

PÜSKÜRTME BETON TAHKİMATIN TTK OCAKLARININ ANA GALERİLERİNDE UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE APPLICABILITY OF SHOTCRETE SUPPORT IN THE MAIN GALLERIES OF THE TTK MINES

Şakir YURDAKUL, *TTK, işletmeler Daire Başkanlığı, 67090 Zonguldak*

Hasan GERÇEK, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Muh Fak, 67100 Zonguldak*

ÖZET

Bu çalışma, püskürtme beton tahkimatın kaya saplamaları ve çelik hasır ile birlikte Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) ocaklarının ana galerilerinde uygulanabilirliğinin araştırılmasıyla ilgilidir. Önce, püskürtme beton ve yeraltında kullanımı hakkında kısa bilgi verilmiş ve TTK ocaklarında kullanılmakta olan kavisli rijit çelik galeri bağlan gözden geçirilmiştir. Sonra, modern kaya kütlesi sınıflama sistemleri kullanılarak, tipik bir galerinin alternatif tahkimat gereksinimleri belirlenmiştir. Alternatif tahkimat sistemi; sürtünmeli kaya saplamaları, kaynaklı çelik hasır ve kuru-karışım püskürtme beton uygulamasından oluşmaktadır. PHASE² sonlu elemanlar bilgisayar programı kullanılarak yapılan gerilme ve duraylılık çözümlenmeleri, yeni tahkimat sisteminin olası koşullar altında başarıyla işlevini yerine getirebileceğini göstermiştir. Son olarak, yeni sistemin galeri ilerleme maliyetlerinde yaklaşık % 20'lik bir iyileştirme yapabileceği kestirilmiştir.

ABSTRACT

This study involves an investigation for the applicability of shotcrete support, along with rock bolts and wire mesh, in the galleries of the mines operated by Turkish Hardcoal Enterprises (TTK). Firstly, a brief information is given on shotcrete and its use as underground support, and the rigid-steel-arch gallery supports currently used in the mines of TTK are reviewed. Then, using modern rock mass classification systems, alternative support requirements of a typical gallery are determined. The alternative support system involves friction rock stabilizers, welded wire mesh and dry-mix shotcrete application. The stress and stability analyses carried out by using PHASE² finite element computer program have shown that the new support system can perform successfully under probable conditions. Finally, it has been predicted that the new system will improve the costs of gallery advance by about 20 %.

1. GİRİŞ

Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) Zonguldak Kömür Havzası'nda, yaklaşık 6885 km² alanda yüksek kalitede taş kömürü üretimi yapan bir iktisadi devlet kuruluşudur. Kurumda, yıllık ortalama 2.5 milyon ton satılabilir taşkömürü üretiminin yanı sıra, yılda ortalama 6 km taşta galeri ve ortalama 10 km de tabanyolu sürülmektedir; yeraltında açık olarak galeri şebekesinin uzunluğu yaklaşık 350 km'dir.

TTK'nın yeraltı maden ocaklarında; sürülen galerilerin bulunduğu derinlik (+ 230 ile - 560 kotları arasında), açıklığın boyutları (B5 ile B18 arasında), geçilen birimlerin türü (kumtaşı, kiltası, kömür vb.) ve kazılan kaya kütlesi özellikleri dikkate alınmaksızın tabanyollarında ve taş içerisinde açılan tüm galerilerde aynı türde tahkimatlar uygulanmaktadır. Bunlar, ahşap kama ve fırçalarla donanmış kavisli rijit çelik bağlardır.

Özellikle, uzun süre ayakta tutulması planlanan kilometrelerce uzunluktaki kat hazırlık galerilerinde zamanla ve yer yer aşırı deformasyonlar oluşmaktadır. Bunun nedeni, uygun olmadığı bilinmesine rağmen, başarısız olduğu kanıtlanan tahkimat şeklinin aynı yerde ısrarla uygulanmasıdır. TTK'da yeraltında açılan galerilerin yaklaşık üçte birlik kısmı her yıl tamir-tarama gerektirmektedir. Delme-patlatma yöntemiyle açılan galerilerde, tamir-tarama çalışmalarının galerilerin sürüldüğü ilk andan itibaren başladığını söylemek mümkündür. Galeri bağları, arında yapılan ateşlemeden etkilenerek geriye doğru devrilmekte ve aynı civardaki tahkimatın bozulmasına sebep olmaktadır. Bu galerilerde yapılan tamir-tarama çalışmaların galeri açma maliyetleri açısından büyük parasal kayıplara neden olmaktadır.

Galerilerde duraylılığın sağlanmasına yönelik yaklaşım, uygulanan tahkimat ile çevre kaya kütlelerinin birlikte çalışmasına olanak verecek şekilde olmalıdır. Bu anlamda, rijit galeri bağlamım, kaya kütlelerinin de bir tahkimat unsuru gibi çalışmasına yardımcı olduğu söylenemez. Ahşap malzeme ile desteklenen çelik bağlarının uygulandığı bu tip tahkimat sisteminde, rijit bağlar, galeride sadece pasif taşıyıcılık işlevi görmektedir. Ayrıca, ahşaba dayalı tahkimat sisteminde, ortamdaki su varlığı ve ocak havasının nemi ahşap malzemenin kısa sürede dayanımını kaybetmesine yol açmaktadır. Bu durum, çevre kayada gevşeme hareketlerine sebep olmakta ve galeride göçük riskini artırmaktadır. Çağdaş tahkimat yaklaşımlarında temel amaç, kaya kütlelerinin kendi kendini taşımasına yardımcı olunmasıdır. Bu düşünceden hareketle, TTK'da uygulanan tahkimat sistemine alternatif tahkimat arayışları, bu çalışmanın konusu olarak gündeme gelmiştir.

Bu bildiriye; son yıllarda madencilik ve inşaat mühendisliği alanında oldukça önem kazanan, püskürtme beton tahkimatının, kaya saplama ve çelik hasır ile birlikte, TTK ocaklarında uygulanabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Öncelikle, püskürtme beton teknolojisi ve yeraltı açıklıklarının tahkimatında kullanımı hakkında bilgiler özetlenmiştir. Sonra, TTK'da halen uygulanmakta olan tahkimat sistemi ve tamir-tarama işleriyle ilgili bilgiler verilmiştir. Daha sonra, mevcut tahkimat sistemine alternatif yaklaşımlar ele alınarak, seçilen bir galeriye uygulanan kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin ortaya koyduğu tahkimat tipleri belirlenmiş; sonuç elemanları çözümlenmesi kullanılarak bu galeriler için duraylılık analizleri yapılmıştır. Son olarak da, mevcut uygulama ile yeni tahkimat sistemi maliyetleri açısından karşılaştırılmıştır.

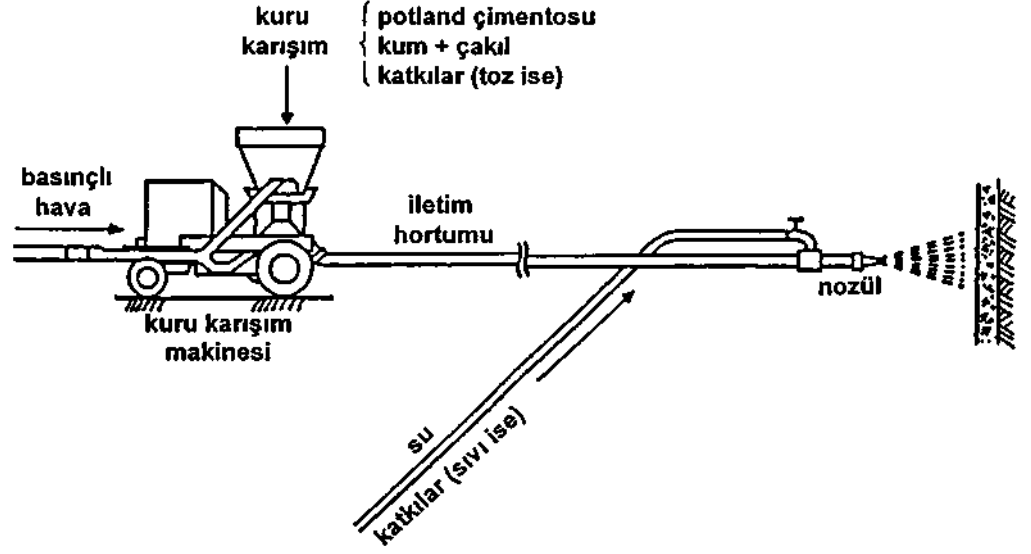
2 . PÜSKÜRTME BETON VE YERALTI TAHKİMATI OLARAK KULLANIMI

Amerikan Beton Enstitüsü püskürtme betonu (*shotcrete*) "bir hortumla taşınarak bir yüzey üzerine basınçlı hava yardımıyla yüksek hızla püskürtülen beton ya da harç karışımıdır," şeklinde tanımlamaktadır (ACI Committee 506, 1966). Püskürtme beton; çimento, çakıl, kum, su ve özel katkı maddelerinin karıştırılarak, yüzey üzerine basınçlı hava ile püskürtülerek bir kabuk oluşmasını sağlayan bir kaplama yöntemidir. Geleneksel betona göre farklılıklar gösteren püskürtme beton kuru ve yaş karışım sistemi olarak iki şekilde uygulanır. TTK ocakları ana galerilerinde, kuru karışım yönteminin denenmesi planlandığı (Ünlü ve Çolak, 2001) için burada yalnızca bu yöntemle değinilecektir.

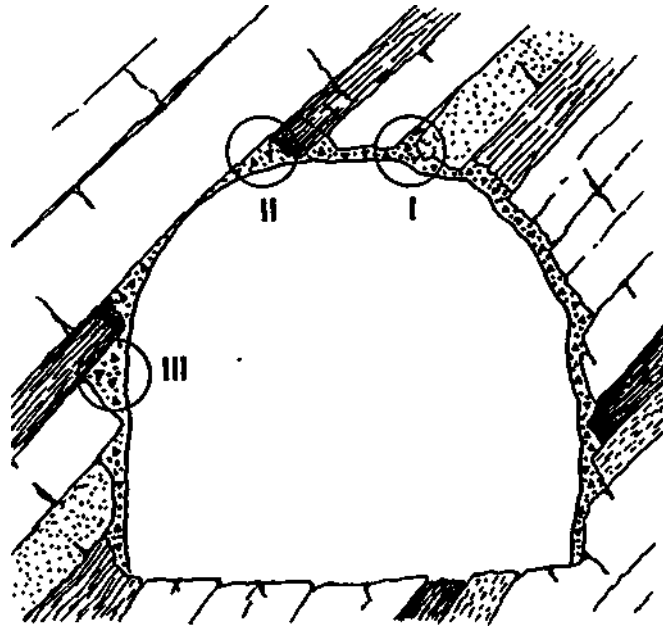
Kuru karışım yönteminde; tasarıma göre belirlenen miktarlarda hazırlanan çimento (normal portland çimentosu), hafifçe (% 2 ile 6 oranında) nemlendirilmiş kum ve çakıl ile susuz ortamda karıştırılır, kuru karışım püskürtme beton makinesine beslenir. Karışım, buradan basınçlı hava yardımı ile özel iletim hortumuna aktarılır, iletim hortumu ucundaki püskürtme tabancasında (nozül) püskürtme suyu ile karıştırılarak, uygulanacak yüzeye yüksek hızla püskürtülür. Uygulamalarda, püskürtme beton karışımı içerisine prizlenmeyi çabuklaştıran hızlandırıcı (*accelerator*) katılır. Genelde, beton dayanımını düşürmeyen, geri sıçrama (*rebound*) miktarını önemli ölçüde azaltan, zararlı maddeler ve alkali içermeyen, püskürtme betonun kaya yüzeyine yapışmasını iyileştiren katkıları tercih edilir. Kullanılan katkı maddesi sıvı ise su ile birlikte püskürtme ucunda, toz ise püskürtme beton makinesine beslenerek ilave edilir (Şekil 1). Püskürtme betondaki çimento miktarı, istenilen yapışmayı elde edebilmek için, normal betona göre daha fazladır; kullanılan en büyük tane çapına bağlı olarak 350-400 kg/m³ arasındadır. Karışım oranları esas olarak yapılacak denemelerle tespit edilirse de, deneylere çimento/çakıl oranı 1:3 ile 1:4 arasında olacak şekilde başlanabilir. Su/çimento oranı, karışımın yaş veya kuru olmasına göre farklıysa da kuru yöntemde bu oran 0.3-0.5 arasında değişir. Toz hızlandırıcılar, karışıma ortalama çimento miktarının % 4 ile 6'sı arasında katılır: (Aka ve Celep, 1978).

Kaya mühendisliğindeki esas uygulamaları yeraltı açıklıklarının tahkimatı ve şev kaplaması olan püskürtme beton teknolojisi, geniş bir alanda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Kazı yüzeyine açılır açılmaz uygulanması ve yüksek uygulanma hızına sahip olması gibi özellikleri nedeniyle, geleneksel betona göre daha ekonomiktir. Püskürtme betonun yeraltı kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir (Gerçek, 1979):

- Hemen her tür yeraltı açıklığının tahkimatında; geçici (ön), kalıcı (son), iyileştirici veya takviye edici tahkimat olarak.
- Yangın barajlarında ve uzunayak madenciliğinde tabanyolu kenarında göçük tarafının hava sızdırmazlığının sağlanmasında.
- Debisi ve basıncı düşük olan su gelirlerinin denetim altına alınmasında.
- Açık havadan, nemden etkilenerek bozulan ya da ayrışan kazı yüzeylerinin veya çelik, ahşap, kaya saptaması, tel hasır gibi tahkimat elemanlarının kaplanmasında.



Şekil 1. Kuru karışım püskürtme beton uygulaması (MBT'den [1997] değiştirilerek).



Şekil 2. Püskürtme betonun tahkimat mekanizması (Mahar et al.[1975] ve Gerçek'ten [1979] değiştirilerek).

Püskürtme betonun galeri veya tünellerde yeraltı tahkimatı olarak kullanımı; uygulama amacı (geçici, kalıcı, iyileştirici veya takviye edici tahkimat), uygulama yöntemi (kuru veya yaş karışım), uygulama şekli (tek basma, çelik hasu: veya kaya saplamalarıyla veya çelik bağ ile), arazi davranışı (elastik, gevşeyen, şişen veya sıkışan arazi), yeraltı suyu koşulları ve kazı yöntemiyle (delme-patlatma veya makineyle kazı) yakından ilişkilidir. Yeraltı açıklıklarının tasarımında üstün performansı ile önemli bir yer tutan püskürtme betonun, yeraltı tahkimatı olarak işlevsel özellikleri, ana hatları ile şöyle özetlenebilir (Gerçek, 1992):

- a. Püskürtme beton uygulamasının ilk saatlerinde esnek olup zaman geçtikçe hızla katılık ve dayanım kazanır. Bu özellik sayesinde, püskürtme beton, gevşeme yüklerinin artışı önlerken, kazıdan hemen sonra uygulanabildiği için doğal arazi kemerleşmesinin genişleme eğilimini durdurur. Böylece, ince bir püskürtme beton tabakası çevre kaya kütlelerinin duraylılığını artırma bir rol oynar.
- b. Bilindiği gibi; galeri tahkimatında, sıkılama noktaları arasındaki uzaklıklar azaldıkça tahkimat bünyesinde oluşan gerilmeler de azalmaktadır. Püskürtme beton, sıkılama aralığı sıfır olan ve çevre kaya ile kesintisiz temas halindeki bir tahkimat olarak düşünülebilir. Bu yüzden, püskürtme beton yüksek kaya yüklerini taşıırken oldukça düşük gerilmelere maruz kalır. Ayrıca, çevre kayayla oluşan bu sürekli temasın üçüncü boyutta (galeri eksenine doğrultusunda) devam etmesi, püskürtme beton tahkimatının yüksek yük taşıma kapasitesine katkıda bulunur.
- c. Püskürtme beton; açık çatlaklara, süreksizliklere ve kazılan kayanın yüzeyindeki girintilere püskürtülerek buraları doldurur. Bu şekilde, taş bir duvardaki tutucu harç gibi görev yapar (Şekil 2'de I).
- d. Püskürtme betonun birçok kaya cinsiyle kuvvetli yapışma yeteneği vardır, ince bir püskürtme beton tabakası, düşük dayanımlı yüzeyi saran yüksek dayanımlı bir iç kaplama gibi davranır. Bu sayede kaya ile dayanımı artmış yüzey arasında bir etkileşim meydana gelir ki yapışma kesme dayanımı yardımıyla gevşemiş blokların yükü duraylı bloklara iletilir. Püskürtme betonun kesme dayanımı, gevşemiş blokların düşmesini önemli derecede önler (Şekil 2'de II).
- e. Açıklık yüzeyindeki sivri ya da köşeli girintiler gerilme yığılmasının oluştuğu zayıflık bölgeleridir. Çabuk katılaştıran püskürtme beton kazıdan hemen sonra uygulandığında, buraların doldurulması ve düzgün bir açıklık yüzeyi sağlanmasıyla gerilme yığılması azaltılabilir (Şekil 2'de III).
- f. Püskürtme betonun kayaya yapışması düşük nitelikte olduğu zaman, sürekli ve ince bir püskürtme beton tabakası eğilme ve çekme kuvvetlerine karşı, direnç gösteren bir iç kabuk gibi davranır.
- g. Püskürtme beton, açıklık yüzeyinde açığa çıkan eklemleri tıkayarak su sızmasını önler ve böylece dolgu malzemeli eklemlerden bu maddenin süzülmesine engel olur.

Havzada uygulanan tek tip tahkimat sistemine alternatif tahkimat arama çabaları, yer yer deneme amaçlı uygulama alanları bulsa da, bu çalışmalar bir proje kapsamında ele alınmadığı için herhangi bir gelişme sağlanamamıştır. TTK'da, püskürme beton tahkimatı uygulamaları aşağıda sıralandığı şekilde yapılmıştır.

- a. Gelik işletmesi, -150 su havuzu uygulaması (29 Haziran 1983),
- b. Gelik yeni servis kuyusu inset galerileri (5 Aralık 1989),
- c. Gelik İşletmesi, -360 akülü lokomotif garajı (12 Ağustos 1994) ve
- d. Gelik işletmesi, +140 fan galerisi kazısı.

3. TTK'DAKİ GALERİ TAHKİMAT UYGULAMALARI

TTK'ya bağlı tüm müessese birimlerinde galeri kazı çalışmaları delme-patlatma yöntemiyle yapılmaktadır. Galeri kazı çalışmalarında uygulanan işlemler; deliklerin delinmesi, doldurulması, patlatılması, havalandırma, kavlak temizliği, postanın kaldırılması, tahkimat ve diğer işler olarak sıralanabilir. Kazı aşamaları incelendiğinde işlemlerin çokluğu ve zaman alıcı olması dikkati çekmektedir. Sıralanan tüm bu işler bir tek galeri anlamında odaklanmaktadır. Örneğin; posta alma işlemi yapılmadan, tahkimat yapılamaz. Bu nedenle, iş organizasyonunda olacak herhangi bir aksama galeri anlamında işlerin durmasına neden olur.

Halen havzada sürülen galerilerde, DİN 21541'e uygun iki parçalı B5, B8, B10 veya üç parçalı B14 ve B18 tiplerinde kavisli rijit çelik bağlar kullanılmaktadır. Galerilerde kullanılan kavisli rijit çelik bağlar, galerinin tavan ve yan duvarlarına ahşap kamalarla sıkıştırılır ve galeri eksenine boyunca yüklenmelere karşı fırçalarla güçlendirilir. Yüklerin tahkimata düzenli olarak transferini sağlamak için kamaların düzgün aralıklarla ve yeterli sıklıkta döşenmesi gerekir. Akıcı arazilerde tavan kısmı sürme kamalar kullanılarak, çok akıcı arazilerde de boşluksuz yığma fırça uygulaması yapılarak tahkimat tamamlanır.

Hoek ve Brown'ın (1980) özetlediği modern tahkimat felsefesine göre; "Herhangi bir yeraltı açıklığının tasarımında temel amaç; çevre kayayı asıl yapı malzemesi olarak kullanmak, kazı sırasında çevre kayayı mümkün olduğunca az düzeyde rahatsız etmek ve mümkün olduğunca az miktarda beton ya da çeliği tahkimat olarak kullanmaktır. Bir anlamda tahkimatın asıl işlevi çevre kayanın ölü yükünü taşımak değil, kayanın kendi kendisini taşımasına yardım etmektir."

Büyük hazırlıklar kapsamında sürülen galerilerde yukarıda açıklanan temel amaçlara uyulduğu söylenemez. Tahkimatta kullanılan rijit galeri bağı ve ahşap malzemeler (kama, fırça, vs.) galeri anlamında duraylılığı sağlamada yeterli olmamaktadır. Özellikle kaya yapısı delme-patlatma ile örülen galerilerde, parçalanmanın olmamasına rağmen çatlaklar genişleyerek daha da aktif duruma gelmektedir. Kaya kütlelerinde giderek artan gevşeme davranışları sonucu kopmalar olmakta, kayayı gizleyen ahşap malzemenin de (zamanla çürümesiyle) dayanımını kaybetmesinden dolayı tavan ve yan duvarlarda boşalmalar ve giderek kısmi göçükler meydana gelmektedir. Bu durumu önlemek için galerilerde devamlı tamir-tarım işleri yapılmakta bu da galeri birim maliyetlerini artırmaktadır. Sonuçta, bozulan tahkimatı düzeltmek için tertip edilen işçi sayısının,

açıklığı tahkim eden işçi sayısından fazla olması, evrensel işletmecilik kuralları açısından tamamen ters ve maliyetleri artırıcı bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

TTK'da, hemen hemen ahşap malzemenin kullanıldığı tüm galerilerde tamir-tarama çalışmaları yapılmaktadır. Örneğin; Karadon'da müessese nakliyat servisinde yapılan tamir-tarama çalışmaları incelendiğinde, her yıl mevcut galerilerin ortalama % 30'unun tamir-tarama gördüğü ortaya çıkmaktadır. Çıkarılan bu sonuçtan hareketle, yapılan galeri kazı çalışmalarında oluşturulan her açıklığın, her yıl % 30'unun tamir-tarama göreceği hesaplanarak maliyetlendirilmesi ve standart tip galeri birim maliyetlerine yansıtılması gerekmektedir.

4. TTK'DA UYGULANAN GALERİ TAHKİMAT SİSTEMİNE ALTERNATİF YAKLAŞIMLAR

TTK'da uygulanan mevcut tahkimat sistemine alternatif tahkimat sistemleri araştırılmış, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden yararlanma yoluna gidilmiştir. Modern kaya kütlesi sınıflama sistemleri, tasarım problemlerinin çözümünde kesin sonuçlar vermemesine rağmen, tahkimat seçimi ve tasannu konusunda yaklaşımlar sunması açısından değerlendirilmiştir.

Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin uygulanması amacıyla B14 kesitli Gelik -360/41405 kuzey hazırlık galerisi seçilmiştir. Galerinin yaklaşık 55-60 metrelik kısmında yapılan bir çalışmada mevcut eklemeler çevre koşullarıyla birlikte incelenmiştir. Bu bölge için Bieniawski'nin (1989) "Jeomekanik Sınıflama Sistemi" ile Barton vd.'nin (1974) "Q (Tünelcilik Niteliği İndeksi) - Sistemi" uygulanmış ve sınıflandırma sistemlerinin önerdiği tahkimat tipleri belirlenerek Çizelge 1'de özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan sınıflandırma sistemlerinin önerileri arasında benzerlikler olduğu ortaya çıkmaktadır. Her iki sistemde kaya saplamaları ön plana çıkmakta, tahkimat ince (5-10 cm kalınlığında) bir püskürtme beton tabakası ile desteklenmektedir. RMR sistemine göre, galerinin kendini tutma (tahkimatsız olarak ayakta kalma) süresi yaklaşık 800 saat (~1 ay) kadardır.

Çizelge 1. Sınıflandırma sistemlerine göre önerilen tahkimat tipleri.

| Kaya kütlesi sınıflama sistemleri (puan) | Tahkimat önerileri (Bieniawski, 1989; Barton and Grimstad, 1994) |
|--|---|
| Jeomekanik Sınıflama Sistemi (RMR =56)* | <ul style="list-style-type: none">• Sistematik kaya saplamaları** (2.9 m uzunlukta, 1-1.5 m aralıklı)• Tavanda çelik hasır• Tavanda 5-10 cm, yan duvarlarda 3 cm kalınlıkta püskürtme beton |
| Tünelcilik Niteliği İndeksi (Q = 3.2) | <ul style="list-style-type: none">• Düzenli kaya saplamaları (2.5 m uzunlukta, 1.6 m aralıklı)• Donatısız püskürtme beton (4-10 cm kalınlığında) |

(*) Temel RMR = 64 ve QSI (Jeolojik Dayanım indeksi) = 67 dir.

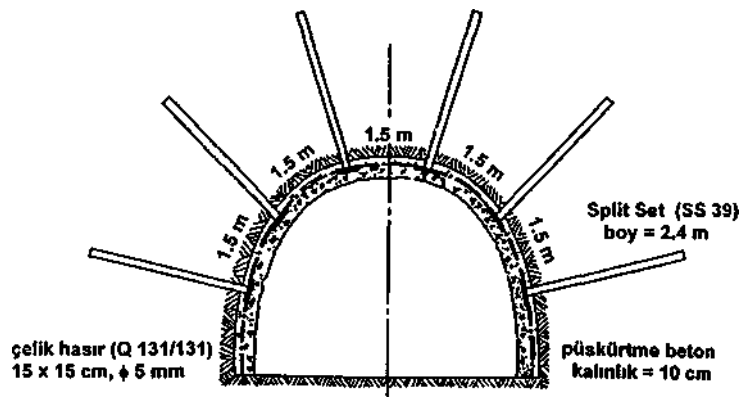
(**) Jeomekanik Sınıflama Sistemi'nin tahkimat önerileri; 10 m genişliğinde, atnalı kesitli, düşey birincil gerilmenin 25 MPa'dan az olduğu koşullarda, delme-patlatma yöntemiyle açılan tüneller için verilmiştir. Bu nedenle düzeltme yapılarak, saplama boyu « 0.5 x galeri genişliği ve saplama aralığı » 0.3 - 0.5 x saplama boyu alınmıştır.

Buna göre; TTK'da galen açıklıklarına uygulanan klasik tahkimat sistemine (rijit çelik bağ + ahşap kama ve fırçalar) alternatif olarak geliştirilmeye çalışılan yeni tahkimat sisteminde, kaya saplama, çelik hasır ve püskürtme beton kullanımı önerilmektedir. Örnek olarak seçilen galeri için belirlenen tasarım bilgileri aşağıya çıkarılmıştır:

Kaya Saplama: Sürtünme ankrajlı kaya saplamaından, yank tıp görünümlü "Split Set"lerin kullanılması planlanmıştır. Maliyeti ve bulunabilirliği, uygulama kolaylığı, ortam koşullarının uygunluğu ve daha önce yapılan çalışmaların ortaya koyduğu sonuçlar (Albayrak,1989; Yaralı, 1991), "Split Şeplerin seçimini ve kullanımını daha bir anlamlı kılmaktadır. Galerinin yan duvarları ve tavanı 2.4 m boyundaki SS 39 tipi (39 mm çapında) "Split Set" kaya saplamaıyla desteklenecektir. Saplama 1.5 m aralıklarla ve kazı yüzeyine dik konumda açılacak 35 mm çaplı deliklere, 15x15 cm'lik taşıma plakaları kullanılarak yerleştirilecek, her sırada 6 saplama bulunacaktır. Galeri ilerleme doğrultusundaki saplama aralıkları da 1.5 m olacaktır (Şekil 3).

Çelik Hasır: Çelik hasırın galerinin tavan ve yan duvarlarına yerleştirilmesi tasarlanmış, bu amaçla uygun çelik hasır tipleri araştırılmıştır. Göz aralıkları 15x15 cm, boy ve en çubuk çapları 5 mm, ağırlığı 2.06 kg/m olan Q 131/131 tipi kaynaklı çelik hasır (Çesan, 2000) uygun bulunmuştur. Çelik hasırın galeri yan duvarlarına ve tavana tutturulmasında sarkmamasına özen gösterilecektir. Bunun için çelik hasır parçaları bir göz aralığı kadar üst üste getirilerek, ince tel çubuklarla birbirine bağlanacaktır.

Püskürtme Beton: Yeni tahkimat sisteminde yer alan püskürtme beton, galerinin yan duvarları ve tavanına 10 cm kalınlığında ve kuru karışım yöntemiyle uygulanacaktır (Şekil.3). Kuru karışım yönteminin seçiminde en önde gelen etkenler olarak; deneme süresi içerisinde tek bir galeri alanında çalışılacak olması, püskürtme beton kalınlığının fazla olmaması, çevrim zamanı içerisinde fazla yer tutmaması, yaş karışım yöntemine kıyasla ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması ve uygulama kolaylığı gösterilebilir. Galeri alanında kuru karışım püskürtme beton yönteminin uygulanabilmesi için; yeraltında kullanımı kolay, küçük işler için tasarlanmış, güvenli ve ekonomik, hava tahrikli kuru karışım püskürtme beton makinesi tercih edilmiştir.



Şekil 3. Yeni tahkimat sistemi için ön tasarım uygulaması.

Galeri kazı çalışmalarında 1 metre galeri ilerlemesi için hesaplanması gereken malzeme bileşenlerini bulmak için, 1978-80 yıllarında, Çayırhan çift hatlı elektrikli tren yolu projesinde kullanılan ve 1983 yılında da Gelik İşletmesi, -150 su havuzunda deneme çalışmaları yapılan ve bir harman olarak da adlandırılan karışım temel olarak alınmıştır (Çizelge 2). Yeni tahkimat sisteminde 1 metre B14 kesit galeri ilerlemesi için gerekli püskürtme beton miktarı, (0.10 m kalınlık x 1 m ilerleme x 10 m galeri çevresi) 1.0 m³ olarak hesaplanmıştır. Uygulamada meydana gelecek geri sıçrama miktarı % 40 olarak düşünülürse, bu miktar 1.4 m³ olarak elde edilir. Buradan, 1 metre galeri ilerlemesi için; 700 kg (0.658 m³) kum, 420 kg (0.395 m³) çakıl, 350 kg (0.328 m³) çimento ve 21 kg (0.019 m³) hızlandırıcı bulunur.

Çizelge 2. Kuru karışım malzeme bileşenleri (Kiska, 1980).

| Malzeme bileşenleri | Ağırlık (kg) | Hacim (m ³) | Katların Oranı (%) |
|------------------------------|--------------|-------------------------|--------------------|
| * Çakıl (8-16 mm) | 500 | 0.313 | 47.0 |
| * Kum (0-8 mm) | 300 | 0.188 | 28.2 |
| * Çimento | 250 | 0.156 | 23.4 |
| * Hızlandırıcı (çim. % 6'sı) | 15 | 0.009 | 1.4 |
| Su | 135 litre | - | - |
| Toplam | 1065 | 0.666 | 100.0 |

* Kuru-çakıl, çimento ve hızlandırıcı yoğunluğu 1600 kg/m³ alınmıştır

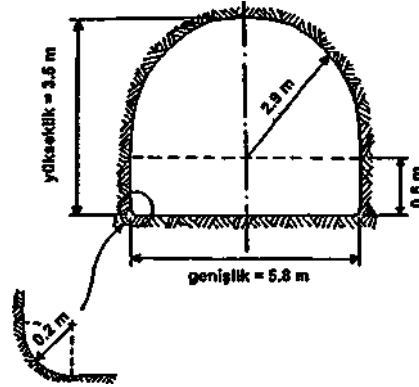
5. DURAYLILIK ÇÖZÜMLEMELERİ

Duraylılık çözümlenmeleri, kaya kütlesi sınıflama sistemleri kullanılarak belirlenen alternatif tahkimatların ön tasarım parametrelerinin ne derece yeterli olduğunu araştırmak, gerekirse tahkimat önlemlerinde değişikliklere gitmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, PHASE² (v. 5.0) iki boyutlu sonlu elemanlar bilgisayar programı (Rocscience, 2001) kullanılmıştır. İzlenen yaklaşıma göre; söz konusu galeri "tahkimatsız," yalnızca "kaya sapslamaları" ile desteklenmiş ve "püskürtme beton + kaya sapslamaları" ile desteklenmiş şekilde üç ayrı durumda modellenmiştir.

5.1 Açıklık Geometrisi ve Sonlu Elemanlar Ağı

B-14 kesitli galeri Şekil 4'te gösterildiği şekilde biraz basitleştirilerek boyutlandırılmıştır. Galerinin kazı genişliği 5.8 m, yüksekliği 3.5 m, yarım daire şeklindeki tavanının eğrilik merkezi tabandan 0.6 m yükseklikte olup; alt köşeler, eğrilik yarıçapı 0.2 m olan daire yaylan şeklindedir. Bu durumda, galerinin kazı kesiti yaklaşık 16.7 m² olmaktadır. Galerinin yan duvarları ve tavanı en fazla 10 cm kalınlığında bir püskürtme betonla kaplanırsa, faydalı kesit yaklaşık 15.7 m² olacaktır.

PHASE² programı yardımıyla oluşturulan sonlu elemanlar ağımda 4 düğüm noktalı dörtgen elemanlar seçeneği kullanılmıştır. Tahkimatsız galeri durumunu modelleyen sonlu elemanlar ağımda 2574 adet eleman ve 2652 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Galeriyi çevreleyen ortamın sınırlarının açıklıktan uzaklığı, yaklaşık olarak açıklık genişliğinin 5 katıdır ve bu sınır üzerinde bulunan düğüm noktalarının yatay ve düşey yöndeki yer değiştirmeleri önlenmiştir, incelenen tüm durumlarda, karşılaştırmaları sağlıklı yapabilmek için, açıklığı çevreleyen ortam için aym sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır.



Şekil 4. Modellenen galeri kesitinin boyutları.

5.2 Birincil Gerilme Alanı

Gerilme ve duraylılık çözümlerinde en önemli girdilerden biri olan birincil gerilme alanı bileşenlerinin büyüklük ve doğrultularının belirlenmesi çözümlerinin en kritik aşamasını oluşturmaktadır. Söz konusu galerinin incelenen kısmı yer yüzünden 510 ile 590 m arasında değişen bir derinlikte yer almaktadır. Bu değer ortalama olarak $h = 550$ m kabul edilip ve örtü katmanının ortalama birim hacim ağırlığı $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ alınarak, düşey birincil gerilme $P_v = h \cdot \gamma = 14 \text{ MPa}$ olarak belirlenmiştir.

Yatay birincil gerilmeler (P_h) için, ölçüm yapılmadıkça, sağlıklı bir değer kestirimi çok zordur. Bu çalışmada, yatay birincil gerilmelerin tüm doğrultularda birbirine eşit olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, literatürdeki mevcut yaklaşımların ve bu derinlik için rapor edilen (Brown and Hoek, 1978) ölçüm sonuçlarının bir değerlendirilmesi yapılarak birincil gerilmelerin oranı olan "k" için bir dizi değer göz önünde bulundurulmuştur ($k = P_h / P_v = 0.5, 1, 2$ ve 2.5). Başka bir deyişle; çözümlerinde sırasıyla $P_h = 7 \text{ MPa}, 14 \text{ MPa}, 28 \text{ MPa}$ ve 35 MPa değerleri kullanılmıştır.

5.3 Kaya Kütesinin Modellenmesi

Galeriyi çevreleyen kaya kütesinin elasto-plastik davranışı modellenirken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

- Kaya kütesi yenilinceye kadar elastik izotropik davranmakta olup, deformasyon modülü = 20 GPa ve Poisson oranı = 0.2'dir.
- Kaya kütesi Hoek-Brown görgül yenilme ölçütüne (Hoek and Brown, 1980) uygun olarak yenilmektedir.
- Kaya malzemesine (ince taneli kumtaşı) ait dayanım parametreleri:
 - tek eksenli basınç dayanımı: $CT_{C1} = 120 \text{ MPa}$
 - Hoek-Brown dayanım parametresi: $m = 15.5$
- GSI = 67 olan kaya kütesine ait dayanım parametreleri:
 - orijinal kaya kütesi için: $m = 4.8$ ve $s = 0.025$;
 - kırılmış kaya kütesi için: $m_r = 3.1$ ve $s_r = 0.001$;
 - dilatasyon parametresi = 0 (hacim artışı yok).

S. 4 Kaya Saplamaalarının Modellenmesi

PHASE² (v. 5.0) programında -Split Set kaya saplamaaları bir dereceye kadar modellenenbilmektedir. Çözümlemelerde, aşağıdaki saplama özellikleri kullanılmıştır.

- saplama tipi: Split Set,
- saplama boyu: 2.4 m
- saplama çeliğinin kesit alanı: 216.5 mm²,
- saplama aralığı: 1.5 m (düzlem içi ve dışı)
- saplama çeliğinin Young modülü: 200 GPa,
- çekme kapasitesi: 0.1 MN
- kesme (*shear*) kapasitesi: 0.02 MN/m,
- kesme katılığı (*shear stiffness*): 10 MN/m/m

5.5 Püskürtme Betonun Modellenmesi

Çözümlemelerde püskürtme beton, Bernoulli formülasyonuna uygun olarak davranan giriş elemanlarıyla temsil edilen kaplama (*lining*) elemanları kullanılarak modellenmiş olup şu özellikler kullanılmıştır:

- a. püskürtme beton tabakasının kalınlığı: 10 cm,
- b. püskürtme betonun elastik özellikleri;
 - Young Modülü: 30 GPa,
 - Poisson oranı: 0.2
- c. püskürtme betonun dayanım özellikleri:
 - tek eksenli basınç dayanımı: 35 MPa,
 - tek eksenli çekme dayanımı: 3 MPa
 - kalıcı basınç dayanımı: 3.5 MPa,
 - kalıcı çekme dayanımı: 0

5.6 Kazı ve Tahkimat Aşamalarının Modellenmesi

PHASE² sonlu elemanlar programı, kazı ve tahkimat aşamalarının modellenmesine izin vermektedir. Ancak, program iki boyutlu çözümleme yapabildiği için, açıklık çevresindeki gerilme ve yer değiştirmelerin düzlem birim şekil değiştirme (*plane-strain*) çözümlemesi, kazı aynasından çok gerideki (galeri aynasının etkisinin hissedilmediği) bir kesitteki durumu yansıtmaktadır. Böyle bir çözümlemede, tahkimat elemanları tek bir aşamada modele uygulanırsa, gerçek hayatta tahkimat elemanlarının maruz kalmayacağı derecede büyük yer değiştirmelere (zorlanmalara) maruz kalacaklardır.

Bilindiği gibi, galeri aynası civarındaki kaya kütlesi bir miktar ön deformasyona uğramış durumdadır. "Kaya saplamaaları + püskürtme beton" tahkimat kazı aynasında uygulansa bile, yalnızca bu ön deformasyondan sonra gelişecek olan çevre kaya deformasyonuna maruz kalacaktır, işte PHASE² programı, tahkimat uygulanmadan önce çevre kayanın maruz kaldığı ön deformasyonu modelleme olanağı tanıyarak, çözümlemenin daha gerçekçi olmasını sağlayabilmektedir.

Buradaki kritik nokta, tahkimat uygulanmadan önce çevre kayada ne kadarlık bir ön deformasyonun meydana geldiğinin kestirimidir. Bunun için de yine PHASE² programı kullanılmıştır. Şöyle ki: hidrostatik birinci gerilme alanında ($P_h = P_v = 14 \text{ MPa}$) açılan, (kesiti B14 galerisi kesit alanıyla aynı) dairesel bir tünel aynası çevresindeki elastik gerilme ve yer değiştirmeler aksel simetrik (*axisymmetric*) bir çözümlenme ile incelenmiştir. Ortama, göz önünde bulundurulmuş galeriyi çevreleyen kaya kütlelerinin elastik özellikleri verilmiştir. Çözümlenmeye göre; tünel aynasındaki ışınal (*radiât*) yer değiştirme, aynanın çok gerisindeki yer değiştirmenin yaklaşık % 25'i civarında bulunmuştur. Çalışmada göz önünde bulundurulmuş tahkimatlı durumlarda, tahkimat elemanlarının ikinci bir aşamada yük almaya başladığı varsayılmıştır. İlk aşamada ise galeriyi çevreleyen ortamın % 25'lik bir ön deformasyona uğrayacağı kabul edilmiştir. Böylece kaya kütlesi ile tahkimat elemanlarının gerçeğe yakın bir şekilde etkileşimi modellenenmiştir.

6. ÇÖZÜMLEME SONUÇLARI

Kaya kütlesi özellikleri kullanılarak, PHASE² programı yardımıyla, her üç tahkimat durumu için elasto-plastik çözümlenmeler yapılmıştır. Açıklık çevresindeki yenilme bölgesi ve dayanım katsayısı kontrolen incelenmiştir. Çözümlenmelerde "o" çekme yenilmesini, "x" kesme yenilmesini "a" de çekme ve kesme yenilmesini birlikte betimlemektedir.

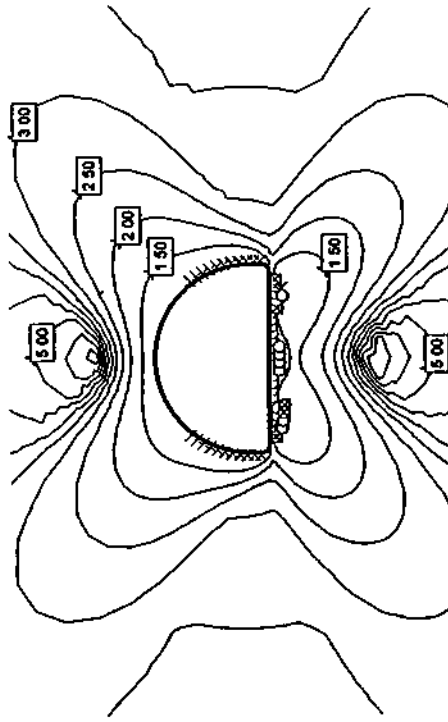
Tahkimatsız durum için k'nın seçilen değerleriyle yapılan çözümlenmelerden elde edilen sonuçlara göre; duraylılık açısından en olumsuz durum $k = 2.5$ koşulunda elde edilmektedir (Şekil 5.a-d). Açıklık çevresindeki yenilme bölgesinin açıklığı tamamen çevreleyerek, özellikle tabanda derinlik kazandığı görülmektedir. Buna göre, tahkimatlı durumlarda yalnızca $k = 2.5$ için çözümlenmeler göz önünde bulundurulmuştur

Kaya sapsamalı tahkimat tasarımı ile yapılan çözümlenme sonuçlarına göre; bu uygulamadaki yenilme bölgelerinin dağılım ve derinliği, tahkimatsız tasarımdakiyle büyük benzerlik göstermektedir. Bu sonuca bakarak, açıklık çevresinin kaya sapsamaları ile desteklenmesinin, yenilmiş bölgelerde anlamlı bir azalmaya neden olmadığı söylenebilir (Şekil 6.a). Ne var ki, gerçek uygulamalarda kaya sapsamaları yenilen kayayı yerinde tutma ve sağlam kısımlara taşıma işlevini yapmaktadır. Bu mekanizma tam olarak modellenemediği için kaya sapsamaları işlevsizmiş gibi algılanmaktadır.

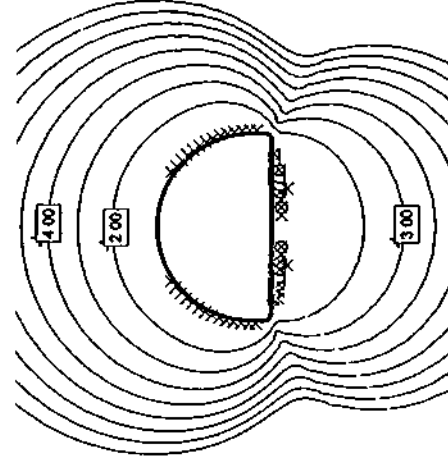
"Kaya sapsaması + püskürtme beton" uygulamasında, galerinin tavan ve yan duvarlarında meydana gelen yenilme bölgesinin genişliği tahkimatsız ve kaya sapsamalı tahkimata oranla önemli ölçüde daralmaktadır (Şekil 6.b).

Sonuçta; şekillerden de anlaşılacağı gibi, duraylılık açısından en kötü durumu veren $k = 2.5$ koşulunda bile, en az yenilmenin "kaya sapsaması + püskürtme beton" tahkimatı durumunda gerçekleştiği görülmektedir.

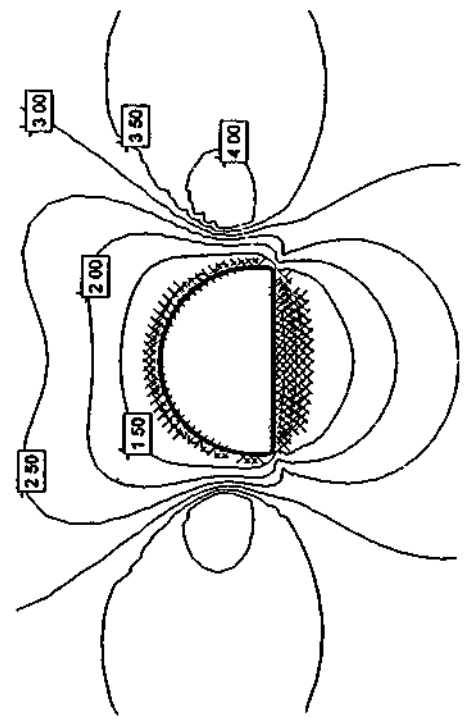
PHASE² sonlu elemanlar programı ile yapılan çözümlenmelerde; programın özellikleri nedeniyle Split Set sapsamalarının gerçek tahkimat mekanizması, çelik hasırın tahkimat davranışındaki etkisi ve püskürtme betonun dayanımının ve katılığının zamanla artması modellenenmiştir.



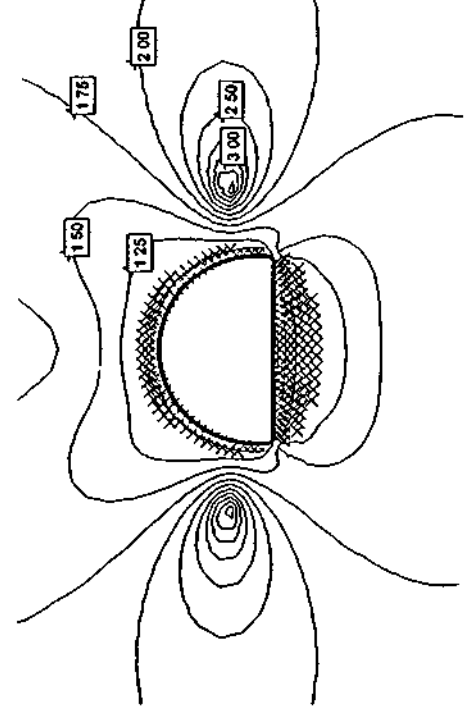
a. $k = Ph / Pv = 0.5$ için çözümlene.



b. $k = Ph / Pv = 1.0$ için çözümlene.

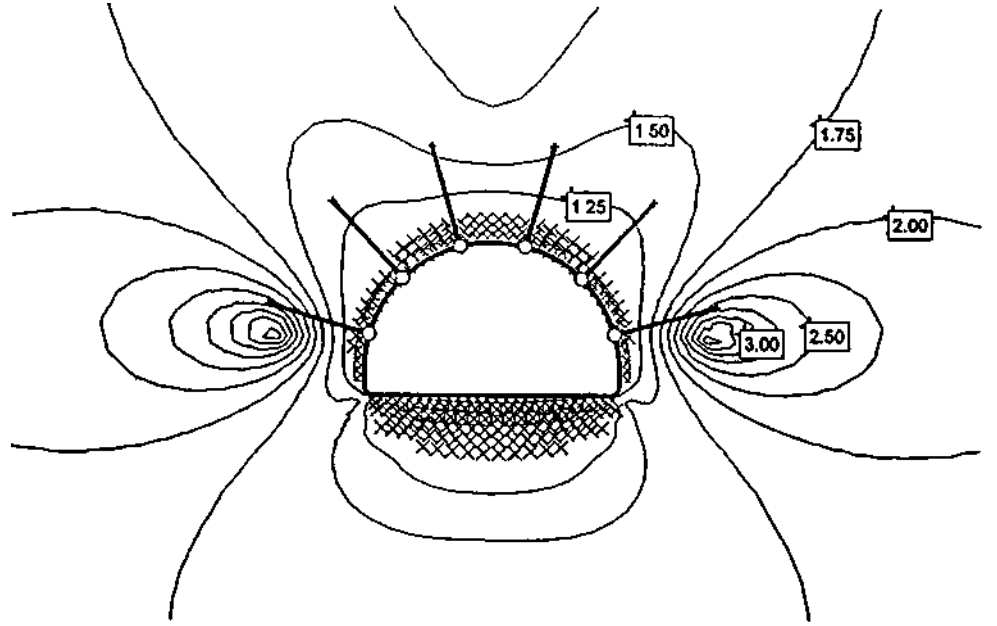


c. $k = Ph / Pv = 2.0$ için çözümlene.

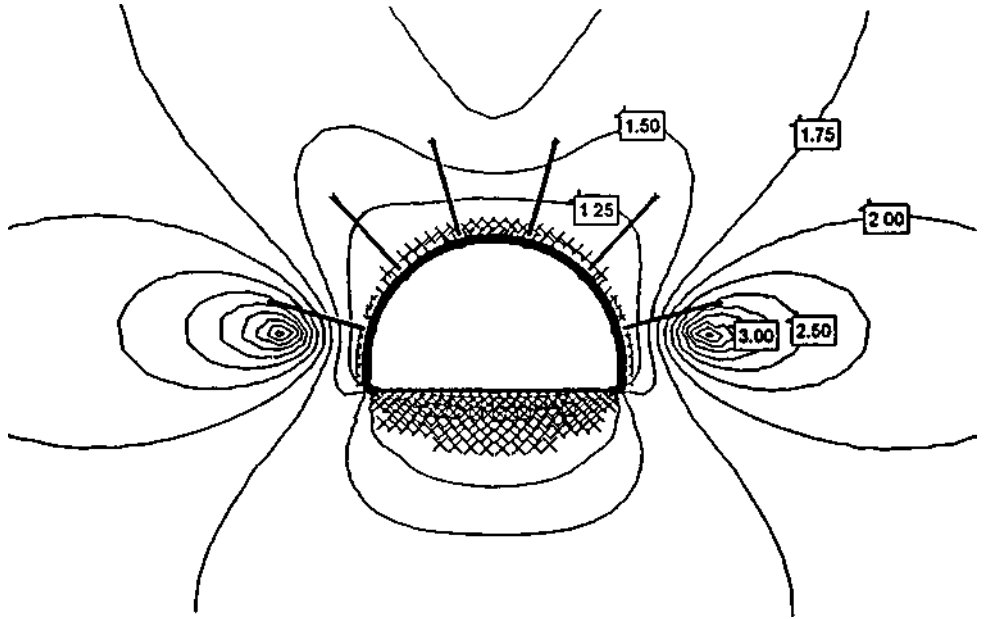


d. $k = Ph / Pv = 2.5$ için çözümlene.

Şekil 5. Tahkimatsız galeri çevresinde çeşitli birincil gerilme koşullarında oluşan yenilme bölgesi ve dayanım katsayısı konturları



a. Kaya saplaması tahkimatlı durum.



b. "Kaya saplaması + püskürtme beton" tahkimatlı durum.

Şekil 6. $k = 2.5$ için yapılan elasto-plastik çözümleme sonucuna göre dayanım katsayısı konturları ve yenilmiş elemanlar.

7. YENİ TAHKİMAT SİSTEMİNDE B14 KESİT STANDART TİP DÜZ GALERİ BİRİM MALİYET HESABI

Yeni tahkimat sisteminde, B14 kesit standart tıp düz galeri için yevmiye miktarlarında arın gerisi tahkimat ustalığı (2) ve arın gerisi tahkimat yedeği (4) ile diğer usta (1) ve diğer yedek (2) olmak üzere toplam 9 yevmiye (galeri kazı sürecinde geriye donuk tamir-tarama çalışmaları olmayacağı varsayılarak) yer almamıştır. Yeni tahkimat sisteminde B14 kesitli galeri için 1 metre galeri maliyeti, Mayıs 2001 tarihi itibarıyla (1.00 USD = 1 145 000 TL), 1 566 268 460 TL çıkmaktadır. Hesaplamaların detayları Yurdakul (2001) tarafından verilmiştir. Maliyet hesaplamaları yapılan her iki sistemde ortaya çıkan sonuçlar Çizelge 3'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Yeni tahkimat sistemi, klasik sisteme kıyasla % 19.6 gibi anlamlı bir fark ortaya koymaktadır. Maliyetlere etki eden diğer bir farkta, yeni tahkimat sisteminde, klasik sisteme oranla tamir-tarama çalışmalarının olmaması ve bunun için de gerek işçiliklerde gerekse malzeme tüketiminde ekonomik anlamda yeni kazanımlar sağlanmasıdır.

Çizelge 3. Karşılaştırmalı maliyet analizi.

| Maliyet Girdileri | Klasik sistem (a) | | Yeni tahkimat sistemi (b) | | Fark (a-b) | |
|-------------------|-------------------|-------|---------------------------|-------|---------------|------|
| | (milyon TL/m) | (%) | (milyon TL/m) | (%) | (milyon TL/m) | (%) |
| İşçilik | 1 074 | 55.1 | 833 | 53.2 | 241 | 124 |
| Malzeme | 174 | 8.9 | 177 | 11.3 | -3 | -0.2 |
| Muh. mas. | 375 | 19.3 | 295 | 18.8 | 80 | 4.1 |
| Etüt his | 325 | 16.7 | 261 | 16.7 | 64 | 3.3 |
| Genel toplam | 1 948 | 100.0 | 1 566 | 100.0 | 382 | 196 |

8. SONUÇLAR

Kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri ve PHASE ile yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, en uygun tasarımın "kaya saplama + püskürtme beton" tahkimatı durumu olduğu söylenebilir. Yeni tahkimat tasarımı olarak adlandırılan bu tasarımın uygulanmasında doğrudan kaya ile etkileşim sağlanarak yük taşıma söz konusudur. Kaya saplama ve çelik hasır desteğinde uygulanan püskürtme beton, açıklığı çevreleyen kaya kütlesi ile birlikte çalışarak, kayanın kendi kendisini taşımasına yardımcı olacaktır. Ancak, maliyetlerde de yaklaşık % 20 ekonomi sağlayan yeni tahkimat sistemi için pilot çalışmalara esas teşkil edecek bu tasarımın yeraltında denenerek, sonuçlarının alınması gerekir.

KAYNAKLAR

ACI Committee 506 (1966) ACI Standart, Recommended Practice for Shotcrete (ACI 506-66). *Shotcreting*, ACI SP-14.

- Aka, İ. ve Celep, Z.** (1978) *Püskürtme Beton ve Uygulaması*, ITU Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayını, İstanbul, s. 1-6.
- Albayrak, S.** (1989) *Zonguldak Komur Havzası'nda Surtunmeli Kaya Saplama Uygulanabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Müh. Tezi, HU Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 100 s.
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J.** (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol. 6, pp. 189-236.
- Barton, N. and Grimstad, E.** (1994) Rock mass conditions dictate choice between NTM and NATM. *Tunnels and Tunneling*, October
- Bieniawski, Z.T.** (1989) *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley and Sons, New York, 251 pp.
- Brown, E.T. and Hoek, E.** (1978) Trends in relationships between measured insitu stresses and depth. *Int J Rock Mech Min Sei & Geomech Abstr*, Vol. 15, pp. 211-215.
- Çesan** (2000) *Beton Çelik Hasarı*, tanıtım katalogu, Çesan A.Ş., İstanbul.
- Gerçek, H.** (1979) *An Analysis of Shotcrete Application Practice*, M.Sc. Thesis, Dept. of Mineral Engineering, The Pennsylvania State University, 237 pp.
- Gerçek, H.** (1992) *Püskürtme Betonun Yeraltı Tahkimatı Olarak Kullanımı*, Zonguldak Endüstri Destekleme Merkezi, Manual No. SP 2/03, Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik Fakültesi, Zonguldak, s. 1-22.
- Hoek, E. and Brown, E.T.** (1980) *Underground Excavations in Rock*, IMM, London.
- Kiska** (1980) Çayırhan çift hatlı elektrikli tren yolu tünel açma projesi, püskürtme beton uygulama kitapçığı (yayımlanmamış), Kiska Kom. Şti, Ankara.
- Mahar, J.W., Parker, H.W. and Wuellner, W.W.** (1975) *Shotcrete Practice in Underground Construction*. Report to the Federal Railroad Administration, Department of Transportation, Contract No. DOT FR 30022, NTIS No. PB-248 248 765/LL.
- MBT** (1997) *Jobsite Manager*, MBT Underground Construction, Zurich, pp. 18-19.
- Rocscience** (2001) *PHASE² 2D Finite Element Program for Calculating Stresses and Estimating Support Around Underground Excavations - User's Guide*, Rocscience Inc., Toronto, 173 pp.
- Ünlü, T. ve Çolak, K.** (2001) TTK Ocaklarında Taşta Sürülen Galerilerde Püskürtme Beton ve Kaya Saplama Kullanımının Araştırılması, Birinci Gelişme Raporu, ZKÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.
- Yaralı, O.** (1991) *Kaya Saplama Uygulamaları, Tasarımı ve Kullanılmalarına İlişkin Yönergeler*, Yüksek Müh. Tezi, HÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, s. 64-71.
- Yurdakul, Ş.** (2001) *Püskürtme Beton Teknolojisinin TTK Ocakları Ana Galerilerinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Müh. Tezi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Zonguldak, 221 s.