

Bir Açık Cevher Ocağının Bilgisayar Destekli Tasarımı

Abdul Rashid Arfany¹, Bülent Erdem^{2*}, Bahadır Şengün³, Zekeriya Duran⁴, Adem Öcal⁵

¹Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

²Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

³İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

⁴Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

⁵Çan Meslek Yüksekokulu, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye

*(bulent@cumhuriyet.edu.tr)

Özet – Bir yüksek lisans tez çalışması kapsamında bir demir maden sahasına ait sondaj verileri kullanılarak açık ocak planlaması yapılmıştır. Çalışma sahasına ait 127 sondaj logundan ve öznelik verilerinden faydalanılarak veri tabanı oluşturulmuştur. Sahadaki kayaç tabakalarının üç boyutlu katı gövde ve jeolojik modelleri hazırlanmıştır. Ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak, cevher blok modeli içindeki tüm alt blokların tenör değerleri kestirilmiştir. Demir maden kaynağının en büyük bölümünün kazançlı biçimde işletilebileceği en büyük nihai ocak kabuğu ve sınırları belirlenmiştir. İşletme, cevher zenginleştirme, izabe ve başlangıç yatırımlarına dair parametre değerlerine dayalı olarak yuvalı ocak optimizasyonu yapılmıştır. En kötü durum ve sabit adımlı ilerleme senaryoları uyarınca en uygun ocak kabuğu seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Açık Ocak Modelleme, Açık Ocak Sınırlarının Optimizasyonu, Kaynak Kestirimi, Ters Mesafe İle Ağırlıklandırma

I. GİRİŞ

2019 yılı Cumhurbaşkanlığı yıllık programında “Madencilikte ülkemiz maden potansiyelinin sağlıklı tespit edilmesi, hammadde arz güvenliğinin sağlanması ve madenlerin yurt içinde işlenip katma değerinin yükseltilerek ülke ekonomisine katkısının artırılması temel amaçtır.” ifadesi yer almıştır [1]. Arden ve Pıçakçı [2] madenciliğin de diğer projelerde olduğu gibi önemli riskler taşıdığını, projeye ilgisi olanlar için kaynak ve rezervler konusunda hazırlanmış raporların hazırlama şekillerinin standart hale getirilmesinin önemli olduğunu ve bir projenin gelecek yıllar içerisindeki nakit akışını, kârlılık ve zararlılık durumunu bir iş senaryosu üzerinden anlayabilmek için projeye yatırım yapmış ya da projeye ilgisi olan herkesin, projedeki maden kaynakları ve rezervlerinin niceliği ve niteliği konusunda yakından ilgilendiğini ve mümkün olan en fazla bilgiye sahip olmak istediklerini belirtmişlerdir.

Madencilik Politikaları Özel İhtisas Komisyonu Raporu’nda yazılım ve bilgisayar uygulamalarının getirdiği kolaylıkların madencilikte arama sonuçları, projelendirme ve üretim planlamasında ön

plana çıktığı, buna karşılık klasik yöntemlerde güvenilir veri üretmenin zaman aldığı ve maliyetlerinin çok yüksek olduğuna vurgu yapılmıştır. Madencilikte aramanın planlanması, yeraltı kaynaklarının belirlenmesi, üç boyutlu modellerinin ortaya çıkarılması, rezervlerin hesaplanması, projelendirilmesi, fizibilite hazırlanması, üretim planlaması, üretim ve diğer faaliyetlerin izlenmesi, üretim sonrası rehabilitasyonun projelendirilip, planlanmasında her ocağın kendine özgü koşullarına uygun faktörlerle beraber yapılmasında sektöre özgü “yazılım ve bilgisayar uygulamaları”nın vazgeçilmez bir unsur haline geldiği belirtilmiştir. İyi bir madencilik yazılımının, verilerin daha hızlı değerlendirilmesi ve insan faktöründen kaynaklanan hataların en aza indirgenmesi ile klasik sistemlere nazaran çok daha hızlı ve güvenli bir sonuç verdiği, bu sistemlerin klasik sistemlere bir diğer üstünlüğünün sınıflandırılmış rezerv dağılımlarının elde edilmesinin mümkün olduğu ifade edilmiştir. Bu sistemlerle sahada değişik kalite parametrelerine bağlı dağılımların belirlenmesi ve buna bağlı olarak kömür, metalik ve endüstriyel hammaddeler gibi malzemelerin kalitesindeki

parametreler de göz önüne alınarak, değişen şartlara göre daha kısa sürede ve hassasiyetle saha değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Madencilik yazılımı ile rezerv belirlenmesi, maden yatağından en verimli şekilde faydalanmayı ve proje bazında maksimum kâr elde edilmesini sağlamaktadır [3].

Bir ülkenin demir-çelik üretimi ve tüketimi, ekonomik gücü ve büyümesiyle güçlü bir şekilde bağlantılıdır. Demir, yer kabuğunda %5,4 oranıyla dördüncü sırada bulunan bir elementtir. Başlıca demir mineralleri manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), limonit ($2Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$), götit ($Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$) ve siderittir ($FeCO_3$). Dünyadaki demir cevheri rezervleri 167 milyar ton olarak bilinmektedir [4]. Dünyada 50'den fazla ülkede demir çıkartılmakla birlikte rezervlerin büyük bölümünün Avustralya, Brezilya, Kanada, Hindistan, ABD, Güney Afrika, Liberya, İsveç, Peru, Çin ve Rusya'da bulunduğu bildirilmiştir [5].

Çalışma kapsamında bir demir açık işletmesinin sondaj verilerinden faydalanılarak açık işletme maden planlaması yapılmıştır. Sondajlardan elde edilen tenör, konum ve uzanım verileri bir maden planlama programında işlenmiş, uzamsal kestirim yöntemleri kullanılarak jeolojik ve cevher blok modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra mevcut satış/maliyet durumları dikkate alınarak en uygun (*optimum*) ve nihai (*ultimate*) ocak sınırları belirlenmiştir. Kısa ve uzun vadeli üretim planlama algoritmaları uygulanmış ve üretim planlaması yapılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma [6], ticari verilerin kullanılmasından dolayı ismi ve konumu belirtilemeyen bir demir madeni sahasında yapılmış ve bir maden planlama programı kullanılarak önce çalışma sahasını temsil eden bir sondaj veri tabanı oluşturulmuştur. Daha sonra cevherin uzamsal özellikleri dikkate alınarak bir arama elipsoidi hazırlanmış ve cevher sahası içinde arama sondajları tarafından kesilen manyetit, granit, amfibolit ve şist birimlerine ait katı gövde modelleri, telkafes biçiminde oluşturulmuştur. Takiben boş blok model, jeolojik blok model ve cevher blok modelleri hazırlanmıştır. Kompozitleme işleminin tamamlanmasının ardından ters mesafe ile ağırlıklandırma (IDW) algoritması kullanılarak tüm cevher bloklarına Fe_3O_4 tenörü ataması yapılmıştır.

Ocak tasarımı sonrası Lerchs-Grossmann optimizasyon algoritması temel alınarak ve ardışık senaryolar oluşturularak manyetit maden kaynağının en büyük bölümünün kazançlı biçimde işletilebileceği optimum ve nihai ocak kabukları belirlenmiştir.

Yuvalı ocak algoritması, üretim süreci 43 yıla yayılan 35 adet iç içe ocak ile sonuçlanmıştır. Ocaktaki işletme faaliyetlerinin 'en kötü' (*worst case*) ve 'eşzamanlı çoklu kat' (*constant lag*) senaryolarına göre yapılması durumunda üretimin safhalar (*stages*) ve yıllar (*periods*) bazındaki değişimine dair analizler hazırlanmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Sondajlar

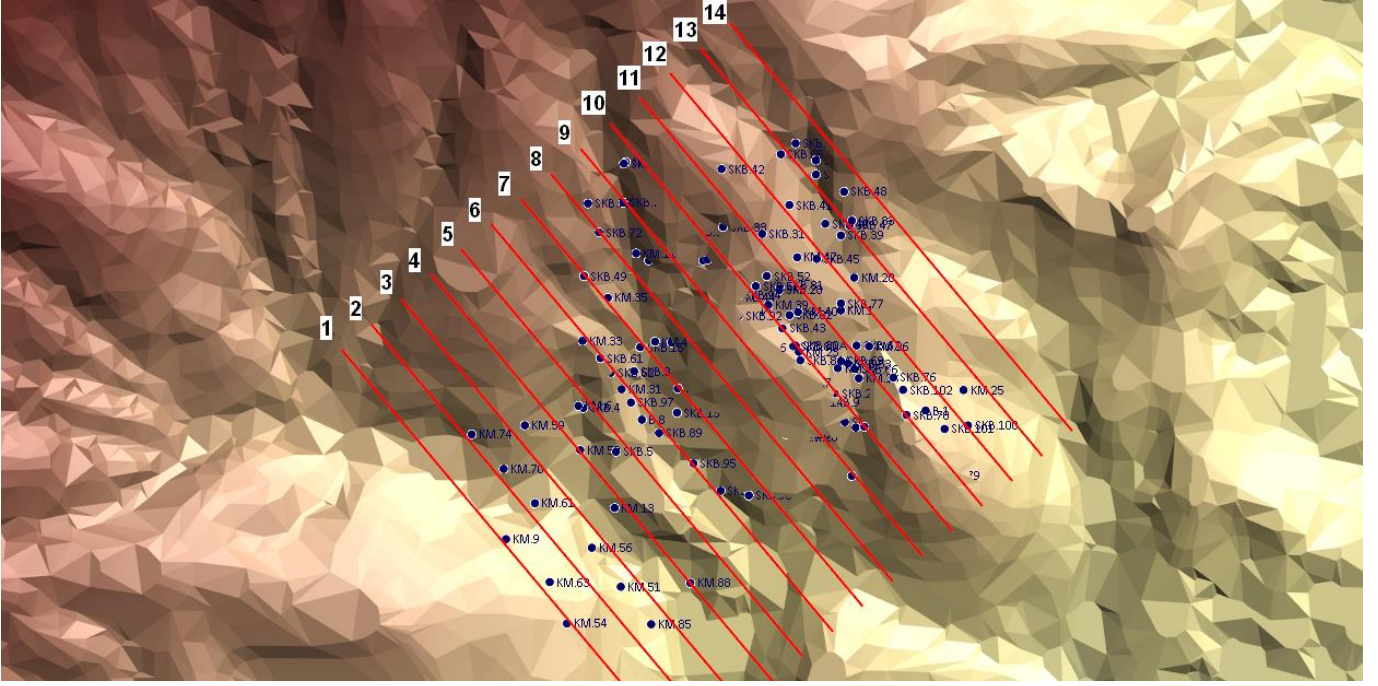
Sahada toplam uzunlukları 16.372,32 m olan 127 adet arama sondajı yapılmıştır. En sığ sondaj 12 m iken en derin sondaj 330 m'dir. Güneybatı-Kuzeydoğu doğrultusunda 590 m, Güneydoğu-Kuzeybatı doğrultusunda 570 m uzanımına sahip olan sondajlar, 1309,72 m ile 1453,14 m kotları arasında yapılmıştır. İşletilerek çıkartılması planlanan cevher, özgül ağırlığı $5,17 \text{ g/cm}^3$ olan manyetit içermektedir. Sahada, sondajlar tarafından cevher (manyetit), granit, amfibolit ve şist birimleri kesilmiştir.

B. Katı Gövde Modellemesi

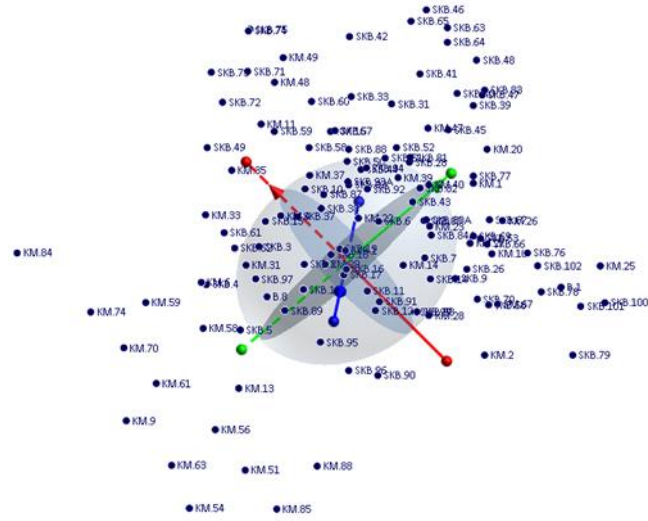
Hasözdemir [7], sahada kestirim teknikleri kullanarak bloklara tenör değerlerinin atanabilmesi için arama elipsoidinin geometrisini denetleyen parametreleri; elipsoidin doğrultusu, dalımı, eğimi, uzunluğu, genişliği, kalınlığı, elipsoidin sahip olması gereken sektör adedi ile beher sektörün yakalaması öngörülen analiz sayısı olarak belirtmiştir. Şekil 1'den cevherin GB-KD doğrultulu (*azimuth* 50°) olduğu görülmektedir. Yine, doğrultuya paralel yönde alınan kesitler incelendiğinde cevherin GB yönüne doğru -20° dalım (*plunge*) yaptığı ve eğim yönünün $K140^\circ$ (GD) olduğu bulunmuştur. Cevher, eğim yönünde -15° yatımlıdır (*dip, rotation*).

Katı gövde oluşturmak üzere dört sektörden oluşan bir arama elipsoidi tasarlanmıştır. Belirli bir sektörün katı gövde modellemesinde baskın olmasını engellemek amacıyla örnek sayısı, sektör başına en fazla 10 nokta ile sınırlandırılmıştır. Diğer yandan, cevher gövdesinin modellenmesi için de en az altı adet nokta kısıtı verilmiştir. Şekil 2'de tipik bir arama elipsoidi gösterilmiştir. Arama elipsoidinin boyutsal özellikleri Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1'de verilen arama elipsoidi kullanılarak cevher sahası içinde arama sondajları tarafından kesilen manyetit, granit, amfibolit ve şist birimlerine ait katı gövde modelleri, telkafes biçiminde oluşturulmuştur. Sahadaki cevherli zonu temsil eden manyetit birimine ait telkafes Şekil 3'de verilmiştir.



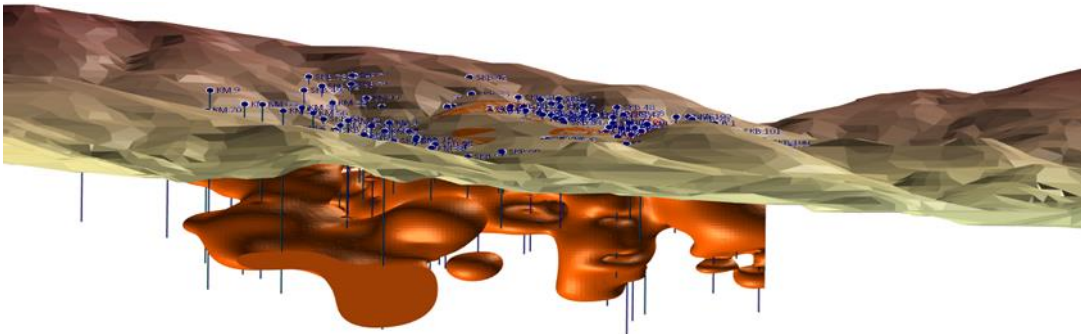
Şekil 1. Sahada yapılmış olan sondajların topografya üzerinde dağılımı ve kesit hatları



Şekil 2. Tipik arama elipsoidi (Eksen 1 → Yeşil, Eksen 2 → Kırmızı, Eksen 3 → Mavi)

Tablo 1. Arama elipsoidi özellikleri

Adı	En çok nokta/sektör	En az nokta (Σ)	Eksen 1 (m)	Eksen 2 (mm)	Eksen 3 (m)	Azimut (°)	Dalım (°)	Eğim (°)
Implicit	10	6	50	40	30	50	-20	-15



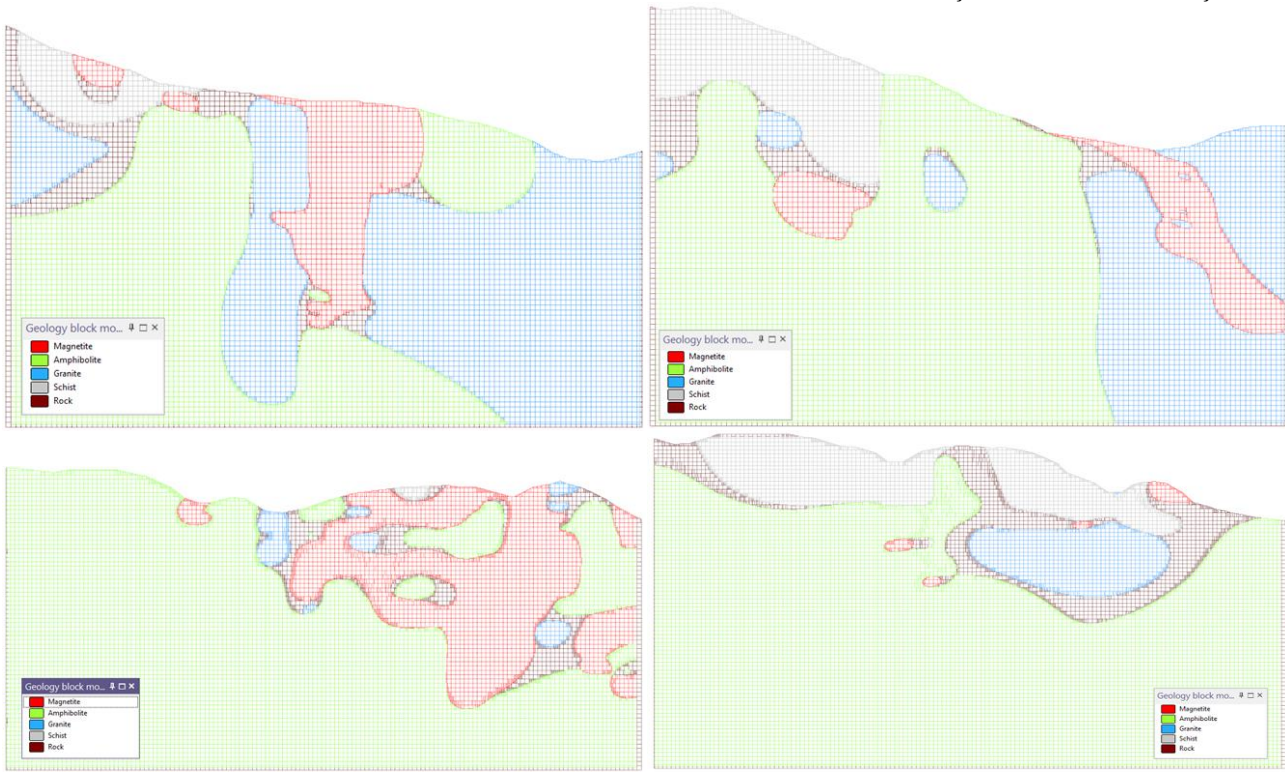
Şekil 3. Manyetit katı gövde modeli (Kesitten kuzeye bakış)

C. Boş Blok Model ve Jeolojik Blok Model

Boş blok model oluşturulurken blok sınırlarının belirlenmesinde tutucu bir yaklaşım izlenmiştir. Burada, her yöndeki en uçtaki sondajlar sınır olarak alınmış, bunlar arasında cevher kesen sondajlar bulursa bile blok sınırları ötelenmemiştir. Boş blok modeli oluşturan alt blokların boyutları X, Y ve Z yönlerinde 5 m alınmıştır. Böylece beher alt bloğun hacmi 125 m³'tür. Ayrıca, bloğun özellikle arazi yüzeyi ile kesiştiği noktalarda daha hassas modelleme yapabilmek amacıyla blok boyutlarının 5 kat küçültülebilmeye izin verilmiştir. Böylece boş blok modelin diğer bir yüzey ile temasta olduğu bölgelerde

1 m × 1 m × 1 m boyutlarında 1 m³'lük bir blok oluşabilecektir. Sonuçta, 1.329.677 adet alt bloktan oluşan bir boş blok model hazırlanmıştır.

Jeolojik blok modeli hazırlamak için öncelikle tüm jeolojik birimleri temsil eden telkafes setleri oluşturulmuş ve sonra da bu telkafeslerin konumsal verisi blok model içindeki alt bloklara atanmıştır. Ancak sahadaki sondajlar geometrik olarak düzenli bir dağılım göstermeyip, belirli bölgelerde yoğunlaştığında jeolojik blok model sınırları içindeki tüm alt bloklara sağlıklı öznitelik değerleri atanamamaktadır. Sonuçta, jeolojik blok modelin herhangi bir formasyon tarafından kapsanmayan bölümleri "kaya" olarak bırakılmış ve K-G ile D-B doğrultularında alınan kesitler Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. Jeolojik blok modelinden alınan kesitler (üstte solda→4.279.700 enleminde, üstte sağda→4.279.450 enleminde, altta solda→612.200 boylamında, altta sağda→612.550 boylamında)

D. Kaynak Kestirimi

Kompozitleme işlemi için tüm analizleri temsil edecek ortak bir kompozit aralığının belirlenmesi önemlidir. Analiz aralığı verisi sağa çarpık ve normal dağılıma uygun değildir. Örnekleme aralıklarının aritmetik ortalaması 7,58 m ancak medyanı 3,0 m'dir. Toplam 360 adet kısa örnekleme aralığının (≤ 4 m), tüm 582 aralığın %62'sini oluşturduğu dikkate alındığında, kısa kompozit aralığının sondajları tatminkâr biçimde temsil edeceği öngörülmüştür. En sık örnekleme aralığı olan 3 m - 4 m grubu, toplam verinin %32'sinden fazladır. Böylece kompozit

aralığı 3 m olarak seçilmiş ve uzunluk ağırlıklı kompozitleme yapılmıştır. Sonuçta ortalaması 2,86 m, medyanı 3,0 m olan ve boyları 0,05 m ile 3,0 m arasında değişen 1541 adet kompozitlenmiş tenör aralığı elde edilmiştir.

Kaynak kestirimi için mesafenin tersi ile ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Algoritma, mesafenin tersinin karesine dayalı olarak çalıştırılmış ve kompozitlenmiş manyetit tenör verisi, programda gömülü anizotropik IDW algoritması kullanılarak, daha önce hazırlanmış olan cevher blok modelindeki tüm alt bloklara mesafe ağırlıklı olarak atanmıştır.

Modellemede, cevher kaynağındaki beher alt bloğun “ölçülmüş” olarak kestirilmesi için en az 2 ayrı sondajdan değer alması ve arama elipsoidinin tüm sektörlerinin toplamı olarak en az 4 analiz değerini yakalaması koşulu vardır.

Bir alt bloğun tenörünün “Belirlenmiş” kaynak kategorisinde yer alması için en az 1 adet sondajdan veri alınabilmesi yeterlidir ve toplam analiz adedi kısıtlanmamıştır. Arama elipsoidi boyutları tüm eksenlerde iki kata çıkartılmıştır. “Potansiyel” kaynak kategorisi esasında, arama elipsoidi boyutlarının tüm eksenlerde üç kata çıkartılması dışında “Belirlenmiş” kategori ile aynı koşullara sahiptir.

Bu çalışmada, arama elipsoidi boyutunun kaynak türleri üzerindeki etkisini gösterebilmek amacıyla elipsoit; küçük, normal ve büyük olmak üzere üç kategoride yapılandırılmıştır.

IDW algoritması ile manyetit maden kaynağı, her üç elipsoit için önce tenör aralıkları sonra da kaynak kategorileri olmak üzere iki başlık altında değerlendirilmiştir. Küçük arama elipsoidi için tenör aralıkları %0 Fe₃O₄ ile %80 Fe₃O₄ arasında değişmektedir. Yatağın toplam maden kaynağı, ortalama %44,8 Fe₃O₄ tenörü ile 53.206.305 ton ve toplam Fe₃O₄ kaynağı 23.850.049 t olarak belirmektedir. Yatak kaynak türü bazında değerlendirildiğinde, ölçülmüş kategoride ortalama %47,9 Fe₃O₄ tenörü ile 4.538.810 ton cevher ve 2.173.983 ton Fe₃O₄ kestirimi yapılmıştır. Belirtilmiş kategoride ise ortalama %44,5 Fe₃O₄ tenörü ile 44.909.329 ton cevher ve 19.993.947 ton Fe₃O₄ kestirimi yapılmıştır (Tablo 2). Maden kaynağının %83,8’lik bölümü belirtilmiş kaynak sınıfındadır.

Normal arama elipsoidi için kaynak kestirim sonuçlarının tenör aralıkları %0 Fe₃O₄ ile %80 Fe₃O₄ arasında değişmektedir. Yatağın toplam maden kaynağı, ortalama %44,8 Fe₃O₄ tenörü ile 53.206.305 ton ve toplam Fe₃O₄ kaynağı 23.822.882 ton olarak belirmektedir. Yatak kaynak türü bazında değerlendirildiğinde, ölçülmüş kategoride ortalama %44,7 Fe₃O₄ tenörü ile 26.666.178 ton cevher ve 11.916.225 ton Fe₃O₄ kestirimi yapılmıştır. Belirtilmiş kategoride ise ortalama %44,9 Fe₃O₄ tenörü ile 26.540.128 ton cevher ve 11.906.657 ton Fe₃O₄ kestirimi yapılmıştır (Tablo 3). Maden kaynağının %50,02’lik bölümü ölçülmüş kaynak sınıfındadır.

Büyük arama elipsoidi için kaynak kestirim sonuçlarının tenör aralıkları %0 Fe₃O₄ ile %80 Fe₃O₄ arasında değişmektedir. Yatağın toplam maden kaynağı, ortalama %44,8 Fe₃O₄ tenörü ile 53.206.305 ton ve toplam Fe₃O₄ kaynağı 23.836.470 ton olarak

belirmektedir. Yatak kaynak türü bazında değerlendirildiğinde, ölçülmüş kategoride ortalama %44,8 Fe₃O₄ tenörü ile 49.691.620 ton cevher ve 22.246.822 ton Fe₃O₄ kestirimi yapılmıştır. Belirtilmiş kategoride ise ortalama %45,2 Fe₃O₄ tenörü ile 3.514.685 ton cevher ve 1.589.648 ton Fe₃O₄ kestirimi yapılmıştır (Tablo 4). Maden kaynağının %93,33’lük bölümü ölçülmüş kaynak sınıfındadır.

E. Nihai Ocak Optimizasyonu

Lerchs-Grossmann optimizasyon algoritması temel alınarak ve ardışık senaryolar oluşturularak manyetit maden kaynağının en büyük bölümünün kazançlı biçimde işletilebileceği en derin ocak kabuğu ve en geniş ocak sınırları belirlenmiştir. Lerchs-Grossmann algoritması gelir-maliyet tabanlı olduğu için Türkiye’de konumlu benzer kuruluşlardan işletme ve zenginleştirme maliyetleri ile cevherin ocak başı satış fiyatlarına dair veri ve bilgi edinilmiştir. Toplam 5 senaryo üzerinde çalışılmış, her senaryoda kullanılan girdi parametre değerleri Tablo 5’de sunulmuş ve aşağıda açıklanmıştır.

İlk senaryoda Mart 2022 fiyatları dikkate alındığında satılabilir cevherin stokhole getirilerek alıcıya teslim edilmesine kadar oluşan maliyet 1,0 US\$/m³, pasa malzemesinin harmana döküm aşamasına kadarki maliyet de 1,0 US\$/m³ alınmıştır. Cevher ve pasa (MCAF) ile çevre düzenleme (RCAF) maliyetlerinin ocağın derinliği, kayaç yapısındaki farklılaşma ya da ölçülmüş/belirtilmiş cevher türü gibi faktörlerden etkilenmediği ve tüm işletme için sabit kaldığı varsayılmıştır. Böylece MCAF ve RCAF için 1 değeri atanmıştır. Manyetit ocağının tüm yönlerdeki genel şev açıları 35° alınmıştır.

Cevher zenginleştirme maliyeti ile genel ve idari giderler, satılabilir cevherin tonu başına 1,5 US\$ ve 0,5 US\$ olarak alınmıştır. Zenginleştirme işlemlerindeki kazanım oranı da %95 alınmıştır. Ayrıca, cevherin mineral yapısının değişmediği ve bundan ötürü farklı zenginleştirme süreçlerine gerek bulunmadığı kabulü ile zenginleştirme maliyeti ayar katsayısı (PCAF) 1’dir. Sonuç olarak, zenginleştirilmiş manyetit cevherinin tesis çıkışında 125 US\$/ton bedel ile satılabileceği ve satış maliyetinin beher ton başına 1,25 US\$ olacağı varsayılmıştır. Sonraki optimizasyon senaryolarında satış fiyatı değiştirilmiştir. Nihai ocak optimizasyonu senaryolarının üretim, maliyet, gelir, tenör parametrelerine ait değerler Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 2. Manyetit kaynağının IDW kestirim algoritması kullanılarak kaynak türü bazında hesaplanan değerleri (arama elipsoidi küçük)

Alt tenör (%)	Üst tenör (%)	Kaynak hacmi (m ³)	Yoğunluk (ton/m ³)	Kaynak tonajı (ton)	Fe ₃ O ₄ (%)	Fe ₃ O ₄ tonajı (ton)	Birikimli					Kaynak türü
							Kaynak hacmi (m ³)	Kaynak tonajı (ton)	Yoğunluk (ton/m ³)	Fe ₃ O ₄ (%)	Fe ₃ O ₄ tonajı (ton)	
70	80	8.537	5,17	44.136	70,9	31.303	8.537	44.136	5,17	70,9	31.303	Belirtilmiş
60	70	508.873	5,17	2.630.873	62,8	1.651.273	517.410	2.675.010	5,17	62,9	1.682.576	Belirtilmiş
50	60	2.952.562	5,17	15.264.746	54,2	8.267.380	3.469.972	17.939.755	5,17	55,5	9.949.956	Belirtilmiş
40	50	2.836.417	5,17	14.664.276	45,3	6.639.333	6.306.389	32.604.031	5,17	50,9	16.589.289	Belirtilmiş
30	40	1.085.701	5,17	5.613.074	35,4	1.984.693	7.392.090	38.217.105	5,17	48,6	18.573.981	Belirtilmiş
20	30	915.452	5,17	4.732.887	25,3	1.195.331	8.307.542	42.949.992	5,17	46,0	19.769.313	Belirtilmiş
10	20	220.752	5,17	1.141.288	17,4	198.570	8.528.294	44.091.280	5,17	45,3	19.967.883	Belirtilmiş
0	10	158.230	5,17	818.049	3,2	26.065	8.686.524	44.909.329	5,17	44,5	19.993.948	Belirtilmiş
70	80	1.193	5,17	6.168	70,9	4.374	1.193	6.168	5,17	70,9	4.374	Potansiyel
60	70	27.412	5,17	141.720	63,9	90.576	28.605	147.888	5,17	64,2	94.949	Potansiyel
50	60	245.317	5,17	1.268.289	52,9	670.408	273.922	1.416.177	5,17	54,0	765.358	Potansiyel
40	50	228.385	5,17	1.180.750	45,8	541.130	502.307	2.596.927	5,17	50,3	1.306.488	Potansiyel
30	40	150.661	5,17	778.917	35,8	279.169	652.968	3.375.845	5,17	47,0	1.585.657	Potansiyel
20	30	65.865	5,17	340.522	26,0	88.591	718.833	3.716.367	5,17	45,1	1.674.248	Potansiyel
10	20	8.085	5,17	41.799	18,8	7.871	726.918	3.758.166	5,17	44,8	1.682.119	Potansiyel
0	10	-	5,17	-	0,0	-	726.918	3.758.166	5,17	44,8	1.682.119	Potansiyel
70	80	-	5,17	-	0,0	-	-	-	5,17	0,0	-	Ölçülmüş
60	70	76.004	5,17	392.941	61,6	242.021	76.004	392.941	5,17	61,6	242.021	Ölçülmüş
50	60	353.576	5,17	1.827.988	54,9	1.002.822	429.580	2.220.929	5,17	56,1	1.244.843	Ölçülmüş
40	50	284.597	5,17	1.471.366	45,7	673.027	714.177	3.692.295	5,17	51,9	1.917.869	Ölçülmüş
30	40	92.480	5,17	478.122	35,9	171.471	806.657	4.170.417	5,17	50,1	2.089.341	Ölçülmüş
20	30	54.978	5,17	284.236	25,4	72.233	861.635	4.454.653	5,17	48,5	2.161.574	Ölçülmüş
10	20	12.248	5,17	63.322	17,6	11.156	873.883	4.517.975	5,17	48,1	2.172.730	Ölçülmüş
0	10	4.030	5,17	20.835	6,0	1.253	877.913	4.538.810	5,17	47,9	2.173.983	Ölçülmüş
70	80	9.730	5,17	50.304	70,9	35.676	9.730	50.304	5,17	70,9	35.676	Tümü
60	70	612.289	5,17	3.165.534	62,7	1.983.870	622.019	3.215.838	5,17	62,8	2.019.546	Tümü
50	60	3.551.455	5,17	18.361.022	54,1	9.940.610	4.173.474	21.576.861	5,17	55,4	11.960.156	Tümü
40	50	3.349.399	5,17	17.316.393	45,4	7.853.490	7.522.873	38.893.253	5,17	50,9	19.813.646	Tümü
30	40	1.328.842	5,17	6.870.113	35,4	2.435.334	8.851.715	45.763.367	5,17	48,6	22.248.979	Tümü
20	30	1.036.295	5,17	5.357.645	25,3	1.356.155	9.888.010	51.121.012	5,17	46,2	23.605.134	Tümü
10	20	241.085	5,17	1.246.409	17,5	217.597	10.129.095	52.367.421	5,17	45,5	23.822.731	Tümü
0	10	162.260	5,17	838.884	3,3	27.318	10.291.355	53.206.305	5,17	44,8	23.850.049	Tümü

Tablo 3. Manyetit kaynağının IDW kestirim algoritması kullanılarak kaynak türü bazında hesaplanan değerleri (arama elipsoidi normal)

Alt tenör (%)	Üst tenör (%)	Kaynak hacmi (m ³)	Yoğunluk (t/m ³)	Kaynak tonajı (ton)	Fe ₃ O ₄ (%)	Fe ₃ O ₄ tonajı (ton)	Birikimli					Kaynak türü
							Kaynak hacmi (m ³)	Kaynak tonajı (ton)	Yoğunluk (ton/m ³)	Fe ₃ O ₄ (%)	Fe ₃ O ₄ tonajı (ton)	
70	80	3.585	5,17	18.534	70,9	13.132	3.585	18.534	5,17	70,9	13.132	Belirtilmiş
60	70	205.048	5,17	1.060.098	63,0	667.981	208.633	1.078.633	5,17	63,1	681.114	Belirtilmiş
50	60	1.653.626	5,17	8.549.246	53,8	4.601.841	1.862.259	9.627.879	5,17	54,9	5.282.955	Belirtilmiş
40	50	1.924.505	5,17	9.949.691	45,6	4.537.487	3.786.764	19.577.570	5,17	50,2	9.820.441	Belirtilmiş
30	40	771.770	5,17	3.990.051	35,8	1.427.077	4.558.534	23.567.621	5,17	47,7	11.247.518	Belirtilmiş
20	30	447.010	5,17	2.311.042	26,1	602.300	5.005.544	25.878.662	5,17	45,8	11.849.818	Belirtilmiş
10	20	40.400	5,17	208.868	17,3	36.142	5.045.944	26.087.530	5,17	45,6	11.885.961	Belirtilmiş
0	10	87.543	5,17	452.597	4,6	20.696	5.133.487	26.540.128	5,17	44,9	11.906.657	Belirtilmiş
70	80	-	5,17	-	0,0	-	-	-	5,17	0,0	-	Ölçülmüş
60	70	183.944	5,17	950.990	62,0	589.466	183.944	950.990	5,17	62,0	589.466	Ölçülmüş
50	60	1.803.481	5,17	9.323.997	54,1	5.048.780	1.987.425	10.274.987	5,17	54,9	5.638.245	Ölçülmüş
40	50	1.723.186	5,17	8.908.872	45,7	4.066.959	3.710.611	19.183.859	5,17	50,6	9.705.205	Ölçülmüş
30	40	789.124	5,17	4.079.771	35,4	1.445.711	4.499.735	23.263.630	5,17	47,9	11.150.915	Ölçülmüş
20	30	507.839	5,17	2.625.528	25,7	675.300	5.007.574	25.889.158	5,17	45,7	11.826.216	Ölçülmüş
10	20	87.995	5,17	454.934	16,6	75.549	5.095.569	26.344.092	5,17	45,2	11.901.765	Ölçülmüş
0	10	62.299	5,17	322.086	4,5	14.461	5.157.868	26.666.178	5,17	44,7	11.916.225	Ölçülmüş
70	80	3.585	5,17	18.534	70,9	13.132	3.585	18.534	5,17	70,9	13.132	Tümü
60	70	388.992	5,17	2.011.089	62,5	1.257.447	392.577	2.029.623	5,17	62,6	1.270.579	Tümü
50	60	3.457.107	5,17	17.873.243	54,0	9.650.621	3.849.684	19.902.866	5,17	54,9	10.921.200	Tümü
40	50	3.647.691	5,17	18.858.562	45,6	8.604.446	7.497.375	38.761.429	5,17	50,4	19.525.646	Tümü
30	40	1.560.894	5,17	8.069.822	35,6	2.872.788	9.058.269	46.831.251	5,17	47,8	22.398.434	Tümü
20	30	954.849	5,17	4.936.569	25,9	1.277.600	10.013.118	51.767.820	5,17	45,7	23.676.034	Tümü
10	20	128.395	5,17	663.802	16,8	111.692	10.141.513	52.431.622	5,17	45,4	23.787.726	Tümü
0	10	149.842	5,17	774.683	4,5	35.157	10.291.355	53.206.305	5,17	44,8	23.822.882	Tümü

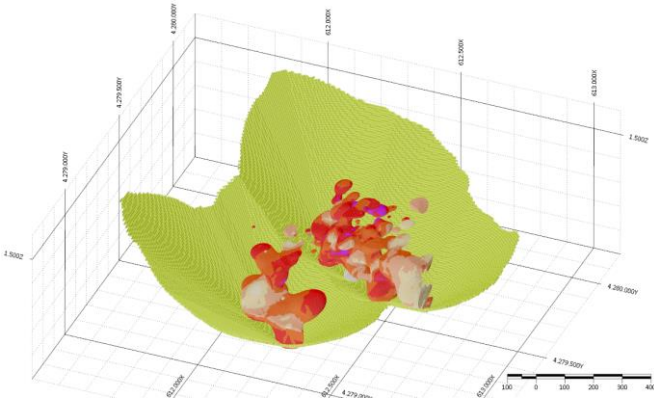
Tablo 4. Manyetit kaynağının IDW kestirim algoritması kullanılarak kaynak türü bazında hesaplanan değerleri (arama elipsoidi büyük)

Alt tenör (%)	Üst tenör (%)	Kaynak hacmi (m ³)	Yoğunluk (ton/m ³)	Kaynak tonajı (ton)	Fe ₃ O ₄ (%)	Fe ₃ O ₄ tonajı (ton)	Birikimli					Kaynak türü
							Kaynak hacmi (m ³)	Kaynak tonajı (ton)	Yoğunluk (ton/m ³)	Fe ₃ O ₄ (%)	Fe ₃ O ₄ tonajı (ton)	
70	80	0	-	-	0,0	-	-	-	-	0,0	-	Belirtilmiş
60	70	50808	5,17	262.677	62,9	165.117	50.808	262.677	5,17	62,9	165.117	Belirtilmiş
50	60	206616	5,17	1.068.205	53,2	568.371	257.424	1.330.882	5,17	55,1	733.487	Belirtilmiş
40	50	285646	5,17	1.476.790	47,7	703.712	543.070	2.807.672	5,17	51,2	1.437.200	Belirtilmiş
30	40	39569	5,17	204.572	34,9	71.312	582.639	3.012.244	5,17	50,1	1.508.511	Belirtilmiş
20	30	27902	5,17	144.253	25,3	36.537	610.541	3.156.497	5,17	48,9	1.545.048	Belirtilmiş
10	20	49419	5,17	255.496	14,5	37.131	659.960	3.411.993	5,17	46,4	1.582.179	Belirtilmiş
0	10	19863	5,17	102.692	7,3	7.469	679.823	3.514.685	5,17	45,2	1.589.648	Belirtilmiş
70	80	125	5,17	646	70,5	456	125	646	5,17	70,5	456	Ölçülmüş
60	70	226188	5,17	1.169.392	62,0	725.084	226.313	1.170.038	5,17	62,0	725.540	Ölçülmüş
50	60	3197232	5,17	16.529.689	54,0	8.932.345	3.423.545	17.699.728	5,17	54,6	9.657.885	Ölçülmüş
40	50	3560395	5,17	18.407.242	45,6	8.387.242	6.983.940	36.106.970	5,17	50,0	18.045.127	Ölçülmüş
30	40	1586612	5,17	8.202.784	35,6	2.924.055	8.570.552	44.309.754	5,17	47,3	20.969.182	Ölçülmüş
20	30	868701	5,17	4.491.184	25,9	1.164.187	9.439.253	48.800.938	5,17	45,4	22.133.369	Ölçülmüş
10	20	114209	5,17	590.461	16,5	97.190	9.553.462	49.391.399	5,17	45,0	22.230.560	Ölçülmüş
0	10	58070	5,17	300.222	5,4	16.262	9.611.532	49.691.620	5,17	44,8	22.246.822	Ölçülmüş
70	80	125	5,17	646	70,5	456	125	646	5,17	70,5	456	Tümü
60	70	276996	5,17	1.432.069	62,2	890.201	277.121	1.432.716	5,17	62,2	890.657	Tümü
50	60	3403848	5,17	17.597.894	54,0	9.500.716	3.680.969	19.030.610	5,17	54,6	10.391.373	Tümü
40	50	3846041	5,17	19.884.032	45,7	9.090.954	7.527.010	38.914.642	5,17	50,1	19.482.327	Tümü
30	40	1626181	5,17	8.407.356	35,6	2.995.367	9.153.191	47.321.997	5,17	47,5	22.477.693	Tümü
20	30	896603	5,17	4.635.438	25,9	1.200.724	10.049.794	51.957.435	5,17	45,6	23.678.417	Tümü
10	20	163628	5,17	845.957	15,9	134.321	10.213.422	52.803.392	5,17	45,1	23.812.738	Tümü
0	10	77933	5,17	402.914	5,9	23.731	10.291.355	53.206.305	5,17	44,8	23.836.470	Tümü

Tablo 5. Nihai ocak optimizasyonunda kullanılan girdi parametresi değerleri

Senaryolara ait parametreler	1	2	3	4	5
İşletme maliyeti (cevher, US\$/m ³)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
İşletme maliyeti (pasa, US\$/m ³)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Çevre düzenleme maliyeti (US\$/ton)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
İşletme maliyeti ayar katsayısı (cevher MCAF)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
İşletme maliyeti ayar katsayısı (pasa MCAF)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Çevre düzenleme maliyeti ayar katsayısı (RCAF)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Cevher yoğunluğu (ton/m ³)	5,17	5,17	5,17	5,17	5,17
Pasa yoğunluğu (ton/m ³)	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
İşletme aşamasında cevher seyrelmesi (%)	5	5	5	5	5
İşletme aşamasında cevher kazanımı (%)	95	95	95	95	95
İşletme şev açısı (°)	35	35	35	35	35
Cevher zenginleştirme maliyeti (US\$/ton)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Genel ve idari giderler (US\$/ton)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Zenginleştirme maliyeti ayar katsayısı (PCAF)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Zenginleştirmede cevher kazanımı (%)	95	95	95	95	95
Zenginleştirilmiş cevher satış fiyatı (US\$/ton)	125	100	75	50	35
Satış maliyeti (US\$/ton)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

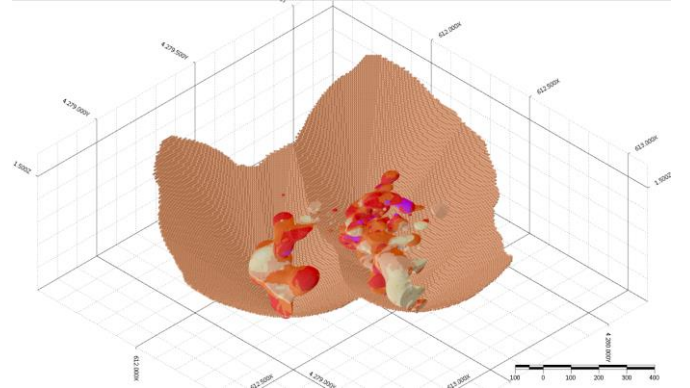
Ocak optimizasyonu algoritması Senaryo-1 ile çalıştırıldığında ocak derinliği 525 m olmakta ve üretim katları 1045 m ile 1570 m arasında yer almaktadır. 5,78 t/t örtükazı oranı ile 22.569.974 tonluk bölümü seyrelmiş Fe₃O₄ kütlesi olmak üzere 52.752.303 ton manyetit çıkartılmış ve 305.050.190 ton dekapaj (toplam 357.802.493 ton cevher + dekapaj) yapılmıştır. Böylece 247.679.695 US\$ maliyet ve 2.680.184.448 US\$ gelir oluşmakta ve paranın zaman değeri dikkate alınmadığında 2.432.504.753 US\$ kar elde edilmektedir. Kaynak kestirimi aşamasında tonajı 53.206.305 ton olarak belirlenen manyetit kütlelerinin, Şekil 5’de izleneceği %99,15’lik bölümünün işletilebildiği görülmektedir.



Şekil 5. Senaryo-1 sonucunda oluşan nihai ocak kabuğu (Kuzeybatıya izometrik bakış)

İkinci senaryoda manyetit satış fiyatı 100 US\$’a düşürülmüş ve diğer değerler sabit bırakılmıştır. Ocak tabanı 1045 m’de kalmış (Şekil 6) ancak örtükazı oranı 5,74’e düşmüştür. Çıkartılan 52.676.180 ton manyetit 22.558.983 tonluk bölümü %42,8 tenör ile seyrelmiş Fe₃O₄ kütlesine aittir. 302.191.359

ton dekapaj yapılmıştır. Toplam maliyetler 246.513.897 US\$, toplam gelir 2.143.103.417 US\$ ve günümüze indirgenmemiş net gelir 1.896.589.520 US\$’dır. Toplam maden kaynağının %99,0’luk bölümü işletilebilmektedir.



Şekil 6. Senaryo-2 sonucunda oluşan nihai ocak kabuğu (Kuzeybatıya izometrik bakış)

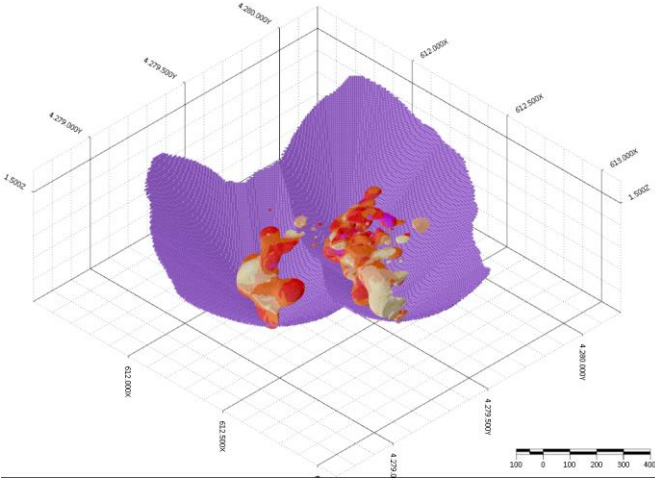
Birinci ve ikinci senaryolarda ocaktaki tüm cevherin üretildiği için üretim miktarının satış fiyatına tepkisini belirleyebilmek amacıyla üçüncü senaryoda manyetit satış fiyatı 75 US\$’a düşürülmüş ve diğer değerler sabit bırakılmıştır. Ocak tabanı 1050 m’de konumlanmış (Şekil 7) ve örtükazı oranı 5,63 t/t’a inmiştir. Çıkartılan 52.479.050 ton manyetit 22.525.817 tonluk bölümü %42,9 tenör ile seyrelmiş Fe₃O₄ kütlesine aittir. 295.691.955 ton dekapaj yapılmıştır. Toplam maliyetler 243.801.025 US\$, toplam gelir 1.604.964.452 US\$ ve günümüze indirgenmemiş net gelir 1.361.163.427 US\$’dır. Toplam maden kaynağının %98,6’lık bölümü işletilebilmektedir.

Tablo 6. Nihai ocak optimizasyonu senaryolarının sonuçları

Sonuçlar	Senaryo-1	Senaryo-2	Senaryo-3	Senaryo-4	Senaryo-5
Ocak taban kotu (m)	1045	1045	1050	1060	1085
Ocak tavan kotu (m)	1570	1570	1570	1570	1570
Yerinde hacim (m ³)	115.373.244	114.372.745	112.093.516	104.471.929	97.043.539
Çıkarılan seyrelmiş hacim (m ³)	115.373.244	114.372.745	112.093.516	104.471.929	97.043.539
Yerinde manyetit hacmi (m ³)	10.229.113	10.214.352	10.176.127	10.062.810	9.956.802
Çıkarılan seyrelmiş manyetit hacmi (m ³)	10.203.540	10.188.816	10.150.687	10.037.653	9.931.910
Yerinde pasa hacmi (m ³)	105.144.131	104.158.393	101.917.389	94.409.118	87.086.737
Çıkarılan seyrelmiş pasa hacmi (m ³)	105.169.703	104.183.929	101.942.830	94.434.275	87.111.629
Yoğunluk (ton/m ³)	3,10	3,10	3,11	3,12	3,13
Manyetit yoğunluğu (ton/m ³)	5,17	5,17	5,17	5,17	5,17
Pasa yoğunluğu (ton/m ³)	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Yerinde toplam kütle (ton)	357.802.493	354.867.539	348.171.006	325.811.172	304.028.203
Çıkarılan seyrelmiş kütle (ton)	357.802.493	354.867.539	348.171.006	325.811.172	304.028.203
Örtükazı oranı (ton/ton)	5,78	5,74	5,63	5,28	4,92
Yerinde manyetit kütlesi (ton)	52.884.515	52.808.200	52.610.577	52.024.728	51.476.667
Çıkarılan seyrelmiş manyetit kütlesi (ton)	52.752.303	52.676.180	52.479.050	51.894.666	51.347.975
Yerinde pasa kütlesi (ton)	304.917.979	302.059.339	295.560.429	273.786.444	252.551.536
Çıkarılan seyrelmiş pasa kütlesi (ton)	305.050.190	302.191.359	295.691.955	273.916.505	252.680.228
İşletme maliyeti-toplam (US\$)	115.373.244	114.372.745	112.093.516	104.471.929	97.043.539
İşletme maliyeti-cevher (US\$)	10.229.113	10.214.352	10.176.127	10.062.810	9.956.802
İşletme maliyeti-pasa (US\$)	105.144.131	104.158.393	101.917.389	94.409.118	87.086.737
Cevher zenginleştirme maliyeti (US\$)	79.128.455	79.014.270	78.718.576	77.841.999	77.021.963
İlave cevher zenginleştirme maliyeti (US\$)	-	-	-	-	-
Genel ve idari maliyetler (US\$)	26.376.152	26.338.090	26.239.525	25.947.333	25.673.988
Satış maliyeti (US\$)	26.801.844	26.788.793	26.749.408	26.555.866	26.288.901
Çevre düzenleme maliyeti (US\$)	-	-	-	-	-
Toplam maliyet (US\$)	247.679.695	246.513.897	243.801.025	234.817.127	226.028.389
Toplam gelir (US\$)	2.680.184.448	2.143.103.417	1.604.964.452	1.062.234.655	736.089.216
Net değer (US\$)	2.432.504.753	1.896.589.520	1.361.163.427	827.417.528	510.060.826

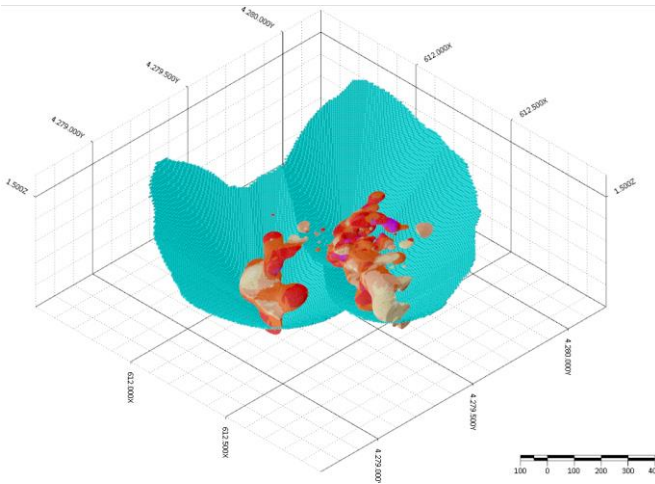
Tablo 6. Nihai ocak optimizasyonu senaryolarının sonuçları (devam ediyor)

Sonuçlar	Senaryo1	Senaryo2	Senaryo3	Senaryo4	Senaryo5
Fe ₃ O ₄ _Yerinde kütle (ton)	23.758.425	23.747.117	23.712.890	23.542.408	23.307.703
Fe ₃ O ₄ _Yerinde cevher kütlesi (ton)	23.757.868	23.746.298	23.711.386	23.539.826	23.303.181
Fe ₃ O ₄ _Çıkarılan seyrelmiş kütle (ton)	22.570.504	22.559.761	22.527.245	22.365.287	22.142.318
Fe ₃ O ₄ _Çıkarılan seyrelmiş cevher kütlesi (ton)	22.569.974	22.558.983	22.525.817	22.362.835	22.138.022
Fe ₃ O ₄ _Cevher hazırlama tesisinden çıkan kütle (ton)	21.441.476	21.431.034	21.399.526	21.244.693	21.031.120
Fe ₃ O ₄ _Yerinde kütle tenörü (%)	6,6	6,7	6,8	7,2	7,7
Fe ₃ O ₄ _Yerinde cevher kütlesi tenörü (%)	44,9	45,0	45,1	45,2	45,3
Fe ₃ O ₄ _Seyrelten tenör (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fe ₃ O ₄ _Yerinde çıkarılan kütle tenörü (%)	6,3	6,4	6,5	6,9	7,3
Fe ₃ O ₄ _Yerinde çıkarılan cevher kütlesi tenörü (%)	42,8	42,8	42,9	43,1	43,1
Fe ₃ O ₄ _Yerinde hacim bakımından (t/m ³)	0,21	0,21	0,21	0,23	0,24
Fe ₃ O ₄ _Yerinde cevher hacmi bakımından (ton/m ³)	2,32	2,32	2,33	2,34	2,34
Fe ₃ O ₄ _Çıkarılan seyrelmiş hacim bakımından (ton/m ³)	0,20	0,20	0,20	0,21	0,23
Fe ₃ O ₄ _Çıkarılan seyrelmiş cevher hacmi bakımından (ton/m ³)	2,21	2,21	2,22	2,23	2,23
Fe ₃ O ₄ _Gelir (US\$)	2.680.184.448	2.143.103.417	1.604.964.452	1.062.234.655	736.089.216
MB_Manjetit_Hacim (yerinde m ³)	10.248.395	10.238.135	10.208.903	10.103.884	10.009.935
MB_Manjetit_Çıkarılan seyrelmiş hacim (m ³)	10.248.395	10.238.135	10.208.903	10.103.884	10.009.935
MB_Manjetit_Yerinde kütle (ton)	52.940.432	52.877.171	52.705.627	52.143.843	51.630.752
MB_Manjetit_Çıkarılan seyrelmiş kütle (ton)	52.940.432	52.877.171	52.705.627	52.143.843	51.630.752
MB_Manjetit_Maliyetler (US\$)	142.554.846	142.379.287	141.916.412	140.449.083	138.994.786
MB_Manjetit_Gelir (US\$)	2.680.184.448	2.143.103.417	1.604.964.452	1.062.234.655	736.089.216
MB_Manjetit_NetGelir (US\$)	2.537.629.602	2.000.724.130	1.463.048.040	921.785.572	597.094.430
MB_Kaynağı belirsiz_Yerinde hacim (m ³)	105.124.849	104.134.610	101.884.613	94.368.044	87.033.604
MB_Kaynağı belirsiz_Çıkarılan seyrelmiş hacim (m ³)	105.124.849	104.134.610	101.884.613	94.368.044	87.033.604
MB_Kaynağı belirsiz_Yerinde kütle (ton)	304.862.061	301.990.368	295.465.379	273.667.329	252.397.451
MB_Kaynağı belirsiz_Çıkarılan seyrelmiş kütle (ton)	304.862.061	301.990.368	295.465.379	273.667.329	252.397.451
MB_Kaynağı belirsiz_Maliyetler (US\$)	105.124.849	104.134.610	101.884.613	94.368.044	87.033.604
MB_Kaynağı belirsiz_Gelir (US\$)	-	-	-	-	-
MB_Kaynağı belirsiz_Netgelir (US\$)	-105.124.849	-104.134.610	-101.884.613	-94.368.044	-87.033.604



Şekil 7. Senaryo-3 sonucunda oluşan nihai ocak kabuğu (Kuzeybatıya izometrik bakış)

Üçüncü senaryoda da ocaktaki tüm cevher (%98,6) üretilebildiği için dördüncü senaryoda cevher satış fiyatı 50 US\$/ton olarak ayarlanmıştır. Ocak tabanı 1060 m²'ye yükselmiştir. Buna karşılık örtükazı oranı 5,28 t/t'a azalmıştır. Çıkarılan 325.811.172 tonluk toplam malzemenin (cevher + dekapaj) 273.916.505 tonluk bölümü seyrelmiş pasa iken 51.894.666 tonluk kısmı manyetittir. Seyrelmiş Fe₃O₄ kütlesi 22.362.835 ton olup, tenörü %43,1'dir. Toplam maliyetler 234.817.127 US\$, toplam gelir 1.062.234.655 US\$ ve günümüze indirgenmemiş net gelir 827.417.528 US\$'dir. Toplam maden kaynağının %97,5'lik bölümü işletilebilmektedir (Şekil 8).

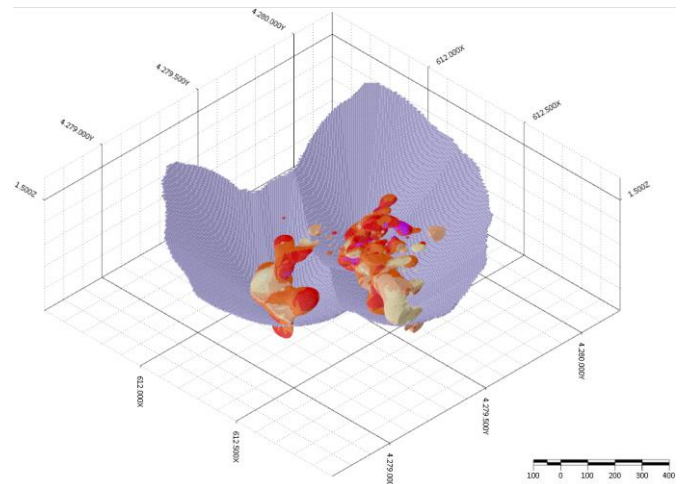


Şekil 8. Senaryo-4 sonucunda oluşan nihai ocak kabuğu (Kuzeybatıya izometrik bakış)

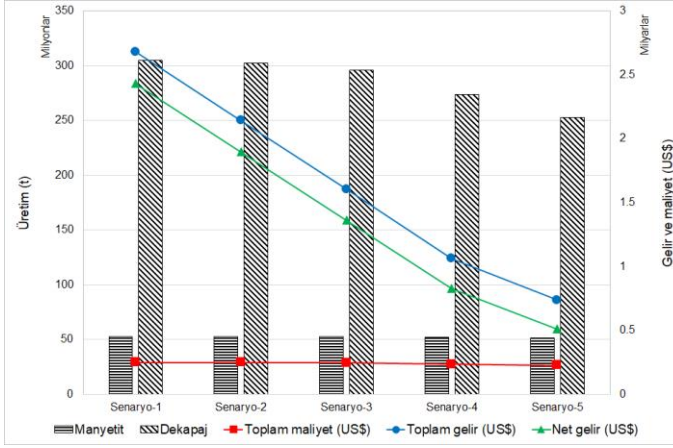
Beşinci ve son senaryoda cevher satış fiyatı 35 US\$/ton'a indirilmiştir. Ocakta (Şekil 9) çıkarılan 304.028.203 tonluk toplam kütleinin 252.680.228

tonluk bölümü seyrelmiş pasa iken 51.347.975 tonluk kısmı manyetittir. Örtükazı oranı 4,92 t/t'dur. Seyrelmiş Fe₃O₄ kütlesi 22.138.022 ton olup, tenörü %43,1'dir. Toplam maliyetler 226.028.389 US\$, toplam gelir 736.089.216 US\$ ve günümüze indirgenmemiş net gelir 510.060.826 US\$'dir. Toplam kaynağın %96,5'lik bölümü işletilebilmektedir.

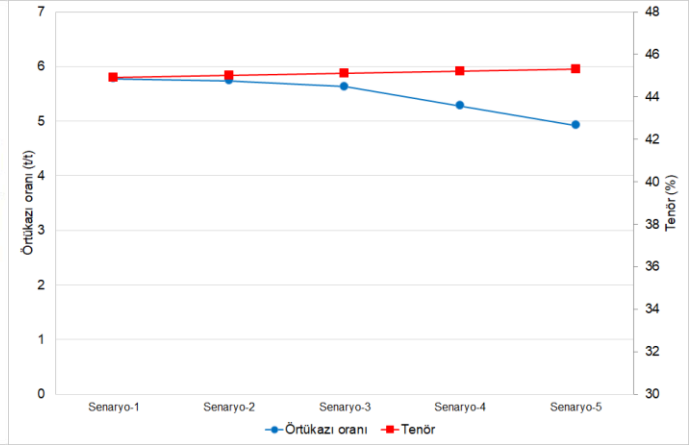
Optimizasyon denemeleri sonucunda, nihai ocağa karar verebilmek amacıyla 1-5 arası seçeneklerin cevher üretimi, dekapaj ve gelir-gider değerleri Şekil 10'da toplu olarak değerlendirilmiştir. Senaryolar ilerledikçe cevher üretim ve dekapaj miktarları hafifçe azalmaktadır. Şekil 11'den de izlenebileceği gibi ocak sığlaştıkça örtükazı oranı da azalmakta ancak üretilen cevherin tenörü hafif biçimde artmaktadır. Nihai ocak senaryoları ilerledikçe cevher satış fiyatları düşürüldüğünden günümüze indirgenmemiş toplam gelir, maliyet ve net gelir meblağları da azalmaktadır. Cevher satış fiyatının 35 US\$/ton ile güncel değerinden düşürüldüğü son senaryo gerçekçi olmadığından, değerlendirmeye alınmamıştır. Diğer yandan 1 ve 4 arası senaryoların tümünde ocaktaki maden kaynağının hemen tamamı kazanılmaktadır (Senaryo-1 → %99,15 ve senaryo-4 → %96,5). Güncel ocak başı manyetit satış fiyatları 50 US\$/ton ile 60 US\$/ton arasında değiştiğinden, nihai ocak kabuğunun Senaryo-4 ile temsil edilmesine karar verilmiştir. Optimizasyon senaryoları sonucunda düşey kesit üzerinde oluşan nihai ocak kabukları toplu halde Şekil 12'de göstermiştir.



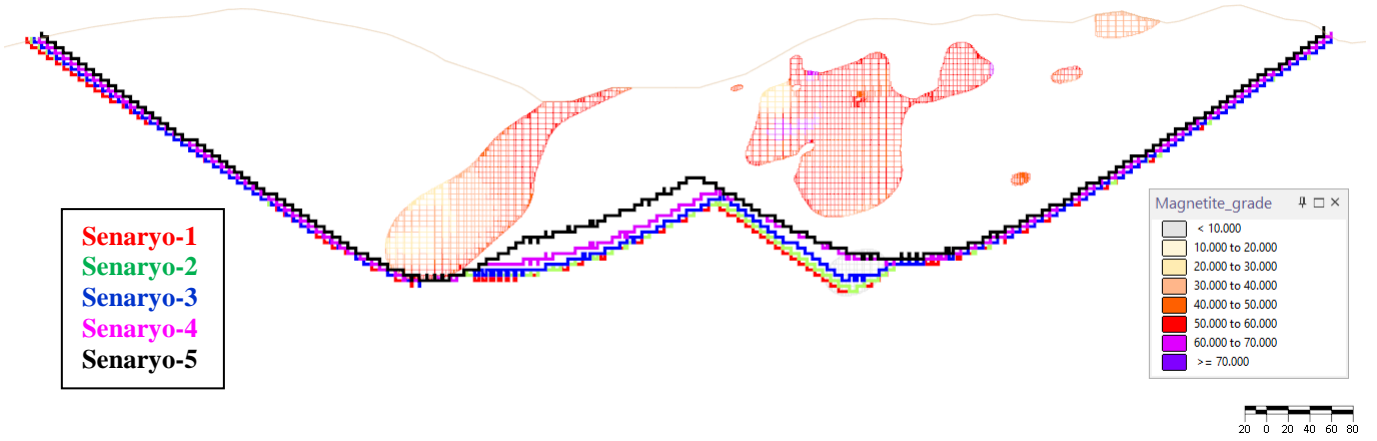
Şekil 9. Senaryo-5 sonucunda oluşan nihai ocak kabuğu (Kuzeybatıya izometrik bakış)



Şekil 10. Nihai ocakların üretim ve gelir-gider durumu



Şekil 11. Nihai ocakların tenör ve örtükazı oranı durumu



Şekil 12. Senaryolar 1, 2, 3, 4 ve 5 sonucunda oluşan nihai ocak kabukları (Kesitten kuzeybatıya bakış)

F. YUVALI OCAK OPTİMİZASYONU

Nihai ocağın oluşturulmasından sonra yuvalı ocakların hazırlanması aşamasına geçilmiştir. Tablo 5'de Senaryo-4 için kullanılan girdiler korunmuş ve gelir ayarlama katsayısı (RAF) 0,2 ile 1,0 arasında 0,02 birimlik artırımlarla değiştirilmiştir. Böylece başlangıç ocağından nihai ocağa kadar toplamda 41 yuvalı ocak oluşturulabilecektir. Ancak her yuvalı ocağın bir sonrakine geçebilmesi için en az 1.000.000 t üretim (cevher + dekapaj) yapılması kısıtı da konulmuştur. Tablo 6'da Senaryo-4 ile verilen nihai ocak içinde toplam 325.811.172 t malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Böylece 41 adet yuvalı ocak hazırlanabilecektir.

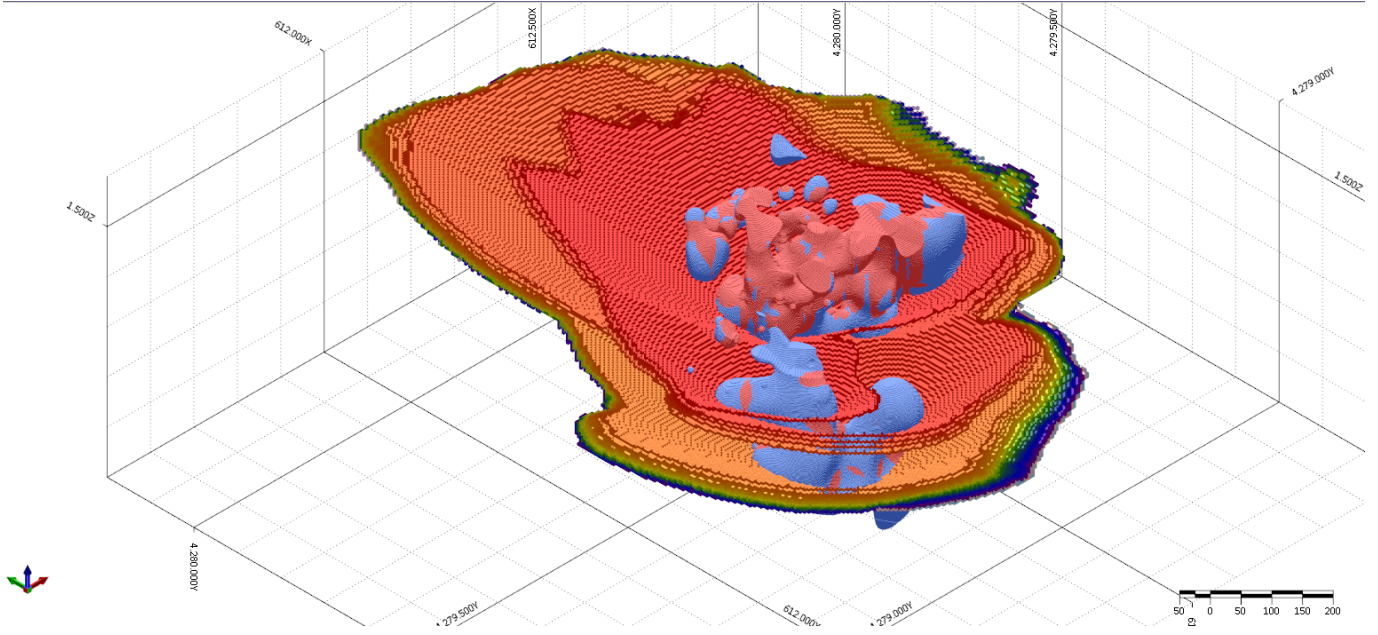
Yuvalı ocak algoritması, üretim süreci 43 yıla yayılan 35 adet iç içe ocak ile sonuçlanmıştır. Başlangıç ocağı 0,20 RAF değerine karşılık gelen 10 US\$/ton değerinde, ikinci ocak 0,22 RAF değerine karşılık gelen 11 US\$/ton değerinde, üçüncü ocak 0,24 RAF değerine karşılık gelen 12 US\$/ton dege-

rinde, onuncu ocak 0,38 RAF değerine karşılık gelen 19 US\$/ton değerinde, yirminci ocak 0,60 RAF değerine karşılık gelen 30 US\$/ton değerinde, otuzuncu ocak 0,84 RAF değerine karşılık gelen 42 US\$/ton değerinde ve otuzbeşinci, son ocakta 1,0 RAF değerine karşılık gelen 50 US\$/ton değerinde oluşmuştur. Her yuvalı ocak, bir sonrakine doğru büyürken en az 1.000.000 t'luk üretim (pushback) gerçekleşmiştir. Ocakların izometrik ve kesit görüntüleri Şekil 13 ve 14'de verilmiştir.

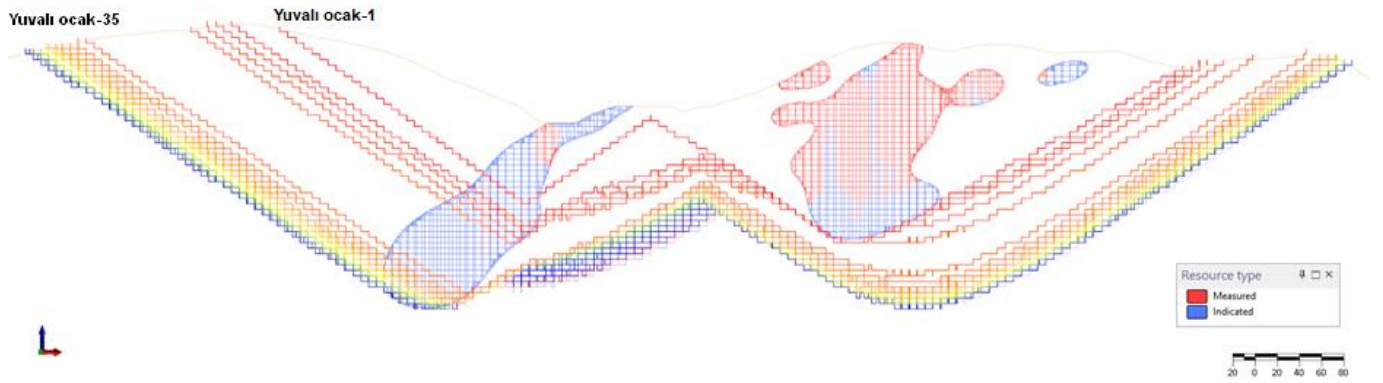
Ocaktaki işletme faaliyetlerinin 'en kötü' (worst case) ve 'eşzamanlı çoklu kat' (constant lag) senaryolarına göre yapılması durumunda üretimin safhalar (stages) ve yıllar (periods) bazındaki değişimine dair analizler Şekil 15'de sunulmuştur. Başlangıçta, 1. ve 2. yıllarda 15.000.000 US\$ olmak üzere toplamda 45.000.000 US\$ yatırım yapılacaktır. İlerleyen yıllarda elde edilen gelirin indirgeme oranı %5 alınmış ve yılda en fazla toplam 8.000.000 ton üretim (cevher + dekapaj) yapılmasına izin verilmiştir. Bu üretimin 2.000.000 tonluk bölümü cevher hazırlama tesisinde işlem görecektir.

Modellemede aynı anda üç katta çalışmaya izin verilmiş ve safhalar bazındaki değerler birikimli olarak, yıllar bazındaki değerler ise o yıla ait olarak sunulmuştur. ‘En kötü’ senaryolar, ocak sınırları içinde bir kattaki tüm cevher ve pasa tamamen üretilmeden alttaki kata geçilmemesi üzerine kurgulanmışken, eşzamanlı çok basamak yönteminde, gerçek uygulamaya benzer biçimde, aynı anda çok sayıda

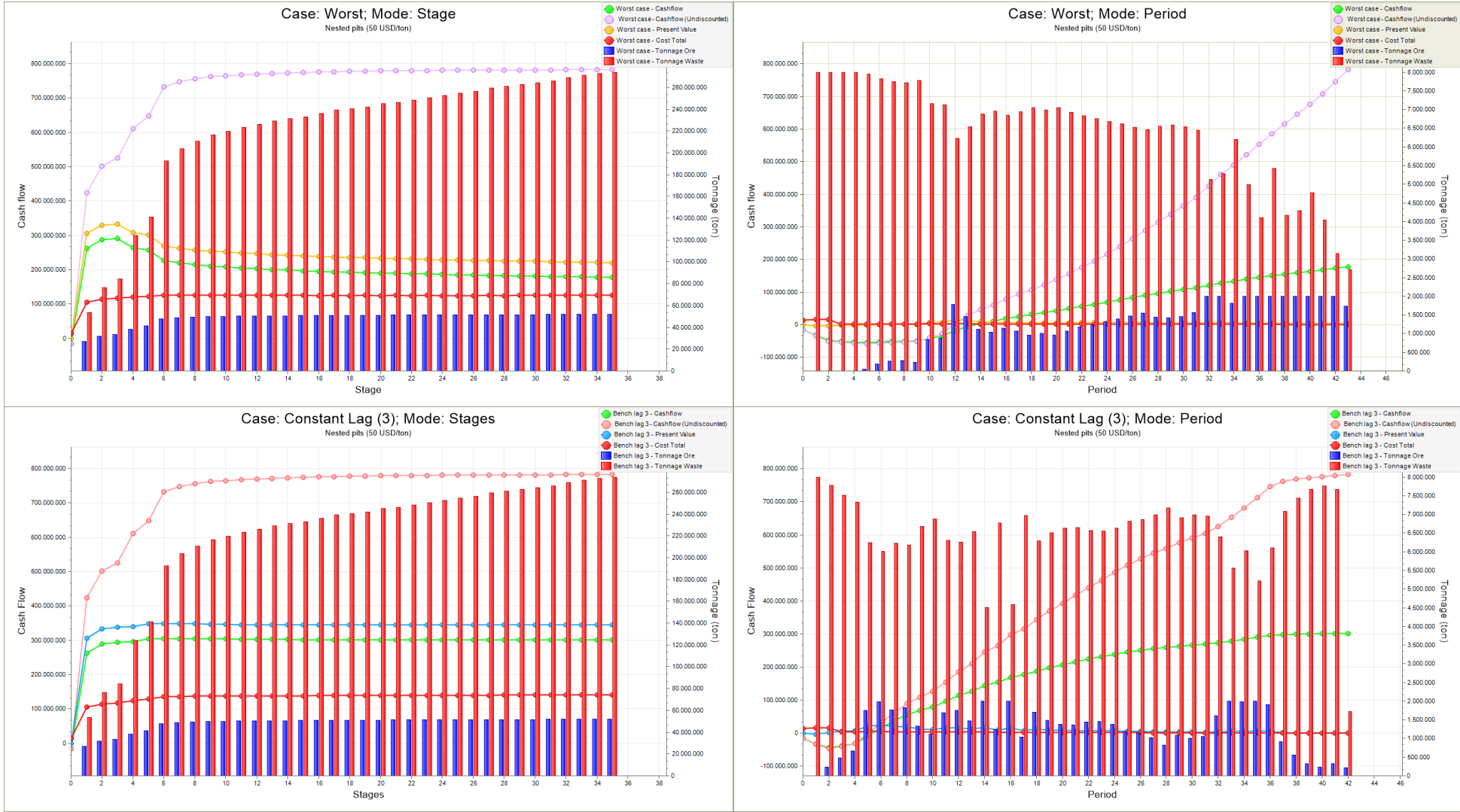
katta çalışmaya olanak vardır. Senaryo-4 kullanılarak yapılan yuvalı ocak modellemesi sonucunda 43 yılda 35 adet iç içe ocağın oluştuğuna değinilmişti. Buna göre son yuvalı ocakta hem en kötü durum hem de eşzamanlı çoklu basamak senaryoları uyarınca 51.894.666 ton manyetit ve 273.916.505 ton dekapaj olmak üzere toplamda 325.811.171 ton üretim yapılmaktadır.



Şekil 13. Senaryo-4 sonucunda oluşan yuvalı ocak kabukları (Kuzeydoğuya izometrik bakış)



Şekil 14. Senaryo-4 temel alınarak hazırlanan yuvalı ocak kabukları (Kesitten kuzeybatıya bakış)



Şekil 15. Yuvalı ocakların üretim ve gelir-gider durumu (üstte solda: en kötü durum senaryosu, safhalı üretim; üstte sağda: en kötü durum senaryosu, yıllar bazında üretim; altta solda: eşzamanlı çok basamaklı senaryo, safhalı üretim; altta sağda: eşzamanlı çok basamaklı senaryo, yıllar bazında üretim)

En kötü durum senaryosu ile kazancın net bugünkü değeri (NPV) 220.720.240 US\$ iken, ilk üç yılda yapılan toplam 45.000.000 US\$ değerindeki sabit yatırımlar da dikkate alındığında kazancın net bugünkü değeri 177.829.084 US\$'a düşmektedir. Diğer yandan eşzamanlı çoklu basamak senaryosu ile yatırımlar dâhil edilmeden 344.673.262 US\$, yatırımlar çıkartıldığında 301.782.106 US\$ net bugünkü değer sağlanmıştır. Bu farkın nedeni, çoklu basamak senaryosunda cevhere işletmenin erken yıllarında erişilebilmesi ve bu yıllarda sağlanan gelirin, bugüne indirgenmesinde kaybın az olmasıdır. Şekil 15'de yıllar bazında verilen analizlerin sonuçları incelendiğinde, ocaktaki üretimin 43 yıla yayıldığı görülmektedir. Ancak elde edilen gelirin bugüne indirgenmiş net değeri 43. yıl sonuna kadar sürekli artarak, en kötü durum senaryosunda 177.829.084 US\$ ve eşzamanlı çok basamak senaryosunda 301.782.106 US\$'a yükselmiştir. Bu nedenle, yuvalı ocaklar göz önüne alındığında en uygun seçeneğin, ocağın 43. işletme yılını içeren 35. safha olarak alınmasına karar verilmiştir.

Diğer yandan yuvalı ocakların sonucusu olan 35. ocak kabuğu, Senaryo-4'de 50 US\$/ton olarak belirlenen satış fiyatındaki değerde oluşmuştur. Bu durumda toplam maden kaynağının %97,5'lik bölümü de işletilebilmektedir. Böylece hem çıkartılacak cevherin satışından elde edilecek gelir en yüksek düzeye ulaşırken hem de yeraltında, güncel ekonomik koşullar altında mümkün olan en az miktarda kaynak bırakılacaktır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında bir manyetit kaynağının açık işletme ile üretilebilmesi için kaynak kestirimi yapılmış ve en uygun ocak sınırları belirlenmiştir.

Maden planlama aşamalarının en önemli girdi parametrelerini, sondajlardan elde edilen ve doğruluğu, tutarlılığı ve bütünlüğü teknik olarak teyit edilmiş veriler (litolojik birim, kalınlık, öznelik değerleri vb.) ile nihai ocak optimizasyonunda kullanılan parametreler (yıllar bazında yatırım maliyetleri, maden işletme, zenginleştirme, metalürjik işleme ve rehabilitasyon maliyetleri, ürün satış fiyatı, satış maliyeti, stok durumu vb.) oluşturmaktadır.

Kaynak kestirimi çalışmalarında kaynak miktarı ters mesafe ile ağırlıklandırma algoritması uyarınca hesaplanmıştır. En yakın komşu ya da krigleme algoritmaları da denenerek, kaynak miktarındaki değişimlerin belirlenmesi, mevcut yöntemin tutarlılığını destekleyici sonuçlar verebilir. Ayrıca çapraz doğrulama işlemi ile kullanılan algoritmanın hata

varyansının da en küçük değerine eriştiği kontrol edilebilir.

Ocak optimizasyonunda Lerchs-Grossmann algoritmasına göre, demir maden kaynağının en büyük bölümünün kazançlı biçimde işletilebileceği en derin ocak kabuğu ve en geniş ocak sınırları belirlenmiştir. Kaynak kestirimi aşamasında 53.206.305 ton olarak belirlenen manyetit cevher kütlesinin, %99,15'lik bölümünün işletilebildiği tespit edilmiştir.

Yuvalı ocak optimizasyonunda üretim süreci 43 yıla yayılan 35 adet iç içe ocak ile sonuçlanmıştır. Ocaktaki işletme faaliyetlerinin en kötü ve eşzamanlı çoklu kat senaryolarına göre yapılması durumunda üretimin safhalar ve yıllar bazındaki değişimleri incelenmiştir. Son yuvalı ocakta hem en kötü durum hem de eşzamanlı çoklu basamak senaryoları uyarınca 51.894.666 ton manyetit ve 273.916.505 ton dekapaj olmak üzere toplamda 325.811.171 ton üretim yapılmıştır. En kötü durum senaryosu ile kazancın net bugünkü değeri (NPV) 220.720.240 US\$ iken, ilk üç yılda yapılan toplam 45.000.000 US\$ değerindeki sabit yatırımlar da dikkate alındığında kazancın net bugünkü değeri 177.829.084 US\$'a düşmektedir. Diğer yandan eşzamanlı çoklu basamak senaryosu ile yatırımlar dâhil edilmeden 344.673.262 US\$, yatırımlar çıkartıldığında 301.782.106 US\$ net bugünkü değer sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] TCC-SBB, *2019 yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı*, T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Resmi Gazete (27 Ekim 2018 tarih ve 30578 Mükerrer Sayı), 2018
- [2] H. Arden, Y. Pıçakçı, "JORC kodu ve Türkiye'deki kaynak ve rezerv sınıflandırmasına etkileri", *Madencilik Türkiye*, 100-109, Aralık 2014.
- [3] T.C. Kalkınma Bakanlığı, *Madencilik Politikaları, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)*, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara, Türkiye: T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018.
- [4] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Demir>, alındığı tarihi: 17.05.2023
- [5] MTA, *Dünyada ve Türkiye'de Demir*, Ankara, Türkiye: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2017.
- [6] A. R. Arfany, "Bir açık cevher ocağının bilgisayar destekli tasarımı" Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye, Haz. 2023
- [7] K. Hasözdemir, "Açık ocak üretim yöntemi ile üretim yapacak olan bir maden ocağının üretim planlamasının optimizasyonu" Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, Türkiye, 2019.