

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜNEL DEFORMASYONLARININ JEODEZİK, GEOTEKNİK VE
SONLU ELEMAN YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Müh. Burak SATIR

**Temmuz 2007
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TÜNEL DEFORMASYONLARININ JEODEZİK, GEOTEKNİK VE
SONLU ELEMAN YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ**

Harita Müh. Burak SATIR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Harita Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.06.2007

Tezin Savunma Tarihi : 26.07.2007

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mualla YALÇINKAYA

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Aslan DİLAVER

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2007

ÖNSÖZ

“Tünel Deformasyonlarının Jeodezik, Geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemi İle Belirlenmesi” adlı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez danışmanlığımı üstlenen ve çalışmam süresince bilgi, görüş ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Doç Dr. Mualla YALÇINKAYA’ya şükranlarımı sunarım. Çalışmalarında gösterdiği ilgi ve yardımlarından dolayı İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE’ye, verdiği bilgilerden ötürü Mapa İnşaat ve Ticaret A.Ş. çalışanlarına, çalışmalarım sırasında manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, her zaman yanımda olan ev arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatımın her anında olduğu gibi, tez çalışmalarım sırasında da maddi manevi büyük desteklerini gördüğüm değerli anneme, babama ve kardeşime sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

Burak SATIR

Trabzon 2007

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLOLAR DİZİNİ	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Tünellerin Tarihsel Gelişimi	3
1.3. Tünel Açma Yöntemleri	5
1.3.1. Aç-Kapa Yöntemiyle Tünel Açma Metodu	5
1.3.2. Tünel Delme Makinesi (TBM) ile Tünel Açma Metodu.....	6
1.3.3. Batırma Tünel Yöntemi	8
1.3.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM).....	10
1.4. Deformasyon Ölçüleri ve Analizi	14
1.4.1. Tünellerde Yapılan Geoteknik Ölçüler	15
1.4.2. Tünellerde Yapılan Jeodezik Ölçüler ve Analizi	22
1.5. Sonlu Eleman Yöntemi	27
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	31
2.1. Trabzon 2 Tüneli.....	31
2.1.1. Trabzon 2 Tünelinin Zemin Jeolojisi.....	33
2.1.2. Trabzon 2 Tünelinde Yapılan Geoteknik Çalışmalar	34
2.1.3. Trabzon 2 Tünelinde Yapılan Jeodezik Çalışmalar	36
2.1.4. Trabzon 2 Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile İki Boyutlu Modellenmesi	38

2.2.	Arhavi Tüneli	39
2.2.1.	Arhavi Tüneli Güzergâh Jeolojisi.....	40
2.2.2.	Arhavi Tünelinde Yapılan Jeodezik Çalışmalar.....	42
2.2.3.	Arhavi Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Üç Boyutlu Modellenmesi	44
3.	BULGULAR	46
3.1.	Trabzon 2 Tüneli Bulguları	46
3.1.1.	Trabzon 2 Tünelinde Geoteknik Ölçülerle Deformasyon Analizi	46
3.1.2.	Trabzon 2 Tünelinde Jeodezik Ölçülerle Deformasyon Analizi	51
3.1.3.	Trabzon 2 Tünelinde Sonlu Eleman Yöntemi ile İki Boyutlu Deformasyon Analizi.....	57
3.2.	Arhavi Tüneli Bulguları	58
3.2.1.	Arhavi Tünelinde Jeodezik Ölçülerle Deformasyon Analizi	58
3.2.2.	Arhavi Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Üç Boyutlu Deformasyon Analizi	63
4.	İRDELEMELER.....	65
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
6.	KAYNAKLAR	70
7.	EKLER	76
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Baraj, köprü, tünel, viyadük, kule gibi büyük mühendislik yapılarında ve bu yapıların çevrelerinde geçici ya da kalıcı özellikte etkiler meydana gelmektedir. Genellikle bu etkiler zeminin fiziksel özelliklerinden, yapının mevcut ağırlığından, hareketli dış yüklerden ve benzeri etkilerden oluşmaktadır. Bunun sonucunda da yapıda ve çevresinde deformasyonlar gözlenmektedir. Mühendislik yapıları maliyet olarak yüksek ve kullanım açısından da büyük önem taşıdıklarından, bu yapılarda oluşan deformasyonların sosyo-ekonomik açıdan izlenmesi çok gereklidir.

Karayolu, metro gibi ulaşım yollarında topoğrafik yapının engebeli olduğu arazilerde geçişler çoğunlukla tünellerle sağlanmaktadır. Ülkemizin özellikle de dağlık bir topografyaya sahip Doğu Karadeniz Bölgesinde yol yapım çalışmalarındaki geçişlerde tünellerin sıkça kullanılması gerekmiştir. Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesinde yapılmakta olan Doğu Karadeniz Sahil Devlet Yolu üzerinde bulunan “Trabzon 2 ve Arhavi” tünellerinde oluşan deformasyonların, jeodezik, geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemi gibi farklı yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece farklı yöntemlerden belirlenen sonuçlar irdelenerek deformasyonların daha gerçekçi yorumlanması yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Deformasyon, Tünel, Jeodezik ve Geoteknik Yöntemler, Sonlu Eleman Yöntemi

SUMMARY

Determining Deformations of Tunnel with Geodetic, Geotechnical and Finite Element Method

Effects which are temporary or permanent property occur in the engineering buildings such as dam, bridge, tunnel, viaduct and tower. Usually, these effects are formed from physical property of the grounds, weight of the build, active outside weight and similar effects. That shape and position changes occurred in the engineering buildings is determined is one of the practice lands of geodetic surveys. Deformations are experiment build and around at the end of this process. As cost of engineering buildings is high and in view of the use this builds carry importance, the monitoring of this build is very necessary at the socioeconomic vision.

Passing is provided with tunnels on the roads such as highway, underground on the topographical builds which are uneven lands. That our country, especially East Karadeniz Region, has a mountainous topography needs often tunnels in the making of roads. In this study, it is aimed that deformations formed in the Trabzon 2 and Arhavi tunnels which are build on the main roads of East Karadeniz Region are determined with different methods such as geodetic, geotechnical and the finite element method. Thus, conclusions determined different methods are examined and deformations are more realistic interpreted.

Key words: Deformation, Tunnel, Geodetic and Geotechnical Methods, The Finite Element Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Aç-Kapa metodu ile inşa edilen tünel	6
Şekil 1.2. Tünel delme makinesi.....	7
Şekil 1.3. Batırma tünel inşası	8
Şekil 1.4. Tüplerin yüzdürülmesi.....	9
Şekil 1.5. Batırma tünel yöntemiyle inşa edilmiş tünel	9
Şekil 1.6. NATM yöntemi ile tünel açma	13
Şekil 1.7. Deformasyon belirlemesinin genel adımları	14
Şekil 1.8. Ekstensometre aletleri.....	16
Şekil 1.9. İnklinometre aleti	17
Şekil 1.10. İnklinometrenin kuruluşu ve ölçümü	18
Şekil 1.11. Strengaç aleti.....	18
Şekil 1.12. Piezometre aleti.....	19
Şekil 1.13. Manyetik oturma kolonları	19
Şekil 1.14. Basınçölçer aleti	20
Şekil 1.15. Manyetometre aleti	20
Şekil 1.16. Tiltmetrenin ölçü düzeni	21
Şekil 1.17. Radon ölçer aleti	21
Şekil 1.18. Sismometre aleti	21
Şekil 1.19. Gravimetre aleti	22
Şekil 1.20. Lazer uzaklıkölçer	22
Şekil 1.21. Gerilimölçer aleti	22
Şekil 1.22. Otomatik total station	23
Şekil 1.23. Hassas nivo	23
Şekil 1.24. Lazer Tarayıcı ve Laser Tracker	24
Şekil 1.25. Tünel obje noktaları ve elektronik aletle yapılan ölçüler.....	24
Şekil 1.26. Jeodezik ölçülerle deformasyon analizinin iş akış şeması	26
Şekil 1.27. Tünelin iki boyutlu sonlu eleman modeli	27
Şekil 1.28. Tünelin üç boyutlu sonlu eleman modeli	27

Şekil 2.1.	KSDY geçişlerinden Trabzon 2 ve Arhavi tünellerinin konumu	31
Şekil 2.2.	Trabzon tüneline trafiğin sıkıştığı andan bir görünüm	32
Şekil 2.3.	Trabzon ve Trabzon 2 tünel tüpleri	32
Şekil 2.4.	Trabzon 2 Tüneli ve çevresindeki yerleşim	33
Şekil 2.5.	Trabzon 2 Tüneli kazı çalışmaları	34
Şekil 2.6.	Trabzon 2 Tüneline tesis edilen inklinometre–I ve II boruları.....	35
Şekil 2.7.	İnklinometre–I ve II boruları ile inklinometre aleti	35
Şekil 2.8.	Trabzon 2 Tüneli istasyonlarındaki kesitler ve obje noktaları	36
Şekil 2.9.	Trabzon 2 Tünelinin geometrisi	38
Şekil 2.10.	Trabzon 2 Tünelinin iki boyutlu sonlu elaman modeli ve numaralanması	39
Şekil 2.11.	Arhavi Tüneli	40
Şekil 2.12.	Arhavi Tüneli kazı çalışmalarından görünüm	40
Şekil 2.13.	Arhavi Tünelinin jeolojik yapısı	41
Şekil 2.14.	Arhavi Tüneli istasyonlarındaki kesitler ve obje noktaları.....	42
Şekil 2.15.	Kontrol noktaları	43
Şekil 2.16.	Arhavi Tünelinin üç boyutlu sonlu eleman modeli ve numaralanması	44
Şekil 2.17.	Arhavi Tünelinin üç boyutlu modeli	45
Şekil 3.1.	İnklinometre–I borusundan, I. ve II. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	46
Şekil 3.2.	İnklinometre–I borusundan, III. ve IV. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	47
Şekil 3.3.	İnklinometre–I borusundan, V. ve VI. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	47
Şekil 3.4.	İnklinometre–I borusundan, VII. ve VIII. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	48
Şekil 3.5.	İnklinometre–II borusundan, I. ve II. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	48
Şekil 3.6.	İnklinometre–II borusundan, III. ve IV. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	49
Şekil 3.7.	İnklinometre–II borusundan, V. ve VI. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	49
Şekil 3.8.	İnklinometre–II borusundan, VII. ve VIII. ölçü periyodunda belirlenen yer değiştirme	50
Şekil 3.9.	İnklinometre-I ve II borularında belirlenen yer değiştirme	50
Şekil 3.10.	I. İstasyon noktasındaki kesit ve kontrol noktaları	51

Şekil 3.11.	Trabzon 2 Tünel kesitlerinde belirlenen yer değiştirmeler	55
Şekil 3.12.	Kesitlerdeki obje noktalarında oluşan yer değiştirmeler	56
Şekil 3.13.	Trabzon 2 Tünelinin iki boyutlu modeli	57
Şekil 3.14.	Trabzon 2 Tünelinin dış yükler altındaki deformasyonu	58
Şekil 3.15.	I. Kesitteki kontrol noktaları	59
Şekil 3.16.	Arhavi Tünelinde belirlenen yer değiştirmeler	61
Şekil 3.17.	Arhavi Tüneli kesitlerindeki obje noktalarında oluşan deformasyonlar ...	62
Şekil 3.18.	Arhavi Tünelinin üç boyutlu sonlu eleman modeli	64
Şekil 3.19.	Arhavi Tünelinin dış yükler altındaki deformasyonu.....	64

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Trabzon 2 Tünel kayasının geomekanik değerleri	34
Tablo 2.2. İnklinometre-I ve II borularında yapılan geoteknik ölçülerin periyotları	36
Tablo 2.3. Trabzon 2 Tüneli istasyonlardaki kesit kontrol noktalarında yapılan jeodezik ölçü periyotları.....	37
Tablo 2.4. Arhavi Tüneli istasyonlardaki kesit kontrol noktalarında yapılan jeodezik ölçülerin periyotları	43
Tablo 3.1. Trabzon 2 Tüneli I. kesitinin sol yan duvarında bulunan noktasının deformasyon analizi	52
Tablo 3.2. Trabzon 2 Tüneli I. kesitinin tavanında bulunan noktasının deformasyon analiz	53
Tablo 3.3. Trabzon 2 Tüneli I. kesitinin sağ yan duvarında bulunan noktasının deformasyon analizi	54
Tablo 3.4. Arhavi Tünelinde anlamlı bulunan deformasyon değerleri	59
Ek Tablo 7.1. Trabzon 2 Tüneli II. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri	76
Ek Tablo 7.2. Trabzon 2 Tüneli III. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri	77
Ek Tablo 7.3. Trabzon 2 Tüneli IV. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri.....	79
Ek Tablo 7.4. Trabzon 2 Tüneli V. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri.....	81

SEMBOLLER DİZİNİ

C	Kohezyon (Chosion)
IMT	Batırılmış Tünel (Immersed Tunnel)
KSDY	Karadeniz Sahil Devlet Yolu
NATM	Yeni Avusturya Tünel Metodu (New Australia Tunnel Method)
Q	Kaya Kalitesi İndeksi (Rock Quality Index)
RMR	Kaya Kütlesi Oranı (Rock Mass Roting)
RQD	Kaya Kalitesi Derecesi (Rock Quality Designation)
RTK	Gerçek Zamanlı Kinematik (Real Time Kinematic)
SEY	Sonlu Eleman Yöntemi (Finite Element Method)
TBM	Tünel Delme Makinesi (Tunnel Boring Mechinery)
Ø	İçsel Sürtünme Katsayısı (Friction Cone)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelgit olayları, kabuk üzerinde yüklere bağlı değişimler, tektonik olaylar ve diğer etkiler nedeniyle yer kabuğunda ya da büyük mühendislik yapılarında ve çevrelerinde deformasyonlar oluşmaktadır. Oluşan hareketleri belirlemek amacıyla yapılan jeodezik deformasyon ölçmeleri ve analizleri sonucunda;

- ❖ İmar planlaması sırasında yerleşim alanlarının nereye kurulması gerektiği,
- ❖ Sanat yapılarının, büyük binaların ve endüstri tesislerinin nasıl denetleneceği,
- ❖ Tektonik etkilerle oluşan yerkabuğu hareketlerinin nasıl belirlenebileceği,
- ❖ Depremlerin önceden kestiriminin nasıl yapılacağı

gibi soruların bir çoğuna cevap verilebilmektedir.

Jeodezik deformasyon ölçme alanları kapsamında, mühendislik yapıları (baraj, tünel, köprü, viyadük, kule, yüksek binalar vb.), depremlerin kestirimi, heyelanların belirlenmesi gibi konuların yanı sıra artık endüstriyel ölçmeler de yer almaktadır. Gelişen ölçme aletleriyle birlikte deformasyon belirleme yöntem ve alanları da gelişmektedir. Özellikle son yıllarda Çok Uzun Baz İnterferometresi (VBLI), Uydu Lazer Uzaklık Ölçme Sistemi (SLR), Global Konum Belirleme Sistemi (GPS) gibi uydu ve uzay teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak kıtalararası ve bölgesel plaka hareketlerinin belirlenmesi ve izlenmesi de kolaylaşmıştır. Ayrıca yersel aletlerdeki gelişmelerle elektronik aletlerin yanı sıra Lazer Tarayıcılar da deformasyon ölçmelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Böylece nokta konumları tarama yoluyla hızla belirlenebilmektedir (Engün ve Kılıçoğlu, 2005; Graham, 1974; Hanssen, 2002; Johnson, 2002; Rosen vd., 2002; Shapiro vd., 2003).

Günümüzde jeodezik deformasyon belirlemenin amacı içerisinde, yalnız geometrik şekil değişimlerinin belirlenmesi değil, deformasyonun nedenlerinin de göz önünde tutulması ve bunların dönüşüm fonksiyonlarının belirlenmesi de yer almıştır. Bu bağlamda, hareketlerin nedenlerini belirlemek için farklı disiplinlerdeki ölçme aletlerinin kullanılması gerekmektedir. Örneğin inklinometre, ekstensometre, piezometre, basınçölçer, oturma kolonları gibi geoteknik aletlerle objenin fiziksel özellikleri, yükleri ve geometrik değişimleri belirlenmektedir.

İstatistiksel analiz yöntemlerindeki gelişmelere bağlı olarak deformasyon modelleri de gelişmiştir. Önceleri deformasyon analizinde hareketin zamanını ve hareket nedenini dikkate almadan belirleyen basit geometrik model kullanılmaktaydı. Sonraları hareketi konuma ve zamana bağlı kalarak belirleyen geliştirilmiş Kinematik Modeller kullanılmaya başlandı. Artık günümüzde deformasyonlar, zamanın yanı sıra hareketin nedenini de içeren gelişmiş ve kapsamlı dinamik modellerle belirlenmektedir. Eğer deformasyonu belirlenecek objenin fiziksel yapısı modellenabiliyorsa diferansiyel denklemlerden oluşan parametrik modellerle çözüm yapılabilir. Objenin fiziksel yapısı modellenemiyorsa parametrik olmayan yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi modellerle çözüm yapılabilir (Ayan, 1981; Pelzer, 1985; Pelzer 1987; Chrzanowski vd., 1990; Ünver 1994; Milev ve Papo, 1998; Heunecke and Pelzer, 1998; Heunecke vd., 1998; Heine, 1999; Yalçınkaya 2003; Yalçınkaya ve Bayrak, 2003; Akyılmaz ve Ayan, 2003; Konak vd., 2005; Yalçınkaya, 2006;).

Büyük mühendislik yapıları ve çevrelerinde oluşan hareketler deformasyon ölçüleri ile izlenerek, gerekli önlemler alınıp, sosyo-ekonomik zararların önüne zamanında geçilmiş olunur. Önemli mühendislik yapılarından olan tünellerin, inşaat aşamasından başlayarak farklı ölçü teknikleriyle oluşan yer değiştirmelerinin izlenmesi gerekir. Böylece farklı ölçülerin analizi sonucu tünellerde oluşan deformasyonların belirlenmesi ve daha gerçekçi yorumlamaların yapılması sağlanmış olur (Yalçınkaya ve Satır, 2005; Yalçınkaya vd., 2006; Satır vd., 2007).

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Sahil Yolunda yapılmış olan Trabzon 2 ve Arhavi Tünelleri uygulama alanı olarak seçilmiştir. Doğu Karadeniz Sahil Yolu, Gürcistan ile Doğu Karadeniz Bölgesinin ticari ve kültürel bakımdan önemli merkezleri olan Trabzon, Rize, Artvin gibi illerimizi birbirine bağlamakta, doğu-batı arasındaki geçişi sağlamaktadır. Doğu Karadeniz Sahil Yolu üzerinde bulunan Trabzon 2 ve Arhavi Tünelleri sahil yolu projesinin en önemli adımlarındandır. Projenin yörenin doğal ve kültürel zenginlikleri ile uyumlu ve bölgeyi geliştirici nitelikte olması için yapılan çalışmalar, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmüş ve proje Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şti. tarafından hazırlanmıştır. Projenin yüklenicisi Cengiz Mapa-Makyol Ortak Girişimi olup, güzergâhta yapılan mekanik sondajlar ve jeofizik çalışmalar JFZ İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. tarafından gerçekleştirilmiştir (Cengiz-MAPA-MAKYOL, 2004).

Birinci uygulamanın yapıldığı Trabzon 2 Tüneli, Trabzon ili şehir merkezinde bulunmaktadır. Bu tünel şehirlerarası geçişin yanı sıra şehir içi ulaşımında da kullanılmaktadır. İkinci uygulamanın yapıldığı Arhavi Tüneli, Artvin iline bağlı Arhavi ilçesi sınırları içinde bulunmakta ve şehirlerarası geçişi sağlamaktadır.

Trabzon 2 Tünelinde, periyodik olarak jeodezik ve geoteknik ölçümler yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Bu tünelin Sonlu Eleman Yöntemiyle iki boyutlu modellenmesi de yapılmış ve dış yüklerin etkisiyle oluşan deformasyonlar iki boyutlu olarak belirlenmiştir. Tüm analiz sonuçları birlikte yorumlanarak gerçekçi yorumlamalar yapılmıştır. Arhavi Tünelinde de, periyodik olarak jeodezik ölçümler yapılmış ve analiz edilmiştir. Aynı zamanda Arhavi Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemiyle üç boyutlu modellenmesi yapılmış ve dış yüklerin etkisiyle oluşan deformasyonlar belirlenmiştir. İki yöntemden belirlenen deformasyonlar yorumlanmıştır.

1.2. Tünellerin Tarihsel Gelişimi

Tüneller önemli mühendislik yeraltı yapılarındandır. Öyle ki tüneller, uygun ulaştırma yapıları vasıtası ile arasında doğal zorluklar ve tehlikeler olan iki yerleşim biriminin kesintisiz bir şekilde bağlantısını sağlamaktır. Böylece, dağlık arazi, nehirler ve denizler gibi doğal engelleri, izin verilen güven ve elverişli ulaştırma sistemiyle, iklim şartlarından da etkilenmeyecek şekilde aşılmasını sağlamaktadır. Yolcu ve yüklerin her ikisinin de devamlı kesintisiz taşınması bir toplumun gelişmesi ve sosyal olarak refaha ermesi için gerekli bir durumdur. Sonuç olarak tünellerin faaliyet alanları, güvenilirlik, verimlilik içinde kesintisiz uygun koşullu bir ulaştırma sağlamaktır.

Tünellerin çok gelişmiş toplumlarda ulusun günlük yaşamının önemli parçasını oluşturduğu ilk çağlardan beri açıkça görülmektedir. Yaşamlarını sürdürebilmek, günlük uygulamalarını devam ettirebilmek, gelişebilmek ve değişik toplumlarla yakınlaşabilmek için tünellere ihtiyaç duyulmuş ve bu nedenle de M.Ö. 200 yılından günümüze kadar tünelcilik çok büyük gelişmelere sahne olmuştur. Tüneller tarih boyunca her zaman kültürel açıdan gelişmiş toplumlarda inşa edilmişler ve bu toplumlar teknik ve ekonomik güce de sahip olmuşlardır.

Kârgir kaplamalı ilk tünelin, M.Ö. 200 yıllarında yapılmış olduğuna dair kalıntılara rastlanmıştır (Küçüköğlü, 2006, URL- 2, 2007, URL- 3, 2007). Fırat nehri altında açılmış olan bu tünel tuğla kaplamalı ve kemerlidir. Nehrin 200 m genişliğindeki bir yerinde

yaklaşık 3,80 m genişlik ve 4,80 m yüksekliğinde olup uzunluğu 960 m'yi bulmaktadır. Daha sonraları galeri açmanın bir savaş tekniği olarak ta kullanıldığı görülmektedir. Mısırlılar ve Romalılar ise daha çok su getirmek amacı ile tüneller açmışlardır. Yunanlılar zamanında ilk tünelin M.Ö. 687'de Sakız Adası'nda açılmış olduğu tespit edilmiştir.

Bütün bu tünellerin açılmasında, elde bulunan olanaklara göre, uygulanan yöntemler çok ilkel olmuştur. Fakat şunu da unutmamak gerekir ki, yüzyıllık, bin yıllık tüneller hala günümüzde ayakta durmaktadır ve bugün bize o zamanın becerisi hakkında düşündürücü fikirler vermektedir. Bu fikirler şu an bile tünel inşaatının gelişmesinde zaman zaman rol oynamaktadır. Bununla beraber 1556 tarihinde Georg Bauer tarafından yazılan "De Re Metallicas Georg" adlı eserde anlatılan Agricola Alias yapısındaki yöntem uzun zaman kullanılmış olan tünel açma usulünü göstermekte olup yaklaşık olarak 350 yıl içinde yeraltı inşaatında tartışılmaz çalışma şekli olarak kalmıştır (Küçüköğlü, 2006, URL- 2, 2007, URL- 3, 2007).

XVII. yüzyılda gelişmeye başlayan kanal taşı, tünelcilikte önemli bir aşama meydana getirmiştir. Endüstri devriminin başlaması da tünellerin gelişmesinde özellikle ulaştırma uygulamalarında hızlı bir ivme sağlamıştır. 18. yy ve 19. yy süresince İngiltere'de endüstriyel gelişim, tünelleri de etkilemiştir. Buna bağlı olarak daha hızlı bir şekilde kanallar da gelişmiştir. Demiryolları ve kayda değer birçok mühendislik uygulamalarında ki gelişmeler, tünellerdeki önemli gelişmelere de etkide bulunmuştur. Avrupa'daki tünel inşasına ait bu gelişmeler Amerika'ya da geçerek 1818 yılında Pansylvania da Schuylkill kanalı üzerinde ilk tünele başlanmıştır. 1820 de biten bu tünel 5,49 m genişliğinde 6,10 m yüksekliğinde ve 250 m uzunluğundaydı (Küçüköğlü, 2006, URL- 2, 2007, URL- 3, 2007).

Gelişmeler ışığında, mühendisler daha zor koşullar altında açılması gereken tüneller hakkında çalışmalar başlamış ve bu noktada su altı tünellerinin ilk örnekleri yapılmaya başlamıştır. Bu çalışmalardan ilki 1823–1843 yılları arasında Taymis Nehri altında açılan 4,20 m ve 4,80 m çaplarındaki halen hizmette olan bir ikiz tüneldir (İngiltere/Londra/Greenwich). Bu tünel, tünel açma yöntemlerinde önemli bir gelişmeye neden olmuştur. Fransız mühendis Brunel'in patentini aldığı Bukliye yöntemi ilk defa burada uygulanmıştır. Brunel'in Taymis Nehri altında ilk bukliyesini attığı devirde Lord Cohrane'da sulu zeminlerde kuyu ve galeri açmak için basınçlı havadan faydalanma yöntemine ait patentini 1830 tarihinde almıştır. Fakat bu şekilde tünel açma ilk defa ancak 1839'da Hersent tarafından Chalannes-sur-Loire'da, sonra da 1879'da Anverste uygulanmıştır. Daha sonra, 1880'de bir deniz altı tüneli açma hazırlığı olarak Manş Denizi

altında iki keşif galerisi açılmıştır. 1893 yılında ABD Boston’da kanalizasyon sistemi için ve 1910 yılında Michigan Central Demiryolunun Detroit nehri geçişinde büyük boyutlarda tüneller kullanılmıştır.

1999 yılında Danimarka ve İsviçre’de Drogden isimli Batırılmış tünel örneğine rastlanmıştır. Ayrıca 2000 yılında, Japonya’da Kawasaki Fairway ve Osaka South Port isimli tünellerin yapımı tamamlanmıştır. Yine aynı yıl Japonya’da Kobe Port isimli bir tünelin inşaatı bitirilmiştir. Trafik yoğunluğunun artmasıyla beraber karayolu tünel inşaatı, özellikle A.B.D., Fransa, İtalya, Almanya gibi gelişmiş ülkelerde büyük önem kazanmış ve bu ülkelerdeki modern otobanlarda uzun tüneller açılmıştır (Küçükoğlu, 2006, URL- 2, 2007, URL- 3, 2007). Ülkemizde de bu alanda gerek kara ve gerekse denizde önemli projeler başlatılmıştır.

1.3. Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açılacak güzergâhın topografyası, zemin koşulları ve açılacak tünelin geometrisi gibi parametreler değerlendirilerek tünel açma yöntemi ve buna bağlı olarak ta kullanılacak ölçme yöntemleri belirlenmektedir. Tünel açma yöntemleri, günümüzde genelde kullanılan inşaat prensipleri açısından dört ana grup halinde incelenebilir. Bu gruplar;

- ❖ Aç-Kapa yöntemiyle tünel açma yöntemi,
- ❖ Tünel Delme Makinesi (TBM) ile tünel açma yöntemi,
- ❖ Batırma Tünel (Immersed Tube) yöntemi,
- ❖ Yeni Avusturya Tünel Açma yöntemi (NATM)

olarak sıralanabilir (Ünlütepe, 2003).

1.3.1. Aç-Kapa Yöntemiyle Tünel Açma Yöntemi

Yüzeyde açılan tünelde genelde Aç-Kapa yöntemi uygulanır. Bu yöntemde, yeraltı boşluğu, yanlar betonarme kazık veya perde duvar ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılır. Kanalizasyon veya içme suyu tünelleri bu yöntemle açılmaktadır. Bu arada zeminin özelliği ve yeraltı suyu durumuna göre gerekiyorsa yeraltı su seviyesi düşürülür veya su, derin kuyularla drene edilir. Tavanın kaplamasından sonra kazılan kısım tekrar doldurularak eski haline getirilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Aç-Kapa yöntemi ile inşa edilen tünel

Aç-Kapa yöntemi, genellikle 10 m derinliğe kadar etkili bir şekilde uygulanır. Bu yöntem, normal tünel açımına göre daha ucuz ve uygulaması daha kolaydır. Fakat yerleşim alanlarında, trafiği engellemesi, rahatsızlık vermesi, gürültüye sebep olması ve yakında bulunan temellerini korumak için pahalı iksa sistemleri gerektirmesinden dolayı pek tercih edilmez. Bilindiği üzere inşaat yöntemi diğer yerüstü inşaat yapılarıyla büyük benzerlikler taşıdığı için Aç-Kapa yöntemi olarak adlandırılan tünel uygulamaları kullanılan ölçme yöntemleriyle de yerüstü yapılarında ihtiyaç duyulan yöntemlerle benzerlik gösterirler (URL- 1, 2003).

1.3.2. Tünel Delme Makinesi (TBM) ile Tünel Açma Yöntemi

Tünel Delme Makinesi (TBM) ile tünel açma teknolojisi, son dönemlerde çok önemli teknik gelişmeler kaydetmiştir. Sistem; inşa edilmesi tasarlanan boyutta dairesel bir silindirik formu olan ring içerisinde tünel yapımı için gerekli teknolojiyi barındıran bir tünel yapım makinesidir. TBM makinelerinin tasarımı; tünel iç kaplama cinsi, zemin ve proje koşullarına göre belirlenmektedir. Sistemin baş kısmında kazılması planlanan zemin koşullarına göre tasarlanmış bir kazıcı kafa ile kazılan malzemenin dışarıya taşınmasını sağlayan bir sistem mevcuttur. Makinenin silindirik formu kazılan zemini ayakta tutarak zemin stabilizesini korur. Kazıcı kafanın ilerlemesiyle ön kısmın stabilitesi de hemen gerisindeki çok sayıda pistonlar aracılığıyla yerleştirilen segmentlere basarak ve kötü zemin koşulları için tasarlanmış ise ayna basıncı uygulayarak sağlanır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Tünel delme makinesi

Lojistik lokomotif aracılığıyla içeri taşınan segment parçaları makinenin erektör sistemi ile kazısı tamamlanan bölümde yerleştirilir. Bu arada sistemin tüm mekanik parametrelerini gösteren bir bilgisayar ile makinenin yeraltında yönlendirme ve iç kaplama yerleşiminin yönetildiği bir ölçme bilgisayarı mevcuttur. TBM makineleriyle tünel açımı sırasında gerekli olan ve burada ele alınacak olan ölçme uygulamaları; tünel makinesinin (TBM) yönlendirilmesi, tünel içi stabilizesinin izlenmesi ve tünel içinde kullanılacak kaplama elemanlarının imalatının ölçümlerle denetlenmesi olacaktır (Butkus vd., 1999; Ünlütepe, 2003).

TBM makineleriyle tünel açımı sırasında gerekli olan ölçme uygulamaları aşağıdaki gibidir.

1. Tünel Makinesinin yönlendirilmesi:

- TBM'nin başlama pozisyonu alması,
- Tünel içerisinde ikincil bir ölçüm sisteminin oluşturulması,
- Tünel içi en kesitlerinin alınması,
- Tünel inşaatının tamamlanması, yeni ölçüm sisteminin oluşturulması ve tünel içi en kesitlerinin güncellenmesi

2. Tünel stabilitesinin izlenmesi:

- Tünel dışındaki deformasyon ölçümleri
- Tünel içerisindeki deformasyon ölçümleri

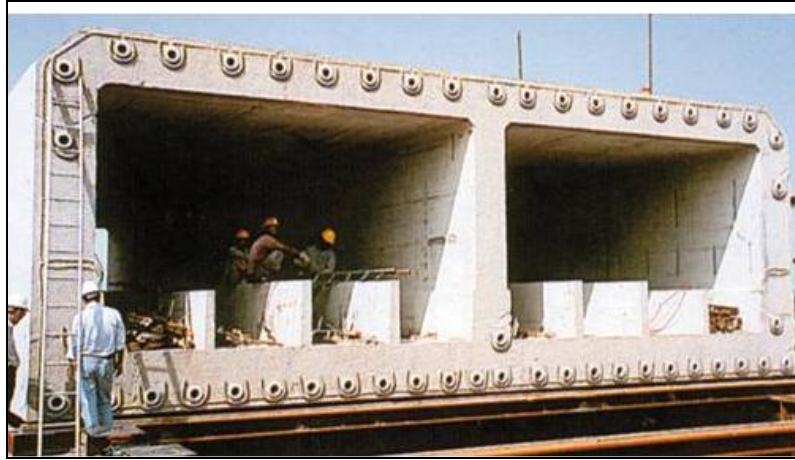
3. Eğer gerekli ise tünel içinde kullanılacak kaplama elemanlarının imalatının ölçümlerle denetlenmesi:

- Fotogrametrik ve geleneksel yöntemler

1.3.3. Batırma Tünel Yöntemi

Karakteristik olarak batırılmış tünel (IMT) planı kanalların ve kanal tarzındaki doğal engelleri alttan geçmede en kısa yoldur. İnşaat şekli hakkında örnek vermek gerekirse, geleneksel bir yöntem olarak, 30 m'den az derinliklerde tarıklama ve sonrada gömme şeklinde uygulanırken, 30 m ile 50 m arasındaki derinliklerde ise deniz tabanına açılan hendeğin içine plak elemanının yarısını gömmek ve üste kalan kısmının da toprak dolgu ile örtmek sureti ile uygulanır. Derinliğin 50 m'den fazla olduğu kesimlerde plak elemanı direkt olarak deniz tabanına konur ve üstü toprak dolgu ile örtülür.

Son zamanlarda, Parsons Brinckerhoff beton tüplerin yüzen dubalar üzerinde yapımı şeklinde yeni bir sistem geliştirilmiştir. Bu şekilde daha önceleri nehir veya kanal havzasında döküm yapmak sureti ile yapılan imalat uygulama şekli kaldırılmış ve böylece maliyetlerde % 20–30 oranında bir azalma olmuştur. Bu yöntemde, ilk olarak, temel katman dubalar üzerinde yapılır, sonra kenar duvarları inşa edilir, daha sonra da tüp çelik başlıklarla kapatılır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Batırma tünel inşası

Dubalar yavaşça yüzdürülerek tüpün yerleştirileceği kota gelince ilk etapta duvarlar batırılır. Taşınabilir bir yapıya sahip tüp dubasız bir şekilde yüzdürülür ve çeperlerin kaygan ve su geçirmez hale getirilmesi tamamlanır (Şekil 1.4). Tüp suya batırılır ve bir önceki tüple birleştirilir (Şekil 1.5).



Şekil 1.4. Tüplerin yüzdürülmesi



Şekil 1.5. Batırma tünel yöntemiyle inşa edilmiş tünel

Batırılmış tünellerin, yaygın olarak kullanımı yaklaşık 100 yıldır devam etmektedir. Dünya çapında 150'nin üstünde batırılmış tünel yapısı mevcuttur, bunların yaklaşık 100 tanesi karayolu ve demiryolu geçişi için projelendirilmiştir. Geri kalanlar ise su temini ve elektrik hattı tünelleridir. Tamamlandığı zaman Batırılmış Tünellerin operasyonel olarak diğer hiçbir tünelden farkı yoktur. Bunun yanında yapım şekli bakımından diğerlerinden tamamen farklıdır.

İlk olarak 1893 yılında ABD Boston'da kanalizasyon sistemi için kullanılan bu teknoloji, daha sonra 1910 yılında büyük boyutlarda Michigan Central Demiryolu için Detroit nehri geçişinde kullanılmıştır (URL- 3, 2007, Butkus, 1999, Ünlütepe, 2003).

Batırma tüneli genel olarak dört aşamada inşa edilir:

- Prefabrik tüp imalatı

- Yerleşim yerinin hazırlanması
- Batırma ve birleştirme
- Dolgu yapılması

Batırma tünel uygulamalarına ilişkin ölçmeler diğer tünelcilik yöntemleri için yapılan ölçmelerden büyük ölçüde farklı olarak hidrografik ve GPS ölçmelerinden yararlanılarak gerçekleştirilirler. Burada işin önemli aşamaları güzergâhın deniz dibi haritasının hazırlanması, su dibinde tünel tüplerinin yerleşeceği kanalın hazırlanması (dredging) için yapılan ölçümler ile batırılan tüplerin ölçme yardımıyla su dibinde yerine yerleştirilmesidir.

Deniz dibindeki tüp yerleşim alanının kazısı ve hazırlanması ile batırılan tüplerin konumu akustik konumlandırma sistemleri aracılığıyla eş zamanlı olarak izlenir ve gerekli düzeltmeler hidrolik pistonlar aracılığıyla yapılır. Bu amaçla Echosounder'ın gönderdiği ses dalgalarını algılamak üzere tüplerin üzerine ses algılayıcı cihazlar konularının belirlenmesi için yerleştirilir. Akustik algılayıcı Echosounder'ın gönderdiği sinyali aldığı zaman bunu tanıyarak konumunu belirtir. Düzeltmeler diğer akustik algılayıcılardan gelen konum bilgilerini de göz önüne alarak yapılır. Gerekli konum düzeltmeleri dalgıçlar ya da özel tasarlanmış uzaktan kumandalı denizaltılar aracılığıyla yapılır. Echosounder'ın konumu ise RTK-GPS ölçmeleriyle belirlenir (Holt, 2000; Ünlütepe, 2003).

1.3.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

Tünel Açma Yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan “Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)”, klasik yöntemle tünel açma tekniklerinin en deneysel ve esnek olanı, en optimum destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır. Bu yöntem adından da anlaşılacağı gibi Avusturya’lı tünel mühendislerince geliştirilmiştir. Yöntemin kökleri 45 yıl öncesine dayanmaktadır. Bu tarihlerde yeraltında yapılan hidroelektrik santrallerinin kazıları sırasında bölünmüş kazı yönteminin uygulanması Avusturya yöntemi olarak adlandırılmasına neden olmuştur. Geniş kesitli olan bu kazılarda önce inverte yakın bir galeriyle kazıya başlanır, daha sonra yan ve üst galerilerle kazı aşamalı olarak üst yarıya doğru genişletilir.

Genişletilen yöntem, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) adını almıştır. Bu isim altında yöntemin temel prensiplerini ortaya koyan, kavram olarak tarif eden L.V Rabcewicz'dir (URL- 4, 2007). 1948 yılında Rabcewicz patent almak için başvurduğunda

yöntemi şu şekilde tarif etmiştir: “İnce ve geçici bir destek uygulayarak, deformasyonlara izin vererek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmaktır. Böylelikle son destekleme (kaplama) daha az yüklenecek, daha sonra yapılabilecek ve daha ince bir yapı olabilecektir. Deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve projedeki hesaplamalarla karşılaştırılacaktır.”

NATM, tüneli çevreleyen kaya/zemin kütlelerini destekleyerek, tünel çevresini yük taşıyıcı bir halka haline getirmeye çalışmaktadır. Geleneksel klasik tünel yapımlarında tünel çevresindeki kaya, dayanım özelliklerine bağlı olarak tünel kaplamasına getireceği yük açısından değerlendirilmekte ve kaplama projelendirilmektedir. NATM’de birincil destekler olarak kullanılan püskürtme beton, hasır çelik, iksa ve kaya bulonları kaya kütleleriyle birlikte kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Kaya ve destek elemanlarından oluşan bu kompozit sistem, tünel kazı çevresinde oluşan basınçların yeniden dağılımını sağlayarak, kayanın gevşeme sonucu azalmakta olan dayanımının artmasını sağlamaktadır. Deformasyonlar, kontrollü bir şekilde tünel içinde göçüğe meydan vermeden veya emniyetsiz bir ortam oluşmadan gerçekleşmektedir. Yapım süresince geoteknik ölçüm ve kontrollerle tünel çevresinde kazı esnasında oluşan yeni basınç dağılımı gözlenebilmekte, tünelin stabilitesi kontrol edilebilmektedir.

Ölçüm verilerine göre, uygulanan kazı sırası, destek sınıfı gözden geçirilerek optimize edilebilmektedir. Tek düze olarak beton gerekmedikçe yerine, emniyeti azaltmadan ekonomik bir destekleme sistemine geçilebilmektedir. Klasik yöntemlerden en önemli ve bu sistemi ekonomik yapan fark, verilerin sürekli kontrol edilebilmesi ve yapım sırasında projelendirmenin devam etmesidir. NATM’de tünel kaplaması ise su yalıtımını koruyucu olup, tünel içindeki diğer elektromekanik (aydınlatma, havalandırma, kontrol sinyalizasyon vb.) donanıma altyapı oluşturmakta ve uzun dönemde tünel stabilizesinde bir problem olması halinde ikincil bir destek görevi görmektedir.

NATM’de deformasyonların birincil desteklerle kontrol edilmesiyle orijinal kaya kütlelerinin dayanımında bir azalma olması engellenmektedir. Tünel çevresindeki kaya kütlelerinin taşıma kapasitesi de böylece korunmaktadır. Tünelin uygulama projesi paketi içinde yer alan jeolojik-geoteknik rapor, inşaata başlamadan önce okunmalı, jeoloji-geoteknik bilgilerin yer aldığı tünelin geoteknik profili incelenmelidir. Tünel güzergâhı üzerinde farklı kaya sınıflarının bulunduğu kesimler ve kritik kesimlerin (baskılı, zayıf, ayrışmış kaya sınıflarının bulunduğu kesimler, düşük örtü kalınlığı olan kesimler, su problemi beklenen kesimler, fay zonu olan kesimler vb.) hangi kesimler olduğu ve bu

kesim için projede ne tip kazı ve destekleme önerildiği belirlenmelidir. Bu çalışma tünel kazısı başladıktan sonra tünel aynasında yapılacak jeolojik haritalama, geoteknik ölçüm sonuçları (deformasyon ve kapanma ölçümleri) ile projede yer alan değerlendirmelerin karşılaştırılabilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmalar sırasında;

1. Davranışı önceden bilinen ve tahmin edilen kayanın "ideal yenilme koşulu";

- a) Yeraltı suyunun drenajı,
- b) Aşırı örselenmeyi engelleme (patlayıcıdan olabildiğince kaçınma),
- c) Gevşemeleri ve sökülmeleri önleme,
- d) Zamanı yetirince kısa tutma

gibi önlemlerle korunmalıdır.

2. Kazı sonrasında oluşan "ikincil gerilme durumu";

- a) Gerilme yoğunlaşmalarını engelleyecek (yuvarlatılmış kazı yüzeyleri),
- b) Tek eksenli gerilme ortamını yaratmayacak püskürtme beton ve ankraj,
- c) Kaya yapısında çekme gerilmeleri oluşmayacak

şekilde uygun kesit şekli (ön pekiştirme) denetlenmelidir.

3. "İkincil deformasyonlar";

- a) Gevşemelere izin vermeyecek kadar küçük,
- b) Tünel cidarını plastikleştirecek, gerilme kemerini dağın içine kaydıracak kadar büyük,
- c) Zamanla sünümlenecek kadar kontrollü

tutulmalıdır. NATM yönteminin uygulanması sırasında iki farklı görüşten yararlanılır:

- 1. Yüzey oturmalarını ve tünel içi deformasyonlarını (konverjans'ı) olabildiğince küçük tutabilmek için "deformasyon önleyici" açım,
- 2. Deformasyonlara imkan tanıyarak dağ içinde koruyucu bölge oluşumunu sağlayan "plastikleştirici" açım türleridir.

Birinci görüş; kazı ve sağlamlaştırma işlemlerinin çok hızlı yürütülmesini ve en kısa zamanda (en fazla 15–30 m) kalın betonarme yapının (radye) kapanmasını sağlayacak şekilde çok iyi organize edilmiş çalışmaları gerektirir. Deformasyonları durdurmak için seçilen sağlamlaştırma kuvvetleri (ankrajlardaki ön gergi kuvvetleri) büyük, püskürtme beton kalitesi yüksek (B300 ve daha fazla) çelik hasır dokusu (<10 cm) dur. Çelik iksa rijittir ve çoğunlukla

yakın aralıklarla (<100 cm) yerleştirilir. Açınımı sırasında genellikle üst yarı (kalot), orta kesim (üst stros) ve taban (alt stros) olmak üzere üç kademeli kazı yapılır. Kazı profilleri en kesitlerde ve boy kesitte köşesizdir. Uygulanan sağlamlaştırma önlemleri ve kullanılan duyarlık süreleri için kabul edilen kaya kalitesi, gerçek durumdan en az bir kaya kalitesi sınıfı kadar daha düşüktür

İkinci görüş; deformasyonları durdurmak, yerinde denetleyerek ikincil gerilmelerin şiddetini azaltmayı ve tüneli çevreleyen kesime psödoplastik özellikler kazandırarak, gerilme yoğunlaşmalarını dağın içine doğru kaydırmayı amaçlamaktadır. Böylece sağlamlaştırma giderlerinde önemli ölçüde azalma sağlanabilmektedir. Bu anlayışla açılan tünellerin üzerinde ve yüzeyinde önemli, fakat zararsız çökmeler ve tünel çapında büyük ölçüde azalmalar gözlenirse de, aşırı gevşemelere izin verilmediği için kaya dokusu yöntemin ilkelerine ters düşecek oranda bozulmaz. Sağlamlaştırma öğeleri ince ve sünektir. Püskürtme beton kalınlığı çoğunlukla 3–5 cm ve kalitesi B200'dür. Hasır dokusu gevşek (10–20 cm) ve çelik bağlar eğilmeksizin çalışacak özelliktedir. Bağ aralıkları genellikle 1,5–3 m arasında seçilir. Yöntem, örtü kalınlığının fazla, yüzey oturmalarının (tasman) önemsiz olduğu boş araziden geçen ve su sirkülasyonunun bulunmadığı yerlerdeki, özellikle demiryolu ve karayolu ulaşım tünellerinde başarıyla kullanılmaktadır (Şekil 1.6) (URL- 4, 2007).



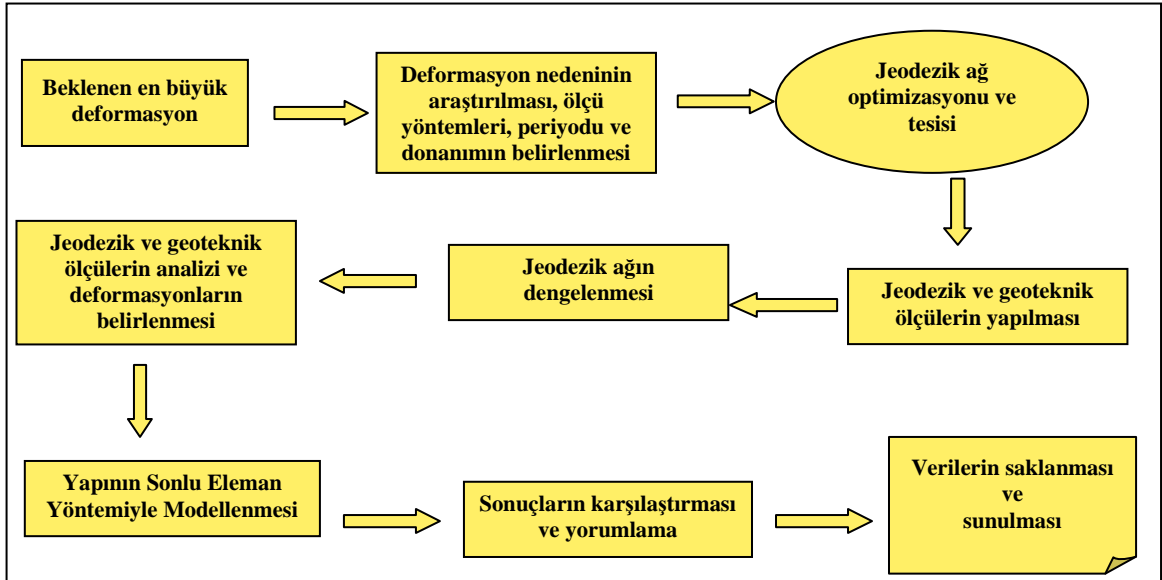
Şekil 1.6. NATM yöntemi ile tünel açma

En doğru tünel anlayışı, yerine göre ilk veya ikinci görüşü ağırlıklı olarak kullanabilen anlayıştır. Buna karar verebilmek için deformasyonun hızlarının ve gerilme değişimlerinin ölçülmesi ve denetlenmesi kaçınılmazdır. Bu nedenle, Yeni Avusturya anlayışında arazi deneyleri, ölçüm ve gözlemleri yöntemin en önemli belirteçleri arasında bulunmaktadır.

NATM, kısaca kazı bölgesi civarında, üç boyutta gerilme dağılımını kontrol altına almak, kazı sırasında oluşan “gevşeme ve deformasyonların minimize” edilmesi, “kayaç-zemin dayanımının korunması” olarak açıklanabilir. Belirtilen koşulların yerine getirilmesi için kazıdan hemen sonra erken taşıyıcılık sağlayabilecek (Püskürtme Beton+Çelik Hasır+Çelik Kafes İksa+Kaya Bulonu) ve çevre ortamı ile birlikte çalışacak taşıyıcı iksa sistemi oluşturmak, kazı faaliyetleri sırasında ve sonrasında oluşan tünel içi deformasyonların ve yüzey hareketlerinin devamlı ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekli olmaktadır. Diğer yandan varsa, yüzeyde bina, karayolu ve köprü gibi hassas yapılarda oluşacak deformasyonların ve oluşabilecek yapı hasarlarının ölçülmesi ve izlenmesi gereklidir (Rabcewicz, 1964; Leca, 1989; Sauer 1990; Arıoğlu v.d., 2002a).

1.4. Deformasyon Ölçüleri ve Analizi

Mühendislik yapılarında zamanla ortaya çıkabilecek geometrik değişimlerin ve bu değişimlere yol açan bazı parametrelerin izlenmesinde kullanılan yöntem, donanım, ölçme ve analizi deformasyon ölçmelerinin konusuna girer. Deformasyonların Jeodezik, geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemi ile izlenmesinde genel adımlar Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7. Deformasyon belirlemesinin genel adımları

Şekil 1.7’de görüldüğü gibi, deformasyon izlemesi yapılan objede beklenen en büyük deformasyonun belirlenmesinin ardından, oluşan deformasyonun nedenleri araştırılarak ölçü yöntemleri, ölçü periyodu ve donanımlara karar verilir. Objeye ve çevresini kapsayan jeodezik ağı tasarlanıp optimizasyonu yapıldıktan sonra tesis edilir. Jeodezik ve geoteknik ölçümler periyodik olarak yapılır. Jeodezik ağı dengelenip, uyumsuz ölçümler ayıklandıktan sonra hareketin nedenini de içeren dinamik deformasyon modeli ile hareket parametreleri belirlenir. Aynı zamanda geoteknik ölçümler de analiz edilerek deformasyonlar belirlenir. Sonlu Eleman Yöntemiyle de obje modellendirilerek, dış yükler etkisi altında oluşan deformasyonlar belirlenir. Farklı yöntemlerle belirlenen deformasyonlar karşılaştırılarak yorum yapılır. Son adım olarak sonuçların saklanması ve sunulması yapılır.

1.4.1. Tünelde Yapılan Geoteknik Ölçümler

Yerkabuğu, yapıların temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle yerkabuğunu oluşturan malzemelerin, yani zemin ve kayaların taşıma gücü, mukavemeti, hacimsel değişim davranışı (sıkışma, kabarma, büzülme vb.) gibi hususlar iyi bilinmelidir. Zeminlerin fiziksel ve mühendislik özellikleri tam olarak belirlenebildiği takdirde zeminlerin analizi, tasarım ve yapım yöntemleri yani geoteknik uygulamaları tam olarak gerçekleştirilebilir. Zemin mekaniği ve temel inşaat bilim dallarının her ikisini birlikte içine alan bu anabilim dalı Geoteknik anabilim dalı olarak adlandırılır.

Geoteknik ölçümler, zemin özellikleri tam kestirilemeyen ve derin kazı gerektiren inşaatlarda zemin mekaniğinin belirtilmesinde, yapı malzemelerinde temellerin ilettiği yapı yükünü taşıyan desteklerin incelenmesinde kullanılır. Tünel inşaatlarında yüzeyde ve tünel içinde;

- ❖ Yüzey oturması (tasman) ölçümleri,
- ❖ Tünel içi deformasyon ve opto-trigonometrik (konverjans) ölçümler,
- ❖ Ekstensometre ve inklinometre ölçümleri,
- ❖ Tünel içinde radyal ve teğetsel basınç hücreleri, yerleştirme ve ölçme,
- ❖ Ayna jeolojik haritası ve jeomekanik büyüklüklerin belirlenmesi

gibi geoteknik ölçümler yapılmaktadır (Chrazanowski, v.d., 1986; Arıoğlu v.d., 1994; Arıoğlu v.d., 2002b).

- Ekstensometre

Ekstensometre, noktalar arasındaki uzaklık değişimini izler. Çubuk ekstensometre, bir sondaj kuyusu içine zeminin düşey hareketini gözlemek için yerleştirilmektedir. Genelde üç kademedan oluşurlar. En alt kademesi tünel tavanının en çok 2 m üzerine gelecek şekilde kuyuya indirilir. Diğer kademelerin yeri jeolojik yapıya göre belirlenir. Kademe sayısı gerektiğinde artırılabilir veya azaltılabilir. Ölçümler yeryüzünde monte edilen ekstensometre kafasından alınır. Şerit ekstensometre ise herhangi bir mühendislik yapısında belirlenen iki sabit nokta arasındaki uzaklık değişimini inceler (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Ekstensometre aletleri

Herhangi bir yapıda (tünel, baraj, yol, vb.) belirlenen sabit noktaların ölçülmesiyle hareketin tipi ve miktarı konusunda yorum yapılabilir. Ekstensometre belirli aralıklarla delinmiş çelik bantlardan oluşur. Hassas bir ölçüm için ekstensometrenin iyi gerilmesi gerekir (Kalkan vd., 2003).

- Tünel İçi Konverjans ve Opto-Trigonometrik Ölçümler

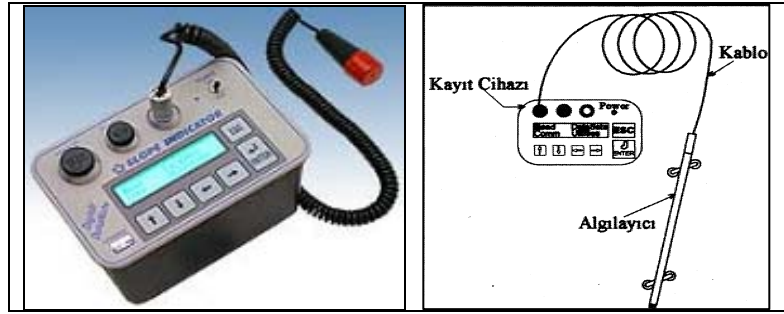
Konverjans ölçümleri 0.01 mm hassasiyetiyle şerit ekstensometreler vasıtasıyla tünel tavanı ve duvarlarının relatif hareketlerini gözlemek amacıyla; opto-trigonometrik ölçümler ise, duvarların mutlak hareketlerini yatayda ve düşeyde ölçmek için yapılmaktadırlar. Her iki ölçüm cinsi de bir adedi tavanda ve ikişer adedi yan duvarlarda olmak üzere toplam beş adet toplama bulonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tünellerde ortalama her yirmi beş metrede bir ölçüm kesitleri oluşturulmaktadır (Kalkan vd., 2003).

- Yüzey ve Bina Oturma Ölçümleri

Yüze ve binalara çakılan bulonlar vasıtasıyla oturmalar ölçülür. Bu iş için yüzeyde tünellerin eksenlerine dik olacak şekilde ortalama her 25 m’de bir ölçüm kesitleri oluşturulur. Burada da ölçüm sıklığı çubuk ekstensometrede olduğu gibi tünel aynasının ölçüm kesitine göre belirlenir. Ancak istasyon bölgelerindeki oturmalar kritik durumuna göre her gün ya da birkaç günde bir alınmaktadır (Kalkan vd., 2003).

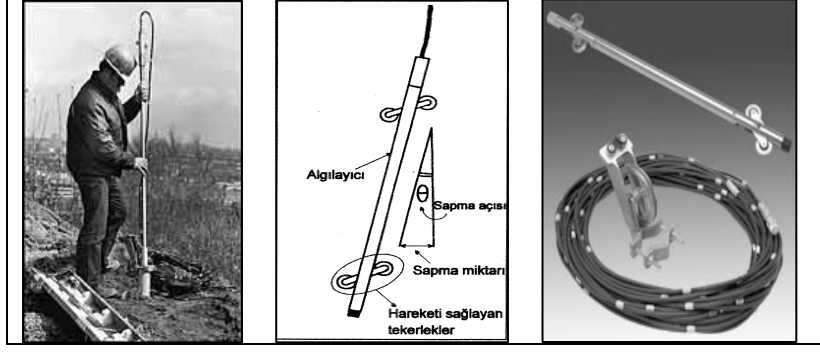
- İnklinometre

İnklinometre aleti, arazide açılmış deliklerin eksenlerinden düşey sapmalarını ölçmek için kullanılır. Ölçülen sapmalar, trigonometrik fonksiyonlarla ifade edilebilecek hale dönüştürülebilir (Hill ve Sipel 2002). İnklinometre aleti, esnek bir boru içerisinde deliğe indirilen probadan oluşan algılayıcı, kayıt cihazı ve bunlar arasındaki bağlantıyı sağlayan kablodan oluşur. Gövdesi, paslanmaz çelikten yapılmış olan algılayıcıların iki değişik tipi bulunmaktadır. Yanal yöndeki hareketlerin izlenmesinde kullanılan düşey inklinometre algılayıcıları, biri tekerleklerin bulunduğu düzlemde diğeri ise bu eksene 90 derece dik durumda bulunan iki adet eksene sahiptir. Bu sayede boruda hem kuzey - güney, hem de doğu - batı yönlerinde standart sapmalar hesaplanır ve yapılan ölçümleri görsel verilere, grafik formlara dönüştürülür (Şekil 1.9)



Şekil 1.9. İnklinometre aleti

Algılayıcıdan alınan voltaj değerleri, algılayıcının uzun ekseninin düşeyden olan sapması sonucu oluşan açıyla doğru orantılıdır. Yatay inklinometre algılayıcıları ise düşey yönde meydana gelecek şişme ve oturma miktarlarının saptanmasında kullanılmakta olup, çap ve boyları yine değişebilmektedir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. İnklinometrenin kuruluşu ve ölçümü

İnklinometre borusunun kurulduğu andaki pozisyonuna göre, bütün deplasmanların hesaplanmasına kadar, en az iki ayrı set halinde yapılacak olan ölçümlere göre borunun ilk konumunun doğruluğu kanıtlanmalıdır. İlk ölçümler yapıldığında borunun tepesi, zemin yüzeyinde, hareket beklenen bölgenin dışında bir noktaya yönelmiş olmalıdır. Ölçümlerin sıklığı çeşitli nedenlere bağlıdır, en önemli neden hareketin oranıdır. Yerleştirildikleri sondaj deliğinin eksenine dik yönde oluşan hareketlerin ölçülmesinde kullanılan inklinometreler yardımıyla düşey doğrultudaki deliğin iki tarafında 10 – 20 derecelik sapmalar ölçülebilmekte, hareketin yeri, büyüklüğü ve yönü saptanabilmektedir. Hareketlerin üçüncü boyutta da izlenmesi mümkündür. Bir tek inklinometre cihazı kullanılarak çok sayıda sondaj deliğinden ölçüm alınabilmekte ve ölçüm hassasiyetinin diğer yöntemlerden daha yüksek olması sebebiyle kaya kütlelerinde ve zeminde gelişebilecek çok yavaş hareketler de kaydedilebilmektedir.

- Strengaç

Strengaç, iki aksenal gerilme alanlarındaki başlıca gerilmelerin yönlerini ve büyüklüklerini belirlemekte kullanılmaktadır. Strengaç yardımıyla şekil değişimleri değişik yönlerde saptanabilmekte ve gerilmeler hesaplanabilmektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Strengaç aleti

- Piezometre

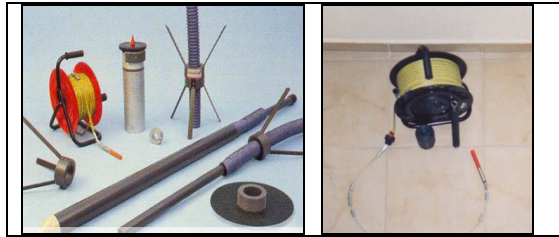
Piezometre, suya doymun veya yarı doymun zeminlerde yeraltı su seviyesi veya boşluk suyu basıncı ölçmelerinde kullanılır. Zeminlerdeki boşluk suyunun veya yeraltı su seviyesi değişimlerinin önemli olduğu durumlarda piezometrelerle değişik derinliklerdeki basınçlar ölçülür ve özel bir yazılım desteği ile bu farklar grafik gösterime dönüştürülür (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Piezometre aleti

- Manyetik Oturma Kolonları

Heyelan riski taşıyan bölgelerde belirli derinliklerde zemindeki oturmaların ölçülmesi, zeminin heyelanla ilişkisinin belirlenmesi açısından önemlidir. Zemin içerisindeki farklı derinliklerde düşey hareketlerin ölçülmesi, manyetik oturma kolonları (settlement gauges) ile yapılmaktadır. Oturma kolonları, sondaj kuyusu içerisine yerleştirilen bir boruya bağlı manyetik halkalardan oluşur. Bu borunun içine belirli zaman aralıklarında bir prob indirilerek her iki manyetik halkanın düşey hareketi ölçülür ve özel bir yazılımla ölçüler sahanın oturma profilini verecek şekilde çizgisel sonuçlara dönüştürülür. Oturma kolonları heyelanlı bölgelerde, seddelerde, temel altlarında, yeraltı kazılarında, barajlarda vb. yerlerde kullanılmaktadır (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Manyetik oturma kolonları

- Basınçölçer

Yüksek ölçüm hassasiyeti gerektirmeyen basınçölçerler sıvıların ve gazların basınçlarını ölçmek için kullanılan birer geoteknik ölçüm aletidir (Şekil 1.14).

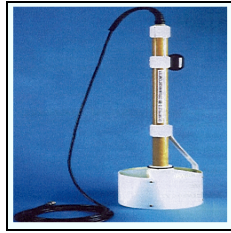


Şekil 1.14. Basınçölçer aleti

Basınçölçerler genellikle, dinamik basınç ölçümlerinde, ani basınç değişimlerinin olduğu yerlerde, titreşimin meydana geldiği yerlerde ve sürekli değişken basınç ölçümlerinde kullanılmaktadır.

- Manyetometre

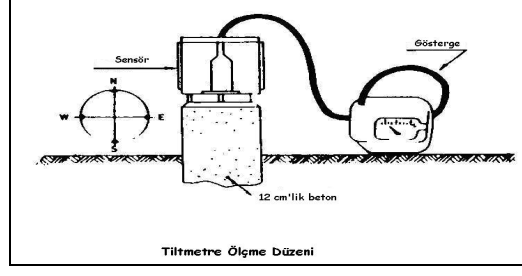
Manyetik alanda kayanın basınç altında deformasyonu meydana gelen bölgesel değişimleri belirlemek amacıyla kullanılan geoteknik ölçüm aletidir (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Manyetometre aleti

- Tiltmetre (Su Terazisi)

Sıvı içindeki hava kabarcığının hareketi, toprak yüzeyinin eğimindeki değişimi gösterir. Tiltmetrenin ölçü düzeni (Şekil 1.16)'da verilmiştir.



Şekil 1.16. Tiltmetrenin ölçü düzeni

- Işıma Sayacı (Radon Ölçer)

Gerilim altındaki kayalardan kuyu suyuna geçen radyoaktif radon gazının miktarını ölçer. Su basıncındaki değişimleri gösterir (Şekil 1.17).



Şekil 1.17. Radon ölçer aleti

- Sismometre

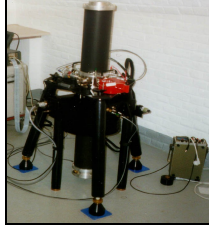
Şokların önemli bir habercisi olan sismik dalga hızlarındaki değişimleri gösterir. En zayıf titreşimi bile kaydeder (Şekil 1.18).



Şekil 1.18. Sismometre aleti

- Gravimetre

Toprağın yükselip alçalmasını ve toprak altındaki kayanın yoğunluğunu ölçer (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Gravimetre aleti

- Lazer Uzaklıkölçer

İki nokta arasındaki kesin uzaklığı ölçer. Böylece noktaların yatay olarak hareket edip etmediği anlaşılır (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. Lazer uzaklıkölçer

- Gerilimölçer (Voltmetre)

Kabuktaki kayanın genişleyip büzülmesini ölçer. Gerilimin birikmesini ve boşalmasını gösterir (Şekil 1.21).



Şekil 1.21 Gerilimölçer aleti

1.4.2. Tünellerde Yapılan Jeodezik Ölçümler ve Analizi

Teknolojideki gelişmelerle birlikte jeodezik yersel ölçme aletlerinde de gelişmeler olmuştur. Yeraltı mühendislik yapılarında olduğu gibi tünel deformasyonlarının

izlenmesinde de gelişmiş Total Station, Hassas Nivo, Lazer Tarayıcı gibi jeodezik aletler kullanılmaktadır. Son yıllarda, Total Station aletlerinin kullanım esnekliği, ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliğinin yanı sıra zaman tasarrufu sağlayan işletimi, bu aletleri, tasarım, araştırma, üretim ve kalite kontrol uygulamalarında maliyet düşürücü bir özelliğe kavuşturmuştur (Şekil 1.22).



Şekil 1.22. Otomatik total station

Otomatik total station, otomatik hedef tanıma ve izleme özelliğine sahiptir; 0.3 mm nokta konum (20 m) ve ± 0.2 mm uzaklık ölçme doğruluğu (120 m) sağlamaktadır.

Nokta yükseklikleri, geliştirilen modern tasarımlı, ergonomik yapılı, kullanımı basit ve hassas otomatik dijital nivolar ile yüksek doğrulukla belirlenebilmektedir (URL- 7, 2006). Yükseklik belirleme doğruluğu 0,8 mm olan hassas nivolar deformasyon ölçmelerinde sıkça kullanılmaktadır (Şekil 1.23).



Şekil 1.23. Hassas nivo

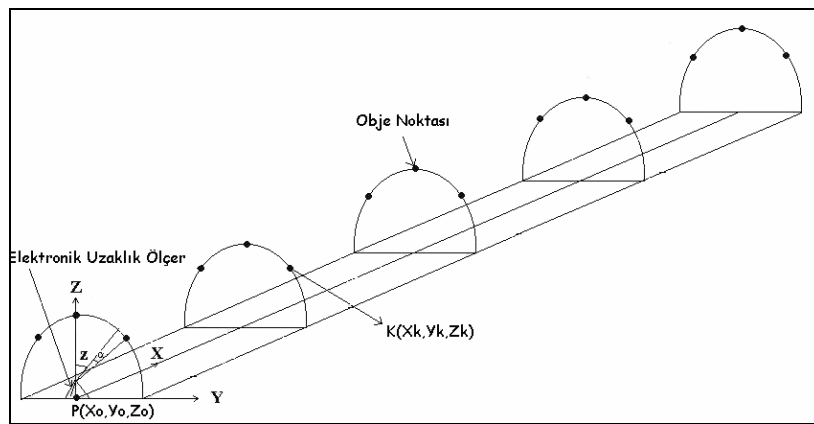
Güçlü bir donanıma sahip olan lazer tarayıcıların hızlı tarama modu ile 5–10 dakikada 250.000–500.000 nokta taranabilmektedir. Lazer tarayıcıların küçük deformasyonların belirlenmesinde kullanılması pek uygun olmamaktadır. Lazer Tracker'lar portatif 3 boyutlu

koordinat ölçme sistemleridir. Sistem yazılım ve donanım bölümlerinde oluşmaktadır. Donanım, sisteme yerleştirilmiş bir lazer interferometre ve yüksek doğruluğa sahip bir uzaklık ölçerden oluşmaktadır. Saniyede 3000 okuma ve 1000 adet koordinat çıktısı verebilmektedir (URL- 5 ve URL- 6, 2006). Bu özellik statik ölçmelerde yüksek doğruluk, tarama ölçmelerinde ise hızlı ve güvenli sayısallaştırma olanağı sağlamaktadır (Şekil 1.24).



Şekil 1.24. Lazer Tarayıcı ve Laser Tracker

Tünel deformasyonlarının belirlenmesinde, yersel Jeodezik aletlerden genellikle total station ve lazer tarayıcılar kullanılır. Tünelde Jeodezik olarak deformasyonların belirlenmesi için, kazı kademelerini takiben, çeşitli aralıklarla belirlenen istasyonlardaki kesitlerin tavan ve yan duvarlarına obje noktaları (deformasyon noktaları) tesis edilir (Şekil 1.25).



Şekil 1.25. Tünel obje noktaları ve elektronik aletle yapılan ölçüler

Kesitlerin tavan ve yan duvarlarındaki obje noktalarının koordinatları, belirlenen ölçü periyotlarında elektronik aletle ölçülür. Çeşitli periyotlarda ölçülmüş koordinatlar

yardımıyla oluşan yer değiştirmeler belirlenir (Niemeier, 1981; Welsch, 1983). Her kesitte bulunan noktaların ölçü periyotlarında belirlenmiş koordinatlarından yararlanarak ortalama hataları,

$$m_{o_j} = \sqrt{\frac{(v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2 + v_{z_i}^2)}{3(n-1)}} \quad (i=1,2,\dots,n); \quad (j=1,\dots,k) \quad (1)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada $(v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i})$, nokta koordinatlarının ortalama değerlerinden olan farklar alınarak bulunan düzeltme değerlerini; n, ölçü periyodu sayısını; k, kesitteki nokta sayısını göstermektedir. Her kesit için genel ortalama hata,

$$m_0 = \frac{\sum_{j=1}^k m_{o_j}}{k} \quad (2)$$

biçiminde hesaplanır. İstasyonlarda, ilk ölçü periyodu başlangıç (sıfır) periyodu (t_0) olarak alınır. Ölçü periyotlarında belirlenmiş koordinatlar ile sıfır periyodundaki koordinatların farkları alınır.

$$\begin{aligned} dx_j &= x_j - x_0 \\ dy_j &= y_j - y_0 \\ dz_j &= z_j - z_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Koordinat farklarının ortalama hatası, (2) eşitliğinden hesaplanan genel ortalama hata (m_0)'dan yararlanarak, çift ölçülerin ortalama hatasından

$$m_{dx}, m_{dy}, m_{dz} = m_0 \sqrt{2} \quad (4)$$

olarak hesaplanır. Obje noktalarının hareketini gösteren deformasyon vektörü

$$d_j = \sqrt{dx_j^2 + dy_j^2 + dz_j^2} \quad (5)$$

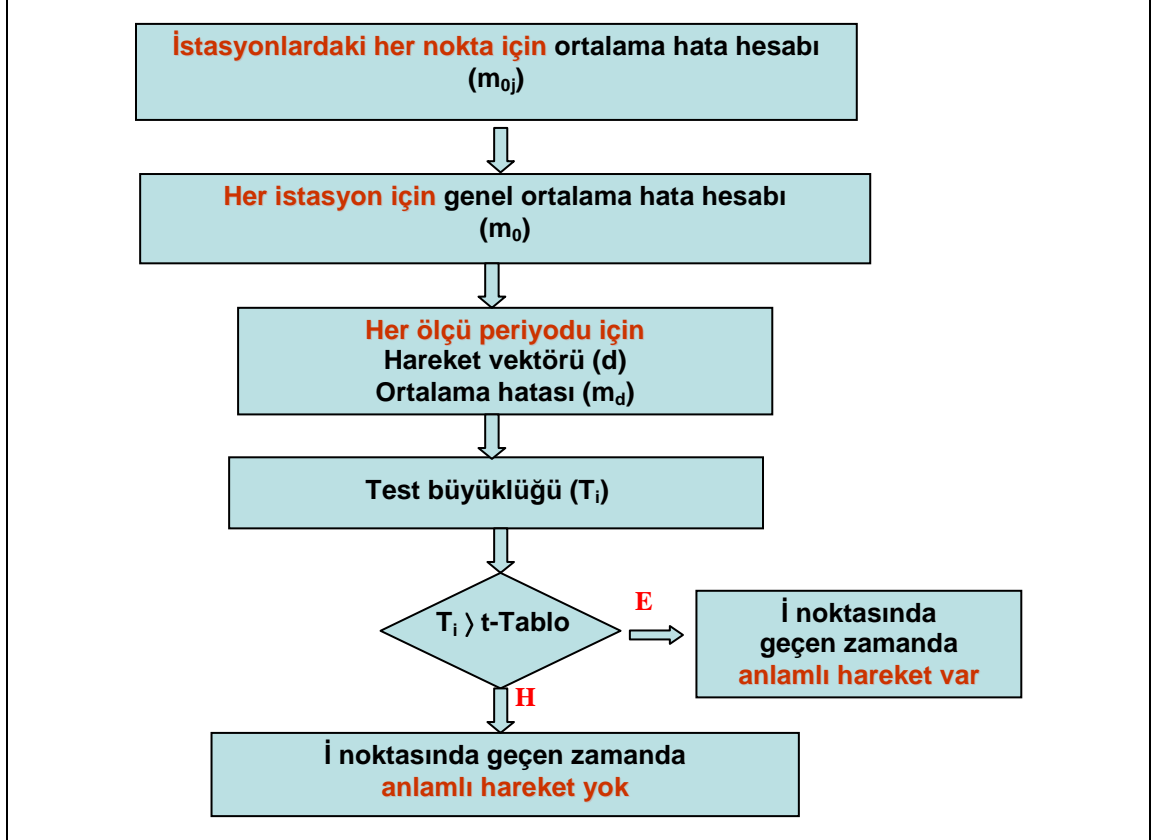
eşitliğinden hesaplanır. (5) eşitliğine koordinatlar arasındaki korelasyon dikkate alınmadan hata yayılma kuralı uygulanarak deformasyon vektörünün ortalama hatası,

$$m_{d_j}^2 = \frac{(dx_j)^2}{dx_j^2 + dy_j^2 + dz_j^2} m_{dx}^2 + \frac{(dy_j)^2}{dx_j^2 + dy_j^2 + dz_j^2} m_{dy}^2 + \frac{(dz_j)^2}{dx_j^2 + dy_j^2 + dz_j^2} m_{dz}^2 \quad (6)$$

biçiminde hesaplanır. Deformasyon vektörünün anlamlı olup olmadığını belirlemek için test büyüklüğü,

$$T_j = \frac{|d_j|}{m_{d_j}} \quad (7)$$

biçiminde hesaplanıp, t-tablo değeriyle karşılaştırılır. $T_j > t_{f,0.975}$ ise noktanın geçen süre içerisinde hareket ettiğine karar verilir (Welsch, 1981; Niemeier, 1985; Koch, 1999). Jeodezik ölçülerinden deformasyon analizinin iş akış şeması Şekil 1.26'da verilmiştir.

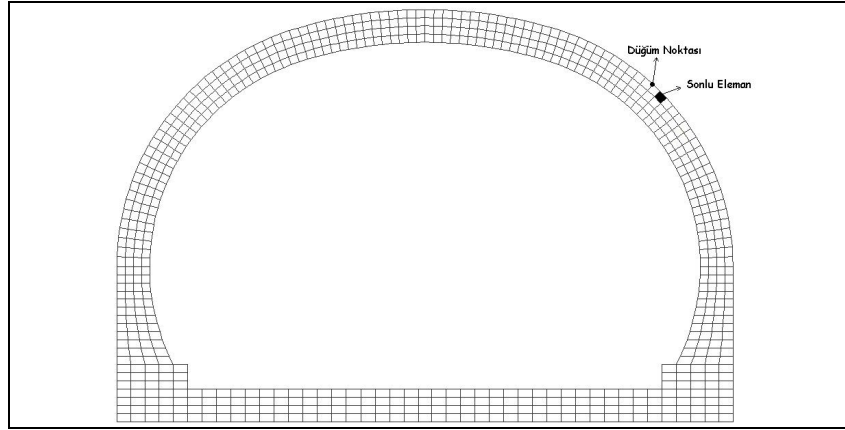


Şekil 1.26. Jeodezik ölçülerle deformasyon analizinin iş akış şeması

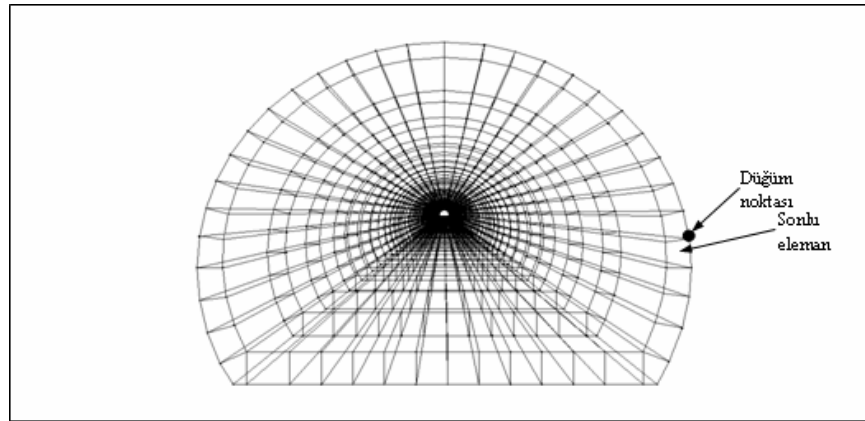
1.5. Sonlu Eleman Yöntemi

Sonlu eleman yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Sonlu eleman metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle elde edilen yöntemdir.

Sonlu eleman yönteminin temel yaklaşımı; sıcaklık, basınç, gerilme veya deplasman gibi herhangi bir sürekli büyüklüğün, küçük ve sürekli parçaların birleşmesi ile oluşan bir modele dönüştürülmesidir. Sonlu eleman yönteminde yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar "düğüm" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilerek denklem takımları elde edilir. Tüneller için oluşturulan iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri Şekil 1.27 ve 1.28'de verilmiştir.



Şekil 1.27. Tünelin iki boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 1.28. Tünelin üç boyutlu sonlu eleman modeli

Elemanlar uygun biçimde seçilmeli ve problemin yapısına uygun olarak yerleştirilmelidir. Değişkenin ani değişim gösterdiği yerlerde elemanlar küçük seçilmelidir. Uygun elemanlar seçmek kadar bu elemanları ve onların düğüm noktalarını uygun numaralamak ta önemlidir. Sonlu elemanlara ayırma işleminden sonra, ifade edilmek istenen büyüklüğün bölge içerisinde değişimini gösteren bir enterpolasyon fonksiyonu belirlenir. Fonksiyon gerçeğe ne kadar yakın seçilirse çözümdeki yaklaşıklıkta o kadar iyi olur (Clough, 1960; Hillier ve Lieberman, 1995; Hinton ve Owen, 1977; Zienkiewicz ve Morgan, 1983; Segrlind, 1984; Moaveni, 2003).

Günümüzde, diferansiyel denklemlerle ilgili matematik modellerin ayrık benzeşiklerinin oluşturulması ve elde edilen ayrık problemin bilgisayarda çözümlenmesi açısından en kapsamlı ve evrensel yöntem, sonlu eleman yöntemi (SEY)'dir. Bu yöntemin klasik sonlu farklar yönteminden başlıca farkı, bunun sınır değer problemini değil, varyasyonel problemi temel almasıdır. Bu nedenle SEY, bilimsel ve teknolojik problemlerin sayısal çözümlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. SEY'in boyutlarının büyüklüğünü göstermek için, bunun hem matematiksel analiz, hem diferansiyel denklemler, hem sayısal yöntemler, hem bilgisayar bilimleri, hem de çeşitli mühendislik bilimleri dallarıyla iç içe olduğunu söylemek yeterlidir (Hrennikof, 1941; Mchenry, 1943; Turner v.d. 1956; Argyis and Kelsey, 1960; Strome, 1963; Argyis, 1964; Grafton and Koenig and Davids, 1969; Gallagher, 1969; Doctors, 1970).

Sonlu eleman yönteminde üç boyutlu model oluşturulurken elemanın herhangi bir noktasındaki x , y ve z koordinatları, düğüm noktası koordinatlarına bağlı olarak geometrik enterpolasyon fonksiyonları ile

$$\begin{aligned} x^e &= \sum_{i=1}^n h_i x_i^e \\ y^e &= \sum_{i=1}^n h_i y_i^e \\ z^e &= \sum_{i=1}^n h_i z_i^e \end{aligned} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; x^e, y^e, z^e , sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki koordinatlarını; x_i^e, y_i^e, z_i^e ise n düğüm noktalı elemanın i . düğüm noktası koordinatlarını göstermektedir. h_i , enterpolasyon fonksiyonları olup, her bir değişkeni -1 ile $+1$ arasında

değişen yerel eksen takımında tanımlanmaktadır. Aynı şekilde, elemanın herhangi bir noktasındaki deformasyonun x , y , z eksenleri doğrultusundaki bileşenleri (U_x, U_y, U_z), düğüm noktası deformasyonlarına bağlı olarak,

$$\begin{aligned} U_x &= \sum_{i=1}^n h_i U_{xi}^e \\ U_y &= \sum_{i=1}^n h_i U_{yi}^e \\ U_z &= \sum_{i=1}^n h_i U_{zi}^e \end{aligned} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; $U_{xi}^e, U_{yi}^e, U_{zi}^e$ n düğüm noktalı elemanın x , y ve z eksenleri doğrultusundaki düğüm noktası deformasyonlarını göstermektedir. Eğer bir sonlu elemanda, eleman koordinat ve deformasyonlarının elde edilmesi için aynı enterpolasyon fonksiyonları kullanılıyorsa böyle sonlu elemanlara “izoparametrik sonlu eleman” denir. Sonlu eleman yönteminin çok önemli olan bu özelliğinden faydalanarak, yapının herhangi bir elemanındaki deformasyonu, düğüm noktası deformasyonlarına bağlı olarak deformasyon enterpolasyon fonksiyonları cinsinden ifade edilmektedir. Bu deformasyon fonksiyonları temel alınarak, eleman düğüm noktası kuvvetleri ile düğüm noktası deformasyonları arasındaki bağıntıyı sağlayan eleman rijitlik matrisi elde edilir. Son olarak sonlu eleman sisteminin çözümü için aşağıdaki bağıntı yazılabilir;

$$F = KU \quad (10)$$

Burada F , sistemin dış yük vektörünü; U , deformasyon vektörünü göstermektedir. Sistemin rijitlik matrisi K ise,

$$K = \sum K^e \quad (11)$$

şeklinde K^e eleman rijitlik matrislerinin toplamından oluşmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin diğer yöntemlerle göre üstünlükleri:

- Sonlu elemanların, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cisimi temsil edebilmesi, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir olması,

- Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgelerin zorluk çekilmeksizin incelenebilmesi,
- Değişik malzeme ve/veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermemesi ve geometri ile malzeme nonlineariteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özelliklerinin kolaylıkla göz önüne alınabilmesi,
- Sebep-sonuç bağıntılarına ait problemlerin sistem rijitlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş "kuvvetler" ve "yer değiştirmeler" cinsinden formüle edilebilmesi,
- Sınır şartlarının kolayca uygulanması,
- Sonlu eleman yönteminin, çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilmesi, analitik ve deneysel yöntemlerden daha hassas sonuç vermesidir.

Sonlu elemanlar yönteminde, doğru element tipini seçmek analiz işleminin çok önemli bir parçasıdır. Çözümü istenen cismin geometrisi, analizin tipi (mukavemet, ısı transferi, manyetik analiz tipi) ve sınırları eleman seçimini etkiler. Çözümü istenilen problemin geometrisi kullanılan sonlu eleman yöntemine dayalı paket program içinde veya bir CAD ortamında oluşturulabilir. Analiz işleminde ağ oluşturma işlemi sonlu eleman yönteminin belkemiğini oluşturur. Ağ oluşturma işleminde düğüm noktalarının ve elemanlarının koordinatları belirlenir. Aynı zamanda kullanıcı tarafından girilen minimum bilgiye karşılık optimum sürede otomatik olarak düğüm noktalarını ve elemanlarını sıralayarak numaralanmasını sağlar.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Türkiye'nin en büyük yol projelerinden biri olan Karadeniz Sahil Devlet Yolu (KSDY) Projesi kapsamında bölgede 12 tünelin yapımı tamamlanmıştır. Bu çalışmada, KSDY geçişlerinden Trabzon 2 ve Arhavi Tünelleri uygulama alanı olarak seçilmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. KSDY geçişlerinden Trabzon 2 ve Arhavi tünellerinin konumu

Tünellerdeki deformasyonlar, jeodezik ölçüler, geoteknik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemiyle belirlenmiştir ve sonuçlar irdelenmiştir.

2.1. Trabzon 2 Tüneli

KSDY geçişlerinden Trabzon 2 tüneli, Trabzon ili merkezinde Trabzon sahil caddesi üzerinde bulunmaktadır. Trabzon sahil caddesi, önemli bir şehir içi ulaşım arteri ve caddesi konumundadır. Cadde, Karadeniz Sahil Devlet Yolunun şehir içinden geçen bölümünü ve şehirlerarası ulaşım fonksiyonunu da karşılamaktadır. Halen şehir içindeki önemli bir kısmı bölünmüş yol durumunda olan cadde, tünelin yapıldığı yerde daha önceden yapılmış tek tüplü Trabzon tüneli olması nedeniyle zorunlu olarak bölünmemiş

iki Őeritli yol durumuna dūŐmektedir. Bōylece sōzū geĉen tūnel noktasında, trafik boĝulmakta ve sıklıkkların oluŐtuĝu bir darboĝaz haline gelmektedir (Őekil 2.2).



Őekil 2.2. Trabzon Tūnelinde trafiĝin sıklıkıĝı andan bir gōrūnūm

Karayolları Trabzon X. Bōlge Mūdūrlūĝū'nce sōz konusu yoĝunluĝunun giderilmesi amacıyla mevcut tūnelin gūneyinde ve hemen yanında ikinci bir tūnel aĉılması planlanmıŐtır. Planlanan Trabzon 2 tūneli, 0+542.500 km ile 0+670.870 km arasında bulunmaktadır (Őekil 2.3).



Őekil 2.3. Trabzon ve Trabzon 2 tūnel tūpleri

Trabzon 2 Tünelinin yapılacağı yerde yoğun yapılaşmanın bulunması, tarihi eserlerin olması, topoğrafik koşullar ve hat geometrisi dolayısıyla tünelin açılması önem kazanmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Trabzon 2 Tüneli ve çevresindeki yerleşim

Tünelin içerisinde yer aldığı zemin zayıf-çok zayıf kaya biçiminde olduğundan, tünelin üst kısmı NATM yöntemiyle; zemin kısmı ise yavaş kazı olarak nitelendirilen ve su altı tünelciliğinde uygulanan “Shield Tunnelling” metodu ile açılmıştır (Leca, 1989; Jancsecz v.d., 1999; Domaniç, v.d., 2005).

2.1.1. Trabzon 2 Tünelinin Zemin Jeolojisi

Bölgede Mapa İnşaat ve Ticaret A.Ş tarafından yapılan jeolojik araştırmalar sonucunda, KSDY Trabzon 2 Tünelinin güzergâhı boyunca genel olarak Eosen yaşlı Kabaköy Formasyonuna ait zayıf-çok zayıf dayanımlı aglomera ve tuf birimleri yer aldığı belirlenmiştir. Aglomeralar tuf ile ardalanmalı, hamur malzemesi tüften oluşan çok ayrılmış, ezik zonlu, su ile temasta dağılabilir kumtaşı, çakıl taşı görünümündedir. Sondaj çalışmalarında ara seviyelerde kireçtaşı mercekleri içerdiği tespit edilmiştir. Tüfler genel olarak sarımsı renkli, çok fazla ayrılmış, su ile temasta ufalanabilir ölçüde zayıf-çok zayıf dayanımlıdır ($c=0,35$ MPa, $\phi=25^\circ$). Yer yer $10^\circ-11^\circ$ kuzeye eğimli ezik zonlar içermektedir. Tüfler yatay tabakalı olup, tabakalar arasında kil dolgular bulunmaktadır. Temel güzergâhı boyunca yapılan jeolojik-geoteknik incelemeler, sondaj ve laboratuvar

sonuçlarına göre tünel kayasının geomekanik tanımları Tablo 2.1’de verilmiştir (Domaniç, v.d., 2005).

Tablo 2.1. Trabzon 2 Tünel kayasının geomekanik değerleri

RQD (Rock Quality Designation)	< 25
Q (Rock Quality Index)	0,2 - 0,3
RMR (Rock Mass Rating)	$21 \leq RMR \leq 40$
ϕ (Friction cone)	$23^\circ - 25^\circ$
C (Chosion)	0,30 – 0,35 MPa
Geçirimsizlik	Orta geçirimsiz
NATM Kaya Sınıfı	C2 – C3

Tünel Kazısı sırasında tamamen kazıcı makinelerle ayna kazısı tamamlanmış olup, tünel kesitine başlangıçta yaklaşık 4 lt/dk su gelişi gerçekleşmiştir. Tünel kazısı çelik donatı destekli invert kazılı, çelik lifli püskürtme beton ($d_s=60-65$ cm), H-200 çelik profil radyal sistematik bulonlama şeklinde destekleme ile sağlanmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Trabzon 2 Tüneli kazı çalışmaları

2.1.2. Trabzon 2 Tünelinde Yapılan Geoteknik Çalışmalar

KSDY Trabzon 2 Tünelinde zeminin basınç dayanımını belirleme araştırmaları sonuçlarına göre, yaklaşım yolu kazısı sırasında ve sonrasında oluşacak deformasyon

miktarı ve derinliğini ölçmek amacıyla arazide tünele yakın uygun yerlerde Km:0+519'a inklinometre-I borusu ve Km:0+513'e inklinometre-II borusu yerleştirilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Trabzon 2 Tünelinde tesis edilen inklinometre-I ve II boruları

İnklinometre-I ve inklinometre-II borularında Slope Indicator aletiyle ölçümler yapılmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. İnklinometre-I ve II boruları ile inklinometre aleti

İnklinometre-I ve İnklinometre-II borularında, Ocak 2004 tarihinden başlayarak periyodik olarak ölçümler yapılmıştır (Tablo 2.2).

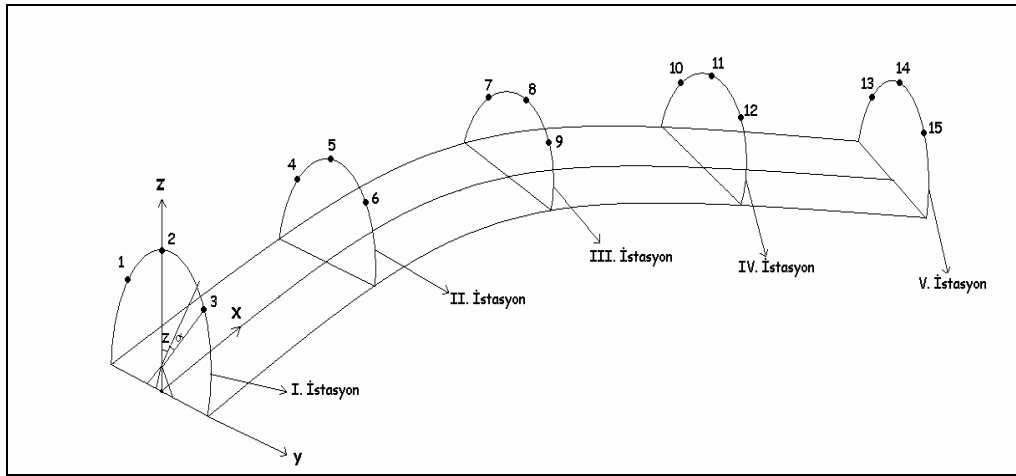
Tablo 2.2. İnklinometre-I ve II borularında yapılan ölçülerin periyotları

Periyot	Ay	Gün	Periyot Sayısı
I	Ocak	12, 19, 26	10
	Şubat	9, 16, 23	
	Mart	8,16, 22, 29	
II	Nisan	7, 12, 21, 28	5
	Mayıs	3	
III	Mayıs	12, 17, 25, 31	5
	Haziran	7	
IV	Haziran	7, 15, 21, 29	5
	Temmuz	5	
V	Temmuz	5, 12, 21, 27	5
	Ağustos	4	
VI	Ağustos	4, 10, 19, 25, 31	5
VII	Eylül	13, 20, 27	5
	Ekim	5, 11	
VIII	Ekim	18, 25	5
	Kasım	1, 22, 29	

Tablo 2.2’de görüldüğü gibi İnklinometre–I ve İnklinometre–II borularında VIII periyot ölçü yapılmıştır. Ölçüm sonuçları bilgisayar ortamında grafiğe dökülerek oluşan hareketler belirlenmiştir.

2.1.3. Trabzon 2 Tünelinde Yapılan Jeodezik Çalışmalar

Karadeniz Sahil Devlet Yolu (KSDY) Trabzon 2 Tünelinde 6 m aralıklarla 5 istasyon belirlenmiştir. Bu istasyonlardaki kesitler üzerinde tavan ve yan duvarlara obje noktaları tesis edilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Trabzon 2 Tüneli istasyonlarındaki kesitler ve obje noktaları

Bu noktaların koordinatları, Total Station aletiyle 2005 yılının Şubat, Mart, Nisan aylarında yapılan periyodik ölçülerle belirlenmiştir.

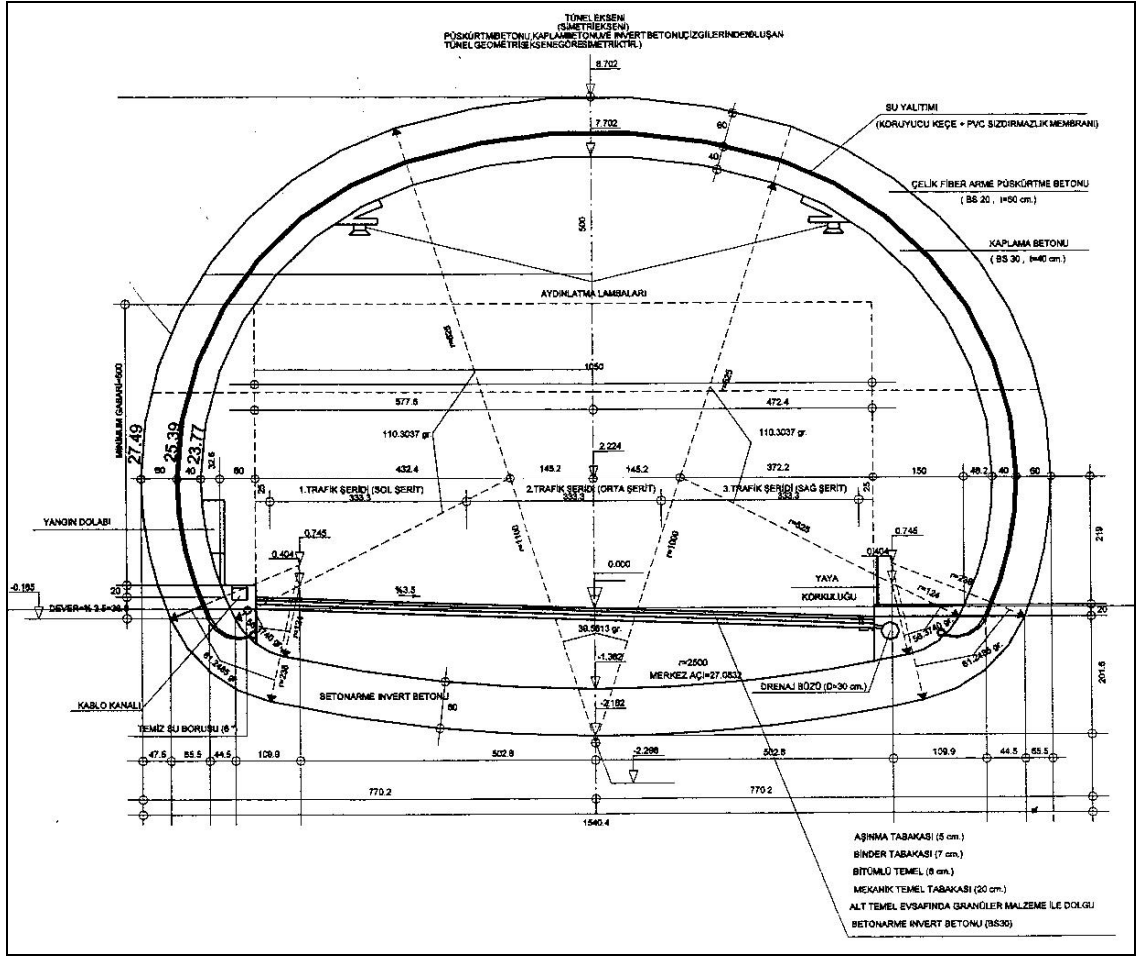
Tablo 2.3. Trabzon 2 Tüneli istasyonlarındaki kesit kontrol noktalarında yapılan jeodezik ölçü periyotları

İstasyon No	Ay	Gün	Toplam Periyot Sayısı
I	Şubat	23, 24, 25, 26, 27, 28	40
	Mart	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31	
	Nisan	1, 2, 3, 4, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30	
II	Şubat	25, 26, 27, 28	42
	Mart	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31	
	Nisan	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30	
III	Şubat	28	39
	Mart	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31	
	Nisan	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30	
IV	Mart	5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31	27
	Nisan	1, 2, 3, 4, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30	
V	Mart	17, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31	25
	Nisan	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24	

Tüm kesitlerdeki noktaların, her periyotta belirlenmiş koordinatlarından yararlanarak ortalama hataları (m_{o_j}); nokta koordinatlarının ortalama değerlerinden olan farklar alınarak bulunan düzeltme değerlerinden ($v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i}$) yararlanarak, (1) eşitliğinden hesaplanmıştır. Kesitdeki her nokta için hesaplanan ortalama hatalardan yararlanarak genel ortalama hata (2) eşitliğinden elde edilmiştir. Tüm istasyonlarda, ilk ölçü periyodu başlangıç (sıfır) periyodu (t_0) olarak alınmıştır. Her periyotta belirlenmiş koordinatların sıfır periyodundaki koordinatlardan olan farkları alınarak nokta hareketini gösteren vektör (5) eşitliğinden hesaplanmıştır. Deformasyon vektörünün (6) eşitliğinden hesaplanan ortalama hatası yardımıyla test büyüklüğü (7) eşitliğinden hesaplanıp, t-tablo değeriyle karşılaştırılmıştır. $T_i > t_{f,0.975}$ ise noktanın geçen süre içerisinde hareket ettiğine karar verilmiştir. Deformasyon analizi, tüm istasyonlar için ayrı ayrı yapılmış ve istatistik olarak anlamlı olan hareketler belirlenmiştir.

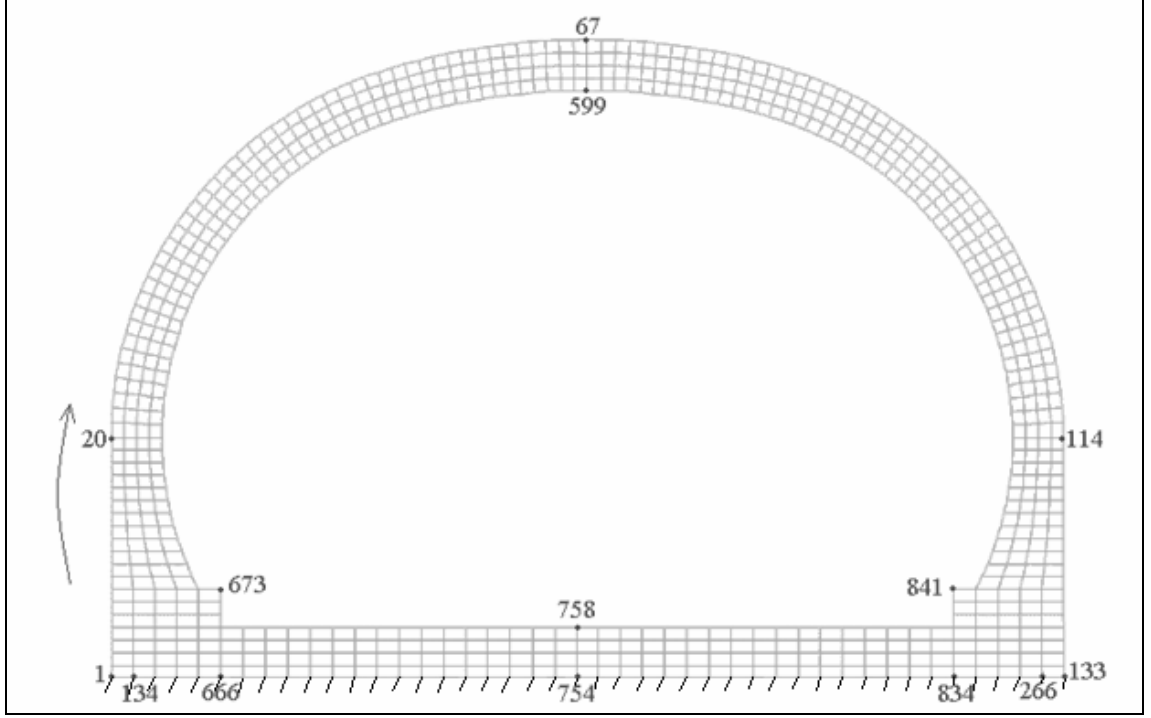
2.1.4. Trabzon 2 Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile İki Boyutlu Modellenmesi

Çalışmada, Trabzon 2 Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemiyle iki boyutlu modelinin oluşturulması ve dış yüklerin etkisiyle meydana gelebilecek deformasyonların belirlenmesi yapılmıştır. Model oluşturmak için tünelin sonlu elemana bölünmesi gerekmektedir. Bu nedenle tünel geometrisinden Şekil 2.9'dan yararlanarak Trabzon 2 Tüneli sonlu elemanlara bölünmüştür.



Şekil 2.9. Trabzon 2 Tünelinin geometrisi

Şekil 2.9'da görülen daire merkezlerinden belirli açılarla püskürtme beton sonlu elemana bölünmüştür. Tünelde 674 sonlu eleman ve 841 düğüm noktası belirlenmiştir. Numaralamalar saat ibresi yönünde yapılmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Trabzon 2 Tünelinin iki boyutlu sonlu eleman modeli ve numaralanması

Düğüm noktalarının yatay koordinatları (x_i^e, y_i^e) Netcad programından belirlenmiştir. Bu koordinatlardan yararlanarak SAP2000 bilgisayar programı kullanılarak tünelin iki boyutlu modeli oluşturulmuştur. Tünelde oluşan deformasyonlar, tünele etki eden yatay ve düşey yükler (F) dikkate alınarak sonlu eleman yöntemiyle belirlenmiştir. Trabzon tünelinin hesabında, tünel üzerinde 7 metre yüksekliğinde bir zemin dolgunun bulunduğu kabul edilmiştir. Bu zeminden dolayı oluşan basınç kuvvetleri, tünelin sonlu eleman modelinde, yapı-zemin etkileşim yüzeyindeki düğüm noktalarına tekil kuvvet olarak etkittirilmiştir. Trabzon tünelinde elastisite modülü $E = 2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, poisson oranı $\nu = 0.20$ ve birim hacim ağırlığı $w = 23112,36 \text{ N/m}^3$ olarak dikkate alınmıştır.

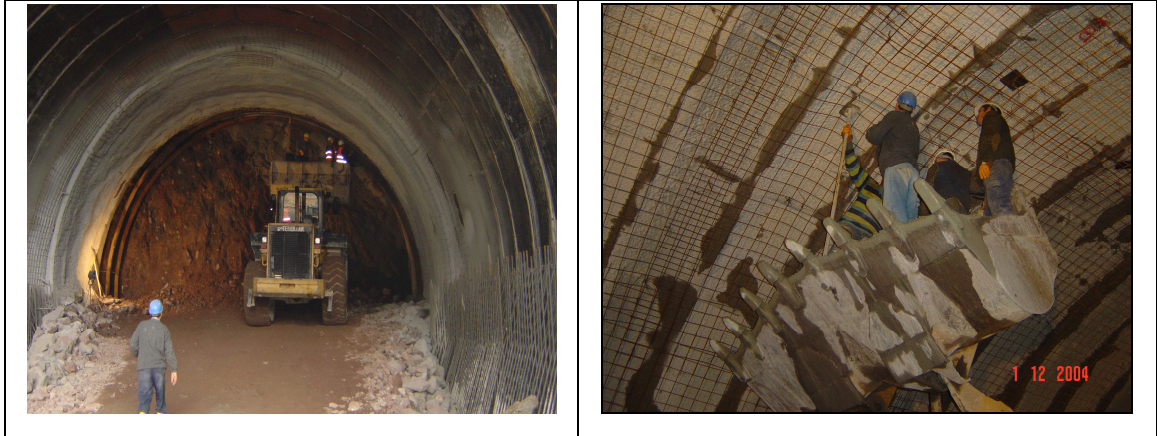
2.2. Arhavi Tüneli

KSDY'de inşa edilen tünellerden birisi de Artvin ili, Arhavi ilçesi sınırları içindeki Arhavi Tüneli'dir. Karayolları X. Bölge Müdürlüğü tarafından Çayeli-Ardeşen-Hopa devlet yolu üzerindeki çift tüplü Arhavi Tünelinin sağ tüpü (Km 207+815-Km 208+815) 1033 m ve sol tüpü (Km 207+840-Km 208+795) 955 m uzunluğundadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Arhavi Tüneli

Arhavi Tüneli Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu ile açılmıştır. Jeolojik ve mühendislik jeolojisi verilerine dayanarak kaya kalite sınıflamaları yapılmıştır. Homojen bölgelendirme ve geoteknik değerlendirmeler yapılmıştır. Kaya kalite sınıflamalarına dayanarak NATM kaya destekleme sınıfları ve destekleme elemanları belirlenmiştir (Şekil 2.12).

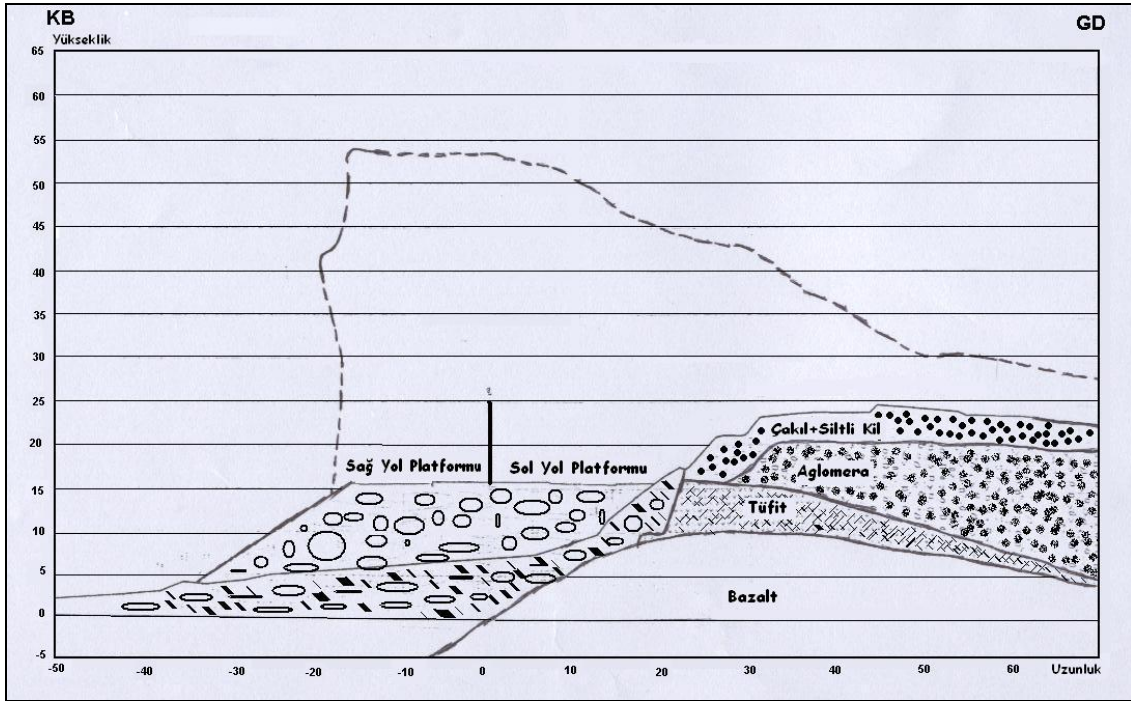


Şekil 2.12. Arhavi Tüneli kazı çalışmaları

2.2.1. Arhavi Tüneli Güzergâh Jeolojisi

Doğu Karadeniz Bölgesi, Arhavi kesiminde yapılan jeolojik çalışmalar, yöre kayaçlarının 70–110 milyon yıl önce Mesozoik zamanın Jura ve Kretase devrinde volkanik

faaliyetler sonrası oluştuğunu göstermektedir. Jura (Liyas) oluşumlu alt Bazik Seri kayalar olan bazalt, andezit ve proklastik kayalar üzerine Kretase (Üst Kretase) devrinde dasit, dasitik tüf, andezit, andezitik tüf, bazalt ve piroklastları ile aglomera gibi kayalar yerleşmiş, bunlar arasına kumtaşı, kireçtaşı, marn gibi kayalar çökelmiştir. Arhavi tüneli, Üst Kretase döneminde oluşan bu volkanik kayalardan bazalt, aglomera ve tüfler içerisinde inşa edilmiştir. Bu kayalardan siyahımsı-yeşil renkli olan bazaltın dayanımı genellikle yüksek olup, kırıklı ve çatlaklıdır. Güzergâhta zemin niteliğinde çakıllı siltli kil, 3–12 milyon yıl önce Senozoik (Pliosen) zamanında 6–7 metre kimi yerlerde çok daha yüksek kalınlıklara ulaşabilmektedir (Şekil 2.13).



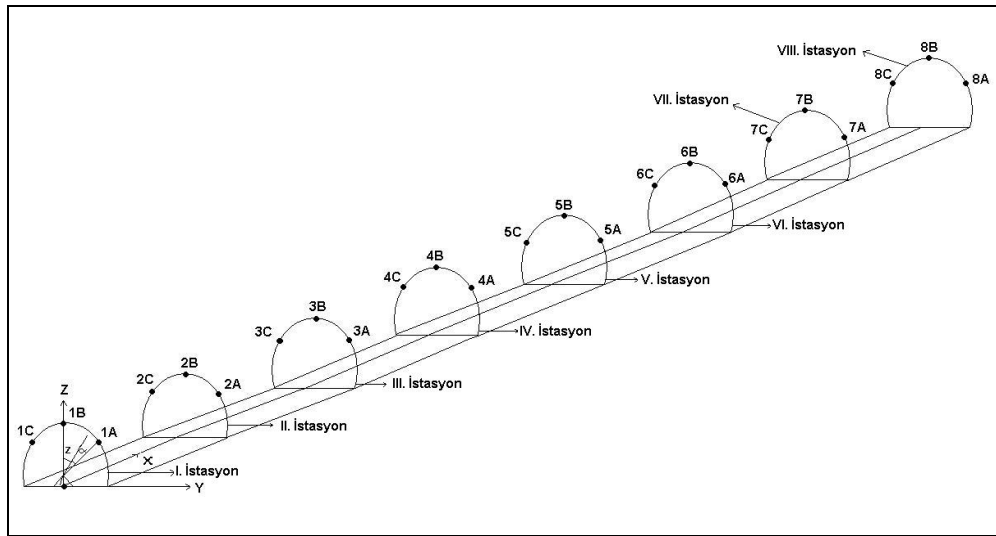
Şekil 2.13 Arhavi Tünelinin jeolojik yapısı

Bölgenin bugünkü yapısı kırık tektoniği sonucunda oluşmuştur. Kırıklı ve çatlaklı olan kayalarda çatlaklar genellikle açık olup, kimi yerlerde kil veya kalsit dolguludur. Kayaların çatlak açıklığı genellikle 1–5 mm ile 10–50 mm arasında olup, çatlak aralığı 20–30 cm'den 1–2 m aralığa kadar değişebilmektedir. Hakim çatlak doğrultu ve eğimi K20-70B / 20-90 KD-GB şeklindedir. Çatlak yüzeyleri çoğunlukla düz-az pürüzlüdür (Goodman vd. 1970; Goodman, 1976; Palmström ve Berthelsen 1988).

Güzergâhta yer alan tepeler kuzeybatıdan güneydoğuya doğru yükselmektedir. Yükselti deniz tarafında dik falez şeklindedir. Tünel giriş ve çıkışlarında sol tüp yamaca yaklaştığı için bazı yerler yamaç tüneli özelliği kazanmaktadır. Güzergâhın genel topografyası litolojik değişimler, tektonik zorlanmalar, dağ kaymaları, eski dönemlerde meydana gelmiş heyelanlar, ayrışma-aşınma olayları gibi nedenler ile değişime uğramış, kendi içerisinde tepeler oluşturmuştur. Güzergâhta eski yeni zamanlı heyelan ve kriplere sıkça rastlanmaktadır (Cengiz-MAPA-MAKYOL-Ortak girişimi, 2004).

2.2.2. Arhavi Tünelinde Yapılan Jeodezik Çalışmalar

Arhavi tüneline, Jeodezik olarak deformasyonları belirlemek için farklı aralıklarla sekiz istasyonda kesitler oluşturulmuştur. Her kesitte sağ yan duvara (A), tavana (B) ve sol yan duvara (C) obje noktaları (kontrol noktaları) tesis edilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Arhavi Tüneli istasyonlarındaki kesitler ve obje noktaları

Kontrol noktalarının 3 boyutlu koordinatları çeşitli periyotlarda elektronik aletle ölçülmüştür (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Kontrol noktaları

Arhavi tüneline oluşturulan VIII kesitteki kontrol noktalarının koordinatları, Total Station aletiyle 2004 yılının Aralık, Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Mayıs aylarında yapılan periyodik ölçülerle belirlenmiştir (Tablo 2.4).

Tablo 2.4. Arhavi Tüneli istasyonlarındaki kesit kontrol noktalarında yapılan jeodezik ölçü periyotları

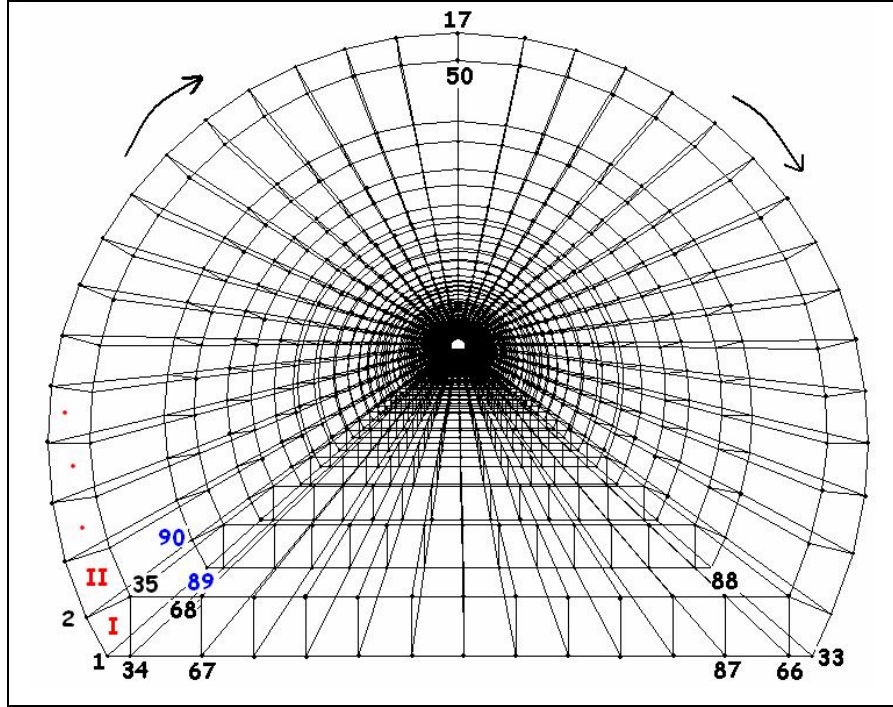
İstasyon No	Ay	Gün	Toplam Periyot Sayısı
I	Aralık	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 22, 29	11
II	Aralık	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 22, 29	11
III	Aralık	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 27	14
	Ocak	6, 16, 26	
IV	Ocak	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 16, 23, 30	12
	Şubat	15	
V	Ocak	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 22, 29	15
	Şubat	5, 15, 26	
	Mart	6	
	Nisan	5	
VI	Şubat	11, 12, 13, 14, 15, 16, 26	11
	Mart	6, 16, 26	
	Nisan	5	
VII	Mart	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	8
	Nisan	4	
VIII	Nisan	23, 24, 25, 26, 27, 28, 29	10
	Mayıs	7, 14, 24	

Arhavi tüneline yapılan periyodik jeodezik ölçülerin deformasyon analizi, Trabzon 2 Tünelindeki ölçülerin analizinde açıklandığı biçimde yapılmıştır. Böylece tüm

istasyonlardaki kesitlerde bulunan kontrol noktalarının istatistik olarak anlamlı bulunan hareketleri belirlenmiştir.

2.2.3. Arhavi Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Üç Boyutlu Modellenmesi

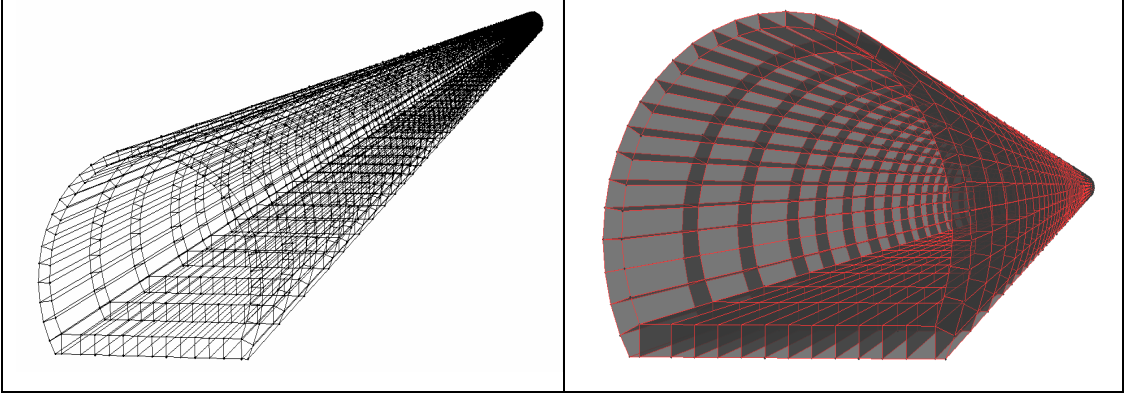
Arhavi Tünelinin 1033 m uzunluğundadır. Sistemin simetrik olmasından faydalanarak olan sağ tüpün yarısı, Sonlu Eleman Yöntemiyle modellenmiştir. Tünelde püskürtme beton sonlu elemana bölünmüştür. Simetri eksenini üzerinde düğüm noktasının sınır şartları tünel boyunca yer değiştirmeler sıfır olacak şekilde dikkate alınmıştır. Bu modelde 61 kesit bulunmaktadır. Bir kesitte 44 sonlu eleman olduğundan eleman sayısı $44 \times 60 = 2640$ olarak elde edilmiştir. Bir eleman için 8 düğüm noktalı katı eleman kullanılmıştır. Bir kesitte 88 düğüm noktası olduğundan 61 kesitte toplam 5368 adet düğüm noktası oluşmuştur (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Arhavi Tünelinin üç boyutlu sonlu eleman modeli ve numaralanması

Düğüm noktaları toplam 16104 adet serbestlik derecesine karşılık gelmektedir. Sınır şartlarından dolayı 2818 adet tutulu serbestlik derecesi vardır. Böylece sistemde 13286

adet aktif serbestlik derecesi, yani çözülecek denklem sayısı mevcuttur. Arhavi tünelinin oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.17. Arhavi Tünelinin üç boyutlu modeli

Analizlerde, tünelde kullanılan BS30 betonunun Elastisite Modülü $E = 3,18 \times 10^7$ kN/m², Poisson oranı $\nu = 0.20$ ve birim hacim ağırlığı $w = 25\ 000$ N/m³ olarak dikkate alınmıştır (TS 500, 2000). Arhavi tüneli, kendi ağırlığı ve zemin basınç yükleri altında SAP2000 (2004) sonlu eleman programı ile analiz edilmiştir. Analizler sonucu, tünelin deformasyon yapmış hali belirlenmiştir. Arhavi tünelinin hesabında, tünel üzerindeki kaya zeminden dolayı oluşacak basınç kuvvetleri, tünelin sonlu eleman modelinde, yapı-etkileşim yüzeyindeki düğüm noktalarına tekil kuvvet olarak etkittirilmiştir.

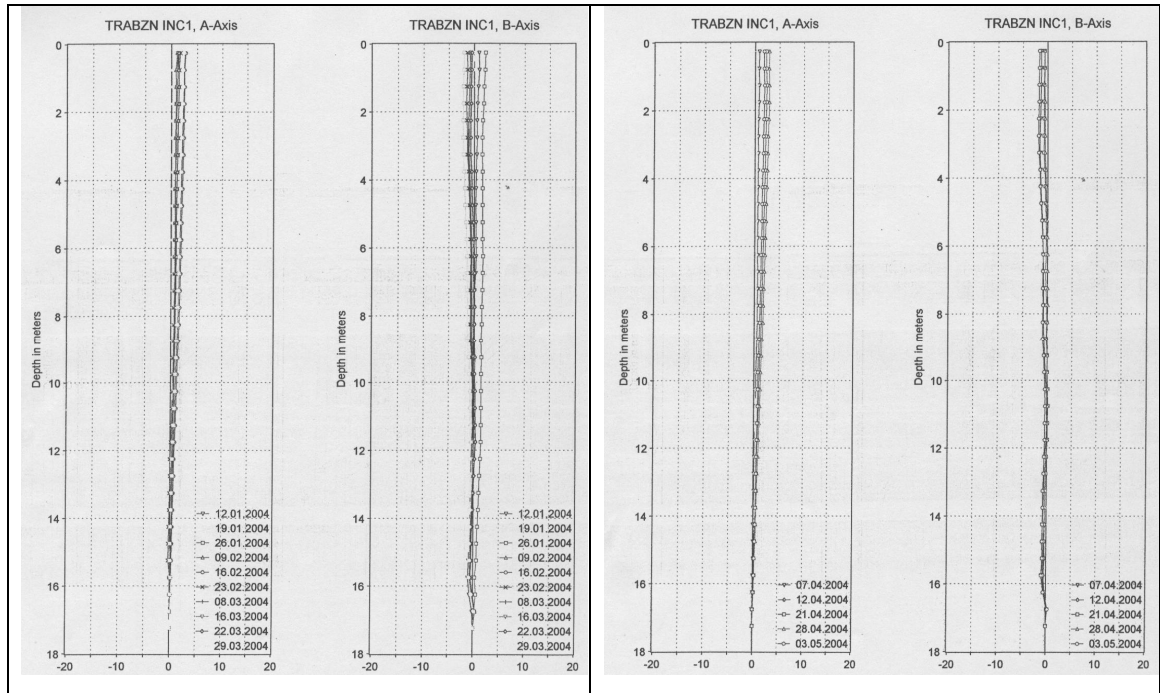
3. BULGULAR

3.1. Trabzon 2 Tüneli Bulguları

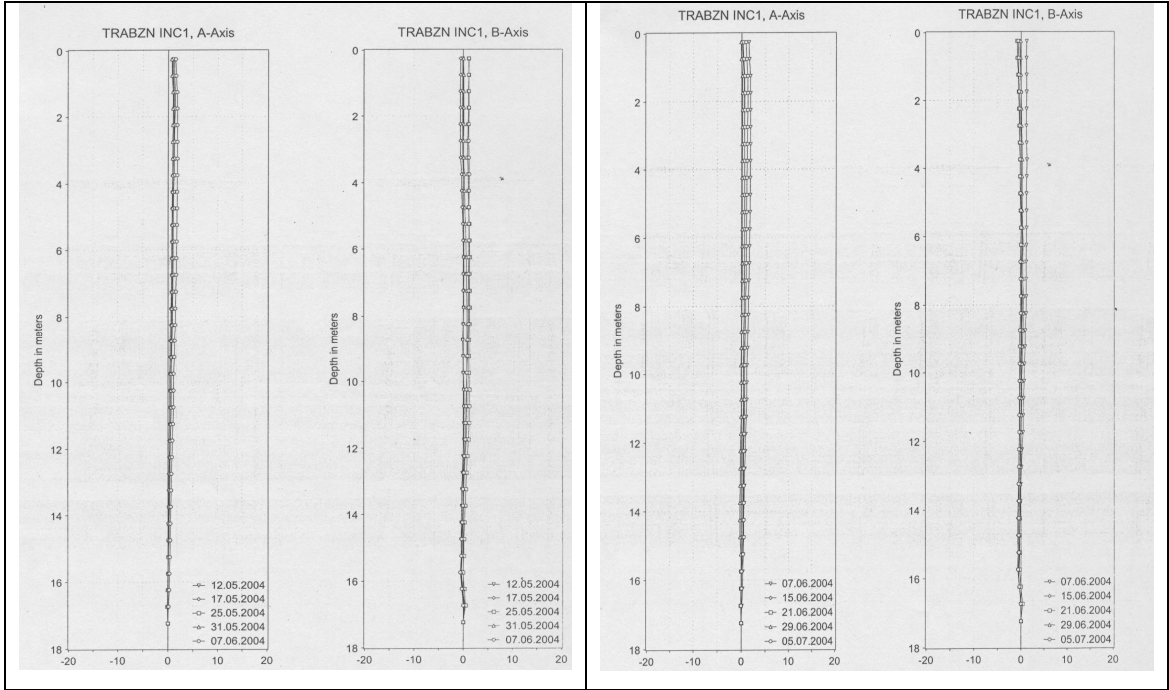
Trabzon 2 Tünel güzergâhının jeolojik yapısı araştırılarak, tünel NATM yöntemine göre açılmıştır. Tünel açılması süresince, deformasyonları belirlemek amacıyla geoteknik ve jeodezik ölçüler yapıp değerlendirilmiştir. Ayrıca tünel Sonlu Eleman Yöntemiyle de iki boyutlu modellenerek dış yükler etkisi altında tünelde oluşan deformasyonlar belirlenmiştir.

3.1.1. Trabzon 2 Tünelinde Geoteknik Ölçülerle Deformasyon Analizi

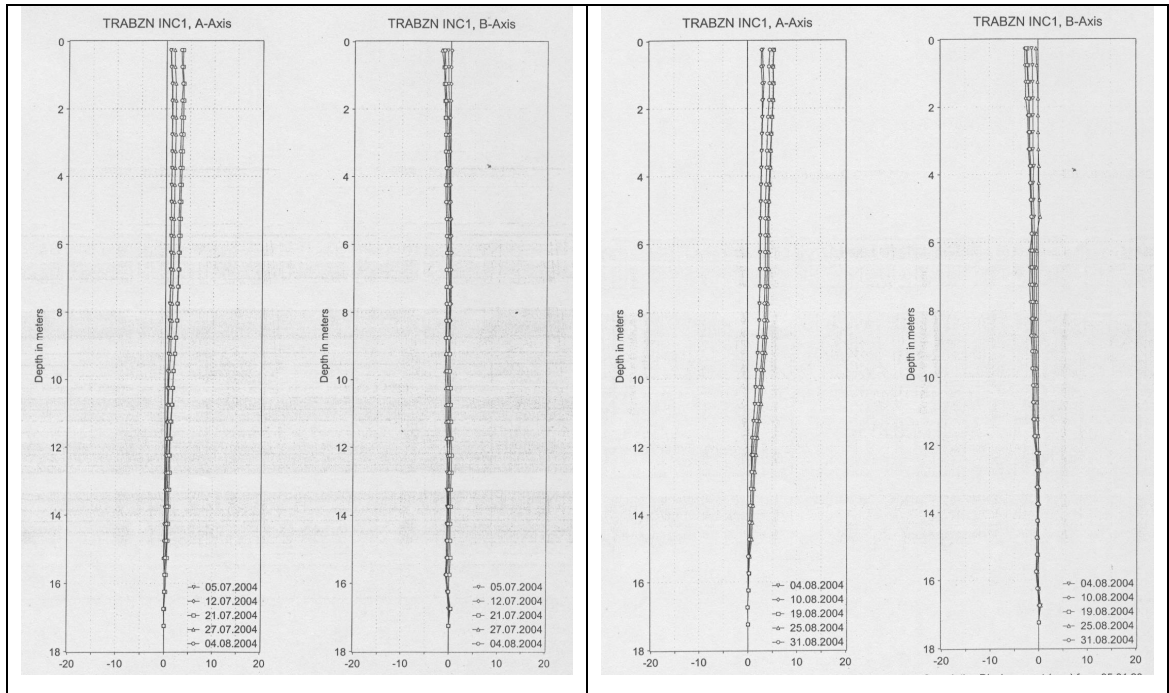
Trabzon 2 Tünelinde oluşacak deformasyon miktarı ve derinliğini ölçmek amacıyla tünele yakın uygun yerlere tesis edilen İnklinometre–I ve İnklinometre–II borularında VIII periyodda ölçüler yapılmış ve ölçü sonuçları grafiğe dökülerek oluşan deformasyonlar belirlenmiştir. İnklinometre–I borusundaki ölçü periyotlarında elde edilen deformasyonlar Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4’de verilmiştir.



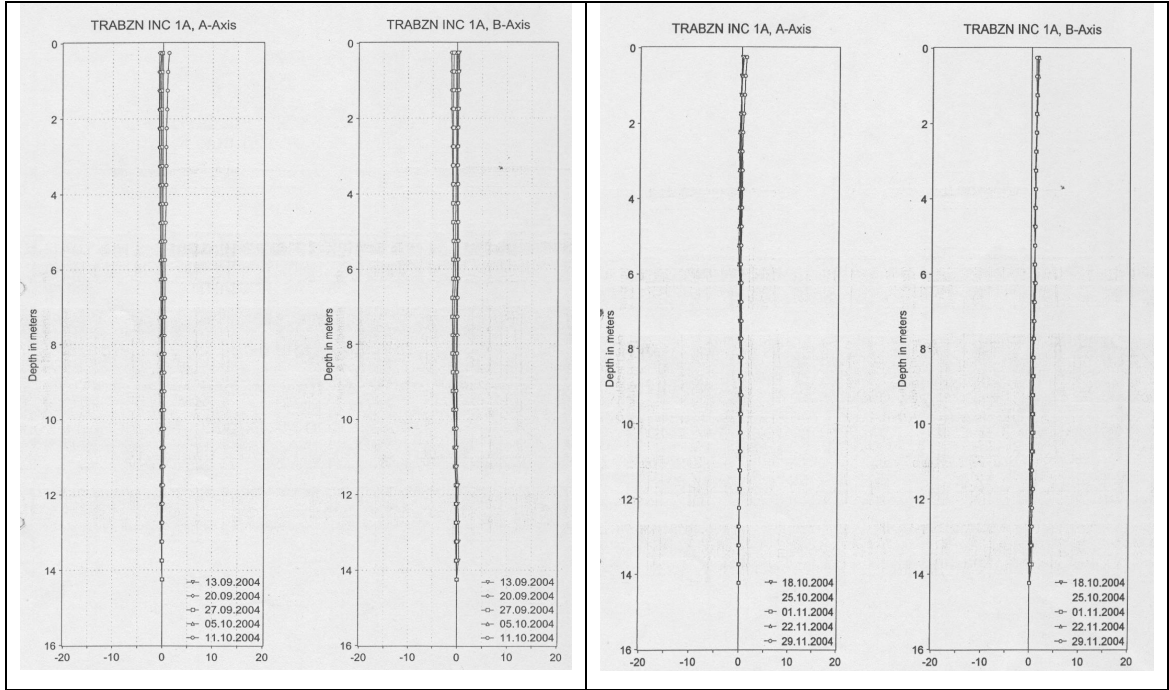
Şekil 3.1. İnklinometre–I borusunda, I. ve II. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon



Şekil 3.2. İnklinometre–I borusunda, III. ve IV. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon

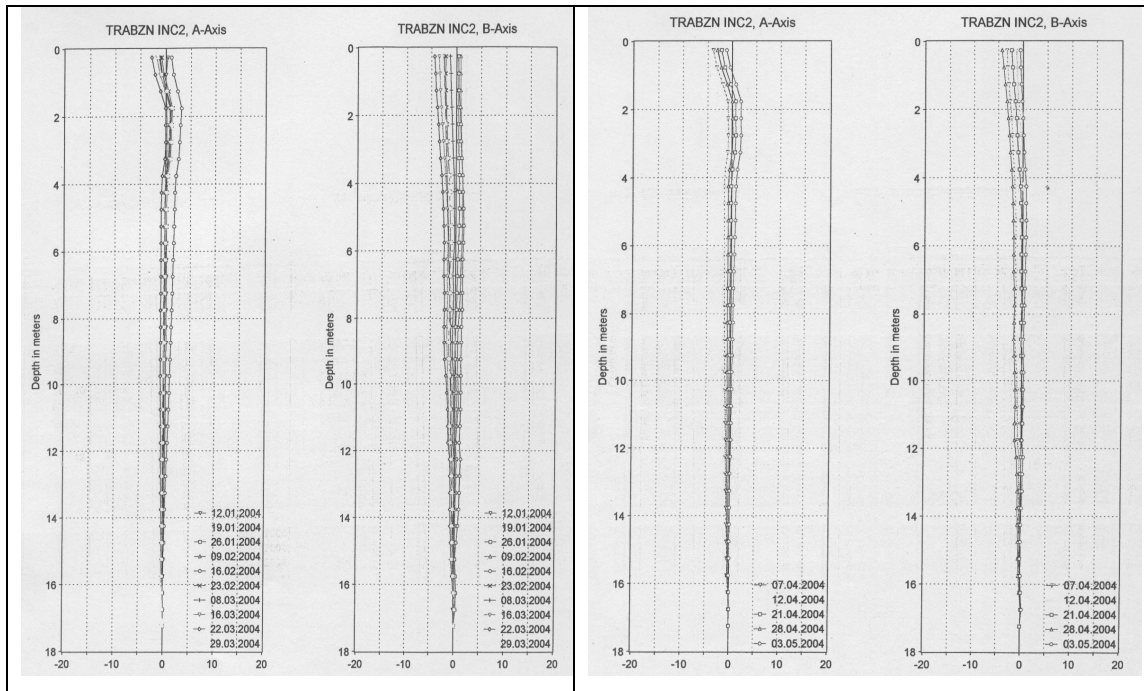


Şekil 3.3. İnklinometre–I borusunda, V. ve VI. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon

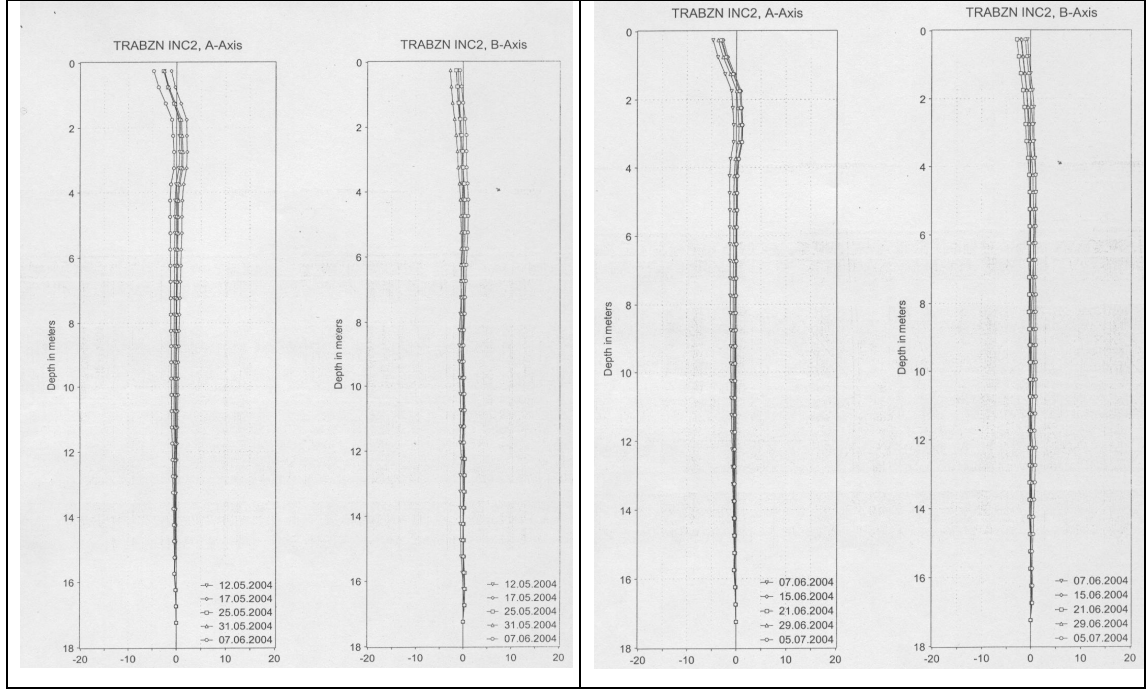


Şekil 3.4. İnklinometre–I borusunda, VII. ve VIII. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon

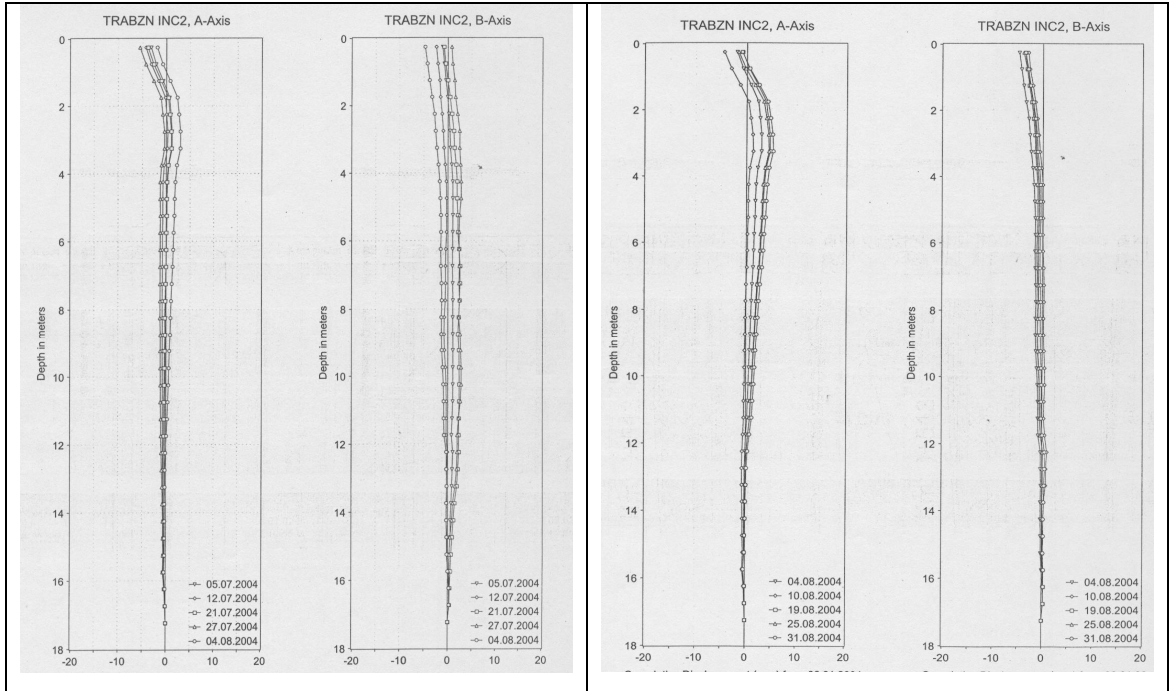
İnklinometre–II borusunda ölçü periyotlarında elde edilen deformasyonlar da Şekil 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8’de verilmiştir.



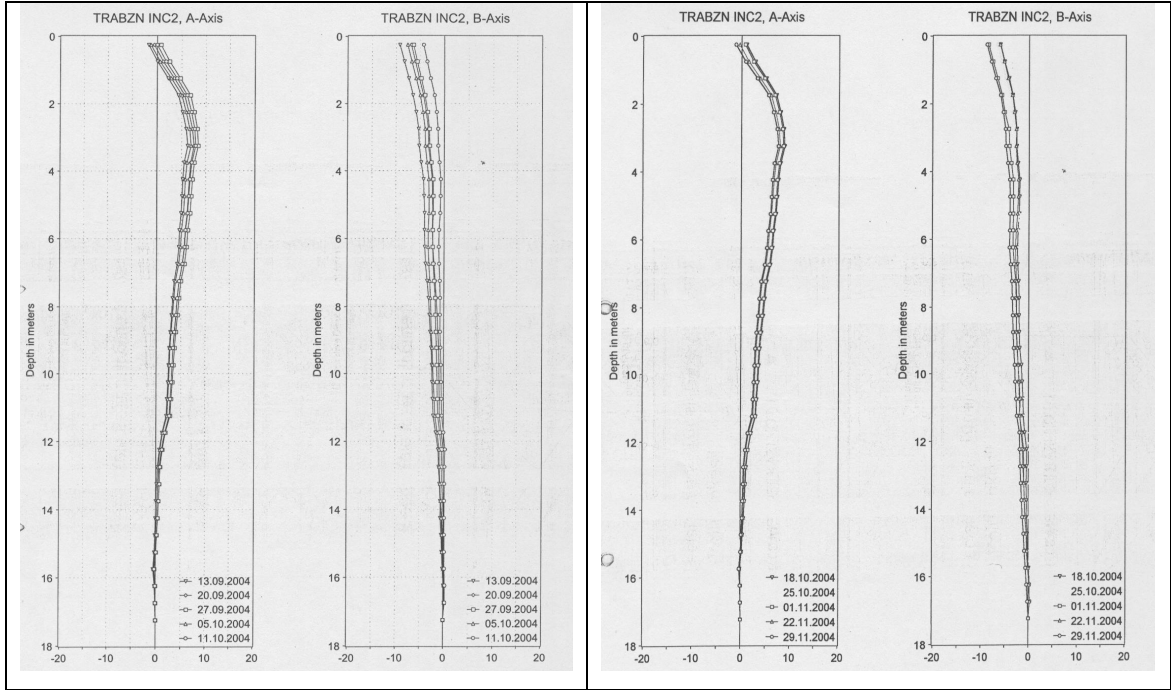
Şekil 3.5. İnklinometre–II borusunda, I. ve II. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon



Şekil 3.6. İnklinometre-II borusunda, III. ve IV. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon

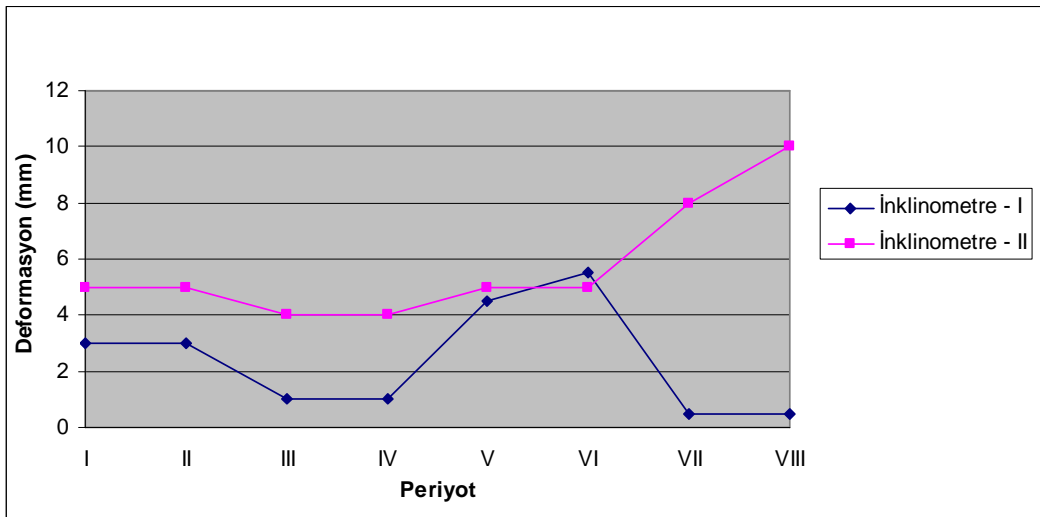


Şekil 3.7. İnklinometre-II borusunda, V. ve VI. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon



Şekil 3.8. İnklinometre-II borusunda, VII. ve VIII. ölçü periyodunda belirlenen deformasyon

İnklinometre-I ve inklinometre-II borularında belirlenen deformasyonlar Şekil 3.9'da birlikte gösterilmiştir.



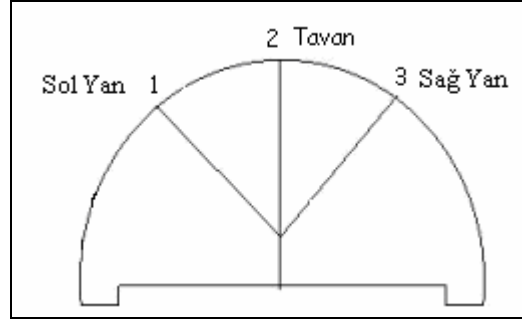
Şekil 3.9. İnklinometre-I ve II borularında belirlenen deformasyon

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi İnklinometre-I ve inklinometre-II borularında yapılan ölçülerden elde edilen deformasyon değerleri IV. periyota kadar birbirleriyle uyumlu ve

deformasyonlar 0,5 ile 5 mm arasında bulunmuştur. V., VI., VII. ve VIII. periyotlarda ise deformasyonlarda farklılık olmuştur. İnklinometre-I borusunda V. ve VI. periyotlarda 5 mm'lik artma, VII. ve VIII. periyotlarda ise 5 mm'lik azalma hareketi olmuştur. İnklinometre-II borusunda ise V. ve VI. periyotlarda değişim olmamış, VII. ve VIII. periyotlarda 5 mm'lik artma hareketi olmuştur. Bu bulunan değerler toprağın hareket etmesinden kaynaklanmaktadır.

3.1.2. Trabzon 2 Tünelinde Jeodezik Ölçülerle Deformasyon Analizi

Trabzon 2 Tünelinde Şekil 2.8'de görüldüğü gibi 5 jeodezik ölçü istasyonunda V kesit belirlenmiştir. Bu kesitler üzerinde tavan ve yan duvarlara obje noktaları tesis edilmiştir. Örnek olarak I. istasyondaki kesit Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. I. İstasyon noktasındaki kesit ve kontrol noktaları

Tavan ve yan duvarlardaki kontrol noktalarının çeşitli periyotlarda ölçülen koordinatları yardımıyla deformasyon analizi yapılmıştır. İlk ölçü periyodu başlangıç (sıfır) periyodu alınıp, her periyottaki koordinatların sıfır periyodundan olan farkları test edilerek deformasyonlar Şekil 1.24'de verilen iş akış şemasına göre belirlenmiştir. Örnek olarak I. istasyondaki noktalarda (Sol yan duvar (1), tavan (2), sağ yan duvar (3)) yapılan analiz sonuçları Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3'de verilmiştir. Tablolarda anlamlı bulunan deformasyonlar, yani test büyüklüğü (T_i), t-tablo değerinden büyük olan periyotlar koyu renkte gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Trabzon 2 Tüneli I. kesitinin sol yan duvarında bulunan noktasının deformasyon analizi

Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{f,0.975}=1,98$)
1 (Sol Yan Duvar)	24.02.2005 - 23.02.2005	2	-2	2	3,46	1,70
	25.02.2005 - 23.02.2005	1	-1	1	1,73	0,85
	26.02.2005 - 23.02.2005	3	0	0	3,00	1,47
	27.02.2005 - 23.02.2005	0	-1	0	1,00	0,49
	28.02.2005 - 23.02.2005	0	0	0	0,00	0,00
	01.03.2005 - 23.02.2005	1	-1	1	1,73	0,85
	02.03.2005 - 23.02.2005	0	0	0	0,00	0,00
	03.03.2005 - 23.02.2005	1	-3	1	3,32	1,63
	04.03.2005 - 23.02.2005	0	-1	0	1,00	0,49
	05.03.2005 - 23.02.2005	2	-3	2	4,12	2,02
	07.03.2005 - 23.02.2005	1	-2	1	2,45	1,20
	09.03.2005 - 23.02.2005	2	-3	2	4,12	2,02
	11.03.2005 - 23.02.2005	1	-3	2	3,74	1,83
	13.03.2005 - 23.02.2005	2	-4	2	4,90	2,40
	15.03.2005 - 23.02.2005	2	-4	2	4,90	2,40
	17.03.2005 - 23.02.2005	3	-5	1	5,92	2,90
	19.03.2005 - 23.02.2005	2	-4	2	4,90	2,40
	21.03.2005 - 23.02.2005	2	-5	2	5,74	2,82
	23.03.2005 - 23.02.2005	2	-5	2	5,74	2,82
	25.03.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50
	26.03.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50
	27.03.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50
	28.03.2005 - 23.02.2005	2	-5	2	5,74	2,82
	29.03.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50
	30.03.2005 - 23.02.2005	3	-5	1	5,92	2,90
	31.03.2005 - 23.02.2005	2	-4	2	4,90	2,40
	01.04.2005 - 23.02.2005	2	-4	2	4,90	2,40
	02.04.2005 - 23.02.2005	2	-4	2	4,90	2,40
	03.04.2005 - 23.02.2005	1	-6	1	6,16	3,02
	04.04.2005 - 23.02.2005	1	-6	1	6,16	3,02
	14.04.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50
	16.04.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50
	18.04.2005 - 23.02.2005	2	-5	1	5,48	2,69
	20.04.2005 - 23.02.2005	4	-6	1	7,28	3,57
	22.04.2005 - 23.02.2005	4	-6	2	7,48	3,67
	24.04.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50
26.04.2005 - 23.02.2005	3	-4	1	5,10	2,50	
28.04.2005 - 23.02.2005	2	-2	1	3,00	1,47	
30.04.2005 - 23.02.2005	1	-4	1	4,24	2,08	

Tablo 3.2. Trabzon 2 Tüneli I. kesitinin tavanında bulunan noktasının deformasyon analizi

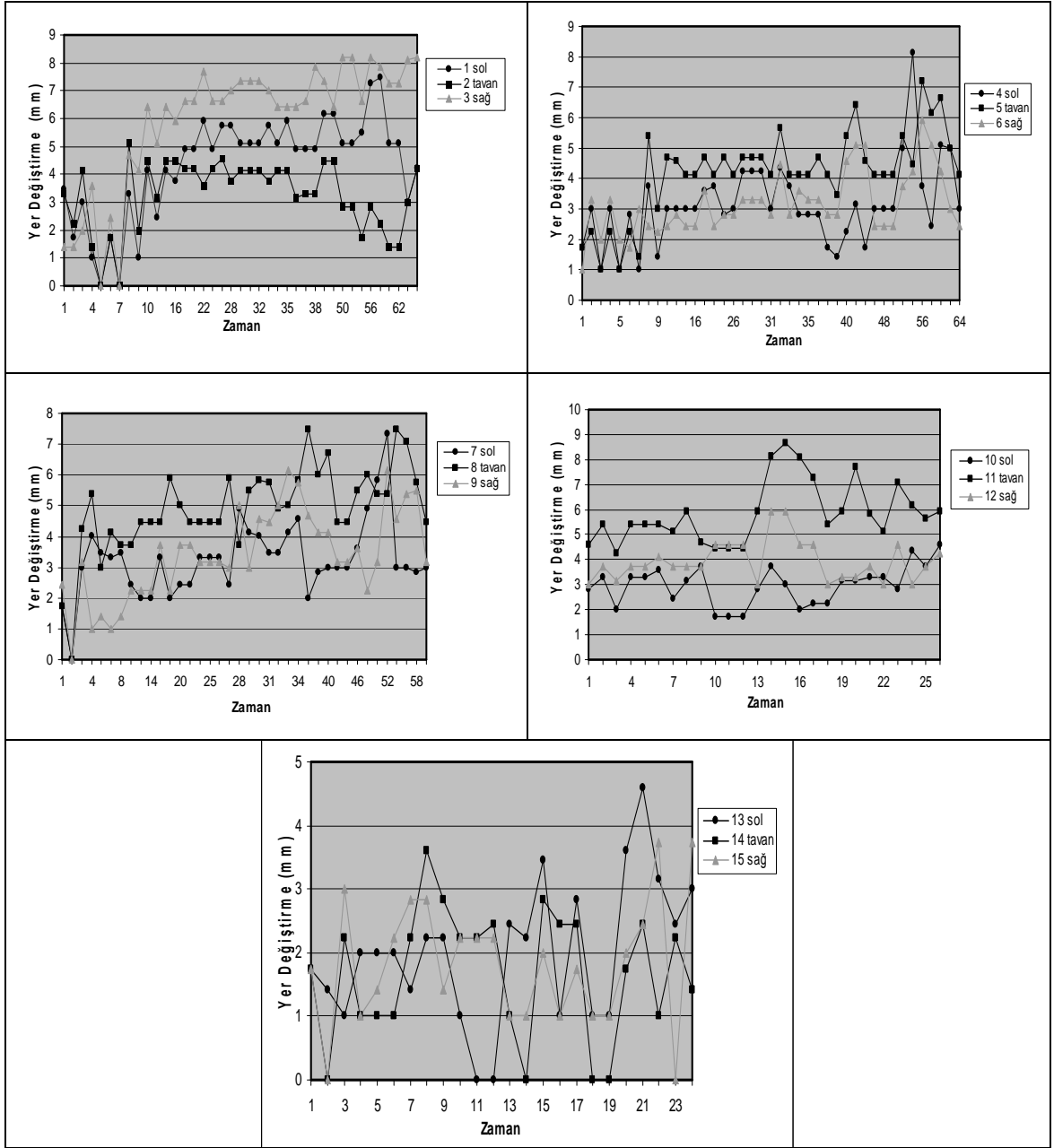
Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{r,0,975}=1,98$)
2 (Tavan)	24.02.2005 - 23.02.2005	-1	3	-1	3,32	1,63
	25.02.2005 - 23.02.2005	0	2	-1	2,24	1,10
	26.02.2005 - 23.02.2005	-2	3	-2	4,12	2,02
	27.02.2005 - 23.02.2005	-1	1	0	1,41	0,69
	28.02.2005 - 23.02.2005	0	0	0	0,00	0,00
	01.03.2005 - 23.02.2005	-1	1	-1	1,73	0,85
	02.03.2005 - 23.02.2005	0	0	0	0,00	0,00
	03.03.2005 - 23.02.2005	-1	3	-4	5,10	2,50
	04.03.2005 - 23.02.2005	0	0	-2	2,00	0,98
	05.03.2005 - 23.02.2005	0	2	-4	4,47	2,19
	07.03.2005 - 23.02.2005	0	1	-3	3,16	1,55
	09.03.2005 - 23.02.2005	0	2	-4	4,47	2,19
	11.03.2005 - 23.02.2005	0	2	-4	4,47	2,19
	13.03.2005 - 23.02.2005	-1	1	-4	4,24	2,08
	15.03.2005 - 23.02.2005	-1	1	-4	4,24	2,08
	17.03.2005 - 23.02.2005	-2	0	-3	3,61	1,77
	19.03.2005 - 23.02.2005	-1	1	-4	4,24	2,08
	21.03.2005 - 23.02.2005	-2	1	-4	4,58	2,25
	23.03.2005 - 23.02.2005	-2	1	-3	3,74	1,83
	25.03.2005 - 23.02.2005	-1	0	-4	4,12	2,02
	26.03.2005 - 23.02.2005	-1	0	-4	4,12	2,02
	27.03.2005 - 23.02.2005	-1	0	-4	4,12	2,02
	28.03.2005 - 23.02.2005	-2	1	-3	3,74	1,83
	29.03.2005 - 23.02.2005	-1	0	-4	4,12	2,02
	30.03.2005 - 23.02.2005	-1	0	-4	4,12	2,02
	31.03.2005 - 23.02.2005	-1	0	-3	3,16	1,55
	01.04.2005 - 23.02.2005	-1	1	-3	3,32	1,63
	02.04.2005 - 23.02.2005	-1	1	-3	3,32	1,63
	03.04.2005 - 23.02.2005	0	2	-4	4,47	2,19
	04.04.2005 - 23.02.2005	0	2	-4	4,47	2,19
	14.04.2005 - 23.02.2005	0	2	-2	2,83	1,39
	16.04.2005 - 23.02.2005	0	2	-2	2,83	1,39
	18.04.2005 - 23.02.2005	-1	1	-1	1,73	0,85
	20.04.2005 - 23.02.2005	0	2	-2	2,83	1,39
	22.04.2005 - 23.02.2005	-2	0	-1	2,24	1,10
	24.04.2005 - 23.02.2005	-1	1	0	1,41	0,69
	26.04.2005 - 23.02.2005	0	1	-1	1,41	0,69
	28.04.2005 - 23.02.2005	-2	2	-1	3,00	1,47
	30.04.2005 - 23.02.2005	0	3	-3	4,24	2,08

Tablo 3.3. Trabzon 2 Tüneli I. kesitinin sağ yan duvarında bulunan noktasının deformasyon analizi

Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{r,0.975}=1,98$)
3 (Sağ Yan Duvar)	24.02.2005 - 23.02.2005	0	1	1	1,41	0,69
	25.02.2005 - 23.02.2005	1	0	1	1,41	0,69
	26.02.2005 - 23.02.2005	0	2	0	2,00	0,98
	27.02.2005 - 23.02.2005	2	0	3	3,61	1,77
	28.02.2005 - 23.02.2005	0	0	0	0,00	0,00
	01.03.2005 - 23.02.2005	1	1	2	2,45	1,20
	02.03.2005 - 23.02.2005	0	0	0	0,00	0,00
	03.03.2005 - 23.02.2005	2	3	3	4,69	2,30
	04.03.2005 - 23.02.2005	4	0	1	4,12	2,02
	05.03.2005 - 23.02.2005	6	1	2	6,40	3,14
	07.03.2005 - 23.02.2005	5	0	1	5,10	2,50
	09.03.2005 - 23.02.2005	6	1	2	6,40	3,14
	11.03.2005 - 23.02.2005	5	1	3	5,92	2,90
	13.03.2005 - 23.02.2005	6	2	2	6,63	3,25
	15.03.2005 - 23.02.2005	6	2	2	6,63	3,25
	17.03.2005 - 23.02.2005	7	3	1	7,68	3,77
	19.03.2005 - 23.02.2005	6	2	2	6,63	3,25
	21.03.2005 - 23.02.2005	6	2	2	6,63	3,25
	23.03.2005 - 23.02.2005	6	3	2	7,00	3,43
	25.03.2005 - 23.02.2005	7	2	1	7,35	3,60
	26.03.2005 - 23.02.2005	7	2	1	7,35	3,60
	27.03.2005 - 23.02.2005	7	2	1	7,35	3,60
	28.03.2005 - 23.02.2005	6	3	2	7,00	3,43
	29.03.2005 - 23.02.2005	6	2	1	6,40	3,14
	30.03.2005 - 23.02.2005	6	2	1	6,40	3,14
	31.03.2005 - 23.02.2005	6	2	1	6,40	3,14
	01.04.2005 - 23.02.2005	6	2	2	6,63	3,25
	02.04.2005 - 23.02.2005	7	3	2	7,87	3,86
	03.04.2005 - 23.02.2005	7	2	1	7,35	3,60
	04.04.2005 - 23.02.2005	6	2	1	6,40	3,14
	14.04.2005 - 23.02.2005	7	3	3	8,19	4,01
	16.04.2005 - 23.02.2005	7	3	3	8,19	4,01
	18.04.2005 - 23.02.2005	6	2	2	6,63	3,25
20.04.2005 - 23.02.2005	7	3	3	8,19	4,01	
22.04.2005 - 23.02.2005	7	2	3	7,87	3,86	
24.04.2005 - 23.02.2005	6	1	4	7,28	3,57	
26.04.2005 - 23.02.2005	6	1	4	7,28	3,57	
28.04.2005 - 23.02.2005	7	1	4	8,12	3,98	
30.04.2005 - 23.02.2005	7	3	3	8,19	4,01	

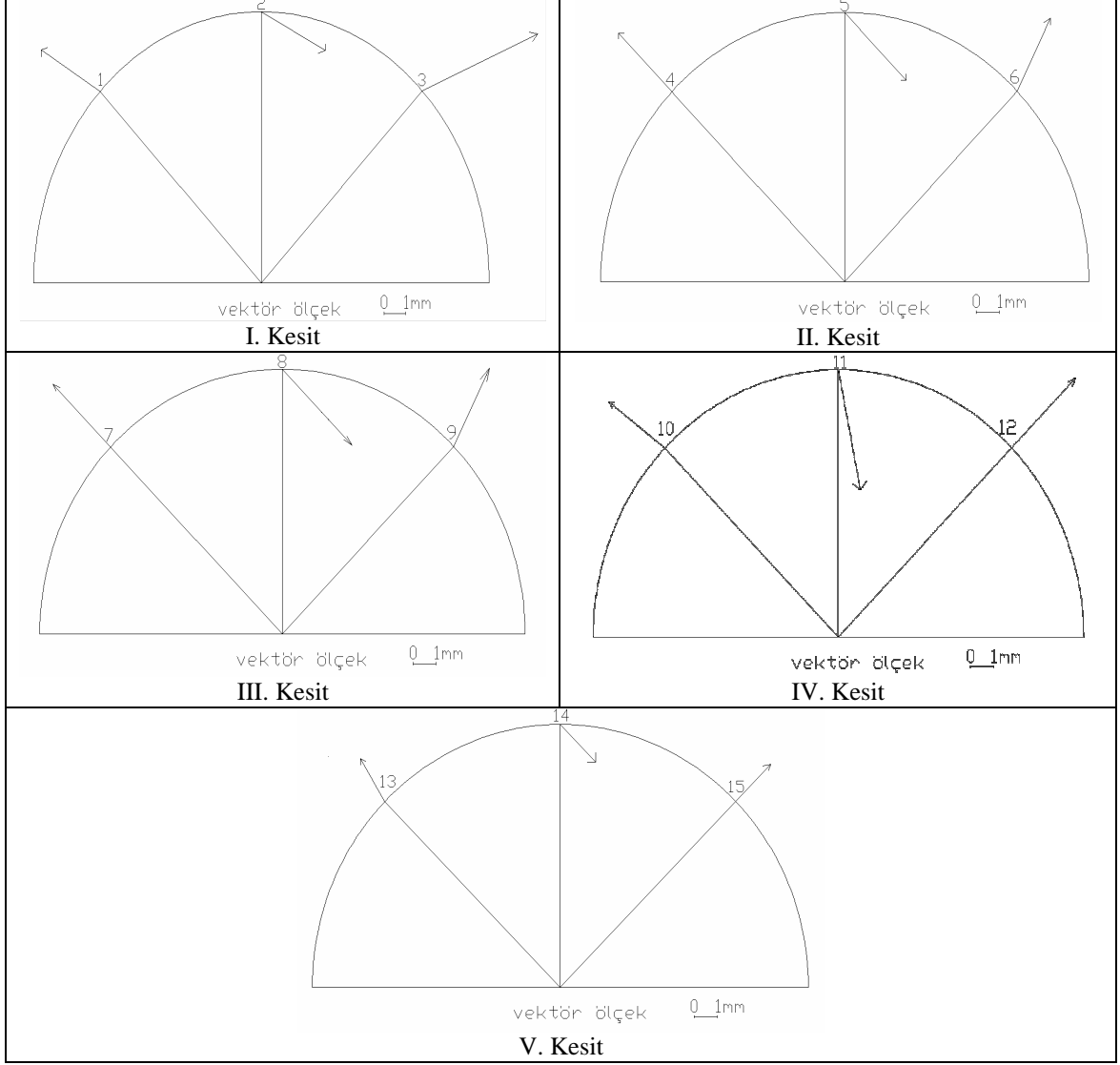
Diğer istasyonlardaki kesitlerde bulunan kontrol noktalarında ölçü periyotlarında belirlenen yer değiştirmelerden yalnızca anlamlı olan deformasyonlar Ekler Bölümünde Ek Tablo 7.1, 7.2, 7.3, 7.4'de verilmiştir. Tablo 3.1, 3.2, 3.3 ve Ek Tablo 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 görüldüğü gibi, sol yan duvarda bulunan kontrol noktalarında y ekseninde (-) yönde

ortalama 2 mm, x ekseninde (+) yönde ortalama 2 mm ve z ekseninde (+) yönde ortalama 3 mm; sağ yan duvardaki noktalarda y ekseninde (+) yönde ortalama 3 mm, x ekseninde (+) yönde ortalama 2 mm ve z ekseninde (+) yönde ortalama 3 mm; tavanda bulunan kontrol noktalarında ise y ekseninde (+ ve -) yönde ortalama 3 mm, x ekseninde (-) yönde ortalama 2,5 mm ve z ekseninde (-) yönde ortalama 4mm hareket olduğu görülmektedir. Kesitlerdeki kontrol noktalarının tüm periyotlarda belirlenen yer değiştirmeler Şekil 3.11’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 3.11. Trabzon 2 Tünel kesitlerinde belirlenen yer değiştirmeler

Kesitlerdeki obje noktalarında, anlamlı bulunan hareketlerden hesaplanan ortalama deformasyonlar Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Kesitlerdeki obje noktalarında oluşan deformasyonlar

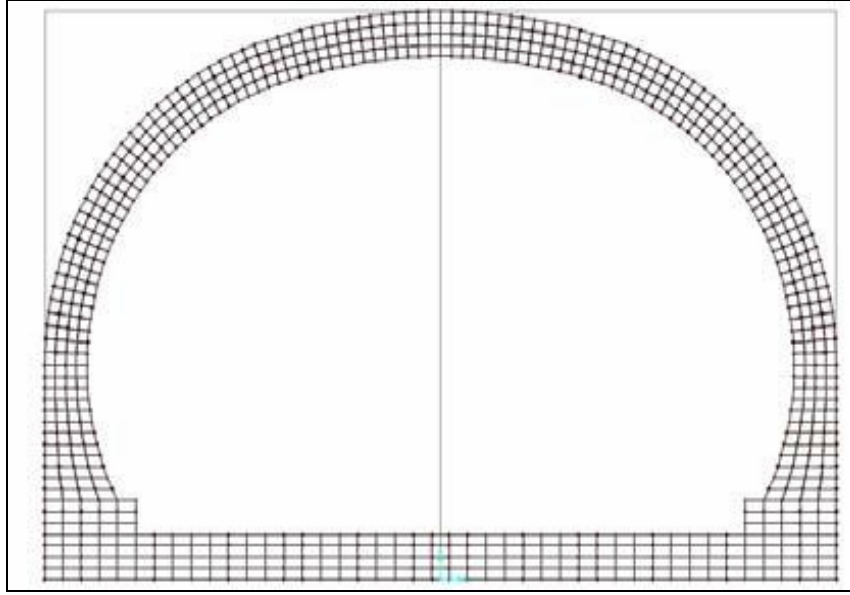
Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de görüldüğü gibi, kesitlerin sağ duvarlarında bulunan noktalar yaklaşık 3,5 ile 7,5 mm arasında sağa ve yukarı doğru; sol duvarında bulunan noktalar yaklaşık 3,5 ile 7,5 mm arasında sola ve yukarı doğru ve kesitlerin tavan duvarlarında bulunan noktalar ise yaklaşık 4 ile 7,5 mm arasında aşağıya doğru hareket etmiştir.

Tablo 3.1, 3.2, 3.3, Ek Tablo 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de görüldüğü gibi, jeodezik ölçülerin değerlendirilmesi sonucu; tüm kesitlerin sağ ve sol duvarlardaki

noktaların, yatayda sırasıyla sağ ve sol yana doğru, düşeyde ise yükselme şeklinde hareket ettiği, tavanda olan noktaların da düşey yönde çökme şeklinde hareket ettiği belirlenmiştir.

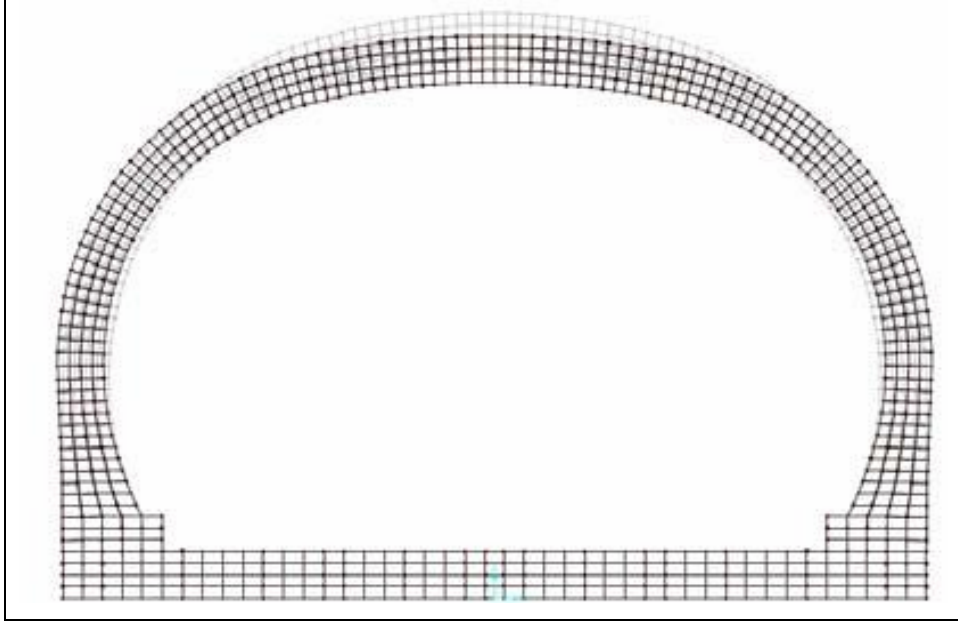
3.1.3. Trabzon 2 Tünelinde Sonlu Eleman Yöntemi ile İki Boyutlu Deformasyon Analizi

Trabzon 2 Tünelinde sonlu eleman yöntemiyle iki boyutlu deformasyon belirleme çalışmaları yapılmıştır. Trabzon 2 tüneli 674 sonlu elemana bölünmüş ve 841 düğüm noktası belirlenmiştir. Düğüm noktalarının yatay koordinatları (x_i^e, y_i^e) Netcad programından belirlenmiştir. Bu koordinatlardan yararlanarak SAP2000 bilgisayar programıyla tünelin iki boyutlu modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Trabzon 2 Tünelinin iki boyutlu modeli

Tünelde oluşan deformasyonlar, tünele etki eden yatay ve düşey yükler (F) dikkate alınarak sonlu eleman yöntemiyle belirlenmiştir. Düğüm noktalarının x ve y eksenleri doğrultusundaki düğüm noktası deformasyonları (U_{xi}^e, U_{yi}^e) (10) eşitliğinden hesaplanmıştır. Bu verilerle tünelin dış yükler altındaki deformasyon olmuş hali Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Trabzon 2 tünelinin dış yükler altındaki deformasyonu

Şekil 3.14’de görüldüğü gibi tünelin tavan kısmında çökme, yan duvarlarda da yatayda sağ ve sol yöne doğru, düşeyde ise yükselme şeklinde hareket oluşmuştur. Tünelin tavan kısmında yaklaşık 8 mm çökme, yan duvarlarda dışa doğru yaklaşık 4-5 mm hareket olduğu gözlenmiştir.

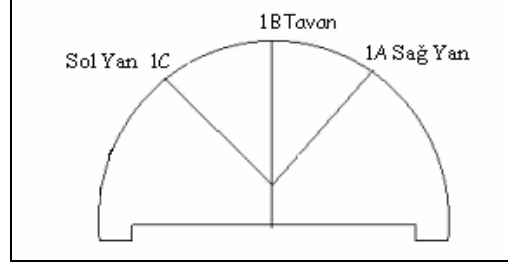
3.2. Arhavi Tüneli Bulguları

Arhavi Tüneli açılmadan önce, tünel güzergâhının jeolojik yapısı araştırılmış ve tünel NATM yöntemine göre açılmıştır. Tünel açılması süresince, deformasyonları belirlemek amacıyla jeodezik ölçüler yapıp değerlendirilmiştir. Ayrıca tünel Sonlu Eleman Yöntemiyle de üç boyutlu modellenerek dış yükler etkisi altında tünelde oluşan deformasyonlar belirlenmiştir.

3.2.1. Arhavi Tünelinde Jeodezik Ölçülerle Deformasyon Analizi

Arhavi Tünelinde Şekil 2.14’te görüldüğü gibi VIII jeodezik ölçü istasyonu belirlenmiştir. Bu istasyonlarda belirlenen kesitler üzerinde tavan ve yan duvarlara obje

noktaları tesis edilmiştir. Noktaların yerleri ve numaralanması örnek olarak I. istasyondaki kesit için verilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. I. Kesitteki kontrol noktaları

Tavan (B) ve yan duvarlardaki (A, C) kontrol noktalarının çeşitli periyotlarda ölçülen koordinatları yardımıyla deformasyon analizi yapılmıştır. Başlangıç periyodu olarak alınan ilk ölçü periyodunda (sıfır) belirlenen koordinatların, tüm periyottaki koordinatlardan olan farkları, test edilerek deformasyonlar Şekil 1.24'te verilen iş akış şemasına göre belirlenmiştir. Tüm kesitlerde, her periyot için (5) eşitliğinden hesaplanan test büyüklükleri (T_i), t-Tablo değeriyle karşılaştırılarak bulunan deformasyonlardan yalnızca anlamlı bulunanlar Tablo 3.4'de verilmiştir.

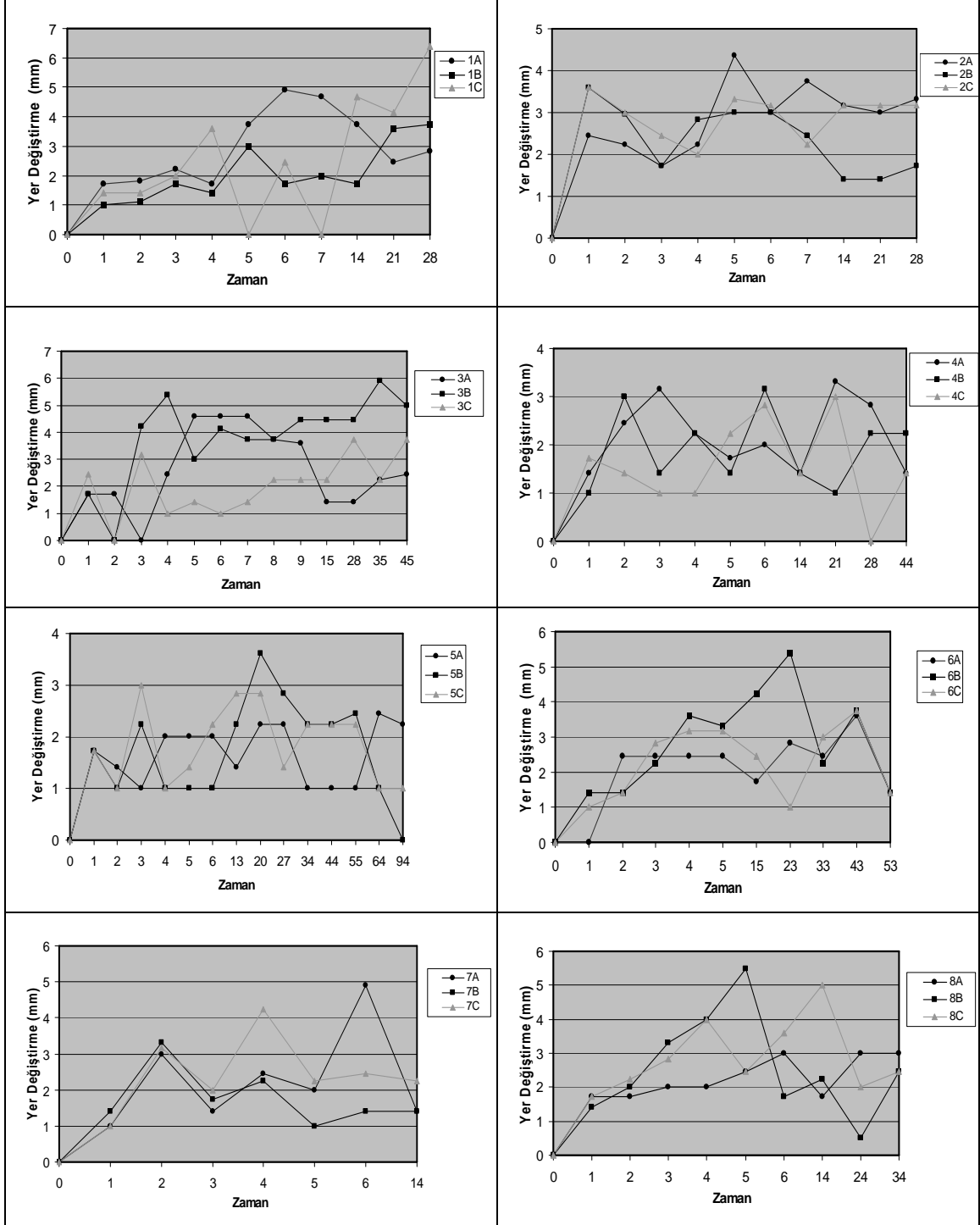
Tablo 3.4. Arhavi Tünelinde anlamlı bulunan deformasyon değerleri

Kesit	Nokta No	Periyot	d_x (mm)	d_y (mm)	d_z (mm)	d_i (mm)	T_i	t- tablo ($t_{f,0,975}$)
I	1A	06.12.2004 – 01.12.2004	3	1	2	3,74	2,41	2,04
		07.12.2004 – 01.12.2004	4	2	2	4,90	3,15	
		08.12.2004 - 01.12.2004	3	3	2	4,69	3,02	
		15.12.2004 - 01.12.2004	3	1	2	3,74	2,41	
	1B	22.12.2004 - 01.12.2004	2	3	0	3,61	2,32	
		29.12.2004 - 01.12.2004	2	3	-1	3,74	2,41	
	1C	05.12.2004 - 01.12.2004	2	0	-3	3,61	2,32	
		15.12.2004 - 01.12.2004	2	-3	-3	4,69	3,02	
22.12.2004 - 01.12.2004		4	0	-1	4,12	2,65		
II	2A	06.12.2004 - 01.12.2004	3	3	1	4,36	2,48	2,04
		08.12.2004 - 01.12.2004	3	2	1	3,74	2,13	
	2B	02.12.2004 - 01.12.2004	3	2	0	3,61	2,05	
	2C	02.12.2004 - 01.12.2004	3	-2	0	3,61	2,05	

Tablo 3.4'ün devamı

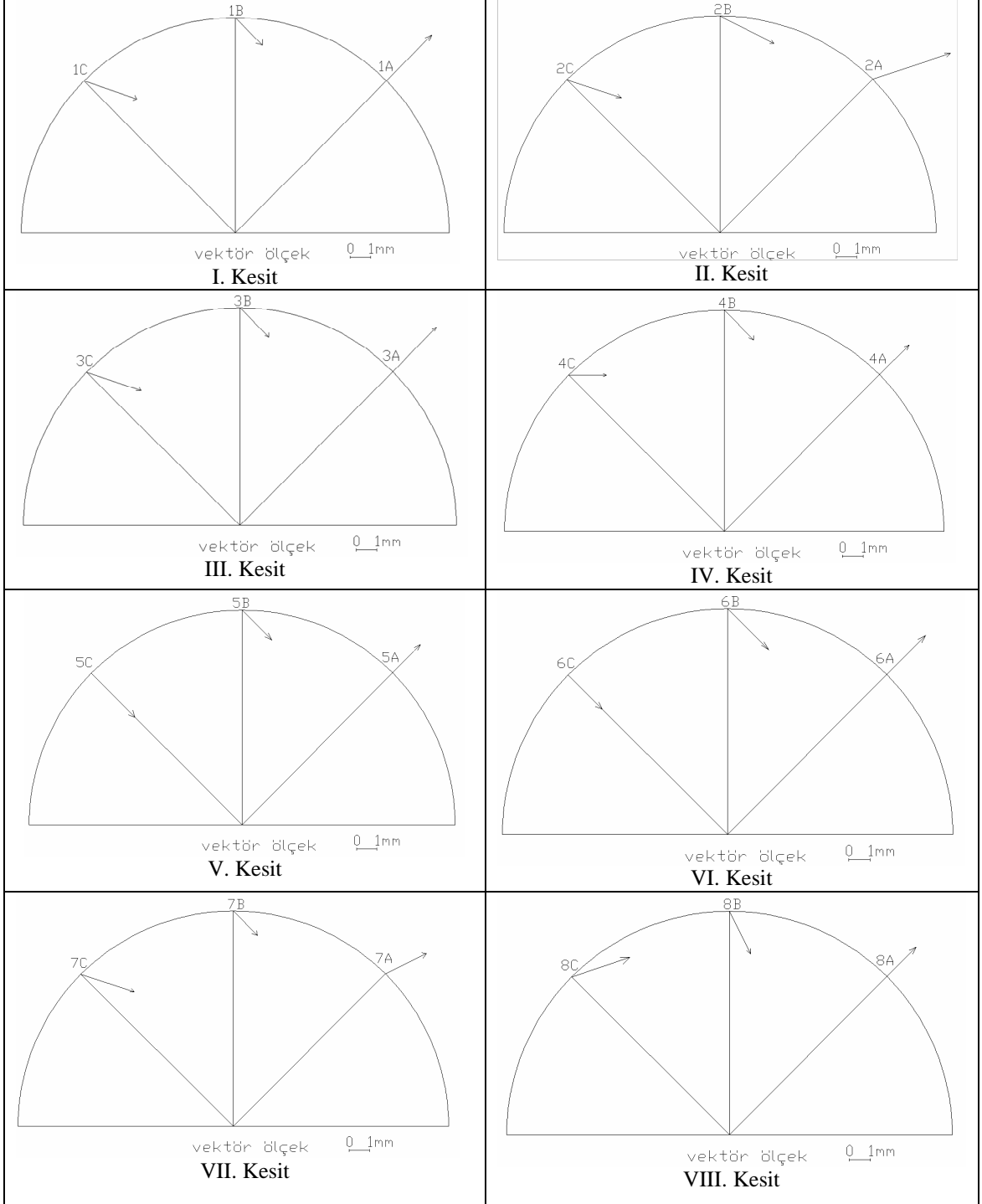
Kesit	Nokta No	Periyot	d _x (mm)	d _y (mm)	d _z (mm)	d _i (mm)	T _i	t- tablo (t _{f,0.975})		
III	3A	17.12.2004 - 12.12.2004	4	2	1	4,58	3,03	2,03		
		18.12.2004 - 12.12.2004	4	2	1	4,58	3,03			
		19.12.2004 - 12.12.2004	4	2	1	4,58	3,03			
		20.12.2004 - 12.12.2004	3	2	1	3,74	2,48			
		21.12.2004 - 12.12.2004	3	2	0	3,61	2,39			
	3B	13.12.2004 - 12.12.2004	3	2	-1	3,74	2,21			
	3C	17.12.2004 - 12.12.2004	1	-4	-1	4,24	2,81			
		18.12.2004 - 12.12.2004	1	-4	-1	4,24	2,81			
		19.12.2004 - 12.12.2004	2	-4	-1	4,58	3,03			
		20.12.2004 - 12.12.2004	1	-4	0	4,12	2,73			
		21.12.2004 - 12.12.2004	2	-5	-1	5,48	3,63			
		27.12.2004 - 12.12.2004	1	-4	-1	4,24	2,81			
	IV	4A	05.01.2005 - 02.01.2005	3	0	1	3,16		2,51	2,04
			16.01.2005 - 02.01.2005	1	1	3	3,32		2,63	
23.01.2005 - 02.01.2005			2	2	0	2,83	2,24			
15.02.2005 - 02.01.2005			0	1	3	3,16	2,51			
4B		04.01.2005 - 02.01.2005	2	2	-1	3,00	2,38			
		08.01.2005 - 02.01.2005	3	1	0	3,16	2,51			
		15.02.2005 - 02.01.2005	3	1	-1	3,32	2,63			
4C		08.01.2005 - 02.01.2005	2	-2	0	2,83	2,24			
		16.01.2005 - 02.01.2005	1	-2	-2	3,00	2,38			
V		5A	05.02.2005 - 02.01.2005	3	2	1	3,74	2,06	2,02	
	5B	15.01.2005 - 02.01.2005	3	1	-2	3,74	2,06			
	5C	15.01.2005 - 02.01.2005	2	-3	-1	3,74	2,06			
		15.02.2005 - 02.01.2005	4	-4	-1	5,74	3,17			
		26.02.2005 - 02.01.2005	4	-4	-1	5,74	3,17			
		06.03.2005 - 02.01.2005	5	-5	-2	7,35	4,05			
		05.04.2005 - 02.01.2005	4	-3	-1	5,10	2,81			
VI	6A	26.03.2005 - 11.02.2005	3	0	2	3,61	2,06	2,04		
	6B	15.02.2005 - 11.02.2005	3	2	0	3,61	2,06			
		26.02.2005 - 11.02.2005	4	1	-1	4,24	2,43			
		06.03.2005 - 11.02.2005	5	2	0	5,39	3,08			
		26.03.2005 - 11.02.2005	3	1	-2	3,74	2,14			
	6C	26.03.2005 - 11.02.2005	1	-3	-2	3,74	2,14			
VII	7A	27.03.2005 - 21.03.2005	4	2	2	4,90	3,21	2,08		
	7B	23.03.2005 - 21.03.2005	3	1	-1	3,32	2,18			
	7C	25.03.2005 - 21.03.2005	4	-1	-1	4,24	2,78			
VIII	8A	29.04.2005 - 23.04.2005	2	1	2	3,00	2,17	2,05		
		14.05.2005 - 23.04.2005	0	0	3	3,00	2,17			
		24.05.2005 - 23.04.2005	2	2	1	3,00	2,17			
	8B	26.04.2005 - 23.04.2005	3	1	-1	3,32	2,40			
		27.04.2005 - 23.04.2005	4	0	0	4,00	2,90			
		28.04.2005 - 23.04.2005	5	2	-1	5,48	3,97			
	8C	26.04.2005 - 23.04.2005	0	-2	-2	2,83	2,05			
		27.04.2005 - 23.04.2005	0	-4	0	4,00	2,90			
		29.04.2005 - 23.04.2005	2	-3	0	3,61	2,61			
		07.05.2005 - 23.04.2005	0	-4	-3	5,00	3,62			

Tünel kesitlerindeki kontrol noktalarında tüm periyotlarda belirlenen yer değiştirmeler Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Arhavi Tünelinde belirlenen yer değiştirmeler

Kesitlerdeki obje noktalarında, anlamlı bulunan hareketlerden hesaplanan ortalama deformasyonlar Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Arhavi Tüneli kesitlerindeki obje noktalarında oluşan deformasyonlar

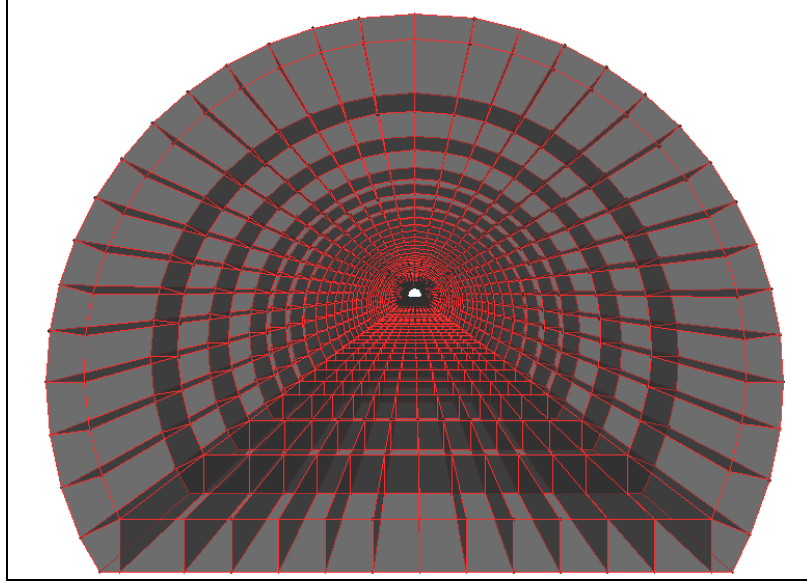
Tablo 3.4’de de görüldüğü gibi, sağ yan duvardaki noktalarda (A), y ekseninde (+) yönde ortalama 2 mm, x ekseninde (+) yönde ortalama 3 mm ve z ekseninde (+) yönde de ortalama 2 mm; sol yan duvarda bulunan kontrol noktalarında (C), y ekseninde (-) yönde ortalama 4 mm, x ekseninde (+) yönde ortalama 2 mm ve z ekseninde (-) yönde ortalama 1 mm; tavanda bulunan kontrol noktalarında (B) ise y ekseninde (+) yönde ortalama 2 mm, x ekseninde (+) yönde ortalama 3 mm ve z ekseninde (-) yönde ortalama 1 mm hareket belirlenmiştir.

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de görüldüğü gibi, kesitlerin sağ duvarlarında bulunan noktaların (A), yaklaşık 3,5 - 5 mm arasında sağa doğru; sol duvarında bulunan noktaların (C), yaklaşık 3,5 - 7 mm arasında sağa ve aşağıya doğru ve kesitlerin tavan duvarlarında bulunan noktaların (B), yaklaşık 3,5 - 5,5 mm arasında aşağıya ve sağa doğru hareket ettiği belirlenmiştir.

Tablo 3.4, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de görüldüğü gibi jeodezik ölçülerin değerlendirilmesi sonucu; tüm kesitlerde sağ duvardaki noktaların, sağa doğru ve yükselme şeklinde; sol duvardaki noktaların da sağa doğru ve alçalma şeklinde hareket ettiği belirlenmiştir. Tavanda olan noktaların ise yatayda sağa doğru, düşey yönde de çökme şeklinde hareket ettiği belirlenmiştir.

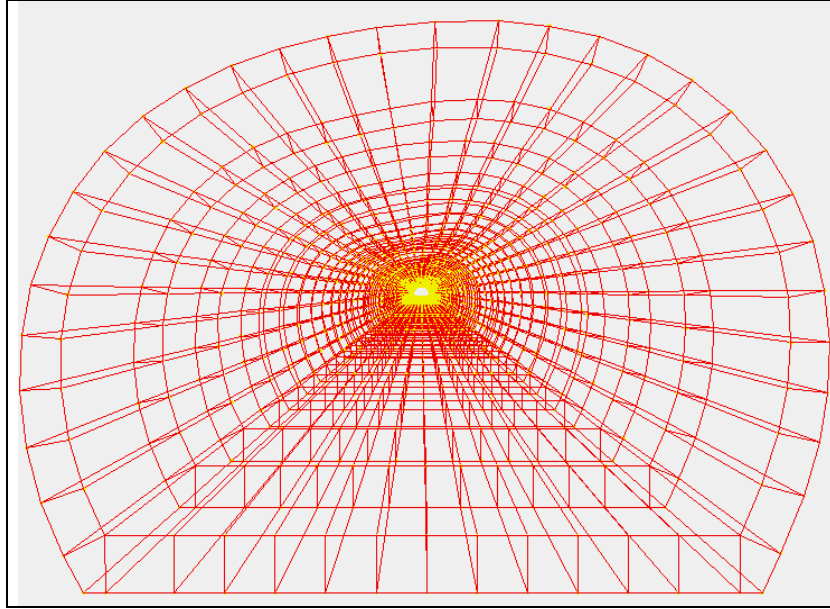
3.2.2. Arhavi Tünelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Üç Boyutlu Deformasyon Analizi

Arhavi Tünelinde sonlu eleman yöntemiyle üç boyutlu deformasyon belirleme çalışmaları yapılmıştır. Arhavi Tüneli 2640 sonlu elemana bölünmüş ve 5368 düğüm noktası belirlenmiştir. Düğüm noktalarının yatay koordinatları (x_i^e, y_i^e) Netcad programından belirlenmiştir. Bu koordinatlardan yararlanarak SAP2000 bilgisayar programıyla tünelin üç boyutlu modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Arhavi Tünelinin üç boyutlu sonlu eleman modeli

Arhavi Tünelinin, SAP2000 sonlu eleman programında yapılan analizi sonucunda deformasyona uğramış hali belirlenmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Arhavi Tünelinin dış yükler altındaki deformasyonu

Şekil 3.19’da görüldüğü gibi tünel sağ yana doğru eğilme hareketi yapmıştır. Tünelin tavan kısmında yaklaşık 10 mm çökme, yan duvarlarda da sağa doğru yaklaşık 7 mm hareket olduğu gözlenmiştir.

4. İRDELEMELER

Karadeniz Devlet Sahil Yolunun önemli geçişlerinden olan Trabzon 2 ve Arhavi Tünellerindeki deformasyonları belirleme çalışmalarında; Trabzon 2 tüneline geoteknik ölçüler ve jeodezik ölçüler ile Sonlu Eleman Yöntemiyle iki boyutlu modellemeler; Arhavi tüneline ise jeodezik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemiyle üç boyutlu modellemeler yapılmıştır.

Trabzon 2 tüneline geoteknik ölçü olarak tünelin yakınında tesis edilmiş olan inklinometre-I ve II borularından belirlenen deformasyonların verildiği Şekil 3.1'den Şekil 3.8'e kadar olan şekiller ve her iki inklinometre aletinden elde edilen deformasyonların gösterildiği Şekil 3.9 incelendiğinde, tünelin açılmaya başladığı Ocak 2004'den (I. Periyot) Temmuz 2004'e (IV. Periyot) kadar ki inklinometre-I ve inklinometre-II borularında yapılan ölçülerden elde edilen yer değiştirme değerlerinin birbirleriyle uyumlu yer değiştirmelerin yaklaşık 0.5 – 5 mm arasında olduğu görülmektedir. V., VI., VII. ve VIII. periyotlarda ise farklılık olmuştur. İnklinometre-I borusunda, V. ve VI. periyotlarda 5 mm'lik artma, VII. ve VIII. periyotlarda ise 5 mm'lik azalma hareketi olduğu. İnklinometre-II borusunda ise V. ve VI. periyotlarda değişim olmamış, VII. ve VIII. periyotlarda ise 5 mm'lik artma hareketi olmuştur. Bunun başlıca nedeni, bu ölçü periyotlarının tünelin açılmasının ileri aşamasına denk gelen 7 ay sonraki ölçü periyotları olmaları ve zeminin zayıf-çok zayıf kaya yapısında olmasından kaynaklanmaktadır.

Trabzon 2 Tüneline Şekil 2.8'de görüldüğü gibi, V kesit üzerinde tavan ve yan duvarlardaki obje noktalarının çeşitli periyotlarda jeodezik olarak ölçülen koordinatları ile elde edilen deformasyon analiz sonuçlarının verildiği Tablo 3.1, 3.2, 3.3, Ek Tablo 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, tüm kesitlerde oluşan deformasyonların bulunduğu Şekil 3.11 incelendiğinde, sol yan duvarda bulunan kontrol noktalarında y ekseninde (-) yönde ve x ekseninde (+) yönde; sağ yan duvardaki noktalarda y ekseninde (+) yönde ve x ekseninde de (+) yönde; tavanda bulunan kontrol noktalarında ise y ekseninde (+ ve -) yönde, x ekseninde (-) yönde; z ekseninde ise yan duvarlardaki noktalarda yükselme, tavanda bulunan noktalarda düşey yönde çökme şeklinde hareket olduğu görülecektir. Bu bağlamda obje noktalarında anlamlı bulunan hareketlerden kesitlerde oluşan deformasyonların

verildiği Şekil 3.12’de de görüldüğü gibi, kesitlerin tavadan ortalama 6 mm çöktüğü, yan duvarlarında da sağa ve sola doğru ortalama 5 mm yükselme hareketi yaptığı gözlenmiştir. Bu durum tünele etki eden dış yüklerin tünelin tavanını çöktürdüğünü, yan duvarlara da dışa doğru basınç yaptığını gösterir.

Trabzon 2 tünelinin Sonlu Eleman Yöntemiyle belirlenen iki boyutlu deformasyon modeli Şekil 3.13 ile dış yüklerin etkisi altında iki boyutlu deformasyonların gösterildiği Şekil 3.14 modeli karşılaştırıldığında, kesitlerin tavanda çökme, yan duvarlarda da sağa ve sola doğru kayma ve yükselme hareketi yaptığı görülmektedir.

Trabzon 2 Tünelinde yapılan jeodezik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemiyle belirlenen deformasyonların, aynı yönlü ve birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu ölçü ve yöntemlerin yanı sıra geoteknik ölçülerle tünel açılmasını takiben günlük olarak tünelin yakın çevresinde oluşan yer değiştirmeler dikkate alınarak önlemler zamanında alınabilmektedir.

Arhavi Tünelinde Şekil 2.14’de görüldüğü gibi, VIII kesit üzerinde tavan ve yan duvarlardaki obje noktalarının çeşitli periyotlarda jeodezik olarak ölçülen koordinatları ile elde edilen anlamlı deformasyon analiz sonuçlarının verildiği Tablo 3.4, tüm kesitlerde oluşan yer değiştirmelerin bulunduğu Şekil 3.16 incelendiğinde, sol yan duvarda bulunan kontrol noktalarında y ekseninde (-) yönde, x ekseninde (+) yönde ve z ekseninde (-) yönde; sağ yan duvardaki noktalarda y ekseninde (+) yönde, x ekseninde (+) yönde ve z ekseninde de (+) yönde; tavanda bulunan kontrol noktalarında ise y ekseninde (+) yönde, x ekseninde (+) yönde ve z ekseninde (-) yönde hareket olduğu görülecektir. Bu sonuçlardan ve kesitlerdeki obje noktalarında anlamlı bulunan hareketlerden Şekil 3.17 görüldüğü gibi, tünelin sağ duvardaki noktalarının sağa doğru yükselerek ortalama 4 mm, sol duvardaki noktaların da sağa doğru alçalarak ortalama 5,5 mm ve tavanda olan noktaların da sağa doğru 4,5 mm çökme hareketi yaptığı gözlenmiştir. Bu durum tünele etki eden dış yüklerin tüneli sağa doğru hareket ettirdiğini göstermektedir.

Arhavi Tünelinde, sonlu eleman yöntemiyle üç boyutlu deformasyon belirleme çalışmaları sonucunda elde edilen tünelin üç boyutlu modelinin gösterildiği Şekil 3.18 ve dış yüklerin etkisi altında üç boyutlu deformasyonların gösterildiği Şekil 3.19 karşılaştırıldığında, kesitlerin sağa doğru kayma ve yükselme hareketi yaptığı görülmektedir.

Trabzon 2 ve Arhavi Tünellerinde yapılan deformasyon analiz sonuçlarında görüldüğü gibi, jeodezik yöntem ve Sonlu Eleman Yöntemiyle bulunan sonuçlar birbirleriyle uyumlu

bulunmuştur. Bu iki yöntemle belirlenen deformasyonlar dikkate alınarak daha gerçekçi yorumlama yapıp, önlemlerin alınmasında daha doğru kararlar verilebilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Karadeniz Sahil Devlet Yolu, Gürcistan ile Doğu Karadeniz Bölgesinin ticari ve kültürel bakımdan önemli merkezleri olan Trabzon, Rize, Artvin gibi illerimizi birbirine bağlayan, doğu-batı arasındaki ulaşımı sağlayan karayoludur. Bu çalışmada, Karadeniz Sahil Devlet Yolunun önemli geçişlerinden olan Trabzon 2 ve Arhavi Tünellerinde oluşan deformasyonların, farklı yöntemlerle belirlenmesinin araştırması yapılmıştır. Trabzon 2 tüneline deformasyonlar, geoteknik ölçüler, jeodezik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemiyle iki boyutlu modellemelerle belirlenmiştir. Arhavi tünelineki deformasyonlar ise jeodezik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemiyle üç boyutlu modelleme yaparak belirlenmiştir.

KSDY Trabzon 2 Tüneline jeolojik araştırmalar sonucunda tünelin zemin yapısı, zayıf-çok zayıf kaya sınıfı olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, tünelin hareket beklenmeyen bölümlerine yerleştirilen iki inklinometre borularında çeşitli periyotlarda yapılan inklinometre ölçüleri ile yaklaşık 4-5 mm deformasyon belirlenmiştir.

Tünel içerisinde jeodezik ölçüleri yapmak için belirlenen beş istasyondaki kesitlerde tesis edilmiş olan 15 jeodezik noktanın çeşitli periyotlarda elektronik aletle ölçülen koordinatlarıyla yapılan istatistik analiz sonucunda, kesitlerin tavadan ortalama 6 mm çöktüğü, yan duvarlarında da sağa ve sola doğru ortalama 5 mm yükselme hareketi yaptığı gözlenmiştir. Bu bilgiler ışığında tünelin, dış yüklerin etkisiyle tavanının çöktüğü, yan duvarlarının da dışa doğru yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonlu Eleman Yöntemiyle Trabzon 2 tünelinin iki boyutlu modelini oluşturmak için, tünel 674 elemana ve 841 düğüm noktasına ayrılmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle, dış yükler dikkate alınarak oluşturulan iki boyutlu modelde, tünelin tavan kısmında yaklaşık 8 mm çökme, yan duvarlarda dışa doğru yaklaşık 4-5 mm hareket olduğu gözlenmiştir.

Trabzon 2 Tüneline yapılan jeodezik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemiyle belirlenen deformasyonlar, aynı yönlü ve yaklaşık aynı büyüklükte bulunmuştur. Tünelin açılmasını takiben günlük olarak yapılan geoteknik ölçülerle tünelin yakın çevresinde oluşan deformasyonlar da belirlenerek önlemler önceden alınabilmiştir.

İkinci uygulama alanı olarak seçilen Arhavi Tünelinin 1033 m olan sağ tüpünde çeşitli aralıklarla belirlenen 8 istasyonda yapılan jeodezik ölçülerin değerlendirilmesi sonucu, tünelin sağ duvarında sağa doğru yükselerek ortalama 4 mm, sol duvarında

sağa doğru alçalarak ortalama 5,5 mm ve tavanında da sağa doğru 4,5 mm çökme biçiminde deformasyon belirlenmiştir. Görüldüğü gibi, dış yükler tüneli sağa doğru hareket ettirmiştir.

Sonlu Eleman Yöntemiyle Arhavi Tünelinin deformasyonlarını üç boyutlu olarak belirlemek amacıyla, tünel 61 kesit, 2640 elemana ve 5368 düğüm noktasına ayrılmıştır. Dış yükler dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu modelde, tünelin tavan kısmında yaklaşık 10 mm çökme, yan duvarlarda da sağa doğru yaklaşık 7 mm hareket olduğu gözlenmiştir.

Arhavi tüneline de jeodezik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemi ile belirlenen deformasyonların yönü aynı, deformasyon değerleri birbiriyle yaklaşık uyumlu olduğu görülmüştür.

Her iki uygulamada da jeodezik ölçüler, geoteknik ölçüler ve Sonlu Eleman Yöntemi ile belirlenen deformasyonlar uyumlu bulunmuştur. Jeodezik ve geoteknik yöntemlerin yanı sıra sonlu eleman yönteminin kullanılması yararlı olmuştur. Çünkü Sonlu Eleman Yöntemi, çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu yöntemlerin sonuçları karşılaştırılarak daha gerçekçi yorumlama yapılabilmiş ve gerekli önlemler alınmıştır.

Sonuç olarak, büyük mühendislik yapılarında deformasyonların belirlenmesi için jeodezik, geoteknik ve Sonlu Eleman Yönteminin birlikte kullanılması önerilir. Böylece deformasyonların daha gerçekçi yorumlamaları yapılarak önlemlerin zamanında alınması sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akyılmaz, O. ve Ayan, T., 2003. Deformasyon Analizinde Kullanılan Yöntemler, Deprem Sempozyumu, 12–14 Mart, Kocaeli, 107-114 s.
- Argyris J.H. and Kelsey S., 1960. Energy Theorems and Structural Analysis, Butterworth Scientific Publications, London.
- Argyris, J.H., 1964. Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis, Progr. Aeron. Sci., 4.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A., Ünlütepe, A. ve Arıoğlu E., 1994. İncirli-M.İnönü Tünelinde Uygulanan Geoteknik Ölçümler ve Değerlendirmesi, Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A., Kurtuldu, S. ve Arıoğlu, E., 2002a. İzmir Metro projesinde Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu Uygulamaları, Yapı Dünyası, İstanbul, 73, 35–49 s.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A. ve Arıoğlu, E., 2002b. İzmir Metro Projesi Nene Hatun Tünelindeki Geoteknik Çalışmalar ve Değerlendirilmesi, ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, ODTÜ, Ankara.
- Ayan. T., 1981. Jeodezik Ağların Analizi, Lisansüstü Ders Notları, İstanbul.
- Bathe, K. J., 1996. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey.
- Butkus, C., Fluker, T. ve Gardiner, T., 1999. Tunneling, April 19 USA.
- Cengiz-MAPA-MAKYOL, 2004. Karadeniz Sahil Devlet Yolu Arhavi Tüneli Kesin Proje Jeoteknik Raporu, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü, İstanbul.
- Chrzanowski, A., Chen, Y., Romero, P. ve Secord, J. M., 1986. Integration of geodetic and geotechnical deformation measurements in the geosciences, Tectonophysics, 130, 369–383 s.
- Chrzanowski, A., Chen Y.Q., Szostak-Chrzanowski A. ve Secord J.M., 1990. Combination of Geometrical Analysis with Physical Interpretation for the Enhancement of Deformation Modelling. XIX FIG Congress, Helsinki, Proceedings, 326–341 s.

- Clough, R. W., 1960. The Finite Element Method in Plane Stress Analysis, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 2nd Conference on Electronic Computations, USA, 23, 345–378 s.
- Doctors, L.J., 1970. An Application of the Finite Element Technique for Boundary Value Problems of Potential flow, *Ins. J. Num. Meth. Engng.*, 2, 243-252 s.
- Domaniç, Y. ve Karahan, E., eds. 2005. Karadeniz Sahil Devlet Yolu Trabzon Şehir Geçişi 2. Tünel Etüt Proje Mühendislik Hizmetleri İşi Kesin Proje Raporu, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü, Trabzon.
- Engün, Y.S. ve Kılıçoğlu, A., 2005. İnterferometrik Yapay Açıklı Radar Tekniğinin Jeodezide Kullanılması, *Harita Dergisi*, 133 s.
- Gallagher, R.H., 1969. Finite Element Analysis of Plate and Shell Structures, Proc. Of A.S.C.E. Symp. On Application of Finite Element Methods in Civil Engineering, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, 155–205 s.
- Gallagher, R. H., 1969, The Development And Evaluation Of Matrix Methods For Thin Shell Structural Analysis, Ph.D. Thesis Univ. of Buffalo, USA.
- Goodman, R.E., 1976. Methods of Geological Engineering, West Publishing, New York, 472 p.
- Goodman, R.E., Van, T.K., and Heuze, F.E., 1970. Measurement of Rock Deformability in Boreholes, Proc. 10th U.S. Symp. Rock Mech., Austin, TX, (Soc. Min. Eng., Littleton, CO), 523-555 s.
- Grafton, P. E. and D. R. Strome. 1963. "Analysis of Axisymmetric Shells by the Direct Stiffness Method," *AIAA Journal*, 1, 10, 2342–2347 s.
- Graham, L.C., 1974. Synthetic Interferometer Radar For Topographic Mapping, Proc. IEEE, 62, 763–768 s.
- Hanssen, R., 2002. Radar Interferometry, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Heine, K., 1999. Beschreibung von Deformationsprozessen durch Volterra-und-Fuzzy-Modelle sowie Neuronale Netze. DGK, Vol 516, Reihe, C., München.
- Heunecke O. ve Pelzer H., 1998. A new Terminology for Deformation Analysis Models based on System Theory, In: Kahmen/Brückl/Wunderlich (Eds.) Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Eisenstadt, 285–292 s.
- Heunecke, O., Pelzer, H. ve Welsch, W., 1998. On the Classification of Deformation Models and Identification Methods in Engineering Surveying. XXI. FIG Congress, Brighton, 230–245 s.

- Hill, C. D. ve Sippel, K.D. 2002. Modern Deformation Monitoring: A Multi Sensor Approach, Proc. of 12th FIG Int. Symp. Deformation Measurements, Washington, DC, USA.
- Hillier, F.S. ve Lieberman, G.J., 1995. Introduction to Operations Research, 6th ed. New York.
- Hinton, E. ve Owen, D.R.J., 1977. Finite Element Programming, Academic Pres, London.
- Holt, P., 2000. The Site Surveyor Guide to Surveying Underwater. Technical Report, 3H Consulting Ltd, USA.
- Hrennikof, A., 1941. Solution of Problems in Elasticity by the Framework method, Journal of Applied Mechanics, A8, 169-175 s.
- Jancsecz, S., Krause, R. ve Langmack, L., 1999. Advantages of Soil Conditioning In Shield Tunnelling Experiences of LRST İzmir, Proceeding of The World Tunnel Congress'99 OSLO "Challenges for The 21th Century" Alten et al (eds), Balkema, Rotterdam.
- Johnson, S., 2002. Modeling Volcano and Earthquake Deformation from Satellite Radar Interferometric Observation, Thesis Stanford University, Ph. D., USA.
- Kalkan, Y., Baykal, O., Alkan, R.M., Yalanak, M., Erden, T. ve Yıldırım, H., 2003. Heyelanların Jeodezik ve Geoteknik Yöntemlerle İzlenmesi: Ambarlı Liman Bölgesinde Bir Uygulama, 1. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, YTÜ, İstanbul, 91-119 s.
- Koch, K.R., 1999. Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer-Verlag, Berlin.
- Koenig, H.A. ve Davids, N., 1969. The Damped Transient Behaviour of Finite Beams and Plates, Inst. J. numerical Methods Engng., 1, 151-162, s.
- Konak, H., Dilaver, A. ve Öztürk, E., 2005. Effects of Observation Plan and Precision on Duration of Outlier Detection and Fuzzy Logic: A Real Network Application, Survey Review, 38, 298, 331-341 s.
- Küçüköğlü, H., 2006. Sonlu Elemanlar Metodu ile Tünel Modellemesi ve Bir Uygulama, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Leca, E., 1989, Analysis of NATM and Shield Tunnel in Soft Grounds, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburgs, USA.
- Mchenry, D., 1943. A Lattice Analogy for the Solution of Plane Stress Problems, Journal of Civil Engineering, 21, 59-82 s.

- Milev, G. ve Papo, H., 1998. Classification of Methods and Models for Deformation, Analysis and Interpretation of deformations. XXI. FIG Congress, Brighton, 230-245 s.
- Moaveni, S., 2003. Finite Element Analysis, Pearson Education, New Jersey.
- Ng, C.W., Lee K.M. ve Tang D.K.W., 2004. Canadian Geotechnical Journal, 41, 3, 523–539 s.
- Niemeier, W., 1981. Statistical Tests for Detecting Movements in Repeatedly Measured Geodetic Networks, *Tectonophysics*, 71, 335–351 s.
- Niemeier, W., 1985. Deformationsanalyse, In: *Geodatische Netze In Landes- Und Ingenieurvermessung II*, Kondrad Wittwer, Germany 559–623 s.
- Palmström, A. ve Berthelsen, O., 1988. The Significance of Weakness Zones in Rock Tunnelling, *Proc. Int. Conf. Rock Mechanics and Power Plants*, Madrid, 8 s.
- Pelzer, H., 1985. Statische, Kinematische und Dynamische Punktfelder, in: *Geodatische Netze in Landes-und Ingenieurvermessung II*, Pelzer, H., Stuttgart.
- Pelzer, H., 1987. Deformationsuntersuchungen auf der Basis Kinematischer Modelle. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 94, 49-62 s.
- Rabcewicz, L., 1964. The New Austrian Tunnelling Method, *Water Power*, Nov, Austrian.
- Reddy, J. N., 1993. An Introduction to Finite Element Method, Second Edition, McGraw-Hill Company New York.
- Rosen, P., Hensley, S., Joughin, I., Li. F., Madsen, N., Rodriguez, E. ve Goldstein, R., 2002. Synthetic Aperture Radar Interferometry, *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333–382 s.
- SAP2000, 2004. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Satır, B., Akköse, M. ve Yalçinkaya, M., 2007. Üç Boyutlu deformasyonların Jeodezik ve Sonlu Eleman Yöntemiyle Belirlenmesi: Arhavi Tüneli Örneği, 11. Türkiye Harita ve Bilimsel Toplantısı, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara.
- Sauer, G., 1990. NATM in Soft Ground, *World Tunnelling*, 3, 6, USA.
- Segrind, L., 1984. Applied Finite Element Analysis, 2nd., ed. John Wiley and Sons, New York.
- Shapiro, II., Zisk, S.H., Rogers A.E.E., Slade, M.A. ve Thompson, T.W., 2003. Lunar Topography: Global Determation By Radar, *Science*, 178, 939-948 s.

- Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C. ve Topp, L.J., 1956. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, *J. Aer. Sci.*, 805.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.
- Ünver, M., 1994. Düşey Yöndeki Yerkabuğu Deformasyonlarının Kinematik Model ile Belirlenmesi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon
- Ünlütepe, A., 2003. Tünel İnşaatları Sırasında Uygulanan Ölçme Yöntemleri ve Bu Yöntemlerin Değişik Tünelcilik Metodları İçin Karşılaştırılması, 1. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, YTU, İstanbul
- Welsch, W., 1981. Gegenwertigen Stand der Geodatischen Analyse und Interpretation Geometrischer Deformationen, *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 88, 2, 41–51 s.
- Welsch, W., 1983. Deformationsanalysen, *Schriftenreihe Vermessungswesen HSBw*, 9, München.
- Yalçinkaya, M., 2003. Monitoring Crustal Movements in West Anatolia by Precision Leveling, *Journ. of Surveying Eng.*, 129, 1, 44-49 s.
- Yalçinkaya, M., Bayrak, T., 2003, Dynamic Model For Monitoring Landslides with Emphasis on Underground Water in Trabzon Province, Northeastern Turkey, *Journal of Surveying Engineering*, 115-124 s.
- Yalçinkaya, M., Satır, B., 2005. Tünellerde Oluşan Hareketlerin Farklı Ölçü Yöntemleri ve Sonlu Eleman Yöntemiyle Belirlenmesi, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İTÜ, İstanbul, 51-63 s.
- Yalçinkaya, M., Satır, B., Akköse, M., 2006. Determining the Displacement Occurred in the Tunnels Using Different Measurement and Finite Elements Methods: a Case Study for Trabzon-2 Tunnel, in Turkey, 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, Australia.
- Yalçinkaya, M., 2006. Deformasyon Ölçmeleri ve Analizindeki Gelişmelere Genel Bir Bakış. Prof. Dr. Muzaffer Şerbetçi Anma Töreni ve Toplantısı, YTÜ, 20 Şubat, İstanbul.
- Zienkiewicz O.C. ve Morgan K., 1983. *Finite Elements and Approximation*, A Wiley Interscience Publication, New York.
- URL- 1, <http://www.geocities.com/ahmetirak/tunel/odev3.html>, 11 Nisan 2003.
- URL- 2, www.odew.net/maden/odewnet40.doc, 14 Mart 2007.
- URL- 3, <http://www.odevsitesi.com/odevler/arsiv1/30508-batirilmis-tuneller---immersed-tunnel.html>, 12 Nisan 2007.

URL- 4, http://forum_posts.asp?TID=8437, 13 Mayıs 2007

URL- 5, http://www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs_5210.htm, 10 Şubat 2006

URL- 6, http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/solutions/other/lgs_2957.htm, 10 Şubat 2006

URL- 7, http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/products/levels/lgs_4457.htm 10 Şubat 2006.

7. EKLER

Ek Tablo 7.1. Trabzon 2 Tüneli II. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri

	Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{f,0.975}=1,98$)
II. Kesit	4(sol)	05.03.2005 - 25.02.2005	3	-2	1	3,74	2,40
		19.03.2005 - 25.02.2005	3	-2	0	3,61	2,31
		21.03.2005 - 25.02.2005	2	-3	1	3,74	2,40
		26.03.2005 - 25.02.2005	3	-3	0	4,24	2,72
		27.03.2005 - 25.02.2005	3	-3	0	4,24	2,72
		28.03.2005 - 25.02.2005	3	-3	0	4,24	2,72
		30.03.2005 - 25.02.2005	3	-3	1	4,36	2,80
		31.03.2005 - 25.02.2005	2	-3	1	3,74	2,40
		10.04.2005 - 25.02.2005	3	-1	0	3,16	2,03
		20.04.2005 - 25.02.2005	3	-4	0	5,00	3,21
		22.04.2005 - 25.02.2005	4	-7	1	8,12	5,21
		24.04.2005 - 25.02.2005	2	-3	1	3,74	2,40
		28.04.2005 - 25.02.2005	3	-4	1	5,10	3,27
		30.04.2005 - 25.02.2005	3	-4	0	5,00	3,21
	5 (Tavan)	05.03.2005 - 25.02.2005	-2	3	-4	5,39	3,45
		09.03.2005 - 25.02.2005	-2	3	-3	4,69	3,01
		11.03.2005 - 25.02.2005	-1	4	-2	4,58	2,94
		13.03.2005 - 25.02.2005	-2	3	-2	4,12	2,64
		17.03.2005 - 25.02.2005	-2	3	-2	4,12	2,64
		19.03.2005 - 25.02.2005	-3	3	-2	4,69	3,01
		21.03.2005 - 25.02.2005	-2	2	-3	4,12	2,64
		23.03.2005 - 25.02.2005	-3	3	-2	4,69	3,01
		25.03.2005 - 25.02.2005	-3	2	-2	4,12	2,64
		26.03.2005 - 25.02.2005	-2	3	-3	4,69	3,01
		27.03.2005 - 25.02.2005	-2	3	-3	4,69	3,01
		28.03.2005 - 25.02.2005	-2	3	-3	4,69	3,01
		29.03.2005 - 25.02.2005	-3	2	-2	4,12	2,64
		30.03.2005 - 25.02.2005	0	4	-4	5,66	3,63
		31.03.2005 - 25.02.2005	-3	2	-2	4,12	2,64
		01.04.2005 - 25.02.2005	-3	2	-2	4,12	2,64
		02.04.2005 - 25.02.2005	-2	3	-2	4,12	2,64
		03.04.2005 - 25.02.2005	-2	3	-3	4,69	3,01
		04.04.2005 - 25.02.2005	-3	2	-2	4,12	2,64
		06.04.2005 - 25.02.2005	-2	2	-2	3,46	2,22
08.04.2005 - 25.02.2005	-4	3	-2	5,39	3,45		
10.04.2005 - 25.02.2005	-4	3	-4	6,40	4,11		
12.04.2005 - 25.02.2005	-2	1	-4	4,58	2,94		
14.04.2005 - 25.02.2005	-2	3	-2	4,12	2,64		
16.04.2005 - 25.02.2005	-2	3	-2	4,12	2,64		
18.04.2005 - 25.02.2005	-2	3	-2	4,12	2,64		
20.04.2005 - 25.02.2005	-3	2	-4	5,39	3,45		
22.04.2005 - 25.02.2005	-4	0	-2	4,47	2,87		

Ek Tablo 7.1'in devamı

Kesit	Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{f,0.975}=1,98$)
II. Kesit	5 (Tavan)	24.04.2005 - 25.02.2005	-6	0	-4	7,21	4,62
		26.04.2005 - 25.02.2005	-2	3	-5	6,16	3,95
		28.04.2005 - 25.02.2005	-2	2	-6	6,63	4,25
		30.04.2005 - 25.02.2005	-3	0	-4	5,00	3,21
	6 (Sağ)	27.02.2005 - 25.02.2005	1	1	3	3,32	2,13
		01.03.2005 - 25.02.2005	1	1	3	3,32	2,13
		19.03.2005 - 25.02.2005	0	3	2	3,61	2,31
		26.03.2005 - 25.02.2005	1	3	1	3,32	2,13
		27.03.2005 - 25.02.2005	1	3	1	3,32	2,13
		28.03.2005 - 25.02.2005	1	3	1	3,32	2,13
		30.03.2005 - 25.02.2005	2	0	4	4,47	2,87
		01.04.2005 - 25.02.2005	0	3	2	3,61	2,31
		02.04.2005 - 25.02.2005	1	3	1	3,32	2,13
		03.04.2005 - 25.02.2005	1	3	1	3,32	2,13
		08.04.2005 - 25.02.2005	1	4	2	4,58	2,94
		10.04.2005 - 25.02.2005	1	4	3	5,10	3,27
		12.04.2005 - 25.02.2005	1	4	3	5,10	3,27
		20.04.2005 - 25.02.2005	1	3	2	3,74	2,40
		22.04.2005 - 25.02.2005	1	4	1	4,24	2,72
		24.04.2005 - 25.02.2005	1	5	3	5,92	3,79
26.04.2005 - 25.02.2005	1	5	0	5,10	3,27		
28.04.2005 - 25.02.2005	1	4	1	4,24	2,72		

Ek Tablo 7.2. Trabzon 2 Tüneli III. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri

Kesit	Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{f,0.975}=1,98$)	
III. Kesit	7(sol)	04.03.2005 - 28.02.2005	0	0	4	4,00	2,37	
		05.03.2005 - 28.02.2005	2	-2	2	3,46	2,05	
		09.03.2005 - 28.02.2005	2	-2	2	3,46	2,05	
		30.03.2005 - 28.02.2005	2	-2	4	4,90	2,90	
		31.03.2005 - 28.02.2005	0	-1	4	4,12	2,44	
		01.04.2005 - 28.02.2005	0	0	4	4,00	2,37	
		02.04.2005 - 28.02.2005	2	-2	2	3,46	2,05	
		03.04.2005 - 28.02.2005	2	-2	2	3,46	2,05	
		04.04.2005 - 28.02.2005	1	0	4	4,12	2,44	
		06.04.2005 - 28.02.2005	2	1	4	4,58	2,71	
		18.04.2005 - 28.02.2005	0	-2	3	3,61	2,13	
		20.04.2005 - 28.02.2005	2	-2	4	4,90	2,90	
		22.04.2005 - 28.02.2005	3	0	5	5,83	3,45	
		24.04.2005 - 28.02.2005	5	-2	5	7,35	4,35	
		8 (Tavan)	03.03.2005 - 28.02.2005	0	-3	-3	4,24	2,51
			04.03.2005 - 28.02.2005	-2	0	-5	5,39	3,18
	07.03.2005 - 28.02.2005		0	-1	-4	4,12	2,44	
	09.03.2005 - 28.02.2005		-1	-2	-3	3,74	2,21	

Ek Tablo 7.2'nin devamı

Kesit	Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti (t _{f,0,975} =1,98)
III. Kesit	8 (Tavan)	11.03.2005 - 28.02.2005	-1	-3	-2	3,74	2,21
		13.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		17.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		19.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		21.03.2005 - 28.02.2005	-1	-5	-3	5,92	3,50
		23.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-3	5,00	2,96
		25.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		26.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		27.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		28.03.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		29.03.2005 - 28.02.2005	-1	-5	-3	5,92	3,50
		30.03.2005 - 28.02.2005	-1	-3	-2	3,74	2,21
		31.03.2005 - 28.02.2005	-1	-5	-2	5,48	3,24
		01.04.2005 - 28.02.2005	0	-5	-3	5,83	3,45
		02.04.2005 - 28.02.2005	-2	-5	-2	5,74	3,40
		03.04.2005 - 28.02.2005	-2	-4	-2	4,90	2,90
		04.04.2005 - 28.02.2005	0	-4	-3	5,00	2,96
		06.04.2005 - 28.02.2005	0	-5	-3	5,83	3,45
		08.04.2005 - 28.02.2005	-2	-6	-4	7,48	4,42
		10.04.2005 - 28.02.2005	-2	-4	-4	6,00	3,55
		12.04.2005 - 28.02.2005	-2	-5	-4	6,71	3,97
		14.04.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		16.04.2005 - 28.02.2005	0	-4	-2	4,47	2,64
		18.04.2005 - 28.02.2005	-1	-5	-2	5,48	3,24
		20.04.2005 - 28.02.2005	-2	-4	-4	6,00	3,55
		22.04.2005 - 28.02.2005	0	-5	-2	5,39	3,18
		24.04.2005 - 28.02.2005	0	-5	-2	5,39	3,18
		26.04.2005 - 28.02.2005	-2	-6	-4	7,48	4,42
		28.04.2005 - 28.02.2005	-3	-5	-4	7,07	4,18
		30.04.2005 - 28.02.2005	-2	-5	-2	5,74	3,40
	9 (sağ)	19.03.2005 - 28.02.2005	2	1	3	3,74	2,21
		23.03.2005 - 28.02.2005	2	1	3	3,74	2,21
		25.03.2005 - 28.02.2005	2	1	3	3,74	2,21
		30.03.2005 - 28.02.2005	0	3	4	5,00	2,96
		01.04.2005 - 28.02.2005	2	1	4	4,58	2,71
		02.04.2005 - 28.02.2005	2	0	4	4,47	2,64
03.04.2005 - 28.02.2005		3	0	4	5,00	2,96	
04.04.2005 - 28.02.2005		3	2	5	6,16	3,65	
06.04.2005 - 28.02.2005		2	2	5	5,74	3,40	
08.04.2005 - 28.02.2005		3	2	3	4,69	2,77	
10.04.2005 - 28.02.2005		3	2	2	4,12	2,44	
12.04.2005 - 28.02.2005		3	2	2	4,12	2,44	
18.04.2005 - 28.02.2005		2	0	3	3,61	2,13	
24.04.2005 - 28.02.2005		3	2	5	6,16	3,65	
26.04.2005 - 28.02.2005		1	2	4	4,58	2,71	
28.04.2005 - 28.02.2005		3	2	4	5,39	3,18	
30.04.2005 - 28.02.2005	2	1	5	5,48	3,24		

Ek Tablo 7.3. Trabzon 2 Tüneli IV. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri

Kesit	Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{f,0.975}=1,99$)
IV. Kesit	10(sol)	07.03.2005 - 05.03.2005	0	-2	2	2,83	2,01
		09.03.2005 - 05.03.2005	1	-1	3	3,32	2,36
		13.03.2005 - 05.03.2005	1	-1	3	3,32	2,36
		17.03.2005 - 05.03.2005	1	-1	3	3,32	2,36
		19.03.2005 - 05.03.2005	0	-2	3	3,61	2,57
		23.03.2005 - 05.03.2005	0	-1	3	3,16	2,25
		25.03.2005 - 05.03.2005	1	-2	3	3,74	2,66
		29.03.2005 - 05.03.2005	0	-2	2	2,83	2,01
		30.03.2005 - 05.03.2005	2	-1	3	3,74	2,66
		31.03.2005 - 05.03.2005	0	0	3	3,00	2,14
		04.04.2005 - 05.03.2005	0	-1	3	3,16	2,25
		14.04.2005 - 05.03.2005	0	-1	3	3,16	2,25
		16.04.2005 - 05.03.2005	1	-1	3	3,32	2,36
		18.04.2005 - 05.03.2005	1	-1	3	3,32	2,36
		20.04.2005 - 05.03.2005	0	-2	2	2,83	2,01
		22.04.2005 - 05.03.2005	1	-3	3	4,36	3,10
		24.04.2005 - 05.03.2005	3	-2	1	3,74	2,66
		26.04.2005 - 05.03.2005	4	-1	2	4,58	3,26
		28.04.2005 - 05.03.2005	0	-2	2	2,83	2,01
		30.04.2005 - 05.03.2005	1	-1	3	3,32	2,36
	07.03.2005 - 05.03.2005	11 (Tavan)	-4	-1	-2	4,58	3,26
	09.03.2005 - 05.03.2005		-5	0	-2	5,39	3,84
	11.03.2005 - 05.03.2005		-4	1	-1	4,24	3,02
	13.03.2005 - 05.03.2005		-5	0	-2	5,39	3,84
	17.03.2005 - 05.03.2005		-5	0	-2	5,39	3,84
	19.03.2005 - 05.03.2005		-5	0	-2	5,39	3,84
	21.03.2005 - 05.03.2005		-4	-1	-3	5,10	3,63
	23.03.2005 - 05.03.2005		-5	-1	-3	5,92	4,21
	25.03.2005 - 05.03.2005		-3	2	-3	4,69	3,34
	26.03.2005 - 05.03.2005		-4	0	-2	4,47	3,18
	27.03.2005 - 05.03.2005		-4	0	-2	4,47	3,18
	28.03.2005 - 05.03.2005		-4	0	-2	4,47	3,18
	29.03.2005 - 05.03.2005		-5	-1	-3	5,92	4,21
	30.03.2005 - 05.03.2005		-7	1	-4	8,12	5,79
	31.03.2005 - 05.03.2005		-7	1	-5	8,66	6,17
	01.04.2005 - 05.03.2005		-7	0	-4	8,06	5,74
	02.04.2005 - 05.03.2005		-7	0	-2	7,28	5,18
	03.04.2005 - 05.03.2005		-5	0	-2	5,39	3,84
	04.04.2005 - 05.03.2005		-5	1	-3	5,92	4,21
	14.04.2005 - 05.03.2005		-7	1	-3	7,68	5,47
	16.04.2005 - 05.03.2005	-5	0	-3	5,83	4,15	
	18.04.2005 - 05.03.2005	-4	-1	-3	5,10	3,63	
20.04.2005 - 05.03.2005	-5	0	-5	7,07	5,04		
22.04.2005 - 05.03.2005	-5	-2	-3	6,16	4,39		
24.04.2005 - 05.03.2005	-4	0	-4	5,66	4,03		
26.04.2005 - 05.03.2005	-5	-1	-3	5,92	4,21		

Ek Tablo 7.3'ün devamı

Kesit	Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{f,0.975}=1,99$)
IV. Kesit	11 (Tavan)	30.04.2005 - 05.03.2005	-5	0	-2	5,39	3,84
	12 (sağ)	07.03.2005 - 05.03.2005	2	2	1	3,00	2,14
		09.03.2005 - 05.03.2005	3	2	1	3,74	2,66
		11.03.2005 - 05.03.2005	3	1	0	3,16	2,25
		13.03.2005 - 05.03.2005	3	2	1	3,74	2,66
		17.03.2005 - 05.03.2005	3	2	1	3,74	2,66
		19.03.2005 - 05.03.2005	2	3	2	4,12	2,94
		21.03.2005 - 05.03.2005	3	2	1	3,74	2,66
		23.03.2005 - 05.03.2005	3	2	1	3,74	2,66
		25.03.2005 - 05.03.2005	1	3	2	3,74	2,66
		26.03.2005 - 05.03.2005	2	4	1	4,58	3,26
		27.03.2005 - 05.03.2005	2	4	1	4,58	3,26
		28.03.2005 - 05.03.2005	2	4	1	4,58	3,26
		29.03.2005 - 05.03.2005	1	2	2	3,00	2,14
		30.03.2005 - 05.03.2005	3	1	5	5,92	4,21
		31.03.2005 - 05.03.2005	3	1	5	5,92	4,21
		01.04.2005 - 05.03.2005	1	2	4	4,58	3,26
		02.04.2005 - 05.03.2005	1	2	4	4,58	3,26
		03.04.2005 - 05.03.2005	1	2	2	3,00	2,14
		04.04.2005 - 05.03.2005	3	1	1	3,32	2,36
		14.04.2005 - 05.03.2005	3	1	1	3,32	2,36
		16.04.2005 - 05.03.2005	3	2	1	3,74	2,66
		18.04.2005 - 05.03.2005	2	2	1	3,00	2,14
		20.04.2005 - 05.03.2005	1	4	2	4,58	3,26
		22.04.2005 - 05.03.2005	2	2	1	3,00	2,14
		24.04.2005 - 05.03.2005	2	1	3	3,74	2,66
		26.04.2005 - 05.03.2005	3	0	3	4,24	3,02
		28.04.2005 - 05.03.2005	2	2	1	3,00	2,14
		30.04.2005 - 05.03.2005	3	2	1	3,74	2,66

Ek Tablo 7.4. Trabzon 2 Tüneli V. kesit obje noktalarında belirlenen anlamlı deformasyon değerleri

	Nokta No	Gün	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	di (mm)	Ti ($t_{f,0.975}=1,99$)
V. Kesit	13(sol)	06.04.2005 - 17.03.2005	2	-2	2	3,46	2,31
		16.04.2005 - 17.03.2005	2	0	3	3,61	2,41
		18.04.2005 - 17.03.2005	4	-2	1	4,58	3,06
		20.04.2005 - 17.03.2005	1	0	3	3,16	2,11
		24.04.2005 - 17.03.2005	0	0	3	3,00	2,00
		06.04.2005 - 17.03.2005	2	-2	2	3,46	2,31
		16.04.2005 - 17.03.2005	2	0	3	3,61	2,41
		18.04.2005 - 17.03.2005	4	-2	1	4,58	3,06
		20.04.2005 - 17.03.2005	1	0	3	3,16	2,11
		24.04.2005 - 17.03.2005	0	0	3	3,00	2,00
	14 (Tavan)	29.03.2005 - 17.03.2005	0	2	-3	3,61	2,41
	15 (sağ)	23.03.2005 - 17.03.2005	2	2	1	3,00	2,00
		20.04.2005 - 17.03.2005	3	1	2	3,74	2,50
		24.04.2005 - 17.03.2005	1	3	2	3,74	2,50

ÖZGEÇMİŞ

Burak Satır, 1980 yılında Balıkesir ili Edremit ilçesinde doğdu. İlkokulu İzmir ilinde Saadettin Tezcan İlkokulu'nda, ortaokul öğrenimini Konya'da Vali Necati Çetinkaya İlköğretim okulunda, liseyi de Ayvalık Lisesinde tamamladı. 1999 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünden 2003 yılında mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek lisans öğrenimine başladı. Aralık 2005'de Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen bu görevini sürdürmektedir.

Burak SATIR

2007