



Original Research / Orijinal Araştırma

### Divriği A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında uygulanmakta olan üretim yönteminin ve cevher kaybının değerlendirilmesi

*Evaluation of actively applied mining method and ore loss in Divriği A-Kafa and Ekinbaşı underground iron mines*

Atila Ceylanoğlu<sup>a,\*</sup>, Bülent Erdem<sup>a,\*\*</sup>, Bahadır Şengün<sup>a,\*\*\*</sup>, Aydın Karatepe<sup>b,\*\*\*\*</sup>, M. Engin Yayla<sup>b,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, SİVAS

<sup>b</sup> Erdemir Madencilik San. ve Tic. A.Ş. Divriği, SİVAS

Geliş-Received: 9 Mart - March 2022 • Kabul - Accepted: 9 Mayıs - May 2022

ÖZ

Bu çalışmada, Divriği A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında uygulanmakta olan üretim yöntemi ve cevher kaybı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yeraltı ocaklarında yerinde ölçüm, gözlem ve incelemeler yapılmıştır. Gerek arazi çalışma sonuçları gerekse konu ile ilgili literatür birlikte değerlendirilmiş ve uygulanmakta olan arakatlı göçertme yöntemi seçiminin isabetli ve doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı ocaklarında sırasıyla cevher kaybı %5,97 ve %8,20 olarak belirlenmiş ve bu değerlerin kabul edilebilir sınırın altında olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Yeraltı üretim yöntemleri, Arakatlı göçertme yöntemi, Cevher kaybı

ABSTRACT

In this study, the applied mining method and ore loss in Divriği A-Kafa and Ekinbaşı underground iron mines were evaluated. Within this scope, in-situ measurements, observations and investigations were made in underground mines. The results of the field investigation as well as the related literature were evaluated together, and it was concluded that the sublevel caving method chosen is accurate and correct. In addition, ore loss in A-Kafa and Ekinbaşı underground operations was determined as 5,97% and 8,20%, respectively, and these values were found to be below the acceptable limit.

**Keywords:** Underground mining methods, Sublevel caving method, Ore loss

#### Giriş

Bilindiği gibi uygun yeraltı üretim yöntemi seçimi birçok parametre göz önüne alınarak yapılmaktadır (Cummins ve Given, 1973; Hustrulid ve Bullock, 2001). Bu parametrelerden özellikle cevher geometrisi ve şekli (kalınlık, uzanım, eğim, derinlik vb.), rezerv ve üretim miktarları, tenör ve tenör dağılımı, cevher-yantaş kontak durumu, jeolojik ve tektonik yapı, cevher ve yan kayaçların sağlamlık durumu, su durumu, yeryüzü koşulları ve ekonomik koşullar dikkate alınmaktadır. Dünyada yeraltı madenciliğinde genellikle uygulanan üretim yöntemleri tahkimatsız, tahkimatlı ve göçertmeli yöntemler olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır (Çizelge 1).

Bu çalışmada özellikle incelenen arakatlı göçertme yönteminde, diğer madencilik yöntemlerinde olduğu gibi, madencilik maliyetlerini ve karlılığı büyük ölçüde değiştirebilen birçok maden planlama faktörü bulunmaktadır. Bu faktörler; üretim planlaması, nakliyat kat açıklığı, cevher galerisi boyutları ve maden kazı sınırı olarak sıralanabilir. Ayrıca yeraltı üretim yöntemi seçilirken planlanan günlük ve yıllık üretim miktarları ile maden ömrü dikkate alınması gerekmektedir. Tüm göçertmeli yöntemler; az ya da çok kontrollü koşullar altında cevher ve yankayacın kırılmasına dayanır. Cevher alındıktan sonra parçalanmış malzeme, boşluğu doldurarak üst kısımda göçük bir alan oluşturur.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: aceylan@cumhuriyet.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-1987-6622>

\*\* bulent@cumhuriyet.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-1226-9248>

\*\*\* bsengun@cumhuriyet.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-0413-1748>

\*\*\*\* akaratepe@erdemirmaden.com.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7543-9710>

\*\*\*\*\* eyayla@erdemirmaden.com.tr • <https://orcid.org/0000-0002-5895-7177>

**Çizelge 1.** Yeraltı üretim yöntemleri (Hustrulid, 1982; Baase vd., 1998)

Tahkimatsız Yöntemler (Unsupported Openings)	Tahkimatlı Yöntemler (Supported Openings)	Göçertmeli Yöntemler (Caving Methods)
Oda Yöntemi (Open Stopes)	Kes-Doldur Yöntemi (Cut and Fill Mining)	Arakatlı Göçertme Yöntemi (Sublevel Caving)
Oda-Topuk Yöntemi (Room and Pillar Mining)	Üsten Dilimli Ayak (Top Slicing Method)	Blok ve Panel Göçertme Yöntemi (Block and Panel Caving)
Arakatlı Kazı Yöntemi (Sublevel Stopping)	Küp Tahkimatlı Yöntem (Square-Set Stopping)	
Ambarlı Kazı Yöntemi (Shrinkage Stopping)	Uzunayak Yöntemi (Longwall Mining)	
Suni Tabanlı Travers Ayak (Stull Stopping)	Kısaayak Yöntemi (Shortwall Mining)	

Yeraltında açılan büyük boşluklar ani göçmeyle işletmeye önemli zararlar vereceğinden, tümüyle ve sürekli göçmenin sağlanması esastır. Bu nedenle örtü tabakası ve tavantaşının kolay göçer nitelikte olması istenir (Demirci vd., 1994).

Arakatlı göçertme yönteminde damar birbirine oldukça yakın dikey dilimler halinde normal olarak 10-30 m arasında değişen arakatlara bölünmektedir (Şekil 1). Cevher gövdesinde düzenli aralıklarla hazırlanan arakatlardan, yukarıdan aşağıya doğru üretim yapılmaktadır. Arakatlar, sistematik şekilde cevher gövdesine yatay düzlemde dik ya da paralel düzende açılmış üretim galerilerinden oluşturulmaktadır. Geniş cevher gövdelerinde arakat üretim galerileri tabantaşı rekubundan başlatılmakta ve tavantaşına kadar sürülmektedir. Bu yöntem, enine arakatlı göçertme olarak adlandırılmaktadır. Arakatlarda delme-patlama ve yükleme işlemleriyle üretilen cevher, arakatlar arasında oluşturulan fereler vasıtasıyla ana nakliye sistemine verilmektedir. Arakatlı göçertme yönteminde, arakat hazırlığı (genel olarak %20'ye kadar üretimin de yapılabildiği), üretim delikleri ve yükleme birbirinden bağımsız olarak ayrı katlarda devamlı sürdürülebilmektedir. Bu durum operasyonlar için çalışma arını sayısını artırmakta, üretim kapasitesini olumlu yönde etkilemektedir. Bu yöntemin özellikle kontrolsüz delme-patlama uygulamalarında seyrelme ve cevher kaybı diğer yöntemlere göre daha fazla olabilmektedir. Genel olarak seyrelme % 10-35 arasında değişirken, cevher kaybı %10-20 arasında olabilmektedir.

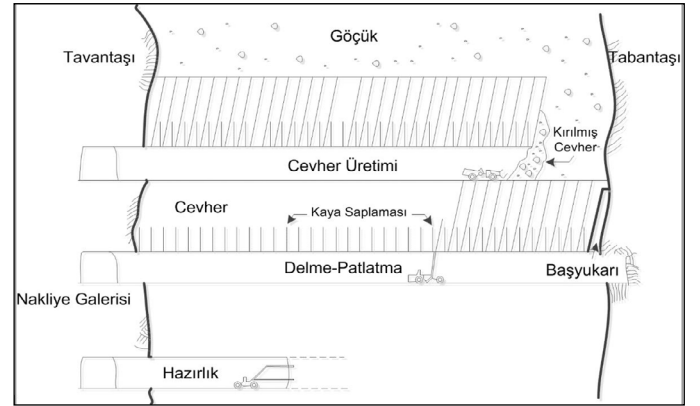
Bu çalışmada kapsamında, Sivas ili, Divriği ilçesi sınırları içinde yer alan A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında uygulanmakta olan arakatlı göçertme yönteminin uygunluğu değerlendirilmiş ve bu yöntemle ilgili olarak cevher kaybının kabul edilebilir düzeyde olup olmadığı incelenmiştir. Öncelikle söz konusu ocaklarda ölçüm, gözlem ve incelemeler yapılmıştır. Daha sonra, gerek arazi çalışma sonuçları gerekse konu ile ilgili literatür çalışmaları değerlendirilmiştir.

## 1. A-kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarının tanıtımı

### 1.1. Jeolojik yapı

A-Kafa ve Ekinbaşı sahalarında MTA tarafında yapılan jeoteknik etüt ve değerlendirmeler sonucunda ocaklar ve civarında mevcut kayaçlar belirlenmiştir (Aktimur vd., 1988; Yıldızeli, 1998). Söz konusu sahalarda yapılan çalışmalarda, yüzeylenmiş cevhere rastlanmamakla birlikte daha önceki yıllarda sahada yapılan jeofizik manyetik çalışmalarda, cevherleşmenin olduğunu belirten manyetik anomaliler elde edilmiştir. Cevherleşmenin konumunun belirlenmesi amacıyla 1991 yılından itibaren sondajlı aramalara başlanmış ve cevherleşmenin granitik kayaçlar ile serpantinler arasında, serpantinlere doğru gelişmiş kontakt felsler içinde oluş-

tuğu tespit edilmiştir. Cevherin felslerle tarak şeklinde girift olarak incelenip, kalınlaştığı belirlenmiştir. Aynı şekilde serpantin-fels ilişkisinde girift ve karmaşıktır (Ermaden, 2008). Son yapılan 9 adet sondaj da mevcut bilgileri doğrulamakta olup cevherin, doğu batı uzanımlı bir ana kütle şeklinde, bu kütlemin altında ve üstünde irili ufaklı mercekler şeklinde yerleştiği izlenmiştir. Cevherleşmenin eğimi batıda yaklaşık güneye eğimli 54°, doğuya doğru gidildikçe güneybatıya eğimli 65°'dir ve cevherleşmeyi tabanda ve kuzeyde granitik kayaçlar sınırlamaktadır. Cevherleşmenin zahiri kalınlığı 40-80 m arası değişmekte olup ortalama kalınlığı 60 m civarındadır (Ermaden, 2008).



Şekil 1. Enine arakatlı göçertme yöntemi (Baase vd., 1998)

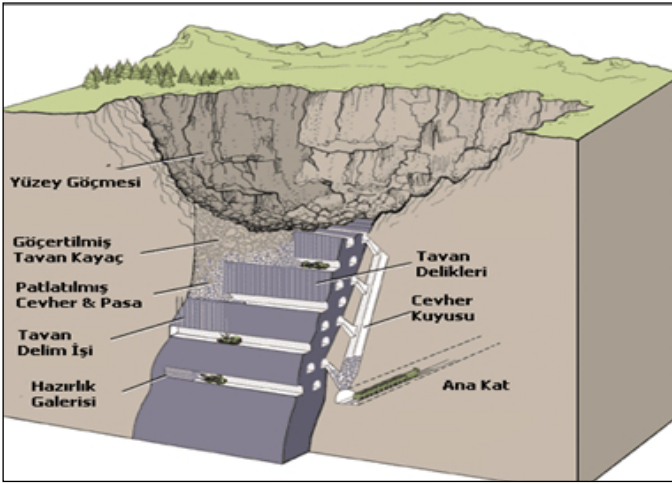
## 1.2. Üretim yöntemi ve mevcut uygulama

### 1.2.1. Üretim yöntemi

A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı ocaklarında arakatlı göçertme yöntemi ile cevher üretimi yapılmaktadır. Ülkemizde ve diğer ülkelerdeki birçok işletmede uygulanmakta olan arakatlı göçertme yönteminde tavan patlatması ile alınan cevher boşluğuna yan kayaç ve tavantaşının dolmasıyla alt kotlara inilmektedir. Arakatlı göçertme yöntemi, cevher gövdesinde düzenli aralıklarla hazırlanan arakatlardan, yukarıdan aşağıya doğru üretim yapılması prensibine dayanmaktadır (Şekil 2). Arakatlar, sistematik şekilde cevher gövdesine yatay düzlemde dik ya da paralel düzende açılmış üretim galerilerinden oluşturulmaktadır. Geniş cevher gövdelerinde arakat üretim galerileri tabantaşı rekubundan başlatılmakta ve tavantaşına kadar sürülmektedir. Yöntem genellikle düşey uzanımlı fazla olan büyük ve dik dalımlı (>60°) cevher gövdelerine uygulanmakla birlikte, oldukça kalın (yatay uzanımlı) ya da masif depozitlerde de kullanılmaktadır. Kaya kütlesi ve cevher minimal tahkimat (aralıkli kaya sıklaması) ile arakat galerilerinin açık kalabileceği şekilde

duraylı olmalıdır. Tavantaşı zayıf→sağlam olabilir ancak cevher alımını takiben kırılarak göçebilmelidir. Bu nedenle, ocak üzerindeki yüzey zemininde tasmana izin verilebilmelidir. Yöntemin uygulanabilmesi için cevher, orta→yüksek dayanıma sahip olmalı ve tahkimatsız durabilmelidir. Cevher alındıktan sonra parçalanmış malzeme, boşluğu doldurarak üst kısımda göçük bir alan oluşturmaktadır. Yeraltında açılan büyük boşluklar ani göçmeyle işletmeye önemli zararlar verebileceğinden, tümüyle ve sürekli göçmenin sağlanması esastır. Bu nedenle, tavantaşının kolay göçer nitelikte olması arzu edilmektedir. Yöntemin kontrolsüz delme-patlatma uygulamalarında seyrelme ve cevher kaybı diğer yöntemlere göre daha fazla olabilmektedir. Genel olarak seyrelmeden dolayı oluşan cevher kaybı en fazla %15 olmaktadır. Arakatlı göçertme yöntemi özellikle masif yatakların ve orta kalınlıktaki dik damarların kazanılmasında başarıyla uygulanmaktadır.

Üretim ve hazırlık katlarının oluşturulması sırasında gerekli ekip ve makinaların organizasyonlarının sağlanması ve uygulanması kolaydır. Üretim ve hazırlık sürecinde personel ile ekipmanın tavan göçmelerine karşı korunmuşluğu sağlanmasına rağmen, yöntemin göçertmeli oluşundan dolayı bir risk faktörü taşımaktadır. Ancak üretimin yapıldığı göçertme noktalarındaki üretim faaliyeti, uzaktan kumandalı ekipman ile sağlandığından sadece ekipmana ait risk faktörü vardır. Buna rağmen risk ögesi emniyet yönünden orta sınıfta değerlendirilmektedir. Modern delme ve ateşleme araçları kullanılabilirliği için üretim kapasitesinin yükseltilebilir olması, mekanizasyona elverişliliği, tahkimat malzemesi gereksiniminin azlığı ve ton başına düşen hazırlık maliyetinin düşüklüğü yöntemin avantajları olarak bilinmektedir. Diğer yandan, yöntemin dezavantajları ise; seyrelme oranının yüksekliği, seçimli cevher üretiminin zorluğu, hazırlık işleminin ve arakat bacalarında tali havalandırma gerekliliği olarak belirtilmektedir.

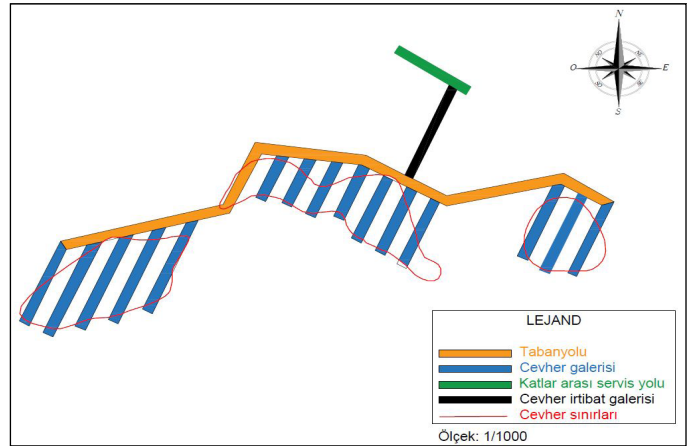


Şekil 2. Arakatlı göçertme yöntemi (Hustrulid, 1982)

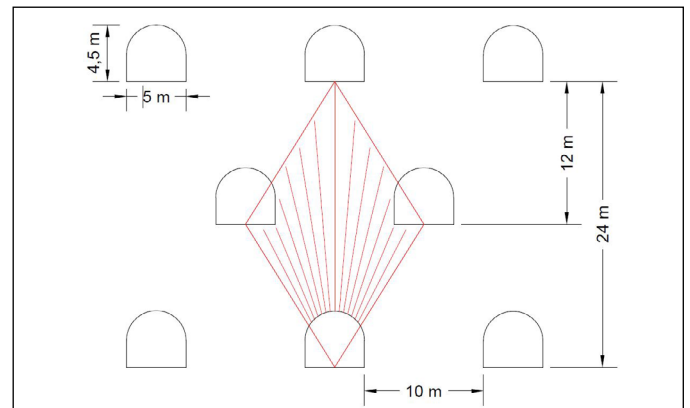
Divriği A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında hazırlık galerileri, cevhere bağlantı galerilerinin ilerletilmesiyle açılmaktadır. Bunlar, cevher sınırlarına paralel şekilde pasa ve cevher içerisinde açılarak ilerletilen 22,5 m<sup>2</sup> kesit alanına sahip galerilerdir ve cevherleşmenin son bulunduğu noktaya kadar ilerletilmektedir. Daha sonra, taban yoluna dik ve cevher içerisine doğru 10 m aralıklarla tabanyolu ile aynı boyutlardaki cevher galerileri, cevherin enine doğru olan sınırına erişişine kadar sürülmektedir. Bu galerilerin aynasına veya yan cidarlarına yapılacak doğrusal veya eğimli sondajlarla ve kat haritalarındaki cevher izleri de dikkate alınarak cevher sınırları tespit edilmektedir. Her iki yeraltı ocağı katlarındaki üretim planı Şekil 3'te gösterilmiştir. Tavan patlatmalarına başlamadan önce en az bir üretim katının galerileri hazırlanmaktadır. Galeri ilerlemeleri delme-patlatma yöntemiyle yapılmakta olup patlatma deliklerinin delinmesinde elektrikli jumbo kulla-

nılmaktadır. Galeri aynası patlatmalarında toplam 53 adet, 45 mm çapında ve 4 m uzunluğunda patlatma delikleri delinmektedir. 8 adet taban deliğinin tamamında dinamit, diğer deliklerde yemleme amacıyla birer adet dinamit ve ANFO kullanılmaktadır. Çekme deliklerinin tamamı ile tarama ve üretim deliklerinin 2/3'ü ANFO ile doldurulmaktadır.

Cevher üretimi 12 m'de bir oluşturulan arakatlardan yapılmaktadır. Her bir katın sonlandırılmış olan galerilerinde, galerinin son noktasından başlanarak, tavan delici makinalarla geriye doğru belirli aralıklarla yelpaze düzeninde delikler delinmekte ve doldurulup patlatıldıktan sonra yükle-taşı-boşalt (YTB) araçları ile taşınarak üretim kuyusuna dökülmektedir. Delik düzenindeki ortadaki en uzun dik delik, iki üst katın tabanına kadar uzanmaktadır. Deliklerin öngörülen toplam uzunluğu 159 m'den az olmaktadır. Böylece tavan üretimi, cevher içerisinde, galeri tabanı ile 90° - 63° arasında değişen açılarda delinen yelpaze şeklindeki deliklerin şarj edilip patlatılması sonucunda yapılmaktadır (Şekil 4). 76 mm çapındaki deliklerin boyu 9 ile 19 m arasında değişmektedir. Cevher, yelpaze delik setleri arasında 2,5 m bırakılarak, dilimler halinde patlatılmaktadır. Patlayıcı olarak ANFO, emülsiyon dinamik ve elektriksiz kapsüller kullanılmaktadır. Ocakta şiddetli sarsıntı oluşturup olumsuzluklara meydan vermemek için bir patlatmada en fazla iki sıra tavan deliği patlatılmaktadır. Tavan göçertmesi ile üretilen cevher yığınındaki 80 cm'den büyük parçalar hidrolik kırıcıyla kırılarak veya patar patlatması yapılarak, 80 cm altına düşürülmektedir. Gerek A-Kafa gerekse Ekinbaşı yeraltı ocaklarında seyrelme ortalama %10-15 arasında değişmektedir. Cevher çekme noktalarında azami dikkat gösterilerek yankayaç geldiğinde üretim sonlandırılmaktadır. Her 200 tonda bir numune alınıp tenör belirlenmekte ve sınır tenör de dikkate alınarak tenörün %25'in altına düşmemesi sağlanmaktadır. Böylece cevher kaybının da en aza çekilmesi mümkün olabilmektedir.



Şekil 3. A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı ocakları üretim planı



Şekil 4. Cevher üretimi yapılan tavan patlatma delik düzeni

### 1.2.2. A-kafa yeraltı ocağında üretim

A-Kafa yeraltı İşletmesi'nde 1236 katından başlatılan cevher üretim faaliyetleri 12'şer metre kat aralıkları ile aşağı doğru ilerletilmektedir. Yöntem gereği cevherde öncelikle hazırlık galerileri açılmakta ve tavan, cevherin sonlandığı bölgeden başlanarak geri gelmek sureti ile yelpaze düzeninde delinmekte, açılan deliklere patlayıcı şarjı yapılmakta ve patlatma işlemi gerçekleştirilmektedir. Patlatılmak sureti ile galeri boşluğuna indirilen tavan cevheri YTB araçları ile yeraltı kamyonlarına yüklenmekte, yeraltı üretim kuyusuna taşınmakta ve buradan, yerçekimi marifetiyle 1104 kotunda bulunan 500 t/h kapasiteli yeraltı kırıcısına indirilmektedir.

### 1.2.3. Ekinbaşı yeraltı ocağında üretim

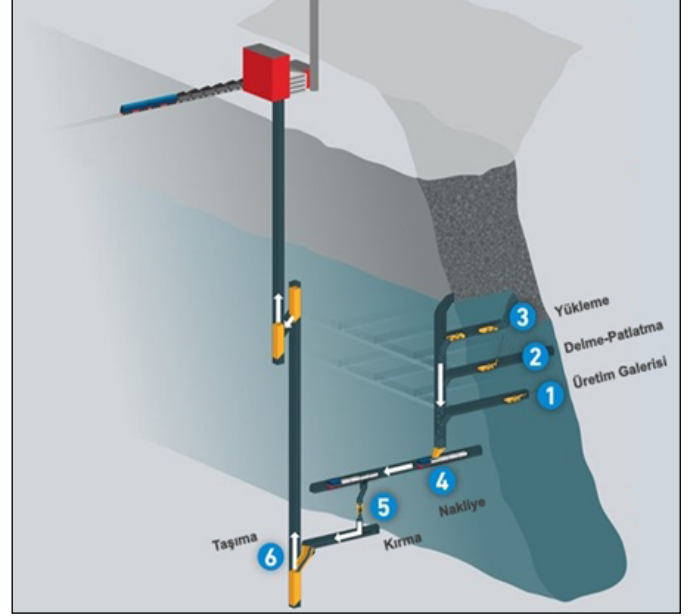
2011 yılında üretim faaliyetleri başlatılan Ekinbaşı yeraltı işletmesinde, 1260 ile 1170 katları arasında kat aralığı 18 m, 1170 katından sonraki alt kademelerde ise 12 m olarak uygulanmıştır. Galeri aralıkları ise 10 m ve kesitleri 5' x 4,5 m'dir. A-Kafa yeraltı ocağında olduğu gibi üretim ayna ve tavanda delme-patlatma ile yapılmaktadır. Üretilen cevher, toplam uzunluğu 121 m olan cevher kuyusuna taşınmakta ve buradan, 1108 kotunda bulunan 700 t/h kapasiteli yeraltı kırıcısına indirilmektedir. Yeraltı kırıcısında birincil kırmaya tabi tutularak boyutu -170 mm'ye indirilen cevher, ana nakliye galerisindeki banda aktarılmakta ve A-Kafa yeraltı ocağı cevherinin taşındığı hat üzerinden işleme tesisine ulaştırılmaktadır.

## 2. Dünyada arakatlı göçertme yöntemi uygulayan bazı yeraltı demir ocakları

Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag (LKAB) firması, İsveç'te arakatlı göçertme yöntemi uygulanan Kiruna (27,3 milyon ton) ve Malmberget (17,4 milyon ton) yeraltı ocakları ile Svappavaara (4,7 milyon ton) açık ocağından yılda yaklaşık 50 milyon ton demir cevheri üretmektedir (Stöckel vd., 2012; LKAB, 2019). Ekonomik ve yüksek derecede mekanizasyon ve otomasyona izin veren arakatlı göçertme yöntemi, tavantaşı bölümünün göçertilmesi ilkesine dayanmaktadır. Kiruna ve Malmberget yeraltı demir madenleri bir yüzyıldan daha uzun süredir endüstriyel ölçekte işletilmektedir. A-Kafa yeraltı demir madeninde olduğu gibi, başlangıçta açık işletme olarak çalıştırılan Kiruna madeni, 1950'li yıllardan itibaren arakatlı göçertme yönteminin uygulandığı yeraltı işletmesine dönüştürülmüştür. Kirunavaara demir gövdesi yaklaşık 400 m uzunluğunda ve yeryüzünden 2000 m'den daha derinlere erişmektedir. Görece sağlam manyetitden oluşan cevher gövdesi, tavanda dayanıklı kuvars porfiri, tabanda ise siyenit porfiri ile çevrilidir. Ancak cevher, tavantaşı ve tabantaşında zayıflık zonları bulunmaktadır. Malmberget yeraltı ocağında halen 10 adedi işletilen dağınık durumda yaklaşık 20 cevher gövdesi bulunmaktadır. Ocağın doğu bölümünde manyetit üretilirken batı bölümündeki hematitin küçük bir kısmı da çıkartılmaktadır.

Yeraltı madenlerinde önce cevhere erişim amacıyla yankayaç içinde galeriler açılmakta, daha sonra cevher gövdesi içinde delme-patlatma yöntemi ile hazırlık galerileri açılarak bunlar, gerekli görüldüğünde kaya saplaması, çelik hasır ve püskürtme beton ile tahkim edilmektedir. Hazırlık galerileri tamamlandığında yukarıya doğru, yelpaze düzeninde boyları 55 m'ye varabilen delikler delinmektedir. Her galeri içinde beheri 8 delikten oluşan 15-40 yelpaze dilimi bulunabilmektedir. Delme işlemi, kontrol odasında bulunan operatörler tarafından uzaktan gerçekleştirilmektedir. Tüm galeri boyunca delme işlemi tamamlandığında, robot araçlar tarafından özel bulamaç türünde patlayıcılar doldurulmakta ve gece vardiyasında patlatılmaktadır. Patlatma sonrası oluşan gazların tahliyesini takiben cevher, kepçesi 17-30 ton yük alabilen yeraltı yükleyicileri ile düşey nakil kuyularına taşınmakta ve ana

katın hemen üzerinde yer alan silolara istiflenmektedir. Silolardaki cevher büyük kırıcılara iletilmektedir. Kiruna ocağında bu işlem yüzeyden 1365 m derinde bulunan ana kattaki sürücüsüz trenler ile yapılırken, üretimin aynı anda çok sayıda cevher gövdesinde sürdüğü Malmberget ocağında büyük kamyonlar kullanılmaktadır. Tren ve kamyonlar cevheri, daha sonra kırıcılara aktarılmak üzere büyük silolara dökmektedir. Kırıcılarda ortalama boyutu 10 cm'ye indirilen cevher, daha sonra skip ihraç sistemine iletilmek üzere uzun bantlı konveyörlere aktarılmaktadır. Her biri 40 ton cevher taşıyabilen skipler, 17 m/s hız ile otomatik olarak yüklenen cevheri yüzeye çıkartmaktadır. Kiruna madeninde ihraç ve tekrar yükleme farklı dağıtım katlarında olurken Malmberget ocağında cevher uzun bir konveyör hattı üzerinden ihraç sistemine taşınmaktadır. LKAB firmasının işletme planı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Kiruna ve Malmberget yeraltı demir ocakları işletme planı (<https://www.lkab.com/en/about-lkab/from-mine-to-port/mining/our-underground-mines/>, 2019)

## 3. Üretim yönteminin ve cevher kaybının değerlendirilmesi

### 3.1. Genel

Bu çalışma kapsamında, A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında üretim yönteminin ve cevher kaybının değerlendirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Her iki ocağın anayol ve üretim hazırlık galerilerinde yerinde ölçüm, inceleme ve gözlemler sonucunda veriler elde edilmiştir (Ceylanoğlu vd., 2019). Gerek arazi çalışma sonuçları gerekse konu ile ilgili literatür çalışmaları dikkate alınarak uygulanan üretim yöntemi ve cevher kaybı değerlendirilmiştir.

### 3.2. Uygulanan üretim yönteminin değerlendirilmesi

Yeraltı üretim yöntemi seçiminde dikkate alınan parametrelerin değerleri (Çizelge 2) ve yerinde gözlem ve inceleme sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, gerek A-Kafa yeraltı ocağı, gerekse Ekinbaşı yeraltı ocağı için arakatlı göçertme yöntemi seçiminin son derece isabetli ve doğru olduğu açık bir şekilde görülmüştür. Tavantaşı, tabantaşı ve cevherin sağlamlığı (Çizelge 2), gerek yerinde yapılan gözlem ve incelemeler gerekse sözkonusu kaya birimlerinin sağlamlıklarının belirlendiği çalışma sonuçları (Ceylanoğlu vd., 1998) dikkate alınarak belirlenmiştir. Sözkonusu çalışmada,



kaya kütle karakteristiği; RMR ve Q sınıflama sistemlerine göre kaya birimlerinin değerlendirilmesi sonucunda belirlenmiştir. Ayrıca söz konusu yöntemin her iki ocakta da Dünyadaki örneklerine benzer biçimde başarılı bir şekilde uygulandığı rahatlıkla söylenebilir. Diğer yandan, literatürde yeraltı metal madenleri için üretim yöntemi seçiminde öne çıkan yöntemler dikkate alındığında arakatlı göçertme yöntemi, blok göçertme yöntemi ve oda topuk yönteminden sonra en düşük işletme maliyeti olan yöntemdir (Çizelge 3). Söz konusu ocaklar için cevher sağlamlığı, modeli ve cevher kaybı dikkate alındığında gerek blok göçertme yöntemi

gerekse oda topuk yöntemi uygun değildir. Ayrıca üretim yöntemi değişikliğinin de ek topuk bırakılmasını gerektireceğinden cevher kaybına neden olacağı, üretim maliyetini büyük bir olasılıkla artıracacağı ve bu durumda da sınır tenörün yükselmesi nedeniyle cevher kaybının artacağı dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, üretim yöntemi değişikliği, cevher kaybının düşürülmesinde kazanılan tecrübelerden (A-Kafa İşletmesinde yaklaşık 15 yıl ve Ekinbaşı İşletmesinde ise 8 yıl) yararlanılmaması ve yeni yöntem uygulanmasındaki deneyimsizlik, cevher kaybını artırabilecektir.

**Çizelge 2.** Uygulanmakta olan üretim yönteminin değerlendirilmesinde dikkate alınan parametreler

Yöntem Seçiminde Dikkate Alınan Parametreler	A-Kafa Yeraltı Demir Ocağı	Ekinbaşı Yeraltı Demir Ocağı
Cevher kalınlığı (m)	70 – 100	40 – 70
Cevher uzunluğu (m)	950	410
Cevher başlangıç derinliği (m) (yüzeyden itibaren)	0	140
Cevher bitiş derinliği (m) (yüzeyden itibaren)	200	300
Cevher eğimi (derece)	40 – 50	50 – 55
Tenör (% Fe)	52 – 56	52 – 56
Yataklanma tipi	Skarn	Skarn
Cevher-yan kayaç kontak durumu (düz, az dalgalı, orta dalgalı, çok dalgalı)	Orta dalgalı	Orta dalgalı
Cevher sağlamlığı*	Orta - Sağlam	Orta - Sağlam
Tavantaşı sağlamlığı*	Zayıf - Orta	Zayıf - Orta
Tabantaşı sağlamlığı*	Zayıf - Orta	Zayıf - Orta
Yeraltı suyu durumu (L/dak)	10	10
Toplam görünür rezerv (ton)	10 800 000	5 080 000
Üretim miktarı (ton/yıl)	800 000	600 000
Ocağın yaklaşık kalan ömrü (yıl)	< 10	< 10
Yeryüzü koşulları (Tasmana uygunluğu) ** (Uygun à kamulaştırılmış, üzerinde herhangi bir yapı bulunmayan boş arazi) (Uygun değil à üzerinde herhangi bir yapı, enerji nakil hattı, ırmak vb. bulunan arazi)	Uygun	Uygun

\* Ceylanoğlu vd., (1998)

\*\* Erdem vd., (2019)

**Çizelge 3.** Yeraltı üretim yöntemlerinin yaklaşık üretim maliyetleri (Stebbins ve Schumacher, 2001)

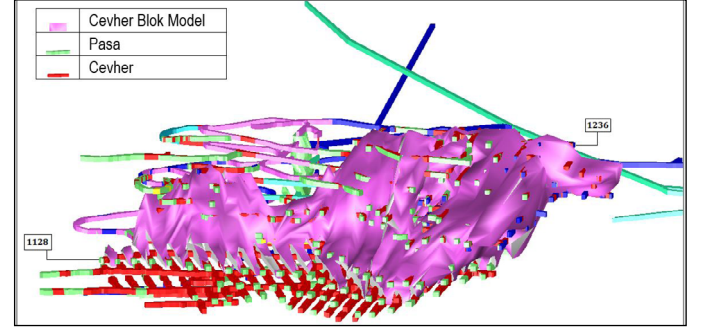
Yöntemler	Cevher Kazanımı (%)	Toplam İşletme Maliyeti (\$/ton)	Toplam Yatırım Maliyeti (\$/ton)	Toplam (İşletme + Yatırım) Maliyeti (\$/ton)
Ambarlı Ayak ( <i>Shrinkage Stopping</i> )	75-85	32,77	16,214	48,984
Oda-Topuk ( <i>Room and Pillar</i> )	50-70	10,66	6,856	17,516
Arakatlı Göçertme ( <i>Sublevel Caving</i> )	80-90	11,30	9,123	20,423
Blok Göçertme ( <i>Block Caving</i> )	90-100	5,18	3,451	8,631
Geri Dönümlü Düşey (Krater) Tavan Ayak ( <i>Vertical Crater Retreat</i> )	-	23,54	20,502	44,042
Sondan Alt Dilimli Ayak ( <i>End Slice</i> )	-	15,52	13,720	29,240
Kes Doldur ( <i>Cut and Fill</i> )	90-100	37,74	15,377	53,117

### 3.3. Cevher kaybının değerlendirilmesi

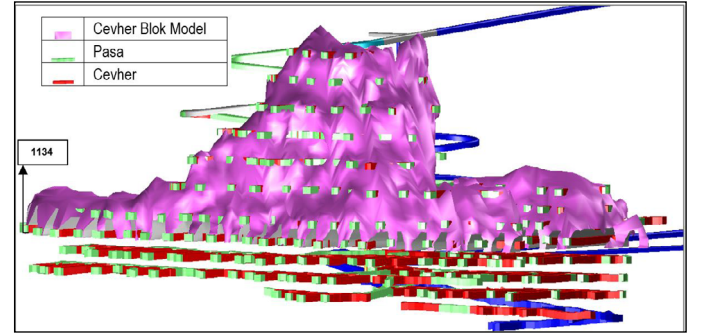
Yüksek üretim miktarlarının sağlanabildiği arakatlı göçertme yöntemi, düşük tenörlü cevherlerde de uygulanabilmektedir. Literatürde cevher kayıp miktarı %15-25, seyrelme miktarı ise %15-40 civarında verilmektedir ve bunlar yöntemin belirgin dezavantajlarıdır. Yöntem tam mekanizasyona uygundur ve yüksek hazırlık maliyeti içermektedir. Yapılan hazırlıklardan sonra üretim yöntemi değişikliği ya da cevher alınan yere dolgu yapılması, üretim maliyetini doğrudan artıracığından sınır tenör değerinin yükselmesine ve mevcut rezervin düşük tenörlü kısımlarının bırakılmasını gerektireceğinden cevher kaybı ile sonuçlanır. Arakatlı göçertme yönteminde seçimli cevher üretiminin zor olması önemli dezavantajlardan biridir ancak cevher kaybı açısından bakıldığında bu durum avantaja dönüşmektedir. Diğer bir deyişle, sınır tenörden düşük olan düşük tenörlü cevherlerin de üretilmesi, cevher kaybının düşük olmasını sağlamaktadır.

Literatür incelendiğinde, üretim yöntemlerinin çoğunda ve dünyada arakatlı göçertme yöntemi uygulamakta olan büyük ölçekli ocaklarda belirli oranda (%10-20) cevherin kazanılmayıp yerinde kaldığı görülmektedir (Çizelge 4 ve Çizelge 5). A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında dünyadaki örneklerine benzer biçimde uygulanan arakatlı göçertme yönteminde cevher gövdesi içinde açılan galerilerin dilimlere ayrılarak, tavanında yelpaze düzende delinen deliklerin patlatılması ve dilimdeki cevherin galeri içine yerçikimi etkisiyle akarak dolması ile kazanılan cevher, üretim kuyusuna taşınmaktadır. A-Kafa yeraltı işletmesinde, açık ocak üretim faaliyeti tamamlanan bölgede kalan rezervin üretimi için 2005 yılında üretime başlanmıştır. Uygulanan arakatlı göçertme yönteminde kat aralığı 12 m, galeri aralıkları 10 m ve galeri kesitleri 5' 4,5 m olarak seçilmiştir. Üretim ayna ve tavanada delme-patlatma ile yapılmaktadır. Cevher kaybını belirlemek için faaliyetin başladığı cevher tavan kotu olan 1236 katı ile ayna ve tavan üretimi tamamlanmış en alt kat olan 1128 katı arasında yapılan faaliyetler incelenmiştir. Bu katlar arasında kalan cevhere ait katı model 3B maden yazılımı (Datamine Studio UG, 2019) ile oluşturulmuş (Şekil 6) ve rezerv ile fiili üretim karşılaştırılmıştır. Fiili üretim değerleri kantar tartımı ile tespit edilmiş, katların ilerlemelerindeki değerlendirmeler sonucunda da rezerv hesaplanmıştır. Üretim faaliyeti tamamen bitmiş olan 1128 katı üzerindeki rezerv miktarı 8 351 679 ton olarak belirlenmiştir. Çizelge 5'te görüldüğü gibi cevher kaybı %5,97'dir ve bu değer kabul edilebilir sınırın oldukça altındadır.

2011 yılında üretim faaliyetleri başlatılan Ekinbaşı yeraltı işletmesinde üretim, A-Kafa yeraltı ocağında olduğu gibi ayna ve tavanada delme-patlatma ile yapılmaktadır. Cevher kaybını belirlemek için sondajlara ve kat ilerlemelerine göre tasarlanıp her ölçümde güncellenen katı model kullanılarak hacim ve tonaj hesaplaması yapılmış ve fiili üretim değerleri bant kantarından alınmıştır. Katı model hacim ve tonaj hesaplamaları için 3B madencilik yazılımları kullanılmıştır (Şekil 7). Üretim faaliyeti tamamen bitmiş olan 1134 katı üzeri için rezerv miktarı 5 252 528 ton olarak hesaplanmıştır. Çizelge 6'da görüldüğü gibi cevher kaybı % 8,20'dir ve bu değer kabul edilebilir sınırın altındadır.



Şekil 6. A-Kafa yeraltı ocağı cevher modeli



Şekil 7. Ekinbaşı yeraltı ocağında üretimi tamamlanmış katlardaki cevher modeli

Çizelge 4. Yeraltı üretim yöntemlerinin cevher kazanım oranları (Gertsch ve Bullock, 1998)

Tahkimatsız Yöntemler	Cevher Kazanımı (%)
Oda Yöntemi (Open Stopes)	60-80 (75*)
Oda-Topuk Yöntemi (Room and Pillar Mining)	50-70 (60*)
Arakatlı Kazı Yöntemi (Sublevel Stopping)	50-75 (60*)
Ambarlı Kazı Yöntemi (Shrinkage Stopping)	75-85 (80*)
Tahkimatlı Yöntemler	
Kes-Doldur Yöntemi (Cut and Fill)	90-100 (95*)
Küp Tahkimatlı Yöntem (Square-Set Mining)	90-100
Uzunayak Yöntemi (Longwall Mining)	90-100
Kısaayak Yöntemi (Shortwall Mining)	90-100
Üsten Dilimli Ayak (Top Slicing Method)	90-100
Göçertmeli Yöntemler	
Arakatlı Göçertme Yöntemi (Sublevel Caving)	80-90
Blok ve Panel Göçertme Yöntemi (Block and Panel Caving)	90-100

\*Ortalama

**Çizelge 5.** Arakatlı göçertme yöntemi uygulayan bazı yeraltı ocaklarının cevher kayıpları

Ocak Adı ve Yeri	Üretim Yönü (Enine veya Boyuna)	Rezerv (Milyon ton)	Yıllık üretim kapasitesi (Milyon ton)	Tenör (%)	Cevher Kaybı (%)	Cevher Kalınlığı (m) ve Eğimi (°)	Cevher Uzanımı ve Derinliği (m)
*Kiruna yeraltı demir ocağı, İsveç*	Enine	500	13,60	Manyetit ve Hematit, 54-67	10-20	80 50-70°	4 500 m 2 000 m
*Malmberget yeraltı demir ocağı, İsveç	Enine	150	7,60	Hematit ve Manyetit, 58	-	10-18 50°	-
**Stobie yeraltı nikel-bakır ocağı, Kanada**	Enine	130	-	Nikel 0,78 Bakır 0,73	-	274 70-75°	2.920 m 1 250 m
***Craigmont yeraltı bakır ocağı, Vancouver-Kanada	Enine	22,30	0,90	Bakır 1,11-2,11	10-20	18-79 50-90°	91-304 m -
****Big Bell yeraltı altın ocağı, Perth-Avusturalya	Boyuna	-	1,70	Altın 3,21	13,70	- 50-80°	1 000 m 510-1 430 m
A-Kafa yeraltı demir ocağı, Divriği-Sivas	Enine	6	0,8	Manyetit 52-56	5,97	70-100 40-50°	450 m 0-200 m
Ekinbaşı yeraltı demir ocağı, Divriği-Sivas	Enine	6	0,6	Manyetit 52-56	8,20	40-70 50-55°	270 m 140-300 m

\*Quinteiro vd., (2001); \*\*Buksa, (2001); \*\*\*Baase vd., (1998); \*\*\*\*Player, (2001)

**Çizelge 6.** Cevher kayıpları

Yeraltı ocağı	Katı model hacmi (m <sup>3</sup> )	Katı model tonajı (ton)	Fiili üretim tonajı (ton)	Fark (ton)	Cevher kaybı (%)
A-Kafa	2 087 919	8 351 679	7 853 044	498 635	5,97
Ekinbaşı	1 313 132	5 252 528	4 831 215	421 313	8,20

## Sonuç

Bu çalışmada Sivas ili, Divriği ilçesi sınırları içinde bulunan A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında uygulanmakta olan üretim yönteminin uygunluk durumu ve cevher kaybı değerlendirilmiştir. A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı demir ocaklarında arakatlı göçertme yöntemi uygulanmaktadır. Arakatlı göçertme yöntemi genellikle düşey uzanımı fazla olan büyük ve dik dalımlı (>60°) cevher gövdelerine uygulanmakla birlikte, oldukça kalın (yatay uzanımlı) ya da masif depozitlerde de kullanılmaktadır.

Yeraltı üretim yöntemi seçiminde dikkate alınan parametrelerin A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı ocaklarına ait değerleri ve konu ile ilgili literatür dikkate alınarak değerlendirilmiş, gerek A-Kafa yeraltı ocağı, gerekse Ekinbaşı yeraltı ocağı için arakatlı göçertme yöntemi seçiminin isabetli ve doğru olduğu görülmüştür. Ayrıca söz konusu yöntemin her iki ocakta da Dünyadaki örneklerine benzer biçimde başarılı bir şekilde uygulandığı rahatlıkla söylenebilir.

Diğer yandan, literatürde yeraltı metal madenleri için üretim yöntemi seçiminde öne çıkan yöntemler dikkate alındığında arakatlı göçertme yöntemi, blok göçertme yöntemi ve oda topuk yönteminden sonra en düşük işletme maliyeti olan yöntemdir. Söz konusu ocaklar için cevher sağlamlığı, modeli ve cevher kaybı dikkate alındığında gerek blok göçertme yöntemi gerekse oda topuk yöntemi uygun bulunmamıştır. Ayrıca üretim yöntemi değişikliğinin ek topuk bırakılmasını gerektireceğinden cevher kaybına neden olacağı, üretim maliyetini büyük bir olasılıkla artıracığı ve bu durumda da sınır tenörün yükselmesi nedeniyle cevher kaybının artacağı dikkate alınmalıdır. Aynı zamanda üretim yöntemi değişikliği, cevher kaybının düşürülmesinde kazanılan tecrübelerden

(A-Kafa İşletmesinde yaklaşık 15 yıl ve Ekinbaşı İşletmesinde ise 8 yıl) yararlanılmaması ve yeni yöntem uygulanmasındaki deneyimsizlik cevher kaybını artırabilecektir. Arakatlı göçertme yönteminde seçimli cevher üretiminin zor olması önemli dezavantajlardan biridir ancak cevher kaybı açısından bakıldığında bu durum avantaja dönüşmektedir. Diğer bir deyişle, sınır tenörden düşük olan düşük tenörlü cevherlerin de üretilmesi cevher kaybının düşük olmasını sağlamaktadır. A-Kafa ve Ekinbaşı yeraltı ocaklarında sırasıyla cevher kaybı %5,97 ve %8,20 olarak belirlenmiş ve bu değerlerin kabul edilebilir sınırın altında kaldığı görülmüştür.

## Kaynaklar

- Aktimur, T., Atalay, Z., Ateş, Ş., Tekirli, M.E., Yurdakul, M.E. 1988. Munzur Dağları ile Çavuşdağı Arasının Jeolojisi. MTA Derleme Rap. No.8320, Ankara, 102 s.
- Baase, R.A., Diment, W.D., Petrina, A.J. 1998. Sublevel caving at Craigmont mines ltd, Kanada. Techniques in Underground Mining, Selection from Underground Mining Methods Handbook. Editors: Richard E. Gertsch ve Richard L. Bullock, 655-686 s.
- Buksa, H. 2001. Sublevel Cave Mining Update at INCO's Stobie Mine, Canada. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Editors: William A. Hustrulid, Richard L. Bullock, 369-370 s.
- Ceylanoğlu, A., Özkan, İ., Erdem, B., Sül, Ö.L. 1998. Divriği YNK-3 Nolu İstihsal Kuyusunda Karşılaşılabilecek Kayaçların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi ve Mühendislik Sınıflaması Çalışmaları, Proje Çalışması, Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Sivas, 250 s.

- Ceylanoğlu, A., Erdem, B., Şengün, B., Doğan, T. 2019. Divriği A-kafa ve Ekinbaşı Yeraltı Demir Ocaklarında Uygulanan Üretim Yönteminin ve Rezerv Kaybının Değerlendirilmesi Raporu, Proje Çalışması, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Sivas, 32 s.
- Cummins, A.B., Given, I. A. 1973. Mining Engineering Handbook, SME, USA.
- Datamine Studio UG, 2019. <https://www.dataminesoftware.com/solutions/studio-ug-underground-design/> [Erişim tarihi: Mayıs 2019].
- Demirci A., Ceylanoğlu, A., Kahrıman, A., Elevli, B., Sül, Ö. L., Arpaz, E., Durutürk, Y.S., Görgülü, K., Uysal, Ö., Yüksek, S. 1994. Kayseri Pınarbaşı - Pulpınar Krom Yeraltı Maden İşletmesinde (4 No'lu Kuyu) Optimum Üretim Yönteminin Belirlenmesi ve Projelendirilmesi Çalışmaları, C.Ü. Maden Müh. Böl., Nihai Rapor, Sivas, 122 s.
- Erdem, B., Ceylanoğlu, A., Doğan, T., Şengün, B. 2019. Divriği Ekinbaşı Yeraltı Demir Ocağında Üretim Yöntemine Bağlı Olarak Oluşan Tasmanın Yeraltı İşletmesine Etkisinin, Yerüstündeki Etki Alanının ve Çevresel Olarak Oluşturduğu Etkinin Değerlendirilmesi, Proje Çalışması, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Sivas, 34 s.
- Ermaden, 2008. Ekinbaşı Demir Madeni Sahasına Ait Fizibilite Raporu, Erdemir Madencilik Sanayi ve Ticaret Aő, Divriği, Sivas, 122 s.
- Gertsch, R.E., Bullock, R.L. 1998. Techniques in Underground Mining: Selections from Underground Mining Methods Handbook. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, ISBN 0-87335-163-0. 836 s.
- Hustrulid, W.A. 1982. Underground Mining Methods Handbook, Society of Mining Engineers, USA.
- Hustrulid, W.A., Bullock, R.L. 2001. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies, Society of Mining Engineers, USA.
- LKAB, 2019. <https://www.lkab.com/en/about-lkab/from-mine-to-port/mining/our-underground-mines> [Erişim tarihi: Haziran 2019].
- Player, J. 2001. Longitudinal Sublevel Caving, Big Bell Mine, Australia. Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies. Editors: William A. Hustrulid, Richard L. Bullock, 371-380 s.
- Quinteiro, C., Quinteiro, M., Hedström, O. 2001. Underground Iron Mining at LKAB, Sweden. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Editors: William A. Hustrulid, Richard L. Bullock, 361-368 s.
- Stebbins, A.S., Schumacher, L. 2001. Cost Estimating for Underground Mines. Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies. Editors: Hustrulid, W.A., & Bullock, R.L. 49-72 s.
- Stöckel, B.M., Sjöberg, J., Mäkitaavola, K., Savilahti, T. 2012. Mining-induced Ground Deformations in Kiruna and Malmberget, Proceedings of the 12<sup>th</sup> EUROCK Symposium, The International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, May, Stockholm, Sweden.
- Yıldızeli, N. 1998. Divriği (GD Sivas) Yöresinde Ofiyolit-Granitoyid İlişkisiyle Gelişen Fels Tipi Demir Yatakları. Ofiyolit-Granitoyid İlişkisiyle Gelişen Demir Yatakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Sivas,130-138 s.