

AŞIRI BASKILI SINIFTA BİR KAYA KÜTLESİNDE AÇILAN DERİN YERALTI AÇIKLIKLARINDA TAHKİMAT SİSTEMLERİNİN DAVRANIŞI
THE SUPPORT SYSTEM BEHAVIOUR OF DEEP UNDERGROUND OPENINGS IN AN EXTREMELY SQUEEZING ROCK MASS

İ.F. Öge^{1,*}, O.Kutay², A. Erel², E. Soyer², C. Tuz², C. Ersoy², E. Kahraman²

¹*Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü*

(*Sorumlu yazar: feridoge@mu.edu.tr)

²*Polyak Eynes Enerji Üretim Madencilik A.Ş.*

ÖZET

Yeraltı açıklıklarının etrafındaki gerilmeler ile kaya kütesinin dayanımı arasındaki orantı olumsuz şekilde bozulduğunda büyük ölçekte ve ısrarcı bir deformasyon gözlemlenebilmektedir. Bunun gibi zemin davranışına, baskılı zemin adı verilmektedir. Baskılı zemin davranışına karşı yeraltı açıklıklarında oldukça rijit davranan ağır tahkimat sistemleri ile veya yenilebilen hafif tahkimat sistemleri ile tasarım ve uygulama yapılabilir. Aynı jeolojik birim içerisinde her iki tahkimat sistemi kullanılarak farklı yeraltı açıklıkları sürülmüş ve uygulamaların davranışları hem çeşitli hesaplama yöntemleri hem de saha gözlemleri ile karşılaştırılmıştır. Rijit tahkimat sistemi daha fazla yük taşıyarak deformasyonları durdururken, deformasyon boşluklu yenilen hafif tahkimat sistemi ise kontrollü bir şekilde zemin hareketine izin vererek duraylı hale gelmiştir. Farklı uygulama kısıtlarının bulunduğu her iki farklı kazı ve tahkimat yönteminde de duraylı yeraltı açıklıkları oluşturulabilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tahkimat, rijit tahkimat, yenilen tahkimat, deformasyon boşluğu, kuyu açma, tünelleme

ABSTRACT

Large-scale and persistent deformations can be observed when the ratio of the stresses around the underground opening to the strength of the rock mass is unfavourably disturbed. Such ground behaviour is called squeezing ground. In order to cope with the squeezing ground behaviour, the design and application of the support system can be executed either by using heavy support systems having a rigid character or yielding light support systems. The underground openings were driven by using two different support concepts in the same geological unit. The behaviour of two systems was compared to each other by using computational approaches and the field observations. While the rigid support system blocked the deformations by accumulating a considerable support stress, the light yielding support with deformation gap converged to a stable state by allowing deformation in a controlled manner. Stable underground openings were established by employing two different excavation and support schemes under different operational restrictions.

Keywords: Ground support, rigid support, yielding support, deformation gap, shaft sinking, tunnelling

GİRİŞ

Yeraltı açıklıkları etrafında gerilme ve deformasyon, açıldıkları kaya veya zemin koşulları, arazi gerilmeleri ve uygulanan tahkimat sistemine göre farklı davranışlar sergiler. Kısa bir şekilde ÖNORM B2203'te verilen davranışlara göz atmak yararlı olacaktır: "Stabil veya duraylı" koşullar oldukça olumlu bir kazı-tahkimat sürecine izin verir ve lokal dökülmeler haricinde elastik davrandığı söylenilebilir.

Koşullara göre tahkimatsız bir açıklık uzun süreler boyunca ayakta kalabilir. “Gevrek” kaya kütleleri ise, stabil duruma göre daha olumsuz koşulları tanımlar. Zaman içerisinde, uygun ve genellikle hafif tahkimat sistemleri uygulanmadığında sökülme veya yenilmeler artar ve deformasyonlar hızlanma eğilimine girer. Masif ve dayanımı yüksek kaya kütlelerinde, yeraltı açıklıkları etrafında gelişen gerilmeler ve depolanan enerjinin ani veya kısa bir süre içerisinde boşalması durumunda, “dağ atma veya kaya patlaması” olarak adlandırılan yenilme davranışı gözlemlenebilir ve bu durumun gerçekleşebilmesi için genellikle kayda değer bir derinlik gereklidir. Bu davranış durumunda kaya malzemesi, genellikle yenildikten sonra aniden dayanım kaybedecek karakterdedir, yenilmeler yeraltı açıklığı etrafında gelişebilir. Kaya malzemesi ve kütlelerinin dayanımı ile açıklık etrafındaki gerilmeler arasında olumsuz bir orantı oluştuğunda “baskılı” davranış gözlemlenir. Bu orantının aşırı derecede olumsuz olduğu durumlarda “aşırı baskılı” kaya koşullarından bahsetmek mümkündür. Kaya malzemesi içerisinde şişme özelliğine sahip kil mineralleri bulunduğu, yeraltı açıklığı, ortamın nem oranına veya suya maruz kalma durumuna bağlı olarak şiddetli şekilde deforme olma eğilimine girebilir ve bu durum da “şişen” kaya kütleleri olarak tanımlanır. Aynı davranış “çok kohezyonlu – kısa süreli stabil” olarak da tanımlanır. Bunların dışında “daneli” kaya koşulları iyi bağlanmamış, kohezyonsuz kaya davranışını, “akıcı” davranış benzer şekilde düşük kohezyon ve sürtünme durumunda ve su basıncı ile yeraltı açıklığının kaya malzemesi ile dolmasını tanımlar. Bu gibi durumlarda desteksiz ve önsürensiz stabilite sağlamayabilir, (KGM, 2013).

Madencilik veya tünelcilik faaliyetlerinde, yukarıda verilen kaya kütleleri davranışlarından birkaçının bir araya geldiği veya burada tanımlanmayan davranışların da gözlemlenebileceği söylenebilir. Örneğin nem veya su maruziyeti karşısında kaya malzemesinin dayanımının kısmen veya tamamen azalması, doğal nemini kaybedince ufalanması, çatlaması ve dökülmesini görmek mümkün olabilir. Doğa ile ilgili olmayan koşullardan da kaynaklanan stabilite problemlerine rastlamak mümkün olabilir. Tahkimat sistemlerinde imalat hataları, uygun olmayan malzeme seçimi, zayıf işçilik veya şantiye koşullarındaki çeşitli zorluklar da tahkimat sistemlerinin performansını etkiler.

Aşırı baskılı kaya kütlelerinde deformasyon miktarları büyüktür ve ısrarcıdır. Yeraltı açıklıkları, uzun süre deforme olma eğilimindedir. Aşırı baskılı kaya kütlelerinde, stabil ve fonksiyonelliğini koruyacak yeraltı açıklıklarının oluşturulması için birbirinden çok farklı felsefede tahkimat sistemleri uygulanabilir. İlki ve en geleneksel olanı “direnc prensibi” veya “ağır ve rijit” tahkimat sistemleri olarak tanımlanabilir. Mühendislik çalışmalarına göre ön görülen kaya baskısını karşılayabilecek ve deformasyonları bastırabilecek kapasitede, genellikle kalın püskürtme beton, betonarme, Bernold kaplaması, rijit çelik bağ gibi tahkimat elemanları kullanılabilir. Bu durumda tahkimat sistemleri büyük yüklere maruz kalır, tahkimat sistemlerinde aksel yükler ve eğilme momentleri oluşur ve eğer uygun tasarlandılar ise, yeraltı açıklığını stabil tutarlar (Barla, 2001).

Aşırı baskılı kaya kütleleri ile başa çıkabilmek için uygulanabilecek bir diğer yöntem ise “yenilen” veya “hafif-esnek” tahkimat sistemleridir. Bu yöntemler, “ağır ve rijit” tahkimat sistemlerine göre daha hafif tahkimat sistemleridir ve idealde belirli bir miktar deformasyona kontrollü şekilde izin vererek tahkimat üzerinde aşırı yük birikimine izin vermezler (Barla, 2001). Nispeten ince püskürtme beton sınırlı miktarda aksel yük biriktirebilir, ancak; eğilme momentine karşı düşük dirençtedir. TH tip kayar-bağ (yenilen tahkimat) ise eğilme momentine karşı belirli bir direnc sergilerken, aksel yük birikimi düşük tutulabilmektedir. Gerilme kontrol elemanları veya yenilen tip çelik tahkimatlar uygun olarak tasarlandığında esnek tipte tahkimat sistemleri oluşturulabilir. Püskürtme beton ve kafes iksa kombinasyonu ile yenilen tip tahkimat sistemi oluşturulması mümkündür.

Her bir tahkimat sisteminin avantajı veya dezavantajı bulunmakta beraber, işletme veya şantiye koşulları tasarımın başarısında önemli rol oynar. En büyük derinliğin 250m’ye ulaştığı Bolu dağı tünelinde tipik NATM konseptleri ile çalışılmaya başlanmış ve karşılaşılan büyük problemler, oldukça rijit ve ağır tahkimat sistemleri ile aşılabılmıştır, (Özben ve Işık, 2006; Şimşek, 2013). Venezüella’da, Yacambú-Quibor tünelinde ise aşırı baskılı kaya koşulları neticesinde TBM kaybı yaşanmış, daha sonra galeri açma makinası ile sürülen 4 m genişlikte tünelde invert tahkimat sistemi uygulamasında karşılaşılan güçlükler

problem yaratmıştır. Nihayetinde, dairesel kesitte yenilen çelik tahkimatlar ve kalın püskürtme beton uygulaması ile problem çözülebilmıştır, (Hoek, 2000).

Çalışmaya konu olan yeraltı açıklıkları oldukça zayıf kaya kütleleri olup yaklaşık 700m derinlikte yer almaktadır. Hem kuyu hem de desandre (eğimli maden galerisi) açıklıkları çalışmada dikkate alınmıştır. Özü itibari ile birbirlerinden çok farklı felsefelere sahip tahkimat sistemleri uygulanarak muhafaza edilmişlerdir.

ÇALIŞMA ALANI VE KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ

Soma Kömür havzasında henüz hazırlık aşamasında yer alan Polyak Eynez yeraltı işletmesinde yaklaşık olarak 4.5 m yükseklik ve 6.8 m genişlikte bir adet desandre ve 8 m iç çapa sahip iki kuyu çalışma için incelemeye alınmıştır. Desandre ve kuyuların Kumtaşı-Silttaşı-Alacalı Kil seviyesi (P1), Üst Linyit seviyesi (KP1) olarak adlandırılan kısımlardan geçişleri esnasında aşırı baskılı bir durum ile karşılaşılacağı öngörülmüştür. Desandre ve kuyular, P1 ve KP1 birimini yaklaşık olarak 700 m örtü kalınlığı altında geçmektedir. KP1 biriminin altında uzanan P1 birimi yeraltı açıklıklarının geçtiği yerlerde deniz seviyesi altında ve yaklaşık olarak -470 m kotlarında bulunmaktadır. Bu bildiri hazırlanırken tüm yeraltı açıklıkları bu birimlerden geçmiş ve nihai olarak stabil hale getirilmişlerdir.

RMR (Bieniawski, 1989) ve Q-Sistemi (Barton, vd., 1974) kaya kütle sınıflama sistemleri olup GSI (Jeolojik Dayanım İndisi), (Hoek, 2007) kütlelerin sadece yapısal ve süreksizlikler açısından kalitesini göstermektedir. Çizelge 1’de KP1 ve P1 birimleri için genel dağılımlar görülmektedir. Aşağıdaki değerler (Çizelge 1) desandrenin kazısı sırasında aynadan elde edilmiştir. Aynı zamanda, desandre için yapılmış olan çok sayıda sondaj, geoteknik log ve laboratuvar deneyinden yararlanılmış ve özet halde verilmiştir. Yeraltı suyu durumu yer yer nemli veya ince sızıntı şeklinde iken, kuru kısımlar büyük yer tutmaktadır. Kaya birimlerinde suya veya neme karşı hassasiyet bulunduğunu belirtmek gerekir. Genel olarak, $I_{s,50}$ değeri 1 MPa’dan küçüktür.

Çizelge 1. Kaya kütlesi hakkında temel bilgiler

	RQD(%)	RMR _{g9adj}	Q-Sistemi	GSI	σ_{ci} (MPa)
Genel	0-20	20-27	0.005-0.028	20-30	1-15
En fazla	50	43	0.772	50	50

P1 birimi kaya malzemesi değişen karbonat seviyesine göre $\sigma_{ci} = 10-15$ MPa gibi tek eksenli basınç dayanımlarına çıkabiliyorken, yer yer zemin karakterinde ve yaklaşık olarak $\sigma_{ci} = 1$ MPa dayanımda rastlanabilmektedir. Üst ve alt bantta dayanım veren bu birim geçişleri tedrici, net ve keskin tabakalanma içermeyen şekildedir. Çizelge 1’de verilen en büyük değerlere nadiren rastlanabilmektedir. Ancak, kaya malzemesi yakından incelendiğinde birçok içsel süreksizlik barındırdığı ve tektonik etki gördüğü anlaşılmıştır.

Kaya kütlelerinin mekanik özellikleri sayısal modelleme gibi amaçlarda kullanılmak için kalibre edilmiş ve Çizelge 2’de verilen özellikler kullanılmıştır. Burada, Gen. Hoek-Brown yenilme ölçütü temel alınmış, eşdeğer Mohr-Coulomb parametreleri bilgi için verilmiştir. Çizelge 2’de “P1-KP1 Genel” malzeme tipi, kayanın zayıf ve sağlam kısımlarının tek bir malzeme tipi olarak genelleştirildiği durum için seçilmiştir. İlerleyen bölümlerde gösterileceği üzere karbonatlı ve düşük karbonatlı seviyeler ayrı ayrı incelenip modellendiğinde kullanılmak üzere P1, “kaya” ve “zayıf” olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Artık dayanım değerleri de ayrıca dikkate alınmış, ancak; burada sunulmamıştır.

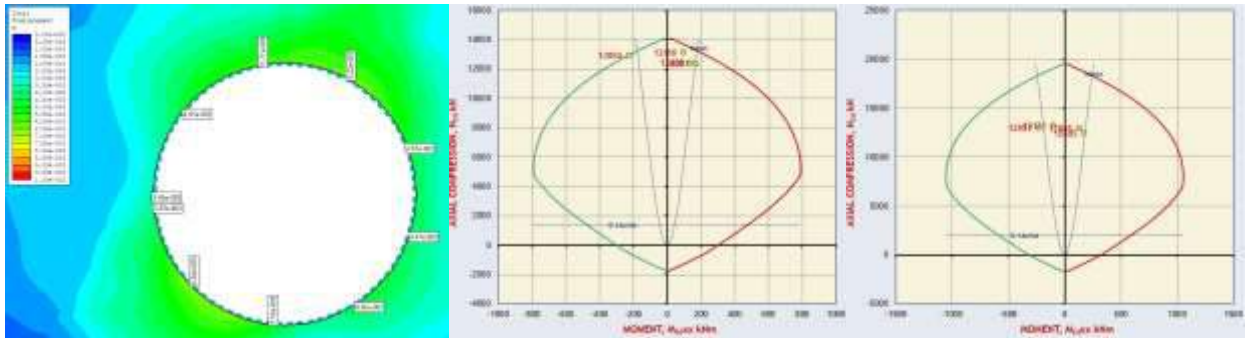
Çizelge 2. Jeolojik birimlerin mekanik özellikleri

Malzeme tipi	Gen. Hoek Brown					Eşdeğer Mohr-Coulomb	
	E_{rm} (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_b	s	a	c' (MPa)	ϕ' (°)
P1-KP1 Genel	676	11	2.515	0.0039	0.506	1.163	26.19
P1 kaya	2198	15	5.138	0.0357	0.501	1.781	34.08
P1 zayıf	139	1	4.682	0.1889	0.500	0.581	14.66

AĞIR VE RİJİT TAHKIMAT SİSTEMİ UYGULAMASI

Madencilik faaliyetlerinde verimli iş döngüsü oluşturulması esastır. Kuyu açılması esnasında beton naklinin kolaylığı göz önüne alınarak betonarme kaplama yapılmasına karar verilmiştir. Proje aşamasında, özellikle büyük derinlikte, P1 jeolojik biriminin de dahil olduğu bazı zayıf birimler için çift katmanlı betonarme planlanmıştır. İlk katman, yani kaya yüzeyi ile temasta olan betonarme kaplama 40cm kalınlıkta, nihai kaplama 60cm kalınlıkta ve her biri çift sıra donatılıdır. Nihai kaplama, ilk katmanın tamamlanmasından sonra yapılacaktır. Sahada kuyu açma çalışmalarında kullanılan betonun dayanımları (küp örneklerde) 28 günde 70 MPa gibi değerlere erişebilmekte, C50/60 sınıf beton rahatlıkla üretilebilerek her iki katmanda da kullanılmaktadır. Betonun 24 saat içerisindeki dayanımı ortalama 32 MPa, civarındadır. İlk katmanın tahkimat basıncı 24 saatte 2.72 MPa ve nihai olarak 4.25MPa olarak hesaplanabilir, (Carranza-torres, 2004). İkinci katman tek başına 6.22 MPa tahkimat basıncı sağlayabilmektedir.

İlk katman betonarme uygulaması, kuyu dibinde pasanın alınmasını takiben yapılmaktadır. Aynaya yakın ve daire şeklinde kalın beton uygulaması, kaplamanın yüksek basınca maruz kalınmasına yol açar ve sistemin oldukça rijit olduğu belirtilebilir. Aksisimetrik sonlu elemanlar modeli ile üç boyutlu kazı deformasyonları incelenmiş ve düzlemsel deformasyon kabulü ile modelde ilk katman betonun dayanımındaki değişim ve aynadan (kuyu dibinden) olan mesafeye göre deformasyonların ayna desteğinden kurtulması canlandırılmıştır, (Rocscience Inc., 2011) (Şekil 1). Modelleme esnasında Çizelge 2’de verilen “P1-KP1 Genel” malzeme özellikleri kullanılmıştır.



Şekil 1. Kuyuda arından itibaren oluşan hareketler (sol), 24 saat içerisinde (orta) ve nihai olarak (sağ) betonarme eksenel yük ve eğilme momentleri

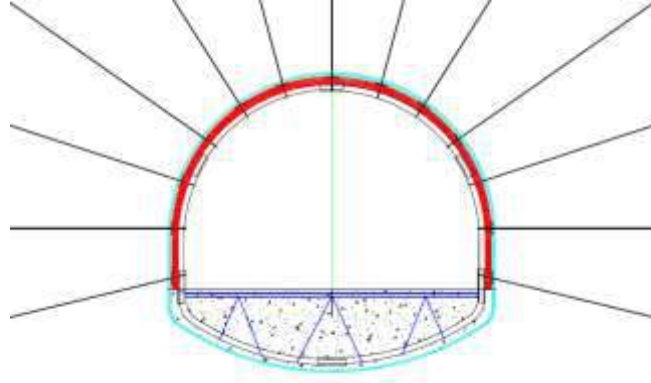
Şekil 1’de kuyu dibinden itibaren tahkimat sistemine etkileyen yüklerden dolayı, betonda en fazla 5-6mm gibi bir radyal deplasman hesaplanabilmektedir. Eksenel yük ve eğilme moment etkileşim diyagramlarına bakarak kuyu dibine yakın kısımlarda (betonun nihai dayanımına erişmediği durum) sınırdan dayanım gözlemlenmiştir. Beton dayanım kazandıkça yeterli bir yük taşıma kapasitesine erişildiği ve betonun zemin yüklerini rahatlıkla karşılayabilecek seviyeye ulaştığı görülebilir. İncelemelere dayanarak, kullanılan kaya kütleli malzeme özelliklerinin de saha ile uyumlu olduğu kanısına varılmıştır. Yerinde betonarme kaplama üzerinde ise gözle görülebilir deformasyon veya çatlak görülemediği ve kuyu iç genişliğinde daralma bulunmamaktadır.

HAFİF-ESNEK TAHKIMAT SİSTEMİ UYGULAMASI

Yeraltı kömür işletmelerinde galeri sürülmesinde, tipik tünelcilik faaliyetlerine göre bazı ilave zorluklar bulunmaktadır. Maden galerilerinde %25 veya daha dik eğimler uzun galeriler boyunca oluşturulabilmektedir. Bunun gibi eğimlerde baş aşağı galeri sürülmesinde pasa alımı problem doğurur ve lastik tekerlekli donanımların kullanımında emniyet problemleri ortaya çıkmaktadır. Tipik olarak, ülkemizdeki orta ve büyük ölçekte kömür madenciliğinde kollu galeri açma makinası ve buna entegre bant konveyör sistemleri kullanılmaktadır. Bu uygulama pasa alımını kolaylaştırırken, kullanılan konveyör sistemi galeri açma makinasının hareketini kısıtlar. Bu durumda aynada püskürtme beton gibi uygulamalarda robot kullanmak oldukça güç bir hal alabilmektedir. İhtiyaçlar doğrultusunda üç şeritli karayolu tüneli gibi büyük kesitlerin kullanımı gerekli olmayabilir ve bu durum yeraltında büyük ekipman kullanımını kısıtlar. Bir diğer kısıt ise, gazlı ortamda çalışmaya uyumlu ATEX Grup I donanım kullanımı olup, püskürtme beton robotları veya Jumbo gibi donanımlarda temin zorlukları ortaya çıkmaktadır ve bunların ayna dibinde kullanımı, kesiti kaplayan galeri açma makinası tarafından sınırlandırılabilir. Çalışma alanında bulunan desandre tahkimat işlerinde, bahsi geçen zorluklar nedeni ile özellikle aynada kaya veya halat saplama uygulaması, rotary tip manuel matkaplar ve kuru karışım püskürtme beton uygulaması şeklindedir. Yürüyen kalıp ile nihai betonarme kaplama yapılması durumu da değerlendirilmiş ancak; oluşturulacak yürüyen kalıbın hidrolik piston ve göğüsleme kirişlerinin, sürekli kullanımda olan monoray, bant ve askı ekipmanlarının, vantüpün ve insan geçişinde sorun oluşturacağı anlaşılmıştır. Tipik tünel inşaatlarının tersine, belirli bir süreliğine tamamen boş bir desandre, madenin işletilmesi boyunca sağlanamayacaktır. Bu nedenle, tünel inşaatlarındakine benzer nihai kaplama uygulamasının yapılamayacağına kanaat getirilmiştir.

Yukarıda bir kısmı verilen uygulama koşulları nedeni ile hafif-esnek bir tahkimat sistemi geliştirilmek durumunda kalınmıştır. Kaya kütlelerinin şiddetli şekilde deforme olma eğilimi göz önüne alınarak, kayanın enerjisini sönmüleyecek ve yeraltı açıklığının kontrollü bir şekilde deforme olmasına izin verecek “Yüksek Deformasyon Toleranslı Tahkimat Sistemi” planlanmıştır. Bu uygulamanın esası ince püskürtme beton, uzun halat saplama ve TH tip çelik tahkimattan oluşmaktadır. Buradaki uygulama, 6.8 m genişlik ve 4.5 m yüksekliğe sahip kemer tavanlı maden galerisi için olup, daha büyük kesitler için modifikasyon gerektirmektedir.

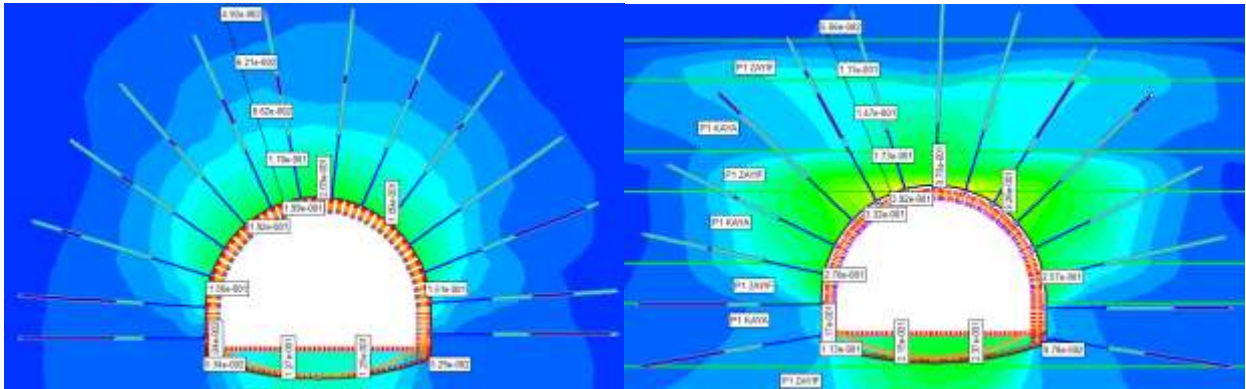
Desandrede gerçekleştirilen uygulamada, tahkimat sisteminin ilk safhası aynada püskürtme beton uygulaması olup kalınlığı 7 cm civarında, çelik hasır veya çelik fiber donatı katkılıdır. Püskürtme beton uygulaması kuru karışım olduğundan dolayı dayanım değerleri operatör tecrübesine göre büyük değişkenlik gösterebilir ve çok yüksek dayanımlar beklenememektedir. Püskürtme beton dayanımı 20 MPa civarındadır. Buna ilaveten 6.3m uzunlukta ve 15.24 mm çapta çelik halat sapsamalar yaklaşık 0.75x0.75 m paternde uygulanmaktadır. Halat sapsamalar tavan ve yan duvarda aynı uzunlukta planlanmıştır. Çelik tahkimat, nihai galeri kesitini belirlemektedir ve püskürtme beton ile halat sapsamanın uygulandığı yüzey ışınsal olarak çelik tahkimattan en az 15cm mesafede yer alır. TH34 tip çelik tahkimat ile püskürtme betonlu ve halat sapsamalı sistem arasında deformasyon boşluğu yer almaktadır. Aradaki deformasyon boşluğuna, kullanılan çelik halat uzunluğuna, halatın kopma uzamasına ve zeminin öngörülen veya ölçülebilen deformasyon dağılımına göre karar verilmektedir. Bu boşluğun açıklığı, gerektiğinde ve uygun tasarlandığında 50cm gibi değerlere de varabilir. Daha sonra zemin beklenen deformasyonu yaparak çelik tahkimat ile temas sağladığında veya yaklaştığında ikinci kat püskürtme beton uygulaması öngörülmüştür. İkinci katmanın kalınlığı ortalama 20 cm olarak belirlenmiş ve ikinci kat çelik hasır gerektiğinde uygulanabilecektir. İvert tahkimat sistemi C30/37 beton olarak belirlenmiş olup, sahanın ve kazı yönteminin kendine özgü koşullarından kaynaklı olarak oldukça geriden (50-100 m) gelmektedir. Planlanan tahkimat sistemi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deformasyon boşluğu içeren (kırmızı renk) tahkimat sistemi

Bu sistemin ilk safhada, eğilme momentine ve aksenal yüklerle karşı direnci düşüktür. Beklenen deformasyon oluştuğundan sonra ise ancak yeterli kadar eğilme momenti ve aksenal yük karşılayabilecek şekilde bir tasarım bulunmaktadır. Kuyu uygulamasındaki betonarme ile kıyaslanamayacak kadar hafif ve esnek bir tahkimat sistemidir. Sistemin ilk aşamada tahkimat basıncı 0.72 MPa ve ikinci kat püskürtme beton ve çelik tahkimat sisteminin tahkimat basıncı 1.13 MPa olarak hesaplanmıştır.

Sayısal modelleme esnasında püskürtme beton ve halat saplama uygulanan yüzeyin çelik tahkimat ile teması sağlanarak ikinci katman betonun uygulanmasına kadar, deplasmanların 15-40 cm aralığında olduğu görülmüştür. İki farklı modelleme yapılmıştır. Bunların ilkinde kaya kütlelerinin homojen ve izotrop olduğu varsayılarak Çizelge 2’de verilen “KP1-P1 Genel” adı altında verilen genelleştirilmiş özellikler kullanılmıştır, (Şekil 3, solda). İkinci yaklaşımda ise P1 biriminin zemine benzer davranış gösteren ve nispeten sağlam kısımları modele ayrı ayrı girilerek, Çizelge 2’de “P1 kaya” ve “P1 zayıf” özellikleri modelde uygulanmıştır, (Şekil 3, sağda).

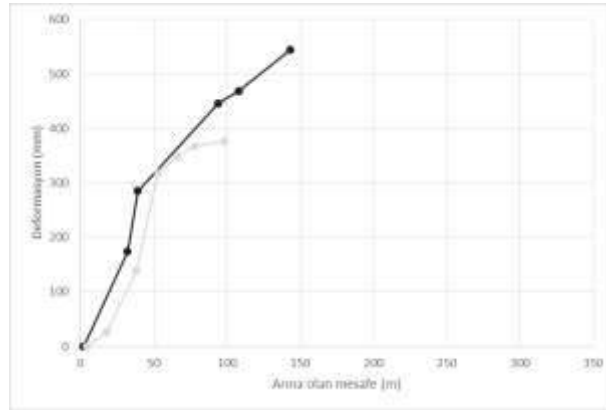


Şekil 3. Deformasyon dağılımları: genelleştirilmiş model (solda), iki malzeme uygulanan model (sağda)

Şekil 3’te sunulan deformasyonlar aynadan itibaren kazı sınırının yaptığı deplasmanlar olup, hareketler oluştuğundan sonra deformasyon boşluğunun kapandığı ve çelik tahkimat ve ilave beton uygulaması ile tahkimat sisteminin tamamlandığı durum görülmektedir. Deformasyon boşluğu kapanırken kontrollü bir şekilde oluşan büyük deformasyonlar, ikinci katmanın devreye girmesinden itibaren ise 1cm değeri ile sınırlı kalabilmiştir. Bu tasarım dikkate alınarak uygulama yapılan kısımlarda deformasyonlar sınırlandırılabilmiş ve zaman içerisinde deformasyonların artması önlenmiştir. Sahada yer yer öngörülenden 10-15 cm fazla deformasyonun olduğu yerler de bulunmakta olup, galeri fonksiyonelliği anlamında problem arz etmemektedir.

Asli uygulamanın dışında, daha hafif tahkimat sistemi uygulanan kısımlara da değinmekte fayda vardır. Bu uygulamalarda aynı halat saplama yoğunluğu kullanılmış olsa da, yan duvarlarda 3m uzunlukta halat saplamlar içermekte ve daire kapanımı daha gecikmeli olarak tamamlanabilmiştir. Ayrıca, ikinci katman püskürtme beton uygulamasının gecikmesi de istenmeyen deformasyonların oluşmasına yol açmıştır. Bu durumda tahkimat basıncı 0.72MPa olarak verilebilir. Bu çalışma kaleme alınırken desandrenin geçtiği KP1-P1 formasyonu boyunca 64 farklı noktada deformasyon ölçümü yapılmıştır ve bu ölçüm noktaları içerisinde büyük deformasyon gösteren iki örnek nokta verilmiştir. Ölçümler total-station kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelerde yapılan deformasyon ölçümlerinde aynadan itibaren 40 cm seviyelerine kadar kesitte daralma görülerek stabil duruma ulaşan yerler varken, 50 cm'den fazla deforme olan kısımlar bulunmaktadır, (Şekil 4). Bu eğriler aynadan itibaren uzunlama deplasman profilini oluşturmaktadır.

Asıl olarak oluşturulan tasarımdan çok daha hafif olarak sınıflandırılabilir tahkimat sisteminin uygulandığı kısımlarda deformasyon durma eğilimine girmemiş ve tamir edilerek kesitin tekrar istenilen boyuta getirilmesi gerekmiştir. Tamirat çalışmaları, ilave 20cm püskürtme beton ve TH34 tip çelik tahkimatları, yer yer 8 m uzunlukta ilave halat saplamları ve planlanan invert uygulamasını içermektedir. Bu şekilde tamir edilen galeri kısımları şu an stabil durumda olup, kullanılmaktadır.

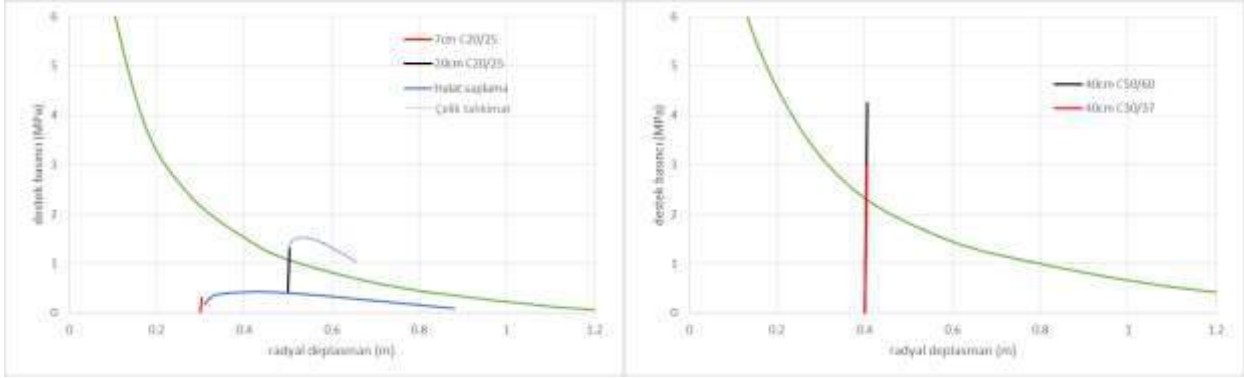


Şekil 4. Ölçülen en yüksek deformasyon ölçümleri (tavan noktası)

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

725m derinlikte ve aynı jeolojik birim içerisinde ağır-rijit ve hafif-esnek tahkimat uygulamaları karşılaştırılmıştır. Hafif ve yenilen tip tahkimat sistemi desandrede, ağır ve rijit tahkimat sistemi kuyuda uygulanmıştır. Kuyuda ölü yük oluşumu, kuyu duvarları desteklenmek durumunda olduğundan ve tavan bulunmadığından dolayı, desandre gibi yataya yakın eğimde galerilere göre daha azdır. Kaya kütlelerinin aşırı baskılı davranış göstermesi durumunda, oluşacak ölü yükler, baskı kaynaklı deformasyonun yanında düşük seviyelerde kalacağı belirtilebilir. Bu durumda tahkimat performanslarının karşılaştırılması uygun görülmüştür.

Aynı koşullar altında tahkimat performanslarını daha açık bir şekilde karşılaştırabilmek amacı ile Zemin-tahkimat reaksiyon eğrileri yaklaşımı kullanılmıştır. Bu çalışmada uzunlamasına deformasyon profilleri, aksisimetrik sayısal modeller ile elde edilerek ayna ve ayna gerisi deformasyonlar kestirilmiştir. Zemin reaksiyon eğrilerini elde etmek için sayısal modeller oluşturulmuştur. Tahkimat reaksiyon eğrileri ise Carranza-Torres (2004)'te verildiği şekilde analitik çözümler ile oluşturulmuştur, (Şekil 5).



Şekil 5. Zemin-tahkimat reaksiyon eğrileri: hafif-esnek tahkimat (solda), ağır-rijit tahkimat (sağda)

Zemin-tahkimat reaksiyon eğrileri incelendiğinde, zemin ve tahkimat için verilen çizgilerin kesişim noktaları, sistemin dengeye geldiği durumu göstermektedir.

Öncelikle, hafif ve yenilen tahkimat sistemi için (Şekil 5, solda) hazırlanan eğrilere bakıldığında ilk uygulanan 7cm kalınlıktaki püskürtme betonun kapasitesinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Halat saplamanın ise, uzun boyu sayesinde uzun bir deplasman boyunca yük taşıyıcılığı bulunmaktadır. İlk uygulanan ince püskürtme beton ve halat saplama kombinasyonu yaklaşık 20cm deplasmana kontrollü şekilde maruz kaldıktan sonra, TH34 çelik tahkimat ile teması ikinci katman püskürtme beton ile sağlanmaktadır. Bu durum bütün sistemin arında uygulanması durumuna veya deformasyon boşluğu uygulanmamasına göre daha yüksek güvenlik katsayısı elde edilmesini sağlayabilmektedir. Çelik tahkimatın kırık çizgi ile belirtilmesinin nedeni, tahkimatın kayar bağ olması ve beton ile kaplanmasında oluşan davranışını yaklaşık olarak vermektir. Bu şekilde uygulama yapıldığında güvenlik katsayısının 1.5 civarında olduğu görülmektedir.

Betonarme tahkimat sisteminin uygulandığı durumda ise sistemin davranışı hem yüksek kapasiteli hem de rijittir. Burada kuyu dibine (arına) yakın kısımlarda beton dayanımı henüz daha düşük seviyede iken güvenlik katsayısı 1.3, dayanımını kazandıktan sonra 1.85 seviyelerine erişmektedir. Ayrıca, oluşan deplasmanlar rijit sistem tarafından sınırlandırıldığından dolayı deformasyon toleransı oldukça düşük değerlerde tutulabilir. Zemin reaksiyon eğrisinin dengeye ulaştığı tahkimat basıncı 2.3 MPa, tahkimat kapasitesi 4.2MPa civarlarındadır. Bunun gibi yüksek bir değere hafif tahkimat sistemleri kullanılarak erişilememektedir. Ancak her iki açıklık fonksiyonellikleri sağlanacak şekilde açılabilmiş ve stabilize edilmişlerdir.

YORUMLAR

Soma kömür havzasında bir yeraltı kömür işletmesinde 700-750m gibi büyük bir derinlik altında aşırı baskılı kaya kütle davranışı olarak tanımlanan probleme karşı birbirine zıt iki farklı tahkimat sistemi felsefesi ile uygulama yapılmıştır. Aynı zemin birimi içerisindeki farklı tahkimat sistemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Hem ağır-rijit hem de hafif-esnek-yenilen tahkimat kullanımı ile yeraltı açıklıkları duraylı hale getirilebilmiştir. Tahkimat sistemlerinin seçiminde işletmedeki uygulama koşulları, makine-donanım ve kazı yöntemi uyumu büyük rol oynamıştır. Deformasyon boşluklu ve yüksek deformasyon toleranslı hafif tahkimat sisteminin tasarımını ve uygulamasını yapmak, rijit tahkimat sistemine nazaran daha güçtür. Oluşacak deformasyonların kestirimine göre oluşturulacak deformasyon boşluğunun belirlenmesi için detaylı çalışma gerekmektedir. Rijit tahkimat sistemi ise yüksek erken dayanıma sahip beton kullanımı ile daha rahat bir şekilde uygulanabilmiştir. İşletme veya inşaat koşullarına göre bu gibi zeminler için birbirinden çok farklı tahkimat sistemleri ile çözümlere ulaşılabileceği görülmekle beraber, geçici tahkimatların deformasyonları durdurulmasından sonra

betonarme veya uygun kalite ve kalınlıkta püskürtme beton ile nihai kaplama yapılması, yapıların uzun süre içerisindeki duraylılıklarına büyük katkı sağlayabileceği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Barla, G., 2001. Tunnelling under squeezing rock conditions Giovanni Barla Eurosummer-School in Tunnel Mechanics.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering Classification Of Rock Masses For The Design Of Tunnel Support. Rock Mech., 4, S.189–239.
- Bieniawski, Z., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. New York, Wiley.
- Carranza-Torres, C., 2004. Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(SUPPL. 1), pp.1-11.
- Hoek, E., 2000. Big tunnels in bad rock / Terzaghi Lecture. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 127, No. 9. September 2001, pages 726-740.
- Hoek, E., 2007. Practical Rock Engineering, Rocscience Inc.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013. (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü Ve Tüneller, Üstyapı Ve Çeşitli İşler),T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2006.
- ÖNORM B2203 1 Oktober 1994.
- Özben, M., Işık, S., 2006. Bolu dağı tünel kazılarında jeolojik birimlerin deformasyon oluşumuna ve kazı destek sınıflarının uygulanmasına etkisi. Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu, 25-27 Mayıs 2006, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Rocscience Inc., 2011. Phase2, v8.
- Şimşek, O. 2013 TÜNELCİLİKTE DÖNÜM NOKTASI BOLU DAĞI TÜNELİ. Türkiye Tünelcilik Semineri, 2013.