

Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesinde uzman sistem oluşturulması

Bülent KOÇAK*, Mahir VARDAR

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yeraltı kaya yapısı yer kabuğu 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 çalışma gerektiren denetim çalışmaları yapılmadığında ise tünelde deplasmanlarla karşılaşılabilen, göçükler olabilmektedir. Uzman sistemler en genel anlamıyla insanın düşünme yöntemini ve mantığını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi çalışmaları sırasında kullanılacak bir uzman sistem yüzlerce verinin arşivlenmesini sağlayacak, verileri birbirleri ile ilişkilendirecek ve deplasmanları her ölçüm noktası için sürekli olarak izleyecektir. Yazılım uzman sistemlerinin yapısı gereği bir problem olması durumunda problemin nedenlerini ortaya koyacak ve mühendise çözümü rapor edecektir. Çalışmanın amacı; yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesinde uzman sistemlerin uygulanabilirliğinin incelenmesi, örnek bir uzman sistem için algoritmanın kurulması ve bir uzman sistemin hazırlanmasıdır. Uzman Sistem ile Tünel Analizi (USTA) adı verilen yazılım Karadeniz Sahil Yolu Projesi kapsamında inşa edilen Nefise Akçelik tüneline ve Sarayköy tüneline uygulanmış ve uzman sistemin denetim ve yönlendirme çalışmalarındaki başarısı ile sağlayacağı faydalar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uzman sistem, yeraltı kaya yapısı, tünel, geoteknik, mühendislik jeolojisi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Bülent KOÇAK. kocakb@itu.edu.tr; Tel: (216) 492 19 40

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Yeraltı Kaya Yapılarının Denetimi ve Yönlendirilmesinde Uzman Sistem Oluşturulması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 10.11.2006 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 21.12.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.02.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Building an expert system for supervising and management of underground rock structures

Extended abstract

Underground rock structure is the surrounding rock, which is safe and sufficient for engineering, of an underground opening. Defining the rock mass properties and observing the changes continuously is the supervising works and describing the methodology and process when needed is the management of underground rock structures constructions.

In modern tunneling approaches, works which are done to define the rock mass properties, can be summarized as following: definition of geological conditions of tunnel face after excavation stages, definition of rock mass quality and definition of rock support system according to obtained data. The changes of rock properties are observed by geotechnical measurements. If needed, horizontal drillings are applied to determine the rock behavior along the tunnel. The data are evaluated and compared to the design foresights. This information is used to give a decision if displacements occur in the tunnel and underground constructions.

Supervising and control works are performed by experienced engineers. If the steps described above are not applied fastidiously, deformation or even subsidence problems may occur during construction. To prevent this kind of problems, benefiting from computer technology could supply both economical and effective solution.

Expert systems can be defined as computer programs, which imitate the thinking methodology and logic of human being. Because of being prepared for a specific subject, they are defined as experts. Using these programs in underground rock structure management works would facilitate the supervision and guidance. The expert system would be able to save hundreds of data, would evaluate them, and before a displacement problem occurs, it would warn the engineer, find out the reason of the problem and recommend a solution.

Expert systems are having a high capacity to save different kind of projects at the same time. This would allow working on different construction sides simultaneously.

The aim of the work is building an expert system for the supervising and management works of underground rock structures. The applicability of expert systems to tunnel management works are discussed by applying a prototype expert system to Nefise Akçelik Tunnel and Sarayköy tunnel, which constructed according to Black Sea Highway Project.

An expert system, called USTA (Uzman Sistem ile Tünel Analizi or Universal Systems for Tunnel Analysis as well) is build by using Visual Basic 6.0. The program uses 7 Access files as knowledge base and data bank. It is possible to save 65 different tunnel projects, having a length of 1000 meters. For each excavation step, the user can save 6 photos, which are converted and saved to the data bank to avoid deletion from the disc. USTA uses Ms Excel and Ms Word for reporting and graphs. This makes it easier to share or save the information. What's more; the program has a sample project library, which can be improved by adding new projects by users. This makes it possible to get solutions or ideas from similar projects. It is important to note that USTA is the first prototype expert system, which is prepared for underground rock structures managements. There are many expert systems around the world, but they are commonly used during design phases. USTA is applied to two tunnel projects, constructed in Black Sea Region in Turkey. Both tunnels encountered to huge displacement problems, up to 12 – 14 cm. Support and improvement works have been done by EMAY Int. Eng. Cons. and Trd. Co. Ltd. with cooperation of IT., Engineering Geology division to reduce the displacements. The obtained excavation and geotechnical measurement data were saved to USTA to find out its effectiveness. As a result; USTA was able to warn the user at the right moment when displacement started to occur. The program calculated the displacement velocity and acceleration. The reasoning of the displacements, reported by USTA were very similar to the displacement cautions, defined during design phases. The program recommended in-situ geomechanical parameters for re-calculation phases of support systems. The in-situ geomechanical parameters were very close to the parameters calculated by FEM back-analysis.

Keywords: *Expert system, underground rock structure, tunnel, geotechnics, engineering geology*

Giriş

Yapay zeka ve uzman sistemler

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 davranışlardır. Bu nedenle bilgisayarların da benzer şekilde zeki olmaları beklenmektedir. Yapay zeka kullanılarak hazırlanan en yaygın yazılımlar strateji oyunları (satranç, dama) ve bir dili anlayıp, konuşabilen programlardır. Burada temel olan, problemin çözümü için gerekli algoritmanın oluşturulmasıdır.

Zeki insanlar alışlagelmişin dışında yeni bir durumla karşılaştıklarında seçenekleri görebilmekte, uyum sağlayabilmekte ve oluşabilen sorunlara çözümler üretebilmektedir. Bunun için ise kombinasyonları ve olasılıkları değerlendirilmektedirler. Yapay zekada ise amaç, makinelerin de benzer şekilde davranmalarının sağlanmasıdır. Burada makineler yazılımlarında var olan kodları teker teker sorgulayarak çözüm üretmekten çok, uzman bir insan gibi davranarak ona benzeyen yeteneklere sahip olacaklardır.

Uzman sistemler; belirli bir konuda bilgiyi toplayan ve depolayan, bunları işleyen, seçenekler oluşturan ve sonuçlar elde eden, belirli sorunlar için çözümler öneren yazılımlardır. Buna göre; uzman sistemler çok kapsamlı veri tabanlarına sahiptirler, bu bilgileri uygun yöntemler kullanarak değerlendirmekte, bunlardan yeni bir bilgi elde etmekte, kendisine sunulan problemi çözmekte ve çözüm için kullandığı yöntemi göstermektedirler.

Uzman sistemler veri tabanı yazılımları olmayıp, bilgi, sonuç ve çözüm üretebilen öğrenilebilir yazılımlardır.

Sürekli olarak veri tabanlarına bilgi eklendiği için kendilerini geliştirmektedirler. Yazılımlar çözüm üretebildikleri ve sonuca nasıl ulaştıklarını açıklayabildikleri için kendilerini açıklaya-

bilme özelliğine de sahiptirler (Zabel ve Hempel, 2000).

Uzman sistemlerin uygulanabileceği konular genel olarak iki kümede toplanabilir (Dilger, 2004; Hartmann, 2003);

- Yüksek oranda belirsizlikler ve değişkenler içeren, çok sayıda kombinasyon kurulmasını gerektiren konular. Bir çözüme ulaşmak için zaman ve uygulama alanı bulmak kısıtlıdır.
- Kesin bir matematik model kurulması güç olan, Bunlar genellikle uzun, anlaşılabilir, düzensiz, güvenilmez ve kimi zaman da yanlışlıklar içerebilmektedir. Uzmanlar bu tür sorunlara genellikle uygulanabilir çözümler getirebilmektedirler. Uzman sistemlerden de bir çözüm getirmeleri beklenmektedir.

Bu türden sorunları çözülmesi için iki özelliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar; veri tabanı ve çıkarım-karar motorudur (sonuca ulaşmayı sağlayan algoritmaların tümü). Bilgi bölümü veri tabanına belirli bir yapıda kaydedilmektedir. Bunun içinse gerçekler (fact/ bilinen olgular) ve kurallar (rules/gerçeklerden çıkarılan hükümler) tanımlanmakta ve ilişkilendirilmektedir. Uzman sistemler için bir yazılım hazırlanırken nesnelere tanımlanması, bunların birbirleri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir.

Örneğin "Bazalt sağlam bir kayadır" dendiğinde 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 nesnelere arasındaki kuralı oluşturmaktadır.

Programlama dillerinde kurallar eğer (if), ise (then) ifadeleri ile tanımlanmaktadır. Birden fazla kural tanımlamak için ise bu ifadeler veya 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 şartın sağlanmaması durumunda elde edilecek olan bilgidir.
- İnsanlar koşullara göre daha temkinli olabilmekte, taraflı davranabilmekte veya çevresinden etkilenebilmektedir.
- İnsanlar sorumluluk almaktan çekinebilir.
- İnsanlar yalan söyleyebilmekte, bilgiyi gizleyebilmektedir.
- İnsanların vefatı ile kendinde depolanmış tüm veri tabanı kaybolmaktadır.

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, verilerin elenmesi ile sonuca gidilmesi, geniş çaplı yüzeysel aramaların yapılması veya ayrıntılı aramaların yapılması gibi özelliklere sahiptirler.

Veriden sonuca gidilmesi için ise genelde iki yöntemden yararlanılmaktadır. 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. Uzman yazılımların aşağıda belirtilen nedenlerle giderek daha yoğun şekilde aranmakta ve kullanılmaktadır.

- Uzman insan bulmak zordur.
- Aşırı iş yükünden ötürü insanlar yorulabilir.
- İnsanlar çok önemli detayları unutabilir.
- İnsanlar günlük koşullara göre birbirleri ile tutarsız kararlar alabilir.
- İnsanların hafızası sınırlıdır.
- İnsanlar çok miktardaki veriyi çok kısa sürede değerlendiremez.
- İnsanların hatırlama süreleri daha yavaştır.

Yazılımların insana kıyasla yukarıda açıklanan üstünlükleri olsa da, uzman sistemlerin sınırları aşağıdaki gibidir:

- Doğası algoritmalara dayanmaktadır ve kapasitesi bilgisayar kapasitesi ile sınırlıdır.
- Çözüm için kimi zaman elde edilemeyecek bilgiler gerekebilir.
- Uzman kişilerin sezgilerine sahip değildirler.
- Değişken koşullara henüz kolayca uyum sağlayamamaktadırlar.
- Getirecekleri sonuç ve çözümler sahip oldukları veri tabanı ile sınırlıdır. Bu veri tabanının eksiksiz olarak tamamlanması ise çok zordur.

Yeraltı kaya yapılarının denetimi

Yeraltı kaya yapıları mühendisliği, geoteknik 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 olabildiğince bir destekleme elemanı ile desteklenmemiş, ana malzemesi kayadan oluşan taşıyıcı sistemlerdir. Bu yapıların güvenli olarak imalatı, oluşturulacak olan tünelin de güvenli ve ekonomik olmasını sağlayacaktır. Teknik girişimin zor doğa koşulları içerisinde gerçekleştirilmesi nedeniyle bu tür yapıların maliyetleri genelde çok yüksek olmakta, güvenli imalatın yapılabilmesi için proje ve yapım aşamalarında uzman kişilerin çalıştırılması gerekmektedir.

Yeraltı kaya yapılarının oluşturulmasından sorumlu olan uzman mühendisler arazi koşullarını sürekli olarak izlemek ve değişimleri denetlemek zorundadır. Teknik girişimin projelendirilmesi aşamasından başlayarak, imalatın tamamlanmasına kadar geçen sürede sağlanan çok sa-

yıda veri sürekli olarak kaydedilmekte ve değerlendirilmektedir. Tüm çalışmalar sırasında mühendise yardımcı olacak çeşitli yazılımlar bulunmaktadır. Projelendirme aşamalarında tünel stabilite analizi yapan programlar, imalat aşamasında geoteknik ölçüm sonuçlarından deplasman-zaman grafikleri hazırlayan programlar bunlara örnek olarak verilebilir. Ancak inşaat sırasında sağlanan tüm verileri kaydeden, bunları değerlendiren, olasılıklara karşı hazırlanmasını sağlayan, gerektiğinde sorumlu mühendisi uyaran ve olası ya da oluşmuş sorunlara karşı yol gösteren bir yazılım geliştirilmemiştir.

Yeraltı kaya yapılarının yapımı sırasında her ilerleme adımı için verilerin sağlanması gerekmektedir. Bu veriler tünel aynasından sağlanan veriler ve geoteknik ölçümlerle sağlanan veriler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Tünel aynasından sağlanan veriler: jeolojik birimler, dokanak sınırları, süreksizlikler–miktar, konum ve sınırları, su durumu, kaya kaliteleri, ayrışma durumu, aşırı sökülme-kavlaklanma durumu, kaya destek sınıfı ve uygulanan destek elemanlarının türü, miktarı, ayna fotoğrafları, ilerleme hızı ve bekleme süresi, kazılabilirlik–patlatılabilirlik ve delinebilirlik durumu ile yerinde jeomekanik büyüklüklerdir. Geoteknik ölçümlerle (konverjans, ekstensometre) yerdeğiştirme miktarı–hızı ve ivmesi belirlenilmekte, gevşeme derinlikleri tespit edilmektedir. Her ilerleme adımı için sağlanan bu veriler ilerleme yönünün gerisinden sağlanan veriler de dikkate alınarak sürekli olarak değerlendirilir. Denetim çalışmaları olarak adlandırılan bu çalışmalarda deplasmanların sabit hızlı hareket ettikleri veya hızlandıkları fark edilirse önlem alınmasını gerektirecek durumun bulunduğu anlaşılmaktadır.

Deplasmanların nedenleri arasında öncelikle araştırılabilecek konular: destek sisteminin yetersizliği, desteksiz bekleme süresinin fazla oluşu, tektonizma – faylar, süreksizlikler, yeraltı suyu, yeryüzündeki kütle hareketleri, hatalı kazı yöntemi olabilmektedir.

Bu çalışmada deplasmanların nedenlerinin bulunması için denetim çalışmaları sırasında sağ-

lanan ayna kesitlerinden faydalanılmaktadır. Sorunlu kesimin ilerisinden ve gerisinden sağlanan ayna kesitlerinden veriler ve bilgiler birarada değerlendirilmekte ve gerektiğinde proje öngörülerini ile karşılaştırılmaktadır. Çözümüne gidilebilmesi için gerekli yönlendirme çalışmaları kapsamında destekleme–sağlama veya iyileştirme önerileri getirilmekte ve görüşler rapor olarak sunulmaktadır.

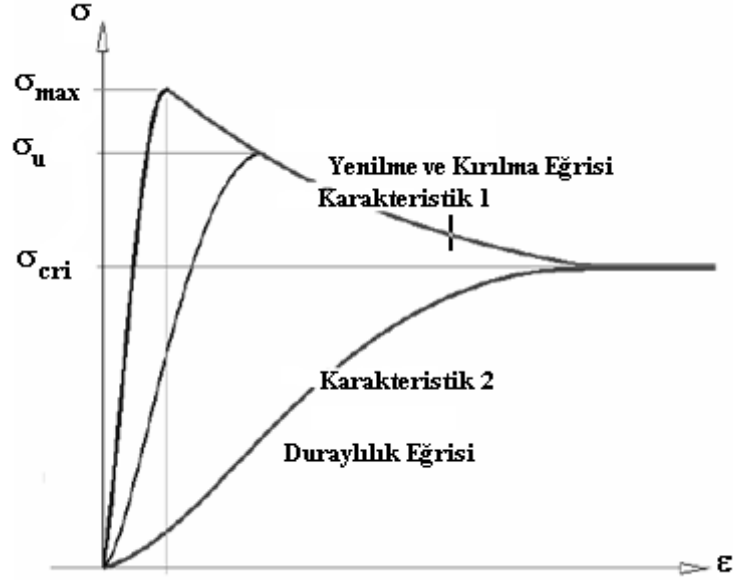
Önerilen çözümün doğruluğu ise sorunlu kesim için yapılan ek stabilite analizleri ile denetlenmektedir. Tünel aynasında karşılaşılan kayaçların yerinde (in-situ) geomekanik büyüklüklerinin belirlenmesi, yapılan hesaplamaların altlığını oluşturmaktadır. Parametrelerin saptanmasında kullanılan yöntemler arasında Hoek & Brown tarafından geliştirilen RocLab adlı yazılım, Vardar (1988) tarafından geliştirilen yöntem kullanılabilir. Ülkemizde yapılan çok sayıda tünel projesinde Vardar yaklaşımı kullanılmış ve RocLab ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yeraltı kaya yapılarının yönlendirilmesi

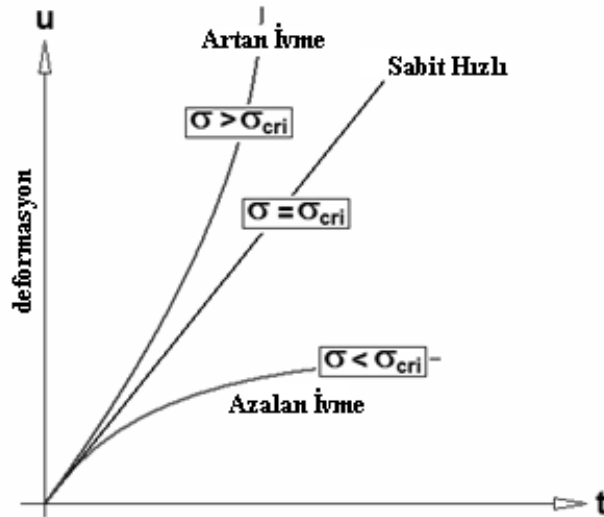
Tüm jeolojik birimler yük altında şekil değiştirmeye başlar. Bu deformasyonların hızı ve sonucu birimin özelliklerine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Kimi kayaçlar artan deformasyonlar sonucunda yenilir ve göçükle sonuçlanır, kimi kayaçlarda ise enerji sönümlenir ve deformasyonlar zamanla azalır, nihayetinde durur (Vardar, 2005).

Her kayacın kritik gerilme değeri (σ_{kri}) vardır, bu değere ulaşıldığında malzeme sabit gerilme altında sabit hızla akmaya başlar. Şekil 1’de gerilme - deformasyon ilişkisi gösterilmiştir;

Kayaçlar zamana bağlı olarak iki farklı şekilde davranabilir. Eğer kayaca etkiyen gerilme kritik gerilmeden küçükse, deplasmanlar zamanla durur. Aksi durumda, kayaca etkiyen gerilmeler kritik gerilme sınırından büyükse göçük olunca ya kadar deformasyon hızı artmaya devam eder. Şekil 2 gerilme ile kritik gerilme arasındaki ilişkiyi göstermektedir;



Şekil 1. Gerilme-deformasyon ilişkisi (Vardar, 2005)



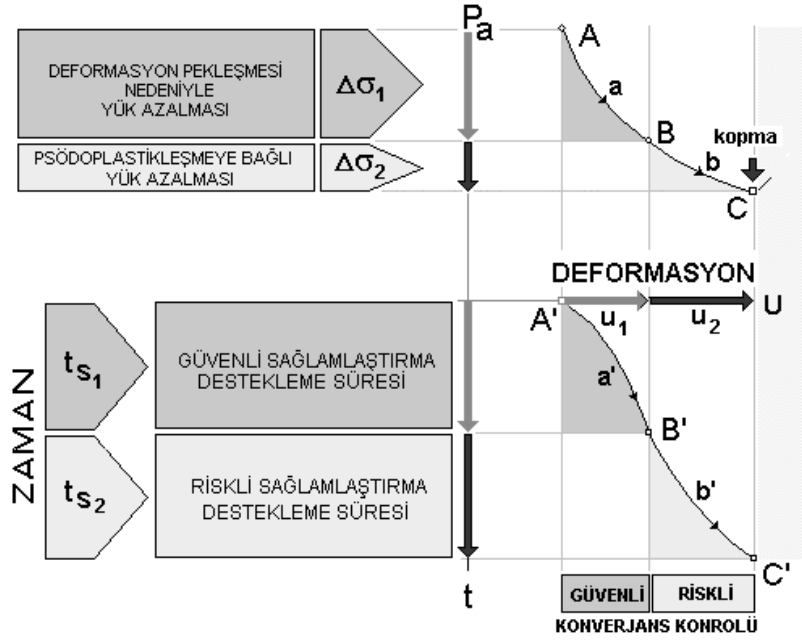
Şekil 2. Gerilme durumuna göre zamana bağlı deformasyonlar (Vardar, 2005)

Kayaya etkiyen gerilmelerin zamana bağlı olarak artması durumunda önce azalan, sonra sabit hızlı hareket eden ve en sonunda artan ivmeli bir hareket meydana gelmektedir.

Yeraltı kaya yapılarındaki duraysızlıkların önlenmesi ve giderilmesi için güvenli olan zaman Şekil 3'de "a" ile gösterilen kesimdir. Bu sınırın aşılması halinde kullanılması gereken destekleme elemanlarının miktarı artmaktadır. Belirli bir

değerden sonra deplasmanlar durdurulamaz hale gelmektedir.

Bir kaya yapıları mühendisinin başlıca görevi; kırılma veya göçükle sonuçlanabilecek deformasyon süreçlerinin başlayıp başlamadığını başta düzenli konverjans okumaları olmak üzere ölçüm ve gözlemlerle denetlemektir. Düzenli okumaların yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi ile tünellerde güvenli imalat yapılabilmektedir.



Şekil 3. Zamana bağlı deformasyonlar ile sağlamlaştırma süreleri ilişkisi (Vardar, 2005)

Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesinde uzman sistem oluşturulması

Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesi çalışmalarından sorumlu mühendisin çalışmalarını kolaylaştırmak ve daha güvenilir kılmak için örnek bir uzman sistem oluşturulmuştur.

Yazılımın kullanım kolaylığı sağlanması ve görsel olması için Visual Basic 6.0 programlama dili tercih edilmiş, raporlandırmalar için Ms Word ve grafik çizimleri için Ms Excel kullanılmıştır. Yazılım ilk yüklendiğinde veri tabanı olarak 7 adet Access dosyası oluşturmakta ve sağlanan verileri bu dosyalara aktarmaktadır. Yazılım veri tabanının kapasitesi ölçüsünde aynı anda birden fazla tünel projesinin yönetilmesine de olanak tanımaktadır.

Yazılıma “Uzman Sistem ile Tünel Analizi” kelimelerinin (İngilizce olarak “Universal System for Tunnel Analisis” ve Almanca karşılığı “Universale System für Tunnel Analysen”) baş harfleri olan USTA ismi verilmiştir.

Yazılımın çalışma prensibi ve sahip olduğu temel özellikler aşağıdaki gibidir:

- USTA’ya birden fazla proje kaydedilebilmektedir. Böylelikle farklı projeler veya aynı projenin farklı kesimleri eş zamanlı olarak çalışılabilir.
- Her ilerleme adımı için tünel aynasından sağlanan veriler kaydedilebilmektedir. Birimlerin dokanak sınırları çizilebilmekte, ileri-geri tuşları ile kesitler arasında geçiş yapılabilmektedir.
- Süreksizlikler ve ortam özellikleri verilen seçeneklerden seçildiğinde USTA Q ve RMR değerlerini hesaplamakta, karşılık gelen NATM sınıfını belirlemektedir.
- Çalışılan kilometreye ait sondaj verisi varsa, USTA sondaj sonuçlarını vermektedir.
- Her ayna kesimine ait 6 adet fotoğraf veri tabanına kaydedilebilmektedir. Seçilen fotoğraf program tarafından büyütülmektedir. Fotoğraflar bilgisayardan silinse dahi veri tabanında saklanmaktadır.
- Kullanıcı her ilerleme adımı için kişisel açıklamalarını da ekleyebilmektedir.

- USTA'ya her okuma noktası için geoteknik ölçümler kaydedildiğinde, yazılım konverjans değerlerini, değişimi belirlemekte ve deplasman hızı ile ivmesini hesaplamaktadır.
- Deplasman hızı veya ivmesinde azalma yoksa, deplasmanlar artıyorsa USTA kullanıcıyı uyarmaktadır.
- USTA deplasman miktar – hız ve ivmesinin zamana bağlı değişimini grafik olarak çizmekte ve Ms Excel formatında bilgisayara kaydetmektedir.
- Yönlendirme çalışmaları kapsamında analizler yapıldığında USTA kullanıcıya sorular sorarak problemin olası nedenlerini bulmaya çalışmaktadır. Kullanıcıdan sağlanan veriler doğrultusunda sorulan sorular değiştirilmektedir. Örneğin yeraltı suyunun olmadığı bir durumda kullanıcıya su ile ilgili sorular sorulmamaktadır.
- USTA Vardar (1988) yöntemini kullanarak yerinde geomekanik büyüklükleri hesaplamaktadır. Hesaplamalar sırasında ihtiyaç duyduğu veri bilinmiyorsa, USTA literatür verilerini kullanarak veya teorik yöntemlerle hesaplayarak gerekli eksik veriyi önermektedir.
- USTA uygulamada kullanılan destek sistemi ile projelendirilen destek sistemini karşılaştırmakta, projeye bağlı kalınıp kalınmadığını denetlemektedir.
- USTA deplasman ölçümü yapılan noktadan sağlanan x, y ve z koordinatlarındaki değişimleri değerlendirerek tünelin hangi yöne doğru kapanmaya çalıştığını hesaplamaktadır. Bu sayede ek destekleme gerektiren bölge belirlenmektedir.
- Yazılım bir proje kütüphanesine sahiptir. Kütüphane içerisinde kayıtlı projeler araştırılabilmekte, özet olarak karşılaşılan problem ve alınan önlem anında görüntülenebilmektedir. İstenildiğinde USTA örnek proje hakkında ayrıntılı veriyi rapor olarak sunmaktadır. Böylelikle benzer projelerden de faydalanılabilmektedir. Kullanıcı yeni projeler ekleyerek kütüphaneyi sürekli olarak geliştirebilmektedir. .
- USTA sağladığı tüm verileri birarada değerlendirerek MS Word formatında bir raporu kullanıcının bilgisayarına kaydetmektedir.

USTA'nın yapım sırasında sağlayacağı faydanın görülebilmesi için iki farklı sorunlu projede uygulaması yapılmıştır.

Nefise Akçelik tüneline USTA'nın uygulama sonuçları

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 tüneline sahiptir. Tünelin tasarım derinliği giriş ve çıkış portallarında 33 metre olup, güzergah boyunca 75 ile 375 metre arasında değişiklik göstermektedir.

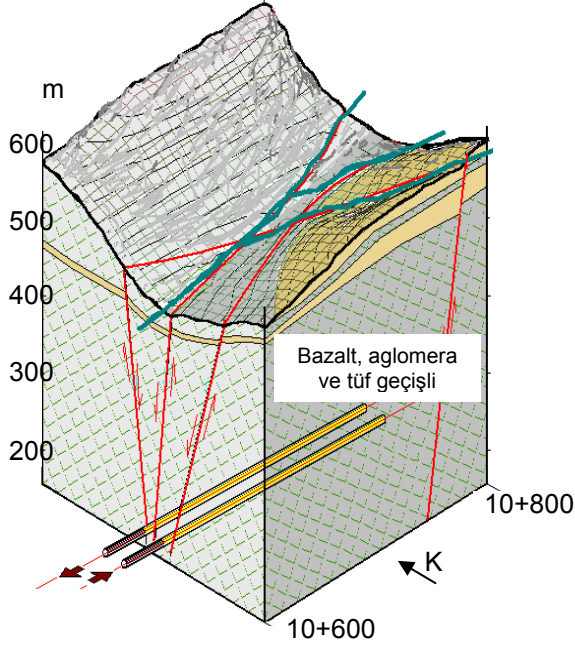
Tünelin sol tüpünde Km 10+683.00–Km 10+800.60 arası, sağ tüpünde ise Km 10+693.10–Km 10+742.10 arası sorunlu kesim olarak nitelendirilmiştir. Bu kesimde derinlik 375 metre olup, proje kriterlerine göre NATM A2, B1, B2 ve B3 sınıflarında yer almaktadır.

Tünel güzergahının bulunduğu bölge, tektonizma ve erozyonun şekillendirdiği bir morfolojiye sahiptir. Tünel güzergahı boyunca morfoloji, dik topografyalı 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 Tünel, dayanımı düşük olan ve genellikle kötü-orta kalitedeki volkanik kayalar içerisinde inşa edilmiştir. Uygulama kapsamında, güzergah içerisindeki 150 metrelik sorunlu kesim çalışılmıştır.

Sorunlu olan kesimde tünel, Şekil 4'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 alın-

mamış ve tünel radye kapanımını öngörmeyen bir tünel geometrisi oluşturulmuştur.

Örtü yükü tünel tarafından tam anlamıyla taşınmadığı, kırık sistemleri boyunca dolaşan su volkanik kökenli birimleri aşındırdığı ve tünelde sökülmelemlerle birlikte zamanla aşırı boyutlara varan deformasyonlara neden olduğu için tünelde büyük sorunlarla karşılaşmıştır.

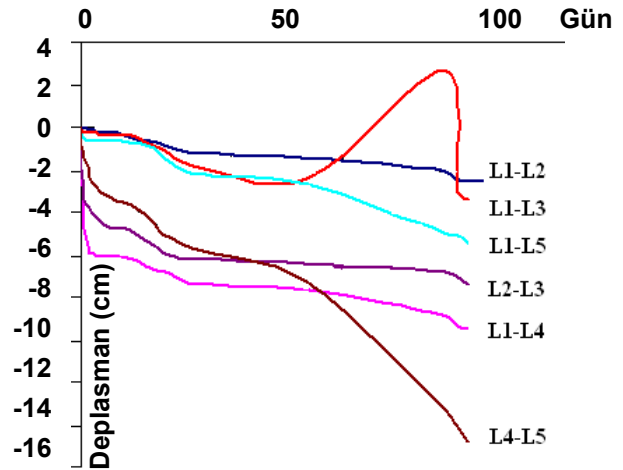
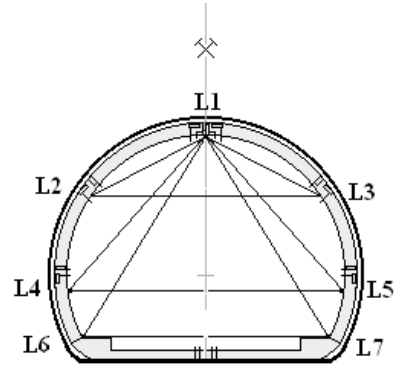


Şekil 4. Vadi altında yer alan sorunlu kesim

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 (Vardar vd., 2004).

Nefise Akçelik tünelinin bu sorunlu kesiminde yer alan Km 10+714.50'de tünel yan duvarlarında 14 cm'ye varan deplasmanlar ölçülmüştür. Şekil 5'de ölçülen deplasmanların zamana bağlı olarak değişimleri gösterilmiştir (Vardar vd., 2004)

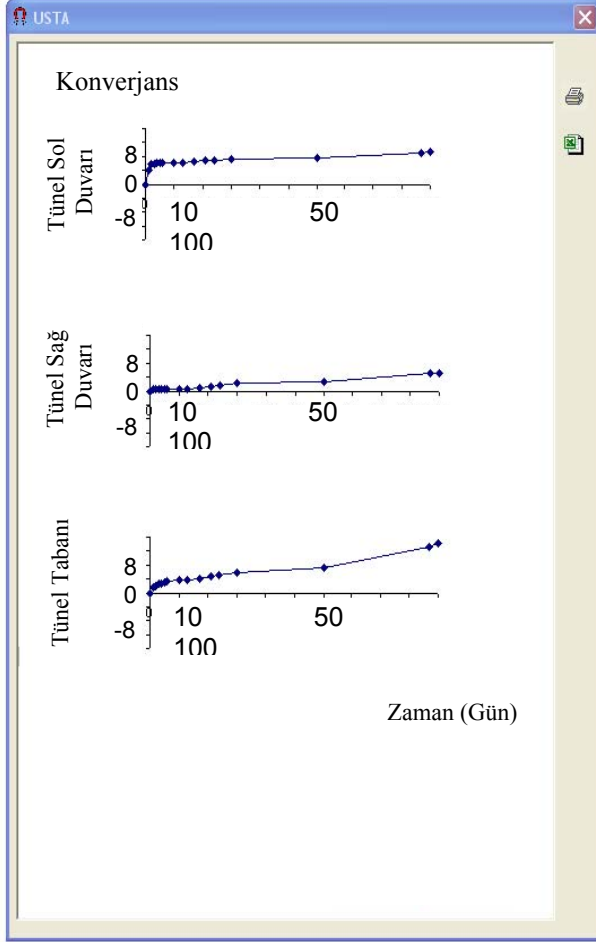
Destekleme-Sağlamaştırma projesi kapsamında EMAY ve İTÜ MJKM'nin ortak çalışması ile tünelde ring kapanımını sağlayacak invert uygulaması öngörülmüştür. Tünel alt yarısında yapılan 12 metrelik ilave bulonlar ile ve ek çelik iksa uygulaması ile deplasmanlar engellenmiştir. Phase2 adlı program kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile geri analiz yapılmış, kayacın yerinde geomekanik parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler, yapılan sağlamaştırma projesinin yeterliliğinin tahkikinde kullanılmıştır.



Şekil 5. Nefise Akçelik tüneli, sağ tüp Km 10+714.50'de ölçülen deplasmanlar

Nefise Akçelik tünelinin sorunlu kesiminden sağlanan tünel ayna kesitleri ve deplasman ölçümleri USTA'ya kaydedilmiş ve "yapım sırasında uzman sistem kullanılmış olsaydı, problem önceden fark edilebilir ve daha erken çözüme gidilebilir miydi?" sorusunun cevabı aranmıştır.

USTA sağlanan veriler ile deplasman hız ve ivmelerini hesaplamaya başlamış, ilk okumalardan itibaren deplasman hızlarının artarak devam ettiğini belirlemiş ve uyarılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7’de elde edilen ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



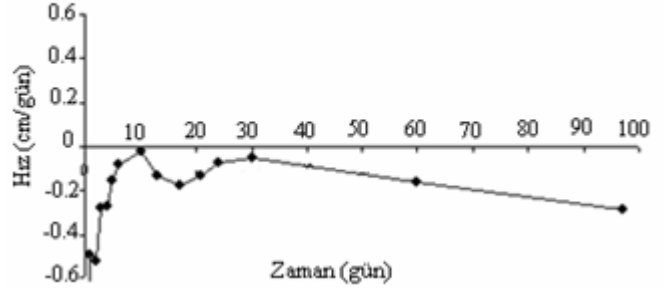
Şekil 6. USTA deplasman ölçüm sonuç grafikleri

USTA deplasman hız ve ivmelerinin hesaplanmasının ardından aşağıdaki uyarıyı vermektedir; “Gerilmeler sol omuz üzerinde yoğunlaşıyor, buraya dikkat edilmeli, kazı sonrasında dökülmeler olabilir”.

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 karşılaşmıştır.



Şekil 7: Tünel tabanı hız-zaman grafiği

- “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 kayalarda ayrışmalar belirgindir ve kırıklar yeraltı suyu dolaşımına izin vermektedir
- “Kazı ilerleme adımları kısaltılmalı”: ilerleme adımları bu kesimde 1.5 metredir. Ortanın gerçekte B3 sınıfında olduğu düşünülürse, ilerleme adımlarının kısaltılması gerektiği doğrudur

USTA yerinde kaya dayanımı için geomekanik parametreleri de hesaplamıştır. Buna göre içsel sürtünme açısı $\phi = 30^\circ$ (Phase2 ile $\phi = 34^\circ$) ve kohezyon $c = 2.23$ MPa (Phase2 ile $c = 1,2$ MPa) olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler, sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan değerler ile uyumlu olup, yapılacak destekleme-sağlamlaştırma veya iyileştirme projesi için de ön bilgi sağlamaktadır.

Sarayköy tüneline USTA'nın uygulama sonuçları

Karadeniz sahil yolu projesi kapsamında inşa edilen Sarayköy tüneli projenin 2. bölümü olan Trabzon–Hopa arasında, 3. kesimde yer almaktadır. Sarayköy tüneli her biri iki şeride sahip

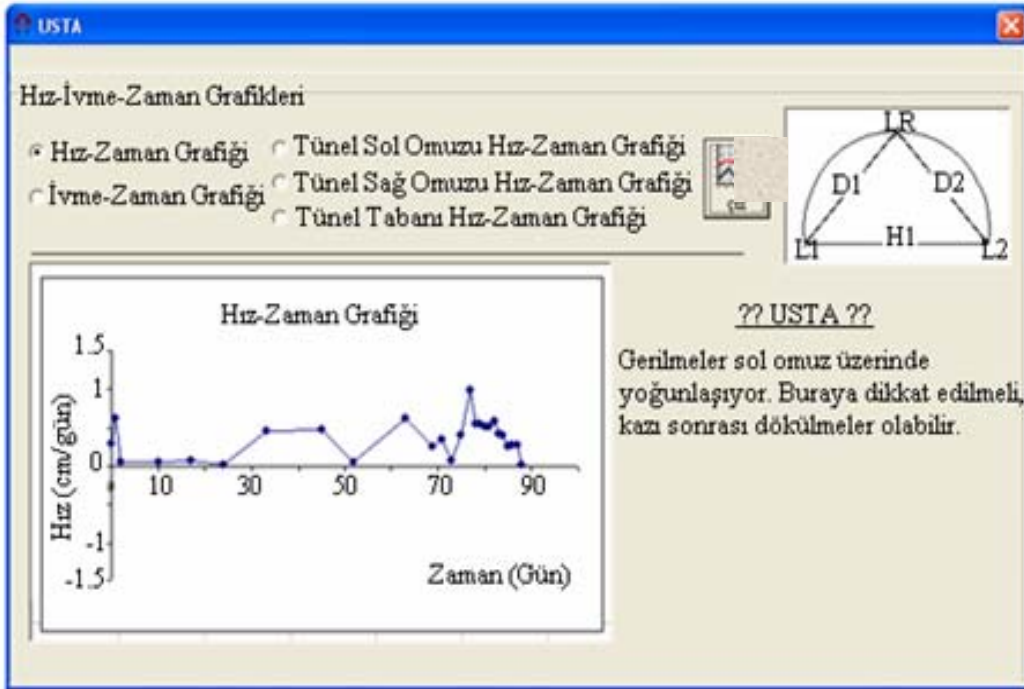
olan, kesit alanı 82.5 m^2 , 10.25 m genişliğinde ve 6.85 m yüksekliğinde çift tüplü karayolu tünelidir. Tüpler arasındaki mesafe 11 m ’dir. Tünel eski bir heyelan sahasında yer alması ve zayıf dayanımlı volkanik kayaların içerisinde inşa edilmesi nedeniyle sorunlu tünellerdendir. Doğu portalı, yada diğer adıyla Rize portalinde yer alan yamaç yılda $4-5 \text{ mm}$ hareket etmektedir. Birim $40-80 \text{ cm}$ kalınlığında bitkisel toprak ve onun altında yer alan kumlu killi ve siltli zeminde oluşmaktadır. Zeminin altında ise çok ayrılmış aglomera, bazaltik tüf ve bazalt bulunmaktadır. Benzer şekilde ara portaller ve Trabzon portalı de heyelan sahasında bulunmaktadır.

Mühendislik jeolojisi ve tünel mühendisliği açısından incelendiğinde Sarayköy tüneline karşılaşılan problemler: 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 ayrılmış tüfit hidrotermal ayrışma zonları, çok az ile hiç arasında kazı sonrası kayanın kendisini tutabilme özelliği şeklindedir. Tüm bu olumsuzluklar

nedeni ile Sarayköy tüneli için klasik tünel açma yöntemleri uygulanamaz, özel önlemlerin alınması zorunludur sonucuna varılmıştır (Vardar, 2002).

Sarayköy tüneline sağlanan veriler USTA’ya uygulanmış, Şekil 8’de de gösterildiği gibi, USTA yaptığı değerlendirme sonucunda; “Genilmeler sol omuz üzerinde yoğunlaşıyor, buraya dikkat edilmeli, kazı sonrası dökülmeler olabilir” uyarısını vermiştir. Gerçekten de maksimum deplasmanlar tüneline sol duvarında oluşmuştur. USTA oluşturduğu hız ve ivme-zaman fonksiyonları ile Sarayköy tünelineki deplasman artışlarını fark ederek uyarı vermiştir.

Yapım sırasında tüneline genelinde bir problemle karşılaşılma olmamasına rağmen $\text{Km } 111+767$ ’den sonraki yaklaşık 150 m ’lik kesimde deformasyon problemleri ile karşılaşmıştır. Tüpler arasındaki imalat takip mesafesinin korunmaması nedeniyle tüneller birbirlerini etkilemiş, iç kaplamanın uygulanmasında yaşanan gecikme nedeniyle $\text{Km } 111+777.98$ ’de ($0+142.35$) düşey yönde 12 cm civarında deplasmanlarla karşılaşmıştır (Vardar, 2002).



Şekil 8. USTA analiz penceresi

Yapım sırasında sorunlarla karşılaşılması 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, tün el bir çatı altına alınmıştır. Etkili drenaj, deformasyonların kontrollü ve minimize edilmesi, kazı sonrası arının ve aynanın hemen desteklenmesi; bu amaçla ilerleme yönünde enjeksiyonlu borular sürülmüştür.

USTA ile mühendislik jeolojisi değerlendirmesi yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Süreksizliklerin yönelimi nedeniyle tünelde kazı sonrası dökülmeler olabilir, ilerleme adımları kısaltılmalı, aşırı sökülme olması durumunda ön süren kullanılmalıdır.
- Heyelan stabilitesi ölçümlerle kontrol edilmesi, 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.

Sonuçlar

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

- Tünel inşaatları sırasında çok sayıda veri elde edilmektedir. Uzman sistem bu verileri bilgisayar ortamına taşıdığı için erişim ve saklama kolaylığı getirmekte, paylaşım imkânı sunmaktadır.
- Yapılan ölçümlerin ve ayna kesitlerinin birbirleri ile ilişkilendirilerek her ilerleme adımı

için yorumlanması tecrübe gerektiren, zahmetli bir iştir. Uzman sistem bunları kendisi yaparak mühendise yardımcı olacaktır. İnşaat sırasında sürekli olarak bir uzmanın bulundurulması her zaman mümkün olmamaktadır. Uzman sistemler bu eksikliği gidermektedir. İnsanlar çeşitli nedenlerden ötürü hatalar yapabilir, uzman sistemlerin kapasiteleri bu bakımdan daha fazladır.

USTA yapılan uygulamalarda gösterdiği başarı nedeni ile uygulamadaki eksikliği giderebilecek, zaman ve mali açıdan kazanç sağlayacak iyi bir uzman sistem örneğidir.

Kaynaklar

- Dilger, W., (2004). Wissensrepräsentation und Problemlösung, *Vorlesung an der Technischen Universität Chemnitz*,33.
- Hartmann, D., (2003). *Wissenbasierte Methoden*, Skripte aus dem Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen, Bochum-Ruhr Universität, 46-52.
- Vardar, M., (1988). Geologie, Felsmechanik, Felsbau Festkolloquim, L. Müller Salzburg, *Trans Tech. Publication P. Egger, E. Fecker, G. Reik*, 95-113.
- Vardar, M., (2002). Doppelröhriger Autobahntunnel Sarayköy mit 4 Portalen an Rutschhängen Probleme und deren Beherschung, 2. *Tiroler Geotechnik und Tunnelbau Tag, Innsbruck/Austria*.
- 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), Austria*.
- 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, *İstanbul*.
- Zabel, F. ve Hempel, T., (2000). Expertensysteme, *Seminar zur Didaktik der Informatik*, Greifswald, 1-15, *Austria*.