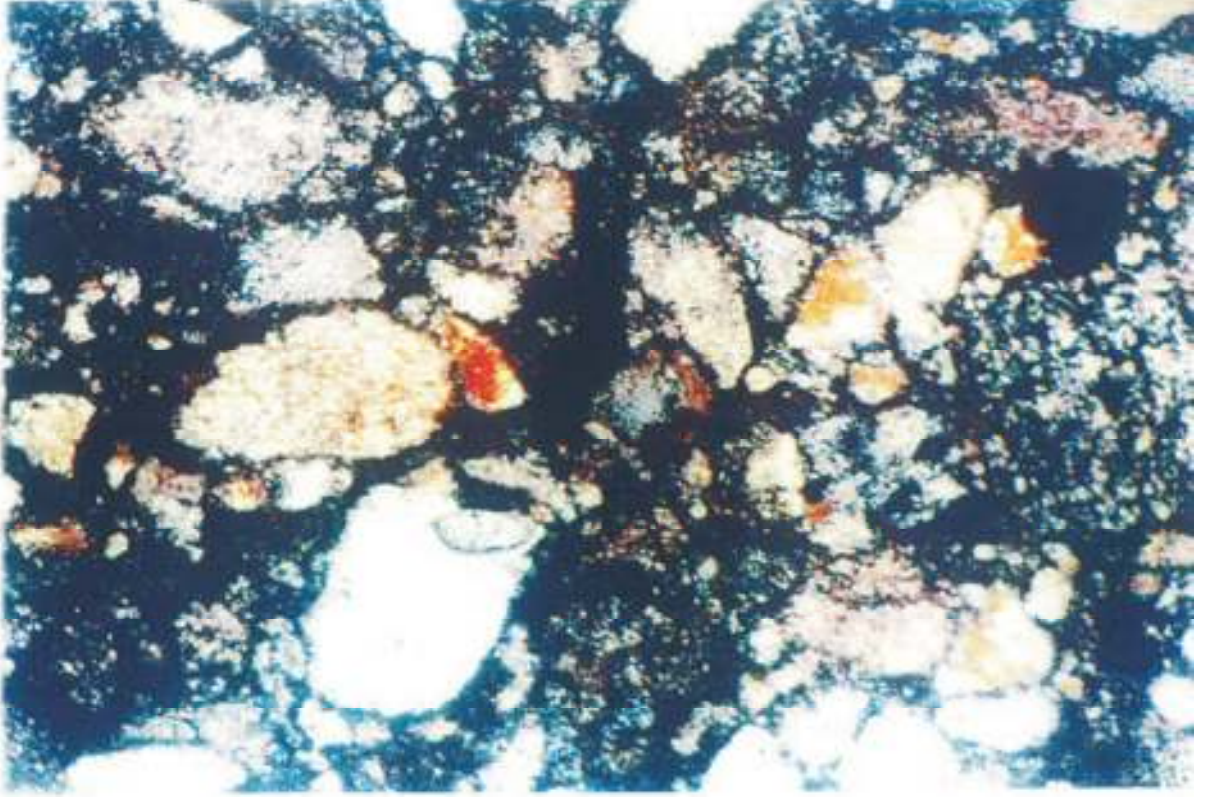
Şekil 6.6: BH145B-C6-(39,60-39,70 m) Feldispatik litarenit/litarkoz. Kayaç parçaları içerir. Çimentosu karbonat ve killi. İkincil çatlaklar kalsit içerir. Kötü yönlendirilmiş. Ölçek 1 cm=145µ

Tıpkı 145A sondajı (Şekil 6.2) gibi BH145B noktasında yapılan sondaj kuzey platform tünelinin 3-4 metre kuzeyindedir. Yaklaşık olarak 0+145km civarına denk gelen bu sondajdan alınan numune gösteriyor ki, ilk incelemeden itibaren jeolojik koşullar biraz kötüleşmiştir. Kötü yönlendirilmiş kalsit dolguları ve çimentosundaki değişim bunu işaret etmektedir (Şekil 6.6).

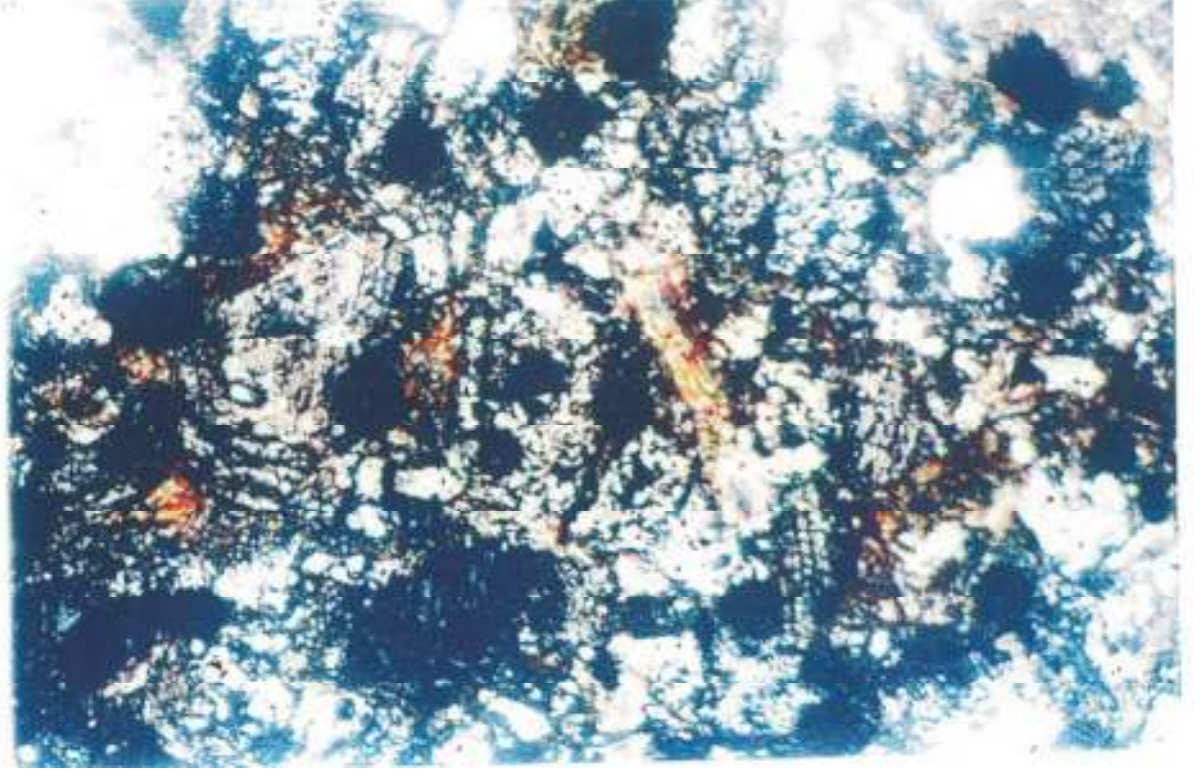


Şekil 6.7: BH146A-C2-(25,30-25,35 m) Feldspatik litarenit/arkozik çakıltaşı çokça kuvars içerir. Genel olarak feldspat ve kayaç parçası içerir. Matrix hematik ve killidir. Hematit içerir ve taneler hematit ile kaplanmıştır. Feldspatta seritizasyon ve alterasyon gözlenir. Kötü yönlendirilmiş ve tanelenmiştir. Poligenetik konglomera gibi gözükmektedir. Ölçek 1 cm=145µ

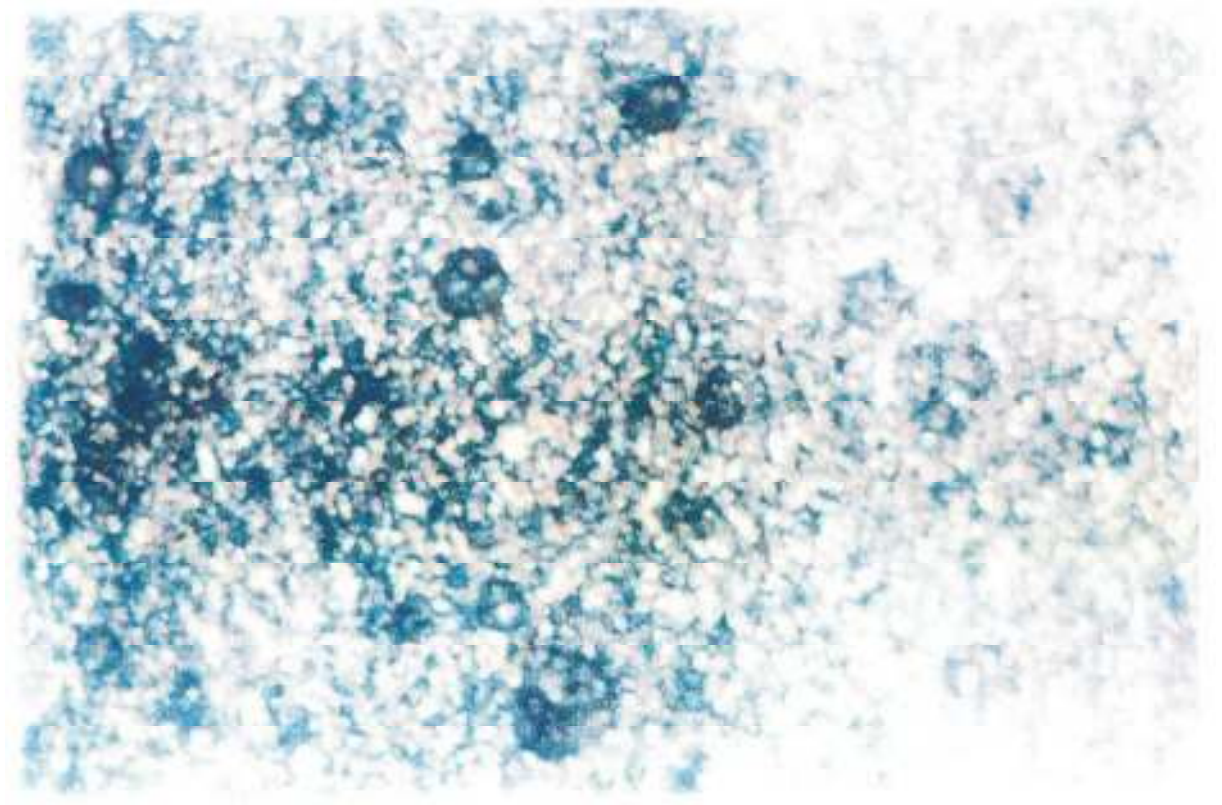
146-A sondajı (Şekil 6.2) merkez yürüme tüneline denk gelmektedir. Alınan derinlik ise tünel güzergahına denk gelir. Bu noktadaki jeolojik koşullar, ayna raporlarından da görüleceği üzere elverişli ve sağlamdır. Özellikle arkoz ve kuvars dolguları, hematit içeriği görülmektedir. Bu noktadaki su gelimi, incelemede alterasyon olarak gözükmiştir. Hematit içeriği bu alterasyona sebep olmuştur (Şekil 6.7). Bu noktadan diğer iki örnek, klorit içeriğiyle su gelimini destekler niteliktedir (Şekil 6.8 ve 6.9).



Şekil 6.8: BH146A-C7-(26,65- 26,70m) Feldispatik litarenit/arkozit çakıltaşı. Kötü yönlendirilmiş çakıllar. Çimentosu serisitik ve kloritik. Ölçek 1 cm=145 μ



Şekil 6.9: BH146A-C10-(32,85-32,90m) Arkozik çakıltası. Kuvars+feldispat+kayaç parçası oranı %75-80 civarı. Kötü yönlendirilmiş. Çimentosu kloritik ve serisitik . Ölçek 1 cm=145µ



Şekil 6.10: BH146-C4-(33,30-33,35m) Şeyl. Bol granitli serisitik parçalı ve ufak kuvarslar bulunuyor. Belirgin laminasyon. Ölçek 1 cm=145µ

Bu numunelerin alındığı sondaj noktaları, Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

6.3. HİDROJEOLJİ

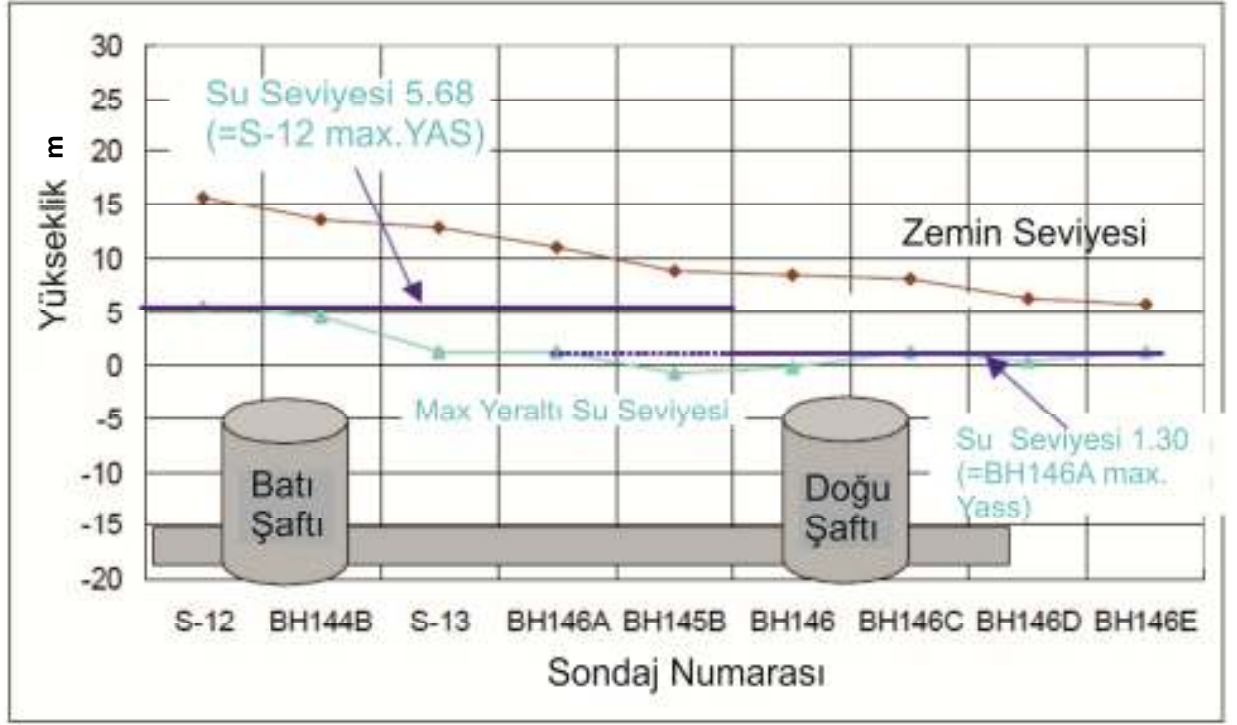
Trakya Formasyonu temel kayası genelde geçirimsiz bir birimdir. Permeabilite katsayısı $k=10$ cm/sn dolayındadır. Buna rağmen birimlerin uğradığı tektonik deformasyonlar sonucu meydana gelen eklem sistemleri ikincil bir permeabilite oluşturmuş bu nedenle su irtibatları sağlamıştır. Ayrıca Diyabaz ve Andezit daykların sokulumları sonucu daykların çevresinde bozunma ve kırılmalar sonucu meydana gelen geçirimsizlik yer yer 2-5 lt/sn debileri bulunmaktadır.

Sirkeci civarında birkaç sayıda araştırma sondajları açılmıştır. Tablo 6.1’de bunun sonucunda bulunan yer altı su seviyeleri verilmiştir

Tablo 6.1: Yeraltı su seviyesi derinlikleri

Sondaj numarası	Zemin Kotu (m)	Max Yer altı su seviye Kotu (m)	Max Yer altı su seviyesi derinliği (m)
S-12	15.73	-10.05	5.68
S-13	12.87	-11.50	1.37
BH144A	22.30	Gözlenmedi	--
BH144B	13.55	-9.00	4.55
BH145B	8.85	-9.60	0.75
BH146	8.51	-8.85	0.14
BH146A	11.10	-9.80	1.30
BH146C	8.10	-6.68	1.24
BH146D	6.30	-5.90	0.40
BH146E	5.85	-4.50	1.35

Bu veriler ışığında belirlenen YAS seviyesi ve tünel ile ilişkisi Şekil 6.12'de belirtilmiştir.



Şekil 6.11: Yükseklik ve kuyu numarasına göre yeraltı su seviyesi

6.4. ARAZİ TESTLERİ

Sirkeci İstasyonu araştırma çalışmaları için Arazi testleri kapsamında standart penetrasyon testi ve packer testi yapılmıştır.

6.4.1. Standart Penetrasyon Testi

Bu test için dış çapı 50,8 mm, iç çapı 34,9 mm olan SPT probu kullanılmıştır. 0,76 m yükseklikten 63,5 kg ağırlık düşürülmüştür. Darbeler her 15 cm için toplamda 45 cm olacak şekilde sayılmıştır. Son iki adım SPT N değerini belirlemek için alınmıştır.

Aşağıdaki Tablolarda SPT değerleri dolgu zemin için, Kuşdili için ve Trakya Formasyonu için verilmiştir. Trakya Formasyonu N değerleri 8 ile 86 arasında değişmektedir. kötü mühendislik koşullarında (jeolojik ortamın iyi olmaması, dayk sokulumu varlığı, faylanma vb.) ise bu değer 8 ile 38 arasında değişmektedir. Ortalama değer ise 24 olarak kabul edilmiştir. İnce taneli fraksiyon içeriği %4'ten %47'ye kadar artış gösterir ama çoğunlukla %20 civarında görülmektedir (Tablo 6.2 ve 6.3).

Tablo 6.2: Dolgu zemin için SPT değerleri (STFA,2006)

Sondaj No.	Üst Sınır (m)	Alt Sınır (m)	Kalınlık (m)	Ortalama N	Makaslama Kuvveti
BH144A	22.30	12.30	10.00	13	32.5 ⁰
	12.30	11.30	1.00	7	31 ⁰
	11.30	9.45	1.85	25	36 ⁰
BH144B	13.55	10.55	3.00	-	-
	10.55	9.55	1.00	41	39 ⁰
	9.55	5.55	4.00	11	33 ⁰
	5.55	4.55	1.00	11	33 ⁰
	4.55	2.05	2.50	>50	>40 ⁰
BH145B	8.55	0.85	8.00	28	37 ⁰
BH146	8.51	-4.19	12.70	22	35.5 ⁰
BH146A	11.10	3.35	7.75	34	36 ⁰
BH146C	8.10	1.40	6.70	14	33.5 ⁰
BH146D	6.30	-0.40	6.70	23	36 ⁰
BH146E	5.85	-1.65	7.50	21	35 ⁰

Tablo 6.3: Kuşdili Formasyonu için SPT değerleri (STFA 2006)

Sondaj No.	Üst Seviye	Alt Seviye	Kalınlık (m)	Ortalama N	Makaslama Kuvveti
BH144A	-	-	-	-	-
BH144B	2.05	-2.15	4.20	31	37.5 ^{II}
BH145B	0.85	-0.65	1.50	30	37.5 ^I
	-0.65	-1.75	1.10	>50	>40 ^I
	-1.75	-3.85	2.10	29	37 ⁰
	-3.85	-4.85	1.00	20	35 ^I
	-4.85	-8.85	4.00	22	35.5 ^I
	-8.85	-10.15	1.30	13	33 ^I
	-10.15	-12.15	2.00	17	34 ^I
	-12.15	-14.15	2.00	>50	>40 ⁰
	-14.15	-15.15	1.00	17	38.5 ^{II}
BH146	-15.15	-16.15	1.00	>50	>40 ^{II}
	-4.19	-5.49	1.30	13	33 ⁰
	-5.49	-8.49	3.00	15	34 ⁰
BH146A	-8.49	-12.49	4.00	9	32 ^I
	3.35	1.35	2.00	21	35 ⁰
	1.35	0.35	1.00	34	38 ⁰
	0.35	-2.90	3.25	25	36 ⁰
BH146C	-2.90	-4.65	1.75	>50	>40 ^I
	1.40	-0.90	1.30	16	34 ⁰
	-0.90	-2.90	2.00	15	34 ⁰
	-2.90	-5.90	3.00	28	37 ^I
	-5.90	-8.90	3.00	19	35 ⁰
BH146D	-8.90	-12.90	4.00	19	35 ⁰
	-12.90	-13.90	1.00	19	35 ⁰
	-0.40	-1.70	1.30	22	35.5 ^I
	-1.70	-3.20	1.50	26	36.5 ^I
	-3.20	-8.70	5.50	27	37 ^I
	-8.70	-11.70	3.00	23	36 ^I
	-11.70	-14.70	3.00	34	38 ^I
	-14.70	-15.70	1.00	33	38 ^I
-15.70	-16.70	1.00	>50	>40 ⁰	
BH146E	-16.70	-20.45	3.75	34	38 ^I
	-20.45	-22.15	1.70	16	34 ^I
	-1.65	-6.15	4.50	31	37.5 ⁰
	6.15	-13.15	7.00	21	35 ⁰
	-13.15	-25.15	12.00	28	37 ^{II}
	-25.15	-26.85	1.70	34	38 ^{II}
	-26.85	-27.65	0.80	>50	>40 ^{II}

6.4.2. Packer Testi

Toplam olarak 2 adet packer testi, arazi incelemelerine uygun olarak yapılmıştır. Test sonuçları ve elde edilen veriler Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4: Packer test sonuçları (STFA,2006)

Sondaj No	Test Seviyesinin altı (m)	Test Seviyesinin Üstü (m)	Permeabilite k.(m/saniye)	Zemin/ Kaya Tipi
BH144A	55,00	58,00	2.92E-07	Kumtaşı
BH146	47,00	50,00	1.82E-08	Çamurtaşı

6.5. LABORATUVAR TESTLERİ

Sondajlardan elde edilen numuneler STFA kalite kontrol ve uzmanlık ltd. laboratuvarlarında incelenmiş ve sınıflandırılmıştır. Su içeriği (W), Atterberg limitleri (LL, PL), elek analizleri, hidrometre, Birim hacim ağırlık γ_n , tek eksenli basınç testi, nokta yükleme testi gibi çalışmalarla index karakteristikleri ASTM standartına uygun olarak belirlenmektedir.

Zemin (Kuşdili Formasyonu) içerisinde 8 araştırma sondajı yapılmıştır. Zemin profili ince dolgu zemin, kumlu zeminler ve ana kayadan oluşmaktadır. Yer altı su seviyesi dolgu zeminde görülmüştür. STFA tarafından yapılan deneylerin sayısı ve standartı Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.5: Yapılan deney sayısı ve standartı (STFA 2006)

Test Tanımı	Kullanılan Standart	Toplam uygulanan Test
Likit limit, Plastik limit belirlemesi	ASTM D 4318	26
Dane boyu belirlemesi (Elek Analizi)	ASTM D 422	71
Dane boyu belirlemesi (Hidrometre)	ASTM D 422	2

Çalışmada kullanılan laboratuvar verileri, Sirkeci İstasyonu genelinde bulunan Trakya Formasyonu ve Kuşdili Formasyonunda elde edilen değerler ve STFA ile Taisei ön çalışma raporlarından elde edilen değerler olmak üzere iki kaynaktan elde edilmiştir. İnceleme alanını kaplayan ve ana kayayı oluşturan Trakya Formasyonu için elde edilen verilere göre; kayaçların birim hacim ağırlığı 2,72 – 2,74 gr/cm³ aralığındadır. Ayırışmanın olduğu bölgelerde bu değer 2,6 gr/cm³ seviyelerine gerilemiştir. Benzer şekilde %2.57 olan porozite değeri ayırışmanın olduğu noktalarda düşmüştür. Kuşdili Formasyonu için birim hacim ağırlığı 2,65 – 2,67 arasında değişmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı değerleri ise Trakya Formasyonu için 90 – 1450 kg/cm² arasında değişkenlik göstermektedir.

Trakya Formasyonu permeabilite değeri ise $2,92 \times 10^{-7}$ değerindedir. Kumtaşından alınan bu değere nazaran çamurtaşında ölçülen değer $1,82 \times 10^{-8}$ olmuştur (Tablo 6.6 ve 6.7).

Tablo 6.6: Trakya Formasyonu mekanik ve fiziksel özellikleri (STFA, 2006)

Kaya Sınıflaması	Deformasyon Modülü E (N/mm ²)	Poisson Oranı ν	Kohezyon C (N/mm ²)	İçsel Sürtünme Katsayısı φ (°)	Birim Ağırlık γt (kN/m ³)
CII	1,000	0.30	1.0	40	23
DI	500	0.35	0.4	35	22
DII	150	0.35	0.2	30	21

Tablo 6.7: Dolgu zemin ve Kuşdili Formasyonu mekanik özellikleri (SFA, 2006)

Zemin	Zemin Tipi	Y _t (kN/m ²)	Y _{sat} (kN/m ²)	Y _{sub} (kN/m ²)	V _s (m/sec)	G ₀ (kN/m ²)	v _d below (above) groundwater level	k (m/sec)
Dolgu	Dolgu	18	19	9	165	49,900	0.50 (0.45)	5 X 10 ⁻⁴
Kuşdili f.	Siltli Killi Kum	18	19	9	235	107,000	0.50 (0.45)	1 X 10 ⁻⁴

Zemin	Zemin Tipi	N_{45}	N_{60}	γ_t (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{sub} (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kN/m ²)	E1 (kN/m ²)	E2 (kN/m ²)	ν
Dolgu	Dolgu	16	12	18	19	9	30	0	14,400	33,600	0.3
Kuşdili f.	Siltli Killi Kum	24	18	18	19	9	34	0	21,600	50,400	0.3

Tabloda görüleceği gibi, dolgu ve Kuşdili Formasyonu için kohezyon değeri 0'dır. E1 ve E2 olarak iki tane deformasyon modülü bulunmaktadır. Bunlar tahkimatlı ve tahkimatsız bölgeleri ifade etmektedir. 3 formasyon için hesaplanan değerler Tablo 6.8, 6.9 ve 6.10'da verilmiştir.

Tablo 6.8: Kayaçların Fiziksel Özellikleri ve Zemin Sınıflaması (Dolgu ve Kuşdili Formasyonu) (STFA, 2006)

Formasyon	Derinlik		Örnek No.	Su İçeriği	Kıvam Limitleri					Hidrometre (mm)%	Elek Analizi				Zemin Sınıflaması
	Öst	Alt			W %	WL %	Wr %	W _L %	I _c %		200 %	40 %	10 %	4 %	
	m	m													
Dolgu Zemin	2,00	2,45	D1							12	28	59	77	İyi derecelenmiş Killi kum ve Çakıl	
	4,00	4,45	D3							11	18	28	36	İyi derecelenmiş Killi kum ve Çakıl	
	6,00	6,45	D5							6	36	64	76	İyi derecelenmiş Killi kum ve Çakıl	
	8,00	8,45	D7							7	18	54	73	İyi derecelenmiş Killi kum ve Çakıl	
	10,00	10,45	D9							2	13	67	94	İyi derecelenmiş Kum	
	11,00	11,45	D10							6	18	49	69	İyi derecelenmiş Killi kum ve Çakıl	
Dolgu Zemin	3,00	3,45	D1							53	63	79	90	Kumlu kil	
	6,00	6,45	D4							8	15	70	84	İyi derecelenmiş çakıllı killi kum	
	8,00	8,45	D6							22	34	76	88	Killi Kum	
	11,00	11,10	D7							14	23	34	49	Kumlu killi Çakıl	
	13,00	13,45	D9							8	38	78	87	İyi derecelenmiş Killi kum	
	14,00	14,45	D10							7	30	81	89	İyi derecelenmiş killi kum	
Dolgu Zemin	2,00	2,20	D02							28	44	72	84	Killi kum ve çakıl	
	4,00	4,45	D2							15	30	59	70	Killi kum ve çakıl	
	6,00	6,45	D4							4	21	69	84	Kötü derecelenmiş kum ve çakıl	
	8,00	8,45	D6		34	19				31	49	64	73	Killi kum ve çakıl	
	11,00	11,45	D8							11	29	68	83	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl	
	13,00	13,45	D10							14	25	45	65	Killi kum ve çakıl	
	15,00	15,45	D12							14	33	76	81	Killi Kum	
	17,00	17,45	D14							20	58	92	99	Killi Kum	
Kuşdili Formasyonu	18,00	18,45	D15							4	21	100	100	Kötü derecelenmiş kum	
	19,00	19,45	D16							11	53	100	100	İyi derecelenmiş kum ve kil	
	21,00	21,45	D18							12	30	57	70	Killi çakıllı kum	
	23,00	23,45	D20							4	9	86	96	Kötü derecelenmiş Kum	
	24,00	24,45	D21							6	9	44	94	Kötü derecelenmiş killi kum	

Tablo 6.9: Kayaçların Fiziksel Özellikleri ve Zemin Sınıflaması (Kuşdili ve Trakya Formasyonu) (STFA, 2006)

Formasyon	Derinlik		Örnek No.	Su İçeriği					Hidrometre (mm)%	Elek Analizi				Zemin Sınıflaması
	Üst	Alt		W	WL	Wr	W _i	Ic		200	40	10	4	
	m	m												
Dolgu Zemin	2,00	2,45	D2							8	24	61	72	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl
	4,00	4,45	D4							8	41	90	94	Kötü derecelenmiş kum ve kil
	6,00	6,45	D6							3	7	29	55	İyi derecelenmiş kum ve çakıl
Kuşdili Formasyonu	8,00	8,45	D8		34	29				22	33	54	79	Killi çakıllı kum
	11,00	11,45	D11							6	22	28	99	Kötü derecelenmiş siltli kil
	15,00	15,45	D15							5	12	36	79	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl
	18,00	18,45	D18							3	24	87	99	kötü derecelenmiş kum
	21,00	21,45	D21							12	49	97	100	killi kum
	25,00	25,45	D24			NP	NP			27	61	79	85	Killi kumlu çakıl
Dolgu Zemin	27,00	27,45	D26							5	27	100	100	Killi kum ve çakıl
	1,00	1,45	D1							4	20	80	99	Kötü derecelenmiş siltli kum
	3,00	3,45	D3							14	25	47	59	Kötü derecelenmiş kum
	5,00	5,45	D5			43	33			14	25	46	56	killi kum ve çakıl
Kuşdili Formasyonu	7,00	7,45	D7			NP	NP			16	33	65	75	Killi çakıl ve kum
	9,00	9,45	D9							16	28	60	78	killi kum ve çakıl
	12,00	12,45	D12							7	17	51	79	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl
	16,00	16,45	D16							5	11	52	83	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl
	19,00	19,45	D19							3	16	85	94	kötü derecelenmiş kum
	22,00	22,45	D22							5	17	79	93	kötü derecelenmiş killi kum
	26,00	26,45	D26							5	37	80	93	kötü derecelenmiş killi kum
Trakya Formasyonu	30,00	30,45	D30							5	10	78	95	kötü derecelenmiş killi kum
	33,00	33,45	D33							19	40	89	99	killi kum

Tablo 6.10: Kayaçların Fiziksel Özellikleri ve Zemin Sınıflaması (Kuşdili ve Trakya Formasyonu) (STFA, 2006)

Formasyon	Derinlik		Örnek No.	Su İçeriği	Kıvam Limitleri					Hidrometre (mm)%	Elek Analizi				Zemin Sınıflaması
	Üst	Alt			W	WL	Wp	Ws	Ic		200	40	10	4	
	m	m													
Dolgu Zemin	2,00	2,45	D2							8	24	61	72	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl	
	4,00	4,45	D4							8	41	90	94	Kötü derecelenmiş kum ve kil	
	6,00	6,45	D6							3	7	29	55	İyi derecelenmiş kum ve çakıl	
Kuşdili Formasyonu	8,00	8,45	D8			34	29				22	33	54	79	Killi çakıllı kum
	11,00	11,45	D11								6	22	28	99	Kötü derecelenmiş siltli kil
	15,00	15,45	D15								5	12	36	79	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl
	18,00	18,45	D18								3	24	87	99	Kötü derecelenmiş kum
Trakya Formasyonu	21,00	21,45	D21								12	49	97	100	Killi kum
	25,00	25,45	D24			NP	NP				27	61	79	85	Killi kumlu çakıl
	27,00	27,45	D26								5	27	100	100	Killi kum ve çakıl
Dolgu Zemin	1,00	1,45	D1								4	20	80	99	Kötü derecelenmiş siltli kum
	3,00	3,45	D3								14	25	47	59	Kötü derecelenmiş kum
	5,00	5,45	D5			43	33				14	25	46	56	Killi kum ve çakıl
Kuşdili Formasyonu	7,00	7,45	D7			NP	NP				16	33	65	75	Killi çakıl ve kum
	9,00	9,45	D9								16	28	60	78	Killi kum ve çakıl
	12,00	12,45	D12								7	17	51	79	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl
	16,00	16,45	D16								5	11	52	83	İyi derecelenmiş killi kum ve çakıl
	19,00	19,45	D19								3	16	65	94	Kötü derecelenmiş kum
Trakya Formasyonu	22,00	22,45	D22								5	17	79	93	Kötü derecelenmiş killi kum
	26,00	26,45	D26								5	37	80	93	Kötü derecelenmiş killi kum
	30,00	30,45	D30								5	10	78	95	Kötü derecelenmiş killi kum
	33,00	33,45	D33								19	40	89	99	Killi kum

6.6. KİMYASAL ANALİZ

Marmaray projesi kapsamında alınan toplam 36 su ve 45 zemin örneğinden kimyasal analizler STFA, (2006) tarafından yapılmıştır. Bunların arasında Sirkeci istasyonuna ait olanların sonuçları aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo 6.11 ve 6.12).

Tablo 6.11: Su örnekleri için kimyasal analiz değerleri (STFA, 2006)

Örnek Numarası	Parametreler			
	pH	COD mg/l	Klorür mg/l	Sülfat mg/l
144A	7,00	30	940	590
144B	7,15	45	40	30
146C	7,00	845	302	515
146E	7,20	285	140	190

Tablo 6.12: Zemin örnekleri için kimyasal analiz değerleri (STFA, 2006)

Örnek Numarası	Parametreler					
	pH	Organik materyal (%)	Suda çözünmüş Klorür mg/kg	Suda çözünmüş Sülfat mg/kg	Asit içerisinde çözünmüş Klorür mg/kg	Asit içerisinde çözünmüş Sülfat mg/kg
144A D3	9,70	2,76	660	190	712	1547
144B D8	8,52	1,15	36	50	513	1632
144B D3	8,74	1,80	85	163	1015	1070
146E D4	8,21	1,11	235	157	1248	5995
146E D9	8,63	1,60	84	1090	1083	1243

6.7. KAYA KÜTLESİ SINIFLAMASI

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 yeraltı suyu durumu göz önünde tutulmaktadır.

Sirkeci İstasyonu için kaya sınıflaması Japon karayolu kurumuna göre belirlenmiştir. Şekilde gözüken index ve özelliklere göre parametreler hazırlanmıştır. Bunun haricinde kullanılan parametreler;

- Elastik dalga hızı (P dalgası)
- Arazi kaya koşulları (kaya kalitesi, su durumu, süreksizlik düzlemleri ve koşulları)
- Sondaj numuneleri (numune koşulları, RQD)
- Tünel kazı metotları

Tablo 6.13: Kaya kütle sınıfları (Japon sınıflaması) için deformasyon ve dayanım özellikleri (Tasei, 2006)

Kaya Sınıflaması	Deformasyon modülü E (N/mm ²)	Poisson oranı ν	Kohezyon C (N/mm ²)	İçsel sürtünme açısı	Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)
B	5.000	0.25	4	50	25
CI	2.000	0.30	2	45	24
CII	1.000	0.30	1	40	23
DI	500	0.35	0.4	35	22
DII	250	0.35	0.2	30	21
E	80	0.40	0.1	30	20

6.7.1. Kayanın Basınç Dayanımı

İnceleme alanında yapılan araştırma sondajlarından elde edilen numuneler ile yapılan nokta yükleme deneylerine göre ortalama olarak kumtaşı için $I_{S50} = 3,06$ Mpa, silttaşı $I_{S50} =$ ortalama 2,01 Mpa, kilitaşı için ise 1,98 Mpa olarak hesaplanmıştır.

6.7.2. Kaya Kütlesi Değerleri (RQD)

Güzergahta yapılan sondajlardan alınan karot numuneleri ile Trakya Formasyonunun RQD değerleri hesaplanmıştır. Tünel kotu üzerinde RQD değeri 0 -25% arasında değişirken, tünel kazısı kotunda ise bu değer 0-52% arasında değişkenlik gösterir. . Kayaçlar genellikle çok çatlaktır. RQD değerinin %10 ve daha az olduğu yerlerde çatlaklar çok yakın veya dolmuş şekildedir. Çatlaklar çoğu zaman veya killi malzeme ile dolmuş şekilde gözükmemektedir. RQD değerleri derinlik ile birlikte değerlendirildiği zaman, belli bir düzen görülmemiştir. Bunun sebebi Trakya Formasyonunun tabakalanma geometrisinin, orojenik hareketler ve dayk sokulumlarıyla yönü çok değişmiştir. RQD ve TCR değerleri Tablo 6.14'de verilmiştir.

Tablo 6.14: Sondajlardan alınan Trakya Formasyonu numunelerinin özellikleri (Tasei, 2006)

Sondaj No.	Kaya	Üst Seviye (m)	Alt seviye (m)	TCR (%)	RQD (%)	SCR (%)
BH144A	Kumtaşı	9,45	-16,05	95	26	32
	Çamurtaşı	-16,05	-30,20	100	50	60
	Kumtaşı	-30,20	<u>-49,70</u>	99	37	43
BH144B	Kumtaşı	-2,15	-14,60	85	2	3
	Kumtaşı	-14,60	-36,65	99	16	27
	Kumtaşı	-36,65	<u>-48,45</u>	61	0	0
BH145B	Kumtaşı	-16,15	-35,15	94	9	18
	Kumtaşı	-35,15	<u>-51,15</u>	73	0	5
BH146	Çamurtaşı	-12,49	-16,09			
	Kumtaşı	-16,09	-35,50	88	0	4
	Kumtaşı	-35,50	<u>-48,49</u>	12	0	0
BH146A	Kumtaşı	-4,65	-13,30	79	15	20
	Kumtaşı	-13,30	-23,90	96	28	41
	Çamurtaşı	-23,90	<u>-48,90</u>	89	6	17
BH146C	Kumtaşı	-13,90	<u>-15,90</u>	56	0	0
BH146D	Silttaşı	-22,15	<u>-23,20</u>	10	0	5
BH146E	Çamurtaşı	-27,65	-28,15	50	0	0

Çalışma alanında karşılaşılan kayalar genellikle çok kötü veya kötü kalitededir. RQD değerlerinde görüldüğü üzere sondajlarda çoğu RQD değerleri 0'a eşittir.

6.7.3. Süreksizlik Aralığı

Güzergah boyunca süreksizlik aralıkları 20-180 mm arasında değişkenlik göstermektedir.

6.7.4. Süreksizlik Durumu

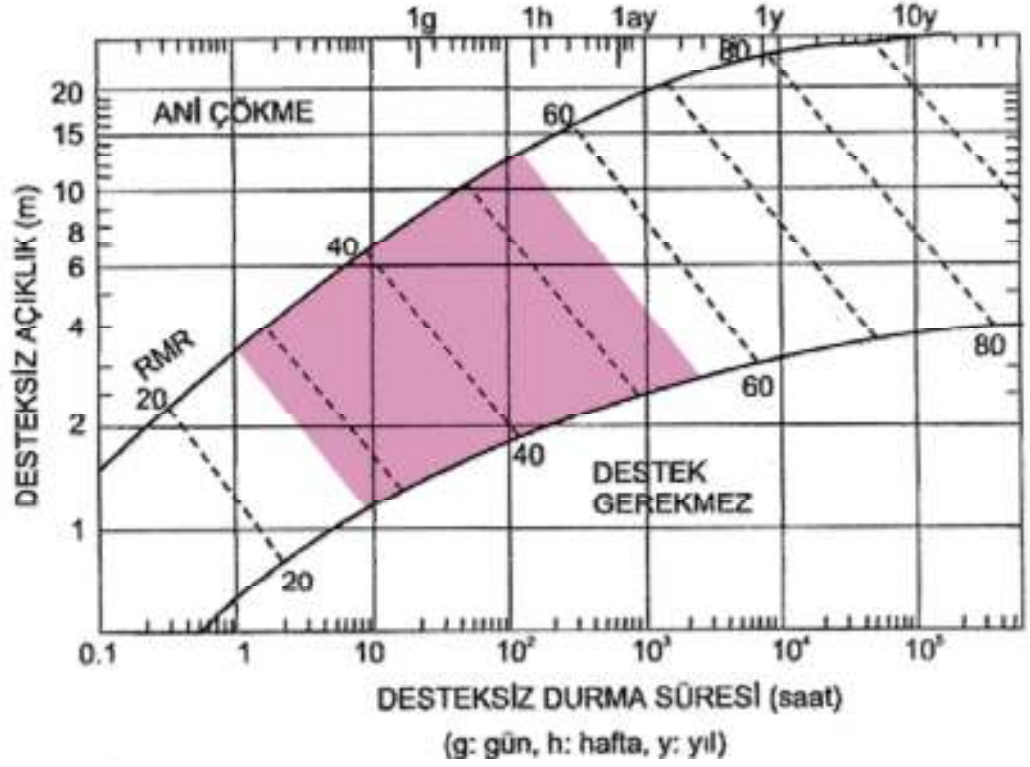
İnceleme alanında yapılan sondajlarda, Trakya Formasyonunu kesen bölgelerdeki kumtaşı, çamurtaşı ve kiltası birimleri orta derecede ayrıışmış-tamamen ayrıışmıştır. Sondajlarda, Trakya Formasyonuna ait birimlerde tektonik evrime bağılı olarak gelişmiş ezilme, kıvrımlanma ve kırılanma özellikleri, süreksizlik dolguları ve ezilme izleri görülmektedir.

Kazı sırasında hazırlanan ayna raporlarından alınan bilgilere göre bu bölgeler orta derecede ayrıışmış-tamamen ayrıışmış bölgelerdir. Yönelimleri genellikle kuzey, doğu yönlü olarak ölçülmüştür. Kuzey platform tüneline jeolojinin ve deformasyonun yüksek olduğu 0+150-0+220 aralığında süreksizlik aralıkları 50 mm üzerinde, kalın dolgulu şeklindedir. Bu süreksizlik düzlemleri bu noktalarda 15 metreye varan devamlılık göstermiştir. Kiltası ve kumtaşlarının fazla olduğu bölgelerdeki ayrıışma (W4) çamurtaşları olan bölgelere göre fazla olduğu gözlenmiştir. (W3-W4). Buna göre, Bieniawski (1989) kaya kütlesi sınıflamasında kullanılan en düşük RMR puanı 13, en yüksek RMR puanı 32 olarak belirlenmiştir.

6.7.5. Rmr İle Desteksiz Kazı Duraylılığı Arasındaki İlişki

Bieniawski tarafından 1973 yılında geliştirilen ve yine aynı araştırmacı tarafından modifiye edilen (1989) bir yöntem ile desteksiz kazı duraylılığı, RMR kaya kütlesi sınıflamasına bağılı 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 (8-52) RMR değerleri bu grafikte ani çökme bölgesi sınırında değerlendirildiğinde 0,5 – 12 m.

tavan açıklığı değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.13). Bu değerler tünel kazısının gerçekleştirildiği Trakya Formasyonuna ait birimlerde kademeli kazı yapılması gerekliliğini desteklemektedir.



Şekil 6.12: Çeşitli RMR kaya kütlesi sınıflarına göre, desteksiz durma süresi ve tavan açıklığı

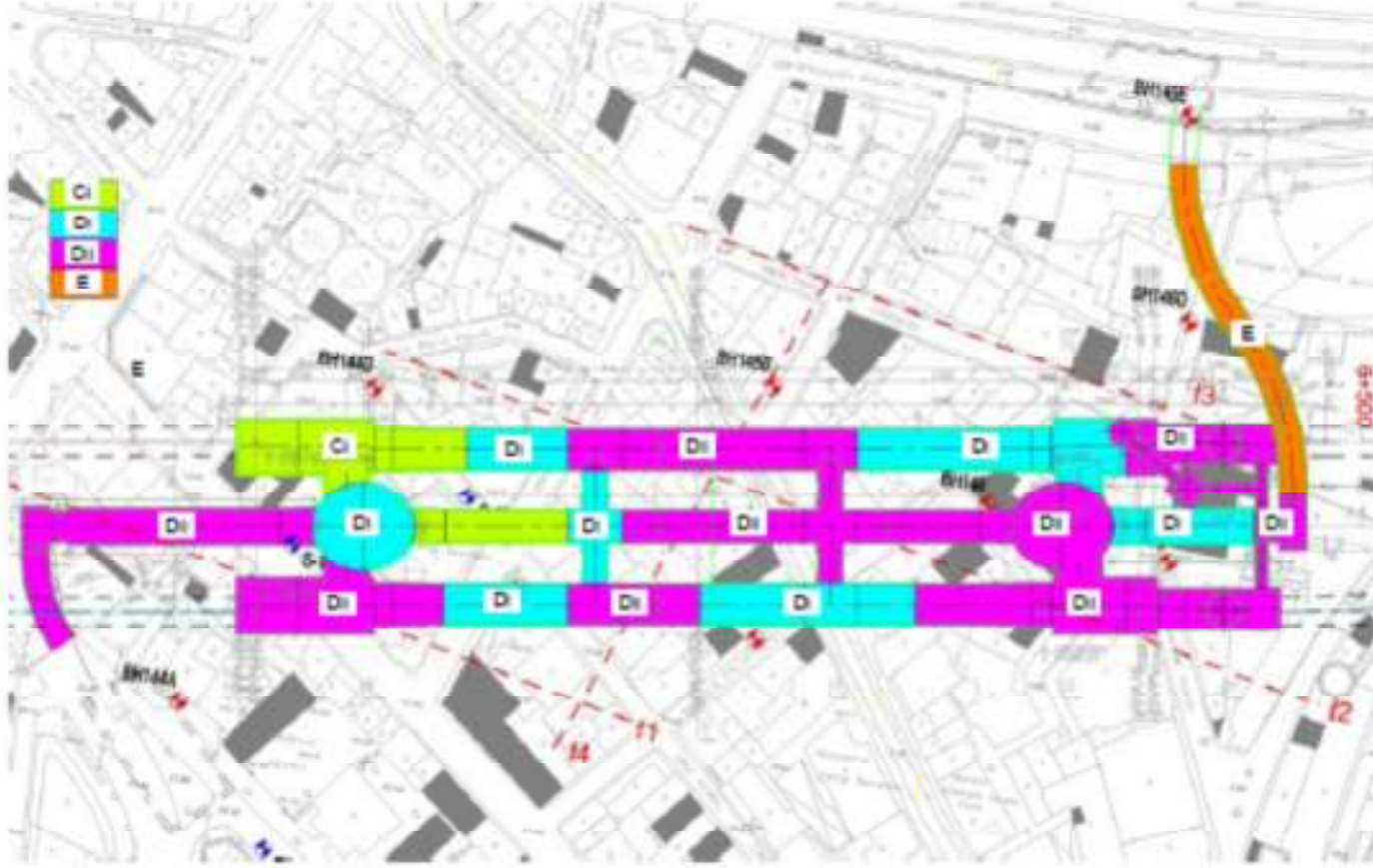
6.7.6. RMR Kaya Sınıfı, Puanları ve Japon Karayolu Sınıflaması ilişkisi

Tünel kazısı için Japon Karayolu Sınıflaması kullanılmıştır. Ancak bu sınıflama ifade edilirken, RMR değerleri olarak ifade edilmiştir. Tabloda RMR değerlerinin hangi Japon sınıfına denk geldiği görülmektedir (Tablo 6.15).

Tablo 6.15: Japon kaya sınıflandırması ve RMR ilişkisi

Kaya Sınıfı	RMR
CI	>35
DI	$25 < < 35$
DII	$15 < < 25$
CII	<15

Japon sınıflaması, kaya kütlesi sınıfları göz önüne alınarak, elastik dalga hızı, süreksizlik koşulları ve durumları, su basıncı ve durumu, kayaç cinsi ve yapısı gibi etkenler hesaba katılarak elde edilen bir sınıflamadır. Çalışma boyunca kaya sınıfları RMR olarak ifade edilecektir. Tabloya göre CI sınıfı RMR olarak 35'ten büyük, DI sınıfı 25 ile 35 arasında, DII sınıfı 15 ile 25 arasında, CII sınıfı ise RMR 15 değerinden düşük olarak tanımlanmış ve karşılığı bu şekilde kullanılmıştır.



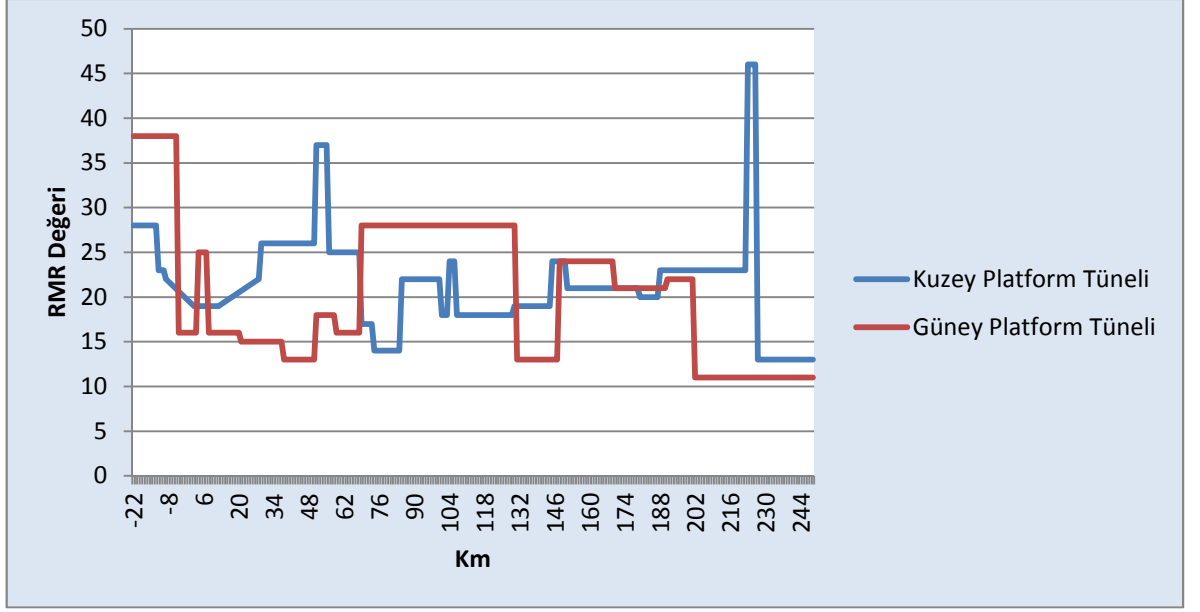
Şekil 6.13: Japon Kaya Sınıflaması ve Güzergah görünümü (Taisei Dizayn raporu, 2006)

Tablo 6.16: 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.

Tüm bu sınıflamaya göre, kazı için karşılaşılan RMR aralıkları 8 ile 54 arası olarak belirlenmiştir. Tünel güzergahı boyunca ortalama olarak Güney Tüneli için 24, Kuzey Tüneli için 18, Merkez yürüme tüneli için ise 26 civarında RMR değerleri hesaplanmıştır. Tünel güzergahı için RMR değerleri ve tünel uzunluğu ilişkisi Şekil 6.15’de verilmiştir.



Şekil 6.14: Sirkeci İstasyonu boyunca RMR değer dağılımı

Tablo 6.17: Japon Kaya Sınıfı özellikleri (Taisei dizayn raporu, 2006)

Zemin Sınıfı	Kaya Grupları	Kaya İsimleri	Elastik Dalga Hızı					Zemin Durumu			Numune Özellikleri RQD	Yeterlilik Faktörü	Kazı veya deplasman sonrasındaki Koşulları
			V _p (km/s)					Kaya veya Su sebebiyle Etkiler	Süreksizlik Boşlukları	Süreksizlik Koşulları			
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0						
B	H kaya Kütlesi	Granit, granadiorit, kuvars,hornfels						Zemin taze ve dayanıklı veya aşınmayla altere olmaya meyilli Su sebebiyle bozulma yok	Çatlaklar arası boşlukları yaklaşık olarak 50 cm Tabakalanma ve şişlenme etkisi tanımlanmış, ama tünel kazısına az bir etkileri var.	Neredeyse hiç fay aynası veya kama gözlenmemiştir. Genel olarak süreksizlikler kontaklarda bulunur	The core shapes show rock fragments --> short columns --> bars. The core length is generally 10 to 20 cm, but lengths of around 5 cm may also be seen. The RQD is 70 or higher.		Kaya dayımı, tünel kazıları tarafından oluşan yüklemelerde çok yüksek gözlenmiştir. Süreksizlik düzlemleri tolere edilebilir ve tünel kazısına karşılık kayıp gözlenmemektedir. Kazı yüzeyinden münferit düşmeler görülebilir, deplasmanlar limitlidir ve yaklaşık olarak 15 mm veya daha az elastik deplasmanlar gözlenmiştir. Ayna kendi kendini destekleyebilir.
		Mesozyoik Kumtaşı											
	M kaya Kütlesi	Andezit, bazalt, riyolit, dasit											
		Teriyas Kumtaşı											
	L kaya Kütlesi	Serpentinit, tuf, tuf bireşi											
M kaya Tabakası	Mesozyoik yaşlı killi şist												
C I	H kaya Kütlesi	Granit, granadiorit, kuvars,hornfels						Zemin göreceli olarak dayanıklı ve taze veya aşınmayla altere olmaya meyilli Zemin, iyi kohezyonlu yumuşak kaya içermektedir. Su sebebiyle az miktar bozulma var.	Çatlaklar arası boşlukları yaklaşık olarak 30 cm Tabakalanma ve şişlenme gözlenebilir seviyede ve tünel kazısına etkileri var	Biraz noktada fay aynası gözlenmiştir. Devamsızlıklar açıklıklara sahip ancak bu açıklıklar çok geniş değil	Numune uzunluğu genel olarak 5 ila 20 cm arasındadır ama 5 den daha kılalarda gözükümüştür. RQD 40 70 arasındır	-	Daya dayınımı tünel kazı yüklemeleriyle karşılaştırıldığında yüksek çıkmıştır. Süreksizlik düzlemleri göreceli olarak yüksek ve az miktarda kazıya bağlı kayıp yaşanmaktadır. Süreksizlik düzlemlerinden düşük miktarda düşme oluşabilir. Deplasmanlar tünel kazısına göre limiti ve 15 ila 20 mm veya daha az olarak değişmektedir. Ayna kendi kendini destekleyebilir.
		Mesozyoik Kumtaşı											
	M kaya Kütlesi	Andezit, bazalt, riyolit, dasit											
		Teriyas Kumtaşı											
	L kaya Kütlesi	Serpentinit, tuf, tuf bireşi											
M kaya Tabakası	Mesozyoik yaşlı killi şist												
C II	H kaya Kütlesi	Granit, granadiorit, kuvars,hornfels						Zemin göreceli olarak taze ve dayanımlıdır veya bir şekilde alterasyona uğramıştır. Kaya aşınma nedeniyle yumuşamıştır. Zemin göreceli olarak iyi kohezyonlu yumuşak kaya içerir Bozunma ve kayıp suya bağlı olarak bazı bölgelerde vardır.	Çatlaklar arası boşlukları 20 cm civarı Şistozite ve tabakalanma gözlenebilir ve tünel kazısına etkileri var	Bölüm bölüm fay aynaları ve ince ardalama mevcut Süreksizlikler açıklıklara sahip ve bu açıklıklar göreceli olarak geniş Süreksizlikler dar genişlikte küçük fayları içeriyor.	Bir çok numune uzunluğu 10 cm veya daha kısa ve 5 cm veya daha az parçalar büyük miktar olarak alınabilir RQD 10 ile 40 arasındadır	-	Kaya dayanımı çok yüksek değil ancak elastik deformasyonu limiteyecek kadar yeterlidir. Kaya dayanımı yüksek olsa bile süreksizlik ortamları kötü ve kaya kütleleri süreksizlikler boyunca, kazı ile alakalı olarak düşebilir. Eğer kazıya bağlı deplasmanlar kaya dayımına bağlı olarak yükleniyorsa, yaklaşık olarak elastik limitte 30 mmdir. Ayna hemen hemen kendini destekler
		Mesozyoik Kumtaşı											
	M kaya Kütlesi	Andezit, bazalt, riyolit, dasit											
		Teriyas Kumtaşı											
	L kaya Kütlesi	Serpentinit, tuf, tuf bireşi											
M kaya Tabakası	Mesozyoik yaşlı killi şist												
L kaya Tabakası	Siyah Şist, Yeşil Şist Tersiyer yaşlı çamurtaşı												

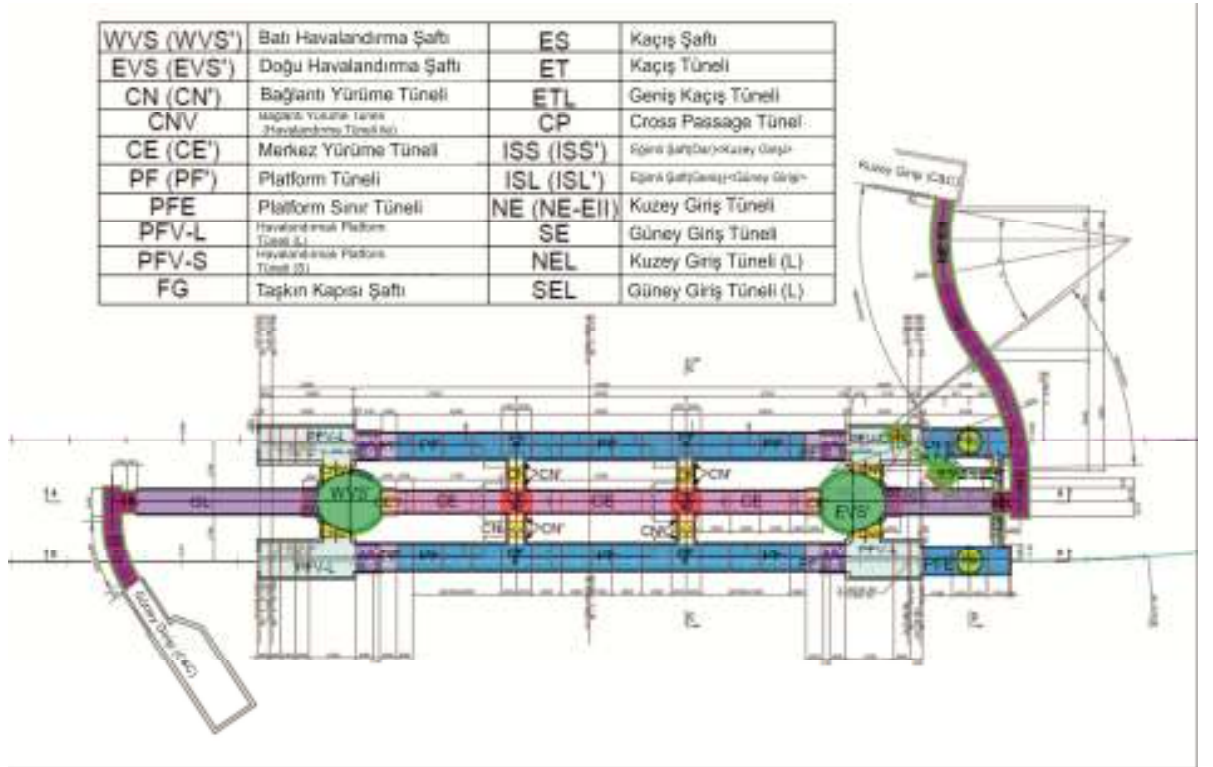
Tablo 6.18: Japon Kaya Sınıfı özellikleri

Zemin Sınıfı	Kaya Ortamı	Tipik Kayaç İsimleri	Elastik Dalga Hızı V _p (km/s)					Zemin Koşulları	Numune Durumları	Yeterlilik Faktörü	Kazı sonrası ortam ve deplasman standardı
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0				
D I	H kaya Kütlesi	Granit, granadiyorit, kuvars, hornfels Paleozoik kesitte mezozoik yaşlı kumtaşı						Bazı kısımlarda kaya ortamı güçlü olmasına rağmen, genel olarak yüksek derecede aşınmış ve altere olmuştur. Tabakalanma ve şistozite yüksek derece gözlenebilir. Süreksizlik boşlukları ortalama 10 cm veya altında Süreksizlik aralıkları geniş, tabakaların arasında ve kil dolgulu Süreksizlikler küçük fayları içeriyor. Zemin sediment ve yüksek miktarda kaya parçası içeren istifler içerir. Bozulma ve gevşeklik su sebebiyle gözle görülür şekilde mevcut.	Numuneler parçalanıyor ve bazen breşle karışmış kil veya kum şeklini alıyorlar ROD 10 veya daha az	4 to 2	Kaya dayanımı tünel kazısı tarafından oluşan yüklemeye karşılaştırıldığında yüksek ve elastik deformasyon ve münferit plastik deformasyon mevcut Kaya dayanımı yüksek bile olsa elastik deformasyonu sınırlayacak kadar yeterli, devamsızlık düzlemleri yüksek derecede kötü ve zemin süreksizlikler boyunca kazı yüzünden düşme gösterebiliyor. Eğer kazı sebebiyle oluşan deplasmanlar kaya dayanımına göre düşük ise, 30 60 mm arası invert boyunca açıklık oluşabiliyor ve bu aynayı tutamayabiliyor. Ayna kendi kendini destekleyemez ve mevcut zeminkoşullarında ringi kapatmak ve desteklemek gerekir
	M kaya Kütlesi	Andezit, bazalt, riyoit, dasit Teriyas yaşlı Kumtaşı									
	L kaya Kütlesi	Serpentin, tuf, tuf breşi									
	M kaya Tabakası	Mezozoik yaşlı killi şist, şist									
	L kaya Tabakası	Siyah şist, yeşil şist Teriyas yaşlı çamurtaşı									
D II	H kaya Kütlesi	Granit, granadiyorit, kuvars, hornfels Paleozoik kesitte mezozoik yaşlı kumtaşı							2 to 1	Tünel kazısı nedeniyle oluşan yüklemeye oranla kaya dayanımı düşüktür ve elastik deformasyon ile geniş plastik deformasyonlar oluşur. Kaya dayanımının düşük olması ile, süreksizlik ortamları yüksek derecede kötü ve zemin kaybı bir çok kaygan süreksizlik düzlemlerinde genişliyor ve bunun sonucunda büyük deplasmanlar oluşuyor. Kazı yüzünden oluşan deplasmanlar yaklaşık olarak 60 ila 200 mm arası invert boyunca açık kalıyor ve bu aynanın kendisini tutmasına yetmiyor Tünel kesiti büyüdüğünde fazla deformasyon beklenmektedir. Zemin koşullarına göre ring kapatılmalı ve destekleme yapılmalıdır.	
	M kaya Kütlesi	Andezit, bazalt, riyoit, dasit Teriyas yaşlı Kumtaşı									
	L kaya Kütlesi	Serpentin, tuf, tuf breşi									
	M kaya Tabakası	Mezozoik yaşlı killi şist, şist									
	L kaya Tabakası	Siyah şist, yeşil şist Teriyas yaşlı çamurtaşı									

6.8. JEOTEKNİK PARAMETRELER

6.8.1. Yöntem

NATM yöntemiyle açılan Sirkeci İstasyonu birkaç tünel bölümünden oluşmaktadır. Her tünel için farklı NATM yöntemine bağlı kalınarak farklı tahkimat miktarları ve yöntemleri kullanılmıştır (Şekil 6.16)



Şekil 6.15: Sirkeci istasyonu kesit tipleri ve tanımlamaları (Taisei platform tünelleri kazı ve destek raporu, 2006)

6.8.2. Geçici Desteklerin Dizaynı

Geçici destek işlerinin dizaynında, kaya için öncelikle Japon Karayolu Sınıflaması kullanılarak sınıflandırılmıştır (Tablo 6.19)

Tablo 6.19: Geçici destek için gereken içerikler (Birincil destek)

Gereken içerik	Planlanan Kullanım
Elastik Dalga Hızı	Kaya Sınıflaması
Kaya Koşulları	Kaya Sınıflaması
Numune Koşulları/RQD	Kaya Sınıflaması
Kaya Dayanım Oranı	Kaya Sınıflaması

6.8.3. Tünel Kazısı ile Alakalı Olan Yüzey Zemin Oturmalarının Hesabı

Tünel kazısıyla alakalı yüzey zemin oturmalarının hesabı için sınırlı öge metodu kullanılmıştır. Bu yöntem için gereken parametreler aşağıda verilmiştir. Tüm bu parametreler birincil gerilme ortamlarının hesabının yanı sıra Trakya Formasyonunun deformasyon ve kuvvet dayanımlarının hesabında da kullanılmıştır.

Tablo 6.20: Yüzey oturmaları hesabı için zemin parametreleri (Taisei, 2006)

Parametre	Planlanan Kullanımı
Birim hacim ağırlık	Birincil Gerilme Tespiti
Yanal Gerilme Katsayısı K	$K=v/(1-v)$
Deformasyon Modülü E	Anakaya deformasyon modülü tespiti
Poisson Oranı v	Anakaya deformasyon modülü tespiti
Kohezyon c	Anakaya dayanım niteliği hesabı
İçsel sürtüme açısı	Anakaya dayanım niteliği hesabı

6.9. TEHLİKE SEVİYELERİ

Bütün tünel boyunca kullanılan ölçümler ve kritik seviyeleri için birkaç adım olacak şekilde tehlike seviyeleri belirlenmiştir. Bu limit değerler Sakurai, (2010) tarafından Taisei firması mühendisleriyle birlikte bu proje için belirlenmiş, Japon Karayolu sınıflaması ve RMR sınıflaması kullanılarak belirlenmiştir. Bina dönmeleri ise yine RMR hesaba katılarak AVRASYA ORTA GİRİŞİM tarafından belirlenmiştir (Tablo 6.21).

Tablo 0.21: Sirkeci İstasyonu için kullanılan Tehlike seviyeleri değerleri (Taisei jeoteknik raporu, 2006)

Binnel Tehlike Seviyesi	Tehlike Seviyesi	I a	II a	III a	IV
	Her tehlike seviyesinde yapılacaklar	Rutin izlemeler ve bina kontroleri	Araştırma gözlemleri ve bina izlemeleri sıklığını artırma	Genel zemin destek sistemleri (çelik sürenleme, toprak işlemi, geçici invert, enjeksiyon)	Kazı durdurulması Tehliyesi yerine geçilmesi genel zemin destek sistemlerinin uygulanması *2
Bina dönmeleri		1/1000 (0.07%)	1/1000 (0.1%)	1/500 (0.2%)	*)

Binnel Tehlike Seviyesi	Tehlike Seviyesi	I b	II b	III b
	Her tehlike seviyesinde yapılacaklar	Rutin izlemeler ve bina kontroleri	Araştırma gözlemleri ve bina izlemeleri sıklığını artırma	Genel zemin destek sistemleri (çelik sürenleme, toprak işlemi, geçici invert, enjeksiyon)
Toplam oturma *)		25mm	50mm	75mm
Konverjans **)	Pilot Tünel (PT)	12 mm (D1) 18 mm (D2)	16 mm (D1) 22 mm (D2)	24 mm (D1) 32 mm (D2)
	Platform Tünel (PF)	23 mm (D1) 30 mm (D2)	32 mm (D1) 43 mm (D2)	40 mm (D1) 53 mm (D2)
	Havalandırma Platform Tünel (PFV)	32 mm (D1) 43 mm (D2)	45 mm (D1) 60 mm (D2)	63 mm (D1) 85 mm (D2)
	Merkez Yürüme (CE)	18 mm (D1) 25 mm (D2)	25 mm (D1) 35 mm (D2)	37 mm (D1) 50 mm (D2)
	Balçık Yürüme (CH)	14 mm (D1) 18 mm (D2)	20 mm (D1) 28 mm (D2)	27 mm (D1) 37 mm (D2)
	Konverjans hızı (1.00 uzaklığı için)	11mm	17mm	25mm
Tavan oturma hızı (1.00 uzaklığı için)	4mm	7mm	12mm	
Çevresel (Çelik Destek)	80 N/mm ² (D1) 120 N/mm ² (D2)	103 N/mm ²	275 N/mm ²	
Geçirimsiz (Sistolete)	2.8 N/mm ² (D1) 4.2 N/mm ² (D2)	6.3 N/mm ²	9.0 N/mm ²	

*2: Çerçeve kazı durdurulması işçiyi bina yıkım işleri bina hasar durumuna göre tehlike seviyesine bakılmaksızın güvenlik sağlar.

*3: Tehlike seviyesi 4 için hesaplamalar, diğer değerler seviye 3'e yakınlığı zemin belirlenir. Ölçümün değerlerini kullanarak, test sonuçları, analitik çıkarılmamış yönlendirme, bu hesapların değerlendirilmesi.

*4:

*5: Tavan oturma hızı için tehlike seviyesi, konverjans değerlerini varsı kadardır.

İnclinometre için 3 adet seviye belirlenmiştir. Bunlar 1/500, 1/1000 ve 1/1500 olarak belirlenmiştir. Toplam oturma için 25 50 75 mm olarak hesaplanmış değerler vardır. Her tünel için ayrı ayrı bu limit değerler değişmektedir. Püskürtme beton ve çelik donatı

için dayanım değerleri 3 adımda verilmiş olup, kazı boyunca bu değerler aşılmamıştır. Ancak bu değerlere yaklaştıkça, jeolojinin de kötüleşmesi ile birlikte deformasyonlar artmıştır. Eğer 1. Seviye aşılsa gözleme ve araştırmalar arttırılacak, ikinci seviye aşılsa fazladan destek sistemi (çelik sürenleme, topuk işleme, geçici temel, enjeksiyon) yapılacak, 3. Seviye aşılsa oturma hızı yavaşlayana kadar kazı durdurulacaktır. Sadece Kuzey tüneli 0+200 metresinde kümülatif oturma değeri olan 15 cm'e yaklaşıncaya kazı bir süre durdurulmuştur. Bu nokta haricinde tünel içerisinde 3. Seviye önlem alınmasını gerektirecek bir durum olmamıştır.

Her tünel için ayrı olan bu limitler ve alınacak önlemler tabloda belirtilmiştir. Tünel içi tünel dışı toplam 150 mm olarak belirlenen bu limitler aşılmamıştır. Limitlere yaklaşıldığı noktalarda deformasyon artışı gözlenmiştir. Ancak tahkimat sistemi ve uygulanan yöntemler, 2. Seviye sonrasında oluşan deformasyonların hızını düşürmüştür.

6.10. KAZI

Tünel inşaatı sırasında merkez yürüme tünelleri, platform tünelleri ve batı şaftında NATM yöntemi kullanılmıştır. Ancak kazı sırasında farklılıklar gözlenmiştir.

6.10.1. Batı Havalandırma Şaftı (WVS')

Belirlenen tahkimat sistemi göz önüne alınarak, mekanik kazı hidrolik arka destekli kepçeli kazıcı ile zemin üzerinden gerçekleştirilmiştir. Zemin profiline göre normal kafa veya twin header (çift uçlu) kafa kullanılmıştır. Dolgu zemin ve Kuşdili Formasyonu geçilirken normal kafa, Trakya Formasyonu içerisinde özellikle diyabaz dayklarına rastlanıldığı kısımlarda ise twin header kullanılmıştır.

Kazı işlemi bittiğinde eksiksiz bir profil için kazı duvarına gerekli tahkimatlar yapılmıştır. Bu işlem formenler ve saha mühendisleri tarafından takip edilmiştir. Kazı bölgesinin boyutu hesaba katılarak alan 2 büyük parçaya bölünmüştür.

Kazı işlemi beton halkalarından aşağı doğru her adım 1.15 m olacak şekilde yapılmıştır. Bu miktar kazıldığında zemindeki tüm hafriyat kaldırılır ve taban kısmı stabil şekilde düzeltilir. Bu şekilde -42,5 metreye kadar kazı işlemi gerçekleştirilmiştir. Tahkimat işlemi sırasında kazı makinesinin giremediği yerlerde balta vb. aletler kullanılarak insan gücüyle kazı işlemi gerektiğinde gerçekleştirilmiştir. Kazı makinesinin kepçesinin 8 cm³ dolun kapasitesi vardır.

Tablo 6.22: Tünel ve Şaftlara göre uzunluk miktarları

Şaft ve Tünel		Mevki	Uzunluk (m)	Toplam Uzunluk (m)	
Şaft	Batı Havalandırma Şaftı(WVS)	VS (Mütemmel Kaya Küresi Bölgesi)	23.473	40.155	
		VS*	16.682		
	Doğu Havalandırma Şaftı(EVS)	VS (Mütemmel Kaya Küresi Bölgesi)	11.336	28.012	
		VS*	16.676		
	Kaçış Şaftı (ES)	Üst	19.695	49.216	
		Alt	29.521		
	Taşkın Kapısı (FG)	Kuzey	14.375	28.750	
	Güney	14.375			
Eğimli küçük Şaft (ISS)			35.777	35.777	
Eğimli büyük Şaft (ISL)			65.710	65.710	
Tünel	Platform Tünel (PF)	Kuzey	175.000	350.000	
		Güney	175.000		
	Havalandırılmalı Platform Tünel (PFV)	Kuzeybatı	33.000	116.000	
		Kuzeydoğu	25.000		
		Güneybatı	33.000		
		Güneydoğu	25.000		
	Merkez Yürüme Tüneli (CE)			153.390	153.390
	Yaya Yürüme Tüneli (CN)	Kuzeybatı	11.049	44.196	
		Kuzeydoğu	11.049		
		Güneybatı	11.049		
		Güneydoğu	11.049		
	Havalandırılmalı Yaya Yürüme Tüneli (CNV)	Kuzeybatı	5.048	20.192	
		Kuzeydoğu	5.048		
		Güneybatı	5.048		
Güneydoğu		5.048			
Yaya Geçidi (CP)			32.117	32.117	
Kaçış Tüneli (E1)	Üst	9.171	23.198		
	Alt	14.027			
Kuzey Giriş Tüneli-Geniş (NEL)			9.976	9.976	
Kuzey Giriş Tüneli (NE)			116.483	116.483	
Güney Giriş Tüneli (SE)			39.012	39.012	

Kazı güzergahı boyunca 11-33 metreleri arasında yer yer görülen DI sınıfı zemin için ve genel olarak görülen DII sınıfı zemin için kullanılan tahkimat sistemi farklılık göstermiştir.

6.10.2. Merkez Yürüme Tüneli

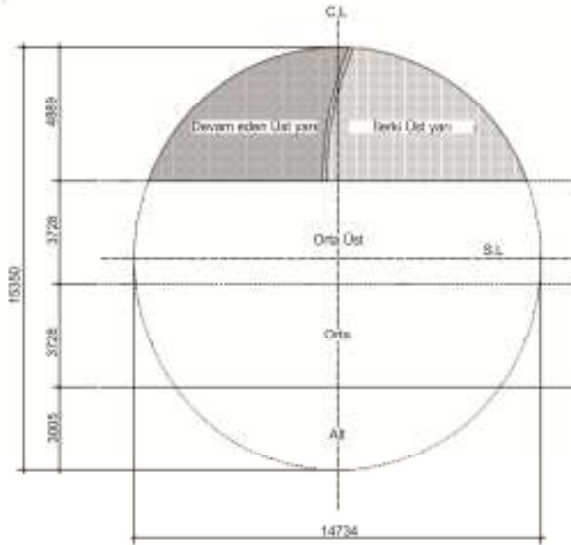
Şaft kazısından sonra, Batı şaftından itibaren Merkez Yürüme tünelinin kazısı başlamıştır. Kazı iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Üst kısım ve alt kısım olarak adlandırılan bu iki kısım kazıları kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Üst kısmın ilk 12 metresi kazıldıktan sonra, alt kısmın kazısına başlanmış ve destek işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Merkez Yürüme tüneli kazısında “kısa sürede ringi kapatma” (micro benching) yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem 5-6 metrelik kazı uzunluğu boyunca üst orta ve alt yarılardan

hepsinin kazılıp ringin kapatılmasıdır. Bu tünelde bu yöntemin kullanılmasının sebebi, tünel boyutu küçük olması ve geçilen kaya sınıfı yer yer kötü olması nedeniyle tünele gelecek baskıya karşı, ringi kapatarak tünelin direncini arttırmaktadır. Bu yöntem tünel içerisinde oluşacak deformasyonları önemli ölçüde yavaşlatmıştır.

6.10.3. Platform Yürüme Tüneli

Platform tünele gelindiğinden platform tünel kazısına başlanmıştır. Platform tüneller basit olarak 3 adet bölümden oluşur; üst kısım, orta kısım, alt kısım. Pilot tünel kazım işlemi bittiği zaman Platform tünelin üst kısmının kazısına başlanmıştır. Platform tünelinin üst kısmı kazıldığı zaman PFV (havalandırmalı platform tüneli) kazısına başlanacağı zaman PF' adı verilen tip kesit kullanılır. PF' kazısı bittikten sonra tünel PFV tünele kazılarak genişletilir. Havalandırmalı Platform tünelinin 4 kısmı vardır. Üst tepe kısım, orta tepe kısım, orta kısım ve alt kısım olarak. İki kademeli olarak kazılan üst tepe kısmının ardından sırayla alt kısımlar kazılmıştır (Şekil 6.17).



Şekil 6.17: PFV Tünel kesiti

Üst kısım kazısı bittikten sonra ilk bağlantı yerinde kuzeyden bağlantı yürüme tüneli kazısı yapılmıştır. Bağlantı tünelinin üst yarısı kazıldıktan sonra PFV (havalandırmalı platform tüneli) orta kısım ve orta üst kısım kazısı yapılmıştır. Kuzey platform tüneli ikinci ve son bağlantı tüneline ulaştığı zaman kuzey platform tüneli ve merkez yürüme

tüneli dahil, bağlantı yürüme tünellerinin kazısı tamamlanmıştır. Aynı zamanda güney platform ve güney havalandırmalı platform tünellerinin üst yarı kazıları tamamlanmıştır. Bu noktadan itibaren kuzey ve güney platform tünel kazıları aynı anda ilerlemeye başlamıştır. Kuzey platform tünelineki doğu şaftının kuzeyinde bulunan PFV tüneli için batı şaftında olduğu gibi önce PF' tüneli açılmıştır. Ardından bu tünel PFV tünele genişletilmiştir. Ardından kaçış tüneli ve yaya geçidi tünelinin kazılarına başlanmıştır. Yaya geçidi tünelinin kazısına başlamadan önce destek tabaka ve bulon işlemleri tünel kesiti boyunca yapılmıştır. Ayrıca 2 adet çelik destek yüklemesi geçici olarak yapılmıştır. Ardından genişletme kazısı çalışmaları başlamıştır. (L=8m). Bu kazı bittiğinde, normal Yaya geçidi tünel kazısı tünelin 5 m gerisine kadar yapılmıştır. Platform havalandırma tünelinin devamındaki platform sınır tünelinin kazısının ardından kalan kısımda tamamlanmıştır. Bu işlemler devam ederken Kaçış tünelinin geçici destek işleri ve bulon çalışmaları tamamlanmıştır.

En son işlem olarak da yaya tüneli kazısı bitirilmiştir. Tüm tünel kazısı 10 adımda planlanmıştır. Bu adımlar kısaca;

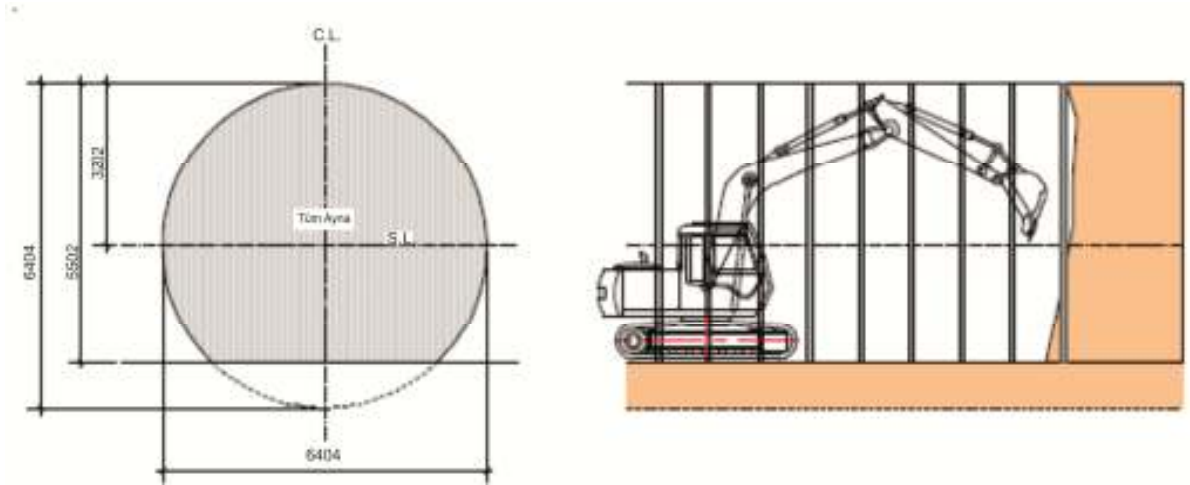
- **Adım 1:** a) Batı şaftı kazısı tamamlandı. b) Uzun çelik süren yüklemesi c) CE kazısı başlangıcı
- **Adım 2:** a) CE kazısı b) CN kazısı(Kuzeybatı) c) Pilot tünel kazısı d) Platform tünel (PF) kazısı (üst bölge) e) Platform tünel (PF') kazısı (üst bölge) f) PFV kazısı (üst bölge)
- **Adım 3:** a) PFV ve PF' kalan kazıları (PF'den PFV'ye ve PF den PF'ye geçiş kazıları) b) Pilot tünel dolgusu
- **Adım 4:** a) Pilot tünel ve Platform tünel kazısı devam (Kuzey)
- **Adım 5:** a) Kuzey platform tünel orta kısım kazısı (bağlantı tüneli bölgesi) b) Bağlantı tünel ve platform tünel birleşimi (Kuzey) c) Kuzey batı PFV tünel orta kısım kazısı
- **Adım 6:** a) Kuzeybatı bölümündeki platform ve havalandırmalı platform tünelleri kalan kazıları(alt yarı) b) Kuzey platform ve güney platform tünelleri üst ve orta yarı kazıları
- **Adım 7:** a) Kuzeydoğu Bağlantı yürüme tüneli kazısı b) Kuzey ve güney platform, havalandırmalı platform tünelleri orta ve alt yarı kazısı

- **Adım 8:** a) PFV ve PF kuzey ve güney kalan kazıları (alt ve üst yarılar) b) Kuzey sınır platform tüneli (PFE) kazısı
- **Adım 9:** a) Kuzey platform, Kuzeydoğu PFV ve Kuzeydoğu PFE tünelleri alt yarı kazıları b) Yaya geçidi kazısı
- **Adım 10:** a) Batı shaftı ile platform ve merkez yürüme tünelleri arasında kalan bağlantı kazılarının tamamlanması b) Merkez yürüme tüneli sonlandırılması

Merkez yürüme tüneli boyunca farklı metrelerde farklı tip kesitler uygulanmıştır. Bunun sebebi ise güzergah boyunca değişken jeolojik koşullara bağlı olarak değişken zemin sınıflarıdır. Aşağıdaki tabloda güzergah boyunca kullanılan kesitlerin metreleri verilmiştir. Tip kesitler ise ekte mevcuttur.

6.10.4. Merkez Bağlantı Tüneli

Merkez yürüme tünelinin kazısı doğu shaftına kadar devam ederken, belirlenen plana uygun olarak Merkez bağlantı tünelinin kazısına başlanmıştır. İlk olarak kuzey yönden ilerlenmiştir. Merkez bağlantı tüneli tek kademede gerçekleştirilmiş kazılardır.



Şekil 6.18: Merkez bağlantı tüneli kesiti

Merkez yürüme tüneline Platform tünele geçişte pilot tünel kazılmıştır. Pilot tünelin kazılmasından önce CN tünelinin imalatı sonlandırılmıştır. Pilot tünel daha sonra plana uygun şekilde PF tünele genişletilmiştir. Pilot tünel kazısına başlanmadan önce Bağlantı Yürüme tüneline dolgu kısım yapılmıştır (Şekil 6.18).

6.11. DESTEK TİPİ VE SİSTEMLERİ

6.11.1. Batı Şaftı Destek Tipleri ve Sistemleri

Püskürtme Beton

Kullanılan püskürtme beton Yenikapı'daki tesislerden elde edilmiştir. Islak veya kuru olarak kullanılmıştır. Acil durumlarda gereken kuru püskürtme beton Shotpatch-33 adıyla YKS-BASF tarafından temin edilmiştir. Tablo 6.20'de püskürtme betonun kalitesi ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.20: Püskürtme Beton Gereksinimleri ve Özellikleri (Taisei, 2006)

Malzeme	Tanımlama	Not
Beton Sınıfı	C 20/25	*EN 206
Şantiyedeki Hedef Kuvvet	>18 Mpa	Numune (10*10)
Garanti Süresi	Vadesinden 28 gün sonra	Erken Basınç Hesaba katılır
Kuvvet Dayanımı	1 gün sonra 5 MPA 28 gün sonra 18 MPa	1 gün kuvveti şantiyede çekme testi ile ölçülmelidir
Çimento Tipi	Cem I-OPC-42,5	OPC 42,5- TS 19, EN 197-1
Max Agregat boyu	12 mm	

Çelik Hasır

Q 188*188 tip çelik hasır (150*150 mm, 6 mm çaplı 2,93 kg/m²) destek elemanı olarak kullanılmıştır. ÇESAN çelik hasır sağlayıcısı olmuştur ve standart olarak TS 4559, BS 4483 ve ASTM-A 497 kullanmıştır.

Çelik Destek

H profil tip çelik destek elemanı olarak yer altı kazılarında kullanılmıştır. JIS şartnamesine (SS400) ve tünel destek çizimlerine eşdeğer olarak H profil kemer HEB boyutlarına uygun olarak kullanılmıştır.

Kaya Bulon

Tanımlanması gereken birkaç kaya bulon tipi vardır. Kaya bulonları kombine olarak iki veya daha fazla şekilde tünel tahkimat sistemi içerisinde kullanılabilir.

Minimum Kaya bulonu gereksinimleri

- Çap: 25mm
- Yükleme verimi: 120 kN
- Kırılma Yüklemesi: 180 kN
- Bağlama metodu: Tamamen çimento enjeksiyonu ile birlikte kapsülleme

SN Tip Kaya Bulonu

SN bulonları çimento ile çevreleyen kayaya bağlanmış deforme çelikten yapılan bulonlardır. Yükleneceği delikler işlem öncesi tamamen çimento ile doldurulur. Tüm tünel boyunca SN tip bulonlar kullanılmıştır.

İlk tahkimat işlemleri tamamlandığında ve püskürtme beton basıncı gereken basıncın %15'ine ulaştığı zaman kaya ortamı için bulon delgisi başlanır. Her ring üzerine 74-80 arasında bulon delgisi yapılmıştır. Delgi işlemi Atlas Copca Hydraulic Drilling Jumbo adı makine ile yapılmaktadır. Deliklerin çapları 57 mm olarak belirlenmiş ve delgi bu bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Yönü ise yüzeye doğru radyal yönde olmuştur. Kaya bulonları tahkimat sistemlerine göre belirlenmiştir.

Tablo 6.21: Farklı çimento/su oranında karakteristikler

Çimento /su oranı	Çimento hortumu sonundaki karakteristik	İşlem sırasında karakteristik
< 0.30	Kuru, sert uzun yapıda büküldüğünde kırılır	Ele yapışmayacak kadar kuru ve top haline getirilebilir.
0.30	Nemli uzun yapı. Zamanla erir.	Tamamiyle flexible. Ele yapışır. Yumuşak toprak halinde yuvarlanır
0.35	Islak yapı. Yapı tamamen zamanla erir	Anında ele yapışır. El çevrilince elden sarkar.
0.4	Yapı kendi ağırlığı ile akar	Ele yapışır ancak sallanınca özgür kalır.
0.5	Anında akar ve zemine yapışır	Sallamaksızın elden düşer

Çimento Harcı

Bu eleman en önemli bağlayıcı birimlerden bir tanesidir. Çimento oranı zemin suyuna göre değişkenlik göstermektedir. Genellikle Portland çimentosu kullanılmıştır.

Batı Şaftının toplam derinliği 58 metredir. Bu miktarın 15,5 metresi zemin kotundan olup 42,5 metresi zeminden derine doğrudur (Tablo 6.22).

Tablo 6.22: Batı şaftı derinlik ve yükseklik

Yükseklik (m)	Derinlik (m)	Kazılan alan (m ³)	Tip Kesit	Kazı Yöntemi
+15.5m				
-5.5m	21	589	-	Cut and cover
-25.5m	20	~450	SK-WVS	Non-TBM Tünel Yöntemi
-42.5m	17	~500	SK-WVS'	Non-TBM Tünel Yöntemi



Şekil 6.19: Batı Şaftı



Şekil 6.20: Batı Şaftı

6.11.2. Platform Tüneli ve Merkez Yürüme Tüneli Tahkimat Sistemleri

Proje kapsamında açılacak kuzey ve güney platform tünelleri ve merkez yürüme tüneli için öncelikle hem araştırma amaçlı hem de çalışma alanının şehir içi yapılaşmanın yoğun olduğu bir bölge olmasından dolayı tünelin etkileri önceden anlamak ve gözlemlemek amacıyla aynı güzergah üzerinde pilot tüneller açılmıştır. Pilot tüneller kazıldıktan sonra Platform tünelle genişletilmiştir.

Püskürtme Beton

Bu tüneller için kullanılan püskürtme betonun özellikleri aşağıdaki tabloda belirtilmiştir (Tablo 6.23).

Tablo 6.23: Platform ve Merkez yürüme tüneli için püskürtme beton karakteristikleri

Birim	Tanım	Not
Beton sınıfı	C20/25	EN206
Hedef basınç	>18MPa	Numune (10*10)
Basınç	Olgunlaştıktan 28 gün sonra	İlk kuvvet hesaba katılmalıdır
Basınç gelişimi	1 gün sonra 5 Mpa 28 gün sonra 18 Mpa	1 Gün kuvveti çekme testi ile hesaplanmalıdır
Çimento Tipi	CEM I-OPC-42,5	OPC 42.5- EN197-1
Max. Agrega boyu	12mm	

Gereken püskürtme beton gücü uzun vadeli 18 mPa (28 gün), kısa vade için 5 Mpa olarak belirlenmiştir (1 gün). Başlangıç basıncı için gereken delgi kuvveti ise;

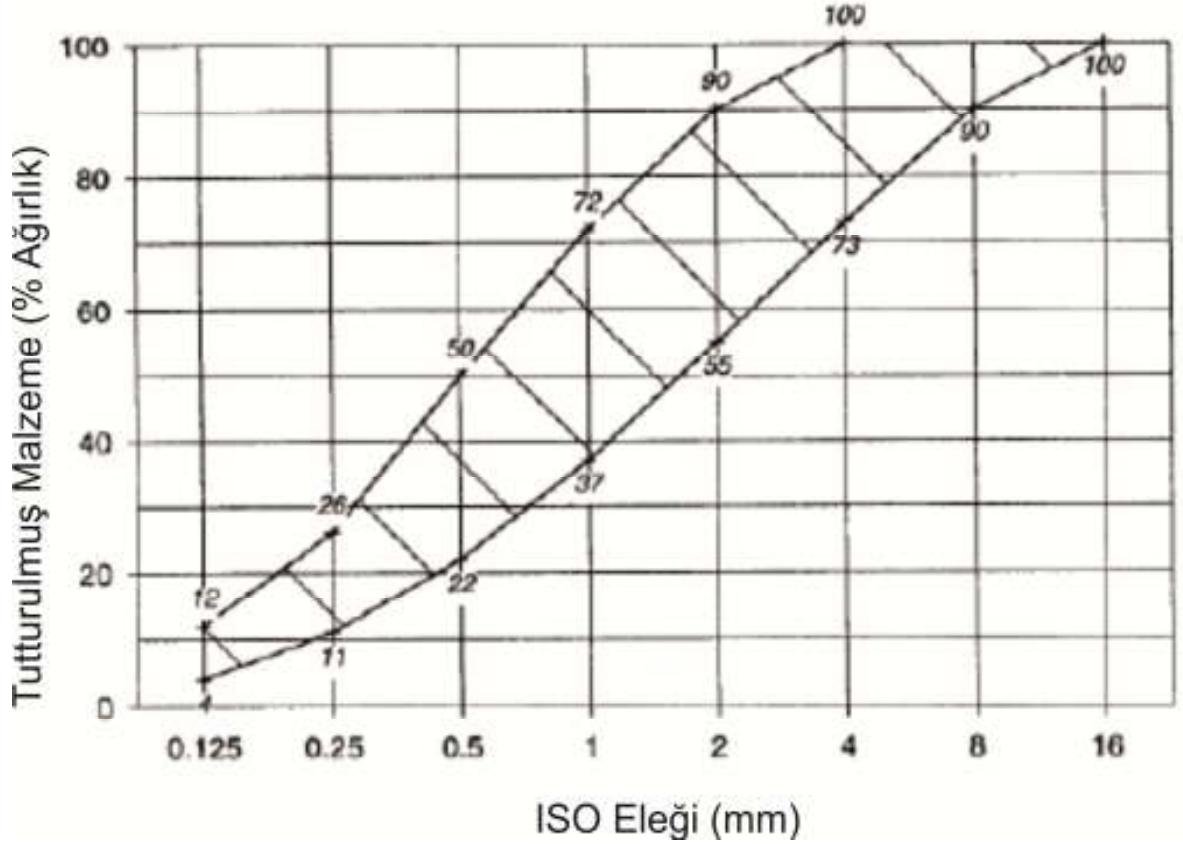
- 2 dakika sonra: 260 N
- 5 dakika sonra: 380 N
- 10 dakika sonra: 450 N

Olarak belirlenmiştir. Gereken püskürtme beton karışımı ise 2006 Japon tünel açma standartına göre belirlenmiş olup;

- Birim çimento miktarı: min 360 kg
- Su çimento oranı: 45 ila 55 %
- İyi agrega oranı: 55 ila 70 %
- Hızlandırıcı oranı: 4 ila 8%

Olarak belirlenmiştir. Gereken püskürtme beton içeriği; Püskürtme beton çimento ise Avrupa spesifikasyonu: Çimento EN197-1'e uygun olmalıdır. %7 ila 11 arasında C3A içeriği olmalı.

Agregalar: Agregaların eğrisi normal olarak aşağıdaki gibi olmalıdır. Uygun süreç ve malzemeler yüklenici tarafından seçilmelidir. Kuru karışımlar için daha uygun ve ince seçimler yapılmalıdır (Şekil 6.21).



Şekil 6.21: Önerilen agregada derecesi

Çelik Hasır

Q 188*188 tip çelik hasır (150*150 mm, 6 mm çapta 2,93 kg/m²) destek elemanı olarak kullanılmıştır. Çelik Hasır sağlayıcısı ÇESAN TS 4559, BS 4483 ve ASTM-A 497 standartlarını kullanmaktadır.

Çelik İksa

Yer altı kazılarında H tipi profil çelik destek elemanı olarak kullanılmıştır (Tablo 6.24).

Tablo 6.24: JIS ve EN standartlarının karşılaştırılması (Taisei, 2006)

JIS G 3101-SS400 (verim kuvveti: 245 N/mm ²)					EN 10025 1993-S 275 JR D IN 17100-ST44-2 (verim kuvveti: 275 N/mm ²)				
Seri (mm)	Birim Genişliği (kg/m)	Eylemsizliğin ikinci dakikası (cm ⁴)	Bölüm Modülü (cm ³)	Verim anı (Nm)	Verim anı (Nm)	Bölüm Modülü (cm ³)	Eylemsizliğin ikinci dakikası (cm ⁴)	Birim Genişliği (kg/m)	Seri (mm)
100x100	16,9	378	75,6	18.522	23,760 (128%)	86,4	432	20,4	100B
125x125	23,6	839	134	32.830	38,500 (117%)	140	838	26,7	120B
150x150	31,1	1.620	216	52.920	57,750 (109%)	210	1.471	33,7	140B
200x200	49,9	4.720	472	115.640	113,850 (%98)	414	3.729	51,5	180B

Çelik iksa ve destek seçiminde önemli olan verim anıdır. Verim anı, verim kuvveti ve bölge modülü ile hesaplanır. Tablodan da görüleceği üzere karşılaştırılma neticesinde 100x100 yerine 100B, 125x125 yerine 120B, 150x150 yerine 140B ve 200x200 yerine 180B çelik destek sistemi kullanılmıştır.

Çelik iksalar aciliyete göre mühendisler tarafından çeşitli şekillerde kullanılabilir. 3 eksenli yapılardır. TS 708 standartına göre üretilmiş iksalar destek sisteminde kullanılmıştır. Çelik iksanın demirler 12 mm çapındadır.

Bulon

Minimum gereksinimler aşağıdaki gibidir.

- Çap: 25mm
- Verimli Yükleme: 120 kN
- Kırılma Yükleme: 180 kN
- Yükleme yöntemi: Tamamen enjeksiyonlu

Tablo 6.25: Farklı zemin sınıfları için tip kesitler

Tünel mesafesi	Tip Kesit	Destek Sınıfı	Kazı bölgesi (m3)
0--6	CE'	CII Ra-DI Ra-DII Ra	67.5--70.5
6--12	CE	CII Ra-DI Ra-DII Ra	59.1--61.8
12--43.5	CE	CII-DI-DII	58.2--59.7
43.5--52	CE Rc	DII RC	66.3
52--102	CE	CII-DI-DII	58.2--59.7
102--110	CE Rc	DII RC	66.3
110--141.25	CE	CII-DI-DII	58.2--59.7
141.25--147	CE	CII Ra-DI Ra-DII Ra	59.1--61.8
147--153	CE'	CII Ra-DI Ra-DII Ra	67.5--70.5

Kullanılan çelik iksa ve destek tipleri bu kesitler içerisinde değişiklik göstermektedir. Aşağıdaki tabloda Merkez Yürüme tüneli için kullanılan iksa çeşitleri ve özellikleri bulunmaktadır (Tablo 6.25).

Tablo 6.26: Destek tipi ve Çelik Destek tipi

Tip Kesit	Destek Modeli	Çelik Destek Tipi	Parça Adeti
CE'	SK-CII Ra	HEB-125 LG-95-20-30	4 2LG
	SK-DI Ra	HEB-125 LG-95-20-30	4 2LG
	SK-DII Ra	HEB-150 LG-115-26-34	4 2LG
CE	SK-CII-2	LG-95-20-30	4 LG
	SK-DI	HEB-125	4
	SK-DII	HEB 150	4
	SK-CII Ra	HEB-125 LG-95-20-30	4 2 LG
	SK-DI Ra	HEB-125 LG-95-20-30	4 2 LG
	SK-DII Ra	HEB-150 LG-115-26-34	4 2LG
	SK-DII Rc	LG-115-26-34 HEB 180 or 120	4 LG 4

Tablo 6.27: PF' ve CN' için tünel lokasyonları

Kesit adı	Tünel Lokasyonu
PF'	TD 0+20--TD +26 (K ve G) TD0+171--TD 0+177 (K ve G)
CN'	TD CN 0--0+005 (K ve G)

Çelik destek seti paletli vinç veya benzeri teçhizat ile monte edilmiştir ve her biri için saha mühendisleri doğru pozisyon ve geometriyi tünel içerisinde belirlemiştir. Her çelik iksa öbürüne civata ve somunlarla bağlanmıştır. Çelik çubuk metallere üzerine çelik iksalar doğru pozisyonda konularak bir diğer iksaya bağlanmıştır.

Pilot tüneller bahsedildiği gibi platform tünellerden önce kazılmıştır. Pilot tünellerin platform tünellere genişletilme işleminde geçici destek demirleri kullanılarak, pilot tünel platform tünelin üst yarısı olarak genişletilmektedir. Ancak bağlantı yürüme tüneli ile birleştiği bölgelerde jeolojik şartlarında kötüleşmesi yüzünden normalden farklı bir uygulama izlenmiştir.

Aşağıdaki tabloda tahkimat ile ilgili olarak kullanılan sistemler ve adetleri bulunmaktadır. Destek B RMR'nin nispeten düşük olduğu (20 altında) yerlerde kullanılmıştır. Destek A ise genel olarak kullanılan tahkimat sistemidir (Tablo 6.28).

Tablo 6.28: : Destek Sınıfı-Kesit tipi ilişkisi

	Tüne ismi	PFV-L		PFV-S		PFV-S (Doğu)		PFV-L(Doğu)		PF					
	Destek Sınıfı	CII	CII-R	CII-R	CII	DI	DI-R	DI-R	DII	CII	DI	DII-R	DII	DII-R	DI
	Kazı Adımı	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1	1	1,2	1	1	1	1	1
Destek A	Çelik İksa(Temel)	H-150	H-150(H-150)	H-125	H-125	H-125	H-125	H-180b	H-200	H-125	H-125	H-150	H-150	H-150	H-125
	Püskürtme Beton (Temel cm)	20 (10)	20 (25)	12,5(10)	10(10)	15 (10)	20 (10)	27,5(27,5)	25(10)	10(10)	15 (10)	25 (10)	20 (10)	25 (10)	15 (10)
	Kaya bulonu uzunluk (m) x alan (m)	4 x1,2	4 x1,2	3x1,5	3x1,5	4 x1,2	4 x1,2	6x1	6x1	3x1,5	4 x1,2	4 x1,2	4 x1,2	4 x1,2	4 x1,2
Destek B	Çelik İksa		H-150(H-150)	H-125	90-20-30		H-125	H-180b				H-150		H-150	
	Püskürtme Beton(cm)		22,5(22,5)	12,5(10)	15(10)		17,5(10)	25(25)				22,5 (10)		22,5 (10)	
	Kaya bulonu uzunluk (m) x alan (m)		4 x1,2 6x1,2	3x1,5 4x1,5	3x1,5		4 x1,2 6x1,2	6x1 6x1				4 x1,2 6x1,2		4 x1,2 6x1,2	

7. JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER

Sirkeci İstasyonu konum itibariyle yerleşimin yoğun olduğu, tarihi yapılarla dolu bir bölgede bulunmaktadır. Jeolojik profilde bulunan üç farklı birim (Trakya Formasyonu, Kuşdili Formasyonu, Dolgu) arasında Trakya Formasyonu tünel içi deformasyona negatif etki etmemekle birlikte yüzey yapılarına da fazla bir etkisi yoktur. Ancak dolgu zemin ve Kuşdili Formasyonu Trakya Formasyonundan farklı bir şekilde çalışmaktadır. Yapılan kazılar nedeniyle yer altı su seviyesi olduğundan aşağı seviyeye inmiştir. Bu sebeple dolgu zemin ve Kuşdili Formasyonu içerisinde bulunan su tünele doğru inmiş, bunun neticesinde oluşan boşluklar nedeniyle yüzeyde yüksek miktarda oturmalar oluşmuştur. Sirkeci istasyonu için yapılan hesaplamalar neticesinde (TGN, 2010) tünel içi oturmalar ve yüzey oturmaların 2/3'ü su gelimi nedeniyle, 1/3 kazı yöntemi nedeniyle olduğu belirlenmiştir. Özellikle tünel kesitinin büyüdüğü bölgelerde deformasyonun arttığı gözlenmiştir.

Oluşan deformasyonu hesaplamak için Tünel güzergahı dahilinde tünel için tavan oturması, konverjans ölçümleri, püskürtme beton üzerine gelen basıncı ölçmek amacıyla basınç hücreleri ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca tünel güzergahı dışında yüzey yapıları için 245 adet bina ve oturma bulonları kullanılmıştır. Ayrıca yapılan inklinometre ve extansometre ölçümleri ile gerektiğinde gün aşırı deformasyonlar izlenmiştir (Tablo 7.1).

Tablo 7.1: Platform tünelleri ve Merkez Yürüme Tüneli için yapılan ölçümler

Birim No.	Ölçüm birimi	Kullanılan Ekipman	Lokasyon
1	Bina Oturması	Optik seviye Oturma bulonları	Çevreleyen Binalarda
2	Bina Deformasyon Bina dönmeleri	Toplam Merkez (Optik Hedefler)	Çevreleyen Binalarda
3	Konverjans (3D)	Konverjans Bulonları	Tünel İçerisinde
4	Püskürtme Betondaki Gerilme	Basınç Hüresi	Tünel İçerisinde

Tablo 7.2: Batı shaftı için yapılan ölçümler

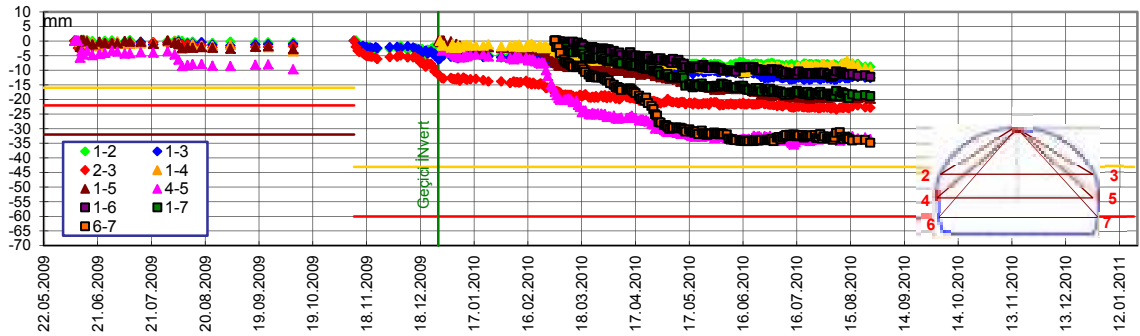
Birim No.	Ölçüm birimi	Kullanılan Ekipman	Adet/bölüm Sayısı	Lokasyon		
				Zemin Seviyesi	Yükseklik	
1	Bina Oturması	Optik seviye Oturma bulonları	3 points	Zemin Yüzeyinde	Çevreleyen Binalarda	
2	Bina Deformasyon Bina dönimleri	Oturma Bulonları	26 adet		Çevreleyen binalarda, binaların tepe ve zeminlerinde aynı seviyede	
3.1	Konverjans (3D)	Konverjans Bulonları	8 bölge (her bölge için 4 bulon toplam 32 bulon)	Şaft içerisinde	-1.5m	+14.0m
3.2					-14.5m	+1.0m
3.3					-21.5m	-6.0m
3.4					-27.5m	-12.0m
3.5					-33.5m	-18.0m
3.6					-39.5m	-24.0m
3.7					-45.5m	-30.0m
3.8					-51.5m	-36.0m
4.1	Deformasyon	Extansometre (L=1,3,5,7,9)	1 bölge (4 parça)	Şaft içerisinde	-39.5m	-24.0m
4.2			1 bölge (2 parça)		-45.5m	-30.0m
5.1	Püskürtme Betondaki Gerilme	Basınç Hücresi	1 bölge (2 parça)	Şaft içerisinde	-39.5m	-24.0m
5.2			1 bölge (4 parça)		-45.5m	-30.0m
6.1	Çelik Donatıdaki Gerilme	Gerilme Ölçer	1 bölge (2 parça)	Şaft içerisinde	-39.5m	-24.0m
6.2			1 bölge (2 parça)		-45.5m	-30.0m

8. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYONLARININ İNCELENMESİ

Tezin bu bölümünde litoloji, tünel içi ölçümler, su gelimi, kazı ilerleme ilişkisi, örtü kalınlığı, kazı destek sistemlerinin deformasyonla ilişkisi incelenmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Taisei firması tarafından yapılan Konverjans, Tavan Oturması, Yüzey oturmaları, püskürtme beton basınçları ölçümleri bu çalışmada incelenmiştir.

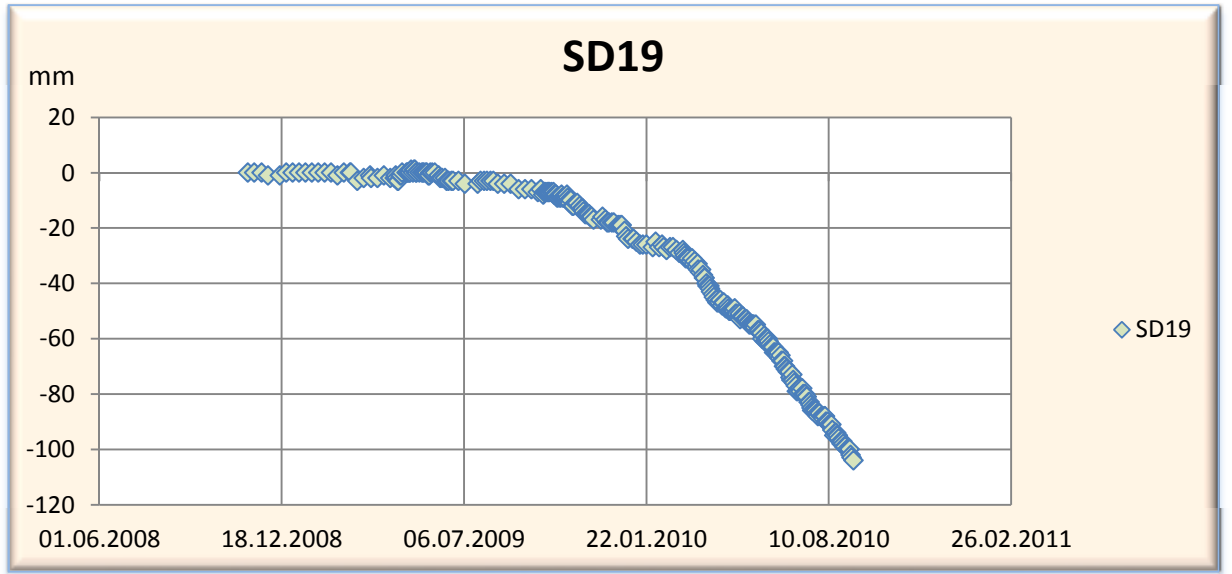
8.1. LİTOLOJİ VE YÜZEY DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Kumtaşı litolojileri, çamurtaşı ve kiltasına göre dayanımlı birimlerdir. Kiltaşlarındaki dayanımın diğer birimlere göre düşük olmasına ve buna bağlı daha yüksek deformasyonlar beklenmesine rağmen yüzey deformasyonları ile litoloji arasında böyle bir ilişki gözlemlenmemiştir. Diabaz daykının sokulumunun (Taisei jeoteknik raporu, 2006) bulunduğu Güney platform tüneli (Şekil 8.3) 0+200 civarında tünel içi deformasyon artmış, buna bağlı olarak yüzey deformasyonlarında da yükselme gözlenmiştir. Bu noktalarda tünel içi konverjans ve tavan oturması değerleri 5 - 6 cm'e ulaşmıştır. Buna paralel olarak yüzey deformasyonlarında artış gözükümüştür.

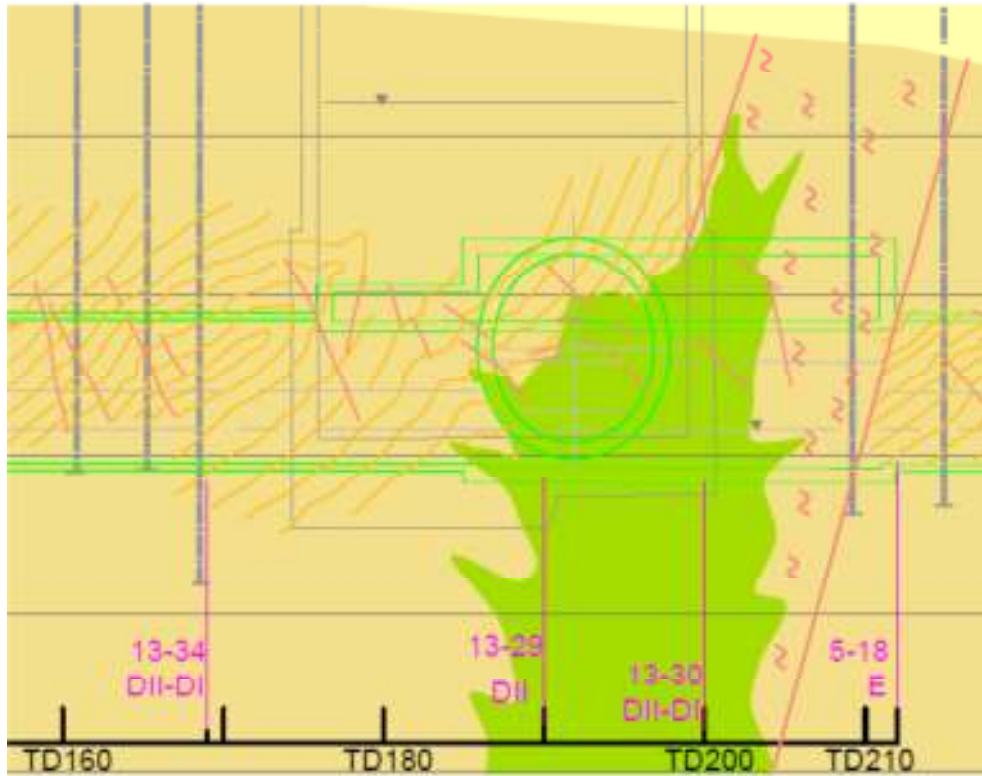


Şekil 8.1: Güney Platform Tüneli 0+206 Konverjans ölçümü

Bu artışa paralel olarak, bu km üzerindeki yüzey bulonlarında okunan yüksek deformasyon değerleri bunu kanıtlar nitelikte olmuştur (Şekil 8.1).



Şekil 8.2: SD19 bulonu oturma grafiği



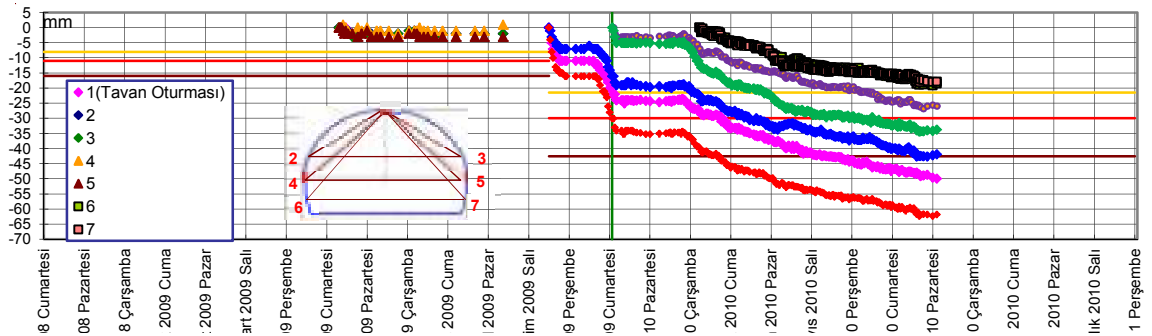
Şekil 8.3: Güney Platform Tüneli 0+190 dayk sokulum gösterimi (Taisei dizayn raporu, 2006)

8.2. KAZI KADEMESİ VE KESİT BOYLARI İLE DEFORMASYON İLİŞKİSİ

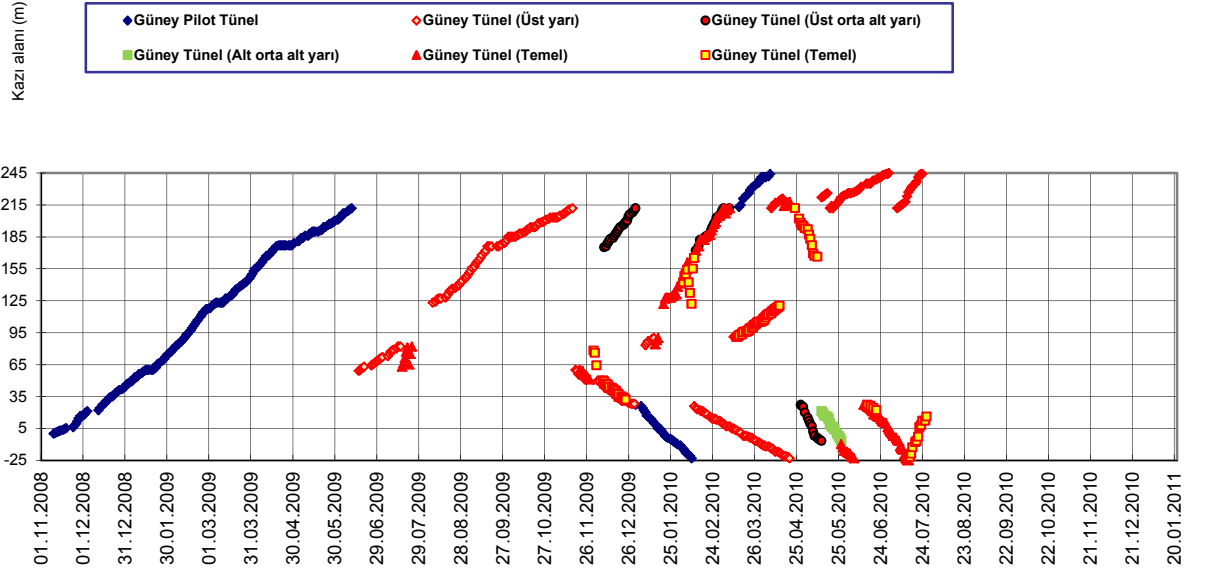
Tünel güzergahı boyunca, uygulanan kazı adımları ve kesit boyları ile deformasyon ilişkisi üç tünel içinde belirtilmiştir.

8.2.1. Kazı Kademesi ve Kesit Boyları İle Tünel İçi Deformasyon İlişkisi

Kazılara öncelikle, Güney Platform tünelinden başlanmıştır. Güney platform tüneli genel olarak 10-12 metre çapında kesitle kazılmıştır. Önce pilot tünel kazısı gerçekleştirilmiş, ardından bu tünel normal kesite genişletilmiştir. Tünel kesitinin genişlediği yerlerde çap 16 metreye kadar ulaşmıştır. (PF' PFV-L) Bu noktalarda tünel kazısı 4 adımda yapılmıştır. En geniş kesit olan PFV-L'de bu sayı 5'e çıkmıştır. Normalde 3 yarı ile kazılan tünelde en yüksek deformasyonun olduğu anlar temel kazısı öncesi kazılan alt yarılardır. Alt yarılarda deformasyon ölçülen en yüksek değerlere gelmiştir. Özellikle tünelin en doğusundaki geniş kesitler, 0+190'dan itibaren Kuzey ve Güney Platform tünelleri için deformasyonun yükseldiği noktalar olmuştur. Bu noktalarda büyüyen kesitler nedeniyle yükselen deformasyonlar, aynı zamanda yüzey deformasyonunu tetikleyen sebep olmuştur. Buna paralel olarak görüldüğü üzere, 4-5 yönündeki konverjanslar en hızlı gelişen konverjanslar olmuştur. Pin yönüne baktığımızda bu yönler, alt yarı bölgesine gelen basıncı gösteren bölgelerdir. 0+206'da -60,4 mm ölçülen konverjans değeri bu tünel için ölçülmüş en yüksek konverjans değeridir (Şekil 8.4).

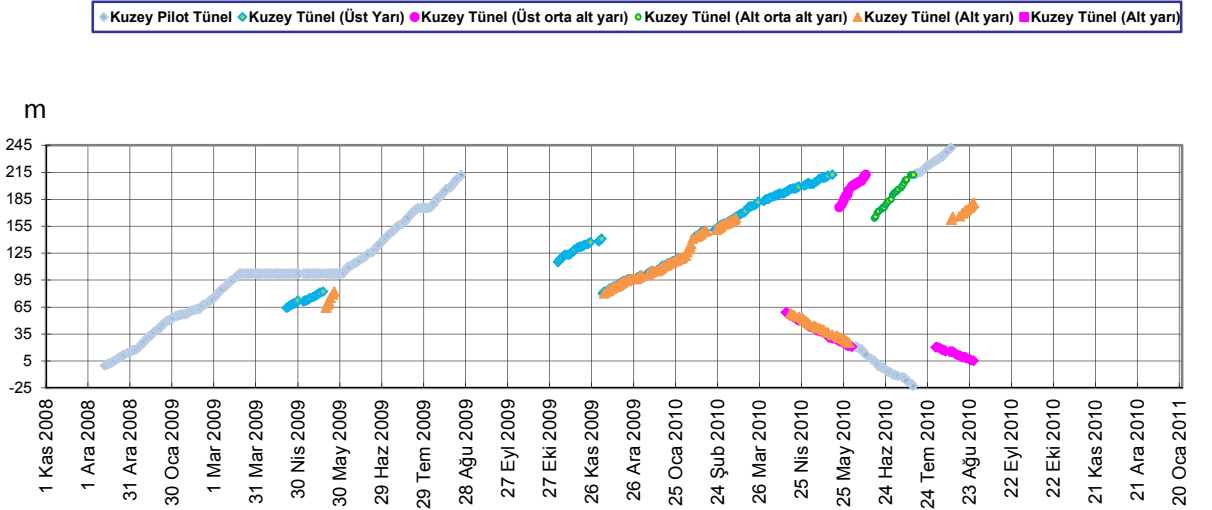


Şekil 0.4: Güney Platform Tüneli 0+206 tavan oturması



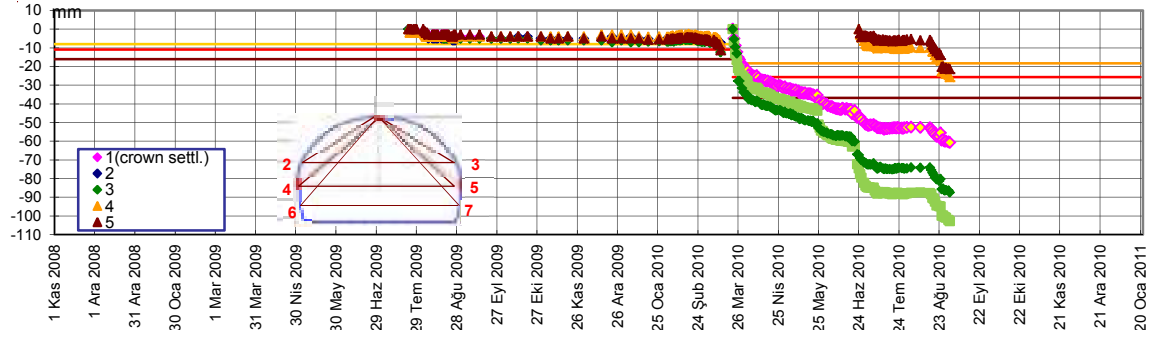
Şekil 8.5: Güney Platform Tüneli kazı adımları

Şekil 8.5'te görüldüğü gibi alt yarı kazısının yapıldığı tarihte (25 Mayıs 2010), Güney Tüneli için tünel içi deformasyonlarda gözle görülür bir artış gözlenmiştir. Aynı şekilde Kuzey Platform tüneli için bu durum geçerli olmuştur.

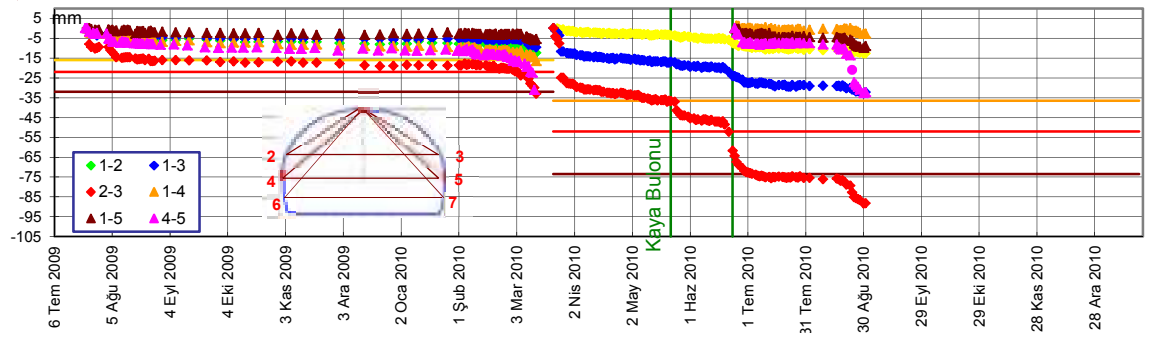


Şekil 8.6: Kuzey Platform Tüneli kazı adımları

25 Temmuz tarihlerinde yapılan alt yarı kazıları, aynı tarihlerde ölçülen tünel içi deformasyonları hızlandırmıştır. Şekil 8.6 ve 8.7'de görülüyor ki, kesit genişledikçe ve kazı ilerledikçe deformasyon hızlanmaktadır.



Şekil 8.7: Kuzey Platform Tüneli 0+175 tavan oturması

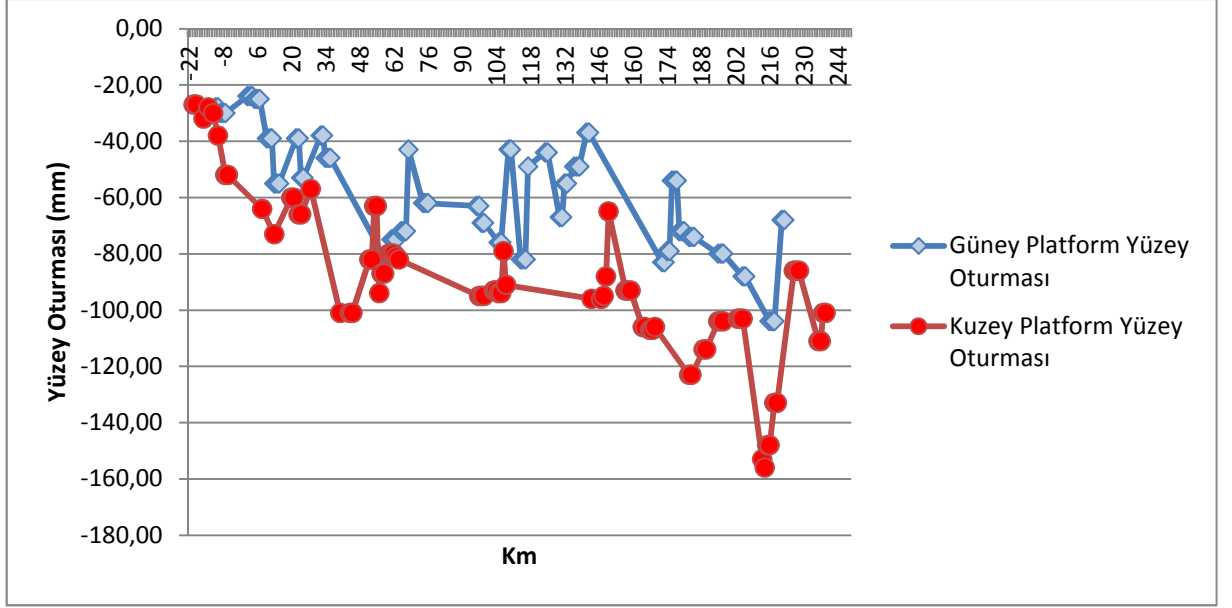


Şekil 8.8: Kuzey Platform Tüneli 0+175 konverjans değerleri

Kuzey Platform tüneli için 25 Temmuz 2010 tarihinde alt yarı kazısına bağlı olarak deformasyon artmıştır. Kazı adımları arttıkça tünel içi deformasyonlar artış göstermiştir. -102 mm ile tavan oturması, -85 mm ile konverjans, kuzey tüneli için ölçülmüş en yüksek değerlerdir.

8.2.2. Kazı Kademesi ve Kesit Boyları ile Yüzey Deformasyon İlişkisi

Kazı ilerlemesi arttıkça tünel içi deformasyonlar gibi, yüzey deformasyonlarında da artış olması beklenmektedir. Güney platform tüneline göre kuzey platform tüneline bu deformasyon daha yüksektir. Bunun sebebi Güney platform tüneline önce kazılmasının yarattığı zayıf zondan etkilenmesidir. İki Tünel içinde 0+190'dan itibaren, kesit tipinin büyümesi sebebiyle yüksek deformasyonlar oluşmuştur. Güney platform tüneline bu noktalarda ölçülen en yüksek oturma değeri -102 olurken, Kuzey platform tüneline bahsettiğimiz sebepten dolayı bu rakam -150 civarında olmuştur.

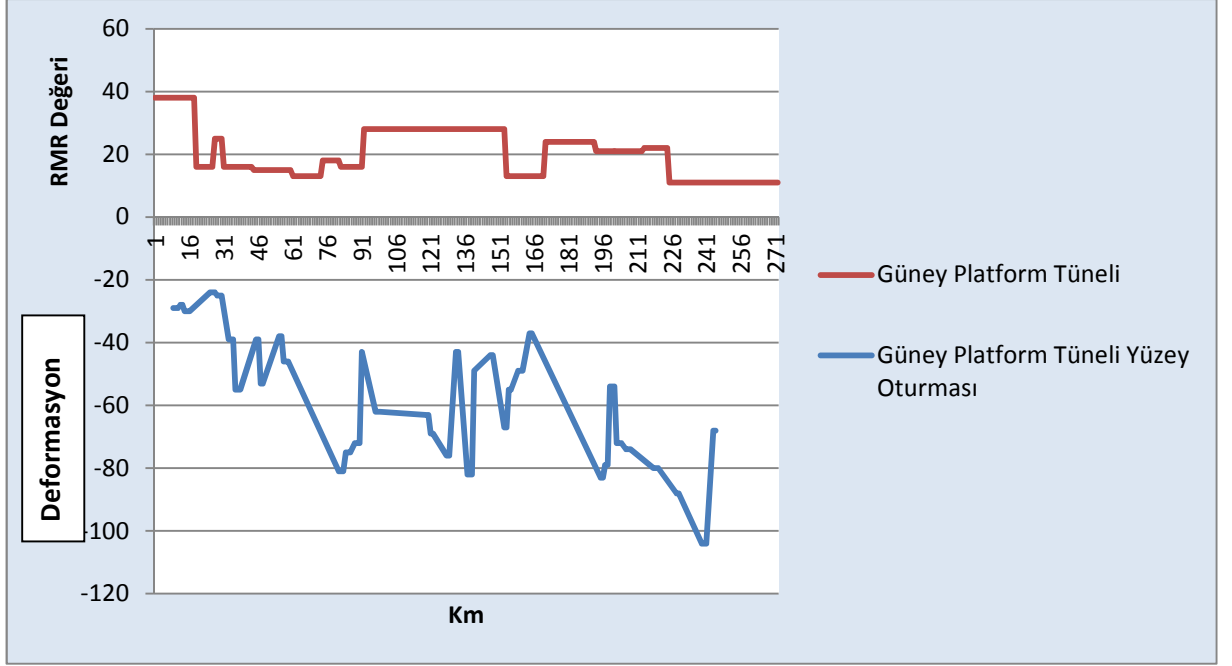


Şekil 8.9: Kuzey Platform Tüneli ve Güney Platform Tüneli Yüze oturması kıyaslaması

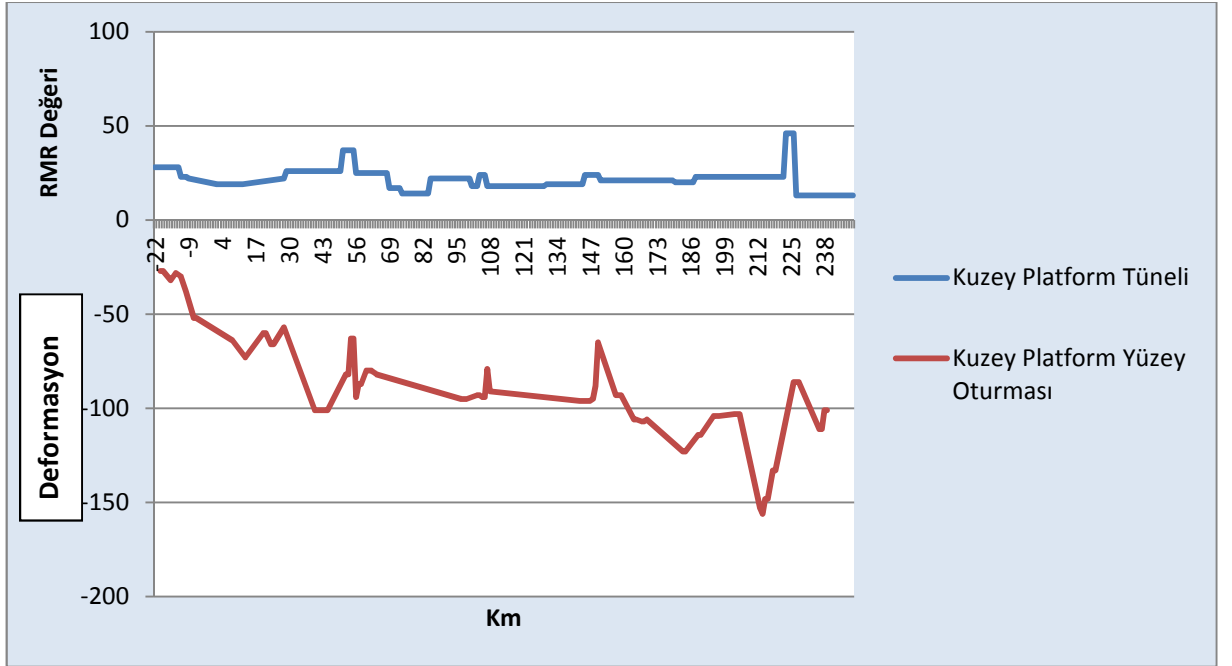
Tüm güzergah boyunca oluşan yüze oturmalarına bakıldığında, Kuzey platform tüneli güzergahında ki oturma miktarları daima fazla olmuştur.

8.3. KAYA KÜTLESİ SINIFI RMR İLE DEFORMASYON ARASINDAKİ İLİŞKİ

RMR en yüksek değerlere ulaştığı bölgelerde, Güney tüneli için 40 olan noktalarda tavan oturması ve konverjans değerleri -15, -20 aralığında değişmiş, yüze oturması ise -50 mm aralığında değişmiştir. Ancak RMR'nin 15 civarı olduğu noktalarda tünel içi deformasyonlar -50 mm civarlarında seyretmiştir. Buna paralel olarak yüze oturmaları ise 80 – 100 mm arasında belirlenmiştir. Buna benzer olarak Kuzey tünelinde RMR ile tünel içi ve yüze deformasyonları ters orantılı olarak gelişmiştir (Şekil 8.10 ve 8.11).



Şekil 8.10: Güney Platform Tüneli Yüzey oturması-RMR ilişkisi



Şekil 8.11: Kuzey Platform Tüneli Yüzey oturması RMR ilişkisi

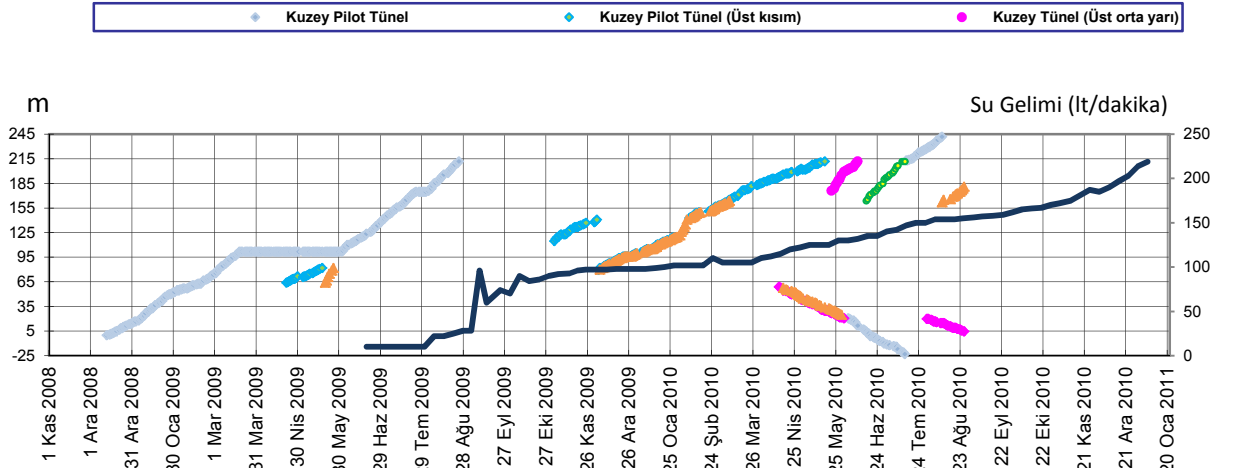
Grafiklerden görüldüğü üzere genel olarak, RMR yükseldikçe deformasyon düşmekte, RMR düştükçe deformasyon artmaktadır.

8.4. ÖRTÜ KALINLIĞI İLE YÜZEY DEFORMASYON İLİŞKİSİ

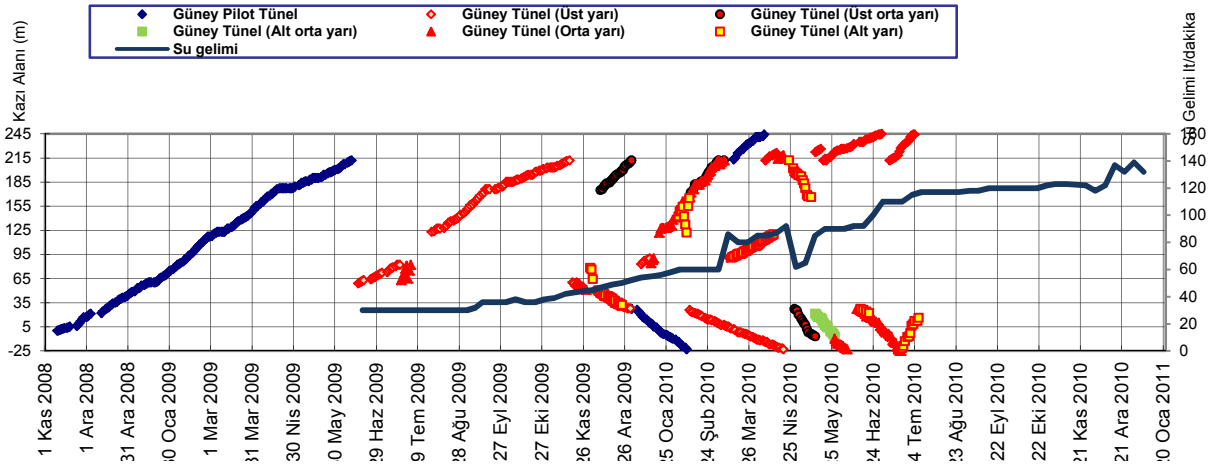
Örtü kalınlığı, tünel güzergahı boyunca belirgin olarak değişiklik göstermemiştir. Bu yüzden deformasyon ile örtü kalınlığı arasında net bir ilişki gözlenememiştir. Ancak dolgu zemin altındaki Kuşdili Formasyonunun kalınlığının azalması ve nispeten dolgu zeminin arttığı bölgelerde deformasyon 5 mm civarında artış göstermiştir. Ancak bu deformasyon artışının direkt olarak bu sebepten olup olmadığı net değildir.

8.5. SU GELİMİ VE KAZI İLERLEME İLE DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Tünel kazı adımları ilerledikçe tünelin yarattığı etki zonunda genişlemiş ve su gelimi artmıştır (Şekil 8.12)

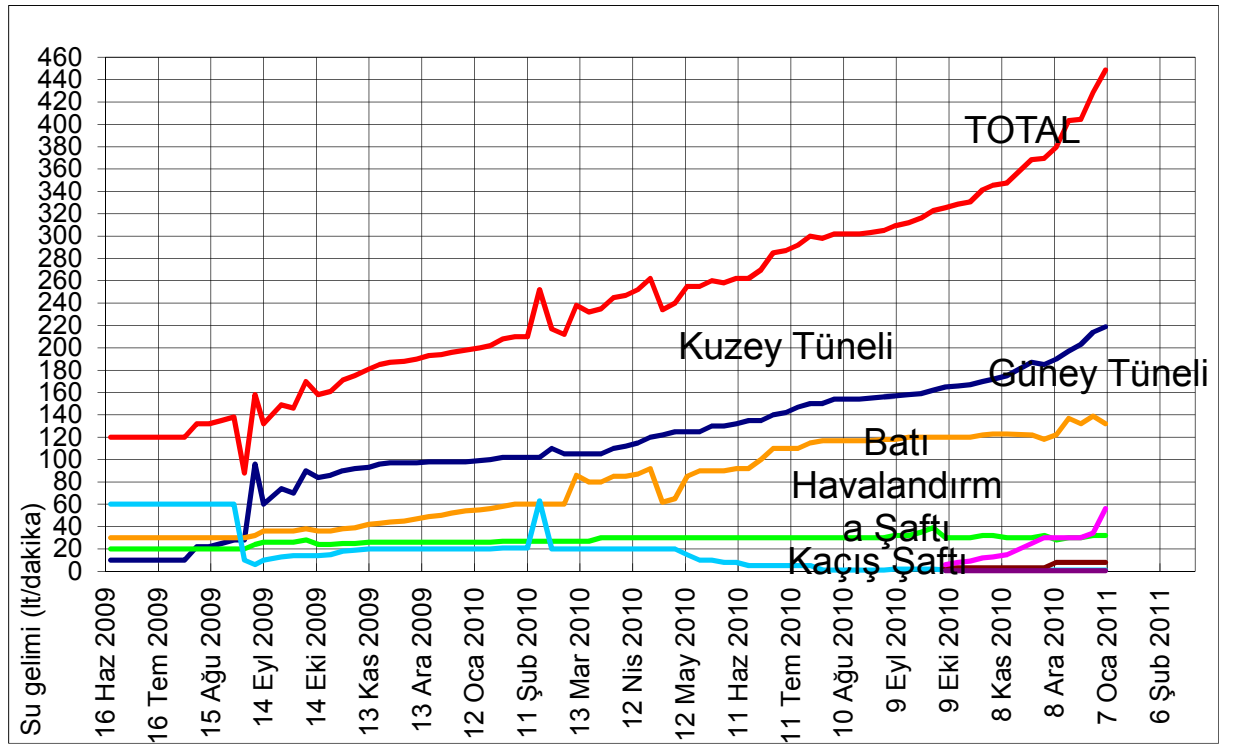


Şekil 8.12: Kuzey Platform Tüneli kazı ilerlemesi-su gelimi ilişkisi



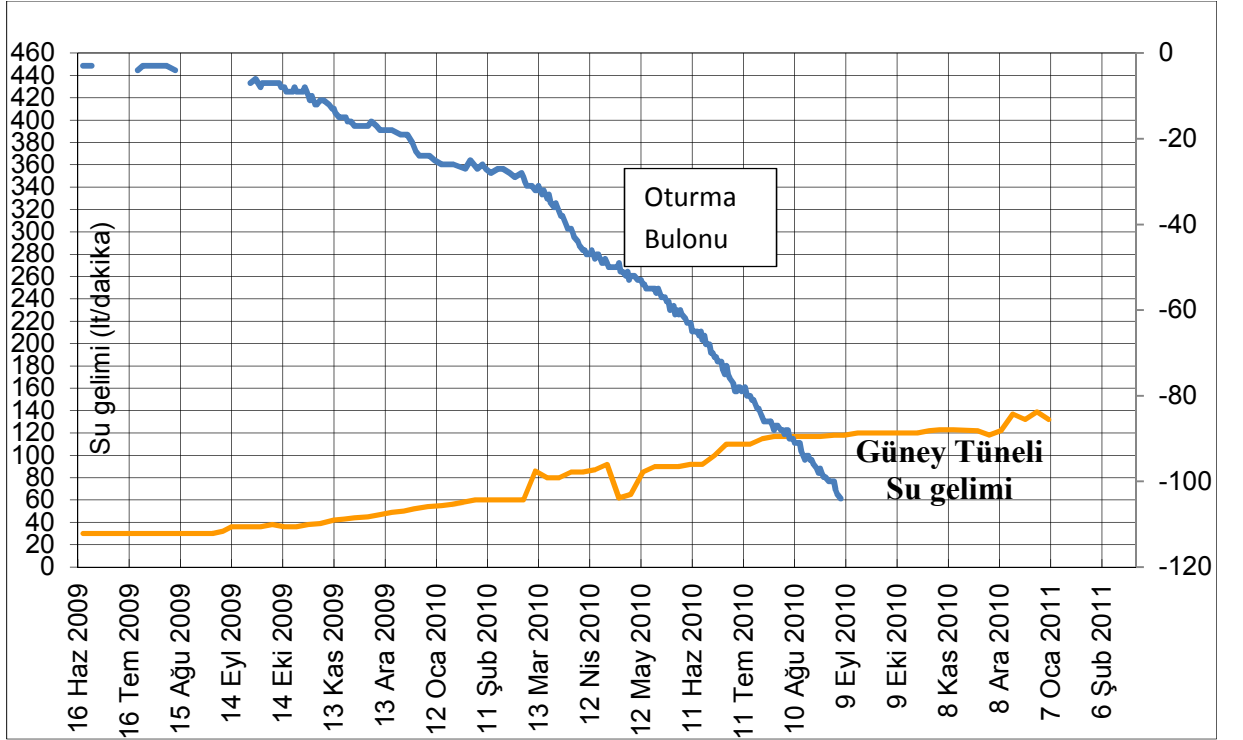
Şekil 8.13: Güney Platform Tüneli kazı ilerlemesi-su gelimi ilişkisi

Kazı adımları arttıkça, kazı derinleştikçe tünele gelen su miktarı doğru orantılı olarak artmıştır. Bunun sebebi genişleyen tünel kesitidir. Tünel içinde yapılan sürenler, yapılan kimyasal enjeksiyonlar su gelimini tam olarak durduramamıştır.

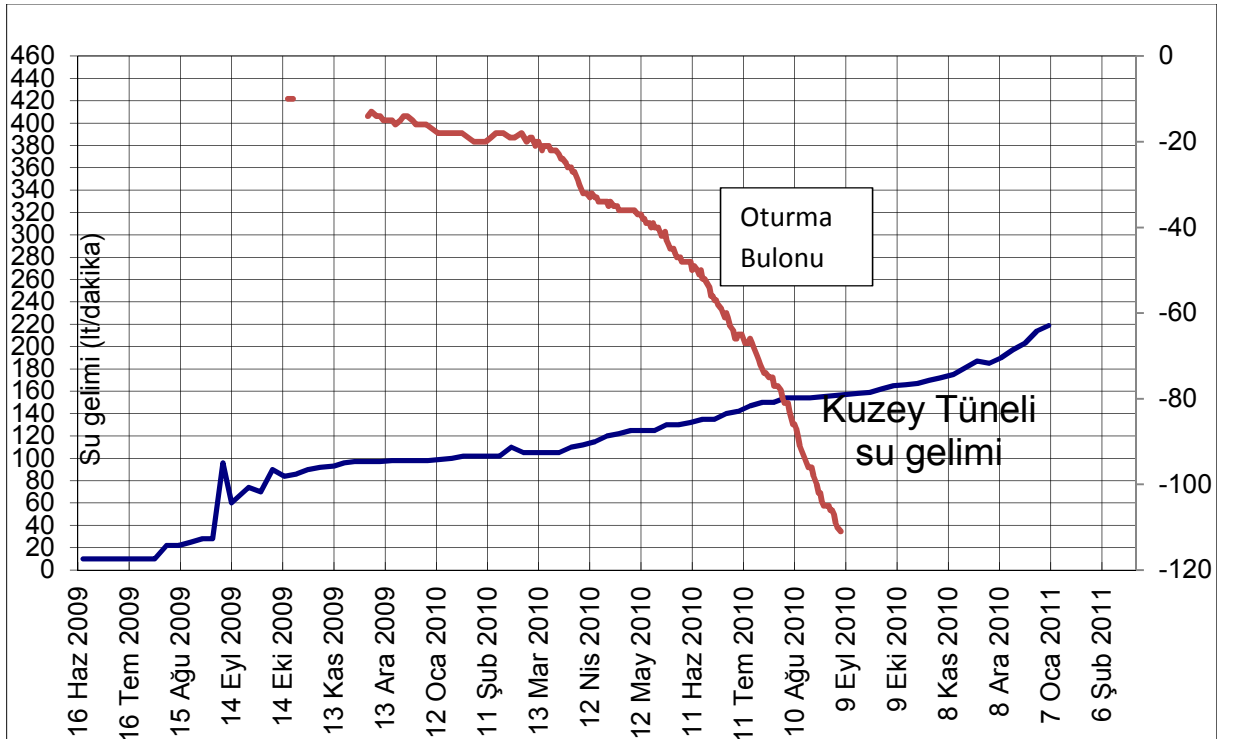


Şekil 8.14: Sirkeci istasyonu su gelim grafiği

Tüm kazı süresinde tünele toplam 460 lt/dakika su gelimi olmuştur. En çok su alan tünel kuzey tüneli olmuştur. Bunun sebebi ise kuzey tüneline, daha önce kazılan güney tüneline etki zonunda kalmasıdır (Şekil 8.15).



Şekil 8.15: Güney Platform Tüneli su gelimi-max ölçülen yüzey bulonu kıyaslaması



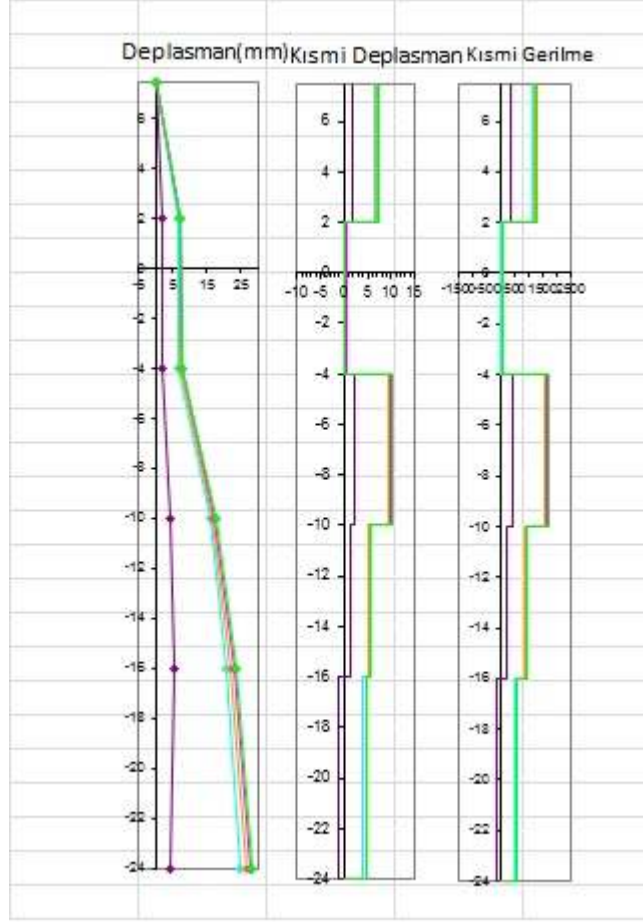
Şekil 8.16: Kuzey Platform Tüneli su gelimi- max ölçülen yüzey bulonu kıyaslaması

İki kıyasa baktığımızda genel durumu kanıtlar niteliktedir. Kuzey tünel güzergahı civarında bulunan bulon, güney tüneline göre daha yüksek deformasyon göstermiştir. Bu done bize kuzey tüneline, güney tüneline kazısı sonrasında oluşan gevşek zonu etkisinde kaldığını göstermektedir (Şekil 8.16).

Su gelimi yüzey oturmasını ve tünel içi oturmayı direkt olarak etkilemektedir. Tüneline içine gelen su, dolgu ve Kuşdili Formasyonunda boşluklar oluşturduğu için, yüzey oturması su geliminin fazla olduğu yerlerde hızlı olmuştur.

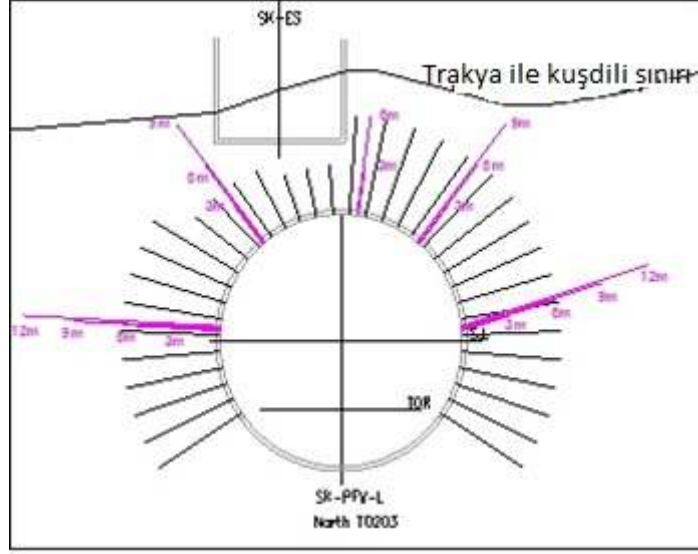
8.6. TÜNEL ETKİ ZONU VE DEFORMASYON İLİŞKİSİ

12 metrelik extansometrelerde ölçülen değerler gösteriyor ki, tüneline etki zonu 12 metreye kadar ulaşmaktadır.. Daha uzun ölçümler mümkün olmadığı için, tüneline etki zonu Sirkeci İstasyonu için en az 12 metre olarak kabul edilmiştir (Şekil 8.17)

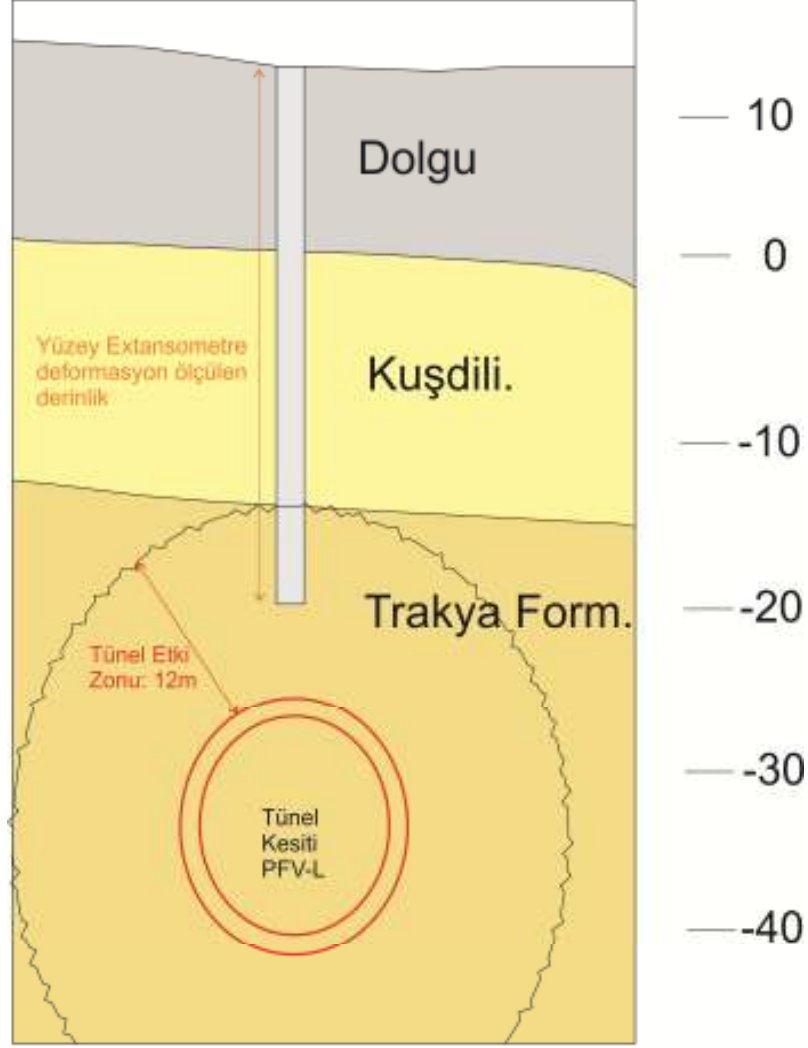


Şekil 8.17: Kuzey Platform Tüneli 0+212 yüzey Extansometre ölçümü

Bu noktadaki yüzey extansometrelerine baktığımızda ise deformasyon etkileri 0 kotunun altında 20 metreye kadar açıkça gözlenmektedir. Grafikteki ilk sütundaki mor eğri pilot tüneli geçtiği zamanı gösterirken, diğer eğriler sırayla üst yarı ve alt yarı kazılarını göstermektedir. Bu durumda -24 kotunda toplam deplasman 25 mm'yi bulmuştur.



Şekil 8.18: Tünel kesiti, Extansometre uzunluğu ve litoloji ilişkisi



Şekil 8.19: Tünel etki zonu diagram gösterimi

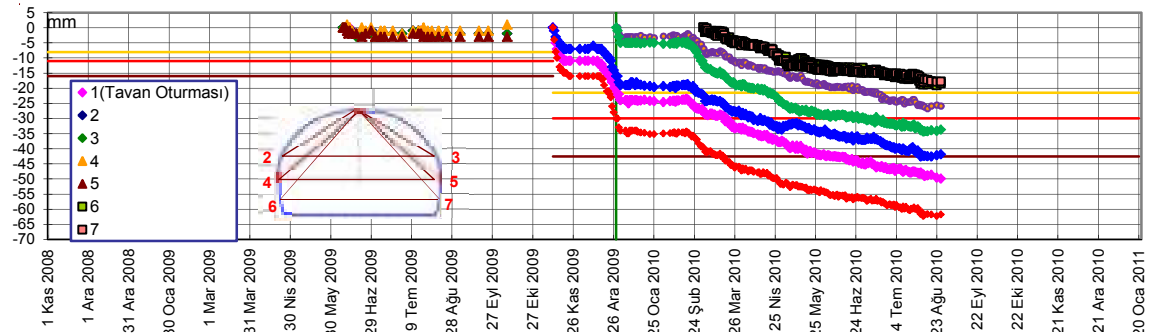
Deformasyon ölçülen en fazla derinlik, yüze extansometresi için 0+202'de 24 metre olmuştur. -20 kotu, tünelin etki zonu içerisinde kalmaktadır. -15 kotunda tünelin etki zonundan çıkılmasına rağmen deplasman değerleri yüksek olarak seyretmiştir (Şekil 8.19). Azalarak ilerleyen bu değerler +6 kotuna kadar sürmüş ve sıfırlanmıştır. Bu bilgi bize zemin hareketinin devam ettiğini göstermektedir. Bu durumda tünel aktivasyonu ile birlikte zemin hareketinin devamı sonucunda yüze oturmaları, su hareketinin etkisiyle bu bölgelerde yoğun olarak gözlenmiştir.

8.7. TÜNEL İÇİ VE YÜZEY DEFORMASYONLARI İLİŞKİSİ

Kuzey platform tüneline, Güney platform tüneline göre deformasyonlar yüksek olmuştur. Merkez yürüme tüneli alt yarısı kazılmadığı için ve kullanılan kazı yöntemi nedeniyle düşük deformasyon göstermiştir. Tüm tünel için geçerli bir durum vardır. Tünel için en hızlı yüzey oturmaları, ardından tavan oturmaları en son ise konverjans oturmaları gerçekleşmiştir.

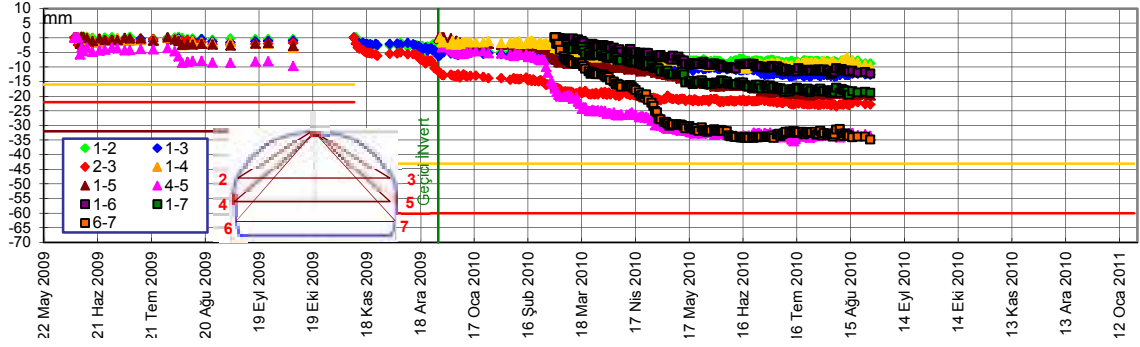
8.7.1. Güney Platform Tüneli Tünel içi ve Yüzey Deformasyonları ilişkisi

Güney platform tüneline, genel olarak deformasyon sırası aynı şekilde gelişmiştir. Güney Platform tüneline yapılan ölçümlerde en yüksek tavan oturması 61,9 mm olarak ölçülmüştür. 0+206 kilometrede ölçülen bu değer güney platform tüneline için ölçülen en yüksek tavan oturması değeridir. Bu km tüneline en geniş kesitine sahip olan PFV-L kısmıdır. DII zemin sınıfı (RMR 23-36) bu noktada artar örtü kalınlığı ve azalan Trakya Formasyonu deformasyonu oluşturan başlıca sebepler olmuştur. Kesitlerden de görüleceği üzere bu noktada bulunan büyük bir diyabaz sokulumu ve ayna haritalarında açıkça gözlemlenen bir çok noktada ki su gelimi deformasyonu oluşturan diğer etkenlerdir. Buna ek olarak büyük bir fay zonu bu noktada tüneline güzergahına girmiştir. Şekil 8.20’de görüldüğü gibi en yüksek oluşan değerlerin okunduğu kilometre 1 ve 5 numaralı pinlerde oluşan değerler en yükseğe ulaşmıştır. 5 numaralı pin yani tüneline sağ duvarına gelen bu yükün nedeni ayna haritalarında gözüktüğü gibi tüneline sağ omzunda bulunan zayıf zon ve su gelimidir.



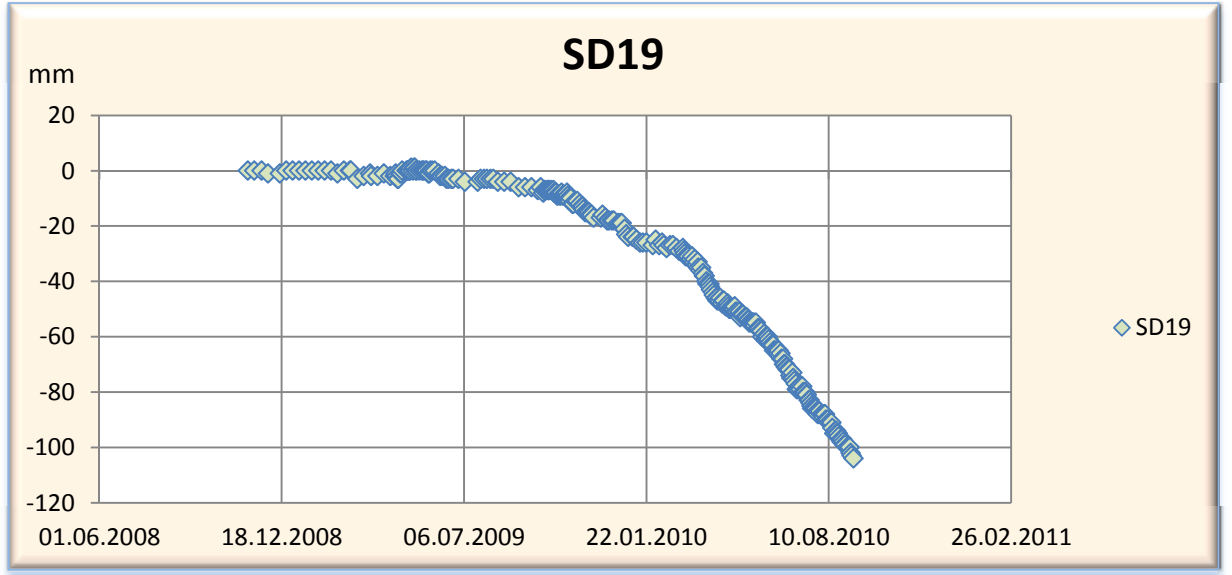
Şekil 8.20: Güney Platform Tüneli 0+206 Tavan oturması değeri

Aynı noktada tünelde görülmüş en yüksek konverjans değeri ölçülmüştür. 60.4 mm olarak ölçülen bu değer güney platform tüneline okunmuş en yüksek konverjans değeridir (Şekil 8.21).

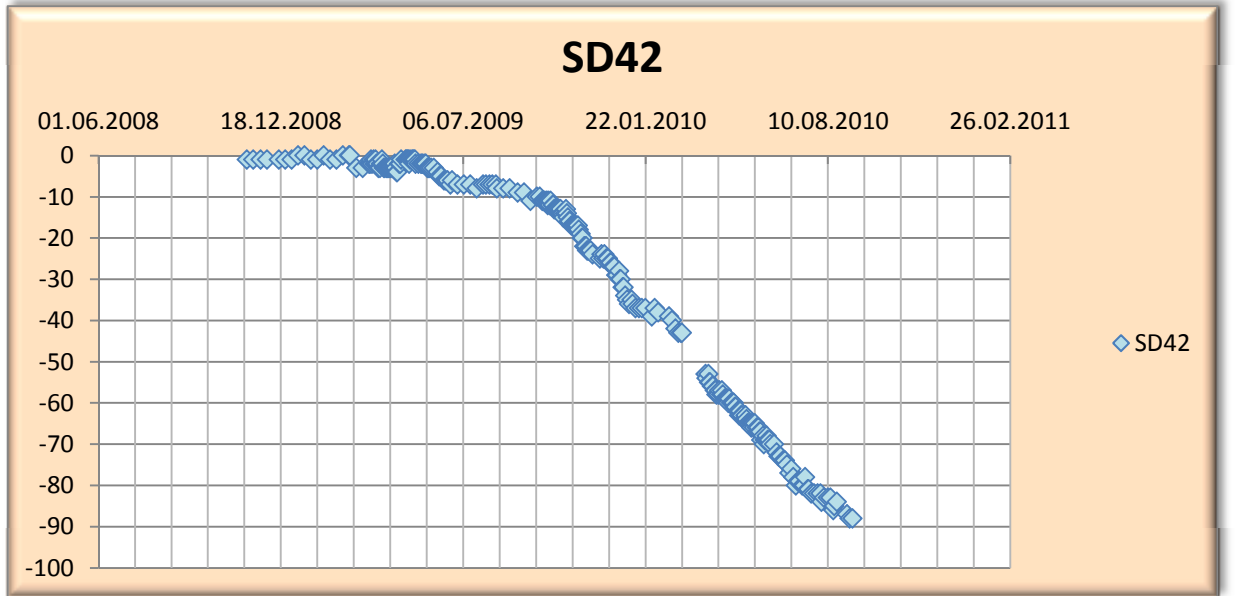


Şekil 8.21: Güney Platform Tüneli 0+190 Konverjans değeri

Grafikte görüldüğü gibi en yüksek değeri veren 4-5 yönünde olmuştur. Yani genel olarak önce tavan oturması oluşmuştur, ardından tünelin kenarlarında konverjanslar oluşmuştur. Bu noktada iki değerinde en yüksek rakamlara ulaşması bir tesadüf değildir. Yukarıda belirtildiği gibi tünel en geniş kesiti olan bu bölge; hem su gelimi açısından yüksek rakamlara ulaşmış, örtü kalınlığı artarken Trakya Formasyonunun kalınlığının azalması gözlenmiş hem de tünel güzergahına direkt olarak büyük bir diyabaz sokulumu girip, dayanımı düşürmüştür. Bu noktada 10-15 aralığına düşen RMR değeri bize bu deformasyon artışının sebebi söylemektedir. Tüm bu deformasyon artışı sadece tünel ile sınırlı kalmamıştır. Yüzeye baktığımız zaman aynı kilometre üzerinde bulunan SD42 ve SD19 bulonları, güney tüneli için ölçülmüş en yüksek yüzey oturması değerlerini vermişlerdir (Şekil 8.22 ve 8.23).

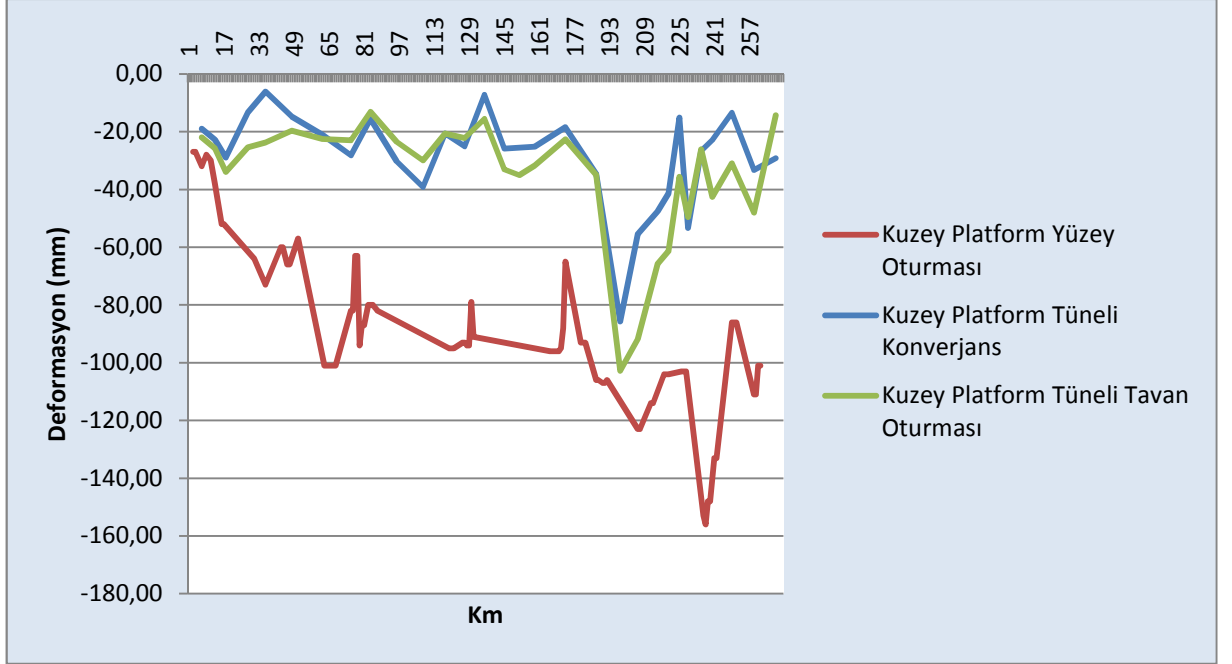


Şekil 8.22: SD19 bulonu oturma grafiği



Şekil 8.23: SD42 bulonu oturma grafiği

Tüm Güney Platform Tüneli güzergahında üç oturma değerinin ilişkisi Şekil 8.24'te verilmiştir.

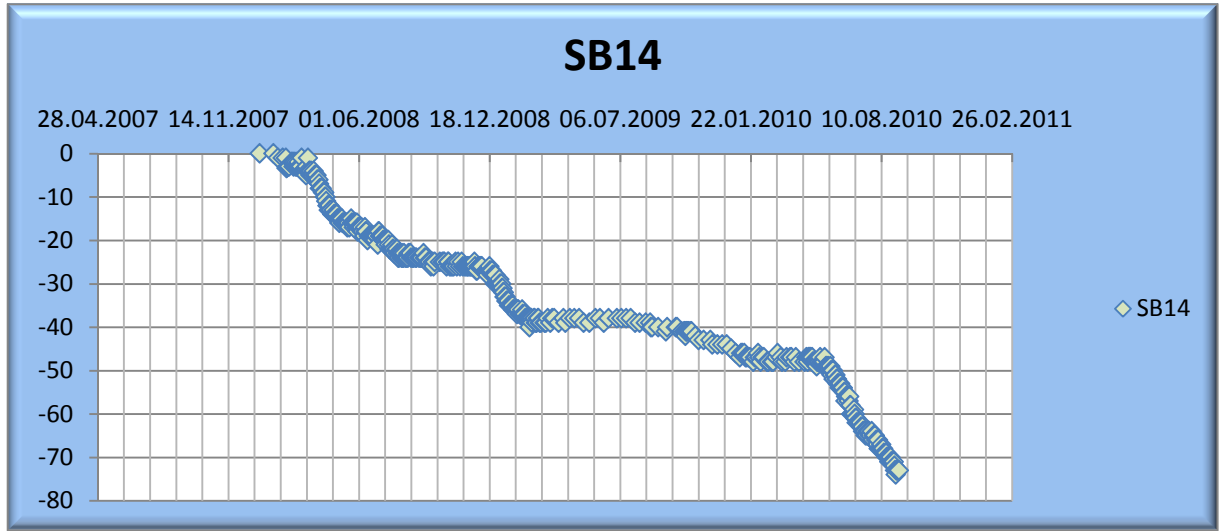


Şekil 8.24: Kuzey Platform Tüneli tünel içi ve yüzey deformasyon kıyaslaması

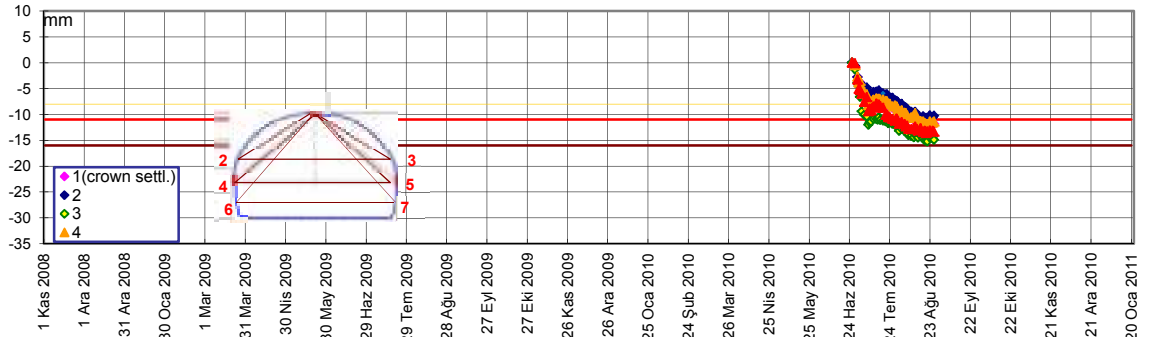
Görüldüğü gibi tünel içi deformasyon ile Yüzey deformasyonu ilişkisi açıkça bellidir. Doğru orantılı olarak, diğer koşulların da etkisiyle değişkenlik göstermişlerdir.

8.7.2. Kuzey Platform Tüneli Tünel içi ve Yüzey Deformasyonları ilişkisi

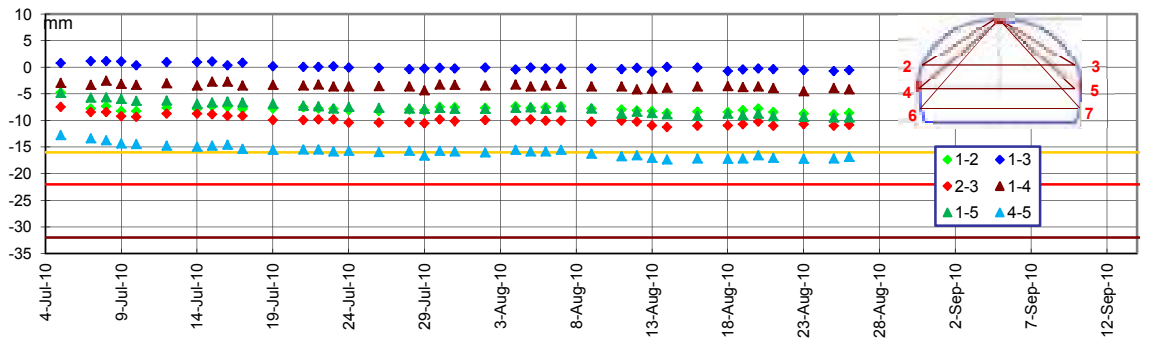
Tünelin ilk noktalarında Kuşdili Formasyonu kalınlığı 4 m civarında, dolgu zemin kalınlıkları ise 10 m civarında ilerlemektedir. Buna rağmen örtü kalınlığı aynı olmasından dolayı tüm tünel boyunca, Trakya Formasyonu olan kısım daha çoktur. 0+022 ile 0+022 arasında bulunan bu kısım PFV-L ile tünelin en geniş kesiti olan kısımdır. Bu noktada faylanma nispeten az miktardadır. Bu aralıkta ölçülmüş tavan oturması 34 mm, konverjans ise 29 mm olarak ölçülmüştür. Bu bölgede yüzey oturmaları kademeli olarak artmış ve 73 mm'ye kadar kademeli olarak yükselmektedir (Şekil 8.25).



Şekil 8.25: SB14 bulonu oturma grafiği



Şekil 8.26: Kuzey Platform Tüneli 0-016 tavan oturması değeri



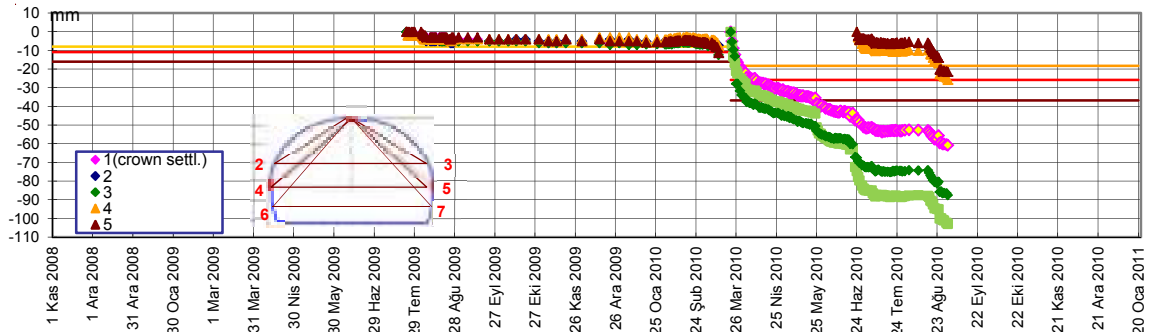
Şekil 8.27: Kuzey Platform Tüneli 0-005 konverjans değerleri

0+164 km'ye kadar tavan oturması ve konverjans değerleri birbiri ile uyum içerisinde ilerlemiştir. Konverjans değerleri 7 ila 40 mm arasında değişkenlik gösterirken, tavan oturması ise 13 ila 37 mm arasında değişmiştir (Şekil 8.26 ve 8.27). Yüzey oturma değerleri ise, SB14 bulonundan sonra 90 mm civarına gerileyerek, 0+164 km'ye kadar

88 92 mm arasında değişerek stabil olarak seyretmiştir. Bu noktaya kadar örtü kalınlığı değişmezken kuşdili formasyonu ve dolgu kalınlığı artmış, Trakya formasyonu kalınlığı azalmıştır. Buna rağmen bu durum, 0+068 ve 0+128 km'lerinde bulunan bağlantı noktalarındaki geniş kesitlere rağmen deformasyonu yükseltmemiştir (Şekil 8.27). Bu noktalarda RMR değerleri oldukça düşük seyretmektedir. 15 – 20 aralığında değişen RMR değerleri, oluşan deformasyonda önemli rol oynamaktadır.

Kuzey Platform Tüneli 0+0165-0+180

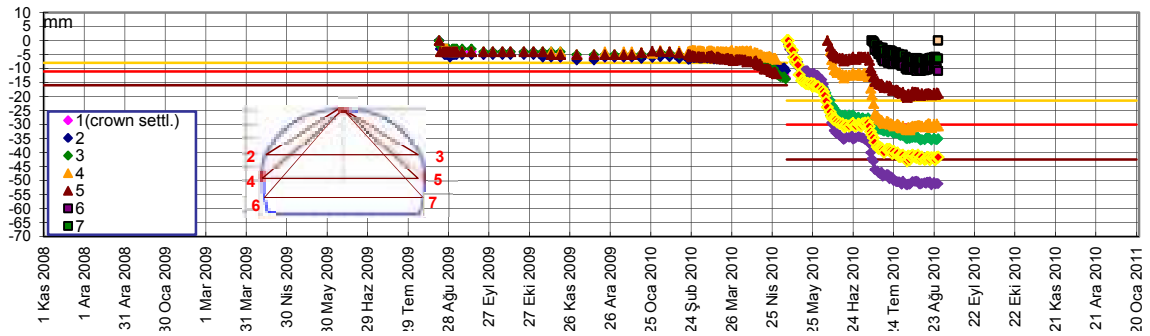
0+165'ten itibaren tavan oturması ve konverjans değerlerinde gözle görülür bir artış olmuştur. İki değer de -34 mm iken, 0+175'te tavan oturması -102 mm, konverjans ise -85 mm'ye kadar çıkmıştır (Şekil 8.28).



Şekil 8.28: Kuzey Platform Tüneli 0+175 tavan oturma grafiği

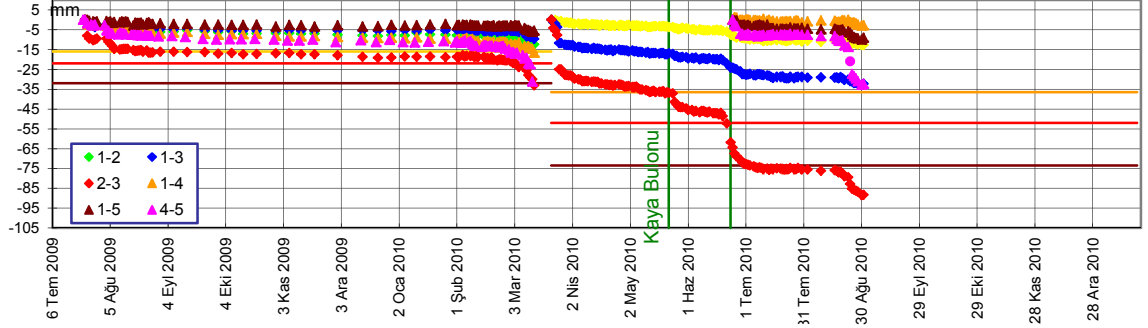
Kuzey Platform Tüneli 0+180 – 0+205

0+175'te, bu tünel için en yüksek değeri gören tavan oturması, 0+202'ye kadar kademeli olarak azalmış ve en nihayetinde bu noktada en yüksek olarak -50 mm civarına kadar gerilemiştir. Bu noktadan itibaren ise -45 mm ortalama değer olarak ilerlemiş ve kazı ile birlikte son bulmuştur (Şekil 8.29).



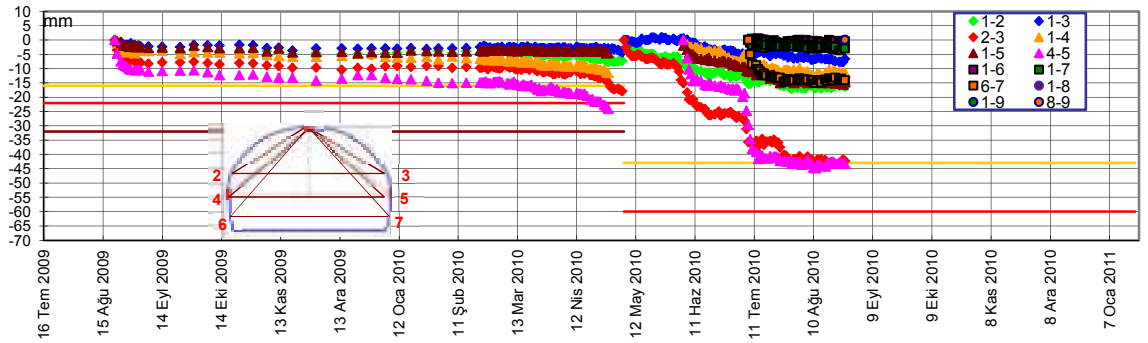
Şekil 8.29: Kuzey Platform Tüneli 0+202 tavan oturması değerleri

Tıpkı tavan oturması gibi, konverjans değeride 0+175'te bu tünel için en yüksek değeri görmüştür. (Şekil 8.30). Bu noktada RMR değerleri 18 civarında seyretmiştir.



Şekil 8.30: Kuzey Platform Tüneli 0+175 konverjans değerleri

Görüldüğü gibi 2 3 yönünde en yüksek -85 mm civarında değer gösteren konverjans, 0+202'ye kadar kademeli olarak azalmıştır. Kazı adımı nedeniyle 2-3 yönü tünelin en çok sıkıştığı noktadır.

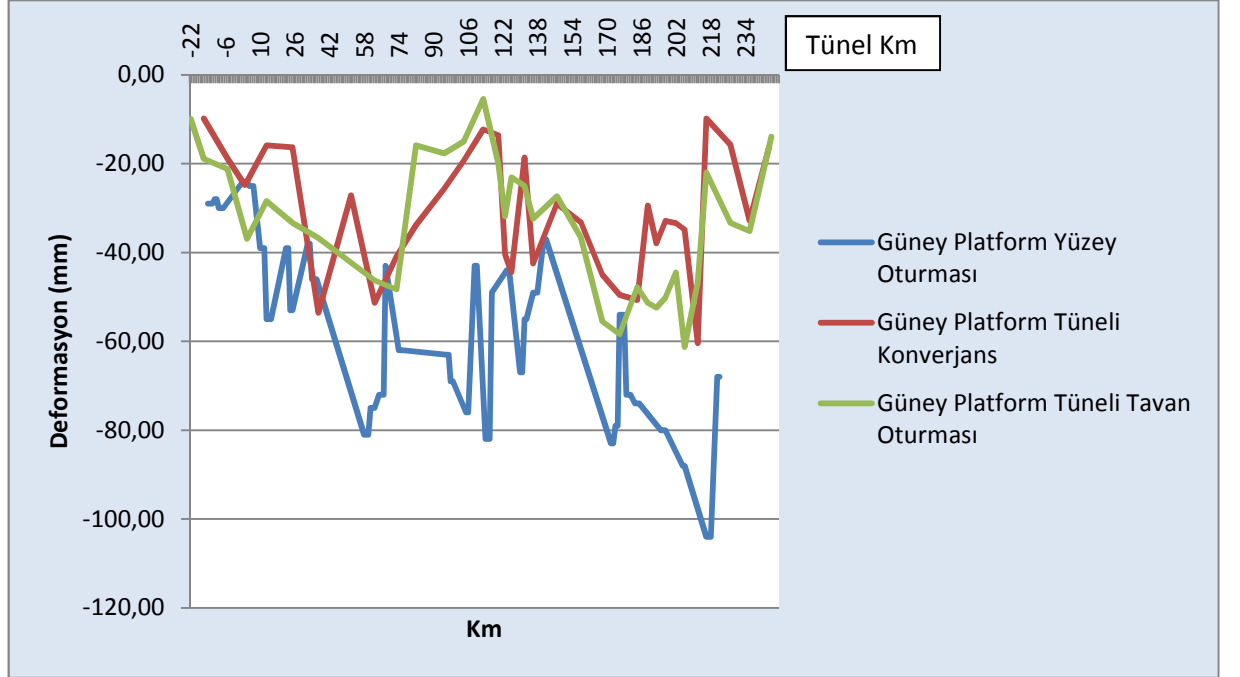


Şekil 8.31: Kuzey Platform Tüneli 0+202 konverjans değerleri

0+202'de en yüksek alınan ölçün -45 mm ile 4-6 yönünde olmuştur. Bu yön tıpkı 2-3 gibi tünelin yanlardan sıkıştığını ispatlar. Bu noktadan itibaren konverjans değerleri, tavan oturması değerlerinin altında seyrederek -30 mm ortalama ile kazı bitimine kadar devam etmiştir (Şekil 8.31).

0+164 ile 0+202 arasında yükselen ve 0+175 noktasında en yüksek değeri gören konverjans ve tavan oturmasındaki artış nedeni öncelikle tam olarak 0+164 noktasında geniş kesit geçilmiş olmasıdır. Toplam 11 metre çaptan, 15m'lik geniş çapa geçildiğinde zemin daha çok rahatsız edilmiştir. Bu noktada ayna haritalarından da göreceğimiz üzere çok yüksek bir su gelimi olmuştur. Tüneli bu noktası çok sayıda fay

zonlarıyla etkilenmiştir. Tüm bu su gelimi ve jeolojik ortamın kötülüğüne ek olarak artan Kuşdili Formasyonu örtü kalınlığı deformasyona etki etmiştir. 202'den itibaren zemin sınıfı DII'ye geçmiş, geniş kesit kazıları bitmiş ve su gelimi nispeten normale dönmüştür. Bu sebeple deformasyon değerleri olağan seviyede ilerlemiştir. 0+218 noktasında 20 civarında seyreden RMR değerleri birkaç metre için 35'e yükselmiş, bu artış direkt olarak deformasyonları düşürmüştür.



Şekil 8.32: Güney Platform Tüneli tünel içi ve yüzey deformasyon kıyaslaması

O noktalar içinde ölçülmüş en yüksek değerlerle elde edilen Şekil 8.32'den de anlaşılacağı gibi, hızlı gelişmesine rağmen yüzey oturması, tünel içi deformasyonlarla paralel gelişmiştir. Genellikle 4-5 yönünde gelişen konverjanslar ile 1 yönünde gelişen tavan oturması değerleri birbiri ile ve yüzey oturması ile paralellik göstermiştir.

9. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, Marmaray Projesi kapsamında Sirkeci İstasyonu güzergahının kaya kütlesi, destek sistemi özellikleri, kazı kademesi ve yüzey yükleri, tünel içi ve yüzey deformasyonları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda Güney Platform Tüneli, Kuzey Platform tüneli ve Merkez Yürüme tüneline deformasyona etki eden parametreler ve özellikleri ortaya konulmuştur. Buna göre;

İncelemeye konu olan Sirkeci İstasyonu kazısı İstanbul Paleozoyik istifinin en üstünde bulunan kumtaşı, silttaşı ve kiltası ar dalanması ve yer yer diyabaz daykları içeren Trakya Formasyonu içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu birimi geç Holosen yaşlı kil-mil boyutlu Haliç çökelleri içeren Kuşdili formasyonu örtmektedir. En üstte ise çeşitli kayaç parçaları, tuğla ve moloz içeren dolgu istifi örtmektedir.

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.

Kazıya önce Güney platform tüneline başlanmış, ardından Kuzey platform tüneli ve Merkez yürüme tüneli kazıları başlamıştır. Güney platform tüneli önce başladığı için verdiği deformasyon değerleri, diğer tünellerden azdır. Tünel için extansometreler ile ölçülen etki zonu 12 metredir. Kuzey tüneli kazısı başladığında, Güney tüneline oluşturduğu gevşek zonda kazı başladığı için bu zon daha da büyümüştür. Bu nedenle Kuzey platform tüneline tünel içi deformasyonlar Güney tüneline göre yüksek çıkmıştır.

Merkez yürüme tüneline micro benching (ringi hemen kapatma yöntemi) kullanılmıştır. Bu yöntem tünel kesitinin küçük olmasının yanında, zemin koşulları nedeniyle tercih edilmiştir. Merkez yürüme tüneli bu sebeple diğer tünellerden çok daha düşük tünel içi deformasyon değerleri göstermiştir.

Bölgede bulunan dolgu zemin birçok çeşitte taşınmış malzeme ve kum ar dalanmasından oluşmaktadır. Kuşdili Formasyonu içerisinde de yer yer kum mercikleri gözükmektedir. Bu iki birim, tünel güzergahı tamamen Trakya formasyonu içerisinde bulunmasına rağmen deformasyonu arttırmıştır.

Yüklenici firma tarafından yapılan jeoteknik enstrümantasyonlara bakıldığında, yüzey oturmalarının tünel içi deformasyonlara göre çok daha hızlı geliştiğini görülmektedir. Bunun sebebi, tünel Trakya Formasyonu içerisinde bulunmasına rağmen, yüzey yapılarının zayıf dolgu birim üzerinde olmasıdır. Bu mevcut yapıların oluşan deformasyon kriterlerine karşı koyamamasından dolayı yüksek yüzey deformasyonları oluşmuştur.

Tünele toplam 460 lt/dakika su gelimi olmuştur. Tünelin geniş kesitindeki bazı yerlerde su gelimi 6 lt/dakikayı bulmuştur. Trakya Formasyonu içerisinde kazılan tünelde, tünelin içerisine gelen yer altı suyu, üst tarafta bulunan Kuşdili Formasyonu ve dolgu zemindeki suyu da tünele çekmiştir. Suyun oluşturduğu boşlukların, suyun ortamı terk etmesiyle birlikte oturması neticesinde yüzey oturmaları ve tünel içi deformasyonlar hızlanmıştır. Bu durum deformasyon bölümünde anlatılmıştır. Kısaca Kuşdili Formasyonu ve dolgu zemin, Trakya Formasyonundan ayrı bir sistem gibi çalışmıştır. Tüm bunlar, Taisei firmasının raporunda belirlediği; deformasyonların sebebi olarak 2/3 su, 1/3 kazı yöntemi sonucunu desteklemektedir.

NATM kriterine göre nihai betonu dökmeden önceki aylık 2 mm'lik deformasyon kriteri aşılmamış ve kazı sağlıklı şekilde ilerlemiştir. 2 gün arayla yapılan jeoteknik ölçümler bunu doğrulamıştır. Ayrıca tünelin üst yarısı ile temeli arası yaklaşık 5-6 metre olarak tutulmuş ve kazı başarılı olarak gerçekleştirilmiştir.

Tünel kazısı başlamadan öngörülen 150 mm deformasyon toleransı aşılmamıştır. Aynı ayrı tavan oturması, konverjans, püskürtme beton basıncı ve yüzey oturmaları bu değerlerin altında kalmıştır. Bu bize kazı yönteminin doğruluğunu ve uygulamadaki başarısını göstermektedir.

Yapılan ölçümlerde güney tüneli için en yüksek yüzey oturması değeri 105 mm olarak ölçülmüştür. En düşük değer ise 24 mm olarak gözlenmiştir. Tavan oturması ise en yüksek -63mm, en düşük -10 mm arasında değişmiştir. Konverjans değerleri (özellikle L4-L5) kapanım yönünde en düşük -10 mm, en yüksek -62 mm olarak ölçülmüştür. Kuzey tüneli için bu değerler konverjans için -65 mm ile -12 mm arasında değişirken, tavan oturması ise -70 mm ile -15 mm arasında değişmiştir. Yüzey oturması ise kuzey tüneli için en yüksek 153 mm olarak ölçülmüştür. Merkez yürüme tüneline ise

konverjans ve tavan oturması değerleri -40 mm'yi geçmemiştir. Ancak Yüzey oturması değerleri diğer iki tünelin oluşturduğu zonun etkisinde kaldığı için -110 mm civarlarına çıkmıştır.

Extansometre değerlerine göre, NATM kuralına göre örtü kalınlığındaki doğal kemerleşme gerçekleşmemiştir ve bu durum tünel dışı istenmeyen deformasyonların oluşmasını hızlandırmıştır. Tünel içi extansometre değerleri bu durumu desteklemektedir. Tünel üstü kotundan ölçülen extansometreler deformasyon bölümünde verilmiştir. Bunlar doğal kemerleşmenin tahkimat sonrasında gerçekleşmediğini net olarak göstermiştir. Kazı bittiği zaman ve ring kapandığı zaman extansometre hareketlerinin bittiği gözlenmiştir.

Tünel içinde yüzey oturmalarından sonra, en hızlı tavan oturması gerçekleşmiştir. Arından L4-L5 kapanım yönünde konverjanslar gelişmiştir. Bu durumda tünele yük önce tavandan, sonra yanıl yönlerden gelmiştir.

Kuzey platform tünelinin 0+150 ile 0+200 arası, tünelin en yüksek tünel içi deformasyon gösterdiği noktadır. Bu noktada tavan oturmaları ile konverjans değerleri -70 mm civarlarına ulaşmıştır. Bunun sebebi, ayna haritalarından da anlaşılacağı üzere bu noktada su geliminin yüksek olması, faylanmanın olmasıdır. Özellikle Kuzeydoğu yönlü faylar kayayı oldukça gevşetmiştir. Bu noktadan sonra 0+210 noktasında ise yüzey oturması değerleri en yüksek seviyeye gelmiştir. 153 mm'ye ulaşan bu değerler, tünel içi deformasyonlar bu noktada düşmesine rağmen yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi bu noktada zeminin gevşemesi ve tünele su gelmesi neticesinde yüzey yapılarının çok etkilenmesidir. Buna ek olarak monoblok olmayan temelleri ve zayıf inşaat yapısı nedeniyle bu noktadaki yüzey yapılarının yüksek deformasyon vermesidir.

Tünel hattı boyunca RMR ile deformasyonlar incelendiğinde, RMR değerleri ile yüzey ve tünel içi deformasyonu değerleri karşılaştırıldığında, RMR değerleri düştükçe yüzey deformasyonu değerlerinin arttığı saptanmıştır.

10. KAYNAKLAR

- ABDÜSSELAMOĞLU, S., 1963, Kocaeli Yarımadası'nın Jeolojisi, M.T.A. Derleme No: 3249, Ankara
- ARIÇ, C., 1955, Haliç – Küçükçekmece gölü bölgesinin jeolojisi, Doktora tezi, İTÜ Maden Fakültesi
- 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.
- BİBEROĞLU, S., 2007. Sirkeci İstasyon NATM Tünelleri Alanı Jeoloji ve Mühendislik Jeolojisi Özellikleri, İstanbul, 4s. (yayınlanmamış)
- 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 in Tunnelling, Proc. 3rd Cong. Of Int. Society For Rock Mechanics, Denver, Vol.2, 27-32.
- BİENIAWSKI, Z.T., 1976, Rock Mass Classification in 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., AYSAL, N., 2005 Petrografik analiz raporu, İÜ Fakültesi, Döner sermaye
- HAAS. W., 1968, Das Alt Paleozoikum von Bithynien (Nordwest Türkei): N.Jb.Geol. Paleont. Abh., 131-2.60-68.
- İNCE, G., 2007, Tarihi Yarımada (İstanbul) Yerel zemin Koşullarının Büyütme Özellikleri ile Jeolojik ve Geoteknik Yapısının Karşılaştırılması, Aksaray Üniversitesi
- İNCE, G., 2007, Tarihi Yarımada (İstanbul)'nın Sıvılaşma ve Şev Stabilitesi potansiyeli, Aksaray Üniversitesi
- KETİN, İ., 1988, İstanbul Bölgesi'nde Karbonifer Yaslı Trakya Formasyonunun Yapısal Özelliği, Mühendislik Jeolojisi Bülteni, 11, 5-12.
- 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 Büyükada subareas), E.Ü.F.F. Kitaplar Serisi, İzmir.

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

ÖZBAY, G., 2009, Marmaray projesinin mühendislik özellikleri, Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü (Lisans Tezi), 40-60.

ÖNALAN, M., 1982, Pendik bölgesi ve Adaların Jeolojisi ve Sedimenter özellikleri: İ.Ü. Yerbilimleri Fakültesi (Doçentlik tezi), 156.

STFA MÜHENDİSLİK, 2006, MARMARAY PROJESİ Sirkeci istasyonu inceleme raporu

TAİSEİ-GAMA-NUROL ORTAKLIĞI, 2006, MARMARAY PROJESİ Sirkeci istasyonu batı şaftı kazı ve destek raporu

TAİSEİ-GAMA-NUROL ORTAKLIĞI, 2006, MARMARAY PROJESİ Sirkeci istasyonu platform tünelleri kazı ve destek raporu

TAİSEİ-GAMA-NUROL ORTAKLIĞI, 2006, MARMARAY PROJESİ Sirkeci istasyonu batı şaftı kazı ve

TAİSEİ-GAMA-NUROL ORTAKLIĞI, 2006, MARMARAY PROJESİ Sirkeci istasyonu Jeoteknik dizayn raporu

TCHIHATCHEFF, P.De., 1867 Asie Mineure, Description Physique de cette contree, quatrième partie, Géologie I, Paris,

11. ÖZGEÇMİŞ

Can TATAR 28.09.1986 yılında İstanbul'da doğdu. Orta ve lise öğrenimini İstanbul'da yaptı. 2004 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği bölümüne girdi. 2008 yılında aynı bölümden mezun oldu. Mezun olduktan bir dönem sonra 2008/2009 döneminde Fen bilimleri Enstitüsü Jeoloji Anabilim Dalı'na Yüksek Lisans eğitimi için girdi.

EKLER