



HİMMETOĞLU (GÖYNÜK-BOLU) LİNYİT AÇIK İŞLETMESİNDE YERALTISUYU SEVİYESİNDEKİ DÜŞÜMÜN KESTİRİLMESİ

Prediction of Groundwater Level Decline in Himmetoğlu Open Pit (Göynük-Bolu)

Mehmet EKMEKÇİ¹, Selim ERDOĞAN²

¹Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, Ankara

²Çevre ve Orman Bakanlığı, Doğal Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü, Ankara

ÖZ

Himmetoğlu Linyitleri Açık İşletmesi'nde (Bolu-Göynük) drenaj ve şev duraysızlığı, işletme ekonomisini ve güvenliğini etkileyen sorunların başında gelmektedir. Bu çalışmada, su durumunun şev duraylılığı açısından değerlendirilebilmesini sağlayacak drenaj-seviye koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. İşletmenin derinleşmesine koşut olarak, kazı kotunun yeraltısuyu seviyesinin altına düşmesiyle birlikte, kazı yüzeylerinde kararsız akım koşullarında serbest drenaj gerçekleşmektedir. Kazı alanına doğru gerçekleşen drenaj, kazı yüzeyinin ardında yeraltısuyu seviyesinin konumunun zaman içinde değişimine neden olmaktadır. Şev duraylılığı analizlerinde gerek duyulan başlıca parametrelerden biri olan yeraltısuyu seviyesinin zaman içindeki konumu, çalışma alanı için uygun ortamların serbest drenajı probleminin belirli başlangıç ve sınır koşulları için türetilen analitik çözümüne dayandırılarak elde edilmiştir. Kullanılan analitik çözümün kuramsal temellerinin kısa bir özetinden sonra, Himmetoğlu linyit açık işletmesinde uygulanan yöntemin sonuçları örnek olarak verilmiştir. Himmetoğlu linyit açık işletmesinde kömür horizonunu içeren Himmetoğlu formasyonunun geometrisi jeolojik kesitlerden, formasyonun kömür horizonu üzerinde kalan ve marn-kiltaşından oluşan kesiminin etkin gözenekliliği ve hidrolik iletkenliği ise eklem analizlerine dayanan görgül eşitliklerden elde edilmiştir. Problemin analitik çözümü, şev duraylılığı analizleri için kritik süre olarak belirlenen yedi gün için gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, duraylılık analizi yapılan üç kesit için Himmetoğlu formasyonuna ait marnlardaki kazı sırasında kesilen su tablasının aynadan iç kesime doğru alacağı konum kestirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık işletme, Himmetoğlu kömür ocağı, şev duraysızlığı, yeraltısuyu seviyesi.

ABSTRACT

Groundwater inflow and instability are the two major problems that adversely affect mining operations at the Himmetoğlu Lignite Open Pit (Göynük-Bolu). This study aims at demonstrating the use of the hydrologic relation between free flow and groundwater level decline in prediction of spatial position of the water table, an essential information required in slope stability analyses. At various stages of mining operations, free-drainage seepage faces are produced as a consequence of excavations cutting the water table in the area. Transient groundwater flow into the pit results in lowering of the water table at and behind the excavation facet. Prediction of this temporal change of water table is of major importance in slope stability analyses. After a concise review of the theoretical background of the problem, an analytical solution derived for certain initial and boundary conditions was applied to predict the areal and temporal position of the water table in the Himmetoğlu lignite open pit. The geological structure defining the boundary conditions of the problem was analyzed on geological cross-sections, while hydraulic characteristics (effective porosity and hydraulic conductivity) of the marl-claystone alternation overlying the coal seam were estimated by empirical relations based on joint analyses. The analytical solution was applied taking the time parameter as 7 days as suggested as a critical time period in the stability analyses. The results for three cases were then presented as graphs depicting the water table level at and behind the excavation facet.

Key Words: Open pit, Himmetoğlu coal mine, slope instability, groundwater level.

1. GİRİŞ

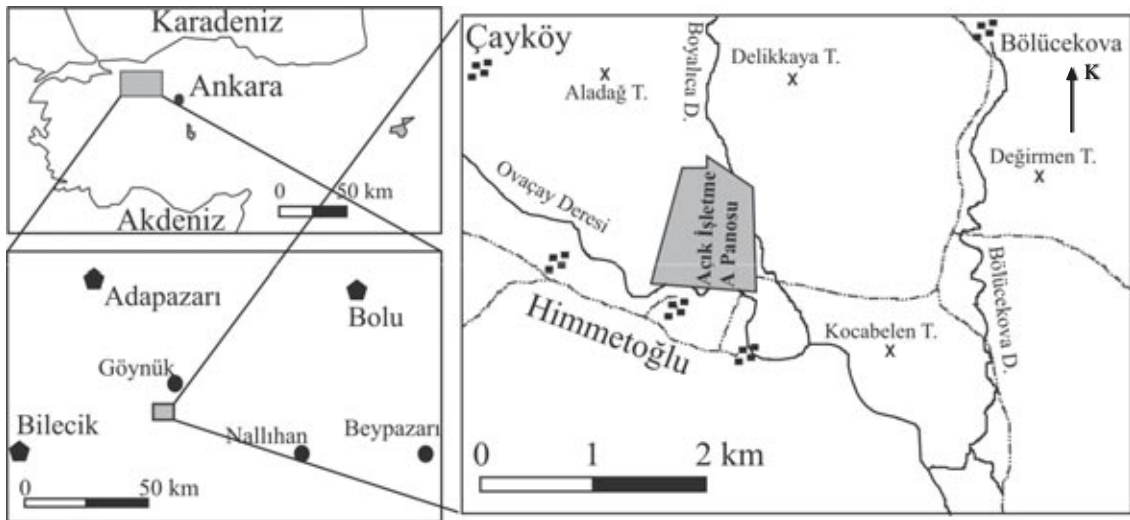
Bolu iline bağlı Göynük ilçesinin 30 km güneyinde Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) tarafından açık ocak şeklinde işletilen Himmetoğlu linyit işletmesinde yeraltısuyuna bağlı olarak gelişen şev duraysızlığı ve drenaj sorunlarıyla karşılaşmıştır (Şekil 1). İşletme güvenliğini tehdit eden sorunların çözümüne yönelik olarak Ulusay vd., (1998) tarafından yapılan çalışmada yeraltısuyu koşullarının genel yaklaşımlar yerine ortamın hidrodinamik yapısını dikkate alan sayısal verilerin belirlenmesi gerekmiştir.

Açık işletmelerde karşılaşılan yeraltısuyu, genelde drenaj ve şev duraysızlığı olmak üzere, iki temel soruna neden olmaktadır. Yeraltısuyunun genellikle işletme gücünü yaratması, dolayısıyla işletme ekonomisini olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle, drenaj kazısı gerektiren mühendislik projelerinde dikkate çözümlenmesi gereken bir sorundur. Bu çalışmanın konusunu oluşturan yeraltısuyu koşullarının şev duraysızlığı üzerindeki etkisi ise, etkin gerilmeyi doğrudan etkileyen bir parametre olan 'gözenek suyu basıncı' şeklinde ortaya çıkmaktadır (Terzaghi, 1950). Gözenek suyu basıncı, h ; su yükü (L); u : basınç (ML/T^2), ρ : yoğunluk (M/L^3) ve g : yerçekimi ivmesi (L/T^2) olmak üzere,

$$h = u / \rho g \quad (1)$$

eşitliği ile su yükü cinsinden ifade edilebilmektedir.

Bu ilişkiye dayanarak, hidrojeolojik çalışmalarda gözenek suyu basıncının yeraltısuyu seviye ölçümlerinden itibaren elde edilebilmesi olanaklı olmaktadır. Yeraltısuyu seviyesinin zamansal değişiminin büyüklüğü, litolojik malzemenin hidrolik iletkenlik ve depolama gibi hidrolik özelliklerine bağlıdır. Doğal koşullarda mevsimsel ölçekte görülebilen bu değişim, kazı alanlarında kazı aynaları ve yakın dolayında çok daha kısa sürelerde önemli büyüklüklere ulaşabilmektedir. Kazının yeraltısuyu seviyesini kestiği andan itibaren kazı alanına yeraltısuyunun serbest drenajı gerçekleşmektedir. Kazı alanına doğru meydana gelen bu akış nedeniyle yeraltısuyu seviyesinin kazı aynasından iç kısımlara doğru zaman içinde gösterdiği değişimin kestirilmesi, Eşitlik (1)'e göre, belirli bir noktadaki gözenek suyu basıncının belirlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.

Yeraltısuyu seviyesinin serbest drenajla değişimi, hidrojeolojide serbest akiferlerde akım problemi şeklinde tanımlanmaktadır (Polubaroniva-Kochina, 1962; Bear vd., 1968; Bear, 1972 ve 1979). Tanımlanan problemin matematiksel ifadesi Boussinesq (1904) tarafından türetilmiştir. Serbest akifer koşullarında yeraltısuyu akımının matematiksel modelini ortaya koyan denklemin kazı alanlarına gelen yeraltısuyu akımına uygulanması, matematiksel denklemin karmaşık çözüm gerektirmesinden dolayı uzun yıllar almıştır. Bu nedenle, duraysızlık analizlerinde gözenek suyu basıncı değerini gerektiren hesaplamalarda genelde güvenli tarafta kalınacak şekilde, sınırlı sayıda gözleme dayanan varsayımlar yapılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemlerde yeraltısuyunun durumu, yeraltısuyu akımının zamanla değişmediği kararlı hal koşulları dikkate alınarak yapılan tahminlere dayandırılmaktadır. Kazı aynasının yeraltısuyu seviyesini kestiği andan itibaren başlayan drenajın kararlı koşullara ulaşma süresi, ortamın hidrolik iletkenlik ve depolama özellikleri ile sınır koşullarına bağlıdır. Açık maden işletmelerinde, basamak oluşturma ve cevher üretimi aşamalarında olduğu gibi, kazı geometrisinin kısa sürelerde değiştiği durumlar kararsız akım koşullarının sürdüğü dönemlerdir. Bu dönemlerde yeraltısuyu seviyesinin alansal ve zamansal değişimlerinin kestirilmesi önemli hale gelmektedir.

2. KURAMSAL TEMEL

2.1. Serbest Akiferlerde Kararsız Koşullarda Yeraltısuyu Akım Denklemi

Himmetoğlu açık işletmesinde işletme güvenliğini tehdit eden şev duraysızlığı sorununun çözümüne yönelik olarak Ulusay vd. (1998) tarafından gerçekleştirilen jeoteknik amaçlı çalışmalar alanda yeraltısuyu koşullarının da ortaya konmasını gerektirmiştir. Özellikle, kazı aynasının yeraltısuyu seviyesini kestiği kesimlerde, şev duraylılığına ilişkin geriye dönük analizlerde kullanılmak üzere belirli zaman dilimlerinde, kazı aynasında ve ayna gerisinde yeraltısuyu seviyesinin konumunun bilinmesine gerek duyulmuştur. Bu çalışma kapsamında, yeraltısuyu seviyesinin konumu, serbest akiferlerde kararsız akım koşullarını ifade eden ve izotrop ve homojen ortamlar için,

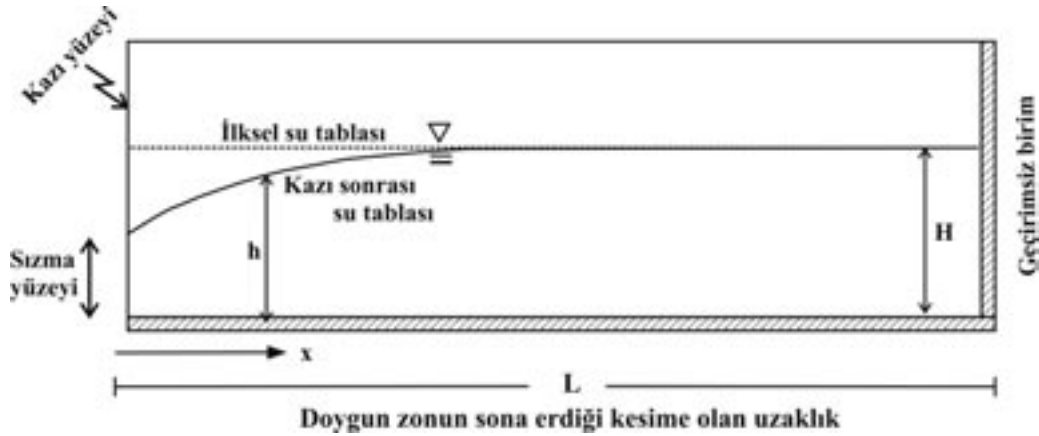
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

kısmi diferansiyel denkleminin İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından türetilen analitik çözümü kullanılarak elde edilmiştir. Doğrusal olmayan bir kısmi diferansiyel denklem sınıfına giren yukarıdaki denklemin çözümü oldukça uzun ve karmaşık yöntemleri gerektirmektedir. Belirli sınır koşulları için çözümleri durumunda ise, akım alanının herhangi bir noktasında herhangi bir andaki hidrolik yük tanımlanmış olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, çözüm, $h(x,y,z,t)$ değerlerinin dağılımını vermektedir

2.2. Denklemin Analitik Çözümü

Her diferansiyel denklemin olduğu gibi, yukarıda verilen kısmi diferansiyel denklemin de tanımlanan her sınır koşulu için özel bir çözümü bulunmaktadır. Yukarıda tanımlanan kısmi diferansiyel denklemin farklı sınır koşulları için çözümleri genellikle kazı alanına gelen su miktarının tahmin edilmesine yönelik olarak türetilmeye çalışılmıştır (Goodman vd., 1965; Singh ve Atkins, 1984; Naugle ve Atkinson, 1993; Hanna vd., 1994). Özellikle madencilik faaliyetleri sırasında ortaya çıkan kazı aynalarında sızma yüzeylerinin olduğu durumları temsil edebilecek sınır koşullarını dikkate alarak, denklemin kazı aynasında ve ayna gerisinde yeraltısuyu seviyesinin konumunun kestirilmesine yönelik analitik bir çözümü İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından türetilmiştir. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen deneylere dayanan yöntem daha sonra Verma ve Brutsaert (1970 ve 1971) tarafından sayısal yöntemler

kullanılarak doğrulanmıştır. İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından kurulan model ve sınır koşulları bir kesit üzerinde, iki boyutlu olarak Şekil 2’de gösterilmiştir. Buna göre, yeraltı suyu akışının meydana geldiği ortam alttan yatay geçirimsiz bir birimle sınırlanmıştır. Benzer şekilde, akifer ortamı kazı aynasından L uzaklığında geçirimsiz bir sınıra sahiptir. Başlangıç anında ($t=0$) yeraltı suyu seviyesi her noktada statik seviye (H) konumundadır. Kazı aynasından serbest drenajın başladığı andan itibaren herhangi bir noktada (x) herhangi bir andaki (t) yeraltı suyu seviyesi veya hidrolik yük $h(x,t)$ Eşitlik (2)’nin tek boyutlu halinin çözümü ile elde edilebilmektedir.



Şekil 2. Analitik çözümün dayandığı modelin sınır koşulları (İbrahim ve Brutsaert, 1965'ten).

Figure 2. Boundary conditions of the model considered in the analytical solution (after İbrahim and Brutsaert, 1965).

Problemi tanımlayan kısmi diferansiyel denklemin doğrusal olmaması nedeniyle, araştırmacılar çözümü olanaklı kılmak için çeşitli basitleştirmeler ve varsayımlar yapmışlardır. Yöntemin belirli bir alanda uygulanabilirliği, yöntemin dayandığı varsayımların uygulama alanında da geçerli olabilmesine bağlıdır. Yöntem; (1) kazı aynasının düşey olduğunu, (2) analiz yapıldığı düşey yüzeyin bir anda ortaya çıktığı, sızmanın kazı tamamlandıktan sonra başladığı, dolayısıyla kazı aynası ortaya çıktığında yeraltı suyunun statik seviyesinde bulunduğunu, (3) sistemin sınır koşullarının Şekil 2’de verildiği gibi, (4) ortamın homojen ve izotrop ve kazının daireselden çok uzunlamasına geliştiği, dolayısıyla kartezyen koordinatların geçerli olduğunu varsaymaktadır (İbrahim ve Brutsaert, 1965; Freeze ve Cherry, 1979)

Kazı aynasının yeraltı suyunu kestiği andan itibaren kazı alanına doğru meydana gelen akımın kararsız olması nedeniyle, gerek kazı aynasında gerekse ayna gerisinde yeraltı suyu seviyesi zamanla değişmektedir. İbrahim ve Brutsaert (1965) elde ettikleri çözümün laboratuvar model boyutlarından bağımsız hale getirilmesi amacıyla hidrolik yük, uzaklık, zaman ve akım gibi parametreleri uyarlamış ve boyutsuzlaştırmışlardır. Bu şekilde, elde ettikleri çözüm, yukarıdaki varsayımları gerçekleyen her özel problemde kullanılabilir hale gelmiştir.

Çözümün boyutsuz parametrelerle ifade edilmesi durumunda, akım alanındaki herhangi bir noktanın kazı aynasından uzaklığı (x) yerine $U=x/L$ şeklinde ve bu noktadaki hidrolik yük (h) yerine $Y=h/H$ şeklinde verilebilmektedir. Görüldüğü gibi uzaklık, kazı aynasından x uzaklığının, aynanın geçirimsiz sınıra kadar uzaklığına oranı ve bu noktadaki hidrolik yük de statik seviyeye oran şeklinde tanımlanmıştır.

Boyutsuz olarak verilen U ve Y parametrelerinin değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, zaman parametresi de akiferde bir su molekülünün L uzaklığını alabilmesi için gereken süreye göre normalize edilerek boyutsuzlaştırılmıştır. Akiferde yeraltı suyu hareketini tanımlayan Darcy hızının (q) etkin gözenekliliğe (S_y) oranı, su molekülünün gerçek hızını (v) vermektedir. Darcy hızı, İbrahim ve Brutsaert (1965) modelinin sınır koşullarını temsil eden simgeler kullanılarak Darcy yasasından, K ortamın hidrolik iletkenlik katsayısı (m/s) olmak üzere,

$$q = K \frac{H}{L} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Buna göre, su molekülünün gerçek hızı,

$$v = \frac{q}{S_y} \quad (4)$$

ve bu eşitlikte q Eşitlik (3)'te tanımlandığı gibi yerine konursa,

$$v = \frac{KH}{S_y L} \quad (5)$$

olur. Yukarıda türetilen hız kullanılarak, bir su molekülünün L uzaklığındaki yolu alabilmesi için gereken süre ise,

$$\tau = \frac{L}{v} = \frac{L}{KH/S_y L} \quad (6)$$

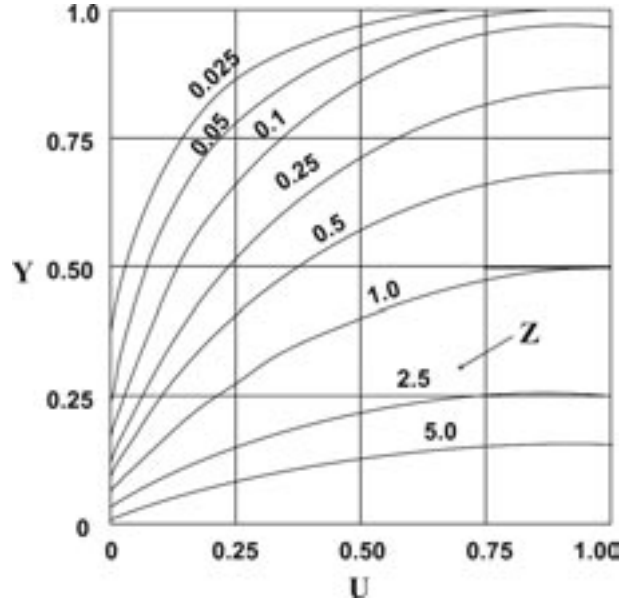
olarak elde edilir.

Hızın yol/zaman tanımından L uzaklığı alacağı süre $t=L/v$ ve $v=L/t$ ilişkisinden boyutsuz zaman parametresi Z, t/τ oranı şeklinde

$$Z = \frac{KH}{S_y L^2} t \quad (7)$$

olarak elde edilir. Burada, t, kazı aynasından serbest drenajın başladığı andan itibaren geçen süredir. Şekil 3'te analitik çözümün boyutsuz parametrelerle elde edilen sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekilde, zamana bağlı olarak akım alanının herhangi bir noktasındaki hidrolik yük zarf eğriler şeklinde verilmiştir.

İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından kazı aynalarından meydana gelen serbest drenaj problemini tanımlayan diferansiyel denklemin analitik çözümü abaklara dönüştürülerek varsayımları sağlayan her özel durum için kullanılabilir hale getirilmiştir. Görüldüğü gibi, yöntemin özel durumlar için uygulanabilmesi, varsayımların sağlanmasının yanı sıra, ortama ilişkin hidrolik iletkenlik katsayısı (K), etkin gözeneklilik (S_y), statik seviye (H) ve aynadan geçirimsiz sınıra uzaklık (L) parametrelerinin bilinmesini gerektirmektedir. Boyutsuz zaman parametresi Z, Eşitlik (7)'den elde edildikten sonra herhangi bir noktadaki hidrolik yük $h(x,t)$ Şekil 3'ten elde edilebilmektedir.



Şekil 3. Farklı boyutsuz zaman (Z) değerleri için boyutsuz uzaklık (U) boyutsuz hidrolik yük (Y) ilişkisi (İbrahim ve Brutsaert, 1965'ten).

Figure 3. Relation between dimensionless distance (U) and dimensionless hydraulic head (Y) for various values of dimensionless time (Z) parameter (after İbrahim and Brutsaert, 1965)

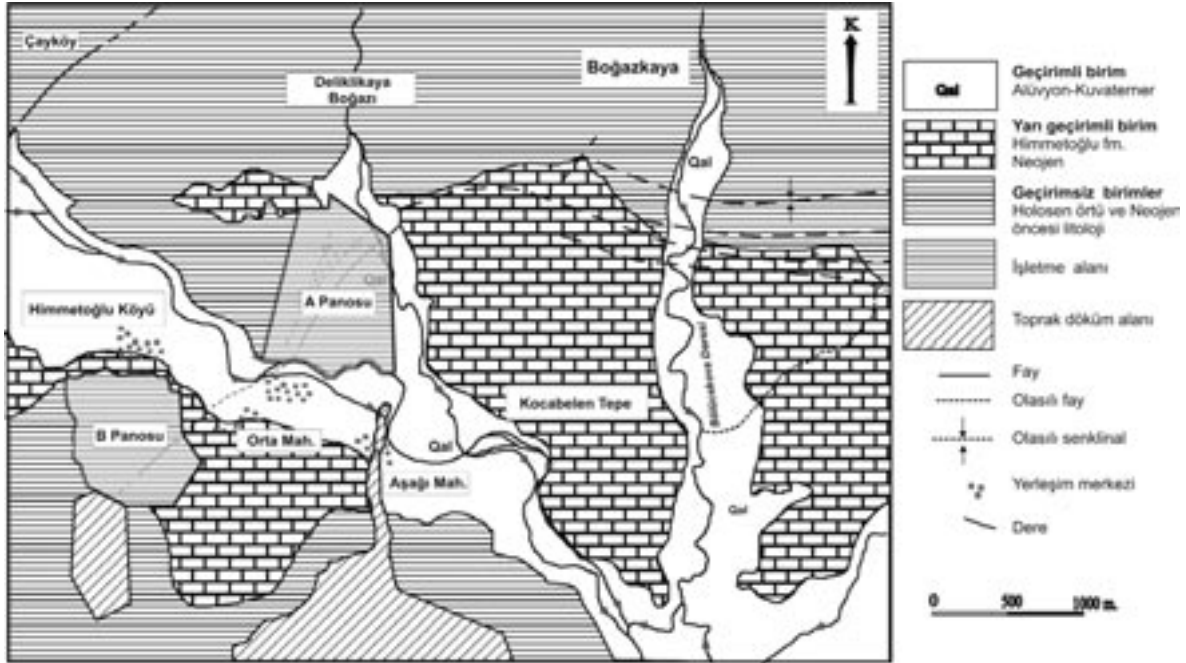
3. ANALİTİK ÇÖZÜMÜN HİMMETOĞLU LİNYİT AÇIK İŞLETMESİNDE UYGULANMASI

Himmetoğlu linyit açık işletmesinde kazılar sırasında oluşan sızma yüzeylerinde serbest drenaj problemine yukarıda açıklanan analitik yöntemin uygulanabilmesi için, öncelikle yöntemin akım sınır koşullarına ilişkin varsayımların gerçekleştiği ortaya konmalıdır. Bu doğrultuda alanın hidrojeolojik yapısı, akım alanının geometrisi ve sınır koşullarını gösterecek şekilde tanımlanmıştır. Öte yandan, analitik çözümün uygulanabilmesi için akımın meydana geldiği litolojik birimlerin hidrolik özelliklerinin belirlenmiştir.

3.1. Hidrojeolojik Durum ve Sınır Koşulları

Hidrojeoloji açısından karmaşık olmayan bir yapıya sahip olan bölgede yüzeylenen jeolojik birimler, hidrojeolojik özelliklerine göre arazi gözlemleri ve litolojilerin jeohidrolojik özellikleri yönünden değerlendirilerek sınıflandırılmıştır. Açık işletme ve yakın dolayını kapsayan yaklaşık 30 km²'lik bir alanda üç farklı hidrojeolojik birim ayrılmıştır (Şekil 4). Ovaçay, Boyalıcadere ve Bölücekova Deresi gibi büyük akarsu yataklarında yüzeylenen ve kumlu çakıldan oluşan Kuvaterner yaşlı alüvyon çökelleri yeraltısuyunu iletebilen ve depolayabilen (akifer) birim olarak değerlendirilmiştir. Doğrudan yağışlardan süzülen sularla belirli oranda beslenebilen bu alüvyon akiferinin asıl beslenmesi akarsulardan süzülen sulardan oluşmaktadır.

Alanda en geniş yayılıma sahip olan ve tabanında kil ve gevşek konglomera, kömür ve kömürün üzerinde bitümlü şeyl, tüfit ve kilaşı aratabakalı marndan oluşan Himmetoğlu formasyonu tektonik hareketlere bağlı olarak bol kırıklı-çatlaklı bir yapı kazanmıştır. Birincil gözenekliliği yüksek, ancak birincil



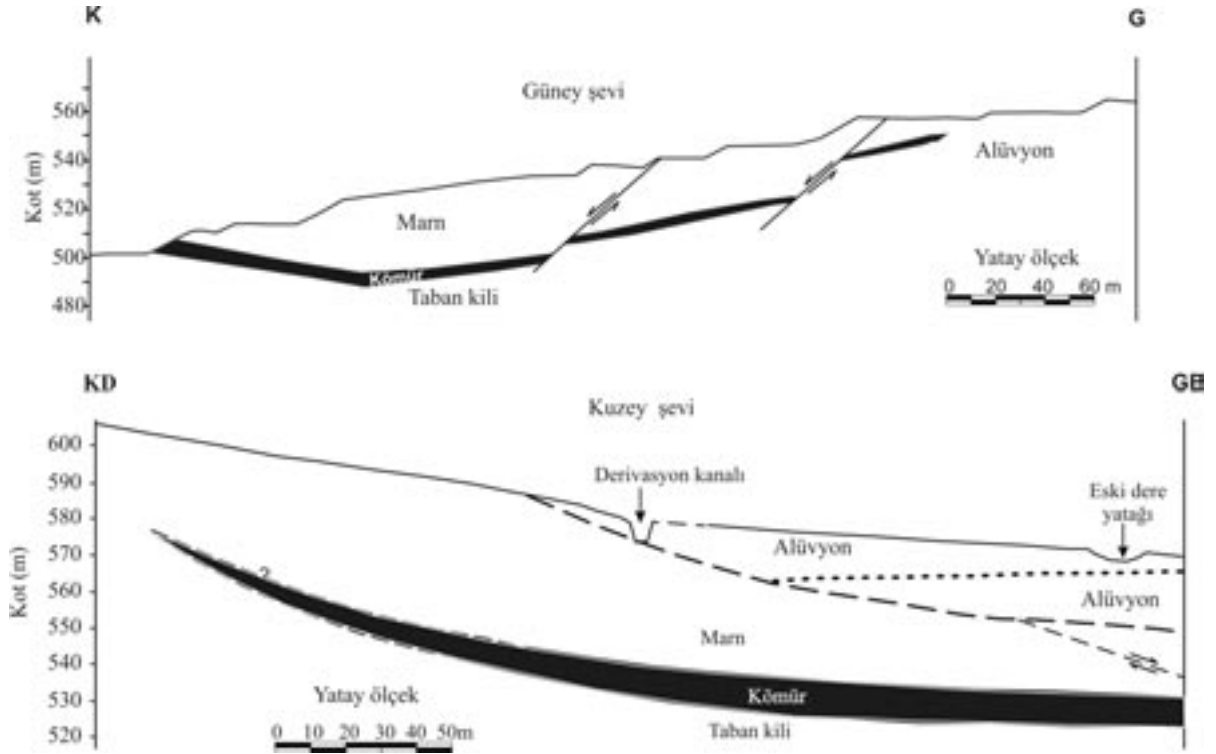
Şekil 4. Çalışma alanının yalınlaştırılmış hidrojeoloji haritası (Ulusay vd.,1998'den).

Figure 4 . Simplified hydrogeological map of the study area (after Ulusay et al., 1998).

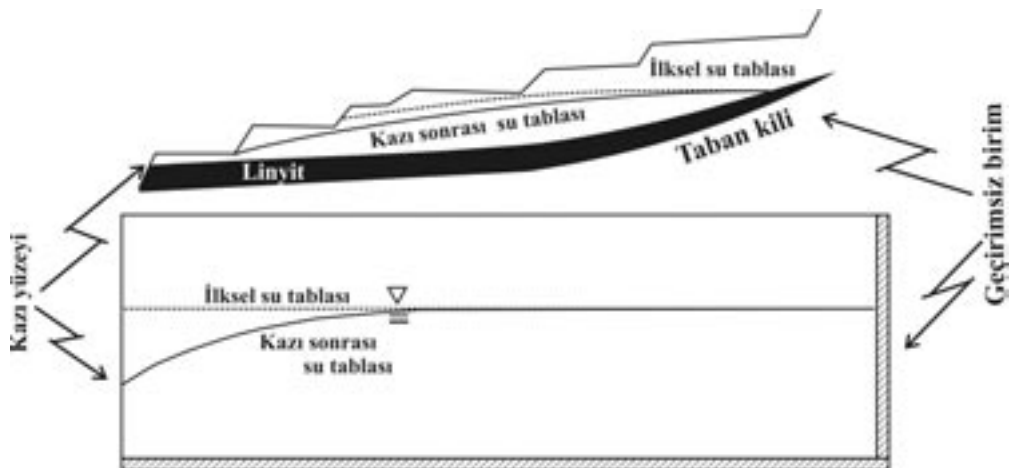
geçirgenliği düşük-çok düşük olan bu formasyonun özellikle kömür ile kömürün üzerindeki kiltası ara-tabakalı marnlardan oluşan kesiminde ikincil geçirimsizlik dike yakın ve devamlılığı yüksek eklemler nedeniyle yükselmiştir. Bu nedenle, genel hidrojeolojik yapı içerisinde Himmetoğlu formasyonu belirli oranlarda su taşıyabilen, ancak taşıdığı suyu yavaş iletebilen 'akitard' niteliğinde bir birim olarak değerlendirilmiştir.

İşletme amacıyla dekapaj çalışmalarının yapıldığı alanda Himmetoğlu formasyonu, Kuvaterner (olasılıkla Holosen) yaşlı alüvyon çökelleri ile örtülüdür. Yer yer kumlu, çakıllı seviyeler içeren birimde özellikle üst kesimlerde hakim malzeme, genellikle kahverengi-gri, killi-siltli ince kumdan oluşmaktadır. Bu birim, pratikte hidrojeolojik açıdan geçirimsiz olarak kabul edilebilecek derecede düşük geçirimsizliğe sahip olduğundan, 'akiklud' niteliğinde değerlendirilmiştir.

Alanda yayılım gösteren birimlerin yanal ve düşey yönlerde birbirleri ile olan ilişkileri Şekil 5'te verilen hidrojeoloji kesitlerinde gösterilmiştir. Geçirimsiz kil katmanı üzerinde yer alan kömür horizonunu da içeren Himmetoğlu formasyonunda katmanlanmanın havzanın içine doğru olduğu ve eğimlerin karşılıklı olarak havzanın kenarlarından orta kesimlerine doğru yataylaştığı görülmektedir. Katmanlanmanın bu genel durumundan çanak şeklindeki göl havzasının kıvrılarak bir senklinal yapısının oluştuğu görülmektedir (bkz. Şekil 5). Analitik çözümün uygulandığı kazı aynalarında, katmanların bu kıvrımlı yapısı, İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından verilen modeldeki geçirimsiz sınır koşulunun sağlanması şeklinde değerlendirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 5 . Himmetoğlu açık işletmesinde linyit horizonunun oluşturduğu senklinal yapı.
 Figure 5 . Syncline structure of the lignite horizon at Himmetoğlu open pit.



Şekil 6. Himmetoğlu kazı alanındaki sınır koşullarının İbrahim ve Brutsaert (1965) modeli ile karşılaştırılması.
 Figure 6. Comparison of boundary conditions of the Himmetoğlu case and the model suggested by Ibrahim and Brutsaert (1965).

3.2. Hidrolik Parametreler

Akifer olma özelliğinin depolama yanında iletkenlik özelliğini de gerektirdiği dikkate alınarak, çakıllı ve siltli-kumlu seviyelerin hidrolik iletkenlik katsayıları laboratuvarında düşen ve sabit seviyeli permeametreler kullanılarak belirlenmiştir. Hidrolik iletkenlik katsayılarının değerlerine göre çakıllı seviyeler verimli (10^{-3} m/s), kumlu-siltli seviyeler ise düşük verimliliğe (10^{-5} m/s) sahip akifer özelliği göstermektedirler.

Analitik çözümde kullanılmak üzere Himmetoğlu formasyonuna ait etkin gözeneklilik (S_y) ve hidrolik iletkenlik (K) gibi hidrolik karakteristikler, eklem aralığı ve açıklığı kullanılarak kestirilmiştir. Alüvyon gibi tanelerarası gözenekliliğe sahip akiferlerden farklı olarak, kırıklı-çatlaklı akiferlerde yeraltı suyu akımı kübik yasa olarak da bilinen

$$Q = \left(\frac{\rho g N b^2}{12\mu} \right) \cdot (bw) \left(\frac{\partial h}{\partial l} \right) \quad (8)$$

veya

$$Q = \left(\frac{\rho g N b^3}{12\mu} \right) \cdot w \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial l} \right) \quad (9)$$

eşitliğine uygun gerçekleşmektedir (Bear, 1979; Whitherspoon vd., 1980; Domenico ve Schwartz, 1998).

Eşitlik 9'da; r : suyun yoğunluğu, g : yerçekimi ivmesi, N : kırık-çatlak frekansı, b : kırık-çatlak açıklığı, w : kırığın akım yoluna dik yöndeki genişliği, $(\partial h/\partial l)$ terimi ise hidrolik eğimdir. Eşitlik, kırıklı çatlaklı akiferlerde akım miktarının kırık-çatlak açıklığı b 'nin küpü ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Görüldüğü gibi Eşitlik (9), ilk terim hidrolik iletkenlik K , ikinci terim akımın kesit alanı A ve son terim hidrolik eğim, i olmak üzere, $Q=K.i.A$ şeklinde ifade edilen Darcy yasasına eşdeğerdir. Buna göre kırıklı çatlaklı ortamların hidrolik iletkenlikleri

$$K = \frac{\rho g N b^2}{12\mu} \quad (10)$$

ifadesiyle tanımlanabilir.

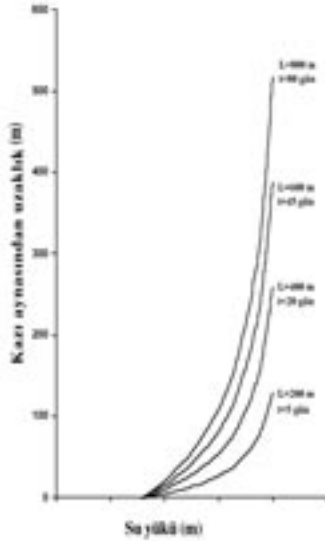
Himmetoğlu formasyonunda yapılan süreksizlik ölçümlerine göre marnlarda süreksizlik aralığı ortalama olarak 0.37 m (1 metredeki eklem sayısı 2.65) ve süreksizlik açıklığı ise genelde kapalı ve en fazla 1 mm'dir (Ulusay vd., 1998). Bu nedenle, hesaplamalarda açıklık 0.5 mm olarak alınmıştır. Kübik yasa esas alınarak yapılan hesaplamalardan elde edilen hidrolik iletkenlik değerlerine göre, Himmetoğlu formasyonuna ait marnların ve kömürün hidrolik iletkenlik değerlerinin verilen yöntemle uygun olarak 5×10^{-5} ile 1×10^{-6} m/s arasında değiştiği belirlenmiş olup, hesaplamalarda su sıcaklığının 10-20 °C arasında değiştiği varsayılmıştır.

Marn ve kilttaşlarından oluşan Himmetoğlu formasyonunun etkin gözenekliliği ise; tanelerarası boşluklardan kaynaklanan birincil gözenekliliğinin yanı sıra, ikincil gözeneklilik de dikkate alınarak, güvenli tarafta kalınmak amacıyla 0.1 olarak kabul edilmiştir.

3.3. Analitik Çözüm Sonuçları

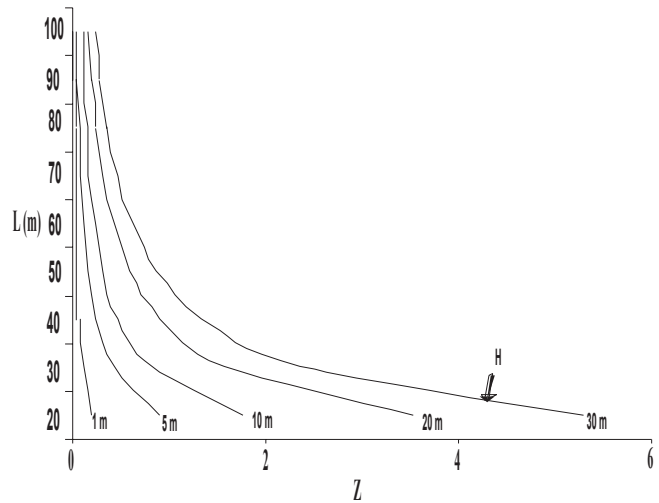
Himmetoğlu formasyonuna ilişkin hidrolik parametreler kullanılarak, yeraltısuyu seviyesinin kazı aynasından farklı x uzaklıklarındaki seviyeleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar, jeoteknik analizler açısından kritik süre olarak belirlenen $t=7$ gün için yapılmıştır (Ulusay vd., 1998). Uygulama alanında, kazı aynasının bulunduğu farklı kesitlerdeki H ve L değerlerinin değişimi dikkate alınarak, farklı L ve H değerleri için hesaplamalar tekrarlanmıştır. Jeoteknik analizlerde kolaylıkla kullanılabilmesi amacıyla, hesaplamalardan elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 7’de verilen örnek grafik, ilksel doymun kalınlığının (H) 20 m olduğu farklı L değerleri için hazırlanmıştır. Örnek olarak verilen grafikte, kazı aynasının yeraltısuyu seviyesini kestiği andan itibaren 5, 20, 40 ve 80. günde yeraltısuyu seviyesinin alacağı konum gösterilmiştir. Şekil 7’den görüldüğü gibi, geçirimsiz sınırın kazı aynasına yakın olması, düşümde hızlı bir artışa neden olmaktadır. Öte yandan, Eşitlik 7 ve Şekil 8’den de anlaşılacağı gibi, kazı alanında doymun kalınlığının artması, Z parametresini arttıracığından, yeraltısuyu seviyesindeki düşüm aynadan gerilere doğru daha yüksek oranda gerçekleşmektedir. Diğer bir ifadeyle, doymun kalınlık arttıkça, aynadan iç kısımlara doğru yeraltısuyu düşümü daha yüksek oranda gözlenmektedir.

Jeoteknik amaçlı analizlerde, ilgilenilen kesitteki doymun kalınlık (H) ve kazı aynasının geçirimsiz birime olan uzaklığı (L) belirlendikten sonra, aynadan istenen uzaklıktaki seviye, Şekil 7’deki abaktan doğrudan okunabilmektedir. Himmetoğlu linyit açık işletmesinin hidrolojik koşulları dikkate alınarak toplam 12 kesit için yapılan hesaplamalarda doymun kalınlığının 1 ile 30 m arasında değiştiği dikkate alınmıştır. Örnek olarak seçilen 3 kesite ilişkin analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 7. Analitik çözümün Himmetoğlu açık işletmesinde uygulanması ile elde edilen sonuçların grafiksel gösterimine bir örnek.

Figure 7. A graphical presentation of results as an example to the application of the analytical solution to Himmetoğlu open pit case.

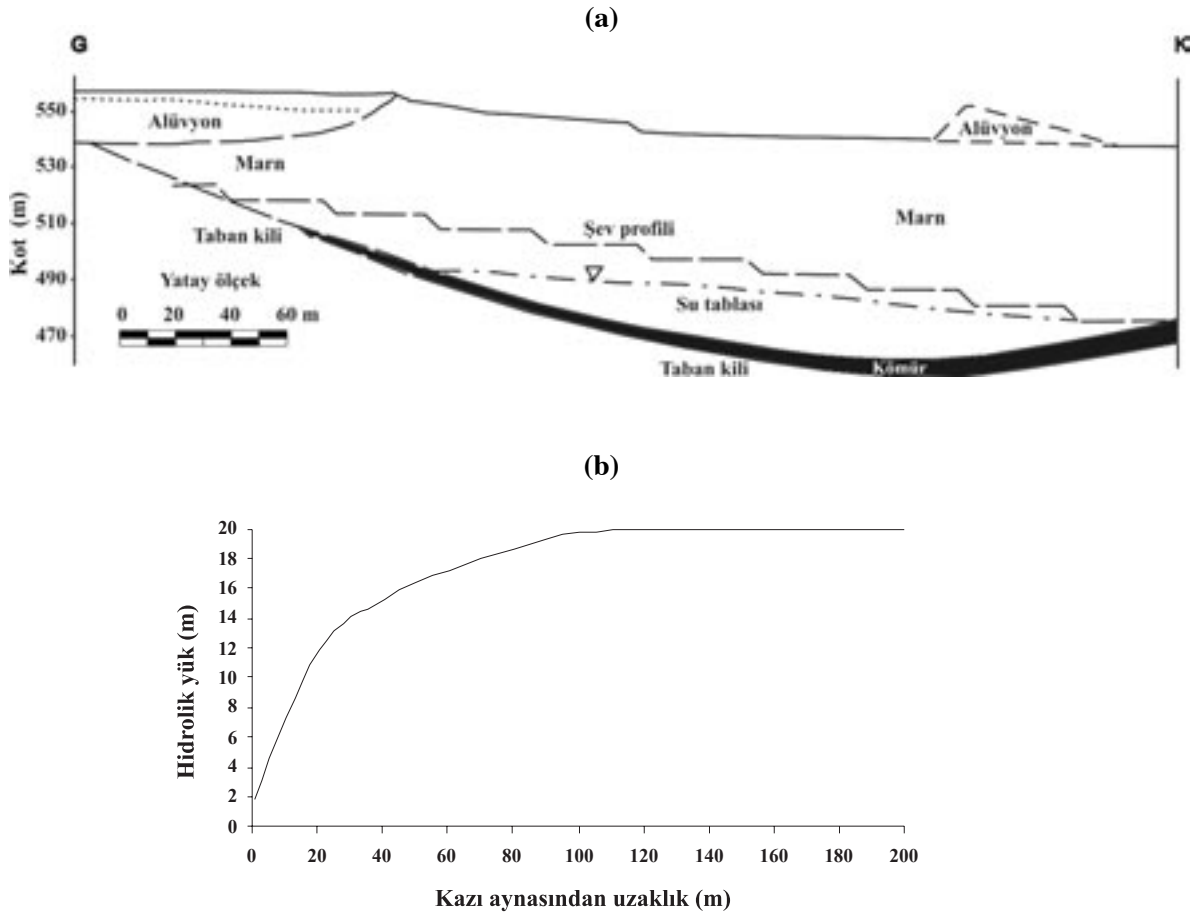


Şekil 8. Himmetoğlu formasyonu için hesaplanan boyutsuz zaman parametresinin (Z) doymun kalınlık (H) ve yeraltısuyunun yayılımı (L) ile ilişkisi.

Figure 8. Graph depicting the dependence of the dimensionless time parameter (Z) calculated for Himmetoğlu formation on thickness (H) and extension (L) of the saturated zone.

3.3.1. Kesit-1'e ait analizler

Açık işletme alanını kuzey-güney doğrultusunda kesen kesitte yeraltısuyunun yaklaşık olarak 200 m'lik bir yayılım ve 20 m'lik bir kalınlığa sahip olduğu görülmektedir (Şekil 9 a). Buna göre, analitik çözümün gerektirdiği sınır koşulları açısından $L=200$ m ve $H=20$ m alınabilir. Hesaplamalarda akiferin hidrolik parametreleri olan hidrolik iletkenlik katsayısı (K) ve özgül verim (S_y) sırasıyla 1 m/gün (1.15×10^{-5} m/s) ve 0.1 olarak alınmışlardır. Kazı sırasında meydana gelecek basamakların yeraltısuyu seviyesini keseceği andan itibaren 7. gün için boyutsuz zaman parametresi $Z=0.035$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen yeraltısuyu seviyesinin konumu Şekil 9 b'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, kazıdan 7 gün sonra, aynadan 100 m'den daha iç kesimlerde yeraltısuyu seviyesinde bir düşüm gözlenmemektedir. Kazı aynasında yaklaşık olarak 18 m olan düşüm, aynadan 20 m uzaklıkta yaklaşık 9 m ve 40 m uzaklıkta ise 5 m civarındadır.

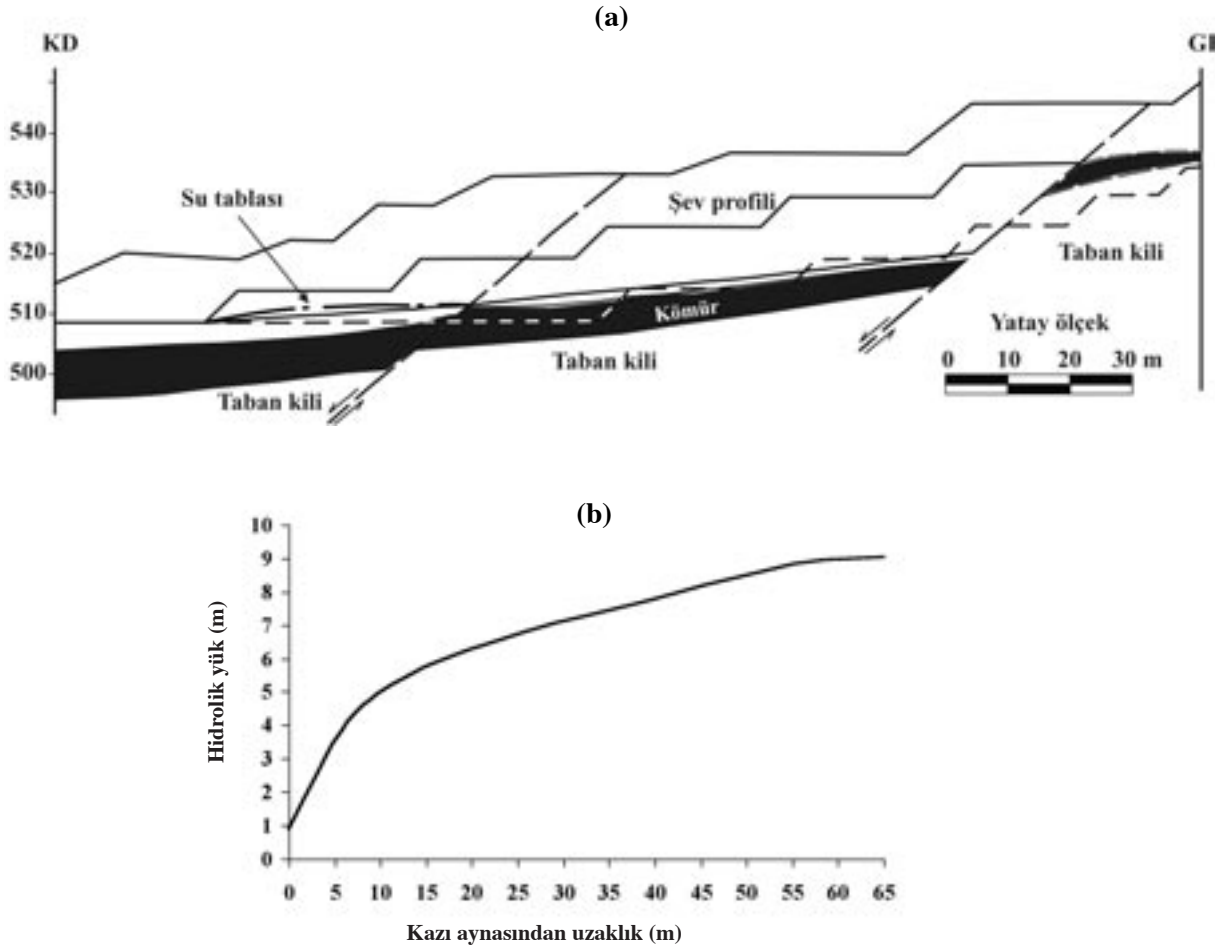


Şekil 9. Analitik çözümün Himmetoğlu açık işletmesinde uygulandığı Kesit-1: (a) hidrojeolojik koşullar ve (b) analitik çözümden elde edilen yeraltısuyu seviyesinin konumu ($L=200$ m, $H=20$ m, $t=7$ gün, $K=1$ m/gün, $S_y=0.1$).

Figure 9. Cross-section-1 where the analytical method was applied in Himmetoğlu open pit: (a) hydrogeological conditions and (b) position of groundwater level as predicted by the analytical method ($L=200$ m, $H=20$ m, $t=7$ days, $K=1$ m/day, $S_y=0.1$).

3.3.2. Kesit-2'ye ait analizler

Açık işletmeyi kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda kesen ikinci kesitte ise, yeraltısuyunun yayılımı (L) 65 m civarındadır. Bu kesimde doymun kalınlık (H) yaklaşık olarak 10 m olarak gerçekleşmektedir (Şekil 10 a). Akifer hidrolik karakteristiklerinin Kesit-1 örneğinde olduğu gibi alınmasıyla yapılan hesaplamalar sonucunda boyutsuz zaman parametresi $Z=0.1657$ olarak bulunmuştur. Kazı aynasından uzaklığa göre yapılan hidrolik yük hesaplamaları sonucunda yeraltısuyu seviyesinin konumunu gösteren grafik Şekil 10 b'de verilmiştir. Buna göre, bu kesitte kazı aynasından yeraltısuyu seviyesinin kazı tabanına kadar düştüğü, aynadan 5 m içeride yeraltısuyu seviyesinin yaklaşık olarak 3 m, 10 metre uzaklıkta ise 5 m civarında olduğu görülmektedir. Geçirimsiz sınırın aynaya uzaklığının küçük (65 m) ve aynı zamanda doymun kalınlığının düşük (10 m) olması nedeniyle, kazıdan sonraki 7. günde, aynadan en uzak noktada dahi (65 m) yeraltısuyu seviyesinin yaklaşık olarak 1 m düştüğü görülmektedir.

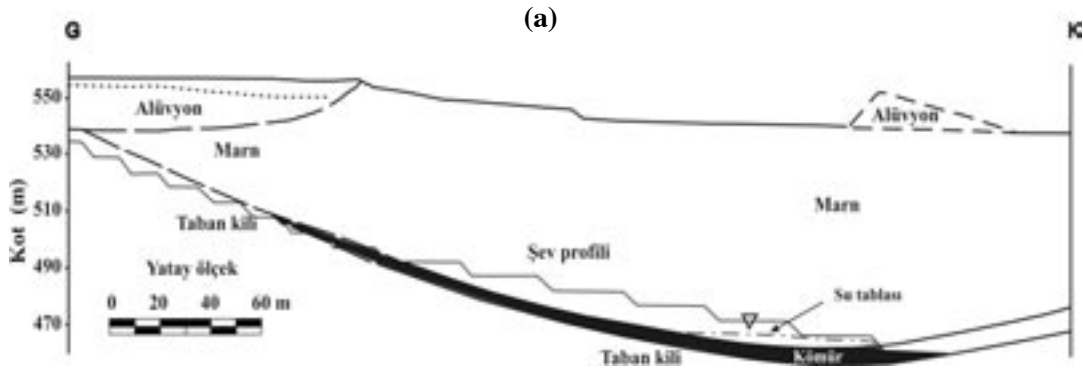


Şekil 10. Analitik çözümün Himmetoğlu açık işletmesinde uygulandığı Kesit-2: (a) hidrojeolojik koşullar ve (b) analitik çözümden elde edilen yeraltısuyu seviyesinin konumu ($L=65$ m, $H=10$ m, $t=7$ gün, $K=1$ m/gün, $S_y=0.1$).

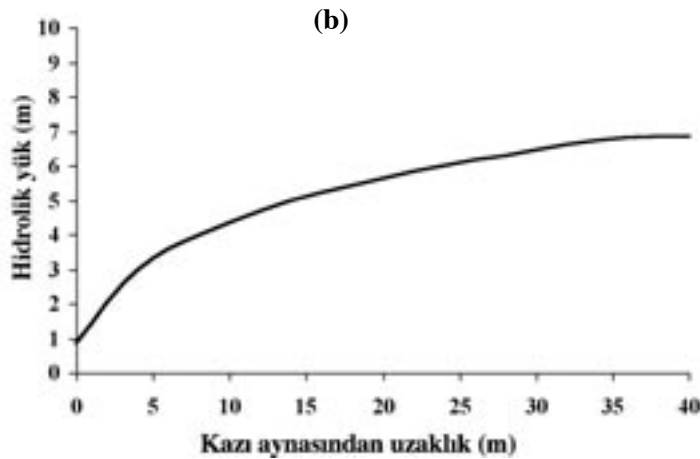
Figure 10. Cross-section-2 where the analytical method was applied in Himmetoğlu open pit: (a) hydrogeological conditions and (b) position of groundwater level as predicted by the analytical method ($L=65$ m, $H=10$ m, $t=7$ days, $K=1$ m/day, $S_y=0.1$).

3.3.3. Kesit-3'e ait analizler

Bu örnekte, Kesit-1'de tanımlanan koşulların kazının ilerlemesiyle alacağı geometriye bağlı olarak ortaya çıkan durum ele alınmıştır. Kazının ilerlemesi sonucunda, basamakların kömür horizonuna yaklaşmasıyla ortaya çıkan durumda kazı aynasının gerisinde yeraltısuyunun yayılımı (L) 40 m'ye, doymun kalınlık da (H) 10 m'ye düşmektedir (Şekil 11 a). Yeni durum için yinelenen hesaplamalar sonucunda boyutsuz zaman parametresi $Z = 0.4375$ olarak bulunmuştur. Buna göre yapılan hidrolik yük hesaplamaları, kazı aynasından iç kesimlere doğru yeraltısuyu seviyesinin konumunun Şekil 11 b'de verildiği gibi gerçekleşeceğini ortaya koymuştur. Kazı aynasında 1 m'nin altına düşen yeraltısuyu seviyesi, aynadan en uzak noktada (40 m) 3 m'den fazla bir düşüm göstermektedir.



Kazı aynasından uzaklık (m)



Şekil 11. Analitik çözümün Himmetoğlu açık işletmesinde uygulandığı Kesit-3: (a) hidrojeolojik koşullar ve (b) analitik çözümden elde edilen yeraltısuyu seviyesinin konumu ($L = 40$ m, $H = 10$ m, $t = 7$ gün, $K = 1$ m/gün; $S_y = 0.1$).

Figure 11. Cross-section-3 where the analytical method was applied in Himmetoğlu open pit: (a) conditions and (b) position of groundwater level as predicted by the analytical method ($L = 40$ m, $H = 10$ m, $t = 7$ days, $K = 1$ m/day, $S_y = 0.1$).

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Kazı aynalarından serbest drenajla meydana gelen yeraltısuyu akımına bağlı olarak kazı aynasında ve ayna gerisinde yeraltısuyu seviyesinin zamanla değişimi, şev duraylılığı analizlerinde etkili olan parametrelere biridir. Serbest akiferlerde kararsız koşullarda yeraltısuyu akımını ifade eden matematiksel denklemin çözümündeki güçlükler, denklemin belirli sınır koşulları için analitik çözümlerinin türetilmesine yol açmıştır. İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından geliştirilen analitik çözüm, kazı alanlarında oluşan sızma yüzeylerindeki akımın kestirilebilmesini sağlamaktadır. Söz konusu çözüm, kazı aynası ve ayna gerisinde yeraltısuyu seviyesindeki değişimlerin kestirilmesini de olanaklı kılmaktadır.

Himmetoğlu linyit açık işletmesinde uygulanan yöntem, jeoteknik çalışmalar açısından kritik süre olarak belirlenen yedi gün için gerçekleştirilmiştir. İncelenen kesitlerde geçirimsiz sınırların aynadan uzaklığı ve statik seviye değerleri dikkate alınarak ve hesaplamalar farklı değerler için tekrarlanarak elde edilen sonuçlar, kullanımı kolaylaştıracak şekilde abaklara dönüştürülmüştür. Yöntem, başta jeoteknik çalışmalar olmak üzere, yeraltısuyu seviyesinin alansal ve zamansal değişiminin kestirilmesini gerektiren çalışmalara önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla birlikte, yöntemin analitik bir çözüme dayanması nedeniyle, uygulama alanlarında söz konusu varsayımların gerçekleşmesi, sonuçların güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, yöntemin uygulanacağı alanın hidrojeolojik yapısının, sınır koşulları ve hidrodinamik ilişkileri de kapsayacak kavramsal bir modelle ortaya konması gerekmektedir. Himmetoğlu örneğinde, alandaki senklinal yapısını ortaya koyan jeolojik kesitlerden, yöntemin sınır koşullarının önemli oranda karşılandığı görülmektedir. Ayrıca, yöntem, homojen ve izotrop olarak kabul ettiği akım ortamına ilişkin hidrolik parametreleri gerektirmektedir. Bu nedenle, etkin gözeneklilik ve hidrolik iletkenlik gibi parametrelerin olabildiğince alanı temsil edecek sayıda ve dağılımda, mümkünse yerinde yapılan deneylerle elde edilmeleri aynı derecede önemli ve gereklidir. Himmetoğlu örneğinde hidrolik karakteristikler, eklem ölçümlerinden dolayı olarak yapılan hesaplamalarla elde edilmişlerdir. Eklem ölçümleri, alanı kapsayacak şekilde uzun hatlar boyunca yapılmasına karşın, hesaplamalarda belirsizlik kaynaklarından birini oluşturmuştur. Abak şeklinde verilen analiz sonuçlarının özel durumlar için uygulanabilmesi, söz konusu alandaki statik seviyeye ait bilgiyi gerektirdiğinden, hidrojeolojik kavramsal modelin bir parçası olan hidrojeolojik haritanın işletme öncesine ilişkin bir yeraltısuyu seviye haritasının yapılmış olması gerekmektedir. Bunun için, maden aramaları sırasında rezerv belirleme amacıyla açılan araştırma kuyularında yeraltısuyu koşullarına ilişkin bilgi ve ölçümlerin kaydedilmesi, hesaplamalardaki belirsizliği önemli oranda azaltacaktır.

Gerek yöntemin varsayımlarına, gerekse varsayımların Himmetoğlu linyit açık işletmesi örneğinde gerçekleşme derecesine bağlı belirsizliklere karşın, yöntem bu amaçla kullanılan genel yaklaşımlara önemli üstünlükler sağlamaktadır.

KATKI BELİRLEME

Bu çalışma, Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü (TKİ) tarafından desteklenen “TKİ Himmetoğlu Linyit Açık İşletmesi Şev Duraylılığı Projesi” kapsamında yapılan analizlerin bir bölümünü içermektedir. Yazarlar; proje ekibine, çalışmalara destek olan TKİ personeline ve çizimleri yapan tekniker Bülent Topuz’a teşekkür borçludurlar.

KAYNAKLAR

- Bear, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York, 764p.
- Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York, 561p.
- Bear, J., Zaslavsky, D., and Irmay, S., 1968. Physical Principles of Water Percolation and Seepage. UNESCO, Paris, 465p.
- Boussinesq, J., 1904. Recherches theoretiques sur l'ecoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le debit des sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10, 5-78.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., 1998. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley and Sons, Second Edition, New York, 506p.
- Freeze R. A., and Cherry, J. A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 604p.
- Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schalkwyk, A., and Javandel, I. 1965. Groundwater inflow during tunnel driving, *Engineering Geology*, 2(1), 39-56.
- Hanna, T. M., Azrag, E. A., and Atkinson, L. C. 1994. Use of an analytical solution for preliminary estimates of groundwater inflow to a pit. *Mining Engineering*, 46(2), 149-152.
- İbrahim, H.A., and Brutsaert, W., 1965. Inflow hydrographs from large unconfined aquifers. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 91, 21-38.
- Naugle, G. D., and Atkinson, C.L., 1993. Estimating the rate of post-mining filling of pit lakes. *Mining Engineering*, 45(4), 402-404.
- Polubarinova-Kochina, P. Ya., 1962. Theory of Groundwater Movement. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 613p.
- Singh, R.N., and Atkins, A.S., 1984. Application of analytical solutions to simulate some mine inflow problems in underground mining, *International Journal of the Mine Water Association*, 3(4), 1-27.
- Terzaghi, K., 1950. Mechanism of landslides. *Berkey Volume: Application of Geology to Engineering Practice*, Geological Society of America, New York, pp. 83-123.
- Ulusay, R., Ekmekçi, M., Gökçeoğlu C., Sönmez, H., Tuncay, E. ve Erdoğan, S., 1998. TKİ Himmetoğlu Linyit Açık İşletmesi Şev Duraylılığı Projesi. Hacettepe Üniversitesi, YUVAM Proje Raporu No. 97-58 (yayımlanmamış).
- Verma, R.D., and Brutsaert, W., 1970. Unconfined aquifer seepage by capillary flow theory. *Journal of Hydraulic Division, Proceedings of American Association of Civil Engineers*, 96, 1331-1344.
- Verma, R.D., and Brutsaert, W., 1971. Unsteady free surface groundwater seepage. *Journal of Hydraulic Division, Proceedings of American Association of Civil Engineers*, 97, 1213-1229.
- Whiterspoon, P.A., Wang, J.Y.S., Iwai, K., and Gale, J.E., 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resources Research*, 16(6), 1016-1024

