

Kuyu Duraylılığının Analitik ve Sayısal Yöntemler ile Karşılaştırmalı Bir İncelemesi

Melih GENİŞ^{*1}, Dinçer ACUN²

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

²Türkiye Taşkömürü Kurumu, Üzülmüş Müessese Müdürlüğü, Zonguldak

Geliş tarihi: 04.11.2015

Kabul tarihi: 25.12.2015

Özet

Bu çalışmada, kuyu duraylılığın değerlendirilmesi için analitik ve sayısal gerilme çözümlemesi yöntemlerinden faydalanılmıştır. Analitik çözümlerde konverjans sınırlama yöntemi, sayısal çözümlemelerde ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Tahkimatlı kuyunun sayısal çözümlemesinde kullanılan yük dağılımı oranları söz konusu yöntemlerden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla bulunmuştur. Tahkimatlı açıklıkların modellenmesinde kullanılan yük dağılımı oranları sırasıyla birinci aşamada %70-75, ikinci aşamada %25-30 arasında olduğu belirlenmiştir. İncelenen durumlar için kuyunun beton kaplamasının duraylı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak, tahkimatlı açıklıkların modellenmesinde göz önünde bulundurulmuş bazı önemli hususlar sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kuyu, Duraylılık, Yenilme, Arazi reaksiyon eğrisi, Tahkimat karakteristik eğrisi

A Comparative Study of Shaft Stability by Analytical and Numerical Methods

Abstract

In this study, analytical and numerical stress analyses (methods) were utilized to evaluate the shaft stability. Convergence confinement method and finite element method were used during the analytical and numerical analyses, respectively. Load split ratios used in the numerical solution for the supported shaft were also obtained by comparison of results of the above mentioned methods. It was determined that load split ratios employed for supported openings were 70-75% in the first stage and 25-30% in the second stage, respectively. It was concluded that concrete support of shaft is stable for considered conditions. Finally, some important considerations on the modelling of supported openings are presented.

Keywords: Shaft, Stability, Failure, Ground reaction curve, Support characteristic curve

* Yazışmaların yapılacağı yazar: Melih GENİŞ, Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, Zonguldak, genis@beun.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde maden, inşaat mühendisliği çalışmaları içinde yeraltı açıklıklarının tasarımı, kaya mekaniği disiplinin en önemli konularından birini oluşturmaktadır. Yeraltı açıklıkları, işlevleriyle uyumlu bir duraylığı kendilerinden beklenen hizmet süreleri boyunca gösterebilmelidir [1]. Özellikle uzun süreli hizmet vermesi beklenen ana maden açıklıkları (kuyu, galeri gibi), ulaştırma tünelleri, baraj yapıları tünellerinin kısa ve uzun süreli duraylılık performanslarının doğru tahmin edilmesi, tasarım başarısının temel unsurunu oluşturmaktadır. Bu kapsamda, proje öncesinde yeraltı yapılarının oluşturulacağı kaya malzemesi ve kütlelerinin jeomekanik özelliklerinin, birincil gerilme durumunun doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte duraylılık performanslarının tahmininde kullanılacak uygun görgül (ampirik), analitik ve sayısal çözümlerinin problemlere uygulanabilmesi de diğer önemli bir unsurdur.

Bu çalışmada, Amasra-Bartın'da özel sektör tarafından yürütülen Amasra B taşkömürü üretim projesi kapsamında açılan üç kuyudan biri olan Tarlaağzı üretim kuyusu incelenmiştir. Kuyu duraylılığın değerlendirilmesi için analitik ve sayısal gerilme çözümleri yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak tahkimatlı açıklıkların duraylılık değerlendirilmesi amacıyla kullanılan sayısal çözümlerinde bazı dikkat edilmesi gereken hususlar vurgulanmıştır.

2. ÇÖZÜMLEME YÖNTEMLERİ

Çalışmada kullanılan analitik çözümler ve sayısal çözümler yöntemi alt başlıklarda incelenmiştir.

2.1. Analitik Çözümleme

Analitik çözümler yöntemi olarak "konverjans sınırlama yöntemi (convergence-confinement method)" kullanılmıştır [2]. Arazi ve tahkimat etkileşim analizi için kullanılan basitleştirilmiş olan bu yöntem aslında yatay açıklıklar (tünel) için

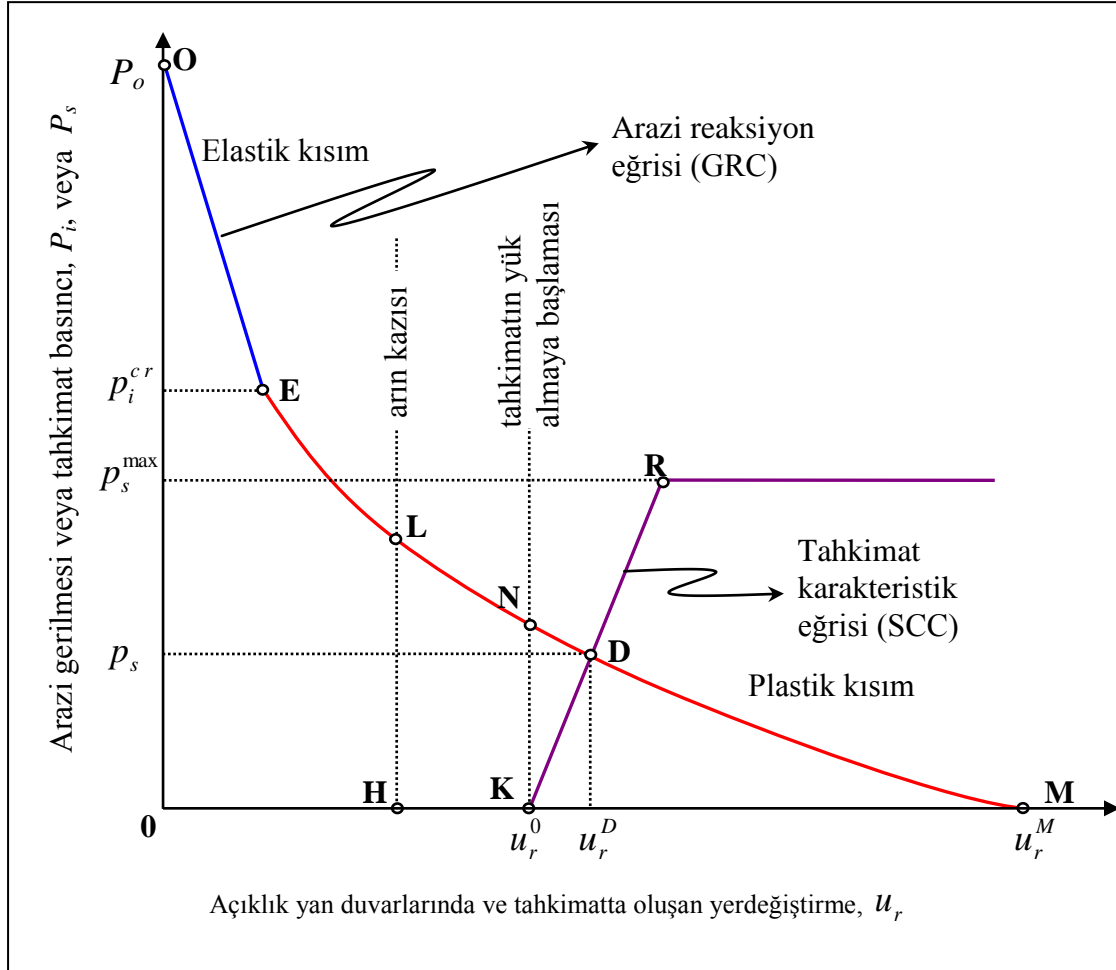
geliştirilmiş olsa da bu çalışmada dikey açıklıklar (kuyu) için uygulanmıştır. Konverjans sınırlama yöntemi tünel veya kuyu arını gerisinde yapılacak tahkimata etkiyecek izin verilen yükleri tahmin eden bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Kazı aynasında hemen kurulan tahkimat arın çevresinde oluşan tüm yükleri taşımayacaktır. Kazı çevresinde oluşan yüklerin bir kısmı kazılmamış kaya kütleleri tarafından taşınacaktır. Tahkimatın kurulması ve arın ilerlemesinden sonra arın etkisi azalacaktır. Arın tarafından taşınan yükün bir bölümü tahkimat tarafından taşınacaktır. Tahkimat tarafından taşınan bu yük tahkimat tasarım yükü olacaktır [2].

Yöntem hidrostatik birincil gerilme altında (P_o) açılan dairesel kesitli bir tünel için geçerlidir. Bu yöntem kuyu arını çevresinde uygulanmıştır. Problemin basitleştirilmesi içinde açıklık çevresinde oluşan bütün deformasyonların açıklığın uzun eksenine dik düzlem içinde olduğu yani düzlem birim şekil değiştirme durumu olduğu varsayılmaktadır. Kaya kütlelerinin dayanımı, Hoek-Brown (H-B) yenilme ölçütü ile tanımlanmıştır. Yöntemin uygulanmasında arazi reaksiyon eğrisi ve tahkimat karakteristiklerinin belirlenmesi başlıca unsurları oluşturmaktadır.

2.1.1. Arazi Reaksiyon Eğrisinin Oluşturulması

Arazi reaksiyon eğrisi (ground reaction curve, GRC), düzenli içsel basınca (tahkimat basıncı) (p_i) sahip dairesel açıklığın elasto-plastik çözümlenmesi ile elde edilmektedir. Tipik bir GRC'de verilen "E" noktası ile tanımlanan kritik içsel basınç (p_i^{cr}), kaya kütlelerinin elastik davranıştan elasto-plastik davranışa geçiş yaptığı arazi gerilmesini veya tahkimat basıncını tanımlamaktadır. Diğer bir ifade ile $p_i \geq p_i^{cr}$ olduğunda kaya kütleleri elastik davranış göstermekte; $p_i < p_i^{cr}$ olduğunda ise kaya kütleleri elasto-plastik davranış göstererek açıklık çevresinde R_p yarıçapında bir yenilme bölgesi oluşmaktadır (Şekil 1). Kritik içsel basınç aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir:

$$p_i^{cr} = \left[P_i^{cr} - \frac{s}{m_b^2} \right] m_b \sigma_{ci} \quad (1)$$



Şekil 1. Arazi tahkimat etkileşiminin şematik gösterimi ([2]'den değiştirilerek)

Burada, σ_{ci} , kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı; m_b ve s , H-B ölçütünde kaya kütlelerinin özelliklerine bağlı sabitler ve P_i^{cr} , ölçeklendirilmiş kritik içsel basınç olup,

$$P_i^{cr} = \frac{1}{16} [1 - \sqrt{1 + 16S_o}]^2 \quad (2)$$

burada, S_o , ölçeklendirilmiş birincil gerilme olup

$$S_o = \frac{P_o}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (3)$$

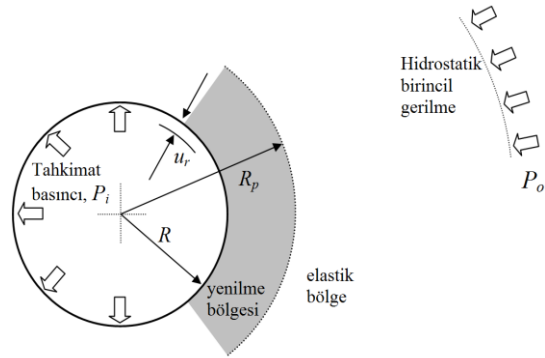
ile verilmektedir. Arazi reaksiyon eğrisinin elastik bölümünde (Şekil 1'de OE doğru parçası) ($p_i \geq p_i^{cr}$) radyal yer değiştirme (u_r^{el}) ile içsel basınç arasındaki ilişki aşağıda verilmektedir:

$$u_r^{el} = \frac{P_o - P_i}{2 G_m} R \quad (4)$$

burada, R , açıklık kazı yarıçapı; G_m ise kaya kütlelerinin kesme (kayma) modülüdür.

İçsel basıncın kritik içsel basınçtan daha düşük olması durumunda ($p_i < p_i^{cr}$) açıklık çevresinde

yenilme bölgesi oluşmaktadır. Şekil 2'de gösterilen yenilme bölgesinin yarıçapı (R_p) aşağıda verilen eşitlik ile bulunmaktadır [2]:



Şekil 2. Hidrostatik birincil gerilme alanında açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi ve yer değiştirme ([2]'den değiştirilerek)

$$R_p = R \exp \left[2 \left(\sqrt{P_i^{cr}} - \sqrt{P_i} \right) \right] \quad (5)$$

Burada P_i , ölçeklendirilmiş içsel basınç olup,

$$P_i = \frac{P_i}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (6)$$

ile tanımlanmaktadır. Arazi reaksiyon eğrisinin plastik bölümünün (Şekil 1'de EM eğrisi) tanımlanması için malzemenin akış kuralı gereklidir. Akış kuralı, malzeme deformasyona uğrarken birim deformasyon ile hacimsel değişiklik arasındaki ilişki olarak tanımlanır. Yeraltı kazıları pratiğinde akış kuralı genellikle doğrusal olarak varsayılmakta olup hacimsel değişimin büyüklüğü dilatasyon açısı (ψ) ile belirtilmektedir. Eğer $\psi=0^\circ$ ise malzeme plastik deformasyon boyunca hacimsel değişime uğramamakta, $\psi>0^\circ$ ise plastik deformasyon boyunca hacim artışına uğramaktadır.

Hoek ve Brown [3], kaya kütesinin plastik hacimsel değişiminin olmadığı yaklaşımının çoğu durumlarda en uygun olabileceğini önermiştir. Dilatasyonun olmadığı ($\psi=0^\circ$) kaya kütleleri için açıklık çevresinde oluşan plastik radyal yer

değiştirme (u_r^{pl}) ve arazi reaksiyon eğrisinin plastik bölümü (EM eğrisi) kolaylıkla hesaplanabilmektedir [2]:

$$\frac{u_r^{pl}}{R} \frac{2G_m}{P_o - P_i^{cr}} = \left[\frac{1-2\nu}{2} \frac{\sqrt{P_i^{cr}}}{S_o - P_i^{cr}} + 1 \right] \left(\frac{R_p}{R} \right)^2 + \frac{1-2\nu}{4(S_o - P_i^{cr})} \left[\ln \left(\frac{R_p}{R} \right) \right]^2 - \frac{1-2\nu}{2} \frac{\sqrt{P_i^{cr}}}{S_o - P_i^{cr}} + \left[2 \ln \left(\frac{R_p}{R} \right) + 1 \right] \quad (7)$$

Tünel arını ve gerisinde oluşan radyal yer değiştirmenin açıklığın uzun eksenini boyunca değişimi ile ilgili birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu araştırmacılar Panet [4], Ünlü ve Gerçek [5], Başarı ve arkadaşları [6] elastik çözümlere dayalı, Chern ve arkadaşları [7] de arazi ölçümlerine dayalı ve Hoek ve arkadaşları, [8] Aydan ve Geniş [9] elasto-plastik çözümlere dayalı eşitlikler önermiştir. Bu çalışmalardan, kazı yapıldığında tünel arınında oluşan yer değiştirmenin, açıklıkta oluşacak toplam yer değiştirmenin yaklaşık %20-30'u civarında olduğu bulunmuştur. Tünel arınında kazı anında oluşan yer değiştirme Şekil 1'de "H" noktası olarak belirtilmiştir. Kuyu ekseninin tünel ekseninden farklı olarak düşey olduğu göz önünde bulundurulduğunda, kazı arınında oluşan radyal yer değiştirmenin kuyular için biraz farklı olabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle bu çalışmada fikir vermesi açısından kuyu arını civarında oluşan radyal yer değiştirmenin, kuyu arını gerisinde oluşan toplam yer değiştirmenin yaklaşık %30'u olduğu varsayımı yapılmıştır.

2.1.2. Tahkimat Karakteristik Eğrisinin (SCC) Oluşturulması

Tahkimat karakteristik eğrisi (support characteristic curve, SCC) (Şekil 1) uygulanan tahkimat basıncı ile açıklık doğrultusundaki birim uzunluktaki tahkimatlı bölümünde oluşan radyal kapanma (u_r) arasındaki ilişkiden bulunabilmektedir.

Tahkimat tarafından sağlanan basınç (p_s) yani SCC'nin elastik bölümü (Şekil 1'de KR doğru

parçası) tahkimatın elastik katılığı (K_s) kullanılarak aşağıdaki eşitlikten bulunabilmektedir.

$$p_s = K_s u_r \quad (8)$$

Tahkimat katılığının (K_s) birimi tahkimat basıncının birim uzunluğa bölümüdür (MPa/m).

Tahkimat karakteristiğinin plastik bölümü (Şekil 1'de R noktasından başlayan yatay doğru) tahkimatın yenilmeden önce taşıyabileceği en yüksek basınç (p_s^{\max}) olarak tanımlanmaktadır. Değişik tahkimat türleri için en büyük tahkimat basıncı ve katılıklarını veren yaklaşımlar literatürde mevcuttur [9-11]. Bu çalışmada, kuyu tahkimatı beton olduğundan beton tahkimatla ilgili en yüksek tahkimat basıncı ve katılığı hakkında bilgi verilecektir.

Brady ve Brown [11]'a göre beton tahkimatın sağlayacağı en yüksek tahkimat basıncı;

$$p_s^{\max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(R - t_c)^2}{R^2} \right] \quad (9)$$

eşitliği ile bulunabilir. Burada, σ_{cc} , beton veya püskürtme betonun tek eksenli basınç dayanımı (MPa) ve t_c , beton kalınlığıdır (m). Kalınlığı 0.3 m olan 28 günlük ve 35 MPa tek eksenli basınç dayanımına sahip beton tahkimatın sağlayabileceği en yüksek tahkimat (içsel) basıncı;

$$p_s^{\max} = 19.1(2R)^{-0.92} \quad (10)$$

ile hesaplanabilmektedir [12].

Beton tahkimatın elastik katılığı ise;

$$K_s = \frac{E_c}{(1 - \nu_c)R} \frac{R^2 - (R - t_c)^2}{(1 - 2\nu_c)R^2 + (R - t_c)^2} \quad (11)$$

ile verilmektedir. Burada, E_c , betonun deformasyon modülü (MPa) ve ν_c ise betonun Poisson oranıdır [2,11].

2.2. Sayısal Gerilme Çözümlemesi

Sayısal gerilme çözümlemeleri için PHASE2 [13] bilgisayar programı kullanılmıştır. Söz konusu programın kullanımı kolay olduğu için mühendislik projelerinde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Program, sonlu elemanlar yöntemine dayalı zemin veya kayada ortamında yapılan yeraltı ve yerüstü yapıları için gerilme çözümlemeleri yapabilmektedir. Ayrıca program şev duraylılığı ve yeraltı suyu geçirimsizlik analizlerinde de kullanılmaktadır. Düzlem birim şekil değiştirme durumunun geçerli olduğu durumlarda iki boyutlu (tünel gibi) ve eksenel simetri durumuna sahip açıklıklar (büyük ölçekli yeraltı odaları gibi) için kısmen üç boyutlu gerilme çözümlemeleri hem statik hem de dinamik koşullar için yapılabilmektedir. Karmaşık ve çok aşamalı kazı ve tahkimat modellemeleri istenilen sayıda aşama ile oluşturulabilmekte ve kullanıcı dostu olması nedeniyle de oldukça hızlı modelleme ve sonuç alınabilmektedir.

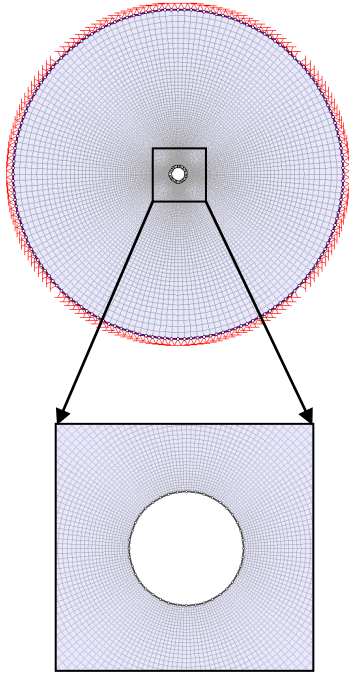
Püskürme beton, beton, çeşitli tür kaya saptaması, çelik tahkimat ve bunların kombinasyonları gibi tahkimat seçeneği sağlayarak tasarımcıya projeye uygun tahkimat elemanları seçiminde ve tahkimatın duraylılık için yeterliği konusunda hızlı bir öneri sağlayabilmektedir. PHASE2 programında kaya kütlelerinin hem elastik hem de çeşitli yenilme ölçütleri kullanılarak elasto-plastik malzeme davranışları modellenmektedir. Elasto-plastik malzeme davranışları için Mohr-Coulomb, Hoek-Brown ve Drucker-Prager yenilme ölçütleri kullanılabilmektedir.

3. ÇÖZÜMLEME GİRDİLERİ

Kuyu arını ve gerisinde tahkimat kurulana kadar ve kurulduktan sonra oluşan yer değiştirmeler ve tahkimat yeterliği yapılan analitik ve sayısal gerilme çözümlemeleri ile belirlenerek karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümlerde düzlem birim şekil değiştirme durumu göz önünde bulundurulmuştur. Öncelikle çözümlemelerde tanımlanan birincil gerilme durumları, kaya kütleli özellikleri ve tahkimat özellikleri hakkında bilgiler verilecektir.

3.1. Açıklık Geometrisi ve Sınır Koşulları

Kuyu için tipik olan dairesel kesitli açıklık geometrisi incelenmiştir. Açıklığın kazı çapı 9 m ve faydalı çapı ise 8 m'dir. Çözümlemelerde kullanılan sonlu elemanlar ağı Şekil 3'te verilmiştir. Kuyu geometrisi daire olduğu için açıklık geometrisi ile uygun olacak şekilde radyal şekilde ve model sınırına doğru genişleyen bir sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar ağı 1260 dörtgen elemandan oluşmakta ve 12800 düğüm noktası içermektedir. Model sınırının açıklıktan uzaklığı, açıklık genişliğinin 10 katı olacak şekilde alınmıştır. Ayrıca, modelin dış sınırındaki tüm noktalar yatay ve düşey doğrultularda yer değiştirmeye izin vermeyecek şekilde sabitlenmiştir [14].



Şekil 3. Sayısal çözümlemelerde kullanılan sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları [14]

3.2. Birincil Gerilme Durumu

Çalışma sahasında herhangi bir birincil gerilme ölçümü bulunmamaktadır. İncelenen derinliklerdeki düşey birincil gerilmelerin örtü

tabakası ağırlığı nedeniyle oluştuğu varsayımı yapılmıştır. Tüm kaya birimlerinin ortalama birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3 olarak alınmıştır. Ayrıca, yatay birincil gerilmelerin de düşey birincil gerilmeye eşit olduğu "hidrostatik birincil gerilme durumu" esas alınmıştır. Hidrostatik birincil gerilme durumu varsayımı, analitik çözümleme ile elde edilen sonuçların sayısal çözümleme ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilmesi olanağını sağlamıştır.

3.3. Kaya Kütleli Dayanım ve Deformasyon Özellikleri

Kuyu boyunca farklı kaya birimlerini temsil edebilecek farklı derinliklerde analizlerin yapılmasına karar verilmiştir. Kaya kütlelerinin elastik kusursuz plastik malzeme davranışı gösterdiği varsayılmıştır. Söz konusu kaya birimleri için analitik ve sayısal gerilme çözümlemelerinde kullanılan kaya malzemesi ve kütlelerine ait dayanım ve deformasyon özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

3.4. Beton Tahkimat Özellikleri

Tarlaağzı kuyusunda kuyu bileziği ve insetler dışında kuyu tahkimatı olarak C25 beton kullanılmıştır. Kuyu bileziği ve inset bölgelerinde ise C30 sınıfı beton kullanılmıştır. Sayısal çözümlemelerde, C25 betonun elasto-plastik malzeme davranışı gösterdiği varsayımı yapılmıştır. Betonun tek eksenli basınç dayanımı 25 MPa, çekme dayanımı 1,8 MPa, kalıcı tek eksenli basınç dayanımı 5 MPa, kalıcı çekme dayanımı 0, Young Modülü 30 GPa ve Poisson oranı ise 0,2 olarak alınmıştır. Beton tahkimatın katılığı ise $838,8 \text{ MPa/mm}$ olarak hesaplanmıştır [14].

4. DURAYLIK DEĞERLENDİRMESİ

Duraylılık çözümleri detayları bir önceki bölümde verilen "konverjans sınırlama" yöntemi ile kuyu kesitinin düzlem birim şekil değiştirme analizinin yapıldığı sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı sayısal gerilme çözümlemesi ile yapılmıştır. Çözümlemelerde yapılan varsayımlar iki

Çizelge 1. Çözümlemelerde kullanılan kaya malzemesi ve kütesinin özellikleri [14]

Kaya Birimi	Derinlik (m)	σ_{ci} (MPa)	m_i	E_i (GPa)	m_b	s	GSI	σ_{cm} (MPa)	E_m (GPa)	P_o (MPa)
Konglomera	204 – 207	35,8	8,80	12,5	3,60	0,0622	75	11,1	10,2	5,15
Siltaşı	371 - 377	18,3	5,67	6,9	0,95	0,0038	50	2,46	2,1	9,43
İri taneli kumtaşı	629 - 634	62,1	10,60	17,1	3,63	0,0357	70	17,8	12,5	15,85

yöntemden alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçta kuyu tahkimatı olarak uygulanan beton tahkimatın açıklığın duraylılığını sağlama konusunda yeterliliği ortaya konmuştur.

Yeraltı kazılarında, kazı yapılır yapılmaz tahkimatın hemen kurulması ve anında yük almaya başlaması çoğu durumda çok zordur. Kazının çok kötü kaya koşulları içinde yapılması gereken bu durumlarda kazı yapılmadan önce kaya kütesinin dayanım ve deformasyon özelliklerini iyileştirme yönünde bazı işlemler (örneğin enjeksiyon) gerekebilmektedir. Kazı arınında kazı işlemi yapıldığında, kaya kütesi dayanım ve deformasyon özelliklerine bağlı olarak kaçınılmaz bir yer değiştirme oluşmaktadır. Eğer çevre kaya dayanım ve deformasyon özellikleri zayıf ise tahkimat kurulmadan önce oluşabilecek yer değiştirmeler de büyük olmaktadır. Tahkimatın kurulma zamanı ve uygun şekilde yük almaya başlaması, tahkimatın etkinliği ve açıklık duraylılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Tünel eksenini boyunca açıklık çevresinde oluşan radyal yer değiştirme dağılımlarının elastik ve elastoplastik çözümlemelerle incelendiği çalışmalarda [4-8,10], arından 0,25-4 tünel çapı uzaklıkta (genellikle kaya kütesi koşullarına göre tahkimatın kurulmaya başladığı uzaklık) çevre kayada oluşacak toplam yer değiştirmelerin yaklaşık %70-75'inin oluştuğu görülmektedir. Bu çalışmada, sayısal çözümlemelerde çevre kayada oluşacak yerdeğiştirmelerin %65, %70 ve %75'inin tahkimat kurulmaya başladığı anda oluştuğu varsayımı yapılmıştır.

Bu varsayım iki aşamalı yapılan tahkimatlı açıklık modellemesinde yük dağılımı (load split) ile tanımlanmıştır. Sayısal çözümlemelerde iki

aşamalı yapılan tahkimatlı açıklık modellemesi yanında tek aşamalı tahkimatsız açıklık modellemesi de yapılmıştır. Farklı yük dağılımı koşullarında (%65, %70 ve %75) yapılan sayısal çözümlemelerden elde edilen sonuçlar analitik çözümlerle karşılaştırılarak en uygun yük dağılımı tespit edilmeye çalışılmıştır.

4.1. Konglomera (204-207 m Seviyesi)

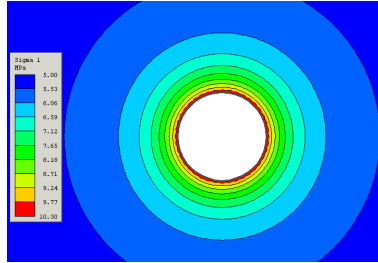
Kuyunun 204-207 m derinliğinde orta dayanımlı konglomera birimi için çözümlemeler yapılmıştır. Öncelikle sayısal gerilme çözümlemeleri yapılmıştır. Tahkimatsız ve tahkimatlı durumda yapılan çözümlemelerde açıklık çevresinde herhangi bir yenilme bölgesi (plastik bölge) oluşmamaktadır. Diğer bir ifade ile kaya kütesi elastik sınırlar içinde davranış sergilemiştir. Bu nedenle de açıklık yüzeyinde oluşan en büyük asal gerilme değeri en yüksek değerini almakta ve açıklıktan uzaklaştıkça birincil gerilme değerine yakınsamaktadır. En büyük asal gerilmeler tahkimatsız açıklıkta yaklaşık 10,3 MPa ve tahkimatlı açıklıkta ise yaklaşık 9,7 MPa civarında oluşmaktadır (Şekil 4).

Hidrostatik birincil gerilme altında tahkimatsız dairesel açıklık çevresinde oluşan en büyük elastik gerilme, birincil gerilmenin iki katı olmaktadır.

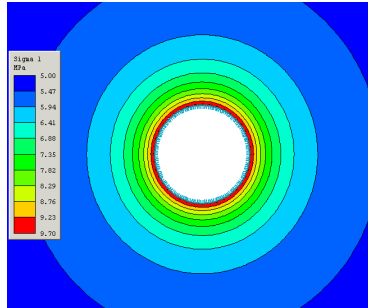
Açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme dağılımları tahkimatsız ve tahkimatlı açıklık durumlarında Şekil 5'te verilmiştir. Tahkimatsız açıklık çevresinde en büyük yerdeğiştirme 2,82 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 5a). Tahkimatlı açıklığın modellendiği iki aşamalı analizde ise tahkimat kurulmadan önce açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme 1,97 mm ve

tahkimatla birlikte açıklığın son yer değiştirmesi 2,58 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 5b ve 5c).

reaksiyon eğrisi ile tahkimat eğrisinin kesiştiği noktada oluşan yer değiştirme tahkimatlı açıklıkta oluşan yer değiştirme olmaktadır.



a. Tahkimatsız açıklık

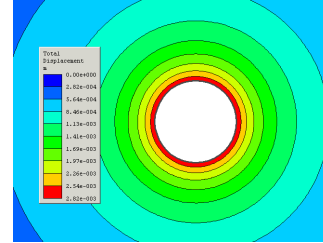


b. Tahkimatlı açıklık

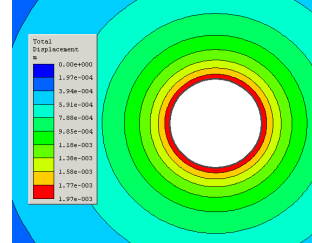
Şekil 4. En büyük asal gerilme dağılımı (204-207 m seviyesi)

İki aşamalı sayısal çözümlemelerde yük dağılımlarının tahkimat kurulmadan önce %70, tahkimat kurulduktan sonra %30 olacağı belirlenmiştir. Söz konusu yük oranlarının belirlenmesi için farklı yük dağılımlarında çözümler gerçekleştirilmiştir. Farklı yük dağılımlarında yapılan aşamalı çözümlemelerde, tahkimat kurulmadan önce oluşan yerdeğiştirme ile tahkimat kurulduktan sonra oluşan yer değiştirme değerleri belirlenmiştir (Çizelge 2). Hem sayısal hem de analitik çözümleme ile elde edilen yer değiştirme değerleri karşılaştırılarak en uygun yük dağılımı değeri tespit edilmiştir (Çizelge 2).

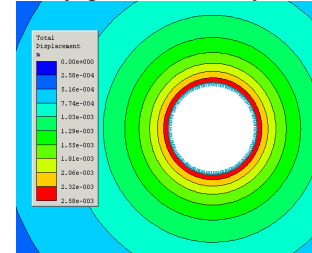
Analitik çözümle elde edilen arazi reaksiyon eğrisi (GRC) ve tahkimat karakteristik eğrisi Şekil 6'da verilmiştir. Analitik ve sayısal gerilme çözümlemesi ile elde edilen yer değiştirme değerlerinin karşılaştırıldığında çok yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir. Arazi



a. Tahkimatsız açıklık



b. Tahkimat yapılmadan önce yer değiştirme



c. Tahkimat yapıldıktan sonraki yer değiştirme

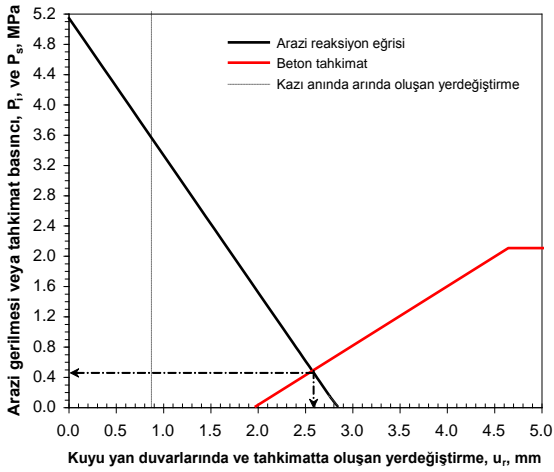
Şekil 5. Tahkimatsız ve tahkimatlı açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme dağılımları (204-207 m seviyesi)

Çizelge 2. Sayısal çözümleme ve analitik çözümleme sonuçları (204-207 m seviyesi)

Yük dağılımı (1.aş - 2.aş.)	1. aşama (tahkimat kurulmadan önce)		2. aşama (tahkimat kurulduktan sonra)		tahkimatsız açıklık	
	U_r (mm)	R_p/R	U_r (mm)	R_p/R	U_r (mm)	R_p/R
%65 - %35	1,83	0	2,54	0	2,82 (2,85)	0
%70 - %30	1,97 (1,95)	0	2,58 (2,58)	0		
%75 - %25	2,11	0	2,62	0		

Not: Parantez içindeki değerler analitik çözümle elde edilen sonuçlardır.

Aynı noktanın düşey eksenini kestiği nokta ise tahkimat tarafından sağlanan tahkimat basıncı olup bu analizde yaklaşık 0,45 MPa olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çözümleme sonuçlarına göre de beton tahkimatta herhangi bir yenilme oluşmamıştır.



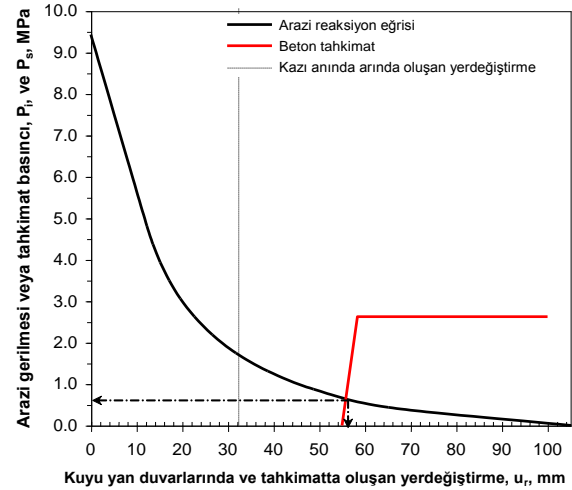
Şekil 6. Arazi reaksiyon eğrisi (GRC) ve tahkimat karakteristik eğrisi (204-207 m seviyesi)

4.2. Silttaş (371-377 m Seviyesi)

Kuyunun 371-377 m derinliğinde düşük dayanımlı silttaş birimi için çözümlemeler yapılmıştır. Öncelikle sayısal gerilme çözümlemeleri yapılmıştır. Tahkimatsız ve tahkimatlı durumda yapılan çözümlemelerde açıklık çevresinde yenilme bölgesi oluşmaktadır. Bu nedenle de açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme değeri en yüksek değerini elastik-plastik bölge sınırında almakta ve açıklıktan uzaklaştıkça birincil gerilme değerine yakınsamaktadır. En büyük asal gerilmeler tahkimatsız açıklıkta yaklaşık 14,3 MPa ve tahkimatlı açıklıkta ise yaklaşık 12,8 MPa civarında oluşmaktadır. Hidrostatik birincil gerilme ortamında dairesel açıklık çevresinde oluşan gerilme ve yer değiştirme dağılımları açıklık şekline uygun bir dağılım (dairese) göstermektedir.

Sayısal gerilme çözümlemesi ile tahkimatsız açıklık çevresinde en büyük yer değiştirme

yaklaşık 97 mm olarak belirlenmiştir. Tahkimatlı açıklığın modellendiği iki aşamalı analizde ise tahkimat kurulmadan önce açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme 53,8 mm ve tahkimatla birlikte açıklığın son yer değiştirmesi 56,0 mm olarak bulunmuştur. Analitik çözümleme ile tahkimatsız açıklıkta oluşacak en büyük yer değiştirme yaklaşık 105,2 mm olarak belirlenmiştir. Buna karşın tahkimat kurulmadan önce açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme 55 mm ve tahkimatla birlikte açıklığın son yer değiştirmesi 56 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Arazi reaksiyon eğrisi (GRC) ve tahkimat karakteristik eğrisi (371-377 m seviyesi)

Analitik ve sayısal gerilme çözümlemesi ile elde edilen tahkimatsız açıklık için yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında iki çözümmeden birbirlerine yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir (Çizelge 3). Arazi reaksiyon eğrisi ile tahkimat karakteristik eğrisinin kesiştiği noktada oluşan yer değiştirme değeri tahkimatlı açıklıkta oluşan yer değiştirme olmaktadır. Aynı noktanın düşey eksenini kestiği nokta ise tahkimat tarafından sağlanan tahkimat basıncı olup bu analizde yaklaşık 0,6 MPa olduğu belirlenmiştir (Şekil 7 ve 9 b). Ayrıca çözümleme sonuçlarına göre de beton tahkimatta herhangi bir yenilme oluşmamaktadır. Sayısal çözümleme ile açıklık

çevresinde oluşan yenilme bölgesi tahkimatsız açıklık ve tahkimatlı açıklık için Şekil 8’de verilmiştir. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi hidrostatik birincil gerilme ortamı ve açıklık geometrisinin dairesel olması nedeniyle dairesel bir şekle sahip olmaktadır.

Çizelge 3. Sayısal çözümlere ve analitik çözümlere sonuçları (371-377 m seviyesi)

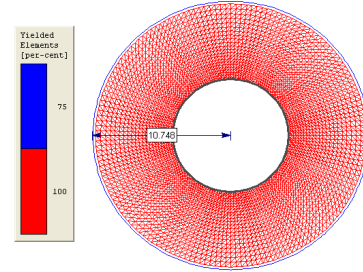
Yük dağılımı (1.aş - 2.aş.)	1. aşama (tahkimat kurulmadan önce)		2. aşama (tahkimat kurulduktan sonra)		tahkimatsız açıklık	
	U_r (mm)	U_r (mm)	R_p / R	U_r (mm)	R_p / R	
%65 - %35	41,83	45,29	1,82 (1,75)	96,99 (105,18)	2,39 (2,53)	
%70 - %30	46,80	49,42	1,89 (1,82)			
%75 - %25	53,75 (55,0)	55,95 (56,0)	1,96 (1,92)			

Not: Parantez içindeki değerler analitik çözümlerle elde edilen sonuçlardır.

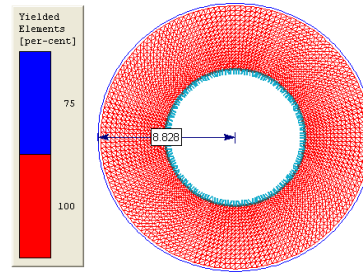
Yenilme bölgesinin yarıçapının açıklığın yarıçapına oranı (R_p/R), tahkimatsız açıklık için 2,39, tahkimatlı açıklık için de 1,96 olarak bulunmuştur. Analitik çözümlerinde R_p/R , tahkimatsız açıklık için 2,53 ve tahkimatlı açıklık için de 1,92 olarak belirlenmiştir (Şekil 9).

Sayısal çözümlerinde farklı yük dağılımlarında yapılan aşamalı çözümlerinde, tahkimat kurulmadan önce oluşan yer değiştirme ile tahkimat kurulduktan sonra oluşan yer değiştirme değerleri belirlenmiştir. Ayrıca tahkimat kurulduktan sonra oluşan yenilme bölgesi yarıçapının açıklığın yarıçapına oranları (R_p/R) da elde edilmiştir (Çizelge 3). Hem sayısal hem de analitik çözümlerle elde edilen yer değiştirme ve R_p/R değerleri birbirleri ile karşılaştırılarak en uygun yük dağılımı değeri tespit edilmiştir.

İki aşamalı sayısal çözümlerde yük dağılımlarının incelenen bu durum için tahkimat kurulmadan önce %75, tahkimat kurulduktan sonra %25 olacağı belirlenmiştir (Çizelge 3).



a. Tahkimatsız açıklık ($R_p/R=2,39$)



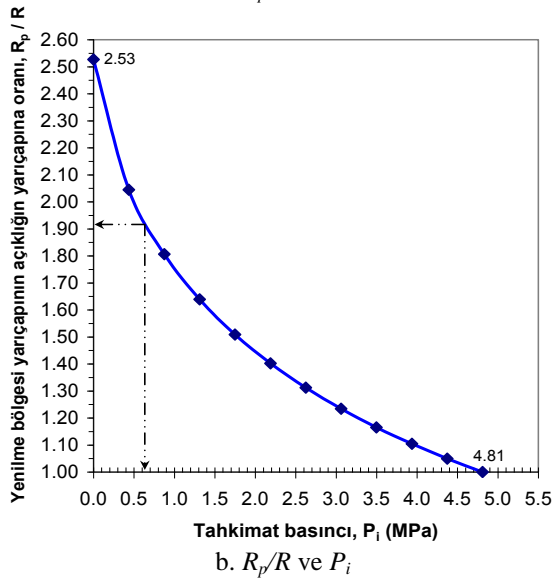
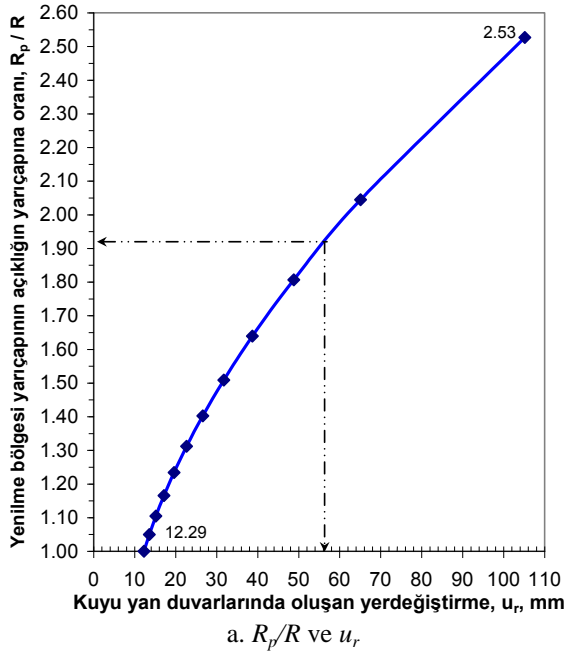
b. Tahkimatlı açıklık ($R_p/R=1,92$)

Şekil 8. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi (371-377 m seviyesi)

4.3. İri Taneli Kumtaşı (629-634 m Seviyesi)

Kuyunun 629-634 m derinliğinde yüksek dayanımlı iri taneli kumtaşı birimi için çözümler yapılmıştır. Öncelikle sayısal gerilme çözümleri yapılmıştır. Tahkimatsız ve tahkimatlı durumda yapılan çözümlerde açıklık çevresinde yenilme bölgesi oluşmaktadır. Bu nedenle de açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme değeri en yüksek değerini elastik-plastik bölge sınırında olmakta ve açıklıktan uzaklaştıkça birincil gerilme değerine yakınsamaktadır. En büyük asal gerilmeler tahkimatsız açıklıkta yaklaşık 28,7 MPa ve tahkimatlı açıklıkta ise yaklaşık 28,5 MPa civarında oluşmaktadır.

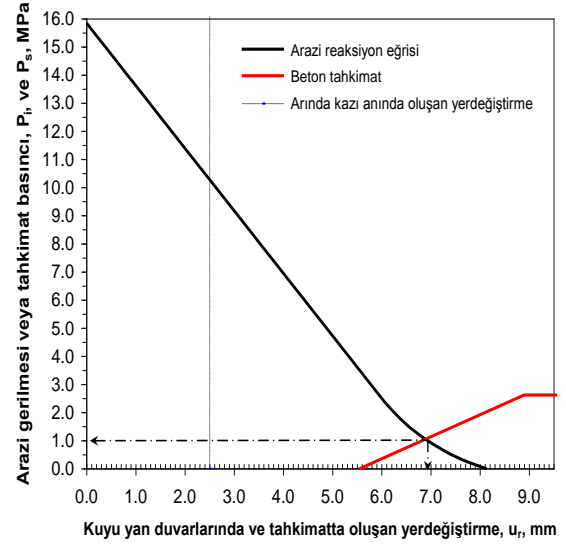
Tahkimatsız açıklık çevresinde en büyük yer değiştirme yaklaşık 8,24 mm olarak belirlenmiştir. Tahkimatlı açıklığın modellendiği iki aşamalı sayısal analizde ise tahkimat kurulmadan önce açıklık çevresinde oluşan yer değiştirme 5,31 mm ve tahkimatla birlikte açıklığın son yer değiştirmesi 6,92 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin açıklık çevresinde oluşan radyal yer değiştirme ve tahkimat basıncı ile değişimleri (371-377 m seviyesi)

Analitik çözümleme ile tahkimatsız açıklıkta oluşacak en büyük yer değiştirme yaklaşık 8,13 mm olarak belirlenmiştir. Buna karşın tahkimat kurulmadan önce açıklık çevresinde

oluşan yerdeğiştirme 5,50 mm ve tahkimatla birlikte açıklığın son yerdeğiştirmesi 6,91 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Arazi reaksiyon eğrisi (GRC) ve tahkimat karakteristik eğrisi (629-634 m seviyesi)

Analitik çözümle elde edilen arazi reaksiyon eğrisi (GRC) ve tahkimat karakteristik eğrisi (SCC) Şekil 10'da verilmiştir. Analitik ve sayısal gerilme çözümlemesi ile elde edilen yer değiştirme değerlerinin karşılaştırıldığında yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir (Çizelge 4). Arazi reaksiyon eğrisi ile tahkimat karakteristik eğrisinin kesiştiği noktada oluşan yer değiştirme değeri tahkimatlı açıklıkta oluşan yer değiştirme olmaktadır. Aynı noktanın düşey eksenini kesiştiği nokta ise tahkimat tarafından sağlanan tahkimat basıncı olup bu analizde yaklaşık 1 MPa olduğu belirlenmiştir (Şekil 10 ve 12.b). Ayrıca çözümleme sonuçlarına göre de beton tahkimatta herhangi bir yenilme oluşmamaktadır.

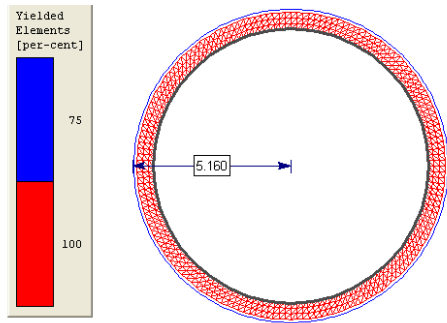
Sayısal çözümleme ile açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi tahkimatsız açıklık ve tahkimatlı açıklık için Şekil 11'de verilmiştir. Yenilme bölgesinin yarıçapının açıklığın yarıçapına oranı (R_p/R), tahkimatsız açıklık için 1,15, tahkimatlı açıklık için de 1,061 olarak bulunmuştur. Analitik çözümlemelerde R_p/R , tahkimatsız açıklık için 1,14

ve tahkimatlı açıklık için 1,067 olarak belirlenmiştir (Şekil 12).

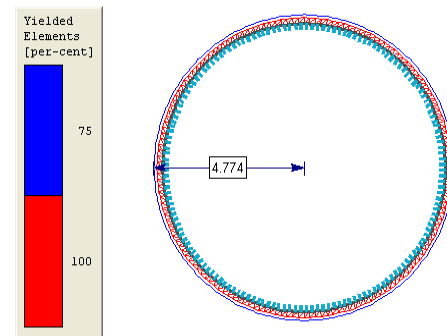
Çizelge 4. Sayısal çözümlere ve analitik çözümlere sonuçları (629-634 m seviyesi)

Yük dağılımı (1.aş - 2.aş.)	1. aşama (tahkimat kurulmadan önce)		2. aşama (tahkimat kurulduktan sonra)		tahkimatsız açıklık	
	U_r (mm)	U_r (mm)	R_p/R	U_r (mm)	R_p/R	
%65 - %35	4,84	6,71	1,080 (1,055)	8,24 (8,13)	1,15 (1,14)	
%70 - %30	5,31 (5,50)	6,92 (6,91)	1,061 (1,067)			
%75 - %25	5,73	7,06	1,061 (1,077)			

Not: Parantez içindeki değerler analitik çözümlerle elde edilen sonuçlardır.

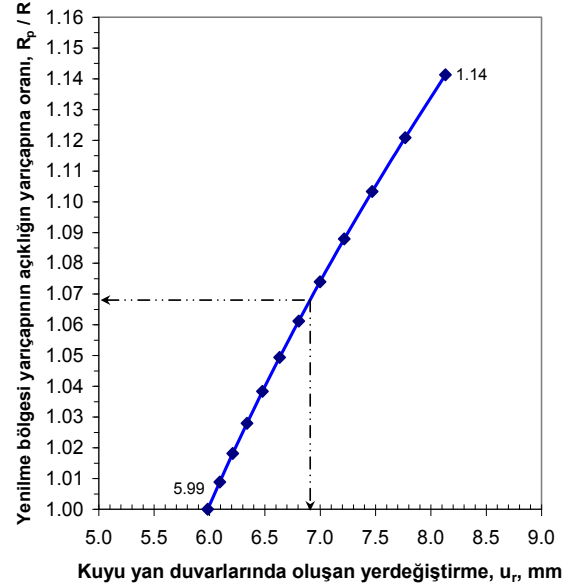


a. Tahkimatsız açıklık ($R_p/R=1,15$)

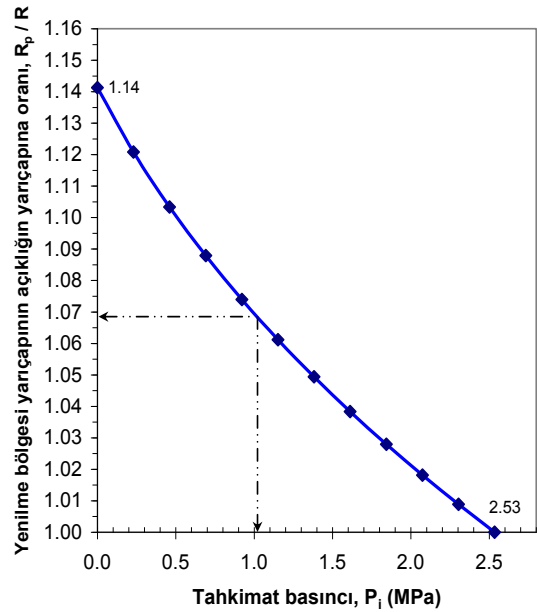


b. Tahkimatlı açıklık ($R_p/R=1,061$)

Şekil 11. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesi (629-634 m seviyesi)



a. R_p/R ve u_r



b. R_p/R ve P_i

Şekil 12. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgesinin açıklık çevresinde oluşan radyal yer değiştirme ve tahkimat basıncı ile değişimleri (629-634 m seviyesi)

5. GENEL DEĞERLENDİRME

Kuyu derinliği boyunca karşılaşılan tipik kaya birimlerinden konglomera, silttaşı ve iri taneli kumtaşı birimleri için farklı derinliklerde düzlem birim deformasyon analizleri yapılmıştır. Özellikle belirli derinlik seviyelerinde, kendi içlerinde genellikle en düşük dayanım ve deformasyon modülü özelliklerine sahip olan birimler analizlerde göz önünde bulundurulmuştur.

Sonlu elemanlar çözümleme yönteminin kullanıldığı ve tahkimat modellemesi yapılan analizlerde en önemli konu tahkimat kurulmadan önce ve kurulduktan sonra yük dağılım oranlarının belirlenmesidir. Bu konu doğrudan tahkimatın kurulma zamanı ile ilişkilendirilmektedir. Kazı yapılır yapılmaz tahkimatın kurulduğu durumlarda (katı tahkimat) arazide oluşacak yer değiştirmelere çok fazla izin vermeyecektir. Bazı durumlarda tahkimatın çok erken kurulması tahkimatın kapasitesini aşan yüklere maruz kalmasını sağlayacak ve tahkimat elemanı yenilecektir. Bununla birlikte kazı yapıldığı anda kaçınılmaz oluşan yer değiştirmelere ilave olarak tahkimatın kurulması için geçen sürede de arazi ile birlikte tahkimat yer değiştirecektir. Çok geç kurulan tahkimatlarda kaya kütlelerinin elasto-plastik deformasyonu çok fazla oluşacak ve tahkimat yeterli yük almadığı için işlevini yapamayacaktır. Sayısal çözümlemede kullanılan iki aşamalı tahkimat modellemesi yapılan çözümlerde “yük dağılımı” işlevi kullanılarak yukarıda açıklanan durum modellenmiştir. Bu yük dağılımı tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %70-75 ve tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %25-30 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum ‘Konverjans Sınırlama Yöntemi’ kullanılarak yapılan analitik çözümlerle de sınımlanmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, özel sektör tarafından Amasra-Bartın’da açılan Tarlaağzı üretim kuyusunun inset bölgeleri dışındaki bölümlerinde duraylılık incelemeleri yapılmıştır. Kuyunun duraylılık çözümleri hem sayısal gerilme hem de analitik

çözümleme yöntemi ile yapılmıştır. Genellikle orta ve yüksek dayanımlı kaya birimlerinde açılan kuyuda herhangi bir duraysızlık probleminin bulunmadığı ortaya konulmuştur. Bu bulgular saha gözlemler ile uyumludur. Bu çalışma ile ilgili elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Kuyunun 300 m derinliğe kadar yapılan tüm analizlerde açıklık çevresinde herhangi bir yenilme bölgesi oluşmamıştır. Kaya kütleli elastik davranış göstermiştir. 300 m den daha derinlerde ise açıklık çevresinde yenilme bölgesi oluşmaktadır. Kuyunun 371-377 m derinliğinde bulunan silttaşı biriminde yapılan çözümlerlerde en büyük yenilme bölgesi oluşmaktadır. Yenilme bölgesinin yarıçapının açıklık yarıçapına oranı yaklaşık 2,4 civarında oluşmuştur. Hidrostatik birincil gerilme alanı varsayımında yapılan çözümlerlerde yenilme bölgesi şekli açıklık kesit şekli ile aynı olup daireseldir. Ayrıca en büyük yerdeğiştirme de silttaşı biriminde oluşmuştur.
- Sayısal çözümlerlerde, kuyunun inset bölgeleri dışında uygulanan 50 cm kalınlığında C25 betonda incelenen durumlarda herhangi bir yenilme olgusu yapılan analizlerde bulunmamıştır. Sonuç olarak bütün kaya birimler için kullanılan aynı özellikteki C25 betonun kuyu tahkimatı için yeterli olduğu bulunmuştur.
- Tahkimat tarafından sağlanan basınçlar (p_s), analitik ve sayısal çözümlerinin sonuçlarından faydalanılarak elde edilmiştir. Kuyu derinliği arttıkça tahkimat basınçları da beklendiği gibi artış göstermektedir. İncelenen durumlar için 200 m derinliklerde tahkimat basıncı 0,45 MPa ve en derinde (630 m) ise yaklaşık 1,0 MPa olarak bulunmuştur.
- İki aşamalı tahkimat modellemesi yapılan sayısal çözümlerde “yük dağılımı” işlevi kullanılmıştır. Bu işlev ile tahkimat kurulana kadar geçen sürede birincil gerilmelerin kaya kütlelerinde oluşturacağı şekil değiştirmesinin ne

kadarlık bölümünün etkin olduğu oransal olarak girilmektedir. Gerçekte arazide bu oranın sağlıklı bir şekilde ölçümü oldukça zor ve zahmetlidir. Sayısal çözümlerinde yük dağılım oranları tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %65, %70, %75 ve tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %35, %30, %25 olacak şekilde seçilmiştir. Bu farklı yük dağılımları durumunda oluşan yer değiştirmeler ve yenilme bölgesi büyüklükleri konverjans sınırlama yöntemi kullanılarak yapılan analitik çözümlerle de sınanmıştır. Sonuçta, yük dağılımı oranlarının tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %70-75 ve tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %25-30 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

- Yeraltı açıklıklarının kazı ve tahkimat modellemesinin yapıldığı iki ve üç boyutlu sayısal çözümlerinde, kullanıcı tarafından mutlaka 'yük dağılımı' işlevinin kullanılması gerekmektedir. Bu işlev kazının yapılması ve tahkimatın kurulması arasında arazinin deformasyonuna tanımlanan oranlarda izin vermektedir. Genellikle kullanıcı tarafından kurulan modelde bazen hatalar yapılabilmektedir. Şöyle ki, genellikle kazı aşamasından sonra tahkimatın modellendiği 2. aşamada 'yük dağılımı (load split)' uygulanmadığında (ya da kullanıcı tarafından yanlış oranlar seçildiğinde) tahkimat elemanı 2. aşamada sayısal olarak herhangi bir yük almayacaktır. Sonuçta yük almayan tahkimat elemanında ikincil gerilmeler ne kadar yüksek olursa olsun herhangi bir yapısal yenilme oluşmayacaktır. Bu durum bazen kullanıcı tarafından tahkimat elemanının yenilmediği yani tahkimatın yeterli olduğu şeklinde yanlış yorumlanabilecektir.
- Kazı ile tahkimat elemanının tek aşamalı olarak aynı anda (yani kazının yapılır yapılmaz tahkimatın uygulandığı) modellendiği sayısal çözümlerinde tahkimat elemanına aniden ortamdaki birincil gerilme etkiyecektir. Bu

durum genellikle yüksek birincil gerilme değerlerinde, elasto-plastik malzeme davranışı varsayımı yapılan tahkimat elemanın yenilmesi ile sonuçlanacaktır. Modellenen bu durum, arazi-tahkimat etkileşiminde göz önünde bulundurulmuş bir noktadaki deformasyonların kazı arını o noktaya yaklaşımdan başladığı gerçeğine aykırıdır. Sayısal çözümler kullanan tasarım mühendislerinin burada anlatılan hususları göz önünde bulundurmaları, elde edilecek sonuçların güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmanın yürütülmesinde yardımlarından dolayı Merhum Maden-Geoloji Mühendisi Avni Akyüz (HEMA)'e, Maden Mühendisi Suat Ölmez (HEMA)'e, Maden Y. Mühendisi Eren Soyer (HEMA)'e teşekkürü borç bilirler.

7. KAYNAKLAR

1. Geniş, M., Gerçek, H., 2000. Yeraltı açıklıklarının dinamik tasarımı. V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, S. Saraç vd. (ed.), Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, Ankara, 65-72.
2. Carranza-Torres C., Fairhurst, C., 2000. Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (2), 187-213.
3. Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34, 1165-1186.
4. Panet, M., 1995. Calcul des Tunnels par la Méthode de Convergence-Confinement. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 178 p.
5. Ünlü, T., Gerçek, H., 2003. Effect of Poisson's Ratio on the Normalized Radial Displacements Occurring Around the Face of A Circular Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 547-553.

6. Başarır, H., Geniş, M., Özarslan, A., 2010. The Analysis of Radial Displacements Occurring Near The Face of a Circular Opening in Weak Rock Mass. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Elsevier, 47 (5), 771-783.
7. Chern, J.C., Shiao, F.Y., Yu, C.W., 1998. An Empirical Safety Criterion for Tunnel Construction". *Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan, 222-227.
8. Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M.S., Corkum, B., 2008. Integration of Geotechnical and Structural Design in Tunnelling. *Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference*, Minneapolis, 1-53.
9. Aydan, Ö., Geniş, M., 2010. A Unified Analytical Solution for Stress and Strain Fields about Radially Symmetric Openings in Elasto-Plastic Rock with the Consideration of Support System and Long-Term Properties of Surrounding Rock". *International Journal of Mining and Mineral Processing*, International Science Press, 1 (1), 1-32.
10. Hoek, E., Brown, E.T., 1980. *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons, London, 527 p.
11. Brady, B.H.G., Brown, E.T., 1985. *Rock Mechanics for Underground Mining*. Chapman and Hall, London, 557 p.
12. Hoek, E., 1998. Tunnel support in weak rock. *Symposium of Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan, 12 p.
13. Rocscience, 2007. Phase2, Toronto, Canada, <http://www.rocscience.com/>
14. Acun, D., 2009. Amasra Tarlaağı Kuyusu Çevre Kaya Özellikleri ve Duraylılığının İncelenmesi. *Yük. Müh. Tezi*, Zonguldak Karael-mas Üniv. Fen Bil. Enst. Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 157 s.

