İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YERALTI KAYA YAPILARININ DENETİMİ VE YÖNLENDİRİLMESİNDE UZMAN SİSTEM OLUŞTURULMASI

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Bülent KOÇAK

Anabilim Dalı : JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ

KASIM 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YERALTI KAYA YAPILARININ DENETİMİ VE YÖNLENDİRİLMESİNDE UZMAN SİSTEM OLUŞTURULMASI

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Bülent KOÇAK
505022060

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Ağustos 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Kasım 2006

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mahir VARDAR

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Nuh BİLGİN (İ.T.Ü.)

Y. Doç. Dr. E. Vural YAVUZ (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü.)

Prof. Dr. Erol GÜLER (B.Ü.)

KASIM 2006

ÖNSÖZ

"Uzman, sorunların oluşmasını engelleyendir."
M. Vardar, 2006

Yeraltı kaya yapıları inşaatında, mühendise denetim ve yönlendirme aşamalarında yardımcı olacak bir uzman sistem oluşturmak amacıyla gerçekleştirdiğimiz doktora tez çalışmasında beklentimiz; bir sorunla karşılaşıldıktan sonra kendisine danışılan değil, sorun oluşmadan bunun farkına varan ve çözüm getiren bir uzman sistem hazırlamaktı. Hazırladığımız uzman sistem "USTA (Uzman Sistem ile Tünel Analizi)" ile amacımızın temellerini atmayı başardığımıza inanıyorum.

Lisans eğitimim sırasında ekibine katıldığım, meslek yaşamımda kendisini örnek aldığım ve tanıştığımız günden bu yana takipçisi olduğum sevgili hocam Sayın Mahir VARDAR'a, bana harcadığı emek için çok teşekkür ederim.

Sadece doktora çalışmalarım sırasında değil, aynı zamanda lisans ve yüksek lisans eğitimim sırasında da bana her zaman destek olan, fikirleri ile yol gösteren ve sorunlarımızı kendi sorunlarıymış gibi çözmeye çalışan çok değerli hocalarım Prof. Dr. Nuh BİLGİN'e ve Yrd. Doç. Dr. Vural YAVUZ'a çok teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren babama, anneme ve her zaman yanımda olan sevgili eşim Filiz KOÇAK'a minnettarım.

Ayrıca, bana her türlü desteği sağlayan EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şti. yönetici ve çalışanlarına, USTA'nın hazırlanması sırasında çok yardımını gördüğüm Sayın Özgür ÖZÇITAK'a ve ismini burada sayamadığım, çalışmamda emeği geçen dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2006 Bülent KOÇAK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET x
SUMMARY xi

1. GİRİŞ 1

2. YAPAY ZEKA ve UZMAN SİSTEMLER 3

2.1 Uzman Sistemlerin Yapısı ve Çalışma İlkeleri 6

2.2 Yeraltı Kaya Yapılarında Uzman Sistemler 10

3. YERALTI YAPILARI MÜHENDİSLİĞİNİN TEMEL İLKE ve YAKLAŞIMLARI 12

4. YERALTI KAYA YAPILARININ DENETİMİ ve YÖNLENDİRİLMESİ 30

4.1 Yeraltı Kaya Yapılarının Denetlenmesi 30

4.1.1 Litoloji ve dokanak sınırları 30
4.1.2 Kaya kalite sınıflamaları 33
4.1.3 Yerinde kaya dayanım parametrelerinin belirlenmesi 46

4.2 Yeraltı Kaya Yapılarının Yönlendirilmesi 50

5. YERALTI KAYA YAPILARI İNŞASINDA UZMAN SİSTEMLER 58

5.1 Örnek Bir Uzman Sistemin Oluşturulması (USTA) 58

5.2 USTA Çalışma Pencereleri 59

5.2.1 USTA başlangıç ekranı 60
5.2.2 Proje izleme ekranı 61
5.2.3 Tünel ayna kesiti ekranı 63
5.2.4 Konverjans verileri ekranı 73
5.2.5 Proje yönlendirme çalışmaları (USTA) 79

6. ÖRNEK PROJELERDE UZMAN SİSTEMİN UYGULANMASI 95

6.1 Nefise Akçelik (Hapan) Tüneli 95

6.1.1 Nefise Akçelik tünelinde uzman sistem (USTA) uygulaması 100

6.2 Sarayköy Tüneli 114

6.2.1 Sarayköy tünelinde uzman sistem (USTA) uygulaması 123

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 130

KAYNAKLAR 135
EKLER (USTA CD)
ÖZGEÇMİŞ 137

KISALTMALAR

MIT	**:** Massachusetts Institute of Technology
RMR	**:** Rock Mass Rating
RQD	**:** Rock Quality Designation
NATM	**:** New Austrian Tunelling Method
YAY	**:** Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
KGM	**:** Karayolları Genel Müdürlüğü
DSİ	**:** Devlet Su İşleri
SB	**:** Sistem Büyüklüğü
USTA	**:** Uzman Sistem ile Tünel Analizi
B1, B2, B3	**:** NATM'e (Önorm B 2203) Göre Kaya Destek Sınıfı

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1: RQD sınıflamasına göre kaya kalite değerleri 33
Tablo 4.2: RMR sınıflamasına göre kaya kalite değerleri 39
Tablo 4.3: RMR sınıflamasında derecelendirme..... 40
Tablo 4.4: Farklı kayaç türleri için direnç düşüm değerleri [19] 49
Tablo 6.1: Nefise Akçelik tüneli, kayaçların yerinde dayanımları 100
Tablo 6.2: Nefise Akçelik tüneli, Km 10+714.50-sağ tüp ölçüm sonuçları 106
Tablo 6.3: Nefise Akçelik tüneli, bazaltik tüf taş örneği için jeomekanik büyüklükler 113

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Uzman sistemlerin yapısı 4
Şekil 3.1: Tünel projelerinde homojen bölgelendirme Konakönü tüneli örneği 13
Şekil 3.2: Yeraltı Açıklığı Çevresinde Farklı Gerilme Dağılımı 15
Şekil 3.3: Fenner – Pacher eğrisi 23
Şekil 3.4: Yeraltı açıklığının oluşturulması sırasında artarda oluşan taşıyıcı zonlar25
Şekil 3.5: Zamana bağlı deformasyonlar ile sağlamlaştırma süreleri ilişkisi 26
Şekil 3.6: Nefise Akçelik tüneli, azalan deformasyonlar 27
Şekil 3.7: Nefise Akçelik tüneli, hızlanan deformasyonlar 28
Şekil 3.8: Tipik karayolu tüneli tip kesiti 29
Şekil 4.1: Tünel aynasının mühendislik jeolojisi tanımlaması 31
Şekil 4.2: Tünel imalatları için mühendislik jeolojisi tanımlamaları 41
Şekil 4.3: Kaya mekaniğinde aynı ortamın sistem büyüklüğüne bağlı olarak farklı şekilde davranmasının post-failure davranışı ile açıklanması..... 47
Şekil 4.4: Tek eksenli basınç direncine bağlı taş-kaya ilişkisi 47
Şekil 4.5: Gerilme – deformasyon ilişkisi 50
Şekil 4.6: Gerilme durumuna göre zamana bağlı deformasyonlar 51
Şekil 4.7: Zamana bağlı deformasyonların değişimi 52
Şekil 4.8: Nefise Akçelik Km 10+714.50 deplasman-zaman ilişkisi 53
Şekil 4.9: Gerilme - deformasyon - zamanla ilişkisi 54
Şekil 4.10: Deplasman hızının zamana bağlı olarak değişimi..... 55
Şekil 4.11: Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi için algoritma..... 56
Şekil 4.12: Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi için algoritma (devam) 57
Şekil 5.1: USTA karşılama ekranı 59
Şekil 5.2: Başlangıç ekranı 60
Şekil 5.3: Proje bilgileri ekranı ve tünel geometrisi ekranı 61
Şekil 5.4: Proje izleme ekranı..... 62
Şekil 5.5: Tünel ayna kesiti ekranı 63
Şekil 5.6: Tünel derinliği hesaplama ekranı 64
Şekil 5.7: Mühendislik jeolojisi ekranı..... 65
Şekil 5.8: RQD veri ekranı 66
Şekil 5.9: RQD hesaplama ekranı..... 66
Şekil 5.10: Mühendislik jeolojisi verilerinin kaydedilmesi ile ayna kesiti..... 67
Şekil 5.11: Süreksizlikler ekranı..... 68
Şekil 5.12: Mekanik sondaj izleme ekranı..... 70
Şekil 5.13: Mekanik sondaj veri ekranı 71
Şekil 5.14: Fotoğraf ekleme ekranı..... 72
Şekil 5.15: Açıklamalar ekranı 73
Şekil 5.16: Konverjans ölçümleri izleme ekranı..... 74
Şekil 5.17: Ölçüm değerleri izleme ekranı 75
Şekil 5.18: Ölçüm değerleri kayıt ekranı..... 76
Şekil 5.19: Ölçüm noktalarının açıklamaları..... 76
Şekil 5.20: Konverjans ölçümleri rapor penceresi..... 78

Şekil 5.21: USTA proje yönlendirme ekranı 79
Şekil 5.22: Jeomekanik analiz penceresi 81
Şekil 5.23: Eşdeğer çatlak sıklığı yardım penceresi 82
Şekil 5.24: Direnç düşüm değeri yardım penceresi 82
Şekil 5.25: Jr Değeri için yardım penceresi 83
Şekil 5.26: Mühendislik jeolojisi analiz penceresi 84
Şekil 5.27: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından kaya bulonu 87
Şekil 5.28: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından püskürtme beton 88
Şekil 5.29: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından çelik iksa I profil 88
Şekil 5.30: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından çelik iksa TH tipi 89
Şekil 5.31: Grafik penceresi 90
Şekil 5.32: USTA proje örnekleri sayfası 92
Şekil 5.33: Kütüphaneye yeni proje ekleme 93
Şekil 5.34: Kütüphaneye projenin kaydedilmesi 94
Şekil 6.1: Nefise Akçelik tüneli yerbulduru haritası 95
Şekil 6.2: Nefise Akçelik tüneli hava fotoğrafı (google earth) 96
Şekil 6.3: Vadi altında yer alan sorunlu kesim (Vardar) 96
Şekil 6.4: Nefise Akçelik tüneli Km 10+714.50'de ölçülen deplasmanlar 98
Şekil 6.5: B2'den B3'e geçiş sağlamlaştırma tip kesiti 99
Şekil 6.6: Taban kemerli B2 sağlamlaştırma tip kesiti 99
Şekil 6.7: Km 10+712.60 sağ tüp ayna kesiti 101
Şekil 6.8: Km 10+714.10 sağ tüp ayna kesiti 101
Şekil 6.9: Km 10+715.60 sağ tüp ayna kesiti 102
Şekil 6.10: Km 10+712.60 için USTA tünel ayna kesiti 104
Şekil 6.11: Km 10+714.10 için USTA tünel ayna kesiti 105
Şekil 6.12: Nefise Akçelik tüneli, USTA konverjans ölçümleri 107
Şekil 6.13: Nefise Akçelik tüneli, USTA deplasman-zaman eğrileri 108
Şekil 6.14: Deplasman hız – zaman eğrisi 109
Şekil 6.15: Deplasman ivme-zaman eğrisi 110
Şekil 6.16: Tünel sol duvarı deplasman hız-zaman eğrisi 110
Şekil 6.17: Tünel sağ duvarı deplasman hız-zaman eğrisi 111
Şekil 6.18: Tünel tabanı deplasman hız-zaman eğrisi 111
Şekil 6.19: Nefise Akçelik tüneli, USTA mühendislik jeolojisi analizi 113
Şekil 6.20: USTA yerinde jeomekanik büyüklükler 114
Şekil 6.21: Sarayköy tüneli yer bulduru haritası 115
Şekil 6.22: Sarayköy tüneli NATM destekleme sınıfları 116
Şekil 6.23: Sarayköy tüneli ara portali için yapım yöntemi 118
Şekil 6.24: Sarayköy tüneli ara portalinde heyelan sahası 118
Şekil 6.25: Sarayköy tüneli ara portali 119
Şekil 6.26: Sarayköy tüneli T1 tüneli portal, ÖK-4 ölçüm sonuçları 121
Şekil 6.27: Sarayköy tüneli ölçüm noktaları lokasyonu 122
Şekil 6.28: Sarayköy tüneli için USTA konverjans penceresi 123
Şekil 6.29: Sarayköy tüneli USTA deplasman-zaman eğrileri 124
Şekil 6.30: Deplasman ortalama hız-zaman eğrisi 125
Şekil 6.31: Deplasman ortalama ivme-zaman eğrisi 125
Şekil 6.32: Tünel sol omuzu deplasman - zaman eğrisi 126
Şekil 6.33: Tünel sağ omuzu deplasman – zaman eğrisi 126
Şekil 6.34: Tünel Tabanı Hız – Zaman Eğrisi 127
Şekil 6.35: USTA konverjans izleme ekranı 128
Şekil 6.36: USTA deplasman hız-zaman penceresi 128

SEMBOL LİSTESİ

σ	: Gerilme
σ_{arazi}	: Yerinde (In-situ) kaya basınç dayanımı
σ_{iab}	: Laboratuvar kaya basınç dayanımı
ε	: Deformasyon
t	: Zaman
u	: Deplasman
V	: Hız
a	: İvme
$ÇT_n$	: Çatlak takımı
k_{stini}	: Eşdeğer çatlak sıklığı
s	: Dolgu kalınlığı
c	: Kohezyon
φ	: İçsel sürtünme açısı
Jr	: Çatlak pürüzlülük durumu
Jn	: Eklem takımı sayısı
Ja	: Çatlak ayrışma durumu
Jw	: Çatlak suyu durumu
SRF	: Gerilme durumu
i	: Heterojenlik sayısı
χ	: Çatlak açıklığı
f	: Direnç düşüm sayısı

YERALTI KAYA YAPILARININ DENETİMİ VE YÖNLENDİRİLMESİNDE UZMAN SİSTEM OLUŞTURULMASI

ÖZET

Yeraltı kaya yapıları yerkabuğu içinde herhangi bir boşluğun açılmasından sonra bu boşluğu çevreleyen ana kayadan oluşan, mühendislik açısından yeterli ve güvenli taşıyıcı sistemlerdir. Kayanın açım sırasında karşılaşılan niteliklerinin saptanması ve değişimlerinin sürekli olarak izlenmesi yeraltı kaya yapısının denetim çalışmalarını, önlem alınmasını gerektiren durumlarda izlenmesi gereken yöntem ve işlemlerin belirlenmesi ise yönlendirme çalışmalarını oluşturmaktadır. Denetim çalışmaları kapsamında ayrıntılı mühendislik jeolojisi ve geoteknik araştırmalar yapılmaktadır. Yapım sırasında sağlanan çok sayıda veri birbirleri ile ilişkilendirilerek incelenmek zorundadır. Uzmanlık ve titiz çalışmalar gerektiren denetimler sağlanamadığında tünel açımını güvenlik açısından değerlendiren yönlendirici uyarılar yapılamamakta ve gerekli öneriler zamanında, doğru ve etkin olarak getirilememektedir. Bunun sonucunda tünelde aşırı deplasmanlarla karşılaşılabilmekte ve göçükler olabilmektedir.

Uzman sistemler en genel anlamıyla insanın düşünme yöntemini ve mantığını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi çalışmaları sırasında kullanılabilen bir uzman sistem çok sayıdaki verinin arşivlenmesini sağlamakta, verileri birbirleri ile ilişkilendirmekte ve deplasmanları her ölçüm noktası için sürekli olarak izleyerek, bir problem olması durumunda bu sorunun nedenlerini ortaya koyarak mühendise çözümü rapor etmektedir.

Çalışmanın amacı; yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesinde uzman sistemlerin uygulanabilirliğinin incelenmesi, örnek bir uzman sistem için gerekli algoritmanın kurulması ve bir uzman sistem programının oluşturulmasıdır.

Uzman Sistem ile Tünel Analizi (USTA) olarak adlandırmış olduğumuz yazılım Karadeniz Sahil Yolu Projesi kapsamında inşa edilen Nefise Akçelik tünelinde ve Sarayköy tünelinde denenerek geliştirilmiştir. USTA, tünellerdeki deplasman değişimlerini fark ederek, sorunun nedenini doğru olarak saptamış ve uygulanabilir çözüm önerileri getirmiştir. Bu çalışmada ayrıca uzman sistemin denetim ve yönlendirme çalışmalarındaki başarısı ile sağlayacağı faydalar tartışılmıştır.

BUILDING AND EXPERT SYSTEM FOR SUPERVISING AND MANAGEMENT OF UNDERGROUND ROCK STRUCTURES

SUMMARY

Underground rock structure is the surrounding rock of an underground opening which is safe and sufficient for engineering applications. Defining the rock mass properties and observing the changes continuously is the supervising works and describing the methodology and process when needed are the management works in underground rock structures constructions. During supervision works, detailed engineering geology and geotechnical observations are performed. It is a must to evaluate related data, gained during construction phases. If supervision works are not done fastidiously, large displacements or even subsidence may occur in tunnel.

Expert systems can be defined as computer programs, which imitate humans thinking methodology and logic. An expert system, used during construction of an underground rock structure, would save large amount of data, relate them, observe displacement changes for every measurement point continually, and if a problem occurs, expert system can define the cautions of the problem and report the results.

The aim of the work is examining the applicability of expert system to supervising and management works of underground rock structure constructions, building the algorithm and constituting an expert system.

The developed program is named as USTA, Universal Systems for Tunnel Analysis, and is applied to two kinds of tunnel projects: Nefise Akçelik Tunnel and Sarayköy Tunnel constructed in the scope of Black Sea Highway Project. USTA has recognized the displacement changes, determined the reasons correctly and offered applicable solutions. In this study, the effectiveness of expert systems in application to underground rock structures supervision and management is also discussed.

1. GİRİŞ

Yeraltı kaya yapıları yerkabuğu içinde herhangi bir boşluğun açılmasından sonra bu boşluğu çevreleyen ana kayadan oluşan, mühendislik açısından yeterli ve güvenli taşıyıcı sistemlerdir. Kayanın açım sırasında karşılaşılan niteliklerinin saptanması ve değişimlerinin sürekli olarak izlenmesi yeraltı kaya yapısının denetim çalışmalarını, önlem alınmasını gerektiren durumlarda izlenmesi gereken yöntem ve işlemlerin belirlenmesi ise yönlendirme çalışmalarını oluşturmaktadır.

Günümüz tünelcilik anlayışında kaya niteliklerinin saptanması için yapılan çalışmalar; kazı sonrası tünel aynasına ait mühendislik jeolojisi kesitlerinin oluşturulması, kaya kalite sınıflamalarının yapılması ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak destek sistemlerinin belirlenmesi aşamalarından oluşmaktadır. Kaya niteliğindeki değişimlerin yeraltı kaya yapısının stabilitesine olan etkisi ise jeoteknik ölçümler ile izlenmektedir. Gerekli görülen durumlarda yatay sondajlar yapılmakta, ilerleme yönüne bağlı olarak ortamın olası davranışı önceden kestirilebilmektedir. Elde edilen tüm veriler birada değerlendirilmekte, projelendirme aşamasında yapılan öngörüler ile karşılaştırılmakta ve önlem alınmasını gerektirecek durumlarda karar verebilmek için gereken veri ve bilgiler sağlanabilmektedir.

Denetim ve yönlendirme çalışmaları tünellerde uzman mühendislerce yapılmaktadır. Yukarıda açıklanan işlemler titizlikle gerçekleştirilmediğinde göçükler oluşabilmekte, can ve mal kayıpları yaşanabilmektedir. Bu tür sorunların yaşanmaması için, bilgisayar teknolojisinden faydalanılması ekonomik olduğu kadar, etkin çözüm kararlarının alınmasını da kolaylaştırmaktadır.

Uzman sistemler en genel anlamıyla insanın düşünme yöntemini ve mantığını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Bu programlar amacı, içeriği ve kapsamı somutlaştırılmış belirli konularda hazırlandıkları için "uzman" sıfatıyla anılmaktadır. Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirme çalışmalarında uzman sistemlerin kullanılması, denetim çalışmalarında elde edilen çok sayıdaki verinin kolayca arşivlenmesini sağlamakta, sağlanan her verinin öncekiler ile birlikte

değerlendirmesini yapmakta, bir problem oluşmadan mühendisi uyarmakta ve sorunun nedenini saptayarak çözüm için öneriler getirmektedir.

Yazılımların sahip oldukları geniş veri tabanları sayesinde birden fazla proje eş zamanlı olarak izlenebilmekte ve değerlendirmeler için benzer proje örneklerinden faydalanılabilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı; yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi için kullanılabilecek bir uzman sistemin oluşturulmasıdır. Tezin teorik bölümlerinde uzman sistemler ayrıntılı olarak tanıtılmış, yeraltı kaya yapılarında denetim ve yönlendirme çalışmalarının nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Yerinde gözlem, ölçüm ve izleme verilerinin zamana bağlı ikincil gerilme oluşumları (σ, τ) ve deformasyonlar (u, ε) dikkate alınarak, f (σ, ε, t) ilişkisine dayalı bir uzmanlık yaklaşımı geliştirilmiştir. Uygulama bölümünde ise Visual Basic programlama dili kullanılarak bir uzman sistem yazılımı hazırlanmış ve bu yazılım sorunlu iki farklı tünel uygulamasında elde edilen veriler ile denenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve "bu tünellerde benzer bir yazılım kullanılmış olsaydı, tüneldeki deformasyon sorunlarına karşı erken önlem alınabilir miydi ?" sorusu cevaplanmıştır. Sonuçlar bölümünde ise bu tür yazılımların pratik tünelcilikte sağlayacakları yararlar ile zayıf kalan yönleri tartışılmıştır.

2. YAPAY ZEKA ve UZMAN SİSTEMLER

Yapay zeka (Almanca'da "Künstliche Intelligenz-KI" veya İngilizce anlamı ile "Artificial Intelligence-AI") bilgisayar bilimlerinin bir dalıdır. Yapay zekanın temeli, bilgisayarların olayları algılayabilmeleri ve problemleri çözebilmeleridir. Algılama ve çözüm üretmenin insanların zekaları ile gerçekleştirdiği davranışlar olduğu düşünülürse, bilgisayarların da benzer şekilde zeki olmaları beklenmektedir. Yapay zeka kullanılarak hazırlanan en popüler yazılımlar strateji oyunları (satranç, dama) ve bir dili anlayıp, konuşabilen programlardır. Burada esas, problemin çözümü için gerekli algoritmanın oluşturulmasıdır [1].

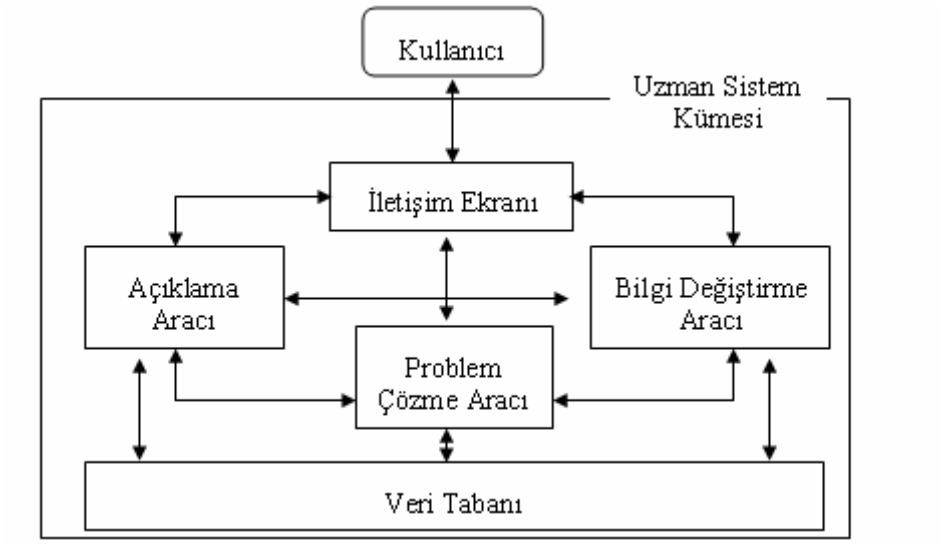
Bir makinanın zeki olup olmadığı Alan Turing tarafından geliştirilen ve Turing-Testi olarak anılan test ile ölçülmektedir. Buna göre; "bir odada bir iletişim aracı ile iletişim kuracak olan insan bulunacaktır. İkinci bir odada ise bir insan veya bir makina bulunacaktır. Birinci odada bulunan kişi çeşitli sorular sorarak karşısındakinin bir insan mı, makina mı olduğuna karar verecektir. Eğer karar veremezse makinanın insani zekaya sahip olduğu söylenebilir" denilmektedir [1].

Bugüne dek bu sınavı geçebilen bir yazılım geliştirilememiş olmasına karşın, sınırlandırılmış konularda yapılan görüşmelerde başarılı olan programlar hazırlanabilmiştir. Ancak henüz bu yazılımlar zeki olarak nitelendirilmemektedir.

Zeki insanlar alışılagelmişin dışında yeni bir durumla karşılaştıklarında probleme uyum sağlayabilmekte, seçenekler oluşturabilmekte ve çözüm üretebilmektedirler. Bu çerçevede kombinasyonları ve olasılıkları değerlendirmektedirler. Yapay zekada amaç, makinaların da benzer şekilde çözüm üretmelerinin sağlanmasıdır. Burada beklenen makinaların yazılımlarında var olan kodları teker teker sorgulayarak çözüm üretmelerinden ziyade, uzman bir insan gibi davranarak ve onun gibi düşünsel yeteneklere sahip olmalarıdır. Yapay zekanın ilk geliştirilmeye başlandığı yıllarda uygulanabilir problem çözme teknikleri geliştirilmeye çalışılmış ve analitik

çözümlerin yanında sezgisel çözümlerin de olması gerektiği görülmüştür. Bu ise ancak depolanmış bilgi ile sağlanabilmektedir.

Uzman sistemler; belirli bir konuda bilgiyi toplayan ve depolayan, bunları kullanarak bir sonuç elde eden, belirli problemler için çözümler öneren yazılımlardır. Buna göre; uzman sistemler çok kapsamlı veri tabanlarına sahip olmalı, verileri analitik ve sezgisel yöntemler kullanarak işleyebilmeli, değerlendirebilmeli, bunlardan yeni bilgiler elde edebilmeli, seçenekler oluşturarak, kendisine sunulan problemi çözebilmelidir. Yazılım ayrıca çözüm için kullandığı yöntemi de göstermelidir. Şekilde 1'de böyle bir uzman sistemin temel yapısı gösterilmeye çalışılmıştır;



Şekil 2.1: Uzman sistemlerin yapısı

Veri Tabanı: Tüm kural ve gerçeklerin tanımlandığı kısımdır.

Açıklama Araçları: Kullanıcıya çözüme nasıl ulaşıldığına dair açıklamaların olduğu kısımlardır.

Problem Çözme Araçları: Belirlenen strateji doğrultusunda kural ve gerçekleri kullanarak çözüm üreten kısımdır.

Bilgi Değiştirme Aracı: Tanımlı gerçek ve kuralları değiştirerek veri tabanını oluşturur.

İletişim Ekranı: Kullanıcı ile yazılım arasındaki program ara yüzüdür.

Bu temele göre uzman sistemler sadece veri tabanı yazılımı olmaktan çıkmaktadırlar. Uzman sistemler sadece verileri kullanıcıya sunmamakta, bunları tanımlı kuralları kullanarak bilgiye dönüştürmekte ve uygulanabilir hale getirmektedirler. Uzman sistemler aynı zamanda öğrenebilir yazılımlardır. Sürekli olarak veri tabanlarına bilgi eklendiği için kendilerini geliştirmektedirler. Yazılımlar çözüm üretebildikleri ve sonuca nasıl ulaştıklarını açıklayabildikleri için kendilerini açıklayabilme özelliğine sahiptirler.

Geliştirilmiş ilk uzman sistemlerin en bilineni 1975 yılında Stanford Üniversitesi tarafından hazırlanan Mycin'dir. Enfeksiyon hastalıklarına karşı teşhis ve tedavi amaçlı kullanılan yazılım özellikle kandaki bakteriyel hastalıklara karşı geliştirilmiştir. Yazılım, doktora hasta hakkında sorular sormakta, sonuca ulaşmakta ve teşhisini koyarak tedavi yöntemi önermektedir. Mycin, yaptığı teşhis ve önerdiği tedavi için doğruluk oranını da yüzdesel olarak verebilmektedir. Bu sayede kullanıcı aldığı kararların ne kadar risk taşıdığını görebilmektedir.

Son 30 yıl içerisinde hazırlanan uzman sistemlerden örnekler aşağıda verilmiştir [2];

- Dendral: 1965 yılında Stanford Üniversitesinde geliştirilen yazılım karmaşık organik moleküllerin kimyasal yapılarını belirleyebilmektedir.
- Mathematica (Macsyma): 1971 yılında MIT'de geliştirilen yazılım, günümüzde de yaygın bir şekilde kullanılan ve ileri seviyede matematik analiz yapabilen bir yazılımdır.
- Puff: 1979'da Stanford Üniversitesinde geliştirilen yazılım Kaliforniya Tıp Merkezinde (California Medical Center) aktif olarak kullanılmaktadır.
- Prospector: 1979'da SRI International tarafından hazırlanan yazılım sondaj verilerini kullanarak analiz yapabilmektedir. Yazılım ile zengin bir molibden yatağı bulunmuştur.
- Xcon (eski adıyla R1): 1980 yılında Carnegie-Mellon Üniversitesinde hazırlanan yazılım emlak danışmanı olarak kullanılmaktadır. Yazılım 1981'den bu yana %90 doğrulukla sonuç vermektedir.

- Drilling Advisor: Teknowledge tarafından geliştirilen yazılım petrol sondajlarında karşılaşılan karmaşık faylanmalarda kullanılmaktadır.

- TUX: 1990 yılında Japonya'da geliştirilen yazılım tünellerin projelendirilme aşamasında destek sistemlerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır.

- Vax AI: 1991 yılında Japonya'da geliştirilen yazılım kaya şevleri için duraylılık analizi yapmaktadır.

2.1 Uzman Sistemlerin Yapısı ve Çalışma İlkeleri

Uzman sistemlerin uygulanabileceği problemler genel olarak iki kategoride sınıflandırılabilir [3, 4];

- Yüksek oranda belirsizlikler ve değişkenler vardır, çok sayıda kombinasyonların kurulması gerekmektedir. Kesin bir çözüme ulaşmak için ise zaman ve uygulama alanı sınırlıdır.

- Matematiksel olarak kesin model kurulması zordur. İçerik günlük yaşamda karşılaşılan sorunlardır. Bunlar genellikle uzun, anlaşılmaz, düzensiz, güvenilmez ve kimi zamanda yanlıştır. Yine de insanlar bu tür sorunlara genellikle uygulanabilir çözümler getirebilmektedirler. Uzman sistemlerden de bir çözüm getirmeleri beklenmektedir.

Programlar bu tür problemleri çözebilmek için iki özelliğe ihtiyaç duymaktadırlar. Bunlar; veri tabanı ve çıkarım-karar motorudur (sonuca ulaşmayı sağlayan algoritmaların tümü).

Bilgi veri tabanına belirli bir yapıda kaydedilmektedir. Bunun için ise gerçekler ("Fact"/bilinen olgular) ve kurallar ("Rules"/gerçeklerden çıkarılan hükümler) tanımlanmakta ve ilişkilendirilmektedir. Uzman sistemler için bir yazılım hazırlanırken nesnelerin tanımlanması, bunların birbirleri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir.

Örneğin “Bazalt sağlam bir kayadır” denildiğinde bazalt ve kaya birer nesne, bazaltın bir kaya olması da bir “gerçektir”. Sağlamlık ise onlar arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu ilişkinin ne zaman doğru olacağını belirleyen ifadeye “kural” denir. “(Eğer) Bazalt ayrışmamış ise sağlam bir kayadır” cümlesinde “ayrışmamış” ifadesi bu nesneler arasındaki kuralı oluşturmaktadır. Programlama dillerinde kurallar eğer (if), ise (then) ifadeleri ile tanımlanmaktadır. Birden fazla kural tanımlamak için ise bu ifadeler ve-veya (and-or) ifadeleri ile desteklenmektedir.

Uzman sistemlerde var olan bilgi aşağıdaki şekillerde olabilir;

- Belirgin bilgiler (explicit knowledge): Bilgi olarak programcı tarafından tanımlanan veriler.
- Belirsiz bilgiler (implicit knowledge): Sistem tarafından elde edilen ve veri tabanına kaydedilen bilgiler.
- Doğrudan bilgiler (direct knowledge): Belirgin ve belirsiz bilginin birleşmesinden oluşan bilgi.
- Dolaylı bilgiler (indirect knowledge): Algoritmada yer alan ve tanımlanmış şartın sağlanmaması durumunda elde edilecek olan bilgidir.

Tüm uzman sistemler bilgiyi veri tabanında arama temeli üzerine kurulmuştur. Arama işlemlerini daha etkili hale getirmek için birçok araştırma ve deneme yapılmıştır. Genellikle kullanılan arama yöntemleri; sınır koşulların belirlenmesi ve kümelerin oluşturulması, verilen elenmesi ile sonuca gidilmesi, geniş çaplı yüzeysel aramaların yapılması veya ayrıntılı aramaların yapılması gibi özelliklere sahiptirler.

Veriden sonuca gidilmesi için ise iki yöntem vardır, bunlar tümevarım ve tümdengelim yöntemleridir. Tümevarım yönteminde koşullar irdelenmekte, bunların sağlanıp-sağlanmama durumuna göre daha sonraki aşamaya geçilmektedir. Tümdengelim yönteminde ise sonuca ulaşmak için gerekli olan koşulların varlığı araştırılmaktadır. Bu yöntem genellikle tüm sonuçların bilinmesi ve olasılıkların az olması durumunda kullanılmaktadır.

Sonuç olarak; uzman sistemler karar verecek kişilerin sınırlı olması durumunda kişilere yardımcı olabilecek yazılımlardır. Yazılımların kullanılabileceği koşullar aşağıdakilerden biri veya birkaçı olabilir;

- Uzman insan bulmak zordur.
- Aşırı iş yükünden ötürü insanlar yorulabilir.
- İnsan çok önemli detayları unutabilir.
- İnsan günlük koşullara göre birbirleri ile tutarsız kararlar alabilir.
- İnsan hafızası sınırlıdır.
- İnsan çok miktardaki veriyi çok kısa sürede değerlendiremez.
- İnsanın hatırlama süresi daha yavaş olabilmektedir.
- İnsan koşullara göre daha temkinli olabilmekte veya çevresinden etkilenebilmektedir.
- İnsan sorumluluk almaktan çekinebilir.
- İnsan yalan söyleyebilir, bilgiyi gizleyebilir.

Yazılımların insana kıyasla yukarıda açıklanan üstünlükleri olsa da, uzman sistemlerin de sınırları bulunmaktadır. Bunlar:

- Doğası algoritmalara dayanmaktadır ve makina gücü ile sınırlı güce sahiptir.
- Çözüm için kimi zaman elde edilmesi mümkün olmayan bilgilere de ihtiyaç duyabilmektedir.
- Uzman kişilerin sahip olduğu sezgisel birikimden yoksundurlar.
- Değişken koşullara kolayca uyum sağlayamamaktadırlar.
- Sağlayacakları çözüm, sahip oldukları veri tabanı ile sınırlıdır. Bu veri tabanının eksiksiz olarak tamamlanması ise çok zordur.

Uzman sistemlerin geliştirilmesi sırasında çözüme gidilirken izlenen yolun değişik uygulama alanlarında benzerlik gösterdiği görülmüştür. Bilimsel içerikleri farklı olmakla birlikte, hazırlanan uzman sistemlerin genelde hep aynı temel özelliklere sahip olduğu anlaşılmıştır.

Uzman sistemlerin kurgusuna bakıldığında sistemlerin başlıca üç farklı temel alanda problem çözme mantığını kullanmakta oldukları görülmektedir. Bunlar:

1. Teşhis, Tanı(lama)

2. Üretim – Planlama

3. Benzetim

Tanılama (teşhis) için geliştirilmiş olan uzman sistemlerde kullanılan veriler (gözlemler, hata olasılıkları, hasarlar…), veri tabanında daha önce tanımlanmışlarla karşılaştırılır ve aralarından uyuşan yakınsayanı çözüm olarak verilir. Bu yöntemin kullanıldığı başlıca uygulama alanları; yorumlama gerektiren konular, kontrol, teşhis-tedavi, hata bulma, seçim yapma ya da sınıflama gerektiren alanlardır. Bu tür çalışmalarda karşılaştırılması gereken birçok veri olsa da, problemi yansıtan belirgin bir göstergenin (semptom-belirti) bulgulanması ve bir tanıya ulaşılması istenir. Ancak sorunun anlaşılması, belirti ve tanı ilişkisinin kurulması bazen birden fazla çözüm seçeneğinin de ortaya çıkması ile sonuçlanabilmektedir.

Üretim-Planlama amaçlı uzman sistemlerde problem küçük parçalara ayrıştırılmaktadır. İmalat aşamasının her bir kalemi, planlama adımlarında kullanılmaktadır. Bu tür uzman sistemlerden genellikle tasarımda, bilgisayar konfigürasyonlarında, planlamada, deneyimlerin uygulanmasında yararlanılmaktadır.

Benzetim yapılan problemlerde çeşitli durumlar için kurallar tanımlanmakta (genellikle bulanık mantık ile), modelleme yapılmakta ve çözüme gidilmektedir. Bilgisayarda yapılan sayısal benzetim, deneylerle desteklenmektedir. Bu tür uzman sistemlere örnek olarak makinaların çalışmaları ve verimlilikleri üzerine yapılan araştırmalar gösterilebilir.

2.2 Yeraltı Kaya Yapılarında Uzman Sistemler

Tünel mühendisliği, jeoteknik mühendisliği çalışma alanı içerisinde yer alan ve temelinde jeomekanik, mühendislik jeolojisi, genel jeoloji, jeofizik ve harita mühendisliğinin yer aldığı çok yönlü bir disiplindir. Yeraltı kaya yapıları, yeraltında oluşturulan ve herhangi bir destekleme elemanı ile desteklenmemiş, ana kayadan oluşan taşıyıcı sistemlerdir. Bu yapıların güvenli olarak imalatı, oluşturulmakta olan tünelin de güvenli ve ekonomik olmasını sağlamaktadır. Teknik girişimin zor doğa koşulları içerisinde yer almasından ötürü bu tür yapıların maliyetleri genellikle çok yüksek olmakta, güvenli imalatın yapılabilmesi için proje ve yapım aşamalarında uzman kişilerin çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yeraltı kaya yapılarının oluşturulmasından sorumlu olan uzman mühendisler arazi koşullarını sürekli olarak denetlemek ve değişimleri izlemek zorundadır. Teknik girişimin projelendirilmesi aşamasından başlayarak, imalatın tamamlanmasına kadar geçen sürede sağlanan çok sayıda veri sürekli olarak kaydedilmekte ve değerlendirilmektedir. Projelendirme aşamalarında tünel stabilite analizi yapan veya imalat aşamasında jeoteknik ölçüm sonuçlarından deplasman-zaman grafikleri hazırlayan programlar kullanılıyor olsa da, inşaat sırasında sağlanan tüm verileri kaydeden, bunları değerlendiren, gerektiğinde sorumlu mühendisi uyaran ve soruna karşı yol gösteren bir yazılım henüz geliştirilmemiştir.

Böyle bir yazılımın uzman sistem prensiplerine dayanarak hazırlanması gerekmektedir. Yazılım geniş bir veri tabanına sahip olmalı, sürekli olarak sağlanacak yeni veriler ile kendisini geliştirmelidir. Uzman sistem, arşiv özelliğine sahip olacağı için yalnızca sayısal verileri değil, aynı zamanda tünel aynasından sağlanan fotoğrafları da saklayabilmeli ve bunları silinme olasılığına karşın bilgisayarın sürücüsünde değil, veri tabanında saklamalıdır. Yazılımın en önemli özelliği, sonuca ulaşmak için zor elde edilen bilgilere ihtiyaç duymaması olmalıdır. Ne yazık ki, uygulama aşamalarında kapsamlı araştırmalar yapılamadığı için kaya özelliklerine ait tüm mekanik özellikler deneysel olarak belirlenememektedir. Bu gibi durumlarda yazılım kullanıcıya öneriler getirmeli, literatür verilerine dayanarak kabuller yapabilmelidir. Yazılımda bir kütüphanenin olması, projelerin kaydedilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, bir sorunla karşılaşıldığında diğer projelerde uygulanan çözümler de incelenebilmektedir. Uzman sistem elde ettiği

sonuçları kullanıcıya rapor olarak sunabilmeli ve ofis programları (Ms Word, Ms Excel) ile uyumlu olacak şekilde kaydedilmesine imkan sağlamalıdır.

Tez çalışması kapsamında seçilen uzman sistem yukarıda açıklanan özelliklere sahip olmakla birlikte, yazılımın kullanım alanları ve sınırları aşağıdaki gibidir:

- Yazılım başta tüneller olmak üzere metro, kavern gibi her türlü yeraltı kaya yapılarında kullanılabilir.

- Yazılım veri olarak ayna kesitlerini ve konverjans ölçümlerini kullanmaktadır. Güzergah boyunca yapılan mekanik sondaj logları, projelendirme sırasında öngörülen destek sistemi ve uygulanan destek sistemi ile tünel aynasına ait fotoğraflar ve tünel aynası için kaydedilen kişisel açıklamalar mühendise yardımcı veri olarak saklanmaktadır.

- Yazılımın verimli olarak kullanılabilmesi için konverjans okumalarında ölçüm noktalarına ait (x, y, z) koordinatlar sağlanmalıdır. Yazılım ekstensometre ölçümlerini değerlendirmemektedir.Yazılım, yeraltı yapısı ile açıklık çevresindeki yapılaşma ilişkisini sorgulamamaktadır.

- Yazılım tam ya da parçalı kesitte, delme-patlatma yöntemi veya kırıcı, kollu galeri açma makinası gibi makina ile kazının yapıldığı inşaatlarda kullanılabilir. Tünel aynasının görülemediği veya segman vb elemanlar desteklemenin yapıldığı, dolayısıyla konverjans ölçümlerinin yapılamadığı tünellerde kullanılamaz.Yazılım Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin kullanıldığı inşaatlarda verimli olarak kullanılabilir.

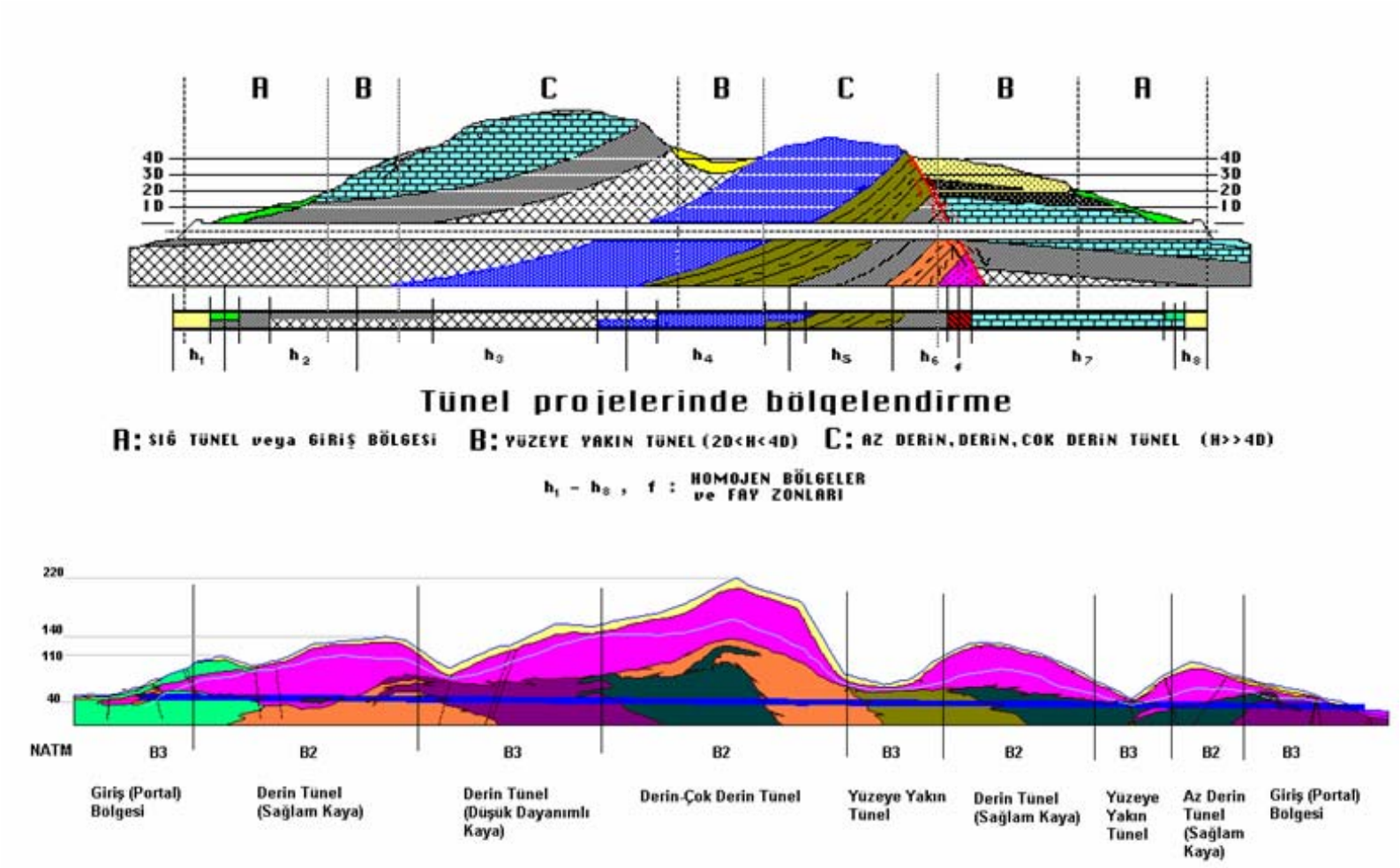
- Yazılım Visual Basic 6.0 programlama dili kullanılarak hazırlanmıştır. Visual Basic kullanılarak uzman sistem kullanıcı tarafından ihtiyaç doğrultusunda geliştirilebilir. Yazılım Microsoft Office programlarını kullanmaktadır. Uzman sistem ilk kez çalıştırıldığında kullanıcının bilgisayarında Access dosyaları veri tabanı amaçlı olarak oluşturmaktadır. Bu nedenle yazılım CD üzerinden çalıştırılamayacağı için bilgisayara kurulmalıdır. Raporlama, grafik oluşturma gibi işlemler için Ms Word ve Excel kullanıldığı için bu programlar da yüklü olmalıdır.

3. YERALTI YAPILARI MÜHENDİSLİĞİNİN TEMEL İLKE ve YAKLAŞIMLARI

Yeraltı kaya yapılarının inşaatının sorunsuz olarak tamamlanması, öncelikle kaya yapısının titizlikle tasarlanmasına ve projelendirilmesine bağlıdır. Bu çalışmalar temel alınarak gerçekleştirilen yapım işlerinde kaya yapıları gerilme veya deplasman kontrollü olarak denetlenmekte ve yönlendirilmektedir. Gerilmeler (yükler) arttırılırken veya azaltılırken deformasyonların değişimi gözlendiğinde buna gerilme kontrolü, deformasyonların artışına veya azalışına karşılık gelen gerilmelerin araştırılmasına ise deformasyon kontrolü adı verilmektedir [5].

Tasarım ve projelendirme çalışmalarının ilkesi, yeraltı kaya yapısının içerisinde yer aldığı ortamın mühendislik jeolojisi açısından tariflenmesidir. Kaya yapısının yapay dolgu, yamaç moluzu, zemin, gevşek kayaç, ayrışmış kayaç, geçiş kayacı, sert kaya, ana kaya gibi hangi ortam veya ortamlarda yer aldığı tariflendiğinde, bu ortamın sahip olduğu mühendislik jeolojisi özellikleri, jeomekanik davranış biçimi ve kazı-destekleme aşamalarında doğa ile teknik girişim arasındaki karşılıklı etkileşim belirlenebilir.

Yeraltı kaya yapısı güzergahı jeomorfoloji, jeoloji veya mühendislik jeolojisi açısından kendi içerisinde benzer özellik ve davranış gösteren kesimlere ayrılabilir. Homojen bölgelendirme (dar anlamda kayaç sınıfı) olarak tanımlanan bu çalışma ile yapım sırasında alınması gereken önlemler tariflenebilmektedir. Bu bölgeler önlem, işlem, yöntem değişimi gerektirmeyen ve risk açısından benzerlik gösteren kesimlerdir. Homojen bölgelendirme yapılırken kesimler; zemin-kaya kökeni, türü, dokanak sınırları, yeraltı su seviyesi, zemin kayaç özellikleri, niteliği, niceliği, süreksizlikler, ayrışma durumu, kaya kalitesi, porozite-geçirimlilik durumu, kayacın erime-kabarma-şişme özellikleri, jeomekanik özellikler, kazılabilirlik, delinebilirlik, patlatılabilirlik özellikleri, güzergah morfolojisi ile yeraltı kaya yapısı ilişkisi (sığ-derin-çok derin tünel, portal bölgesi, yamaç tüneli, vadi-akarsu altında yer alan tünel, heyelan sahası vb) gibi özellikler dikkate alınarak ayrılırlar. Şekil 3.1'de tünel güzergahı için bir bölgelendirme örneği verilmiştir.



Şekil 3.1: Tünel projelerinde homojen bölgelendirme (Vardar) ve Konakönü-Trabzon tüneli örneği

Yeraltında inşa edilen tünel, metro, kavern ve benzeri yeraltı kaya yapılarında ortamın birincil gerilme durumu değiştirilmektedir. Tünel mühendisliğinde bilinmesi gereken en önemli konulardan birisi, kayacın basınç dayanımının bir miktar aşılması durumunda taşıyıcılığının hangi oranda devam edeceğidir. Kaya yapısı çevresinde oluşan koruyucu bir zon ile yükler dengelenmekte, tünel ve kayadan oluşan bir sistem kalıcı bir yapı haline gelmektedir. Böyle bir sisteme deformasyonlar eşlik etmekte, gevşemeler olmaktadır.

Doğada yapılan gözlemler, basınç altındaki kayacın deformasyon-yenilme ilişkisinin büyük oranda zamana bağlı olduğunu göstermiştir. Yeraltı kaya yapılarında gerilme-deformasyon-zaman ilişkisi, geçen yüz yıl boyunca birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [6, 7].

Arazi basıncı etkisi ile kayacın davranışı konusunda yapılan çalışmaların başlangıcı 1900'lü yıllara dayanmaktadır. Heim 1905 yılında yayınladığı çalışmasında çok derin tünellerde tünelin zaman içerisinde kapanacağını, bu nedenle tünelin bir boru gibi dairesel şekil alması gerektiğini açıklamıştır. Heim çalışmasında: "Eğer arazi basıncı tünel derinliğinden bağımsızdır diye düşünülürse hata yapılmış olunur. Kireçtaşı – kiltaşı içerisinde açılan ve derinliği 200-500 metre olan tünellerde arazi basıncı hemen etkili olmakta, kayacı tünel içerisinde doğru sıkıştırmaktadır. Granit gibi sağlam kayada ise benzer duruma ancak 1000 metre derinlikten sonra, aradan birkaç yıl ya da daha fazla zaman geçtikten sonra rastlanmaktadır. Bu yüzden her yerde tünel alt yarısının kapatılması gerekli olmaktadır. Sadece 500 metreden daha az derinlikte ve granit benzeri sağlam kayada açılan tünellerde gerekli olmayabilir." açıklamasını yapmıştır.

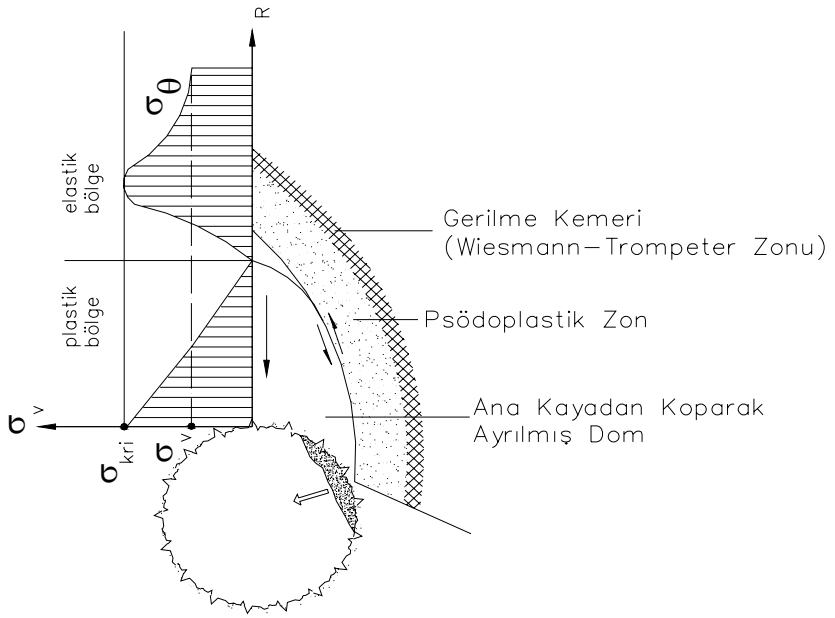
Birincil gerilme durumunun sadece kayacın kendi ağırlığı ile ilişkili olduğunu düşünen bir grubun temsilcisi olan Heim'a göre kazı sonrası büyük teğetsel gerilmeler etkili olacak ve ortam tüm kazı derinliği boyunca gevşeyecektir. Heim tarafından ortaya atılan bu teoriye göre kayaç belirli bir derinlikte, kendi ağırlığı altında latent-plastik halde bulunacak, yeraltı açıklığı etrafında gerilmelerin etkili olmayacağı bir zon oluşmayacaktır. Boşluk, oluşan yükleri dengelemediği için basınç altındaki açıklık göçecektir.

1909 yılında Brandau, Simplon tünelinin inşasında edindiği deneyimle tünel duvarlarında etkili olan gerilmelerin, Heim'ın beklediklerinden çok daha düşük olduklarını fark etmiştir. Brandau bu bilgiye dayanarak Heim teorisini arazi basıncı teorisi ile birleştirmiştir.

Brandau: "Eğer 0-2000 metre derinliğe sahip bir ortamda açılan bir tünelde, tünel desteklemesinin kalınlığı değiştirilmediyse, bu durum, ikincil gerilme durumunun elastik kaldığının ya da çok az bir kesimin plastikleştiğinin göstergesidir" demiştir.

Daha farklı bir teoriye göre tünel tavanı ve tabanı altında iki parabolik ve gerilmelerden arındırılmış bir zonun oluştuğu varsayılmaktadır. Gerilme akıları bu zon boyunca akmakta, büyük kuvvetler tünel omuzlarında etkili olmaktadır. Willman ve Kommerell bu teorinin önemli temsilcilerindendir.

1909 yılında Wiesmann: "Spesifik basınç dayanımı sadece kayanın özelliklerine bağlı değil, aynı zamanda kayacın boyutları, karmaşık büyüklük içerisinde yer alan süreksizliklerle de ilgilidir" demiştir. Wiesmann'a göre kırılmış kaya dayanımını kaybetmektedir, yenilmeden önce kayacın karşıladığı arazi basıncı yenilmeden sonra çevre kayaçlara aktarılacak ve tünel çevresindeki parçalar basınçtan etkilenmeyecektir. Kuvvetlerin aktarılması ise kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlıdır. Şekil 3.2'de yeraltı yapısı çevresindeki gerilme dağılımı gösterilmiştir [8].



Şekil 3.2: Yeraltı Açıklığı Çevresinde Farklı Gerilme Dağılımı

Wiesman çalışmasında: “Yeraltı açıklığı etrafında basınçtan etkilenmeyen bir zon bulunmaktadır. En azından gerilmelerin engellendiği böyle bir alan mevcuttur ve bu alan sayesinde açıklığa etkiyen yükler ve etkileşimler dengelenebilmektedir. Bu sebeple yeraltı açıklığının kapanmasına neden olabilecek gerilmeler oluşmayacaktır.

Tünelci bir miktar örtü kalınlığına sahip olduğunda kayacı arazi basıncın etkisinden kurtarabilecek, yeraltı açıklığı boşlukta açılıyormuş gibi davranacaktır” açıklamasında bulunmuştur.

Wiesmann’a göre, dengelenen gerilme dağılımı ancak kohezyonunun çeşitli nedenlerle azalmadığı, homojen ortamlarda oluşmaktadır. 1938 yılında Fenner dairesel ve eliptik açıklıklar etrafında oluşan gerilmeleri hesaplamıştır. Fenner’e göre: “Kohezyonlu ortamlarda deplasmanları karşılayabilecek esnek bir destekleme, ring oluşturacak şekilde meydana getirildiğinde gerilmeler karşılanabilecek, kırılmalar engellenecektir. Bu sayede sistemde denge oluşacaktır. Kilde inşa edilen tünellere bakıldığında, eğer yapı 1000 metreden daha fazla derinlikte ise, 40–50 kg/cm^2 lik basıncı karşılayabilecek bir duvar örülmelidir. Daha ince bir yapı oluşturmak mantıklı olmayacaktır.”

Arazi gerilmeleri yeraltı açıklığından koruyucu bir zon ile uzak tutulmaktadır ve gerilmeler kayaç tarafından taşınmaktadır anlayışını benimseyen bu gruba göre radyal ve teğetsel gerilmeler açıklık etrafındaki kayacı plastikleştirmektedir. Leon ve Wilhelm modellemeleri ile koruyucu zonun varlığını ispatlamış ve bu zonun zamana bağlı olarak geliştiğini ortaya koymuştur [6, 7]

Rabcewicz’in 1944 yılındaki araştırmalarına göre; gevşeme nedeniyle meydana gelen “gerçek” arazi basıncı ve kayacın fiziksel veya kimyasal nedenlerden dolayı hacminin büyümesi ile meydana gelen arazi basıncı vardır. Gevşeme basıncının nedeni kazıdır ve en önemli faktör zamandır. Bir açıklık ne kadar çabuk kapatılırsa, oturmalar da o oranda az olacaktır. Kayaçlar homojen bir yapıdan uzak oldukları için arazi basıncı daha çok jeolojik nedenlere dayanmaktadır. Sadece yeraltı yapısının kesitini incelemek bu yüzden yanlış olacaktır. Sistem bir bütün olarak, çevresi ile birlikte değerlendirilmelidir. Rabcewicz’e göre: “Arazi basıncını rijit, ağır malzemeler ile önlemeye çalışmak yararsızdır. Bu elemanlar da arazi basıncı altında sıkıştırılacaklardır. Kuvvetler o kadar büyüktür ki, ancak ona eşdeğer bir kuvvetle

karşı koymak gerekir. Bu kadar yüksek dayanıma sahip malzeme ise mevcut değildir. Bu nedenle doğanın yardımı alınmalıdır, bu ise doğanın bize sağladığı koruyucu zon ile elde edilebilmektedir. Bunun için zaman ve mekan gerekmektedir."

1963 yılına kadar yapılan koruyucu zon teorilerinin derlenmesi ile birlikte Rabcewicz, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (YAY, NATM, NÖT) adında bir yöntem ortaya koymuştur. Rabcewicz ve Müller kısa sürede bu yöntemin ikinci gerilme durumu altında kaya davranışına ne kadar uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Pacher, Sattler, Lombardi ve Egger bu yöntemin temsilcilerindendir. Modern yeraltı kaya yapıları mekaniği anlayışına göre yeraltı açıklığını çevreleyen kayaçlar bir yandan tüneli yüklemekte, öte yandan da komşu bölgelerden gelen yükleri taşımaktadır.

Tüneli zorlayan bu gerilmelerin ortaya çıkarılması ve anlaşılması, projelendirmede olduğu kadar uygulama sırasında da en önemli konular arasındadır. Aşağıda, tünel projelerinde dikkate alınması gereken gerilme türleri, kaynaklarına göre sıralanmıştır [9]:

I.	Kayaç örtüsünün kalınlığına bağlı basınçlar:	Litostatik gerilmeler
II.	Tektonizmaya bağlı basınçlar:	Tektonik gerilmeler
III.	Kayaçların gevşemesine bağlı basınçlar:	Psödoplastikleşme gerilmeleri
IV.	Kimyasal-fiziksel kökenli genleşme basınçları:	Kabarma-şişme gerilmeleri
V.	Yapılaşma yükleri:	Yapay etmen gerilmeleri
VI.	Servis yükleri:	Hizmet gerilmeleri

Bunlardan ilk ikisi primer (doğal, ilkel) gerilme durumunu oluşturmaktadır. Yeraltı kazısıyla birlikte ilk gerilme ortamı bozulmaktadır. Böylece; mevcut gerilmeler kayacın gevşemesine bağlı olarak yer, yön ve şiddet değiştirek zamanla ikincil (sekonder) gerilmelere dönüşmektedir.

Kazının tamamlanması ile birlikte, ideal-elastik malzeme özelliğindeki kayada ikincil gerilme-deformasyon durumunun son şeklini alması beklenmektedir. Fakat arazi ölçümleri kazı dolayındaki deformasyonların zamana bağlı olarak ve farklı hızlarda geliştiğini kanıtlamaktadır. Bu ikincil gerilme ve deformasyon durumunun, bilinen bir primer gerilme durumundan yola çıkarak ve zaman faktörünü de dikkate alacak

şekilde bulunması ve denetlenebilmesi tünelciliğin bilimsel temelini oluşturmaktadır. İkincil gerilmeler uygulama aşamasının gerilmeleri olduğundan, projede hesaplananlarla (veya kabul edilenlerle) arazide oluşan ve ölçülen gerilmelerin birbirleriyle karşılaştırılması ve geçerliliğin kanıtlanması gerekir. Aksi takdirde, aşırı boyutlandırma ya da duraysızlık kaçınılmaz olmaktadır.

İkincil (Sekonder) gerilme durumu, kayalarda kazı sırasında doğal gerilmelerin yön, yer ve şiddet değiştirmesiyle oluşan gerilme dağılımıdır. İkincil gerilmelerin dağılımı sırasında boşluk çevresinde oluşan yeni gerilmelerin şiddetlerine ve kayanın dokusuna bağlı olarak "kemerlenme" adı verilen yüklerin yoğunlaştığı bölgeler meydana gelmektedir.

Bu kemerlenme olayı oluşum nedenlerine bağlı olarak:

a) Gerilme Kemerlenmesi

b) Geometrik (dokusal) Kemerlenme şeklinde ikiye ayrılmaktadır.

Yeraltı kazısı sırasında gerilme trajektörlerinin (yörüngelerinin) boşluk dolayına kayarak, sıklaşması sonucu buralarda büyük teğetsel gerilmeler oluşur. Eğer bunların şiddeti kayanın dayanımlılığından azsa, gerilmeler boşluk duvarında en büyük değerlerine ulaşır. Fakat, bu ikincil gerilmelerin şiddeti, kaya malzemesini hemen veya zamanla kıracak değerler almışsa, boşluk daha içerilere kayacaktır. Gerilmelerin boşluk dolayında veya daha içerilerde yoğunlaşarak taşıyıcı ve koruyucu bir zon meydana getirmesine "Gerilme Kemerlenmesi" denir [5].

Kayayı oluşturan, süreksizlikle sınırlanmış olan kaya elemanları (süreksizlik cisimcikleri) açılan boşluğun boyutuna ve kendi konumlarına bağlı olarak yerçekimi ve doğal kuvvetler etkisiyle, dönerler, gevşerler ve birbirleri üzerinde kayarak ötelenirler. Böylece oluşan hacim artması (dilatasyon) sonucu, süreksizlik cisimleri kendi aralarında kenetlenirler, sıkışırlar ve kilitlenerek bir "Dokusal (Geometrik) Kemerlenme" meydana getirirler. Boşluk dolayındaki gerilmeler giderek bu bölgelerde yoğunlaşır ve buralarda taşıyıcı bir zon oluşturur [5]. Wiesmann-Trompeter zonu olarak da bilinen koruyucu zon teorisi ile Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (YAY), ikincil gerilme durumu altındaki derin tünellerde, zaman etkisini de dikkate alan en modern yöntemdir. Sistem Müller - Salzburg'un tanıtım

ve tanımlamasında 22 maddede toplanmıştır. YAY, prensipte her türlü arazi koşullarında uygulanabilecek önlem, iş ve işlemlerin optimizasyonuna yönelik bir tünelcilik felsefesinin adı olarak tanımlanmıştır. Norm haline getirilen ve Önorm B - 2203 olarak adlandırılan Avusturya Normlarındaki sınıflamalarda akıcı zemin dışındaki tüm ortam ve koşullar için (enine kesitte) destekleme ve sağlamlaştırma amacıyla nelerin ve nasıl kullanılacağı belirlenmiştir. Burada, değişen ortam koşullarında denetim ve yönlendirme ölçümlerine dayalı olarak, yararlanılan sağlamlaştırma ve destekleme öğelerinin miktar ve boyutlarında değişiklikler yapılmasının gereği üzerine de ayrıca dikkat çekilmektedir.

YAY'ın 22 temel fikir ve ilkeleri aşağıdaki gibidir [10]:

1. Tünel destek sisteminin önemli bir kısmı, açıklığı çevreleyen ana kayanın kendisinden oluşmaktadır.

2. En temel ilke, kazı sırasında ortamdaki kaya dayanımının korunmasıdır.

3. Mümkün olduğunca gevşemelerin önüne geçilmelidir. Gevşemeler kaya dayanımı azaltacacaktır.

4. Tek ve iki eksenli gerilme ortamını oluşturmaktan kaçınılmalıdır. Bu türden gerilmelerin etkisinde bulunan kayanın taşıma direnci düşer.

5. Koruycu zon kayacın taşıma direnci azaltılmaksızın oluşturulmalıdır. Kazı sonrasında oluşan deformasyonlar koruycu zonun oluşmasına yeterli olacak fakat kayacın aşırı gevşeyerek taşıma direncinin düşmesine neden olmayacak şekilde denetlenmeli ve yönlendirilmelidir. Bu alanda başarılı olunduğu ölçüde güvenlik ve ekonomiklik artar.

6. Sağlamlaştırma işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır. Bunu sağlamak için sağlamlaştırma işlemlerine ne çok erken, ne de çok geç başlanmalı ve iksa direncini oluşturan yapının ne çok rijit ne de çok zayıf olmamasına özen gösterilmelidir.

7. Kayacın kendini tutma süresi (özgül zaman faktörü) doğru olarak tahmin edilmelidir.

8. Özgül zaman faktörü laboratuvarda ve arazide yapılacak deneylerle tahmin edilebileceği gibi, tünelde deplasman ölçümleri ile de belirlenebilir. Desteksiz kalma süresi, deplasman oranı ve kaya kalite sınıflamaları bu önemli faktör hakkında fikir verebilir.

9. Kazı sonrasında büyük deformasyonların ve gevşemelerin beklendiği durumlarda sağlamlaştırma direnci yayılı yükler şeklinde ve sağlamlaştırma önlemi boşluk yüzeyini bağlayacak biçimde olmalıdır. Bunu sağlayan en başarılı yöntem kısa sürede prizlenen püskürtme beton kullanımıdır.

10. Sağlamlaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde ve bükülebilir esneklikte olmalıdır. Böylelikle eğilme momentlerini azaltacak, çekme ve kesme kırıklarının oluşumu önlenebilecektir.

11. Sağlamlaştırma kabuk kalınlığının arttırılması ile değil, çelik hasır kullanımı ve-veya çelik iksa-bulon uygulaması ile sağlanmalıdır. Kayayı kendine taşıtmak için etkin gerilmeler ankrajlarla dağın içine aktarılmalıdır.

12. Sağlamlaştırma zamanı ve araçları ölçülen deplasmanlara göre belirlenmelidir. Tünel duvarındaki ve onu çevreleyen kayaçlar içindeki deformasyonların ve gerilmelerin ölçülmesi, kayacın uygulama sırasındaki davranışını göstermesi bakımından önemlidir. Ön varsayımlara göre yapılan projelendirme ile dağın içine girildikten sonra uygulanması gereken proje çoğun beklenmedik yeni etmenlerin de ortaya çıkması nedeniyle birbirinden farklı olacaktır. Bu nedenle, yeraltı kaya yapılaır projelerinde, sürekli değişikliği zorunlu kılan bir hareketlilik vardır. Yeraltı kaya yapıları mühendisliğinde bir projeden değil, adım adım ve yer yer değişen bir projeler sisteminden söz edilmelidir. Bu sistemin kendi içerisindeki uyumunun ve kaya ortamına uygunluğunun başarılabilmesi için ise gözleme, ölçme, deneyleme, denetleme, yorumlama ve arşivlendirme gibi tüm mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği çalışmalaırnın eksiksiz yapılması zorunludur.

13. Tünel statik bakımdan taşıyıcı zon ile sağlamlaştırma kabuğunun oluşturduğu bir halkadır.

14. Sağlamlaştırma kabuğu kapalı halka şeklinde olmalıdır. Yay veya çentikli, derzli bir halka statik bakımdan çembere kıyasla duraysızdır. Bu bakımdan kalot, sağ ve

sol yan kazı ve sağlamlaştırma kaplaması bir halka şeklinde boşluk duvarına yapıştırılmalıdır. Bu durum ancak tam kesit kazılarını izleyen çember şeklindeki sağlamlaştırma kabuklarıyla elde edilebilir. Ancak taban kayacın taşıma özelliklerinin iyi olduğu durumlarda, tabanın sağlamlaştırılması ve sağlamlaştırma yayının bir halkaya tamamlanması gerekmeyebilir.

15. Halka en kısa zamanda oluşturulmalıdır. Kayanın ikincil gerilmelerinin oluşumu sırasındaki davranışı kabuğun deformasyonlarına bağlıdır. Tam kapanmamış bir çember, taşıyıcı halka durumunda olmadığı için gevşemeleri arttıran ve boşluğu çevreleyen kayaları plastikleştirerek onun direncini düşüren bir etken olmaktadır. Kaya içindeki deformasyonların ve plastik zon oluşumlarının zamanın bir fonksiyonu olduğu göz önüne alınacak olursa, sağlamlaştırma yayını en kısa zamanda halka şeklindek kapatmak çok olumlu sonuçlar verecektir.

16. Gerilme dağılımı açısından bakıldığında, tüm kesitin bir defada kazılması avantajlı görülmektedir. Parçalı kesitte kazı, gerilme dağılımını birçok kez değiştirmekte, bu ise kayaya zarar vermektedir. Dağ bu nedenle olabildiğince az kurcanalmalıdır.

17. Tünel açma yönteminin uygulanış biçimi yeraltı kaya yapısının duraylığını ve güvenliği açısından, kayanın zamana bağlı davranışını doğrudan etkilediği için büyük önem taşımaktadır. Yöntemler uygulanış biçimlerine göre organizasyon ve zamanlamada büyük farklılıklar oluştururlar. Bu bakımdan arın anosunun uzunlukları, atım derinlikleri, sağlamlaştırmanın gerçeklenme süresi, tabanın kapanması, sağlamlaştırma direncinin sağlanması yeraltı yapılarının güvenliğine büyük ölçüde etkir.

18. Kesitte, gerilme yığılmalarını engellemek için keskin kenarlardan kaçınılmalıdır. Bu kaya kütlesini ve pürüzsüzlüğüne zarar verir. Dairesel kesitler tercih edilmelidir.

19. Eğer dış ve iç kaplamadan oluşan destek sistemi kullanılacaksa, iç kaplama da ince olmalıdır. Dış kaplama ile arasında sıkı fakat sürtünmesiz bir bağ olmalıdır.

20. Kaya kütlesi ve destekleme elemanlarından oluşan tüm sistem sadece dış kaplama uygulaması ile stabilitesini kazanmış olmalıdır. İç kaplama ek güvenlik

sağlamaktadır. Çok fazla su gelirinin olduğu kesimlerde iç kaplama tüm kaya kütlesini stabilize edebilecek dayanımda olmalıdır. Ankrajlar ancak bu durumda sürekli destek elemanları olarak kullanılmalıdır.

21. Yapım süresi içinde yönlendirme ve denetim ölçümleri yapılmalıdır. Kaya ve kabuktan oluşan sistemin yapım süreci içindeki karşılıklı davranışlarının bilinmesi, deformasyonların sönümlenip sönümlenmediğinin belirlenmesi ve gerilmelerin yer, büyüklük ve türlerinin saptanması açısından büyük önem taşımaktadır. Kaya ve beton içine yerleştirilen ölçme aygıt ve gereçleri yapının tamamlanmasından sonra da kontrol amacıyla kullanılmalıdır.

22. Destek sistemi üzerinde etkili olan boşluk suyu basıncı veya statik basınç drenaj (filtrelerin yardımıyla da) ile engellenmektedir.

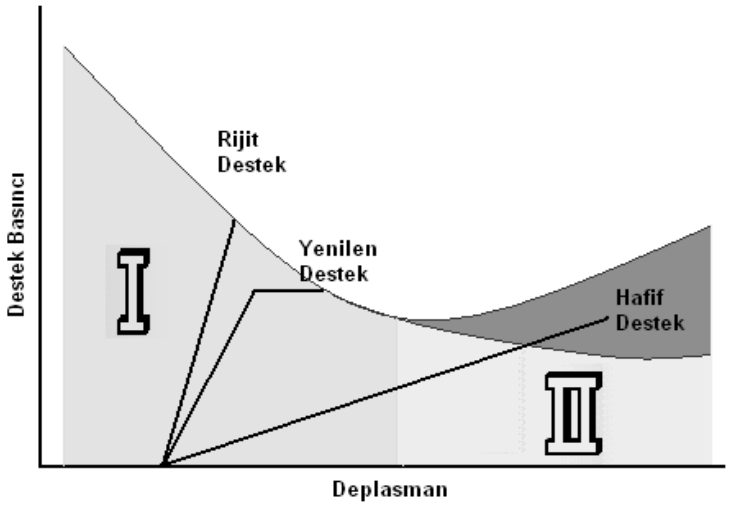
YAY'nde "konverjansa bağlı direnç (basınç) azalması karakteristiği - davranış karakteristiği" en uygun sağlamlaştırma zamanının ve türünün belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Kazı yüzeylerine bir miktar deformasyon serbestliği tanıyarak araziden gelen yüklerin azaltılabileceği şeklinde de ifade edilebilecek bu mekanik davranıştan olabildiğince yararlanmaktadır. Bir yandan arazinin (kayaçların) ilkel dayanımını olabildiğince korunmakta öte yandan onu örseleyerek (psödoplastikleştirerek) ikincil gerilme oluşumlarını ve deformasyonları denetlenmeye çalışılmaktadır. Dar kapsamda algılandığında, kendi içinde çelişkili gözüken bu yaklaşım, doğanın dengelenebilmesi için gerekenlerin onun kendi taşıyıcılığını da dikkate alarak belirlenmesi şeklinde anlaşılır.

Bu nedenle YAY; tüm arazi koşullarına uyarlanabilen, tam kesit kazıdan çok parçalı kazıya, aynayı hemen geriden izleyen ring (halka) kapanımından, desteksiz açıma ve biribirinin yerine geçebilen sağlamlaştırma-iyileştirme-destekleme ögelerine kadar hemen hemen her önlem ve işlemleri kapsamaktadır. YAY açık kazı, önyapımlı kaplama elemanı (Tübbing) kullanan şildli kazı ve (boru) sürme yöntemi dışındaki tüm açım teknikleri için geçerlidir.

Bu bakımdan günümüzün modern tünel mühendisliğini de içine alan kaya yapıları projelerinde, önceden tanımlanmış yapı öğelerinin sayısında, boyutlarında ve niteliklerinde değişikliklerin yapılması olağan sayılmakta, izleme, gözlemleme, ölçme, değerlendirme, yorumlama, yönlendirme, değiştirme, yenileme, geliştirme ve

onaya dayalı uygulama şeklindeki çalışmaların kesintisiz ve pürüzsüz olarak sürdürülmesi gerekmektedir. Bu konu "denetim ve yönlendirme ölçümleriyle tünel açımı" adı altında da bilinmekte olup, zamana bağlı olarak gerilme ve deformasyon ilişkisinin önlem, işlem ve yönteme göre matematiksel tanımını içermektedir.

Pacher 1964 yılında gerilme ile deformasyonlar arasındaki ilişkiyi incelemiş ve kalıcı deformasyonun rijit bir destek sistemi ile durdurulabileceğini görmüştür. Kayaç elastik kaldığı sürece, deformasyonlar ile destek basıncı ters orantılı olmaktadır. Kayacın dayanımı aşıldığında ise, yeraltı açıklığından çevre kayacın derinliklerine doğru koruyucu zon adı verilen bölge oluşmaya başlamaktadır. Zamana bağlı olarak açıklık etrafındaki sıkışmış olan malzeme arazi basıncının etkisi ile boşluğa doğru patlamaktadır [6]. Şekil 3.3'de Fenner-Pacher eğrisi olarak bilinen bu davranış gösterilmiştir [11]. Kritik deformasyon sınırı denetlenerek arazi basıncı kontrol edilebilmekte ve gerekli destek basıncı bu sayede belirlenebilmektedir.

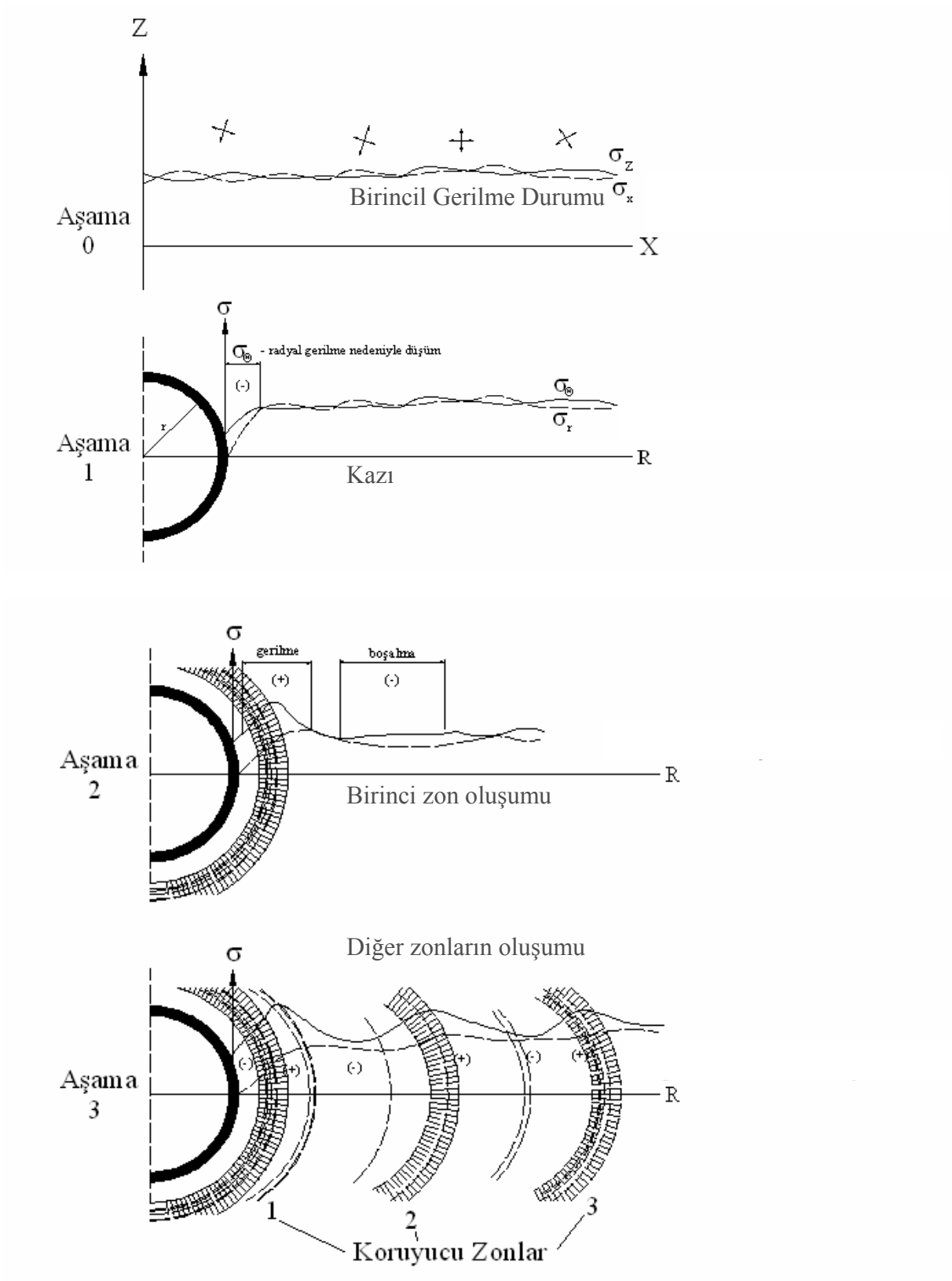


Şekil 3.3: Fenner – Pacher eğrisi

Şekle göre rijit bir destek sistemi uygulandığında yüksek destek basıncı elde edilmekte, deplasmanların oluşumu engellenebilmektedir. Metro tünelleri gibi yüksek deplasmanlara izin verilmeyen sistemlerde uygulanan bu yöntemin aksine, bir miktar deplasmana izin verildiğinde gerekli olan destek basıncı azalmakta, daha az ve esnek bir destekleme ile imalat yapılabilmektedir.

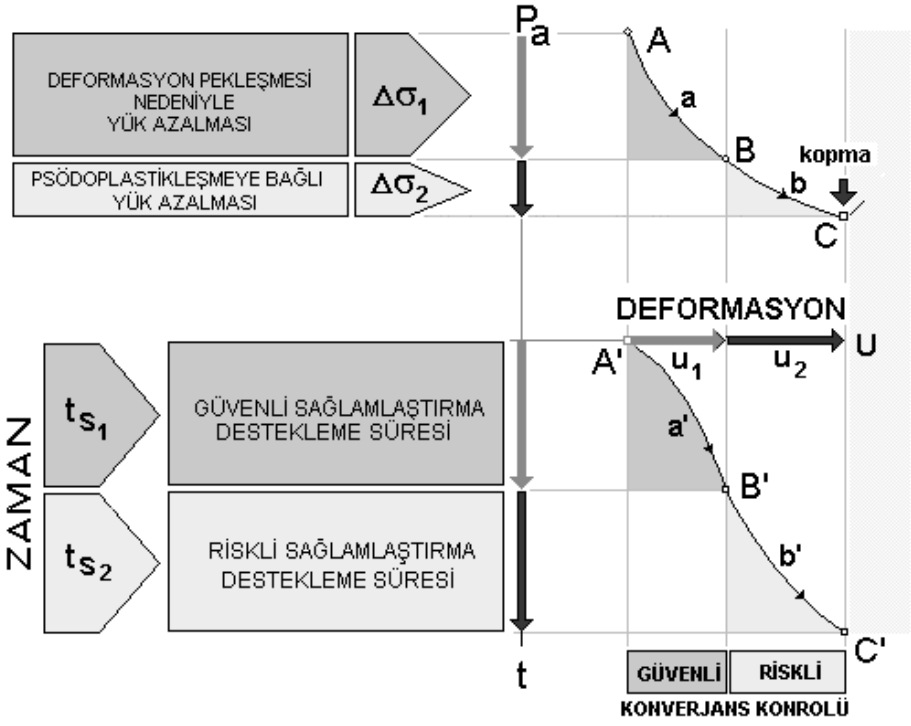
Eğer bu aşamada deplasmanlar durdurulmazsa, arazi basıncının ve gevşemelerin etkisi ile gerekli destek sistemi ihtiyacı artmakta, deplasmanlar kontrol edilemez bir duruma gelmektedir.

Sauer laboratuvarda ve arazide yaptığı çalışmalar ile koruyucu zonun, teğetsel gerilmeleri karşılayan tek bir zondan oluşmadığını, aksine ard arda birçok ringin meydana geldiğini ve gerilmelerin karşılandığını göstermiştir. Eğer ilk ringde kaya dayanımı aşılırsa, maksimum gerilme ilk ringden ikincisine sıçramaktadır. Bu sayede plastik zon, pik gerilmeleri karşılayan bir dalga etkisi oluşturmaktadır. Şekil 3.4'de yeraltı açıklığının oluşturulması sırasında art arda oluşan taşıyıcı zonlar gösterilmiştir [7].



Şekil 3.4: Yeraltı açıklığının oluşturulması sırasında art arda oluşan taşıyıcı zonlar

Kayaçların mineralojik bileşimi, petrokimyasal yapısı ve dokusu, teknik girişim sırası ve sonrasındaki su-hava etkisi ve yük kalkmasına bağlı gerilme boşalması gibi nedenlerle fiziksel ve/veya kimyasal kökenli hacımsal değişimlere uğrayabilir. Sonuçta, büyük kabarma-şişme basınçları veya erimeye bağlı göçme olayları meydana gelebilir. Daha tünel açımı sırasında ortaya çıkabilen bu olumsuzluklar, dikkate alınmadıkları veya yeterince anlaşılamadıkları takdirde, zamanla bir türlü başedilemeyen tünelcilik sorunlarına dönüşebilmektedir. Üçüncül (tersiyer) gerilmeler olarak da bilinen bu gerilmeler, ileride gelebilecek yeni yapılaşma yükleri ve servis yükleri ile birlikte tünel statiğinde ayrıca belirleyici olurlar. Şekil 3.5 de P_a olarak simgelenen yük, yukarıda özetlenen tüm yüklenme koşullarının bileşkesi olarak anlaşılmalıdır. Şekilde görüldüğü gibi, deformasyon kontrollü bir projede çalışırken, zaman kullanımına özen gösterilmeli, güvenli sağlamlaştırma ve desteklemenin deformasyon pekleşmesi nedeniyle yük azalmasının yaşandığı dönemde yapılmalı, aksi takdirde, karalı ve hızlanan deformasyonların bulunduğu bölgelerde yapılacak sağlamlaştırmaların riskli dönemde yapılacağı bilinmelidir [9].

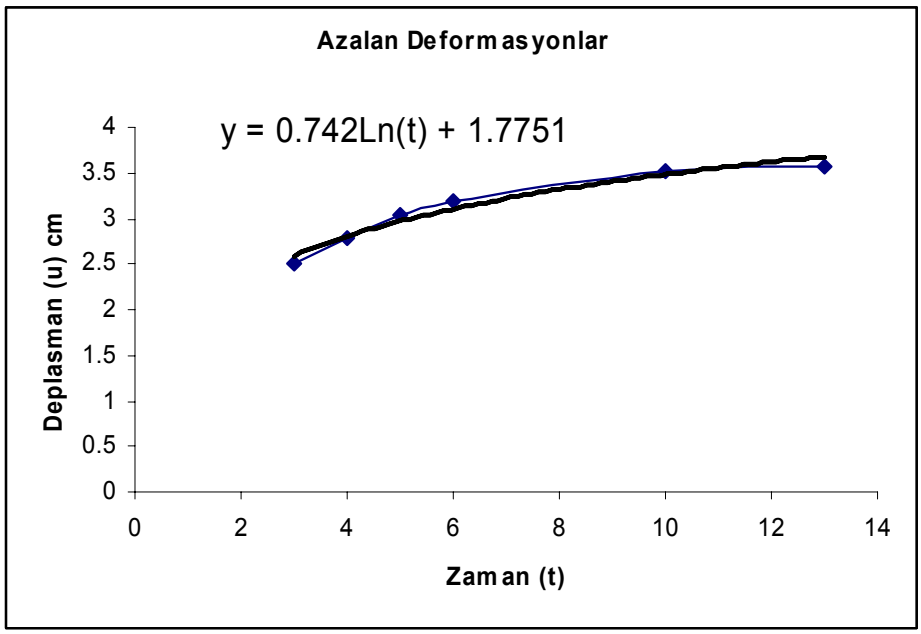


Şekil 3.5: Zamana bağlı deformasyonlar ile sağlamlaştırma süreleri ilişkisi

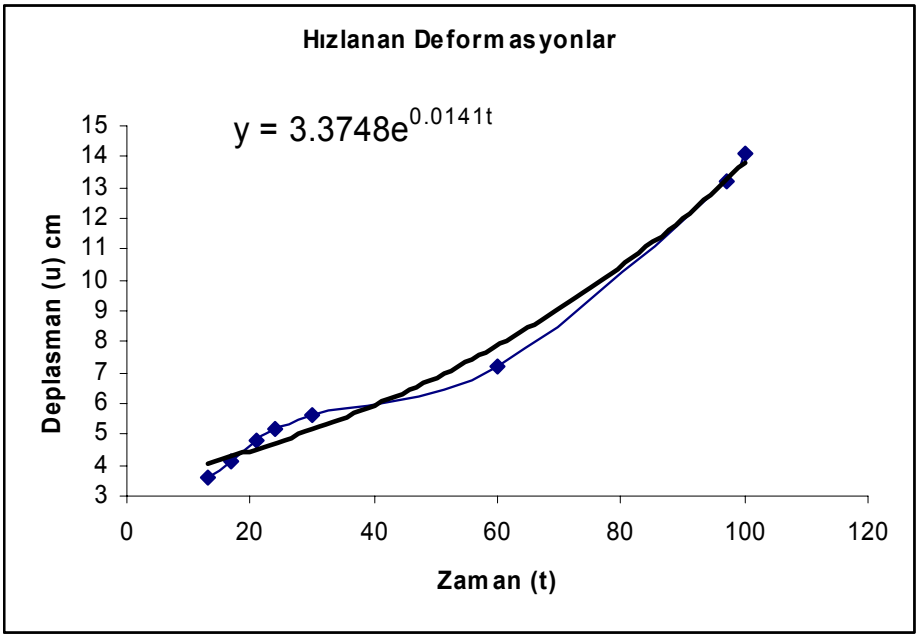
Yeraltı kaya yapıları mühendisliğinde zamana bağlı deformasyonlar üç farklı fonksiyon oluşturabilmektedir. Bunlar [11]:

- İlk dönem (azalan deformasyonlar): $\ln u_{v,h} = a_{pri} \ln t + k_{pri}$ (3.1)
- İkinci dönem (sabit hızlı deformasyonlar): $u_{v,h} = a_{sec}\, t + k_{sec}$ (3.2)
- Üçüncü dönem (hızlanan deformasyonlar): $u_{v,h} = k_{ter}\, e^{(a_{ter}\, t)}$ (3.3)

şeklinde tanımlanmaktadır. Eğer her farklı birim için farklı ölçüm kesitlerinde, ayrı ayrı ve yeterli sayıda güvenilir veri elde edilmişse yukarıdaki bağıntılardan yararlanılarak henüz açılmamış kesimler için öngörüde bulunulabilir. Şekil 3.6 ve 3.7'de Nefise Akçelik tünelinde ölçülmüş olan azalan ve hızlanan deformasyonlara ait ölçüm sonuçları örnek olarak gösterilmiştir. Tünel yan duvarlarında ölçülen bu deplasmanların ilk döneminde destek sistemi uygulaması ile deplasmanlar azalmıştır. Tünel aşırı ayrışmış, çok zayıf dayanımlı ve faylarla çevrelenmiş bir ortamda açıldığı için uygulanan destek sistemi yeterli gelmemiş, çok kısa süreli yaşanan bir ikinci dönemin ardından üçüncü dönem-hızlanan deformasyonlar başlamıştır.



Şekil 3.6: Nefise Akçelik tüneli, azalan deformasyonlar



Şekil 3.7: Nefise Akçelik tüneli, hızlanan deformasyonlar

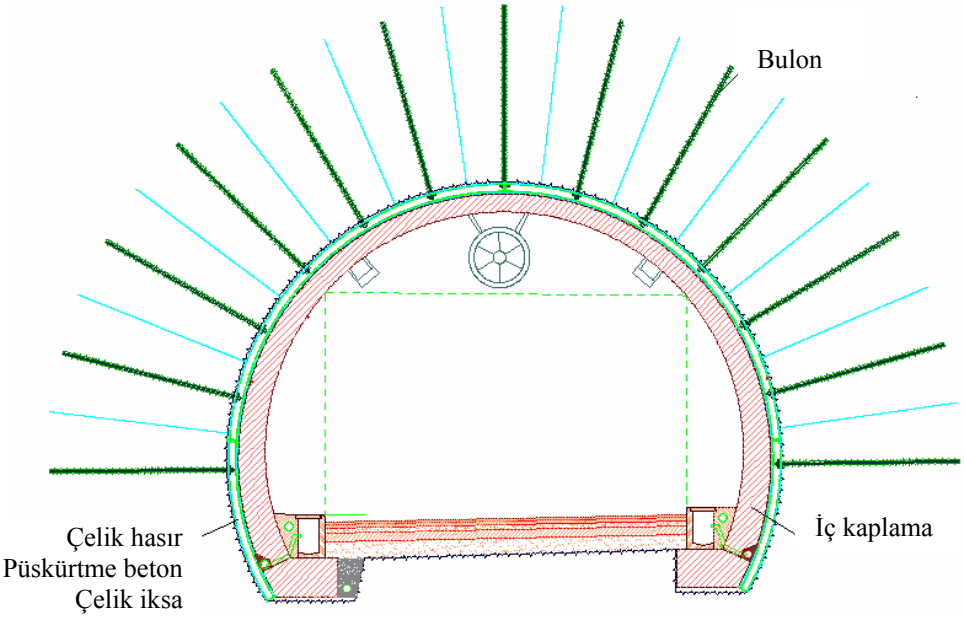
Yeraltı kaya yapılarının inşatı sırasında içinde çalışılan ortam ve koşullar değişmektedir. Bu değişimin derecesi, kuvvetler ve moment dengesinin ya da gerilme durumunun teknik girişim sonucunda ne kadar bozulmuş olduğuna bağlıdır. Zamana bağlı gerilme-deformasyon ilişkisi ve çevre kayacın psödoplastikleşmesi, denge duırumu ile etkileşimin ölçütü ve nedeni olmaktadır. Bu etkileşim miktarının teknik girişim için öngörülen sınırları aşması durumunda ise duraylılık sorunu başlamaktadır. Duraylılığın bozulması, yeraltı kaya yapısının çevresi ile olan ilişkisine bağlıdır. Örneğin bir metro tünelinde hiçbir olumsuzluk olmamasına rağmen yüzeyde oturmaların olması duraysızlık kabulü için yeterli olacaktır. Benzer şekilde yerleşimden uzak bir yerde inşa edilen bir tünelde, yeryüzündeki oturmalar duraysızlık olmayacak, tünelde göçüğe neden olabilecek deplasmanlar duraysızlık olarak kabul edilecektir. Duraysızlığın önlenmesi ve-veya giderilmesi için alınan önlemler [12];

- sağlamlaştırma
- destekleme
- iyileştirme

olarak derlenmekte ve ön, geçici veya kalıcı olarak sınıflandırılmaktadır.

Alınabilecek bu önlemler kuvvetler dengesini değiştirebilmekte, gerilme durumunu değiştirebilmekte ya da ortam koşullarını iyileştirebilmektedir.

Süreksizlikler arasında kalan kama ve bloklar, kinematik serbestlik bulduklarında, genelde yerçekimi etkisi ile çevre kayaçtan koparak ayrılmaktadırlar. Bu parçaları yerinde tutmaya çalışan kuvvet çatlak dolgusunun kohezyonu ve süreksizlik yüzeylerindeki sürtünmedir. Kama ve blokların hareketi çelik hasır ve püskürtme betonun kullanımı ile engellenebilmekte ve ortam sağlamlaştırılmaktadır. Kullanılan kaya bulonları veya ankrajlar ile tünel çevresindeki gevşemeler engellenmekte, tünel çevresindeki çekme gerilmeleri karşılanmakta, çelik iksa uygulaması ile gerilmeler kontrol edilebilmekte ve tünel desteklenmektedir. Tünel ilerleme yönünde kullanılan enjeksiyonlu ön sürenler ortamı iyileştirici, kayacın dayanımını arttırıcı özelliğe sahip olduğu gibi, ayna önünde oluşan kesme gerilmelerini de kontrol edebilmektedir. Benzer şekilde enjeksiyonlu bulonlar, jet-grout gibi çalışmalar da ortamı iyileştiren uygulamalardır.



Şekil 3.8: Tipik karayolu tüneli tip kesiti

4. YERALTI KAYA YAPILARININ DENETİMİ ve YÖNLENDİRİLMESİ

4.1 Yeraltı Kaya Yapılarının Denetlenmesi

Yeraltı yapılarının güvenli olarak inşa edilebilmesi için kazı sonrasında vakit geçirilmeksizin aynadan mühendislik jeolojisi verilerinin titizlikle alınması gerekir. Her ilerleme adımından sağlanan veriler ve hazırlanan kesitlerin bir arada değerlendirilmesi ile yeraltı yapısı güzergahının üç boyutlu yeraltı haritasını oluşturmak mümkün olmaktadır. Yapılan jeoteknik ölçümler neticesinde herhangi bir kesimde aşırı deplasmanlara rastlanması durumunda ise ayna kesitlerinden faydalanarak sorunun nedeni araştırılabilmektedir. Tünellerde kazı sonrası elde edilmesi gereken veriler; aynada karşılaşılan birimler ve dokanak sınırları, süreksizliklerin konum, miktar ve sınırları, ayrışma durumu, su durumu, kavlaklanma ve aşırı sökülme durumu, kaya kalitesi, ve kaya dayanımıdır. Bu veriler kullanılarak kaya destek sınıfı belirlenir, buna bağlı olarak da destekleme elemanlarının cinsi, ilerleme adımı mesafesi ve bekleme süresi kesinleştirilir.

4.1.1 Litoloji ve dokanak sınırları

Tünel aynasının kayıtlarının tutulabilmesi için geliştirilmiş çok sayıda form örneği vardır. Bunlar için kesinleştirilmiş bir standart olmamakla birlikte, yapım firmaları genellikle inşaat öncesi kendi formlarını kendileri oluşturmakta veya form örneğini idareden (KGM, DSİ gibi) temin etmektedirler. Formlarda önemli olan içeriğidir. Aynadan ne kadar çok veri sağlanması istenirse, oluşacak olan veri tabanı da o ölçüde kullanışlı olacaktır. Formlar üzerinde ölçekli olarak hazırlanmış bir tünel kesiti yer almaktadır. Aynada karşılaşılan jeolojik birimler ve dokanak sınırları, kazı sonrasında ilgili jeoloji mühendisi tarafından kesit üzerine işlenmektedir. Daha sonraki aşamalarda bu kesitler kullanılarak tünel için mühendislik jeolojisi haritaları oluşturulabilmektedir. Şekil 4.1'de örnek bir tünel ayna kesiti gösterilmiştir [13];

Yapımcı Firma: ..... Müşavir: .....

..... TÜNELİ

SOL TÜP ( ) Tünel Aynasının Mühendislik Jeolojisi Tanımlaması SAĞ TÜP ( )

Ölçek	Tarih	Zaman	Kilometre	Round No	Kaya Sınıfı	Kazı İlerlemesi	Çelik İksa No

$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF}$

$RQD = 115 - 3.3Jv$

Jv = Toplam eklem sayısı / m^3

Q-NATM İlişkisi: 1000−70 = A1 ; 71 − 10 = A2 ; 10 − 4 = B1 ; 4 − 1 = B2 ; 1 − 0.1 = B3 ; 0.1 − 0.031 = C1 ; 0.031 − 0.016 = C2 ; 0.016 − 0.008 = C3 ; 0.008 − 0.002 = C4 ; 0.002 − 0.001 = C5

Kaya Kalitesi (RQD)
çok zayıf 0−25 ; zayıf 25 − 50 ; orta 50 − 75
iyi 75 − 90 ; çok iyi 90 − 100

Eklem Takımı Sayısı (Jn)

masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5 - 1.0
bir eklem takımı	2
bir eklem takımı, gelişigüzel eklemler	3
iki eklem takımı	4
iki eklem takımı, gelişigüzel eklemler	6
üç eklem takımı	9
üç eklem takımı, gelişigüzel eklemler	12
dört veya daha fazla eklem takımı, küp şeker görünümüde	15
parçalanmış kaya, toprak görünümlü	20

Eklem Pürüzlülük Sayısı (Jr)

süreksiz eklemler	4
pürüzlü veya düzenli dalgalı	3
düz, dalgalı	2
sürtünme izli, dalgalı	1.5
pürüzlü,	1.5
düz, düzlemsel	1.0
sürtünme izli, düzlemsel	0.5
süreksizlik izlerinin temasını engelleyen kil dolgu	1
süreksizlik izlerinin temasını engelleyen kumlu, çakıllı zon	1

Eklem Alterasyon Sayısı (Ja)

(a) Süreksizlik Dokanağı	
sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamayan, geçirimsiz dolgu	0.75
altere olmamış eklem yüzeyleri	1
az altere olmuş eklem yüzeyleri	2
siltli veya kumlu yüzey kaplamaları	3
yumuşamayan kil kaplaması	4
(b) 10 cm kayma öncesi süreksizlik dokanağı	
kum taneli, kil içermeyen parçalanmış kaya	4
aşırı konsolide kil dolguları	6
orta-düşük konsolide, yumuşamayan kil dolgu	8
şişen kil dolgu	8-12
(c) Kaymadığı zaman süreksizlik dokanağı yok	
parçalanmış kaya veya kil zonları	6-8
siltli veya kumlu kil zonları	5
kalın, sürekli kil zonları	10-13

Eklem Su Azaltma Faktörü (Jw)

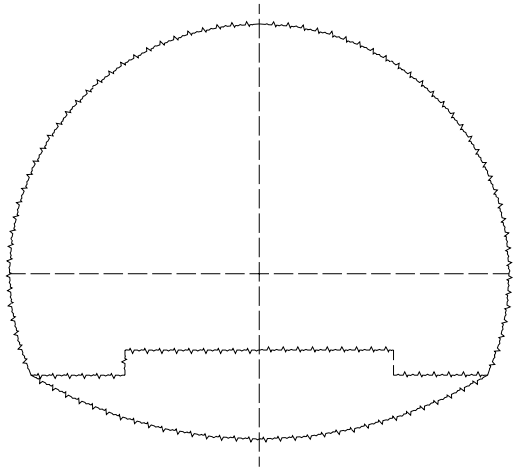
Kuru kazılar yada sızma	1
orta derecede su geliri	0.66
dolgusuz, eklemli kayada çok su geliri	0.5
büyük miktarda su geliri	0.33
patlamada aşırı su geliri	0.2 - 0.1
zamanla azalmayan su geliri	0.1-0.05

Gerilme Azaltma Faktörü (SRF)

(a) Kazıyı kesen zayıf zonlar kazı sırasında gevşemeye neden olabilir	
kil içeren zayıf zon,çok gevşek çevre basıncı	10
kil içeren kayada tek zayıf zon (h<50 m)	5
kil içeren kayada tek zayıf zon (h>50 m)	2.5
kil içeren kayada birden çok makaslama zonu	7.5
kil içermeyen kayada tek zayıf zon (h<50 m)	5
kil içermeyen kayada tek zayıf zon (h>50 m)	2.5
gevşek ve açık eklemler (küp şeker görünümü)	5
(b) Dayanıklı Kaya	
düşük gerilme, yüzeye yakın tünel	2.5
orta derecede gerilme	1
yüksek derecede gerilme	0.5-2
az kaya patlaması	5-10
aşırı kaya patlaması	10-20
plastik akma	5-10
suya bağlı kimyasal şişme	10-15

Q =

Litolojik Özellikler



Ayrışma	Kaya Dayanımı	Süreksizlik Açıklığı	Süreksizlik Devamlılığı	Süreksizlik Aralığı
Taze I	Aşırı zayıf kaya RO	Çok sıkı <0.1 mm	Çok düşük <1m	son derece kapalı <2 cm
Az Ayrışmış II	Çok zayıf kaya R1	sıkı 0.1-0.25 mm	düşük 1-3 m	çok kapalı 2-6 cm
Orta derecede ayrışmış III	Zayıf kaya R2	kısmen açık 0.25-0.5 mm	orta 3-10 m	kapalı 6-20 cm
yüksek derecede ayrışmış IV	orta sert kaya R3	açık 0.5-2.5 mm	yüksek 10-20 m	orta 20-60 cm
tamemen ayrışmış V	sert kaya R4	orta geniş 2.5-10 mm	çok yüksek >20 m	açık 60-200 cm
rezidüel zemin VI	çok sert kaya R5	geniş >10 mm		çok açık 200-600 cm
	aşırı sert kaya R6	çok geniş 1-10 cm	Kohezyonlu Zemin Dayanımı	son derece açık >600 cm
Su Durumu	Fay Kili % Değeri	son derece geniş 10-100 cm	H sert	Tabakalanma
D Kuru-Nemli	0-10 1	boşluklu >1m	VST çok katı	çok ince <5 cm
W Islak	10-30 2	Dolgu Malzemesi	ST katı	ince 5-30 cm
DR Damlama	30-50 3	Kalsit	FI orta katı	orta 30-100 cm
F1 < 1lt/sn	50-70 4	Kil	SO yumuşak	kalın 100-300 cm
F2 1-10 lt/sn	70-90 5	Ayrışmış Oksidasyon	VSO çok yumuşak kohezif olmayanlar	çok kalın >300 cm
F3 10-20 lt/sn	90-100 6			
F4 >100 lt/sn				

Şekil 4.1: Tünel aynasının mühendislik jeolojisi tanımlaması

Süreksizlik; herhangi bir gözlem bölgesinde inceleme yöntemine bağlı olarak varlığı saptanan ve komşu noktalar arasındaki fiziksel ve/veya mekanik bağları koparan yapısal bozuklukların (fay, kırık, çatlak vb) genel adıdır.

Süreksizliklerle kısmen veya tamamen ayrılmış olan bir kaya elemanlarının kayaç içerisindeki boyutları, biçimleri, dizilimleri ve süreksizliklerin tüm fiziko-mekanik özellikleri kaya dokusu kavramı içerisinde değerlendirilmektedir. Kaya mekaniği açısından süreksizliklerin tanımlanması sırasında bunların;

- Türü (tabaka, kesme çatlağı, çekme çatlağı, fissür, fay vb)
- Konumu (x, y, z)
- Takımı ($ÇT_1$, $ÇT_2$, $ÇT_3$,…)
- Aralığı (d (d_{min}, d_{maks}))
- Sıklığı (k_{stini} (k_{min}, k_{maks}))
- Ayrılma derecesi ($\chi_{Müller}$)
- Oluşturduğu kaya elemanı boyutu (d_1 x d_2 x d_3)
- Pürüzlülüğü
- Dolgu malzemesi (türü, c, φ)
- Dolgu kalınlığı (s)
- Açıklığı (S)

sayısal olarak saptanmak zorundadır. Tünel ayna formları üzerine bu değerler işlenmektedir. Yukarıda açıklanan süreksizliklerden başka kayanın ayrışma durumu, dayanımı, kaya yapısında meydana gelen aşırı sökülme ve kavlaklanma durumu, süreksizliker arasındaki dolgu malzemesinin cinsi, fay zonları, su durumu değerleri de belirlenmekte ve kayıt altına alınmaktadır.

4.1.2 Kaya kalite sınıflamaları

Kaya mekaniğinde literatüre geçmiş çok sayıda kaya kalite sınıflaması yer almaktadır. Genellikle kayanın sahip olduğu süreksizlik özelliklerini, kaya dayanımını, su durumunu, ayrışma durumunu ve yeraltı açıklığı çevresinde yer alan gerilme durumunu kullanarak kaya kalitesini belirlemeye çalışan bu yöntemler arasında ülkemizde en çok Q-Barton, RMR-Bieniawski ve RQD-Deere sınıflamaları tünel inşaatları sırasında tercih edilmektedir. Yapılan kaya kalite sınıflamaları neticesinde kayaya bir puan verilmekte, bu puan onun bir mühendislik işlemi için ne kadar güvenilir olduğu hakkında fikir edinilmesini sağlamaktadır. Delme patlatma yöntemi ile inşa edilen tünellerin neredeyse tamamında kullanılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin (NATM) kaya destekleme sınıfı da kaya kalitelerine bağlı olarak belirlenebilmektedir.

Deere tarafından 1989 yılında geliştirilen RQD (Rock Quality Designation), kullanım kolaylığı bakımından kaya kalite sınıflamaları arasında en çok bilinendir. Mekanik sondaj sonrasında alınan karot parçalarının uzunluğu kullanılarak belirlenen RQD değeri aşağıdaki yöntemle hesaplanabilmektedir [14];

$$\mathrm{RQD} = \frac{\sum 10\ \mathrm{cm'den\ uzun\ karot\ parcalarinin\ uzunlugu}}{\mathrm{Toplam\ Karot\ Uzunlugu}} \mathrm{x}\,100 \qquad (4.1)$$

Tablo 4.1'de RQD büyüklüklerine göre kaya kalitesi gösterilmiştir;

Tablo 4.1: RQD sınıflamasına göre kaya kalite değerleri

RQD (%)	Kaya Kalitesi
< 25	Çok zayıf
25 – 50	Zayıf
50 – 75	Orta
75 – 90	Iyi
90 - 100	Mükemmel

Barton tarafından geliştirilen Q sınıflama sistemi, kaya kalitesinin belirlenmesinde birçok parametreyi dikkate aldığı için tercih edilmektedir. Q sınıflamasının yapılabilmesi için RQD değerinin, çatlak (eklem) takım sayısının (Jn), çatlak pürüzlülük durumunun (Jr), çatlak ayrışma durumunun (Ja), çatlak suyu durumunun

(Jw) ve sistemdeki gerilme durumunun (SRF) bilinmesi gerekmektedir. Q değeri aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilmektedir [15];

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \qquad (4.2)$$

Q sınıflamasında süreksizlik elemanlarına ait puanlama aşağıdaki gibidir [14];

- RQD

$0 \leq RQD \leq 10$ ise Q sınıflamasında RQD = 10 alınmalıdır. Daha hassas sonuç için RQD değeri 5 ve 5'in katları şeklinde seçilmelidir.

• Eklem Takımı Sayısı	(Jn)
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1.0
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve düzensiz eklemler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve düzensiz eklemler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve düzensiz eklemler	12
H. Dört ya da daha fazla eklem takımı, düzensiz eklemler, çok sayıda ve küp şeker görünümlü	15
J. Çok parçalı kaya, toprak görünümlü	20

Not: (i) Kesişen tünellerde Jn x 3 alınmalıdır

(ii) Portallerde Jn x 2 alınmalıdır

- Eklem Pürüzlülük Sayısı (Jr)

(a) Süreksizlik yüzeyleri temasta ve (b) 10 cm'den küçük kayma sonucu temas sağlanmakta ise;

A. Süreksiz eklemler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Sürtünme izli, dalgalı	1.5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5
F. Düz, düzlemsel	1.0
G. Sürtünme izli, düzlemsel	0.5

Not: (i) tanımlamalar küçük veya orta ölçekli süreksizlikler içindir

(c) Kayma sonucu süreksizlik yüzeyleri birbirlerine değmiyorsa

H. Kil minerali içeren zonlar süreksizlik yüzeyleri arasını dolduruyor	1.0
J. Kumlu, çakıllı veya parçalanmış zon süreksizlik yüzeylerinin temasını engellemekte	1.0

Not: (i) süreksizlik aralığı 3 m den büyükse sonuca 1 eklenmelidir

(ii) minimum dirence göre yönlenmesi koşuluyla, lineasyonlara sahip düzlemsel sürtünme yüzlü eklemler için Jr = 0.5 alınabilir

- Eklem Ayrışma Durumu (Ja) ~ φ^o

(a) Süreksizlik Yüzeyleri Temasta ise

A. Sıkı kaynaşmış, sert, yumuşamayan, geçirimsiz dolgu örnek kuars, epidot	0.75	----

B. Ayrışmamış eklem yüzeyleri, sadece lekeli yüzey	1	25-35
C. Az ayrışmış eklem yüzeyleri, yumuşamayan yüzey mineralleri ile kaplanmış, kum tanecikleri, kil içermeyen parçalı kaya	2	25-30
D. Siltli, veya kumlu killi kaplama, yumuşak olmayan kil parçaları	3	20-25
E. Yumuşayan, düşük sürtmeli kil mineralleriyle kaplı, az miktarda akıcı kil. Örnek örneğin kaolinit veya mika, klorit, talk, jips, grafit, ve az miktarda akıcı kil	4	8-16
(b) 10 cm'lik kayma öncesi eklem yüzeylerinin teması sağlanabiliyor ise		
F. Kum tanecikleri, kil içermeyen parçalanmış kaya	4	25-30
G. Aşırı derecede konsolide olmuş, yumuşayan kil dolgulu (< 5 mm'den az kalınlıkta ve sürekli)	6	16-24
H. Orta derecede veya az miktarda konsolide olmuş, yumuşayan kil dolgulu (< 5 mm'den az kalınlıkta ve sürekli)	8	12-16
J. Akıcı kil dolgulu, örneğin montmorillonit, sürekli ve < 5 mm'den az kalınlıkta), Ja değeri akıcı kil minerallerinin oranına ve su içeriğine bağlıdır	8-12	6-12
(c) Kayma sonucunda eklem yüzeylerinin teması sağlanamıyorsa;		
K-L-M.. Parçalanmış, kırılmış kayada zon veya bantlar ve kil içeriği (kilin tanımlamaları için G-H ve J maddelerine bakın)	6-12	6-24
N. Siltli veya kumlu killi, yumuşamayan az kil sürtünmeli zon veya bantlar	5.0	----
O. Kalın, sürekli zonlar veya kil bantları (bkn G-H-J)	10-13	
veya	13-24	6-24

• Eklem Su Azaltma Faktörü	(Jw)	~ Su Basıncı (kg/cm^2)
A. Kuru kazılar ya da az su geliri. Örnek olarak lokal su geliri < 5lt/dk	1	< 1
B. Orta derecede su geliri ya da basıncı, eklem dolgusunun yıkanması	0.66	1-2.5
C. Yüksek su geliri veya basınç	0.5	2.5-10
D. Yüksek su geliri veya basınç, dolgunun tamamen yıkanması	0.33	2.5-10
E. Patlatma sonrası aşırı su geliri, zamanla azalıyor	0.2-0.1	> 10
F. Patlatma sonrası aşırı su geliri, zamanla azalmıyor	0.1-0.05	> 10

Not: (i) C ile F arasındaki faktörler kaba tahminlerdir, eğer drenaj ölçümleri yapılıyorsa Jw değeri arttırılmalıdır

(ii) buzlanmadan kaynaklanan özel durumlar dikkate alınmamıştır

• Gerilme Azaltım Faktörü	(SRF)
(a) Kazıyı kesen zayıflık zonları tünel kazısı sonrası gevşemelere neden olabilirse;	
A. Birden çok zayıflık zonu, kil veya kimyasal ayrışma sonucu ayrışmış kaya içerir, herhangi bir derinlikte çok gevşek kaya	10
B. Tekil zayıflık zonu, kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içermektedir (kazı derinliği < 50 m)	5
C. Tekil zayıflık zonu, kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içermektedir (kazı derinliği > 50 m)	2.5
D. Birden çok zayıflık zonu, kil içermeyen kaya, herhangi derinlikte gevşek çevre kayacı	7.5
E. Tekil zayıflık zonu, kil içermiyor, kazı derinliği < 50 m	5
F. Tekil zayıflık zonu, kil içermiyor, kazı derinliği > 50 m	2.5

G. Gevşek, açık eklemler, aşırı çatlaklı, küp şeker görünümü 5

Not: belirgin zayıflık zonlarında eğer bölgeler kazı alanına etki ediyor fakat alanı kesmiyorsa SRF değerini %25-50 oranında azaltılır.

(b) Sağlam kayada kaya gerilme problemleri

	σ_c / σ_1	σ_t / σ_1	(SRF)
H. Düşük gerilme, yüzeye yakın	> 200	> 13	2.5
J. Orta derecede gerilme	200-10	13-0.66	1.0
K. Yüksek gerilme, sıkı yapı (stabilite sağlanabilmekte, genelde duvarlarda gevşemeler olmakta)	10-5	0.66-0.33	0.5-2
L. Kavlaklanma (masif kaya)	5-2.5	0.33-0.16	5-10
M. Aşırı kaya patlaması (masif kaya)	< 2.5	< 0.16	10-20

Not: (ii) aşırı anizotropik gerilme koşullarında (eğer ölçüldüyse), $5 \leq \sigma_3 / \sigma_1 \leq 10$ ise σ_c ve σ_t değerlerinin 0.8 katını alın. Eğer ölçülen değer 10'dan büyükse bu durumda 0.6 katını alın. (σ_c basınç dayanımı, σ_t çekme dayanımı, σ_3 ve σ_1 ise üç eksenli gerilme durumunda majör ve minör gerilme değerleridir).

(iii) eğer tünel derinliği, genişliğinden de az ise SRF değerini 2.5'den 5'e kadar arttırılır.

(c) Yüksek gerilme koşulları altında sıkışan kayada plastikleşmeye bağlı akma varsa

N. Yumuşak kayada kaya basıncı	5-10
O.Yüksek oranda sıkışma	10-20
P. Yumuşak kayada akma	5-10
R. Yüksek oranda akma	10-15

Ek Notlar: Q sınıflamasına ait puanlama yaparken aşağıdaki konulara da dikkat edilmelidir.

1. Eğer sondaj yapılamamışsa, RQD değeri RQD = 115 – 3.3 Jv değerinden de hesaplanabilir. Jv birim metreküp kayada toplam eklem sayısıdır. Jv < 4.5 için RQD = 100'dür.

2. Jn değeri foliasyon, şistozite, klivaj gibi etkenlerden değişecektir. Birbirine paralel olarak gelişmiş bu tarz yapılar tek bir yapı gibi değerlendirilmelidir Eğer sadece birkaç eklem varsa veya karotta bu yapılardan ötürü kırılmalar var ise bunları düzensiz eklemler olarak değerlendirmek daha uygun olacaktır.

3. Jr ve Ja değerleri (kesme dayanımını temsilen) en zayıf eklem bölgesi için veya kil içeren süreksizlikte değerlendirilmelidir.

4. Eğer bir kaya kil içeriyorsa, SRF değeri gevşeyen kesimler için değerlendirilmelidir.

Hesaplanan Q değerine karşılık RMR değeri de aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilmektedir [16].

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (4.3)$$

Tablo 4.2'de RMR değerlerine karşılık gelen kaya kaliteleri gösterilmiştir.

Tablo 4.2: RMR sınıflamasına göre kaya kalite değerleri

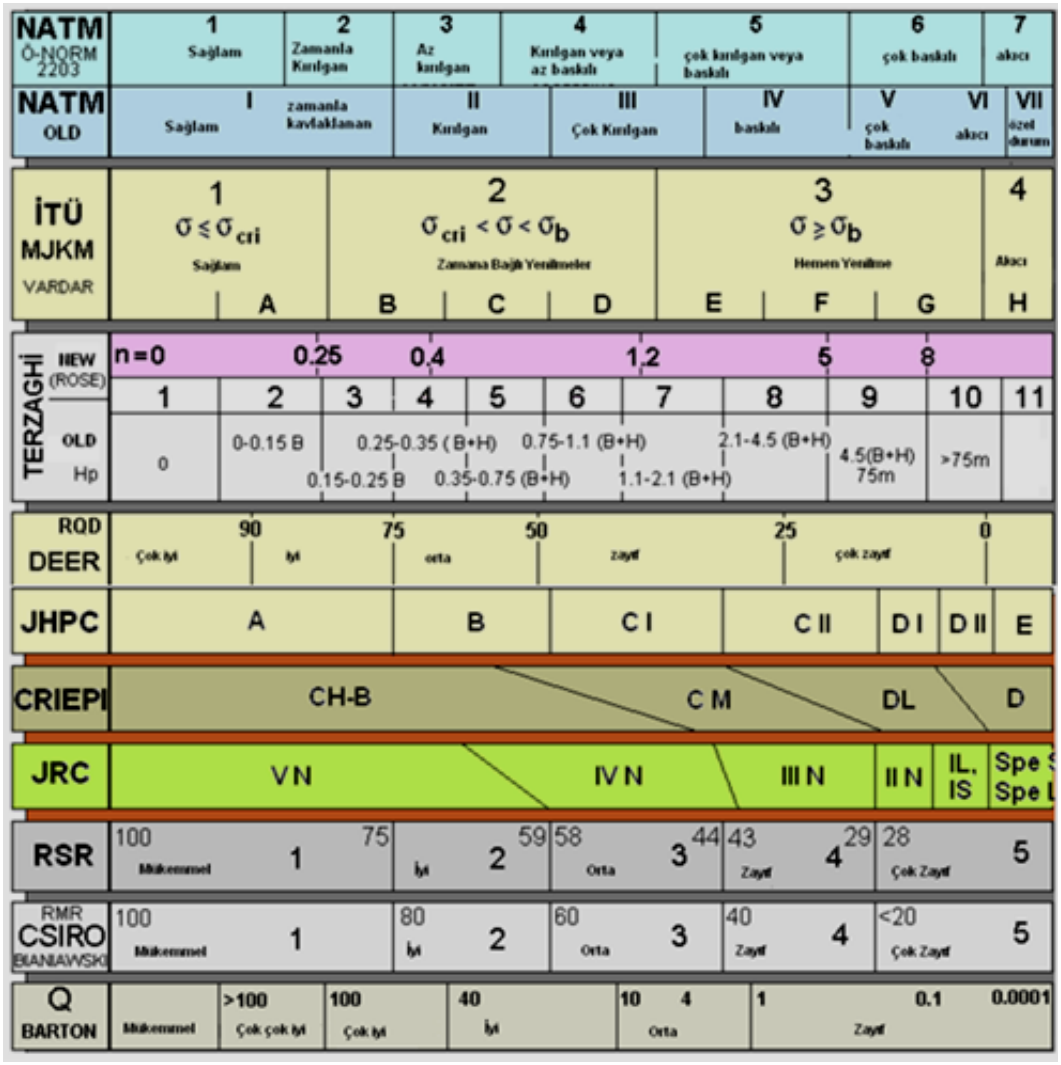
RMR	**Kaya Kalitesi**
< 20	Çok zayıf kaya
21 - 40	Zayıf kaya
41 - 60	Orta kalitede kaya
61 - 80	Iyi kaya
81 - 100	Çok iyi kaya

RMR için kaya kalitesinin hesaplanması, Q sisteminde olduğu gibi kaya özelliklerine bağlı olarak da hesaplanabilmektedir. Tablo 4.3'de RMR sınıflaması için kullanılabilecek abak gösterilmiştir.

Tablo 4.3: RMR sınıflamasında derecelendirme

1	**Sağlam kayanın mukavemeti**	Uç-yük mukavemet indeksi	> 8 MPa	4-8 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Tek eksenli basınç dayanımı deneyine göre		
		Tek eksenli basınç dayanımı	> 200 Mpa	100-200 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	10-25 Mpa	3-10 Mpa	1-3 Mpa
	Derecelendirme		15	12	7	4	2	1	0
2	**RQD**		%90-100	%75-90	%50-75	%25-50	<%25		
	Derecelendirme		20	17	13	8	3		
3	**Eklem sıklığı**		>3m	1-3m	0.3-1m	50-300m	<50mm		
	Derecelendirme		30	25	20	10	5		
4	**Eklem durumu**		Çok kaba yüzey, sürekli değil ayrılma yok eklemli sert kaya	Az kaba yüzeyler <1mm açıklıklı Eklemli sert kaya	Az kaba yüzeyler <1 mm açıklıklı Eklemli yumuşak kaya	Sürtünme izli yüzey veya fay kili<5mm veya 1-5mm açık eklemler sürekli eklemler	Yumuşak fay kili>5mm kalın veya açık eklemler >5mm sürekli eklemler		
	Derecelendirme		25	20	12	6	0		
5	**Yeraltı suyu**	Tünelin 10m.'lik kısmından gelen su	Yok		<25 litre/dak.	25-125 litre/dak	>125 litre/dak		
		Oran: Eklem-deki su basıncı	0		0.0-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Oran: Ana asal gerilme							
		Genel koşullar	Tamamen kuru		Yalnızca nemli (kırıklardaki su)	Orta basınç altında su	Önemli su problemleri		
	Derecelendirme		10		7	4	0		

Yapılan kaya kalite sınıflamalarına bağlı olarak kaya destekleme sınıfı Avusturya Normlarına göre (Önorm B 2203 – Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) belirlenebilmektedir. Kaya sınıflamaları ile NATM arasındaki ilişki Şekil 4.2'de gösterilmiştir [11].



Şekil 4.2: Tünel imalatları için mühendislik jeolojisi tanımlamaları

Şekilde JHPC Japon Karayolları Birliği (Japan Highway Public Corperation), CRIEPI Elektrik Güç Santralleri Merkez Araştırma Enstitüsü (Central Research Institute of Electric Power Industry) ve JRC ise Japon Demiryolları Birliği (Japan Railway Corporation) anlamına gelmektedir.

Kaya kalite sınıflamalarına göre NATM değerleri A (A1, A2), B (B1, B2, B3) ve C (C1, C2, C3, C4, C5) olmak üzere üç ana sınıf altında değerlendirilir. A sınıfı kayalar stabil, hafif sökülen kaya kütleleri, B sınıfı kayalar gevrek kaya kütlelerini ve C sınıfı kayalar baskılı kaya kütlelerini temsil etmektedir [17]. Kaya destek sınıfına bağlı olarak destekleme elemanlarının türü ve miktarı projelendirme sırasında yapılan stabilite analizleri ile belirlenir, imalat sırasında kesinleştirilir.

NATM'e göre kaya sınıflarının özellikleri aşağıdaki gibidir [18];

Kaya Sınıfı A; Sağlam – Zamanla Kırılgan Kayaçlar

Bu ortamlarda genelde açım sırasındaki zorlamalar nedeniyle kırılmalar olmaz. A1 ve A2 olmak üzere iki altsınıfı vardır.

A1 Sağlam: Çok kısa sürede sönümlenen çok az deformasyon olur. Kavlakların temizlenmesinden sonra hiçbir sökülme oluşmaz. Duraylık süresi 3 haftadan fazladır. Çevrimli açımda destekleme gerekmez. İlerleme adımlarının uzunluğu ilke olarak çalışma tekniğince kısıtlanır. Sürekli açımda da destekleme gerekmez.

A2 Zamanla Kırılgan: Çok kısa sürede sönümlenen düşük deformasyonlar görülür. Tavanda veya üst omuzlarda yeryer süreksizliklere bağlı kavlaklar oluşabilir.

Kaya Sınıfı B; Kırılgan Kayaçlar

Bu kayaç sınıfı süreksizliklere bağlı doku dayanımının ve/veya gerilme kemerlenmesinin yetersizliği nedeniyle gevşemeye yatkın ortamları kapsar. B1, B2 ve B3 olmak üzere üç altsınıfa ayrılır.

B1 Kırılgan: Çok kısa sürede sönümlenen düşük deformasyonlar, süreksizliklere bağlı dayanım azalması vardır. Patlatma sarsıntıları gevşemelere ve tavanda veya üst omuzlarda sökülmelere neden olur. Duraylık süresi 4 gün ile 10 saat arasındadır. Çevrimli açımda destekleme düzenli olmakla birlikte dar kapsamlıdır. İlerleme adımları duraylık süresi, serbest açıklık boyuna ve sağlamlaştırma ve destekleme elemanlarının oluşturulması için gereken süreye bağlı olarak belirlenir. Yer yer arının desteklenmesi gerekebilir. Sürekli açımda B1.1 ve B1.2 olmak üzere yeniden iki alt sınıf tanımlanmıştır;

B1.1: Düzenli fakat dar kapsamlı destekleme tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda arın öncesindeki 2. çalışma bölgesinde makinalı kazıyı engellemeksizin gerçekleştirilir. Duraylık süresi 4 gün ile 2 gün arasındadır.

B1.2: Tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda düzenli ve dar kapsamlı destekleme 1. ve 2. çalışma bölgesinde gerçekleştirilir. Kazı makinasının

çalışmaları destekleme ve sağlamlaştırma önlemlerinin alınması sırasında kısıtlanır. Duraylık süresi 2 gün ile 10 saat arasındadır.

B2 Çok Kırılgan: Çok kısa sürede sönümlenen düşük deformasyonlar, süreksizliklere bağlı dayanım azalması, düşük kemerlenme, yüksek doku hareketliliği belirgindir.

Patlatmaların etkisiyle desteklenmemiş yüzeylerden parçaların kopması gibi hızlı ve derine ulaşan geşemeler oluşur. Duraylık süresi 10 saat ile 2 saat arasında, hatta daha kısadır. Çevrimli açımda destekleme tavanda, omuzlarda ve yanlarda düzenli ve çoğun arını da içerecek şekilde geniş kapsamlıdır. Parçalı kazı kesitleri gerekir. İlerleme adımları azalan duraylık süresi, serbest açıklık boyuna göre belirlenir ve arın sürekli olarak desteklenir. Sürekli açımda B2.1 ve B2.2 olmak üzere yeniden iki alt sınıf tanımlanmıştır:

B2.1: Kazı kafasının hemen arkasından başlamak üzere düzenli destekleme gerçekleştirilir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Frezeli makina kullanılıyorsa parçalı kazı yapılır. Duraylık süresi 10 - 5 saat arasındadır.

B2.2: Kazı kafasının hemen arkasında ön çalışma bölgesini (1.bölgeyi) çepeçevre saracak şekilde düzenli destekleme gerekir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Frezeli makina kullanılıyorsa parçalı kazı yapılır 1. ve 2. çalışma bölgesinde gerçekleştirilir. Duraylık süresi arın desteklenmeksizin 5 - 2 saat arasındadır.

B3 Dökülür: Küçük parçalı kazı kesitlerinin açımında bile kayaç parçaları içeriye dökülür. Stabilite yetersizliğinin nedeni, kohezyonun ve kayaç dokusundaki kenetlenmenin azlığıdır. Çevrimli açımda arının ön sürenlerle desteklenmesi, çok parçalı kazıda çalışabilmek için bile kayaç niteliğini iyileştirici ve duraylığı arttırıcı önlemlerin alınması gereklidir. Aynayı da kapsamak üzere tüneli çepeçevre saracak şekilde düzenli ve yoğun bir destekleme gerekir. Sürekli açımda şiltsiz makinalar ancak ön sağlamlaştırma gibi çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir. Duraylık süresi 2 saatten daha azdır.

Kaya Sınıfı C; Baskılı Kayaçlar

Bu kayaç sınıfı kayaç dayanımın önemli ölçüde aşıldığı ortamları kapsar. Kaya patlaması ve belirgin şişme - kabarma davranışının görüldüğü kayaçlar da bu sınıfa girer. C1, C2, C3, C4 ve C5 olmak üzere beş alt sınıfı vardır.

C1 Kaya Patlamalı: Primer (doğal) gerilmeler genelde yoğun, sert ve kırılgan kayaçlarda elastik enerji olarak depolanır. Kazı sırasında bu enerji birdenbire boşalır ve kayaç parçalarının koparak fırlamasına neden olur. Kırılma olaylarının derinlere ulaşmadığı serbest kazı yüzeylerinden dışarıya fırlatılan bu parçalar genelde sırçalanmış şekildedir. Çevrimli açımda destekleme çoğun belirli bölgelerde hemen ve oldukça sık yerleştirilmiş kısa kaya saplamalarıyla yapılır.

Gerektiğinde çelik hasır da kullanılır. Kayadaki gerilmelerin boşaltılması için gevşetme delikleri açılabilir veya patlatma ile ortam gevşetilebilir. Sürekli açımda 1. çalışma bölgesinde sık aralıklarla kısa kaya saplamaları ve gerektiğinde çelik hasır kullanılır. Makinalı kazı bundan fazlaca etkilenmez.

C2 Baskılı: Uzun süreli, çok yavaş sönümlenen deformasyonlar belirgindir. Plastik ve yüksek kohezyonlu kayaçlarda yenilme mekanizmaları ve plastikleşme bölgeleri gelişir. Çevrimli açımda destekleme ve sağlamlaştırma bütün kesiti kaplayacak şekilde düzenli olarak yapılır. Aynada çoğun geçici duraylık bulunduğundan kazı kesiti ve biçiminin stabilitenin korunması ve arttırılmasına yardımcı olacak şekilde seçilmesi gerekir. Sağlamlaştırma işlemlerinin hedefi; yenilme mekanizmalarını denetleyerek kırılmaları sınırlandırmaktır. Atım-ilerleme boyu arındaki stabiliteye göre belirlenir. Sürekli açımda C2.1 ve C2.2 olmak üzere iki alt sınıf tanımlanmıştır.

C2.1: Destekleme düzenli ve kapsamlı şekilde 1 ve 2. çalışma bölgesinde tavanda, omuzlarda ve yanlarda kademeli olarak gerçekleştirilir. Bu çalışmalar makinalı kazı çalışmalarını engeller. Makinanın sıkışmasının önüne geçmek için gerekli önlemler alınmalıdır. Duraylık süresi 2 gün ile 10 saat arasındadır.

C2.2: Kazı kafasının hemen arkasından başlamak üzere düzenli destekleme gerçekleştirilir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler.

Parçalı kazı yapılarak ilerlenir. Tünel açma makinasının sıkışmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Duraylık süresi 10 - 5 saat arasındadır.

C3 Çok baskılı: Başlangıçta yüksek deformasyon hızları gösteren, uzun sürede ve çok yavaş sönümlenen büyük deformasyonlar görülür. Bu sırada derine ulaşan yenilme mekanizmaları ve plastikleşme bölgeleri oluşur ve gelişir. Duraylık süresi 5 saat ile 2 saat arasındadır. Çevrimli açımda bütün serbest yüzeylerin desteklenmesi ve sağlamlaştırılması gereklidir. Parçalı kazı kesitleri gerekir. Bunların boyutları arının desteklenebilirliği ile sınırlıdır. Deformasyonların büyüklüğü çoğunlukla deformasyon yarıkları veya biçim değiştirebilen destek ögelerinin kullanımı gibi özel yapısal önlemlerin alınmasını zorunlu kılar. İlerleme adımları aynanın duraylığına ve deformasyon hızlarına göre belirlenir ve arın sürekli olarak desteklenir. Sürekli açımda düzenli ve yoğun bir destekleme kazı kafasının hemen arkasındaki ön çalışma bölgesini (1.bölgeyi) çepeçevre saracak şekilde gerçekleştirilir. Frezeli kazı ancak parçalı olarak ve önemli duraksamalarla yapılabilir. Tünel açma makinasının sıkışmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Duraylık süresi arın desteklenmeksizin 5 - 2 saat arasındadır.

C4 Akıcı: Çok düşük içsel parametreli (kohezyon ve sürtünme açılı) ve yumuşak-plastik kıvamlı kayaçlar desteklenmemiş çok küçük kazı kesitlerinde bile kısa sürede tünel içine akar. Çevrimli açımda gerçekleştirilen iyileştirme ve aynanın ön sürenlerle desteklenmesi gibi özel önlemlerle ortam niteliğinin, çok parçalı kazıda ilerlemeyi sağlayacak şekilde önceden ve imalat sırasında geliştirilmesi zorunludur. Her parçada aynayı ve kazı yüzeylerini çepeçevre saracak şekilde düzenli ve yoğun destekleme ve sağlamlaştırma önlemlerinin alınması gerekir. Sürekli açımda şiltsiz makinalar ancak ön sağlamlaştırma gibi çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir. Duraylık süresi 2 saatten daha azdır.

C5 Şişen-Kabaran: Üzerinden yükün kalkmasıyla su alarak şişen ve/veya kabaran killi, anhidritli ve tuzlu mineraller içeren ortamlardır. Çevrimli açımda zaman içinde de şişme-kabarma basınçlarını alabilen uygun destekleme önlemleri ve işlemleriyle kabarma deformasyonlarının oluşumu önlenebilir ya da bunların zararlı etkileri engellenebilir. Sürekli açımda zaman içinde de şişme-kabarma basınçlarını alabilen uygun destekleme önlemleri ve işlemleriyle kabarma deformasyonlarının oluşumu önlenebilir ya da bunların zararlı etkileri engellenebilir. Şiltsiz makinalar ancak çok

özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir. Duraylık süresi için veri yoktur.

4.1.3 Yerinde kaya dayanım parametrelerinin belirlenmesi

Polilit olarak adlandırılan çok parçalı, çatlaklı ortamlar monolit (tek, çatlaksız kayaç) ortamlara göre daha düşük direnç gösterir ve kolayca şekil değiştirerek plastikleşebilir. Bunun nedeni, bir gerilme durumunda kayaya aktarılan kuvvetlerin süreksizliklerden ötürü farklı noktalarda farklı büyüklüklere ulaşmasıdır. Parçadan parçaya kuvvet aktarımları sırasında pürüzlü çatlak yüzeylerinde gerilme yığılmaları oluşur. İkincil etmenler arasında ise süreksizlik yüzeylerinin geçmişteki oluşumları sırasında geçirdikleri örselenmeler ve buna bağlı olarak gelişen ayrışma olayları gösterilebilir. Sonuç olarak süreksizliklere yakın kesimlerde yer alan parçacık, iç kesimlere göre önceden daha fazla zorlanmış ve örselenmiştir. Parçacık küçüldükçe bu zayıf kesimlerin hacim içerisindeki payı artar, sonuçta çok parçalılık arttıkça kayanın dayanım parametreleri laboratuvarda incelenen taş örneklerinde bulunan değerlere kıyasla çok belirgin azalmalar gösterir [19].

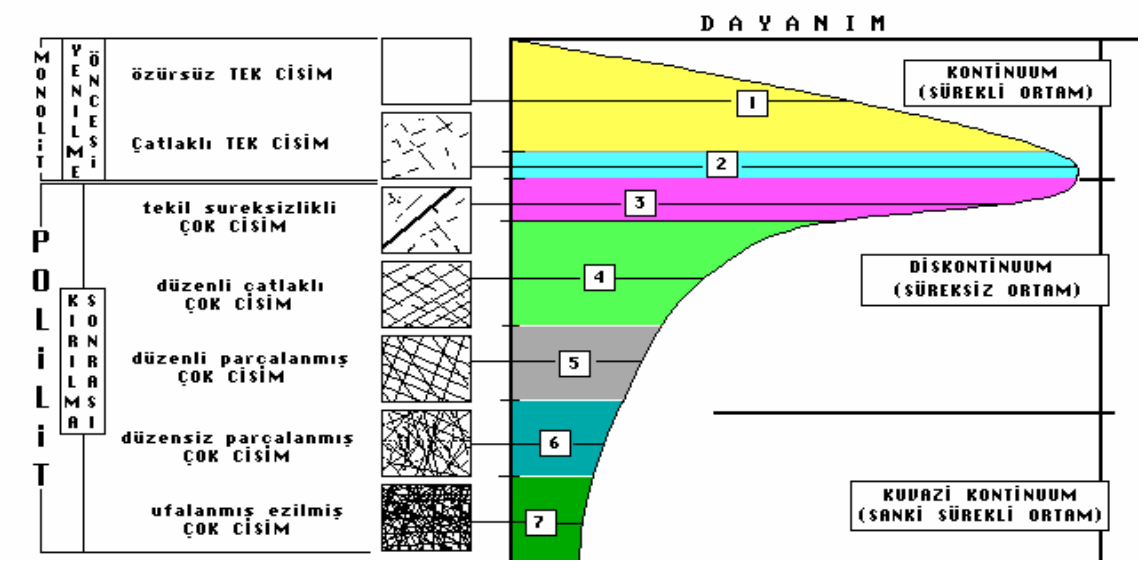
Kaya mekaniğinde (diskontinuum mekaniğinde) kayaçların arazide sahip oldukları jeomekanik büyüklükleri belirlemek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Hoek & Brown, Lama, Denkhaus & Bieniwaski, Protodjakonov gibi).

Hoek & Brown tarafından geliştirilen ve laboratuvar taş örneğinin tek eksenli basınç dayanımı değeri ile birlikte kayacın arazide sahip olduğu süreksizlik miktarını ve örselenme durumunu kullanarak hesaplama yöntemi [20], internetten sağlanabilen yazılımı (RocLab) nedeni ile uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

Modern kaya mekaniğinin kurucularından Müller L. tarafından temeli atılan ve Vardar tarafından geliştirilen bir başka yöntem ile kayacın sahip olduğu dokusal özellikler, süreksizlik özellikleri, kayaç tek eksenli basınç dayanımı, sistem büyüklüğü kullanarak kayaç için yerinde jeomekanik büyüklükler hesaplanabilmektedir [19].

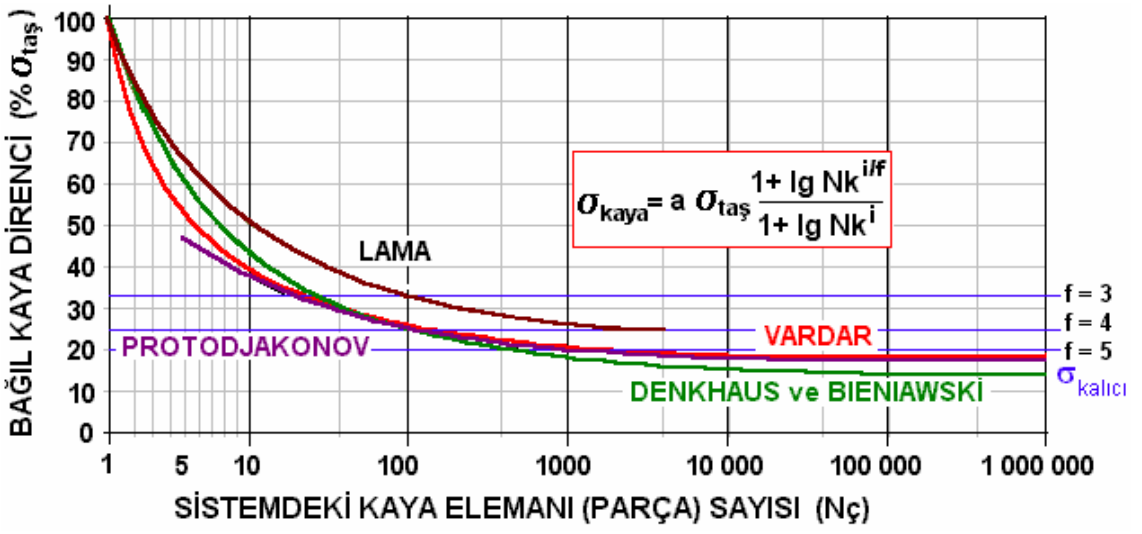
Sistem büyüklüğü, teknik girişimin etkileşimde olduğu büyüklüktür. Uygulamada kazı açıklığının 8 katı olarak alınabilmektedir. Sistem büyüklüğü veya ölçek etkisi aynı ortamda dikkate alınan değerlendirme sınırıdır. Şekil 4.3’ de görülebileceği gibi

aynı ortam ne kadar küçük bir alan içerisinde incelenirse, o sistemde etkili olan süreksizliklerin sayısı da azalmış, kayaç monolite yaklaşmış olacaktır [19].



Şekil 4.3: Kaya mekaniğinde aynı ortamın sistem büyüklüğüne bağlı olarak farklı şekilde davranmasının post-failure davranışı ile açıklanması

Kayaçların yerinde mekanik büyüklüklerinin saptanmasında kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarından yola çıkılmaktadır. Şekil 4.4 bu dirençlerine bağlı olarak taş (laboratuvar örneği) – kaya (arazide) ilişkisini göstermektedir.



Şekil 4.4: Tek eksenli basınç direncine bağlı taş-kaya ilişkisi

σ_{arazi}; kayacın yerinde basınç dayanımı

σ_{lab}; laboratuvar deneylerinden elde edilen kayaç tek eksenli basınç dayanımı

a; anizotropi yükleme yönüne bağlı olarak azalan dayanımın oransal değeri

$(0{,}2 \leq a \leq 1)$

SB; sistem büyüklüğü = 8D

i; heterojenlik sayısı

f; direnç düşüm sayısı ($3 < f < 40$)

χ; çatlak açıklığı (mm)

Jr; çatlak pürüzlülük durumu (Barton – Q Sistemi)

Ja; çatlak ayrışma durumu (Barton – Q Sistemi)

k; eşdeğer çatlak sıklığı (k_{stini}), (adet/m)

olmak üzere kayacın yerinde basınç dayanımı;

$$\sigma_{arazi} = a.\sigma_{lab}.\frac{1+\frac{2i}{f}\log(SBk)}{1+2i\log(SBk)} \tag{4.4}$$

ile hesaplanabilmektedir. Yukarıdaki eşitlikte heterojenlik sayısı (i);

$$i = \chi \,.\, J_r \,.\, \sqrt{J_a} \tag{4.5}$$

Direnç düşüm sayısı (f) farklı kayaç türleri için post-failure deneylerinden elde edilmektedir. Tablo 4.4'de farklı kayaç türleri için elde edilmiş değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.4: Farklı kayaç türleri için direnç düşüm değerleri [19]

Kayaç Türü	Direnç düşüm sayısı "f"
Obsidiyen	>40
Kuvarsit	30-40
Granit	25-35
Bazalt	20-30
Kumtaşı	15-25
Kireçtaşı	12-20
Marn	8-15
Kiltaşı	3-12

a değeri anizotropi sayısıdır. Yönlü örneklerde elde edilen tek eksenli basınç dirençlerinin karşılaştırılması ile ulaşılmaktadır. Büyüklük tek eksenli basınç dayanım değerlerinden minimum değer ile maksimum değerin birbirlerine olan oranından belirlenebilmektedir.

$$a = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} \tag{4.6}$$

Kayacın teknik kohezyonu ve içsel sürtünme açısı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$c_{kaya} = c_{lab} \times \sqrt{i} \times (\sigma_{arazi} / \sigma_{lab}) \tag{4.7}$$

$$\phi_{kaya} = 90 - ((2 \arctan (2 \times c_{kaya} / \sigma_{kaya})) \tag{4.8}$$

Dış etkilere bırakılan kayanın içsel parametrelerinin zaman, su ve psödoplastikleşme ile alabileceği son değerler için Barton ve Bieniawski parametreleri ile

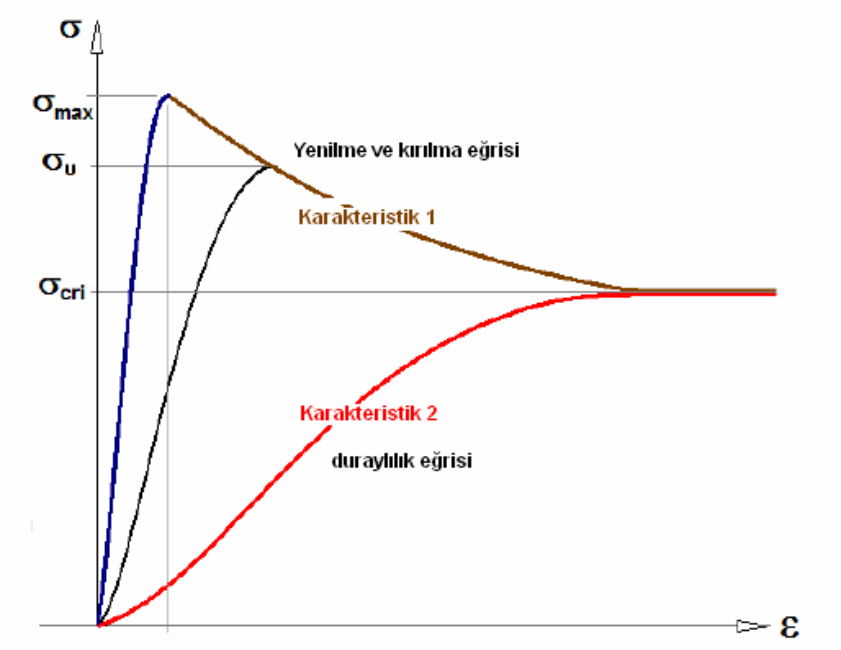
$$c_{rez} = c_{kaya} \times 0{,}018 \tag{4.9}$$

$$\phi_{rez} = \phi_{kaya} \times Jw \times RMR_{final} / RMR_{basic} \tag{4.10}$$

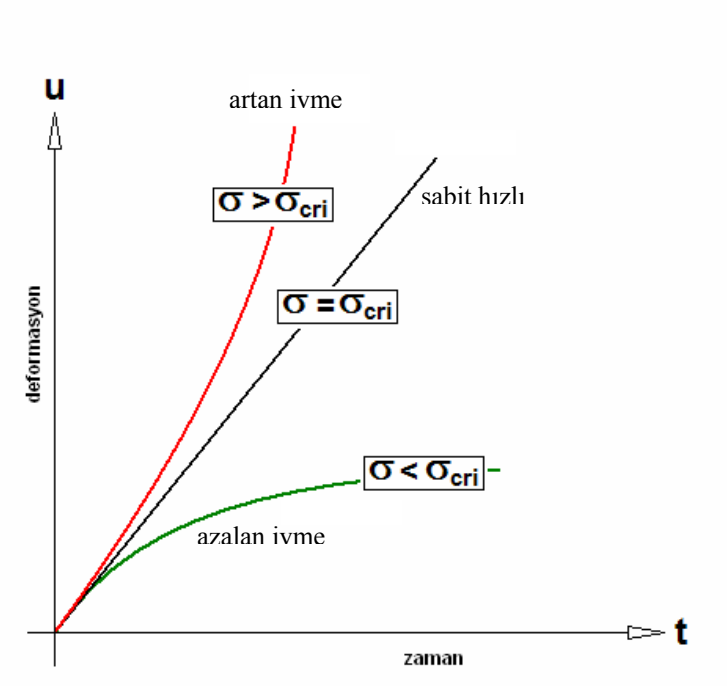
4.2 Yeraltı Kaya Yapılarının Yönlendirilmesi

Tüm jeolojik birimler yük altında şekil değiştirmeye başlar. Bu deformasyonların hızı ve sonucu birimin özelliklerine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Kimi kayaçlar artan deformasyonlar sonucunda yenilir ve göçükle sonuçlanır, kimi kayaçlarda ise enerji sönümlenir ve deformasyonlar zamanla azalır, nihayetinde durur.

Her kayacın kritik gerilme değeri (σ_{kri}) vardır, bu değere ulaşıldığında malzeme sabit gerilme altında sabit hızla akmaya başlar. Şekil 4.5'de gerilme-deformasyon ilişkisi gösterilmiştir [11];



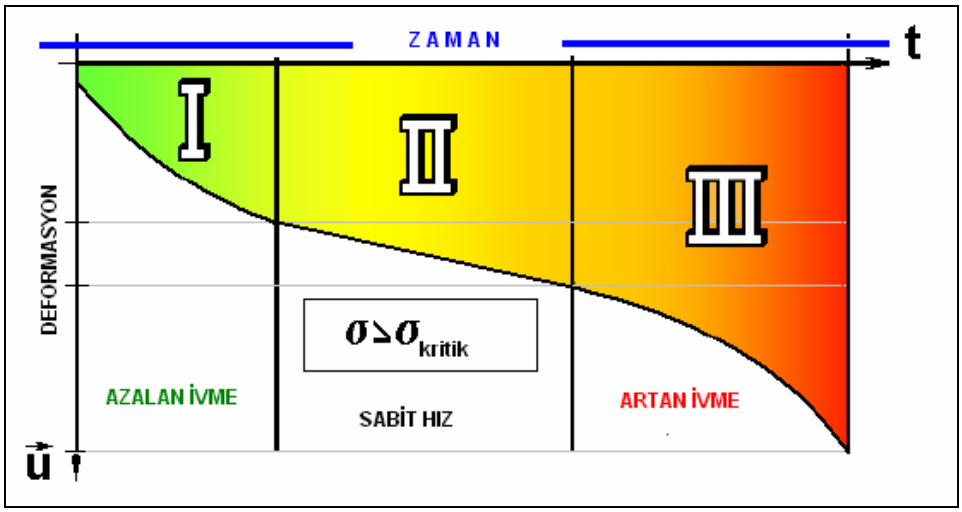
Şekil 4.5: Gerilme – deformasyon ilişkisi



Şekil 4.6: Gerilme durumuna göre zamana bağlı deformasyonlar

Kayaçlar zamana bağlı olarak iki farklı şekilde davranabilir. Eğer kayaca etkiyen gerilme kritik gerilmeden küçükse, deplasmanlar zamanla duracaktır. Aksi durumda, kayaca etkiyen gerilmeler kritik gerilme sınırından büyükse göçük oluncaya kadar deformasyon hızı artmaya devam edecektir. Şekil 4.6 gerilme ile kritik gerilme arasındaki ilişkiyi göstermektedir;

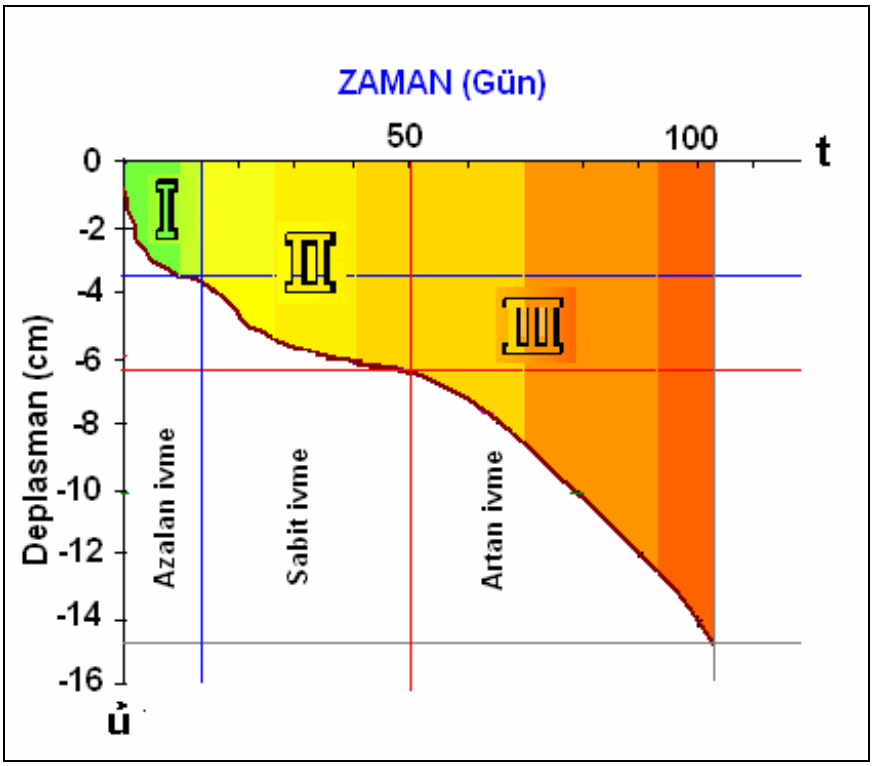
Kayaya etkiyen gerilmelerin zamana bağlı olarak artması durumunda önce azalan, sonra sabit hızlı hareket eden ve en sonunda artan bir ivmeli hareketin olduğu durum meydana gelecektir. Şekil 4.7'de bu ilişki gösterilmiştir;



Şekil 4.7: Zamana bağlı deformasyonların değişimi

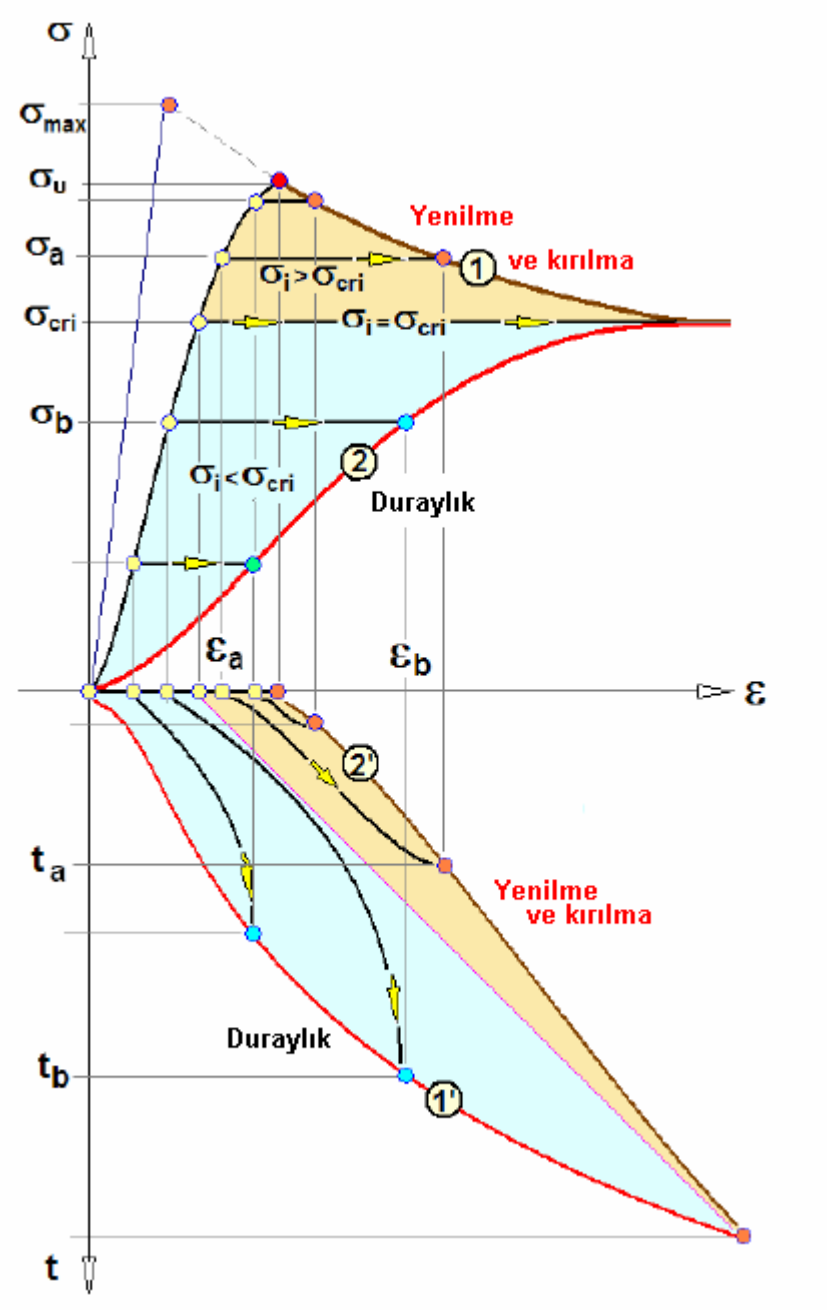
Bir tünel mühendisinin en başta gelen görevi; kırılma veya göçükle sonuçlanabilecek bir deformasyon sürecinin başlayıp başlamadığını düzenli konverjans okumalarıyla denetlemektir. Ancak düzenli okumaların yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi ile tünellerde güvenli imalat yapılabilecektir.

Günümüzde birçok tünelde konverjans ölçümleri jeodezik yöntemler ile yapılmaktadır. Elektronik ölçme sistemlerinin gelişimi ile birlikte hızlı ve doğru ölçüm alma imkanı doğmuştur. Elektronik ölçüm istasyonları ile ölçüm noktalarının 3 boyutta da yer değiştirmeleri kolaylıkla saptanabilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler ile deplasman-zaman grafikleri hazırlanmaktadır. Yukarıda açıklanan değişimler bu grafikler üzerinden izlenmekte, bir sorun ile karşılaşılması durumunda ise önlem alınmaktadır. Bu durumda yapılması gereken ilk işlem problemin nedeninin saptanmasıdır. Deplasman sorunlarının yaşandığı kesim için ayna kesitleri incelenir ve yeraltı kaya yapısı çevresinde yer alan zayıflık zonları belirlenir. Burada oluşan gerilmeleri durdurabilmek için ek sağlamlaştırma-destekleme önlemleri alınarak, deplasmanların azalıp azalmadıkları sürekli olarak izlenir. Şekil 4.8'de Nefise Akçelik (Hapan) tüneli sağ tüp yan duvarında Km 10+714.50 için elde edilmiş deplasman-zaman eğrisi gösterilmiştir [21].



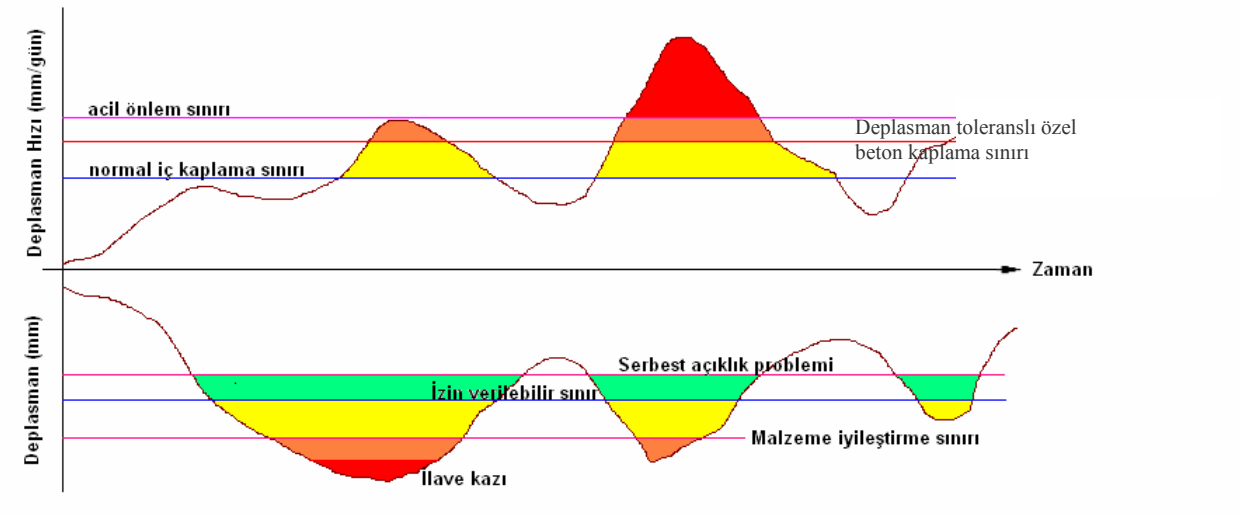
Şekil 4.8: Nefise Akçelik Km 10+714.50 deplasman-zaman ilişkisi

Yeraltı kaya yapılarının desteklenmesi için güvenli olan aralık azalan ivmenin olduğu I numaralı bölgededir. Bu sınırın aşılması halinde kullanılması gereken destekleme elemanlarının miktarı artacak, bir yerden sonra deplasmanlar önlenemez hale gelecektir. Şekil 4.9'da farklı durumlar için gerilme-deformasyon-zaman ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Gerilme - deformasyon - zamanla ilişkisi

Deplasman hızının değişimi ile birlikte uygulanabilecek destekleme elemanlarının seçimleri arasında da benzer bir ilişki vardır. Şekil 4.10 izin verilebilir deplasman sınırları ile iç kaplama yerleştirme sürelerinin deplasman hız veya deplasman oranı ile değişimini göstermektedir.

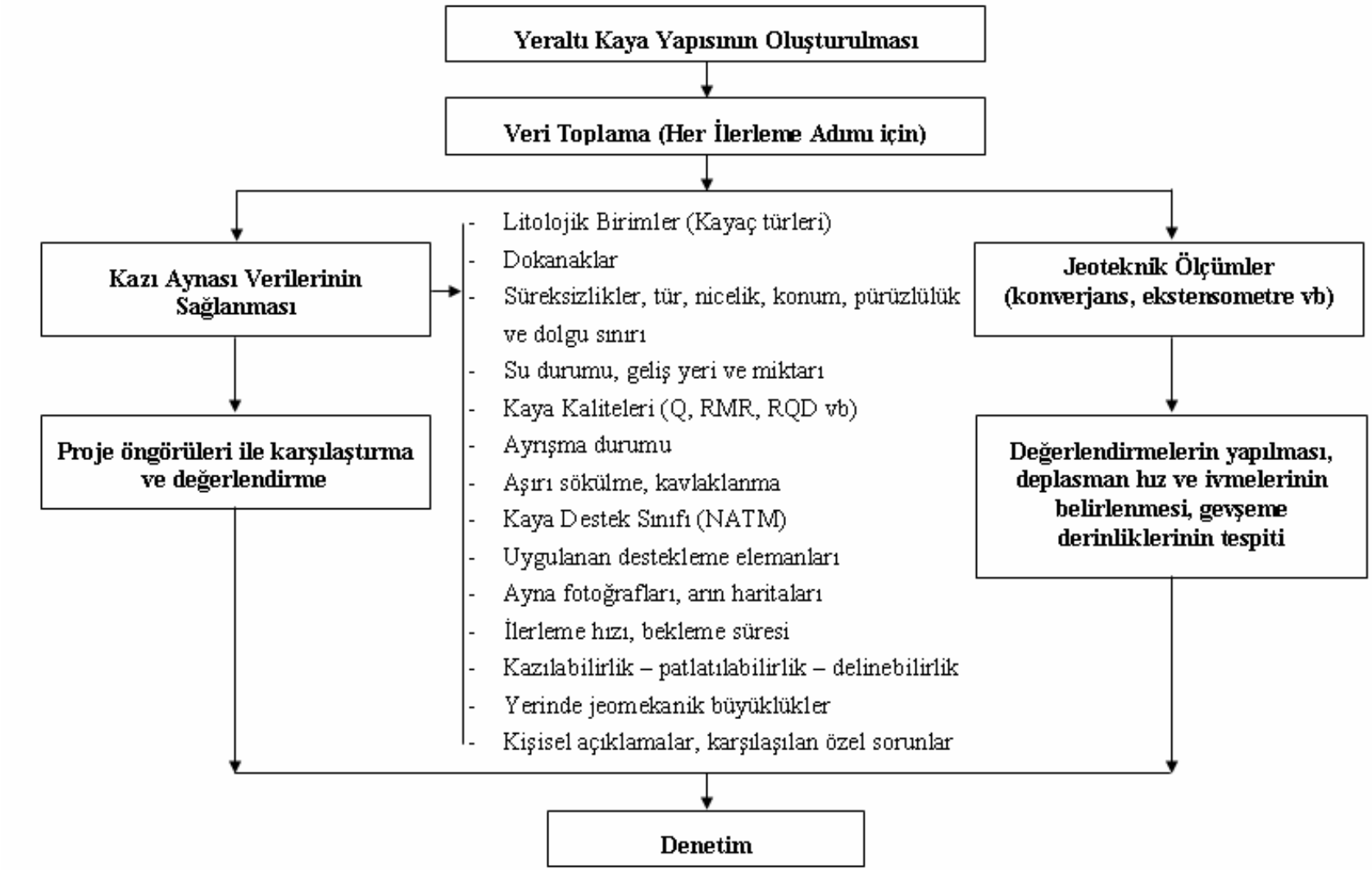


Şekil 4.10: Deplasman hızının zamana bağlı olarak değişimi

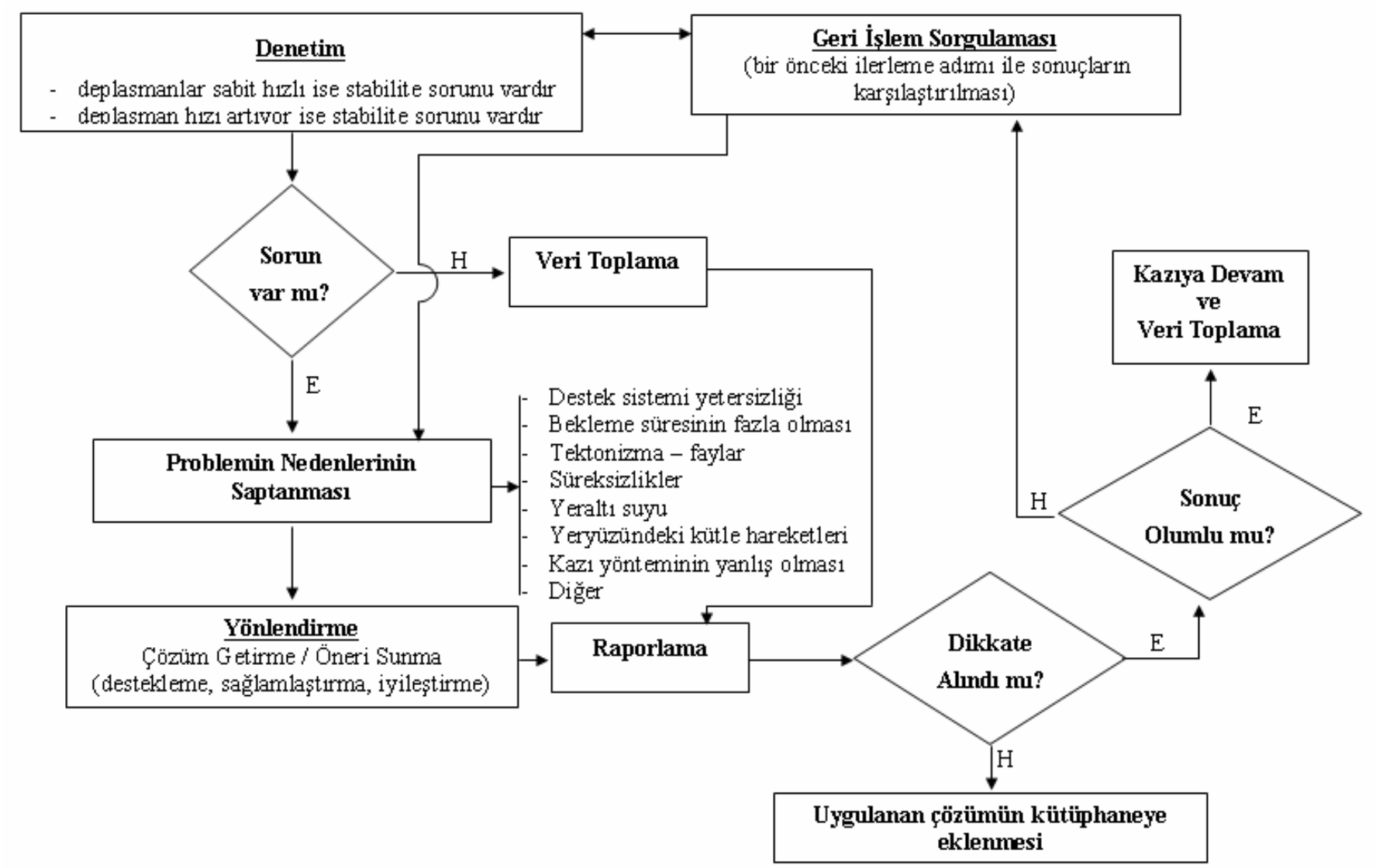
Deplasman hızları ve oranları önlem alınabilecek zamanı belirlemektedir. Şekilde sarı ve kırmızı ile gösterilen bölgeler önlem almak için geç kalınmış, riskli alanlara karşılık gelmektedir.

Yapılan ölçümler neticesinde oluşan bir problemin nedenleri uygulanan destek sisteminin yetersizliği (projelendirme aşamasında süreksizlikler, ayrışma durumu, su etkisi, faylar vb gibi etkenler yeterince dikkate alınmamış olabilir) veya zamanında uygulanmamasıdır. Bu durumda yapılması gereken, en kısa zamanda ilave bulon uygulaması ile tünel üzerindeki gevşemelerin durdurulması olmalıdır. Eğer baskılı bir ortamda imalat yapılıyorsa ve invert uygulaması yapılmamış ise, tünelde daireselliği sağlamak için invert uygulanmalıdır. Şekil 4.7'de gösterilen III nolu tehlikeli kesime gelindi ise rijit desteklemeye gidilmeli, invert ve ilave bulon uygulamasının yanı sıra ek iksa uygulaması ve püskürtme beton kalınlığının arttırılması durumu değerlendirilmelidir.

Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi çalışmaları için yukarıda açıklanan ilkeler ışığında oluşturulacak akış diyagramı(algoritma) aşağıdaki gibi olacaktır:



Şekil 4.11: Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi için algoritma



Şekil 4.12: Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi için algoritma (devam)

5. YERALTI KAYA YAPILARI İNŞASINDA UZMAN SİSTEMLER

5.1 Örnek Bir Uzman Sistemin Oluşturulması (USTA)

Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi çalışmalarında sorumlu mühendisin çalışmalarını kolaylaştırmak ve daha güvenilir kılmak için örnek bir uzman sistem hazırlanmış, iki tünel üzerinde uygulaması yapılmıştır. Uzman sistem mantığı ile çalışan programlar hazırlamak için çeşitli programlama dilleri mevcuttur. Bunlar arasında Prolog, Clips gibi yazılımlar doğrudan bu amaçla kullanılıyor olmalarına rağmen örnek yazılımın daha görsel olması için Visual Basic 6.0 programlama dili tercih edilmiştir. Yazılım çıktıları (raporlar ve grafikler) MS Word ve Excel formatındadır. Programın hatasız çalışması için Office programlarının kullanıcı bilgisayarında yüklü olması gerekmektedir. Yazılım veri tabanı olarak ise MS Access'i kullanmaktadır. Hazırlanan örnek yazılımın genel özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Programlama dili: Visual Basic 6.0.
- Veri Tabanı Kapasitesi: 7 adet Access dosyası (proje bilgileri, mühendislik jeolojisi verileri, dokanak sınırları, litoloji, konverjans ölçümleri, örnek projeler kütüphanesi, sondaj logları ayrı ayrı olarak saklanmakta).
- Toplamda 1000 metre uzunluğunda 65 ayrı proje kaydedilebilir.
- Her ilerleme adımı için 6 adet fotoğraf veri tabanında saklanmaktadır (resim dosyaları bilgisayarın sabit diskinde kalmak zorunda değil).
- Çıktılar Word ve Excel formatına dönüştürüldüğü için taşınma veya saklanma kolaylığı sağlanmaktadır.
- Örnek proje kütüphanesi kullanıcı tarafından geliştirilebilir ve programın öğrenme kapasitesi arttırılabilir.

Hazırlanan yazılıma USTA adı verilmiştir. USTA; "Uzman Sistemle Tünel Analizi" kelimelerinin baş harflerinden oluşmuş olup, kelime uzman kelimesi ile eş anlamlıdır. Program İngilizce veya Almanca dillerinde de hazırlanacak olursa ismi İngilizce'de "Universal System for Tunnel Analysis" ve Almanca'da "Universale System für Tunnel Analysen" şeklindeki açılım ile de uyumlu olmaktadır. Bilindiği gibi tünel mühendisliğindeki denetim ve yönlendirme çalışmaları modern tünelcilik anlayışında aynı temel üzerine oturmaktadır.

5.2 USTA Çalışma Pencereleri

Program çalıştırıldığında kullanıcı şekil 5.1'de gösterilen karşılama ekranı ile karşılanmaktadır. Yaklaşık 5 saniye ekranda kalan görüntü daha sonra kaybolmakta ve ana menü (başlangıç penceresi) ekrana gelmektedir.

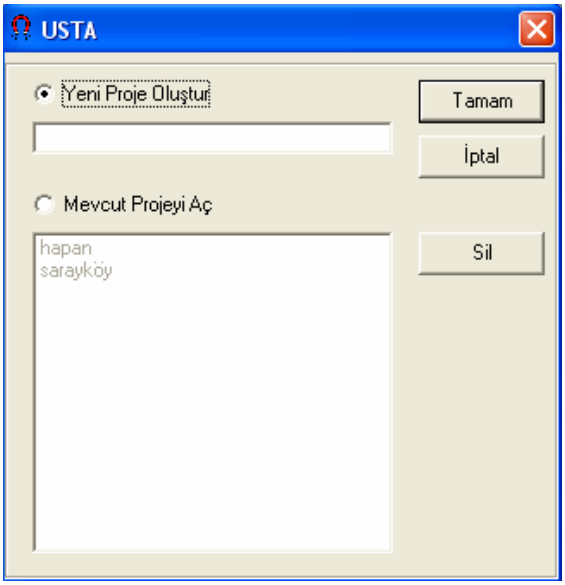


Şekil 5.1: USTA karşılama ekranı

5.2.1 USTA başlangıç ekranı

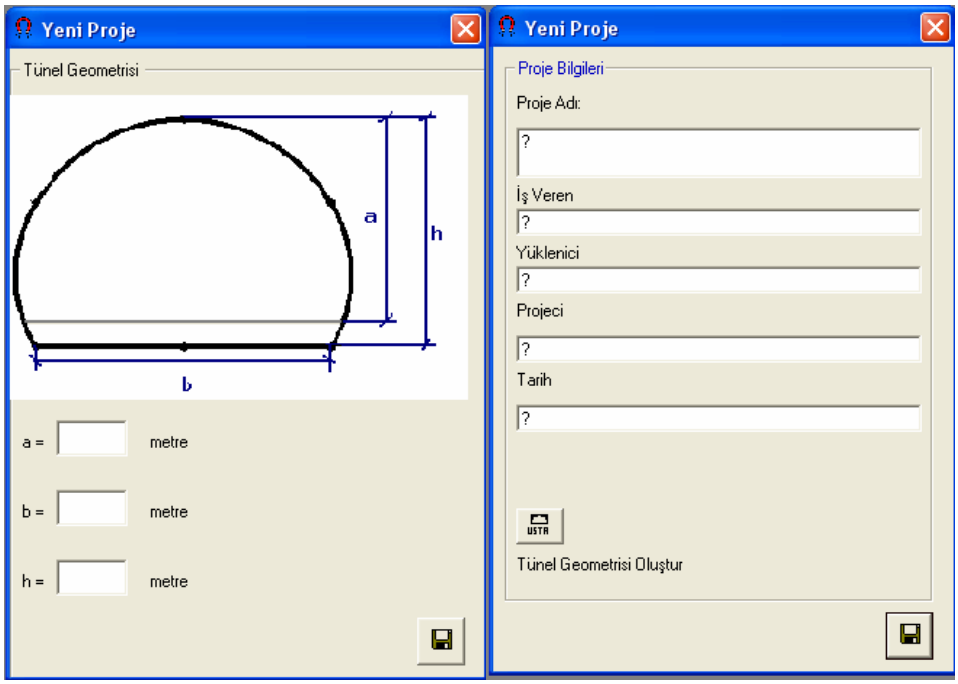
USTA üzerinde kayıtlı tüm projelere başlangıç ekranı üzerinden erişilmektedir. Başlangıç ekranı iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar "yeni proje oluştur" seçeneği ve "mevcut projeyi aç" seçeneğidir.

Eğer bir proje ilk kez oluşturulacaksa "yeni proje oluştur" seçeneği seçilip, ilgili satıra proje adı yazılmalı ve "tamam" tuşuna basılmalıdır. Kaydedilen proje, program daha sonra tekrar çalıştırıldığında alt kısımda görülebilmektedir. Mevcut bir proje üzerinde çalışılacaksa "mevcut projeyi aç" seçeneği seçilmelidir. Aktif hale gelen alt ekrandan proje seçilmeli ve "tamam" tuşuna basılmalıdır.



Şekil 5.2: Başlangıç ekranı

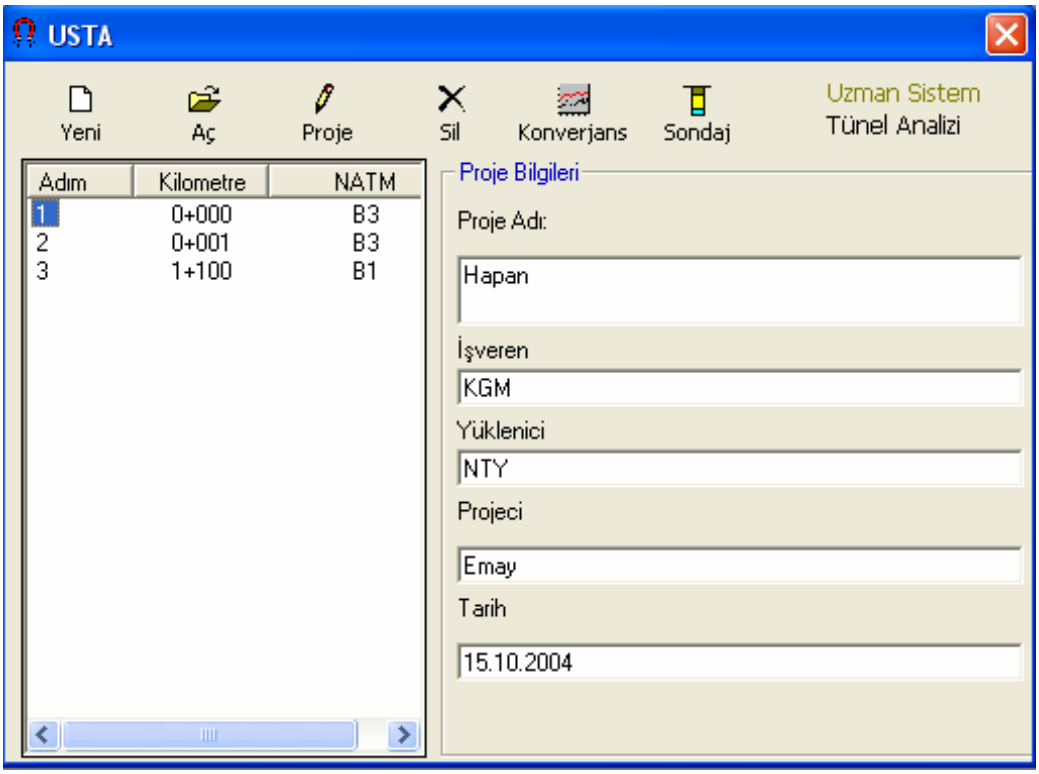
Eğer "yeni bir proje oluştur" seçeneği seçildi ise şekil 5.3'de gösterilen ekran bir defaya mahsus olmak üzere açılacaktır. Proje bilgileri ekranına projenin tam adı, iş veren (idare), yüklenici firma adı, proje firması adı ve proje başlama tarihi kaydedilir. "Tünel geometrisi oluştur" tuşuna basıldığında ise tünel geometrisi ekranı açılır. Bu pencerede tünel alt yarı ve üst yarı yükseklikleri ile tünel genişliği kaydedilir. Girilen bu bilgiler ile tünel aynası ekranında USTA tünel şeklini oluşturmakta ve dokanak sınırlarının ölçekli olarak çizilmesine imkan tanımaktadır. Tünel boyutları aynı zamanda USTA tarafından tünel derinliğinin hesaplanmasında (siyah kotun ve kırmızı kotun kullanıcıdan istenmesi ile) kullanılmaktadır.



Şekil 5.3: Proje bilgileri ekranı ve tünel geometrisi ekranı

5.2.2 Proje izleme ekranı

Yeni bir proje için proje bilgileri girildiğinde veya mevcut bir proje seçildiğinde proje izleme ekranı açılmaktadır. Proje izleme ekranı üzerindeki tuşlar aracılığı ile yeni bir tünel ayna kesiti oluşturulabilmekte, mevcut olan bir kesit açılabilmekte, konverjans ölçümleri ekranına erişilebilmekte ve güzergah boyunca yapılmış mekanik sondajlara ait veriler kaydedilebilmektedir. Ekranın sol tarafında yer alan pencerede kaydedilmiş tünel ayna kesitleri izlenebilmektedir. Projedeki mühendislik jeolojisi verilerine göre (tünel ayna kesiti ekranında kaydedilen veriler) NATM'e karşılık gelen kaya destekleme sınıfı USTA tarafından belirlenmektedir. Ekranın sağında yer alan pencerede ise proje bilgileri salt okunur olarak görülmektedir. Bu bilgiler, projenin ilk kez oluşturulması sırasında kaydedilen bilgilerdir. Şekil 5.4'de "proje izleme ekranı" gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Proje izleme ekranı

Proje izleme ekranında yer alan tuşlar ve işlevleri aşağıdaki gibidir;



Yeni: Yeni bir tünel ayna kesiti için pencere açar.



Aç: Ekranın solunda yer alan pencerede seçili olan (adım) tünel ayna kesitini açar.



Proje: Başlangıç ekranına geri döner.



Sil: Seçili tünel ayna kesitini veri tabanından siler.



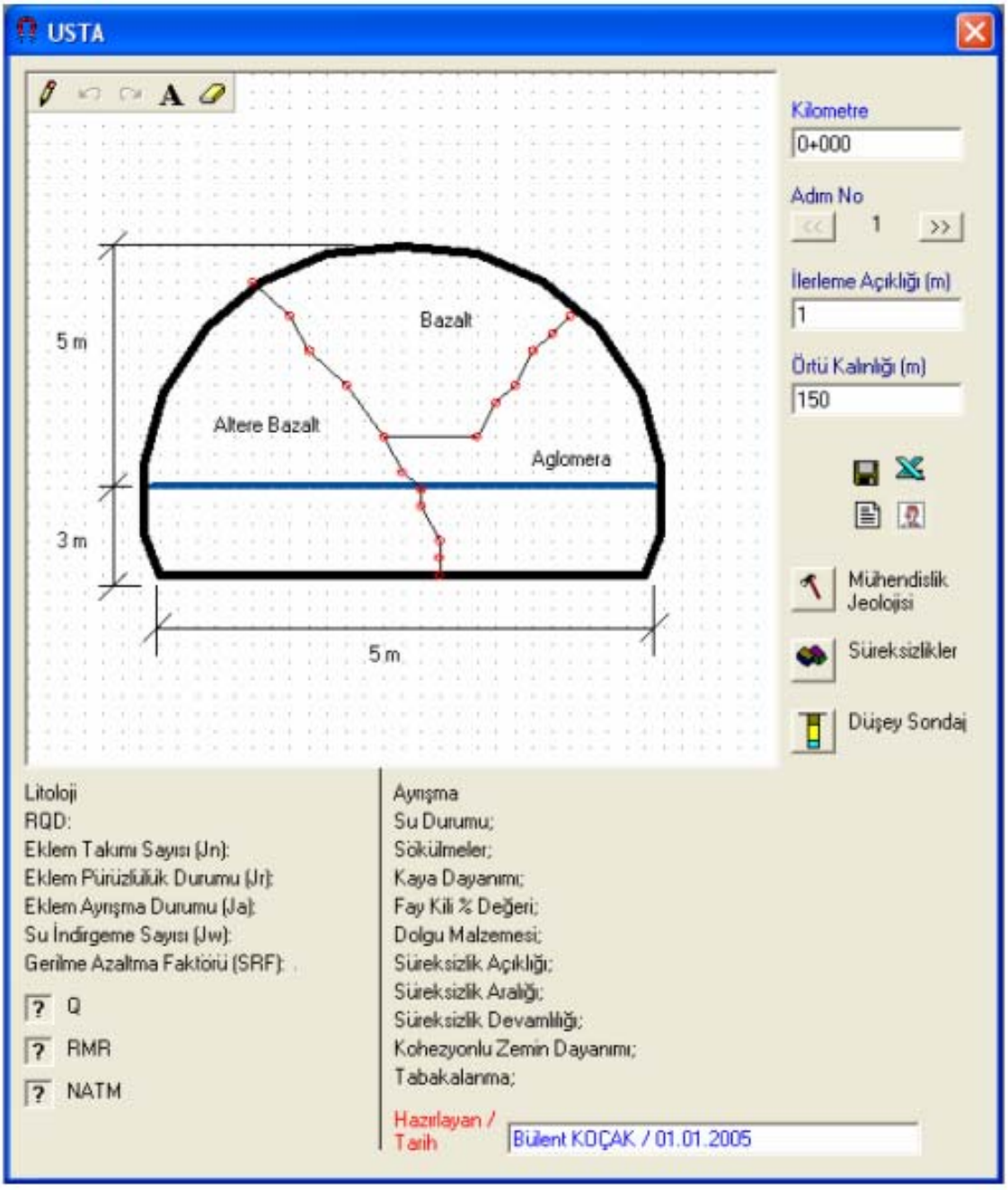
Konverjans: Konverjans ölçümleri ile ilgili ekranı açar.



Sondaj: Proje güzergahında yer alan mekanik sondajları veri tabanına kaydetmek için sondaj ekranını açar.

5.2.3 Tünel ayna kesiti ekranı

Proje izleme ekranında "yeni" tuşuna basıldığında yeni ilerleme adımı için tünel ayna kesiti bilgileri kaydedilebilmektedir. "Aç" tuşuna basıldığında ise aynı ekran, daha önce kaydedilmiş bilgilerle birlikte açılmaktadır.



Şekil 5.5: Tünel ayna kesiti ekranı

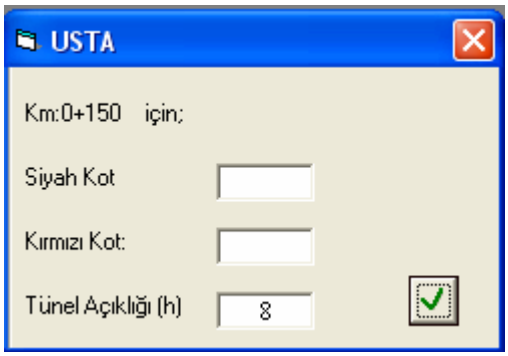
Ekran kendi içerisinde farklı kısımlardan oluşmaktadır. Bunlar hakkında ayrıntılı bilgi aşağıdaki gibidir;

5.2.3.1 Dokanak sınırlarının kaydedilmesi ve litoloji

Tünel aynasında karşılaşılan jeolojik birimlerinin türleri ve dokanak sınırları, ekranda yer alan çizim penceresinde oluşturulabilmektedir. Dokanak sınırlarının çizilebilmesi için kalem ( ) simgesinin olduğu tuşa basılmalıdır. Jeolojik sınır çizgisi tamamlandıktan sonra tamam tuşuna ( ) basılmalıdır. Bu tuş, ekranda bir dokanak sınırı olması halinde aktif olmaktadır. Kayaç türünün şekil üzerine eklenmesi için yazı simgesine (A) basılmalıdır. Açılan "açıklama" penceresine kayacın ismi yazılmalı ve ekran üzerindeki bir nokta seçilerek kayaç adının istenen noktaya eklenmesi sağlanmalıdır. "İleri" veya "geri" tuşları kullanılarak yapılan işlem geri veya ileri alınabilir. "Silgi" simgesine basıldığında ise çizim ekranı temizlenebilmektedir.

Çizim penceresinin sağında yer alan kısımda "adım no" açıklaması ve ileri-geri tuşları bulunmaktadır. Buradaki tuşlar kullanılarak bir sonraki ve bir önceki tünel ayna kesitleri arasında geçiş yapılabilmektedir. Böylece litolojinin ilerleme adımına bağlı olarak değişimi izlenebilmektedir.

Çizim ekranının sağında, örtü kalınlığı kutucuğu yer almaktadır. Eğer mevcut bir tünel ayna kesiti açılmış ise tünel derinliği orada yazılı olacaktır. Eğer yeni bir ayna kesiti oluşturuluyorsa "örtü kalınlığı (m)" yazısının yanında soru işareti (?) simgesi görünecektir. Bu simgeye basılırsa aşağıdaki yardım ekranı açılmaktadır;

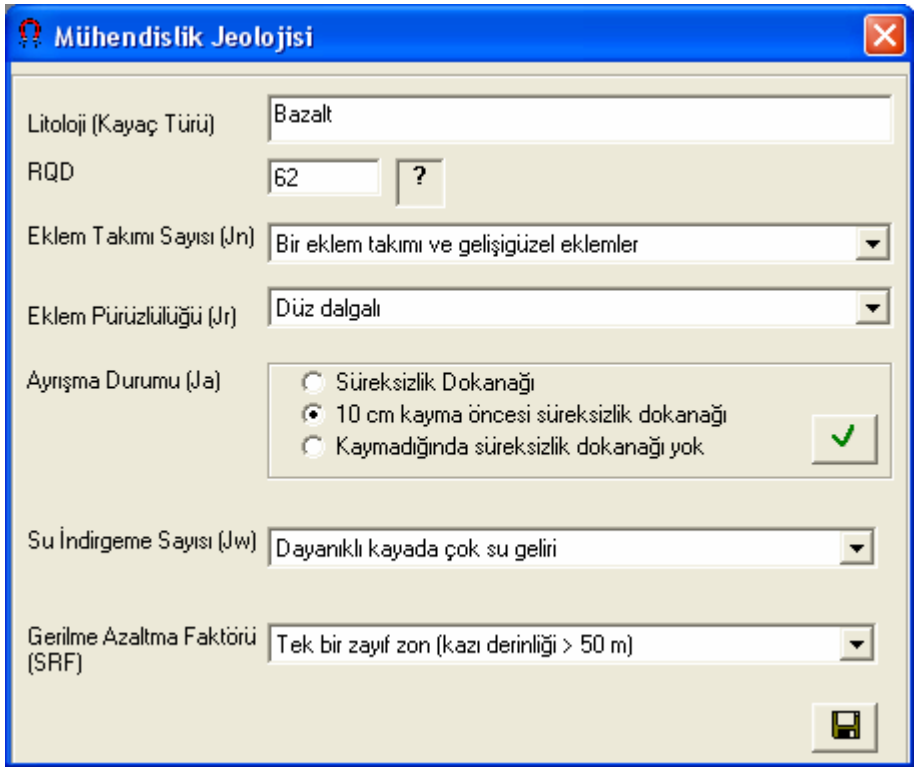


Şekil 5.6: Tünel derinliği hesaplama ekranı

Projeye ait kot bilgileri girilerek USTA'ya tünel derinliği hesaplatılabilmektedir. Tünel açıklığı değeri USTA tarafından veri tabanından okunmaktadır. Programın kullanıcıya her aşamada yardımcı olması amaçlandığından yazılımın birçok yerine yardım seçeneği (soru işareti simgesi) eklenmiştir.

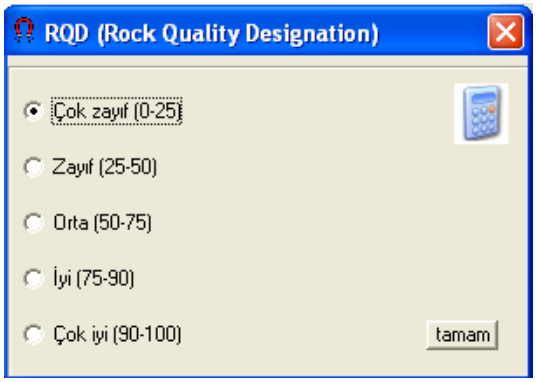
5.2.3.2 Mühendislik jeolojisi bilgileri

İlgili ilerleme kesitinde yer alan kayaçların kaya kalitelerinin hesaplanması ve kaya destekleme sınıfının belirlenebilmesi için mühendislik jeolojisi tuşu ( ) eklenmiştir. Bu tuşa basıldığında şekil 5.7'de gösterilen ikinci bir pencere daha açılmaktadır;



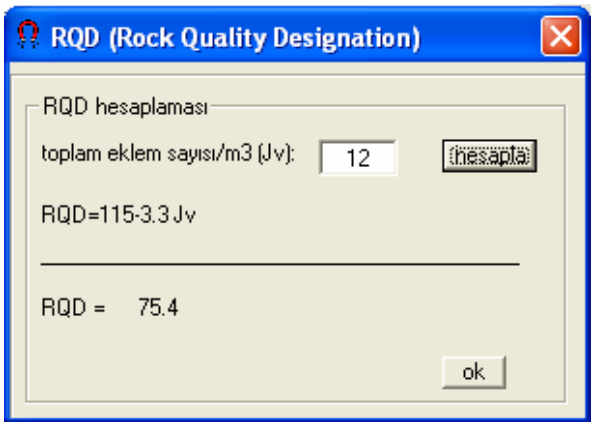
Şekil 5.7: Mühendislik jeolojisi ekranı

Mühendislik jeolojisi ekranı ile RQD, Q ve RMR kaya kalite büyüklükleri belirlenebilmektedir. Eğer biliniyorsa RQD seçeneğinin olduğu hücreye değeri yazılmalıdır. Eğer RQD bilinmiyorsa soru işaretine tıklanarak USTA'dan yardım alınabilir. Yardım tuşuna basıldığı takdirde RQD için ek bir ekran daha açılmaktır;



Şekil 5.8: RQD veri ekranı

Şekil 5.8'de gösterilen ekranda kaya kalitesi seçilebilir. Eğer eklem takımı sayısı biliniyorsa RQD değeri USTA'ya hesaplatılabilir. Bunun için sağ üstte yer alan hesap makinası simgesine basılmalıdır. Ekran bu durumda şekil 5.9'daki gibi değişmektedir;



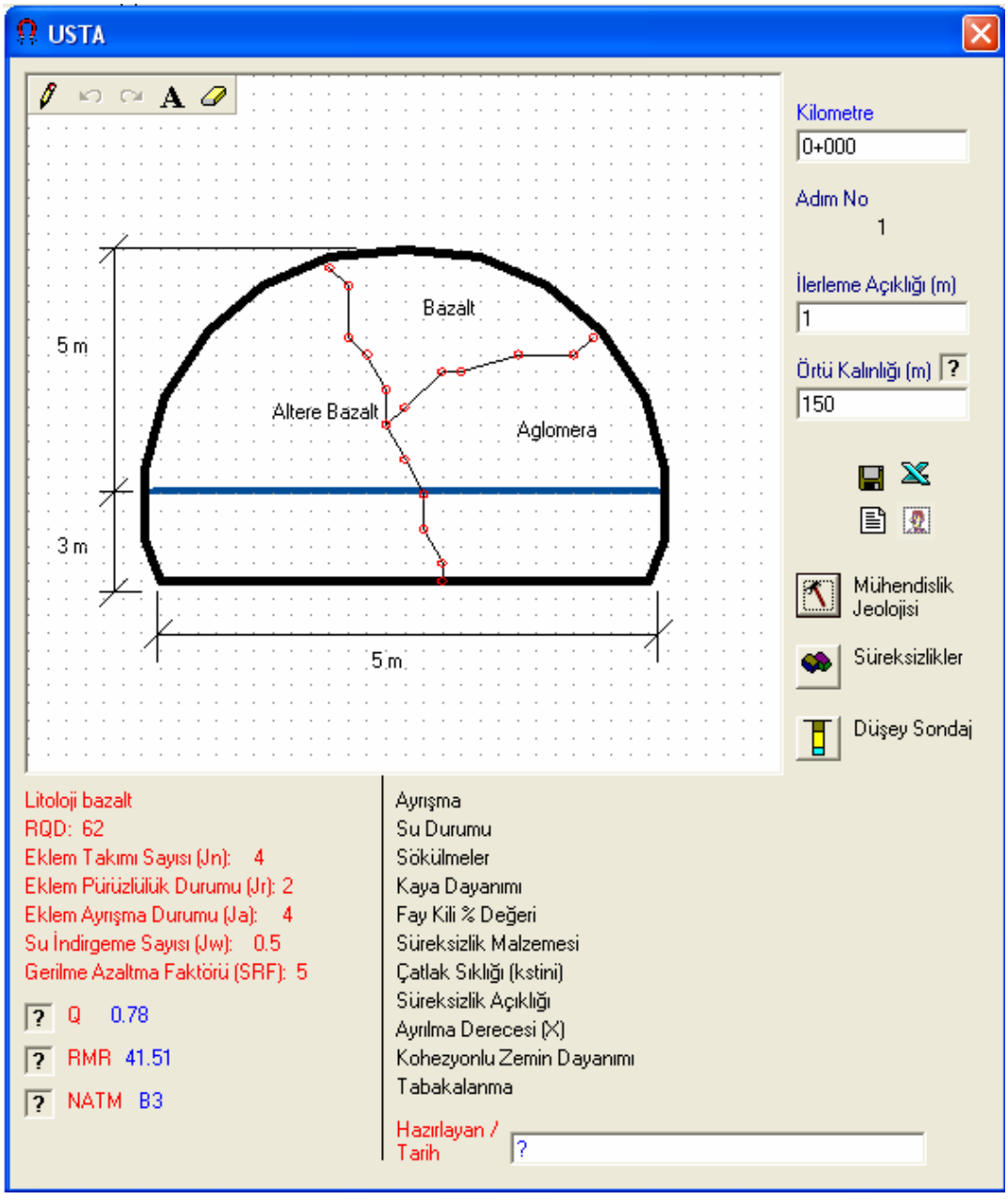
Şekil 5.9: RQD hesaplama ekranı

Jv değeri girilerek "hesapla" tuşuna basıldığında USTA RQD değerini yukarıdaki şekilde de görülen formülü kullanarak hesaplamaktadır. "Ok" tuşuna basıldığında ise program şekil 5.7'deki mühendislik jeolojisi ekranına geri dönecek ve bulduğu RQD değerini ilgili hücreye yazacaktır.

Q değerinin hesaplanması için gerekli olan parametreler mevcut kutucuklar kullanılarak seçilmelidir. Jn, Jr, Jw ve SRF değerleri için bilgiler seçildiğinde USTA bu bilgilere karşılık gelen değerleri belirleyecektir.

Ja, ayrışma durumu için ise Q sınıflamasında yer alan üç ana maddeden birisi seçilmeli ve tamam tuşuna basılmalıdır. Seçilen maddeye göre açılacak olan ek ekrandan ayrışma durumu seçilmelidir.

Pencerenin en altında yer alan disket simgesi seçildiğinde şekil 5.5'de görülen tünel ayna kesiti ekranına geri dönülmektedir. USTA verilen bilgilere göre Q değerini ve RMR değerini hesaplamakta, karşılık gelen NATM değerini belirlemektedir. Eğer tüm veriler eksiksiz girildiyse tünel ayna kesiti ekranının sol alt kısmında yer alan satırlar doldurulmuş ve rengi kırmızıya dönmüş olmaktadır.

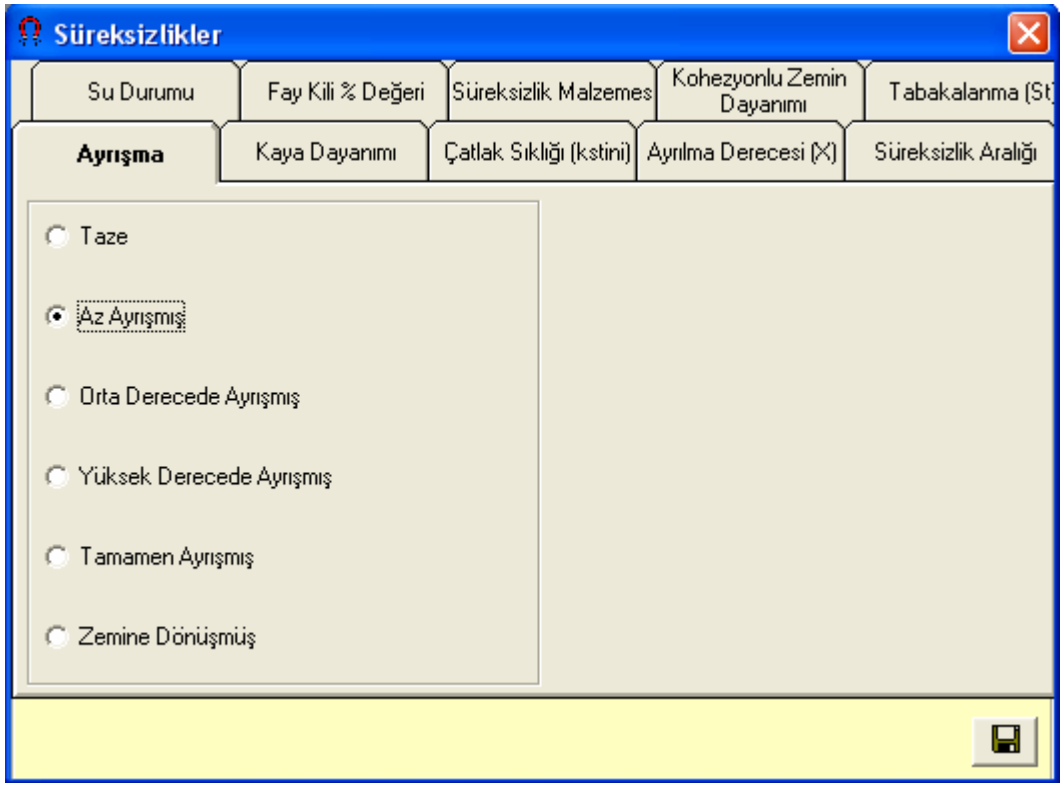


Şekil 5.10: Mühendislik jeolojisi verilerinin kaydedilmesi ile ayna kesiti

Uzman sistemlerin önemli özelliklerinden bir tanesi elde edilen sonuca nasıl ulaşıldığının kullanıcı ile paylaşılmasıdır. Q, RMR ve NATM büyüklüklerinin solunda yer alan soru işareti simgelerine basıldığında USTA ekranda açacağı ek pencereler ile kullanıcıya kullandığı yöntemi göstermektedir. Kullanılan yöntem Bölüm 4.1.2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

5.2.3.3 Süreksizlikler

Mühendislik jeolojisi verilerinin kaydedilmesinin ardından süreksizlik değerlerinin kaydedilmesi gerekmektedir. Süreksizlikler tuşuna () basıldığında aşağıdaki ekran açılmaktadır.



Şekil 5.11: Süreksizlikler ekranı

Süreksizlikler ekranı kendi içerisinde 10 adet kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Ayrışma Durumu: taze, az ayrışmış, orta derecede ayrışmış, yüksek derecede ayrışmış, tamamen ayrışmış ve zemine dönüşmüş.

- Kaya Dayanımı: aşırı zayıf dirençli kaya, çok zayıf dirençli kaya, zayıf dirençli kaya, orta dirençli kaya, dirençli kaya, çok dirençli kaya ve aşırı dirençli kaya.

- Çatlak Sıklığı (kstini): çok sıkı, sıkı, kısmen açık, açık, orta geniş, geniş, çok geniş, son derece geniş, boşluklu.

- Ayrılma Derecesi: çok düşük $0<\chi<0.2$, düşük $0.2<\chi<0.5$, orta $\chi=0.5$, yüksek $0.5<\chi<0.9$ ve tümüyle ayrılmış $\chi=1$.

- Süreksizlik Aralığı (Açıklığı): tümüyle kapalı 0 mm, çok kapalı 0-0.01 mm, kapalı 0.01-0.1 mm, orta 0.1-1 mm, açık 1-5 mm, çok aralanmış 5-10 mm ve son derece aralanmış >10 mm.

- Su Durumu: kuru-nemli, ıslak, damlama, < 1lt/sn, 1-10 lt/sn, 10-20 lt/sn, >100 lt/sn.

- Fay Kili % Değeri (çatlaklar arası); % 0-10, % 10-30, % 30-50, % 50-70, % 70-90, % 90-100.

- Süreksizlik (Dolgu) Malzemesi: kalsit, kil, ayrışmış, oksidasyon.

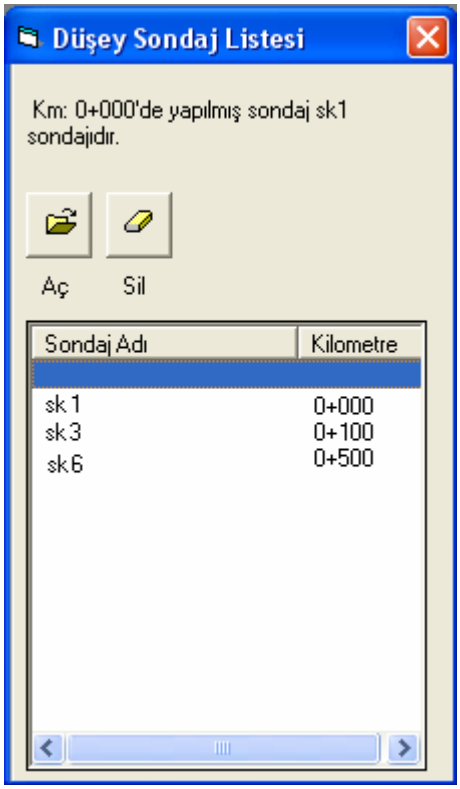
- Kohezyonlu Zemin Dayanımı: sert, çok katı, katı, orta katı, yumuşak, çok yumuşak, kohezif değil (daneli ayrık, kum,…).

- Tabakalanma (St): çok ince $St < 0.1$, ince $0.1 \leq St < 0.5$, orta $0.5 \leq St < 1$, kalın $1 \leq St < 2$, çok kalın ≥ 2 metre.

Tüm süreksizlik özelliklerinin tanımlanmasının ardından ekranın sağ alt tarafında yer alan disket simgesine basılarak verilerin kaydedilmesi sağlanmalıdır. Kayıt işleminin başarı ile tamamlanması halinde tünel ayna kesiti ekranına geri dönülmektedir. Mühendislik jeolojisi verilerinde olduğu gibi, süreksizlik verileri de ayna kesiti ekranındaki ilgili yere işlenmiş ve kırmızı renkte olmaktadır. Eğer eksik süreksizlik verisi varsa, eksik olan verinin rengi siyah olarak kalmaktadır.

5.2.3.4 Sondaj verileri

Tünel ayna kesiti ekranında yer alan "sondaj" simgesine () basıldığında şekil 5.4'de gösterilen proje izleme ekranında daha önce kaydedilmiş sondaj verilerine ulaşılabilmektedir. Açılan düşey sondaj listesinde, proje güzergahında yer alan tüm sondajların isimleri ve kilometreleri yer almaktadır. USTA üzerinde çalışılan tünel ayna kesitinin kilometresinde yer alan mekanik sondajın olup olmadığını da izlemekte ve kullanıcıya vermektedir. Sondaj ekranında yer alan bir sondaj seçilip "aç" tuşuna basıldığında ilgili sondaja ait verilere erişilebilmektedir. "Sil" tuşuna basılması durumunda da veriler veri tabanından kalıcı olarak silinebilmektedir. Şekil 5.12'de sondaj izleme ekranı gösterilmiştir.

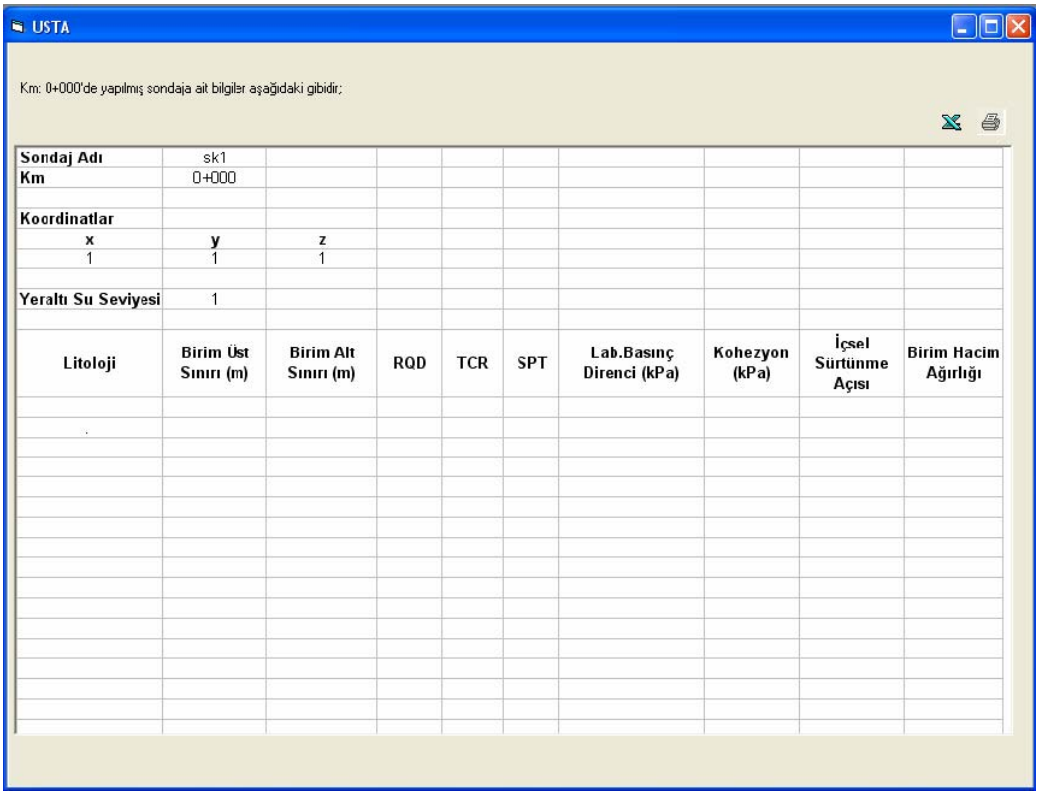


Şekil 5.12: Mekanik sondaj izleme ekranı

Listede yer alan bir sondaja ait bilgiler açıldığında Excel simgesine basılarak sondaj verileri Excel (*.xls) formatında bilgisayara kaydedilebilmekte, "yazıcı" simgesine basılması halinde de tanımlı yazıcıdan çıktı olarak alınabilmektedir. Ekranın sağ ütünde yer alan çarpı simgesine basılarak ekran kapatılabilir. Sayfanın kapatılması halinde tünel ayna kesiti ekranına geri dönülmektedir.

USTA Excel ve Word formatındaki dosya paylaşımlarını Visual Basic'de "OLE" adı verilen nesneler aracılığı ile sağlamaktadır. Verilerin Excel formatında kaydedilebilmesi için bilgisayarda programın önceden kurulu olması gerekmektedir. Aksi halde USTA hata mesajı vermektedir.

Şekil 5.13'de mekanik sondaj veri ekranı gösterilmiştir.



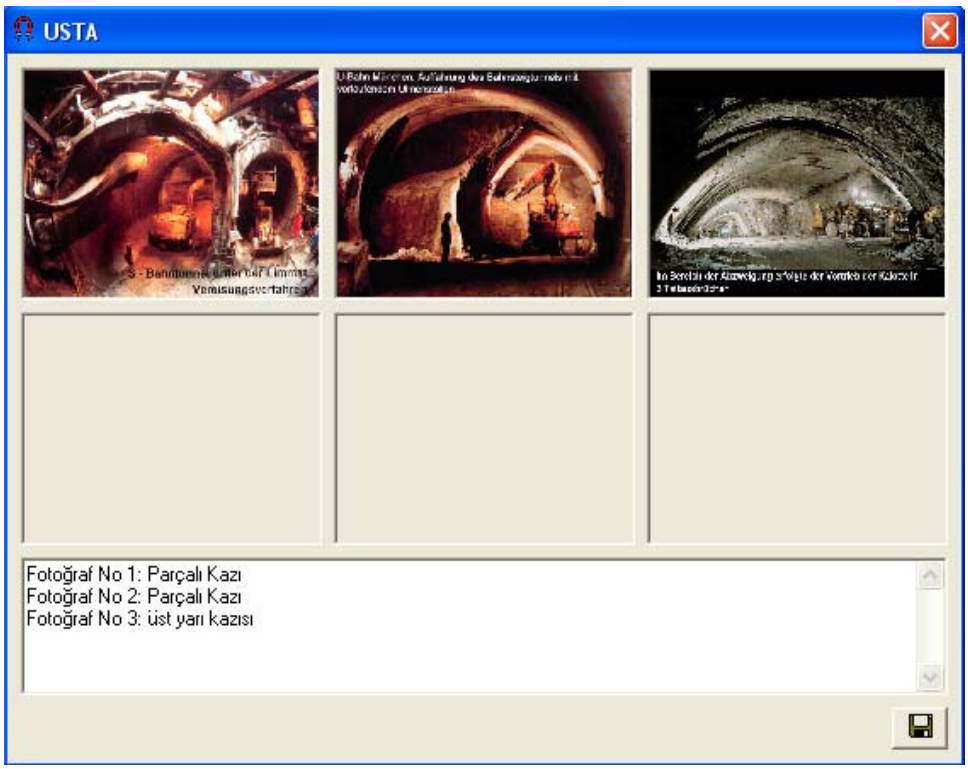
Şekil 5.13: Mekanik sondaj veri ekranı

5.2.3.5 Fotoğraf - açıklama kaydetme ve raporlama

Şekil 5.5'deki "Tünel ayna kesiti ekranı"nda yer alan fotoğraf simgesine ( ) basıldığında veri tabanına her bir ilerleme adımı için 6 adet fotoğraf kaydedilebilmekte ve fotoğraflar için açıklamalar eklenebilmektedir. Fotoğraflar veri tabanına (Access) kaydedilmektedir. Bu yüzden kullanıcının fotoğrafları bilgisayarında saklaması gerekmemektedir.

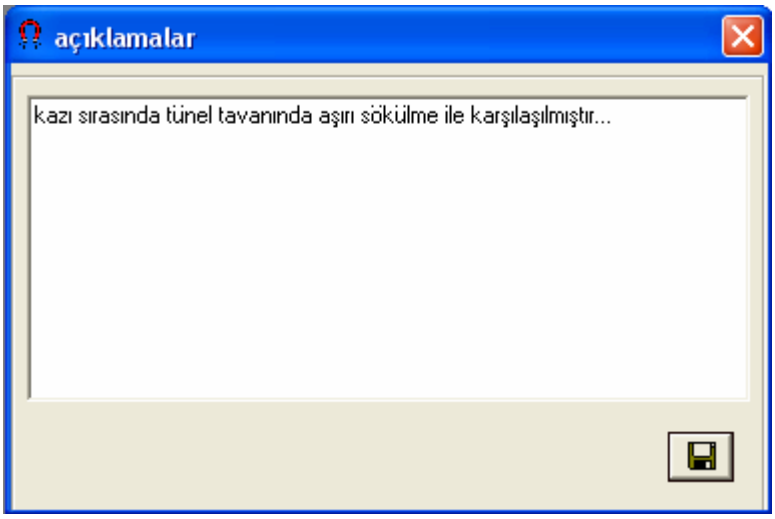
Fotoğraf tuşuna basıldığında, Şekil 5.14'de gösterilen fotoğraf ekleme ekranı açılmaktadır. Şekilde de görülebileceği gibi burada 6 farklı fotoğraf için hazırlanmış alanlar vardır. Bu alanlar üzerine tıklandığında açılacak dosya seçme ekranında

fotoğraf seçilebilmektedir. “Tamam” tuşuna basıldığında fotoğraf seçili alana eklenmiş olmaktadır. Fotoğraf üzerinde farenin “sol tuşu” ile tıklanırsa ikinci bir pencere üzerinde fotoğraf büyütülmüş olarak açılmaktadır. Bu sayede fotoğraftaki ayrıntılar daha rahat incelenebilmektedir. Eğer fotoğraf üzerinde farenin “sağ tuşuna” basılırsa açılan seçenekler aracılığı ile fotoğraf silinebilmekte veya başka bir dosya ile değiştirilebilmektedir. Ekranın altında yer alan “açıklamalar” hücresine ise fotoğraflar ile ilgili açıklayıcı bilgiler eklenebilmektedir.



Şekil 5.14: Fotoğraf ekleme ekranı

Tünel ayna kesiti ekranında yer alan “açıklama” ( ) tuşuna basıldığında ilgili ayna kesiti için kişisel açıklamalar eklenebilmektedir. Şekil 5.15’de bu tuşa basılması halinde açılacak olan açıklama ekranı gösterilmiştir. Açıklama ve fotoğraf kaydetmek USTA için zorunlu olmayıp, kullanıcının isteğine bağlıdır.

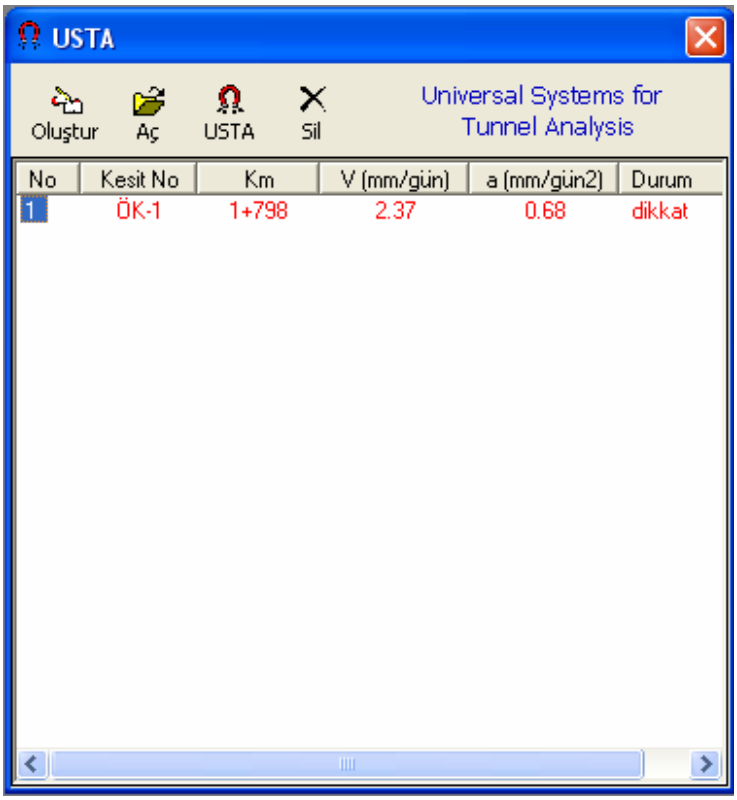


Şekil 5.15: Açıklamalar ekranı

Tünel ayna kesiti ekranındaki Excel ( ) simgesine basıldığında USTA ayna kesiti ile ilgili sağlanan tüm verileri Excel formatında kullanıcının bilgisayarına kaydetmektedir. Disket simgesine basıldığında ise ayna kesiti verileri kaydedilmekte ve proje izleme ekranına (şekil 5.4) geri dönülmektedir.

5.2.4 Konverjans verileri ekranı

Şekil 5.4'de gösterilen "proje izleme ekranı"ndaki konverjans tuşuna basıldığında, şekilde 5.16'da gösterilmiş olan "USTA konverjans ölçümleri izleme ekranı" açılmaktadır.



Şekil 5.16: Konverjans ölçümleri izleme ekranı



Oluştur: Yeni bir ölçüm noktası için ölçüm sonuçları kaydedilir.



Aç: Mevcut ölçüm değerleri veri tabanından yüklenir (yeni ölçüm eklemek için).



USTA: Deplasman sorunu olan bir kesit için sorunun belirlenmesi ve yönlendirme.

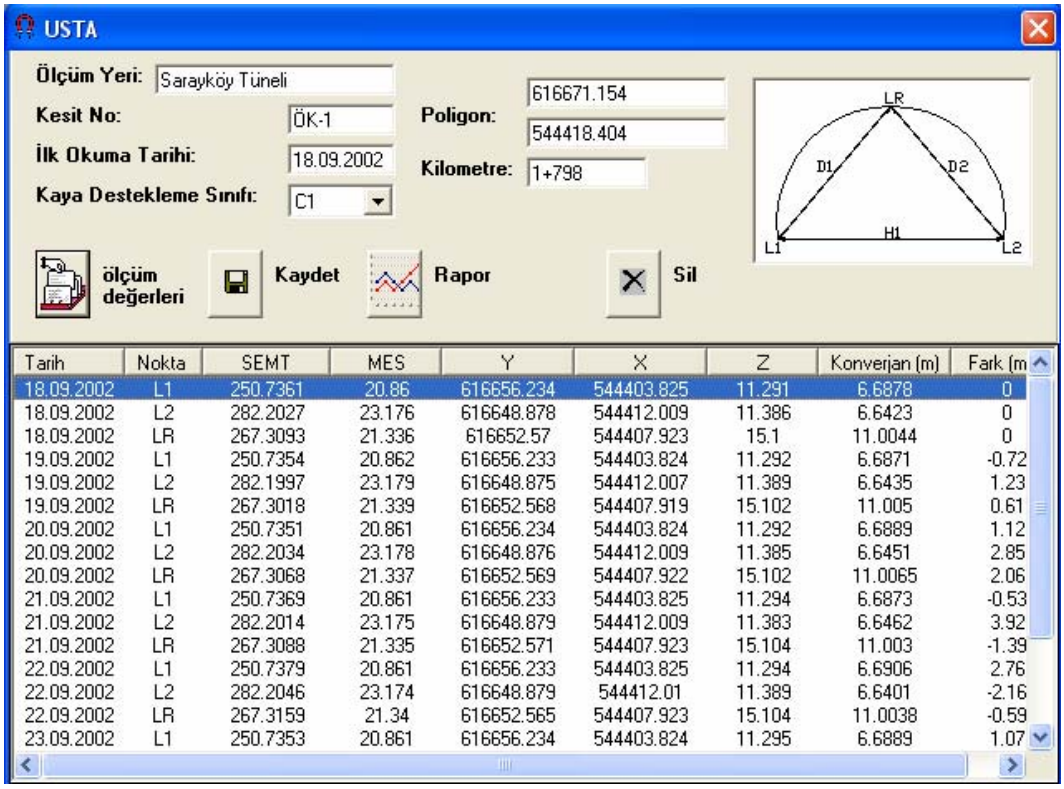


Sil: seçili konverjans ölçümlerini kalıcı olarak veri tabanından siler.

Konverjans ölçüm ekranının altında yer alan pencerede ölçüm yapılan kesitlere ait deplasman hız ve ivmelerinin son durumları izlenebilmektedir. Girilen her yeni ölçüm sonucu için bu veriler USTA tarafından güncellenmektedir.

Eğer deplasmanlar bir önceki ölçümlere göre arttıysa, hesaplanan deplasman hızı artıyorsa veya sabit hızlı hareket ediyorsa (deplasmanlar sönümlenmiyorsa), durum seçeneğinin altında “dikkat” uyarısı belirmektedir. Uyarı satırının rengi bu durumda kırmızıdır. Eğer deplasmanlar girilen yeni değerlere göre azalırsa, bu durumda renk siyah olmakta ve durum “normal” olarak görülmektedir.

Konverjans ölçümleri izleme penceresinde “oluştur” veya “aç” seçeneklerinden birisi seçildiğinde şekil 5.17’deki ekran açılmaktadır;

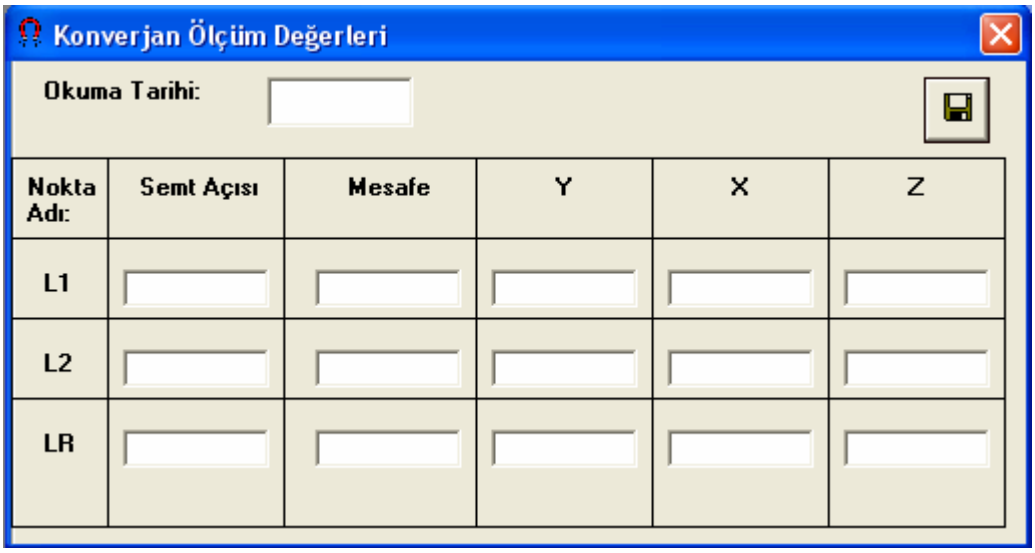


Tarih	Nokta	SEMT	MES	Y	X	Z	Konverjan (m)	Fark (m
18.09.2002	L1	250.7361	20.86	616656.234	544403.825	11.291	6.6878	0
18.09.2002	L2	282.2027	23.176	616648.878	544412.009	11.386	6.6423	0
18.09.2002	LR	267.3093	21.336	616652.57	544407.923	15.1	11.0044	0
19.09.2002	L1	250.7354	20.862	616656.233	544403.824	11.292	6.6871	-0.72
19.09.2002	L2	282.1997	23.179	616648.875	544412.007	11.389	6.6435	1.23
19.09.2002	LR	267.3018	21.339	616652.568	544407.919	15.102	11.005	0.61
20.09.2002	L1	250.7351	20.861	616656.234	544403.824	11.292	6.6889	1.12
20.09.2002	L2	282.2034	23.178	616648.876	544412.009	11.385	6.6451	2.85
20.09.2002	LR	267.3068	21.337	616652.569	544407.922	15.102	11.0065	2.06
21.09.2002	L1	250.7369	20.861	616656.233	544403.825	11.294	6.6873	-0.53
21.09.2002	L2	282.2014	23.175	616648.879	544412.009	11.383	6.6462	3.92
21.09.2002	LR	267.3088	21.335	616652.571	544407.923	15.104	11.003	-1.39
22.09.2002	L1	250.7379	20.861	616656.233	544403.825	11.294	6.6906	2.76
22.09.2002	L2	282.2046	23.174	616648.879	544412.01	11.389	6.6401	-2.16
22.09.2002	LR	267.3159	21.34	616652.565	544407.923	15.104	11.0038	-0.59
23.09.2002	L1	250.7353	20.861	616656.234	544403.824	11.295	6.6889	1.07

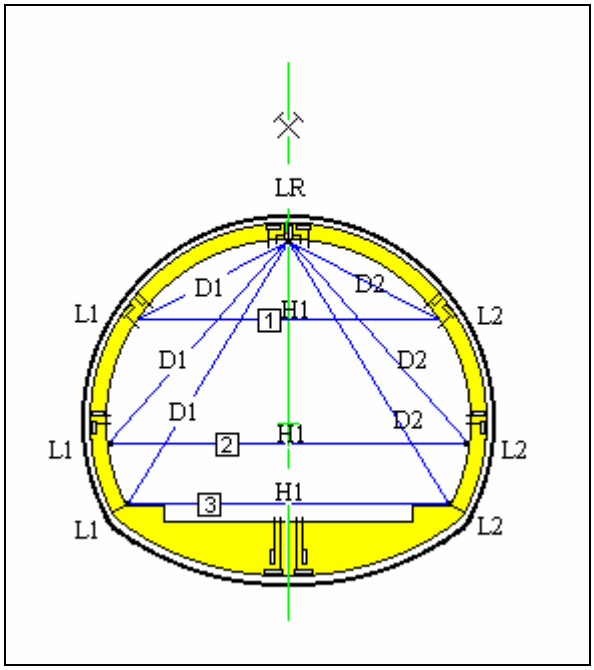
Şekil 5.17: Ölçüm değerleri izleme ekranı

Bir kesite yeni bir ölçüm eklenecek ise, “aç” tuşuna basıldıysa, kesite ait bilgiler (ölçüm yeri, kesit nı vb) veri tabanından yüklenecektir. Ekranın altında yer alan pencerede ise daha önce kaydedilmiş tüm ölçüm değerleri izlenebilmektedir.

Mevcut ölçümlere yeni bir ölçüm eklemek (veya ilk kez bir ölçüm değeri tanımlamak) için ölçüm değerleri () tuşuna basılmalıdır. Aşağıdaki şekilde de gösterilen ekran üzerinde yapılan ölçümlere ait koordinatlar kaydedilebilmektedir.



Şekil 5.18: Ölçüm değerleri kayıt ekranı



Şekil 5.19: Ölçüm noktalarının açıklamaları

Eğer daha önce kaydedilmiş okuma yoksa USTA bunu fark etmektedir. Bu durumda "okuma tarihi" yazısı "ilk okuma tarihi" olarak değişmektedir. Ölçüm değerleri olarak kullanıcıdan istenen veriler şekil 5.19'da gösterilmiştir;

Koordinatların haricinde istenen Semt Açısı, ölçüm noktasının kuzeyle yaptığı açı, mesafe ise ölçüm noktasının, poligon noktası ile olan uzaklığıdır. Bu değerler tünelde ölçümü yapan mühendis tarafından bilinmektedir.

L1, L2 ve LR noktalarının koordinatları yazıldıktan sonra "disket" simgesine basılarak kaydetme işlemi tamamlanmakta ve şekil 5.17'de gösterilen ölçüm değerleri izleme ekranına geri dönülmektedir.

USTA kaydedilen L1, L2 ve LR noktalarını kullanarak bu noktalar arasındaki D1, D2 ve H1 mesafelerini aşağıdaki formülü kullanarak hesaplamaktadır.

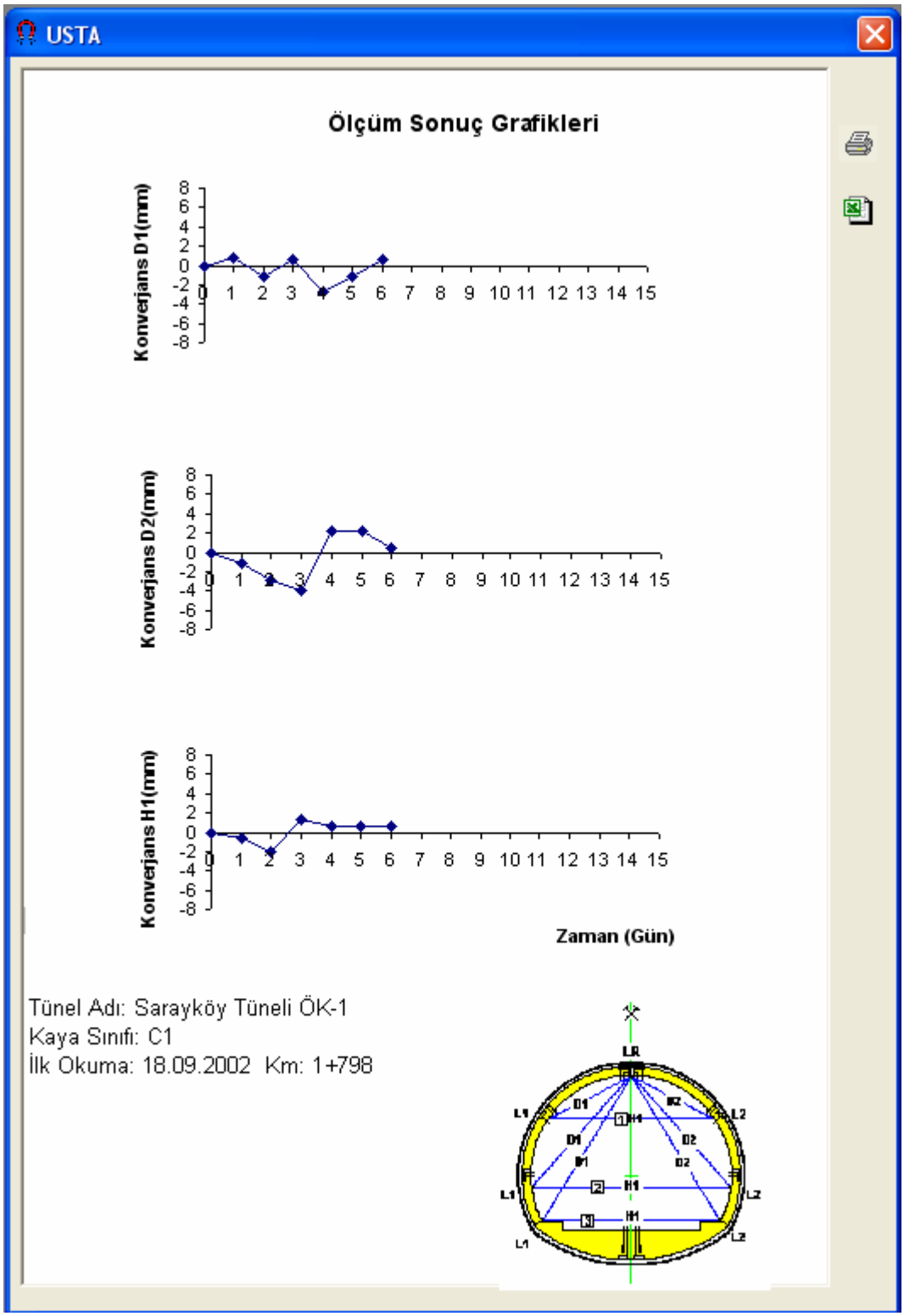
$$Di = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \qquad (5.1)$$

D1 mesafesi için bu doğru arasında kalan L1 ve LR noktalarını; D2 için L2 ve LR noktalarını ve H1 için L1 ve L2 noktaları için hesaplamalar yapılmaktadır. Bu sayede D1, D2 ve H1 doğrularının uzunlukları belirlenmektedir. İki farklı ölçüm günü için bu doğruların uzunluk farkları alınırsa, o noktanın geçen sürede ne kadar yer değiştirdiği hesaplanabilmektedir. Bütün bu hesaplamalar USTA tarafından yapılmakta ve şekil 5.17'deki pencerede "konverjan" ve "fark" sütunları altında izlenebilmektedir.

Şekil 5.16'daki ekranda izlenebilen deplasman hız ve ivmeleri de bu yerdeğiştirme miktarlarına bağlı olarak hesaplanmakta ve güncelleştirilmektedir. Deplasman hızının son durumu için son iki ölçümün yerdeğiştirme miktarlarının farkı ile aradan geçen zaman oranlanmaktadır ($V_{ort} = \Delta x / \Delta t$). Benzer şekilde ivme ise son iki ölçüme ait hızın, aradan geçen zamana oranı olarak alınmaktadır ($a_{ort} = \Delta V / \Delta t$).

USTA D1, D2 ve H1 uzunluklarındaki değişimi kendi aralarında karşılaştırarak, yeraltı açıklığının hangi yöne doğru kapanmaya çalıştığını da hesaplayabilmektedir. Bu sayede gerilmelerin tünelin hangi noktasında yoğunlaştığı bilinmekte ve önlem almak kolaylaşmaktadır. Bu hesaplama sonucu şekil 5.16'da gösterilen "USTA" tuşunun altında açılan ayrı bir ekranda verilmekte olup, ilerideki bölümlerde ele alınmıştır.

Şekil 5.17'deki "ölçüm değerleri izleme ekranı"nda yer alan rapor () tuşuna basıldığında, ölçüm noktaları için deplasman-zaman grafikleri ayrı bir ekran üzerinden izlenebilmektedir. Daha önceki verilerde olduğu gibi, bu grafikler de Excel formatında bilgisayara kaydedilebilmekte veya yazıcıdan çıktı olarak alınabilmektedir. Şekil 5.20'de rapor tuşu ile açılan ekran gösterilmiştir;



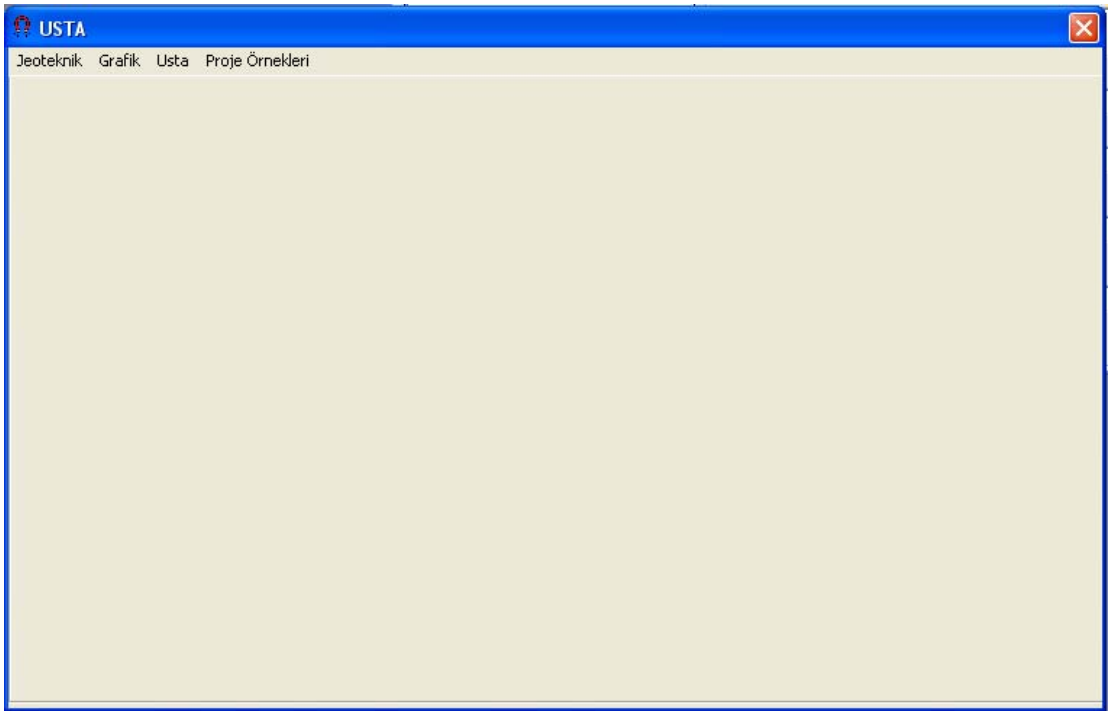
Şekil 5.20: Konverjans ölçümleri rapor penceresi

İlgili rapor çıktı olarak alındığında sayfanın altına imza sütunları (mühendis, kontrol mühendisi-müşavir, idare) "USTA" tarafından eklenmektedir.

5.2.5 Proje yönlendirme çalışmaları (USTA)

Şekil 5.16'da gösterilen konverjans ölçümleri izleme ekranında kullanıcı isterse ölçüm kesiti üzerinde analiz yapabilmekte, yeraltı kaya yapısını yönlendirebilmektedir. Eğer ölçüm sonuçlarına göre dikkat uyarısı varsa ve eklenen yeni ölçümlere göre deplasmanlar azalmıyorsa, USTA () tuşuna basarak ilgili ölçüm kesitinin analizi yapılmalıdır.

Aşağıda bu durumda açılacak olan ekran gösterilmiştir;



Şekil 5.21: USTA proje yönlendirme ekranı

Proje yönlendirme ekranı altında 4 ana pencere yer almaktadır. Bu pencereler altında yer alan alt seçenekler aşağıdaki gibidir;

- Jeoteknik:

  / Jeomekanik

  / Mühendislik Jeolojisi

  / Destekleme & Sağlamlaştırma

- Grafik:

  / Deplasman Hız-İvme-Zaman Grafikleri

  / Yazdır

- Usta:

  / Analiz

  / Çıkış

- Proje Örnekleri:

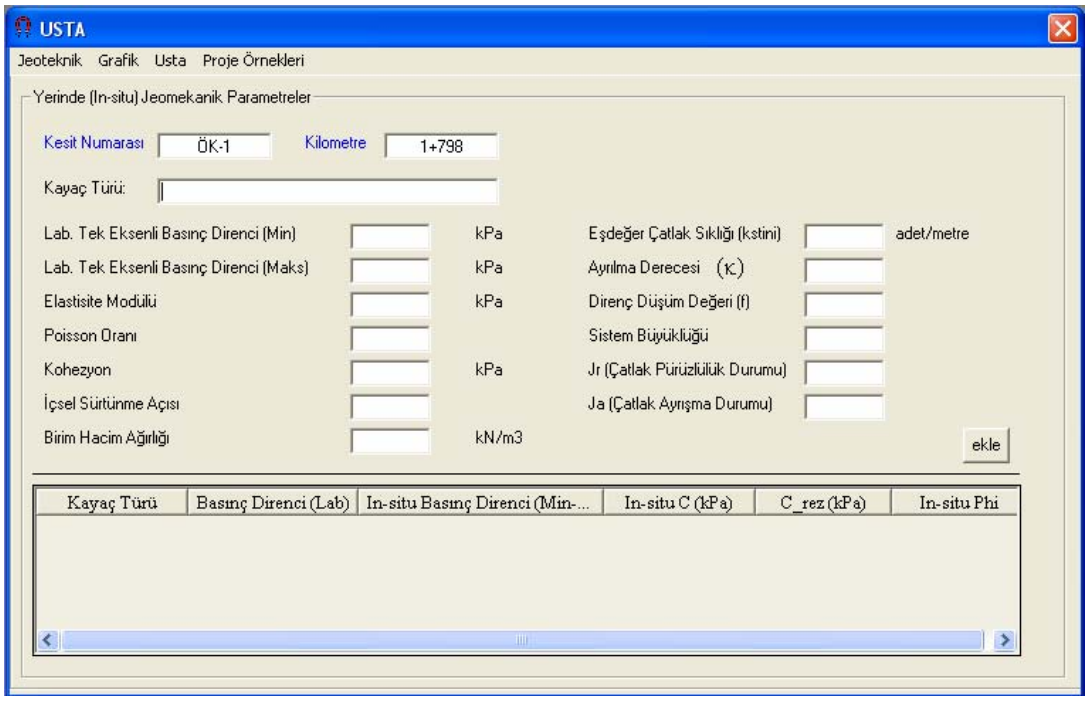
  / Sorgula

  / Proje Oluştur

5.2.5.1 Jeoteknik veriler analiz penceresi

Jeomekanik:

Jeoteknik veriler penceresi altındaki "jeomekanik" seçeneği seçildiğinde "USTA çalışma ekranı" içerisinde ek bir pencere açılacaktır. Bu pencere üzerinde kayaçların yerinde jeomekanik büyüklüklerini hesaplamak mümkün olmaktadır. USTA hesaplamalarında VARDAR tarafından geliştirilen ve Bölüm 4.1.3'de açıklanan yöntemi kullanmaktadır. Şekil 5.22'de jeomekanik analiz penceresi gösterilmiştir;

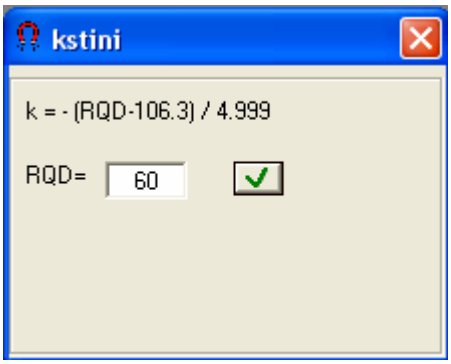


Şekil 5.22: Jeomekanik analiz penceresi

Uygulamalarda kullanılan birçok yazılımda en büyük sorun, yazılım tarafından gerekli görülen verilerin kullanıcıda olmamasıdır. Bu gibi durumlarda literatür verileri kullanılarak çeşitli kabullerin yapılması kaçınılmaz olmaktadır. USTA bu sorunu ortadan kaldırmak için kullanıcıya sürekli olarak öneriler getirebilmektedir.

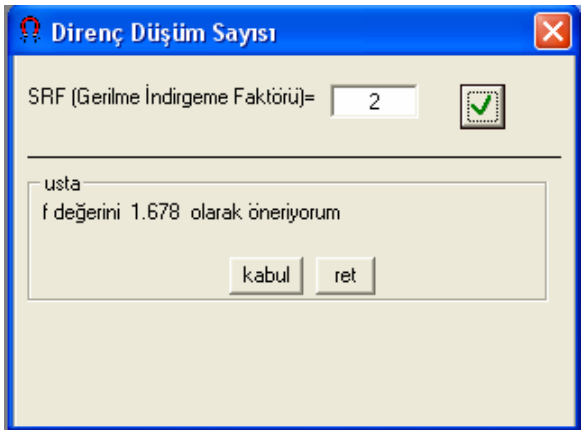
Şekil 5.22'de gösterilen analiz penceresinde yer alan eşdeğer çatlak sıklığı, direnç düşüm değeri, sistem büyüklüğü, çatlak pürüzlülük durumu ve çatlak ayrılma derecesi ile ilgili verilerde USTA öneriler getirebilmektedir. Bunun için öneri istenen veri ile ilgili kelimenin üzerine fare ile tıklanmalıdır.

"Eşdeğer çatlak sıklığı" cümlesinin üzerine tıklandığında aşağıdaki pencere açılacaktır. USTA, RQD büyüklüğüne göre "kstini"değerini hesaplamaktadır.



Şekil 5.23: Eşdeğer çatlak sıklığı yardım penceresi

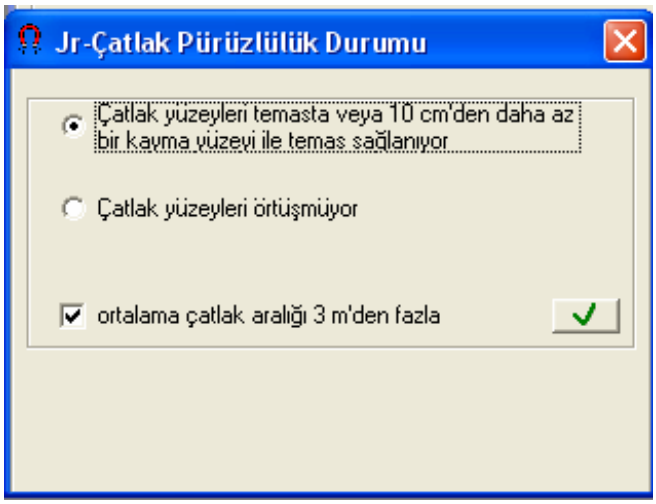
"Direnç düşüm değeri" cümlesinin üzerine tıklandığında USTA, SRF_Q değerine göre direnç düşüm değerini (f) önermektedir. Eğer ret edilirse f değerinin kayaç cinsine göre ilişkisini gösteren pencere açılmaktadır (Tablo 4.4'e göre).



Şekil 5.24: Direnç düşüm değeri yardım penceresi

"Sistem büyüklüğü" cümlesinin üzerine fare ile tıklandığında USTA açıklama penceresi açarak sistem büyüklüğünün, yeraltı açıklığının 8 katı olarak alınabileceğini belirtmektedir.

"Çatlak pürüzlülük durumu" veya "çatlak ayrışma durumu" cümlelerinin üzerine tıklandığında ise USTA, Q_{Barton} değerlendirmesinde yer alan verileri kullanıcıya sunmaktadır.



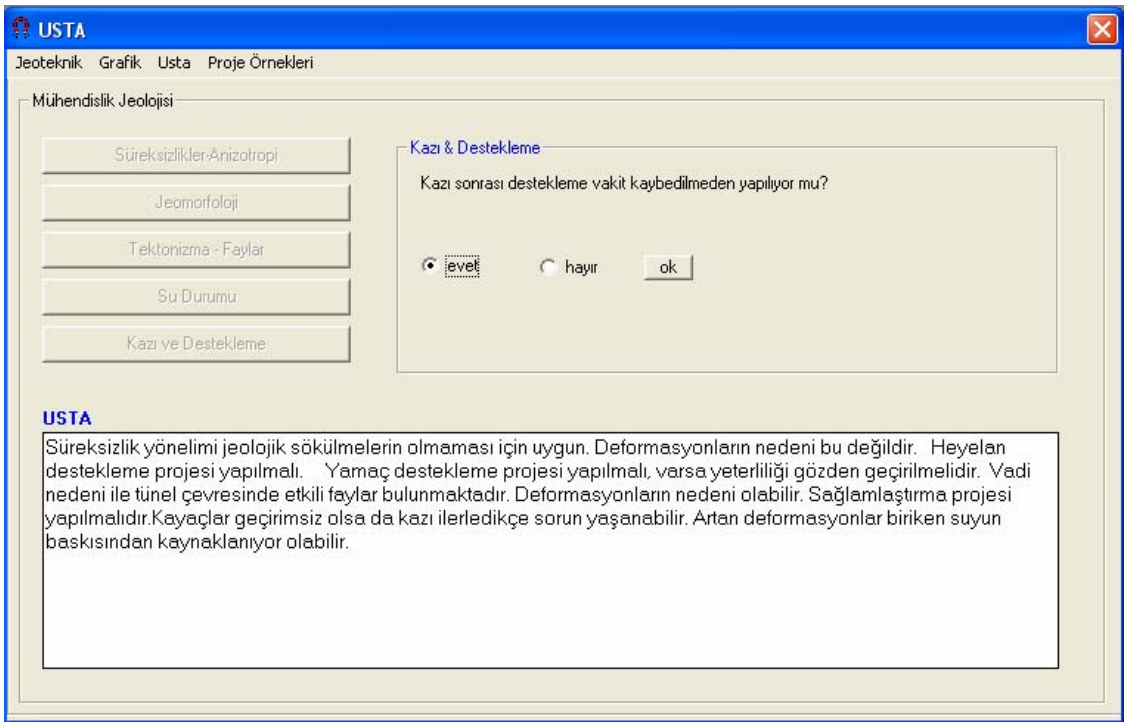
Şekil 5.25: Jr Değeri için yardım penceresi

Gerekli olan diğer verilerin (basınç dayanımı vs) kullanıcı tarafından girilmesi ve "ekle" tuşuna basılmasının ardından USTA yerinde kaya dayanım büyüklüklerini hesaplamaktadır. Bu veriler, ek destekleme veya sağlamlaştırma projesinin yapılmasına ihtiyaç duyulması halinde, hesaplamalarda kullanılabilir.

USTA hesapladığı değerleri şekil 5.22'de gösterilen pencereye alt alta yazmaktadır. Bir analiz kesiti için 10 farklı jeolojik birime ait yerinde jeomekanik büyüklükler hesaplanabilmektedir.

Mühendislik Jeolojisi:

USTA oluşan deplasmanların olası nedenlerini belirlemek için kullanıcıya çeşitli sorular yöneltmektedir. Kullanıcının sorulara verdiği "evet" veya "hayır" cevaplarına göre ise konuyu derinleştirmekte veya değiştirmektedir. Bu şekilde deplasmanların mühendislik jeolojisi açısından olası nedenleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 5.26'da "mühendislik jeolojisi çalışma ekranı" ve USTA'nın kullanıcıya sorabileceği sorular gösterilmiştir. USTA verilen cevaba göre yorumunu ekranın altındaki pencereye yazmaktadır.



Şekil 5.26: Mühendislik jeolojisi analiz penceresi

USTA'nın konulara göre sorduğu sorular ve karşılığında yaptığı yorumlar aşağıdaki gibidir;

Süreksizlikler ve Anizotropi:

Soru: Kazısı yapılan ortam çok kırıklı, çatlaklı mı ? Cevap evet ise

Soru: Kırık ve Çatlakların yönelimleri, tabakalanma durumu tünel içine doğru mu ? Cevap evet ise

Öneri: ön süren kullanılmalı, ilerleme adımları kısaltılmalı

Jeomorfoloji:

Soru: Tünel üzerinde heyelanlı saha var mı? Cevap evet ise

Soru: Heyelan etki alanı tüneli kapsıyor mu? Cevap evet ise

Soru: Heyelan ıslahı için proje yapılmış mı?

Cevap hayır ise öneri: heyelan ıslah projesi yapılmalı

Cevap evet ise;

Soru: ıslah projesi yeterli mi, güvenlik sağlanıyor mu? Cevap hayır ise

Öneri: proje gözden geçirilmeli, stabilite sağlanmalı

Soru: Tünel yamaç tüneli mi? Cevap evet ise

Soru: yamaç ile tünel arasında yeterli et kalınlığı var mı? Cevap hayır ise

Soru: yamaçta destekleme – sağlamlaştırma yapılmış mı? Cevap hayır ise;

Öneri: yamaç sağlamlaştırması yapılmalıdır.

Tektonizma ve Faylar:

Soru: tünel bir vadi altından mı geçiyor? Cevap evet ise

Soru: projelendirme sırasında bu durum dikkate alınmış mı? Cevap hayır ise;

Öneri: deformasyonların nedeni vadi altındaki olası faylardır. Sağlamlaştırma projesi yapılmalıdır

Soru: tünel çevresinde etkili tektonizma var mı? Cevap evet ise

Öneri: tünel ilerleme adımları kısaltılmalı, fay etkisi altındaki duvarlar/tavan bulonlarla desteklenmelidir

Su Durumu:

Soru: ortam suya doygun mu? Cevap evet ise

Soru: kayaçlar yeraltı suyunun rahat dolaşımına izin veriyor mu? Cevap evet ise

Soru: drenaj yeterli mi? Cevap hayır ise

Öneri: drenaj sistemi iyileştirilmeli

Soru: tünel içerisine önemli oranda su sızıntısı oluyor mu? Cevap evet ise

Öneri: membran kullanılmıyorsa uygulanmalı, drenaj sistemi geliştirilmeli

Soru: şişme özelliği gösteren kayaçlar var mı? Cevap evet ise

Öneri: deformasyonlar bu kayaçlar yüzünden olabilir, drenaj sistemi geliştirilmelidir

Soru: kayaçta belirgin ayrışma var mı? Cevap evet ise

Öneri: ayrışmalar nedeni ile meydana gelen sökülme ve gevşemeler tünel üzerinde gerilmeleri yoğunlaştırmaktadır. Deformasyonların olduğu kesim için ek bulon uygulaması yapılmalıdır.

Kazı ve Destekleme

Soru: kazı sonrası destekleme vakit kaybedilmeden yapılıyor mu? Cevap hayır ise

Öneri: deformasyonlar kayaçların gevşemesinden ve dokusal hareketliliğinden meydana geliyor. Destekleme vakit kaybedilmeden yapılmalıdır.

Soru: kazı sonrası aşırı jeolojik sökülmeler oluyor mu? Cevap evet ise

Soru: kazı parçalı mı yapılıyor? Cevap evet ise

Öneri: kontrollü patlatma yapılmalı

Soru: tünel derinliği yeterli kemerlenme için yeterli mi? Cevap hayır ise

Öneri: kullanılan destekleme elemanları yetersiz, tünel gerilmeleri karşılayamıyor

Soru: taban kabarması var mı? Cevap evet ise

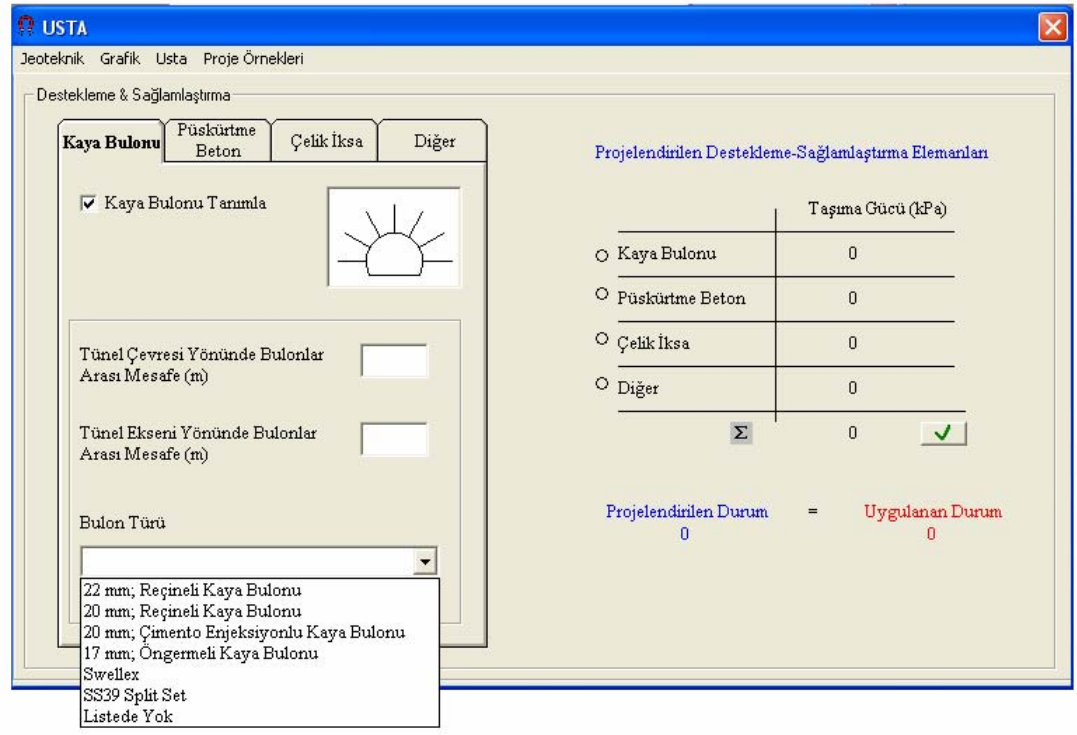
Öneri: eğer su geliri var ise, taban kabarması su ile kayaçların şişmesinden kaynaklanıyor, sağlamlaştırma projesi yapılmalı

Öneri: eğer fay var ise; tabanda ezilme zonu olabilir, sağlamlaştırma yapılmalıdır.

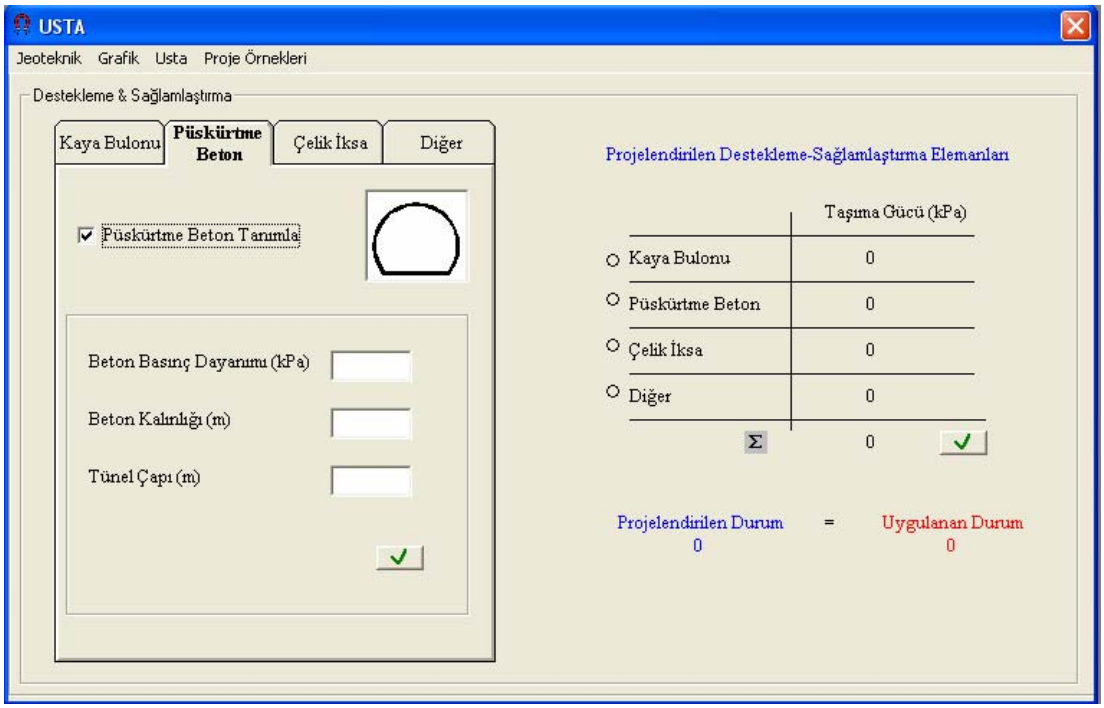
Destekleme ve sağlamlaştırma:

"Jeoteknik" penceresinin içerisinde yer alan "destekleme ve sağlamlaştırma" seçeneğinde, USTA projelendirilen ve uygulamada kullanılan destek sistemlerini karşılaştırmaktadır. Projelendirilen kaya bulonlarının, çelik iksanın, püskürtme betonun ve kullanılan diğer destekleme elemanlarının taşıma güçleri belirlenmekte,

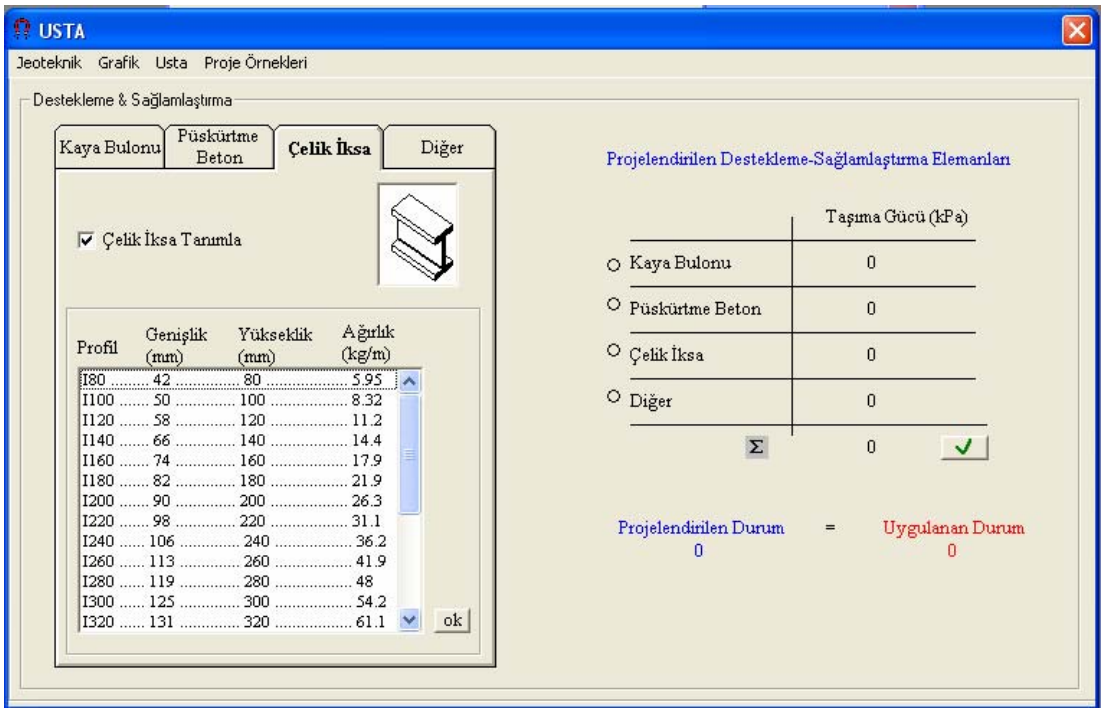
bunlar uygulamada kullanılanların taşıma güçleri ile karşılaştırılmaktadır. Eğer uygulamada kullanılan destekleme veya sağlamlaştırma elemanlarının taşıma gücü, projelendirilen durumdan daha az ise yazılım uyarı vermektedir. Bu durumda deplasmanların nedeninin kullanılan desteklemenin yetersizliğinden kaynaklandığı söylenebilir. Sorunun giderilmesi için ise ek önlemlerin alınması kaçınılmaz olacaktır. Aşağıdaki şekillerde destekleme-sağlamlaştırma seçeneğine ait yazılım pencereleri gösterilmiştir;



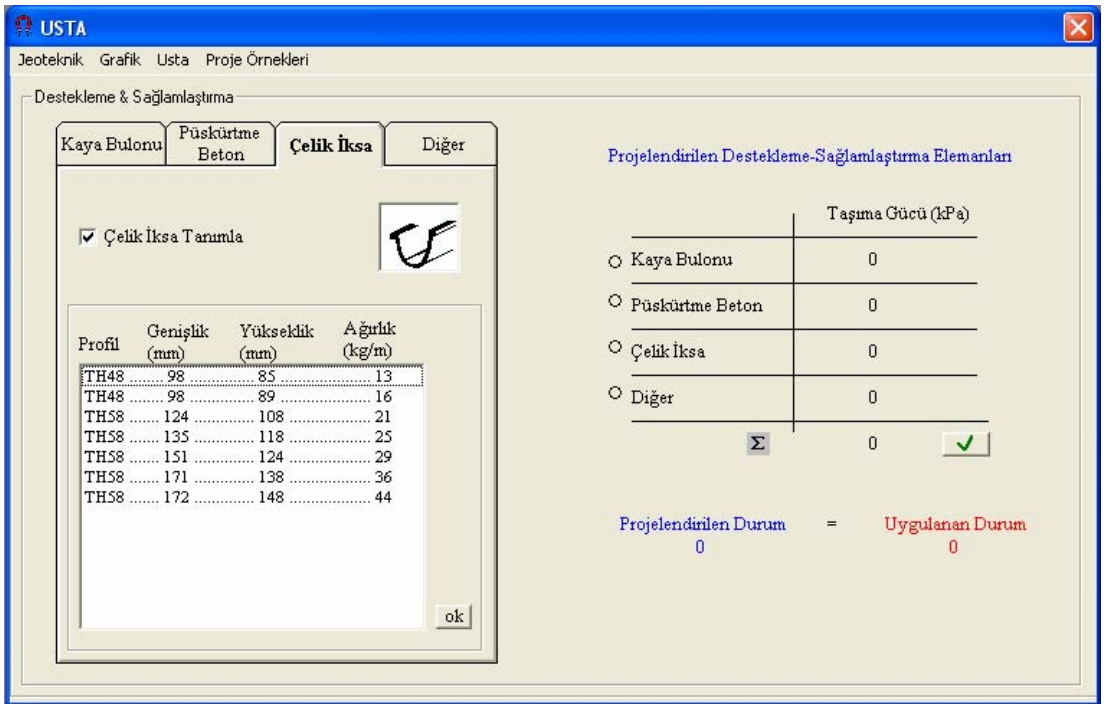
Şekil 5.27: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından kaya bulonu



Şekil 5.28: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından püskürtme beton



Şekil 5.29: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından çelik iksa I profil

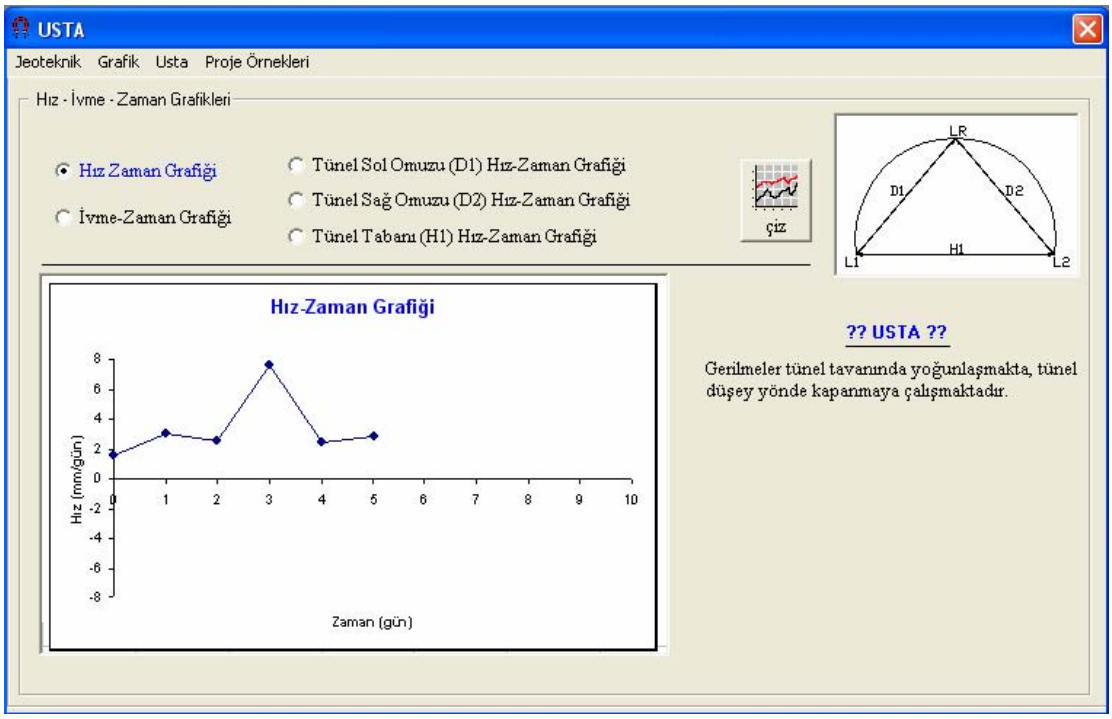


Şekil 5.30: Destekleme sağlamlaştırma elemanlarından çelik iksa TH tipi

5.2.5.2 Jeoteknik ölçüm verileri (grafik) analiz penceresi

Deplasman hız-ivme-zaman grafikleri:

USTA çalışma ekranında grafik penceresine tıklandığında, deplasman hız-ivme ve zaman grafikleri seçeneği görülmektedir. Bu pencere ile çalışılan kesite ait deplasmanların fonksiyonları elde edilebilmektedir. Şekil 5.31'de grafikler penceresi gösterilmiştir.



Şekil 5.31: Grafik penceresi

Şekil 5.16'da gösterilen "konverjans ölçümlerini izleme ekranı"nda yazılı olan deplasman hız ve ivmeleri, bu pencerede grafiksel olarak D1, D2 ve H1 noktaları için çizilmektedir. Eğer ekranın sağında yer alan "??USTA??" yazısının üzerine tıklanırsa, USTA, D1, D2 ve H1 noktalarındaki uzama veya kısalma oranlarına göre (bileşke vektör) deplasmanların hangi yönde olduğu belirlemektedir.

Grafik penceresinin altında yer alan "yazdır" seçeneği seçildiğinde ise seçili grafiğin yazıcıdan çıktısı alınabilmektedir.

5.2.5.3 USTA analiz penceresi

USTA penceresinin altında "analiz" ve "çıkış" olmak üzere iki ayrı seçenek yer almaktadır. Analiz seçeneğine basıldığında USTA belirlediği tüm verileri bir rapor haline getirmekte ve Excel formatında kaydederek kullanıcıya vermektedir. Raporda yer alan bilgiler aşağıdaki gibidir;

- Proje Adı.
- Kilometre ve Kesit Numarası.
- NATM destekleme sınıfı.

- Son okumaya göre deformasyın hız ve ivmesi.
- Yerinde jeomekanik büyüklükler.
- Kullanılan ve uygulanan destekleme elemanları ve taşıma güçleri ile karşılaştırmaları.
- Deformasyonların mühendislik jeolojisi açısından olası nedenleri ve çözüm önerisi.

Örnek olarak, sağlanan tüm veriler sonrasında USTA'nın deformasyon problemine getirdiği yorum ve çözüm önerisi raporda aşağıdaki gibi olmaktadır;

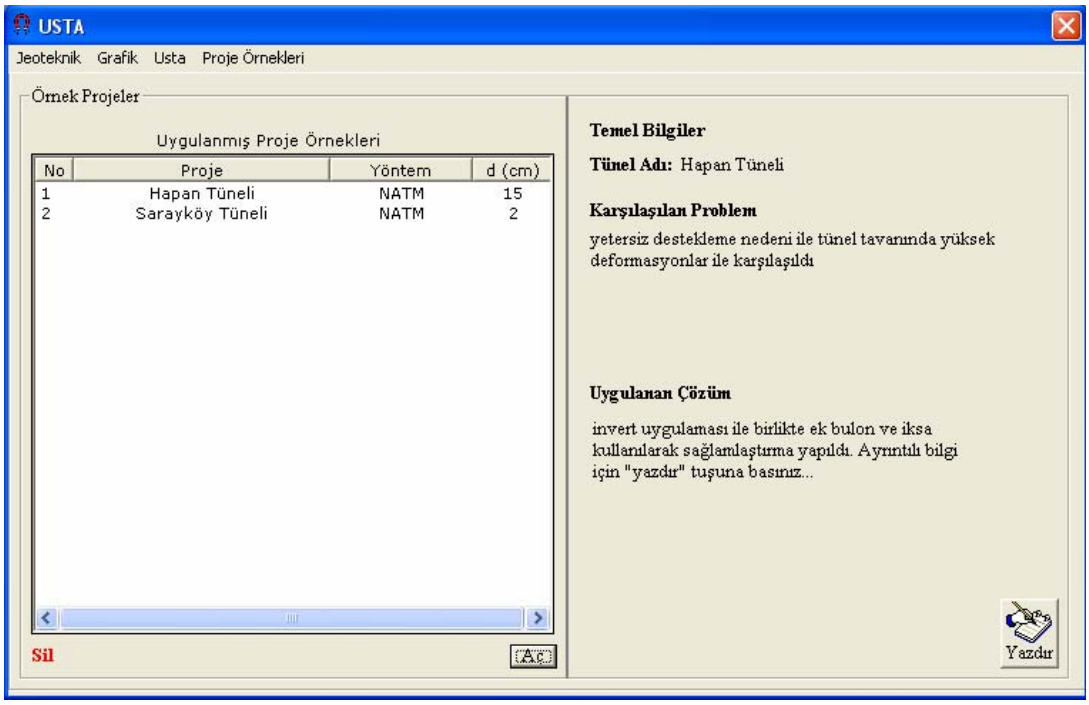
"Ortam çok kırıklı, çatlaklı olmadığı için jeolojik sökülmeler olmayacaktır. Kütle hareketleri tüneli etkilememekte. Tektonizma veya faylar tünel stabilitesini etkilememektedir. Yeraltı suyu tünel üzerinde etkili değil. Destekleme kazı sonrası vakit geçirilmeden yapılmalıdır. Deformasyonlar kayaçların gevşemelerinden kaynaklanıyor. Kazı ilerleme adımları kısaltılmalı ve kontrollü patlatma yapılmalıdır. Destekleme sistemi güçlendirilmelidir."

USTA penceresi altındaki "Çıkış" seçeneğine basıldığında ise konverjans ölçümlerini izleme sayfasına geri dönülmektedir.

5.2.5.4 Proje örnekleri (USTA kütüphane) penceresi

Proje örnekleri sorgulaması:

Uzman sistemlerin en önemli özelliklerinden birisi, yazılımların sürekli olarak öğrenmeye açık olmalarıdır. USTA bu bakımdan farklı proje örneklerinin yer aldığı bir kütüphaneye sahiptir. Kullanıcı kendisi yeni projeler ekleyebilmekte ve yazılımın kapasitesini arttırabilmektedir. Eğer programın kapasitesi daha ileriye götürülebilirse ve kullanımı tünel mühendisliği uygulamalarında yaygınlaşırsa, gelecekte yazılıma eklenebilecek ek kodlar ile Internet üzerinden bilgi alış-verişi sağlanabilir. Örnek projeler internet üzerindeki bir siteye dünyadaki kullanıcılar tarafından kaydedilirse, yazılımın kendisini sürekli olarak bu site aracılığı ile güncellemesi sağlanabilir. Şekil 5.32'de proje örnekleri/sorgula seçeneği altındaki çalışma ekranı gösterilmiştir;



Şekil 5.32: USTA proje örnekleri sayfası

Ekranın sol tarafında yer alan pencerede, yazılım kütüphanesinde kayıtlı olan proje örnekleri gösterilmiştir. İstenen proje seçilip "aç" tuşuna basıldığında, ekranın sağında projeye ait özet-temel bilgiler yazılmaktadır. Burada projenin adı, karşılaşılan problem ve uygulanan çözüm görülebilmektedir. Eğer kullanıcı bu proje hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak isterse "yazdır" tuşuna basmalıdır. USTA, Word formatında bilgileri rapor olarak kullanıcının bilgisayarına kaydedecektir.

Rapor kapsamında yer alan bilgiler aşağıdaki gibidir;

- Proje Bilgileri;

  Tünel adı, proje yeri, yapım yılı, tünel tipi, uzunluğu ve tünel boyutları

- Jeolojik Özellikler;

  Üst yarı kazısında karşılaşılan birimler, alt yarı kazısında karşılaşılan birimler ve diğer jeolojik özellikler

- Mühendislik Jeolojisi bilgileri;

Süreksizlikler, RQD, RMR ve Q kaya kalite değerleri ile diğer MJKM özellikleri

- Jeoteknik Özellikler;

  NATM sınıfı, kullanılan destekleme elemanlarının tür ve miktarları ile projede karşılaşılan mühendislik jeolojisi özellikleri

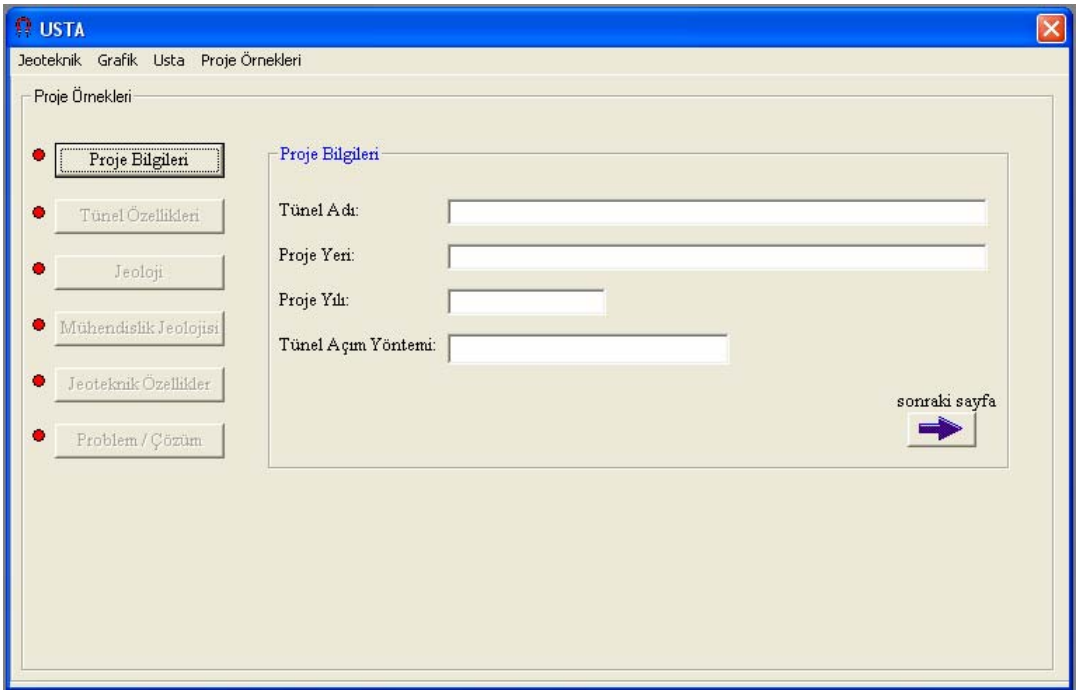
- İmalat sırasında karşılaşılan problemler, nedenleri ve getirilen çözümler

Pencerenin altında yer alan "sil" tuşuna basıldığında ise proje veri tabanından kalıcı olarak silinebilmektedir.

Proje oluştur:

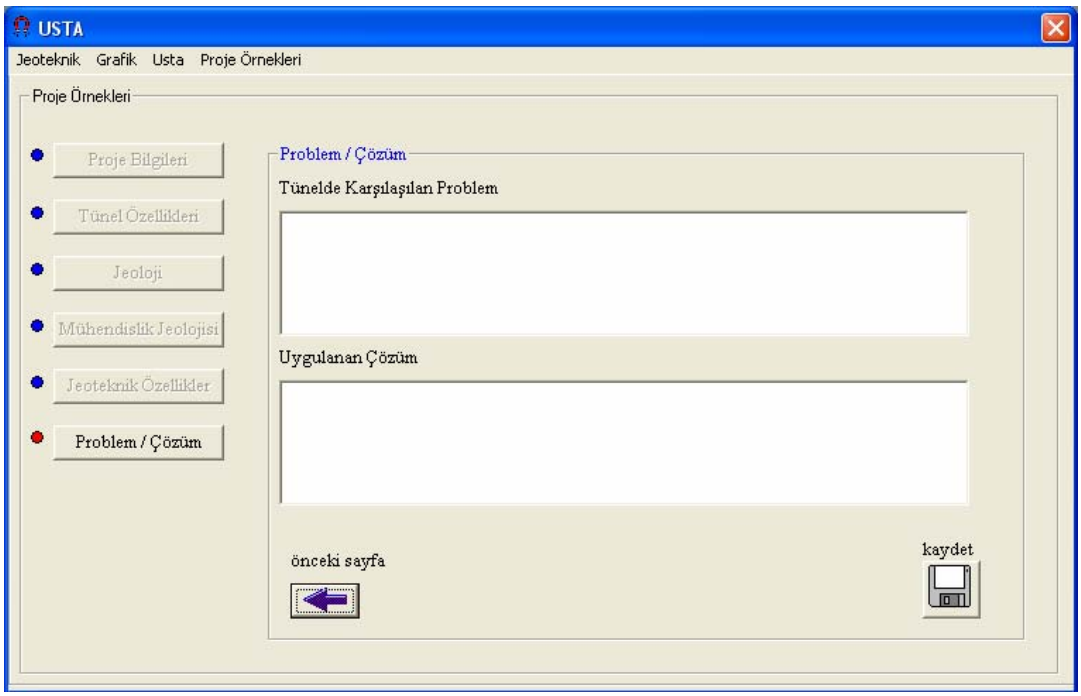
Proje oluştur penceresi ile kullanıcı yeni bir projeyi kütüphaneye ekleyebilir. Eklenecek olan proje, o an uygulanmakta olan proje olmak zorunda değildir. Yeni bir proje kaydedilmek istendiğinde USTA kullanıcıdan proje bilgilerini sırasıyla almaktadır. Verilerin eksiksiz girilmesi ile bir sonraki aşamaya geçilebilmektedir. Bununla kütüphanenin veri açısından eksiksiz olması amaçlanmıştır.

Şekil 5.33'de proje oluştur seçeneği ile karşılaşılan ekran gösterilmiştir;



Şekil 5.33: Kütüphaneye yeni proje ekleme

İlgili konuda gerekli bilgiler girildiğinde "sonraki sayfa" tuşuna basılmalıdır. Eğer veriler eksiksiz ise ekranın solunda yer alan konu başlığı aktif hale gelmektedir. Tamamlanan bölüme ait kırmızı nokta ise mavi renge dönüşmektedir. Son aşamaya gelindiğinde "kaydet" tuşuna basıldığında, USTA verilerin veri tabanına başarı ile kaydedildiğini bildiren mesaj vermektedir.



Şekil 5.34: Kütüphaneye projenin kaydedilmesi

6. ÖRNEK PROJELERDE UZMAN SİSTEMİN UYGULANMASI

6.1 Nefise Akçelik (Hapan) Tüneli

Karadeniz sahil yolu projesi kapsamında inşa edilen ve Bolaman-Perşembe arasında yer alan 5 tünelden birisi olan Nefise Akçelik tüneli gidiş ve geliş yönleri için ayrılmış çift şeritli tüpleri olan ve 3776 metre uzunluğuyla da halen ülkemizin projelendirilmiş en uzun karayolu tünelidir. Tünelin tasarım derinliği giriş ve çıkış portallerinde 33 metre olup, güzergah boyunca 75 ile 375 metre arasında değişiklik göstermektedir.

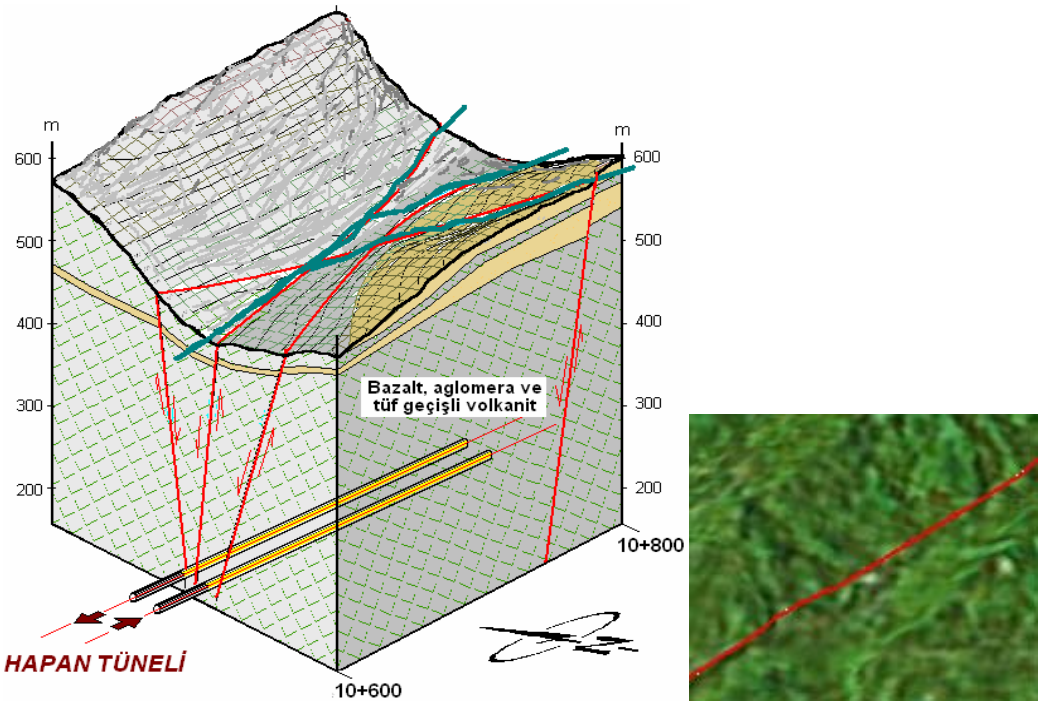
Tünelin sol tüpünde Km 10+683.00 – Km 10+800.60 arası, sağ tüpünde ise Km 10+693.10 – Km 10+742.10 arası sorunlu kesim olarak nitelendirilmiştir. Bu kesimde derinlik 375 metre olup, proje kriterlerine göre NATM A2, B1, B2 ve B3 sınıflarında yer almaktadır. Şekil 6.1'de proje yerbulduru haritası ve hava fotoğrafı gösterilmiştir [21, 22];



Şekil 6.1: Nefise Akçelik tüneli yerbulduru haritası



Şekil 6.2: Nefise Akçelik tüneli hava fotoğrafı (google earth)



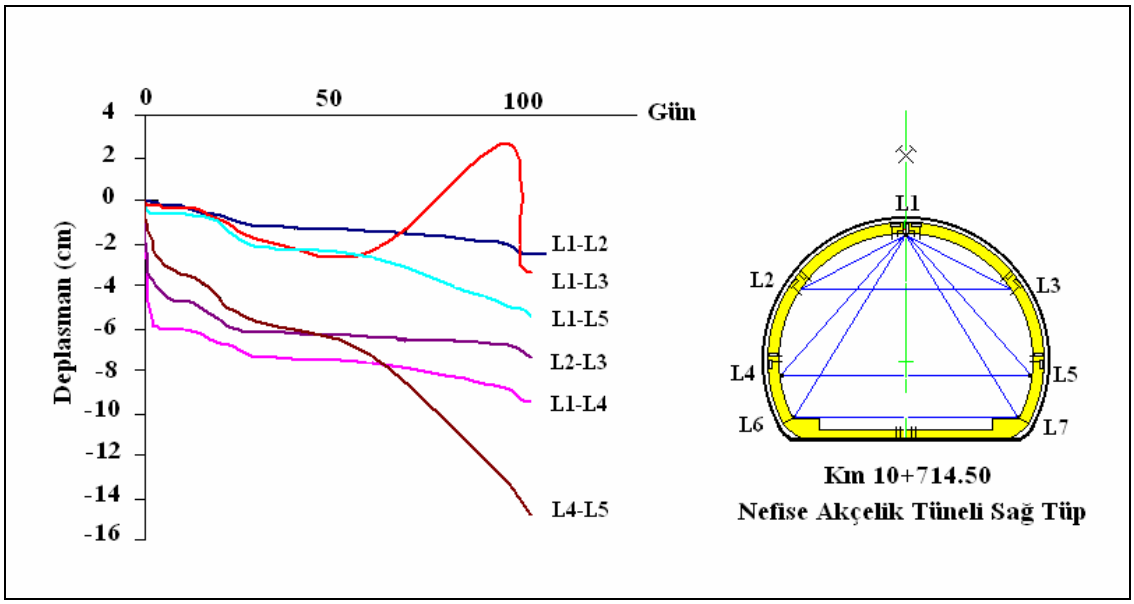
Şekil 6.3: Vadi altında yer alan sorunlu kesim (Vardar)

Tünelde uygulanan destekleme elemanları kısa bulonlar (4-6 metre), hafif çelik hasır (Q 180 / 180) ve püskürtme betondur. Tünelde çelik iksa genelde kullanılmamış veya çok hafif tutulmuştur (B3 için I120). 40 cm kalınlığındaki iç kaplama ise donatısızdır. Bunlar narin, genelde donatısız betondan, soğuk derzli, mütemadi temeller üzerine oturtulmuştur. Yapılan projeye göre; temeller iç kaplama haricinde hiçbir düşey veya yanal yük almamaktadır [22].

Tünel güzergahının bulunduğu bölge, tektonizma ve erozyonun şekillendirdiği bir morfolojiye sahiptir. Tünel güzergahı boyunca morfoloji, dik topoğrafyalı ve yer yer vadilerle bölünmüş şekildedir. Genç tektonizmanın yükselttiği bu bölgede akarsular vadi tabanlarını aşındırmaya devam etmekte, çatlak, kırık ve faylardan sızan sular derin ve etkin ayrışmalara neden olmaktadır. Yüzeysuları işte bu, daha az dayanımlı olan yerleri izlemektedir. Dolayısıyla yüzeydeki doğal drenaj ağı genelde yerin iç yapısı ve zayıflık zonları hakkında da önemli ipuçları verebilmektedir.

Sorunlu olan kesimde tünel Şekil 6.3'de gösterilen vadi altından geçmektedir. Bu vadiyi geliştiren doğu-batı doğrultulu düşey fay ve kırık sistemleri tünelin açıldığı kotlara kadar ulaşmaktadır. Bu durum projelendirme sırasında kaya kalitesinin kestirilmesinde dikkate yeterince alınmamış ve tünel radye kapanımını öngörmeyen bir tünel geometrisi oluşturulmuştur. Örtü yükü tünel tarafından tam anlamıyla taşınamadığı, kırık sistemleri boyunca dolaşan su volkanik kökenli birimleri aşındırdığı ve tünelde sökülmelerle birlikte zamanla aşırı boyutlara varan deformasyonlara neden olduğu için tünelde büyük sorunlarla karşılaşılmıştır.

Yol güzergahının geçtiği bölgede Üst Kretase yaşlı bazaltik, andezitik lavlar ve piroklastlardan oluşan volkanik birimler ile bunların üzerine yerleşmiş olan Üst Kretase – Eosen yaşlı kırıntılılar ve karbonatlı kayaçlar bulunmaktadır. Nefise Akçelik tünelinin tamamı jeolojik olarak volkanosedimanter seri içinde açılmıştır. Bu seri litolojik birim olarak bazik volkanik lavlar (bazalt, diyabaz), bazik volkanik piroklastlar (andezitik, bazaltik tüf-breş-aglomera) ve sedimanter kayaçlar (kiltaşı, çamurtaşı, şeyl) içermektedir. Nefise Akçelik Tüneli çıkış tarafında litoloji yaygın olarak sert, sağlam, çatlaklı bazaltik lavlardan oluşmasına karşın, giriş tarafında daha zayıf dayanımlı, yer yer sediment katkılı bazik piroklastlar (tüf-breş-aglomera) egemendir.

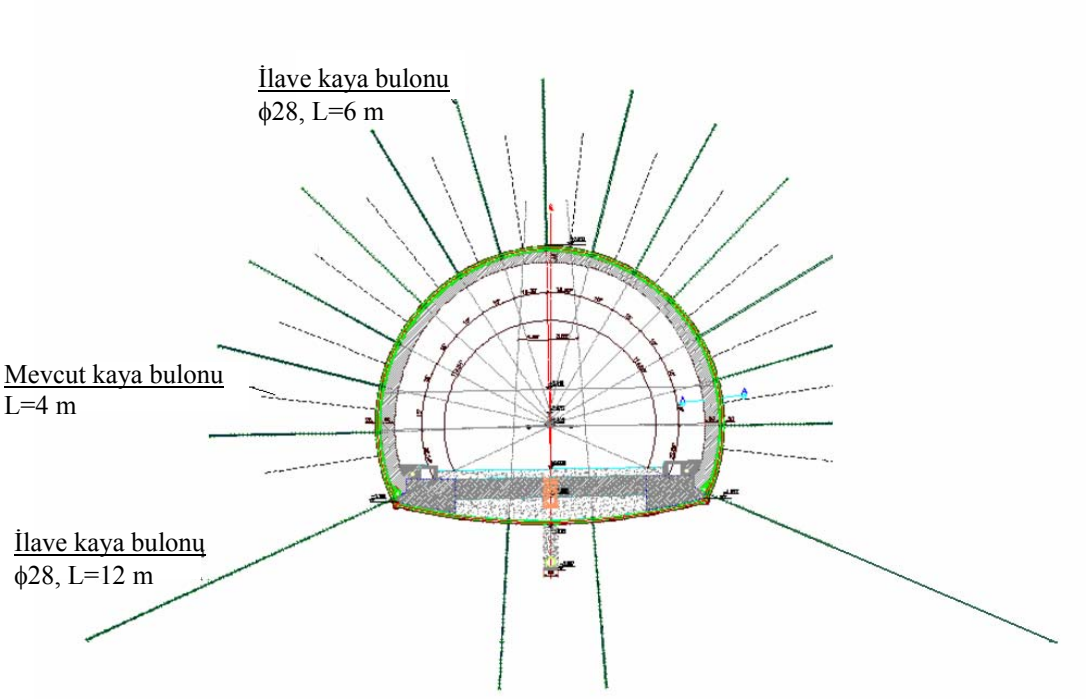


Şekil 6.4: Nefise Akçelik tüneli Km 10+714.50'de ölçülen deplasmanlar

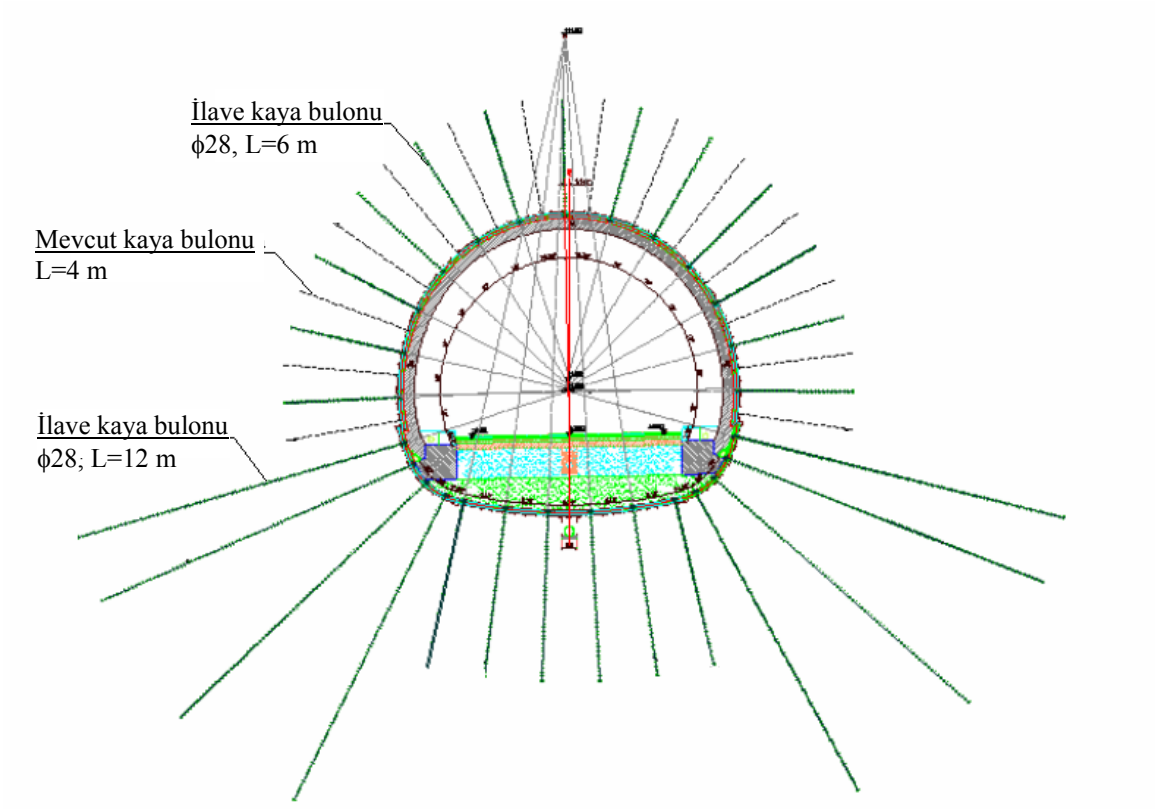
Nefise Akçelik tünelinin bu sorunlu kesiminde yer alan Km 10+714.50'de tünel yan duvarlarında 14 cm'ye varan deplasmanlar ölçülmüştür [21]. Şekil 6.4'de ölçülen deplasmanların zamana bağlı olarak değişimleri gösterilmiştir;

Nefise Akçelik tünelinde karşılaşılan yüksek deplasmanlar nedeni ile sağlamlaştırma projesinin yapılması zorunlu olmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplama yapan Phase adlı program kullanılarak geri analiz yapılmış, uygulamada kullanılan destekleme elemanları ile 14 cm deformasyon yapan kayacın arazide sahip olduğu jeomekanik parametreler belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler için hesaplamalar sağlamlaştırma projesi için yinelenmiştir. Sonuç olarak iki yeni tünel tip kesiti oluşturulmuştur. Bunlar mevcut B2 kaya destekleme sınıfının ek bulonlar ile B3 kaya sınıfına dönüştürülmesi ve B2 kaya sınıfının invert uygulaması ile geliştirilmesidir.

Şekil 6.5'de ve Şekil 6.6'da tasarlanan sağlamlaştırma projesine ait tip kesitler, tabloda ise geri analiz ile hesaplanan kaya dayanım parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 6.5: B2'den B3'e geçiş sağlamlaştırma tip kesiti



Şekil 6.6: Taban kemerli B2 sağlamlaştırma tip kesiti

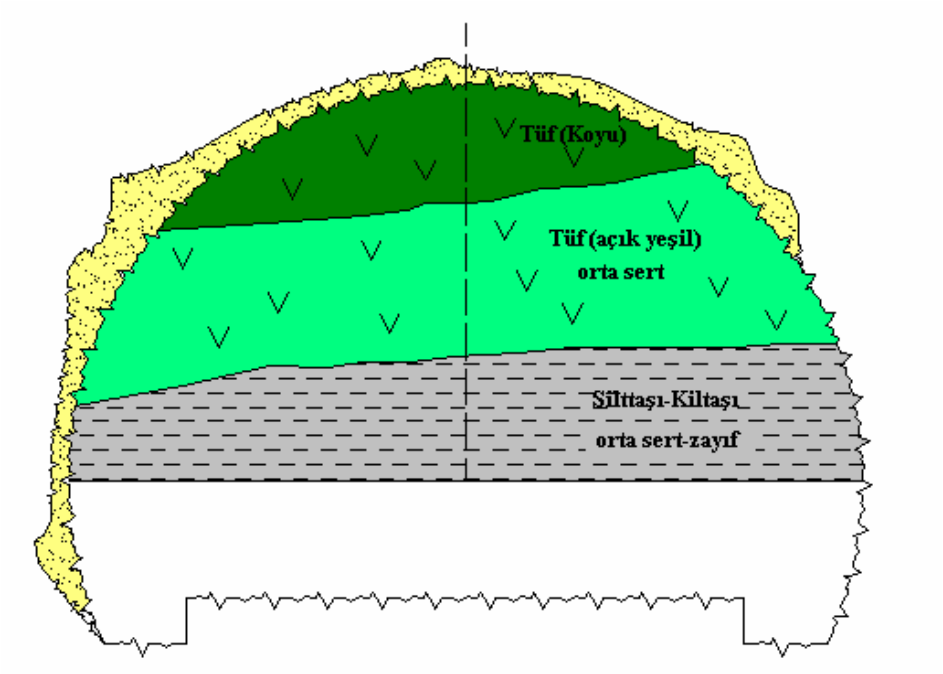
Tablo 6.1: Nefise Akçelik tüneli, kayaçların yerinde dayanımları

Kayaç Türü	Elastik (Yenilme Öncesi)					Plastik (Yenilme Sonrası)	
	γ (kN/m^3)	ν	E (MPa)	c (MPa)	φ (^{o})	c (MPa)	φ (^{o})
Aplit	26	0,21	11000	15	57	10	50
Bazalt	25	0,24	6500	3	50	2,2	42
Aglomera	25	0,24	6500	3	50	2,2	42
Tüf	23	0,25	4300	2,2	40	1,2	34
Kil	19	0,31	3500	1	22	0,3	18
Fay Malzemesi	19	--	3000	--	--	0,1	13

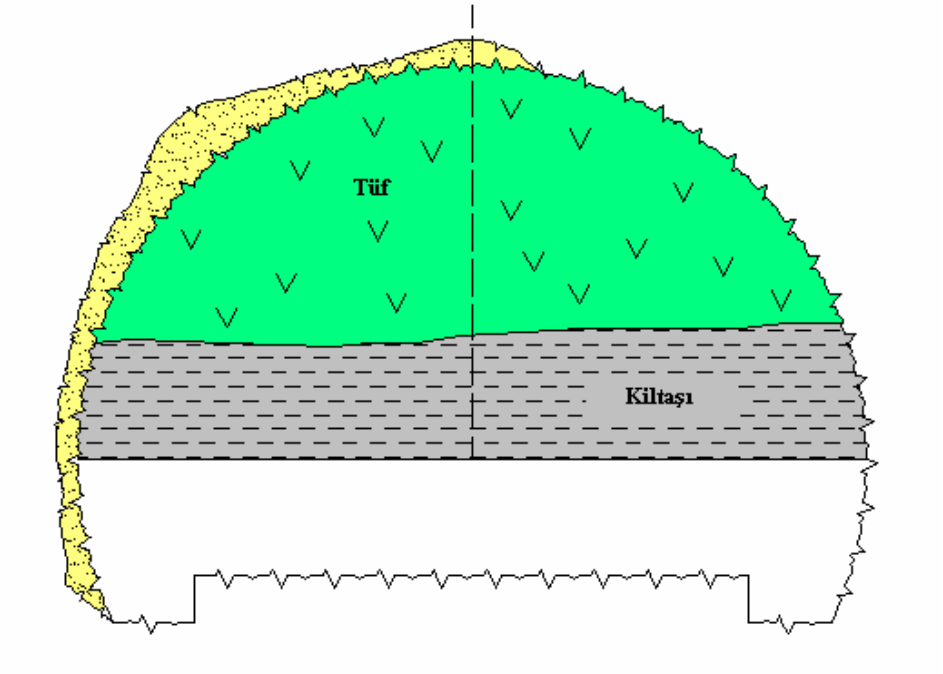
6.1.1 Nefise Akçelik tünelinde uzman sistem (USTA) uygulaması

Nefise Akçelik tüneli inşaatı sırasında deplasman ölçümlerini sürekli olarak izleyen ve inşaatı denetleyen bir uzman sistem kullanılmış olsaydı, deplasman hızlarının desteklemenin yerleştirilmesi ile azalmadığı, aksine arttığı program tarafından fark edilecekti. Bu ise zamanında müdahaleye imkan tanıyacaktı. Bunu görebilmek için tünelin sorunlu kesiminden elde edilen veriler USTA'ya girilerek, uzman sistemin uygulaması yapılmıştır.

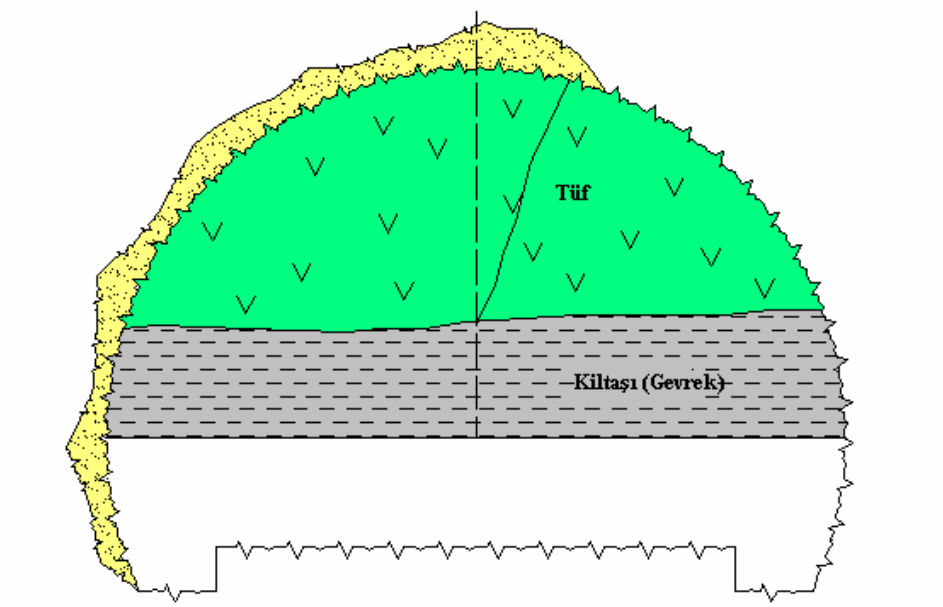
Nefise Akçelik tünelinde maksimum deplasmanların ölçüldüğü kesim için Km 10+712.60, Km 10+714.10 ve Km 10+715.60'dan sağlanan ayna kesitlerine ait veriler aşağıdaki gibidir [22];



Şekil 6.7: Km 10+712.60 sağ tüp ayna kesiti



Şekil 6.8: Km 10+714.10 sağ tüp ayna kesiti



Şekil 6.9: Km 10+715.60 sağ tüp ayna kesiti

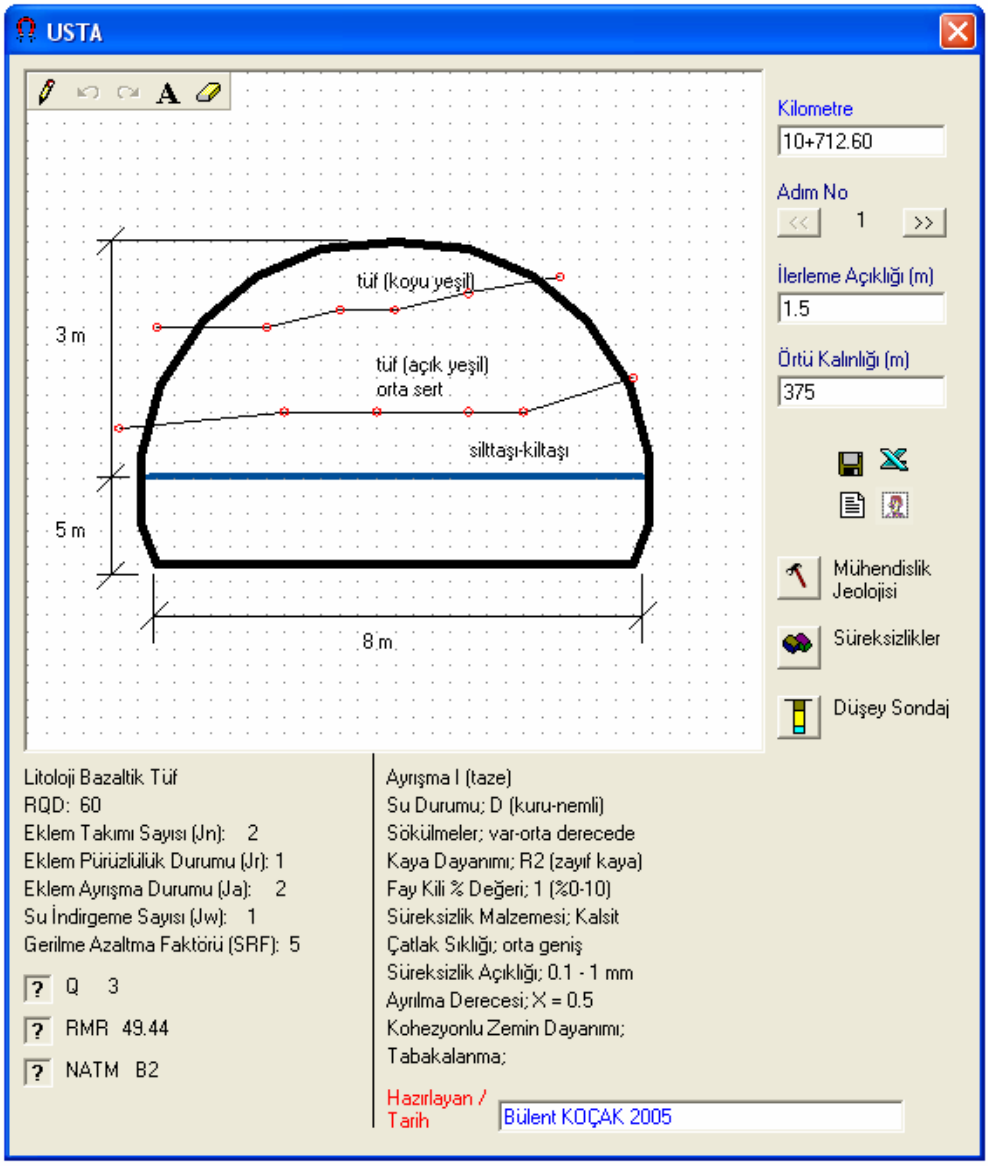
Bu kilometreler için kayaçların sahip oldukları mühendislik jeolojisi özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

- Kazı ilerlemesi = 1.50 metre
- Eklem takımı sayısı (Jn) = 2 (bir eklem takımı)
- Eklem pürüzlülülük sayısı (Jr) = 1 (düz, düzlemsel)
- Eklem alterasyon sayısı (Ja) = 2 (az altere olmuş eklem yüzeyleri, yumuşamayan yüzey kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları)
- Eklem su azaltma faktörü (Jw) = 1 (kuru kazılar ya da sızma, lokal olarak 5 lt/dk'dan az)
- Gerilme azaltma faktörü (SRF) = 5 (az kaya patlaması-masif kaya)
- RQD = 60
- Q = (60 / 2) x (1 / 2) x (1 / 5) = 3
- NATM kaya destekleme sınıfı B2
- Ayrışma durumu: taze (I)

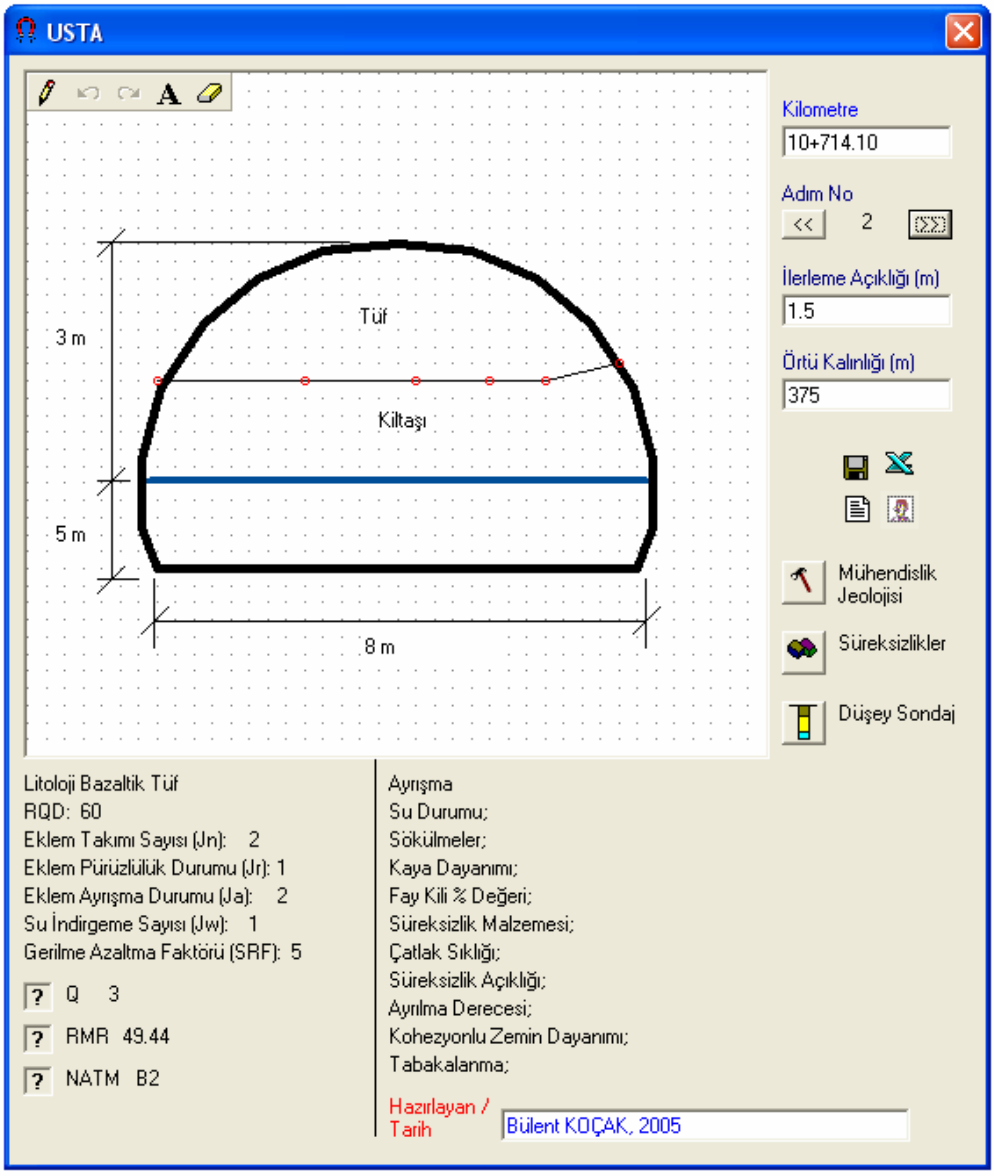
- Su durumu: kuru-nemli (D)
- Kaya dayanımı: zayıf kaya (R2), orta sert kaya (R3)
- Fay kili değeri: % 0 -10 (1)
- Süreksizlik açıklığı: kısmen açık (0,25 – 0,5 mm)
- Dolgu malzemesi: kalsit damarları
- Süreksizlik devamlılığı: orta (3-10 m)
- Süreksizlik aralığı: orta (20-60 cm)
- Litolojik özellikler: yeşilimsi renkte bazaltik tüf, açık yeşil renkte kiltaşı,

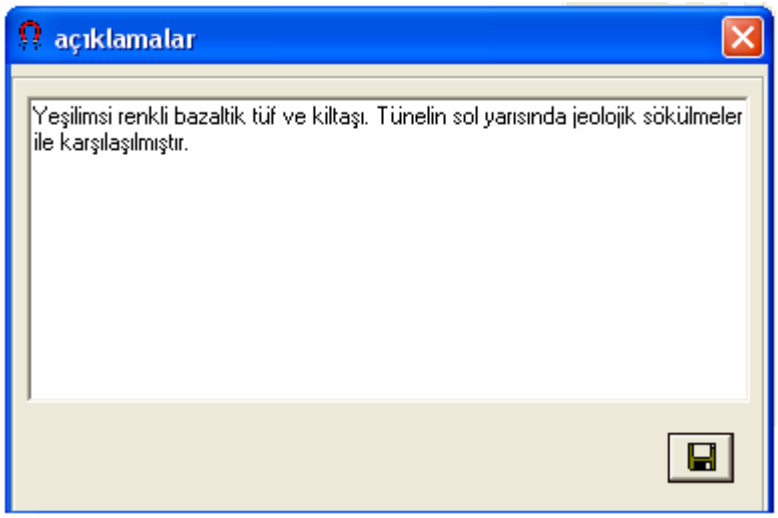
Deplasmanların maksimum seviyeye ulaştığı bu 3 kilometreye ait ayna kesiti verileri USTA'ya girilmiş ve veriler veri tabanına kaydedilmiştir. Nefise Akçelik tünelinde yapılan jeoteknik ölçümlerin sonuçları da (zamana bağlı deplasmanlar) USTA konverjans ölçümleri bölümüne kaydedilmiş, buradan deplasman hız ve ivmeleri hesaplatılmıştır. USTA ilk okumalardan itibaren deplasman hızının artarak devam ettiğini belirlemiş ve "dikkat" uyarısını vermiştir.

Şekil 6.10 ve 6.11'de USTA'ya kaydedilen tünel ayna kesitleri gösterilmiştir. USTA aynadan sağlanan veriler doğrultusunda Q değerini Q = 3 ve RMR değerini RMR = 49.44 olarak hesaplamış, bunlara bağlı olarak NATM sınıfını B2 olarak belirlemiştir.



Şekil 6.10: Km 10+712.60 için USTA tünel ayna kesiti





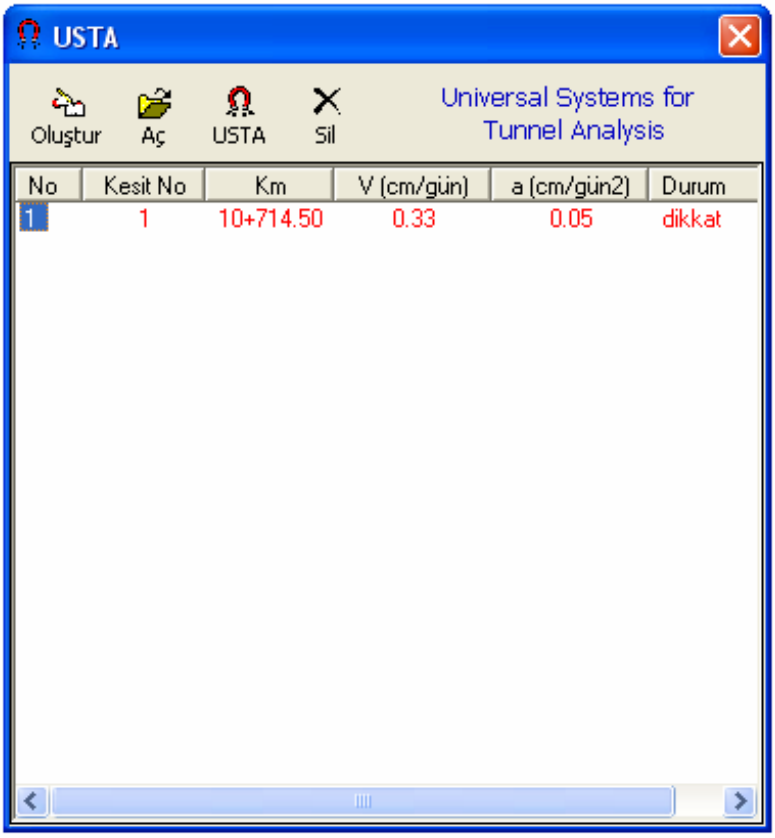
Şekil 6.11: Km 10+714.10 için USTA tünel ayna kesiti

Tablo 6.2'de Nefise Akçelik tüneli Km 10+714.50'de yapılmış konverjans ölçüm sonuçları gösterilmiştir;

Tablo 6.2: Nefise Akçelik tüneli, Km 10+714.50-sağ tüp ölçüm sonuçları

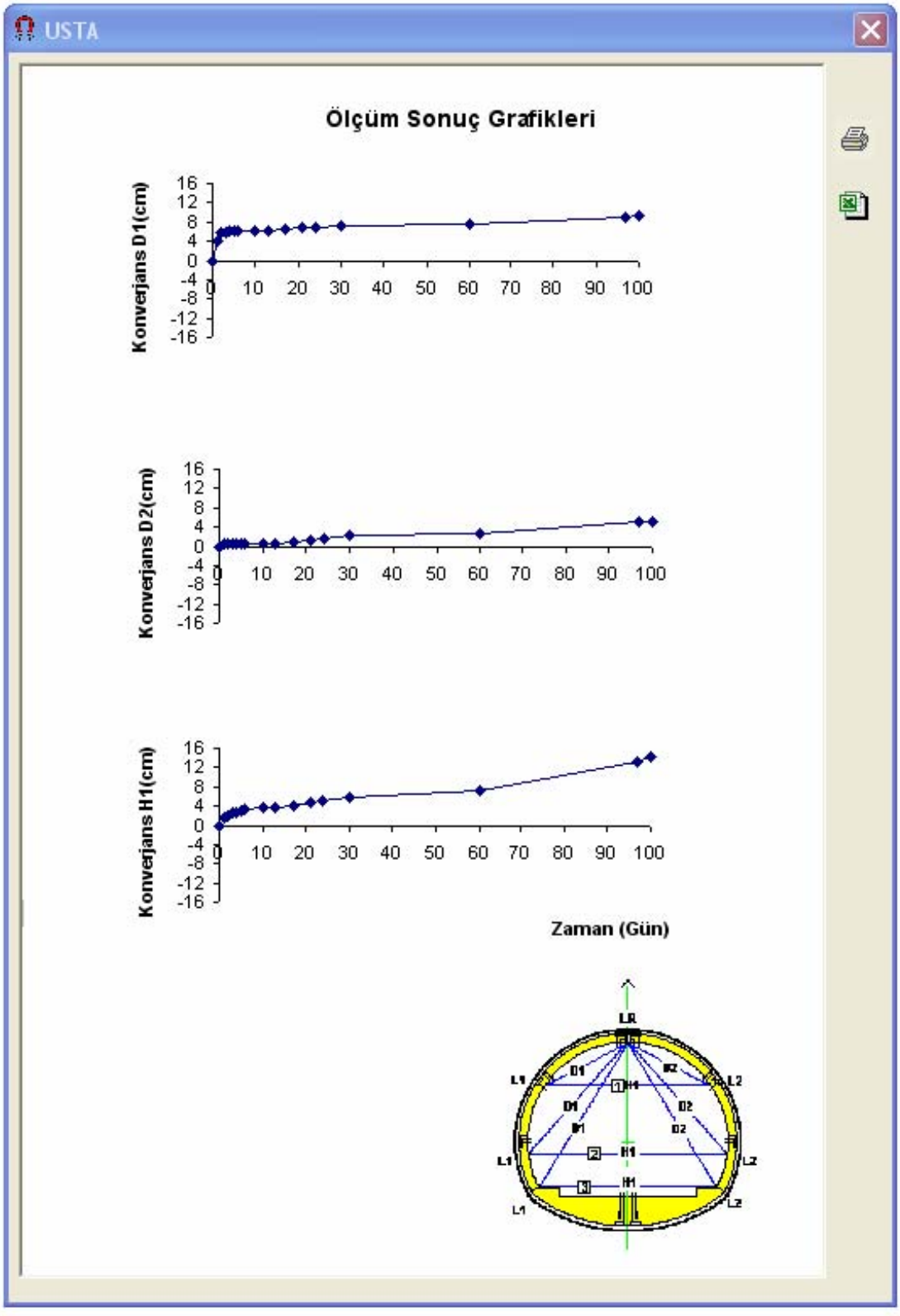
Tarih	Toplam Gün	Deplasmanlar - DS (cm)					
		L1-L2	L1-L4	L1-L3	L1-L5	L2-L3	L4-L5
05.06.2002	0	0	0	0	0	0	0
06.06.2002	1	0	-4.007	-0.199	-0.454	-3.365	-1.488
07.06.2002	2	-0.098	-5.904	-0.26	-0.567	-3.732	-1.975
08.06.2002	3	-0.123	-5.971	-0.272	-0.588	-4	-2.498
09.06.2002	4	-0.186	-6.006	-0.287	-0.597	-4.207	-2.78
10.06.2002	5	-0.202	-6.023	-0.325	-0.611	-4.351	-3.053
11.06.2002	6	-0.236	-6.059	-0.339	-0.62	-4.556	-3.2
15.06.2002	10	-0.253	-6.054	-0.362	-0.627	-4.778	-3.525
18.06.2002	13	-0.453	-6.225	-0.385	-0.674	-4.901	-3.579
22.06.2002	17	-0.566	-6.553	-0.707	-0.875	-5.391	-4.101
26.06.2002	21	-0.692	-6.75	-1.025	-1.213	-5.674	-4.806
29.06.2002	24	-0.977	-6.95	-1.386	-1.685	-6.011	-5.201
05.07.2002	30	-1.167	-7.38	-1.829	-2.207	-6.158	-5.641
04.08.2002	60	-1.43	-7.58	-2.385	-2.685	-6.403	-7.223
10.09.2002	97	-2.022	-8.868	2.651	-4.951	-6.734	-13.217
13.09.2002	100	-2.425	-9.347	-3.052	-5.093	-7.087	-14.071

Nefise Akçelik tünelinde 14 cm ile maksimum deplasmanın ölçüldüğü tünel yan duvarları (şekil 5.4'de L1-L4, L4-L5 ve L1-L5 noktalarının oluşturduğu üçgen) için ölçümler USTA'ya girildiğinde, yazılım ilk ölçüm günlerinden itibaren uyarı vermeye başlamıştır. Toplam ölçüm günü olan 100. günde ise deplasman ortalama hızı V = 0.33 cm/gün, deplasman ortalama ivmesi a = 0.05 cm/gün^2 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.12'de konverjans ölçümleri izleme sayfası gösterilmiştir;



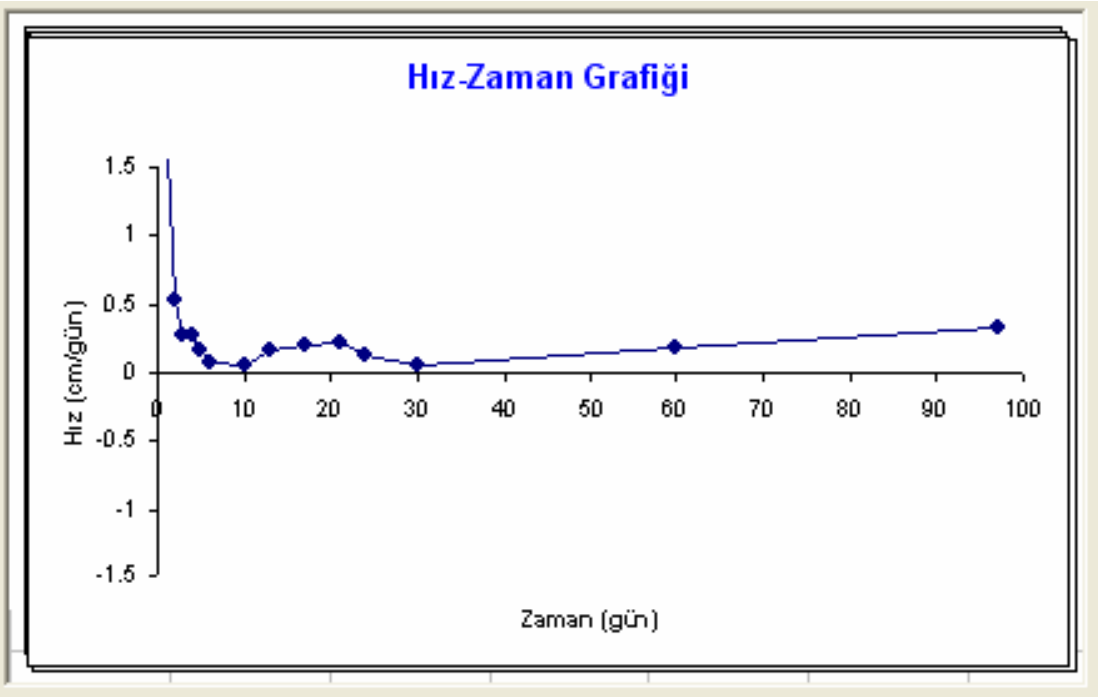
Şekil 6.12: Nefise Akçelik tüneli, USTA konverjans ölçümleri

Jeoteknik ölçümlere ait deplasman – zaman eğrileri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Elde edilen değerler, arazide elde edilen değerler ile (şekil 6.4) birebir uyumludur. Şekilde de görüldüğü gibi, maksimum yer değiştirme tünel yan duvarlarında (D1) doğrultusunda meydana gelmektedir. Deplasmanlar zaman içerisinde önce artmakta, sonra sabit kalmakta veya daha düşük bir hızla artmakta, 60. günden sonra ise hızla artışını sürdürmektedir. 100. günün sonunda ise 14 cm'lik değere ulaşılmaktadır.



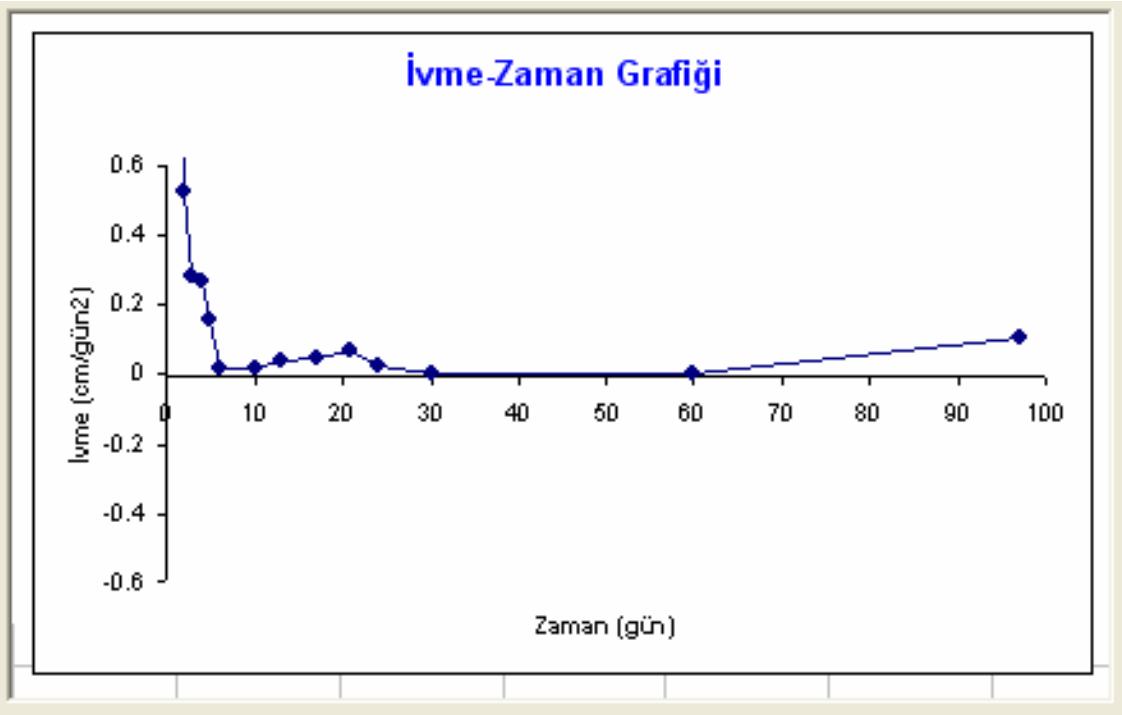
Şekil 6.13: Nefise Akçelik tüneli, USTA deplasman-zaman eğrileri

Aşağıdaki şekillerde ise USTA tarafından hesaplanan hız-ivme / zaman eğrileri gösterilmiştir;



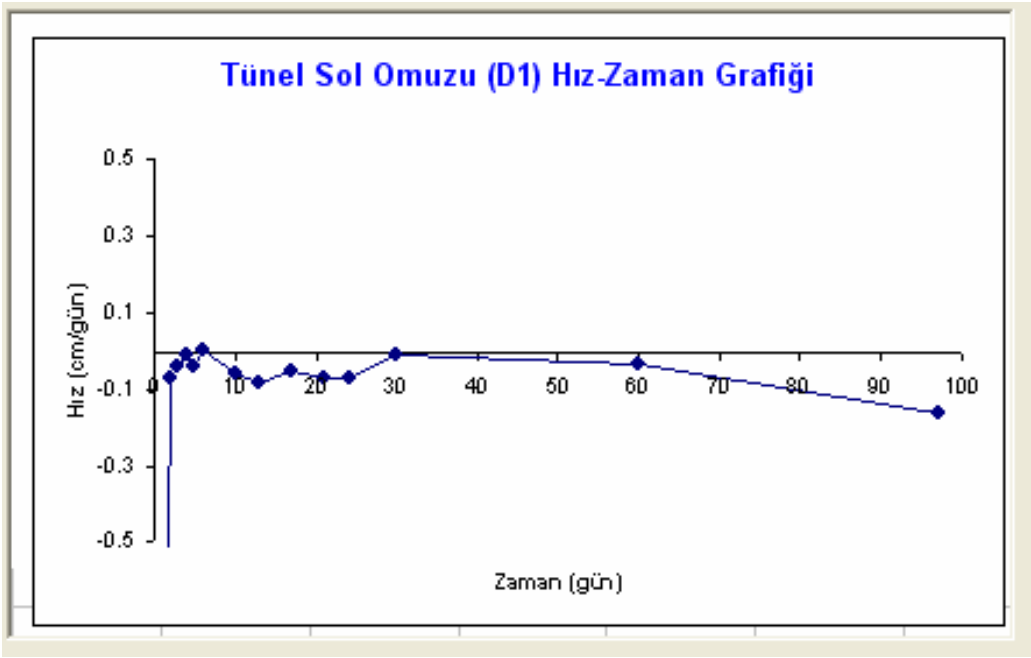
Şekil 6.14: Deplasman hız – zaman eğrisi

Nefise Akçelik tünelinde deplasman hızları ilk günlerde azalmıştır. 10. günden sonra 20. güne kadar hızlanmış, sonra eski durumuna dönmüştür. 30. günden itibaren ise son ölçüm gününe kadar deplasmanlar hızlanarak devam etmiştir. Şekil 6.15'de deplasman ivmelerinin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir;

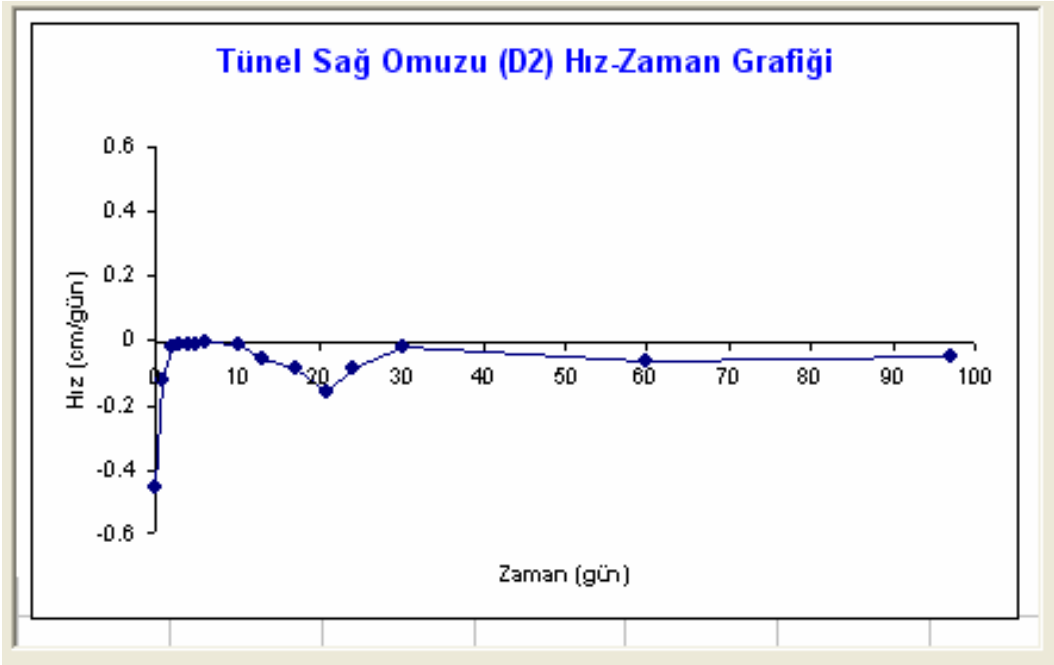


Şekil 6.15: Deplasman ivme-zaman eğrisi

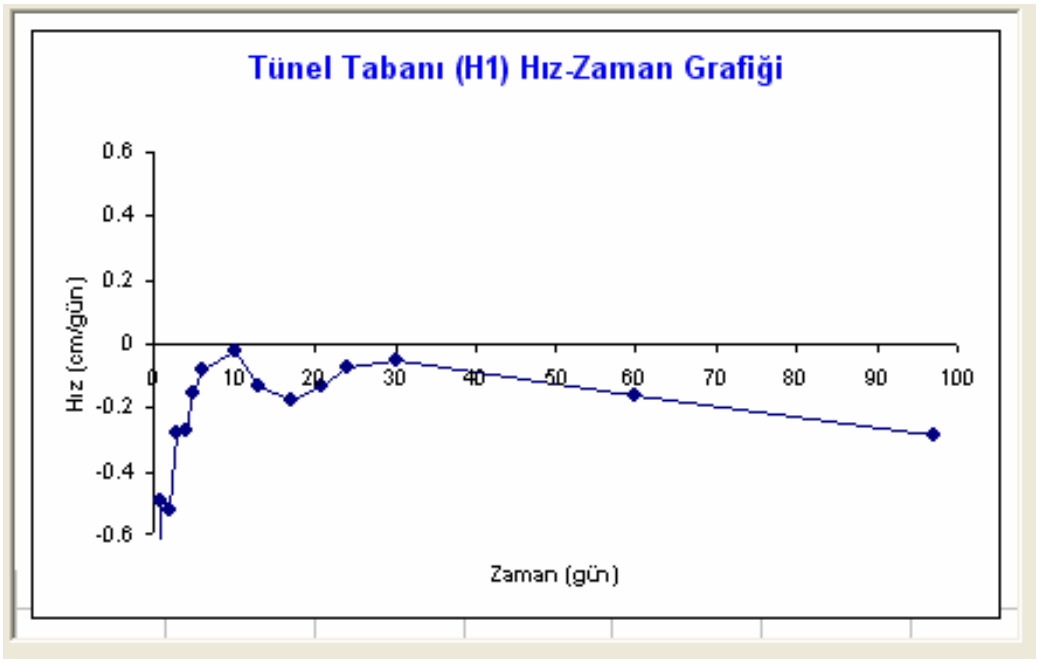
Tünelde maksimum yer değiştirmeler sol duvarda meydana gelmiştir. Şekil 6.16 tünel sol duvarında meydana gelen deplasmanları, Şekil 6.17 sağ duvarda meydana gelen deplasmanları, Şekil 6.18 ise tünel üst yarı tabanında meydana gelen deplasmanları göstermektedir.



Şekil 6.16: Tünel sol duvarı deplasman hız-zaman eğrisi



Şekil 6.17: Tünel sağ duvarı deplasman hız-zaman eğrisi



Şekil 6.18: Tünel tabanı deplasman hız-zaman eğrisi

USTA deplasman hız ve ivmelerinin hesaplatılmasının ardından aşağıdaki uyarıyı vermiştir;

"Gerilmeler sol omuz üzerinde yoğunlaşıyor, buraya dikkat edilmeli, kazı sonrasında dökülmeler olabilir".

Ayna kesitleri incelendiğinde (şekil 6.8); analizi yapılan kilometredeki tünel sol yarısında sökülmelerle karşılaşıldığı görülmektedir. Maksimum deplasmanlar da tünel sol yarısında meydana gelmiştir. Eğer inşaat sırasında yazılım kullanılabiliyor olsaydı, problemlerle karşılaşılmadan önleminin alınması mümkün olabilecekti.

USTA, mühendislik jeolojisi verilerine dayanarak, problemin nedeni için aşağıdaki yorumları yapmış ve çözüm için alınması gereken önlemleri belirtmiştir;

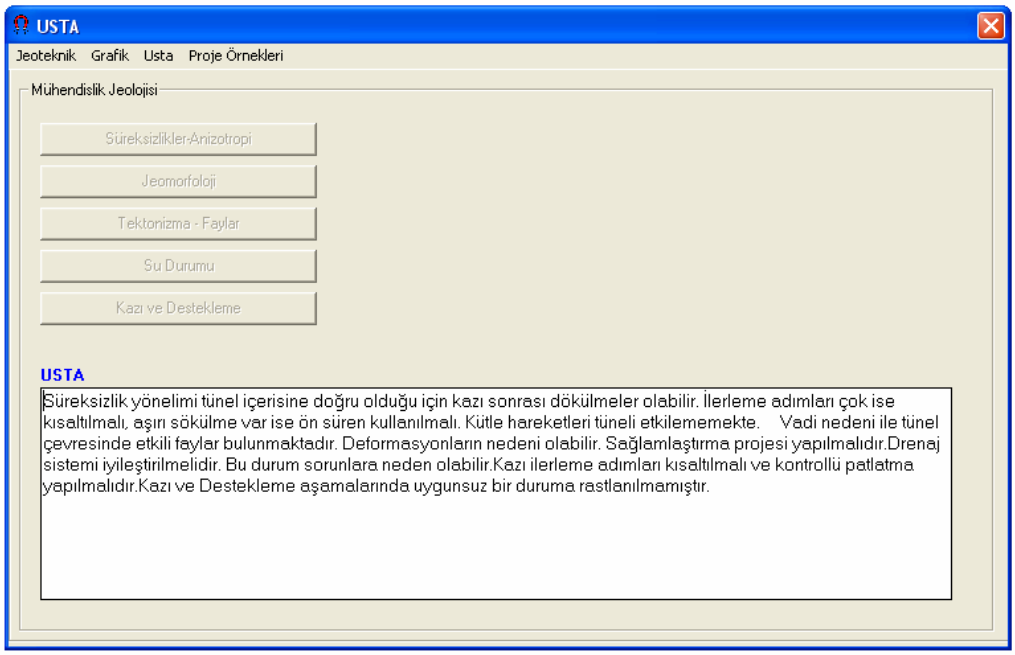
- "Süreksizlikler nedeniyle sökülmeler olabilir – ön süren kullanılmalı ve ilerleme adımları kısaltılmalı": inşaat sırasında sökülmeler ile karşılaşılmıştır,

- "Vadi nedeni ile tünel çevresinde etkili faylar bulunmakta, deformasyonların nedeni olabilir, sağlamlaştırma projesi yapılmalı": sorunlu kesimde tünel bir vadi altındadır ve fayların bulunduğu doğrudur. Tünel için daha sonra sağlamlaştırma projesi yapılmıştır

- "Drenaj sistemi iyileştirilmelidir": tünel çevresindeki kayaçlarda ayrışmalar belirgindir ve kırıklar yeraltı suyu dolaşımına izin vermektedir

- "Kazı ilerleme adımları kısaltılmalı": ilerleme adımları bu kesimde 1.5 metredir. Ortamın gerçekte B3 sınıfında olduğu düşünülürse, ilerleme adımlarının kısaltılması gerektiği doğrudur

Şekil 6.19'da USTA mühendislik jeolojisi ekranı gösterilmiştir;

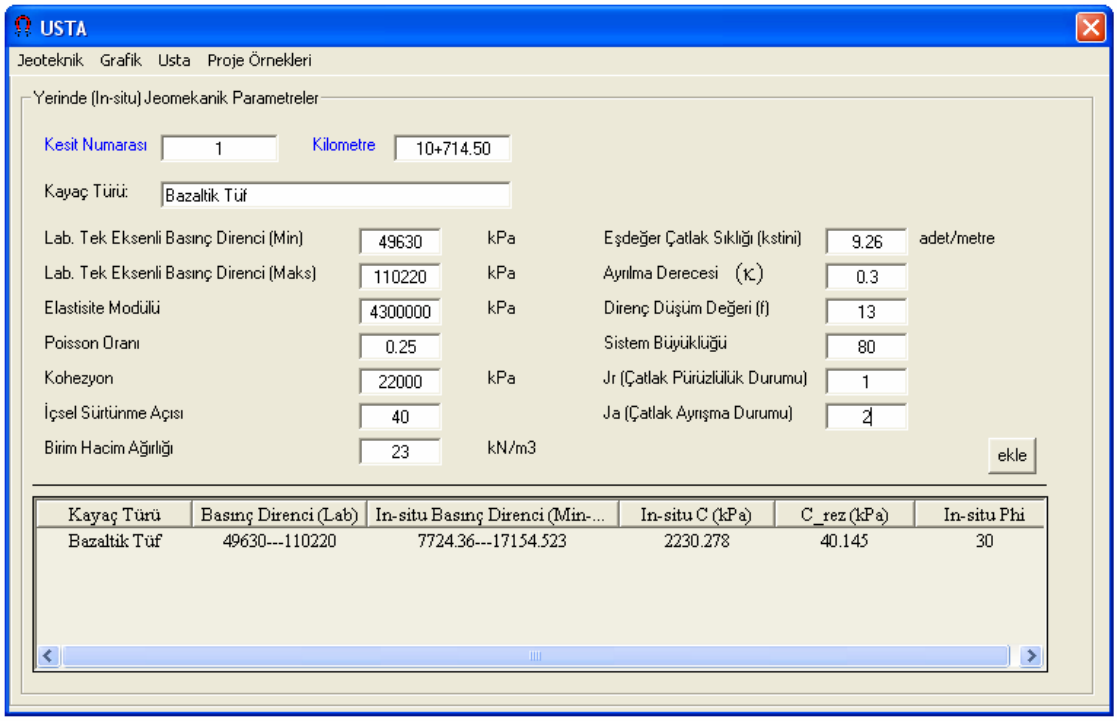


Şekil 6.19: Nefise Akçelik tüneli, USTA mühendislik jeolojisi analizi

USTA, sağlamlaştırma projesinde kullanılmak üzere yerinde jeomekanik parametreler de önermektedir. Kayaçların yenilme öncesi – elastik durumda sahip oldukları jeomekanik büyüklükler Tablo 6.3'de verilmiştir. Tünelin içerisinde inşa edildiği bazaltik tüf için USTA'nın hesapladığı değerler şekil 6.20'de gösterilmiştir;

Tablo 6.3: Nefise Akçelik tüneli, bazaltik tüf taş örneği için jeomekanik büyüklükler

Litoloji	**Basınç Dayanımı (MPa)**	**Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)**	**Elastisite Modülü (MPa)**	**Poisson Oranı**	**Kohezyon (MPa)**	**İçsel Sürtünme Açısı (^{o})**
Bazaltik Tüf	49.63 - 110.22	24.6 - 27.4	4300	0.25	2.2	40



Şekil 6.20: USTA yerinde jeomekanik büyüklükler

USTA ile yapılan hesaplamalarda yerinde jeomekanik büyüklükler;

Basınç Dayanımı $\sigma = 7.72 – 17.15$ MPa

Teknik Kohezyon $c = 2.23$ MPa

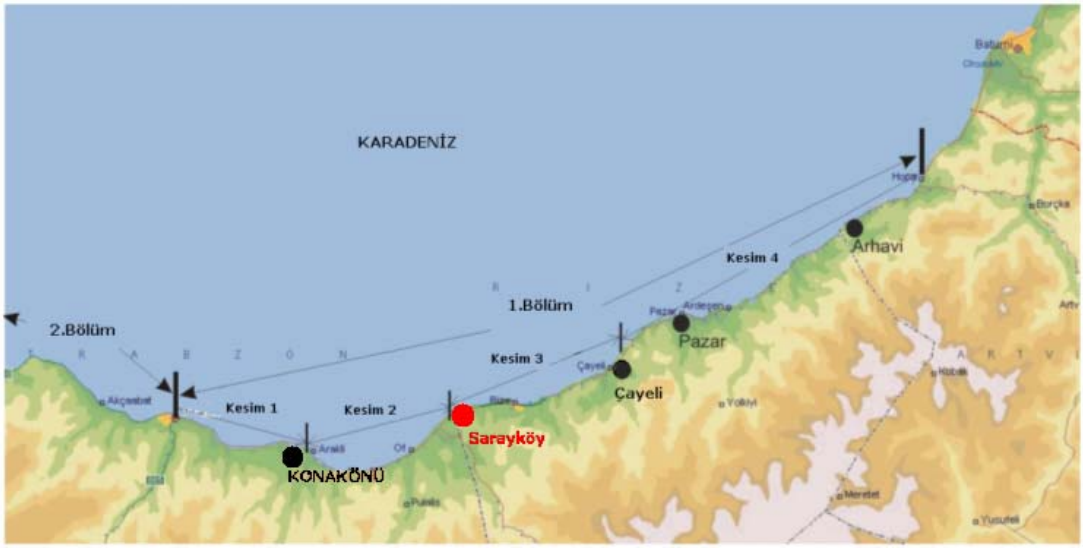
Rezidüel Kohezyon $c_{rez} = 0.04$ MPa

İçsel Sürtünme Açısı $\varphi = 30^{o}$ olarak hesaplanmıştır.

Bu değerler sağlamlaştırma projesinin hazırlanması sırasında Phase programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan geri analizden elde edilen sonuçlar ($c = 1.2$ MPa, $\varphi = 34^{o}$) ile de uyumludur.

6.2 Sarayköy Tüneli

Karadeniz sahil yolu projesi kapsamında inşa edilen Sarayköy tüneli projenin 2. bölümü olan Trabzon – Hopa arasında, 3. kesimde yer almaktadır. Şekil 6.21'de proje yer bulduru haritası gösterilmiştir [23];

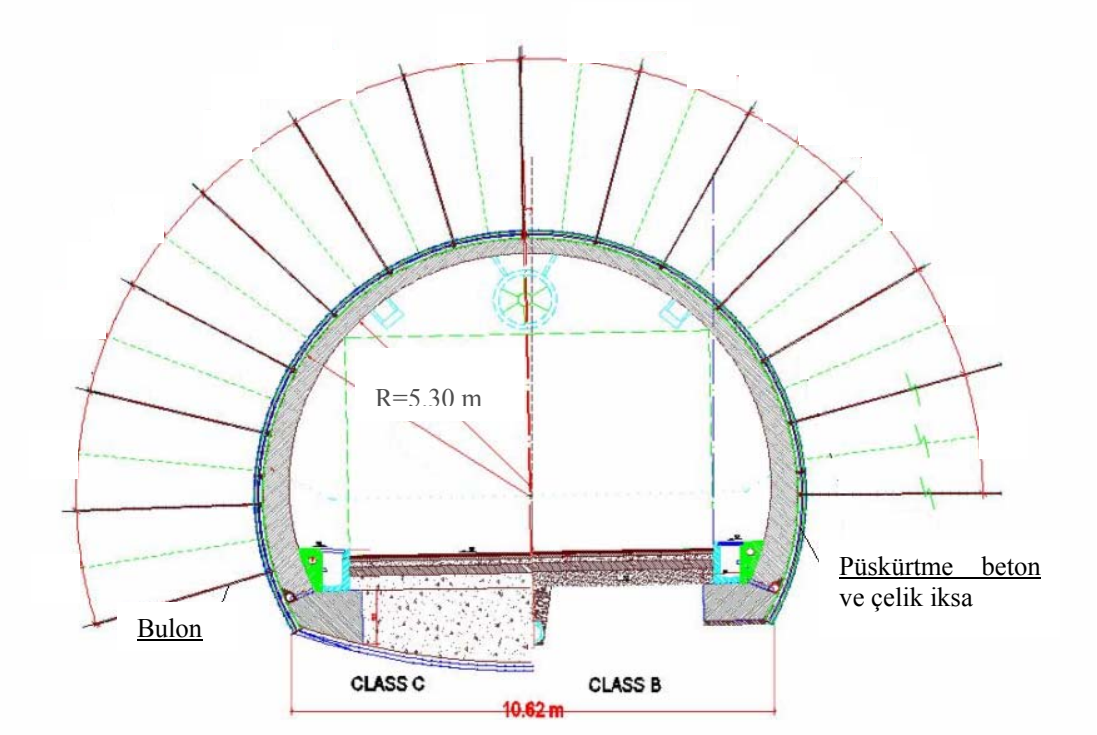


Şekil 6.21: Sarayköy tüneli yer bulduru haritası

Sarayköy tüneli her biri iki şeride sahip olan, kesit alanı 82.5 m^2, 10.25 m genişliğinde ve 6.85 m yüksekliğinde çift tüplü karayolu tünelidir. Tüpler arasındaki mesafe 11 metredir. Proje firması Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. şirketi olup, yüklenici Limak İnşaat'tır.

Tünel eski bir heyelan sahasında yer alması ve zayıf dayanımlı volkanik kayaçların içerisinde inşa edilmesi nedeniyle sorunlu tünellerdendir. Doğu portali, ya da diğer adıyla Rize portalinde yer alan yamaç yılda 4-5 mm hareket etmektedir. Birim 40-80 cm kalınlığında bitkisel toprak ve onun altında yer alan kumlu killi ve siltli zeminden oluşmaktadır. Zeminin altında ise çok ayrışmış aglomera, bazaltik tüf ve bazalt bulunmaktadır. Benzer şekilde ara portaller ve Trabzon portali de heyelan sahasında bulunmaktadır.

Sarayköy tünellerinin inşası sırasında NATM'e göre B1 ile C3 arasında değişen kaya destekleme sınıfları ile karşılaşılmıştır. Portal bölgelerinde C2 – C3 sınıfları uygulanmış, derin tünelli kesimlerde ise B1-B3 arasında değişen kaya destekleme sınıfları tercih edilmiştir. Şekil 6.22'de NATM'e göre projelendirilen destek elemanları gösterilmiştir [23];



Şekil 6.22: Sarayköy tüneli NATM destekleme sınıfları

Mühendislik jeolojisi ve tünel mühendisliği açısından incelendiğinde Sarayköy tünelinde karşılaşılan problemler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Giriş portallerinde tünelleri kesen süreksizlikler.
- Rize portalinde tünel derinliğinin çok az olması.
- Gevşek çevre kayaç ve paleo-heyelan sahası.
- Dört portal bölgesinde de kayma tehlikesi bulunan yüzey örtüsü.
- Çok yağış alan iklim ve suya doygun zemin.
- Tektonizmadan etkilenmiş litoloji, ezilme ve makaslama zonları.
- Çok – aşırı ayrışmış tüfit.
- Hidrotermal ayrışma zonları.
- Çok az ile hiç arasında kazı sonrası kayanın kendisini tutabilme özelliği.

Tüm bu olumsuzluklar nedeni ile Sarayköy tüneli için klasik tünel açma yöntemleri uygulanamaz, özel önlemlerin alınması zorunludur sonucuna varılmıştır. Yapım sırasında sorunlarla karşılaşılmaması için alınan önlemler ise;

- Yamaç sağlamlaştırma; bu amaçla heyelan sahası jet-grout kolonları ile desteklenmiştir, portal ile bir ağırlık yapısı oluşturulmuş, denge sağlanmıştır.

- Tünel çevresindeki kayaçların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi; bu amaçla birbirini kesen jet-groutlar yapılmış, tünel bir çatı altına alınmıştır

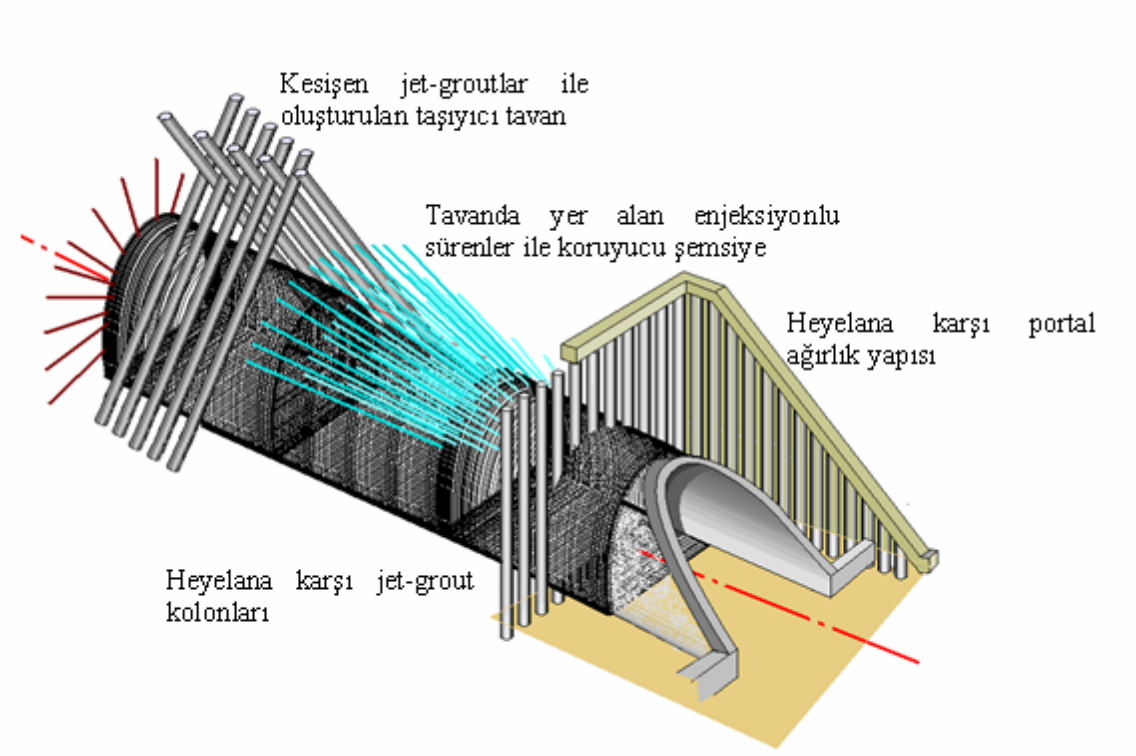
- Etkili drenaj yapılmıştır.

- Deformasyonların kontrollü ve minimizasyonu sağlanmıştır.

- Kazı sonrası arının ve aynanın hemen desteklenmesi; bu amaçla ilerleme yönünde enjeksiyonlu borular sürülmüştür.

Projelendirme sırasında yapılan çalışmalar sonucunda çakıllı siltli kil birimi için belirlenen jeomekanik parametreler (sırasıyla birim hacim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısı); γ=21 kN/m^3 , ϕ=13^0 ve c=50 kPa olup zayıf – çok aşırı altere bazaltik tüf – aglomera karmaşığı içinse γ=23 kN/m^3 , ϕ=24^0 ve c=220 kPa olarak belirlenmiştir.

Şekil 6.23'de Sarayköy tüneli ara portallerinde uygulanan destekleme-sağlamlaştırma ve iyileştirme elemanları bir arada gösterilmiştir [24];



Şekil 6.23: Sarayköy tüneli ara portali için yapım yöntemi



Şekil 6.24: Sarayköy tüneli ara portalinde heyelan sahası



Şekil 6.25: Sarayköy tüneli ara portali

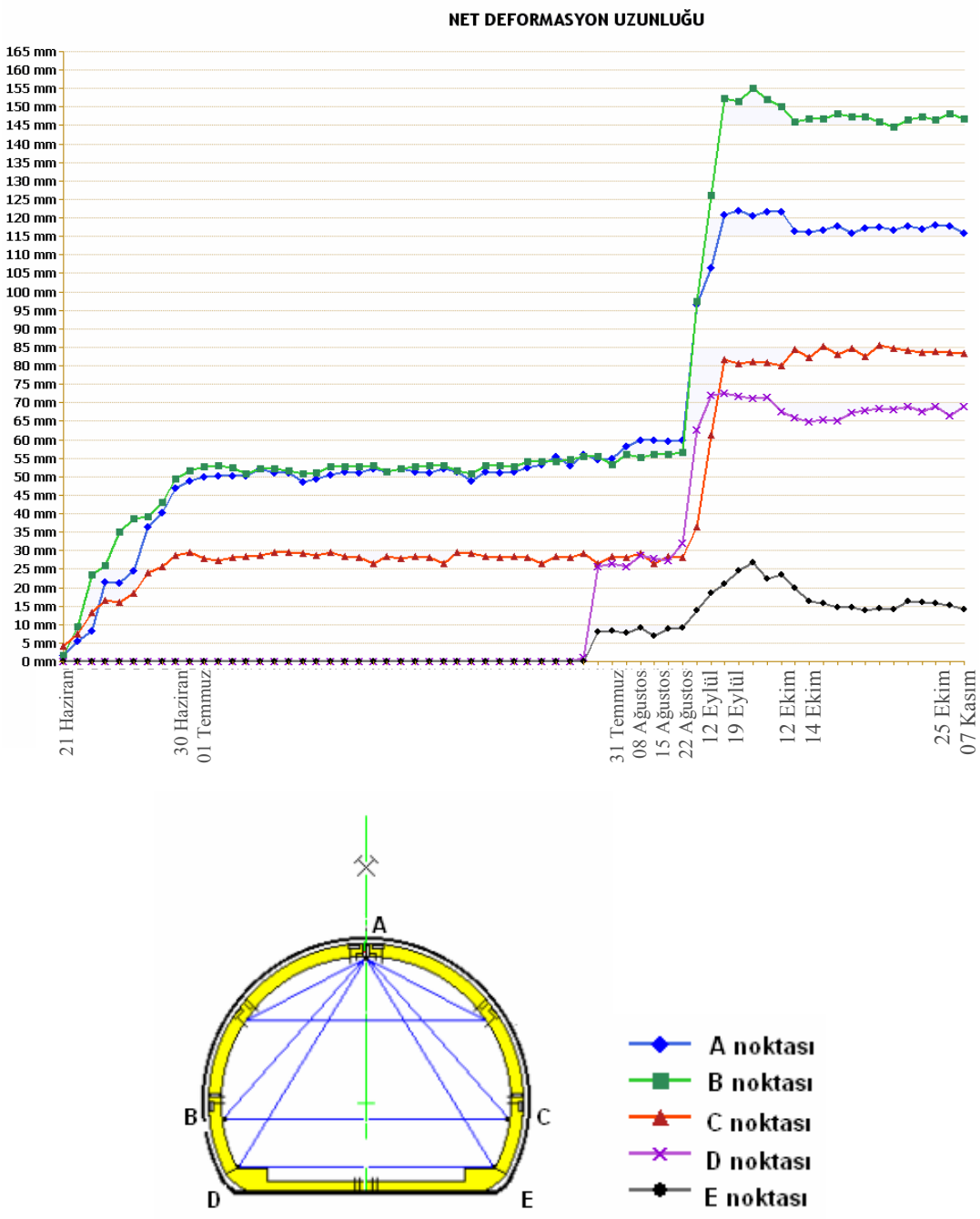
Sarayköy tünelinin Km 111+780 – 112+590 arasında kalan kesiminde sağ tüp T1 tüneli, sol tüp T3 tüneli olarak; Km 112+720 – Km 113+420 arasında kalan kesimde ise sağ tüp T2 tüneli, sol tüp T4 tüneli olarak adlandırılmıştır.

Yapım sırasında tünelin genelinde bir problemle karşılaşılmamış olmasına rağmen Km 111+767'den sonraki yaklaşık 150 metrelik kesimde deformasyon problemleri ile karşılaşılmıştır. Tüpler arasındaki imalat takip mesafesinin korunmaması nedeni ile tüneller birbirlerini etkilemiş, iç kaplamanın uygulanmasında yaşanan gecikme nedeniyle Km 111+777.98'de (0+142.35) düşey yönde 12 cm civarında deplasmanlarla karşılaşılmıştır.

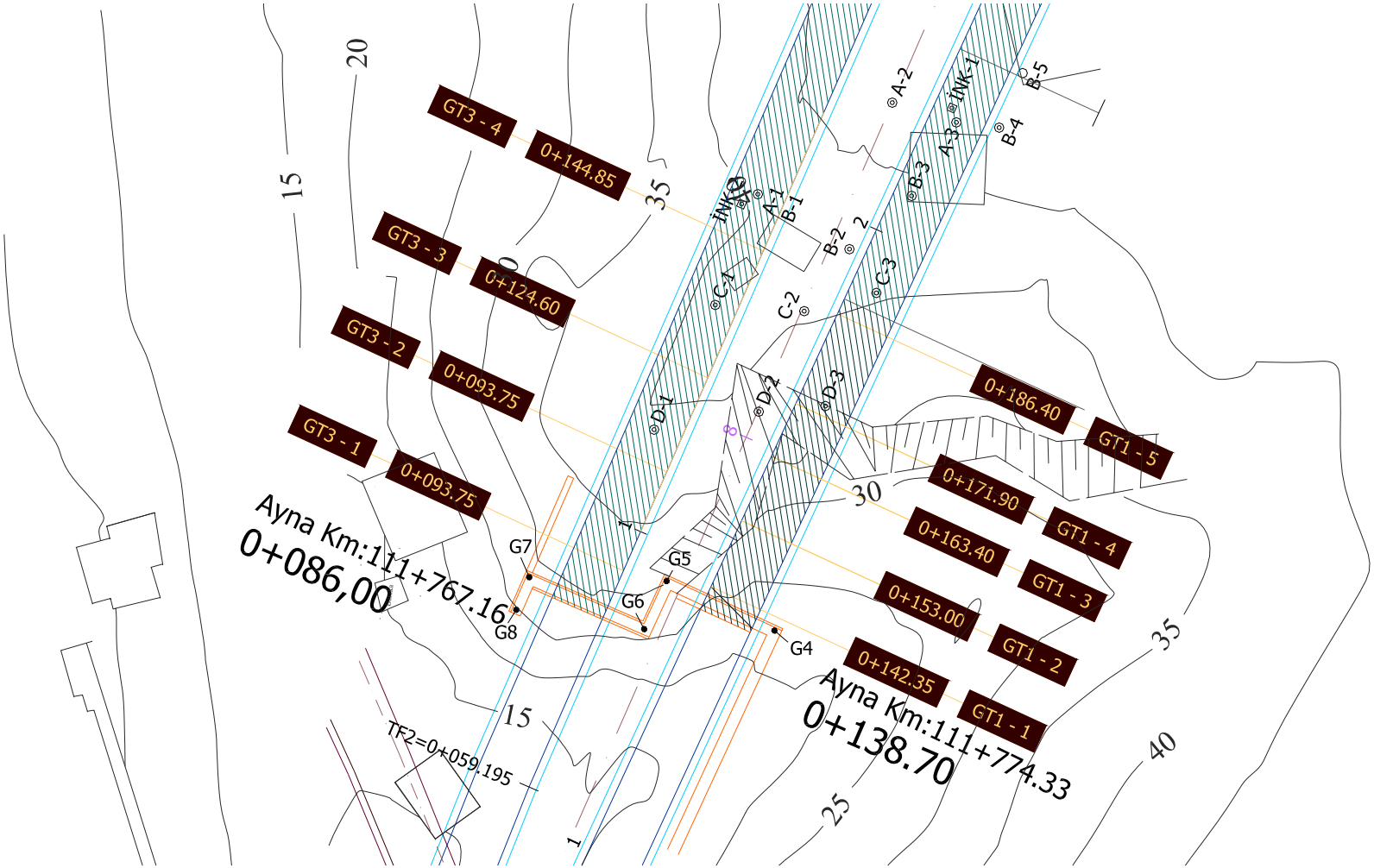
29.07.2005 tarihinde T1 tüneli giriş portalinde G-T1 ÖK-4 ölçüm noktasında başlanan okumalarda tünel tavanında ölçülen deplasman 5.47 cm iken, 19.09.2005 tarihinde 10.6 cm; 06.10.2005 tarihinde ise maksimum değeri olan 12.19 cm mertebesine ulaşmıştır. İmalatın yavaşlatılmasının ardından tüneller arasındaki etkileşim durmuş ve 07.11.2005 tarihinde 11.6 cm'ye gerilemiştir. Tünel sol duvarında yapılan okumalarda ise maksimum deplasman 08.10.2005 tarihinde 15.5 cm olarak ölçülmüş, bu değer 07.11.2005'de 14.67 cm'ye düşmüştür.

Bu tarihten sonra arazide yapılan incelemeler neticesinde tünellerde ve ayak betonlarında ölçümlerin devam edilmesine, ayak betonlarında deformasyonların artması halinde gergi uygulanmasına, donatıları yerleştirilmiş olan ayak betonlarının dökülmesine, invert betonlarının tamamlanmasına, üst yarıda deplasmanların olması halinde üst yarıda geçici invert yapılmasına, nihai kaplama betonunun invert betonunu 10 m geriden takip etmesine, T1 tüpünde imalatlar yapılırken T3 tüpünde imalatın yapılmamasına ve yüzey ölçümlerinin de sürdürülmesine karar verilmiştir.

Şekil 6.26'da Sarayköy tüneli T1 ve T3 tünelinde yapılan ölçüm noktalarının plan görünüşü ve maksimum deplasmanların ölçüldüğü G-T1 ÖK-4 ölçüm noktasında elde edilen deplasman – zaman eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.26: Sarayköy tüneli T1 tüneli portal, ÖK-4 ölçüm sonuçları



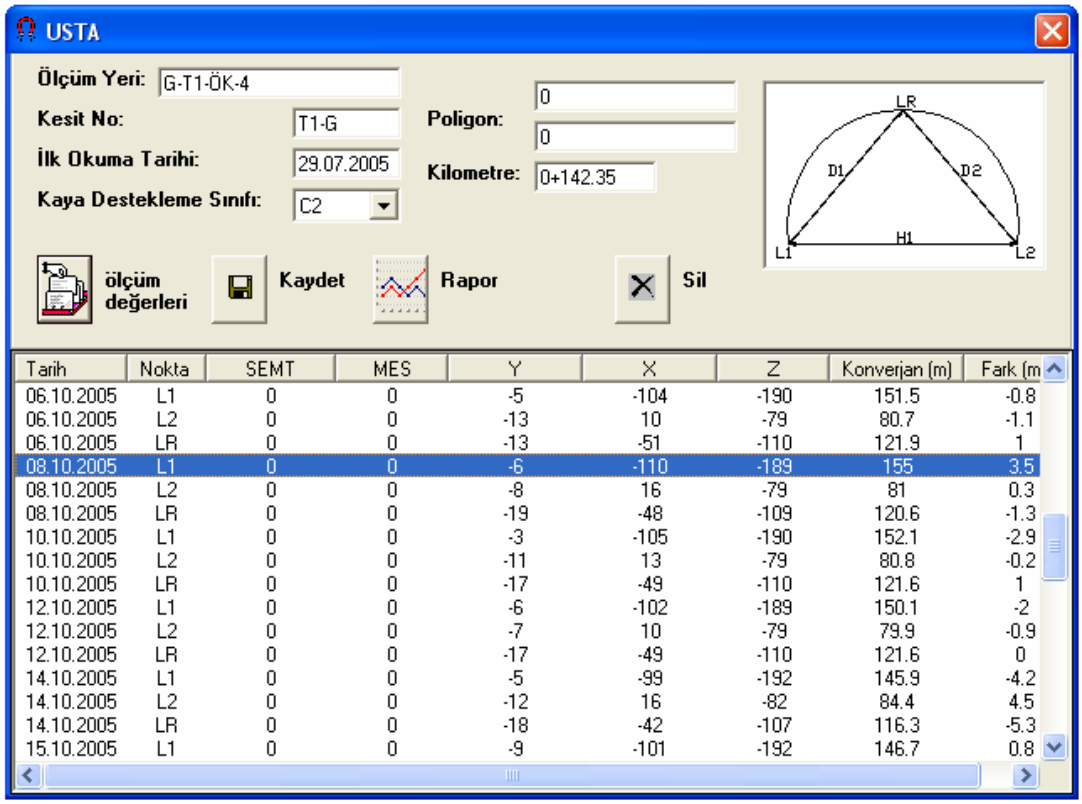
Şekil 6.27: Sarayköy tüneli ölçüm noktaları lokasyonu (T1 GT1 ÖK4 Km 0+142.35'de yer almaktadır)

6.2.1 Sarayköy tünelinde uzman sistem (USTA) uygulaması

Sarayköy tüneli Km 0+142.35 ÖK 4 noktasından 29.07.2005 ile 07.11.2005 tarihleri arasında ölçülen deformasyon değerleri USTA'ya kaydedilip, değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- USTA ölçümlerin 45. gününde (12.09.2005) 40.8 mm'lik deplasman farkı (12 Eylül ile bir önceki okuma olan 31 Ağustos günleri arasındaki değişim) ölçerek ilk uyarıyı vermiştir. Gerçekten de bu tarihlerde okunan değerler sırasıyla 56.7 mm ve 97.5 mm'dir. Bu tarihten sonra 8 Ekim 2005'e kadar deplasman sürekli olarak artmış ve nihayetinde durmuştur.

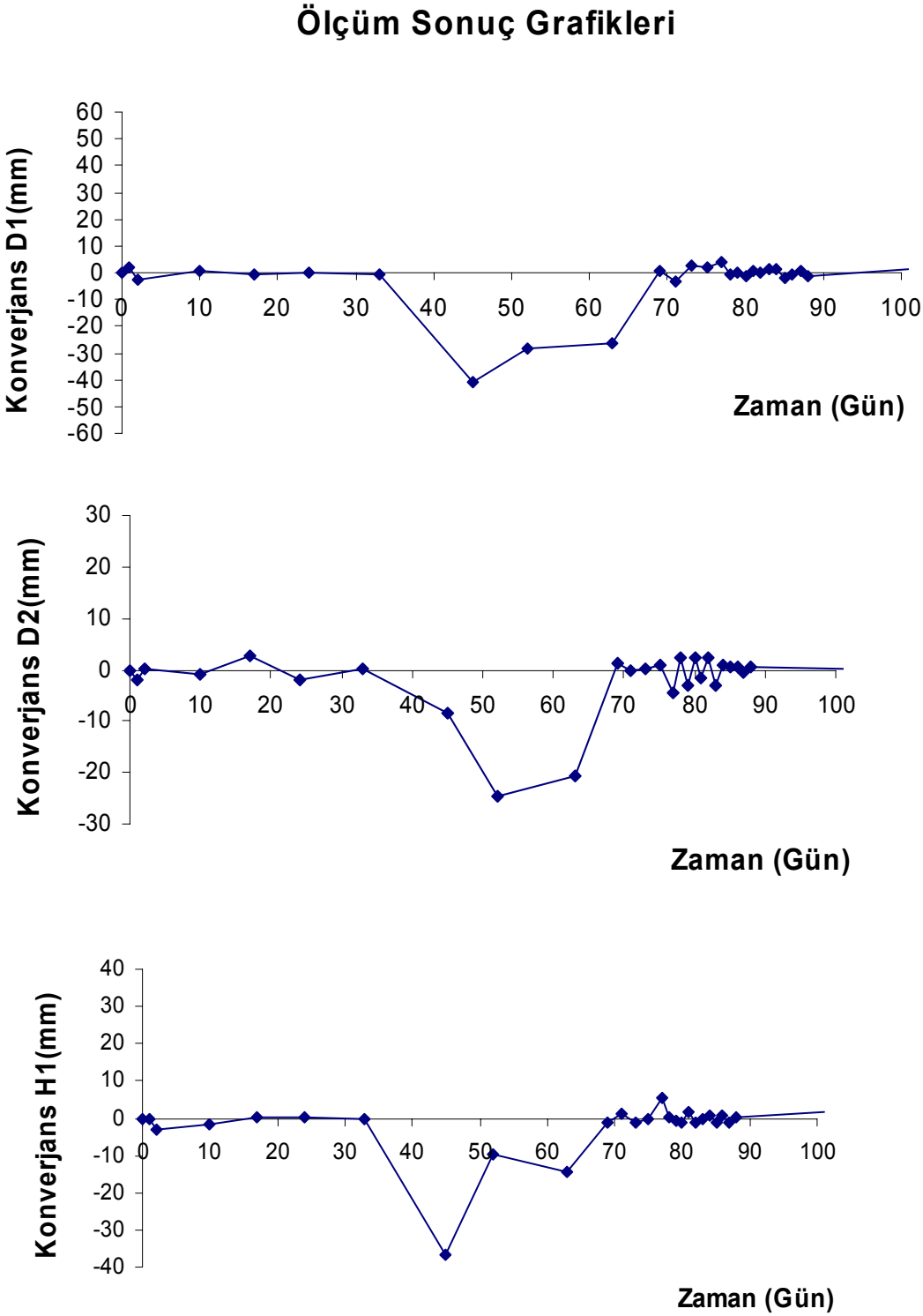
Şekil 6.28'de USTA konverjans ölçüm penceresi gösterilmiştir;



Tarih	Nokta	SEMT	MES	Y	X	Z	Konverjan (m)	Fark (m
06.10.2005	L1	0	0	-5	-104	-190	151.5	-0.8
06.10.2005	L2	0	0	-13	10	-79	80.7	-1.1
06.10.2005	LR	0	0	-13	-51	-110	121.9	1
08.10.2005	L1	0	0	-6	-110	-189	155	3.5
08.10.2005	L2	0	0	-8	16	-79	81	0.3
08.10.2005	LR	0	0	-19	-48	-109	120.6	-1.3
10.10.2005	L1	0	0	-3	-105	-190	152.1	-2.9
10.10.2005	L2	0	0	-11	13	-79	80.8	-0.2
10.10.2005	LR	0	0	-17	-49	-110	121.6	1
12.10.2005	L1	0	0	-6	-102	-189	150.1	-2
12.10.2005	L2	0	0	-7	10	-79	79.9	-0.9
12.10.2005	LR	0	0	-17	-49	-110	121.6	0
14.10.2005	L1	0	0	-5	-99	-192	145.9	-4.2
14.10.2005	L2	0	0	-12	16	-82	84.4	4.5
14.10.2005	LR	0	0	-18	-42	-107	116.3	-5.3
15.10.2005	L1	0	0	-9	-101	-192	146.7	0.8

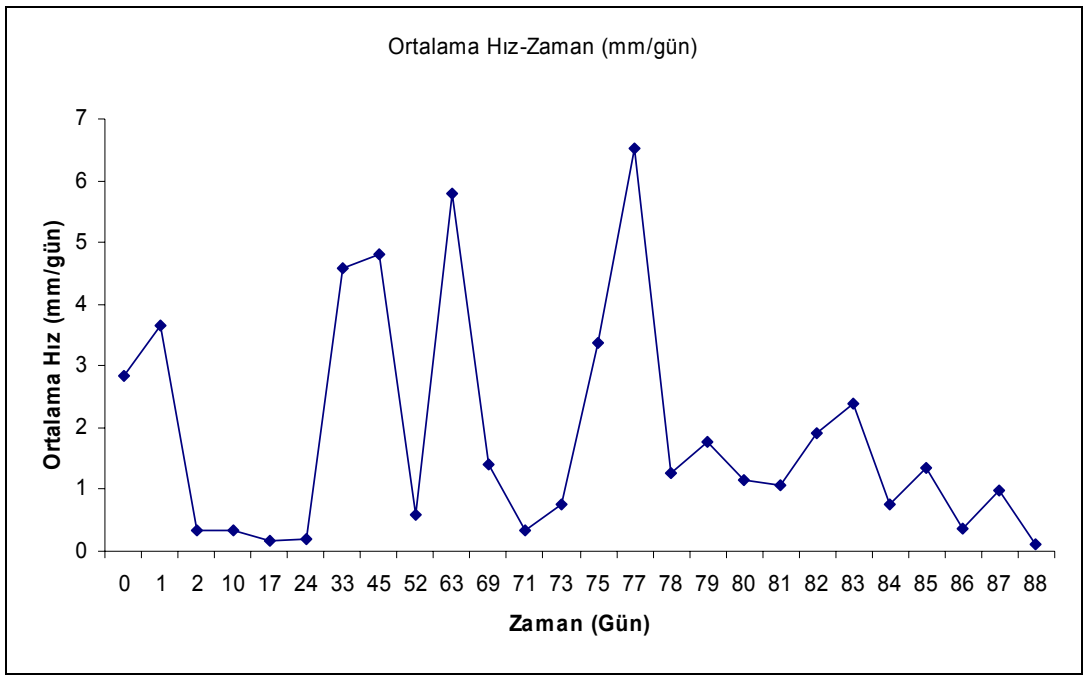
Şekil 6.28: Sarayköy tüneli için USTA konverjans penceresi

USTA'dan elde edilen deplasman ölçüm grafikleri ise aşağıdaki gibidir. Ölçüm grafiklerinde de 45. gün yüksek deplasmanlar meydana gelmiş, zamanla azalarak durma noktasına gelinmiştir.

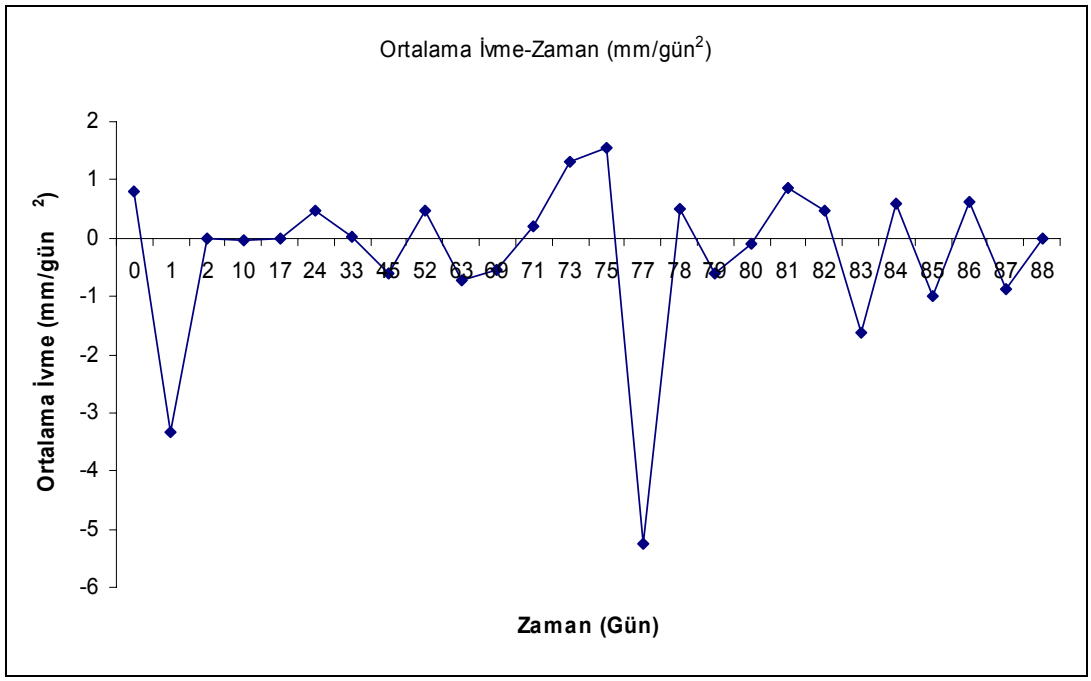


Şekil 6.29: Sarayköy tüneli USTA deplasman-zaman eğrileri (D1 tünel sol omuzu, D2 tünel sağ omuzu ve H1 tünel tabanında meydana gelen deplasmanlar

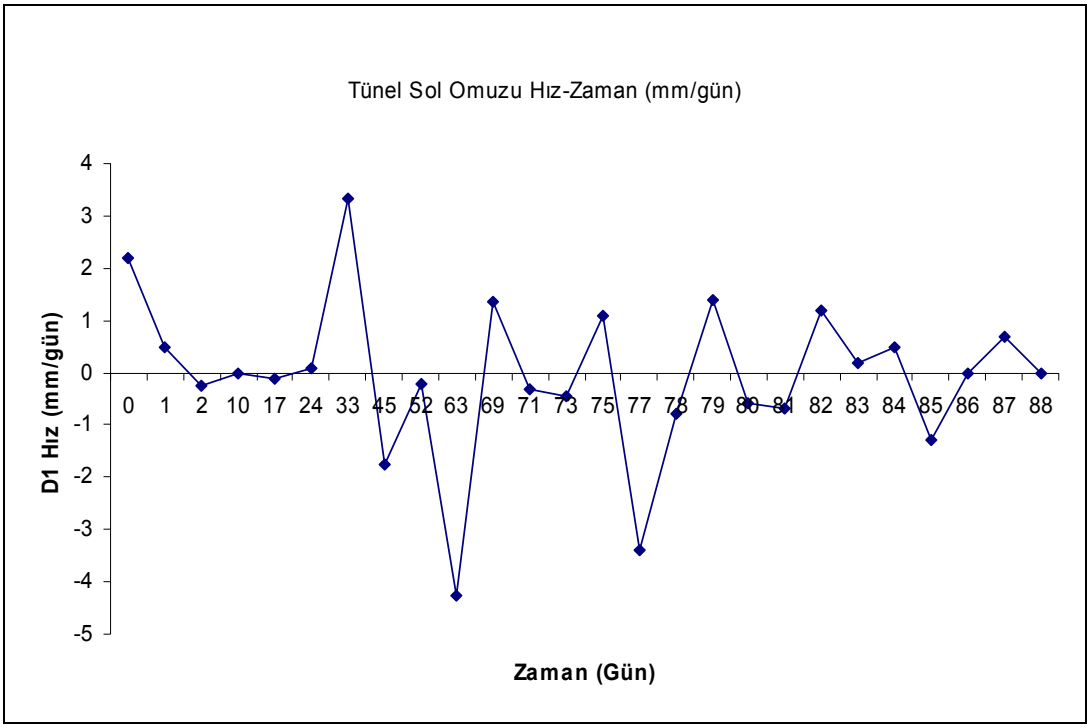
Ölçümler için elde edilen deplasman hız ve ivme – zaman eğrileri ise aşağıdaki gibidir;



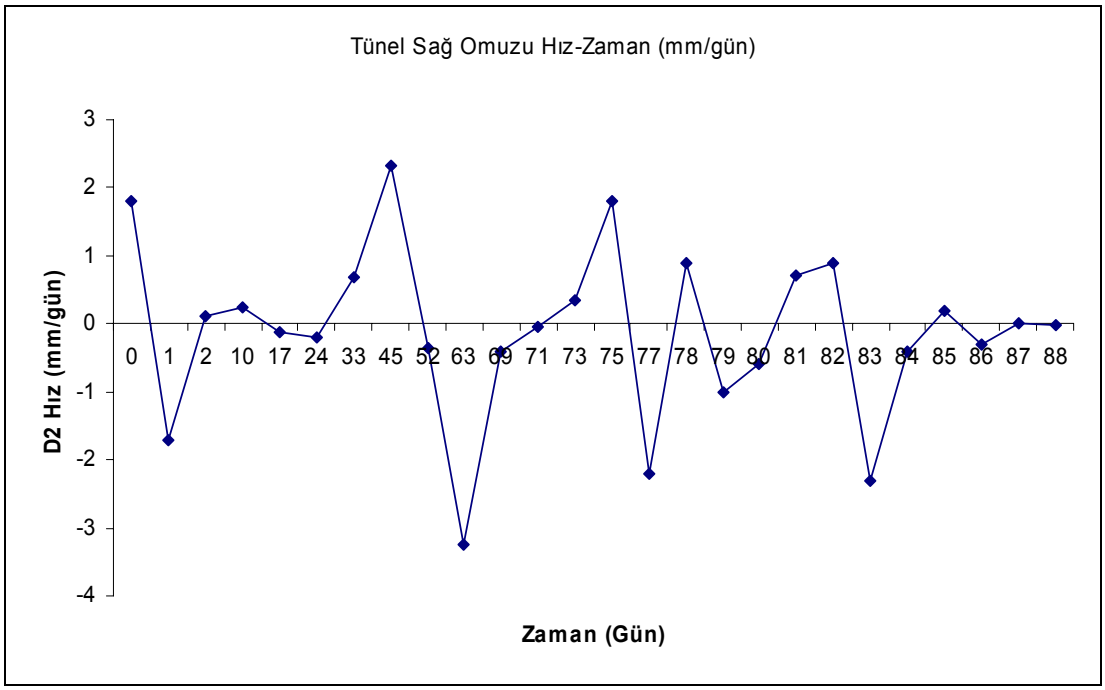
Şekil 6.30: Deplasman ortalama hız-zaman eğrisi



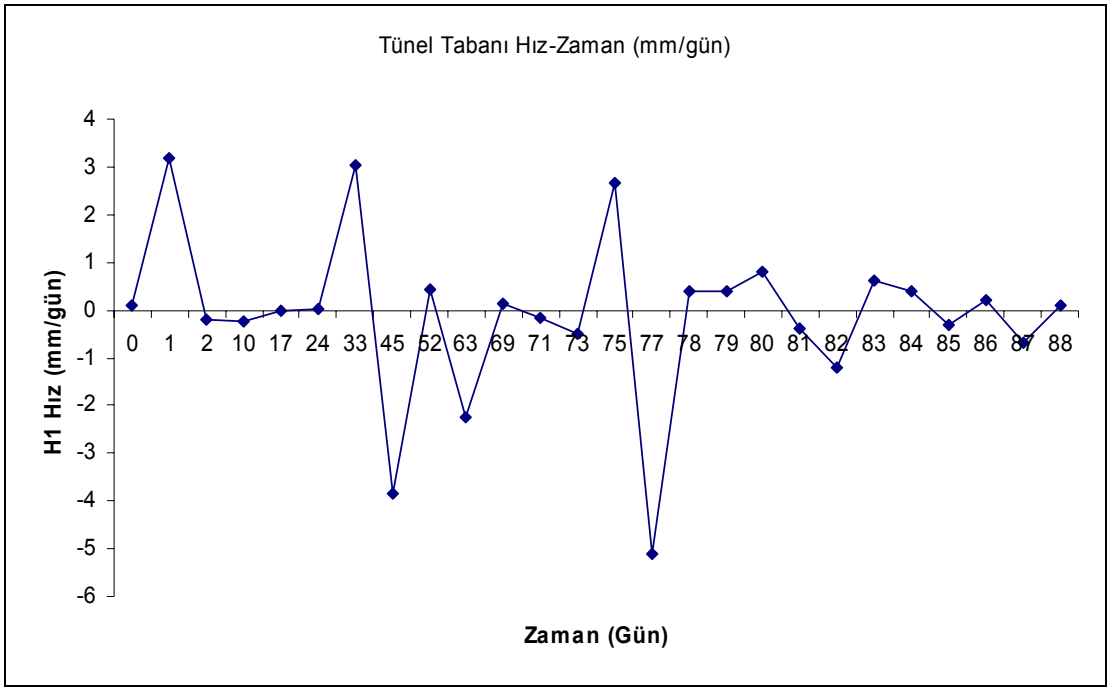
Şekil 6.31: Deplasman ortalama ivme-zaman eğrisi



Şekil 6.32: Tünel sol omuzu deplasman - zaman eğrisi



Şekil 6.33: Tünel sağ omuzu deplasman – zaman eğrisi



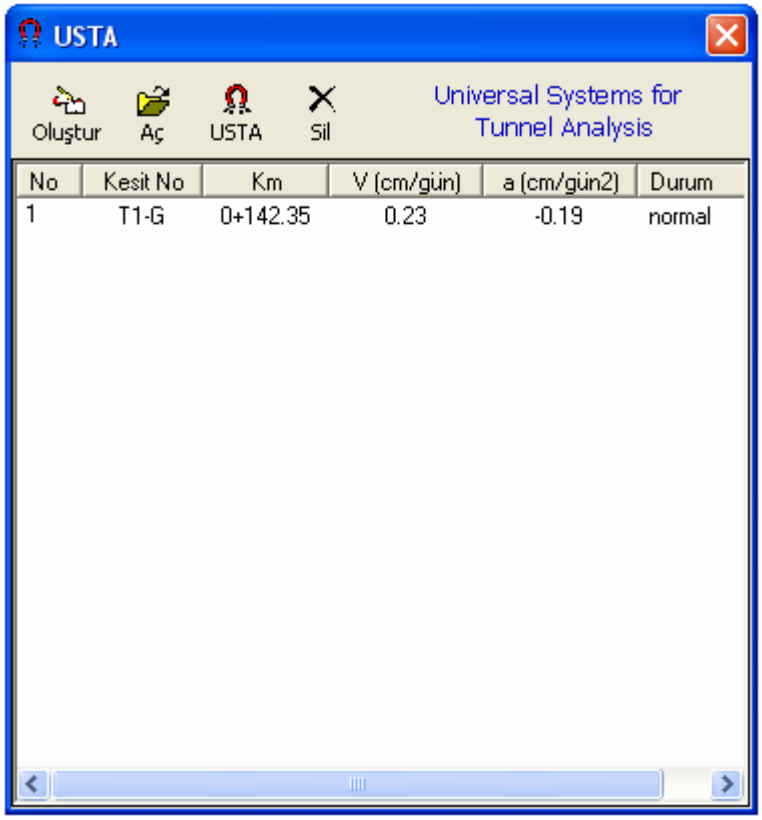
Şekil 6.34: Tünel Tabanı Hız – Zaman Eğrisi

Hız-ivme zaman eğrileri incelendiğinde deplasman hızının, ölçümlerin 24. günden 33. güne geçişten itibaren büyük oranda değişmeye başladığı görülmektedir. Ölçümlerin 33. günü 31.08.2005 tarihi olup, bu tarihte deplasmanlar tünel tavanında 59.8 mm'den 96.5 mm'ye, sol duvarda ise 67 mm'den 150 mm'ye çıkmıştır.

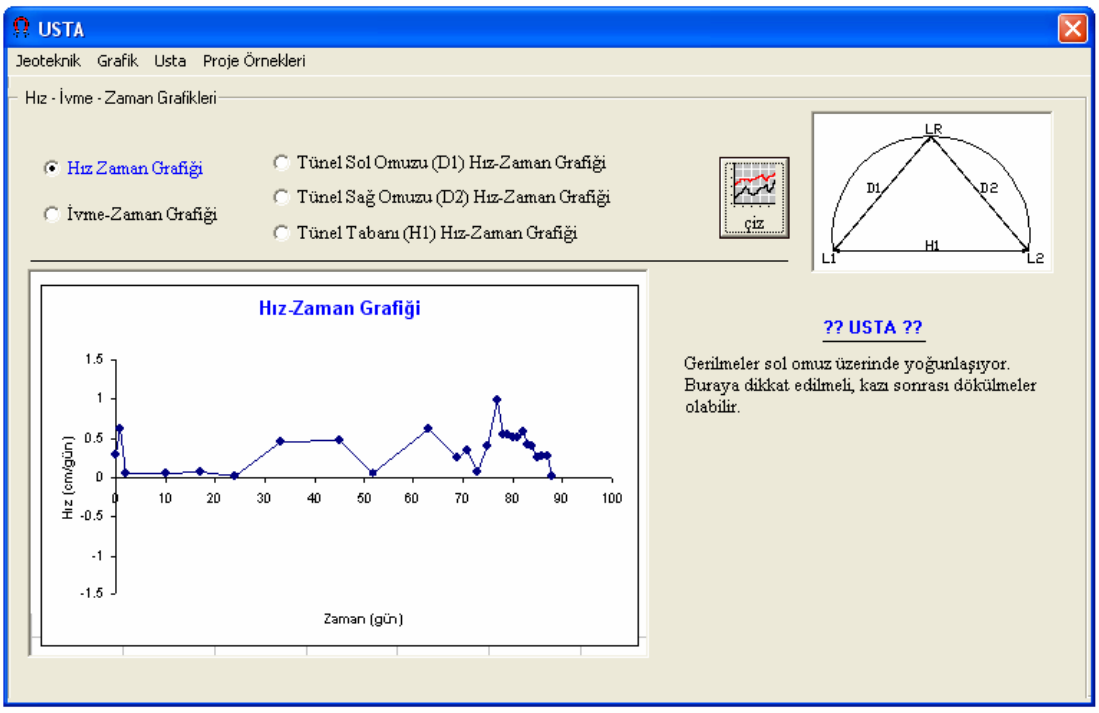
Ölçümlerin 75. günü olan 14.10.2005 tarihinden itibaren ise deplasmanlar kontrol altına alınmaya başlamakta, dolayısıyla hız ve ivme yeniden azalmaktadır. Ölçümlerin son günlerinde ise deplasman ortalama hızı 0.23 mm/gün ve ivmesi -0.19 mm/gün^2 hesaplanarak durum "normal" olarak belirtilmiştir.

USTA yaptığı değerlendirme sonucunda; "Gerilmeler sol omuz üzerinde yoğunlaşıyor, buraya dikkat edilmeli, kazı sonrası dökülmeler olabilir" uyarısını vermiştir. Gerçekten de maksimum deplasmanlar tünelin sol duvarında, Şekil 6.26'ye göre "B" noktasında oluşmuştur.

Şekil 6.35'de ve 6.36'da USTA konverjans izleme penceresi ve deplasman hız-zaman ekranı gösterilmiştir;



Şekil 6.35: USTA konverjans izleme ekranı



Şekil 6.36: USTA deplasman hız-zaman penceresi

USTA ile mühendislik jeolojisi değerlendirmesi yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Süreksizliklerin yönelimi nedeniyle tünelde kazı sonrası dökülmeler olabilir
- İlerleme adımları kısaltılmalı, aşırı sökülme olması durumunda ön süren kullanılmalı
- Heyelan stabilitesi ölçümlerle kontrol edilmeli, sağlamlaştırma önlemleri alınmalı
- Tünelde su sızıntısı önlenmeli
- Destekleme vakit geçirilmeden yapılmalı
- Deformasyonlar kayaçların gevşemelerinden kaynaklanmaktadır,
- Taban kabarması varsa bu kayaçların su alınca şişmesinden veya temel üzerine fazla yük binmesinden kaynaklanıyor olabilir, temel sistemi gözden geçirilmeli
- Kayaçlarda ayrışma yoğun ise drenaj sistemi gözden geçirilmelidir

Emay teknik elemanlarının, yapımcı firma mühendislerinin, müşavir mühendislerin ve idarenin katılımı ile yapılan yerinde incelemelerde alınan kararlardan;

- Tünellerde ve ayak betonlarında ölçümlerin devam edilmesi, ayak betonlarında deformasyonların artması halinde gergi uygulanması
- Donatıları yerleştirilmiş olan ayak betonlarının dökülmesi, invert betonlarının tamamlanması
- Yüzey ölçümlerinin sürdürülmesi

maddeleri ile uyum içerisindedir. Benzer şekilde Sarayköy tünelinde kayaçların aşırı ayrışmış olmaları, tektonizmadan etkilenmiş olmaları, yeraltı suyunun etkili oluşu ve kayaçların kazı sonrası kolayca gevşedikleri de projelendirme aşamalarında belirlenen özelliklerle aynıdır.

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yeraltı kaya yapıları yerkabuğu içinde herhangi bir boşluğun açılmasından sonra bu boşluğu çevreleyen ana kayadan oluşan, mühendislik açısından yeterli ve güvenli taşıyıcı sistemlerdir. Bu sistemlerin güvenli ve yeterli olarak oluşturulması, kullanılacak olan destekleme sistemlerinin tür ve miktarını, dolayısıyla yeraltı yapısını etkilemektedir. Güvenli olarak inşa edilmeyen yeraltı kaya yapılarında aşırı deformasyonlar ile karşılaşılmakta, bu ise ek sağlamlaştırma veya iyileştirme çalışmalarını zorunlu kıldığı için maliyetleri arttırmakta, en kötü durumda göçükler olabilmekte, mal ve can kayıpları yaşanabilmektedir.

Yeraltı kaya yapılarının güvenli ve yeterli olarak oluşturulması, bu sistemlerin sürekli olarak denetlenmesi ile mümkündür. Yapım sırasında ayna kesitlerinden sağlanan mühendislik jeolojisi verilerinin yorumlanması, yapılan konverjans ve ekstansometre ölçümleri gibi jeoteknik çalışmalarla kayaçtaki yer değiştirmelerin izlenmesi, güvenli bir inşaatın en temel gerekleridir. Tüm bu çalışmalar yeraltı kaya yapılarının denetim çalışmalarını oluşturmaktadır. Yapılan gözlemlerde bir sorunla karşılaşılması durumunda alınacak önlemlerin belirlenmesi için yapılan çalışmalara ise yönlendirme çalışmaları adı verilmektedir.

Uzman sistemler, konusunda uzman olan insanların düşünme yöntemlerini taklit ederek, problemler için çözüm üreten bilgisayar programlarıdır. Endüstri, sağlık gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılan bu yazılımlar, sorunların nedenlerinin tespitinde ve çözülmesinde uzmanlara yardımcı olmakta, ya da uzmanın bulunamadığı durumlarda yol gösterici olabilmektedirler.

Yeraltı yapıları mühendisliği açısından bakıldığında, uzman sistemlerin genellikle projelendirme çalışmaları sırasında stabilite analizleri için kullanıldığı görülmektedir. Yapım sırasında inşaatı denetleyen ve yönlendiren bir uzman sistem ise bulunmamaktadır.

Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi sırasında kullanılacak bir uzman sistem aşağıdaki kolaylıkları sağlamaktadır;

- Tünel inşaatları sırasında çok sayıda veri (ayna kesitleri, ölçümler vb) elde edilmektedir. Bu veriler dosyalanarak arşivlendirilmektedir. Bunlar çok yer kapladığı gibi, ihtiyaç duyulduğunda tüm verilerin değerlendirilmesi kolay olmamaktadır. Uzman sistemler bu verileri bilgisayar ortamına taşıdığı için erişim ve saklama kolaylığı getirmekte, paylaşım imkanı sunmaktadır.

- Yapılan ölçümlerin ve ayna kesitlerinin birbirleri ile ilişkilendirilerek her ilerleme adımı için yorumlanması tecrübe gerektiren, zahmetli bir iştir. Uzman sistem bunları yaparak mühendise yardımcı olacaktır.

- Yapım sırasında sürekli olarak bir uzmanın bulundurulması her zaman mümkün olamamaktadır. Uzman sistemler bu eksikliği gidermektedir.

- İnsan çeşitli nedenlerden ötürü hatalar yapabilir (bilgi eksikliği, dikkatsizlik, yorumlama hatası, problemde çok fazla değişkenin olması gibi). Uzman sistemlerin kapasiteleri bu bakımdan insana kıyasla daha fazladır.

- Bir problemle karşılaşılması durumunda, farklı projelerde karşılaşılan benzer durumlarda alınan önlemler her zaman için bir yol gösterici olmaktadır. Uzman sistemlerde bulunabilen proje kütüphaneleri bu bilgilere erişimi kolaylaştırmaktadır.

- Uzman sistemler ürettikleri bilgileri rapor olarak kullanıcıya sunabilmekte, bu bilgiyi nasıl elde ettiğini açıklayabilmektedir. Bu bakımdan yazılımlar mühendise yol gösterici olabilmektedirler.

Tezin konusu “Yeraltı Kaya Yapılarının Denetimi ve Yönlendirilmesinde Uzman Sistem Oluşturulması” olup, hedefi tünel açımı sırasında, tünelin olası sorunlarını öngörerek gereken uyarı ve önerileri yapabilen bir “tünel yönetim ve denetim tekniğini” arazi gözlem ve ölçümleriyle, kazı ve destekleme önlem-işlemlerini dikkate alarak oluşturmaktır. Bu çalışmada, amaca yönelik kararları (çıkarımları)

belirleyen ve denetleyen etmen, yerdeğiştirme ivmesinin zamana bağlı olarak yerinde ölçülen deplasmanlara göre saptanmasıdır.

Yukarıda açıklanan özellikleri sağlayan bir uzman sistem örnek olarak hazırlanmıştır. Yazılım Visual Basic 6.0 programla dili kullanılarak geliştirilmiş ve veri tabanı 7 farklı Access dosyasından oluşturulmuştur. Yazılıma "Uzman Sistemle Tünel Analizi" kelimelerinin baş harfleri olan USTA ismi verilmiştir. Program raporları Excel ve Word formatında verdiği için Ms Office programları ile birlikte çalışmaktadır.

Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesinde uzman sistemlerin gerçekte ne kadar yararlı olabileceklerinin incelenmesi amacıyla USTA, Nefise Akçelik tüneli ve Sarayköy tüneli üzerinde denenmiştir.

Nefise Akçelik tüneli Karadeniz sahil yolu projesi kapsamında inşa edilen, 3776 metre uzunluğunda çift tüplü bir Karayolu tünelidir. Tünelin maksimum derinliğe (375 metre) ulaştığı Km 10+714.50'de yapılan konverjans ölçümlerinde, tünelde 14 cm'ye varan deplasmanlar ölçülmüştür. Yapılan tünel sağlamlaştırma projesi çalışmalarında, deplasmanların nedenleri olarak; tünelin ilgili kesimde bir vadi altında yer alması, çevresinde kırıkların ve fayların bulunması, yeraltı suyu dolaşımının serbestliği ile kayaçlardaki ayrışmalar gösterilmiştir.

Sorunlu kesim olarak da adlandırılan bu kesimden sağlanan ayna kesitleri, mühendislik jeolojisi verileri ve konverjans ölçüm sonuçları USTA veri tabanına kaydedilmiştir. USTA, sağlanan verileri kullanarak değerlendirmeler yapmış, deplasman hız ve ivmelerini hesaplamıştır. Yapılan değerlendirmede USTA ilk ölçüm günlerinden itibaren deplasman değerlerindeki değişimi fark ederek, uyarı vermiştir. Deplasmanların asıl nedeni olarak vadiden kaynaklanan fayları göstermiş, çevre kayaçlarda belirgin ayrışmalar olduğu konusunda uyarmıştır. USTA çözüm önerisi olarak ilerleme adımlarının kısaltılmasını, sökülmelerin sol duvarda olabileceğini (ayna kesitlerine göre inşaatta sökülmeler sol duvarda olmuştur), bunları engellemek için ön süren kullanılmasını ve sağlamlaştırma önlemlerinin alınması gerektiğini belirtmiştir. USTA sağlamlaştırma projesinde kullanılmak üzere kayaçların yerinde jeomekanik büyüklüklerini de hesaplamıştır. Hesaplanan değerler, sağlamlaştırma projesi kapsamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, geri analiz

yöntemi ile hesaplanan değerler ile de uyumludur (USTA kohezyonu c_{ort} = 1.135 MPa olarak hesaplamıştır, projede c = 1,2 MPa olarak belirlemiştir. USTA içsel sürtünme açısını $\varphi = 30^0$ olarak hesaplamış, projede $\varphi = 34^0$ olarak belirlemiştir). Elde edilen sonuçlara göre, Nefise Akçelik tünelinde USTA ya da benzeri bir uzman sistem kullanılmış olsaydı, oluşacak sorunlar önceden belirlenebilecekti. Bu ise zaman ve maliyet kazancı anlamına gelmektedir.

Sarayköy tüneli de Karadeniz Sahil Yolu projesi kapsamında inşa edilen çift tüplü ve bir tüpü yaklaşık 1650 metre uzunluğunda karayolu tünelidir. Çok zayıf dayanımlı, çok ayrışmış volkanik kayaçlar içerisinde inşa edilen bu tünellerin portal bölgeleri eski heyelan sahasının altında kalmaktadır. Tünellerin ara portalinde yapılan imalatlar sırasında 15.5 cm'ye varan deplasmanlarla karşılaşılmıştır. Deplasmanların durdurulması için tünellerin imalat sırasında birbirlerine olan mesafeleri arttırılmış, iç kaplama uygulama zamanı hızlandırılmış, ayak betonlarında deplasmanların sürmesi halinde gergi uygulanmasına ve ölçümlerin yüzeyde ve tünel içerisinde sürdürülmesine karar verilmiştir. Alınan bu önlemler yeterli olmuş, takip eden günlerde deplasmanlar kontrol altına alınabilmiştir.

Sarayköy tünelinde maksimum deplasmanların ölçüldüğü kesimden sağlanan konverjans ölçümleri USTA veri tabanına kaydedilmiştir. USTA deplasmanların artmaya başladığı günlerde uyarı vermeye başlamış, gerçek ölçümlere uygun olarak deplasman-zaman eğrilerini oluşturmuştur. Problemin nedenleri analiz edildiğinde ise USTA tünelde süreksizliklerden kaynaklanan sökülmelerin yaşanacağını, imalat sırasında ön süren kullanılmasını, heyelan sahasının ölçümlerle kontrol edilmesini, tünele su sızıntısının önlenmesini, desteklemelerin vakit geçirilmeden yapılmasını, kayaçların gevşediğini ve bunun önlenmesi gerektiğini, taban kabarmasının olabileceğini ve kayaçlarda aşırı ayrışmaya rastladığını belirtmiştir. Sarayköy tünelinde gerçekten de aşırı ayrışmış kayaçlar içerisinden su geliri ile karşılaşılmış, kayaçların gevşemesinden kaynaklanan deplasmanlar olmuş, ayak betonlarında deplasmanlarla karşılaşılma ihtimali doğmuş, sonucunda da iç kaplamanın vakit geçirilmeden uygulanması zorunlu olmuştur. USTA yorumlarında tünelin sol duvarında gerilmelerin biriktiğini söylemiştir ki deplasman ölçümlerinin maksimum değerine ulaştığı yer tünelin sol duvarıdır.

Elde edilen bu sonuç da bir uzman sistemin bu tür problemlerin yaşanmasını önceden fark edip, mühendisi uyarabileceğini doğrulamaktadır. USTA, yeraltı kaya yapılarının denetlenmesi ve yönlendirilmesi çalışmaları için iyi bir örnek uzman sistemdir. Yazılımın sahip olduğu veri tabanı geliştirilirse ve portal inşaatları için ek yazılımlar hazırlanırsa daha da faydalı olabilecektir. Yazılımın farklı dillerde versiyonlarının hazırlanması, uluslararası tünel projelerinde kullanımına da olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] **Zabel F., Hempel T.** 2000. Expertensysteme, *Seminar zur Didaktik der Informatik,* Greifswald, 1-15.

[2] **Eder J.,** 2003. Knowledge Engineering V. 4.0, *Die Alpen-Adria Universität Klagenfurt, Avusturya Ders Notları,* 4.1-4.13

[3] **Dilger W.**, 2004/2005. Wissensrepräsentation und Problemlösung, *Vorlesung an der Technischen Universität Chemnitz,* 33

[4] **Hartmann, D.**, 2003. Wissenbasierte Methoden, *Skripte aus dem Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen, Bochum-Ruhr Universität,* 46-52

[5] **Vardar M.,** 2004. Kaya mekaniği ders notları, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı*

[6] **Schubert W.,** 2002. Grundlagen der New Austrian Tunnelling Method, *Technische Universität Graz Institute für Felsmechanik und Tunnelbau,* 9-21

[7] **Vardar M.,** 1977**.** Zeiteinfluss auf das Bruchverhalten des Gebirges in der Umgebung von Tunneln**,** *Fakultät für Bauingenieur-und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe (TH),* 1-26

[8] **Vardar M.,** 1985. Sürtünmeli çelik bağların yeni Avusturya tünel açma yönteminde kullanilabilme olanaklari *Kaya Mekaniği Bülteni,* **3.** 35-44

[9] **Vardar M., Koçak C., Tokgözoğlu F.,** 1998. Bolu tünelinde zamana bağlı deformasyonların kökeni ve gelişimine ilişkin örneklemeler, *4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı,* Zonguldak 22-23 Ekim, 1-7

[10] **Müller L.-Salzburg, Fecker E.,** 1963. Fundamental ideas and principles of the "*New Austrian Tunelling Method*", 1-10

[11] **Vardar M.**, 2005. Time dependent stability problems in tunnels and time-dependent behavior of the rock mass, *ITA / AITES Training course tunnel engineering*, 12-13

[12] **Vardar M.**, 1994. Metro tünellerinde duraylığın korunması ve sağlanması, sağlamlaştırma-destekleme-iyileştirme, *T.M.M.O.B. Maden Mühendisleri Odası Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1.Sempozyumu*, 41-51

[13] **Vardar M., Yavuz V.**, 2004. Uygulamalı Jeoloji Ders Notları, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı*

[14] **Arıoğlu E.**, 1995. Kaya Mekaniği Ders Notları*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü,* 1-3

[15] **Barton N**., 1978. Recent experiences with the Q-System of tunnel support design, the shear strength of rock and rock joints, the shear strength of rock joints in theory and practise, *Norwegian Geotechnical Institute,* 1-11

[16] **Bieniawski Z.T**., 1984. Rock mechanics design in mining and tunneling*, Balkema Publications,* 112-120

[17] **K.G.M.,** 2005. NATM uygulamalı yeraltı tünel işleri teknik şartnamesi**,** *T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü,* 2/5

[18] **Vardar M.**, 1999-2000. Kaya Yapıları Mekaniği Yüksek Lisans Ders Notları

[19] **Vardar M.**, 1988. Geologie, Felsmechanik, Felsbau Festkolloqium, L. Müller Salzburg, *Trans Tech. Publication P. Egger, E. Fecker, G. Reik*, 95-113

[20] **Hoek E.**, 2005. Rock Engineering, *Course Notes*,161 – 188

[21] **Vardar M., Şans G., Koçak B., Karaoğlan H.,** 2004. Engineering geological and geomechanical reasons for time dependent excessive deformations on Hapan tunnel / Black Sea Coastal Road Project, *Eurock 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Schubert (ed)*

[22] **Vardar M.**, 2004. Karadeniz Sahil Yolu, Bolaman Perşembe arası, Nefise Akçelik tüneli oluşan aşırı deformasyon ve taban kabarmaları şeklindeki duraysızlıklara ilişkin rapor, Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şti. teknik rapor, Istanbul, Türkiye.

[23] **Vardar M.**, 2001. Karadeniz Sahil Yolu, İyidere-Çayeli kesimi Sarayköy tüneli ara portal projelerine ilişkin değerlendirme raporu, Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şti. teknik rapor, Istanbul, Türkiye.

[24] **Vardar M.**, 2002. Doppelröhriger Autobahntunnel Sarayköy mit 4 Portalen an Rutschhängen Probleme und deren Beherschung, *2. Tiroler Geotechnik und Tunnelbau Tag*, *Innsbruck*

ÖZGEÇMİŞ

12 Haziran 1978 yılında Almanya'da doğan Bülent KOÇAK ilkokulu Almanya'da Blankensteinschule'de ve Nazilli Beşeylül İlköğretim okulunda okudu. 1992 yılında Nazilli Mehmet Akif Ersoy ortaokulundan ve 1995 yılında Nazilli lisesinden mezun olduktan sonra aynı yıl İTÜ Maden Mühendisliği bölümünde okumaya hak kazandı. Bir yıllık İngilizce hazırlık sınıfından sonra başladığı lisans eğitimini 2000 yılında tamamladı. Lisans öğrenciliği sırasında DAAD ve IAESTE bursları ile Almanya Ruhrkohle AG taşkömürü işletmesinde ve Avusturya Blisadona tünelinde stajlarını tamamladı. 2000 yılında başladığı İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Kazı ve Mekanizasyonu yüksek lisans programından, 2002 yılında mezun olan Bülent KOÇAK, aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü jeolojisi mühendisliği doktora programına kayıt oldu. Bülent KOÇAK 2001 yılından bu yana EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret limited şirketinde tünel ve geoteknik mühendisi olarak görev yapmakta olup, yüksek mimar Filiz KOÇAK ile evlidir.