T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR DEMİRYOLU TÜNELİNİN TAHKİMAT ANALİZLERİ

Kaygusuz ÜNLÜ

YÜKSEK LİSANS

Maden Müendisliği Anabilim Dalını

Kasım/2010

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

Kaygusuz ÜNLÜ
12/11/2010

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR DEMİRYOLU TÜNELİNİN TAHKİMAT ANALİZLERİ

Kaygusuz Ünlü

Selçuk üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman Doç. Dr. İhsan ÖZKAN

2010, KONYA

JÜRİ: Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
Yrd. Doç. Dr. Melih GENİŞ
Doç. Dr. İhsan ÖZKAN

Bu çalışmada Konya-Polatlı-Ankara demiryolu güzergahı üzerinde konumlanan Bozdağ'da açılan tünele ait tahkimat analizleri yapılmıştır. Tahkimat analizlerinde sahada gerçekleştirilen beş sondaj verisinden elde edilen kaya kütle sınıflama sonuçları kullanılmıştır. Tünel genişliği 13 m olan açıklıkta tünel ekseni, jeoteknik açıdan 12 farklı bölgeye ayrılmış ve her bölge için kaya kütle malzeme özellikleri ($\sigma_c, \sigma_{cm}, E_i, E_m, m, s, a$) belirlenmiştir. Sınıflama sonuçlarına bağlı yeni Avusturya tünelcilik (NATM) yaklaşımı kullanılarak tahkimat türleri ve boyutları seçilmiştir. Tünelde kaya saplamaları, beton, çelik bağ, çelik tel hasır ve jeotekstil membran tahkimat üniteleri olarak kullanılmıştır. Tahkimat ünitelerine ait mekanik özellikler ve kaya kütle özelliklerine bağlı olarak PHASE2 programı yardımıyla sayısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler neticesinde tünel kesitinde en büyük ikincil gerilmelerin ve yerdeğişimlerinin tünel tabanında olduğu görülmüştür. En büyük yerdeğişimlerinin oluştuğu tünel tavanı, yan cidarı ve tabanı sırasıyla Km 177+100-177+380 (u_i=8.1 mm), Km 177+100-177+380 (u_i=7.65 mm) ve Km 175+360-175+390 (u_i=13.8 mm) 'dır. PHASE2 çıktılarına bağlı olarak önce her iki kesite ait ortalama yerdeğişimler, sonra B1, B2 ve B3 NATM sınıflarına ait ortalama yerdeğişimler sırası ile 1.1, 2.84 ve 5.2 mm olarak hesaplanmıştır. Sahada gerçekleştirilen ölçümlerden ise bu NATM sınıflarında ölçülen yerdeğişimlerinin sırasıyla 2.94, 6.62 ve 7.23 mm olduğu belirlenmiştir. PHASE2 çıktıları ile gerçek ölçüm sonuçları arasında güçlü bir istatistiksel ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, kaya kütle sınıflaması, püskürtme beton, kaya saplaması, sayısal çözümleme.

ABSTRACT

MASTER THESIS

SUPPORT SNSLYSIS FOR A RAILWAY TUNNEL

Kaygusuz Ünlü

Selcuk Unıversıty

Graduate School Of Natural And Scıences

Department Of Mınıng Engıneerıng

SUPEVIZOR: Assoc. Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

2010, KONYA

JURY: Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY

Assist Prof. Dr. Melih GENİŞ

Assoc. Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

ABSTRACT

In this study, fortification anaysis of a tunnel in Bozdağ, which is an area on Konya – Polatlı – Ankara railway route, has been done. In related fortification analysis, rock mass classification results, that is provided from 5 drilling datas on field, has been utilized. The tunnel with 13 m axis width, separated into 12 different areas and rock mass material characteristics (σc,σcm, Ei,Em, m, s, a) was defined for each area. New fortification types and dimensions has been set by using Austrian Tunneling Aproach according to classification results. Rock pinnings, concrete, steel links and mats and jeotextile membrane are utilized as fortification units. Numerical analysis has been done with the support of PHASE2 Program and according to rock mass and mechanical characteristics of fortification units. By the end of numerical analysis it is observed that the second largest tension and place exchagings on tunnel section was on tunnel floor. The tunnel ceiling, which had the largest place exchangings, side hull and floor dimensions is in order; Km 177+100-177+380 (u_i=8.1 mm), Km 177+100-177+380 (u_i=7.65 mm) ve Km 175+360-175+390 (u_i=13.8 mm). At first, average place exchangings of both tunnel sections and then other average place exchangings ,which belong to B1, B2 and B3 NATM types, has been calculated as 1.1, 2.84 ve 5.2 mm according to PHASE2 results. It is also determined from measurements, that were done on field, the dimensions of place exchangings in NATM types are 2.94, 6.62 ve 7.23 mm. In conclusion, it is confirmed that, there is a strong statistical relation between PHASE2 and fieldwork results.

Key words: Tunnel, rock mass classification, blasting concrete, rock pinning, numerical analysis.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında; beni her zaman yönlendiren, her konuda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. İhsan ÖZKAN hocama, çalışmanın uygulama kısmındaki verilerin toplanmasında ve kullanılmasından bana yardımcı olan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları çalışanlarına, sayısal çözümleme çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ve ayrıca tezin düzeltilmesi ve değerlendirilmesinde katkısı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Melih Geniş'e, tezin değerlendirilmesinde ve düzeltilmesinde büyük katkısı olan Prof. Dr. M. Kemal Gökay'a tezin yazılması ve hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma, beni yalnız bırakmayan eşim İnşaat Mühendisi Hayriye ÜNLÜ' ye ve her konuda benim yanımda olan ve manevi olarak destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Kaygusuz ÜNLÜ

KONYA/2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET i

ABSTRACT ii

ÖNSÖZ iii

İÇİNDEKİLER vi

SİMGELER VE KISALTMALAR vi

1. GİRİŞ 1

1.1 Problemin Tanımı 1

1.2 Çalışmanın Amacı 1

1.3 Çalışmanın İçeriği 2

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 3

2.1 Genel 3

2.2 Tünel.....3

2.2.1 Tünel Açma Yöntemleri.....4

2.2.1.1 Aç-Kapa Yöntemi 4

2.2.1.2. Batırma Tünel (Immersed Tube) Yöntemi.....5

2.2.1.3. Klasik Tünel Açma Yöntemi.....6

2.2.1.4.Tünel Delme Makinesi İle Tünel Açma Yöntemi 8

2.3. Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri 14

2.3.1. RMR Sınıflama Sistemi 15

2.3.2. Q Sınıflama Sistemi 16

2.3.3. Jeolojik Dayanım İndeks (GSI) Sınıflaması 18

2.4. Kaya Malzeme ve Kütle Davranışının Belirlenmesi 18

2.4.1. Kaya Malzemesi Davranışı 19

2.4.1.1. Coulomb Yenilme Ölçütü 19

2.4.1.2. Mohr Yenilme Ölçütü 19

2.4.1.3. Griffith Yenilme Ölçütü 20

2.4.2. Kaya Kütle Davranışı 21

2.4.2.1. Hoek-Brown Yenilme Ölçütü 23

2.4.5. Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) 26

2.5. Literatür Özeti 27

2.6. PHASE2 Programı 30

3. ÇALIŞMA SAHASI 31

3.1. Genel 31

3.2. Coğrafi Konum 31

3.3. Yapısal Jeoloji 31

3.4. Tünel Açma Çalışmaları 35

4. SAHADA GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR 37

4.1. Genel 37

4.2. Sondaj Çalışmaları 37

4.3. Kaya Kütle Sınıflama Çalışmaları 38

4.3.1. RMR Kaya Kütle Sınıflama Çalışmaları 38

4.3.2.Q Kaya Kütle Sınıflama Çalışmaları 40

4.3.3. Yeni Avusturya Tünel Yöntemi (NATM) Sınıflama Çalışmaları 41

4.3.3.1. B1 Tahkimat Türü 44

4.3.3.2. B2 Tahkimat Türü 45

4.3.3.3. B3 Tahkimat Türü 46

4.4. Tünel Kazı Çalışmaları.....46

5. TASARIM GİRDİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ 48

5.1. Genel 48

5.2. Kaya Kütle Tasarım Verilerinin Tespiti 48

5.3. Genel Tasarım Verilerinin Belirlenmesi 53

5.4. Tahkimat Elemanlarının Malzeme Özellikleri 68

6. TÜNEL AÇIKLIKLARINA AİT SAYISAL MODELLEME ve DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ 71

6.1. Genel 71

6.2. Duraylılık Çözümlemelerinde Kullanılan Bilgisayar Programı 71

6.3. Çözümleme Yöntemleri 72

6.3.1. Açıklık Geometrisi Ve Model Sınır Koşulları 72

6.3.2. Birincil Arazi Gerilme Koşulu 74

6.3.3. Kaya Kütlesi Dayanım Ve Deformasyon Özellikleri 76

6.3.4. Tahkimat Elemanlarına Ait Malzeme Özellikleri 76

6.4. Duraylılık Çözümlemeleri 79

6.4.1. 175+360–175+390 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 1) 79

6.4.2. 175+390–175+828 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 2) 83

6.4.3. 175+828–176+000 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 3) 86

6.4.4. 176+000–176+104 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 4) 89

6.4.5. 176+104–176+524 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 5) 92

6.4.6. 176+524–176+555 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 6) 95

6.4.7. 176+555–176+797 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 7) 98

6.4.8. 176+797–176+832 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 8) 101

6.4.9. 176+832–176+842 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 9) 104

6.4.10. 176+842–177+100 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 10) 107

6.4.11.177+100–177+380 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 11) 110

6.4.12. 177+380–177+390 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 11) 113

6.5. Tünellerde Gerçekleştirilen Yerdeğiştirme Ölçümleri ve Sayısal Çözümleme Sonuçlarının Karşılaştırılması 116

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 122

8. KAYNAKLAR 127

EKLER 132

SİMGELER VE KISALTMALAR

Ab	Tünel içersinde patlama etkisi
Aw	Zayıflık düzlemleri
As	Gerilme değişimleri
B	Tünel taban genişliği
C	Kohezyon
D	İçsel sürtünme açısı
De	Eşdeğer boyut
E	Elastik modülü
ESR	Kazı destek oranı
E_{beton}	Püskürtme beton elastik modülü
$F_{çelik}$	Kaya saplama elastik modülü
GSI	Jeolojik dayanım indeksi
ht	Tünel yüksekliği
J_a	Çatlak yüzeyinin durumu
J_n	Çatlak takım sayısı
J_r	Çatlak pürüzlülük sayısı
J_w	Çatlak suyu azaltma faktörü
m, s	Kaya sabitleri
NATM	Yeni Avusturya tünel açma metodu
RMR	Kaya kütlesi oranı
RQD	Kaya kalitesi derecesi
RSR	Kaya yapısı oranı
SCR	Süreksizlik düzlem koşulu
SR	Yapısal özellik puanı
SRF	Gerilme değişim faktörü
Q	Kaya kütle indeksi
P	Arazi gerilmeleri

σ_t	Çekme dayanımı
σ_1	En büyük asal gerilme
σ_3	En küçük asal gerilme
Φ	İçsel sürtünme açısı
τ	Kesme gerilmesi
θ	Dönme açısı
$\sigma_{\theta,}\ \tau_\theta$	Yenilme yüzeyine etkiyen normal ve kesme gerilmeleri
σ_c	Tek eksenli basma dayanımı
γ	Birim hacim ağırlık
ν	Poisson oranı

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Dünyada nüfus artışı ile birlikte yerleşim yerlerinin sayısı artmaktadır. Aynı zamanda artan yerleşim bölgeleri arasındaki ulaşım sorunu gündeme gelmektedir. Günümüzde modern araçlar yardımıyla ulaşım; hava, deniz ve karayolu ile yapılmaktadır. XXI. yüzyıl insanı zamanı ve parayı akıllıca kullanmak istemektedir. Ulaşım esnasında güvenli ve rahat karayolu ile kısa zaman içerisinde ulaşmak istediği noktaya gitmek isteyen insanoğlunun yaşantısına karayolu ve demiryolu tünelleri hızla girmiştir. Günümüzde geliştirilen modern kazı makineleri ve tahkimat yöntemleri ile birlikte büyük çaplı ve uzun tünellerin açılması mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte sutaşıma amaçlı, lağım amaçlı, haberleşme hat amaçlı, araştırma amaçlı (İsviçre'de CERN) gibi birçok tünel yapılmakta ve kullanılmaktadır. Tünel kazılan bu kadar önemli olmakla birlikte tünel'den istenen en önemli husus en az maliyetli kazı ile emniyeti sağlayacak en uygun bir tahkimat tasarımına sahip olmasıdır.

1.2. Çalışmanın Amacı

2007 yılında başlamış olan Konya-Ankara-İstanbul hızlı tren projesinin Demiryolu güzergâhı; Konya-Polatlı-Ankara ve Konya-Polatlı-Eskişehir-İstanbul şeklinde olacaktır. Konya-Polatlı güzergâhında Sarayönü mevkiinde demiryolunun tünel yardımıyla aşılması planlanmıştır. Yaklaşık 2030 m uzunluğundaki tünelde gerçekleştirilen kaya kütle sınıflama sistemleri yardımıyla ulaşılan RMR ve Q sınıflama sonuçları kullanılarak sayısal çözümleme çalışmalarına temel teşkil eden parametreler belirlenmiştir. Tünel'in uzun eksen boyunca dikkate alınan 12 noktasında sayısal çözümleme ile tahkimat analizi gerçekleştirilecek ve ulaşılan sonuçlar ile tünelde ölçülen deformasyon ölçümlerinin karşılaştırılması bu çalışmanın amacını oluşturmuştur.

1.3. Çalışmanın İçeriği

Tezin ilk bölümde problemin tanımı, çalışmanın amacı ve çalışmanın içeriği verilmiştir. İkinci bölümde Tünel kazısı, tahkimatı ve sayısal çözümlemelerin yapıldığı PHASE2 yazılımı hakkında detaylı bir kaynak araştırması sunulmuştur. Bolüm III'de çalışma sahası ile ilgili bilgiler sunulurken, IV. bolümde tünel ekseni boyunca yapılan 5 adet sondaj karot verisinden belirlenen kaya kütle sınıflaması verilmiş ve sayısal analizler için gerekli olan girdi parametrelerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar sunulmuştur. Bölüm VI’ da sayısal çözümlemeler ve arazi ölçüm sonuçları ile karşılaştırmaları, Bölüm VII 'de ise ulaşılan sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2. 1. Genel

Yerleşim alanları hızla büyüyen kentlerde ulaşım sorunu, mevcut karayolu ulaşım sistemleri ile çözülemez duruma gelmektedir. Mevcut karayolu ulaşımının gerek kapasite, gerekse yoğun trafikte zaman açısından taşıdığı olumsuzluklar ve neden olduğu çevre problemleri metro, hafif raylı sistem, tramvay gibi raylı toplu taşıma sistemlerinin daha çok uygulamaya geçirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Ayrıca şehirlerarası mesafelerin daha da kısaltılması için demiryolu ve karayolu tünellerinin açılması gerekmektedir. Bununla birlikte artan temiz su, pis atık suyu ve karmaşık enerji ve haberleşme hatlarının na alınabilmesi için tünellere ihtiyaç duyulmalıdır.

Günümüzde tünelcilik çalışmalarında ortaya çıkan yeni gelişmeler tünel projelerinin istenilen hassasiyette, güvenli olarak en kısa zamanda ve düşük maliyet ve yüksek kalite ile tamamlanmasını sağlamaktadır. Projenin yürütülmesi esnasında ve tamamlanmasından sonra belli periyotlarda yapılacak olan deformasyon ölçmeleri de projenin uzun süre güvenli olarak çalışması için son derece önemli ölçme uygulamalarıdır. Tünel projelerinin uygulaması esnasında yapılacak deformasyon ölçümleri, güvenliğin sağlanması ve oluşabilecek herhangi bir felaket sonucu ortaya çıkacak maddi zararları önlemek açısından çok önemlidir.

2.2. Tünel

İki ucu açık kazıları tünel, tek ucu açık kazıları ise galeri olarak tanımlanmaktadır. İlk tünel M.Ö. 4000 yılında Fırat nehri altında Babil yakınlarında 3.5x4.5m boyutlarında 1km uzunluğunda aç-kapa yöntemiyle açılmıştır. Ülkemizdeki ilk galeri M.Ö. 300 yılında Silifke'de ki Aksıfat galerisidir ve su amacıyla açılmış olup 45 km uzunluğunda 0.80x1.5m kesitindedir.

Genellikle, tünel açılacak güzergâhın topografyası, toprak ya da kaya zemin koşulları ve açılacak tünelin geometrisi gibi parametreler değerlendirilerek tünel açma yöntemi, tahkimat türü ve buna bağlı olarak da kullanılacak ölçme yöntemleri belirlenmektedir. Günümüzde tünel uygulamaları dört grup halinde incelenebilir.

Bu gruplar;

- Aç-kapa yöntemiyle açılan tüneller,
- Batırma yöntemiyle oluşturulan tüneller,
- Delme-Patlatma (klasik) yöntemiyle açılan tüneller,
- Tünel açma makinesi ile açılan tüneller (kısmi ve tam mekanize tünel açma makineleri),

olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada Aç-Kapa yöntemi ve Batırma tünel yöntemine kısaca değinilip Klasik yöntem ve makineler ile tünel açma metotları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.2.1. Tünel Açma Yöntemleri

2.2.1.1. Aç-kapa yöntemi

Genellikle metro tünellerinin güzergah itibariyle ana yolların altından geçirilebildiği yüzeye yakın kısımlarında, bazen de bir taşıt yolunun çığlardan korunması amacıyla karayolunda, kanalizasyon, içme suyu ve yaya geçitlerinin de açılmasında basit ve ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu yöntemde önce kazı boşluğunun yanları betonarme, kazık veya beton duvar perdesi ile desteklendikten sonra, iş makineleri ile daha geniş bir kanal toprak ya da kaya zeminde açılır. Daha sonra kanalın üzeri beton bir yapı ile kapatılır. Bu betonun üzeri ise toprak ya da kaya ile doldurularak temel oluşturulmuş olur.

Suları yüzeye yakınsa su seviyesi düşürülür veya su derin kuyulara drene edilir. Kenar ayakların örülmesinde hiçbir özellik yoktur. Tamamen açık havadaki duvar örme usullerine göre yapılır. Tavanın oluşturulmasında eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik varsa bir kemer oluşturulur. Bu kemer de açık havada oluşturulduğundan fazla güçlükle karşılaşılmaz. Eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik yoksa betonarme bir tavan oluşturulabilir.

Yerleşim alanları içerisinde yapılan kazı çalışmaları gürültü ve trafiğin engellenmesi gibi zararları nedeniyle pek tercih edilmez. Trafiğin gidişatını engellememek için seyyar köprüler kullanılabilir.

Aç-kapa tünel açma yönteminin diğer yöntemlerden farkı tavanda tasman oluşmamasıdır. Bu nedenle çevredeki yapılara zarar vermeden geçilmesi mümkündür. Ayrıca diğer yöntemlerle yeteri kadar yapılamayan yalıtım işlemi bu yöntemle kolaylıkla yapılabilir

2.2.1.2. Batırma Tünel (Immersed Tube) Yöntemi

1893 yılında ABD Boston'da kanalizasyon sistemi için ilk defa kullanılan bu teknoloji daha sonra 1910 yılında Michigan Central Demiryolu için Detroit Nehri geçişinde kullanılmıştır. Bu konuda ülkemizde İstanbul Boğazı'nda halen inşa edilen Marmaray Projesi dünyada en derin batırma tünel olması açısından önemli örneklerden biridir.

Batırma tüp tüneli genel olarak 4 aşamada inşa edilir;

- Prefabrik betonarme tüpün yeryüzünde imal edilmesi.
- Tüpün su altında 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;

- Tünel güzergâhının batı metrik veya hidrografik haritalarının hazırlanması
- Tüplerin deniz dibinde yerleştirilecekleri kanalın hazırlanması (dredging) sırasında gerekli ölçme işlemleri
- Tüplerin yerleştirilmesi (Immersing) sırasında yapılacak ölçme işlemleri Güzergahın deniz dibi haritasının (batı metrik veya hidrografik harita) hazırlanması, su dibinde veya hidrografik harita hazırlanması, su dibinde yerleştirilmesidir.

Deniz dibindeki tüp yerleşim alanının kazısı ve hazırlanması ile batırılan tüplerin konumu akustik konumlandırma sistemleri (APS) aracılığıyla eş zamanlı olarak izlenir ve gerekli düzeltmeler hidrolik pistonlar aracılığıyla yapılır. Bu amaçla Echosounder' in gönderdiği ses dalgalarını algılamak üzere tüplerin üzerine ses

algılayıcı cihazlar konumlarının belirlenmesi için yerleştirilir. Akustik algılayıcı Echosounder' in 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 ölçümleriyle belirlenir.

2.2.1.3. Klasik Tünel Açma Yöntemi

Klasik tünel açma yönteminde tünel kazısı, delme-patlatma yardımıyla yapılmaktadır. Tünel arınında ilerleme kaya zeminin durumuna bağlı olarak tek ayna kademesinde ya da parçalı ayna kademesinde yapılır. Aynada tasarıma uygun delikler delinir, patlayıcılar deliklerin içerisine yerleştirilir ve gerekli tüm önlemler alınarak patlatma gerçekleştirilir. Patlatma sonrasında oluşan pasa arından uzaklaştırılır ve tahkimat üniteleri yerleştirilir. Patlatma ile arında yapılan ilerleme eğer kaya sağlam ise tüm arında, eğer kaya yeteri kadar sağlam değilse arında birkaç aşamada ilerleme sağlanır. Günümüzde en uygun ilerleme yöntemi; tepe-çekirdek olarak tanımlanmaktadır. Delme- patlatmanın haricinde son zamanlarda geliştirilen galeri açma makineleri ile de klasik tünel kazıları yapılmaktadır.

Kaya zeminlerin kütlesel mekanik özelliklerini tanımlayan ve buna bağlı kazı ve tahkimat önerilerinde bulunabilen kaya kütle sınıflama sistemleri tünelcilik çalışmalarında yaygın olarak kullanmaktadır. Tüm sınıflama sistemlerinin felsefesini bünyesine alarak bütünleyici tünel kazı-tahkimat-ölçme prensiplerini bir araya getiren klavuz bir yaklaşım olan NATM (New Avustralia Tunnelling Method-Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu) mühendisleri tarafından kullanılmaktadır.

Tünel açma yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan NATM, uygun klasik yöntemle tünel açma tekniklerinin en deneysel ve esnek olanı, en uygun destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır (Ünlütepe, 2005).

NATM, ilk önce Avusturya, Fransa, Almanya, İsviçre ve İtalya'da uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntemin dünyaya yayılımı hızlı olmuştur. İlk uygulamalardan biri olan Frankfurt Metrosunda tünel açımına 1969 yılında iç içe tabakalı kil, marn, tebeşir ve kumtaşında başlamıştır. Bu yöntem Japonya'daki Seikan

tünelinde de başarı ile uygulanmıştır. Bir başka başarılı uygulama Meksiko şehrindeki Emisor Central kanalizasyon tünelidir.

NATM'nin yirmiden fazla ilkesi olup, esası ana kayanın ilk sağlamlığını korumak, kaya kütlesini fazla rahatsız etmeden arazi gerilmesini kaya kütlesinin kendisine taşıtmak, deformasyonları ve gerilmeleri ölçümlerle denetlemek, tahkimat işlemlerini en kısa zamanda tamamlamak ve kazı kesitlerini olduğunca yuvarlak seçmektir.

NATM tünel güzergâhı boyunca yapılan toprak zemin ya da kaya zemin etütleri ile topografya, derinlik ve açılacak tünel geometrisine bağlı olarak prensipte tünel inşaat detayları belirlenir. Bununla beraber uygulama sırasında yapılan gözlemler ve deformasyon ölçmelerinden elde edilen sonuçlara göre uygulamaya ilişkin kazı ve tahkimat yöntemi yeniden gözden geçirilerek daha uygun hale getirilir.

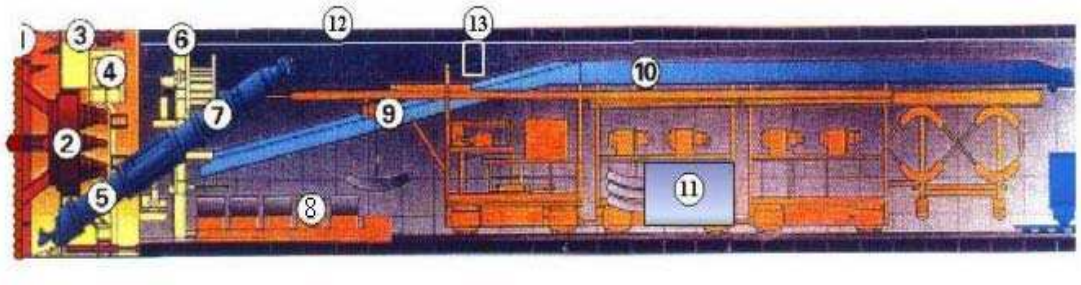
Tünel içerisinde kazı yüzeyi ile tahkimat elemanlarının doğrudan temas etmesi ile kompozit bir yapı oluşmaktadır. Bu kompozit yapı, tünel kazı çevresinde oluşan arazi gerilmelerinin yeniden dağılımını sağlayarak, ikincil arazi gerilmelerinin yeniden dengeye gelmesini sağlamaktadır. Klasik yöntemle açılan tipik bir tünel kesiti Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Klasik yöntemle açılan tipik bir tünel kesiti

2.2.1.4. Tünel Açma Makinesi ile Tünel Açma Yöntemi

Madencilik ve inşaat sektöründe yapılarının önemi teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstünde yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. Her ne kadar ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da tam cephe tünel açma makineleri (TBM) tasman gibi istenilmeyen hareketlerini önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı kaya birimleri için kullanılacak farklı kafa tasarımları ve keski tipleri, tam kesit tünel açma makineleri (TBM) ile tünel açma teknolojisi son dönemlerde çok önemli teknik gelişmeler kaydetmiştir. Sistem; açılması tasarlanan boyutta dairesel bir silindirik formu olan ring içerisinde tünel yapımı için gerekli teknolojiyi barındıran bir tünel açma makinesidir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 TBM makinesi (Ünlütepe, 2003)

Şekil 2.2'de sunulan: 1-Kazıcı Kafa 2-İtme Ünitesi 3-Piston 4-Basınç Ünitesi 5-Burgu Konveyör 6-Ring Montaj Kolu 7-Burgu Konveyör 8-Segment Besl. Ünitesi 9-Segment Vinci 10-Çamur Nakil Bandı 11-Kontrol Kabini 12-Segment İç Yüzeyi 13-TBM Yönlendirme Lazer İstasyonu'dur.

Sistemin baş kısmında kazılması planlanan toprak ya da kaya zemin koşullarına göre tasarlanmış bir kazıcı kafa ile kazılan malzemenin dışarıya taşınmasını sağlayan bir sistem mevcuttur. Arazi gerilmeleri açısından en uygun dairesel kesite uygun makinenin silindirik formu, kazı yüzeyinin duraylılığının kolayca sağlanmasında etkindir. Kazılan zemini ayakta tutarak zemin duraylılığını korur. Çok kötü zemin koşullarında ayna duraylılığını sağlamak ve sistemi dengede tutmak için zemin denge basıncından yararlanılır. Bu durumda sistem EPB makinesi adını alır. Kazıcı kafanın ilerlemesiyle ön kısmın duraylılığı da hemen gerisindeki çok sayıda pistonlar tarafından sağlanır. Bu pistonlar eğer varsa iç kaplama elemanlarına da daimi bir baskı yaparak iç kaplama formunu korur. İç kaplama elemanlarının şild içerisinde her yerleştirilmesinden sonra silindirik formlu şild ilerleyerek iç kaplama ile zemin arasından çekilir. Bu işlem sırasında iç kaplama ile toprak yada kaya zemin arasına ince beton karışımlı enjeksiyon malzemesi getiren raylı vagonlar geriye kazılan malzemeyi taşırlar. Teknolojik açıdan daha da gelişmiş TBM makineleri olmakla beraber makinenin tasarımı; tünel iç kaplama cinsi, zemin ve proje koşullarına göre belirlenmektedir. Bu arada sistemin tüm mekanik parametrelerini gösteren bir bilgisayar ile makinenin yeraltında seyahatinin ve iç kaplama yerleşiminin yönlendirdiği bir ölçme bilgisayarı mevcuttur. Bu üniteye kontrol kabini adı verilir (Ünlütepe, 2003).

TBM'ler genel olarak çalıştıkları kaya birimlerine göre sınıflandırılır. Genel anlamda sert kaya ve yumuşak kaya birimleri olmak üzere iki ana grup mevcuttur.

Sertten, yumuşak kaya birimine doğru gidildikçe TBM yapısal özellikleri de önemli ölçüde değişim gösterir.

150 yıllık bir gelişmeden sonra TBM her türlü tünel şartında mekanik kazının yapılabildiği bir noktaya gelmiştir. Eskiden sadece delme - patlatma yöntemi ile açılabilecek kaya birimleri bile artık TBM kullanılarak açılabilmektedir. Tam cephe tünel açma makineleri aynayı tamamen keskileri ile kavrar ve kazı yapar. Kazma işleminin gerçekleşmesi için iki önemli kuvvet vardır. Kesici kafanın aynaya doğru itilmesi ve bu itilme sırasında kafanın dönmeye başlaması kazı olayını gerçekleştirir. Aynadan kazılan malzeme kesici kafa üzerinde bulunan kanatçıklar tarafından kesici kafa arkasındaki hazneye aktarılır, hazne içerisinde bulunan konveyör çıkan pasanın nakliyatını yapar ve aynanın kesici kafa tarafından tamamen kapatılması aynaya yanaşmayı engeller. Bu yüzden keskilerin değiştirilmesi zordur. Kimi durumlarda kesici kafanın önüne bir işçi geçerek keskileri kontrol edebilir. Yeni geliştirilen modellerde keskiler kesici kafanın içinden değiştirilebilmekte böylece aynaya geçmeye gerek kalmamakta ve çalışma güvenliği tehlikeye atılmamış olmaktadır. Çalışacakları kaya birimine göre kesici kafa tasarımları ve kullanılan keskiler değişmektedir. Genel olarak yumuşak kaya birimlerinde riper dişler, kalem keskiler kullanılmaktadır. Çok yumuşak zeminlerde ise kesici kafa hem riperler hem de disk keskilerden oluşur. Disk keskiler olası yüksek dayanımlı ve kayaları kesmek için kesici kafaya yerleştirilmiştir. Sert zeminlerde ise kesici kafada sadece disk keskiler bulunur.

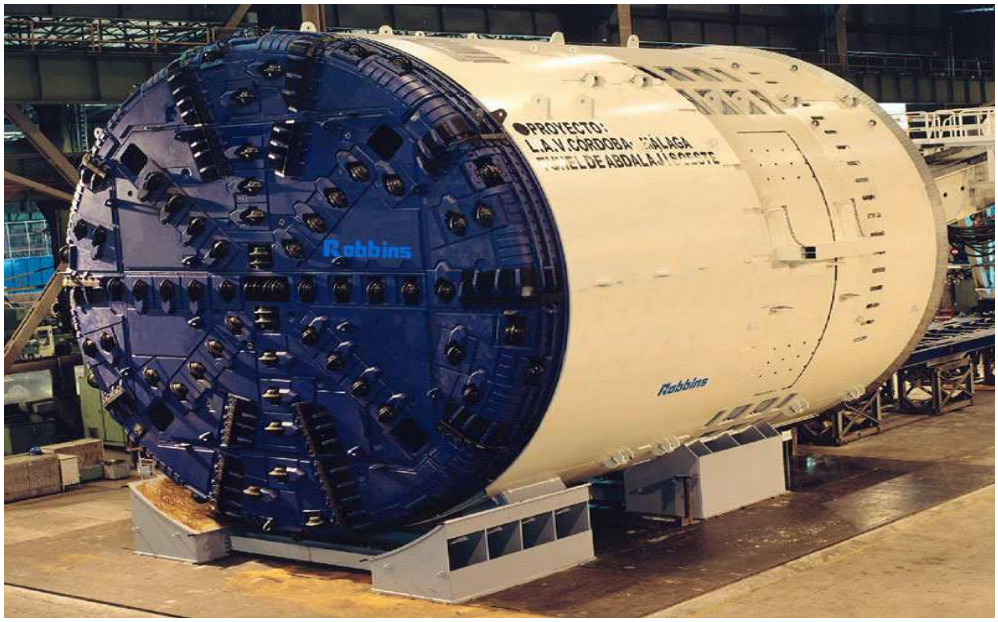
Sert kayaçlar için geliştirilen tünel açma makineleri aşağıda kısaca tanımlanmıştır.

Şiltsiz TBM’ler sert ve kendini tutabilen kaya birimlerinde kullanılırlar. TBM arkasından tavan kaya saplamaları veya dairesel özel ısıl işlemden geçirilmiş beton segmentler ile tahkimat yapılır.

Tek şiltli TBM’lerde tam daire şeklinde komple bir şilt mevcuttur. Tek şiltli TBM'ler yumuşak zeminlerde, sert kaya zeminlerde ve kaya içerisinde açılacak tünellerde kullanılabilirler. Tahkimat olarak beton segmentler kullanılır.

Çift şiltli TBM bu makine iki türlü çalışabilmektedir. Yukarda anlatıldığı gibi tek şilt olarak veya teleskopik olarak ana şildin içinde uzanabilen kuyruk tarafındaki

ikinci şildi bir kavrayıcılar (gripper) düzeniyle kullanmak mümkündür. Bu tür yapının avantajı sabit kuyruk şildinde kaplama işi ile kavrayıcıları iterek yapılacak delme işlerinin aynı anda gerçekleştirilmesine imkân sağlayıp çalışıldığı zaman ortaya çıkmaktadır. Bu makineler sert kaya zeminlerde kullanılabilir. Tipik bir çift şiltli TBM Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2.3. Tipik bir çift şiltli TBM (Ünlütepe, 2003)

Yumuşak zeminlerde kullanılan tünel açma makineleri aşağıda kısaca sunulmuştur.

Arazi dengeleme makinelerin (EPB) kullanıldığı yapışkan olmayan ortamlarda ve su seviyesi altında bulunan kaya zeminlerde ilerlemeler sırasında duraylılık sorunları kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda ve kendini kısa süre bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılır. Temel çalışma ilkesi, su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim halinde basınç altında tutulması olarak tanımlanabilir. Bir başka ifadeyle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve bu malzemenin tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 10 bar'a (1 MPa) kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde yapılabilirler. En iyi çalışma koşulu arazi nemlilik oranının % 10–15 veya daha az olduğu durumlardır. EPB makinesi çok sert kayaçlardan (diskli) çok yumuşak olanlarına

(kalem keskili) kadar, değişik toprak zemin ya da kaya zemin kaya birimlerinde kullanılmak üzere tasarlanabilirler. Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerin (Slurry Machines) yerlerini almaktadırlar. Bir EPB makinesinde kazılan malzeme bir vida konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılır. Kazı bölgesinde ki arazi basıncı azalmalarını ve bu yüzden oluşacak oturmaları engellemek için malzeme aktarımının kontrollü bir şekilde yapılması gereklidir. Bu yüzden vida konveyörün hızı malzeme çıkış hızının kontrol etmek için ayarlanabilir. İstenilen bir şekilde vida hızı ayarlaması bilgisayarlı bir monitörden izleme sistemiyle yapılabilir. Dengeli ve güvenli bir kazı yapabilmek için malzeme çıkış hızının makine ilerleme hızına eşit olması gerekmektedir. Böylece zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez. Eğer ortamda bulunan suyun basıncı atmosfer basıncının üzerine çok fazla çıkarsa bazı basınç kilitleri gerekli olabilir. Basınç kilitleri vidanın bir yanından diğerine doğru bir patlamayı önlemek için gereklidir ve vidanın çıkış kapısında konumlandırılır. EPB makinelerinde diğer metotların aksine ikincil bir destekleme yöntemi kullanılmaz (sıkıştırılmış hava, süspansiyon). Akıcı kaya birimi döner kafadaki keskiler tarafından kazılır ve ittirme kuvveti aynaya kazı haznesinin doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla transfer edilir. Böylece kazı bölgesinde kontrolden çıkmış bir şekilde malzeme akışı engellenmiş olur. Kazı bölgesindeki kaya birimi uygulanan ittirme kuvveti nedeniyle daha fazla yük alamadığı anda denge sağlanılmış olacaktır. Kaya birimine destekleme basıncı, sağlanan dengenin üzerine çıkarılırsa kazı bölgesindeki akıcı kaya birimi çok daha sağlam bir hale gelecektir. Eğer açılan tünel yeryüzüne yakınsa çok fazla uygulanan ittirme basıncı sebebiyle kabarmalar meydana gelebilir. Tünel boyunca taşıma, bant konveyörlerle, vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisine taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi eklendikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir.

EPB çalışma prensiplerine bağlı olarak çeşitli isimler alır: Malzeme Hapsedici Şiltleri (Soil Confinement Shields), Su Basıncını Destekleme Şiltleri (Water Pressure Balance Shields), Yüksek Yoğunluktaki Çamur Şiltleri (High Density Slurry Shields) ve Çamur Şiltleri (Mud Shields).



Şekil 2.4. Tipik bir EPM makinesi (www.penatrade.com,2009)



Şekil 2.5. Tipik bir çamur şildi (www.penatrade.com,2009)

Yukarıda değinilen büyük kesitli tam cephe tünel açma makinesi (TBM) haricinde son zamanlarda daha küçük kesitli tam cephe kazı yapabilen mikro tünel açma makineleri geliştirilmiştir. Bu makineler;

2.3. Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleri

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri pratik gereksinimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmış teorik bilgilerden oluşan sistemler olarak görülse de tünelcilik pratiğinde günlük işlerin bir parçası olarak yoğun kullanım alanına sahiptirler. Tünelin kazı sistem ve yöntemleri, tahkimat elemanlarının seçimi ve bunların uygulanması, sözleşmelerin hazırlanması, maliyetlerin çıkarılması, ödemelerin yapılması gibi birçok tünelcilik işlemine, kaya kütlesi sınıflama sistemleri temel oluşturmaktadır.

Tasarım çalışmaları sayısal, görgül (ampirik) ve deneme-yanılmaya dayalı yöntemler olmak üzere üç ana yönteme ayrılır. Sayısal yöntemler kazıların duraylılık koşullarının araştırılması ve kaplamadaki gerilme – deformasyon ilişkilerinin analizi için kullanılır. Bu yöntemlerin başlıcaları, sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sınır elemanlar vb. yöntemlerdir. Görgül yöntem, kaya ya da zemin koşulları bilgisinden yararlanılarak bir takım yaklaşımlar ortaya koyar. Bu yöntemlerin başlıcaları Kaya Yükü (Terzaghi, 1946), Kaya Kütle Belirteci RQD (Dere ve Miller, 1966), Kaya Yapısı Puanı RSR (Wickham ve ark., 1972), Kaya Kütlesi Puanı RMR (Bieniawski, 1973,1976 – 1979,1989), Tünelcilik Niteliği İndeksi Q (Barton, ve ark.., 1974, Grimstad ve Barton, 1993), Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) (Hoek vd., 1995) olarak sıralanabilir. Görgül yöntemlerin birçoğu ön kazı ve tahkimat önerisinde bulunmaktadır. Ancak mühendislik kararları verilirken pratik amaçlar için yeterlidir (Franklin ve Desseault, 1991). Gözleme dayanan Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) (Rabcewicz, 1964), özellikle kazı ve çevresinden elde edilen deneyimler ve jeodezik cihazlar kullanarak aletsel izleme çalışmalarını kapsar.

Bu yöntemler mühendislik tasarım yöntemi olmakla birlikte, aslında tasarıma yardımcı olan ve ön tasarım amacıyla kullanılabilecek birer araç olarak değerlendirilir. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin bu çerçevede algılanması ve doğru kullanılması halinde, günümüzde pek çok mühendislik uygulamasında başarı ile kullanılmaktadır (Özkan ve Ünal, 1996).

Takip eden bölümlerde RMR, Q, GSI VE NATM uygulama yöntemleri hakkında genel bilgiler sunulmuştur.

2.3.1. RMR Sınıflama Sistemi

İlk kez Bieniawski (1973) tarafından önerilen bu sistem birkaç kez yeniden düzenlendikten sonra 1989'da yapılan değişiklikle (Bieniawski 1989) son şeklini almıştır. RMR kaya kütle sınıflama sistemi belirlenirken 6 parametreden yararlanılır.

1. Kayacın tek eksenli basınç dayanımı (σ_c)
2. Kayaç kalite göstergesi (RQD)
3. Süreksizlik aralığı (J_s)
4. Süreksizliklerin durumu (J_c)
5. Yeraltı suyu durumu (G_w)
6. Süreksizliklerin konumu (O_I)

Yukarıdaki parametrelerin indeks değerleri belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla RMR değeri hesaplanmıştır.

$$RMR=I_{\sigma c}+I_{RQD}+I_{Js}+I_{Jc}+ I_{Gw} +I_{O\imath} \quad [2.1]$$

Kaya kütlesinin RMR değeri belirlenirken Bieniawski (1989)'daki son versiyon kullanılarak sistemin ilk üç parametresi olan tek eksenli basınç dayanımı indeksi, RQD ve süreksizlik aralığı indeks puanları Bieniawski (1989) tarafından önerilen puan tayin grafiklerinden, dördüncü parametre puanı, süreksizliklerin durumunun puanlandırılması bozunma, pürüzlülük, açıklık, devamlılık ve dolgu için önerilen kılavuzdan, 5. parametre puanı, sınıflama parametreleri ve puanları çizelgesinden yararlanılarak belirlenir. Bu ilk beş parametreden elde edilen puanlar toplanarak temel RMR değeri elde edilir. 6. parametrenin puanı süreksizlik yönelimine göre düzeltme çizelgesi kullanılarak belirlenir ve temel RMR değerinden 0 -12 puan arasında azaltmaya gidilerek nihai RMR elde edilir. Elde edilen RMR değerinden kaya kütlesi 0 – 100 arasındaki bir puan aralığında çok iyi kayadan – çok zayıf kayaya kadar sınıflandırılır. Eğer tünel içersinde patlama etkisi (Ab), zayıflık düzlemleri (Aw) ve gerilme değişimleri (As) varsa Laubscher (1977) ile Kendorski ve arkadaşları (1983)

tarafından belirtilen bu düzeltme faktörlerinin RMR hesaplamasında göz önüne alınması gerekmektedir.

Tahkimat tasarımında kullanılacak RMR değerine bağlı olarak galeri ya da tünel tavanında oluşacak örselenmiş bölge kalınlığı ve tavan basıncı Ünal (1983) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$h_t = [\frac{100-RMR}{100}]B \quad (m) \qquad [2.2]$$

$$P = ht\,\gamma \qquad (kPa) \qquad [2.3]$$

Burada

B galeri genişliği (m)

h_t galeri tavanında oluşan örselenmiş bölge kalınlığı (m)

γ galeri tavanındaki kaya birimine ait doğal yoğunluk (kN/m^3)

Ayrıca Ünal (1983), Ergür (1992) ve Ünal ve Ergür (1993) tarafından kaya saplamalarının tasarımı için yeni yaklaşımlar önermişlerdir.

2.3.2. Q Sınıflama Sistemi

Bu sistem kaya kütle özelliklerinin ve tünel destekleme sisteminin belirlenmesi için Norveç Jeoteknik Enstitüsünde çalışan Barton ve ark., (1974) tarafından önerilmiştir.

Q sistemi, altı parametre yardımıyla aşağıda sunulan eşitlikteki gibi ortaya konmuştur.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) * \left(\frac{J_r}{J_a}\right) * \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \qquad [2.4]$$

Burada Q Kayaç Kalitesi Göstergesi, RQD Değeri, Eklem takım sayısı (Jn), Eklem pürüzlülük sayısı (Jr), Eklem alterasyon sayısı (Ja), Eklem su azaltma faktörü (Jw), Gerilme azalma faktörü (SRF).

Eşitlikte; RQD/Jn kaya kütlesinin genel yapısının blok boyutu Jr/Ja bloklar arası kayma dayanımının ve Jw/SRF ise aktif gerilme değerinin bir göstergesidir.

Kazının mekanik davranışını ve tahkimat gerektirip gerektirmediğini bulabilmek için Barton ve arkadaşları (1974) kazı çapının veya yüksekliğinin kazı

tahkimat oranına (ESR) bölümünü belirten eşdeğer boyut (De) kavramını tanımlamışlardır.

De = (tünel çapı veya yükseklik)/ESR [2.5]

En büyük tahkimatsız açıklık, B_{max}(m):

$$B_{max}=2(ESR)Q^{0.4} \quad [2.6]$$

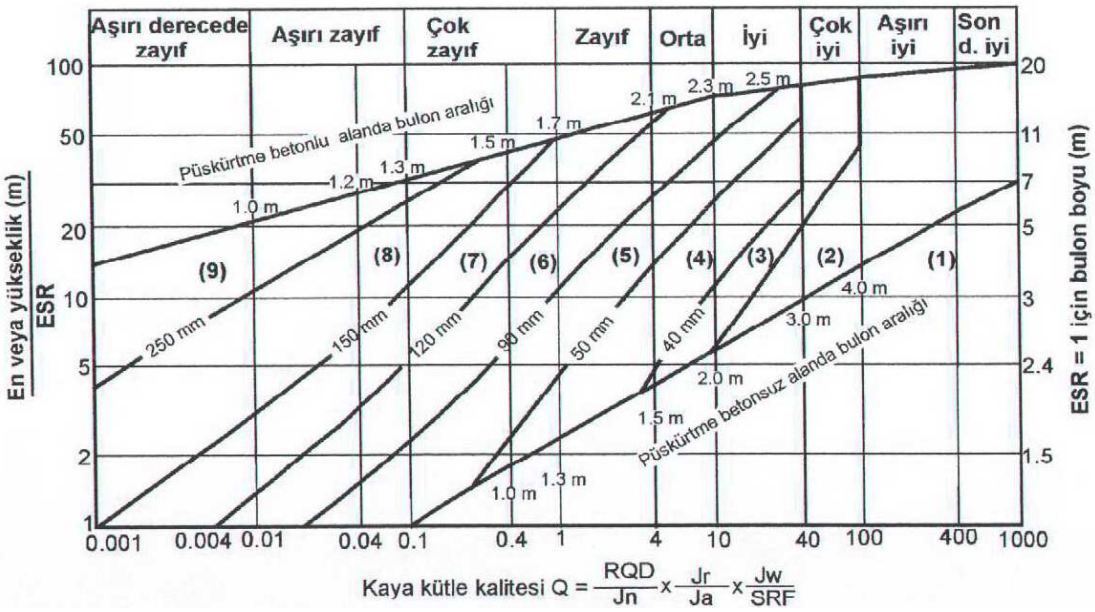
Tünel tavanında oluşan basınç, P_{tavan}(kg/cm^2)

$$P_{tavan}=(2/Jr)Q^{-1/3} \quad [2.7]$$

Eğer eklem takım sistemlerinin sayısı üçten az ise,

$$P_{Tavan} = \frac{2}{3} J_n^{\frac{1}{2}} J_r^{-1} Q^{-\frac{1}{3}} \quad \text{(kg/cm}^2\text{)} \quad [2.8]$$

Barton ve arkadaşları (1974)'e göre Q sisteminde son derece zayıftan-son derece iyiye kadar 9 adet kaya kalitesi ve 38 adet tahkimat sınıfı bulunmaktadır. Daha sonra Grimstad ve Barton (1993) tünelcilikte fiber katkılı püskürtme betonu uygulamalarını göz önünde bulundurmak amacıyla destek sınıfını 9 kategoriye ayırarak Q kaya sınıflama sistemine bağlı tahkimat sınıflaması için yeni bir düzenlemeye gitmişlerdir. Bu düzenleme yardımıyla uygulama mühendisleri, kullanacakları beton kalınlığını ve buna bağlı kaya saplama uzunluğunu ve saplama aralıklarını kolayca belirleyebilmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Q Sınıflama Sistemi (Grimstad ve Barton,1993)

2.3.3. Jeolojik Dayanım İndeks (GSI) Sınıflaması

Jeolojik dayanım indeksi (GSI) Hoek (1995), tarafından farklı jeolojik koşullarda kayaç kütle dayanımındaki değişimleri belirlemek için geliştirilmiş olup ve Hoek-Brown (H-B) kaya kütle yenilme ölçütünde RMR'ın yerine ölçüte dahil edilen bir parametredir. Hoek (1998)'de GSI sistemine foliasyonlu – laminalı – makaslanmış ve sağlam masif grubunu da ekleyerek GSI sınıflama sistemini yeniden düzenlemiştir.

Sadece bir abaktan oluşan GSI sisteminde hatanın azaltılması için Sönmez ve Ulusay (1999), Ulusay ve Sönmez (2002) ölçülebilen veya tanımlanabilen bir puanlama sistemine geçilmesini gerekli görmüşlerdir. Bu araştırmacılar çalışmalarında, "Yapısal Özellik Puanı (SR)" ve "Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR)" olarak tanımlanan iki parametrenin GSI sistemine dahil edilmesini önermişleridir.

Fliş gibi heterojen kaya kütleleri için GSI değerinin belirlenmesi için Marinos ve Hoek (2001) tarafından ayrı bir çizelge önerilmiştir. Buna göre kumtaşlarındaki silttaşı ve şeyl oranına bağlı olarak bir GSI değeri elde edilmektedir.

2.4. Kaya Malzeme ve Kütle Davranışının Belirlenmesi

Kaya malzemesi ve kütlesine ait birçok yenilme ölçütü geliştirilmiştir. Bunlardan en çok dikkate alınanlar aşağıda sunulmuştur.

2.4.1. Kaya Malzemesi Davranışı

2.4.1.1. Coulomb Yenilme Ölçütü

Kaya mekaniğinde kullanılan en yaygın yenilme ölçütü Coulomb (1773) tarafından önerilmiştir. Bu ölçütte bir düzlem boyunca oluşan kesme yenilmesi üzerine dayandırılmıştır. Yenilmeye neden olan kesme gerilmesi IτI; malzeme sabitleri olan kohezyon (c), iç sürtünme açısı (θ) ve düzlem üzerine etkiyen normal gerilmenin (σ_n) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$|\tau| = c + \sigma_n \tan\theta \qquad [2.11]$$

τ nun işareti kaymanın yönüyle ilgilidir. Literatürde, bu ölçüt; Coulomb – Navier (1951) ve Jaeger (1962) yenilme ölçütü daha sonra Franklin (1989) tarafından Mohr – Coulomb yenilme ölçütü gibi farklı adlarla tanımlamışlardır. Fakat birçok araştırmacı, Mohr ve Coulomb kriterlerinin fiziksel dayanaklarının birbirinden farklı olduğunu ileri sürmektedir.

Yenilme düzleminin en büyük asal gerilme (σ_1) ile θ açısı yapması halinde; asal gerilemelere bağlı kırık yüzeyine etkiyen normal ve kesme gerilmeleri (kırılma anında), iki boyutta gerilme analizi için;

$$\tau = {}^1/_2\,(\sigma_1 + \sigma_2) + {}^1/_2\,(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \qquad [2.10]$$

$$\tau = {}^1/_2\,(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta \qquad [2.11]$$

değerlerini almaktadır. Burada σ_n normal gerilme ve τ makaslama dayanımıdır. Ölçüt ayrıca asal gerilmeler arasındaki oranın sabit olduğunu ve $\sigma_1 = f(\sigma_3)$ doğrusunun σ_1 eksenini kestiği noktanın malzemenin tek eksenli basınç dayanımına karşılık geldiğini ifade etmektedir.

2.4.1.2. Mohr Yenilme Ölçütü

Mohr (1990) bir düzlem boyunca kesme yenilmesinin oluşması durumunda, düzlem üzerine etkiyen kesme gerilmesi (τ) ve normal gerilme (σ) nin malzeme karakteristiği ile ilgili bir fonksiyonu tanımlayacağını önermiştir.

$$\tau = f(\sigma) \qquad [2.12]$$

Bu ilişkinin τ, σ düzleminde bir eğri ile temsil edilebileceği, bu eğri ile σ ekseninin sınırladığı bölgede kalan gerilme durumlarında malzemenin kırılmayacağı, eğri üzerindeki her noktanın ise kırılma koşulu (Mohr Zarfı) oluşturacağı önerilmektedir. Ayrıca, üç eksenli gerilme durumunda, en büyük ve en küçük asal gerilmeler arasındaki farkın (deviatör gerilme) kırılmaya neden olacağı, ortanca asal gerilmenin kırılma olayını etkilemeyeceği kabulü söz konusudur.

Coulomb ölçütü doğrusal Mohr Zarfı ile aynı anlama gelmektedir. Ancak yapılan çalışmalar σ_3'ün artmasıyla kırılma koşulunu temsil eden Mohr zarfının σ ekseni yönünde doğrusallıktan saptığını ortaya koymaktadır.

2.4.1.3. Griffith Yenilme Ölçütü

Coulomb ve Mohr kırılma ölçütleri makroskopik ölçekteki kırılma mekanizmalarıyla ilgilidir. Malzemenin içyapısındaki makroskopik yenilmenin nedeni bu ölçütlerle açıklanamamaktadır. Bu ölçütlere göre atomlar arası kuvvetler dikkate alınarak, tek bir kristalden oluşan malzeme için yapılan teorik hesaplar çekme dayanımının, deneylerde elde edilen değerlerden 100 – 1000 kat daha az olduğunu ortaya koymuştur. Böylece kristallerin mikro çatlaklar içerdiği ve bu fissürlerin malzemenin direncini üzerinde etkili olduğu açıkça anlaşılmıştır. Grıffıth (1924) mevcut mikro çatlakların uçlarında yoğunlaşan dolaylı çekme gerilmelerinin söz konusu çatlakların büyüyüp gelişmesine neden olduğunu saptayarak bunun sonucunda yenilme kırığının oluştuğunu belirlenmiştir.

Ölçüt σ_1, σ_3 düzleminde çekme direncine göre ölçeklendirilmiş olup aşağıdaki eşitliklerle tanımlanır.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3), \text{eğer} \quad \sigma_1 + 3\sigma_t > 0 \qquad [2.13]$$

$$\cos 2\theta = {}^1/_2 \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}\right] \qquad [2.14]$$

$$\sigma_1 = -\sigma_t \quad eğer \quad \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0 \qquad [2.15]$$

$$\theta = 0 \qquad [2.16]$$

Böylece ölçüt σ_1, σ_3 düzleminde, $-\sigma_ç < \sigma_1 < 3\sigma_t$ için $\sigma_3 = -\sigma_t$ aralığında doğru bundan sonraki kesim için ise bir parabolle temsil edilir $\sigma_3 = 0$ olması durumunda eşitlik $\sigma_c = 8\sigma_t$ olmaktadır.

Murrel (1963) ise aşağıdaki eşitliği önermektedir;

$$\tau\theta^2 + 4\sigma\tau\theta = 4\sigma_t^2 \qquad [2.17]$$

2.4.2. Kaya Kütle Davranışı

Kaya malzemesi için geliştirilen yenilme ölçütleri yanında kaya kütlesinin yenilemesini açıklayan yenilme ölçütleri geliştirilmiştir. Çizelge 2.1 de tasarım çalışmalarında kullanılan kaya kütle yenilme ölçütleri görülmektedir. Ölçütlerin bazı parametrelerinin RMR ve GSI sınıflama sonuçları ile ilişkili olması dikkat çekmektedir. Bieniawski ilk yaklaşımını 1976 yılında ortaya atmış ancak iki kez düzeltmiştir. Genelleştirilmiş Bieniawski yaklaşımı 1980 yılında önerilmiştir. Hoek – Brown yaklaşımı ilk kez 1980 yılında (Hoek ve Brown, 1980) ortaya atılmıştır. Yaklaşım çok yoğun bir kullanım bulmuş ancak geriye dönük analizler yardımıyla ölçüt iki kez düzenlenmiştir. En son düzenleme 1995 yılında yapılmış olup Genelleştirilmiş Hoek – Brown yaklaşımı olarak tanımlanmıştır. Bu iki yaygın kullanım alanı bulan ölçüt haricinde Ramamurty (1986) ve Carter (1989) yaklaşımı literatürde yer almıştır.

Bu tez çalışmasında yaygın olarak proje çalışmalarında kullanılan Hoek – Brown (Hoek ve Brown, 1980) yaklaşımının kullanımına karar verilmiştir. Hoek – Brown yenilme ölçütü ile ilgili temel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Kaya Kütle yenilme ölçütleri(Özkan ve Özel, 2002)

Yenilme Ölçütünün İsmi	Model No	Önerilen Yenilme Ölçütü Eşitliği	Kaya Kütle Dayanım Sabitleri
Orijinal Bieniawski	1	$\frac{\sigma_1}{\sigma_C} = A\left[\frac{\sigma_3}{\sigma_C}\right]^k + 1$	1. $m_i = 1{,}22A^{1.764}$ (Gerçek ve Müftüoğlu, 1993) 2.Orijinal Bieniawski yenilme ölçütü için A sabiti önerileri (Bieniawski,1974) 3.Kaya birimleri için k=0,75 (Bieniawski,1974)
Düzeltilmiş Bieniawski	2	$\frac{\sigma_1}{\sigma_C} = B\left[\frac{\sigma_3}{\sigma_C}\right]^{0.6} + A$	$A = \exp\left[\frac{1}{12}(RMR - 100)\right]^*$ $B = \exp\left[\frac{1}{52}(RMR + 20)\right]^*$
Genelleştirilmiş Bieniawski	3	$\frac{\sigma_1}{\sigma_C} = 4\left[\frac{\sigma_3}{\sigma_{Cm}}\right]^{0.6} + 1$	$\sigma_{Cm} = \sigma_C \exp\left[\frac{1}{24}(RMR-100)\right]^*$
Orijinal Hoek-Brown	4	$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_C\sigma_3 + s\sigma_C^2)^{\frac{1}{2}}$	$m = m_i \exp\left[\frac{RMR-100}{28}\right]$ $s = \exp\left[\frac{RMR-100}{9}\right]$ $m = m_i \exp\left[\frac{RMR-100}{14}\right]^{**}$ $s = \exp\left[\frac{RMR-100}{6}\right]^{**}$
Düzeltilmiş Hoek-Brown	5	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_C\left[m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_C}\right]^a$	$m_b = m_i \exp\left[\frac{GSI-100}{28}\right]$ (GSI<25 ve GSI>25 için) $s = \exp\left[\frac{GSI-100}{9}\right]$ (GSI>25 için) $s = 0$ (GSI<25 için) $a = 0{,}5$ (GSI>25 için) $a = 0{,}65 - \frac{GSI}{200}$ (GSI<25 için)
Genelleştirilmiş Hoek-Brown	6	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_C\left[m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_C} + s\right]^a$	$m_b = m_i \exp\left[\frac{GSI-100}{28}\right]$ (GSI<25 ve GSI>25 için) $s = \exp\left[\frac{GSI-100}{9}\right]$ (GSI>25 için) $s = 0$ (GSI<25 için) $a = 0{,}5$ (GSI>25 için) $a = 0{,}65 - \frac{GSI}{200}$ (GSI<25 için)
Coulomb	7	$\sigma_{max} = N_\phi\sigma_{min} + \sigma_C$	$N_\phi = (1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$
Ramamurthy	8	$\frac{\sigma_1-\sigma_3}{\sigma_3} = B\left[\frac{\sigma_{Cm}}{\sigma_C}\right]^a$	$\frac{\sigma_C}{\sigma_{Cm}} = \exp\left[\frac{1}{31}(RMR-100)\right]^*$
Carter	9	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{Cm}} = \left[1-\frac{\sigma_3}{\sigma_C}\right]^R$	$\frac{\sigma_{Cm}}{\sigma_C} = \exp\left[\frac{1}{22}(RMR-100)\right]^*$ $R = \exp[-0{,}03-0{,}0025RMR]^*$

2.4.2.1. Hoek–Brown(H-B) Yenilme Ölçütü

1980 yılında önerilen ölçütün özgün şekli;

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} + (m\sigma_c \sigma_{min} + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad [2.18]$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad [2.19]$$

Burada, $\sigma_{max} = \sigma_ı$ = yenilme anında uygulanan en büyük asal etkin gerilme,

$\sigma_{min} = \sigma_3$ = yenilme anında uygulanan küçük asal (efektif) gerilme,

$\sigma_c = \sigma_{Ci}$ = sağlam ve çatlaksız (intact) kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ve m ve s = kayanın türüne, özelliklerine ve asal gerilmeler uygulanmadan önceki çatlaklık derecesine bağlı istatistiksel değiştirgelerdir (Gerçek, 2002b).

Ayrıca, m ve s parametrelerinden; s parametresi, kaya kütlesinin içerdiği bloklar/taneler arasındaki çekme dayanımına ve süreksizlikler tarafından sınırlanan kaya malzemesi parçalarının birbirine kenetlenme derecesine bağlı bir sabittir. Kaya malzemesi (sağlam ve çatlaksız kaya kütlesi) için s = 1 iken, kaya kütlesinin kalitesine göre l'den 0'a doğru azalmaktadır. Kaya malzemesi için (sağlam ve çatlaksız kaya kütlesi) s değeri s olarak yazılır. Kırılmış / yenilmiş kaya kütlesi içinse s_r şeklinde ifade edilir. Tamamen kırılmış kaya içinse s = 0 kabul edilir (Ulusay ve Sönmez, 2002, Gerçek, 2002b).

m parametresi ise kayanın türüne, kayayı oluşturan tanelerin büyüklüğüne, geometrisine ve kenetlenme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Sağlam kaya malzemesi için m değeri m_i olarak yazılır. Eklemli kaya kütleleri için m değeri, m_i şeklinde simgelenir. Kırılmış / yenilmiş kaya kütlesi içinse m_r şeklinde ifade edilir (Ulusay ve Sönmez, 2002. Gerçek, 2002b). Özgün ölçüt [Eşitlik 2.21] kaya malzemesi (sağlam ve çatlaksız kaya kütlesi) için s = 1 olduğu için, aşağıdaki gibi uygulanır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_i \sigma_c \sigma_3 + \sigma_c^2)^{1/2} \quad [2.20]$$

Özgün ölçüte göre; kaya malzemesi için tek eksenli çekme dayanımı (σ_{ti}) aşağıda verilmektedir.

$$\sigma_{ti} = 0.5\ \sigma_{ci}\ (m_i - (\ m_i^2 + 4)^{1/2}) \qquad [2.21]$$

Ayrıca özgün ölçüte göre, kaya kütlesi için tek eksenli çekme dayanımı (σ_{tm}) aşağıda verilmektedir.

$$\sigma_{tm} = 0.5\ \sigma_{ci}\ (m_i - (\ m_i^2 + 4s)^{1/2}) \qquad [2.22]$$

H-B ölçütüne göre, kaya malzemesi için tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ve s değiştirgesi kullanılarak bulunan kaya kütlesi için tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}) Eşitlik 2.22'da sunulmuştur.

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci}\ s^{1/2} \qquad [2.23]$$

Şayet, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ve tek eksenli çekme dayanımı (σ_{ti}) biliniyorsa, "m_i" değiştirgesi Eşitlik 2.24'deki gibi belirlenebilir. ($\sigma_{ti} < 0$ dır).

$$m_i = (\sigma_{ti}/\ \sigma_{ci}) - (\sigma_{ci} / \sigma_{ti}) \qquad [2.24]$$

Doğrudan çekme dayanımı deneyi her zaman yapılamamaktadır. Bu nedenle daha kullanışlı ve yaygın olan dolaylı çekme dayanımı (σ_{ti}) deneyi (Brezilian deneyi) kullanılır. Eğer dolaylı çekme dayanımı σ_{ti} biliniyorsa m değiştirgesi Eşitlik 2.25'deki gibi olur (Gerçek, 2002b).

$$m_i = 16(\sigma_{ti}/\ \sigma_{ci}) - (\sigma_{ci} / \sigma_{ti}) \qquad [2.25]$$

Yukarıda sunulan özgün ölçütte sunulan m ve s parametreleri Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi RMR sınıflama sonucunu dikkate alınmaktadır.

Hoek tarafından düzeltilen ve düzeltilmiş H – B ölçütü olarak tanımlanan ölçüt aşağıda sunulmuştur.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c\ (m_b(\sigma_3/\ \sigma_c))^a \qquad [2.26]$$

Burada m_b ve a kaya kütlesine bağlı parametre olup Hoek (1992) tarafından gerçekleştirilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerine bağlıdır(Çizelge 3). bu

eşitlikte s parametresi kullanılmamıştır. Ancak yapılan geriye dönük analizlerde s parametresine ihtiyaç duyulduğu görülerek H – B ölçütü aşağıdaki gibi genelleştirilmiştir.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m_b(\sigma_3/ \sigma_c+s))^a \quad [2.27]$$

Eşitlik 2.26'da sunulan m_b, s ve a parametreleri Kaya Kütleri İndeksi GSI' ya bağlı dayanım parametreleridir.

GSI sınıflama değerlerinin belirlenmesi için Hoek (1995) tarafından bir abak sunulmuştur. Ancak RMR ile ilişkisi analiz edilmiş ve aşağıdaki durum sunulmuştur.

$$RMR \leq 23 \text{ ise } GSI = RMR - 5 \quad [2.28]$$

$$RMR > 23 \text{ ise } GSI = RMR \quad [2.29]$$

Şevler, temeller ve kazılarının dizaynında kullanılan herhangi bir analiz için kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin güvenilir tahminleri gerekmektedir. Eklemli kaya kütlelerinin dayanımlarının tahminin sağlanması için Hoek ve Brown (1980a, 1980b) tarafından bir yöntem önerilmiştir. Hoek Brown yenilme ölçütü eklemli kaya kütlelerinin deformasyona uğrama özelliklerini ve dayanımlarının tahmininde kullanılır. Bu yöntem yıllar boyu kullanıcıların ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilmiş ve son olarak ölçüte RMR değerinin yerine Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değeri eklenmesiyle GSI değerine göre yeniden düzenlenmiştir (Hoek,(1997). Hoek ve Brown 1997, Hoek ve ark, 1998, Sönmez ve Ulusay 1999, Marinos ve Hoek 2001, Sönmez ve Ulusay 2002, Hoek ve ark, 2002).

GSI değerinin tahmin edilmesinden tünel içerisinde ve şevlerdeki patlatma ve gerilme boşalması etkileri ortaya koymak için Hoek ve arkadaşları (2002) 0 – 1 arasında değişen Bozunma Derecesi Faktörünün (D) formüle etmişlerdir.

Hoek-Brown yenilme ölçütünde kullanılan kaya kütle dayanım özelliklerini belirleyen m_b, s ve a parametreleri Örseleme Derecesi Faktörü de göz önüne alınarak aşağıda sunulmuştur:

$$m_b = m_i \exp\left[\frac{GSI-100}{28-14D}\right] \quad [2.30]$$

GSI > 25 için, kaya kütlesi iyi kalitededir. Orijinal Hoek Brown ölçütüne uygulanmasıyla

$$s = \exp\left[\frac{GSI-100}{9D}\right] \quad [2.31]$$

ve

$$a = 0.5 \quad [2.32]$$

GSI < 25 için kaya kütlesi çok kötü kalitededir. Değiştirilmiş Hoek Brown ölçütüne uygulanması ile

s=0

ve

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right) \quad [2.33]$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan m_b, s ve a kaya kütle sınıflama değerlerine bağlı büyüklüklerdir.

2.4.5. Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM)

1950'lerden sonra, yeraltı kazılarının ve tünel açımının artması güvenli ve ucuz tünel açım yöntemlerinin de ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu yıllarda yapılan hidrolik santrallerin kazıları sırasında aşamalı kazı yönteminin uygulanması Avusturya Metodu olarak adlandırılmıştır. Geniş kesitli olan bu kazılarda ilk olarak inverte yakın bir galeriyle kazıya başlanıp daha sonra yan ve üst galerilerle kazı aşamalı olarak üst yarıya doğru genişletilir. Daha sonra geliştirilen bu yöntemde Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) adını almıştır. Yeni Avusturya yönteminin esas gelişimi 70 ' li yıllarda olmuştur. Rabcewicz (1963) bu yöntemi, ince ve geçici bir destekleme uygulayarak, deformasyonlara izin vermek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak; böylelikle son desteklemeyi (kaplama) daha az yüklemek, daha sonra yapabilmek ve daha ince bir yapı oluşturmak olarak tanımlamıştır.

Bütünüyle tünel açımı sırasında yapılacak gözlem ve deformasyon ölçümlerine dayanan NATM kaya sınıflaması bu anlamda yapım aşamasının sınıflamasıdır. Tasarım

aşamasındaki nitelikleri incelendiğinde, bu kaya sınıflamasının tanımsal olduğu ve bu bağlamda da nicel veri sağlamayacağı görülür. Göreceli olarak üniform jeolojik yapıya sahip bölgelerde kaya kalitesinin sayılarla ifade edildiği ve kaya davranışının formülle tahmin edildiği kaya sınıflama sistemleri geliştirilirken, jeolojik yapının büyük değişkenlikler gösterdiği bölgelerde NATM gibi esnek yapım yöntemleri ve kazı sırasında kaya davranışını esas alan kaya sınıflama sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

2.5. Literatür Özeti

Tünellerde deformasyon ölçümü ve değerlendirilmesi ile yenilme ölçütünün belirlenmesine yönelik bazı kuramsal çalışmalar; Hoek ve Brown (1980 b), Schubert ve Vavrovsky (1994), Schubert ve Budil (1995), Schubert ve Steindorfer (1995), Schubert ve Steindorfer (1996), Özkan ve Ünal (1996), Hoek ve Brown (1997), Schubert ve Steindorfer (1997), Geodata (1997), Sönmez ve Ulusay (1999), Sellner ve Steindorfer (2000), Schubert ve ark. (2002) tarafından yapılmıştır.

Hoek ve Brown (1980), kaya kütleleri için basit dayanım ölçütünün tanımlanmasında üç temel varsayımının dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu varsayımlar; pratikte sayıldığı gibi ana kaya malzemesinin sorumlu olduğu tüm gerilme koşullarının yeterli şekilde tanımlanması, var olan eklem düzlemleri ile birlikte anizotropik dayanım davranışının hesaba katılması veya katılabilir olması, yaklaşık bile olsa çok sayıda süreksizlik içeren kayaç kütlelerinin dayanımı ile ilgili bazı varsayımların yapılması.

Schubert ve Vavrosky (1994), çalışmalarında tüneldeki yerdeğiştirme izlemelerinin yorumlanması ve veri işlemleri veya süreçleri için yapılan işlemleri ortaya koymuşlardır. Tünel performansının belirlenmesinde kullanılan ekstansiyometre yardımıyla yapılan konverjan ölçümler, kaya bulonu ölçümleri gibi klasik yöntemlerden birçoğunun belirgin bir eksikliğinin olduğunu ve okumaların havalandırma, iş makinelerinin çalışması gibi nedenlerden dolayı sağlıklı yapılamadığını belirtmektedir. Ancak NATM' ın tasarımlarında tahkimat tipi, kaya kütlesinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri, tünel davranışı ve deformasyonların izlenmesinin temel alındığı belirtilmiştir.

Schubert ve Budil (1995), 12,8 km uzunluğundaki intal tünelinde yapılan gözlemlerle kazı yönündeki yer değiştirme bileşenlerinin sistematik değerlendirmesini yapmışlardır. Fay zonundaki yer değiştirme değerinin 80 mm, tünel tavanında 170 mm ve tünel yan duvarlarında 100 mm'nin üzerinde olduğunu belirlemişlerdir. Belirli eğilimlerin gözlenebilmesi amacıyla yer değiştirme vektörü ve yerdeğiştirme açısı değerlerini hesaplamışlardır. Açının negatif olduğu durumda kazı yönünde bir yerdeğiştirmenin olduğunu, pozitif olduğu durumda ise kazı yönünün tersi bir yerdeğiştirmenin olduğunu ortaya koymuşlardır.

Schubert ve Steindorfer (1995), özellikle yüksek derecede faylanmış kayaçlarda tünel açıldığında boşluktaki yer değiştirme vektörlerinin yönlenimi kullanılarak sadece birkaç çap ilerideki kaya kütle dayanımındaki değişikliklerin izlenebildiği ve aynı zamanda birincil gerilme yönlenmelerindeki sapmalarında belirlenebileceğini belirtmiştir

Ünal ve Özkan (1996), "Kaya kütle sınıflama sistemleri üzerine kritik bir değerlendirme" isimli çalışmalarında, ilgili kitap ve konferanslarda 24 adet sınıflama sistemini özetlemişler ve her bir sınıflama sisteminin tüm girdi ve tasarım çıktı parametrelerini tartışmışlardır. Ayrıca, bu sınıflama sistemlerinin yeraltı boşlukları etrafındaki, kaya kütle davranışlarının tanımlanmasındaki yaklaşımlarda değerlendirilmiştir.

Hoek ve Brown (1997), eklemli kayaçlar için Hoek – Brown yenilme ölçütünün tanımını yapmışlardır. Hoek – Brown sabitlerini, Jeolojik Dayanım İndeksini (GSI), suyun etkisi, ana kaya özelliklerini, örnek boyutunun etkisi ve Mohr Coulomb parametrelerini ortaya koyan özellikler üzerinde durmuşlardır.

Steindorfer ve Schubert (1997), Galganberg tünelinde, Haberl fay zonunda jeodezik izleme verilerinin değerlendirilmesi ile yer değişim vektör yönlenmelerinin değerli bilgiler sağladığını belirtmişlerdir. Sadece çeşitli çaplardaki kaya kütlesi içindeki değişiklikler değil aynı zamanda ilksel gerilme yönlenmelerindeki saplamaları da incelemişlerdir. Kaya kalitesinin belirlenmesi ve tahkimat tipi için tünel kazısı süresince sistematik bir izlemenin önemini vurgulamışlardır.

Geodata (1997), yer değiştirmelerin ölçümü ve kaydı sırasında kullanılan aletleri, standartları ve bu ölçüm sisteminin avantajları ve dezavantajları hakkında bilgi sunmuştur. Ayrıca, yöntemin uygulandığı ve referans olarak sunulan Türkiye ve dünyaya ait örnekler verilmiştir. Bunlara örnek olarak; dünyada, Zammer tüneli (Avusturya), Garham tüneli (Almanya), Passür tüneli (Avusturya) ve Atina metrosu (Yunanistan) bunlara örnek projelerdir. Türkiye de yeni yeni uygulanmaya başlanan bu sistem Bolu tünelleri, İzmit Balçova tünelleri, İstanbul metrosu ve Ayaş tünellerinde uygulanmıştır.

Yılmazer ve arkadaşları su – süreksizlik – kil (SSK) üçlüsünün mühendislik jeolojisi ve jeoteknik çalışmalarda önemli rol oynadığını bildirmişlerdir. Dipole (ikiz kutup) özelliğine bağlı olarak bir su molekülünün yüksek yer değiştirme kapasiteli kil minerallerinin smektit grubunda aşırı şişmeye neden olduğu ve bunun da ciddi jeoteknik problemlere yok açtığı sonucuna varmışlardır. Güvenilir bir jeoteknik tasarımda, jeoteknik problemleri azaltmak, işi zamanında bitirmek ve çevreye olan olumsuz etkisini en aza indirgemek için jeolojik modellemenin, mühendislik jeolojisi modellemesinin ve jeoteknik modellemenin yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Sönmez ve Ulusay (1999), güncel GSI sisteminin sübjektif değerlendirmeye dayalı olan uygulamasını değiştirerek, sayısal verileri esas alacak şekilde yeniden düzenlenmesine yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Bu amaçla sistemdeki yapısal özellik ve yüzey koşulu tanımlamaları puanlama yöntemine göre yeniden düzenlenmiş güncellenmiştir. Ayrıca, Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünün son versiyonun (Hoek ve ark., 1998) da kaya kütlesi sabitlerinin hesaplamasında örselenmenin dikkate alınmasının gerekliliği geriye dönük analizlerle ortaya koymuşlardır. Bu araştırmanın dikkati çeken diğer bir sonucu da, göreceli olarak düşük miktarda ince tane içeren, köşeli ve yuvarlak parçalardan oluşan pasa malzemelerinin de GSI sisteminde yer alan parçalanmış malzeme grubuna dahil edilebileceği konusudur. Bu tür malzemelerin makaslama dayanımının Hoek – Brown yenilme ölçütüyle tayinin bu çalışmada önerilen değişiklikler dikkate alınarak mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

Sellner ve Steindorfer (2000), çalışmalarında sıkışabilir zeminlerde açılan tünellerde yatay yerdeğiştirme ve oturma değerlerinden yola çıkılarak tünel

duvarlarındaki yer değiştirmelerin tahminine yönelik Geofit adlı analitik bir yöntem önermişlerdir.

Schubert ve arkadaşları (2002), çalışmalarında son yıllarda tünellerde daha fazla ölçüm verisinin elde edilmesi için izleme yöntemlerinin devamlı değişmesi ile zamanında ve yerinde ölçümlerinin yapılabildiği böylece ölçümlerin grafiksel olarak değerlendirilebildiği ve sonuç olarak ile tünel içerisindeki tahkimat tipi ve miktarı hakkında ek bilgiler sağlanabildiği belirtilmiştir.

2.6. PHASE2 Programı

PHASE2, (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) iki boyutta yeraltı açıklıklarının analizi için sınır elemanlar ve sonlu elemanlar çözümleme yöntemlerini esas alan bir paket programdır (Rocscience, 2007). Her modelleme için PHASE2 programında öncelikle tünel geometrisinin oluşturulması gerekmektedir. Bu işlemden sonra dikdörtgen model oluşturulur. Model sınırı ve açıklık geometrilerini içeren sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Modelleme yapılan kesitte farklı tabakaların sınırları birbirinden ayrılır. Bu işlem hem farklı kayaç türleri için hem de tüneli çevreleyen püskürtme betonu, çelik bağ, çelik tel hasır, kaplama betonu için de yapılabilmektedir. Böylece sınırlarla ayrılan farklı özelliklerdeki kayaç çeşitlerinin ve tahkimatın her birinin özelliklerini programa girebilmek mümkün olmaktadır.

PHASE2 programında istenildiği takdirde veri olarak bilgisayara girilen değerler değiştirilebilmekte ve yeni verilere göre kayaç kütlesinin davranışında ne gibi değişikliklerin olacağı, gerilmelerin artıp-azalışı, yerdeğiştirmelerin azalıp-çoğalması kısa zamanda bilgisayara hesaplatılarak sonuçlar ekranda veya yazıcıdan alınabilmektedir. Program temel olarak girilen veriler ve tanımlanan alan için gerilme ve şekil değiştirmeleri (deplasman) hesaplanmaktadır. Programda elasto-plastik davranışa ait üç değişik yenilme modeli mevcuttur. Bunlar, Mohr – Coulomb (M-C), Hoek – Brown (H-B), ve Drucker-Prager (D-P) modelleridir (Rocscience, 2007).

3. ÇALIŞMA SAHASI

3.1. Genel

Polatlı bağlantılı Ankara Konya demiryolu projesi ülkemizde son on yıl içerisinde uygulanan önemli projelerden birisidir. Proje çalışması 2007 yılında başlamış olup halen devam etmektedir. Toplam 212,555 km uzunluğuna sahip güzergah üzerinde Km:175+360–177+390 kilometreler arasında bir tünel açılmıştır. Bu bölümde demiryolu projesiyle ilgili genel bilgiler sunulmuştur.

3.2. Coğrafi Konum

Ankara Konya demiryolu güzergahı üzerinde konumlanan tünel, Konya ilinin Sarayönü ilçesi yakınlarında olup uzunluğu 2030 metredir. Bu tez çalışmasına konu olan tünel, Konya il merkezine yaklaşık 40 km uzaklıktadır (Şekil 3.1). Konya kapalı havzasının kuzey istikametinde konumlanan Bozdağ yaklaşık 1190 m rakım değerinde sahiptir. Demiryolu güzergahı yaklaşık 1070 m rakımda seyrettiği için Bozdağ'ın bir tünel yardımıyla aşılması planlanmıştır. Demiryolu güzergah Şekil 3.1' de bir coğrafik harita üzerinde sunulmuştur.

3.3.Yapısal Jeoloji

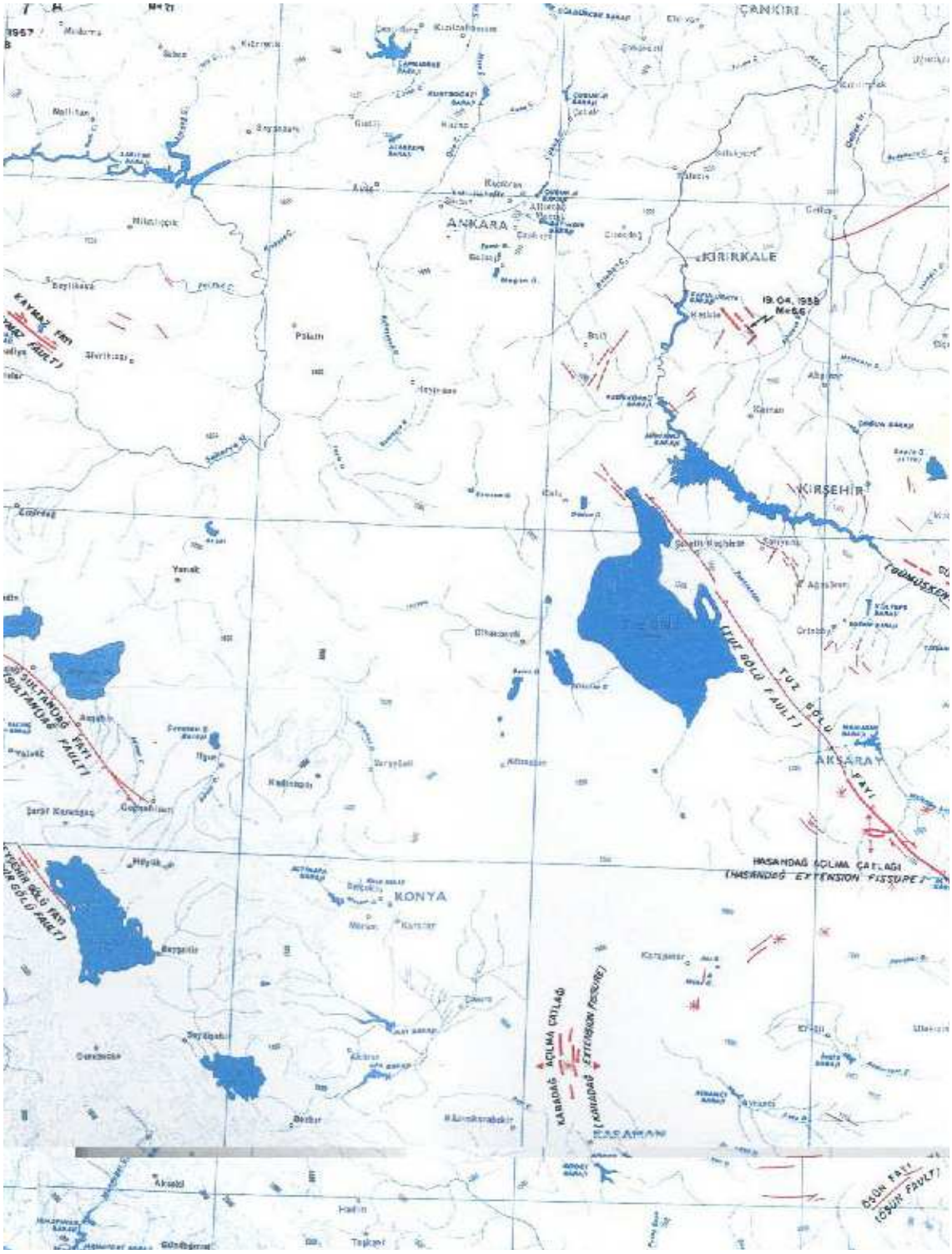
Tünelin konumlandığı Bozdağ inceleme alanında yüzeylenen kayaçlar, tektonik hareketlere bağlı olarak kıvrımlı ve kırıklı bir yapı sergilemektedir. Çalışma alanındaki kayaçlar, Hersiniyen, Alpin ve genç tektonik hareketlerden etkilenmişlerdir. Çalışma alanında, Neojen öncesi çökel birimlerde tabakalanma, ince – orta kalınlıkta, genel tabaka doğrultusu ise KB-GD uzanımlı olup, genel tabakalanma eğimi KD yönlüdür. Neojen yaşlı birimlerden İnsuyu kaya biriminde orta-kalın, Derviş kaya biriminde ise ince-orta tabakalanma egemendir. İnsuyu ve Derviş kaya birimlerinde tabakaların konumları genelde yataydır. İnceleme alanında yer alan ve İnsuyu Fayı olarak daha önce adlandırılan kırık hattı BKB-DGD uzanımlı olup Kırmızıbayırtepe kaya birimi içinde gelişen normal bir fay niteliğindedir.



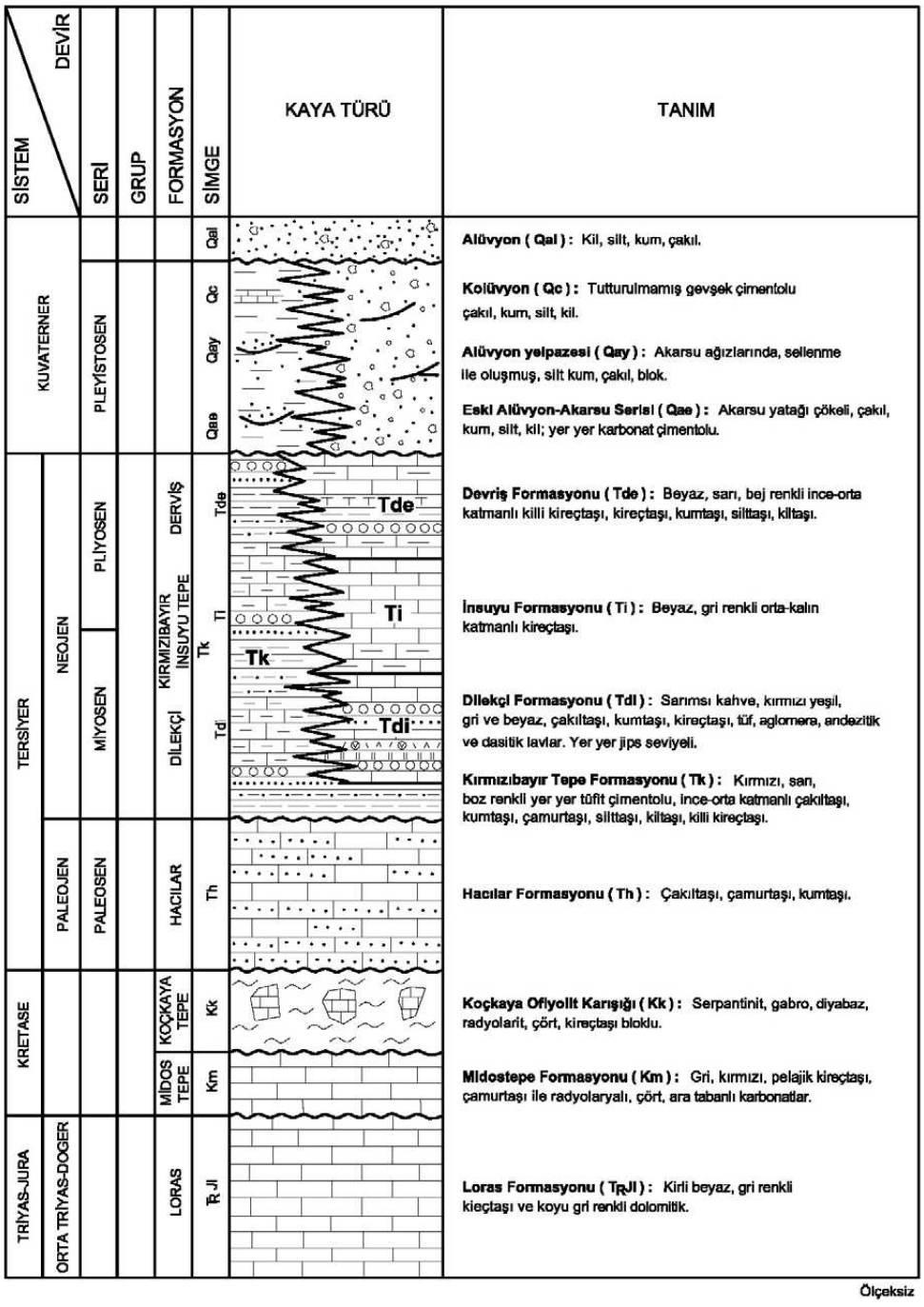
Şekil 3.1. Konya – Ankara hızlı tren güzergahı (www.tcdd.gov.tr, 2010)

İzlenebilen İnsuyu fayı tek bir fay olarak değil, kendisine koşut faylar da oluşturmuştur. Konya civarında gözlenen birimlerde kıvrımlaşmalar, en az iki evrede oluşmuştur. Bu evrelerin ilkinde, kıvrımlar kuzeye eğimli devrik ve izoklinal yapıdadır. Birinci evrede oluşan kıvrımlar ikinci evrede ise, KD ya eğim oluşturacak biçimde yeniden kıvrımlanmışlardır. Loras Kireçtaşı ve Midostepe kaya biriminin karbonatlarında izlenen devrik kıvrımlarda, devrik kanat incelmiş kopmuş ve ufak boyutta bindirmelere yol açmıştır. Sahada gözlenen faylar aktif olmayıp demiryolu güzergâhını sismik yönden etkilemeyecekleri varsayılmaktadır. Proje güzergâhının yakın çevresinde yer alan fayların konumlarını gösterir “D’ri Fay Haritası” Şekil 3.2.’de verilmektedir. Tünel ekseni için geliştirilmiş stratigrafik dikme kesiti ise Şekil 3.3’te sunulmuştur.

,



Şekil 3.2. Bölgenin Yapısal Jeolojisi (www.tcdd.gov.tr, 2010)



Şekil 3.3. Tünel güzergahı içim genelleştirilmiş Stratigrafik Dikme Kesiti (Yüksel Proje, 2008)

Tünel eksenini dik kesen beş adet karotlu sondaj açılmıştır. Sondaj karotları jeolojik ve jeoteknik incelemelerde kullanılmıştır. Tünelin Konya girişi Km:177+390, tünel çıkışı (Afyon yönü) Km:175+360 olarak tanımlanmıştır. Bu metrajlar arasında kalan bölgelerdeki jeolojik yapı aşağıda özetlenmiştir.

Mevcut demiryolu tüneline paralel olarak açılacak tünelin zemini Kırmızıbayır Tepe kaya birimi (Tk) ve Midostepe kaya biriminden (Km) oluşmaktadır. Öngörülen tünelin 175+360 olan tünel girişinden 175+580'de tavana doğru üst kesimde yer alan Kırmızıbayır Tepe kaya birimini (Tk) kırmızı, sarı, boz renkli çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması söz konusudur.

Tünelin Km:175+360 – 175+580 aralığında Kırmızıbayır Tepe kaya birimini (Tk) altında ve sonrasında beklenen Midostepe kaya birimini (Km); gri, kırmızı pelajik kireçtaşı, çamur taşı ile radyolaryalı, çört ara bantlı karbonatlardan oluşmaktadır. Üste doğru çört oranı artmakta olup Çört düzeyleri arasında gri renkli, kaba taneli karbonatlar gözlenmektedir. Orta kesimlerinde pembe-kırmızı renkli pelajik kireçtaşı-çört ardalanmasından oluşan birim, yeşil renkli şeyl ara düzeyleri de içerir.

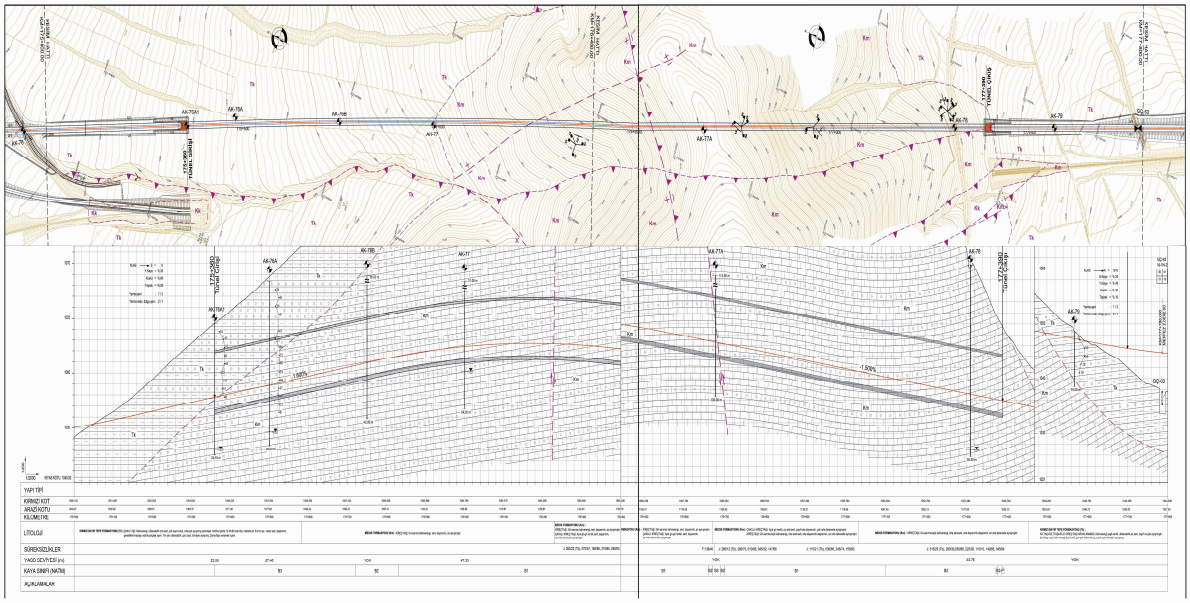
3.4.Tünel Açma Çalışmaları

Proje takvimine uymak amacıyla tünel Konya ve Afyon girişi olmak üzere iki ayrı noktadan açılmaya 2008 yılında başlanmıştır. Sahada yapılan jeoteknik incelemelere bağlı olarak tepe – çekirdek yöntemi yardımıyla açılmıştır. Tünel açıklığı 13 m olup yüksekliği yine 13 metredir. Kazı çalışmalarında klasik yöntem delme-patlatma kullanılmıştır. Delme – patlatma çalışmaları tünelin tepe kısmında kullanılmış olup arında silindir orta çekme uygulanmıştır. Tepe kısmında delme – patlatma yöntemi ile yapılan ilerleme sonrasında çekirdek kısmı kazı makineleri yardımıyla kazılmıştır. Tünel en kesiti ve boy kesiti şekil 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.

Tünel tahkimat tasarımı için sahada yapılan çalışmalar takip eden IV bölümde ayrıntıları ile sunulmuştur.



Şekil 3.4. Tünelin kesitlerine dair resimler



Şekil 3.5. Tünelin Jeolojik Jeoteknik Plan Profil Kesiti

4. SAHADA GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

4.1. Genel

Tünel çalışması yapılan güzergâhta açılan beş sondaj yardımıyla altı eşit aralıkta kaya kütle sınıflama değerleri belirlenmiştir. Ulaşılan veritabanı kullanılarak tünel için tahkimat tasarımı yapılmıştır. Sahada yapılan tüm çalışmalar TCDD adına Yüksel Proje tarafından yapılmıştır. Sahada gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

4.2. Sondaj Çalışmaları

Tünel ekseni boyunca belirlenen beş noktada karotlu sondaj yapılmıştır Çizelge 4.1'de sondaj isimleri ve derinlikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tünel boyunca açılan sondajlara ait genel bilgiler

Sondaj Adı	Sondaj Üst Kodu	Sondaj Alt Kodu	Sondaj Derinliği (m)	Tünelin Alt Kodu(m)	Sondaj Yeri (m)	Sondajlar arası mesafe (m)
Tünel Girişi	-	-	-	-	175+360*	
AK-76A	1076.75	1046.72	30.0	1057.84	175+500	140
AK-76B	1093.72	1051.72	42.0	1062.609	175+750	250
AK–77	1107.70	1053.50	54.2	1064.789	176+000	250
AK-77A	1185.74	1050.74	135.0	1060.284	176+677	677
AK–78	1074.77	1039.77	35.0	1051.284	177+310	633
Tünel Çıkışı	-	-	-	-	177+390*	80

*Tünel giriş ve çıkış konumları

Tünelin Konya girişi 175+360 ve tünel çıkışı (Afyon girişi) 177+390 olduğu dikkate alınırsa Konya girişinden 140., 390., 640., 1317. ve 1950. metresine tekabül eden noktalarda karotlu sondaj çalışmaları yapılmıştır. 2030 metre uzunluğundaki tünel eksenindeki ilk iki sondajın (AK – 76A ve AK – 76B) ve son iki sondajın (AK – 77A ve AK – 78) tünel girişi ve çıkışlarına yakın açıldığı AK -77'nin ise tünelin orta bölgesinde açıldığı görülmektedir (Çizelge 4.1)

4.3. Kaya Kütle Sınıflama Çalışmaları

Yüksel Proje mühendisleri sahada gerçekleştirilen beş sondaj karotunu kullanılarak Bieniawski (1989) tarafından önerilen RMR ve Barton ve ark (1974) tarafından önerilen Q sistemi sınıflama değerlerinin belirlemişlerdir. Daha sonra her iki sınıflama sonucu dikkate alınarak Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) tarafından önerilen sınıflama tanımlamaları yapılmıştır. Konu üzerinde gerçekleştirilen çalışmalara ait sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

4.3.1. RMR Kaya Kütle Sınıflama Çalışmaları

Tünel ekseni boyunca belirli mesafelerde karotlu sondaj çalışmaları proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Karotların jeoteknik incelemeleri tünel projesini hazırlayan Yüksel Proje tarafından yapılmıştır. Her bir sondajın tünel ekseni boyunca etki mesafesi belirlenmiş ve tüm incelemelerin neticesinde tünel ekseni boyunca ortalama RMR değerleri hesaplanmıştır. Tünel ekseni boyunca karşılaşılacak genel kaya birimleri ve bunlara ait düzeltilmiş RMR indeks değerleri topluca Çizelge 4.2 de sunulmuştur.

Çizelge 4.2'de sunulan RMR sınıflama değerlerinden tünelin Konya girişinde ve tünelin orta bölgesinde kaya kütlesinin zayıf diğer bölgelerde ise kaya sınıfının orta kaya sınıfında olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.2. RMR Sınıflama Sistemi için parametrik ve düzeltilmiş genel RMR indeks değerleri

Tünel Ekseninde Aralık (m)	Mesafe (m)	Litoloji	∇_c (Mpa)	$I_{\nabla c}$	RQD (%)	I_{RQD}	Eklem Sıklığı (mm)	I_{JS}	Eklem Durumu	I_{JC}	Yer altı Suyu (lt/m)	I_{GW}	Temel RMR	Süreksizlik Konumu	I_{QI}	RMR	Kaya Sınıfı
175+360 175+720	360	Çakıltaşı, Çakıllı Kireçtaşı	5-25	2	34	8	60-200	8	Bozunma 5 Pürüzlülük 5 Devamlılık 2 Açıklık 1 Dolgu 1	14	ISLAK	7	39	45°-90°	-5	34	Zayıf
175+720 176+000	280	Kireçtaşı	50-100	7	98	20	200-600	10	Bozunma 6 Pürüzlülük 5 Devamlılık 2 Açıklık 4 Dolgu 1	18	ISLAK	7	62	45°-90°	-5	57	Orta
176+000 176+670	670	Çakıllı Kireçtaşı, Kireçtaşı	50-100	7	98	20	200-600	10	Bozunma 6 Pürüzlülük 5 Devamlılık 4 Açıklık 4 Dolgu 4	23	NEMLİ	10	70	20°-45°	-10	60	Orta
176+670 176+690	20	Breşik Kireçtaşı	5-25	2	74	13	60-200	8	Bozunma 5 Pürüzlülük 2 Devamlılık 5 Açıklık 4 Dolgu 0	16	ORTA MİKTARDA SU BASINCI	4	43	20°-45°	-10	33	Zayıf
176+690 177+100	410	Çakıllı Kireçtaşı, Kireçtaşı	50-100	7	98	20	200-600	10	Bozunma 6 Pürüzlülük 5 Devamlılık 2 Açıklık 4 Dolgu 6	23	NEMLİ	10	70	20°-45°	-10	60	Orta
177+100 177+390	290	Kireçtaşı	25-50	4	74	13	60-200	8	Bozunma 5 Pürüzlülük 5 Devamlılık 4 Açıklık 3 Dolgu 2	19	ISLAK	7	51	45°-90°	-5	46	Orta

Çizelge 4.3. Bieniawski Kaya Sınıflamasına göre kaya tünellerindeki kazı şekilleri ve tahkimat sistemleri

Kaya kütlesinin tanımı, sınıfı ve RMR	Kazı şekli	TAHKİMAT		
		Kaya cıvataları (20mm çaplı tamamen betonlanmış)	Püskürtme beton	Çelik bağ
Orta derecede sağlam kaya III RMR: 41-60	iki basamak halinde ilerleme. Üst basamakta 1.5-3 m ilerleme her patlatmadan sonra tahkimata başla. Tahkimatı aynadan 10 m içinde tamamla	Sistematik kaya cıvatası, 4 m uzunlukta, tavan ve yan duvarda 1.5-2 m aralıklı, tavanda çelik hasır	Tavanda 50-100 mm, yan duvarlarda 30 mm, kalınlıkta	Gerekmez
Orta derecede sağlam kaya IV RMR: 21-40	İki basamak halinde ilerleme. Üst basamakta 1-1.5 m ilerleme tahkimatı olabildiğince kazı ile birlikte yürüt. Tahkimatı aynadan 10 m içinde tamamla	Sistematik kaya cıvatası, 4-5 m uzunlukta, tavan ve yan duvarda 1.5 m aralıklı, tavanda çelik hasır	Tavanda 100-150 mm, yan duvarlarda 100 mm, kalınlıkta	Gerektiğinde 1.5 m aralıklı hafif bağ

4.3.2. Q Kaya Kütle Sınıflama Çalışmaları

RMR sınıflama çalışmalarında değinildiği gibi beş adet karotlu sondajın temsil bölgeleri belirlenerek her bir bölge için genel Q sınıflama parametrelerine ait indeks değerleri ve genel Q sınıflama değerleri belirlenmiştir. Yüksel Proje mühendisleri tarafından hazırlanan sınıflama değerleri Çizelge 4.4'de sunulmuştur. Çizelge 4.4'de sunulan verilerde tünel giriş ve çıkışını temsil eden Km:175+360 – 175+720 ve Km:177+100 – 177+390 bölgelerinde süreksizlik takım sayısı (Jn) hesaplamalarda Barton ve ark. (1973) tarafından önerildiği gibi 2 ile çarpılmıştır.

Çizelge 4.4. Q Sınıflama Sistemi için Parametrik ve Nihai Q Sınıflama Değerleriyle Kaya Sınıfları

Tünel Ekseninde aralık (cm)	Mesafe (m)	Litoloji	RQD	J_n		J_r		J_a		J_w		SRF		Q	Kaya Sınıfı
175+360 175+720	360	Çakıltaşı, Çakıllı Kireçtaşı	34	Üç Eklem Takımı	2x9=18	Pürüzlü, Düzensiz ve Dalgalı	3	10 cm.den az bir makaslama hareketi ile eklem yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde; Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya v.s.	4	Kuru kazılar ya da yer yer az su akışı < 5 lt/m	1	Kendi kendini tutabilen kaya, kaya gerilmesi; Yüzeye yakın, düşük gerilme.	2.5	0.567	Çok Zayıf
175+720 176+000	280	Kireçtaşı	98	Üç Eklem Takımı	9	Pürüzlü ya da Düzensiz Düzlemsel	3	10 cm.den az bir makaslama hareketi ile eklem yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde; Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya v.s.	4	Kuru kazılar ya da yer yer az su akışı < 5 lt/m	1	Kendi kendini tutabilen kaya, kaya gerilmesi; Yüzeye yakın, düşük gerilme.	2.5	3.267	Zayıf
176+000 176+670	670	Çakıllı Kireçtaşı, Kireçtaşı	98	Üç Eklem Takımı	9	Pürüzlü, Düzensiz ve Dalgalı	3	10 cm.den az bir makaslama hareketi ile eklem yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde; Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya v.s.	4	Kuru kazılar ya da yer yer az su akışı < 5 lt/m	1	Kendi kendini tutabilen kaya, kaya gerilmesi; Yüzeye yakın, düşük gerilme.	1	8.167	Orta
176+670 176+690	20	Breşik Kireçtaşı	74	Üç Eklem Takımı + Düzensiz Eklemler	12	Cilalı Dalgalı	1.5	10 cm.den az bir makaslama hareketi ile eklem yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde; Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya v.s.	4	Kuru kazılar ya da yer yer az su akışı < 5 lt/m	0.66	Kendi kendini tutabilen kaya, kaya gerilmesi; Yüzeye yakın, düşük gerilme.	2.5	0.611	Çok Zayıf
176+690 177+100	410	Çakıllı Kireçtaşı, Kireçtaşı	98	Üç Eklem Takımı	9	Pürüzlü, Düzensiz ve Dalgalı	3	10 cm.den az bir makaslama hareketi ile eklem yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde; Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya v.s.	4	Kuru kazılar ya da yer yer az su akışı < 5 lt/m	1	Kendi kendini tutabilen kaya, kaya gerilmesi; Yüzeye yakın, düşük gerilme.	1	8.167	Orta
177+100 177+390	290	Kireçtaşı	74	Üç Eklem Takımı	2x9=18	Pürüzlü, Düzensiz ve Dalgalı	3	10 cm.den az bir makaslama hareketi ile eklem yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde; Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya v.s.	4	Kuru kazılar ya da yer yer az su akışı < 5 lt/m	1	Kendi kendini tutabilen kaya, kaya gerilmesi; Yüzeye yakın, düşük gerilme.	2.5	1.233	Zayıf

Çizelge 4.4'deki Q sınıflama sonuçları incelendiğinde tünelin Km:175+360 – 175+720 ve Km:176+670 – 176+690 metreler arasında kaya tanımının çok zayıf, Km:175+720 – 176+000 ve Km:177+100 – 177+390 metreler arasında zayıf, diğer bölgelerde ise kaya sınıfının orta olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.5. Q sistemine göre tahkimat önerisi

Tünel ekseninde aralık (m)	Q	Kaya Sınıfı	B	ESR	Püskürtme Beton Kalınlığı d_s (mm)	Kaya Saplama Aralığı S (m)	Kaya Saplama Boyu L (m)
175+360 175+720	0.567	Çok zayıf	13	1	100	1.6	4.25
175+720 176+000	3.267	Zayıf	13	1	150	2	4.25
176+000 176+670	8.167	Orta	13	1	200	2.25	4.25
176+670 176+690	0.611	Çok Zayıf	13	1	100	1.65	4.25
176+690 177+100	8.167	Orta	13	1	200	2.25	4.25
177+100 177+390	1.233	Zayıf	13	1	150	1.8	4.25

4.3.3. Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) sınıflama çalışmaları

Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) tünel açma çalışmalarında bütünleyici bir yaklaşım olurken tünel açmada yapılması gereken işlemleri sıralayan bir kılavuz önermektedir. Yaklaşım ÖNORM – 2203 dikkate alınarak kaya sınıflarını RMR ve Q sınıflama değerlerine göre belirleyebilmektedir. İlgili olarak II. Bölümde sunulmuştur.

Tünellerin gerek projelendirilmesinde gerekse yapımında Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) prensipleri esas alınmaktadır. Uygulanması önerilen NATM kaya sınıflandırma sistemi, kaya kütlesini

A (Sağlam – hafif aşırı sökülen)

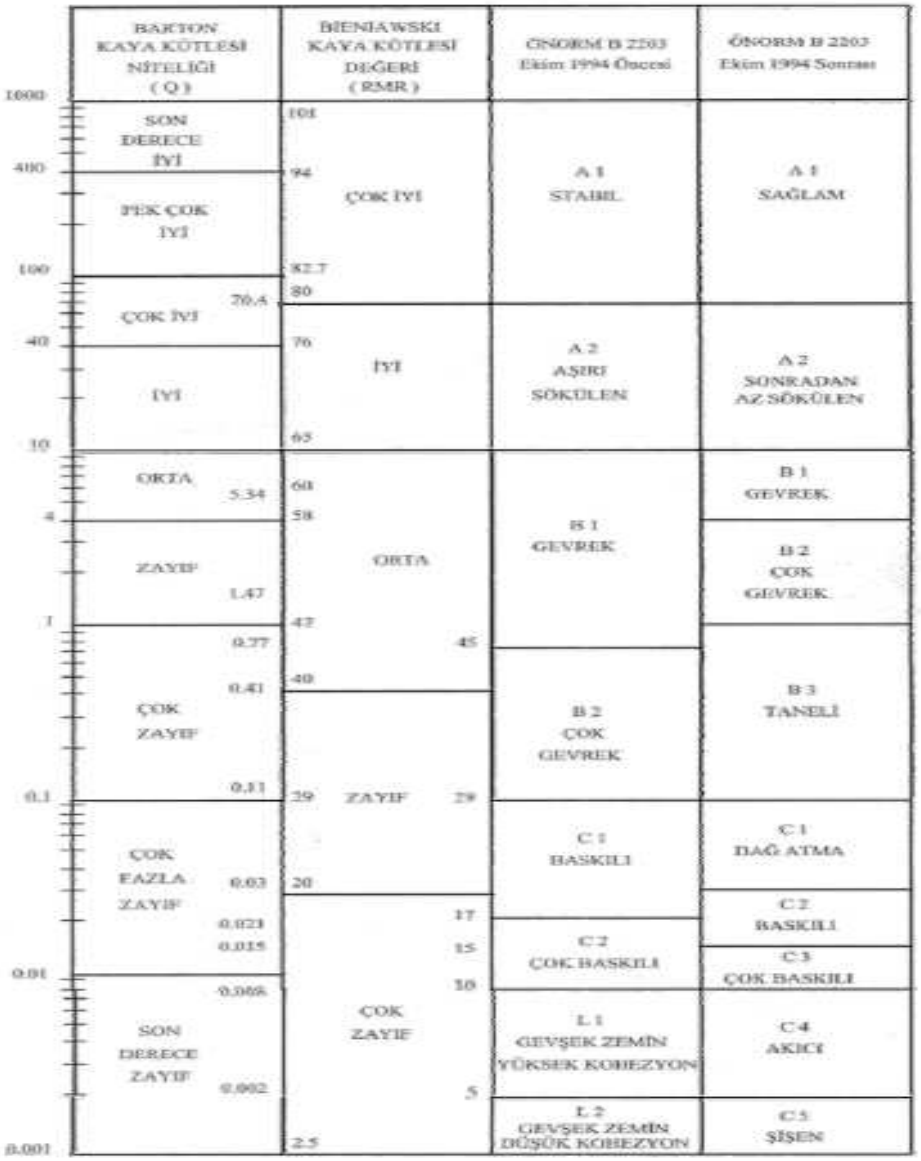
B (Gevrek)

C (Baskılı)

olmak üzere 3 ana sınıf ve bunların alt gruplarında oluşmaktadır.

Bu sınıflama ile ilgili detay bilgiler Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan NATM uygulamalı yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi'nde verilmektedir. Bu yöntemde kaya sınıflarının belirlenmesi sayısal bir veriye dayanmaz. Buna karşılık tünel zemininin jeolojik – jeoteknik özellikleri, tünel kesiti, örtü yükü ve kaya ortamının zamana bağlı davranışını esas alınarak kaya kütleleri sınıflandırılmaktadır. Bu yöntemde belirlenen kaya sınıflarının diğer sınıflama sistemlerinde genel olarak hangi aralığa karşılık geldiği Çizelge 4.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.6. Karayolları Türkiye Teknik Şartnamesi, Kaya sınıflama sistemlerinin karşılaştırılması



“A” olarak gösterilen kaya kütleleri genellikle sağlam olup elastik davranış sergiler. Kaya kütlesine etkiyen basınçlar büyük göçüklere yol açmaz. Süreksizliklerin konumuna bağlı olarak yersel duraylılık sorunu beklenebilir. A sınıfı kendi içerisinde 2 alt sınıfa ayrılır (Çizelge 4.6).

“B” olarak tanımlanan kaya kütlelerinin davranışı yapısal zayıflık ve / veya çekme mukavemeti azlığının neden olduğu hızlı gevşeme ve ayrışmaya karşı duyarlıdır. B sınıfı kendi içerisinde 3 alt sınıfa ayrılır (Çizelge 4.6).

“C” kaya kütlelerinin davranışı genellikle kaya basıncının yeniden dağılımı süreci ve / veya deplasman sınırlamaları sonunda oluşan gerilmelerin kaya mukavemetinden daha büyük olduğunu göstermektedir. Kaya kütlelerinin aşırı gerilmelere uğraması halinde kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zayıflık mekanizmaları oluşur. C sınıfı kendi içerisinde 5 alt sınıfa ayrılır (Çizelge 4.6).

Tünel güzergahı boyunca yapılan sondaj çalışmaları yardımıyla belirlenen RMR ve Q sınıflama sonuçlarının dikkate alınarak çizelge 4.5 yardımıyla belirlenen NATM sonuçları aşağıdaki çizelgede sunulmuştur (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.2 ve 4.4’de sunulan RMR ve Q sınıflama sonuçlarında tünel ekseni 6 aralıkta değerlendirilirken çizelge 4.7’de 9 aralıkta tünel değerlendirilmiştir. Çizelge 4.7’den görüldüğü üzere ayrıca üç aralıkta 10’ar metrelik geçiş bölgesi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.7’de tünelin Afyon girişinde tünel giriş portalının zayıf kaya kütlesine sahip olmasından dolayı yoğun tahkimat (B2–P) önerilmiştir. NATM yaklaşımı tarafından her bir aralık için önerilen tahkimat önerileri aşağıda sırasıyla sunulmuştur. Projede bu tahkimat önerilerine göre tahkimatlar yapılmıştır.

Çizelge 4.7. NATM göre kaya sınıfları ve tahkimat öneri sınıfları

Tünel Eksen Aralığı (m)	Mesafe (m)	LİTOLOJİ	KAYA SINIFI (ÖNORM–2203)	KAZI TAHKİMAT SINIFI
175+360 175+720	360	Çakıltaşı	B3	B3
175+720 176+000	280	Kireçtaşı	B2	B2
176+000 176+660	660	ÇakıllıKireçtaşı, Kireçtaşı	B1	B1
176+660 176+670	10	Çakıllı Kireçtaşı	B1	B2
176+670 167+690	20	Çakıllı Kireçtaşı	B3	B3
176+690 176+700	10	Çakıllı Kireçtaşı	B1	B2
176+700 177+100	400	ÇakıllıKireçtaşı, Kireçtaşı	B1	B1
177+100 177+380	280	Kireçtaşı	B2	B2
177+380 177+390	10	Kireçtaşı	B2	B2-P

4.3.3.1. B1 Tahkimat Türü

Tünelin Km: 176+000–176+660 ve Km: 176+000–177+100 aralıkları için önerilen “B1” tahkimat sisteminde aşağıdaki tahkimat elemanları kullanılmıştır.

- Püskürtme beton (ds=100 mm)
- Hasır çelik (1 kat)
- Çelik bağ (M/M 1.00–1.5 metre)
- Sistematik kaya saplaması (L=4.00 metre uzunluğunda, 2.00x2.50 metre aralıklı SN – kaya saplaması)
- Alt yarıda gerektiğinde SN – kaya saplaması

4.3.3.2. B2 Tahkimat Türü

Tünel güzergahının Km:175+720–176+000, Km:176+660–176+670, 176+690–176+700 ve Km:177+100–177+390 aralıkları için önerilen "B2" tahkimat türü, aşağıdaki elemanlardan kuruludur. 10 metre boyunca B2 tahkimat tipi uygulamaları, B3 ve B1 kaya sınıfları arasında tedrici geçişi sağlamak amacıyla uygulanması önerilmiştir.

- Püskürtme beton (ds=150 mm)
- Hasır çelik (2 kat)
- Sistematik kaya saplaması (L=4.0 metre uzunluğunda, 2.00 x 2.00 metre aralıklı SN – kaya saplaması)

"Çok gevrek" olarak tanımlanan bu kaya kütlesinde desteklemenin zamanında yapılması halinde deformasyonlar hızla azalır. Destek uygulamasının zamanında yapılmaması ya da yetersiz olması ise derinlere ulaşan gevşemeler ve buna bağlı kopmalara yol açar duraylılığın sağlanmasına yönelik olarak tünel tavanı, yan duvarlar ve aynada yukarıda özetlenen tahkimatın uygulanması önerilmektedir.

Tünelin Afyon girişindeki kazı nedeniyle zeminde gevşemeler olasıdır. Bu nedenle, çıkış portalında tünelin Km:177+380–177+390 aralığında kalan son 10 metresi için B2 – P tahkimat sistemi uygulanmalıdır. Bu tahkimat sistemi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır.

- Püskürtme beton (ds=200 mm)
- Hasır çelik (2 kat)
- Çelik bağ (M/M 1.00–1.5 metre)
- Sistematik kaya saplaması (L=4.00 metre uzunluğunda, 1.00x1.50 metre aralıklı SN-kaya saplaması
- Enjeksiyonlu süren (ilk 5.00 metrede, L=4.00 metre, 0.40 – 0.5 metre aralıklı her çelik bağda bir)

4.3.3.3. B3 Tahkimat Türü

Güzergâhta tasarlanan tünelin Km:175 + 360 – 176 + 720 ve Km:176 + 670 – 176 + 690 aralıları için önerilen “B3” tahkimat türü aşağıdaki elemanlardan kuruludur.

- Püskürtme beton (ds=200 mm)
- Hasır çelik (2 kat)
- Çelik bağ (M/M 1.00 metre)
- Sistematik kaya saplaması (L=4.00 metre uzunluğunda, 1.5 * 1.00 metre aralıklı SN – kaya saplaması)
- Enjeksiyonlu süren (L=4.00 metre, her çelik bağda)

Bu kaya sınıfında yapılan kazılarda kaya kütlesinde dökülmeler meydana gelebilir. Kohezyonun düşük, tünel kayasının parçalı ve zayıf olması duraylılık sorunları yaratabilir ve buna bağlı olarak deformasyonlar 10 cm’ ye kadar çıkabilir.

4.4. Tünel Kazı Çalışmaları

Gerek Q ve RMR değerleri, gerekse bu değerlere karşı gelen NATM kaya sınıflaması dikkate alınarak kazının üstyarı / altyarı şeklinde aşamalı olarak yapılması duraylılık yönünden uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Delme – patlatma yöntemi veya mekanik kazı ile açılacak tünellerde ilerleme (round) uzunluğu tünel tavanının tahkimatsız durma süresi, tahkimatsız açıklık ve destekleme elemanı yerleştirme süresine bağlıdır. Bu bağlamda tüneli temsil eden kaya sınıfları için önerilen ilerleme uzunluğu (üstyarı/altyarı) aşağıdaki değerlerle sınırlandırılmıştır. Ancak tünel girişlerinin ilk birkaç metresinde ve fay zonlarında bu uzunluklar 1.00 metreden fazla olmaması önerilmektedir.

B1 : 2.0 – 3.0 metre / 4.0 metre

B2 : 2.0 – 2.5 metre / 3.5 metre

B3 : 1.5 – 2.0 metre / 3.0 metre

Tünel yapımında tahkimat kurulmuş üst yarı kazısı ile altyarı aynası arasındaki mesafe mümkün olduğu ölçüde kısa tutulmuş. B1 için 50–100 metre, B2 için 30–40 metre ve

B3 için 10–15 metre arasında değişen bu mesafe jeolojik koşullar göz önüne alınarak değiştirilmiştir.

Ayrıca jeolojik veriler ve kayaçların niteliği çok uygun gözükse bile, tünel yapımı sırasında kazı ve tünel emniyeti için deformasyon ölçümlerinin yapılması anlamlı olacaktır. Tünel kazısı sırasında jeolojik koşulların gerektirmesi halinde ayna arkasındaki zemin ve su durumu araştırmak amacıyla yatay sondaj yapılmalıdır.

5. TASARIM GİRDİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

5.1. Genel

Bu yüksek lisans tez çalışmasında tahkimat tasarımının sayısal çözümleme yaklaşımının doğrultusunda PHASE2 programı yardımıyla yapılmasına karar verilmiştir. Bu amaç doğrultusunda tasarım çalışmalarında kullanılacak girdi parametrelerinin bulunması aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

5.2. Kaya Kütlesi Verilerinin Tespiti

Kaya kütle sınıflama sonuçlarına dayalı yenilme ölçütlerinden Hoek-Brown (H-B) yenilme ölçütü tasarım mühendisleri tarafından sıkça kullanılmaktadır. Ölçüt geriye dönük analizler ile temel olarak iki kez yeniden düzenlenmiştir. Sayısal çözümleme çalışmalarında ölçütün son hali olan genelleştirilmiş durumu kullanılmaktadır. Ölçüt en büyük asal gerilme (σ_1) değerini, en küçük asal gerilme (σ_3), tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değeri ile birlikte kaya kütle özelliklerini yansıtan m_b, s ve a parametrelerini kullanarak belirleyebilmektedir. Ölçüt II. Bölümde sunulmuştur. Sayısal çözümleme çalışmalarında kullanılacak H-B ölçütüne bağlı yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Hoek-Brown (H–B) ölçütünde kullanılan m_b, s ve a tasarım verilerinin belirlenmesi bu tez çalışmasının önemli bir kısmını oluşturmuştur. Ölçütte kullanılan m_b , s ve a kaya kütlesine bağlı parametreler GSI (Geological Strength Indeks) yardımıyla belirlenmiştir. Ölçütün ilk halinde aslında Bieniawski (1973,1989) tarafından önerilen RMR kullanılmıştır. Ancak Hoek (1995) daha sonra H-B ölçütü için GSI sınıflama sistemini önermiş ve H-B eşitliğinde kullanmıştır (Hoek ve Brown, 1997). Burada RMR > 23 olduğu durum için GSI = RMR–5 kabul edilmiştir. Bölüm IV'te sunulan temel RMR sınıflama değerleri dikkate alınarak (Çizelge 4.2) aşağıdaki Çizelge 5.1. hazırlanmıştır. m_b ve s örselenmemiş kaya kütlesini yansıtmaktadır. Hesaplamalardan m_i değeri Hoek (1995) tarafından önerilen çizelgeden belirlenmiştir (Çizelge 5.2). Tünel ekseni boyunca karşılaşılan kireçtaşı kaya birimi için m_i=8 seçilmiştir.

Çizelge 5.1. Tünel tahkimat tasarımı için genelleştirilmiş H – B ölçütüne bağlı belirlenen kaya sabitleri

Tünel Mesafesi	GSI=RMR	m_i	m_b	s	a
175+360 175+720	34	8	0.7575	0.0006534	0.5
175+720 176+000	57	8	1.722	0.008414	0.5
176+000 176+670	65	8	2.292	0.0205	0.5
176+670 176+690	38	8	0.8738	0.001019	0.5
176+690 177+100	65	8	2.292	0.0205	0.5
177+100 177+390	46	8	1.163	0.002478	0.5

Çizelge 5.2. Kaya Malzemesine ait m_i değerleri

Kayaç tipi	Sınıf	Grup	İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı 19	Silttaşı 9	Kiltaşı 4
			← Grovak → (18)			
	Klastik Olmayan	Organik	← Tebeşir Taşı → (18)			
			← Kömür → (18)			
		Karbonatlı	Breş (20)	Sparitik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8	
		Kimyasal		Jips (16)	Anhidrit (13)	
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9	Hornfels (19)	Kuvarsit 24	
	Düşük foliasyonlu		Migmatit (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)	
	Foliasyonlu*		Gnays 33	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt 9
MAĞMATİK	Açık ▲		Granit 33		Riyolit (16)	Obsidyen (19)
			Granodiyorit (30)		Dasit (17)	
			Diyorit (28)		Andezit 19	
			Gabro 27	Dolerit (19)	Bazalt (17)	
	Koyu		Norit 22			
	Püskürük piroklastik		Aglomera (20)	Breş (18)	Tüf (15)	

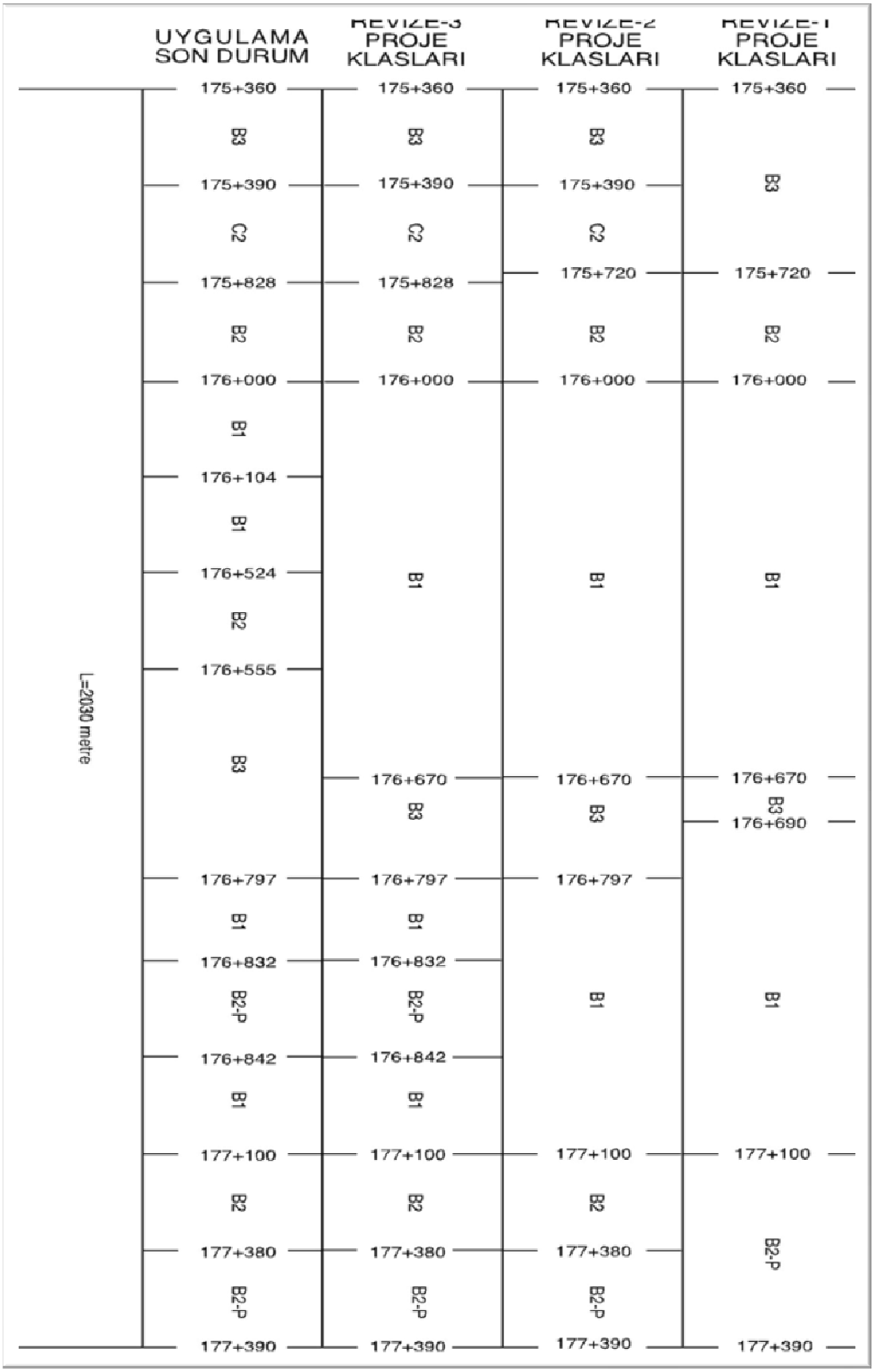
Parantez içindeki değerler tahminidir.

* Bu değerler, foliasyona dik yönde deneye tabi tutulmuş kayaç malzemeleri için olup, yenilmenin foliasyon düzlemi boyunca gerçekleşmesi halinde m_i önemli ölçüde farklı olacaktır.

Çizelge 5.3’de sunulan tünel mesafe değerleri Yüksel Proje tarafından önerilen aralıklardır. Ancak uygulamada yani tünel kazısında NATM tahkimat destek bölgeleri değiştirilmek zorunda kalınmıştır. Uygulamada dikkate alınan aralıklar ve kullanılan tahkimat destek sınıfları Şekil 5.1’ de sunulmuştur.

Şekil 5.1’de uygulamada kullanılan tahkimat sınıflarının sınır değerleri kullanılarak yeni aralıklar için RMR değerleri dikkate alınarak daha önce belirlenen RMR değerleri hesaplandı. Bu hesaplanan RMR değerleri yardımıyla m_b, s ve a parametre değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.3. NATM Yaklaşımına göre tünel tahkimat tasarımında ilk proje sonucu, revize edilen durum ve nihai uygulamaya yansıyan plan görünüşü



Bu belirlenen değerler RMR ≥ 23 olduğu için hesaplanan RMR değerleri GSI+5 olarak algılanıp hesaplamalarda kullanılmıştır.

Çizelge 5.4. Uygulamada kullanılan NATM tahkimat destek bölgelerinde tünel tahkimat tasarımı için genelleştirilmiş H-B ölçütü için belirlenen m_b, s ve a değerleri

Tünel mesafesi (m)	GSI	m_i	m_b	s	a
175+360 175+390	34	8	0.7575	0.0006434	0.5
175+390 175+828	39	8	0.9056	0.001139	0.5
175+828 176+000	57	8	1.7220	0.008414	0.5
176+000 176+104	65	8	2.292	0.0205	0.5
176+104 176+524	65	8	2.292	0.0205	0.5
176+524 176+555	65	8	2.292	0.0205	0.5
176+555 176+797	61	8	1.9869	0.01312	0.5
176+797 176+832	65	8	2.292	0.0205	0.5
176+832 176+842	65	8	2.292	0.0205	0.5
176+842 177+100	65	8	2.292	0.0205	0.5
177+100 177+380	46	8	1.1630	0.002478	0.5
177+380 177+390	46	8	1.1630	0.002478	0.5

5.3 Genel Tasarım Verilerinin Belirlenmesi

PHASE2 programında genelleştirilmiş H–B ölçütü için kaya malzemesi ve kütlesi için tek eksenli basınç dayanımları ve elastik modül değerleri belirlenmiştir.

Kaya kütlesi için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin belirlenmesi için Çizelge 5.5'de sunulan eşitlikler kullanılarak Çizelge 5.6'da görülen değerler hesaplanmış ve ortalamaları belirlenmiştir. Tasarım çalışmalarında kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanım değerleri kullanılmıştır (Çizelge 5.7). Bütün aralıklar için kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanım değerleri Çizelge 5.6.'da sunulurken Çizelge 5.7.'de sunulan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri Hoek ve ark (2002)'den hesaplanmıştır.

Çizelge 5.5. Kaya Kütlesi için önerilen tek eksenli basınç dayanım değerleri (Geniş ve ark,2007)

Araştırmacı(lar)	Görgül Bağıntı (MPa)	Açıklama
(Hoek ve Brown (1980)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	
Yudhbir ve ark., (1983)	$\sigma_{cm} = e^{\frac{RMR-100}{100}}$	σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{(\frac{RMR-100}{18.75})}$	
Kalamaris ve Bieniawski (1995)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{(\frac{RMR-100}{24})}$	
Bhasin ve Grimstad (1996)	$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{100} 7\gamma Q^{\frac{1}{3}}$	γ kaya kütlesinin yoğunluğu t/m^3
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} e^{(\frac{RMR-100}{20})}$	
Trueman (1998)	$\sigma_{cm} = 0.5e^{0.06RMR}$	
Aydan ve Dalgıç (1998)	$\sigma_{cm} = \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)}\sigma_{ci}$	B=6
Barton (2000)	$\sigma_{cm} = 5\gamma(Q\frac{\sigma_{ci}}{100})^{1/3}$	
Hoek ve ark (2002)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^{a}$	

Çizelge 5.6a. 175+360–175+390 Tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	0.383
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	0.960
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	0.440
Kalamaris ve Bieniawski (1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	0.959
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	0.550
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	3.845
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	1.186
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	0.383
Ortalama		1.089

GSI=34, σ_{ci}=15MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6b. 175+390–175+828 Tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	0.600
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	0.177
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	0.680
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	1.338
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	0.830
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	6.210
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	1.620
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	0.378
Ortalama		1.479

GSI =39, σ_{ci}=15MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6c. 175+828–176+000 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{\beta^{\frac{RMR-100}{9}}}$	6.880
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	2.800
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	7.600
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	12.500
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	8.740
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	15.280
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	13.570
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	2.083
Ortalama		8.773

GSI =57, σ_{ci}=75MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6d. 176+000–176+104 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{\beta^{\frac{RMR-100}{9}}}$	8.120
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	3.520
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	8.880
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	14.166
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	10.150
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	18.300
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	15.000
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	2.676
Ortalama		10.100

GSI =65, σ_{ci}=75MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6e. 176+104–176+524 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	8.120
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	3.520
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	8.880
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	14.166
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	10.150
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	18.300
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	15.000
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	2.676
Ortalama		10.100

GSI =65, σ_{ci}=75MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6f. 176+524–176+555 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	8.120
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	3.520
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	8.880
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	14.166
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	10.150
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	18.300
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	15.000
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	2.676
Ortalama		10.100

GSI =65, σ_{ci}=75MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6g. 176+555–176+797 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	7.27
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	3.020
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	7.980
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	13.030
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	9.180
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	16.230
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	14.030
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	2.265
Ortalama		9.126

GSI =61, σ_{ci}=75MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6h. 176+797–176+832 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	5.690
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	2.460
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	6.220
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	9.916
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	7.110
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	18.300
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	10.500
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	1.870
Ortalama		7.749

GSI =65, σ_{ci}=75MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6i. 176+832–176+842 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	5.690
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	2.460
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	6.220
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	9.916
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	7.110
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	18.300
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	10.500
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	1.870
Ortalama		7.749

GSI =65, σ_{ci}=52.5MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6j. 176+842–177+100 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerler

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	5.690
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	2.460
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	6.220
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	9.916
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	7.110
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	18.300
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	10.500
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	1.870
Ortalama		7.749

GSI =65, σ_{ci}=52.5MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6k. 177+100–177+380 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	1.870
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	0.600
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	2.110
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	2.898
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	2.520
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	7.900
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	4.660
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	0.959
Ortalama		2.874

GSI =46, σ_{ci}=37.5MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.6l. 177+380–177+390 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül bağıntı	σ_{cm} (MPa)
Hoek ve Brown(1980)	$\sigma_{cm}=\sigma_{ci}\sqrt{e^{\frac{RMR-100}{9}}}$	1.870
Yudhbir vd. (1983)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/100}$	0.600
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/18.75}$	2.110
Kalamaris ve Bieniawski(1995)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/24}$	2.898
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}e^{(RMR-100)/20}$	2.520
Trueman (1998)	$\sigma_{cm}=0.5e^{0.06RMR}$	7.900
Aydan ve Dalgıç(1998)	$\sigma_{cm} =\frac{RMR}{RMR+\beta(100-RMR)}$	4.660
Hoek ve ark. (2002)	$\sigma_{cm}= \sigma_{ci}s^{a}$	0.959
Ortalama		2.874

GSI =46, σ_{ci}=37.5MPa, $\beta = 6$

Çizelge 5.7. Tünel ekseni boyunca NATM tahkimat destek aralılarında Kaya kütlesinin görgül ve kaya maddesinin tek eksenli basınç dayanımları

Tünel mesafesi	Hoek ve ark (2002)'den σ_{cm} (MPa)	σ_{ci} (MPa)
175+360-175+390	0.83	15
175+390-175+828	0.378	15
175+828-176+000	2.083	75
176+000-176+104	2.676	75
176+104-176+524	2.676	75
176+524-176+555	2.676	75
176+555-176+797	2.265	75
176+797-176+832	1.870	75
176+832-176+842	1.870	75
176+842-177+100	1.870	75
177+100-177+380	0.959	37.5
177+380-177+390	0.959	37.5

H – B yenilme ölçütünün kullanımı için kaya kütlesinin elastik modül (Em) değerlerinin hesaplanması için Çizelge 5.8'de sunulan ilgili eşitlikler kullanılmıştır. Çizelge 5.8'de sunulan eşitlikler her bir NATM tünel destek aralığına ait RMR(=GSI) değerleri dikkate alınarak kullanılmıştır. Eşitliklerde ayrıca sağlam kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ve örselenme faktörü (D) kullanılmaktadır. Hesaplanan kaya kütle elastik modül (Em) büyüklükleri her bir tünel aralığı için hesaplanan ortalama Em değerleri Çizelge 5.9'da sunulmuştur. Çizelgede sunulan tünel çalışmalarında kazı işlemleri delme-patlatma ile yapıldığı için tünel çevresindeki kaya kütlesinin örselendiği kabul edilmiştir. örselenme faktörü (D)'nü içeren eşitliklerde D=0.5 alınmıştır. Hoek ve Diederichs (2006) tarafından orta derecede örselenmiş kaya kütleleri için D değerinin

0.5 alınması önerilmiştir. Bölüm VI'da gerçekleştirilen sayısal çözümleme çalışmalarında çizelge 5.9'da sunulan ortalama elastik modül ve Hoek ve Diederichs (2006) yaklaşımı ile hesaplanan elastik modül değerleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.8. Görgül Kaya kütle elastik modül (Em) eşitlikleri(Ulusay ve Sönmez, 2007)

Araştırmacı(lar)	Eşitlik (GPa)	Açıklama
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	RMR>50
Serafim ve Pereria (1983)	$E_m = 10^{\frac{(100-RMR)}{40}}$	RMR<50
Grimstad ve Barton (1993)	$E_m = 25loQ$	Q > 1
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	$\sigma_{ci} \leq 100MPa$
Read ve Ark., (1999)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	
Barton (2002)	$E_m = 10\Omega \frac{\sigma_{ci}}{100}^{\frac{1}{3}}$	$\sigma_{ci} \geq 100MPa$
Hoek ve Ark., (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	
Hoek ve Ark., (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	$\sigma_{ci} > 100MPa$
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = 100000(+\frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{75+25D-GSI)11}})$	E_i bilinmiyorsa
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02+\frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{60+15D-GSI)11}})$	
Sönmez ve Ark., (2006)	$E_m = E_i\, 10(\frac{(RMR-100)(100-RMR)}{4000\exp(\frac{RMR}{100})})$	D örselenme faktörü

Çizelge 5.8a 175+360 – 175+390 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	3.980
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	1.540
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	3.930
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.290
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	2.980
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{60+15D-GSI)11}})$	0.567
Ortalama		2.22

GSI =34, σ_{ci}=15MPa, D=0.5

Çizelge 5.8b 175+390 – 175+828 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	6.320
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	2.440
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	7.410
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.290
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	4.730
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{60+15D-GSI)11}})$	0.759
Ortalama		3.66

GSI =39, σ_{ci}=15MPa, D=0.5

Çizelge 5.8c 175+828–176+000 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	14.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	12.95
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	18.52
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.650
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	11.22
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{60+15D-GSI)11}})$	11.995
Ortalama		11.56

GSI =57, σ_{ci}=75MPa, D=0.5

Çizelge 5.8d 176+000–176+104 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	20.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	15.40
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	21.60
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.65
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	13.34
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{60+15D-GSI)11}})$	18.509
Ortalama		14.9

GSI =65, σ_{ci}=75MPa, D=0.5

Çizelge 5.8e 176+104–176+524 ünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	20.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	15.40
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	21.60
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.65
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	13.34
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{60+15D-GSI)11}})$	18.509
Ortalama		14.9

GSI =65, σ_{ci}=75MPa, D=0

Çizelge 5.8f 176+524–176+555 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	20.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	15.40
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	21.60
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.65
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	13.34
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{60+15D-GSI)11}})$	18.509
Ortalama		14.9

GSI =65, σ_{ci}=75MPa, D=0.5

Çizelge 5.8g 176+555–176+797 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	16.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	13.73
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	19.51
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.65
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	11.89
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{(60+15D-GSI)11}})$	15.084
Ortalama		12.8

GSI=61, σ_{ci}=75MPa, D=0.5

Çizelge 5.8h 176+797–176+832 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	20.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	15.40
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	21.60
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.65
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	13.34
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{(60+15D-GSI)11}})$	18.509
Ortalama		14.9

GSI =65, σ_{ci}=52.5MPa, D=0.5

Çizelge 5.8i 176+832 – 176+842 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	20.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	15.40
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	21.60
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.65
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	13.34
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{[60+15D-GSI]11}})$	18.509
Ortalama		14.9

GSI =65, σ_{ci}=52.5MPa, D=0.5

Çizelge 5.8j 176+842 – 177+100 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	20.00
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	15.40
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	21.60
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.65
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	13.34
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{[60+15D-GSI]11}})$	18.509
Ortalama		14.9

GSI =65, σ_{ci}=52.5MPa, D=0.5

Çizelge 5.8k 177+100 – 177+380 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	7.940
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	4.860
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	9.730
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.459
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	5.960
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{(60+15D-GSI)11}})$	2.967
Ortalama		5.32

GSI =46, σ_{ci}=37.5MPa, D=0.5

Çizelge 5.8l 177+380 – 177+390 tünel aralığında hesaplanan kaya kütlesine ait elastik modül (Em) değerleri

Araştırmacı(lar)	Görgül Yaklaşım	Em (GPa)
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	7.940
Hoek ve Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	4.860
Read ve ark.(1998)	$E_m = 0.1(\frac{RMR}{10})^3$	9.730
Hoek ve ark (2002a)	$E_m = (1-\frac{D}{2})\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	0.459
Hoek ve ark (2002b)	$E_m = (1-\frac{D}{2})10^{\frac{(GSI-10)}{40}}$	5.960
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i(0.02 + \frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{(60+15D-GSI)11}})$	2.967
Ortalama		5.32

GSI =46, σ_{ci}=37.5MPa, D=0.5

Çizelge 5.9. Tünel ekseni boyunca NATM tahkimat destek aralılarında kaya kütlesinin görgül ve kaya maddesinin elastik modül değerleri

Tünel mesafesi	Ortalama E_{mort} (GPa)	Hoek ve Diederichs (2006) E_m (GPa)	σ_{ci} (MPa)
175+360 – 175+390	2.22	0.567	15
175+390 – 175+828	3.66	0.759	15
175+828 – 176+000	11.56	11.995	75
176+000 – 176+104	14.90	18.509	75
176+104 – 176+524	14.90	18.509	75
176+524 – 176+555	14.90	18.509	75
176+555 – 176+797	12.80	12.800	75
176+797 – 176+832	14.90	18.509	75
176+832 – 176+842	14.90	18.509	75
176+842 – 177+100	14.90	18.509	75
177+100 – 177+380	5.32	2.967	37.5
177+380 – 177+390	5.32	2.967	37.5

5.4 Tahkimat Elemanlarının Malzeme Özellikleri

Bölüm III'de Yüksel Proje mühendisleri tarafından önerilen tahkimat unsurları sırasıyla püskürtme beton, kaya saplaması, çelik bağ (iksa) ve çelik hasır olarak belirtilebilir. Bu tez çalışmasında geçekleştirilen sayısal tahkimat analizlerinde çelik bağ PHASE2 programında modellenemediği için ihmal edilmiştir. Çelik hasırın tahkimat görevi olmadığı için göz ardı edilmiştir. NATM tahkimat destek sınıflarına göre püskürtme beton ve kaya saplamasına ait malzeme özellikleri aşağıda sırasıyla sunulmuştur. Çizelge 5.10 da her bir aralık için kullanılacak betona ait kalınlık (ds), tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cbeton}) ve elastik modül (E_{beton}) değerleri görülmektedir. Çizelge 5.11'de ise Kaya saplamasına ait uzunluk (L), saplamalar arası mesafe (S),

saplama çapı (Φ) saplamaya ait elastik modül ($E_{çelik}$) ve çekme kuvveti ($F_{çelik}$) sunulmuştur. Bu veriler sayısal çözümleme çalışmalarında kullanılmıştır.

Çizelge 5.10. Püskürtme betona ait malzeme özellikleri

Tünel mesafeleri (m)	NATM sınıfı	d_s (m)	σ_{cbeton} (MPa)	E_{beton} (GPa)
175+360 175+390	B3	0.2	25	28
175+390 175+828	B3	0.15	25	28
175+828 176+000	B2	0.15	25	28
176+000 176+104	B1	0.1	25	28
176+104 176+524	B1	0.1	25	28
176+524 176+555	B2	0.15	25	28
176+555 176+797	B3	0.1	25	28
176+797 176+832	B1	0.1	25	28
176+832 176+842	B2 - P	0.2	25	28
176+842 177+100	B1	0.1	25	28
177+100 177+380	B2	0.15	25	28
177+380 177+390	B2 - P	0.2	25	28

Çizelge 5.11. Kaya Saplamasına ait malzeme özellikleri

Tünel mesafeleri	NATM sınıfı	L (m)	S (mxm)	Φ (mm)	$E_{çelik}$ (GPa)	Çekme Kuvveti $F_{çelik}$ (MN)
175+360 175+390	B3	4	1x1.5	28	300	0.15
175+390 175+828	C2	4	1x1.5	28	300	0.15
175+828 176+000	B2	4	2x2	28	300	0.15
176+000 176+104	B1	4	2x2.5	28	300	0.15
176+104 176+524	B1	4	2x2.5	28	300	0.15
176+524 176+555	B2	4	2x2	28	300	0.15
176+555 176+797	B3	4	1x1.5	28	300	0.15
176+797 176+832	B1	4	2x2.5	28	300	0.15
176+832 176+842	B2 - P	4	1x1.5	28	300	0.15
176+842 177+100	B1	4	2x2.5	28	300	0.15
177+100 177+380	B2	4	2x2	28	300	0.15
177+380 177+390	B2 - P	4	2x2	28	300	0.15

6.TÜNEL AÇIKLIKLARINA AİT SAYISAL MODELLEME VE DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ

6.1. Genel

TCDD tarafından açılan hızlı tren tünelinde 2030 m'lik tünel ekseni 12 farklı jeoteknik bölgeye ayrılmıştır. Her bir jeoteknik bölgeye ait sayısal modeller hazırlanmış ve duraylılık çözümlemeleri yapılmıştır. Duraylılık çözümlemelerden elde edilen sonuçlar ve tünelde ölçülen yerdeğiştirme ölçümleri bu bölümde karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

6.2. Duraylılık Çözümlemelerinde Kullanılan Bilgisayar Programı

Yeraltı açıklıklarının duraylılık çözümlemeleri analitik ve sayısal yöntemlerle yapılabilmektedir. Analitik çözümlemelerde kaya kütle ve tahkimat etkileşim eğrileri kullanılmaktadır. Bu eğrilerin hazırlanmasında basitleştirilmiş arazi-tahkimat analizi için Carranza-Torres ve Fairhust (2000) tarafından önerilen konverjans sınırlama yöntemi kullanılmaktadır. Yöntem hidrostatik birincil gerilme altında (P_o**)** dairesel kesitli tünel açıklıkları için geçerlidir. Analitik çözümleme yardımıyla tünel cidarında oluşacak ikincil gerilmeler ve bunlara bağlı yerdeğiştirmeler belirlenebilmektedir. Sayısal çözümlemeler için geliştirilmiş hazır paket programlar kullanılmaktadır. Bu bilgisayar programlarına FLAC, UDEC, DEM, PHASE2 örnek gösterilebilir. Bu programlar yardımıyla açıklıkları etrafında gerilme değişimleri, yerdeğiştirmeleri ve olası aşırı gerilme/yenilme bölgeleri belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında PHASE2 (Rocscience 2007b)'in kullanılmasına karar verilmiştir (Geniş, 2010). PHASE programı son zamanlarında kullanımı kolay olduğu için birçok projede yaygın olarak kullanılmaktadır. Program toprak ve kaya zemin ortamlarında yapılan ve yerüstü yapıları için sonlu eleman yöntemine dayalı duraylılık analizleri yapabilmektedir. Düzlem birim şekil değiştirme durumunun geçerli olduğu iki boyutlu ve eksenel simetrisi olan açıklıklarda kısmen üç boyutlu gerilme analizleri statik ve dinamik koşullarda gerçekleştirilebilmektedir. Çok aşamalı kazı ve tahkimat modellemelerine olanak sağlayan program, açıklıklarının tahkimat uygulamalarında püskürtme beton, kaya saplaması ve çelik bağ tahkimat ve bunların kombinasyonlarına ait analiz sonuçları üretebilmektedir. Program duraylılık analizlerinde kaya kütlesi elastik ve elasto-plastik

malzeme özellikleri ile modellenebilmektedir. Elasto-plastik malzeme davranışları için Mohr-Coulomb, Hoek-Brown ve Drucker-Prager yenilme ölçütleri program tarafından kullanılabilmektedir.

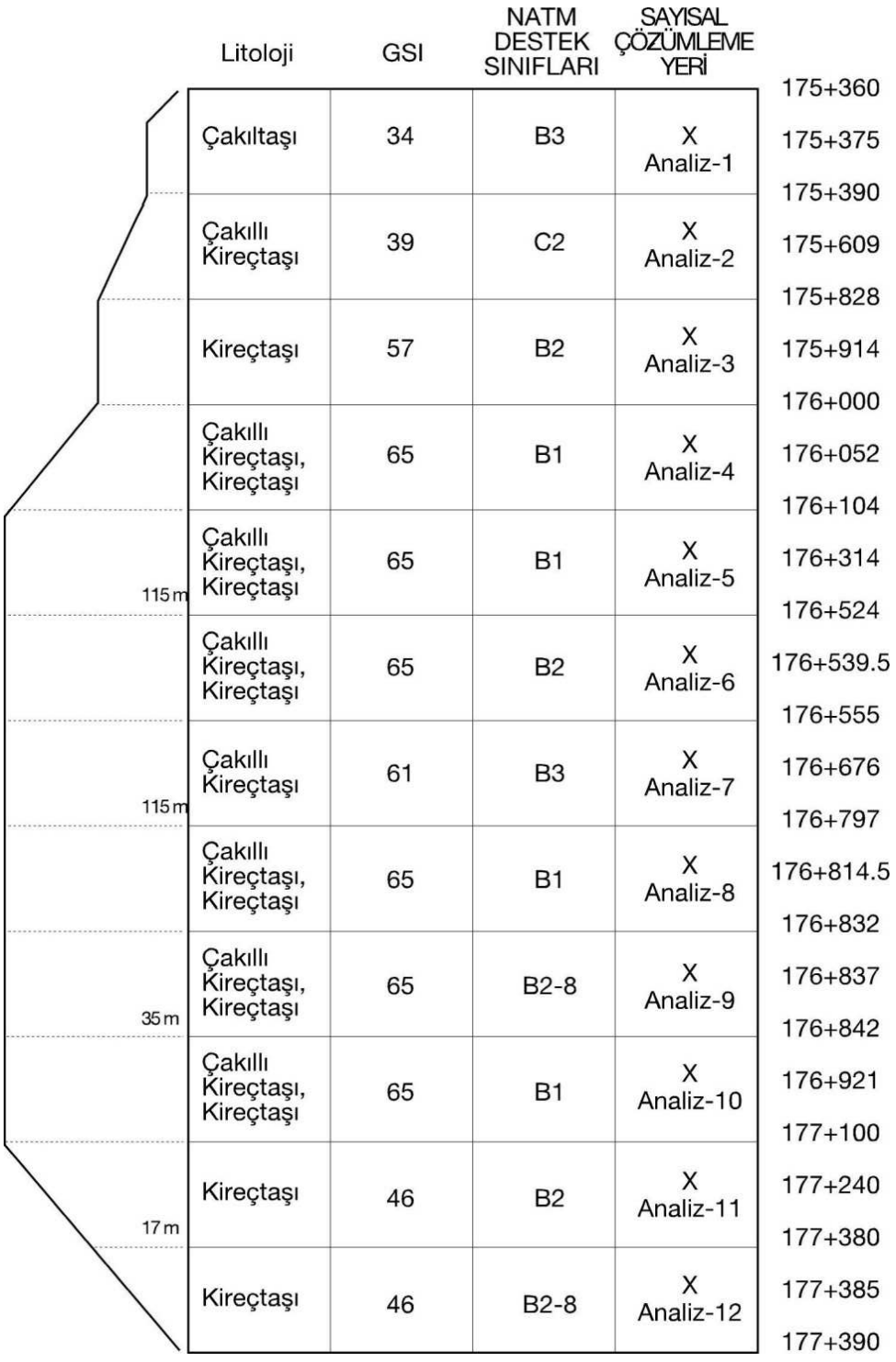
Bu tez çalışmasında, sayısal çözümleme için kullanılan PHASE2 yardımıyla elde edilen yerdeğişim sonuçları ve tünel açıklığında ölçülen yerdeğişim ölçüleri karşılaştırılmıştır. Yenilme ölçütü olarak genelleştirilmiş Hoek-Brown (1995) seçilmiştir.

6.3. Çözümleme Yöntemi

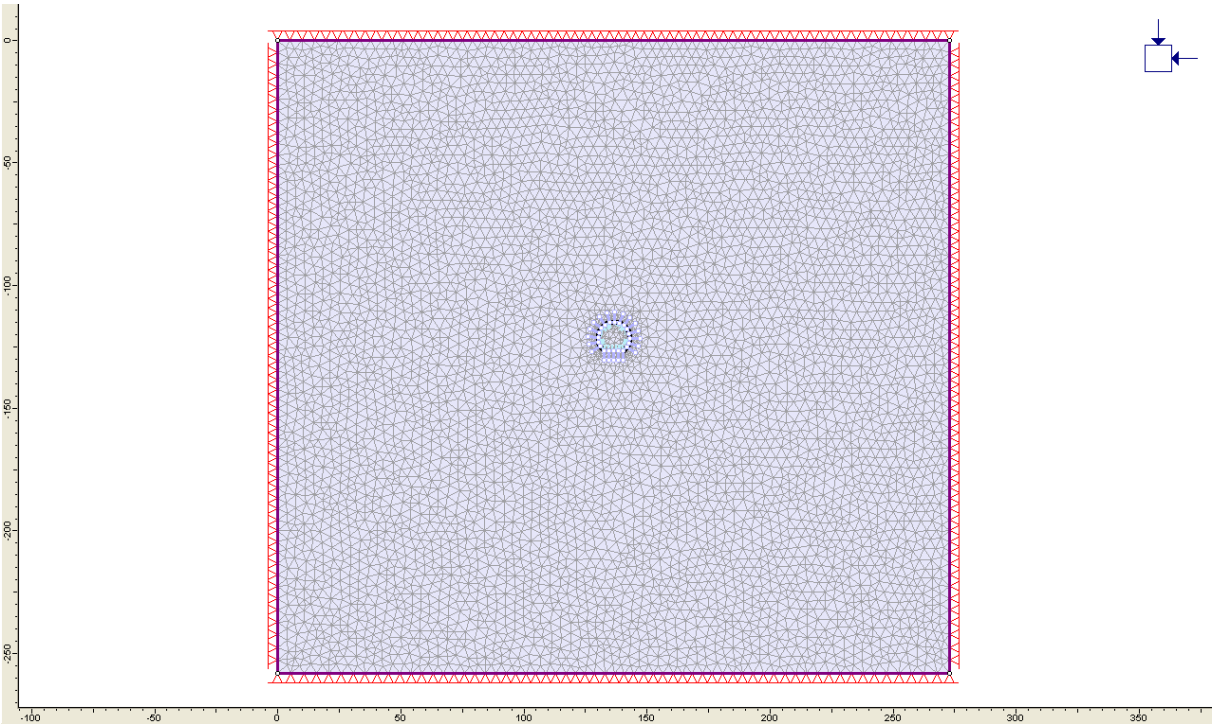
Tünel ekseni boyunca belirlenen 12 yapısal bölgenin (Şekil 6.1) tam orta noktalarında duraylılık analizinin yapılması planlanmıştır. Çözümlemede kullanılacak açıklık geometrisi ve model sınır koşulları, birincil gerilme durumu, kaya kütle malzeme özellikleri ve tahkimat elemanlarına ait tahkimat özellikleri sonraki bölümlerde sunulmuştur.

6.3.1. Açıklık Geometrisi ve Model Sınır Koşulları

Tünel kesiti at nalı şeklinde olup kazı, üst ve alt yarı olarak iki kademede gerçekleştirilmiştir. Tünel genişliği (B) ve yüksekliği 13 metredir. Tünel geometrisi dairesel kesite yakın olduğu için açıklık geometrisi ile uygun olacak şekilde radyal ve model sınırına doğru genişleyen bir sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Model sınırının açıklıktan uzaklığı, açıklık genişliğinin (B) 10 katı olacak şekilde seçilmiştir. Ancak tünelin örtü yüksekliği (Şekil 6.1) gerçeğine uygun modellenmiştir. Bununla birlikte modelin dış sınırındaki tüm noktalar, yatay ve düşey doğrultularında yerdeğiştirmeye izin vermeyecek şekilde sabitlenmiştir. Sınır koşullarını model üzerinde gösteren tipik bir model Şekil 6.2’de sunulurken diğer kesitlere ait modeller EK-1’DE verilmiştir.



Şekil 6.1. Sayısal Çözümleme Çalışmalarında Dikkate Alınan12 Jeoteknik Bölgenin Gösterildiği Tünel Ekseni



Şekil 6.2. 176+797–176+832 metreler arasındaki Analiz–8 bölgesine ilişkin model

6.3.2. Birincil Arazi Gerilme Durumu

Tünel ekseni boyunca analiz edilecek noktalarda yeryüzü ile tünel arasındaki mesafe (H) 17-115 m arasında değişmektedir. Proje çalışması için arazide birincil gerilme ölçümleri yapılmamıştır. Düşey birincil gerilme gravite etkisi ile oluştuğu ve her bir derinlik seviyesindeki yüzey gerilmelerinin düşey birincil gerilmelere eşit olduğu varsayımı yapılmıştır. Analizlerde hidrostatik birincil arazi gerilme değeri, yükseklik (H) ile birim hacim ağırlık (γ) değerlerinin çarpımı ile belirlenmiştir. Tünel üzerinde karşılaşılan kireçtaşı kaya birimi için birim hacim ağırlık (γ) değeri deneysel çalışmalar ile belirlenen 26.8kN/m^3 değeri kullanılmıştır. Duraylılık analizlerinde dikkate alınan hidrostatik birincil arazi gerilme değerleri aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Tünel ekseninde karşılaşılan 12 jeoteknik aralık için hidrostatik birincil düşey arazi gerilme (P_o) değerleri

Analiz No	Tünel bölgesi	Tünel aralığı (m)	NATM Sınıfı	Derinlik H (m)	P_o (MPa)
1	175+360 175+390	30	B3	17	0.456
2	175+390 175+828	438	B3	17	0.456
3	175+828 176+000	72	B2	35	0.938
4	176+000 176+104	104	B1	35	0.938
5	176+104 176+524	420	B1	115	3.082
6	176+524 176+555	31	B2	115	3.082
7	176+555 176+797	242	B3	115	3.082
8	176+797 176+832	35	B1	115	3.082
9	176+832 176+842	10	B2-P	115	3.082
10	176+842 177+100	258	B1	115	3.082
11	177+100 177+380	280	B2	115	3.082
12	177+380 177+390	10	B2-P	35	0.938

6.3.3. Kaya Kütlesine ait Tasarım Girdi Değerleri

Kaya kütle malzeme özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili detaylar Bölüm V'de sunulmuştur. Duraylılık analizlerinde kullanılacak kaya kütle malzeme özellikleri bu bölümde topluca Çizelge 6.2'de sunulmuştur. Kaya kütlesinin elastik kusursuz plastik malzeme davranışı sergilediği varsayılmıştır. Kaya malzemesine ait elastik modül (E_i) için aşağıda sunulan eşitlik kullanılmıştır.

$$E_i = MR\ \sigma_{ci} \qquad [6.1]$$

Burada σ_{ci} sağlam kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanımı olup MR, Hoek ve Diederichs (2006) tarafından ortaya atılan modül oranıdır. Araştırmacılar tarafından verilen abaktan kireçtaşı kaya birimi için MR değerinin 600–800 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında MR=700 alınarak Çizelge 6.2' de sunulan Ei değerleri hesaplanmıştır. Sayısal çözümleme çalışmalarında Çizelge 6.2' de sunulan kaya kütle ve malzeme özellikleri kullanılmıştır.

6.3.4. Tahkimat Elemanlarına ait Malzeme Özellikleri

Tünel kesitinde kazı sonrasında yapılan tahkimat çalışmalarında kaya saplaması + çelik tel hasır + püskürtme beton + çelik bağ kullanılmıştır. Ancak çelik bağ tahkimat ünitesi sadece B3 tahkimat destek sınıfında kullanılmıştır. Çelik tel hasırın tahkimat ünitesi olmakla birlikte yük taşıma özelliği olmamasından modelleme çalışmasında dikkate alınmamıştır. Bu tez çalışmasında çelik tel hasır ve çelik bağ göz önüne alınmamıştır. Duraylılık analizlerinde dikkate alınan tahkimat parametreleri topluca Çizelge 6.3'te sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Sayısal çözümlemelerde kullanılan kaya kütle ve malzeme özellikleri

Analiz no	Tünel bölgesi	Derinlik (m)	P_o (MPa)	σ_{ci} (MPa)	E_i (Gpa)	GSI	σ_{cm} (MPa)	Em (GPa)	$\mathbf{m_i}$	m_b	s	a
1	175+360 175+390	17	0.456	15	10.5	34	1.089	0.575	8	0.7575	0.0006434	0.5
2	175+390 175+828	35	0.456	15	10.5	37	1.479	1.179	8	0.9056	0.00139	0.5
3	175+828 176+000	35	0.938	75	52.5	57	8.773	4.410	8	1.7220	0.0084140	0.5
4	176+000 176+104	115	0.938	75	52.5	65	10.100	5.690	8	2.292	0.0205	0.5
5	176+104 176+524	115	3.082	75	52.5	65	10.100	5.690	8	2.292	0.0205	0.5
6	176+524 176+555	115	3.082	75	52.5	65	10.100	5.690	8	2.292	0.0205	0.5
7	176+555 176+797	115	3.082	75	52.5	61	9.126	4.800	8	1.9869	0.01312	0.5
8	176+797 176+832	115	3.082	75	52.5	65	7.749	5.690	8	2.292	0.0205	0.5
9	176+832 176+842	115	3.082	75	52.5	65	7.749	5.690	8	2.292	0.0205	0.5
10	176+842 177+100	115	3.082	75	52.5	65	7.749	5.690	8	2.292	0.0205	0.5
11	177+100 177+380	115	3.082	37.5	26.25	46	2.874	1.690	8	1.163	0.002479	0.5
12	177+380 177+390	35	0.938	37.5	26.25	46	2.874	1.690	8	1.163	0.002479	0.5

Çizelge 6.3. Püskürtme beton ve kaya saplama özellikleri

Analiz No	Tünel bölgesi	Tünel aralığı (m)	NATM sınıfı	Püskürtme Beton Özellikleri				Kaya Saplama Özellikleri				
				d_s (m)	σ_{cbeton} (MPa)	P_0 (MPa)	E_{beton} (GPa)	L (m)	S (mxm)	Φ (mm)	E_s (GPa)	$F_{çelik}$ (MN)
1	175+360 175+390	30	B3	0.20	25	2.56	28	4	1x1.5	28	300	0.15
2	175+390 175+828	438	B3	0.20	25	2.56	28	4	1x1.5	28	300	0.15
3	175+828 176+000	72	B2	0.15	25	2.56	28	4	2x2	28	300	0.15
4	176+000 176+104	104	B1	0.10	25	2.56	28	4	2x2.5	28	300	0.15
5	176+104 176+524	420	B1	0.10	25	2.56	28	4	2x2.5	28	300	0.15
6	176+524 176+555	31	B2	0.15	25	2.56	28	4	2x2	28	300	0.15
7	176+555 176+797	242	B3	0.20	25	2.56	28	4	1x1.5	28	300	0.15
8	176+797 176+832	35	B1	0.10	25	2.56	28	4	2x2.5	28	300	0.15
9	176+832 176+842	10	B2-P	0.20	25	2.56	28	4	1x1.5	28	300	0.15
10	176+842 177+100	258	B1	0.10	25	2.56	28	4	2x2.5	28	300	0.15
11	177+100 177+380	280	B2	0.15	25	2.56	28	4	2x2	28	300	0.15
12	177+380 17+390	10	B2-P	0.20	25	2.56	28	4	2x2	28	300	0.15

6.4. Duraylılık Çözümlemeleri

Tünel çalışmalarında delme-patlatma yöntemi ile kazı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tünel arınında deliklerin delinmesini takiben yapılan patlatma işlemi ile hemen yeni arın önüne yığılan pasa malzemesinin arından alınması yaklaşık 2-3 saat sürmektedir. Arında yapılan yaklaşık 2 metrelik ilerleme ile açılan yeni tünel arını pasanın temizleme sürecinde desteksiz kalmaktadır. Bu süreç içerisinde desteksiz bölgede tünel cidarında yerdeğiştirmelerin oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak duraylılık analizlerinde kazı ve tahkimat modellemelerinde üç aşama olduğu varsayılmıştı (Geniş,2010, Acun, 2009). Birinci aşama kazı öncesi durumu, ikinci aşama kazı aşamasının yürütüldüğü süreci ve üçüncü aşama ise tahkimatın yerleştirilmesinden sonraki süreci tanımlamaktadır. Zamandan bağımsız bu kabulde, tünel cidarında kazının hemen sonrasında oluşacak toplam ikincil gerilme ve yerdeğiştirmelerin ilk aşamada % 0, ikinci aşamada %70'inin daha sonraki üçüncü safhada ise geriye kalan %30'luk değişimin olacağı varsayılmıştır. Tünel ekseni boyunca açıklık etrafında incelenen radyal yerdeğişimlerin dağılımlarının elastik ve elasto-plastik çözümlemelerin incelendiği çalışmalarda (Paret 1995, Chern ve ark. 1998, Ünlü ve Gerçek 2003, Hoek ve ark. 2008) benzer yaklaşımların dikkate alındığı tespit edilmiştir. Üç basamaklı yapılan tahkimatlı açıklık modellemesi yanında sonuçların kontrolü için ayrıca tek aşamalı tahkimatsız açıklık modellemesi yapılmıştır. Duraylılık çalışmaları takip eden bölümlerde sunulmuştur.

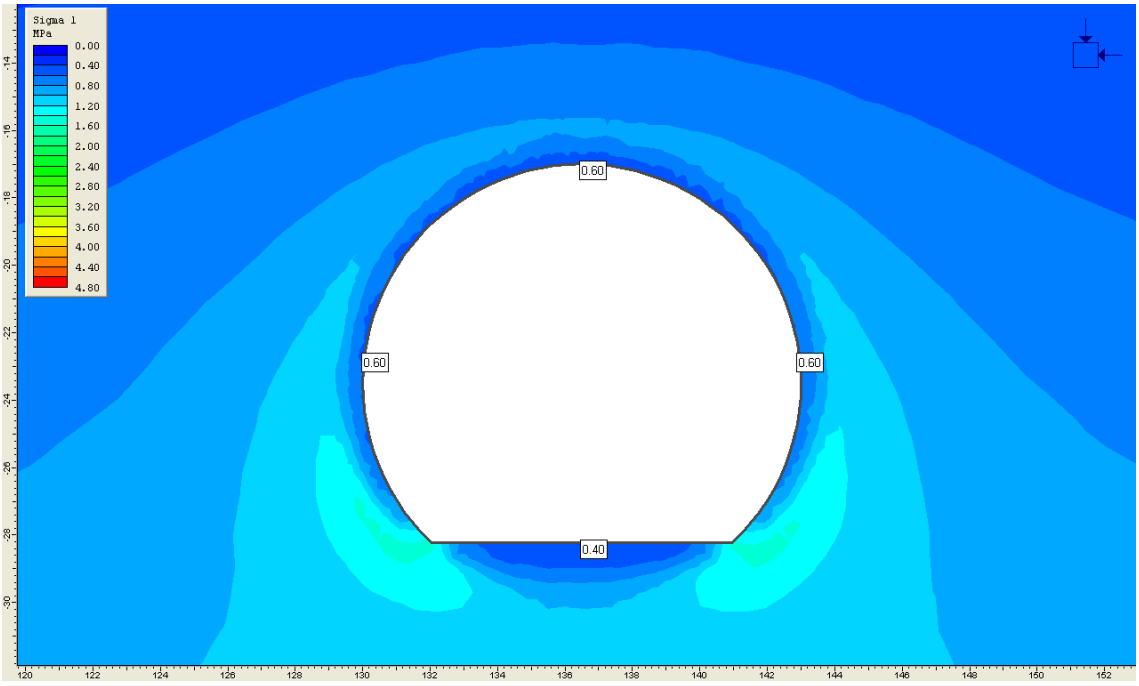
6.4.1. 175+360–175+390 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 1)

Tünelin Afyon girişi olan 175+360–175+390 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık çözümlemesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralık için iki ayrı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşama içerirken ikinci dosya tahkimatsız durum için tek aşama içermektedir. Üç aşamalı tünel çalışması için sayısal çözümleme sonucunda belirlenen açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeler Çizelge 6.4'de sunulurken genel çözümleme sonuçlarını içeren iki boyutlu kesitler Şekil 6.3'de görülmektedir.

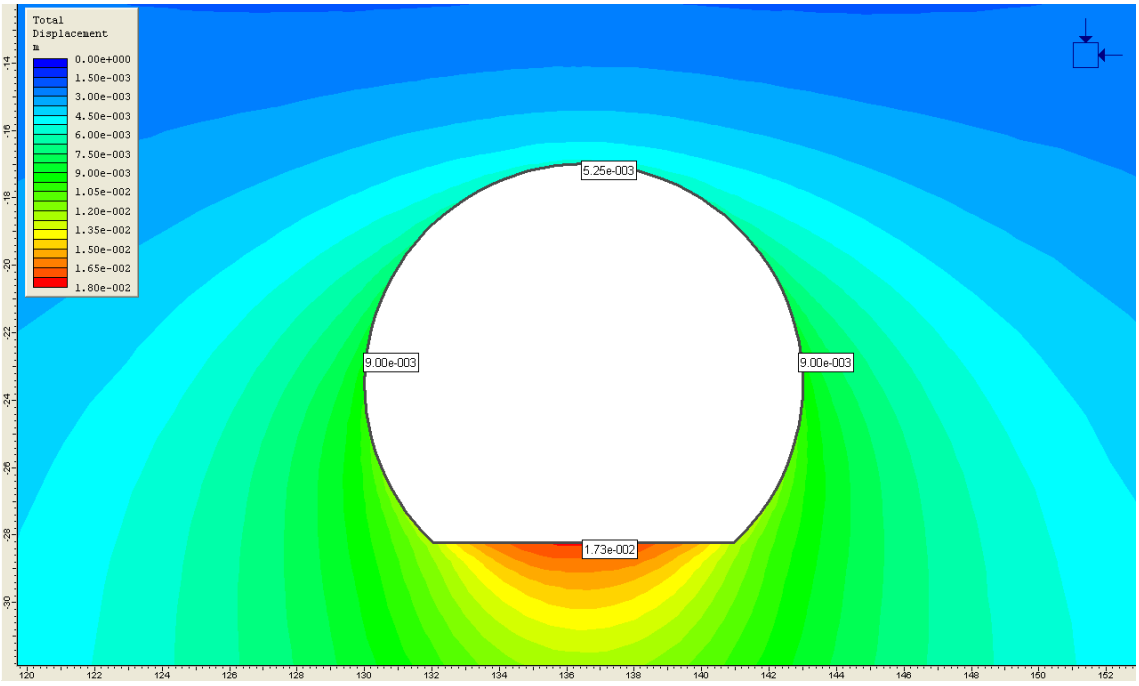
Çizelge 6.4. 175+360 -175+390 tünel aralığında analiz sonuçları.

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.30	0.0	0.45	0.0	0.60	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	0.60	3	0.60	6.0	0.45	11.5
Tahkimatlı Aşama 3	30	0.80	3.6	0.80	7.2	0.60	13.8
Tahkimatsız Aşama 1	100	0.60	5.25	0.60	9	0.40	17.3

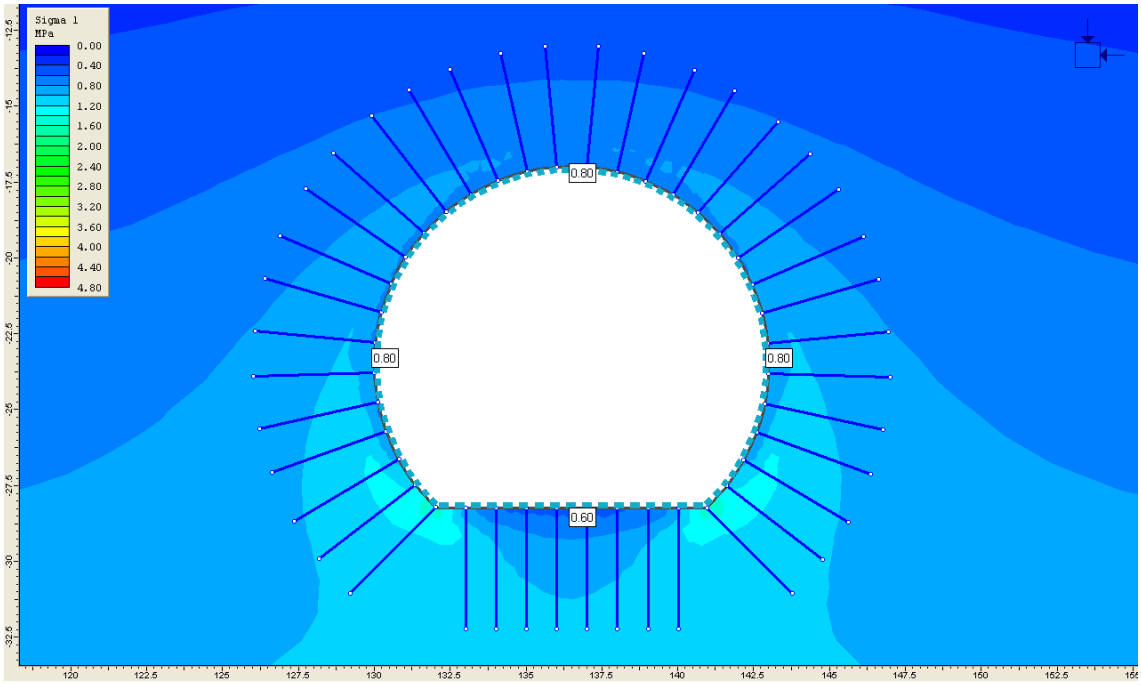
Şekil 6.3 a, b, c, d ve Çizelge 6.4' de sunulan sonuçlara göre tahkimatsız durumda en büyük yer değiştirmenin tünel tabanında olacağı (u_o = 17.3 mm) ancak tahkimat işleminden sonra tünel tabanındaki yer değişim miktarının u_1=13.8 mm seviyelerine ineceği anlaşılmaktadır. Benzer durum tünel tavanında u_0=5.25 mm iken u_1=3.6 mm, tünel yan cidarında ise u_0=9 mm iken u_1=7.2 mm olacağı belirlenmiştir. bu sonuçlara göre tahkimat ünitelerinin görev yaptığı görülmektedir. Tahkimat ünitesinin bu kesitte bakir yer değişimleri, tünel tavanında %31, tünel yan cidarında %20, tünel tabanında %20 oranında engellediği belirlenmiştir.



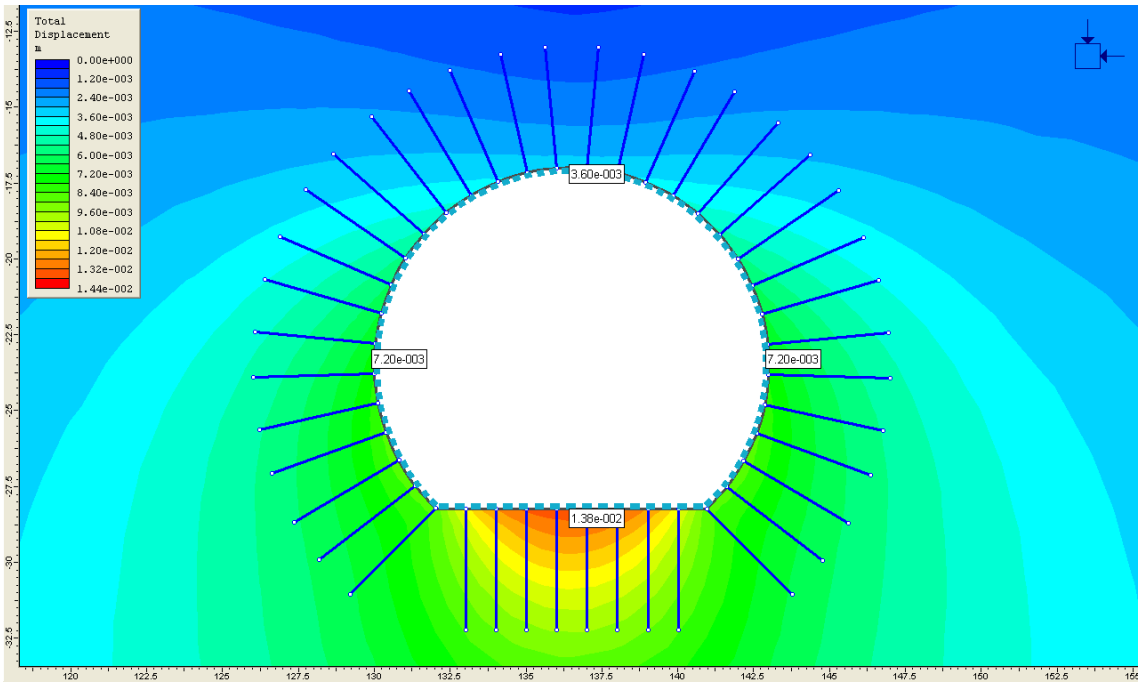
Şekil 6.3a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.3b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme durumu



Şekil 6.3c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.3d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

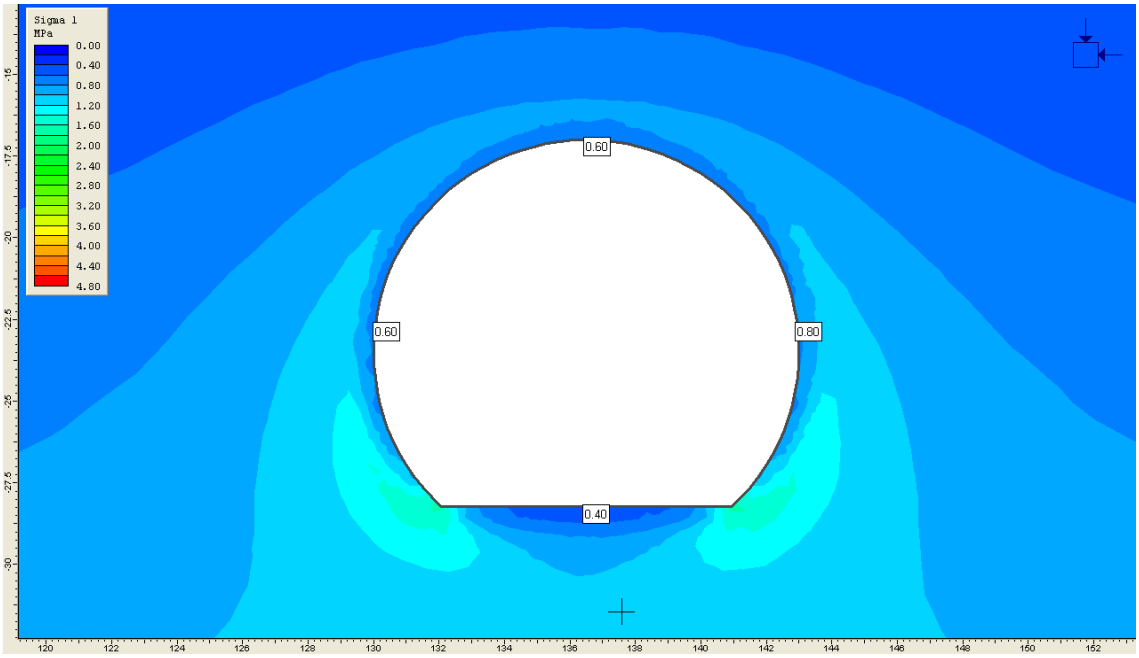
6.4.2.175+390–175+828 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 2)

Şekil 6.1'de sunulan tünelin plan görünüşüne göre tünelin 175+390–175+828 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık çözümlemesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralıktaki kesit, tahkimatsız ve tahkimatlı duruma ait iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatsız durum için tek aşama içerirken ikinci dosya tahkimatlı durum için üç aşama içermektedir. Tahkimatlı analizde üç aşamalı tünel çalışması için belirlenen açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeleri gösteren PHASE2 çıktıları Şekil 6.4'de bu kesitlerden elde edilen sayısal sonuçlar ise Çizelge 6.5'de sunulmuştur.

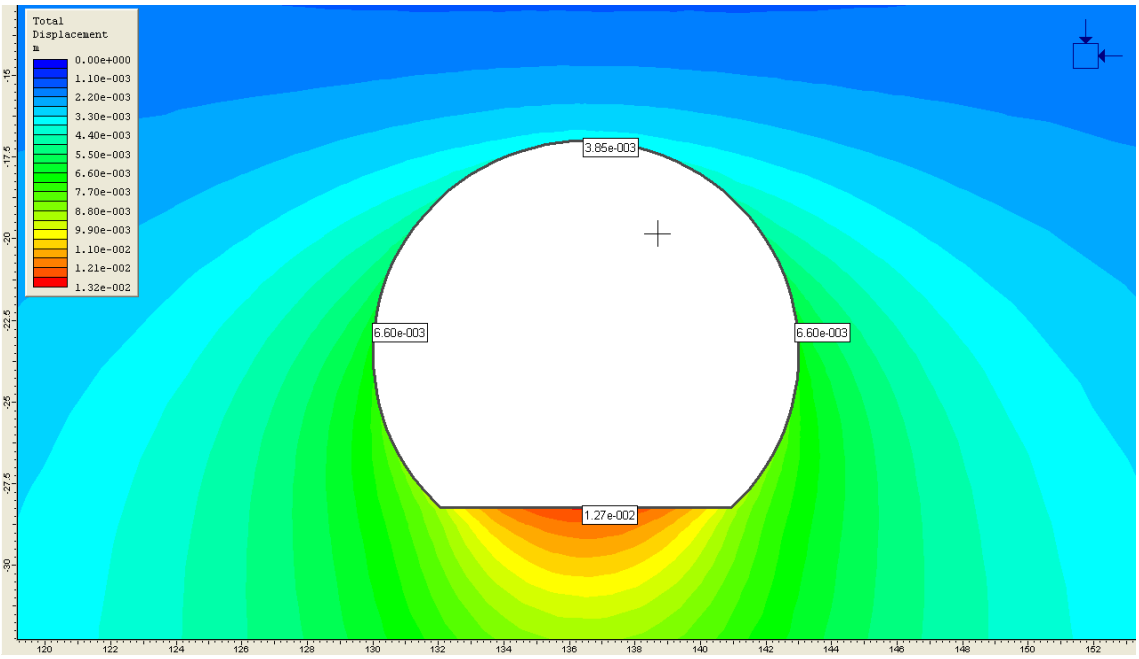
Çizelge 6.5. 175+390–175+828 tünel aralığında analiz sonuçları.

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.30	0.0	0.45	0.0	0.60	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	0.60	2.4	0.75	4.4	0.45	8.4
Tahkimatlı Aşama 3	30	0.80	2.25	1.0	5.4	0.60	9.9
Tahkimatsız Aşama 1	100	0.60	3.85	0.80	6.6	0.40	12.7

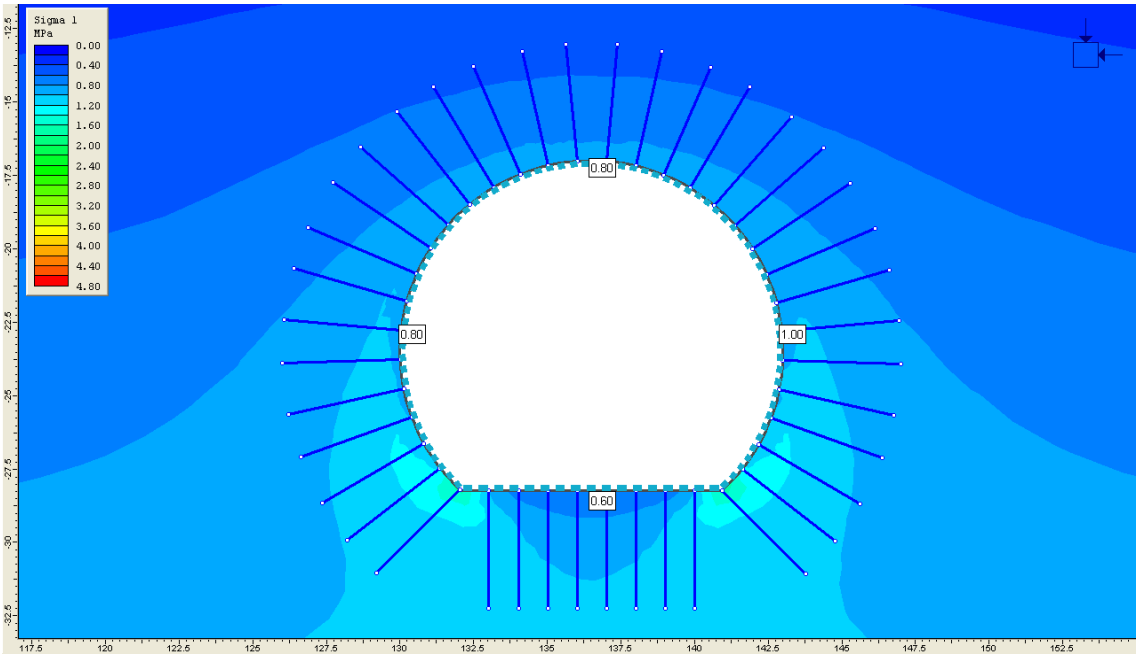
Tünelin 175+390–175+828 aralığına tekabül eden 438 m uzunluğundaki bu bölgede gerçekleştirilen tahkimatsız duruma ait analizlerde tünel tavanı, yan cidarı ve tabanında sırasıyla oluşabilecek yer değişim miktarları sırası ile u_0=3.85, 6.6, 12.7 mm'dir. Tahkimat yerleştirildikten sonra aynı tünel noktalarında beklenen yer değişimlerin u_1=2.25, 5.4 ve 9.9 mm olması tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre tahkimat üniteleri tahkimat görevini yerine getirdiği anlaşılmaktadır(Şekil 6.4 ve Çizelge 6.5). Tahkimat performansı incelendiğinde yüzdesel olarak tünel tavanında yan cidarında ve tabanında sırasıyla %42, %18 ve %22 oranında tahkimatsız ortama göre yer değişimlerin tahkimat tarafından önleneceği görülmektedir.



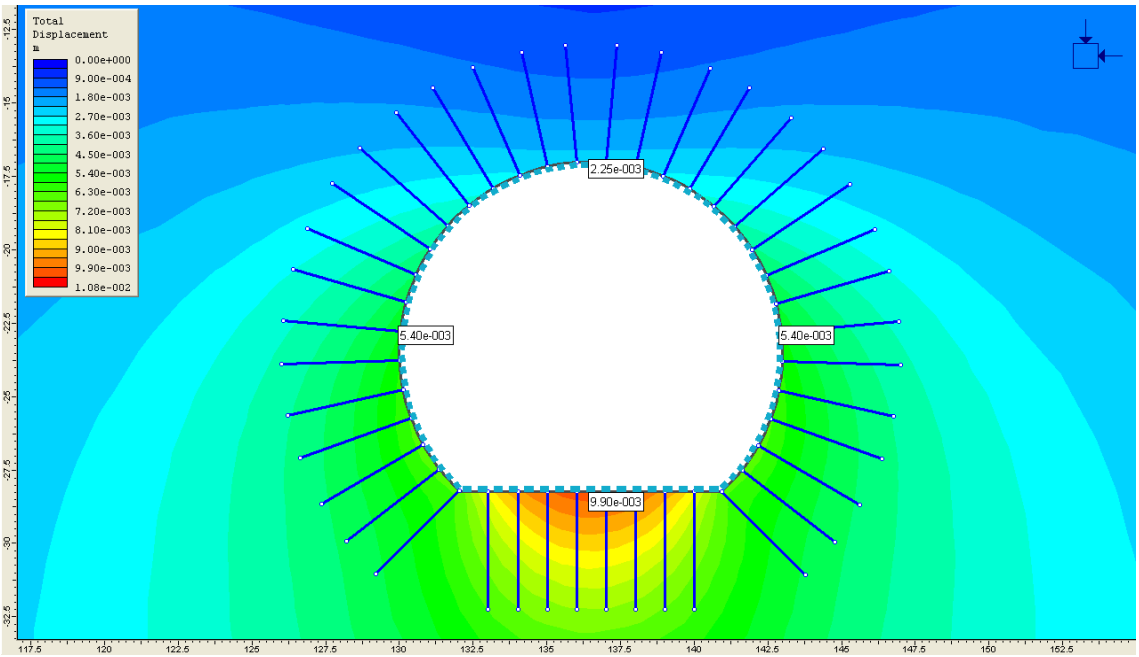
Şekil 6.4a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.4b Tahkimatsız durum toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.4c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.4d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

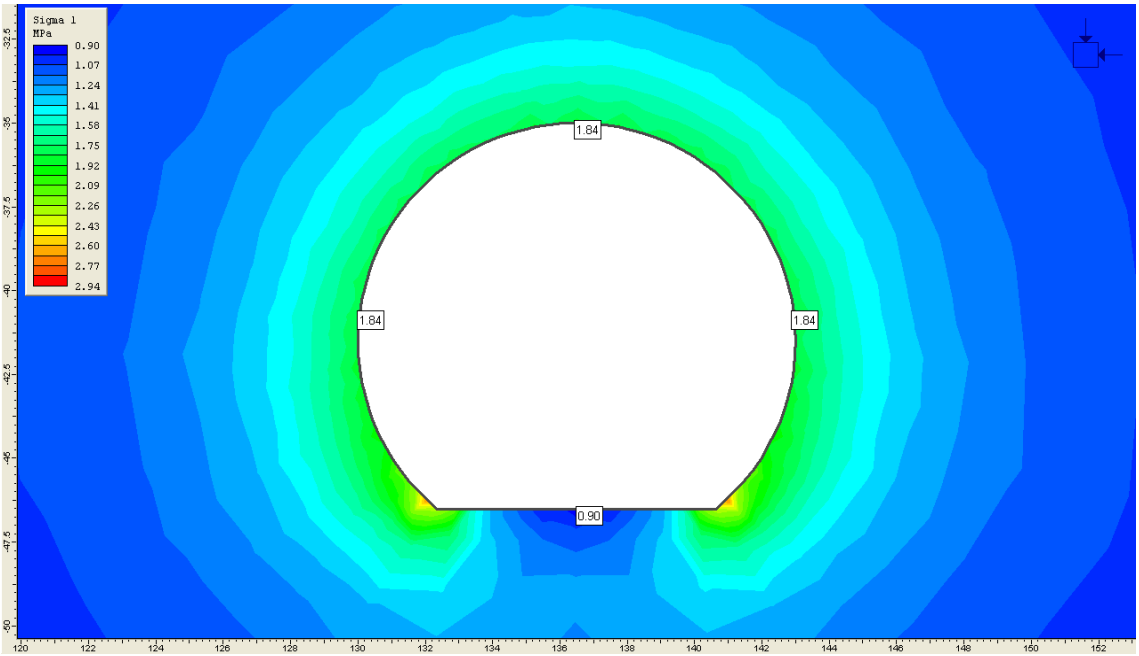
6.4.3. 175+828–176+000 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 3)

Tünelin 175+828–176+000 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık çözümlemesinde analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralıkta iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşama içerirken ikinci dosya tahkimatsız durum için tek aşama içermektedir. Tahkimatlı durumda açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeler Şekil 6.5 ve Çizelge 6.6'da görülmektedir.

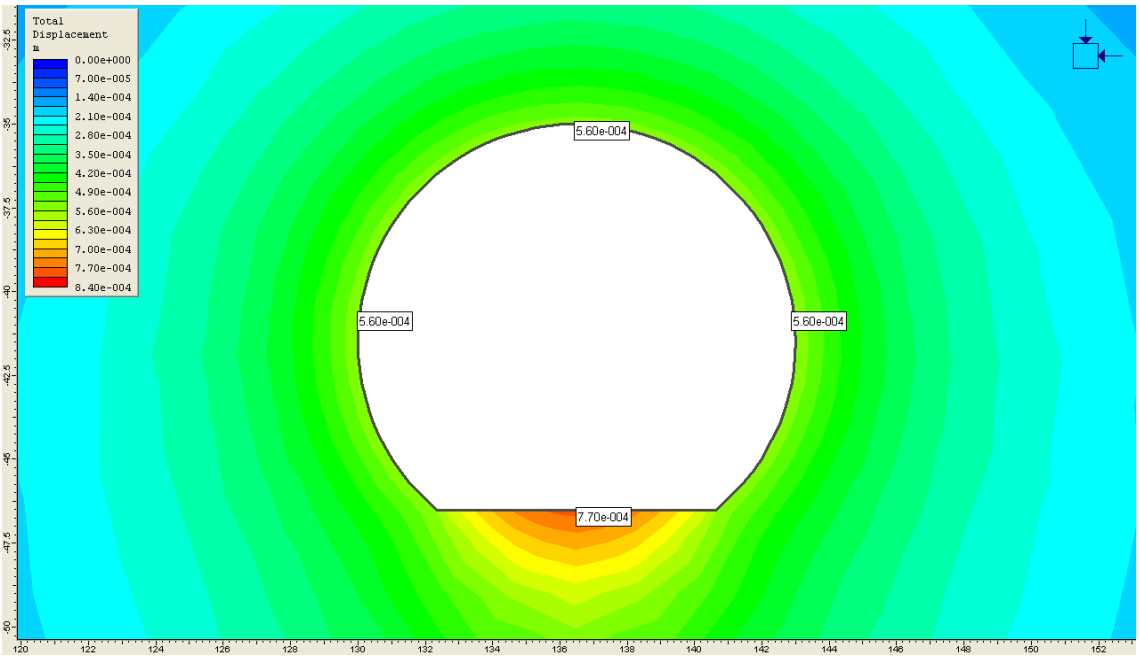
Çizelge 6.6. 175+828–176+000 tünel aralığında analiz sonuçları

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama	70	1.32	0.38	1.27	0.40	0.66	0.55
Tahkimatlı Aşama 3	30	1.87	0.53	1.79	0.56	0.99	0.77
Tahkimatsız Aşama 1	100	1.84	0.56	1.84	0.56	0.90	0.77

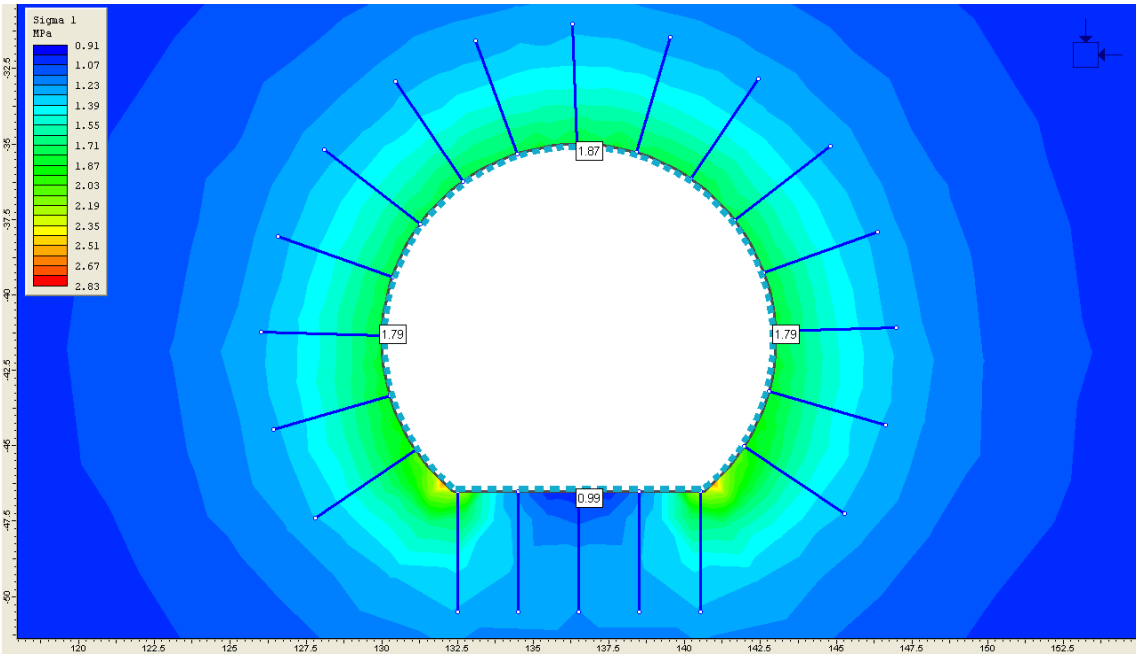
Şekil 6.5 ve Çizelge 6.6'da sunulan sonuçlara göre 175+828+176+000 aralığında gerçekleştirilen analizlerde tahkimatsız kazı açıklığının tavanında, yan cidarında ve tabanında yerdeğişim u_0=0.56, 0.56 ve 0.77 mm iken kazı açıklığının tahkimatı ile bu yer değişimlerin u_1=0.53, 0.56 ve 0.77 mm seviyelerinde kalacağı tahmin edilmektedir. Tahkimat performansının ise % 6, % 0 ve % 0 seviyelerinde olacağı görülmektedir.



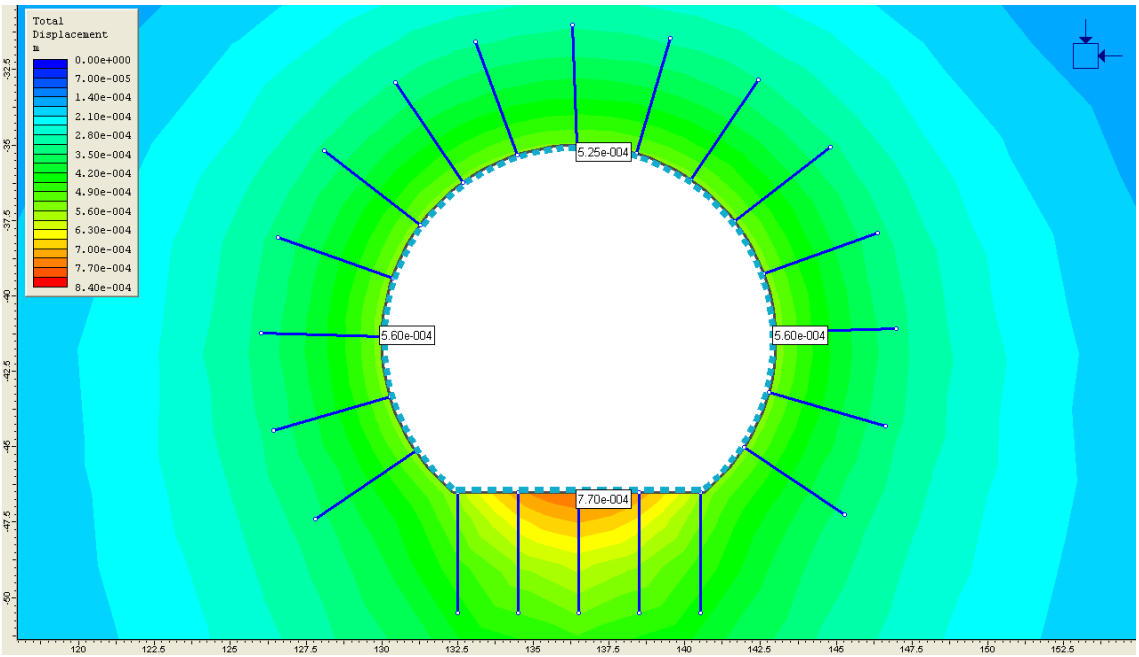
Şekil 6.5a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.5b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.5c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.5d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

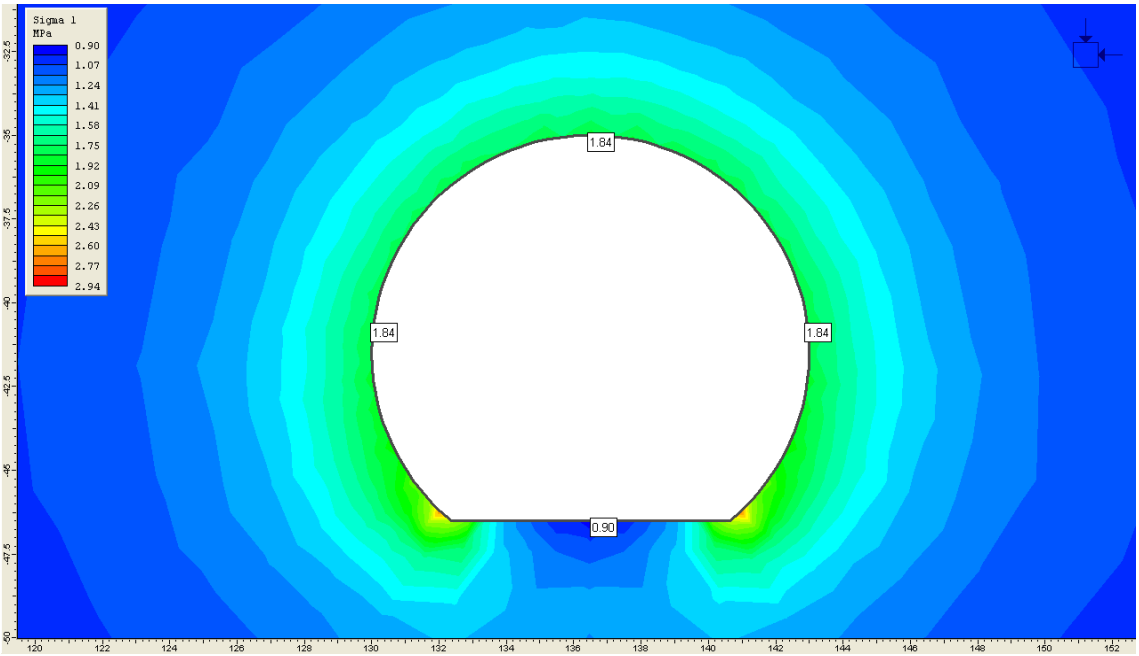
6.4.4. 176+000–176+104 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 4)

Tünelin Afyon girişi olan 176+000–176+104 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık çözümlemesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralığa ait iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşama içerirken ikinci dosya tahkimatsız durum için tek aşama içermektedir. Üç aşamalı tünel çalışması için çözümlemesi sonucunda belirlenen açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeler Çizelge 6.7'de sunulurken genel çözümleme sonuçlarını içeren iki boyutlu kesitler Şekil 6.6'da görülmektedir.

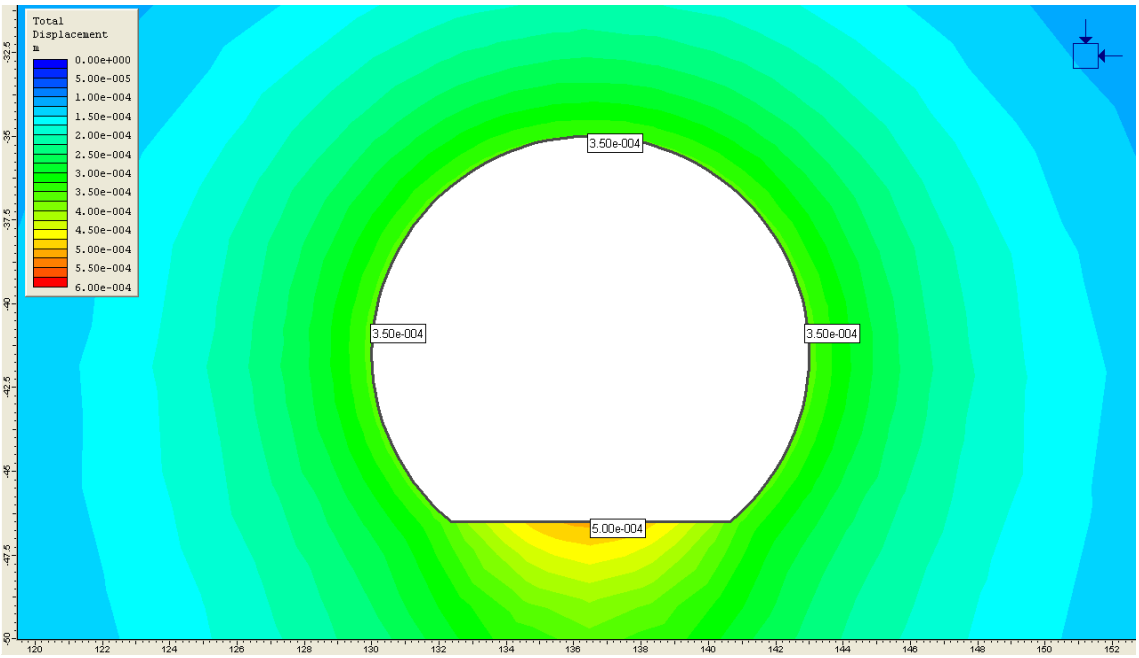
Çizelge 6.7. 176+000 -176+104 tünel aralığında analiz sonuçları

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	1.32	0.24	1.27	0.26	0.66	0.36
Tahkimatlı Aşama 3	30	1.88	0.35	1.80	0.35	0.97	0.5
Tahkimatsız Aşama 1	100	1.84	0.35	1.84	0.35	0.90	0.5

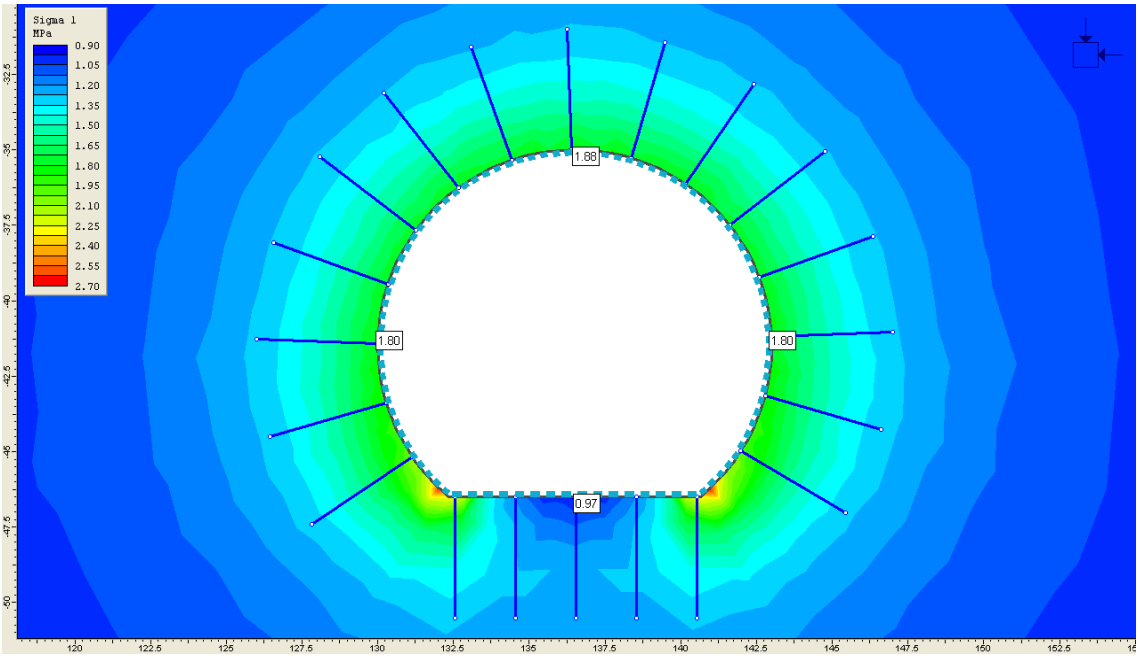
Şekil 6.6 a, b, c, d ve Çizelge 6.7' de sunulan sonuçlara göre tahkimatsız durumda en büyük yerdeğiştirmenin tünel tabanında olacağı (u_o = 0.5 mm) ancak tahkimat işleminden sonra tünel tabanındaki yerdeğişim miktarının u_1=0.5 mm seviyelerine ineceği anlaşılmaktadır. Benzer durum tünel tavanında u_0=1.12mm iken u_1=0.35 mm tünel yan cidarında ise u_0=0.35 mm iken u_1=0.35 mm olacağı belirlenmiştir. Tahkimat ünitesinin bu kesitte tahkimatsız durumdaki yer değişimleri, tünel tavanında %0, tünel yan cidarında % 0, tünel tabanında % 0 oranında engellediği belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre tahkimat ünitelerine görev düşmediği kaya kütlesinin kendi kendini taşıdığı anlaşılmaktadır.



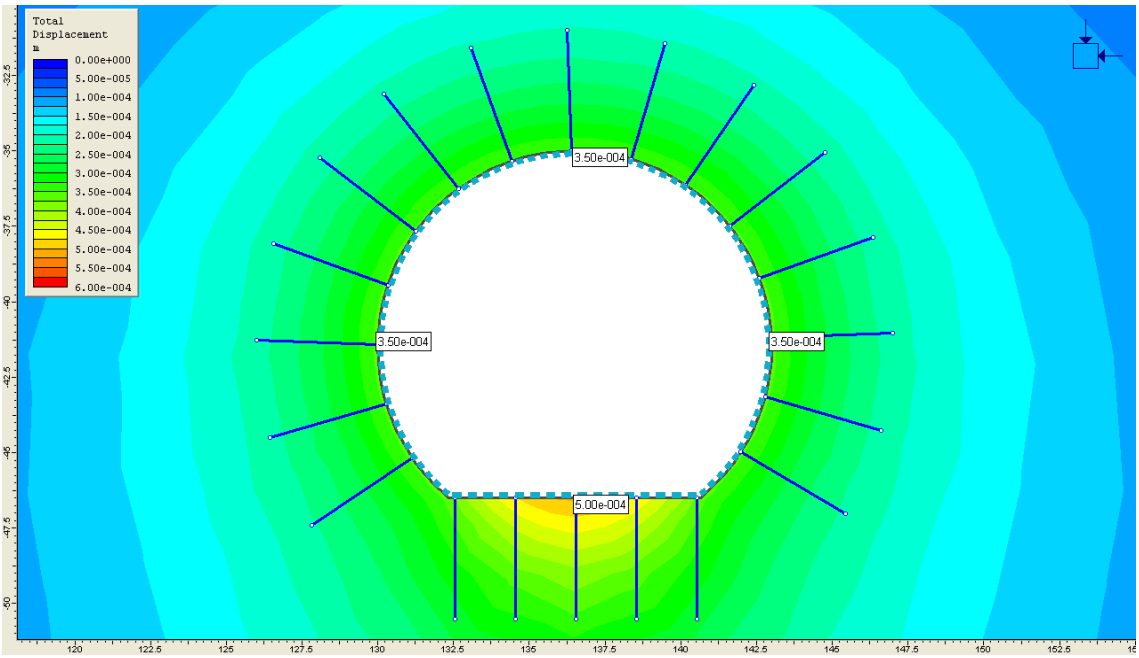
Şekil 6.6a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.6b Tahkimatsız durum için toplam Yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.6c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.6d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

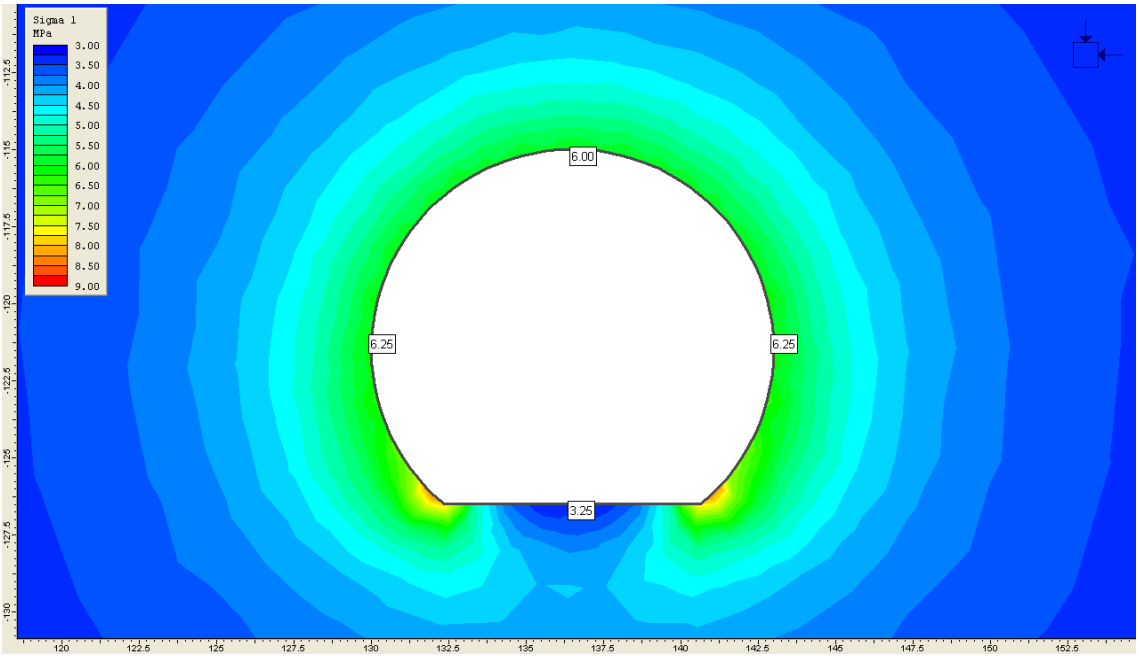
6.4.5. 176+104–176+524 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 5)

Tünelin 176+104–176+524 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası üzerinde yapılmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşama, ikinci dosya ise tahkimatsız durum için tek aşama içermektedir. Üç aşamalı tünel çalışması için sayısal çözümleme sonucunda belirlenen açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yerdeğiştirmeler Çizelge 6.8'de genel çözümleme sonuçlarını içeren iki boyutlu kesitler ise Şekil 6.7'de sunulmuştur.

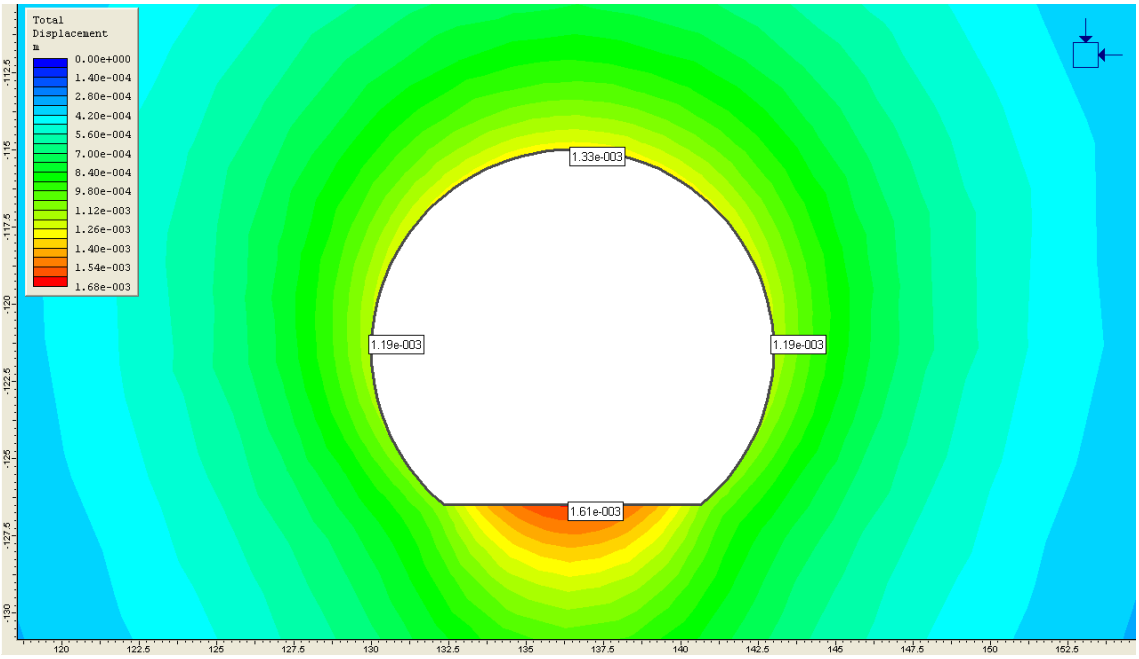
Çizelge 6.8. 176+104–176+524 tünel aralığında analiz sonuçları

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	4.20	0.9	4.40	0.85	2.40	1.15
Tahkimatlı Aşama 3	30	6.00	1.26	6.25	1.19	3.25	1.61
Tahkimatsız Aşama 1	100	6.00	1.33	6.25	1.19	3.25	1.61

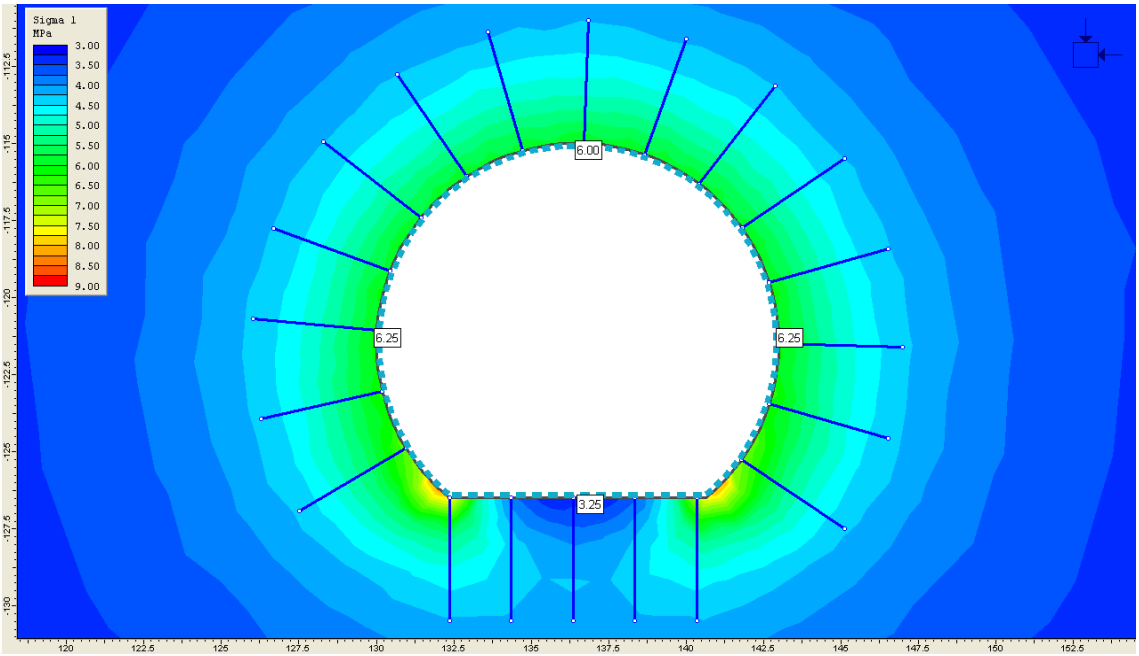
Tünelin 176+104–176+524 aralığına tekabül eden 420 m uzunluğundaki bölgede gerçekleştirilen tahkimatsız duruma ait analizlerde tünel tavanı, yan cidarı ve tabanında sırasıyla oluşabilecek yer değişim miktarları sırası ile u_0=1.33, 1.19, 1.61 mm'dir. Tahkimat yerleştirildikten sonra aynı tünel noktalarında beklenen yer değişimlerin u_1=1.26, 1.19 ve 1.61 mm olması tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre tahkimat üniteleri tahkimat görevini yerine getirdiği anlaşılmaktadır(şekil 6.7 ve çizelge 6.8). Tahkimat performansı incelendiğinde yüzdesel olarak tünel tavanında yan cidarında ve tabanında sırasıyla % 5, % 0 ve % 0 oranında yer değişimlerin tahkimat tarafından önleneceği görülmektedir



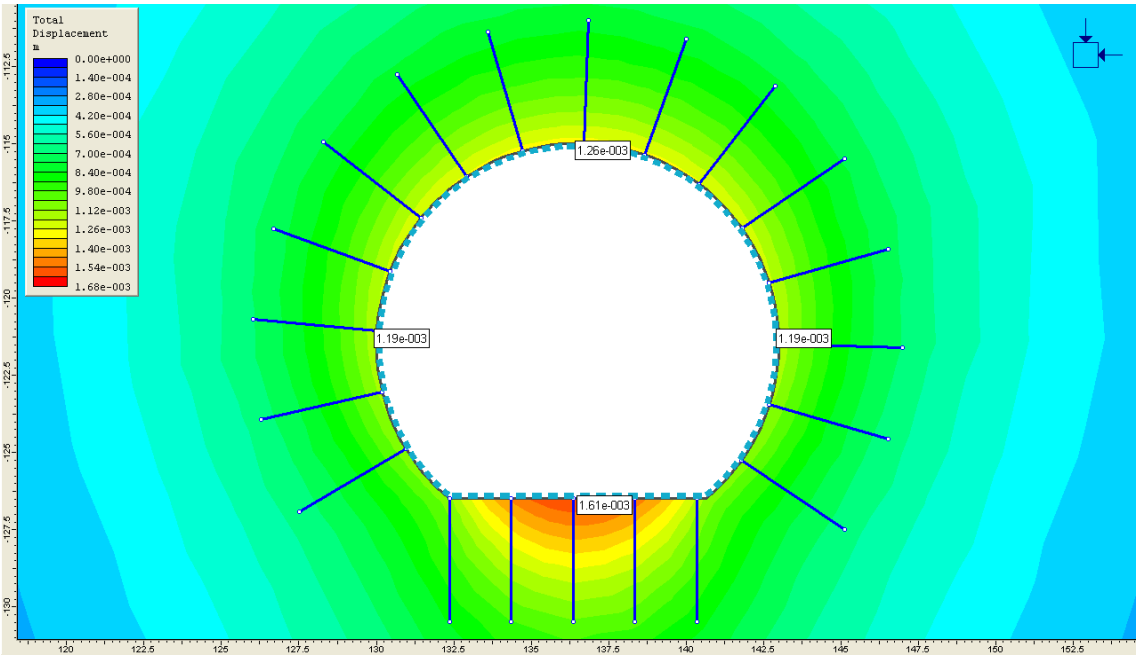
Şekil 6.7a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.7b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.7c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.7d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

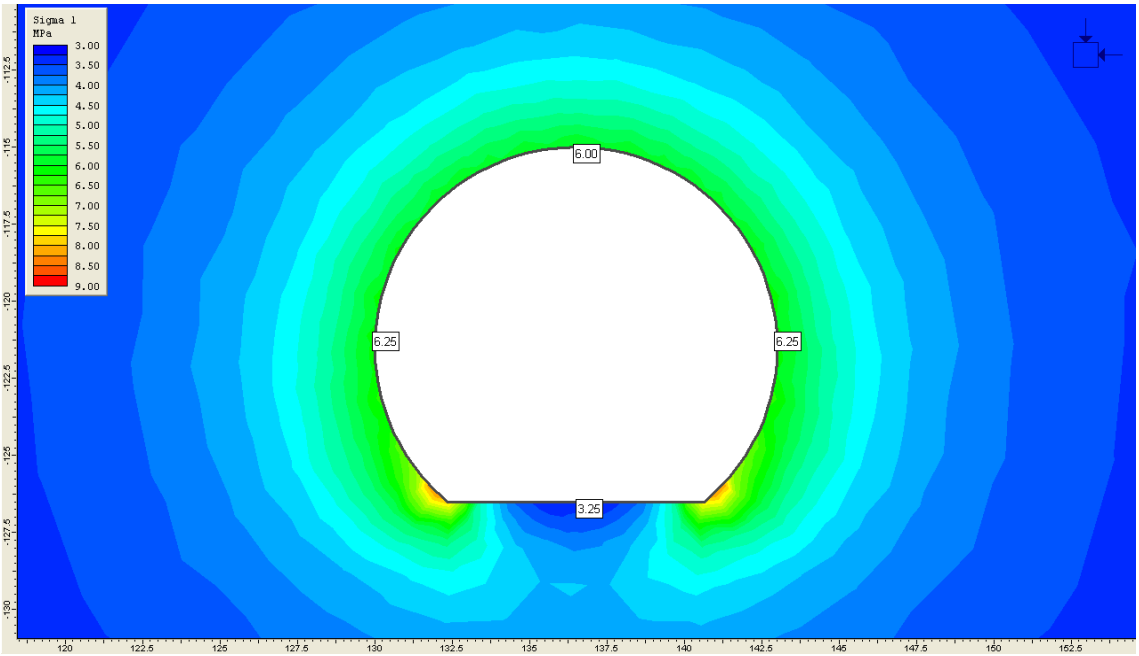
6.4.6. 176+524–176+555 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 6)

Tünelin 176+524–176+555 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık çözümlemesinde sonuçlarının kontrolü için bu aralıkta iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşama içerirken ikinci dosya tahkimatsız durum için tek aşama içermektedir. Tahkimatlı durumda açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeler Şekil 6.8 ve Çizelge 6.9'da görülmektedir.

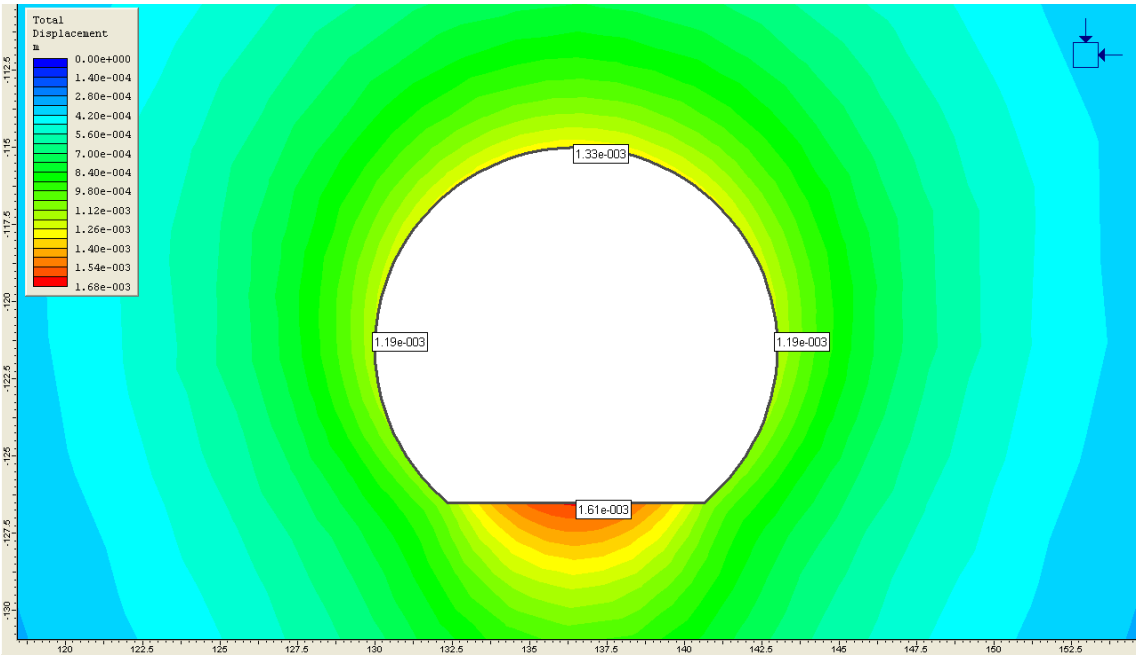
Çizelge 6.9. 176+524–176+555 tünel aralığında analiz sonuçları

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	4.20	0.9	4.40	00.85	2.40	1.15
Tahkimatlı Aşama 3	30	6.00	1.26	6.25	1.19	3.50	1.61
Tahkimatsız Aşama 1	100	6.00	1.33	6.25	1.19	3.25	1.61

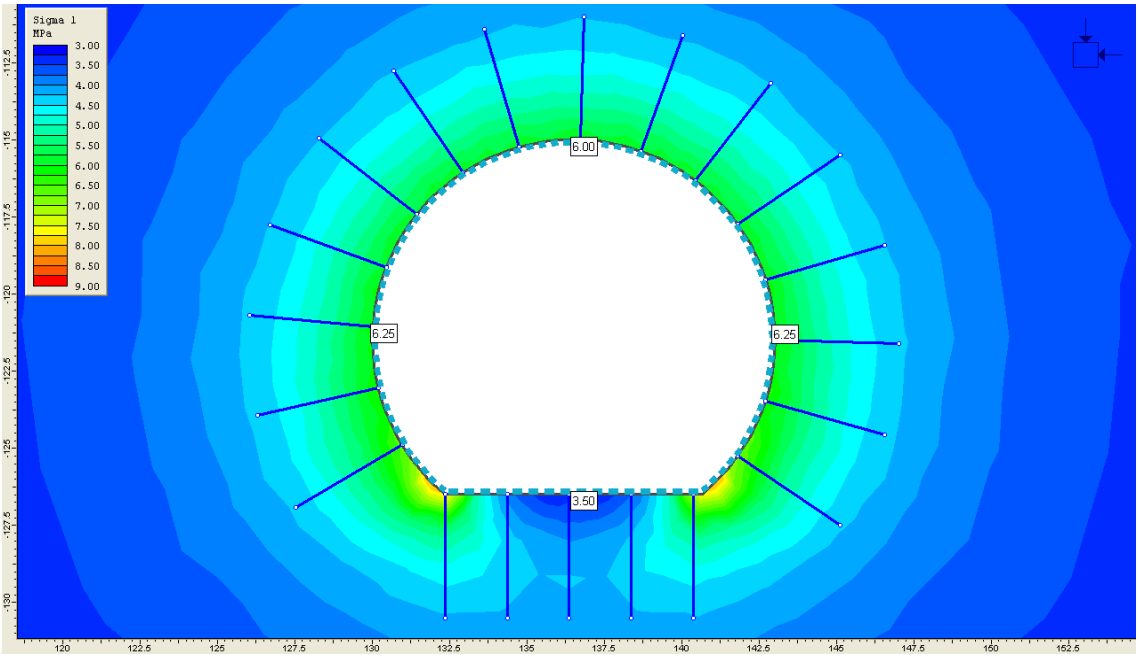
Şekil 6.8a, b, c, d ve Çizelge 6.9'de sunulan sonuçlara göre 176+524–176+555 aralığında gerçekleştirilen analizlerde tahkimatsız kazı açıklığının tavanında, yan cidarında ve tabanında yerdeğişim u_0=1.33, 1.19 ve 1.61 mm iken kazı açıklığında tahkimat yapılması sonucunda bu yerdeğişimlerin u_1=1.26, 1.19 ve 1.61 mm seviyelerinde kalacağı tahmin edilmektedir. Tahkimat performansı ise % 5.9, % 0 ve % 0 seviyelerinde olacağı görülmektedir.



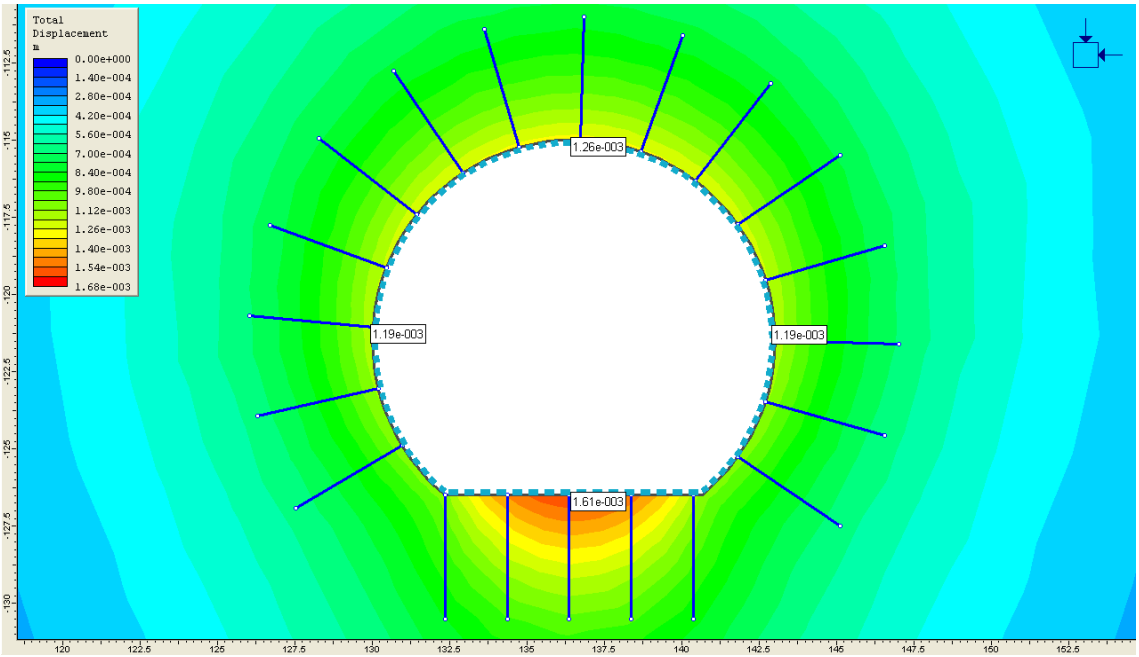
Şekil 6.8a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6. 8b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6. 8c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6. 8d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

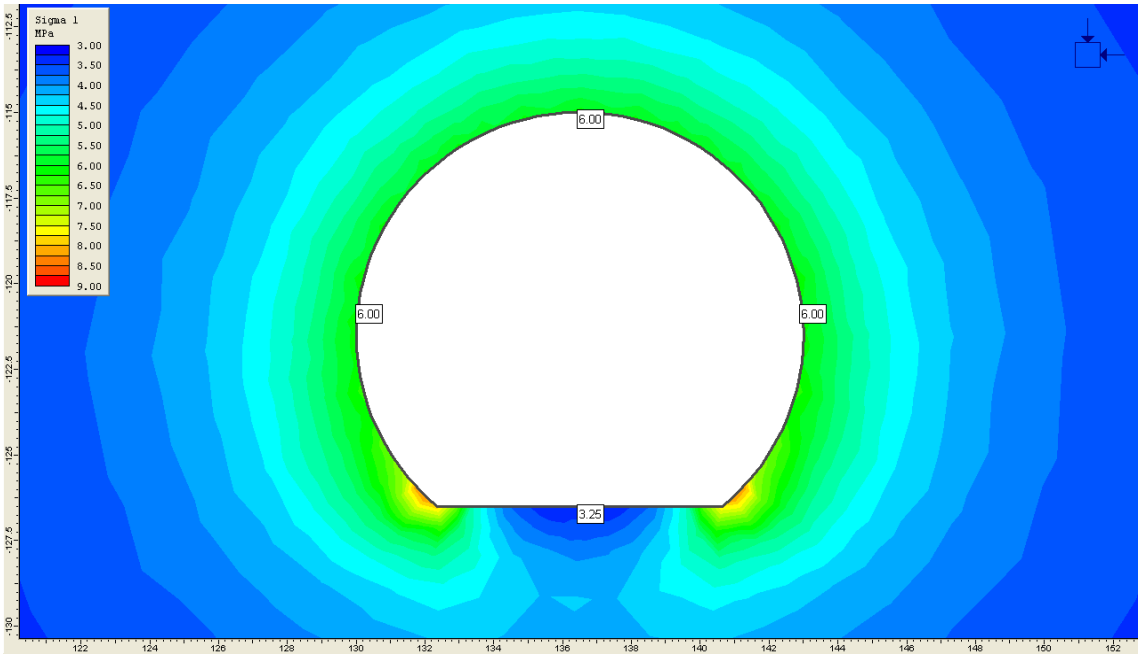
6.4.7. 176+555–176+797 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 7)

Tünelin Afyon girişi olan 176+555–176+797 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) PHASE2 yardımıyla duraylılık çözümlemesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralık için iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşamadan oluşurken ikinci dosya tahkimatsız durum için tek aşamalı oluşturulmuştur. Üç aşamalı tünel çalışması için çözümlemesi sonucunda belirlenen açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yerdeğiştirmeler Çizelge 6.10'da sunulurken genel çözümleme sonuçları Şekil 6.9'da görülmektedir.

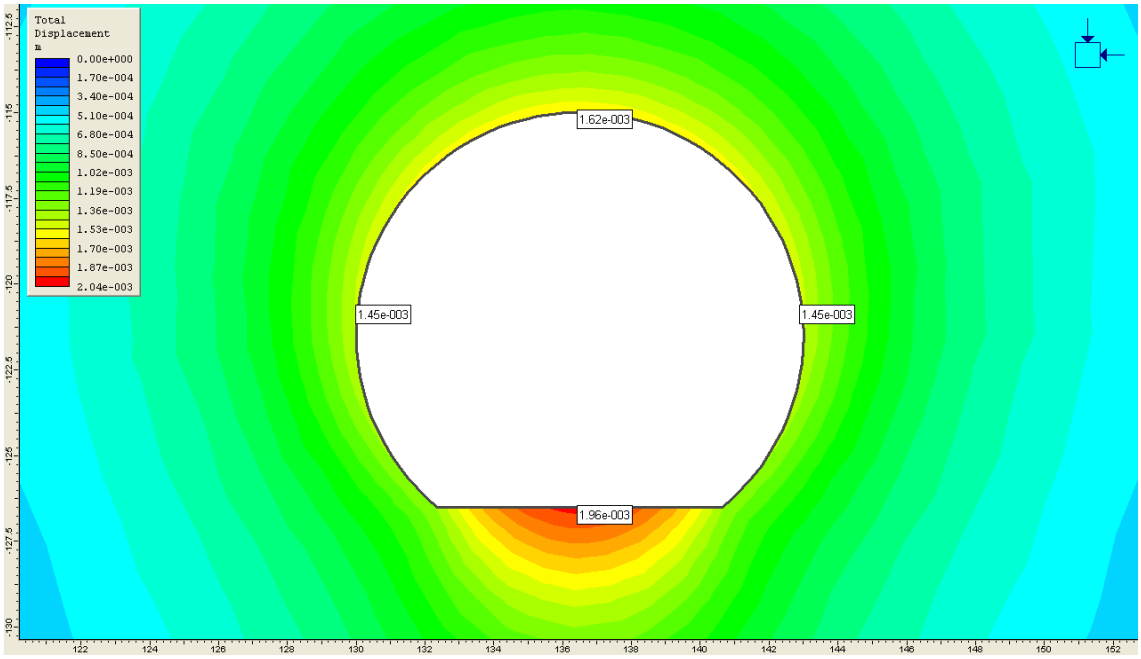
Çizelge 6.10. 176+555–176+797 tünel aralığında analiz sonuçları.

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	4.20	1.14	4.40	1.02	2.40	1.38
Tahkimatlı Aşama 3	30	6.00	1.53	6.00	1.45	3.50	1.96
Tahkimatsız Aşama 1	100	6.00	1.62	6.00	1.45	3.25	1.96

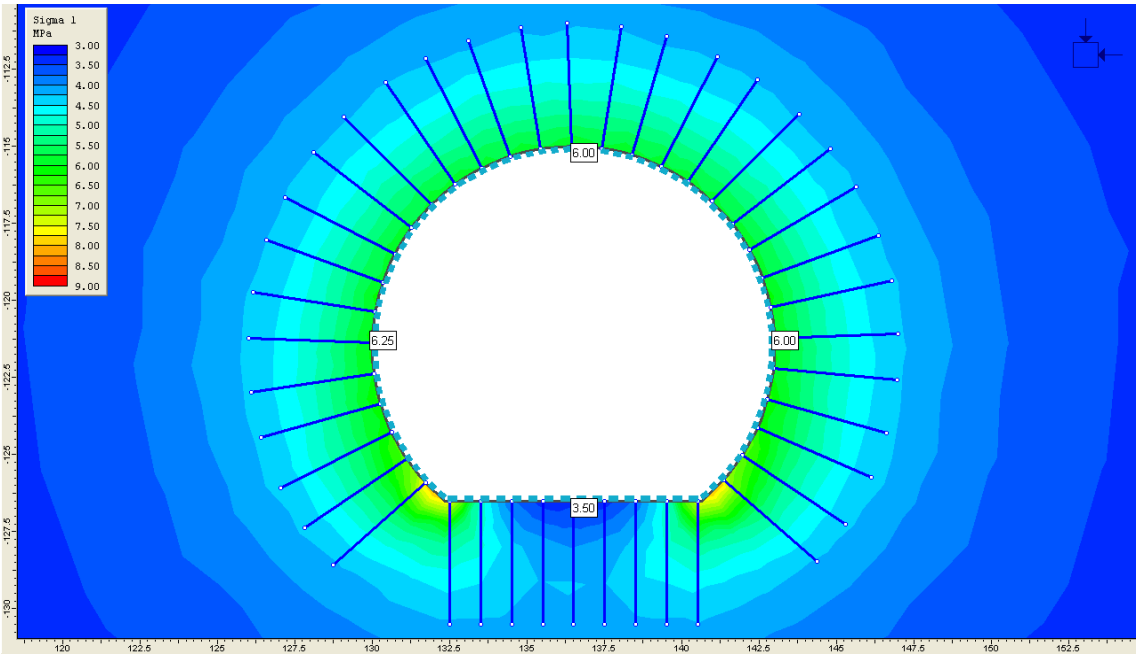
Şekil 6.9 a, b, c, d ve Çizelge 6.10' da sunulan sonuçlara göre tahkimatsız durumda en büyük yer değiştirmenin tünel tabanında olacağı (u_o = 1.96 mm) ancak tahkimat işleminden sonra tünel tabanındaki yer değişim miktarının u_1=1.96 mm seviyelerine ineceği görülmektedir. Benzer durum tünel tavanında u_0=1.62 mm iken u_1=1.53 mm olacağı tünel yan cidarında ise u_0=1.45 mm iken u_1=1.45 mm olacağı anlaşılmıştır. Bu sonuçlara göre tahkimat ünitelerinin görev yaptığı görülmektedir. Tahkimat ünitesinin bu kesitte yerdeğişimleri, tünel tavanında % 6, tünel yan cidarında % 0, tünel tabanında % 0 oranında engellediği belirlenmiştir



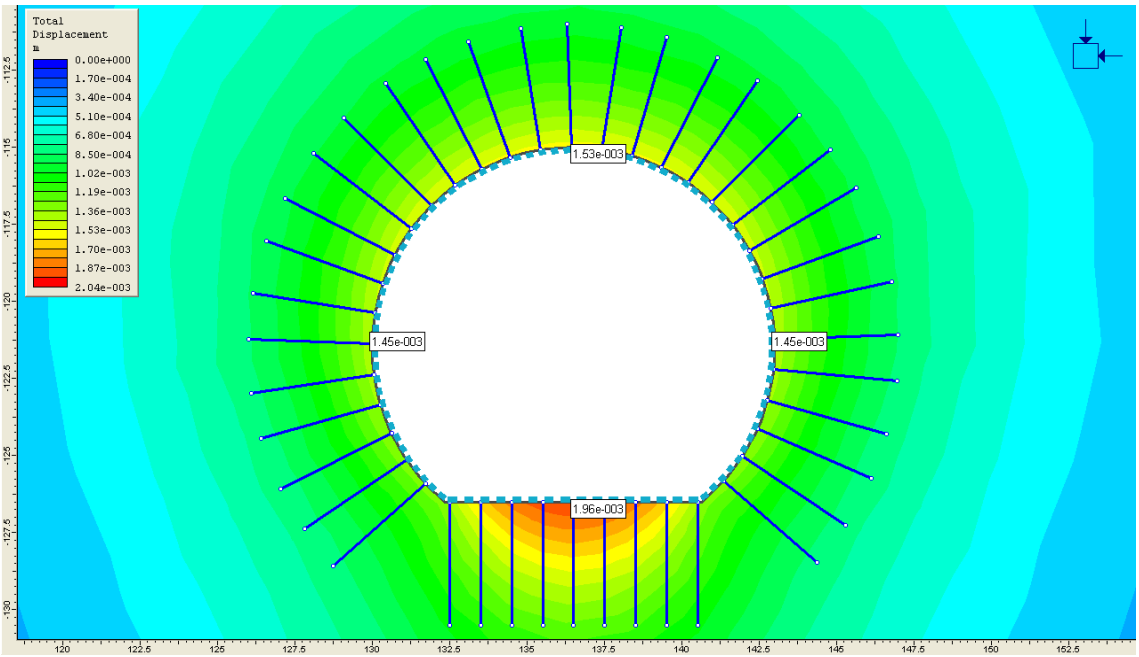
Şekil 6.9a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.9b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.9c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.9d Tahkimatlı durum için yer değiştirme dağılımı

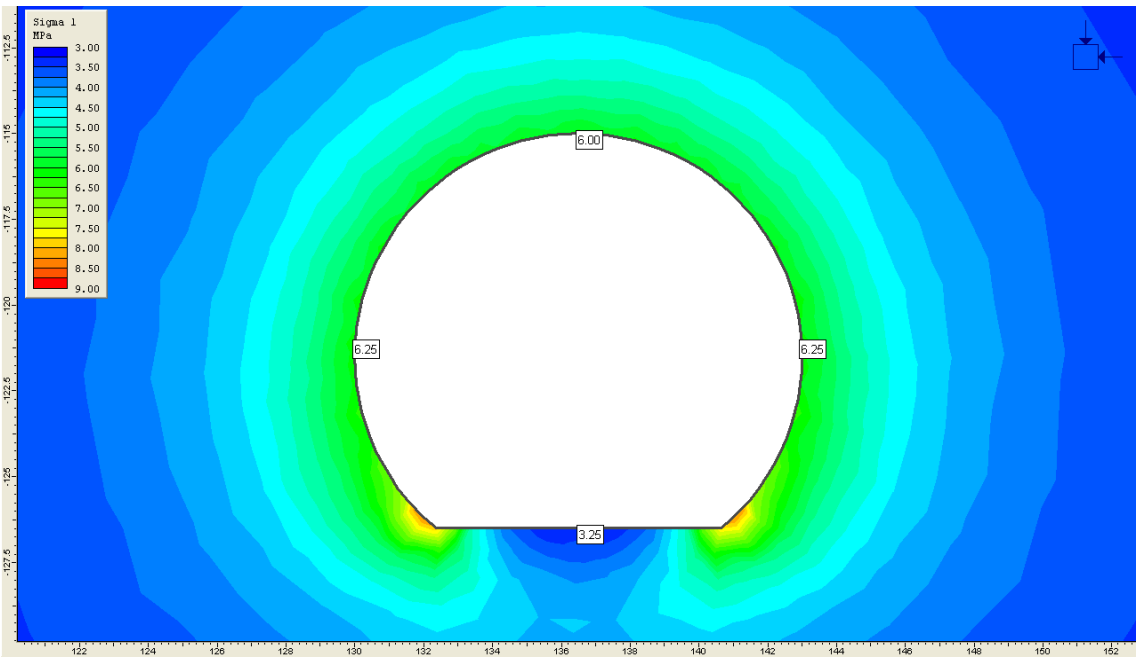
6.4.8. 176+797–176+832 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 8)

Şekil 6.1!de sunulan tünelin plan görünüşüne göre tünelin 176+797–176+832 jeoteknik aralığında duraylılık çözümlemesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralıktaki kesit için tahkimatsız ve tahkimatlı durum incelenmesi iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası üzerinde yapılmıştır. İlk dosya tahkimatsız durum için tek aşama içerirken ikinci dosya tahkimatlı durum için üç aşama içermektedir. Tahkimatlı analizde üç aşamalı tünel çalışması için belirlenen açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeleri ve yer değiştirmeleri gösteren PHASE2 çıktıları Şekil 6.10'de bu kesitlerden elde edilen sayısal sonuçlar ise Çizelge 11'de sunulmuştur.

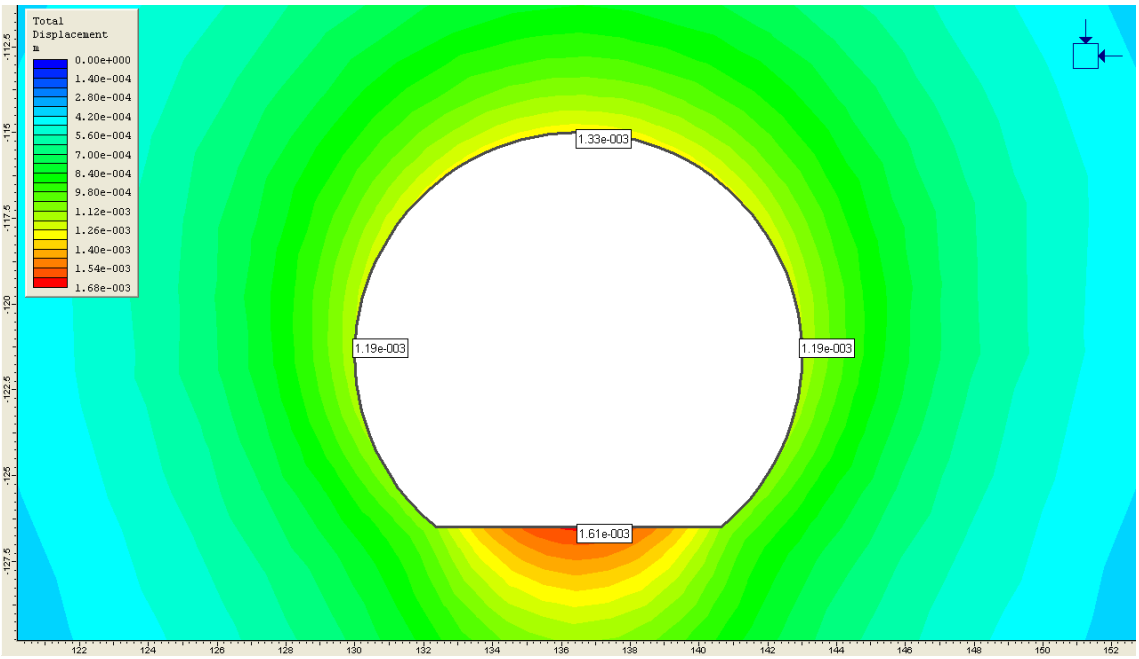
Çizelge 6.11. 176+797–176+832 tünel aralığında analiz sonuçları

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	4.20	0.9	4.20	0.85	2.40	1.15
Tahkimatlı Aşama 3	30	6.00	1.26	6.00	1.19	3.25	1.61
Tahkimatsız Aşama 1	100	6.00	1.33	6.25	1.19	3.25	1.61

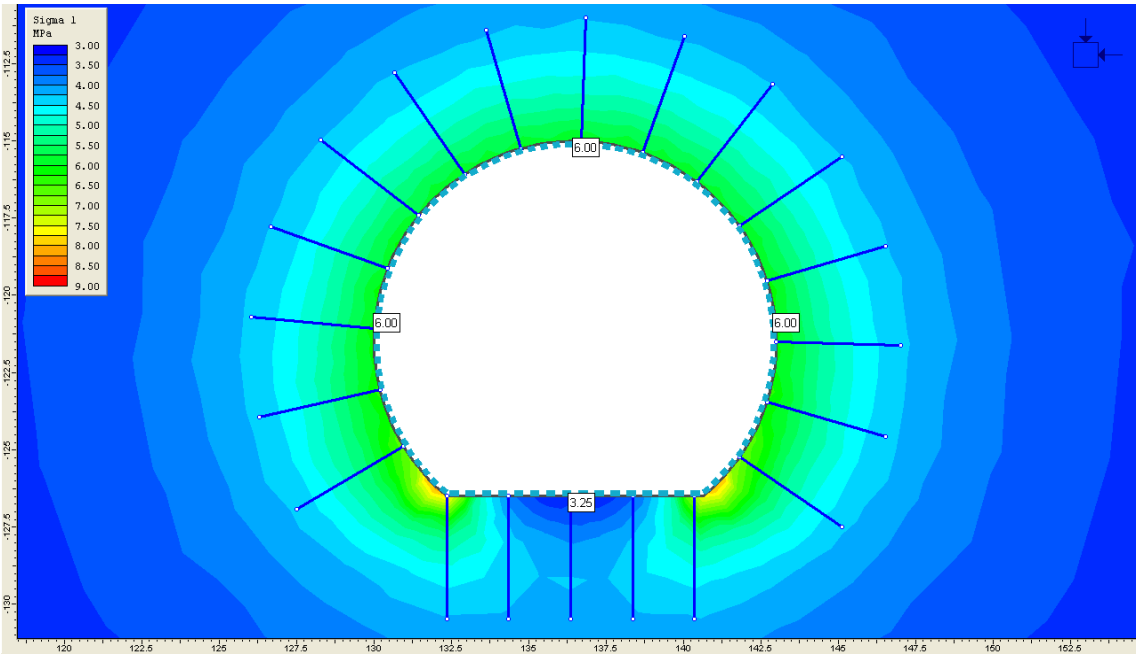
Tünelin 176+797–176+832 aralığına tekabül eden 35m uzunluğundaki bölgede gerçekleştirilen tahkimatsız duruma ait analizlerde tünel tavanı, yan cidarı ve tabanında sırasıyla oluşabilecek yerdeğişim miktarları sırası ile u_0=1.33, 1.19, 1.61 mm'dir. Tahkimat yerleştirildikten sonra aynı tünel noktalarında beklenen yerdeğişimlerin u_1=1.26, 1.19 ve 1.61 mm olması tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre tahkimat üniteleri tahkimat görevini yerine getirdiği anlaşılmaktadır(Şekil 6.10 ve Çizelge 6.11). Tahkimat performansı incelendiğinde yüzdesel olarak tünel tavanında yan cidarında ve tabanında sırasıyla % 5, % 0 ve % 0 oranında yer değişimlerin tahkimat tarafından önleneceği görülmektedir.



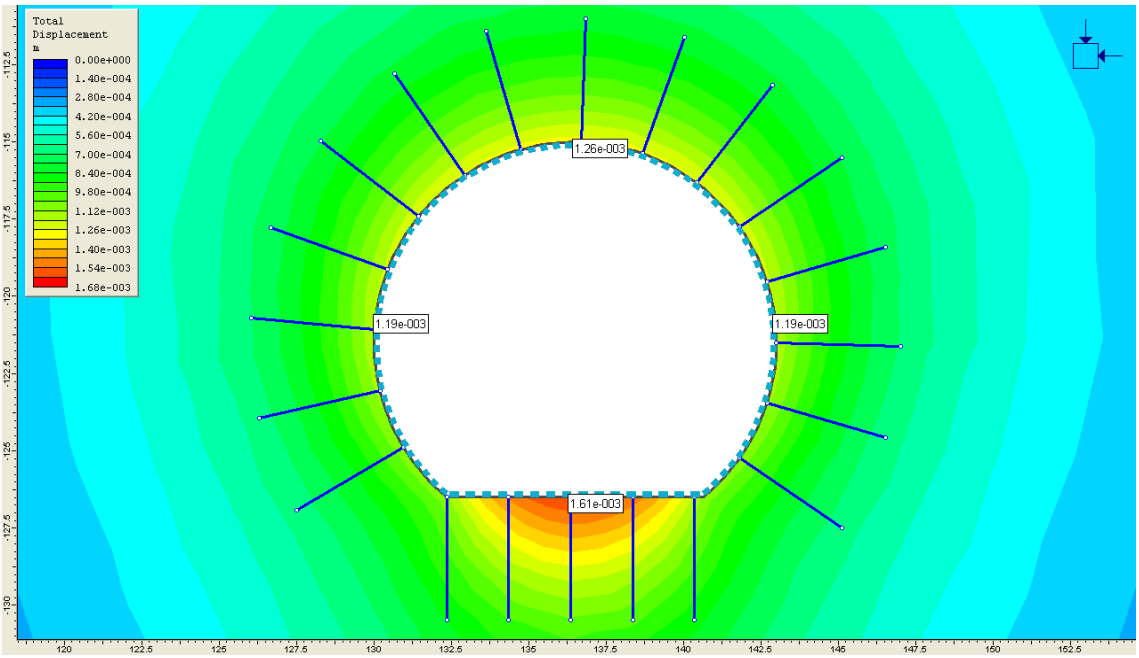
Şekil 6.10a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



6.10b Tahkimatsız durum için en büyük toplam yer değiştirme dağılımı



6.10c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.10d Tahkimatlı durum için yer değiştirme dağılımı

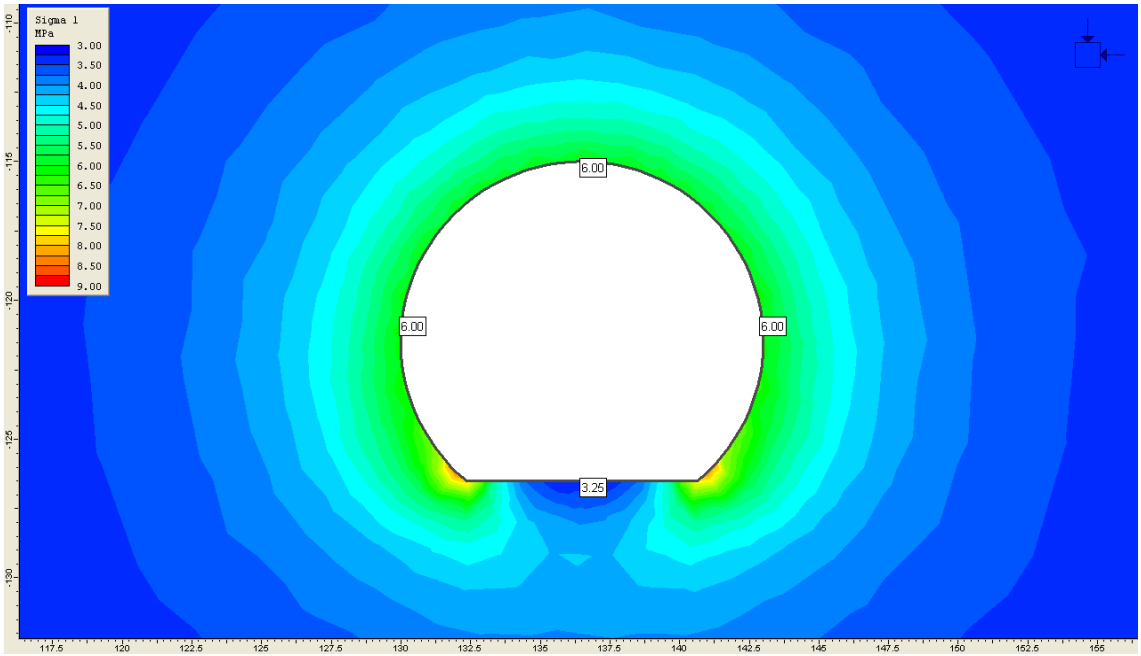
6.4.9. 176+832–176+842 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 9)

Tünelin 176+832–176+842 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık çözümlemesinde analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralıkta iki ayrı model dosya hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşama içerirken ikinci dosya tahkimatsız durum için tek aşama içermektedir. Tahkimatlı durumda açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeler Şekil 6.11 ve Çizelge 6.12'de görülmektedir..

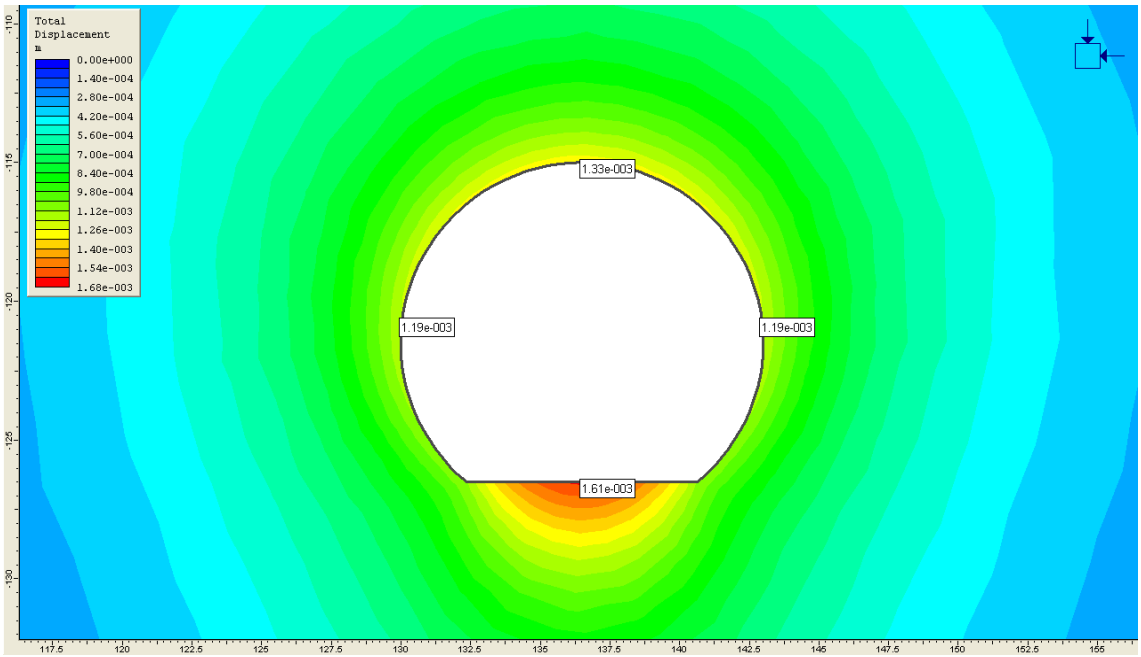
Çizelge 6.12. 176+832 -176+842 tünel aralığında analiz sonuçları.

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	4.20	0.9	4.40	0.85	2.40	1.15
Tahkimatlı Aşama 3	30	6.00	1.26	6.25	1.19	3.50	1.61
Tahkimatsız Aşama 1	100	6.00	1.33	6.00	1.19	3.25	1.61

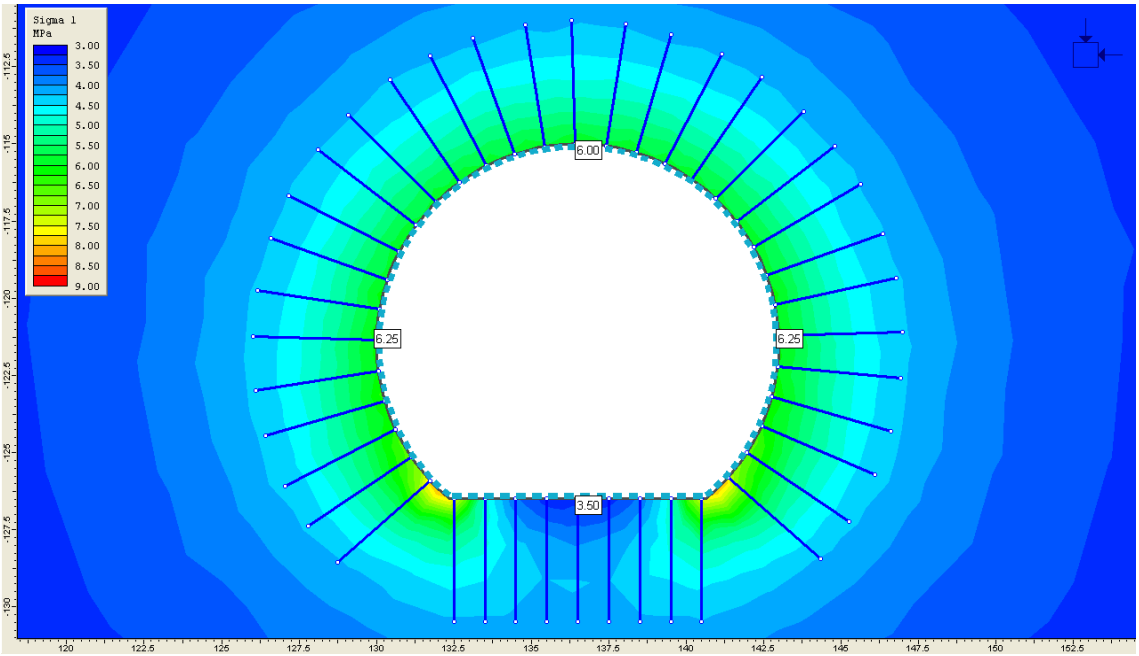
Şekil 6.11 a, b, c, d ve Çizelge 6.12'de sunulan sonuçlara göre 176+832–176+842 aralığında gerçekleştirilen analizlerde tahkimatsız kazı açıklığının tavanında, yan cidarında ve tabanında yerdeğişim u_0=1.33, 1.19 ve 1.61 mm seviyelerinde kazı açıklığının tahkimatı yapılması ile bu yerdeğişimlerin u_1=1.26, 1.19 ve 1.61 mm seviyelerinde kalacağı analizleri görülmektedir. Tahkimat performansının ise %5, % 0 ve % 0 seviyelerinde olacağı görülmektedir.



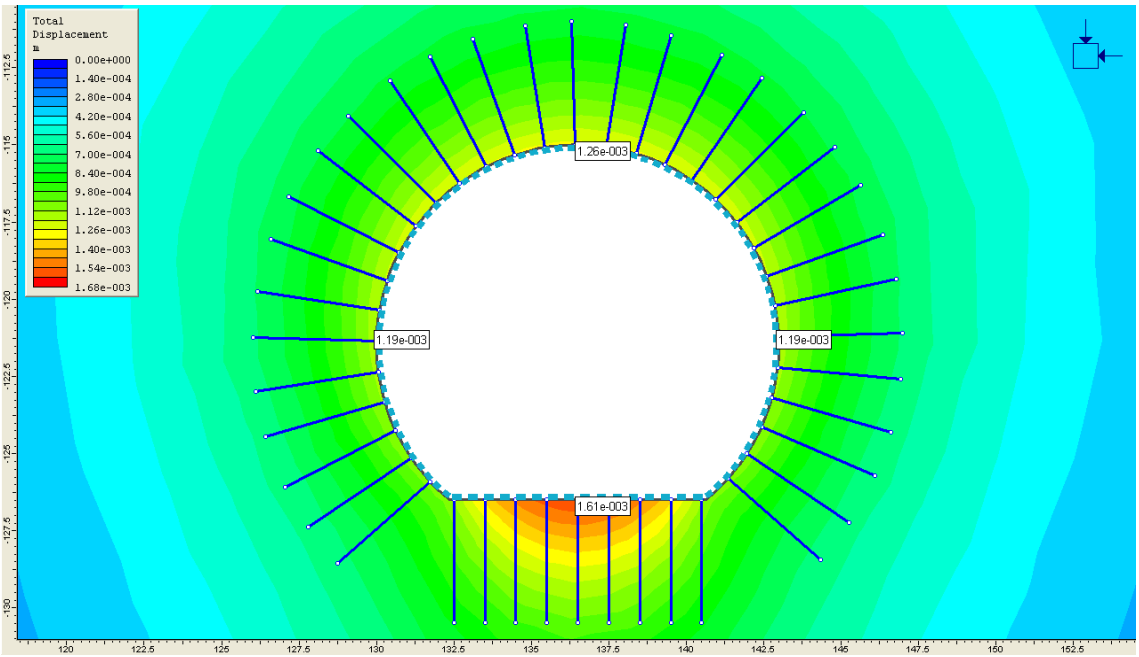
Şekil 6.11a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.11b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.11c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



6.11d Tahkimatlı durum için yer değiştirme dağılımı

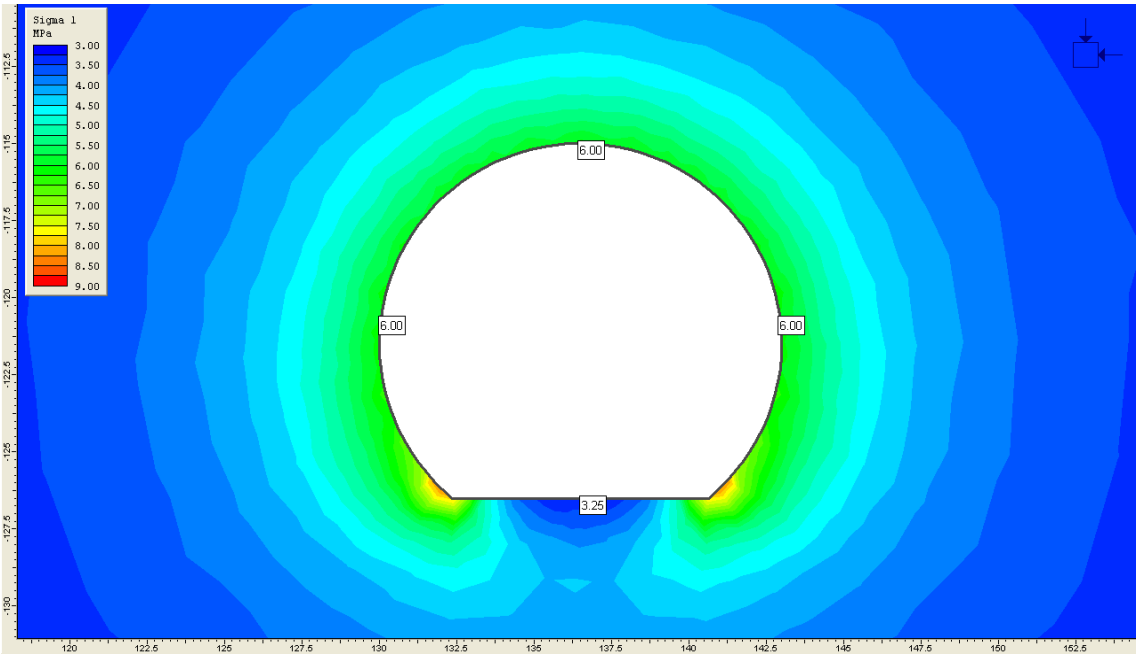
6.4.10. 176+842–177+100 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 10)

Tünelin 176+842–177+100 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) duraylılık çözümlemesi için iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. Tahkimatlı durum için hazırlanan dosya üç aşama içerirken tahkimatsız durum için hazırlanan dosya tek aşama içermektedir. Üç aşamalı tünel çalışması için gerçekleştirilen sayısal çözümleme sonucunda belirlenen sonuçlara göre açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeler Çizelge 6.13'de sunulurken genel çözümleme sonuçlarını içeren iki boyutlu kesitler ise Şekil 6.12'de görülmektedir.

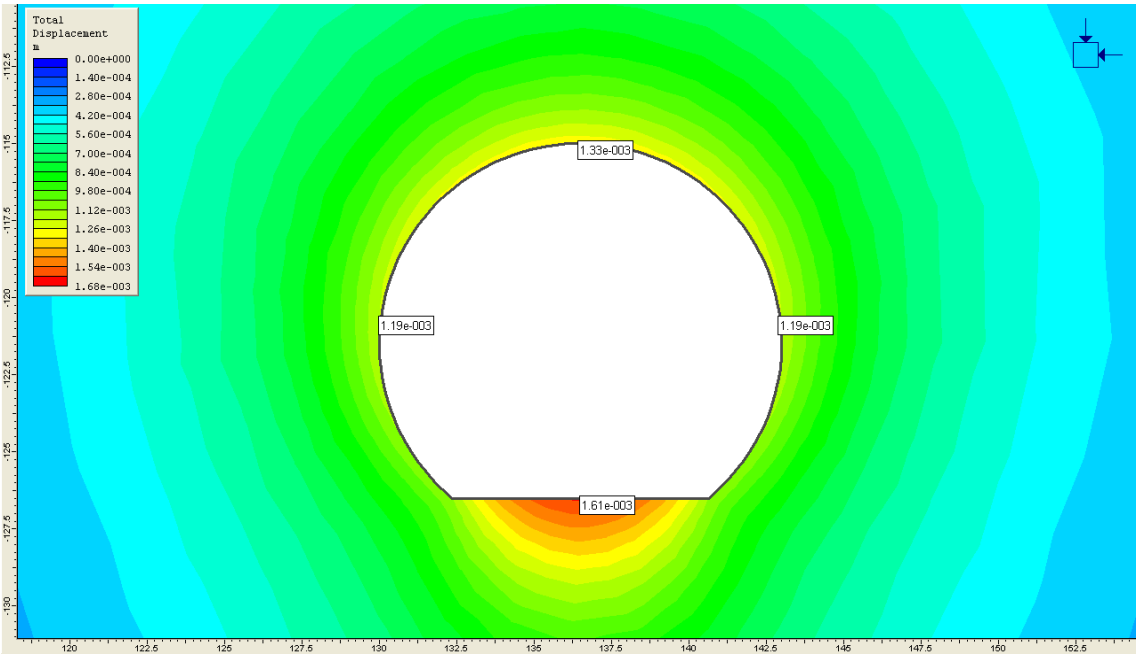
Çizelge 6.13. 176+842 -177+100 tünel aralığında analiz sonuçları

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	4.20	0.9	4.40	0.85	2.40	1.15
Tahkimatlı Aşama 3	30	6.00	1.26	6.25	1.19	3.50	1.61
Tahkimatsız Aşama 1	100	6.00	1.33	6.00	1.19	3.25	1.61

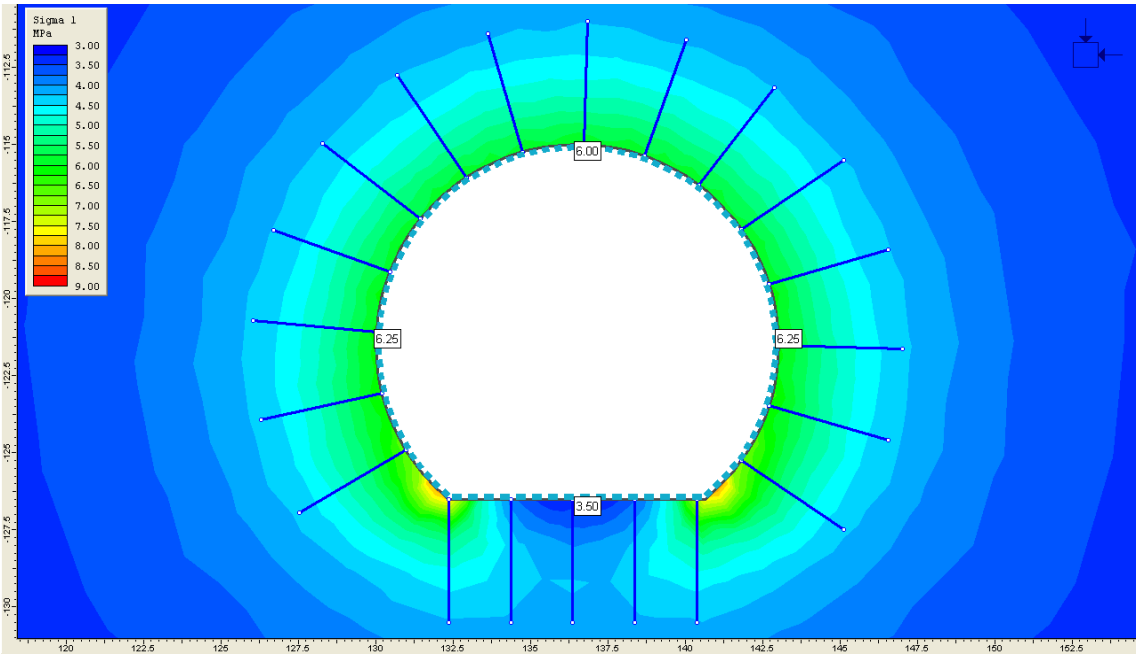
Şekil 6.12 a, b, c, d ve Çizelge 6.13' de sunulan sonuçlara göre tahkimatsız durumda en büyük yer değiştirmenin tünel tabanında olacağı (u_o = 1.61 mm) ancak tahkimat işleminden sonra tünel tabanındaki yer değişim miktarının u_1=1.61 mm seviyelerine ineceği anlaşılmaktadır. Benzer durum tünel tavanında tahkimatsız durumda u_0=1.33 mm iken tahkimatlı durumda u_1=1.26 mm olacağı tünel yan cidarında ise bu durumun u_0 ile u_1'in aynı (1.19 mm) seviyelerinde olacağı belirlenmiştir. Tahkimat ünitesinin bu kesitte tahkimatsız duruma göre yer değişimleri, tünel tavanında % 5, tünel yan cidarında % 0, tünel tabanında % 0 oranında engellediği anlaşılmıştır.



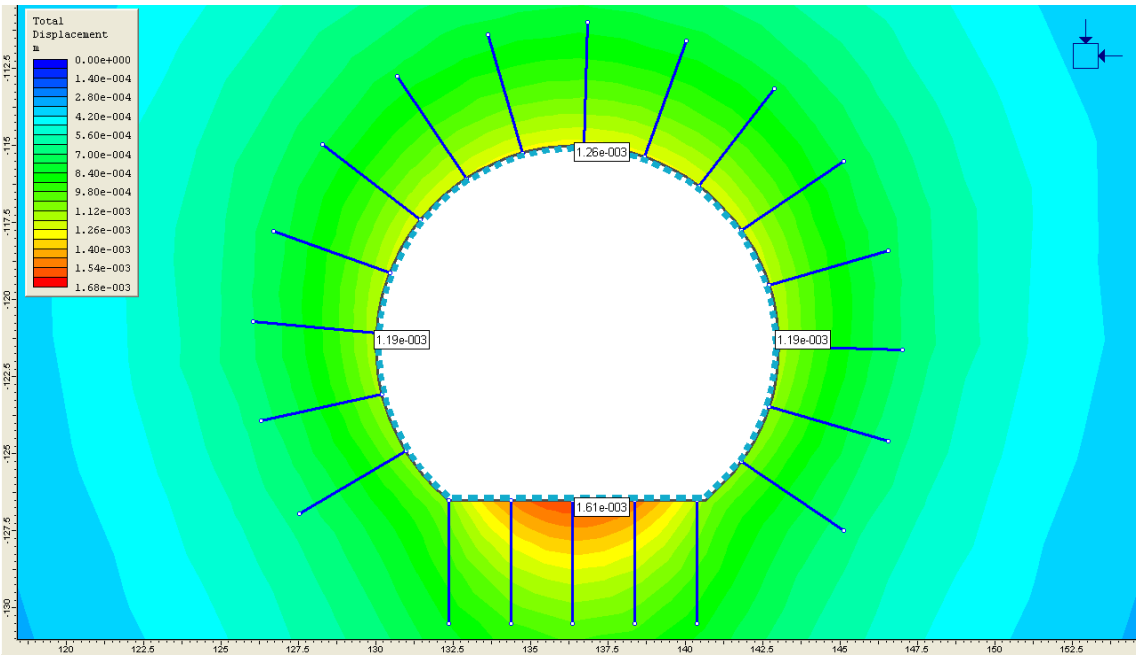
Şekil 6.12a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.12b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.12c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.12d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

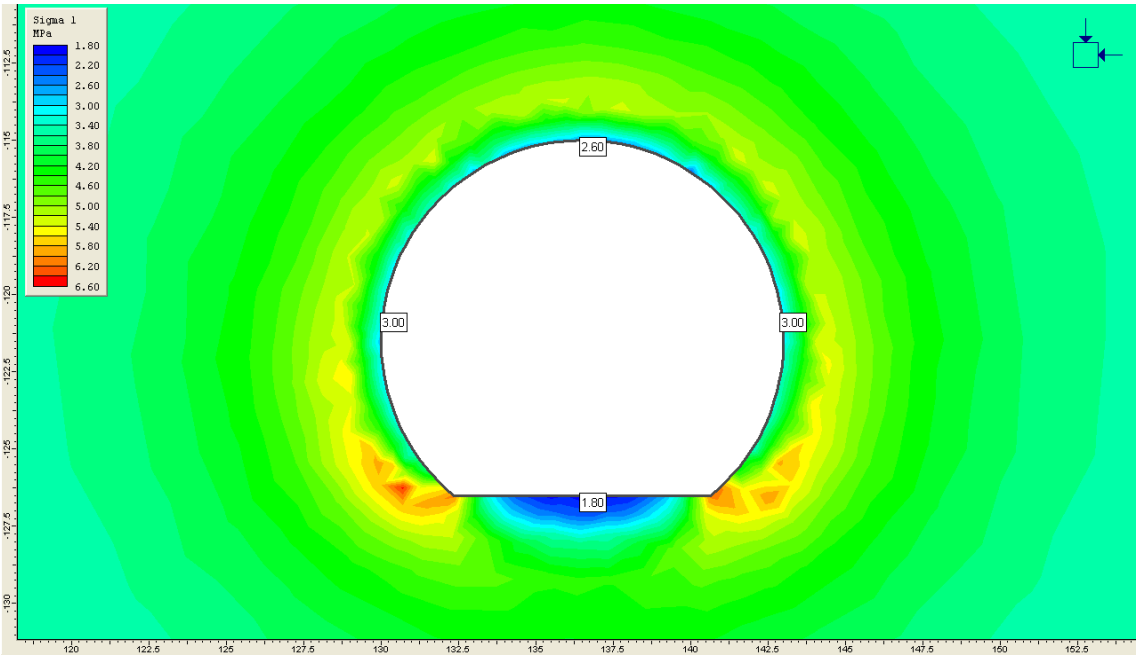
6.4.11. 177+100–177+380 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 11)

Şekil 6.1'de sunulan tünelin plan görünüşüne göre tünelin 177+100–177+380 jeoteknik aralığında duraylılık çözümlemesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralıkta analizler, tahkimatsız ve tahkimatlı durum iolmak üzere iki ayrı PHASE2 dosyası üzerinde yapılmıştır. Tahkimatsız durum tek aşamalı olup tahkimatlı durum ise üç aşama içermektedir. Sayısal analizlerde açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında belirlenen ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeleri gösteren PHASE2 çıktıları Şekil 6.13'te bu kesitlerden elde edilen sayısal sonuçlar ise Çizelge 6.14'te sunulmuştur.

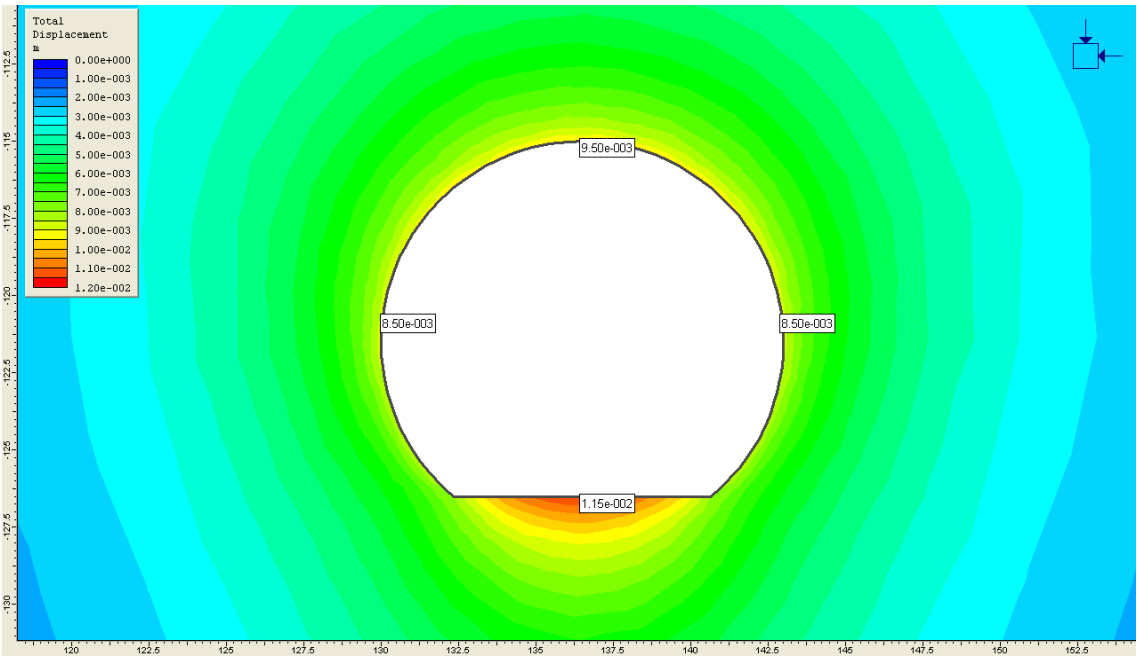
Çizelge 6.14. 177+100 -177+380 tünel aralığında analiz sonuçları.

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	2.55	6.3	2.85	5.6	1.80	7.35
Tahkimatlı Aşama 3	30	4.20	8.1	4.40	7.65	2.80	9.9
Tahkimatsız Aşama 4	100	2.60	9.5	3.00	8.5	1.80	11.5

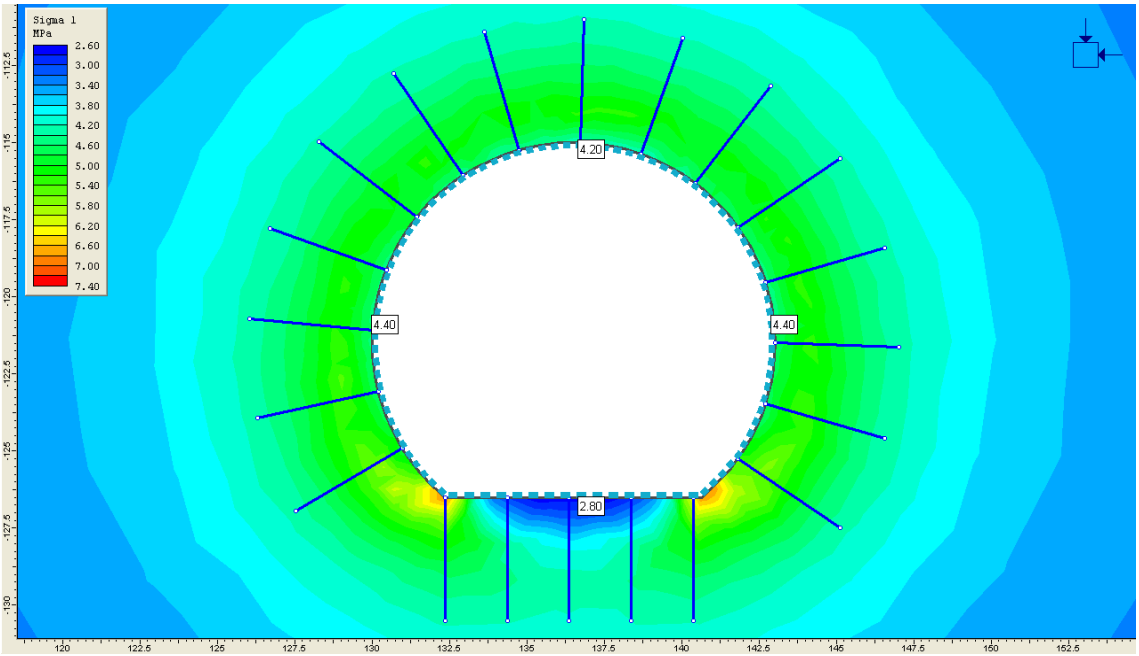
Tünelin 177+100–177+380 aralığına tekabül eden 280m uzunluğundaki bölgede gerçekleştirilen tahkimatsız duruma ait analizlerde tünel tavanı, yan cidarı ve tabanında sırasıyla oluşabilecek yer değişim miktarları sırası ile u_0=9.5, 8.5, 11.5 mm'dir. Tahkimat yerleştirildikten sonra aynı tünel noktalarında beklenen yer değişimlerin u_1=8.1, 7.66 ve 9.9 mm olması tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre tahkimat üniteleri tahkimat görevini yerine getirdiği anlaşılmaktadır (Şekil 6.13 ve Çizelge 6.14). Tahkimat performansı incelendiğinde yüzdesel olarak tünel tavanında yan cidarında ve tabanında sırasıyla % 15, % 10 ve % 14 oranında yer değişimlerin tahkimat tarafından önleneceği görülmektedir.



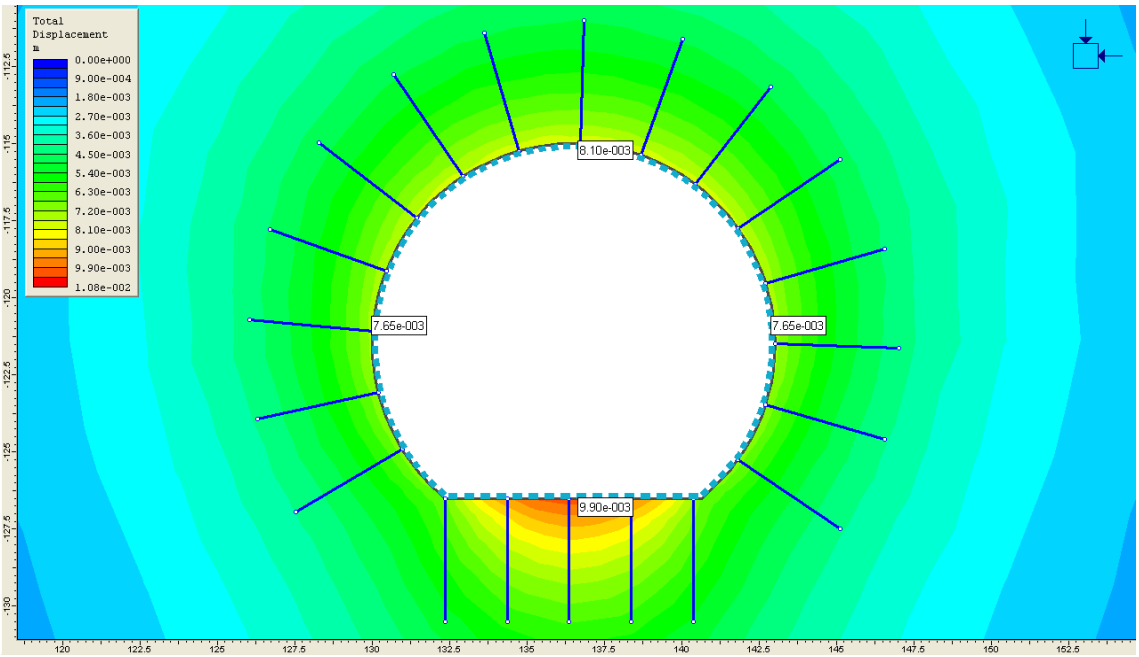
Şekil 6.13a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.13b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.13c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.13d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

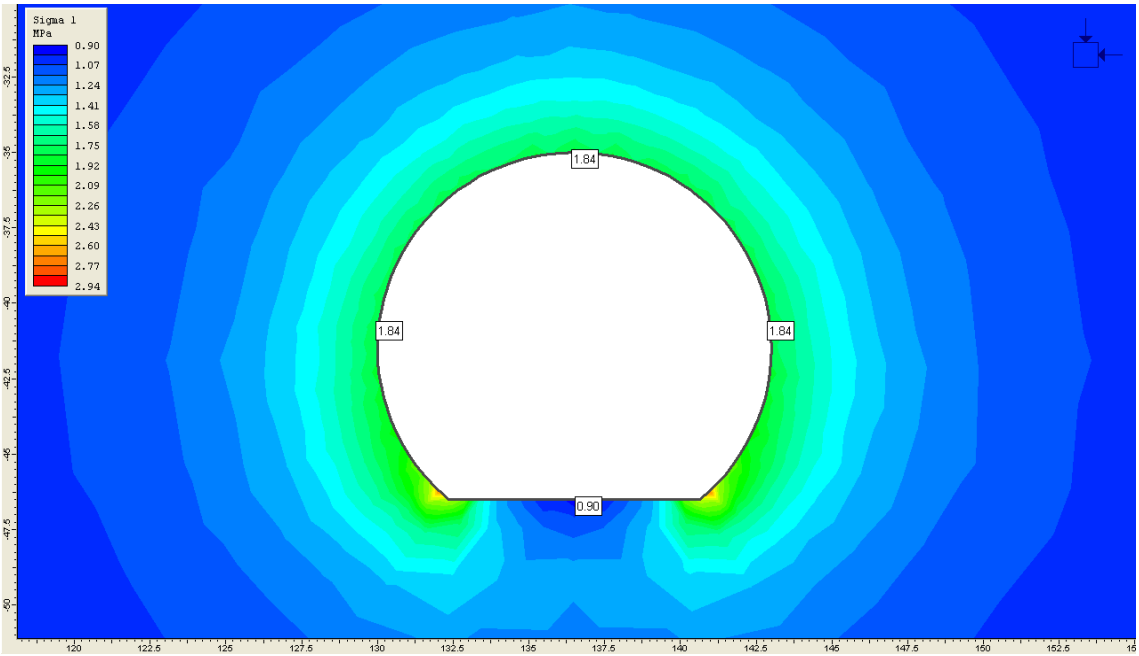
6.4.12. 177+380–177+390 Jeoteknik Tünel Aralığında Duraylılık Analizi (Analiz 12)

Tünelin 177+380–177+390 jeoteknik aralığında (Şekil 6.1) gerçekleştirilen duraylılık çözümlemesinde analiz sonuçlarının kontrolü için bu aralıkta iki ayrı fez uzantılı PHASE2 dosyası hazırlanmıştır. İlk dosya tahkimatlı durum için üç aşama içerirken ikinci dosya tahkimatsız durum için tek aşama içermektedir. Tahkimatlı durumda açıklık tavanında, yan cidarında ve tabanında oluşacak ikincil gerilmeler ve yer değiştirmeler Şekil 6.14 ve Çizelge 6.15'de görülmektedir.

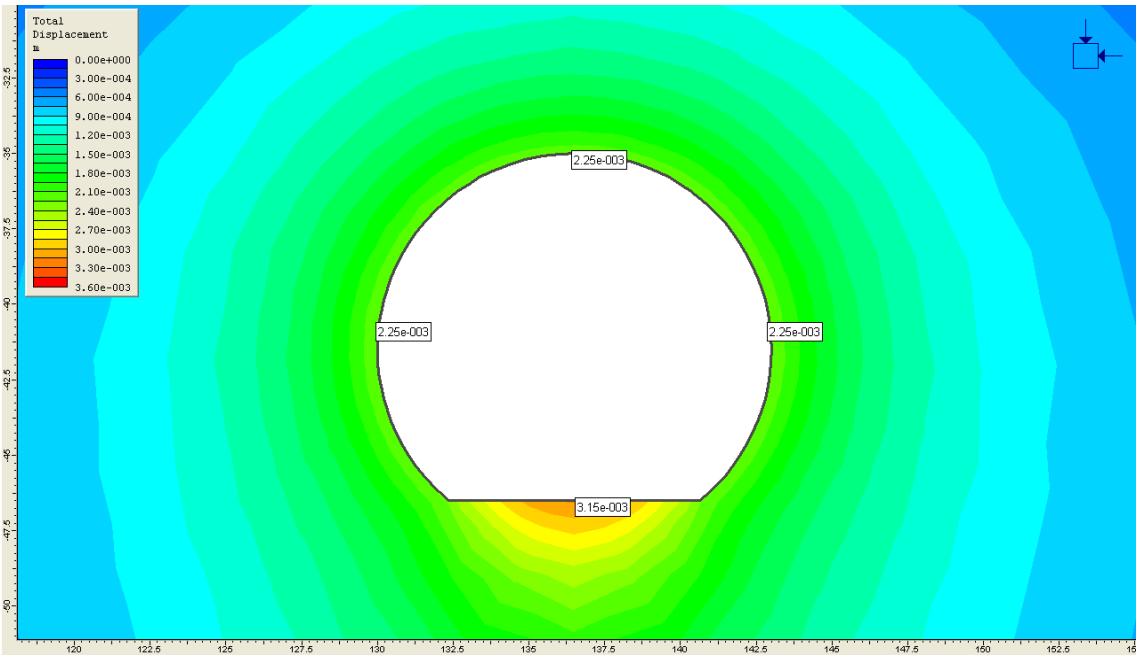
Çizelge 6.15. 177+380- 177+390 tünel aralığında analiz sonuçları.

Yükleme Aşaması	Yükleme yüzdesi (%)	Tünel tavanında		Tünel yan cidarında		Tünel tabanında	
		σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)	σ_1 (MPa)	u (mm)
Tahkimatlı Aşama 1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tahkimatlı Aşama 2	70	1.32	1.52	1.32	1.61	0.66	2.18
Tahkimatlı Aşama 3	30	1.82	1.95	1.82	2.1	0.98	3
Tahkimatsız Aşama 1	100	1.84	2.25	1.84	2.25	0.90	3.15

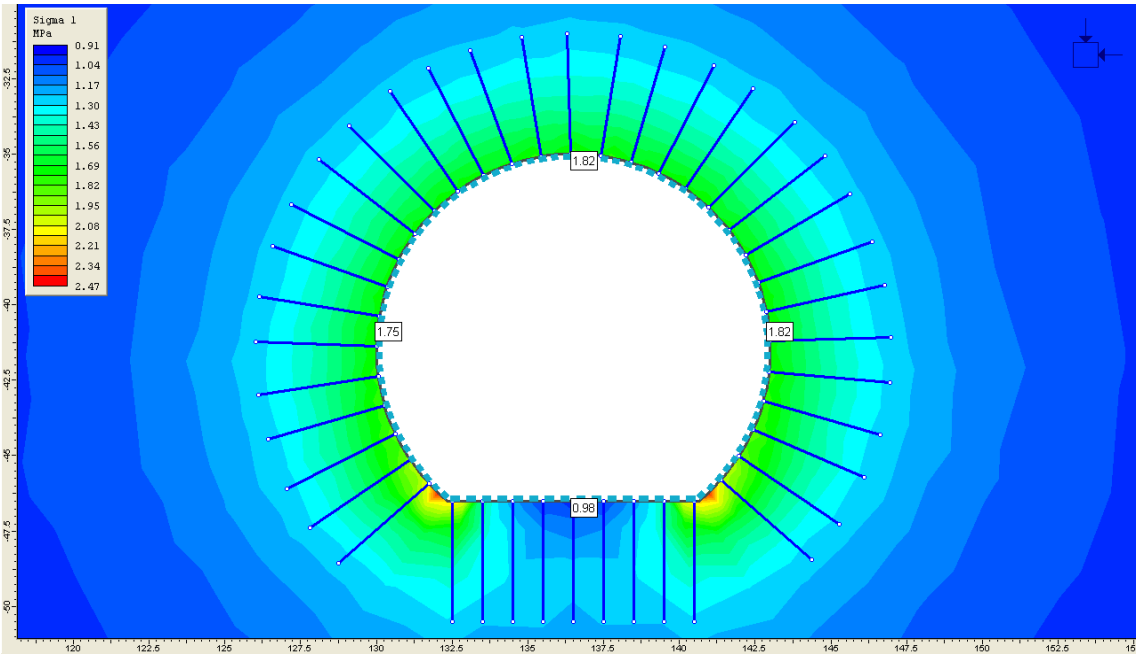
Şekil 6.14a, b, c, d ve Çizelge 6.15'de sunulan sonuçlara göre 177+380–177+390 aralığında gerçekleştirilen analizlerde tahkimatsız kazı açıklığının tavanında, yan cidarında ve tabanında yer değişim u_0=2.25, 2.25 ve 3.15 mm iken kazı açıklığının tahkimatlandırılması ile bu yer değişimlerin u_1=1.95, 2.1 ve 3 mm seviyelerinde kalacağı tahmin edilmektedir. Tahkimat performansı ise % 13, % 7 ve % 5 seviyelerinde olacağı görülmektedir.



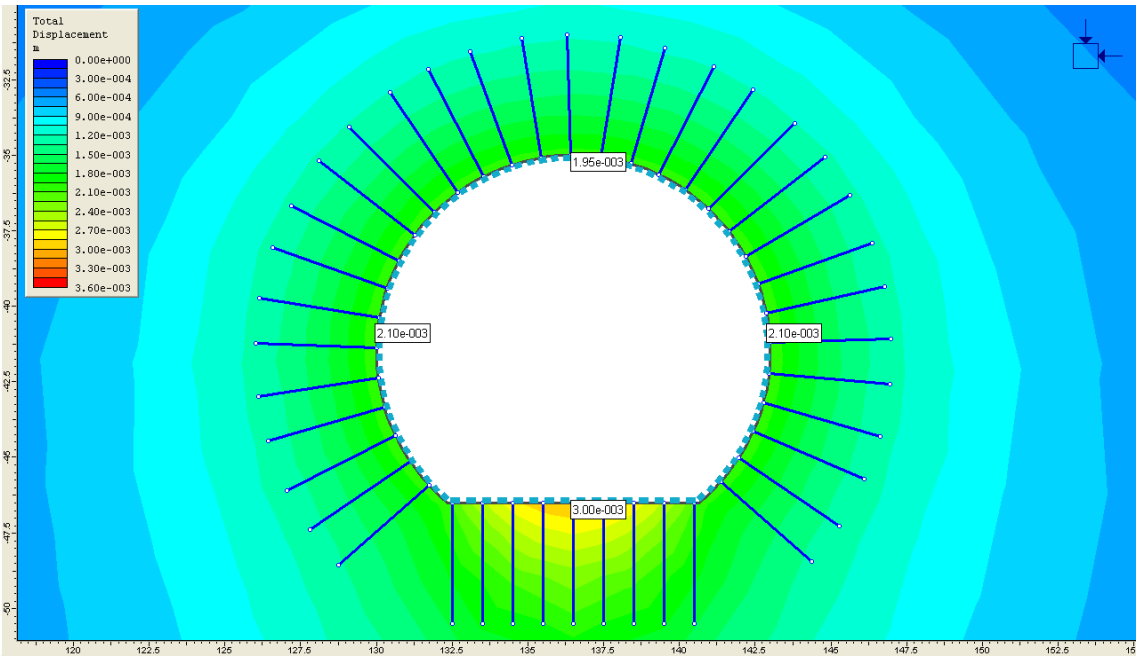
Şekil 6.14a Tahkimatsız durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.14b Tahkimatsız durum için toplam yer değiştirme dağılımı



Şekil 6.14c Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı



Şekil 6.14d Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı

6.5. Tünelde Gerçekleştirilen Yer değiştirme Ölçümleri ile Sayısal Çözümleme Sonuçlarının Karşılaştırması

PHASE2 programı yardımıyla gerçekleştirilen sayısal çözümleme sonuçlarının genel bir sunumu Çizelge 6.16'da yapılmıştır. Tünelin B2 ve B3 NATM sınıf bölgelerinde kurulan tahkimatın yerdeğişimleri önemli ölçüde önlediği görülmektedir. Analizlerde tünelin tavanı, yan cidarı ve tabanındaki yerdeğişim değerleri dikkate alınmış ve değerlendirilmiştir (çizelge 6.16.). Ancak genel değerlendirme çalışmalarında tünelin bu üç noktasında oluşan yerdeğişimlerin genel bir ortalaması alınmıştır. Böylelikle tünelin her bir kesiti için genel yerdeğişim değerleri belirlenmiş ve Çizelge 6.17'de sunulmuştur.

Çizelge 6.17'den görüldüğü üzere tahkimatsız durumda en büyük ikincil asal gerilmenin Km 176+104-176+524, 176+524-176+555 ve 176+797-176+832 aralıklarında, en küçük asal gerilmenin Km 176+000-176+104 aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Aynı şekilden en büyük yerdeğişimin Km 175+360-175+390 aralığında, en küçük yerdeğişiminin ise Km 176+000-176+104 aralığında olduğu görülmektedir. Benzer şekilde tahkimatlı durumu yansıtan analiz sonuçlarından ikincil gerilmenin en büyük ve en düşük olduğu aralıkların sırasıyla Km 176+524-176+555, 176+832-176+142, 176+842-177+100 ve 175+360-175+390 olduğu anlaşılmaktadır. Yerdeğişim değerlerinin en yüksek ve en düşük olduğu aralıkların ise Km 177+100-177+380 ve km 176+000-176+104 bölgelerinde kendini gösterdiği belirlenmiştir. Tünelde kullanılan tahkimatın genelde B2 ve B3 NATM destek sınıflarında görev yaptığı B1 bölgelerinde ise kaya kütlesinin kendi kendini yeterince iyi taşımasından dolayı tahkimata daha az görev düştüğü anlaşılmıştır.

Çizelge 6.17 hazırlandıktan sonra ayrıca B1, B2 ve B3 NATM sınıfları için genel bir değerlendirmeye tabi tutularak Çizelge 6.18 hazırlanmıştır. Burada 4 adet B1, 5 adet B2 ve 3 adet B3 bölgesinde belirlenen yerdeğişimlerin her bir bölgenin ortalaması alınmıştır.

Çizelge 6.16. Sayısal çözümlemeler sonucunda ulaşılan yerdeğişim miktarları

Analiz No	Tünel Bölgesi	H (m)	RMR (=GSI)	Tünel Aralığı (m)	NATM Sınıfı	Tahkimatsız Durum u_0 (mm)			Tahkimatlı Durum u_1 (mm)			Tahkimat Performansı (%)		
						Tünel tavanı	Tünel yan cidarı	Tünel tabanı	Tünel tavanı	Tünel yan cidarı	Tünel tabanı	Tünel tavanı	Tünel yan cidarı	Tünel tabanı
1	175+360 175+390	17	34	30	B3	5.25	9.0	17.3	3.6	7.2	13.8	31	20	20
2	175+390 175+828	17	39	438	B3	3.85	6.6	12.7	2.25	5.4	9.9	42	18	22
3	175+828 176+000	35	57	72	B2	0.56	0.56	0.77	0.53	0.56	0.77	6	0	0
4	176+000 176+104	35	65	104	B1	0.35	0.35	0.50	0.35	0.35	0.5	0	0	0
5	176+104 176+524	115	65	420	B1	1.33	1.19	1.61	1.26	1.19	1.61	0	0	0
6	176+524 176+555	115	65	31	B2	1.33	1.19	1.61	1.26	1.19	1.61	5	0	0
7	176+555 176+797	115	61	242	B3	1.62	1.45	1.96	1.53	1.45	1.96	5	0	0
8	176+797 176+832	115	65	35	B1	1.33	1.19	1.61	1.26	1.19	1.61	6	0	0
9	176+832 176+842	115	65	10	B2-P	1.33	1.19	1.61	1.26	1.19	1.61	5	0	0
10	176+842 177+100	115	65	258	B1	1.33	1.19	1.61	1.26	1.19	1.61	5	0	0
11	177+100 177+380	115	46	280	B2	9.5	8.5	11.5	8.1	7.65	9.9	15	10	14
12	177+380 177+390	35	46	10	B2-P	2.25	2.25	3.15	1.95	2.1	3	13	7	5

Çizelge 6.17. Tünel kesitinde oluşan ortalama gerilme ve yerdeğişim değerleri

Aralık (m)	Tünel aralığı (m)	Tahkimat sınıfı	Tahkimatsız durum		Tahkimatlı durum	
			σ_1 (MPa)	u_1 (mm)	σ_1 (MPa)	u_1 (mm)
1	175+360 175+390	B3	0.53	10.5	0.73	8.2
2	175+390 175+828	B3	0.6	7.7	0.87	5.85
3	175+828 176+000	B2	1.53	0.63	1.55	0.62
4	176+000 176+104	B1	1.53	0.4	1.55	0.4
5	176+104 176+524	B1	5.2	1.38	5.2	1.35
6	176+524 176+555	B2	5.2	1.38	5.25	1.35
7	176+555 176+797	B3	5.1	1.68	5.2	1.65
8	176+797 176+832	B1	5.2	1.38	5.1	1.35
9	176+832 176+842	B2-P	5.1	1.38	5.25	1.35
10	176+842 177+100	B1	5.1	1.38	5.25	1.35
11	177+100 177+380	B2	2.5	9.8	3.8	8.55
12	177+380 177+390	B2-P	1.53	2.55	1.54	2.35

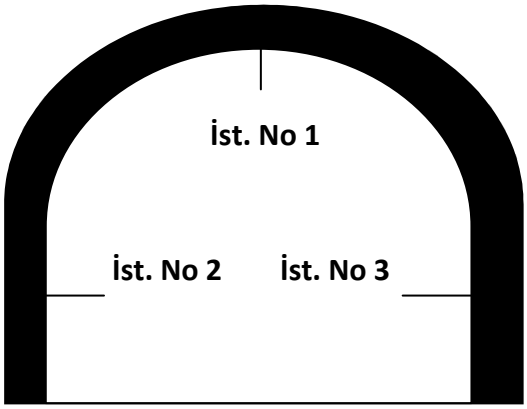
Çizelge 6.18. PHASE2 çıktılarına göre B1, B2 ve B3 NATM sınıflarında yerdeğişim miktarları

NATM Sınıfı	u_1 (mm)
B1	1.10
B2	2.84
B3	5.20

Sahada tünel kazı çalışmaları TCT Groupe tarafından gerçekleştirilmiştir. Tünelde kazı çalışmaları tünelin her iki ucundan başlatılmış ve tünel ortasına yakın bir noktadan birleştirilmiştir. Tepe – çekirdek yöntemi ile açılan tünelde kazı çalışmaları delme-patlatma ile yapıldıktan sonra kazılan malzeme kamyonlar ile dışarı nakledilmiş daha sonra tahkimat çalışmalarına geçilmiştir. Kaya kütlesinin yapısal farklılıklarına bağlı olarak ayrılan 12 jeoteknik bölgeye NATM tarafından önerilen tahkimat birimleri yerleştirilmiştir. Daha sonra tünel kesitinde Şekil 6.15'de gösterilen şekildeki gibi tünel ekseni boyunca belirlenen 12 farklı bölgede bölgenin uzunluğuna bağlı olarak her 40-90 metrede bir tünel kesitinde jeodezik ölçüm istasyonu kurulmuştur. Tünel cidarına uygulanan kaplama betonuna yerleştirilen ölçüm çubuklarındaki x, y ve z yönlerindeki yatay ve düşey yerdeğişimle 20-25 gün boyunca jeodezik cihazlarla ölçülmüştür. Şekil 6.15'de gösterilen ölçüm istasyonu No 1, No 2 ve No 3'de ayrı ayrı ölçümler yapılmış ve böylelikle tünel tavanında ve yan cidarındaki yerdeğişimler belirlenmiştir. Tünelde gerçekleştirilen tipik ölçüm sonuçları Çizelge 6.19'da sunulmuştur. Çizelge 6.19'da sunulan ölçüm noktaları, bu bölümün başında verilen Şekil 6.1 den görüldüğü üzere sırası ile Km 176+555-176+797, 176+842-177+100 ve 177+100-177+380 tünel aralıklarına girmektedir. Çizelge 6.19'da verilen ölçüm sonuçlar NATM tahkimat sınıfı olan B1, B2 ve B3 için tipik sonuçları olup karşılaştırma çalışmalarında kullanmak amacıyla ortalamaları alınmıştır. Daha önce belirtildiği gibi NATM'ye göre B1 göreceli olarak B2'den daha sağlam, B2 ise göreceli olarak B3'e göre daha sağlam kaya kütlesini ifade etmektedir. Çizelge 6.19'da sunulan yer değişim sonuçları bu durumu göreceli olarak doğrulamaktadır.

Çizelge 6.19'da B3 sınıfı için sunulan yer değişim değeri (u) 7.23 mm iken çözümleme sonuçlarına göre Çizelge 6.16'dan B3 sınıf değerlerinin Km 175+360–175+390 (Analiz 1) aralığında (u) 13.8 mm, Km 175+390–175+828 (Analiz 2) aralığında (u) 6.6 mm ve Km 176+555–176+797 (Analiz 7) aralığında (u) 1.61 mm olacağı tahmin edilmiştir. Benzer şekilde B2 sınıfına ait sonuçlara bakıldığında gerçek ölçüm sonuçlarına göre yer değişim (u) değeri 6.62 mm (Çizelge 6.19) iken Çizelge 6.16'den B2 kaya sınıfına ait çözümleme sonuçlarının sırasıyla 175+828–176+000 (Analiz 3) aralığında (u) 0.77 mm, Km 176+524–176+555 (Analiz 6) aralığında (u) 1.61 mm ve Km 177+100–177+380 (Analiz 11) aralığında (u) 9.9 mm olduğu görülmektedir. B1 kaya sınıfında gerçekleştirilen arazi ölçümlerinden gerçek

yer değişimin (u) 2.34 mm olduğu göz önüne alınırsa (Çizelge 6.19) çözümleme sonuçlarının Çizelge 6.16'dan Km 176+000–176+104 (Analiz 4) aralığında (u) 0.5 mm, Km 176+104–176+524 (Analiz 5) aralığında (u) 1.61 mm, Km 176+797–176+832 (Analiz 8) aralığında (u) 1.61 mm ve Km 176+842–177+100 (Analiz 10) aralığında yer değişim değerinin 1.61 mm olacağı tahmin edilmiştir.



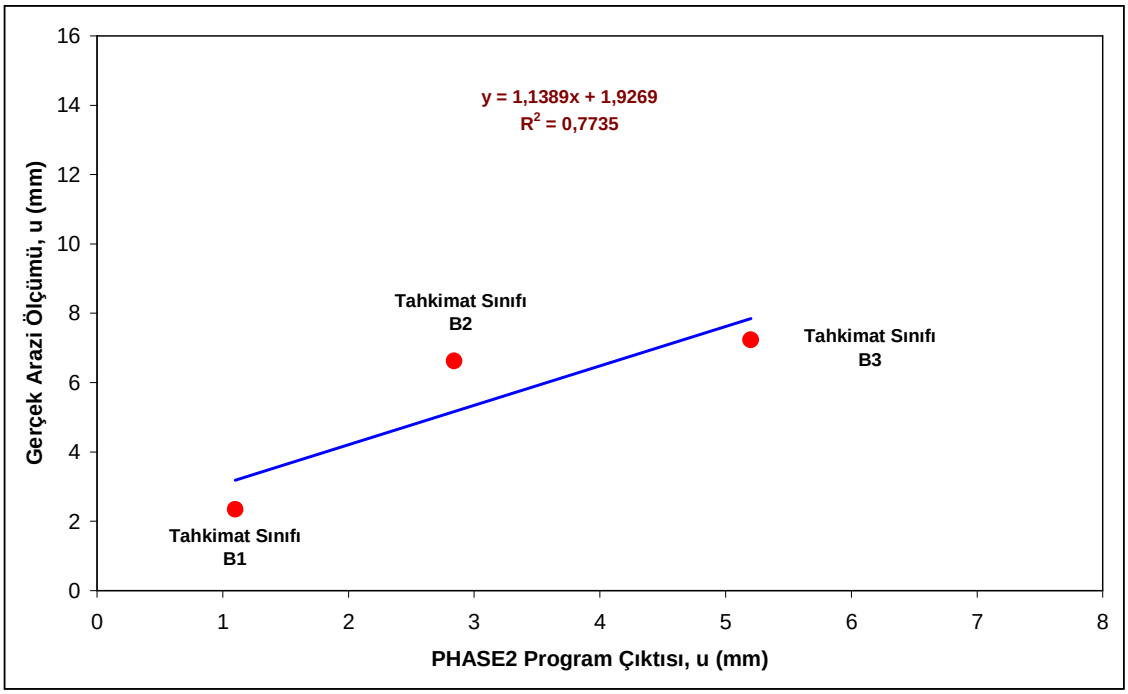
Şekil 6.15. Tünel kesitinde yerdeğişim istasyon yerleri

Çizelge 6.19. Tünelde TCT Gruope tarafından gerçekleştirilen yer değişim ölçümlerine ait tipik veriler

Tünel bölgesi	Tünel aralığı (m)	NATM sınıfı	Derinlik (m)	İstasyon No 1'de ölçülen z yönündeki yer değişim u (mm)	Ortalama yer değişim u (mm)
176+596 176+636 176+676	40 40	B3 B3 B3	115 115 115	4.70 4.30 12.3	7.23
177+082		B1	115	2.34	2.34
177+172 177+232 177+322	60 90	B2 B2 B2	115 115 115	6.13 7.30 6.43	6.62

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sayısal çözümleme analizleri sonucunda tahmin edilen genel yerdeğişim sonuçları (Çizelge 6.18) ile çizelge 6.19 karşılaştırılmıştır.

Her iki çizelgede sunulan sonuçlardan tüneldeki en düşük yerdeğişim değerlerinin B1 sınıfında en yüksek yerdeğişimlerin ise B3 sınıfında gerçekleştiği görülmektedir. PHASE2 çıktıları ile gerçek arazi ölçümleri sayısal olarak birbirine yakın sonuçlar olmasa da oransal bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Bu durumu açıklamak amacıyla Şekil 6.16 hazırlanmıştır. Sunulan şekilden görüldüğü üzere PHASE2 çıktıları ile gerçek arazi ölçümleri arasında güçlü bir ilişki söz konusudur. Belirlenen eşitlikte Bozdağ tüneli için PHASE2 yerdeğişim sonuçlarının kullanımı ile gerçek arazi ölçüm sonuçlarına yaklaşılabileceği görülmektedir.



Şekil 6.16. Tünel yerdeğişimlerinin PHASE2 çıktıları ile gerçek arazi ölçüm değerleri ile karşılaştırılması

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Konya Ankara arasında TCDD tarafından yapılan hızlı tren projesi dahilinde açılan tünel için bir seri sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlere temel teşkil eden kaya kütle özellikleri için Yüksel Proje tarafından belirlenen değerler alınmıştır. Sahada gerçekleştirilen 5 adet sondaj verisi yardımıyla ilk önce tünel 6 jeoteknik aralığa bölünürken tünel açma çalışmalarında karşılaşılan özel durumlar göz önüne alınarak tünel ekseni 12 jeoteknik aralığa ayrılmış ve buna göre NATM tahkimat önerileri yapılmıştır. Bu tez çalışmasında bu 12 jeoteknik aralıkta duraylılık çözümlemeleri yapılmıştır. Duraylılık çözümlemelerinde kaya kütlesine ait elastik modül (E_m) değerlerinin oldukça etkin olduğu görülmüştür. Bu parametre için Hoek ve Diederichs (2006) tarafından önerilen E_m değerlerinin kullanılması ile belirlenen yer değişim sonuçlarının gerçek arazi ölçümlerine daha yakın olduğu görülmüştür.

1. 175+360 – 175+390 jeoteknik aralığında kaya birimi çakıltaşına GSI değeri 34, σ_{ci}=15MPa, E_i=10.5 GPa, σ_{cm}=0.383 MPa, E_m=0.567 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta 200 mm kalınlığında C25 püskürtme beton, 4m uzunluğunda 1x1.5 m aralıklı sistematik kaya saplaması kullanılmıştır. Bu aralıkta tünel kazısının hemen sonrasında tahkimat öncesinde tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 5.25 mm, 9 mm, 17.3 mm yer değişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 3.6 mm, 7.2 mm, 13.8 mm yer değişimin olacağı belirlenmiştir. Ulaşılan yerdeğişim sonuçlarıyla sahada tünelin bu aralığında ölçülen yer değişim değerlerinin (7.23 mm) birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

2. II. Jeoteknik aralıkta (175+390–175+828) kaya birimi çakıllı kireçtaşı olup bu kaya biriminin GSI değeri 39 σ_{ci}=15MPa, E_i=10.5 GPa, σ_{cm}=0.378, MPa, E_m=0.759 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta 4m uzunluğunda 1x1.5 m aralıklı sistematik kaya saplaması 150 mm kalınlığında C25 püskürtme beton kullanılmıştır. 175+390–175+828 aralığındaki tahkimatsız durum için tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 3.85 mm, 6.6 mm, 12.7 mm yer değişim olacağı görülmüştür. Tahkimatlı durumda aynı noktalarda sırasıyla yerdeğişimler 2.25 mm, 5.4 mm, 9.9 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. Ulaşılan yerdeğişim sonuçlarının kesitteki

ortalaması 5.85 mm iken sahada tünelin bu aralığında ölçülen yer değişim değerlerinin u=7.23 mm olduğu görülmüştür.

3. Tünelin 175+828–176+000 jeoteknik aralığında karşılaşılan kaya birimi kireçtaşına ait GSI değeri 57, σ_{ci}=75MPa, E_i=52.5 GPa, σ_{cm}=2.083 MPa, E_m=11.995 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta 150 mm kalınlığında C25 püskürtme beton, 4m uzunluğunda 2x2 m aralıklı sistematik kaya saplaması kullanılmıştır. Bu aralıkta tünel kazısı sonrasında tahkimat kurulmadan önce tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 0.56 mm, 0.56 mm, 0.77 mm yer değişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 0.53 mm, 0.56 mm, 0.77 mm yer değişimin olacağı belirlenmiştir. kesitteki ortalama yerdeğişim 0.62 mm olmaktadır. Sahada tünelin bu aralığında ölçülen yer değişim değerlerinin u=6.62 mm olduğu görülmüştür.

4. 176+000–176+104 jeoteknik aralığında kaya birimi çakıllı kireçtaşı olup GSI değeri 65, σ_{ci}=75MPa, E_i=13.67GPa, σ_{cm}=2.676 MPa, E_m=18.5 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta 100 mm kalınlığında C25 püskürtme beton, 4m uzunluğunda 2.5x2 m aralıklı sistematik kaya saplaması kullanılmıştır. Bu aralıkta tünel kazısının hemen sonrasında tahkimat öncesinde tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 0.35 mm, 0.35 mm, 0.5 mm yerdeğişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 0.35 mm, 0.35 mm, 0.5 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. Kesitteki yerdeğişim ortalaması 0.4 mm iken sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 2.34 mm olduğu görülmüştür.

5. IV. Jeoteknik aralıkta (176+104–176+524) kaya birimi çakıllı kireçtaşı olup bu kaya biriminin GSI değeri 65, σ_{ci}=75MPa, E=13.67GPa, σ_{cm}=2.676 MPa, E_m=18.5 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tünel kazısı sonrasında tahkimatsız durum için tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 1.33 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişim olurken tahkimatlı durumda aynı noktalarda sırasıyla yerdeğişimler 1.26 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. kesite ait ortalama

yerdeğişim 1.35 mm iken sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 2.34 mm birbirine yakın olduğu görülmüştür.

6. Tünelin 176+524–176+555 jeoteknik aralığında karşılaşılan kaya birimi çakıllı kireçtaşına ait GSI değeri 65, σ_{ci}=75MPa, E=13.67GPa, σ_{cm}=2.676 MPa, E_m=18.5 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tünel kazısı sonrasında tahkimat kurulmadan önce tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 1.33 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 1.26 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. Kesitteki ortalama yerdeğişim 1.35 mm olup sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 6.62 mm olduğu görülmüştür.

7. 176+555–176+797 jeoteknik aralığında kaya birimi çakıllı kireçtaşı olup GSI değeri 61, σ_{ci}=75MPa, E=11.49GPa, σ_{cm}=2.265 MPa, E_m=12.8 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tünel kazısı sonrasında tahkimatsız durum için tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 1.62 mm, 1.45 mm, 1.96 mm yerdeğişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 1.53 mm, 1.45 mm, 1.96 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. Bu aralıktaki tünel kesiti için ortalama yerdeğişim 1.65 mm olacağı görülmektedir. Sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin ise 7.23 mm olduğu görülmüştür.

8. 176+797–176+832 jeoteknik aralığında kaya birimi çakıllı kireçtaşına ait GS) değeri 65, σ_{ci}=52.5MPa, E=13.54GPa, σ_{cm}=1.87 MPa, E_m=18.5 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tünel kazısı sonrasında tahkimatsız durum için tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 1.33 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 1.26 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. bu kesite ait ortalama yerdeğişim 1.35 mm iken sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 2.34 mm ile birbirine yakın olduğu görülmüştür.

9. Tünelin 176+832–176+842 jeoteknik aralığında karşılaşılan kaya birimi çakıllı kireçtaşına ait GSI değeri 65, σ_{ci}=52.5MPa, E_i=13.54GPa, σ_{cm}=1.87 MPa, E_m=18.5 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tünel kazısı sonrasında tahkimat kurulmadan önce tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 1.33 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 1.26 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. kesitteki ortalam yerdeğişim 1.35 mm olmaktadır. Sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 6.62 mm olduğu görülmüştür.

10. 176+842–177+100 jeoteknik aralığında kaya birimi çakıllı kireçtaşı olup GSI değeri 65, σ_{ci}=52.5MPa, E_i=13.54GPa, σ_{cm}=1.87 MPa, E_m=18.5 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tünel kazısının hemen sonrasında tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 1.33 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 1.26 mm, 1.19 mm, 1.61 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. kesitteki yerdeğişim ortalaması 1.35 mm iken sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 2.34 mm ile birbirine yakın olduğu görülmüştür.

11. 177+100–177+380 jeoteknik aralığında kaya birimi kireçtaşına ait GSI değeri 46, σ_{ci}=37.5MPa, E=5.78GPa, σ_{cm}=0.96 MPa, E_m=2.97 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tünel kazısı sonrasında tahkimatsız durum için tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 9.5 mm, 8.5 mm, 11.5 mm yerdeğişim olurken tahkimat sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 8.1 mm, 7.65 mm, 9.9 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. kesite ait ortalama yerdeğişim 8.55 mm iken sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 6.62 mm ile birbirine yakın olduğu görülmüştür.

12. Tünelin 177+380–177+390 jeoteknik aralığında karşılaşılan kaya birimi kireçtaşına ait GSI değeri 46, σ_{ci}=37.5MPa, E=5.78GPa, σ_{cm}=0.96 MPa, E_m=2.97 GPa, Poisson Oranı 0.2'dir. Bu aralıkta tahkimatsız durumda tünel tavanında, yan cidarında ve tünel tabanında sırasıyla 2.25 mm, 2.25 mm, 3.15 mm yerdeğişim olurken tahkimat

sonrasında aynı noktalarda sırasıyla 1.95 mm, 2.1 mm, 3 mm yerdeğişimin olacağı belirlenmiştir. Bu kesite ait ortalama yerdeğişim 2.35 mm iken sahada tünelin bu aralığında ölçülen yerdeğişim değerlerinin 6.62 mm olduğu görülmüştür.

13. PHASE2 çıktıları yardımıyla B1, B2, B3 NATM sınıflarına ait ortalama yerdeğişim sonuçları ile sahada gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarının birebir benzer olmadığı görülmüş ancak her iki sonuç arasında anlamlı bir ilişkinin var olduğu belirlenmiştir.

Yukarıda sunulan genel sonuçlar yardımıyla PHASE2 bilgisayar çözümleme sonuçlarının güvenilir olduğu söylenebilir. Tünel kazı çalışmalarına başlamadan ulaşılan kaya kütlesine ve malzemesine ait mekanik özellikler ile tahkimatsız duruma ait tünel cidarındaki olası ikincil gerilme ve yer değişim değerleri belirli doğrusal oran ile doğruya yakın tahmin edilebilir. Proje aşamasında tahkimat veya tahkimat kombinasyonları ile tüneldeki ikincil gerilme ve yer değiştirmelerin hangi seviyelerde olacağı tahmin edilebilir. Böylece hangi tahkimat sisteminin kullanılacağı tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

Aydan, Ö. and Dalgıç, Ö., 1998, Prediction of Deformation Behaviour of 3-Lines Bolu Tunnels Trough Squueezing Rocks Of North Anatolian Fault Zoen (Nafz), Prof. Regional Symp. Sedimantary Rock Engineering, Taipei, pp. 228-233.

Barton, N., 1974, "Engineering Classification of Rock Massesfor The Design of Tunnel Support" Rock Mechanics, 189-243.

Barton, N., 2002, Some New Q-Value Correlations to Assist in the Characterisation and Tunnel Design. International Journal of Rock Mechanics&Mining Sciences.

Bhasin, R., Grimstad, E., 1996, The Use of Stress-Strength Relationships in The Assement of Tunnel Stability Tunneling and Underground Space Technology Vol 1"1, No 1, pp 93-98.

Bieniawski, Z. T., 1973, Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Trans. South African Inst. Civil Engineering 15, 335-344.

Bieniawski, Z. T., 1974, Geomechanics Classification of Rock Masses, and 1st Application in Tunneling, Proc. 3rd Cong. of Int Society For Rock Mechanics, Denver, Vol2, 27-32.

Bieniawski, Z. T., 1976, Rock Mass Classification in Rock Engineering, Proc. Symp. on Exploration For Rock Engineering, Cape Down, Balkema, 97-106.

Bieniawski, Z. T., 1978, Detrmining Rock Mass Deformability, Experience From Case Histories, Int. J. Rock Mech Min. Sci. & Geomech Abstr. 15, 237-247.

Bieniawski, Z. T., 1979, The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications Proc. 4th, Congr., Int Soc. Rock Mech., Montreux 2, 41-48.

Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Clafication, John Wiley And Sons, 237.

Carranza-Torres C and Fairhust C., 2000, Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. Tunneling and Underground Space Technology, 15 (2) pp. 187-213.

Carter, B. J., Duncan, E. J. S. And Lajtas, E. Z., 1991, Fitting Strength Criteria to İntact Rock Geotechnical And Geological Engineering 9, 73-81.

Deere, D. U. And Miller, R. P., 1966, "Engineering Classification and Index Properties For Intact Rock", Tech. Rept. No Afwl-65-116 Air Force Base, New Mexico.

Deere, D. U., 1968, Geological Considerations Rock Mechanics in Engineering Practice (Chapter 1), Eds. Stagg K. G., Zienkiewics O. C., London Wilwy, pp 1-20.

Franklin, J., Dusseault, M. B., 1991, Rock Engineering Applications Uluslar Arası Baskı, Mcgraw Hill (Singapore).

Geniş, M., 2002, Geometrik Tasarım Değiştirmelerin Derin Yer Altı Açıklıklarında Yenilme Bölgesinin Boyutlarına Etkilerinin Statik Ve Dinamik Koşullarda Araştırılması. Doktora Tezi (Yayımlanmamış), ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 352s.

Geniş, M., Başarır, H., Özarslan, A.İ., Bilir, E. And Balaban, E., 2007, Engineering Geological Appraisal of the Rock Masses And Preliminary Support Design, Dorukhan Tunnel, Zoguldak, Turkey. Engineering Geology, 92:14-26.

Geodata,Integrated Tunnel Measuring System and Dedalos, 1998. Viyana.

Gerçek, H., 2004, Kaya Mekaniği Ders Notları (Yayımlanmamış), ZKÜ Müh., Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak,270s.

Griffith, A. A., 1924, The Theorey of Rupture, Proc, 1st Int Congr., Apply Mech., Delft.

Grimstad, E., Barton, N., 1993, "Uptading The Q Systam For NTM", Proceeding International Sympposium on Sprayed Concrete, 44-46.

Hoek, E., Brown, E. T., 1980, Underground Excavations in Rock The Inst Mining And Metalurgy, Stephan Austin And Sons London, 527s.

Hoek, E., Brown, E. T., 1980a,"Emprical Strength Criterion Of Rock Masess", J. Geotech. Engin. Div. Asce 106 (GTQ), P. 1013-1035.

Hoek, E., Brown, E. T., 1980b, Underground Excavations in Rock, London Int Min. Metal.

Hoek, E., 1992, "A Modified Hoek-Brown Criterion For Jointed Rock Masses" Proc. Rock Characterization, Symp. Int Soc. Rock. Mech, Eurock 92, (J., Hudson Ed) P 209-213.

Hoek, E., Brown, E. T., 1997, Practical Estimates of Rock Mass Strength Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34: 1165-1186.

Hoek, E:, 1998, Tunnel Support in Weak Rock Symposium of Sedimantary Rock Engineering, Taipei, Taiwan 12p.

Hoek, E. And Brown, E. T., 1998, Practical Estimates of Rock Mass Strength Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8) : 1165-1186.

Hoek Ve Ark., 2002, "Hoek –Brown Failure Criterion-2002 Edition" Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto in July.

Hoek, E. And Diederichs, M. S., 2006, Empirical Estiamtion of Rock Mass Modulus Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41: 203-215.

Hoek, E., 2006, Kaya Mühendisliği Çev., M. Karakuş ve H. Başarır, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ümit Ofset Matbaacılık Ankara, 319s.

Jaeger, J. C., 1969, Fundementals of Rock Mechanics, 1st. Ed. Chapman & Hall. London.

Kalamaris, G. S. And Bieniawski Z.T., 1995, A Rock Mass Styerngth Concept For Coal Incorporation The Effect of Time. Proc. of The 8th International Congress on Rock Mechanic, Melbourne, Rotterdam, Balkema, 1: 295-302.

Kendorski, F., 1983, Rock Mass Classification For Block Caving Mine Drift Support in Proc. 5th Int Congr, Rock Mech, Melbourne, Pp B51-B63 Balkema, Rotterdam.

Laubscher, D. H., 1977, "Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-Mining Applications", Trans. Inst., Of Mine Asd Metal, Vol 86, Pp A 1-8.

Marinos, P. And Hoek, E., 2000, GSI : A Geological Friendly Tool For Rock Mass Strength Estimation. Proc. of The Int. Conference On Geotechnical and Geological Engineering Geo Eng2000, Melbourne, Pp 1422-1440.

Marinos, P. And Hoek, E., 2001, "Estimating The Geotecnical Properties of Heteroge-Neous Rock Masses Such As Flysch" Bull Engg. Geol. Env. 6012, P. 85-92.

Murrel, S. A. F., 1963, A Criterion For Brittle Fracture of Rocks and Concrete Under Triaxial Stress and The Effectof Pore Pressure on The Criterion, Proc. 5th. Rock Mech. Symp., University of Minessota Oxford, Pergamon.

Özkan, İ., Ünal, E., 1996, Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleri Üzerine Kritik Bir Değerlendirme, 3. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara. 187-193.

Ramamurty, T., 1986, Stability of Rock Mass. 8th Annual Lecture. Indian Geotechnical Journal, Pp1-74.

Rabcewicz, L., 1964, The New Austrian Tunneling Method. Waters Power, Nov., Pp 453-457.

Read, S. A. L., Richards L. R. and Perrin, N. D., 1999, Applicability of The Hoek-Brown Failure Criterion To Nez Zelland Greywacke Rocks. Proc. 9th International Society For Rock Mechanics. Songress, Paris, Pp 655-660.

Rockcsience, 2007a Roclab (Ver.1.031), Toronto, Canada, http://www.rocsience.com.

Rockcsience, 2007b Phase2, Toronto, Canada, http://www.rocsience.com.

Serafim, T. L. and Pereira, J. P., 1983, Considerations of The Geomechanics Classification of Bieniawski . Proc. Int. Symposium Engineering Geology and Underground Construction, Rotterdam, pp 1133–1142.

Schubert, W., Vavrovsky, G. M., 1994, Interpretation of Monitoring Results, World Tunneling., Wt Review, 351-356.

Schubert, W., Budil, A., 1995, The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnelş Excavation Proc. 8th Congress on Rock Mechanics, A. A. Balkema, Tokyo.

Schubert, W., Steindorf, A., 1995, Advanced Monitoring Data Evaluation For Tunnels in Poor Rock, 8th Congress On Rock Mechanics, A. A. Balkema, Tokyo.

Schubert ve Steindorfer, 1996, Selective Displacement Monitoring During Tunnel Excavation, Felsbau 14(2), 93-97.

Schubert ve Steindorfer, 1997, Applicationof New Methods of Monitoring Data Analysis For Short Term. Prediction In Tunneling. Tuunels For People World Tunnel Congress, J. A. A. Balkema, Vienna, 65-69.

Sheorey, P. R., 1997, Empirical Rock Failure Criteria. Balkema, Rotterdam.

Sönmez, H. and Ulusay, R., 1999, Modification To The Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability To Stability of Slopes. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 35: 219-333.

Terzaghi, K., 1946, "Rock Defects and Loads on Tunnel Support", in Rock Tunneling With Steel Supports, Commercial Shearing and Stamping Company, 17-99.

Trueman, R., 1998, an Evaluation of Strata Support Techniques in Dual Life Gateroads, Phd Thesis, University of Wales, Cardiff.

Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2002, Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri1. Basım TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları: 60, Ankara 243s.

Ünal, E., 1983, Development of Design Gudelines and Roof Control Standarts For Coal Mine Roof, Doktora Tezi Pem. State Üniv., Usa, 355s.

Ünal, E., 1983, Design Guidelines and Roof Control Standarts For Coal Mine Roofs. Ph D. Thesis, P 355. Pennsylvania State University.

Ünlütepe, A., 2003, Tünel İnşaatları Sırasında Uygulanan Ölçme Yöntemleri ve Bu Yöntemlerin Değişik Tünelcilik Metotları için Karşılaştırılması", I. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Yıldız Teknik Üniversitesi 30-31 Ekim, İstanbul.

Ünlütepe, A., 2005, "Marmaray BCI Projesi ve Ölçme Çalışmaları" 1. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi 23-25 Kasım, İstanbul.

Wickham, G. E., Tredemann, H. R. ve Schinner E. H., 1972, "Support Determination Based on Geologic Predictions", Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf. AIME, New York, S. 43-64.

Yalçınkaya, M., Satır, B., 2005, "Tünellerde Oluşan Hareketlerin Farklı Ölçü Yöntemleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi", 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım, 51-63. Yıldız Teknik Üniversitesi İstanbul.

Yılmazer,İ., Ertunç, A. ve Erkan, F., 1992, "Engineering Geologycal The Düziçi-Kömürler Region", 1st Int Symp. Eastern Meditermean Geology, Çukurova Üniv. Adana, S 77-89.

Yudhbir, R. K., Lemanza, W. and Prinzl, F., 1983, an Empirical Failure Criterion For Rock Masses Proc. of The 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Rotterdam, Balkema 1: B1-B8.

İNTERNET ADRESLERİ

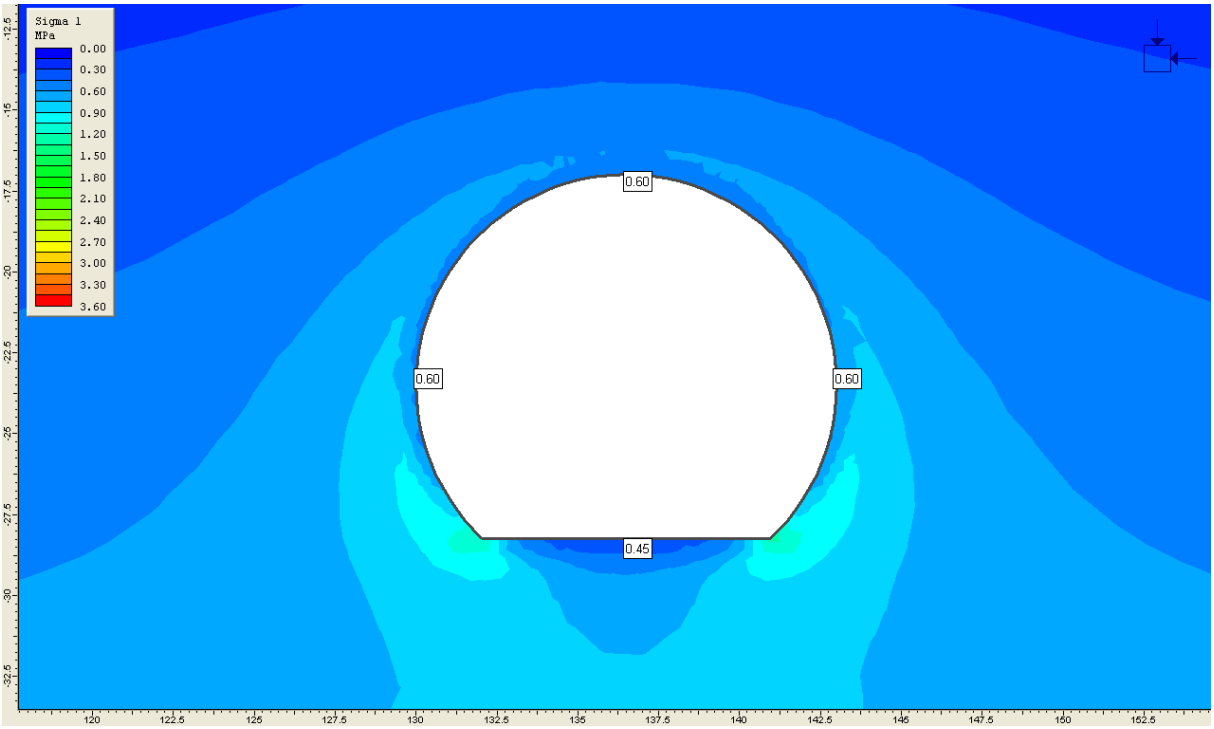
www.geodata.com , 1997

www.rocscience.com 2007

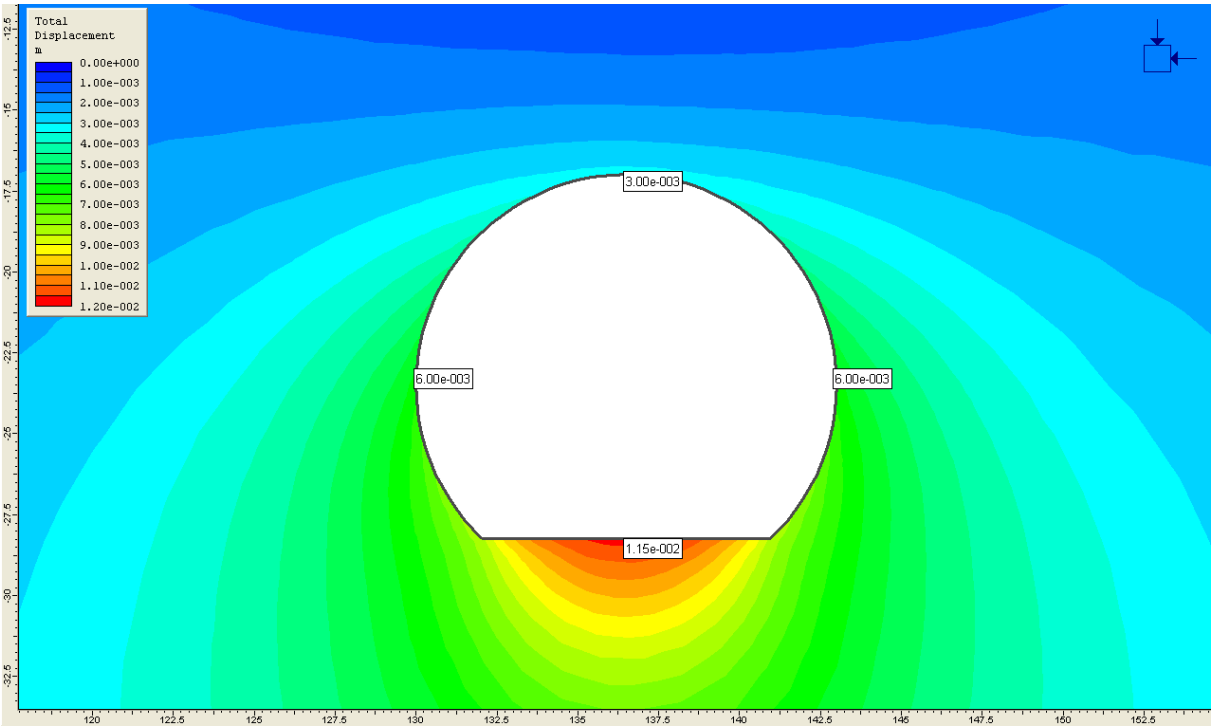
www.penatrade.com 2009

www.tcdd.gov.tr 2010

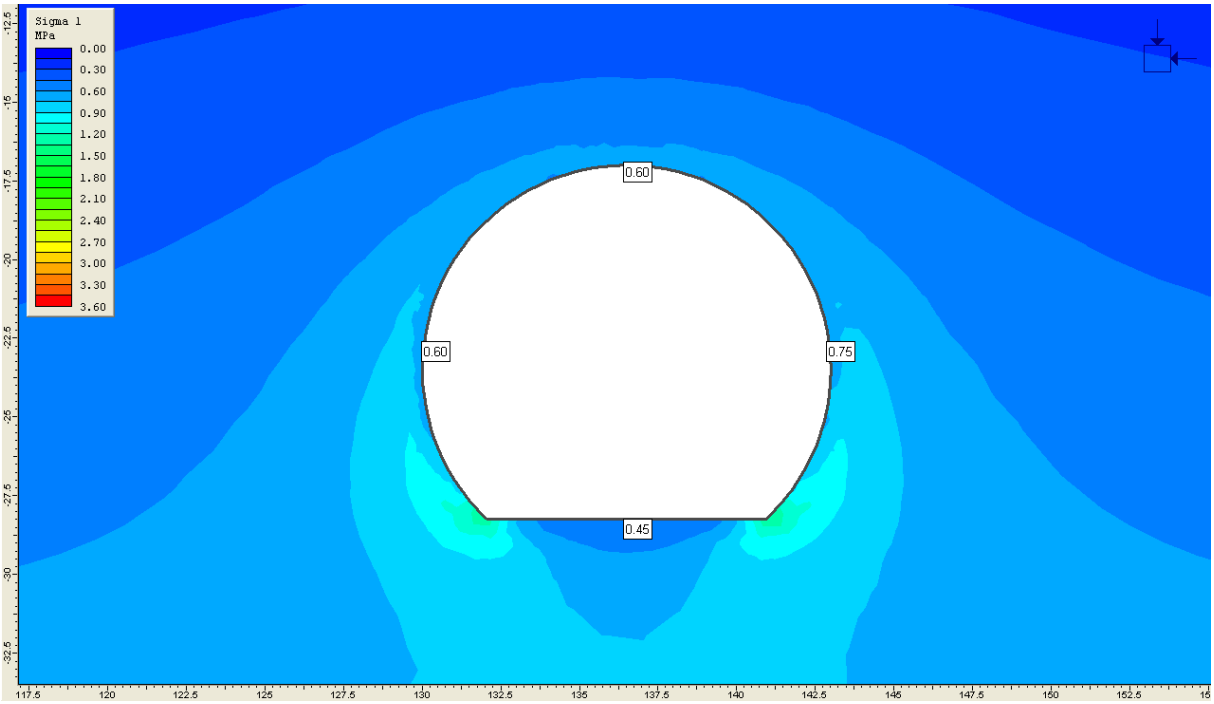
EKLER



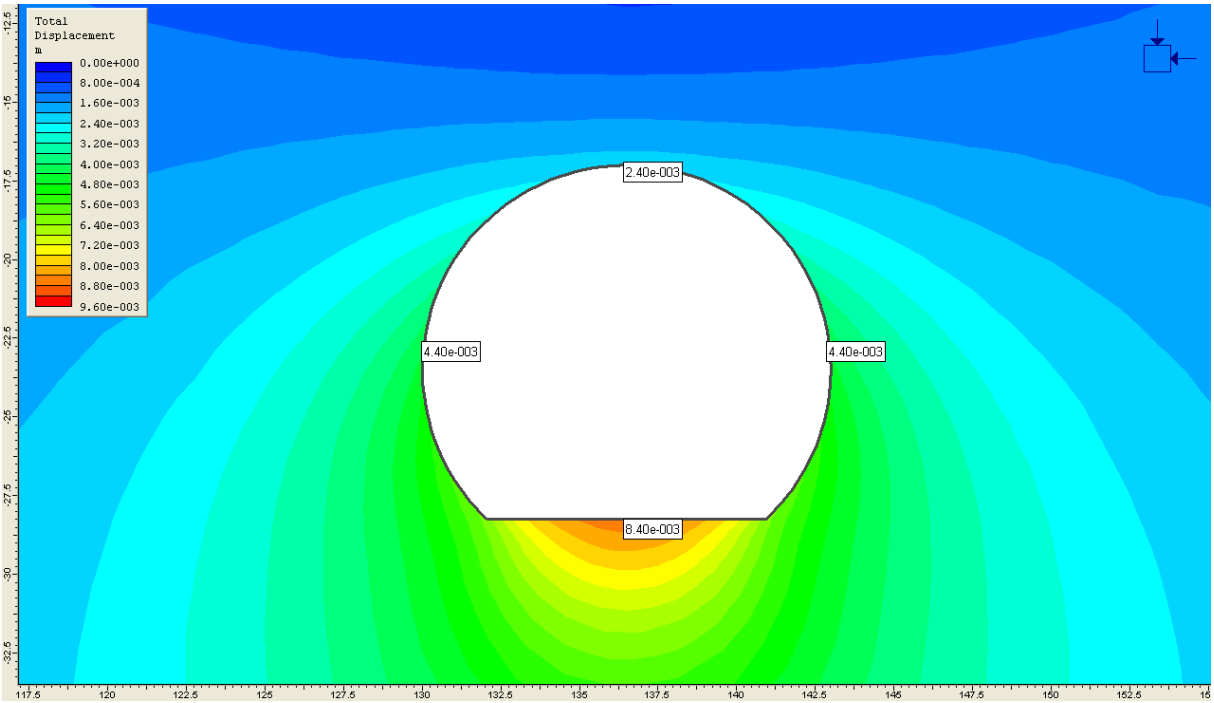
Analiz 1 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



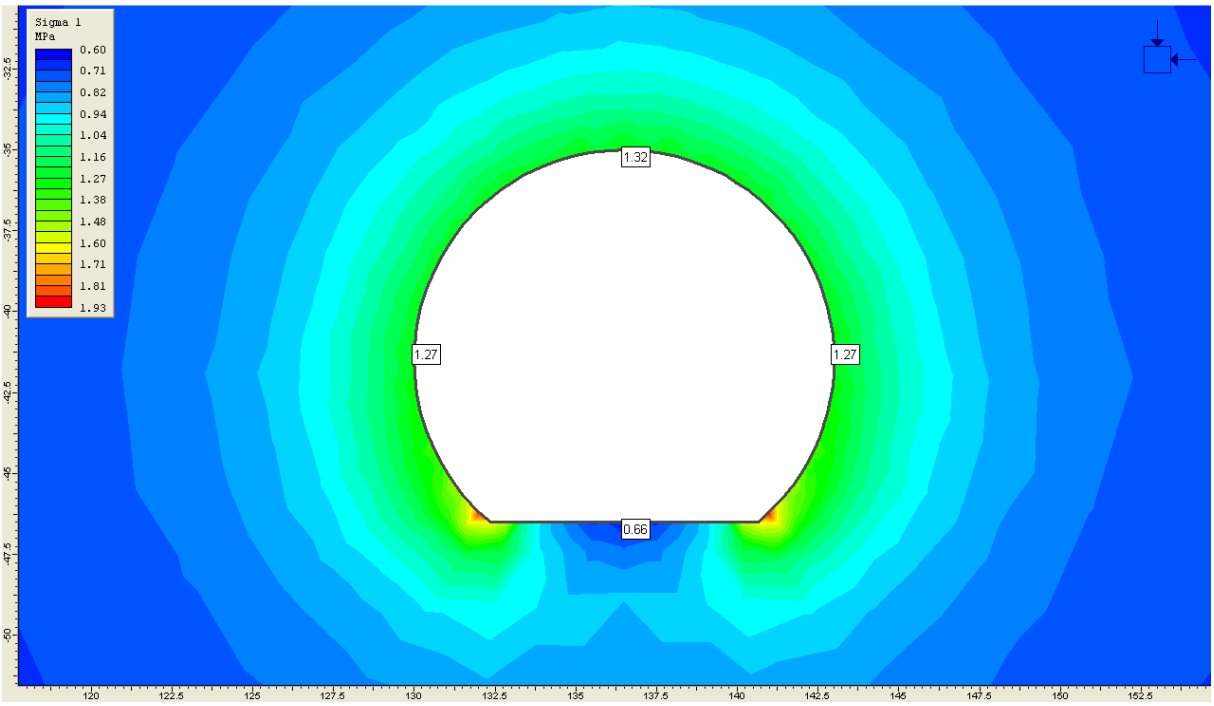
Analiz 1 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



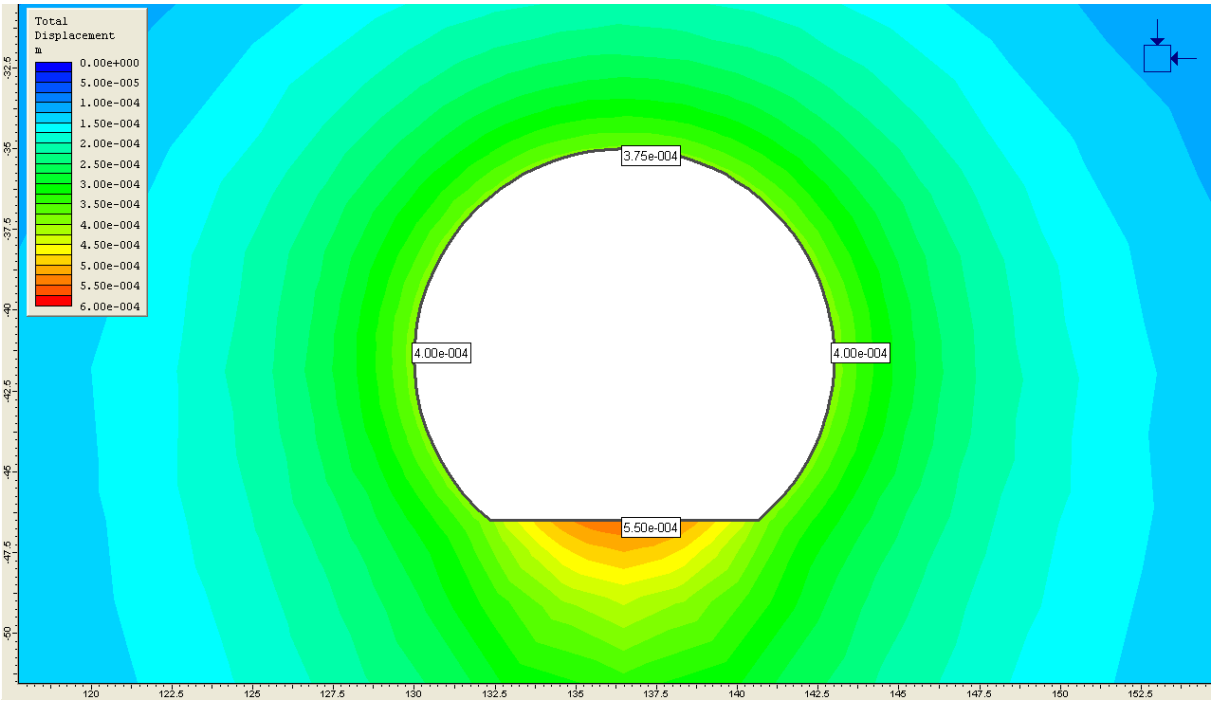
Analiz 2 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



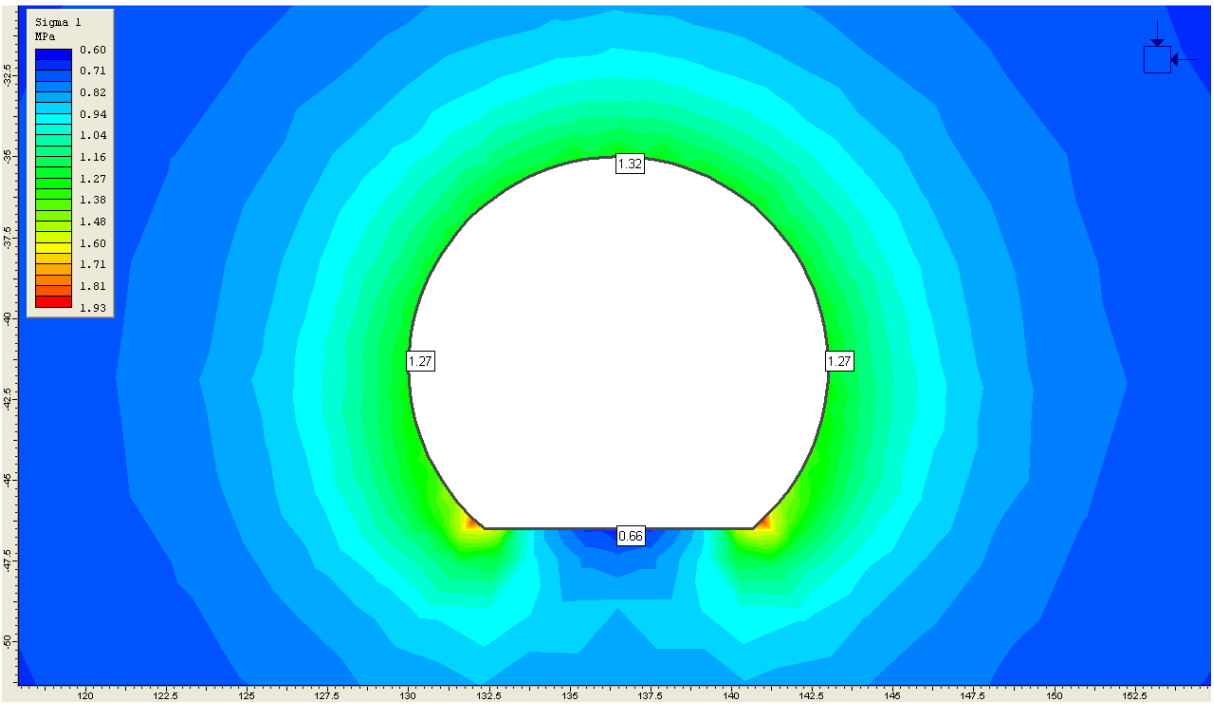
Analiz 2 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



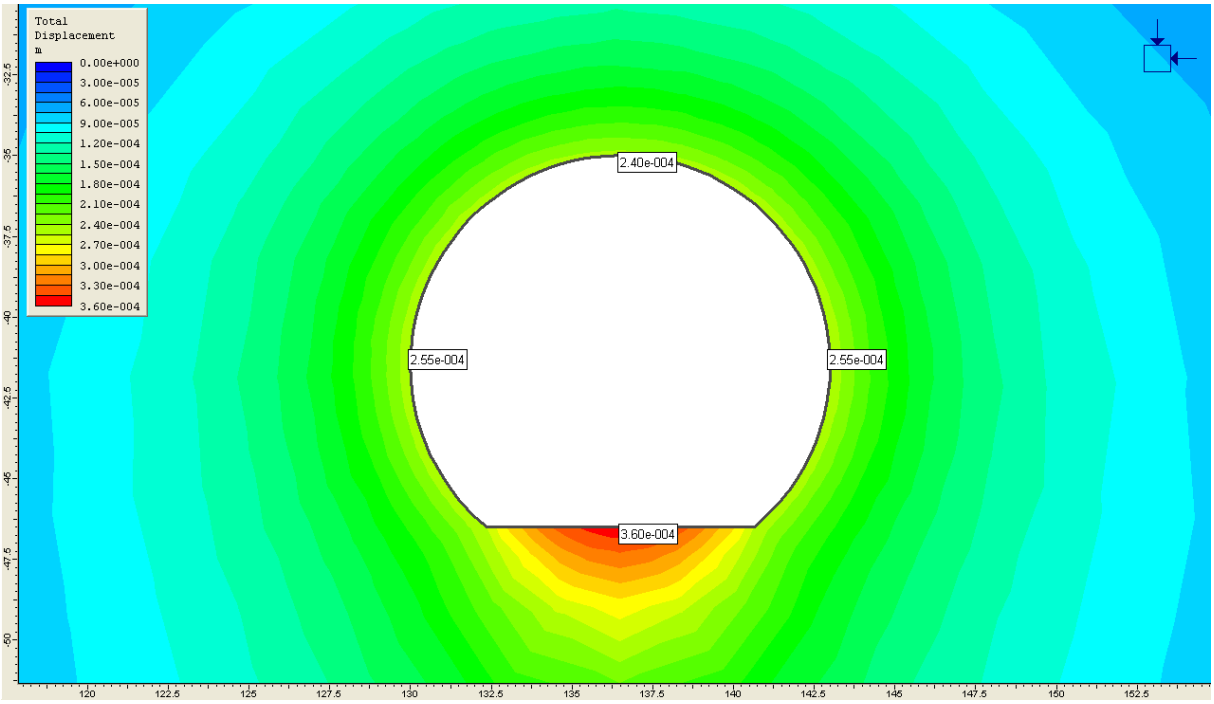
Analiz 3 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



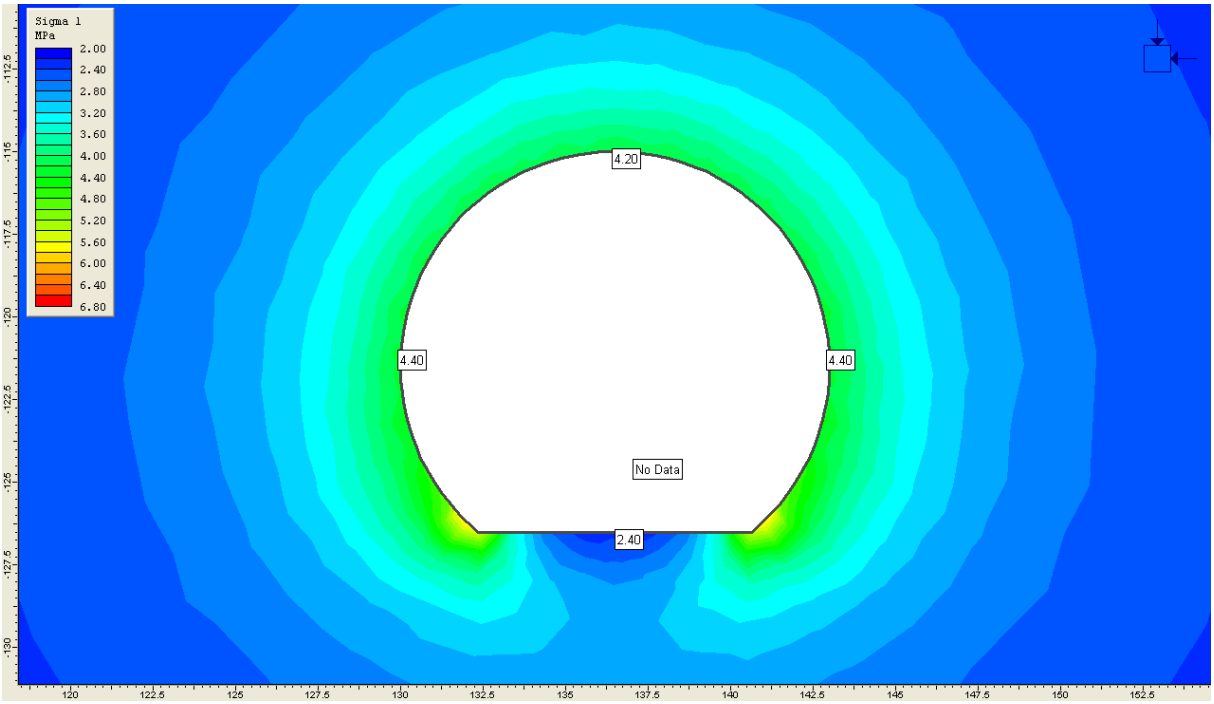
Analiz 3 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



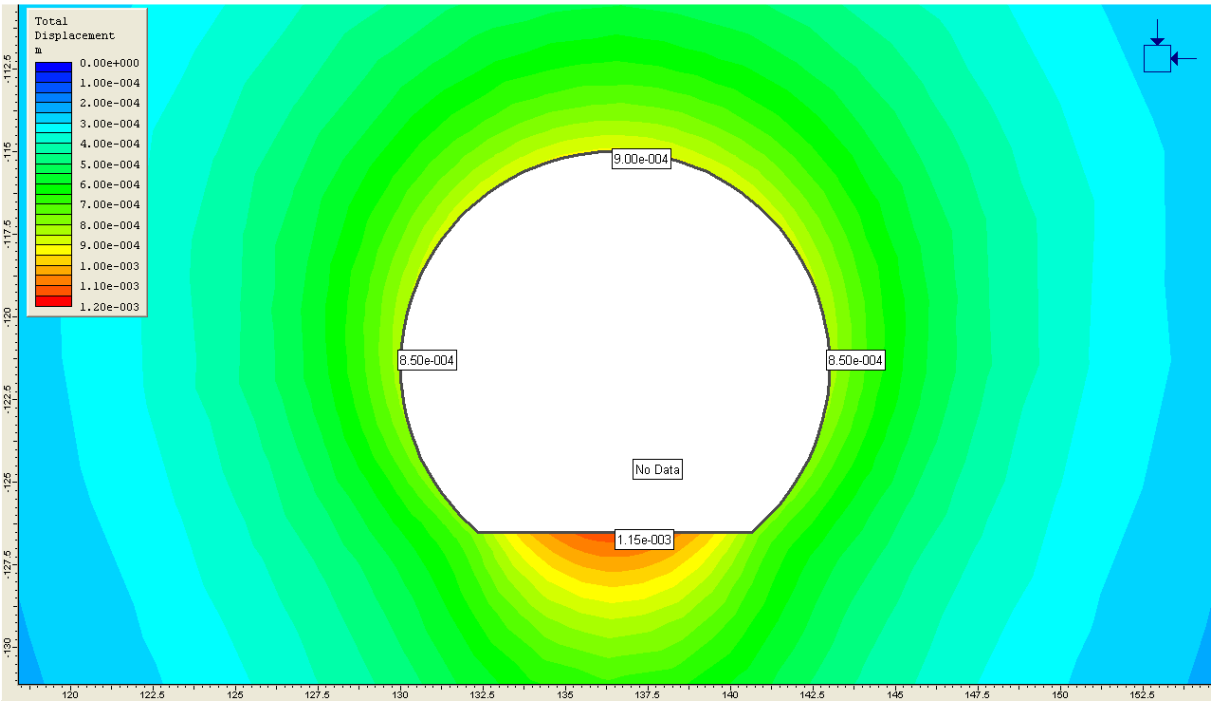
Analiz 4 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



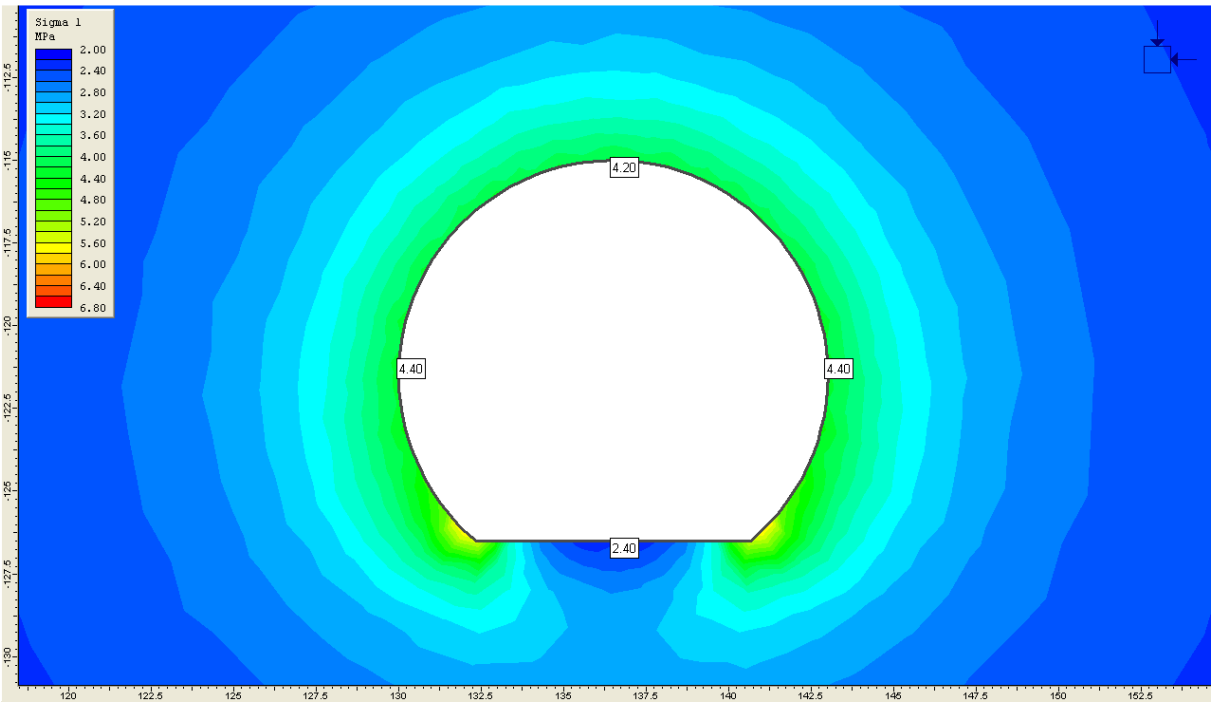
Analiz 4 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



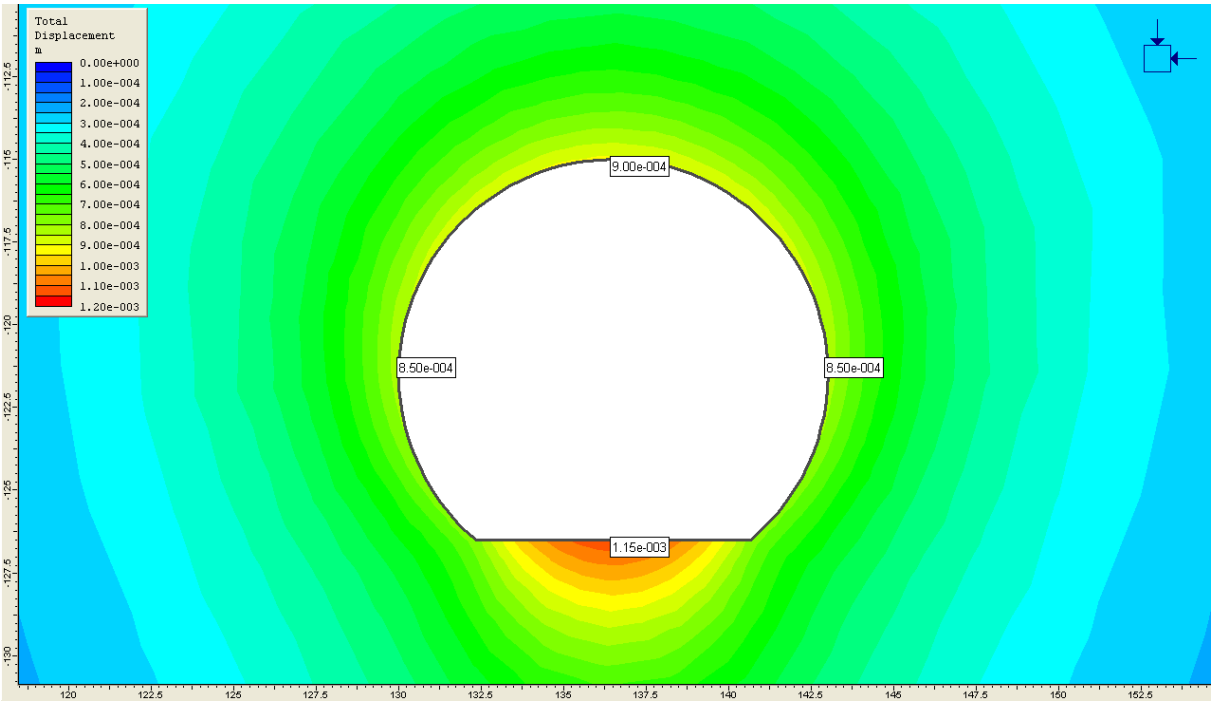
Analiz 5 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



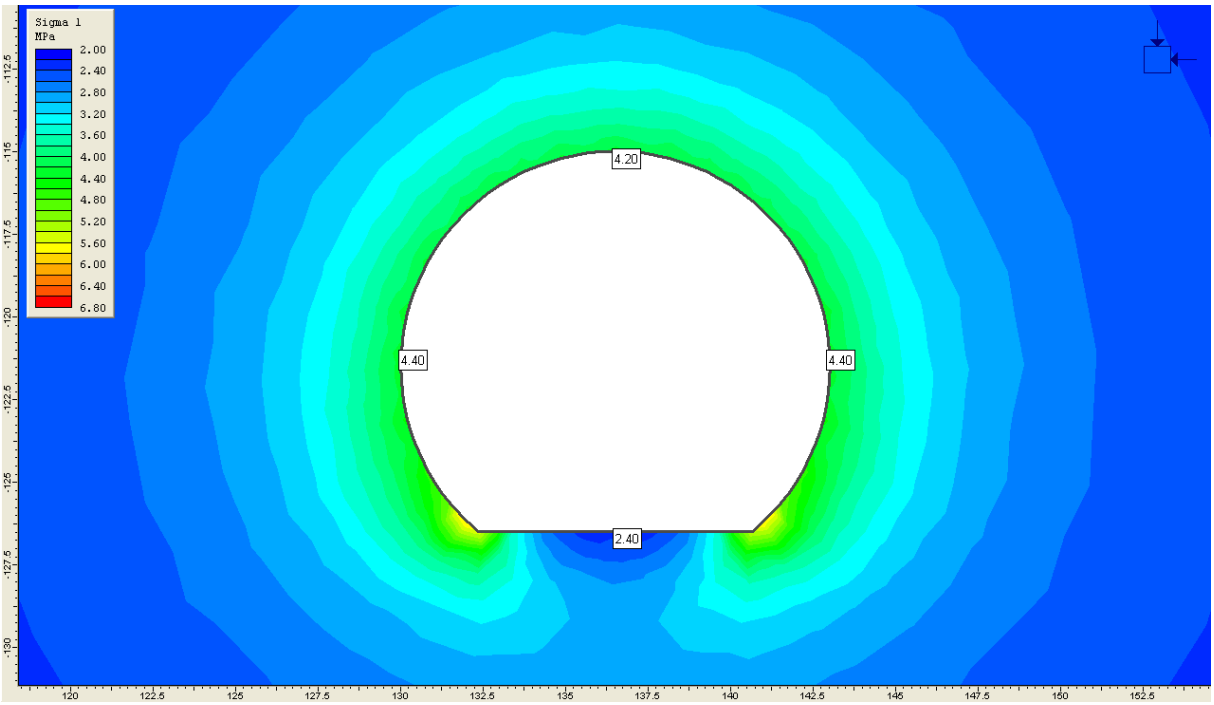
Analiz 5 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



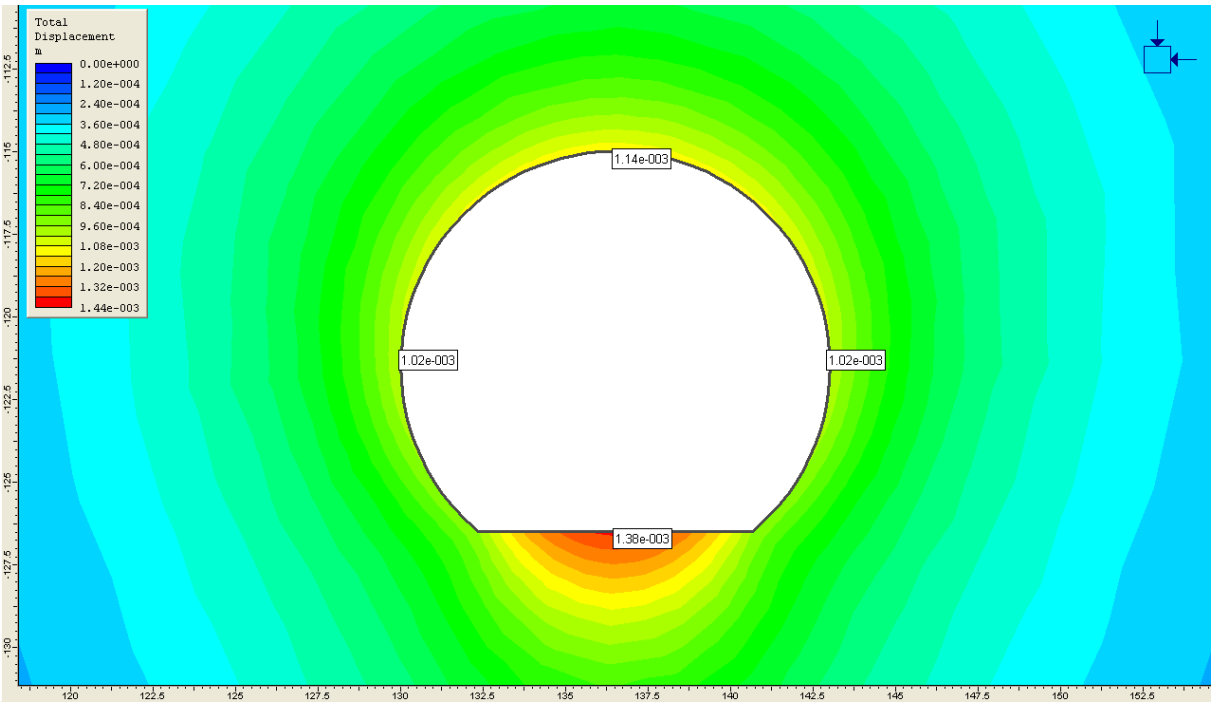
Analiz 6 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



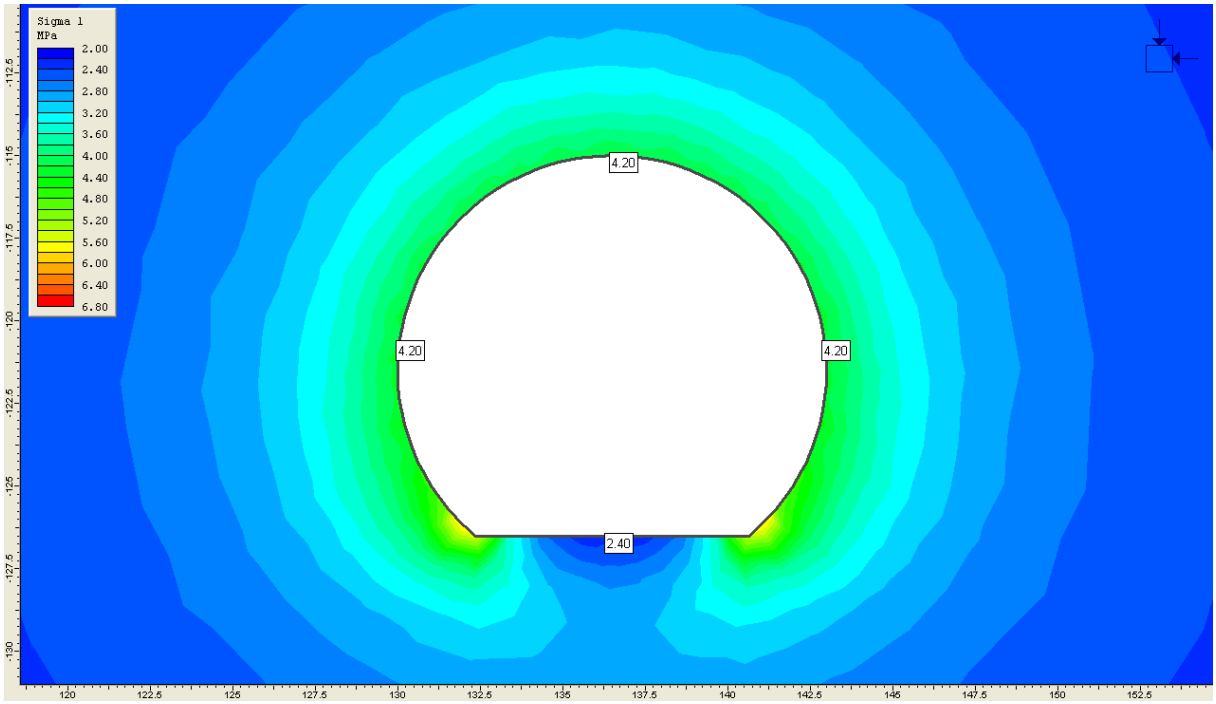
Analiz 6 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



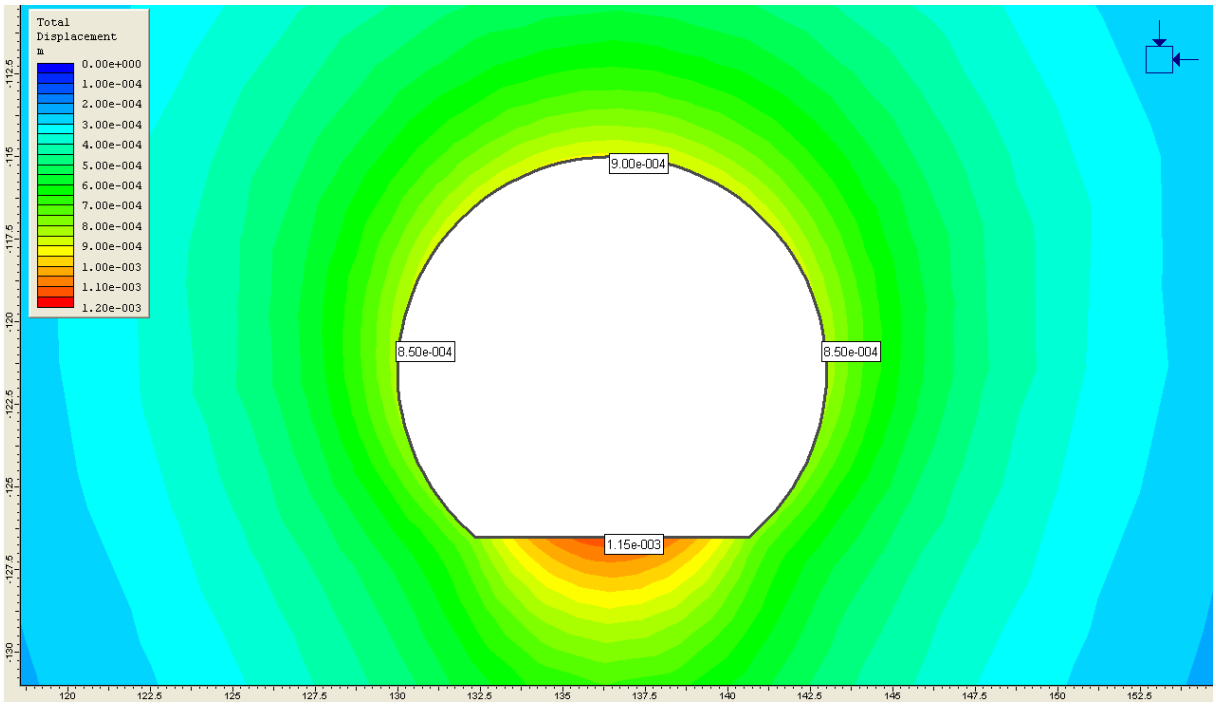
Analiz 7 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



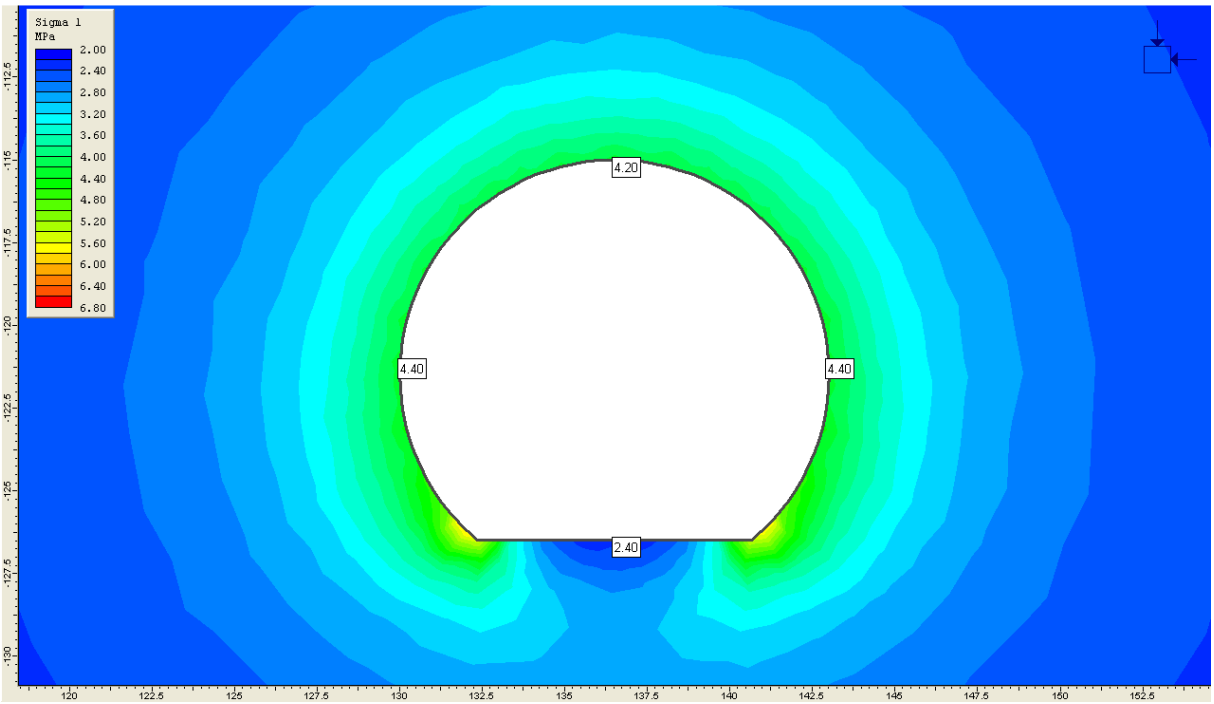
Analiz 7 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



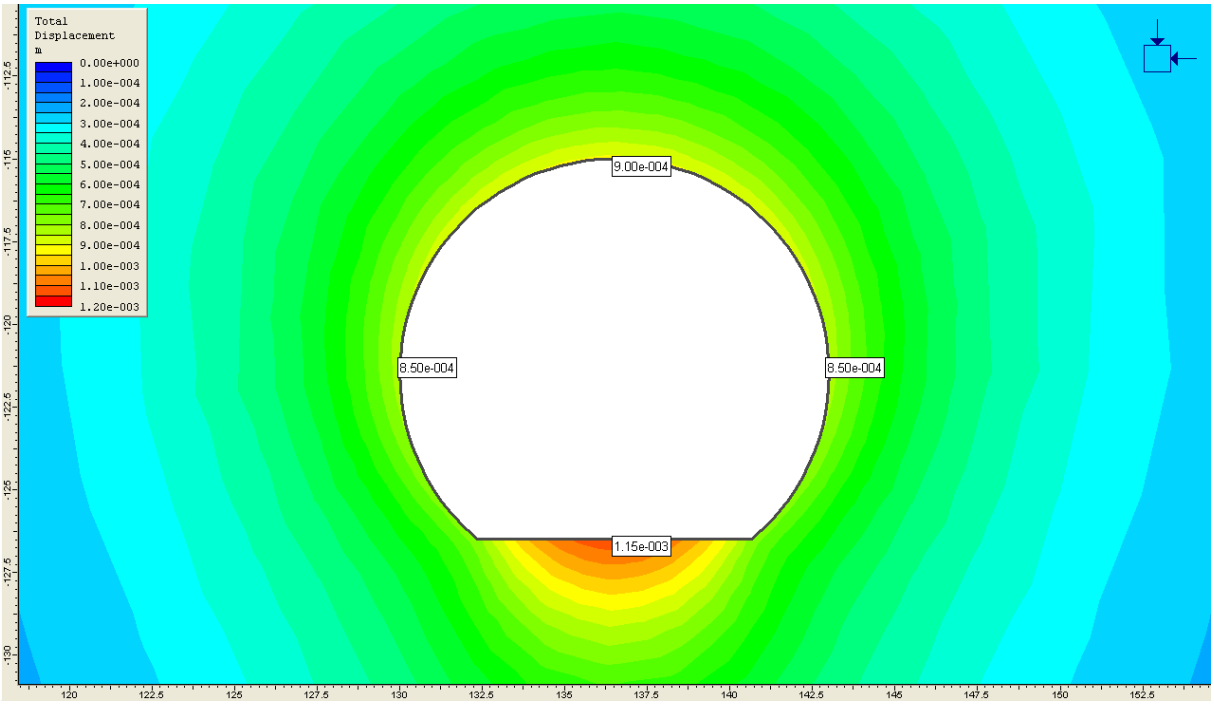
Analiz 8 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



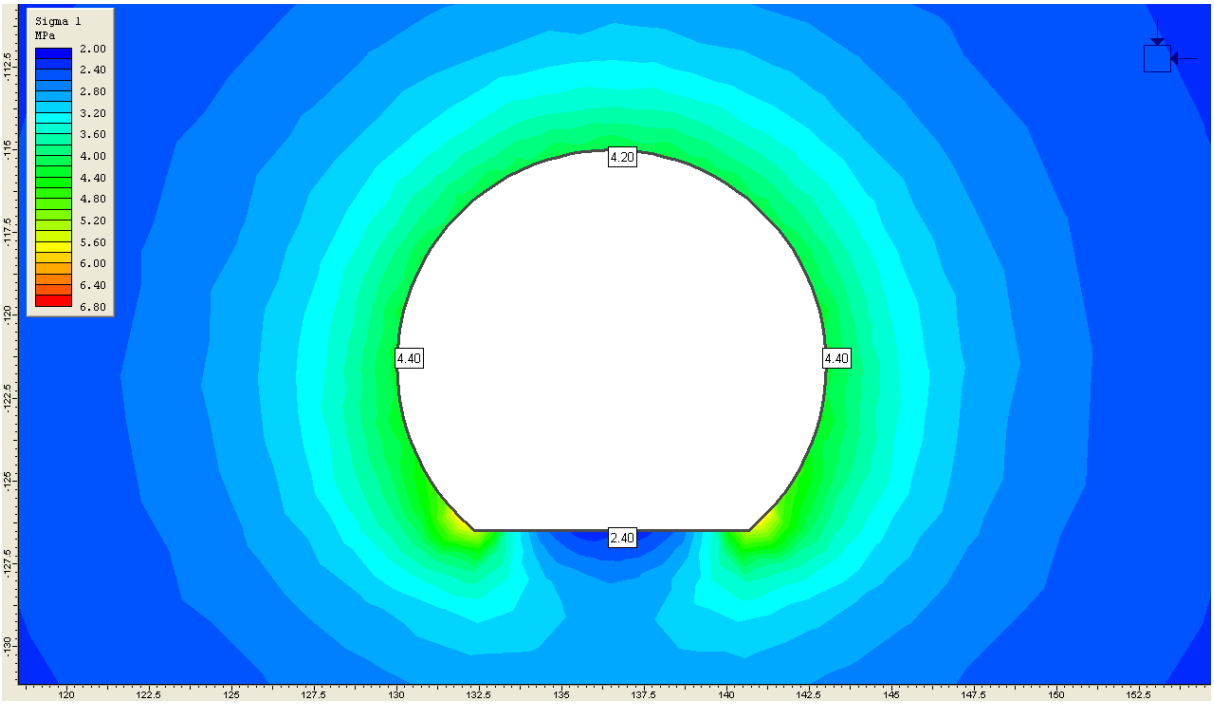
Analiz 8 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



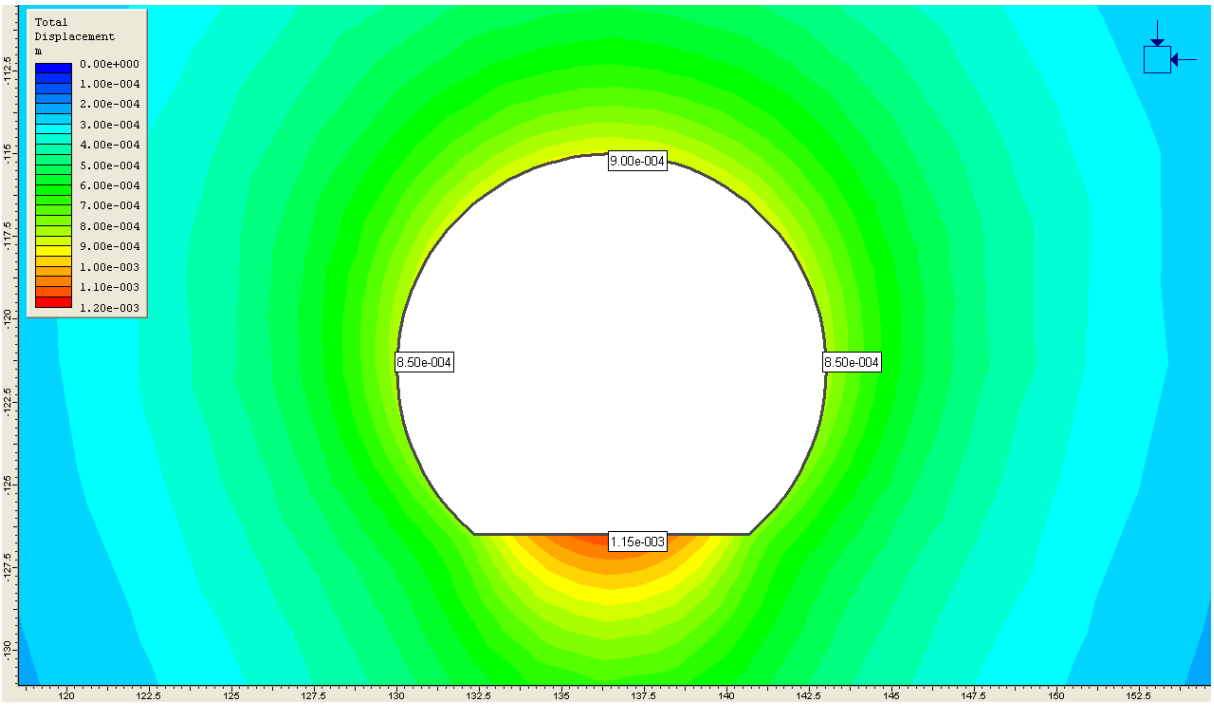
Analiz 9 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



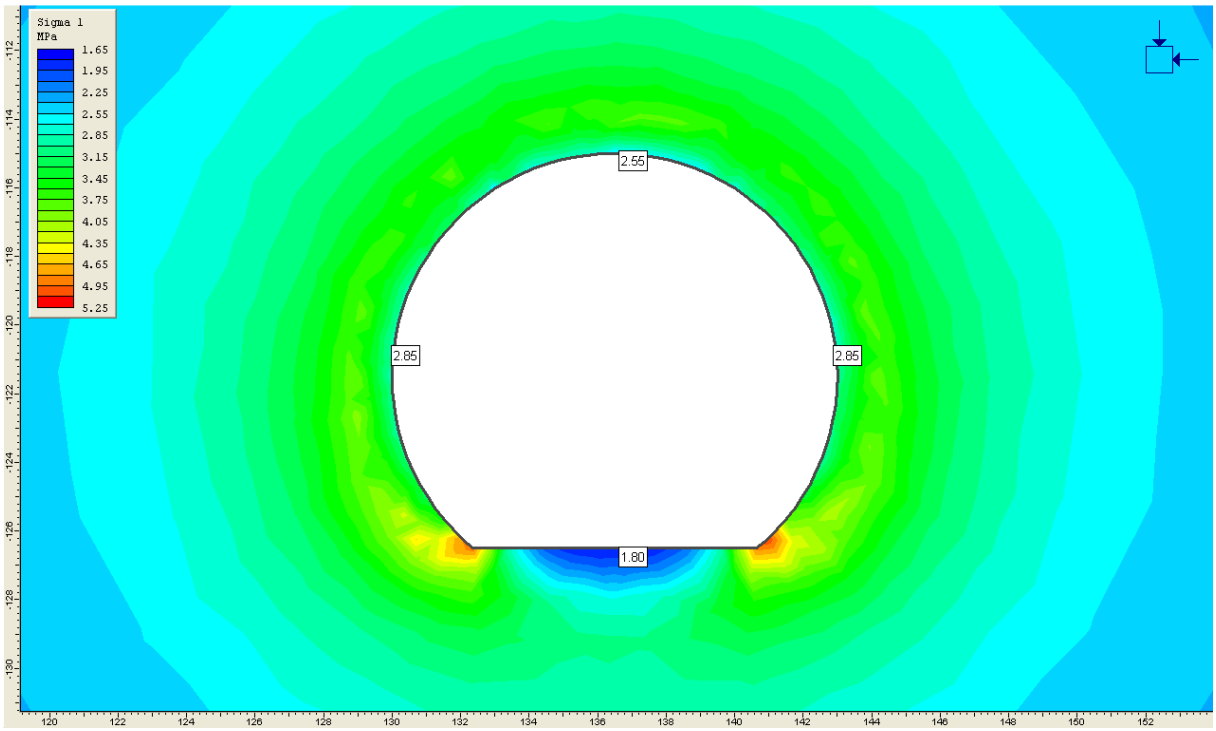
Analiz 9 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



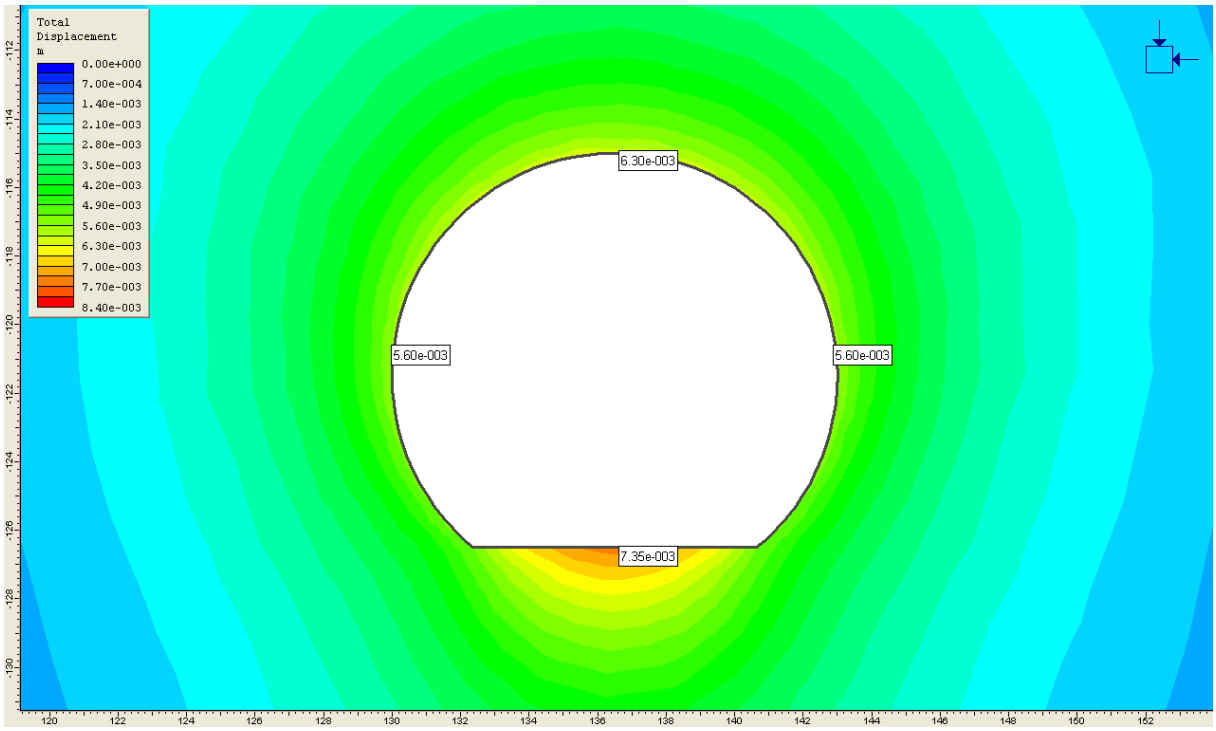
Analiz 10 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



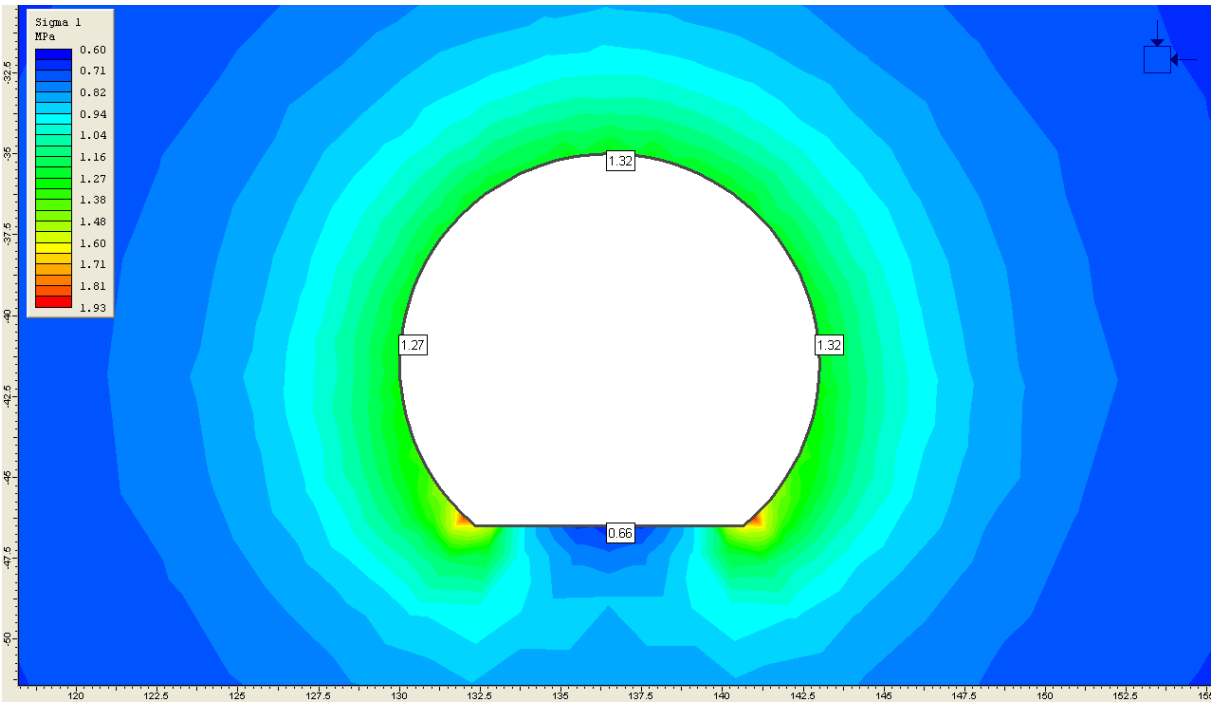
Analiz 10 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



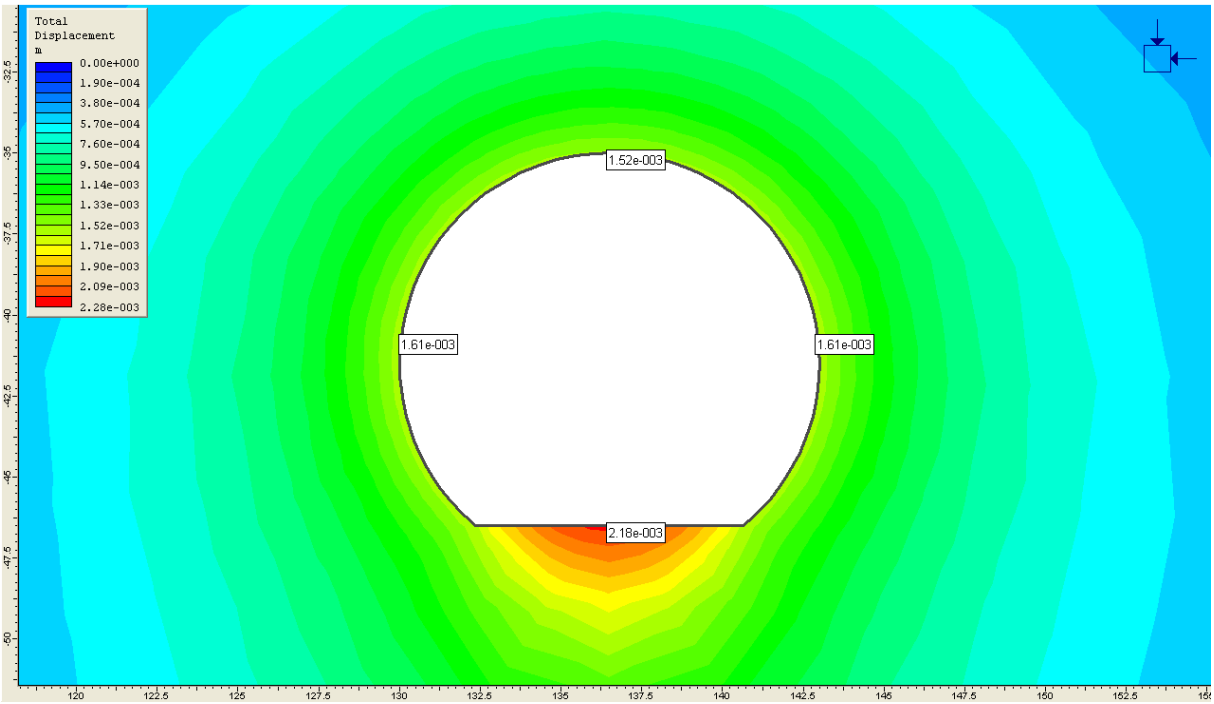
Analiz 11 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



Analiz 11 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)



Analiz 12 Tahkimatlı durum için en büyük asal gerilme dağılımı (Stage 2)



Analiz 12 Tahkimatlı durum için toplam yer değiştirme dağılımı (Stage 2)