T.C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR AÇIK BAKIR OCAĞININ UZUN DÖNEM ÜRETİM PLANLAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MOHAMMAD MUSLIM FAQIR YAR
(20219221002)

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent ERDEM

SİVAS
AĞUSTOS 2024

Mohammad Muslim FAQIR YAR'ın hazırladığı ve "**BİR AÇIK BAKIR OCAĞININ UZUN DÖNEM ÜRETİM PLANLAMASI**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:	**Prof. Dr. Bülent ERDEM** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……
Jüri Üyesi :	**Prof. Dr. İhsan ÖZKAN** Konya Teknik Üniversitesi	……
Jüri Üyesi :	**Dr. Öğr. Üyesi Tuğba DOĞAN** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu'nda (Yönerge) belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Mohammad Muslim FAQIR YAR, 2024

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu'nda (Yönerge) belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

25.06.2024

Mohammad Muslim FAQIR YAR

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Tezin tüm aşamalarında birlikte çalıştığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Bülent ERDEM'e çok teşekkür ederim.

Maden planlama çalışmalarımda eğitim amaçlı olarak maden planlama ve tasarım paket programı Micromine® kullanımına olanak sağlayan Mapteknik Ltd. Şti'den Yüksek Maden Mühendisi Sayın Abdülgani EŞİYOK ve YSK Group'a teşekkürlerimi sunarım.

Jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. İhsan ÖZKAN'a ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Tuğba DOĞAN'a gerek tezin okunması gerekse tez savunmasında gösterdikleri anlayış ve destek için çok teşekkür ederim.

ÖZET

BİR AÇIK BAKIR OCAĞININ UZUN DÖNEM ÜRETİM PLANLAMASI

Mohammad Muslim FAQIR YAR

Yüksek Lisans Tezi
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ERDEM
2024, 80+xii sayfa

Madencilik çalışmalarında, maden ömrü boyunca, tespit edilmiş proje değerleri üzerinden tesise cevher beslemek veya satış imkânları güvence altına alınmak istenir. Proses için tespit edilmiş ton ve tenör hedeflerinde aşırı değişikliklere müsaade edilemez. Bu yüksek lisans tez çalışma kapsamında bir açık bakır ocağının uzun dönem üretim planlamasına ait çalışmalar yapılmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için önce, 213 adet sondaj verisi kullanılarak veri tabanı kurulmuştur. Arama sondajlarından faydalanarak bu bakır yatağındaki mevcut kayaç tabakaları üç boyutlu olarak incelenmiş olup katı gövde ve jeolojik modelleri tasarlanmıştır. Jeoloji modeli tasarım yaptıktan sonra ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak cevher blok modeli içindeki tüm alt blokların tenör değeri atanmıştır. Nihai ocak sınırları, ekonomik açıdan parametreleri ve mevcut rezervini en karlı biçimde üretebilmesi amacıyla optimizasyon işlemler yapılmıştır. İşletme, cevher zenginleştirme, izabe ve başlangıç yatırımlarına dair parametre değerlerine dayalı olarak yuvalı ocak optimizasyonu yapılmıştır. Buradan gelen sonuçlar vasıtasıyla altıncı ocak işletilebilecek en karlı ocak olarak sunulmuştur. Daha sonra optimum ocak kabuğu üzerine taşıma yolları tasarlanmıştır. Son aşamada ise belirli bir yıllık üretim planı ve kısıtlar altında üretim çizelgelemesi yapılmış olup bu çizelgenin farklı ölçütler ile optimizasyon denemeleri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Açık Ocak, Maden ömrü, Optimizasyon, Rezervlerin hesaplanması, Sınırların belirlenmesi, Üretim planlama

ABSTRACT

LONG-TERM PRODUCTION PLANNING of an OPEN COPPER MINE

Mohammad Muslim FAQIR YAR

Master of Science Thesis
Department of Mining Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Bülent ERDEM
2024, 80+xii pages

In the context of mining operations, the primary objective is to ensure a consistent supply of ore to the processing plant or secure sales opportunities throughout the mine's lifespan, while avoiding excessive fluctuations in the planned tonnage and grade targets. To achieve this, a comprehensive master's thesis study was conducted on the long-term production planning of an open-pit copper mine. The study began by establishing a database from 213 drilling data points, which were then used to analyze the three-dimensional rock formations within the copper deposit and create solid body and geological models. Subsequently, the grade value of all sub-blocks within the ore block model was assigned using the inverse distance weighting method. Optimization processes were then carried out to determine the most profitable final pit boundaries, economic parameters, and existing reserves. This was done through nested pit optimization, based on parameters related to operations, ore processing, smelting, and initial investments. The results of this analysis identified the sixth pit as the most profitable option for mining operations. Finally, the optimum haul roads within the pit were designed.

The factory's output was guided by a specific yearly plan and restrictions. Adjustments were tested to this schedule using various criteria in an effort to optimize the production.

Key words: Open-pit, Mine life, Optimization, Scheduling, Resource estimation, Reserve calculations, Production planning.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vii**
ABSTRACT ..... **viii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Giriş 1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Hedefleri 3
1.3 Araştırmanın Süreci 3
2. ÖNCEL ÇALIŞMALAR **5**
2.1 Genel Hususlar 5
2.2 Maden planlamaya dönük literatürün değerlendirilmesi 5
2.3 Açık İşletmelerde Uzun Dönem Üretim Planlaması Üzerine Yapılmış Çalışmalar 7
2.4 Açık Ocak İşletmeciliği 9
2.5 Tez Bölümleri 11
3. MATERYAL VE METOT **12**
3.1 Materyal 12
3.2 Metot 12
3.2.1 Açık ocak planlaması 12
3.2.2 Açık ocak işletmeciliğinde temel kavramlar 13
3.2.3 Ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemi 15
3.2.4 Lerchs-Grossmann algoritması 16
3.2.5 Yuvalı ocak oluşturma yaklaşımları 18
4. AÇIK BAKIR OCAĞININ UZUN DÖNEM ÜRETİM PLANLAMASI **23**
4.1 Sondaj Veri Tabanı 23
4.2 Katı Gövde Modellemesi 27
4.3 Boş blok ve Jeolojik Blok Modellemesi 33
4.4 Kaynak Kestirimi 35
4.4.1 Kompozitleme işlemleri 35
4.4.2 Ters mesafe ile ağırlıklandırma (IDW) ile modelleme 37
4.5 Ocak Optimizasyonu 42
4.5.1 Nihai ocak optimizasyonu 42
4.5.2 Yuvalı ocakların optimizasyonu 44
4.6 Ocak Tasarımı 47
4.7 Tenör-Tonaj İşlemleri 56
4.7.1 Açık ocak bloklarının oluşturulması 56
4.7.2 Ocaktaki tenör-tonaj işlemleri 56
4.8 Ocak İşletme Süreci 59
4.8.1 Üretim çizelgeleme 59
4.8.2 Optimizasyon 62
4.8.3 Optimizasyona Dönük Değerlendirme 68
SONUÇLAR ve ÖNERİLER **69**
KAYNAKLAR **71**
EK- MADEN BLOKLARININ KATLARA DAĞILIMI **75**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Sıyırma ve açık ocak madenciliği örnekleri 2
Şekil 3.1 Eşik tenörün üretilebilecek cevher tonajı üzerindeki etkisi (Beck, 2013) 15
Şekil 3.2 İki boyutlu Lerchs-Grossmann algoritmasında yantaş ve cevherin ızgara biçiminde gösterimi (Hustrulid vd., 2013'den değiştirilerek) 17
Şekil 3.3 Cevher bloklarına tenör değerlerinin atanması (Url-2) 20
Şekil 3.4 Blok ekonomik değerlerinin cevher ve yantaş bloklarına atanması (Url-2) 20
Şekil 3.5 Blok ekonomik değerlerinin aşağı yönlü ve birikimli olarak cevher ve yantaş bloklarına atanması (Url-2) 20
Şekil 3.6 Blok değerlerinin solundaki sütunda bulunan komşu en yüksek blok değeri ile toplanması (Url-2) 21
Şekil 3.7 En uygun ocak sınırlarının bulunması (Url-2) 21
Şekil 3.8 Ocak ekonomik değerinin en uygun sınırlar üzerinde gösterilmesi (Url-2) 21
Şekil 3.9 Yuvalı ocaklar 22
Şekil 3.10 En iyi durum senaryosu (Özkan, 2015'den değiştirilerek) 22
Şekil 3.11 En kötü durum senaryosu (Özkan, 2015'den değiştirilerek) 22
Şekil 3.12 Sabit adımlı ilerleme senaryosu (Özkan, 2015'den değiştirilerek) 22
Şekil 4.1 Sondajların tutarlılık kontrol işlemi 24
Şekil 4.2 Sahadaki arama sondajlarının görünümü (Güneybatıya izometrik bakış) 25
Şekil 4.3 Bakır analizlerinin tenör histogramı 26
Şekil 4.4 Cevher tenörünün sondajlar boyunca dağılımı (Kuzeybatıya izometrik bakış) 28
Şekil 4.5 Cevher yatağında kesilen kayaç tabakaları (Güneydoğuya izometrik bakış) 29
Şekil 4.6 Tasarlanmış arama elipsoidi ve sondajlar ile görünümü (Güneydoğuya izometrik bakış) 30
Şekil 4.7 Cevher katı gövde modeli (Kuzeybatıya izometrik bakış) 31
Şekil 4.8 Katı gövde modellerinden alınmış kesitler 32
Şekil 4.9 Boş blok model 34
Şekil 4.10 Kompozitleme için analiz aralığı histogramı 35
Şekil 4.11 Kompozitleme için cevherin gövdesi içinde kalan Cu tenörleri (Kuzeye bakış) 36
Şekil 4.12 Anisotropic IDW ile kaynak kategorisi bazında cevher kaynağının blok modeli (Güneybatıya izometrik bakış) 40
Şekil 4.13 Anisotropic IDW ile bakır tenörü bazında cevher kaynağının blok modeli (Güneybatıya izometrik bakış) 41
Şekil 4.14 Nihai ocak kabuğu (Kuzeydoğuya izometrik bakış) 45
Şekil 4.15 Nihai ocak kabuğu ve cevher bloğu (Kesit görünüm) 46
Şekil 4.16 Ekonomik koşullar altında tasarlanmış yuvalı ocak kabukları (Kuzeydoğuya izometrik bakış) 48
Şekil 4.17 Ekonomik koşullar altında tasarlanmış yuvalı ocak kabukları (Kesit görünüm) 49
Şekil 4.18a En iyi durum senaryosuna göre aşamalar bazında üretim ve gelir-gider durumu 50
Şekil 4.18b Çoklu basamakta eşzamanlı çalışma senaryosuna göre aşamalar bazında üretim ve gelir-gider durumu 50

Şekil 4.18c En iyi durum senaryosuna göre yıllar bazında üretim ve gelir-gider durumu _____ 51
Şekil 4.18d Çoklu basamakta eşzamanlı çalışma senaryosuna göre yıllar bazında üretim ve gelir-gider durumu _____ 51
Şekil 4.19 Nihai ocağın tasarımlanmış mühendislik işlemleri ve ocağın basamak geometrisinin görünümü _____ 52
Şekil 4.20 Ocaktaki taşıma yollarının telkafes görünümü (Kuzeybatıya izometrik bakış) _____ 53
Şekil 4.21 Bakır ocağındaki taşıma yolları ve topoğrafya ile bağlanma görünümü (Kuzeydoğuya izometrik bakış) _____ 54
Şekil 4.22 Bakır ocağında işletilmesi öngörülen pasa ve cevher kütlesi (Güneydoğuya izometrik bakış) _____ 55
Şekil 4.23 Cevher, pasa ve cevher+pasadan oluşan maden blokları (Güneydoğuya izometrik bakış) _____ 57
Şekil 4.24 Ocak içinde işletilmesi öngörülen maden blokları ve cevher blokları ___ 58
Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2290 katı (üst sol), 2300 katı (üst orta), 2310 katı (üst sağ), 2320 katı (orta sol), 2330 katı (orta orta), 2340 katı (orta sağ), 2350 katı (alt sol), 2360 katı (alt orta), 2370 katı (alt sağ) 76
Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2380 katı (üst sol), 2390 katı (üst orta), 2400 katı (üst sağ), 2410 katı (orta sol), 2420 katı (orta orta), 2430 katı (orta sağ), 2440 katı (alt sol), 2450 katı (alt orta), 2460 katı (alt sağ) (devam ediyor) _____ 77
Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2470 katı (üst sol), 2480 katı (üst orta), 2490 katı (üst sağ), 2500 katı (orta sol), 2510 katı (orta orta), 2520 katı (orta sağ), 2530 katı (alt sol), 2540 katı (alt orta), 2550 katı (alt sağ) (devam ediyor) _____ 78
Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2560 katı (üst sol), 2570 katı (üst orta), 2580 katı (üst sağ), 2590 katı (orta sol), 2600 katı (orta orta), 2610 katı (orta sağ), 2620 katı (alt sol), 2630 katı (alt orta), 2640 katı (alt sağ) (devam ediyor) _____ 79
Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2650 katı (üstte), 2660 katı (altta) (devam ediyor) _____ 80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1 Sondajlarda kesilen bakır cevherine dönük istatistiksel veriler---------- 27
Çizelge 4.2 Veri parametreleri doğrultusuna oluşan arama elipsoidi geometrisi ------- 27
Çizelge 4.3 Cevher katı gövde modelinin özellikleri ---------- 33
Çizelge 4.4 Jeolojik bloğa ait birimlerin alt blok adetleri ---------- 35
Çizelge 4.5 IDW kestirim algoritmasında kullanılan parametre değerleri---------- 37
Çizelge 4.6 Bakır kaynağının IDW kestirim algoritması ile kaynak türü bazında hesaplanan değerleri ---------- 38
Çizelge 4.6 Bakır kaynağının IDW kestirim algoritması ile kaynak türü bazında hesaplanan değerleri (devam ediyor) ---------- 39
Çizelge 4.7 Nihai ocak optimizasyonunda kullanılan girdi parametresi değerleri ----- 42
Çizelge 4.8 Nihai ocak optimizasyon sonuçları ---------- 43
Çizelge 4.9 Bakır ocağındaki kaynak bilgileri---------- 56
Çizelge 4.10 Bakır ocağı yıllık üretim bilgileri ---------- 60
Çizelge 4.11 Bakır ocağının katlar bazında üretim bilgileri---------- 61
Çizelge 4.12 Birinci optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri - 63
Çizelge 4.13 İkinci optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri -- 64
Çizelge 4.14 Üçüncü optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri 65
Çizelge 4.15 Dördüncü optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri ---------- 66
Çizelge 4.16 Beşinci optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri 67
Çizelge 4.17 Optimizasyon aşamaları ve üretime dönük bilgiler ---------- 68

1. GİRİŞ

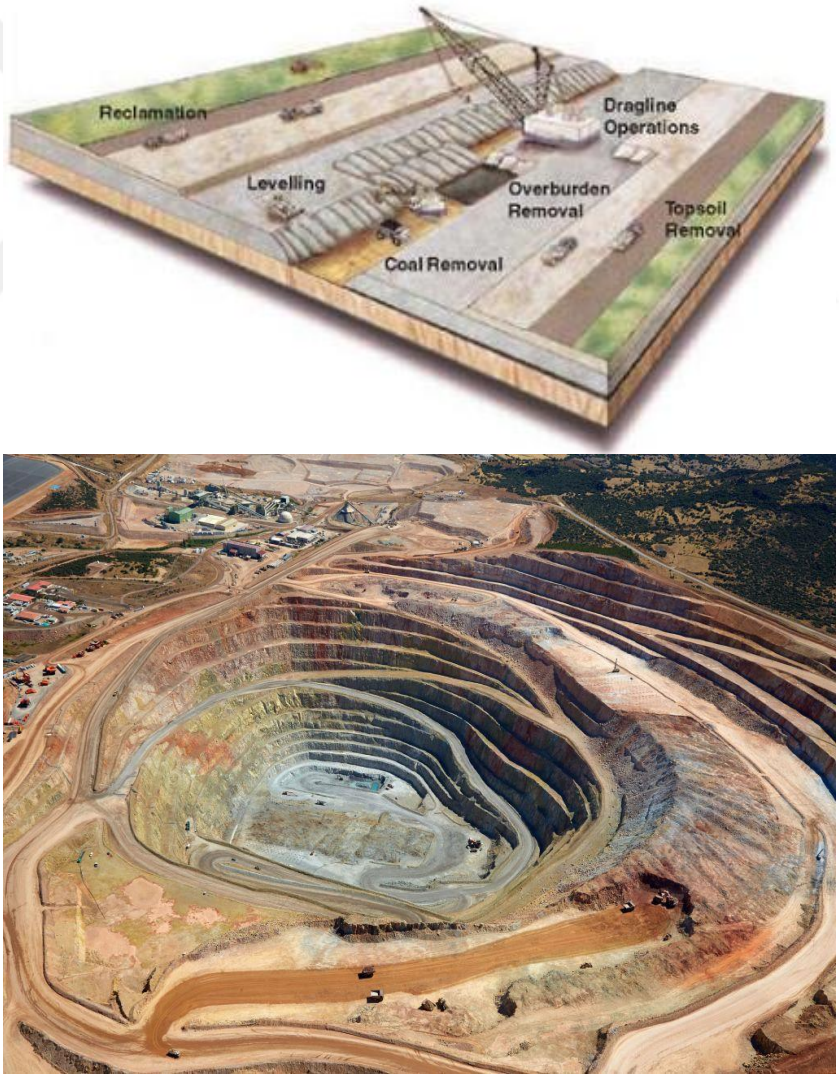
1.1 Giriş

Madencilik dünya ekonomisinin en önemli endüstrilerinden biridir. Mevcut tüm maden üretim yöntemleri arasında açık ocak madenciliğinin üretimindeki payı diğer yöntemlere göre çok daha güçlüdür. Açık ocak madenlerinin tasarımında önemli ve temel konulardan biri uzun dönem üretim planlaması konusudur. Uzun dönem üretim planlaması, madenin farklı yerlerinden cevher ve atıkların çıkarılma zamanını ve sırasını çeşitli koşulları dikkate alarak belirler, operasyonel sınırlamalar madencilik gelirinin en yüksek ekonomik değerine erişmesini sağlar. Bu araştırmada Micromine yazılımı kullanılarak açık ocak madeninin uzun dönem üretim planlaması yapılmıştır. Micromine, madencilik işlerinde uzun dönem planları optimize etmek amacıyla endüstriyel standart doğrusal programlama algoritmalarından arama operasyonları, 3 boyutlu tasarım, modelleme, tahmin, optimizasyon ve üretim planlaması için kapsamlı ve pratik bir yazılım sağlamıştır.

Madencilik, yüksek yatırım maliyetli ve yüksek gelir potansiyeli olan karmaşık bir sektör olarak değerlendirilebilir. Bu büyük maliyetler, büyük gelirleri ve madenlerin karlılık düzeyini garanti edebilecek, yatırım getirisini en üst düzeye üretim amacıyla, en uygun planlamayı gerektirir. Açık ocak madenlerinin üretim yöntemi dünyada çok iyi bilinen ve yaygın bir uygulamadır. Açık ocak madenlerinde, uzun dönem üretim planlaması yüksek verimlilik ve karlılık açısından son derece önemli bir faktördür (Lotfian vd., 2020). Açık ocak madenlerinde, sığ derinlikteki yüksek tenörlü mineraller ile daha derinlerde yer alan düşük tenörlü minerallerden dolayı, açık ocak madenlerinde uzun dönem üretim planlamasının değeri ve önemi vurgulanmaktadır. Açık ocak madenlerinde uzun dönem üretim planlaması hedefine ulaşmak ve yüksek düzeyde karlılık elde etmek için mineral blokların özellikleri, yüksek kaliteli mineraller, kayacın yapısı, net bugünkü değer (NPV), faydalı bileşenin kalitesi temel ve doğru bir şekilde analiz edilmelidir (Osanloo vd., 2008). Dolayısıyla, bahse konu sorunu tespit ve analiz etmek için üç boyutlu maden tasarım ve planlama yazılımları kullanılarak farklı senaryo ve üç boyutlu şekiller vasıtasıyla karmaşık mineral problemleri çözülebilmekte ve maden mühendislerinin incelemesine sunulabilmektedir. Operasyonel maden planı ile açık ocakta maden bloklarının işletilmesi için bir takvim oluşturulmakta, mevcut ekipman gücü ile stratejik planda belirtilen işin belirtilen periyotta yapılabilirliği araştırılmakta, stratejik plana

uygun takvim ve ekipman ve diğer işgücü belirlenebilmektedir (Eşiyok, 2019). Madencilik yazılımı ile rezerv belirlenmesi, maden yatağından en verimli şekilde faydalanmayı ve proje bazında maksimum kâr elde edilmesini sağlamaktadır (T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018).

Yerüstü madenciliği iki ana türe ayrılabilir; sıyırma ve açık ocak madenciliği (Şekil 1.1). Sıyırma madenciliğinde ekonomik mineraller geniş alana yayılabilmekte ve örtü tabakası altında bulunmaktadır. Böyle açık ocaklarda çoğunlukla düz veya düze yakın tabakalanmış olan değerli mineraller, büyük kapasiteli maden makineleri ile kazılabilmektedirler. Sıyırma madenciliğinde örtü tabakaları daha önceki kazılmış ve cevheri alınmış yerlere dökülmektedir. Açık ocak madenciliğinde dekapaj malzemesi ayrı bir döküm sahasında (harman) depolanabilmektedir.



Şekil 1.1 Sıyırma ve açık ocak madenciliği örnekleri

1.2 Çalışmanın Amacı ve Hedefleri

Bu araştırmada, açık ocak metal madeninin uzun dönem üretim planlamasına ilişkin kapsamlı çalışmalar yapılmış olup ve aşağıdaki hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır:

a) Mineralin jeolojik yapısının teşhisi
b) Maden rezervlerinin belirlenmesi ve hesaplanması
c) Madendeki maksimum net değerli olan (NPV) maden bloklarının tanımlanması
ç) Üretim limitlerinin uygulanmasına yönelik önlemler
d) Madendeki maksimum net bugünkü değer dikkate alınarak nihai ocağın (ultimate pit) tespiti ve tanımlanması.

1.3 Araştırmanın Süreci

Madencilik işlerinde uzun dönem üretim planlamasını, çeşitli matematiksel denklemler ve madencilik yazılımları kullanarak daha çok yöntemler bulunmaktadır. Bu tez projesinin aşağıdaki sıralı işlemlerin takip edilmesi ile tamamlanması planlanmıştır.

a) Sondajların üç boyutlu olarak basit izleri üzerinde litolojileri ve tenörleri; çubuk grafik, disk ve sayısal değer olarak görüntülenecektir.
b) Sonraki aşamalarda kullanılmak üzere sondajlar üzerinde kesit hatları hazırlanacaktır.
c) Başlangıçta mesafenin tersi (2. kuvvet) algoritması ile arama elipsoidi oluşturulacaktır. Böylece cevher gövdesinin uzaysal boyutları kestirilebilecek ve örtülü (implicit) modelleme ile katı gövde oluşturulacaktır.
ç) Sondaj sınırlarına dayalı olarak boş blok modeli oluşturulacaktır.
d) Sondajlarda kesilen litolojiye bağlı istif bilgileri kullanılarak, jeolojik blok modeli oluşturulacaktır.
e) Sondajlardan alınan tenör bilgileri kullanılarak, cevher blok modeli oluşturulacaktır. Takiben, arama elipsoidi de dikkate alınarak görünür (measured), belirlenmiş (indicated) ve potansiyel (inferred) cevher blokları üzerinden kaynak kestirimi yapılacaktır.
f) Günün koşulları altında geçerli; işletmecilik, mali, zenginleştirme, hukuk ve pazarlama koşulları ile belirlenen gelir/gider figürleri dikkate alınarak nihai ocak sınırlarını belirleyen optimizasyon yapılacak ve nihai ocak kabuğu oluşturulacaktır.
g) Aynı koşullar altında önceden belirlenmiş üretim ve gelir/gider kısıtlarına bağlı olarak yuvalı ocak kabukları oluşturulacak ve net bugünkü değer kavramı

üzerinden değerlendirilerek, en yüksek getiriyi sağlayan en uygun (optimum) ocak kabuğu seçilecektir.

ğ) En uygun ocak üzerinde taşıma yolu planlanacaktır.

h) Üretim planlaması algoritması kullanılarak, beher operasyonda çıkartılacak maden blokları oluşturulacaktır.

ı) Uzun dönemli (stratejik) üretim planlaması yapılacaktır. Böylece, önceden belirlenmiş bir üretim oranına dayalı olarak ocak ömrü tespit edilecektir.

i) Çizelgeleme işlemleri aracılığıyla üretim planlaması yapılacaktır.

2. ÖNCEL ÇALIŞMALAR

2.1 Genel Hususlar

Genel hatlarıyla bir işletmenin açık işletme veya yeraltı işletmesi şeklinde üretimine dönük kararlar, mali kriterler (maliyetler, satış gelirleri, net bugünkü değerler, iç kârlılık oranı vb.) ve mali olmayan kriterlerin (derinlik, kazı teknikleri, emniyet koşulları, planlama kolaylığı, yer yüzü tahribi sorunları, insan gücü ve yatırım talebi, mekanizasyonu imkanları, seçimlilik, fleksibilite, steril karışımlar, verimlilik, iklim koşulları, kayıplar, tumba alanları varlığı, hazırlıkların kapsamı, konservasyon ve rezervasyon vb.) dikkate alınması ile verilmektedir (Demirci ve Şengün, 2018).

Bir maden hammaddesinin maden kaynağı olarak değerlendirilebilmesi için yeterli miktarda kaliteye ve boniteye sahip olması gerekmektedir. Özellikle arama sondajları, maden planlamanın temelini oluşturması nedeniyle litolojik, jeolojik ve öznitelik verileri doğru bir şekilde veri tabanına aktarılmalıdır. 1980'li yılların başlarında bilgisayar donanımı ve yazılımlarında meydana gelen gelişmeler dünya madenciliğine olumlu yönde yansımıştır. Özellikle kaynak kestirimi ve ocak tasarımlarında kullanılan klasik yöntemler yerine maden yazılımlarına geçişler olmuştur. Bu kapsamda birçok maden planlama programları geliştirilmiştir (Micromine, Surpac, Datamine, Vulcan, NetPro/Mine vb.). Bu programlar sayesinde gerek açık işletme gerekse yeraltı maden işletme planlamaları yapılabilmektedir.

Maden planlamanın en önemli aşamalarından biri kaynak kestiriminin doğru bir şekilde yapılabilmesidir. Kaynak kestiriminde başlıca geometrik ve jeoistatistiksel yaklaşımlar bulunmakta olup başlıcaları arasında üçgen poligon, çokgen poligon, eş nitelik eğrileri ve kesit yöntemleri ile ters mesafe ile ağırlıklandırma ve krigleme sayılabilir (Khezrawi, 2022).

2.2 Maden planlamaya dönük literatürün değerlendirilmesi

Aşağıda özetlendiği şekliyle atıfta bulunulan bazı araştırmacıların madenlerde uzun dönem üretim planlaması ile ilgili çalışmaları verilmiştir. Bu çalışmalar özellikle kaynak kestiriminde kullanılan klasik ve jeoistatistik yöntemler, katı ve blok modellerin oluşturulması, maden planlama programları, nihai ve yuvalı ocak kabuklarının belirlenmesi, maden optimizasyonu ve uzun dönem üretim planlaması başlıkları altında

toplanmaktadır. Ülkemizde pek çok maden sahasının planlamaları lisansüstü çalışmalarda (Yünsel, 2007; Öngen, 2008; Göksüner, 2010; Aliyazıcıoğlu, 2011; Üredi, 2018) incelenmiştir. Yapılan benzer araştırmalar (Ergin vd., 1998; Westman, 1999; Tercan ve Akçan, 2005; Visser vd., 2013; Karakurt, 2019) olmakla birlikte, özellikle kullanılan maden planlama programları, kaynak kestirim yöntemleri ve farklı maden sahalarında çalışılmış konular olduğu görülmektedir. Literatürde kaynak kestiriminde hem klasik hem de jeoistatistik yöntemler olup işaret edilen yöntemler ile yapılmış araştırmalar bulunmakta olup jeoistatistiksel yöntemin kaynak tahmin hata sınırlarını vermesi nedeniyle daha tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir (Knudsen, 1975; Yalçın, 1993; Fidan vd., 2011; Karim ve Howladar, 2013).

Ergin vd. (1998) bir linyit sahasının kaynak miktarını hem klasik poligon yöntemi hem de ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar tespit edilmiştir.

Özkan (2006), bir açık ocak işletmesinin en uygun nihai sınırını Lerchs-Grossmann algoritmasını kullanarak belirlemiştir. Eti-Bor Kestelek açık ocağında yapılan çalışmada, bor fiyatlarındaki değişimlere göre ocak sınırlarındaki değişimler incelenmiştir. Ayrıca ocağın nihai durumuna göre dekapaj oranı, rezerv miktarı ve ocak net değerleri hesaplanmıştır.

Topal ve Ramazan (2012), şebeke akış modeli ve gerçek durum uygulamasını kullanarak stratejik maden planlama modeli geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, net bugünkü değeri (NPV) maksimum çıkarmak ve üretim planlamasını verimli bir şekilde optimize etmek için doğrusal ağ programlama (LP) modelini geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, Batı Avustralya'da bulunan birçok maden işletmesinde denenmiş ve önerilen yöntem sayesinde, üretim kapasitesi yüksek olan bir maden işletmesinin üretim programının verimli bir şekilde optimize edildiği sonucuna varılmıştır.

Açan'ın (2013) yapmış olduğu çalışmada bir demir sahası blok modeli oluşturulmuş ve oluşturulan blok modelde %Fe atamalarında en yakın komşu ve ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yönteme göre elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, tahmin edilen rezerv miktarında ve tenör dağılımlarında farklılıklar görülmüştür.

Visser vd. (2013), bir maden sahasında Gemcom firmasının geliştirmiş olduğu Whittle ve Minesched yazılımlarını kullanmış, en uygun ocak kabuğu ve üretim planı çizelgelemesi

yapmışlardır. Optimizasyonda temel girdi faktörleri olarak sermaye harcamaları ve işletme maliyetleri kullanılmıştır.

Moharaj ve Wangmo (2014), bir altın madeninde sondaj verileri kullanarak kaynak kestirimi yapmışlardır. Kaynak kestiriminde ters mesafe ile ağırlıklandırma, en yakın komşu ve krigleme yöntemleri kullanılmıştır. Ters mesafe ile ağırlıklandırma ve en yakın komşu yöntemlerinin verimlilikleri basit krigleme yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre en yakın komşu yönteminin, krigleme yöntemine kıyasla demir tenörü dağılımı gerçek değerinden fazla, rezerv miktarı ise olması gereken değerden az olarak belirlenmiştir. Ayrıca ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemi çalışma sahasının tenör dağılımı ve rezerv miktarının daha fazla tahmin edildiği belirtilmiştir.

Akisa ve Mireku-Gyimah (2015), Surpac ve Whittle programlarını kullanarak bir altın açık işletmesinin maden planlaması ve optimizasyonu yapmışlardır. Öncelikle sahanın blok modeli oluşturulmuş ve altın tenörünün sahadaki dağılımının tahmin edilmesinde ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca ocak optimizasyonunda 3 boyutlu Lerchs-Grossman algoritmasına göre en uygun ocak kabuğu seçilmiştir. Net bugünkü değerin özellikle altın fiyatlarına ve işletme maliyetlerine duyarlı olduğu belirtilmiştir.

Üredi (2018) ise Afşin-Elbistan Kömür Havzası E-Sektörü içindeki bir bölgenin kömür kaynağını en yakın komşu, mesafenin tersi, sıradan krigleme yöntemiyle belirlemiş ve birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Karakurt (2019), bir metal açık ocak işletmesinin üretim planı optimizasyonunu yapmıştır. Jeoistatistiksel analizler ile tenör-tonaj hesaplamaları yapılmış ve krigleme yöntemi ile cevherin dağılımı tespit edilmiştir. Ayrıca, cevher fiyatı değiştirilip maliyetler sabit tutularak ocak sınırlarındaki değişimler incelenmiştir.

2.3 Açık İşletmelerde Uzun Dönem Üretim Planlaması Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Açık işletmelerde uzun dönem üretim planlaması (long-term production planning, LTPP) büyük ölçekli bir optimizasyon problemidir. Maksimum üreten blok çıkarma sırasını amaçlayan çeşitli fiziksel ve koşulları karşılarken olası net bugünkü değer (NPV) ekonomik kısıtlamaları incelemelidir. Madencilik endüstrileri daha derine indikçe uzun dönem üretim planlaması, düşük tenörlü cevherlerin üretiminin durdurulmasıyla

operasyonlar veya projeyi devam edilmesi sonuçlanabilecek önemli bir gelişim haline gelmektedir (Organ vd., 2013).

Matematiksel programlama modelleri açık ocak madenlerinin uzun dönem üretim planlaması optimize etmek için çok uygundur. Bu matematiksel modeller 1960'lı yıllardan bu yana literatürde yoğun olarak çalışılmaktadır. Açık ocak madeni üretim planlaması 'Blokların üretim sırasının belirtilmesi' olarak tanımlanabilir. Üretim çeşitliliğine, kalitesine bağlı olarak en yüksek net bugünkü değeri verecek şekilde madenden çıkarma, harmanlama ve ocak eğimi kısıtlamaları' önem kazanmıştır. Belirli bir süreye göre üretim planlama zaman çizelgesi üretim planlama olarak bilinmektedir. Üretim planlaması tipik olarak üç aşamayı kapsar, karar verme için zaman aralıkları: uzun vadeli, orta vadeli ve kısa vadeli üretim planlamalarına ayrılmıştır.

Osanloo vd. (2008) uzun dönem üretim planlama problemlerini çözmek için farklı türde algoritmaların kullanımı yoluyla üretim planlamasını anlatmış, bu sorunu çözmek için birçok araştırmacı tarafından geleneksel ve belirsizliğe dayalı yöntemlerin geliştirilmiş olduğuna değinmiştir. Konunun çözümüne dönük önerilen yöntemler bu çalışmada tartışılmış ve kategorize edilmiştir.

Açık maden işletmelerinde uzun dönem üretim planlama problemini çözmek için tamsayılı programlama ve gevşetme yöntemleri gibi farklı matematiksel teknikler denenmiş ancak hepsi gerçekçi boyut ve detay düzeyindeki örnekleri çözememeden mustarip olmuştur. Bir araştırmada, karınca kolonisi optimizasyonu (ant colony optimization, ACO) kavramına dayanan yeni bir uzun dönem açık ocak üretim planlama tekniği sunulmuştur. Uygulaması, maks-min karınca sistemi (max–min ant system, MMAS) ve karınca kolonisi sistemi (ant colony system, ACS) dâhil olmak üzere karınca kolonisi optimizasyonunun iki türü kullanılarak gerçek boyutlu bir bakır-altın yatağı üzerinde test edilmiştir (Shishvan ve Sattavand, 2015).

Kaynak tahmini aşamalarında sahada mevcut mineralojik özellikleri, jeolojik birimler ve faylar tarafından kontrol edilen, belirli bir düzene sahip üç boyutlu bir jeolojik modelin sağlanması önemli bir adım oluşturmaktadır. Kaynak değerlendirmesinde jeolojik birimlerin yoğunluğunun belirlenmesi, cevher-kaya ilişkisi, jeo-metalürjik özelliklerin cevher kazanımına etkisi ve analiz sonuçlarının dağılımındaki değişiklikler, ekonomik parametreleri belirleyen önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır (Özkan ve Akbaba, 2013).

Kaynak modelinin kestiriminde, yapılan tahminle belirlenen cevher miktarının güvenilirlik derecesi, jeolojik model ise gerçeğe yakın değerleri ve bu modelin saha kaynağını içerecek şekilde tasarlanmıştır. Bu verilerle tutarlı tahmin yönteminin seçilmesine dayanmaktadır. Ayrıca kaynak modelinin tutarlı sonuçlara sahip olduğunu göstermek için cevher miktarının farklı tahmin yöntemleriyle test edilmesi gerekmektedir. Jeolojik unsurları iyi sınıflandırılan ve bunlara bağlı değişkenler ve süreksizlikler mümkün olduğu kadar tahmin edilerek yaklaşıklaştırılan madenler, uzun vadeli ve kısa vadeli üretim planlarında veya üretim sırasında ekonomik stratejik kararların etkin bir şekilde uygulanmasına olanak sağlar (Fenerli ve Güven, 2019).

2.4 Açık Ocak İşletmeciliği

Açık ocak madenciliği, büyük bir ihtimal ile bilinen en eski madencilik yöntemidir. Önceki dönemlerde yeraltı madenciliği daha yaygınca uygulanmakta birlikte 20. YY ile birlikte madenlerde uygulanmaya başlanan yeni teknolojiler, açık ocak işletmeciliğinin yeniden gündeme gelmesini sağlamıştır. Mekanizasyonda kaydedilen gelişmeler ve başta fosil yakıtlar olmak üzere maden hammaddelerine talep, açık ocak madenciliğinin giderek artan derinliklere (ki bunlar daha önceleri yeraltı yöntemlerinin sınırları içinde kalmaktaydı) ilerlemesine yol açmıştır. Üretim kayıplarının çok düşük olması ve daha emniyetli ve ekonomik işletmecilik yapılabildiğinden mümkün olan her yerde tercih edilmektedir.

Bazı durumlarda üretim ekonomisi açısından yatak kısmen ya da tamamen bu yöntem ile işletilebilmektedir. Teknolojik gelişim; kazı makinelerinin büyümesine ve karada uzun mesafelerde kesintisiz bant taşımacılığının yapılabilmesine olanak sağladığından açık ocak madenciliği, dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Göktürk, 2004).

Sert kayaçlardan oluşan tabakaların bulunduğu açık ocaklar ve artan derinlikler, çok gelişmiş bir teknoloji gerektirebilmektedir. Açık maden ocaklarında derinlikler arttıkça ya da taşıma yolları dikleştikçe büyük kapasiteli kamyonlar ile taşıma yapmak oldukça zorlaşmakta, artan akaryakıt fiyatları da üretim maliyetlerinde istenmeyen artışlara yol açmaktadır. Cevherin ekskavatörden, aynı basamak üzerine yerleştirilmiş yarı hareketli (semi stationary) bir kırıcıya kamyon ile nakledilerek (elektrik tahrikli, aynı hatta gidip gelen vagonlar da olabilir) buradan da yüzeye bantlar ile taşınması bir çözüm olarak seçilebilir. Ancak birkaç on yıl önce mevcut olan mobil kırıcıların maksimum kapasiteleri yalnızca 1800 t/sa olduğu için bunların kapasitelerinin ileride arttırılması gerekecektir.

Bu gelişmeler dizisinde, ilerleyen yıllarda uygulanabilecek bir nihai adım, kamyonların yerlerini tamamı ile bant taşımacılığına bırakması olabilir. Maden hammaddelerine artan talepler, madencilik ile çok az ilgili ve hatta ilgisiz şirketlerin bile madencilik alanına girmelerine yol açmaktadır. Kararlar çoğunlukla, aşağıdaki özellikleri taşıyan şirketlerce hazırlanan fizibilite raporlarına dayanmaktadır (Kim ve Knudsen, 1975).

1. Dünyadaki gelişmelere yalnızca kendi ülkelerinin bakış açısından yaklaşanlar.
2. Arazinin yeniden düzenlenmesini de kapsayan bir madencilik planını adım adım yürütmemiş olanlar.
3. Diğer firma ve kuruluşların mevcut deneyimlerinden yararlanmamış ya da yalnızca söz konusu sahalara yapılan bir takım kısa gezilerle konu hakkında yüzeysel bilgilere sahip olanlar.

Açık ocak madenciliğinde izlenmesi gereken aşamalı mantıksal yolun anlatımına geçmeden önce, açık ocakların yeraltı işletmelerine göre avantaj ve dezavantajları anlatılmalıdır. Açık ocak işletmeciliğinin yeraltı maden işletmeciliğine göre üstünlükleri arasında aşağıdakiler sayılabilir.

a) Üretim sırasında cevher kayıpları çok düşüktür. Örneğin kömür üretiminde, iyi bir planlama ile düzgün tabakalanma koşullarında kayıplar %0'a yaklaşırken, düzensiz tabakalanmada da %5'i aşmamaktadır. Sorun bir enerji krizinden öte çok daha ciddi olan bir hammadde krizi konumundadır. Mineral rezervleri sınırlıdır ve tümüyle değerlendirilmeleri gerekmektedir. Bu yüzden üretim sırasındaki kayıpların önlenmesi birinci derecede önemli bir sorundur.
b) İşletme yöntemi ve üretim kapasitesi açısından daha esnektir.
c) İşletmenin kapatılması ve yeniden açılması daha kolaydır.
ç) İşçi randımanı ve mekanik randıman daha yüksektir.
d) Açık ocak işletmeciliğinde üretim hızı yüksektir, vardiya başına ve adam başına üretim daha fazladır.
e) Personel açısından, daha uygun çalışma koşulları vardır.
f) İş güvenliğinin sağlanması daha kolaydır.

Açık ocak madenciliğinin yeraltı maden işletmeciliğine göre sakıncaları ise şunlardır:

a) Üretim sırasında cevherin yanı sıra çok miktarda örtü ve yantaşın kazılması ve taşınması gerekmektedir.
b) Açık ocakta genellikle ön yatırım daha yüksektir.

c) Açık ocakta çalışma olanağı iklim koşullarına bağlıdır.

2.5 Tez Bölümleri

Tezin giriş bölümünde açık ocak madenciliği üretim yöntemleri, maden planlamanın önemi ve çalışmanın hedeflerine değinilmiştir. İkinci bölüm, maden planlaması üzerine yapılmış akademik ve bilimsel çalışmalara ayrılmış ve temel açık işletme kavramlarına değinilmiştir. Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan materyal ve izlenen yöntem genel hatları ile verilmiştir. Yüksek lisans tezinin ana kısmını oluşturan dördüncü bölümde, açık ocak sahasında yapılmış sondajlardan bir veri tabanı oluşturulmuş, cevherin uzamsal özellikleri dikkate alınarak bir arama elipsoidi hazırlanmış ve cevher sahası içinde arama sondajları tarafından kesilen granodiyorit, biyotit ve andezit tabakalarına ait boş blok model, jeolojik blok model ve cevher blok modelleri hazırlanmıştır. Kompozitleme işlemlerinin tamamlanmasının sonra ters mesafe ile ağırlıklandırma (inverse distance weighting) algoritması kullanılarak tüm cevher bloklarına tenör ataması yapılmıştır. Daha sonra Lerchs-Grosmann optimizasyon algoritması esas alınarak, ardışık senaryolar oluşturulmuş ve bakır maden kaynağının kazançlı biçimde işletilebileceği optimum ve nihai ocak kabuğunun sınırları belirlenmiştir. Nihai ocak sınırları belirlendikten sonra optimizasyon çalışmaları yuvalı ocaklar ile sürdürülmüş ve açık bakır ocağındaki üretim, 52 yıl süreli 13 yuvalı ocak ile sonuçlanmıştır. Madendeki operasyonların “en kötü durum”, “en iyi durum” ve “çoklu basamakta eşzamanlı çalışma” senaryolarına göre yürütülmesi durumunda aşamalar ve yıllar (zaman dilimleri) bazında üretim ve parasal akış değişimine ilişkin analizler hazırlanmıştır. Sağlanan gelirin net bugünkü değerini enbüyükleyecek ocak kabuğu, en uygun ocak sınırları olarak seçilmiştir. Tasarım aşamasında basamaklar ve taşıma yolları modellenmiştir. Uzun dönemli üretim planlaması yapılmış ve nihai olarak ocaktan istenen üretim, verilen belirli kısıtlar altında optimize edilerek, sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tezin sonuç ve öneriler kısmında, dördüncü bölümden elde edilen bulgular doğrultusunda genel bir değerlendirilme yapılmış ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Yüksek lisans tez çalışmasının temel materyali açık ocak sahasında yapılmış 213 arama sondajına ait koordinat, istif, doğrultu ve tenör verisidir. Bir Excel dosyasının ayrı sayfalarına aktarılan sondaj verisi, düzenlendikten sonra bir maden planlama programına (Url-1) aktarılmış ve hatalarından arındırılmış bir veri tabanı hazırlanmıştır. Oluşturulan veri tabanı kullanılarak önce ocak sahasında bulunan tüm kayaç ve cevher tabakalarının katı gövde modeli oluşturulmuştur. Daha sonra jeolojik blok model hazırlanmış ve cevher gövdesi alt bloklara ayrılarak tümüne bakır tenörleri atanmıştır. Cevher kaynağı görünür, belirlenmiş ve mümkün kategorilerine ayrılarak beher kategorideki cevher ve bakır tonajları önceden belirlenmiş tenör aralıkları bazında kestirilmiştir. Ocağın devreye alınması ve çalıştırılması için gerekli yatırım ve işletme maliyetleri ile yıllık üretim figürleri dikkate alınarak nihai ve yuvalı ocak kabukları hazırlanmış ve en uygun ocak kabuğu seçilmiştir. Son işlem, üretim çizelgelemesi ve altı farklı senaryodan oluşan üretim optimizasyonudur.

3.2 Metot

3.2.1 Açık ocak planlaması

Açık ocak planlaması işletme faaliyetinin tüm aşamalarına uygulanmalıdır. Planlamaya etki eden çok sayıda faktör olup bu faktörlerin cevher ve çevreleyen kaya birimlerinin özelliklerini yansıtması elzemdir. Diğer yandan, etkili faktörlerin sahaya özgü olabileceği de akılda tutulmalıdır. Bu bölümde açık işletme planlaması ana hatlarıyla verilecektir.

Açık işletme planlamasında dikkate alınması gereken faktörler şunlardır: farklı yöntemler ile alınmış numuneler ve analizlerdeki tenör dağılımı, ocak yöresinin jeolojisi, kaynak geometrisi ve miktarı, topoğrafya, makine parkı, işletme maliyetlerine etki eden faktörler, yatırım harcamaları, kârlılık, cevherin cinsi, ocak sınırları, kritik tenör, örtü-kazı oranı, üretim kapasitesi, çalışma ve nihai şevleri eğimleri, basamak yükseklikleri, yol eğimleri, cevherin, tabantaşının ve tavantaşının mineralojik, petrografik, mekanik ve jeoteknik özellikleri, su koşulları, işletme sahası sınırları ve piyasa koşulları.

Madencilik faaliyetleri temel anlamda arama, hazırlık, üretim ve maden kapatma olarak dört ana başlık altında sıralanabilmektedir. Maden arama faaliyetlerinde sondajlardan elde edilen noktasal veriler klasik ve jeoistatistik yöntemler ile değerlendirilerek, sahanın kaynak miktarı belirlenebilmektedir. Klasik yöntemler genellikle kesit ve planların kullanımını içerirken, jeoistatistiksel yöntemlerde tonaj ve tenörü tahmin etmek için karmaşık, bilgisayar destekli iki ve üç boyutlu istatistiksel teknikler geliştirilmiştir. En iyi kestirim yönteminin seçiminde ayrıntılı jeolojik incelemelerin ve arama analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Kaynak kestiriminden sonra gelen ocak tasarımında amaç, çıkarılan cevherin toplam değeri ile cevher ve pasa malzemelerinin toplam üretim maliyeti arasındaki farkı enbüyükleyen bir ocak sınırı tasarlamaktır. Genel itibariyle ocak sınırlarının belirlenmesinde doğrusal programlama, dinamik programlama, ağ akış algoritması ve grafik teori algoritmaları kullanılmaktadır. Belirtilen yaklaşımlar arasında günümüzde en yaygın olarak kullanılan dinamik programlama algoritması Lerchs ve Grossman (1965) tarafından geliştirilmiştir. Ocak tasarımlarında geleneksel ve bilgisayar destekli yöntemler kullanılırken en uygun ocak tasarımında ise hareketli koni yöntemi veya Lerchs-Grossmann algoritmasından faydalanan maden planlama yazılımlarına başvurulabilmektedir.

3.2.2 Açık ocak işletmeciliğinde temel kavramlar

Açık ve yeraltı işletme yöntemlerinden hangisinin seçileceğini ekonomik olarak kontrol eden faktörler işletme maliyeti, örtükazı oranı ve üretilmesi planlanan cevherin tenörüdür. Açık ve yeraltı işletme maliyetini karşılaştırmada başvurulan en önemli unsur örtükazı oranıdır. Dekapaj, cevheri üzerleyen ve gerekli olduğunda ocak şevlerindeki ekonomik değeri bulunmayan malzemenin çıkartılarak uygun bir alana taşınması ve cevherin çıkarılmaya uygun hale getirilmesi işlemidir (Ceylanoğlu, 1991).

Örtükazı oranı, ocakta birim cevher üretimi için kaldırılması gereken kayaç hacmi olarak tanımlanmıştır (Arıoğlu, 1986; Saban, 2016'dan). Söz konusu oran genellikle m^3/m^3, m^3/ton veya örtü kalınlığının damar kalınlığına oranı ile ifade edilir. Açık işletmeden yeraltı işletmesine geçiş için sınır örtükazı oranı, sahanın bu değerin daha düşük oranı veren kesimlerinin açık işletme yöntemiyle daha ekonomik olarak çalıştırılabileceğini göstermekte olup aşağıda hesaplanmaktadır:

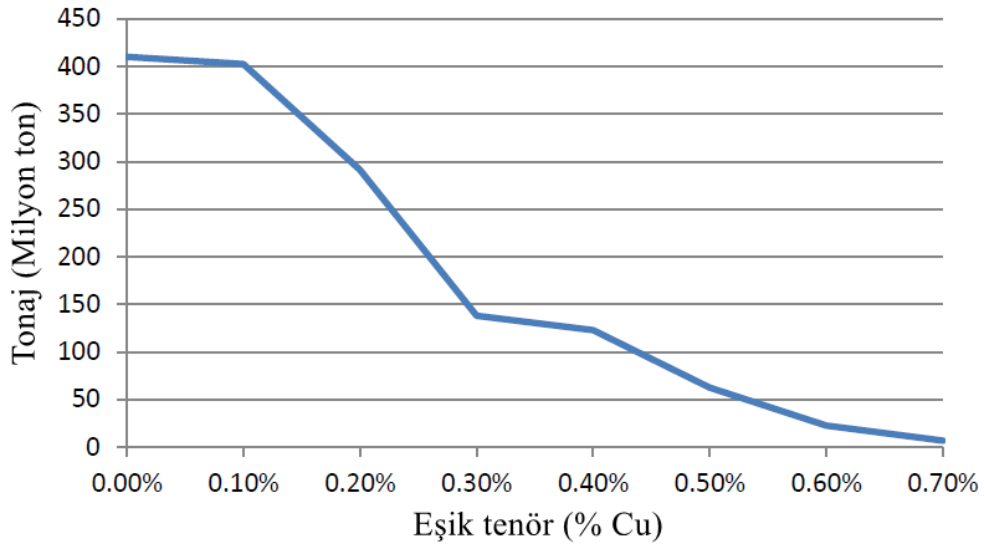
$$Sınır\ Oran = \frac{Yeraltı\ \ işletme\ \ birim\ maliyeti - Açık\ \ işletme\ cevher\ birim\ maliyeti}{Açık\ \ işletme\ dekapaj\ birim\ maliyeti}$$

Örnek olarak, bir bakır sahasının yeraltı işletmesi olarak çalıştırılması durumunda birim maliyetin 670 ₺/ton_cevher, açık işletme olması durumunda birim maliyetin 168 ₺/ton_cevher ve dekapaj maliyetinin de 101 ₺/ton_pasa olması halinde sınır örtükazı oranı 5:1 olmaktadır. Sınır örtükazı oranı sahanın farklı bölümlerinde değişiklik gösterebilmekle birlikte açık işletmecilik uygulanabilen tüm sektörlerde bu oranın aşılmaması gerekliliği not edilmelidir.

Açık maden işletmelerinin cevhere ulaşmak için hemen tamamen dekapaj yapılmak zorunda kalınan başlangıç aşamalarında anlık (yıllık) örtükazı oranı oldukça yüksek olup ocak geliştikçe ve cevhere erişildikçe düşmektedir. Bu durumda sınır örtükazı oranı da geçici olarak aşılabilmektedir. Diğer yandan, açık ocak tabanının cevher gövdesi tabanı ya da uygun bir kot olarak belirlendiği aşamaya gelindiğinde oluşan nihai örtükazı oranı ise sınır örtükazı oranının oldukça kalmaktadır (Ceylanoğlu, 1991).

Ocak tasarımlama aşamasındaki en önemli kararlardan birisi cevherin hangi bölüm(ler)inin çıkartılarak cevher hazırlama tesisine ya da satış için stok sahasına gönderileceği, hangi kısımlarının ise döküm sahasına sevk edileceği üzerine olmaktadır. Metalik cevherler için temel değişken, cevher içindeki değerli metal konsantrasyonunun, ilgili metali içeren kütleye oransal olarak ifade edilmesidir. Bu tez çalışmasında bakır cevheri konu edildiğinden örneğin temsili bakır tenörleri üzerinden verilmesi yerinde olacaktır. Analizler sonucunda sahayı temsil eden ortalama tenör %2,5 Cu olduğunda, üretilen beher cevher kütlesinin 25 kg bakır içerdiği sonucuna varılabilir. Diğer yandan, açık bakır madeni için hesaplanan eşik tenör %1 Cu olduğunda bu, cevher gövdesinde %1'den yüksek bakır içeren bölümlerin ekonomik olarak değerli olduğu ve çıkarılmaya ve işlenmeye değer olduğu anlamına gelmektedir. Eşik tenör; cevher satış fiyatı, teknik ve kapasite kısıtlamalarına bağlı olarak zaman içerisinde değiştirilebilmektedir. Ancak bu düzenlemenin, yatağın ‘ekonomik’ kabul edilen kesimini değiştirmesi nedeniyle işletme ekonomisi, yapılandırması ve ömrü üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Eşik tenör düşürüldüğünde ekonomik cevher olarak kabul edilen ve bu nedenle işletme ve zenginleştirme için hedeflenen cevher tonajı artmakta, benzer şekilde düşürüldüğünde ise azalmaktadır. Uygun bir örnek, Filipinler’de bulunan Hinoba bakır projesi için eşik tenörün tonaj üzerindeki etkisini göstermek amacıyla Şekil 3.1’de verilmiştir (Beck,

2013). Cevher kaynağının ortalama tenörü eşik tenör ile paralellik arz etmekte olup her türlü halde eşik tenöründen daha yüksek olacaktır. Hinoba bakır projesi dikkate alındığında eşik tenör için %0,10 Cu değeri seçildiğinde cevherin ekonomik olarak işletilebilecek bölümü 400.000.000 t olurken, eşik tenör %0,30'a artırıldığında ekonomik cevher kütlesi 140.000.000 t'a ve %0,60'a yükseltildiğinde ise 25.000.000 t'a azalmaktadır.



Şekil 3.1 Eşik tenörün üretilebilecek cevher tonajı üzerindeki etkisi (Beck, 2013)

3.2.3 Ters mesafe ile ağırlıklandırma yöntemi

Ters mesafe ile ağırlıklandırma (IDW), kriglemede olduğu gibi variogram modellemesi gerektirmeyen bir enterpolasyon yöntemidir. Herhangi bir sondaj üzerindeki bir analiz değerinin, cevher gövdesinin herhangi bir noktası (genellikle alt blokların merkezi) üzerindeki etkisinin mesafe ile ters orantılı olarak değiştiği varsayılmaktadır. Böylece, analizin konumu örneklenmemiş ve kalite parametresi değeri atanmak istenen konuma ne kadar yakınsa, enterpolasyonda o kadar fazla ağırlık kazanmakta ve uzaklaştıkça ağırlığı azalmaktadır. IDW yönteminde analiz ağırlığının mesafe ile değişiminin kontrolü için üs değeri değiştirilmekte ve böylece yüksek bir üs, enterpolasyonun en yakın komşular tarafından daha fazla etkilendiğini, düşük bir üs ise enterpolasyonun uzak analizler tarafından da etkilenerek ortalamaya yaklaşıldığına işaret etmektedir. Oldukça pratik bir uygulaması olan IDW yönteminin temel dezavantajı ise enterpolasyon belirsizliğine dönük kestirim verememesidir (Shepard, 1968). IDW, bunların yanında, verilerin normal dağılımlı olduğunu varsaymakta, yoğun ve düzgün bir veri dağılımı gerektirmekte ve

veride anizotropiyi dikkate almamaktadır. Algoritma fonksiyonu üs içerdiği için aykırı değerlerin etkisi büyük olmaktadır. Son olarak IDW, veri boşlukları veya sınırları arasında interpolasyonda başarısız olmaktadır. IDW yöntemiyle ağırlıklı ortalama değeri aşağıda verilmiştir (Revuelta, 2018).

$$Z_B = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Z_i}{d_i^n}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{d_i^n}\right)}$$

Burada:
z_i : arama alanı (Z_B) içindeki bir noktanın tahmini değeri
1/d: örnek ile değeri tahmin edilecek nokta arasındaki uzaklık
n : ağırlıklandırma fonksiyonun üs değeri

3.2.4 Lerchs-Grossmann algoritması

Nihai ocak sınırlarının tespit edilmesine dönük arayışlara yönelik en popüler ve iyi geliştirilmiş yaklaşım olan Lerchs-Grossmann (LG) algoritması, esas olarak grafik teorisine dayalıdır. Lerchs ve Grossmann (1965), bir açık ocaktan üretilen cevherin toplam parasal değeri ile ocaktan çıkartılan tüm kütlenin toplam işletme maliyeti arasındaki farkı enbüyükleyecek bir ocak sınırı tasarlamayı amaçlamışlardır.

Lerchs ve Grossmann (1965), öncelikle 2 boyutlu kesitler üzerinde hesaplamalar yapmış daha sonra bu kesitleri 3 boyutlu ocak oluşturmak amacıyla bir araya getirmişlerdir. Dinamik programlama yöntemi ile açık ocak sınırlarının bulunması için kullanılan temel adımlar Özkan ve Erçelebi (2014) tarafından açıklanmış olup iki boyutlu bir kesit üzerindeki uygulaması aşağıda kısaca verilmiştir.

a) ijk koordinat sisteminde i no'lu kesitte, j no'lu sütun ve k katı için m_{ijk}, bir bloğun ekonomik değerini temsil etmektedir.
b) Her ijk bloğu için en üst kottan başlayarak aşağıya doğru ekonomik değerler toplanarak aynı bloğa yazılır.

$$m_{ijk} = \sum_k m_{ijk}$$

c) Sütunların en soluna j=0 blokları, satırların üzerine de k=0 blokları eklenir. Sonradan eklenen bu blokların değerleri sıfırdır.
d) En sol üst köşedeki bloktan başlanarak p_{ijk} değerleri bulunur (i sabit). p_{jk} değeri bir bloğun solunda yer alan üç komşu bloğun incelenmesiyle ortaya çıkar. Bu üç

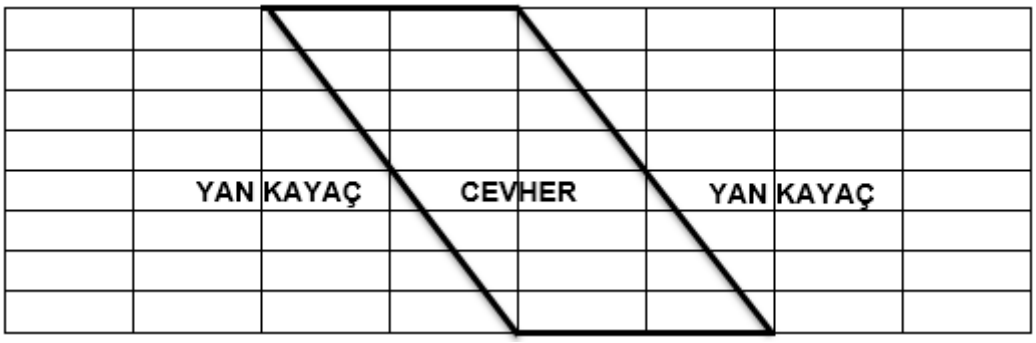
blok içerisinde ekonomik değeri en büyük olan blokla, incelenen bloğun değeri toplanır. Ardından değeri büyük olan bu bloğa doğru bir ok çizilir.

$$p_{jk} = m_{jk} + \max(p_{j-1,k-1}, p_{j-1,k}, p_{j-1,k+1})$$

e) Bütün bloklar incelendikten sonra k=1 seviyesindeki p_max değeri bulunur ve bu değer iki boyutlu kesit için maksimum ocak değerini verir. Bu bloktan başlanarak ok işaretlerinin gösterdiği bloklar takip edilir. Bu bloklar, incelenen kesit için nihai sınırları gösteren bloklardır. Eğer k=1 seviyesinde pozitif değerli bir blok yoksa işletmeyi kâra geçirecek bir üretim mevcut değil demektir.

$$p_{max} = Max p_{ij}$$

Lerchs ve Grossmann (1965) algoritması ile ocak ekonomik değerinin hesaplanmasına dönük örnek, aşağıda 2 boyutlu kesitler üzerinde verilen örnek ile gösterilmektedir. Öncelikle, kesit üzerindeki cevher kütlesi ve yan kayaçlar, düzgün satır ve sütunlara bölünerek bir matris oluşturulmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 İki boyutlu Lerchs-Grossmann algoritmasında yantaş ve cevherin ızgara biçiminde gösterimi (Hustrulid vd., 2013'den değiştirilerek)

İkinci aşamada cevher kütlesi içerisindeki her bir bloğa tenör değerleri atanmakta, ekonomik değer taşımayan bloklar boş bırakılmaktadır (Şekil 3.3). Üçüncü aşamada belirli bir tenör seviyesine çıkartılan cevherin satış fiyatı, işletme, zenginleştirme ve satış maliyetleri, blok boyutları ve cevher ile yantaşın yoğunlukları, izabe randımanı gibi faktörler dikkate alınarak beher bloğun ekonomik değeri hesaplanmakta ve tüm bloklara atanmaktadır (Şekil 3.4). Dördüncü aşamada kesite en solda bir sütun ve en üstte bir satır

eklendikten sonra beher sütunda bulunan blokların birikimli ekonomik değer toplamları, en üstten başlamak ve aşağıya doğru ilerlemek üzere yazılır (Şekil 3.5). Beşinci aşamada ise ilk sütunun en üstteki bloğundan başlanarak, solundaki sütunda üstünde, yanında ve altındaki satırlarda bulunan komşu blokların en düşük değerlisi ile toplanmakta ve toplam, blok değeri olarak kendi üzerine yazılmaktadır (Şekil 3.6). Bir sonraki aşamada işletme sınırlarını belirlemek için öncelikle en üst satırın sağından başlamak üzere sola doğru en yüksek blok değeri başlangıç noktası olarak belirlenmekte ve en yüksek blok değerine bir soldaki sütunda komşu üç blok arasından en yüksek blok değerine doğru işletme sınırları işaretlenerek ilerlenmektedir (Şekil 3.7).

Lerchs ve Grossmann (1965) algoritmasının nihai işlemi Şekil 3.8'de verilen ocak sınırları içinde kalan blokların ekonomik değerlerinin toplanması ve ocak ekonomik değerinin bulunmasıdır. Burada verilen örnekte ocak ekonomik değeri 948 birimdir.

3.2.5 Yuvalı ocak oluşturma yaklaşımları

Açık ocaklarda üretim planlaması, madenin ömrü boyunca cevher ve pasa çıkarım sırası ve her malzemenin çıkarılacağı zaman aralığı olarak tanımlanabilmektedir. Üretim planlamasının temel amacı, çeşitli fiziksel ve ekonomik kısıtlamalara tabi olarak madenden elde edilen toplam indirgenmiş kâr en büyük olacak şekilde gerçekleştirmektir. Üretim planlamasında ekonomik parametreler (satış fiyatı, maliyetler vb.) değiştirilerek nihai ocak sınırı ile başlayan bir dizi yuvalı (iç içe) ocaklar oluşturulmaktadır. İç içe yapılanan bu ocakların her birine öteleme (push-back) veya faz (phase) adı verilmektedir. Şekil 3.9'da en içeride yer alan Faz-1, cevher satış fiyatlarının düşük olduğu durumlarda bile işletmeye gelir sağlayabilecek başlangıç ocağını temsil etmektedir. Maliyetlerin düşmesi veya cevher satış fiyatının artması ya da eşik tenör değerinin düşmesi gibi durumlar gerçekleştiğinde ise ocak sınırları büyümekte ve Faz-2, Faz-3 ve Faz-4 koşulları oluşabilmektedir.

Yuvalı ocaklar aracılığıyla ocaktan sağlanan gelirin bugünkü değerini enbüyükleyecek en uygun ocağın belirlenmesi amacıyla en iyi durum (the best case), en kötü durum (the worst case) ve sabit adım (constant lag) olarak tanımlanan farklı senaryolar geliştirilmiştir (Whittle vd., 2005). En iyi durum senaryosunda başlangıç ocağı, yüksek tenörlü cevherin yüzeye en yakın olduğu noktaya konumlandırılmakta ve önceden belirlenen bir üretimi gösteren ötelemeler, aşağıya doğru sürdürülmektedir. Her yuvalı ocaktaki üretim, en üst basamaktan aşağıya doğru ilerlemektedir. Cevhere hızlı erişilip üretim, işletmenin erken

yıllarında başlayabildiği için bu senaryoda indirgenmiş net bugünkü değer yüksektir. En iyi durum senaryosunda kazı operasyonlarının ilerlemesine dair kavramsal bir görüntü Şekil 3.10'da verilmiştir.

En kötü durum senaryosunda, tüm yuvalı ocakların ocağın en üst kotunda bulunan basamakları işletilmekte ve bu kot bitirildikten sonra bir alttaki basamağın üretimine geçilmektedir. Özellikle tabakalı yatakların işletilmesinde uygulama bulabilen bu senaryoda cevhere işletmenin ilerideki yıllarında ulaşılabildiğinden ocaktan elde edilen gelirin başlangıç yılına indirgenen net bugünkü değeri, en iyi durum senaryosu ile kıyaslandığında, indirgeme oranı da büyük alınırsa, oldukça düşük olacaktır. En kötü durum senaryosunda kazı operasyonlarının ilerlemesine dair kavramsal bir görüntü Şekil 3.11'de verilmiştir.

Sabit adımlı ve birkaç basamakta aynı anda üretim yapılmasına olanak tanıyan Milawa algoritmasında ocaktan elde edilen gelirin net bugünkü değeri en iyi durum senaryosuna yakın olabilmektedir. Bu üretim sıralamasında üretim yapılacak ocak ve basamak, Milawa algoritması (Url-3) tarafından belirlenmektedir. Bu senaryoda kazı operasyonlarının ilerlemesine dair kavramsal bir görüntü Şekil 3.12'de verilmiştir.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	6	0	0	4	4	9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	6	5	5	6	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	7	7	7	7	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	7	1	0	0	0	8	9	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 3.3 Cevher bloklarına tenör değerlerinin atanması (Url-2)

-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	86	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	40	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-4	-4	-4	-4	-4	-4	51	-4	-4	28	28	86	40	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	40	-4	-4	51	40	40	51	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	62	62	62	62	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	28	74	-4	-4	-4	-4	28	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	62	-4	-4	-4	-4	74	86	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4

Şekil 3.4 Blok ekonomik değerlerinin cevher ve yantaş bloklarına atanması (Url-2)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	86	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
0	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	126	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
0	-12	-12	-12	-12	-12	-12	43	-12	-12	154	20	78	32	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
0	-16	-16	-16	-16	-16	-16	39	28	-16	150	71	118	72	39	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
0	-20	-20	-20	-20	-20	-20	35	24	-20	146	67	180	134	101	46	-20	-20	-20	-20	-20	-20
0	-24	-24	-24	-24	-24	-24	31	20	8	220	63	176	130	97	74	-24	-24	-24	-24	-24	-24
0	-28	-28	-28	-28	-28	-28	27	16	70	216	59	172	126	171	160	-28	-28	-28	-28	-28	-28
0	-32	-32	-32	-32	-32	-32	23	12	66	212	55	168	122	167	156	-32	-32	-32	-32	-32	-32

Şekil 3.5 Blok ekonomik değerlerinin aşağı yönlü ve birikimli olarak cevher ve yantaş bloklarına atanması (Url-2)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	19	105	169	189	209	338	510	600	701	747	793	867	929	925
0	-8	-12	-12	-12	-12	-12	-12	23	15	173	193	213	342	514	604	705	751	797	871	933	925	921
0	-12	-20	-24	-24	-24	-24	31	19	47	201	221	350	522	612	713	759	805	879	941	929	921	913
0	-16	-28	-36	-40	-40	-40	15	59	43	197	272	490	624	725	771	817	891	953	937	925	913	905
0	-20	-36	-48	-56	-60	-60	-5	39	39	193	372	552	686	787	833	907	969	949	933	917	905	893
0	-24	-44	-60	-72	-80	-84	-29	15	47	305	368	548	682	783	927	989	965	945	925	909	893	881
0	-28	-52	-72	-88	-100	-108	-57	-13	85	301	364	540	674	853	1013	985	961	937	917	897	881	865
0	-32	-60	-84	-104	-120	-132	-85	-45	53	297	356	532	662	841	1009	981	953	929	905	885	865	849

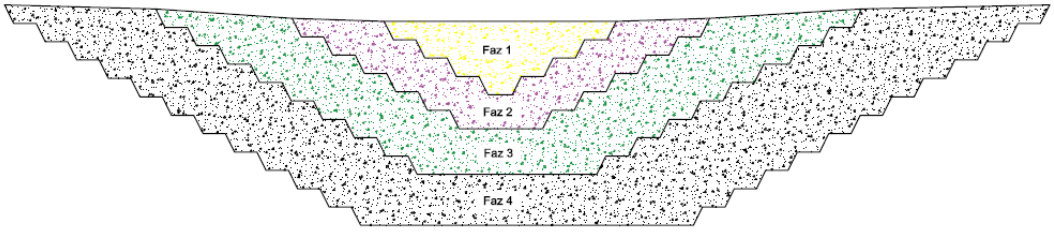
Şekil 3.6 Blok değerlerinin solundaki sütunda bulunan komşu en yüksek blok değeri ile toplanması (Url-2)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-4	-4	**-4**	-4	-4	-4	-4	-4	19	105	169	189	209	338	510	600	701	747	793	867	**929**	925
0	-8	-12	-12	**-12**	-12	-12	-12	23	15	173	193	213	342	514	604	705	751	797	871	**933**	925	921
0	-12	-20	-24	-24	**-24**	-24	31	19	47	201	221	350	522	612	713	759	805	879	**941**	929	921	913
0	-16	-28	-36	-40	-40	**-40**	15	59	43	197	272	490	624	725	771	817	891	**953**	937	925	913	905
0	-20	-36	-48	-56	-60	-60	**-5**	39	39	193	**372**	**552**	686	787	833	907	**969**	949	933	917	905	893
0	-24	-44	-60	-72	-80	-84	-29	**15**	47	**305**	368	548	**682**	783	927	**989**	965	945	925	909	893	881
0	-28	-52	-72	-88	-100	-108	-57	-13	**85**	301	364	540	674	**853**	**1013**	985	961	937	917	897	881	865
0	-32	-60	-84	-104	-120	-132	-85	-45	53	297	356	532	662	841	1009	981	953	929	905	885	865	849

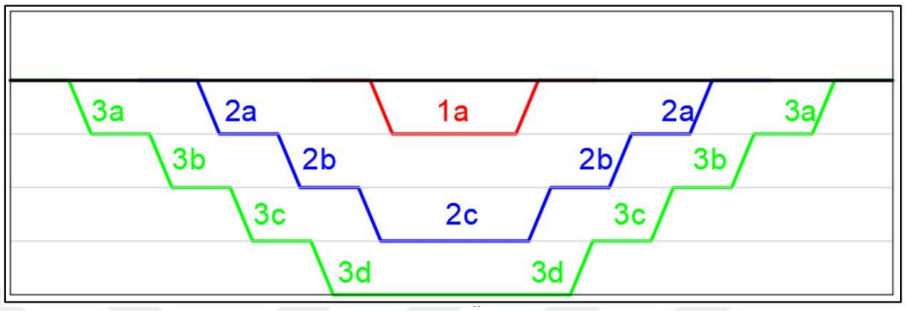
Şekil 3.7 En uygun ocak sınırlarının bulunması (Url-2)

			-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	86	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
				-4	-4	-4	-4	-4	-4	40	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4		
					-4	-4	51	-4	-4	28	28	86	40	-4	-4	-4	-4	-4	-4			
						-4	-4	40	-4	-4	51	40	40	51	-4	-4	-4	-4				
							-4	-4	-4	-4	-4	62	62	62	62	-4	-4					
								15	28	74			-4	-4	28	-4						
									62					74	86							

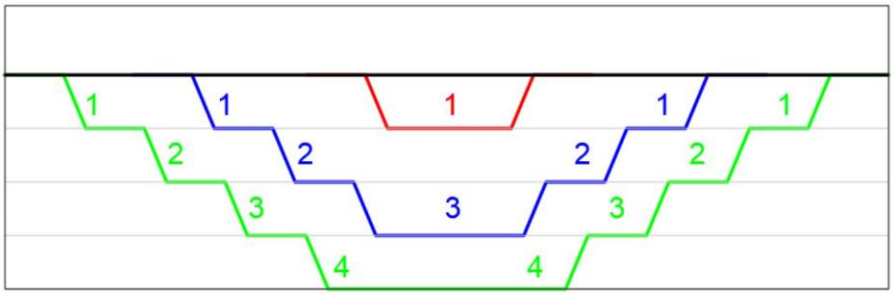
Şekil 3.8 Ocak ekonomik değerinin en uygun sınırlar üzerinde gösterilmesi (Url-2)



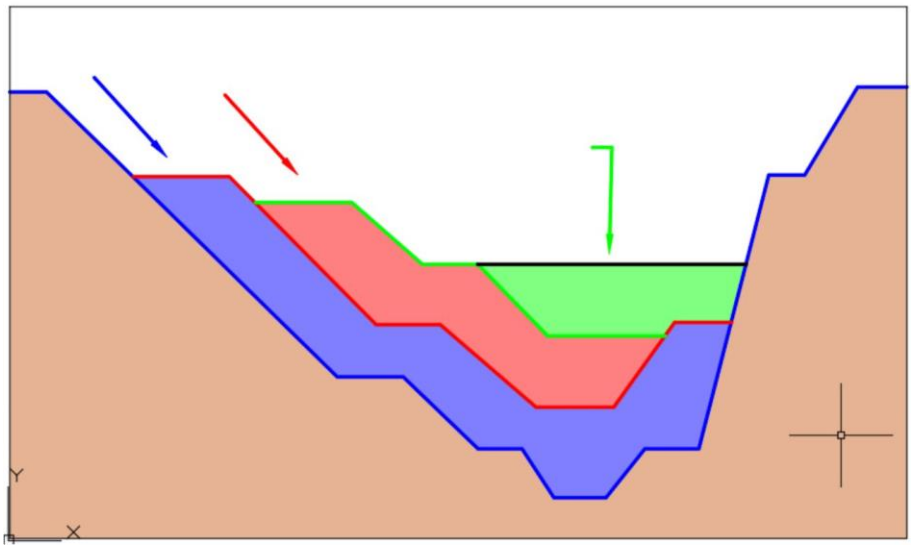
Şekil 3.9 Yuvalı ocaklar



Şekil 3.10 En iyi durum senaryosu (Özkan, 2015'den değiştirilerek)



Şekil 3.11 En kötü durum senaryosu (Özkan, 2015'den değiştirilerek)



Şekil 3.12 Sabit adımlı ilerleme senaryosu (Özkan, 2015'den değiştirilerek)

4. AÇIK BAKIR OCAĞININ UZUN DÖNEM ÜRETİM PLANLAMASI

4.1 Sondaj Veri Tabanı

Üretim planlamasının temel amacı, rezervin maksimum kâr ile üretilmesini sağlayabilmektir. Maksimum kârı elde etmek için açık ocağın nihai sınırları ve madendeki yatağın üretimin sıralaması açısından iki temel faktör bulunmaktadır. Bu iki etkileyici faktör, maksimum net bugünkü değeri veren ocak nihai sınırları ve cevher bloğunun ekonomik değerleri belirlenmeden bulunamaz. Öte yandan ocağın nihai sınırları içerisinde çeşitli üretim sıralaması seçenekleri de ekonomik açıdan mümkün olmaktadır (Karakurt ve Onur, 2019).

Bu bölümde, çalışma alanında yapılmış sondajlara ait konum, istif ve analiz verileri sayesinde bir açık bakır ocağının uzun dönem üretim planlamasına kadar geçen safhalar anlatılmıştır. Cevher yatağının konumu ve sahadaki arama sondajları ile ilgili bilgi, sondaj verisi alınırken yapılan sözlü anlaşma nedeniyle örtülü kalmış olup ocağın kuzeydoğu Afganistan'da bulunduğu varsayılmıştır.

Uzunluğu 1800 m ve genişliği 1100 m'ye uzanan bakır sahasında toplam 213 adet arama sondajı yapılmıştır. Sahadaki sondajların en kısası 46,58 m iken en derin sondaj 750 m'dir. Sahadaki sondajların özellikleri dört başlık ile açıklanmıştır:

Sondaj Ağız Koordinat Bilgisi

- Sondaj adı (Hole_ID)
- Enlem (Northing)
- Boylam (Easting)
- Kot (RL)
- Boy (Depth)

Doğrultu Bilgisi (Survey)

- Sondajın yönü (Azimuth)
- Sondajın eğimi (Inclination)
- Sondajın derinliği (Depth)

Litoloji Bilgisi (Lithology)

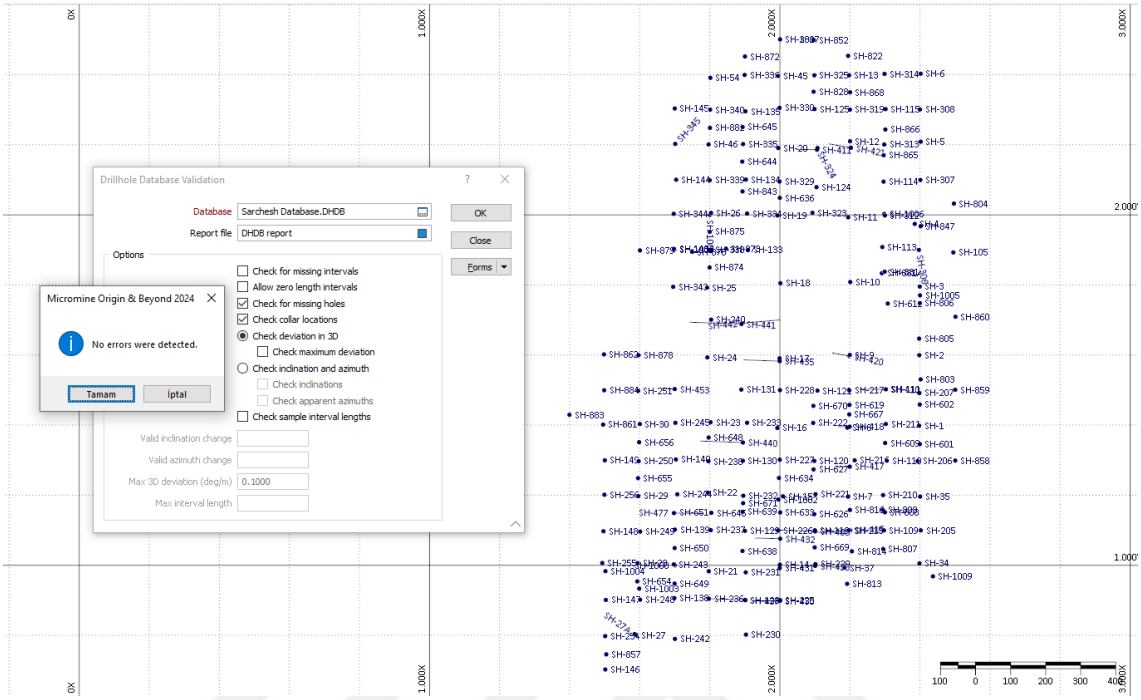
- Sondaj adı (Hole_ID)
- Aralığın başlangıcı (From)
- Aralığın bitişi (To)
- Aralık (Interval)
- Litoloji (Lithology)

Sondajın Tenör Bilgileri (Assay)

- Sondaj adı (Hole_ID)
- Aralığın başlangıcı (From)
- Aralığın bitişi (To)
- Analiz boyu (Interval)
- Analizin tenörü (Cu Percent)

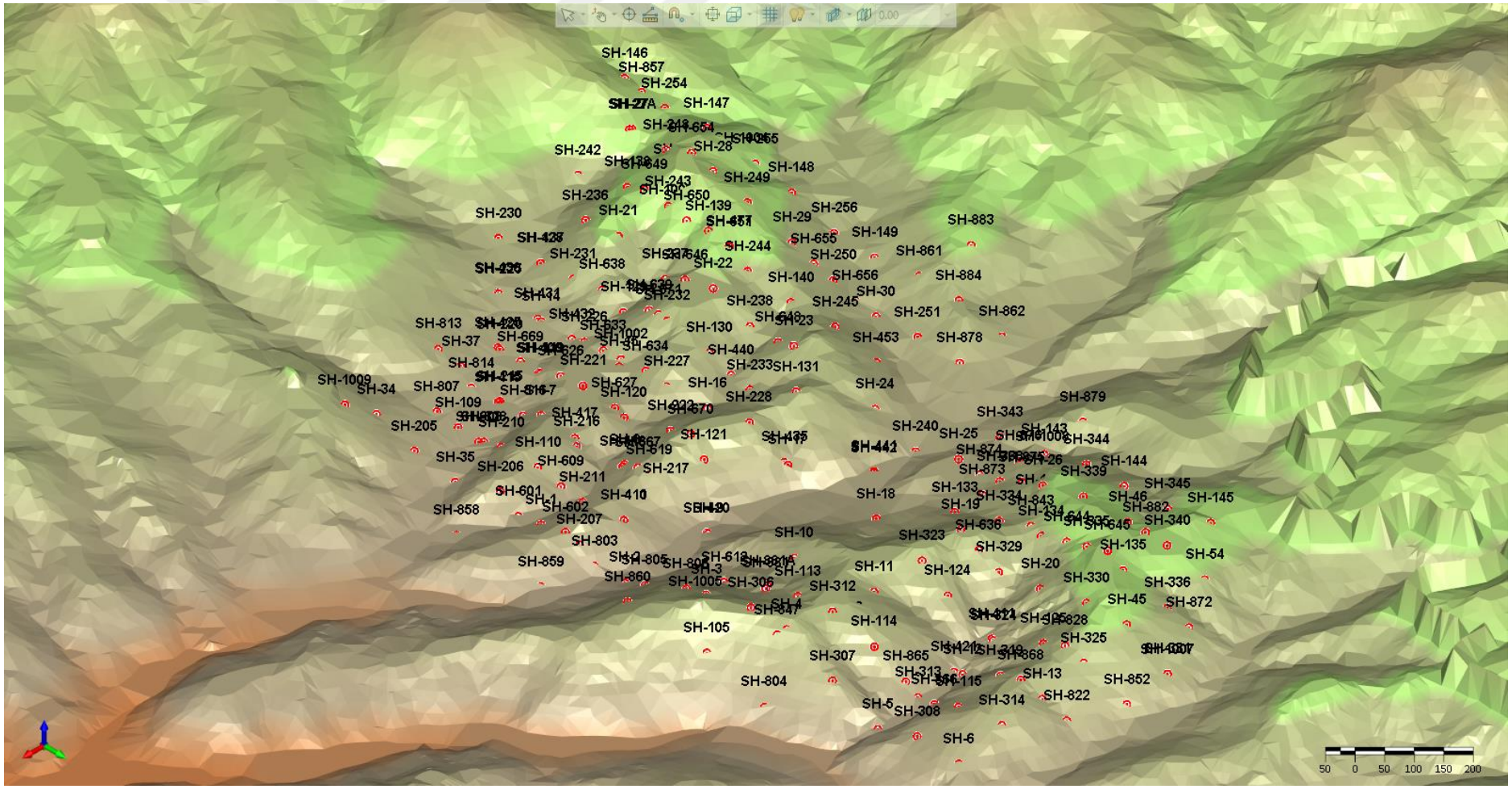
Sahadan elde edilmiş bütün veri, tek bir dosya olarak Excel yazılıma tanımlanmış ve bu dosyadaki içerikler (Collar, Lithology, Assay ve Survey) detaylı biçimde incelenmiştir. Tanımlanmış verilerde eksiklik ya da herhangi bir sondaja ait veride tutarsızlık olup olmadığı, Micromine yazılımının "Sondaj Veritabanı Doğrulama İşlemleri" işlevi ile

tespit edilebilmekte ve düzeltilebilmektedir (Şekil 4.1). Arama sondajlarının topografya üzerindeki yerleşimlerine ait görünüm Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Sondajların tutarlılık kontrol işlemi

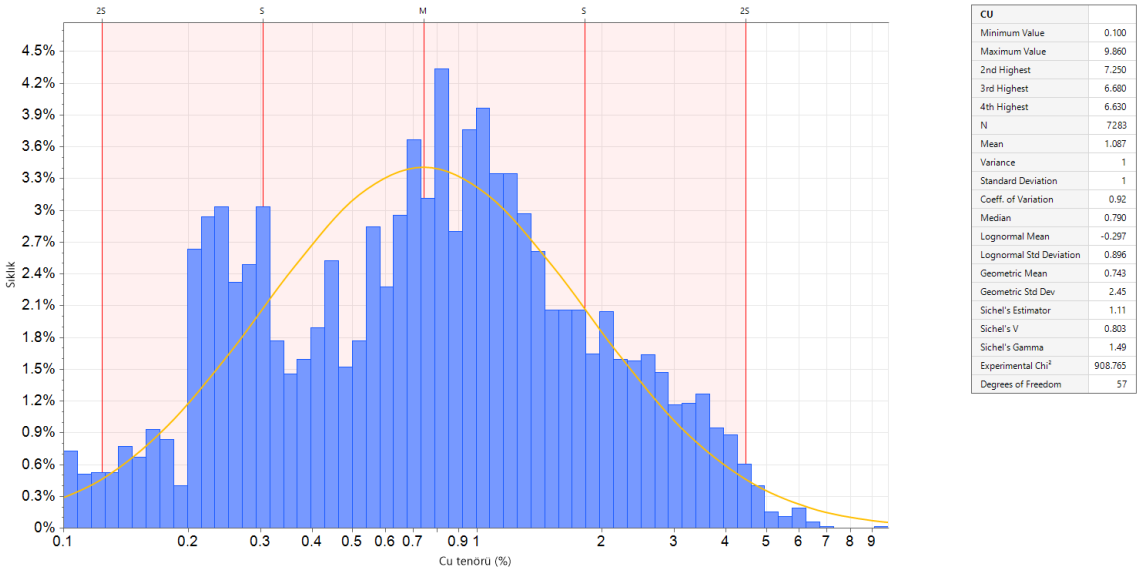
Dünyada 20. Yüzyıldan bu yana üretilen bakır cevherinin ortalama tenörü belirgin biçimde düşmektedir. Ortalama tenör, 1900 yılında %4 Cu iken 2010 yılında %1,07 Cu seviyesine inmiştir. Buna bağlı olarak, bilinen bakır cevheri kaynaklarındaki son 70 yıldaki artışın büyük bir kısmı, eşik tenörlerindeki düşüşe bağlanabilir. Proje aşamasında eşik tenörü %0,40 Cu olan porfiri tipte yataklanmaya sahip Kuzey Peru'daki (https://portergeo.com.au/database/mineinfo.asp?mineid=mn1263) Rio Blanco bakır ocağının eşik tenörü %1,26 Cu kabul edildiğinde toplam 65 milyon ton cevherden 0,82 milyon ton bakır elde edilebilmektedir. Ancak eşik tenör %0,58 Cu'ya düşürüldüğünde cevherin tonajı 1,1 milyar ton ve bakır içeriği 6,38 milyon ton olmaktadır (Schodde, 2010). Eşik tenördeki düşüşle ters orantılı olarak bakır fiyatları da 20. ve 21. Yüzyıllarda artmaya devam etmiştir. Temmuz 1959 itibariyle 639 USD/t olan metalik bakır Mayıs 2024 tarihinde rekor bir seviye olan 11.199 USD/t seviyesine yükselmiş ve Ağustos 2024'de 8769,50 USD/t değerine erişmiştir (https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Summary).



Şekil 4.2 Sahadaki arama sondajlarının görünümü (Güneybatıya izometrik bakış)

Umman'daki bir polimetal cevher yatağının açık işletme yöntemi ile çalıştırılmasına dönük yapılan fizibilitede eşik tenör %0,35 Cu alınmıştır (Japan International Cooperation Agency, 1990). Hindistan'ın Madhya Pradesh eyaletinde bulunan yıllık 2 milyon ton cevher üretme kapasitesine sahip açık bakır ocağındaki yatağın ortalama tenörü %1,31 Cu ve eşik tenörü %0,45 Cu olarak verilmiştir (Indian Minerals Yearbook, 2016, 2019). Diğer yandan Maleki vd. (2016), İran'daki Sarcheshmeh açık bakır ocağı için yaptıkları optimizasyonda cevherin eşik tenörünü %0,1617 olarak belirlemişlerdir.

Cevher yatağındaki bakır tenörlerinin dağılımı Şekil 4.3'deki histogramda, cevher analizlerine dönük istatistiksel veri Çizelge 4.1'de verilmiştir. %0,20 Cu altındaki az sayıda analiz, cevher yatağının görece küçük bir bölümünün düşük tenörlü olduğuna işaret etmektedir. Bu bilgi ile çalışma yapılan bölgenin İran'daki Sarcheshmeh ocağı ile benzerlik gösterdiği kabul edildiğinde modellemede dikkate alınacak eşik (cut-off) bakır tenörünün %0,20 olarak belirlenmesine karar verilmiştir. Eşik tenör değeri literatüre kıyasla düşük olmakla birlikte günümüzde 8769,50 US$/ton mertebesinde olan metalik bakır fiyatlarının %0,20 Cu tenörüne kadar cevherin ekonomik açıdan kârlı şekilde işletilmesini mümkün kılacağı kabul edilmiştir. Daha düşük tenörlü bloklar pasa olarak kabul edilecek ve döküm harmanına gönderilecektir.



CU	
Minimum Value	0.100
Maximum Value	9.860
2nd Highest	7.250
3rd Highest	6.680
4th Highest	6.630
N	7283
Mean	1.087
Variance	1
Standard Deviation	1
Coeff. of Variation	0.92
Median	0.790
Lognormal Mean	-0.297
Lognormal Std Deviation	0.896
Geometric Mean	0.743
Geometric Std Dev	2.45
Sichel's Estimator	1.11
Sichel's V	0.803
Sichel's Gamma	1.49
Experimental Chi²	908.765
Degrees of Freedom	57

Şekil 4.3 Bakır analizlerinin tenör histogramı

Bakır tenörlerinin sondajlar boyunca dağılımı da Şekil 4.4'de verilmiştir. Maden sahasında cevherin yankayaçları arasında granodiyorit, biyotit ve andezit bulunmaktadır.

Bakır cevheri porfiri yapıda olup yüzeye yakın yataklanmış halde iken taban kayacı genellikle andezittir (Şekil 4.5).

Çizelge 4.1 Sondajlarda kesilen bakır cevherine dönük istatistiksel veriler

Analiz Sayısı	: 7283	Varyans	: 1,0
En düşük tenör	: %0,100 Cu	Lognormal ortalama	: %-0,297 Cu
En yüksek tenör	: %9,860 Cu	Lognormal standart sapma	: %0,896 Cu
Ortalama tenör	: %1,087 Cu	Geometrik ortalama	: % 0,743 Cu
Medyan	: %0,790 Cu	Geometrik standart sapma	: 2,450
Standart sapma	: 1,0	Sichel kestirimi	: 1,11

4.2 Katı Gövde Modellemesi

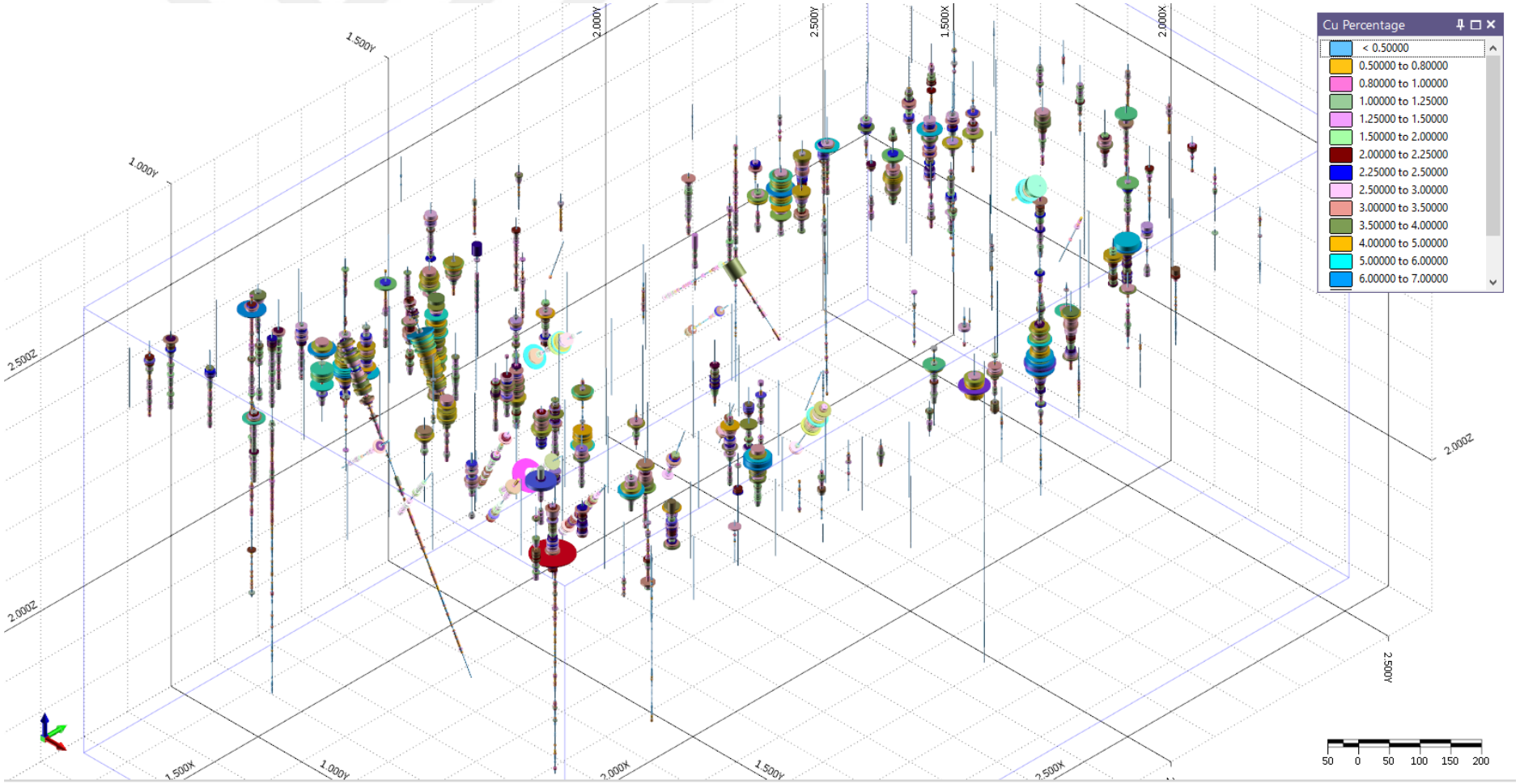
Sahadaki cevher doğrultusu K10°, doğrultu boyunca cevher gövdesi dalımı ise 3°'dir. Mevcut sondajlardan K100° boyunca BKB-DGD doğrultulu kesitler alındığında cevher gövdesi eğimi de 4° olarak belirlenmiştir.

Cevher bloklarına tenör değerlerinin atanması için öncelikle mineral/kayaç tabakalarının katı gövde modelleri çıkartılmalıdır. Bu da bir arama elipsoidinin tüm boyutları ile tanımlanmasını gerektirir (Hasözdemir, 2019). Arama elipsoidi eksenlerini denetleyen parametreler; doğrultu (strike), eğim yönü (dip direction), eğim (dip) ve doğrultu boyunca dalımdır (pitch, plunge). Öte yandan, elipsoidin sahip olması gereken sektör adedi, beher sektörün yakalaması gereken en fazla sayıda analiz ile elipsoidin yakalaması gereken en az sayıdaki toplam analiz adetlerine de karar verilmiş ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Katı gövde modellemesi işleminde kullanılacak olan arama elipsoidinin sondajlar içindeki uzanımı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

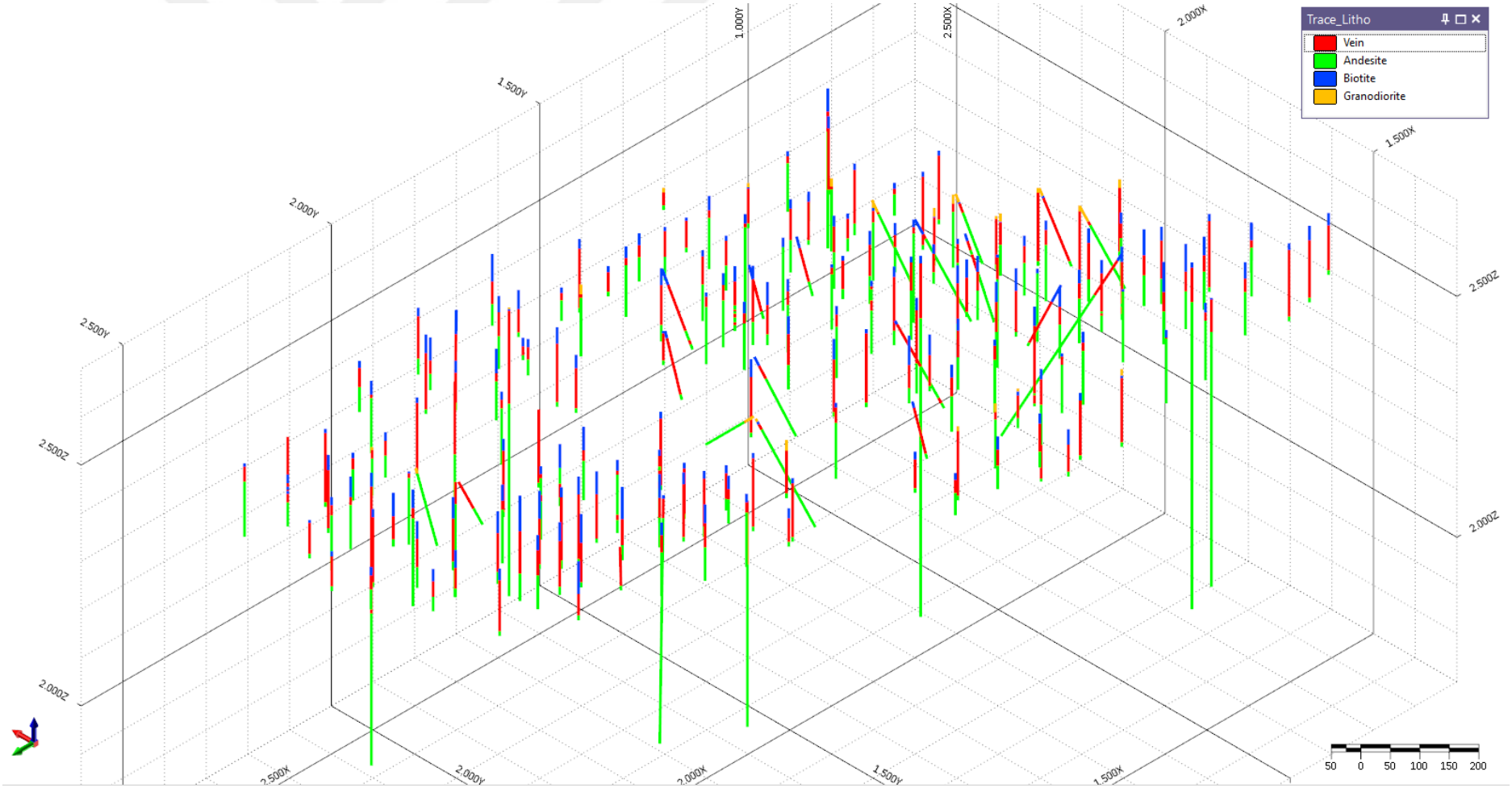
Çizelge 4.2 Veri parametreleri doğrultusuna oluşan arama elipsoidi geometrisi

Sektör başına en çok nokta adedi	Elipsoid için en az nokta adedi	Eksen1 (m)	Eksen2 (m)	Eksen3 (m)	Doğrultu (°)	Dalım (°)	Eğim (°)
10	4	150	100	75	K10	3	4

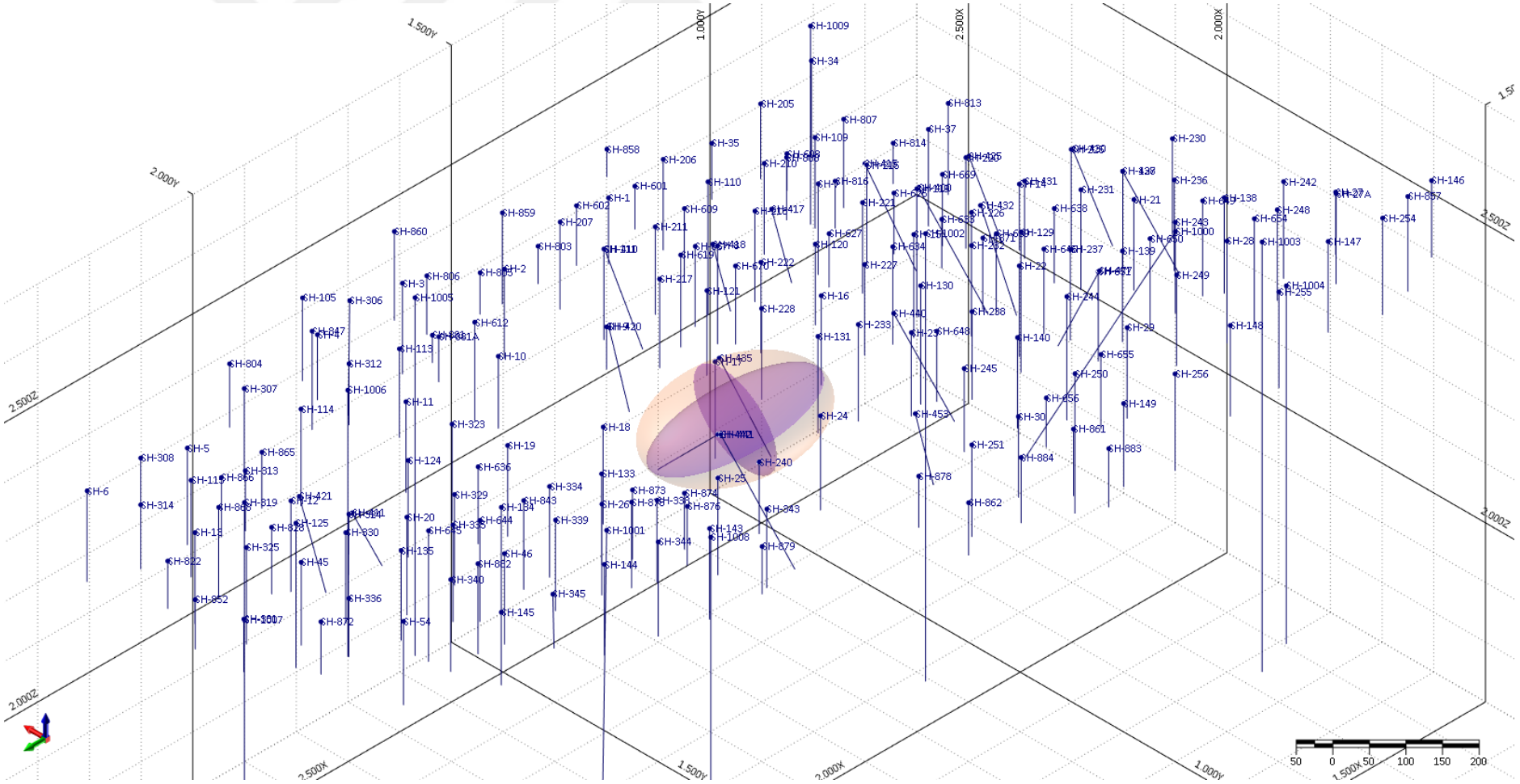
Yukarıdaki hazırlanmış elipsoit yardımıyla sahada yapılmış bütün sondajların değerleri yakalanmış olup tüm katmanların katı gövde modeli oluşturulmuştur. Bu yöntem ile cevher katı gövde modelinin özellikleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7'de, yankayaç tabakalarının da aralarında bulunduğu tüm katı gövde modellerinden alınan kesitler Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



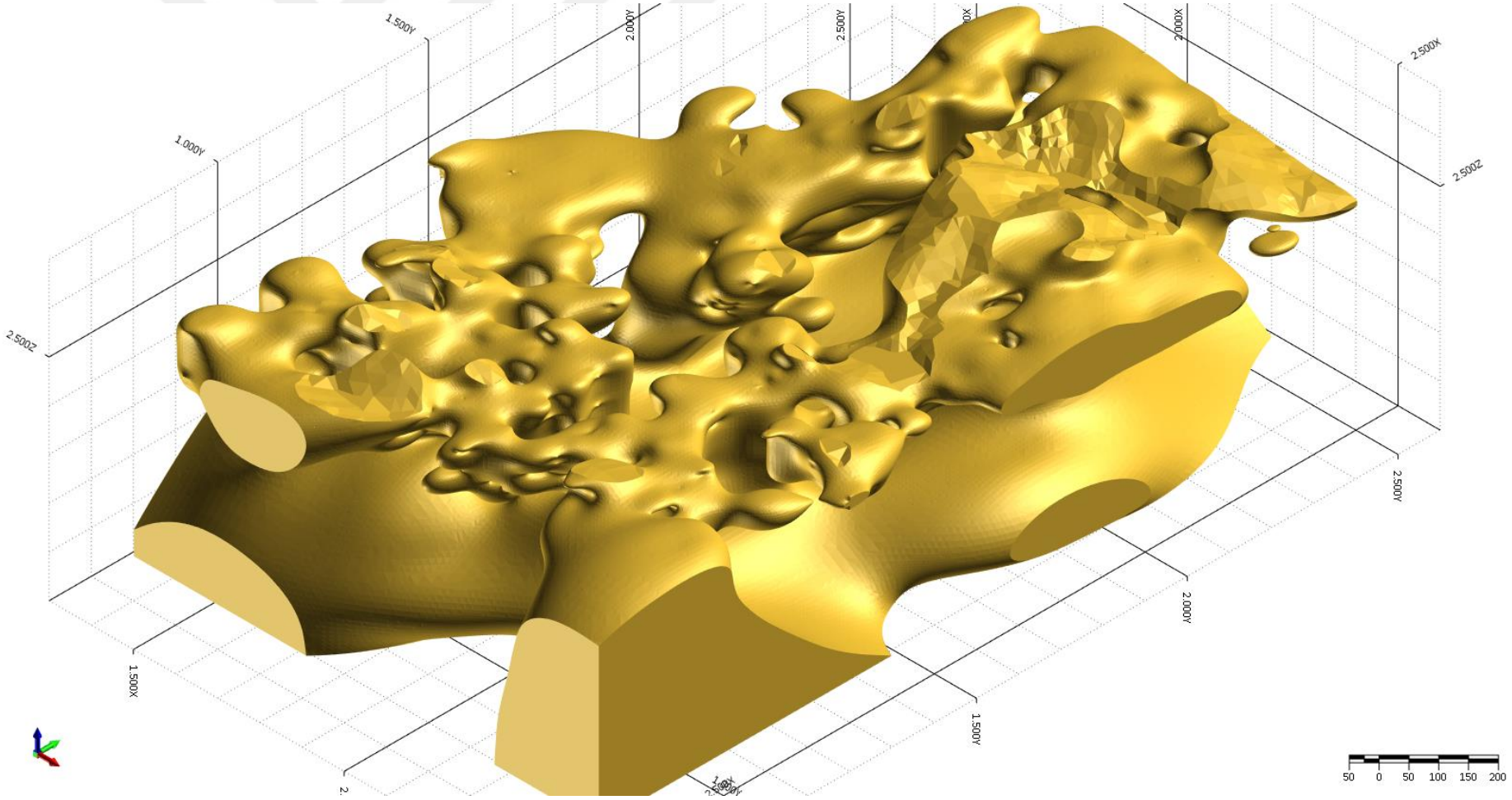
Şekil 4.4 Cevher tenörünün sondajlar boyunca dağılımı (Kuzeybatıya izometrik bakış)



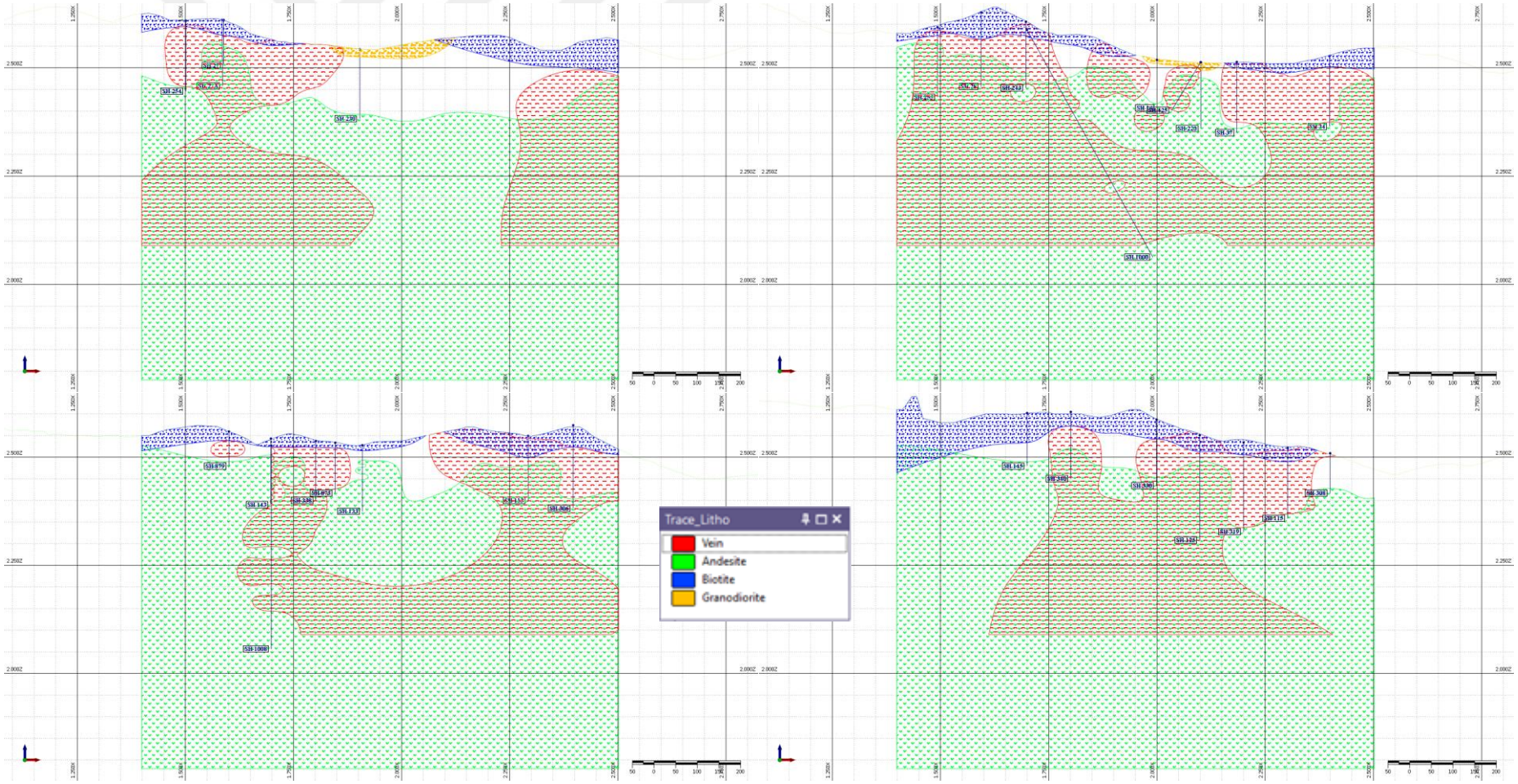
Şekil 4.5 Cevher yatağında kesilen kayaç tabakaları (Güneydoğuya izometrik bakış)



Şekil 4.6 Tasarlanmış arama elipsoidi ve sondajlar ile görünümü (Güneydoğuya izometrik bakış)



Şekil 4.7 Cevher katı gövde modeli (Kuzeybatıya izometrik bakış)



Şekil 4.8 Katı gövde modellerinden alınmış kesitler

Çizelge 4.3 Cevher katı gövde modelinin özellikleri

Telkafes	X_{min} (m)	X_{max} (m)	Y_{min} (m)	Y_{max} (m)	Z_{min} (m)	Z_{max} (m)	Hacim (m^3)
Cevher	1398	2502	702	2501	2090	2620	457.073.701

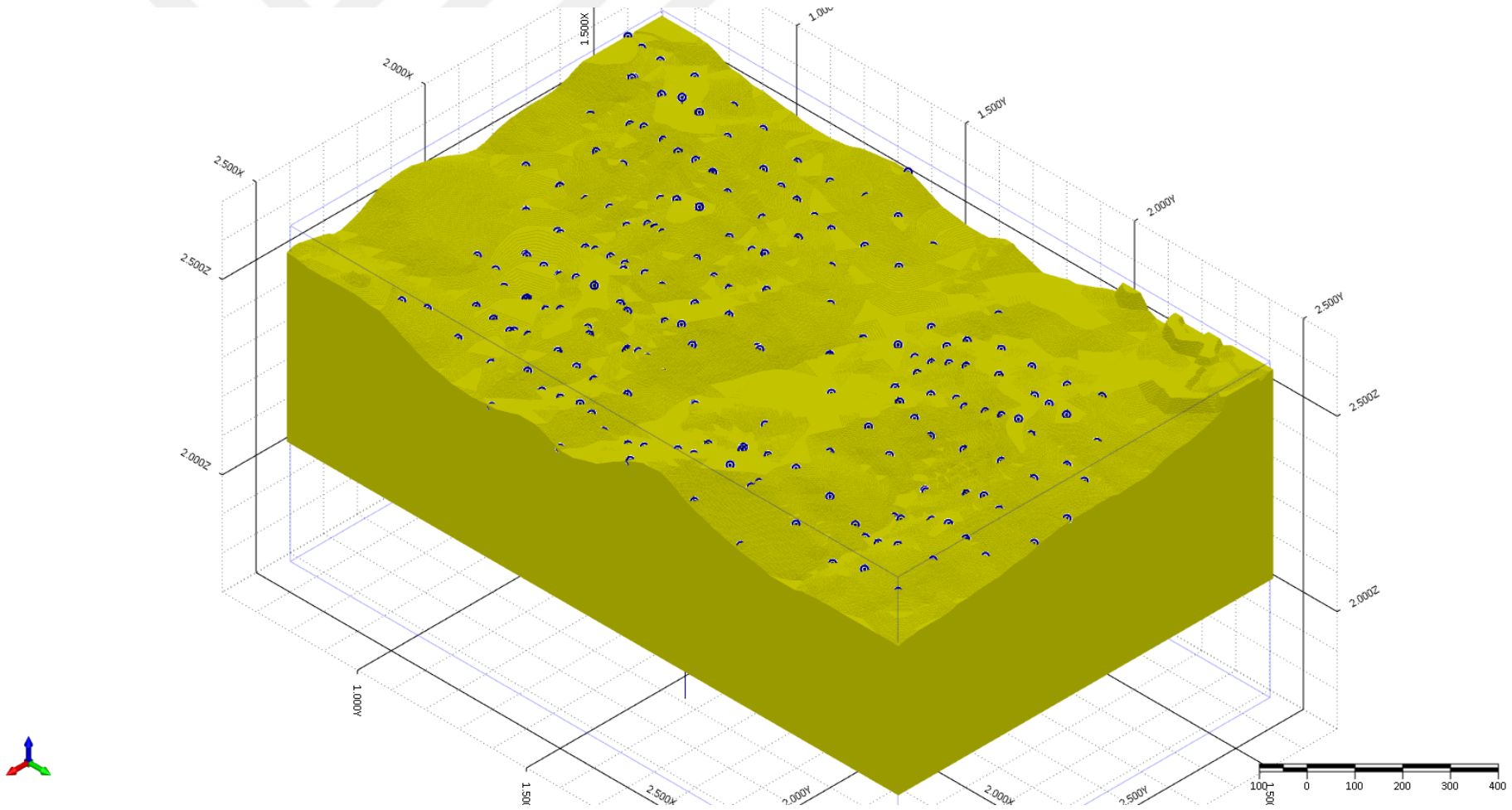
4.3 Boş blok ve Jeolojik Blok Modellemesi

Blok modeli, maden yatağındaki (cevher ve atık) küçük hacimli olan kayaları temsil eden, bilgisayar tarafından üretilen "blokların" bir yığını olarak düşünülebilecek cevher ve çevresinin basitleştirilmiş bir temsilidir. Her blok veya hücre tenör, yoğunluk ve diğer jeolojik veya mühendislik değişkenlerinin değerleri gibi veri tahminlerini içerir.

Bir blok modelin hücreleri, bir XYZ ızgara sisteminde düzenlenmekte ve hücreler, çevreleyen diğer birimlerle uyum sağlamak amacıyla tek tip veya düzensiz boyutta olabilmektedir. Maden planlama yazılımlarında bloklara farklı kestirim yöntemleriyle tenör atanabilmektedir. Bunlar arasında en yakın komşu, ters mesafe ile ağırlıklandırma ve krigleme yöntemleri en sıklıkla başvurulanlar arasındadır.

Bu tez çalışmasında, açık ocaktaki basamak yüksekliği de dikkate alınarak boş bloğun hücrelerinin boyutları X, Y ve Z eksenleri boyunca 10 m alınmıştır. Ancak blok kütlesinin özellikle topografya ile kesiştiği yüzey boyunca daha uyumlu bir sınır elde etmek amacıyla bu bölgelerde blok kenarlarının ⅕ oranında küçültülmesine izin verilmiştir. Böylece tam boyutlardaki bir alt blok 10 m × 10 m × 10 m (1000 m^3) hacme ulaşabilecekken, sınır bölgelerindeki bir alt blok 2 m × 2 m × 2 m (8 m^3) hacme küçülebilecektir (Şekil 4.9).

Boş blok oluşturmanın asıl amacı, sahadaki istifi yansıtacak jeolojik blok için bir altlık hazırlamaktır zira boş blok olmaksızın jeolojik blok hazırlanamamaktadır. Jeolojik bloğu oluşturmak için sondajlarda kesilen farklı litolojik birimler boş blok ile kesiştirilmekte ve enterpolasyon yöntemiyle tüm jeolojik birimler alt bloklara atanmaktadır. Sondajlarda cevher, andezit, biyotit ve granodiyorit birimleri kesildiği için bu birimlerin jeolojik blokları çıkartılmıştır. Sondajlarda çok az sayıda örnek veren fay düzlemleri ya da toprak örtüsü gibi birimlerin modellenmesine gerek olmayabileceğinden bu birimlerin kapladığı hacimler, boş blokta adlandırıldıkları haliyle ‘kaya’ olarak tanımlanmaktadır. Bakır cevheri sahasında en sıklıkla karşılaşılan cevher ve andezit birimleri ile ‘kaya’ olarak tanımlanan diğer birimlere ait blok adetleri Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Boş blok model

Çizelge 4.4 Jeolojik bloğa ait birimlerin alt blok adetleri

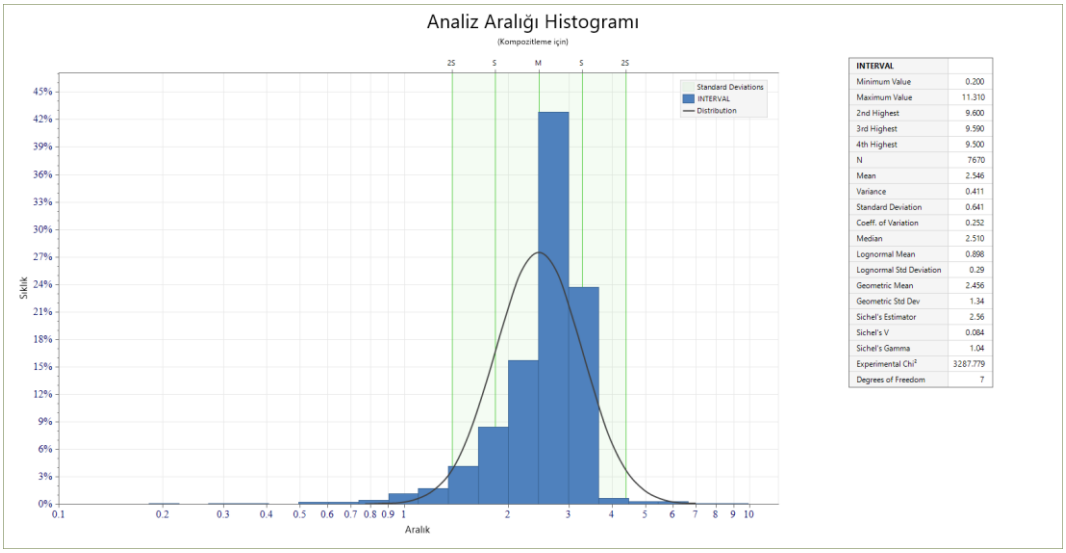
Andezit	Cevher	Diğer kayaçlar
2.023.014	863.535	1.723.149

4.4 Kaynak Kestirimi

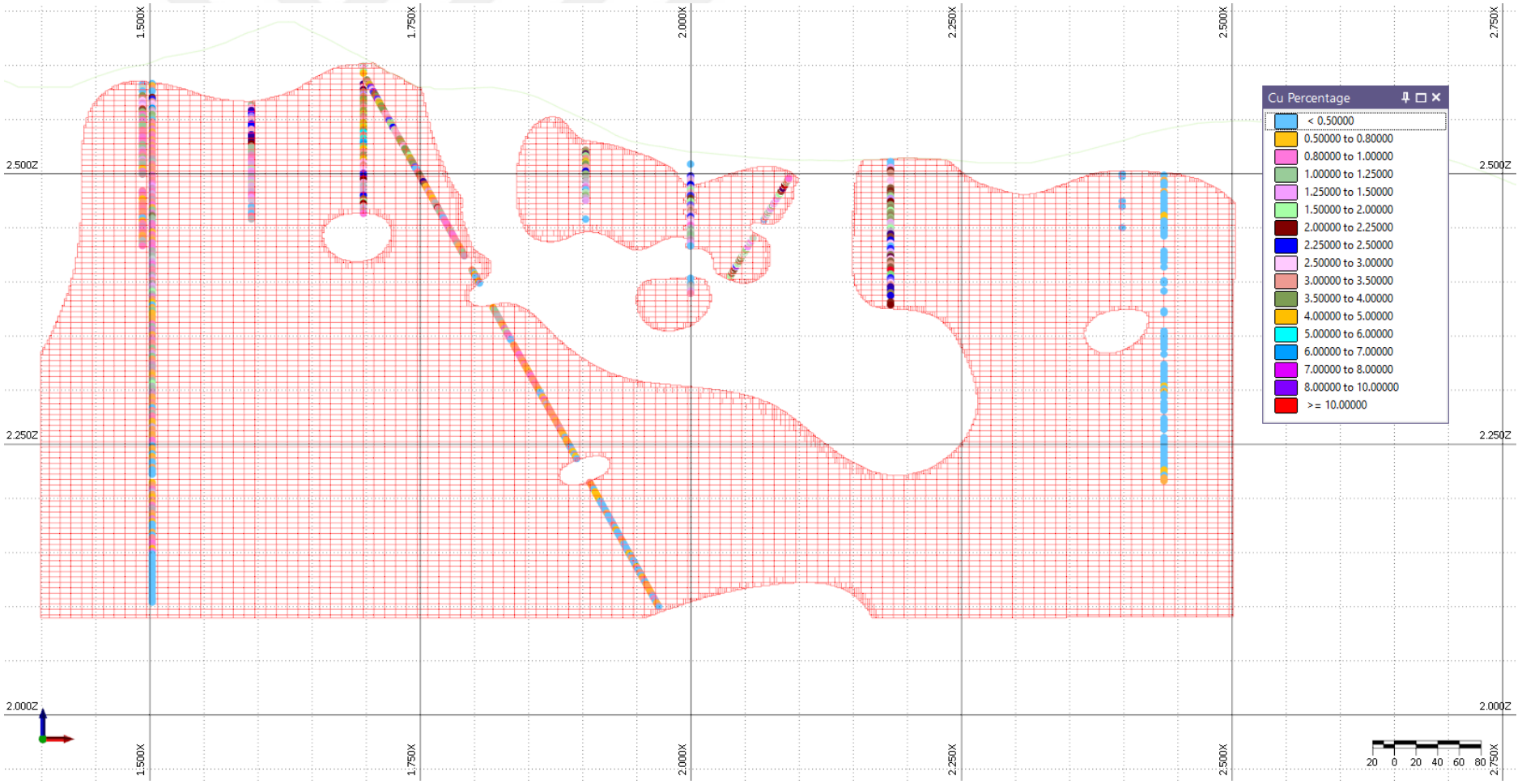
4.4.1 Kompozitleme işlemleri

Kaynak ya da rezerv kestirimleri kompozit veriler üzerinde yapıldığı için farklı uzunluktaki örnek değerleri eşit uzunluklu kompozit değerlerine dönüştürülmelidir (https://wiki.netcad.com.tr/pages/diffpagesbyversion.action?pageId=217911059&selectedPageVersions=1&selectedPageVersions=2). Ancak öncelikle analiz dosyasında (assay.dat) cevher gövdesi dışında kalan tenörlerin cevher bloğunu etkilememesi için bunların temizlenmesi gereklidir. Böylece kompozitleme işlemine yalnızca cevher gövdesi içinde kalan Cu tenörleri alınacaktır. Cevher içinde kalan Cu analiz verisi histogramı Şekil 4.10'da sunulmuş ve betimleyiciler aşağıda verilmiştir. Analiz aralığı aritmetik ortalaması ve medyanı 2,62 m ve 2,66 m olup veri normal dağılıma uygunluk göstermektedir. Böylece, kompozitleme için analiz aralığı 2,60 m kabul edilmiştir. Temizleme işlemi sonrasında oluşan yeni analiz dosyası (assay_in_vein.dat) kullanılarak cevher gövdesinden alınan bir kesit Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

- Veri Sayısı: 7670
- En kısa analiz aralığı: 0,20 m
- En uzun analiz aralığı: 50,0 m
- Ortalama analiz aralığı: 2,62 m
- Standard Sapma: 1,43
- Medyan: 2,66 m
- Geometrik ortalama: 2,50 m
- Geometrik standart sapma: 1,34
- Lognormal ortalama: 0,92
- Lognormal standart sapma: 0,29



Şekil 4.10 Kompozitleme için analiz aralığı histogramı



Şekil 4.11 Kompozitleme için cevherin gövdesi içinde kalan Cu tenörleri (Kuzeye bakış)

4.4.2 Ters mesafe ile ağırlıklandırma (IDW) ile modelleme

Ters mesafe ile ağırlıklandırma (IDW) sıklıkla kullanılan yöntemlerdendir. Bu çalışmada kompozitlenmiş analiz verisi kullanılarak IDW yöntemi ile cevher bloklarına tenör atanması yapılmıştır. Arama elipsoidine ait parametre değerleri ölçülmüş, belirlenmiş ve potansiyel kaynak türleri için Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 IDW kestirim algoritmasında kullanılan parametre değerleri

Kategori	Kuyu (adet)	Sektör başına veri	En az veri adedi	Arama Elipsoidi					
				Eksen-1 (m)	Eksen-2 (m)	Eksen-3 (m)	Azimut (°)	Dalım (°)	Eğim (°)
Ölçülmüş	≥2	≤8	≥2	50	40	25	10	3	4
Belirlenmiş	-	≤8	-	100	80	50	10	3	4
Potansiyel	-	≤8	-	150	120	75	10	3	4

Bakır cevheri kaynağının IDW kestirim algoritması kullanılarak tenör aralıkları bazında hesaplanan hacim ve tonajı Çizelge 4.6'da, anizotropik IDW ile cevher kaynağının kaynak kategorisi bazında blok modeli Şekil 4.12'de, bakır tenörü kaynağının blok modeli Şekil 4.13'de verilmiştir. Yatakta ortalama %0,74 Cu tenörüne sahip 1.057.972.927 t bakır cevheri ve buradan üretilebilecek 7.912.802 t metalik bakır bulunmaktadır. Kaynağın %53,63'lük en büyük bölümü güvenilirliği en düşük olan potansiyel kategoride, %41,71'lik diğer bölümü ise belirlenmiş kategoride yer almaktadır. Kaynağın yalnızca %4,66'lık kısmı yüksek güvenilirliğe sahip ölçülmüş kategorisindedir. Buradan, arama elipsoidinin sahaya göre küçük kaldığı ve ölçülmüş kategorisinin gerektirdiği koşulları sağlayabilen az sayıda analiz yakalayabildiği görülmektedir. Elipsoidin boyutları doğrultu ve eğim yönü boyunca sondaj grupları arasındaki ortalama mesafe gözetilerek belirlendiği için sondaj aralıklarının daraltılması ile kaynağın daha büyük bölümünün ölçülmüş kategoriye geçebileceği değerlendirmesi yapılmıştır. Sahadaki birkaç sondajın çok derin olması cevher bloğunun boyutlarını artırmıştır. Blok sığ derinlik ile sınırlanmış olsaydı, sondajların bulunmadığı kesimlerdeki potansiyel kategorisindeki kaynak miktarı önemli ölçüde azalmış olabilecekti.

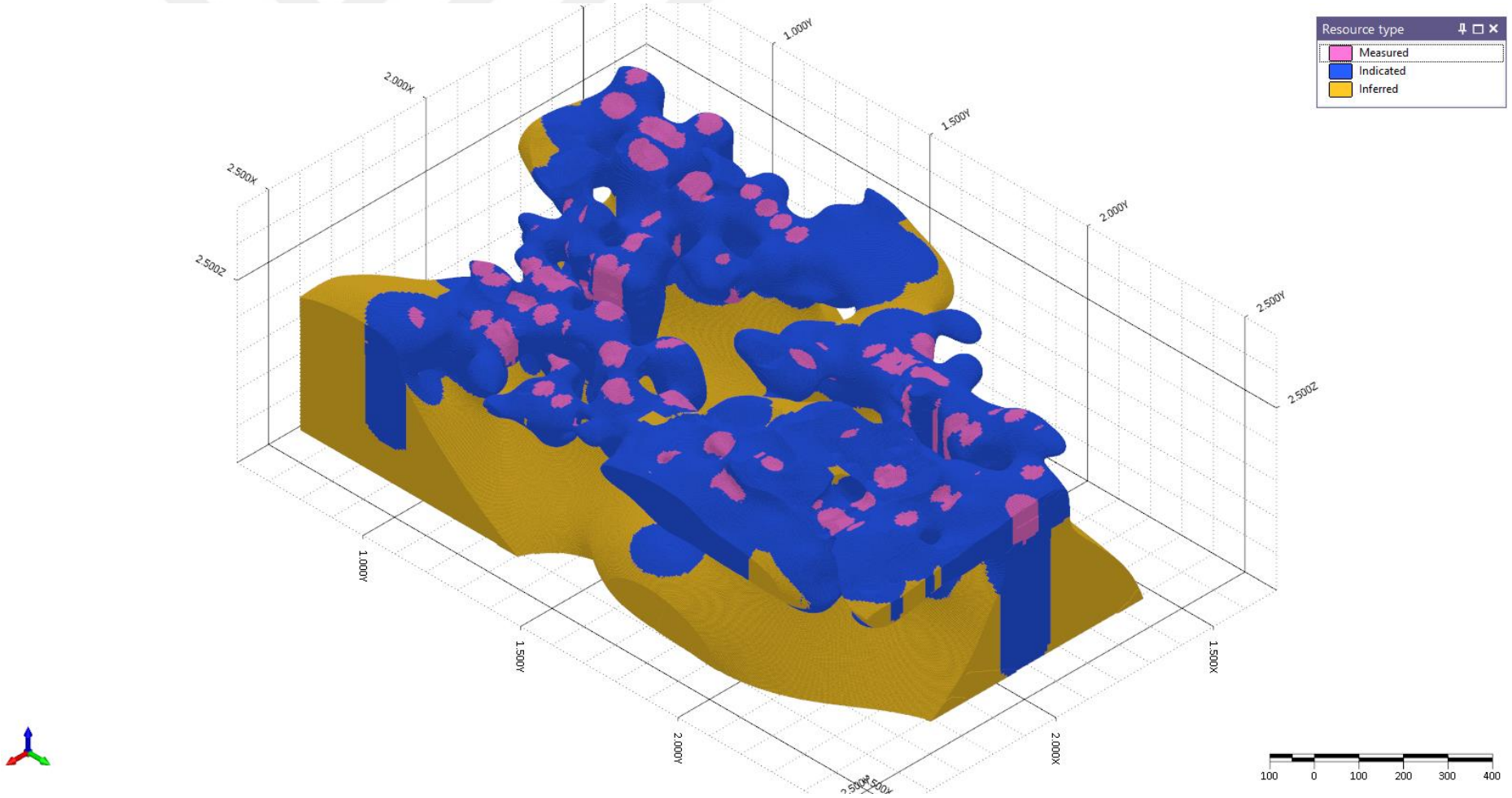
Kaynak bütün halinde değerlendirildiğinde en büyük bölüm, 419.740.420 t cevher ile %0,25 - %0,50 Cu tenör aralığından sağlanmaktadır. Bu durum belirlenmiş ve potansiyel kategorileri için de geçerlidir. Ancak ölçülmüş kategorisindeki en büyük kaynak %0,75 - %1,0 Cu tenör aralığından gelmektedir. Sahanın düşük tenörlü bir bakır cevheri kaynağını barındırdığı söylenebilir. Keza, kaynak miktarları düşük tenör aralıklarından yükseğe doğru ilerlendikçe belirgin biçimde azalmaktadır.

Çizelge 4.6 Bakır kaynağının IDW kestirim algoritması ile kaynak türü bazında hesaplanan değerleri

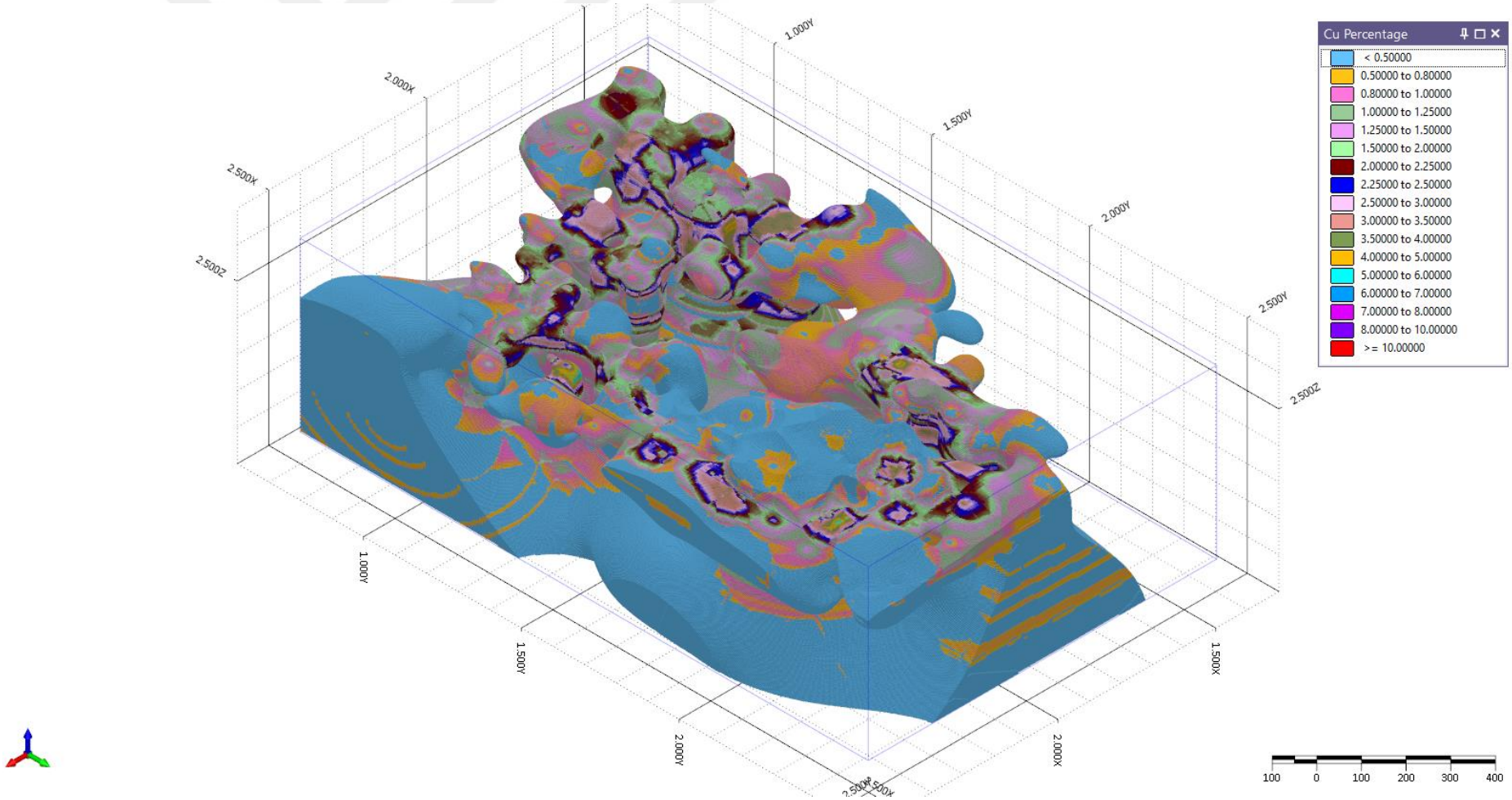
Alt tenör (%)	Üst tenör (%)	Kaynak hacmi (m³)	Yoğunluk (t/m³)	Kaynak tonajı (t)	Tenör (%)	Bakır tonajı (t)	Birikimli					Kaynak Türü
							Kaynak hacmi (m³)	Kaynak tonajı (t)	Yoğunluk (t/m³)	Tenör (%)	Bakır tonajı (t)	
5,00	7,00	4.792	2,75	13.178	5,19	683,51	4.792	13.178	2,75	5,18	683,51	Ölçülmüş
4,50	5,00	16.588	2,75	45.617	4,72	2.155,01	21.380	58.795	2,75	4,82	2.838,52	Ölçülmüş
4,00	4,50	44.528	2,75	122.452	4,17	5.110,10	65.908	181.247	2,75	4,38	7.948,61	Ölçülmüş
3,50	4,00	205.912	2,75	566.258	3,70	20.952,99	271.820	747.505	2,75	3,86	28.901,60	Ölçülmüş
3,00	3,50	618.864	2,75	1.701.876	3,22	54.780,74	890.684	2.449.381	2,75	3,41	83.682,34	Ölçülmüş
2,50	3,00	967.988	2,75	2.661.967	2,74	72.999,90	1.858.672	5.111.348	2,75	3,06	156.682,20	Ölçülmüş
2,00	2,50	1.380.720	2,75	3.796.980	2,22	84.372,36	3.239.392	8.908.328	2,75	2,70	241.054,60	Ölçülmüş
1,75	2,00	2.565.468	2,75	7.055.037	1,73	122.397,40	5.804.860	15.963.365	2,75	2,27	363.452,00	Ölçülmüş
1,25	1,50	1.648.236	2,75	4.532.649	1,37	62.087,24	7.453.096	20.496.014	2,75	2,07	425.539,30	Ölçülmüş
1,00	1,25	2.383.064	2,75	6.553.426	1,11	72.958,91	9.836.160	27.049.440	2,75	1,84	498.498,20	Ölçülmüş
0,75	1,00	3.401.844	2,75	9.355.071	0,87	81.559,75	13.238.004	36.404.511	2,75	1,59	580.057,90	Ölçülmüş
0,50	0,75	2.489.676	2,75	6.846.609	0,63	42.893,32	15.727.680	43.251.120	2,75	1,44	622.951,20	Ölçülmüş
0,25	0,50	2.187.336	2,75	6.015.174	0,38	22.651,33	17.915.016	49.266.294	2,75	1,31	645.602,60	Ölçülmüş
5,00	7,00	35.396	2,75	97.339	5,29	5.154,06	35.396	97.339	2,75	5,29	5.154,06	Belirlenmiş
4,50	5,00	49.212	2,75	135.333	4,74	6.415,09	84.608	232.672	2,75	4,97	11.569,15	Belirlenmiş
4,00	4,50	107.888	2,75	296.692	4,19	12.459,14	192.496	529.364	2,75	4,53	24.028,30	Belirlenmiş
3,50	4,00	483.536	2,75	1.329.724	3,70	49.214,90	676.032	1.859.088	2,75	3,93	73.243,19	Belirlenmiş
3,00	3,50	1.139.812	2,75	3.134.483	3,20	100.577,70	1.815.844	4.993.571	2,75	3,48	173.820,90	Belirlenmiş
2,50	3,00	2.590.340	2,75	7.123.435	2,70	192.546,30	4.406.184	12.117.006	2,75	3,02	366.367,20	Belirlenmiş
2,00	2,50	5.301.124	2,75	14.578.091	2,22	324.858,30	9.707.308	26.695.097	2,75	2,58	691.225,50	Belirlenmiş
1,75	2,00	10.107.224	2,75	27.794.866	1,72	478.391,40	19.814.532	54.489.963	2,75	2,14	1.169.617,00	Belirlenmiş
1,25	1,50	9.579.776	2,75	26.344.384	1,36	359.784,50	29.394.308	80.834.347	2,75	1,89	1.529.401,00	Belirlenmiş
1,00	1,25	16.156.936	2,75	44.431.574	1,11	494.437,70	45.551.244	125.265.921	2,75	1,61	2.023.839,00	Belirlenmiş
0,75	1,00	30.090.368	2,75	82.748.512	0,86	717.198,70	75.641.612	208.014.433	2,75	1,31	2.741.038,00	Belirlenmiş
0,50	0,75	39.144.964	2,75	107.648.651	0,63	680.453,20	114.786.576	315.663.084	2,75	1,08	3.421.491,00	Belirlenmiş
0,25	0,50	45.675.564	2,75	125.607.801	0,37	468.075,70	160.462.140	441.270.885	2,75	0,88	3.889.567,00	Belirlenmiş

Çizelge 4.6 Bakır kaynağının IDW kestirim algoritması ile kaynak türü bazında hesaplanan değerleri (devam ediyor)

Alt tenör (%)	Üst tenör (%)	Kaynak hacmi (m^3)	Yoğunluk (t/m^3)	Kaynak tonajı (t)	Tenör (%)	Bakır tonajı (t)	Birikimli					Kaynak Türü
							Kaynak hacmi (m^3)	Kaynak tonajı (t)	Yoğunluk (t/m^3)	Tenör (%)	Bakır tonajı (t)	
5,00	7,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Potansiyel
4,50	5,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Potansiyel
4,00	4,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Potansiyel
3,50	4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Potansiyel
3,00	3,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Potansiyel
2,50	3,00	9.868	2,75	27.137	2,57	696,52	9.868	27.137	2,75	2,56	696,52	Potansiyel
2,00	2,50	183.660	2,75	505.065	2,19	11.069,62	193.528	532.202	2,75	2,21	11.766,14	Potansiyel
1,75	2,00	7.402.148	2,75	20.355.907	1,63	332.465,90	7.595.676	20.888.109	2,75	1,64	344.232,00	Potansiyel
1,25	1,50	3.642.728	2,75	10.017.502	1,37	137.308,50	11.238.404	30.905.611	2,75	1,55	481.540,50	Potansiyel
1,00	1,25	6.815.452	2,75	18.742.493	1,12	210.107,70	18.053.856	49.648.104	2,75	1,39	691.648,20	Potansiyel
0,75	1,00	20.195.240	2,75	55.536.910	0,84	468.964,80	38.249.096	105.185.014	2,75	1,10	1.160.613,00	Potansiyel
0,50	0,75	63.321.196	2,75	174.133.289	0,63	1.101.420,00	101.570.292	279.318.303	2,75	0,80	2.262.033,00	Potansiyel
0,25	0,50	104.769.980	2,75	288.117.445	0,39	1.115.600,00	206.340.272	567.435.748	2,75	0,59	3.377.633,00	Potansiyel
5,00	7,00	40.188	2,75	110.517	5,28	5.837,50	40.188	110.517	2,75	5,28	5.837,50	Tümü
4,50	5,00	65.800	2,75	180.950	4,73	8.570,10	105.988	291.467	2,75	4,94	14.407,67	Tümü
4,00	4,50	152.416	2,75	419.144	4,19	17.569,20	258.404	710.611	2,75	4,49	31.976,90	Tümü
3,50	4,00	689.448	2,75	1.895.982	3,70	70.167,80	947.852	2.606.593	2,75	3,91	102.144,70	Tümü
3,00	3,50	1.758.676	2,75	4.836.359	3,21	155.358,40	2.706.528	7.442.952	2,75	3,45	257.503,20	Tümü
2,50	3,00	3.568.196	2,75	9.812.539	2,71	266.242,70	6.274.724	17.255.491	2,75	3,03	523.745,90	Tümü
2,00	2,50	6.865.504	2,75	18.880.136	2,22	420.300,30	13.140.228	36.135.627	2,75	2,61	944.046,20	Tümü
1,75	2,00	20.074.840	2,75	55.205.810	1,69	933.254,70	33.215.068	91.341.437	2,75	2,05	1.877.301,00	Tümü
1,25	1,50	14.870.740	2,75	40.894.535	1,36	559.180,10	48.085.808	132.235.972	2,75	1,84	2.436.481,10	Tümü
1,00	1,25	25.355.452	2,75	69.727.493	1,11	777.504,30	73.441.260	201.963.465	2,75	1,59	3.213.985,50	Tümü
0,75	1,00	53.687.452	2,75	147.640.493	0,85	1.267.723,20	127.128.712	349.603.958	2,75	1,28	4.481.708,70	Tümü
0,50	0,75	104.955.836	2,75	288.628.549	0,63	1.824.766,60	232.084.548	638.232.507	2,75	0,98	6.306.475,30	Tümü
0,25	0,50	152.632.880	2,75	419.740.420	0,38	1.606.326,70	384.717.428	1.057.972.927	2,75	0,74	7.912.802,00	Tümü



Şekil 4.12 Anisotropic IDW ile kaynak kategorisi bazında cevher kaynağının blok modeli (Güneybatıya izometrik bakış)



Şekil 4.13 Anisotropic IDW ile bakır tenörü bazında cevher kaynağının blok modeli (Güneybatıya izometrik bakış)

4.5 Ocak Optimizasyonu

4.5.1 Nihai ocak optimizasyonu

Bu bölümde, Bakır kaynağının kazançlı biçimde işletilebilmesine dönük olarak nihai ocak sınırlarının oluşturulması amaçlanmıştır. Lerchs-Grosmann optimizasyon algoritması kullanılarak bakır kaynağının en büyük kısmının net bugünkü değerini enbüyükleyecek optimum ocak geometrisi seçilmektedir. Bu amaca yönelik olarak tipik bir açık bakır ocağının gelir ve maliyet figürlerine erişebilmek amacıyla benzer işletmelerden bu değişkenlere ait bilgi ve veri edinilmiştir. Yine de bu verinin gerçek işletme koşullarını temsil etmeyebileceği not edilmelidir. Optimizasyon sürecinde kullanılan girdi parametreleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Bakır açık ocağı 120°'lik merkez açıların gördüğü 3 jeoteknik bölgeye ayrılmış ve bu bölgelerin genel şev açıları, K0°-K120° için 45°, K120°-K240° için 41° ve K240°-K360° için 40° olarak girilmiştir. Ancak bu varsayım herhangi bir jeoteknik çalışmaya dayanmamakta olup takip eden süreçte yapılacak şev duraylılığı analizleri sonucunda elde edilecek daha gerçekçi açılar ile tekrar düzenlenmesi uygun olacaktır.

Nihai ocağın optimizasyonu sonucunda üretim, gelir ve tenör gibi parametrelere ait değerler Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Nihai ocak optimizasyonunda kullanılan girdi parametresi değerleri

İşletme maliyeti (cevher, US$/m³)	5,0
İşletme maliyeti (pasa, US$/m³)	5,0
Çevre düzenleme maliyeti (US$/t)	0,0
İşletme maliyeti ayar katsayısı (cevher MCAF)	1,0
Çevrenin düzenlemesinin maliyeti ayar katsayısı (RCAF)	1,0
Cevher yoğunluğu (t/m³)	2,70
Pasa yoğunluğu (t/m³)	2,75
İşletme aşamasında cevher seyrelmesi (%)	10
İşletme aşamasında cevher kazanımı (%)	90
İşletme şev açısı (°, yakalar bazında)	45°, 41°, 40°
Cevherin zenginleştirmesinin maliyeti (US$/t)	65
Genel ve idari giderler (US$/t)	6,5
Zenginleştirme maliyeti ayar katsayısı (PCAF)	1,0
Zenginleştirmede cevher kazanımı (%)	75
Zenginleştirilmiş metalik cevherin satış fiyat (US$/t)	8975
Satış maliyeti (US$/t)	10,0

Çizelge 4.8 Nihai ocak optimizasyon sonuçları

Ocak taban kotu (m)	2280
Ocak tavan kotu (m)	2685
Yerinde hacim (m³)	123.634.127,607
Çıkartılan seyrelmiş hacim (m³)	123.634.127,607
Yerinde cevher hacmi (m³)	36.884.296,993
Çıkartılan seyrelmiş cevher hacmi (m³)	36.515.454,023
Yerinde pasa hacmi (m³)	86.749.830,614
Çıkartılan seyrelmiş pasa hacmi (m³)	87.118.673,584
Yoğunluk (t/m³)	2,7351
Bakır cevheri yoğunluğu (t/m³)	2,700
Pasa yoğunluğu (t/m³)	2,750
Yerinde toplam kütle (t)	338.149.636,068
Çıkartılan toplam seyrelmiş kütle (t)	338.149.636,068
Örtükazı oranı (t/t)	2,4298
Yerinde cevher kütlesi (t)	99.587.601,880
Çıkartılan seyrelmiş cevher kütlesi (t)	98.591.725,861
Yerinde pasa kütlesi (t)	238.562.034,188
Çıkartılan seyrelmiş pasa kütlesi (t)	239.557.910,207
İşletme maliyeti-toplam (USD)	618.170.638
İşletme maliyeti-cevher (USD)	184.421.485
İşletme maliyeti-pasa (USD)	433.749.153
Cevher zenginleştirme maliyeti (USD)	6.408.462.181
İlave cevher zenginleştirme maliyeti (USD)	-
Genel ve idari maliyetler (USD)	640.846.218
Satış maliyeti (USD)	12.869.652
Çevre düzenleme maliyeti (USD)	-
Toplam maliyet (USD)	7.680.348.689
Toplam gelir (USD)	11.550.512.671
Net değeri (USD)	3.870.163.981
Cu_Yerinde kütle (t)	2.456.924,357
Cu_Yerinde cevher kütlesi (t)	1.906.615,111
Cu_Çıkartılan seyrelmiş kütlesi (t)	2.211.231,922
Cu_Çıkartılan seyrelmiş cevher kütlesi (t)	1.715.953,600
Cu_Cevher hazırlama tesisinden çıkan kütle (t)	1.286.965,200
Cu_Yerinde kütle tenör	0,007
Cu_Yerinde cevher kütle tenörü	0,019
Cu_Seyrelten tenör	0,000
Cu_Yerinde çıkartılan kütle tenörü	0,007
Cu_Yerinde çıkartılan cevher kütle tenörü	0,017
Cu_Yerinde hacim bakımından (t/m³)	0,020
Cu_Yerinde cevher hacim bakımından (t/m³)	0,052
Cu_Çıkartılan seyrilmiş hacim bakımından (t/m³)	0,018
Cu_Çıkartılan seyrelmiş cevher hacmi bakımından (t/m³)	0,047
Cu_Gelir (USD)	11.550.512.671
MB_ Cu_Hacim (yerinde m³)	65.048.674,030
MB_ Cu_Çıkartılan seyrelmiş hacim (m³)	65.048.674,030
MB_ Cu_Yerinde kütle (t)	177.039.638,734
MB_ Cu_Çıkartılan seyrelmiş kütle (t)	177.039.638,734
MB_Cu_Maliyetler (USD)	7.387.421.421
MB_Cu_Gelir (USD)	11.550.512.671
MB_Cu_NetGelir (USD)	4.163.091.249
MB_Kaynağı belirsiz_Yerinde hacim (m³)	567.708,084
MB_Kaynağı belirsiz_Çıkartılan seyrelmiş hacim (m³)	567.708,084
MB_Kaynağı belirsiz_Yerinde kütle (t)	1.561.197,232
MB_Kaynağı belirsiz_Çıkartılan seyrelmiş kütle (t)	1.561.197,232
MB_Kaynağı belirsiz_Maliyetler (USD)	2.838.540
MB_Kaynak belirsiz_Gelir (USD)	-
MB_Kaynak belirsizi_Net gelir (USD)	-2.838.540

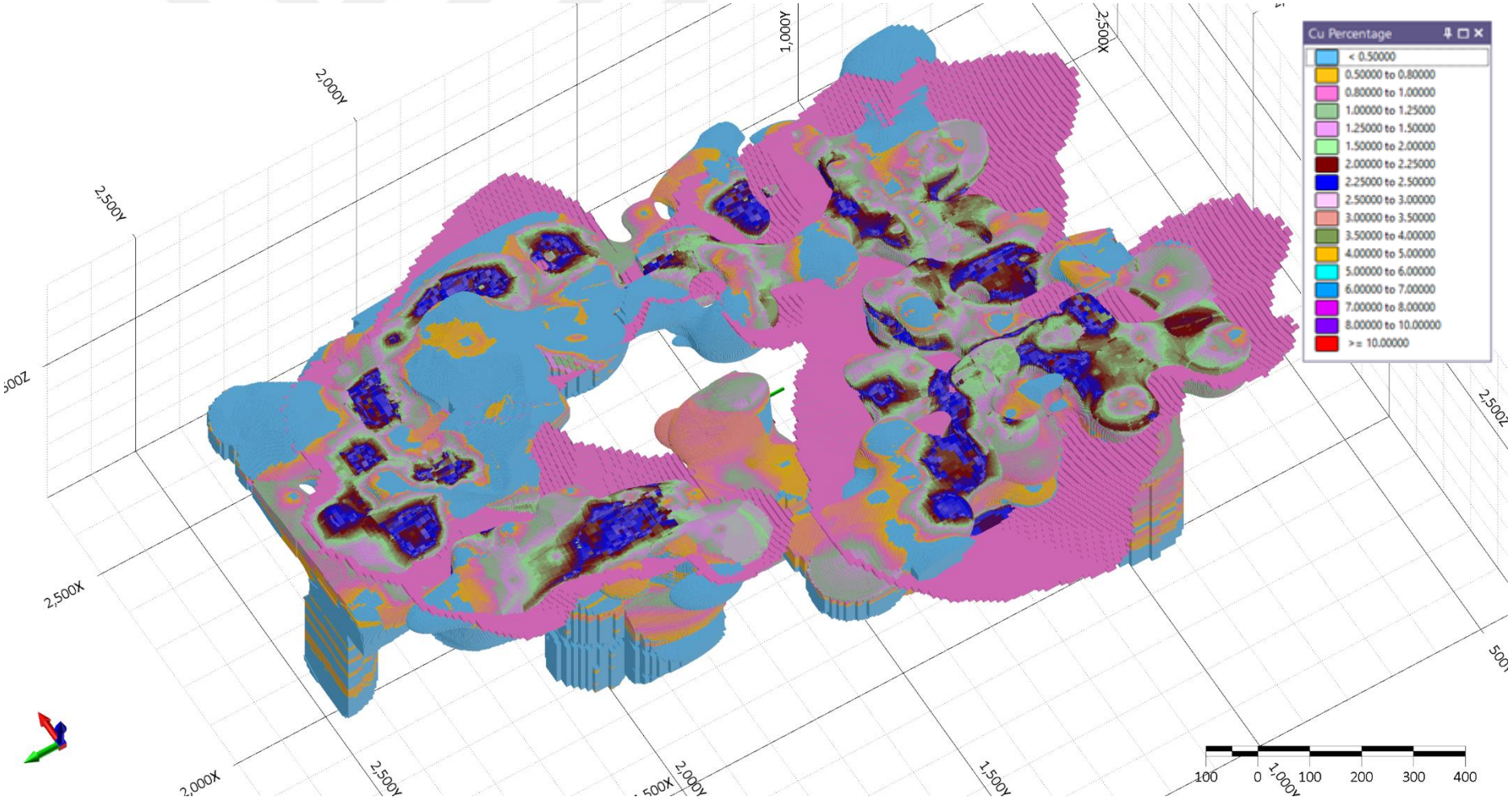
Şekiller 4.14 ve 4.15'deki izometrik ve kesit görüntüleri üzerinden izlenebilen nihai (ultimate) ocak, en yüksek noktasından tabanına kadar 405 m'lik derinliğe sahiptir. Ortalama 2,7351 t/m³ yoğunluk ile nihai ocaktan 338.149.636,068 t malzeme çıkartılabilir. Bu kütlenin 98.591.725,861 t'luk kısmı seyrelmiş cevher, 239.557.910,207 t'luk kısmı ise pasa olup bu durumda ocaktaki örtükazı oranı 2,4298 olmaktadır.

Nihai ocakta 1.906.615,111 t bakır bulunmakta birlikte bu kütlenin %90'lık bölümünün kazanılabileceği kabulüyle çıkartılabilen seyrelmiş tonaj 1.715.953,600 t'a düşmekte ve zenginleştirme tesisi verimi %75 alındığın ise buradan çıkan bakır 1.286.965,200 t olmaktadır.

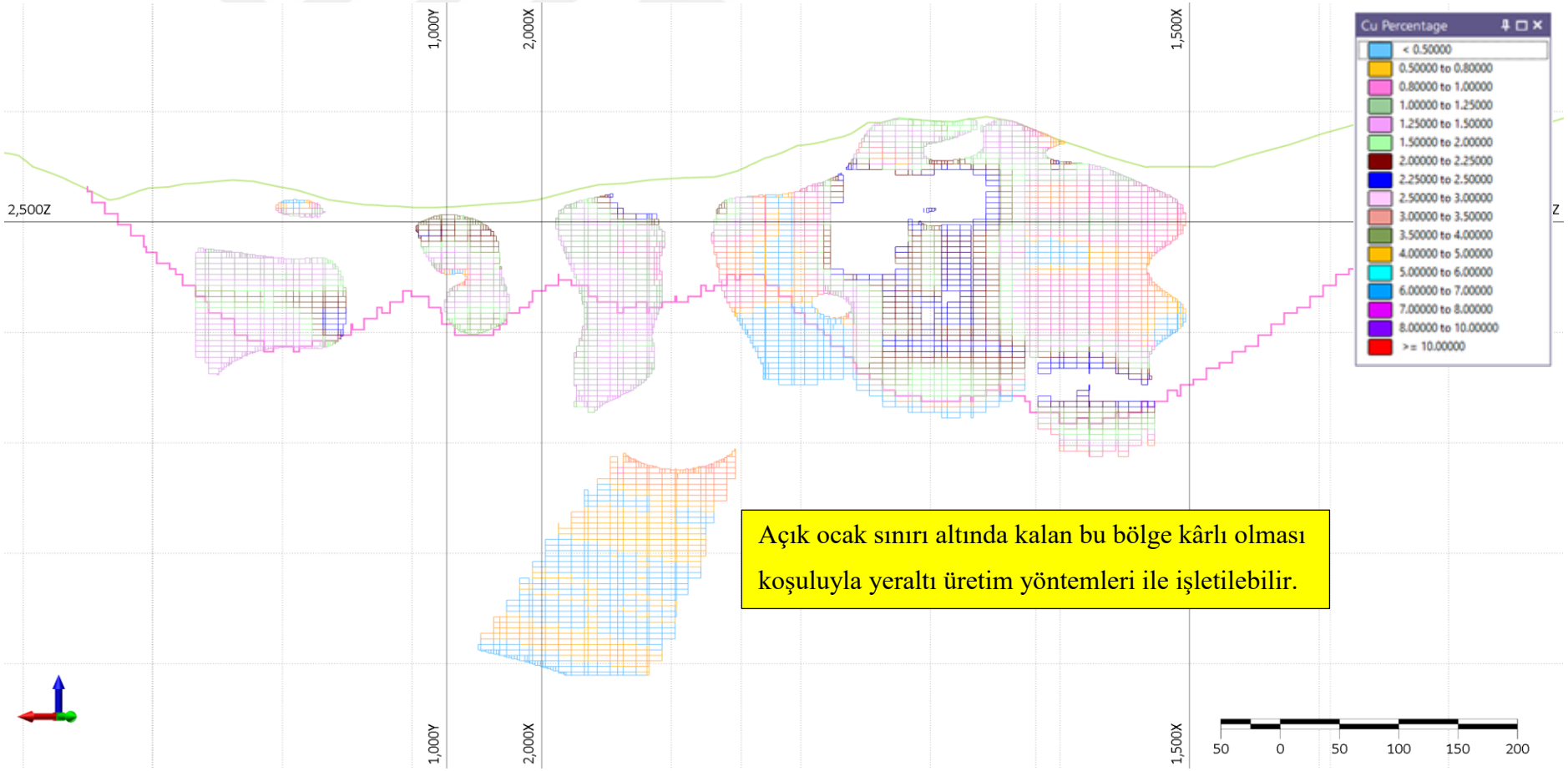
Açık ocaktaki işletme maliyeti 618.170.638 USD, cevher zenginleştirme maliyeti 6.408.462.181 USD, genel ve idari maliyetler ile satış maliyeti 640.846.218 USD ve 12.869.652 USD olarak hesaplanmıştır. Böylece, ocağın ömrü boyunca toplam gelir ve maliyetler 11.550.512.671 USD ve 7.680.348.689 USD olurken vergi öncesi net gelir de 3.870.163.981 USD olmaktadır. Gelir-gider verisinin zamandan bağımsız ve günümüze indirgenmemiş olduğu not edilmelidir.

4.5.2 Yuvalı ocakların optimizasyonu

Açık ocağın işletmede kalacağı onlarca yıllık süreç dikkate alındığında gelir ve giderlerin zaman boyutunda değerlendirilmesi gerekmektedir. En yüksek getiriyi sağlayabilen ocak sınırlarının seçilmesi için yuvalı ocaklar tasarlanmıştır. Bakır satış fiyatının, ocağın faaliyette bulunacağı onlarca yıl boyunca zamana bağlı değişimi öngörülemediğinden bu parametreyi gösteren gelir ayarlama katsayısı (RAF) 0.6 ile 1.4 arasında 0,5'lik adımlar ile değiştirilmiş 17 adet yuvalı ocağın oluşturulabilmesine olanak sağlanmıştır. Ancak yuvalı ocakların birinden diğerine geçebilmesi için her yuvalı ocaktan en az 50.000 t üretim (dekapaj+cevher) yapılması ön koşulu getirilmiştir. Dolayısıyla, bu koşulun sağlanamadığı ocak oluşmayacak ve toplam yuvalı ocak sayısı 17'den daha az sayıda kalabilecektir. Optimizasyon işleminde bakır satış fiyatı 8975 USD/t alındığı için hassasiyet analizlerinde satış fiyatı 5385 USD/t ile 12565 USD/t arasında değiştirilmiştir. Diğer tüm değişkenler sabit kalmak koşuluyla bakır satış fiyatı arttıkça ocak sınırlarının genişlemesi ve ocağın derinleşmesi beklenecektir.



Şekil 4.14 Nihai ocak kabuğu (Kuzeydoğuya izometrik bakış)



Şekil 4.15 Nihai ocak kabuğu ve cevher bloğu (Kesit görünüm)

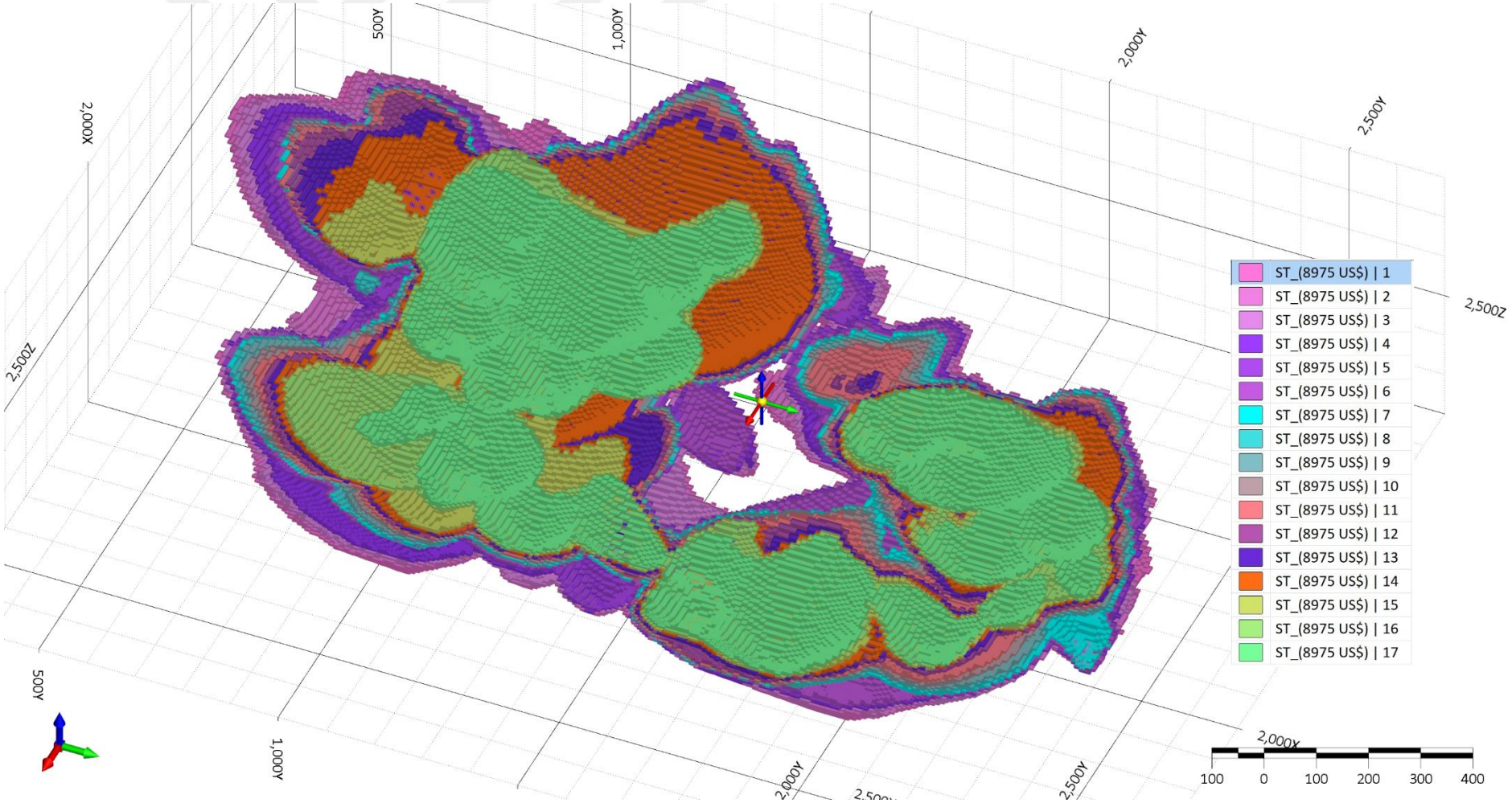
Yuvalı ocakları oluşturmak için en iyi durum ve çoklu basamakta eşzamanlı çalışma senaryolarına göre analizler yapılmıştır. En iyi durum senaryosunda yüksek tenörlü cevhere en kısa yoldan erişilebilecek noktadan üretime başlanmakta ve böylece işletmenin erken yıllarında pozitif gelir akışı sağlanabilmektedir. Eşzamanlı çoklu basamakta çalışma yöntemi ise gerçek uygulama ile benzer biçimde aynı anda çok birden fazla katta çalışma olanağı var olup bu tezdeki optimizasyonda 5 katta eşzamanlı çalışma kurgulanmıştır. Oluşan yuvalı ocakların izometrik ve kesit görüntüleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

En iyi durum ve çoklu basamakta eşzamanlı çalışma senaryolarına göre aşamalar ve yıllar bazında üretim ve gelir-gider figürleri Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.18a ve 18b'deki en iyi durum ve çoklu basamak senaryolarının aşamalar bazında üretim ve bugüne indirgenmiş gelir-maliyet figürlerine göre mevcut koşullar altında gelirlerin net bugünkü değerleri altıncı yuvalı ocağa kadar somut biçimde artmakta ancak sonraki ocaklarda sağlanan günümüze indirgenmiş gelir belirgin bir artış göstermemektedir. Çoklu basamakta çalışma senaryosunda da cevhere işletmenin erken yıllarında erişilebilmekte ve bu yıllarda sağlanan gelirin bugüne indirgenmesinde daha az kayıp olmaktadır. Bu durum Şekil 4.18c ve 18d'den de izlenebilmektedir. Yıllar içerisinde sağlanan gelirin günümüze indirgenmiş değerlerinde artış sağlanamamakta hatta düşmeler görülmektedir.

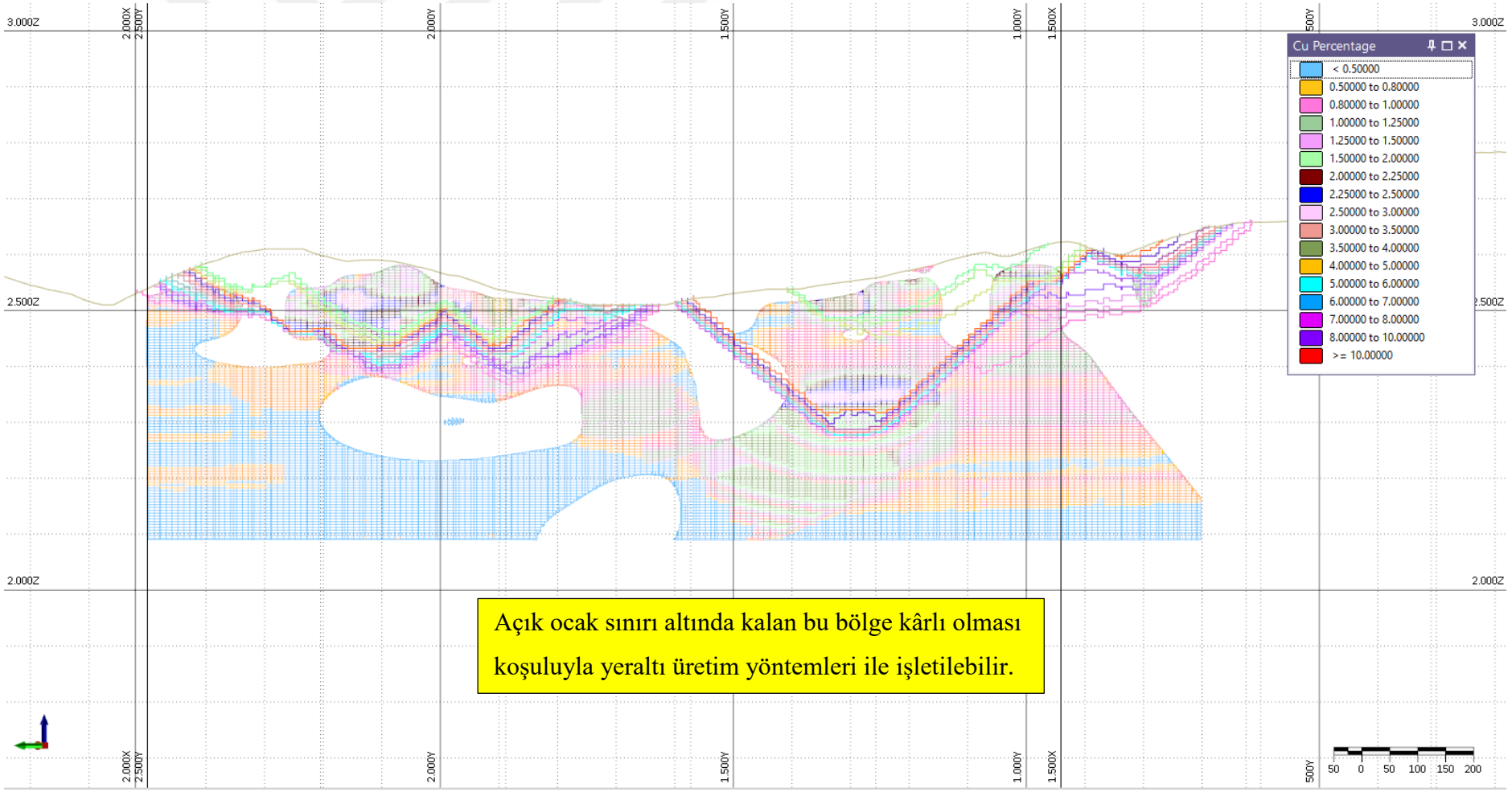
Yuvalı ocakların sonuncusu olan 17. ocak kabuğu, 12565 USD/ton bakır olarak belirlenen satış fiyatında oluşmuştur. Yine de sahadaki bakır kaynağının en kârlı biçimde çıkartılmasına olanak sağladığı için bundan sonra yapılacak ocak tasarımında altıncı ocağın kullanılmasına karar verilmiştir.

4.6 Ocak Tasarımı

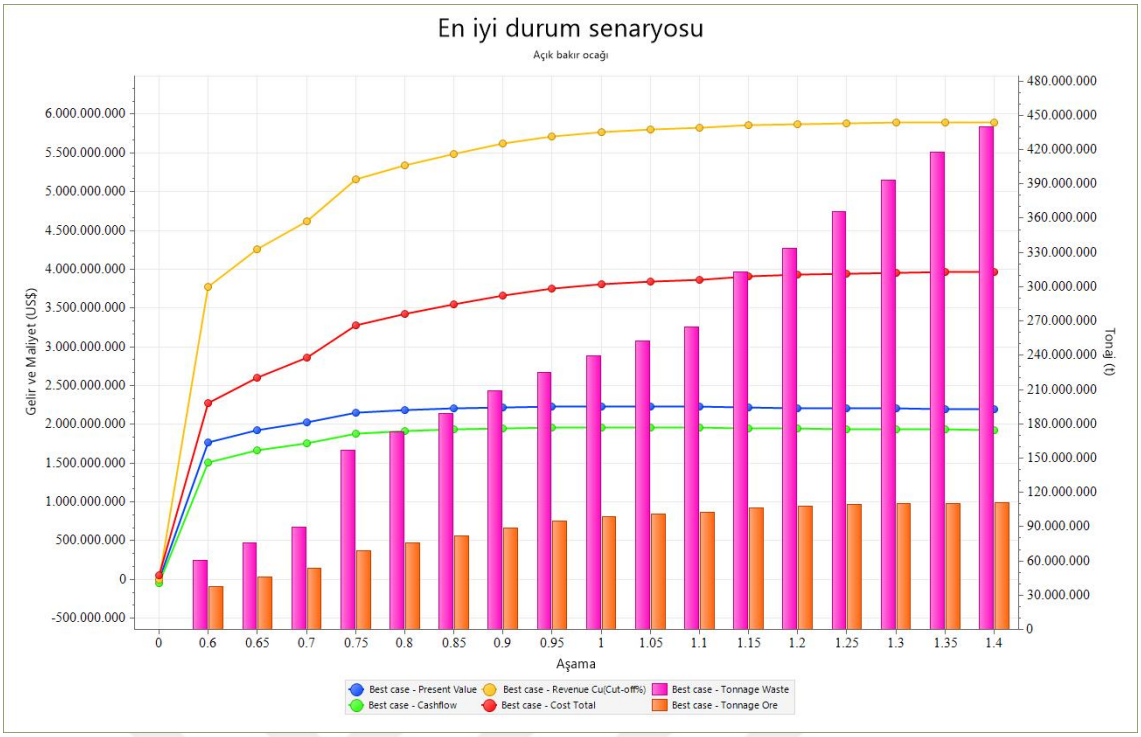
Önceki bölümde mevcut finansal ve işletmeye ait koşullar altında en uygun ocağın, RAF katsayısı 0,85 olan altıncı yuvalı ocak olduğu olarak ifade edilmişti. Ancak bu kabuk şev geometrisi yerine alt blokların geometrisi dikkate alınarak hazırlandığından işletmecilik bakımından gerçekçi değildir. Bu nedenle bu bölümde, basamak geometrisi değerleri girilerek işletmeciliğe uygun bir ocak tasarımı yapılmıştır.



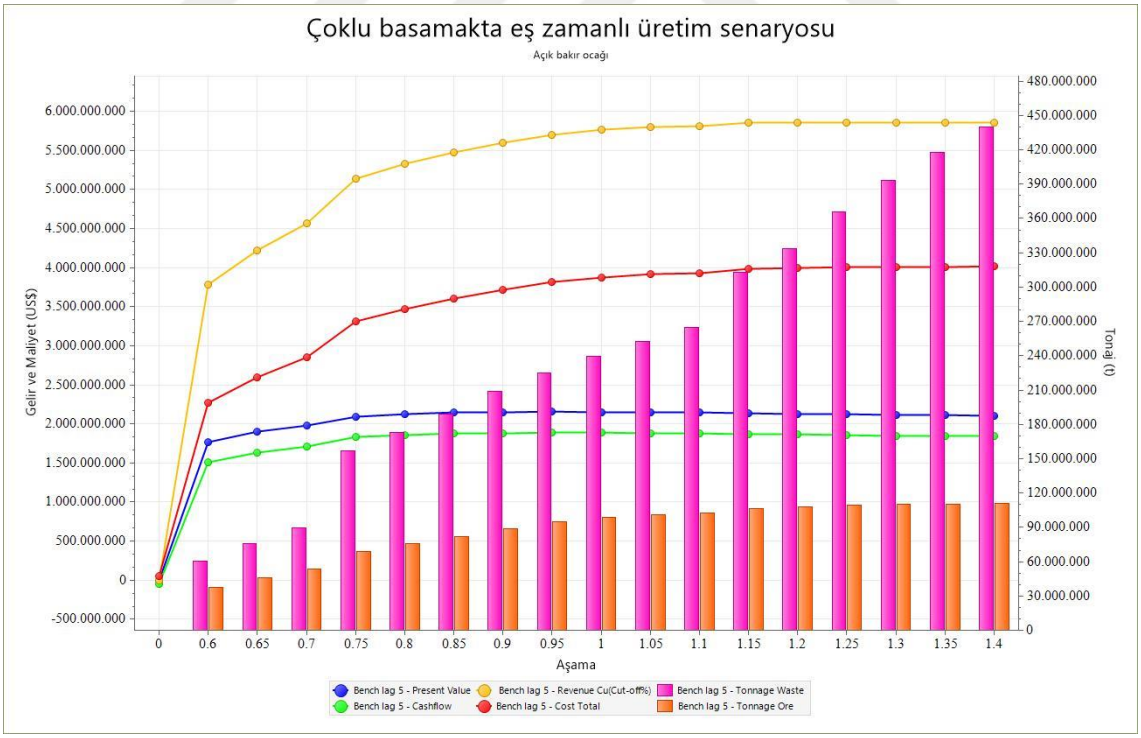
Şekil 4.16 Ekonomik koşullar altında tasarlanmış yuvalı ocak kabukları (Kuzeydoğuya izometrik bakış)



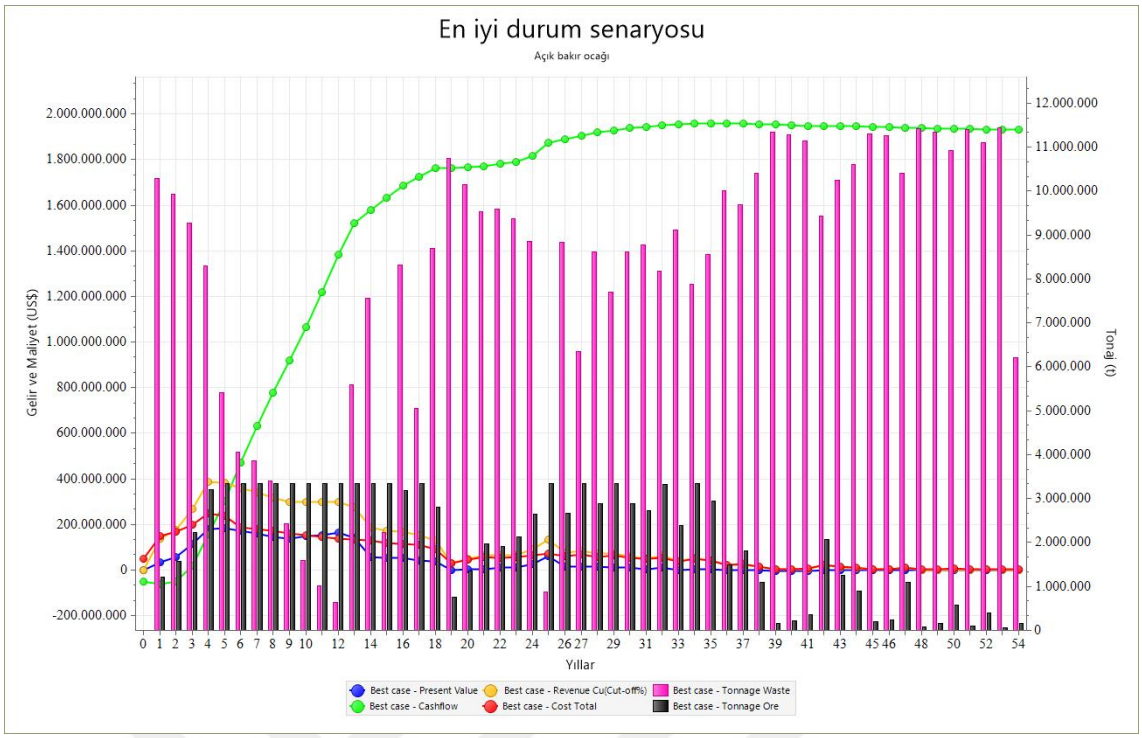
Şekil 4.17 Ekonomik koşullar altında tasarlanmış yuvalı ocak kabukları (Kesit görünüm)



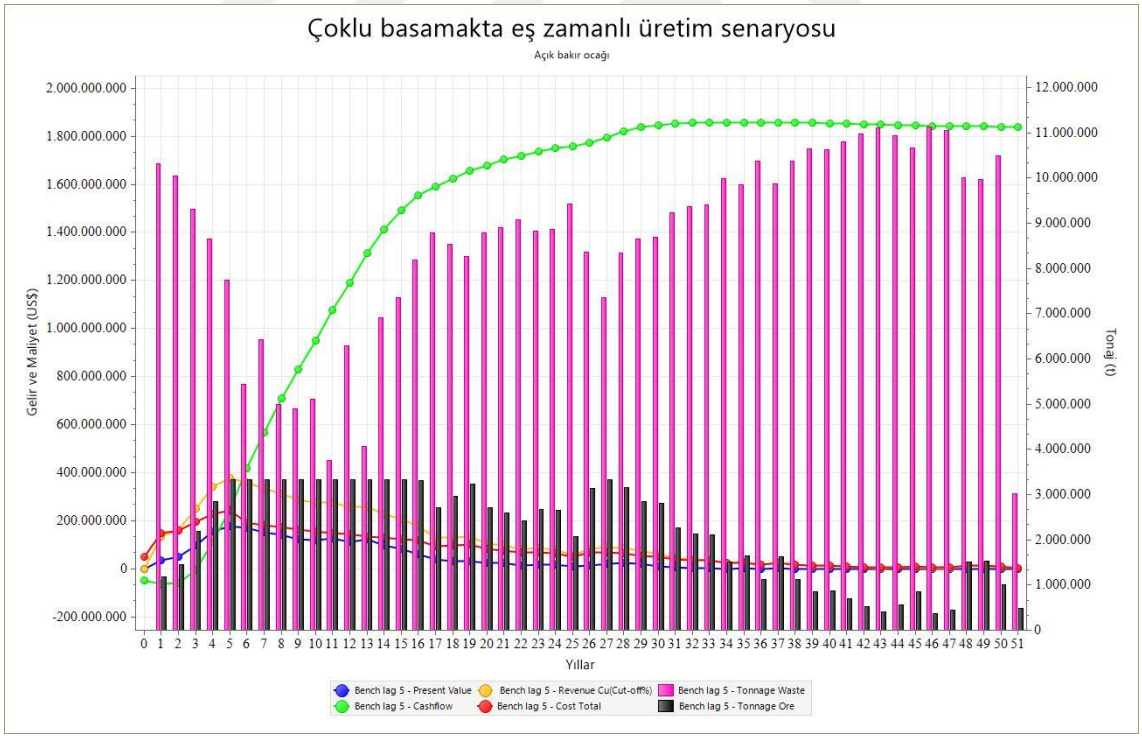
Şekil 4.18a En iyi durum senaryosuna göre aşamalar bazında üretim ve gelir-gider durumu



Şekil 4.18b Çoklu basamakta eşzamanlı çalışma senaryosuna göre aşamalar bazında üretim ve gelir-gider durumu



Şekil 4.18c En iyi durum senaryosuna göre yıllar bazında üretim ve gelir-gider durumu

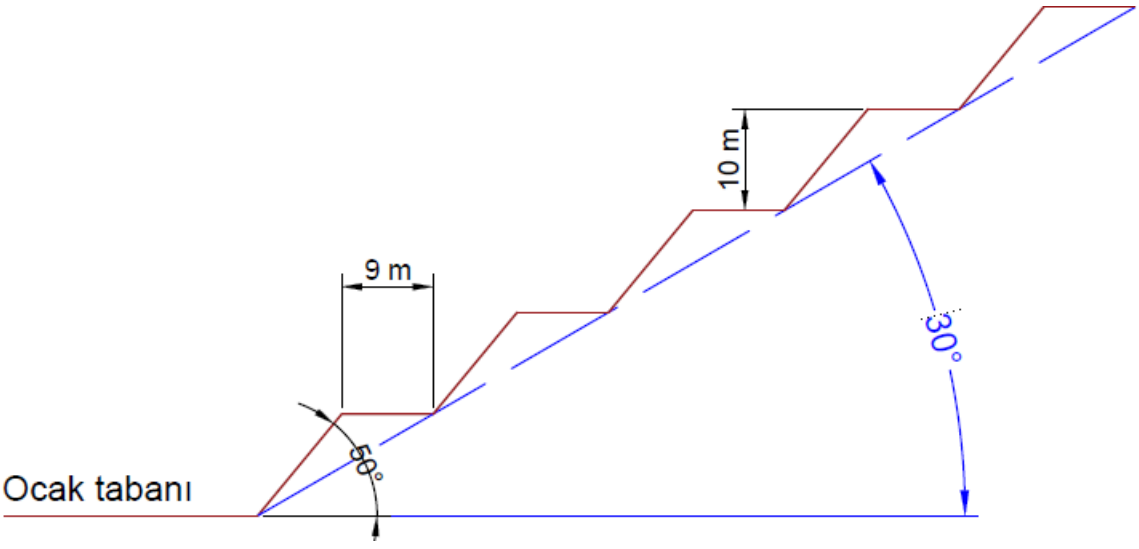


Şekil 4.18d Çoklu basamakta eşzamanlı çalışma senaryosuna göre yıllar bazında üretim ve gelir-gider durumu

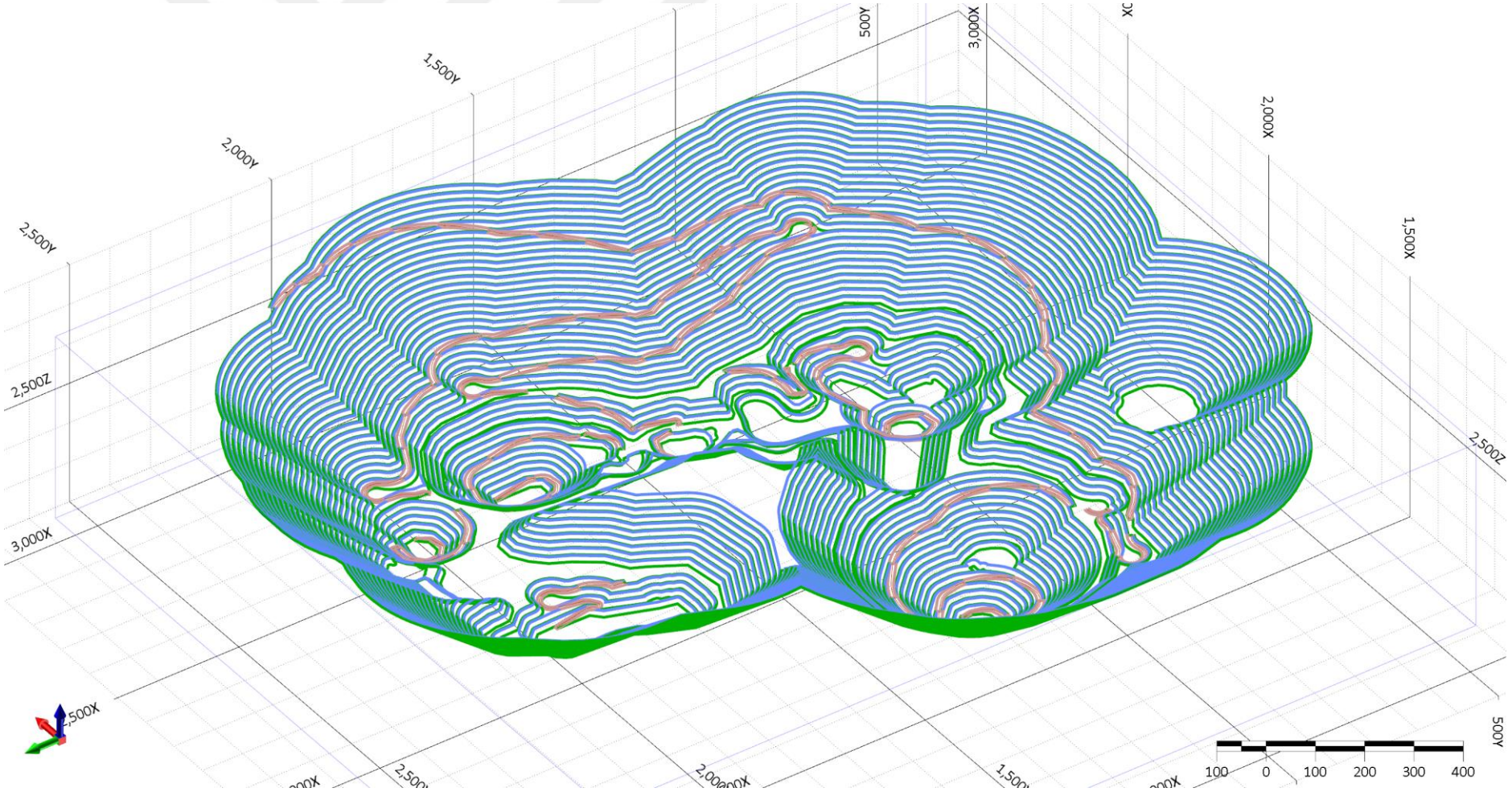
Ocak, tabandan başlanarak, topografyayı kesecek biçimde yüzeye doğru yükselerek oluşturulan basamaklar ve basamaklar arasında yukarı doğrultusunda ilerleyen taşıma

yolları ile eşzamanlı olarak hazırlanmıştır. Basamak yüksekliği ve genişliği 10 m ve 9 m, basamak şev açısı 50° alınmıştır. Bu düzenleme ile genel şev açısı Şekil 4.19'da gösterildiği gibi 30°'dir. Ancak burada verilen genel şev açısı farazi olup şev duraylılığı açısından test edilmemiştir. Kaya mekaniği analizleri ile genel şev açısının değişmesi durumunda optimizasyonların yeniden yapılması gerekecektir. Ocak içi taşıma yolları, dolu ve boş kamyonların kendi şeritlerinde ilerleyeceği biçimde iki şeritli gidiş-geliş tipindeki trafiğe olanak sağlayacak şekilde tasarımlanmıştır. Yollar oluşturulurken, bir yol segmentinin alttaki basamaktan üstteki basamağa bağlanması sonrasında ocak, yol genişliği kadar genişletilmektedir. Ancak taşıma yollarının ocağı haddinden fazla genişletmesine engel olmak için alttan üste doğru bağlanan yolların, üst kademede bir şerit genişliğinde örtüşmesine izin verilmiştir.

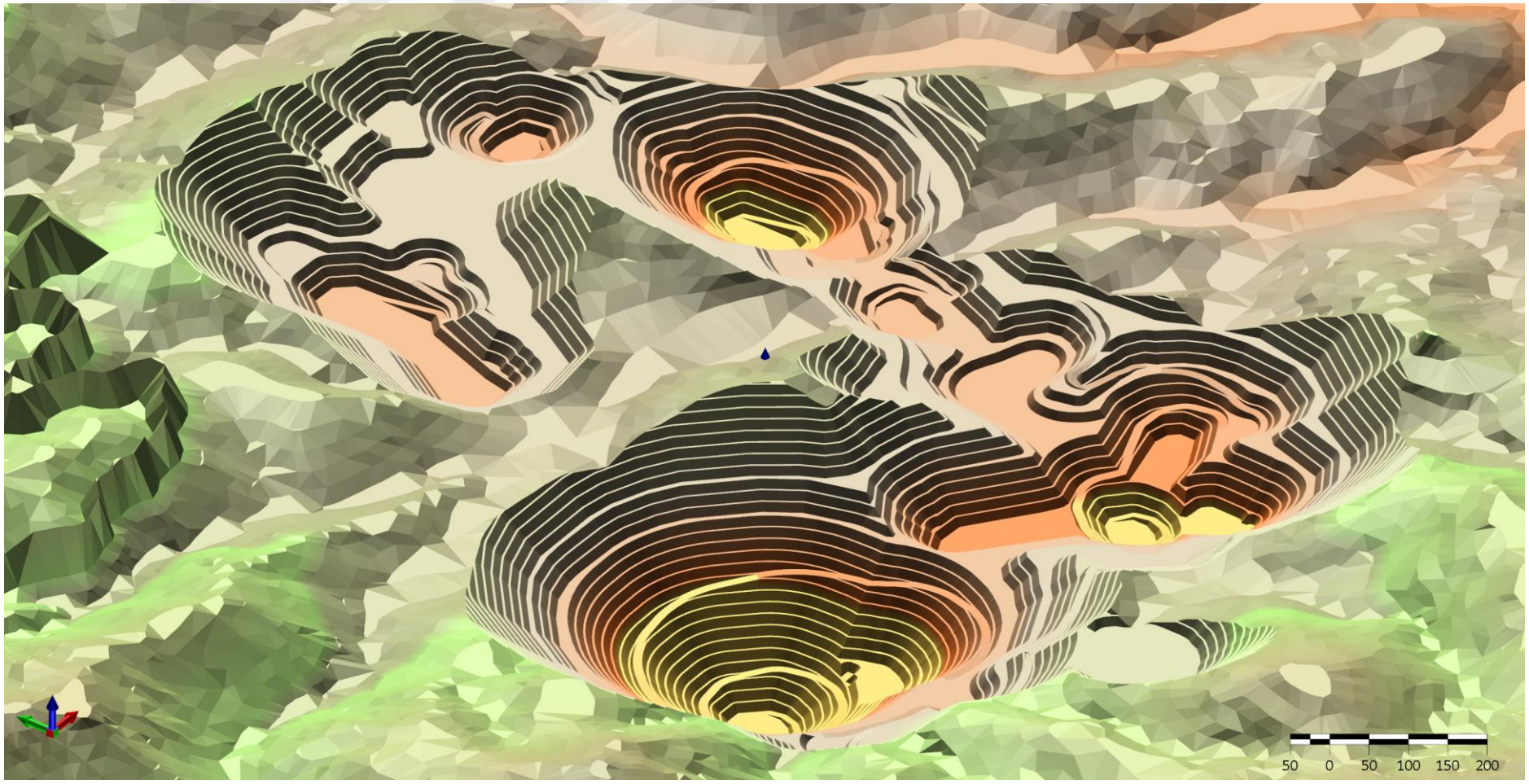
Ocak içi taşıma yolları saat ibresi dönüş yönünde ilerleyecek biçimde tasarımlanmıştır. Yol genişliği 14 m ve eğimi, kamyonlar için önerilen 8% - 15% aralığında olmak üzere %13 seçilmiştir. Yol uzunluğu merkez çizgisi boyunca hesaplanmıştır. Ocaktaki taşıma yolu, başlangıç tasarımında 2290 ve 2670 katları arasında %13 eğim ile toplamda 2250 m uzunluğu sahip olmuştur. Basamakların ve taşıma yollarının eşzamanlı olarak tasarımlanmasından sonra bakır ocağı tek kısımda yapılanmıştır. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de ocağın telkafes görünümü ile tüm cevher çıkartıldıktan sonra oluşacak nihai görünümü sunulmuştur. Sonuç olarak, Şekil 4.22'de gösterilen ve 122.472.622,6 m^3 hacim sahip bakır ocağının işletilerek cevherin çıkartılması öngörülmüştür.



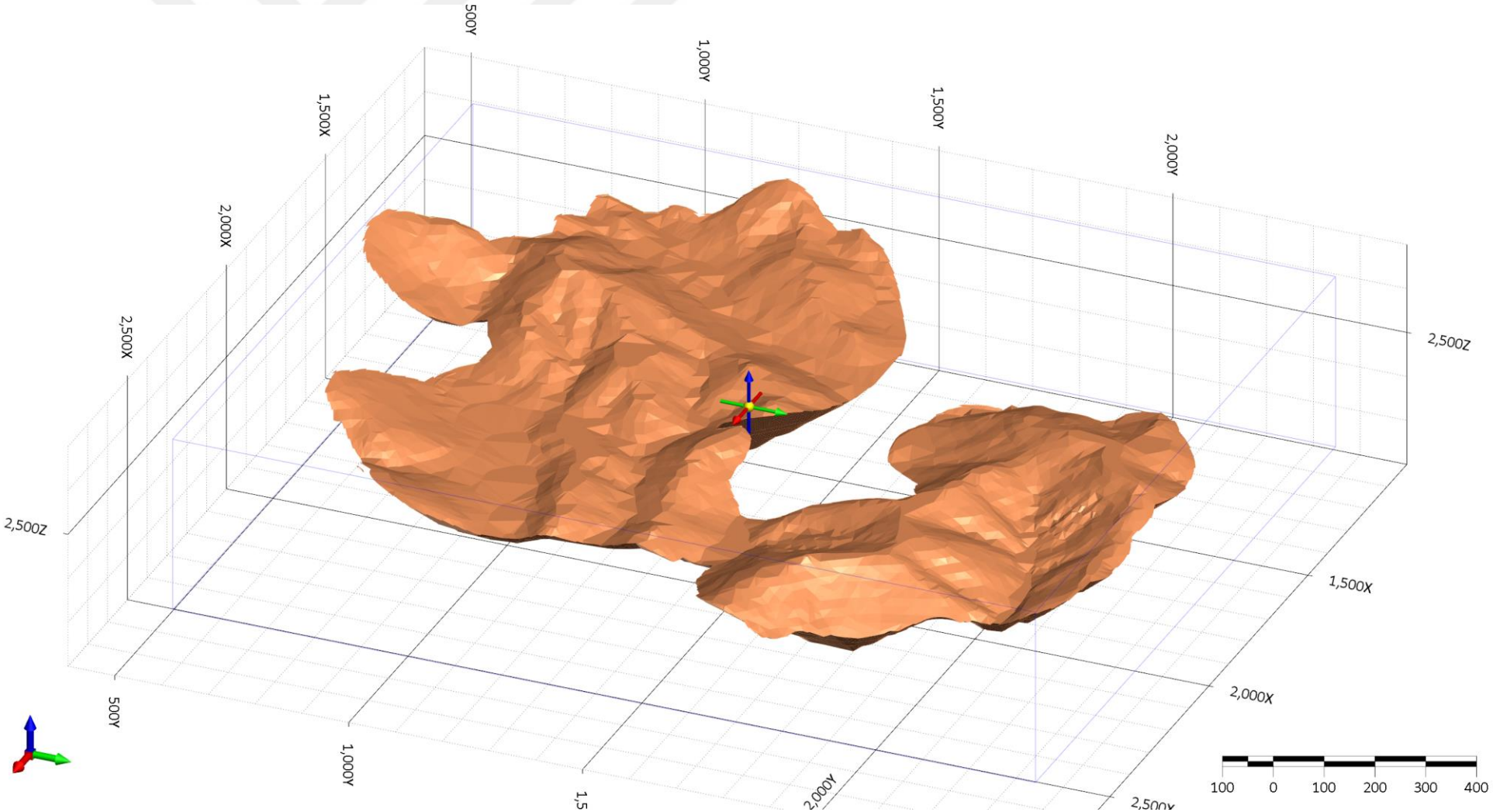
Şekil 4.19 Nihai ocağın tasarımlanmış mühendislik işlemleri ve ocağın basamak geometrisinin görünümü



Şekil 4.20 Ocaktaki taşıma yollarının telkafes görünümü (Kuzeybatıya izometrik bakış)



Şekil 4.21 Bakır ocağındaki taşıma yolları ve topoğrafya ile bağlanma görünümü (Kuzeydoğuya izometrik bakış)



Şekil 4.22 Bakır ocağında işletilmesi öngörülen pasa ve cevher kütlesi (Güneydoğuya izometrik bakış)

4.7 Tenör-Tonaj İşlemleri

4.7.1 Açık ocak bloklarının oluşturulması

Nihai ocak tasarım kısmında bulunan kabuk hacmi 122.472.622,6 m³'dir. Cevher gövdesini çıkarabilmek amacıyla bu kütlenin X ekseninde 50 m ve Y ekseninde 30 m boyutlara sahip küçük bloklara bölünmesi kararlaştırılmıştır. Nihai ocak ile içindeki tüm maden bloğu boyutlarının birbirleri ile uyumlu olması gerekmektedir. Beher maden bloğunun yüzey alanı 1.500 m² ve basamak yüksekliği de 10 m olarak tasarlandığı için hacmi, 15.000 m³ olacaktır. Bu tasarımda hacmi 5000 m³'den küçük bloklar yandaki blok ile birleştirilmektedir. Tenör-tonaj kontrolü sonrasında 8760 adet cevher ve pasa bloğu oluşturulmuştur. Bu tasarımda ocak tabanından itibaren 39 adet basamak bulunmakta olup maden blokları izometrik olarak Şekil 4.23'te ve kesit üzerinde Şekil 4.24'de gösterilmiştir.

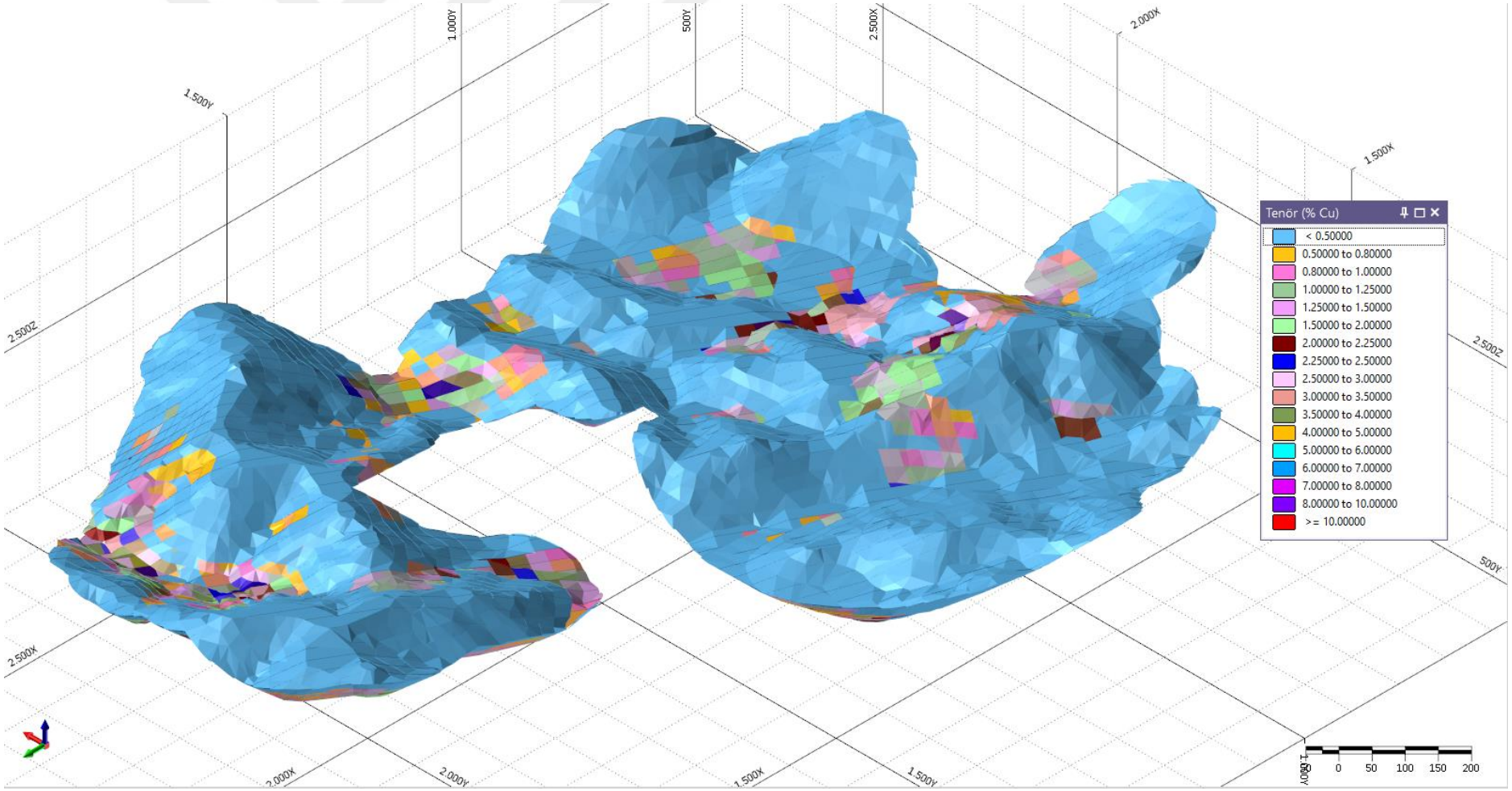
4.7.2 Ocaktaki tenör-tonaj işlemleri

Planlanmış maden blokları için aşağıdaki nitelikler tanımlanıp, kaynak miktarı blok modelindeki değerleri atanması yapılmıştır. Çizelge 4.9'dan, bakır ocağında 0,375% Cu tenörlü 159.928.919 ton cevher ve 173.886.491 ton pasa hesaplanmıştır. Bu ocaktan yaklaşık olarak 2.172.775 ton bakır elde edilmiştir.

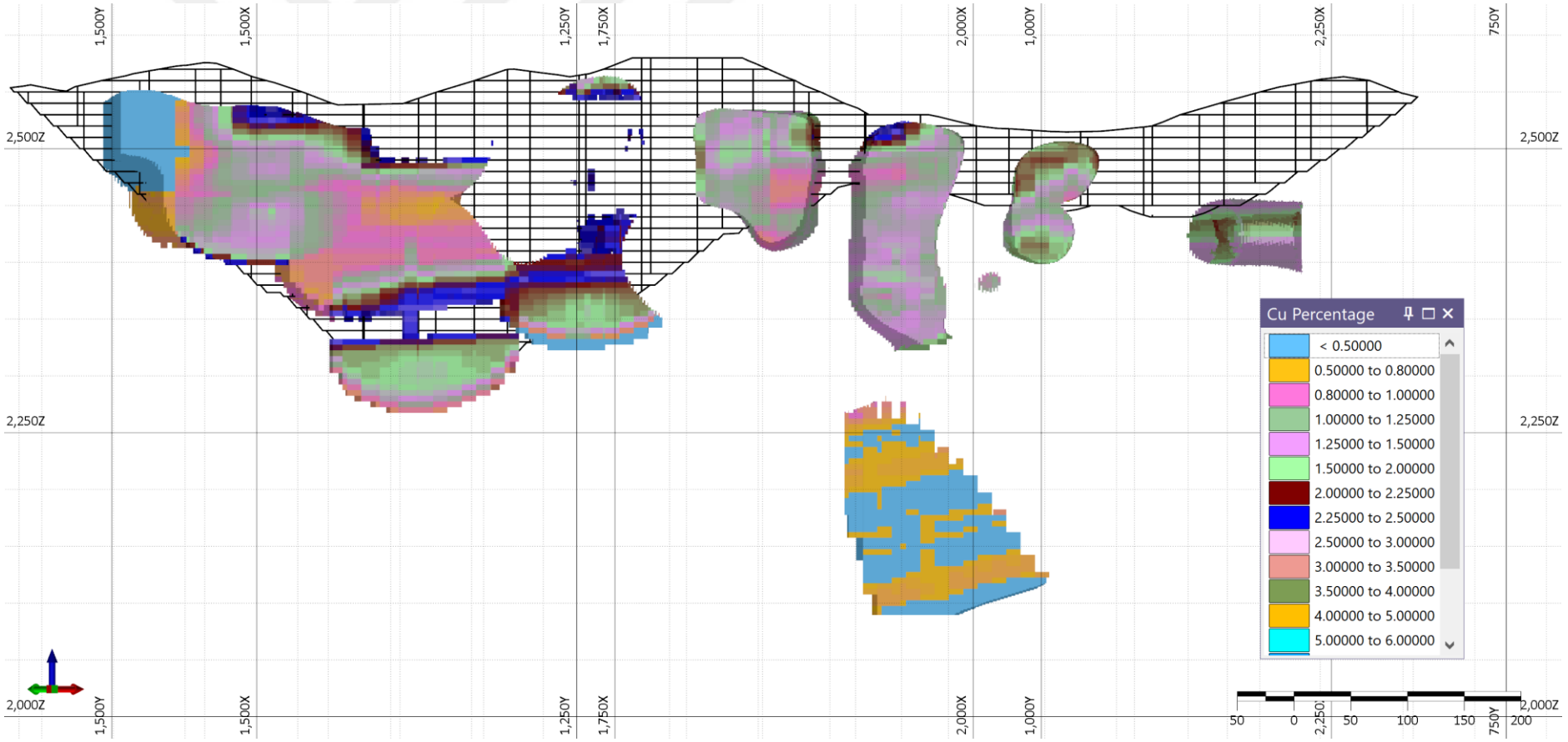
- Cevher yoğunluğu (t/m³)
- Hacim (m³)
- Pasa yoğunluğu (t/m³)
- Toplam yoğunluk (t/m³)
- Bakır tenörü, seyrelmiş (%)
- Bakır tenörü (%)
- Basamak kotu (m)
- Cevher kütlesi (t)
- Pasa kütlesi (t)
- Toplam kütle (t)

Çizelge 4.9 Bakır ocağındaki kaynak bilgileri

Kategori	Hacim (m³)	Yoğunluk (t/m³)	Kütle (t)	Tenör (%)	Toplam bakır (t)
Cevher	59.232.933	2,70	159.928.919	1,350	2.172.775
Pasa	63.239.690	2,75	173.886.491	-	-
Toplam	122.472.623	2,72	333.838.066	0,651	2.172.775



Şekil 4.23 Cevher, pasa ve cevher+pasadan oluşan maden blokları (Güneydoğuya izometrik bakış)



Şekil 4.24 Ocak içinde işletilmesi öngörülen maden blokları ve cevher blokları

4.8 Ocak İşletme Süreci

4.8.1 Üretim çizelgeleme

Madendeki blokların öznitelik değerleri hesaplandıktan sonra üretim miktarını belirtmek için 7.500.000 t/yıl üretim yapılması ve üretimin 05 Ocak 2025 tarihinde başlatılması planlanmıştır. Bir daha aşamada tüm 8760 adet maden bloğu, başta katlar bazında düşey bağımlılıkları kurup ve ondan sonra maden blokları üretim yapmak amacıyla bir başlangıç noktası seçilerek bütün blokların yatay bağımlılıklarını kurulmuştur.

Çizelgeleme yaptıktan sonra bu bakır ocağında üretimin faaliyetleri 05.01.2025 tarihinde başlamış ve bütün maden bloklarının üretimi 24.12.2074 tarihine kadar devam etmiştir. Bakır ocağı 50 yıl çalıştırılmıştır. Üretim miktarları ve yıllar bazında üretim bilgileri Çizelge 4.10'da, katlar bazında gerçekleştirilmiş üretimin miktarı Çizelge 4.11'de sunulmuştur. Cevher ve pasa içeren maden bloklarının katlara dağılımı EK-1'de Şekil E1'de verilmiştir.

Çizelge 4.10 Bakır ocağı yıllık üretim bilgileri

Yıllar	Periyod	Cevher kütlesi (t)	Bakır kütlesi (t)	Cevher tenörü (%)	Dekapaj kütlesi (t)	Toplam kütle (t)
2025	1	540.433	3.392	0,6276	6.955.429	7.495.862
2026	2	2.365.321	19.511	0,8249	5.134.172	7.499.493
2027	3	3.420.970	34.413	1,0059	4.079.017	7.499.987
2028	4	4.619.493	66.156	1,4321	2.880.379	7.499.872
2029	5	3.841.707	43.429	1,1304	3.634.827	7.476.534
2030	6	5.125.204	36.207	0,7065	2.373.328	7.498.531
2031	7	4.630.455	47.722	1,0306	2.866.832	7.497.287
2032	8	6.112.085	68.339	1,1181	1.387.016	7.499.101
2033	9	2.420.674	34.092	1,4084	5.078.198	7.498.872
2034	10	4.276.111	59.200	1,3844	3.221.101	7.497.212
2035	11	4.571.562	77.457	1,6943	2.927.011	7.498.573
2036	12	632.258	7.026	1,1112	6.858.204	7.490.462
2037	13	5.564.245	93.737	1,6846	1.371.629	6.935.875
2038	14	5.748.169	93.704	1,6302	1.744.002	7.492.171
2039	15	1.706.754	25.606	1,5003	5.779.381	7.486.135
2040	16	1.603.786	19.543	1,2186	5.896.002	7.499.788
2041	17	2.376.675	30.127	1,2676	5.122.006	7.498.680
2042	18	3.668.235	57.319	1,5626	3.830.227	7.498.462
2043	19	2.129.099	28.259	1,3273	5.368.402	7.497.500
2044	20	671.258	7.933	1,1819	6.828.134	7.499.393
2045	21	2.374.426	41.326	1,7405	4.745.345	7.119.772
2046	22	3.553.376	62.566	1,7607	3.937.630	7.491.006
2047	23	2.582.820	34.102	1,3203	4.916.406	7.499.227
2048	24	3.355.040	54.856	1,6350	4.144.868	7.499.908
2049	25	3.375.560	50.703	1,5021	4.124.052	7.499.612
2050	26	3.706.444	62.447	1,6848	3.792.608	7.499.052
2051	27	3.790.254	56.490	1,4904	3.702.893	7.493.146
2052	28	2.898.448	47.788	1,6487	4.601.551	7.499.999
2053	29	2.956.097	51.647	1,7471	4.540.501	7.496.598
2054	30	3.804.170	56.896	1,4956	3.688.809	7.492.980
2055	31	2.398.342	37.658	1,5702	5.037.629	7.435.971
2056	32	3.968.357	55.988	1,4109	3.524.745	7.493.101
2057	33	3.026.457	43.857	1,4491	4.472.834	7.499.291
2058	34	4.211.207	63.462	1,5070	3.252.741	7.463.947
2059	35	4.104.755	43.754	1,0659	3.394.808	7.499.563
2060	36	3.917.507	52.005	1,3275	3.579.773	7.497.281
2061	37	4.648.301	55.785	1,2001	2.850.591	7.498.892
2062	38	3.844.432	32.767	0,8523	3.655.237	7.499.670
2063	39	3.096.684	36.464	1,1775	4.400.736	7.497.420
2064	40	5.145.228	51.910	1,0089	2.345.455	7.490.683
2065	41	4.639.694	48.911	1,0542	2.850.031	7.489.726
2066	42	1.851.587	19.389	1,0472	1.581.533	3.433.120
2067	43	81	0	0,4201	195.098	195.179
2068	44	Bu yıllar arasında cevher üretimi ve dekapaj yapılmamıştır.				
2069	45					
2070	46					
2071	47					
2072	48	4.570.435	55.369	1,2115	2.689.994	7.260.429
2073	49	5.088.257	97.681	1,9197	2.403.287	7.491.544
2074	50	5.821.754	86.610	1,4877	1.664.045	7.485.799
Toplam		**158.754.208**	**2.153.604**	**1,3566**	**173.428.495**	**332.182.702**

Çizelge 4.11 Bakır ocağının katlar bazında üretim bilgileri

Katlar	Cevher kütlesi (t)	Bakır kütlesi (t)	Cevher tenörü (%)	Dekapaj kütlesi (t)	Toplam kütle (t)
2290	147.329	2.152	1,4609	-	147.329
2300	278.305	4.155	1,4928	-	278.305
2310	439.734	6.863	1,5607	853	440.587
2320	589.026	10.288	1,7466	42.057	631.082
2330	722.290	15.356	2,1261	125.776	848.067
2340	829.827	18.506	2,2301	271.391	1.101.217
2350	1.084.694	21.344	1,9678	418.616	1.503.310
2360	1.219.768	21.812	1,7882	609.246	1.829.014
2370	1.602.239	27.297	1,7037	873.488	2.475.727
2380	1.966.704	29.702	1,5102	1.147.692	3.114.396
2390	2.572.265	33.745	1,3119	1.434.057	4.006.322
2400	3.568.726	45.727	1,2813	1.871.427	5.440.153
2410	4.393.150	56.336	1,2824	2.139.373	6.532.523
2420	5.237.909	67.516	1,2890	2.465.774	7.703.682
2430	6.373.975	81.731	1,2823	2.875.914	9.249.889
2440	8.499.698	113.502	1,3354	3.679.367	12.179.065
2450	10.720.649	141.217	1,3172	5.169.267	15.889.916
2460	12.043.285	162.658	1,3506	6.270.178	18.313.463
2470	13.092.360	178.848	1,3660	7.655.962	20.748.322
2480	15.559.361	200.559	1,2890	10.366.392	25.925.753
2490	14.745.036	192.481	1,3054	12.081.680	26.826.716
2500	13.218.697	180.542	1,3658	13.308.076	26.526.773
2510	11.586.923	162.815	1,4052	13.968.690	25.555.612
2520	8.851.433	123.474	1,3950	14.501.012	23.352.445
2530	6.547.972	87.028	1,3291	14.033.514	20.581.486
2540	4.864.478	61.773	1,2699	13.208.493	18.072.971
2550	3.898.300	50.006	1,2828	11.902.339	15.800.639
2560	2.628.039	34.877	1,3271	9.832.373	12.460.412
2570	1.462.435	20.834	1,4246	7.759.210	9.221.645
2580	720.950	10.713	1,4860	6.033.570	6.754.520
2590	338.866	5.739	1,6937	4.289.432	4.628.298
2600	104.822	2.583	2,4640	2.560.638	2.665.460
2610	19.644	596	3,0319	1.401.196	1.420.840
2620	28	1	2,9035	855.804	855.833
2630	-	-	-	464.520	464.520
2640	-	-	-	172.361	172.361
2650	-	-	-	70.346	70.346
2660	-	-	-	26.411	26.411
Toplam	**159.928.919**	**2.172.775**	**1,4609**	**173.886.491**	**333.815.410**

4.8.2 Optimizasyon

Bu bölümde modellenen bakır ocağında üretim önceden belirlenen belirli sayıda kısıdı sağlayarak, verilen bir amacın enbüyüklenmesi ya da enküçüklenmesi denemeleri yapılmıştır. Birinci denemede ocak, 05.01.2025 tarihinden itibaren 50 yıl boyunca faaliyet gösterirken, çıkartılan toplam malzemenin yıllık en fazla 7.000.000 ton olması kısıdı altında, üretilen cevher kütlesini enbüyüklemek amaçlanmıştır. Algoritma tarafından sağlanan çözümün, %75 düzeyinde olması yeterli olacaktır. Bu koşullar altında uygun bir çözüm bulunmuş ve sonuçları Çizelge 4.12'da sunulmuştur. Buna göre 50 yıllık işletme dönemi boyunca 142.524.927 ton cevher, 164.087.196 ton pasa olmak üzere 306.612.123 ton üretim yapılmıştır. Cevher içerisindeki bakır miktarı 1.924.007 tondur. Üretilen cevherin ağırlıklı ortalama tenörü %1,35 olup %0,5235 ile %1,8754 arasında değişmiştir. Çıkartılan tüm malzeme dikkate alındığında cevherin seyreltilmiş ağırlıklı ortalama tenörü %0,63 olup %0,0257 ile %1,0160 arasındadır.

İkinci denemede de ocak 05.01.2025 tarihinden itibaren 50 yıl boyunca işletilecektir. Amaç fonksiyonu üretilecek cevher kütlesinin enbüyüklenmesidir. Amaç, iki adet fonksiyon tarafından kısıtlanmıştır, bunlar: işletme ömrü boyunca ocaktan yılda en fazla 8.000.000 t toplam üretim yapılması ve beher yılda üretilen cevherin bakır tenörünün en az %0,5 olmasıdır. Algoritma tarafından sağlanan çözümün, %75 düzeyinde olması yeterli görülmüştür. Bu koşullar altında uygun bir çözüm bulunmuş ve sonuçları Çizelge 4.13'de sunulmuştur. Buna göre, 159.776.716 ton cevher, 173.753.957 ton pasa olmak üzere 333.530.673 ton üretim yapılacaktır. Cevher içerisindeki bakır miktarı 2.172.481 tondur. Üretilen cevherin ağırlıklı ortalama tenörü %1,3597 olup %0,5176 ile %1,9262 arasında değişmiştir. Çıkartılan tüm malzeme dikkate alındığında cevherin seyreltilmiş ağırlıklı ortalama tenörü %0,6514 olup %0,0341 ile %1,7581 arasındadır.

Üçüncü denemede ocak 05.01.2025 tarihinden itibaren 45 yıl boyunca işletilecektir. Amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcılar önceki deneme ile aynıdır ancak cevherin bakır tenörü en az %0,4 olmalıdır. Algoritma tarafından sağlanan çözümün, %75 düzeyinde olması yeterli görülmüştür. Bu koşullar altında uygun bir çözüm bulunmuş ve sonuçları Çizelge 4.14'de sunulmuştur. Buna göre, 159.928.919 ton cevher, 173.682.974 ton pasa olmak üzere 333.611.893 ton üretim yapılacaktır. Cevher içerisindeki bakır miktarı 2.172.775 tondur. Üretilen cevherin ağırlıklı ortalama tenörü %1,3586 olup %0,6495 ile %1,9374 arasında değişmiştir. Çıkartılan tüm malzeme dikkate alındığında cevherin seyreltilmiş ağırlıklı ortalama tenörü %0,6513 olup %0,0262 ile %1,4090 arasındadır.

Çizelge 4.12 Birinci optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri

Yıllar	Periyod	Cevher kütlesi (t)	Dekapaj kütlesi (t)	Toplam kütle (t)	Bakır kütlesi (t)	Tenör (%Cu)	Seyrelmiş tenör (%Cu)	Yoğunluk (t/m³)
2025	1	343.680	6.656.228	6.999.908	1.799	0,5235	0,0257	2,7475
2026	2	1.982.154	5.017.394	6.999.548	14.333	0,7231	0,2048	2,7357
2027	3	3.732.763	3.266.001	6.998.765	38.564	1,0331	0,5510	2,7231
2028	4	3.216.452	3.783.493	6.999.945	51.718	1,6079	0,7388	2,7268
2029	5	4.267.952	2.725.420	6.993.372	39.779	0,9320	0,5688	2,7193
2030	6	4.403.752	2.579.733	6.983.485	41.307	0,9380	0,5915	2,7183
2031	7	Bu yıllar arasında cevher üretimi ve dekapaj yapılmamıştır.						
2032	8							
2033	9							
2034	10							
2035	11	3.487.112	3.500.527	6.987.640	55.359	1,5875	0,7922	2,7248
2036	12	3.648.065	3.342.139	6.990.204	46.213	1,2668	0,6611	2,7237
2037	13	2.642.722	3.523.473	6.166.195	26.703	1,0104	0,4331	2,7283
2038	14	4.091.195	2.883.762	6.974.958	48.695	1,1902	0,6981	2,7205
2039	15	4.174.249	2.816.511	6.990.760	46.233	1,1076	0,6613	2,7199
2040	16	3.684.978	3.315.006	6.999.984	52.920	1,4361	0,7560	2,7235
2041	17	Bu yıllar arasında cevher üretimi ve dekapaj yapılmamıştır.						
2042	18							
2043	19	3.073.955	3.922.302	6.996.257	43.990	1,4311	0,6288	2,7278
2044	20	3.477.002	3.521.563	6.998.565	54.993	1,5816	0,7858	2,7249
2045	21	1.252.705	5.664.006	6.916.710	14.107	1,1261	0,2040	2,7408
2046	22	3.430.658	3.475.690	6.906.348	55.385	1,6144	0,8019	2,7249
2047	23	1.506.727	5.491.177	6.997.904	21.788	1,4461	0,3114	2,7391
2048	24	2.401.290	4.596.482	6.997.772	35.072	1,4606	0,5012	2,7326
2049	25	2.244.062	4.752.892	6.996.954	35.162	1,5669	0,5025	2,7338
2050	26	2.878.856	4.120.946	6.999.802	53.989	1,8754	0,7713	2,7292
2051	27	2.112.317	4.863.891	6.976.207	31.820	1,5064	0,4561	2,7347
2052	28	3.588.367	3.400.067	6.988.434	55.891	1,5576	0,7998	2,7241
2053	29	3.003.791	3.996.169	6.999.960	54.952	1,8294	0,7850	2,7283
2054	30	4.073.857	2.922.847	6.996.704	61.001	1,4974	0,8718	2,7207
2055	31	2.106.595	4.893.392	6.999.987	34.587	1,6418	0,4941	2,7348
2056	32	2.609.632	4.390.314	6.999.946	42.107	1,6135	0,6015	2,7311
2057	33	2.608.741	4.391.021	6.999.762	46.887	1,7973	0,6698	2,7312
2058	34	3.395.144	3.604.737	6.999.882	50.625	1,4911	0,7232	2,7255
2059	35	3.450.114	3.548.849	6.998.963	51.517	1,4932	0,7361	2,7251
2060	36	3.946.032	3.051.249	6.997.281	55.569	1,4082	0,7941	2,7216
2061	37	3.625.537	3.298.629	6.924.166	54.700	1,5088	0,7900	2,7236
2062	38	4.079.235	2.904.521	6.983.756	57.226	1,4029	0,8194	2,7206
2063	39	2.468.818	4.506.175	6.974.992	34.707	1,4058	0,4976	2,7321
2064	40	2.050.605	4.946.399	6.997.003	31.483	1,5353	0,4499	2,7352
2065	41	3.234.266	3.762.253	6.996.519	47.617	1,4723	0,6806	2,7267
2066	42	3.323.592	3.674.098	6.997.690	40.674	1,2238	0,5813	2,7260
2067	43	4.444.683	2.552.466	6.997.149	71.091	1,5995	1,0160	2,7180
2068	44	3.456.395	3.535.687	6.992.082	30.013	0,8683	0,4292	2,7251
2069	45	4.110.889	2.813.211	6.924.100	51.214	1,2458	0,7396	2,7201
2070	46	4.225.991	2.768.475	6.994.466	51.141	1,2101	0,7312	2,7196
2071	47	3.007.160	3.984.748	6.991.908	35.821	1,1912	0,5123	2,7283
2072	48	4.081.488	2.915.092	6.996.580	45.068	1,1042	0,6441	2,7206
2073	49	4.381.802	2.614.949	6.996.751	41.213	0,9405	0,5890	2,7185
2074	50	5.199.548	1.793.210	6.992.758	68.975	1,3266	0,9864	2,7126
Toplam		**142.524.927**	**164.087.196**	**306.612.123**	**1.924.007**	**1,3499**	**0,6275**	**2,7265**

Çizelge 4.13 İkinci optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri

Yıllar	Periyod	Cevher kütlesi (t)	Dekapaj kütlesi (t)	Toplam kütle (t)	Bakır kütlesi (t)	Tenör (%Cu)	Seyrelmiş tenör (%Cu)	Yoğunluk (t/m³)
2025	1	444.644	7.555.297	7.999.942	2.732	0,6144	0,0341	2,7472
2026	2	2.338.641	5.661.279	7.999.919	24.415	1,0440	0,3052	2,7352
2027	3	2.391.001	5.431.708	7.822.709	28.948	1,2107	0,3701	2,7345
2028	4	4.270.065	3.720.671	7.990.736	39.576	0,9268	0,4953	2,7231
2029	5	2.179.876	5.800.964	7.980.839	28.907	1,3261	0,3622	2,7362
2030	6	3.175.559	4.792.491	7.968.050	16.435	0,5176	0,2063	2,7299
2031	7	2.655.948	5.337.146	7.993.094	24.282	0,9142	0,3038	2,7332
2032	8	3.728.110	3.536.844	7.264.955	55.447	1,4873	0,7632	2,7241
2033	9	4.051.526	3.816.461	7.867.987	48.762	1,2036	0,6198	2,7240
2034	10	5.677.360	2.306.522	7.983.882	66.429	1,1701	0,8320	2,7143
2035	11	2.781.550	5.213.100	7.994.650	40.574	1,4587	0,5075	2,7324
2036	12	2.828.441	5.170.583	7.999.024	22.375	0,7911	0,2797	2,7321
2037	13	4.098.872	3.896.856	7.995.728	59.154	1,4432	0,7398	2,7241
2038	14	5.422.346	2.573.456	7.995.803	80.255	1,4801	1,0037	2,7159
2039	15	4.071.715	3.884.947	7.956.662	70.576	1,7333	0,8870	2,7242
2040	16	3.181.918	4.807.489	7.989.407	46.379	1,4576	0,5805	2,7299
2041	17	1.755.721	6.234.464	7.990.185	25.229	1,4369	0,3157	2,7389
2042	18	6.490.460	1.500.781	7.991.240	125.022	1,9262	1,5645	2,7093
2043	19	1.096.548	6.902.354	7.998.901	9.053	0,8256	0,1132	2,7430
2044	20	3.483.085	4.514.200	7.997.286	55.161	1,5837	0,6897	2,7280
2045	21	3.803.179	4.187.195	7.990.373	56.439	1,4840	0,7063	2,7260
2046	22	4.613.727	3.378.477	7.992.204	83.021	1,7994	1,0388	2,7209
2047	23	1.117.356	5.186.353	6.303.710	11.262	1,0079	0,1787	2,7410
2048	24	3.584.775	4.374.839	7.959.613	44.794	1,2496	0,5628	2,7273
2049	25	3.060.726	4.902.195	7.962.921	41.035	1,3407	0,5153	2,7306
2050	26	4.382.798	3.600.467	7.983.265	71.553	1,6326	0,8963	2,7223
2051	27	4.588.574	3.404.177	7.992.751	82.884	1,8063	1,0370	2,7211
2052	28	3.616.807	4.375.993	7.992.801	54.449	1,5054	0,6812	2,7271
2053	29	3.245.987	4.220.754	7.466.741	50.549	1,5573	0,6770	2,7280
2054	30	4.871.599	3.115.426	7.987.025	73.926	1,5175	0,9256	2,7193
2055	31	2.967.830	5.031.763	7.999.593	40.495	1,3645	0,5062	2,7312
2056	32	2.151.855	5.844.361	7.996.217	29.767	1,3833	0,3723	2,7364
2057	33	3.133.709	2.396.321	5.530.030	27.754	0,8856	0,5019	2,7214
2058	34	4.577.822	3.402.996	7.980.818	57.643	1,2592	0,7223	2,7211
2059	35	4.384.322	3.613.432	7.997.754	54.835	1,2507	0,6856	2,7224
2060	36	5.165.596	2.833.275	7.998.871	64.562	1,2498	0,8071	2,7175
2061	37	4.716.249	3.283.499	7.999.748	52.876	1,1211	0,6610	2,7203
2062	38	4.758.156	3.239.921	7.998.077	37.789	0,7942	0,4725	2,7200
2063	39	4.519.162	3.478.696	7.997.858	56.966	1,2606	0,7123	2,7215
2064	40	5.505.721	2.488.281	7.994.002	103.692	1,8834	1,2971	2,7154
2065	41	6.472.640	1.516.544	7.989.184	82.397	1,2730	1,0314	2,7094
2066	42	5.409.846	2.589.048	7.998.894	76.366	1,4116	0,9547	2,7160
2067	43	-	50.871	50.871	-	-	-	2,7500
2068	44	Bu yıllar arasında cevher üretimi ve dekapaj yapılmamıştır.						
2069	45							
2070	46							
2071	47							
2072	48	50.047	-	50.047	746	1,4898	1,4898	2,7000
2073	49	327.970	28.306	356.275	6.264	1,9099	1,7581	2,7039
2074	50	2.626.877	553.153	3.180.030	40.706	1,5496	1,2801	2,7086
Toplam		**159.776.716**	**173.753.957**	**333.530.673**	**2.172.481**	**1,3597**	**0,6514**	**2,7258**

Çizelge 4.14 Üçüncü optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri

Yıllar	Periyod	Cevher kütlesi (t)	Dekapaj kütlesi (t)	Toplam kütle (t)	Bakır kütlesi (t)	Tenör (%Cu)	Seyrelmiş tenör (%Cu)	Yoğunluk (t/m³)
2025	1	296.794	7.682.162	7.978.956	2.090	0,7042	0,0262	2,7481
2026	2	2.898.511	5.089.300	7.987.811	28.925	0,9979	0,3621	2,7316
2027	3	3.561.020	4.430.755	7.991.775	35.051	0,9843	0,4386	2,7275
2028	4	4.581.986	3.417.452	7.999.439	52.080	1,1366	0,6510	2,7211
2029	5	3.166.136	4.830.301	7.996.437	20.565	0,6495	0,2572	2,7300
2030	6	5.222.010	2.761.238	7.983.247	64.644	1,2379	0,8097	2,7171
2031	7	5.187.827	2.808.384	7.996.212	49.233	0,9490	0,6157	2,7174
2032	8	5.347.353	2.649.788	7.997.141	61.800	1,1557	0,7728	2,7164
2033	9	847.663	984.336	1.831.999	11.888	1,4024	0,6489	2,7266
2034	10	4.528.672	2.870.707	7.399.379	73.657	1,6265	0,9954	2,7192
2035	11	772.434	671.239	1.443.673	10.890	1,4098	0,7543	2,7230
2036	12	3.280.257	2.421.887	5.702.144	53.614	1,6345	0,9402	2,7210
2037	13	2.167.676	5.827.543	7.995.219	35.788	1,6510	0,4476	2,7363
2038	14	761.581	7.201.761	7.963.342	10.696	1,4044	0,1343	2,7451
2039	15	4.081.738	3.392.662	7.474.399	63.923	1,5661	0,8552	2,7225
2040	16	3.704.830	4.290.940	7.995.771	44.059	1,1892	0,5510	2,7266
2041	17	2.093.622	5.903.743	7.997.365	32.268	1,5412	0,4035	2,7367
2042	18	1.586.738	6.412.141	7.998.879	22.543	1,4207	0,2818	2,7399
2043	19	2.761.200	5.228.830	7.990.031	47.487	1,7198	0,5943	2,7325
2044	20	3.000.705	4.999.106	7.999.812	43.361	1,4450	0,5420	2,7310
2045	21	1.248.303	5.727.699	6.976.002	13.021	1,0431	0,1867	2,7409
2046	22	4.401.743	3.019.025	7.420.768	52.598	1,1949	0,7088	2,7201
2047	23	4.716.645	3.280.749	7.997.394	85.377	1,8101	1,0676	2,7203
2048	24	3.058.138	4.933.645	7.991.784	43.236	1,4138	0,5410	2,7306
2049	25	5.050.939	2.937.008	7.987.947	97.856	1,9374	1,2250	2,7182
2050	26	3.292.293	4.699.062	7.991.356	53.229	1,6168	0,6661	2,7292
2051	27	3.773.781	4.222.490	7.996.271	63.991	1,6957	0,8003	2,7262
2052	28	3.430.181	4.547.460	7.977.641	53.951	1,5728	0,6763	2,7283
2053	29	4.121.605	3.874.667	7.996.271	67.385	1,6349	0,8427	2,7240
2054	30	4.339.183	3.656.733	7.995.916	64.613	1,4891	0,8081	2,7226
2055	31	2.710.815	5.239.667	7.950.482	43.516	1,6053	0,5473	2,7327
2056	32	4.487.343	3.512.522	7.999.864	64.295	1,4328	0,8037	2,7217
2057	33	3.650.839	4.330.249	7.981.089	57.570	1,5769	0,7213	2,7269
2058	34	2.957.128	5.042.521	7.999.648	35.591	1,2036	0,4449	2,7313
2059	35	4.370.213	3.629.441	7.999.654	55.645	1,2733	0,6956	2,7225
2060	36	3.489.516	4.509.949	7.999.465	38.465	1,1023	0,4808	2,7280
2061	37	3.368.825	2.550.744	5.919.569	42.064	1,2486	0,7106	2,7213
2062	38	5.422.505	2.563.498	7.986.003	46.219	0,8524	0,5788	2,7159
2063	39	4.636.856	3.359.986	7.996.843	49.922	1,0766	0,6243	2,7208
2064	40	4.823.043	3.162.579	7.985.622	47.473	0,9843	0,5945	2,7196
2065	41	4.840.270	3.156.494	7.996.763	56.400	1,1652	0,7053	2,7195
2066	42	5.176.201	2.822.191	7.998.392	97.085	1,8756	1,2138	2,7174
2067	43	5.111.900	2.878.926	7.990.826	63.729	1,2467	0,7975	2,7178
2068	44	5.063.633	1.836.357	6.899.990	74.777	1,4767	1,0837	2,7131
2069	45	2.538.266	315.040	2.853.306	40.203	1,5839	1,4090	2,7054
Toplam		**159.928.919**	**173.682.974**	**333.611.893**	**2.172.775**	**1,3586**	**0,6513**	**2,7258**

Dördüncü denemede diğer girdi unsurları aynı kalmak koşuluyla cevherin bakır tenörü en az %0,7'ye yükseltilmiştir. Sonuçlar, Çizelge 4.16'da sunulmuştur. 139.490.587 ton cevher, 159.861.264 ton pasa üretilecektir. Cevher içerisindeki bakır miktarı 1.870.358

t'a düşmüştür. Üretilen cevherin ağırlıklı ortalama tenörü %1,3408, seyreltilmiş ağırlıklı ortalama tenörü %0,6248'dir.

Çizelge 4.15 Dördüncü optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri

Yıllar	Periyod	Cevher kütlesi (t)	Dekapaj kütlesi (t)	Toplam kütle (t)	Bakır kütlesi (t)	Tenör (%Cu)	Seyrelmiş tenör (%Cu)	Yoğunluk (t/m³)
2025	1	400.531	7.595.194	7.995.725	2.875	0,7177	0,0360	2,7475
2026	2	2.509.566	5.488.964	7.998.530	24.181	0,9636	0,3023	2,7341
2027	3	3.865.729	4.133.447	7.999.176	44.784	1,1585	0,5599	2,7256
2028	4	5.232.888	2.766.332	7.999.220	57.450	1,0979	0,7182	2,7171
2029	5	Bu yıllar arasında cevher üretimi ve dekapaj yapılmamıştır.						
2030	6							
2031	7	257.058	436.782	693.840	4.407	1,7146	0,6352	2,7313
2032	8	3.052.170	2.953.998	6.006.168	33.550	1,0992	0,5586	2,7244
2033	9	41	1.450.600	1.450.641	1	1,7596	0,0000	2,7500
2034	10	4.712.662	3.239.965	7.952.628	48.401	1,0271	0,6086	2,7201
2035	11	1.442.846	6.018.309	7.461.154	13.061	0,9052	0,1751	2,7402
2036	12	3.441.081	4.306.154	7.747.235	28.820	0,8375	0,3720	2,7276
2037	13	2.586.696	3.988.280	6.574.976	26.750	1,0341	0,4068	2,7301
2038	14	3.272.542	3.517.496	6.790.038	37.747	1,1534	0,5559	2,7257
2039	15	1.498.296	823.956	2.322.252	21.873	1,4599	0,9419	2,7175
2040	16	4.874.007	2.711.506	7.585.513	65.616	1,3462	0,8650	2,7177
2041	17	1.737.269	5.230.139	6.967.408	18.997	1,0935	0,2727	2,7374
2042	18	3.676.653	4.199.942	7.876.595	52.174	1,4191	0,6624	2,7264
2043	19	Bu yıllar arasında cevher üretimi ve dekapaj yapılmamıştır.						
2044	20							
2045	21	2.870.257	4.436.751	7.307.007	49.858	1,7371	0,6823	2,7301
2046	22	3.406.499	4.584.018	7.990.517	51.893	1,5234	0,6494	2,7285
2047	23	3.559.130	4.273.349	7.832.479	57.704	1,6213	0,7367	2,7271
2048	24	2.012.652	5.982.675	7.995.327	28.406	1,4114	0,3553	2,7372
2049	25	1.874.326	6.121.760	7.996.087	34.211	1,8252	0,4278	2,7381
2050	26	4.718.309	3.268.344	7.986.654	80.056	1,6967	1,0024	2,7202
2051	27	3.613.272	4.375.792	7.989.064	42.632	1,1799	0,5336	2,7272
2052	28	3.934.087	4.065.699	7.999.786	60.717	1,5434	0,7590	2,7252
2053	29	5.840.521	2.075.267	7.915.788	114.454	1,9596	1,4459	2,7129
2054	30	4.180.209	3.810.510	7.990.719	63.398	1,5166	0,7934	2,7236
2055	31	2.193.852	5.785.668	7.979.520	33.638	1,5333	0,4216	2,7361
2056	32	4.067.434	3.926.144	7.993.578	66.306	1,6302	0,8295	2,7243
2057	33	3.375.596	4.020.261	7.395.857	47.773	1,4153	0,6459	2,7270
2058	34	3.706.207	4.164.651	7.870.858	47.324	1,2769	0,6013	2,7262
2059	35	4.506.783	3.254.829	7.761.612	84.204	1,8684	1,0849	2,7207
2060	36	2.972.608	5.020.129	7.992.737	43.752	1,4718	0,5474	2,7312
2061	37	3.268.451	4.724.667	7.993.118	37.615	1,1508	0,4706	2,7293
2062	38	3.810.026	4.168.112	7.978.138	51.623	1,3549	0,6471	2,7259
2063	39	4.818.866	3.167.534	7.986.400	79.690	1,6537	0,9978	2,7196
2064	40	4.565.121	3.433.924	7.999.045	50.805	1,1129	0,6351	2,7212
2065	41	4.962.829	3.036.485	7.999.314	62.460	1,2586	0,7808	2,7188
2066	42	4.135.624	3.855.932	7.991.556	32.790	0,7929	0,4103	2,7239
2067	43	4.572.128	3.421.529	7.993.656	47.070	1,0295	0,5888	2,7212
2068	44	3.866.193	4.127.901	7.994.094	50.729	1,3121	0,6346	2,7256
2069	45	6.099.572	1.898.269	7.997.841	70.560	1,1568	0,8822	2,7117
Toplam		**139.490.587**	**159.861.264**	**299.351.851**	**1.870.358**	**1,3408**	**0,6248**	**2,7265**

Beşinci denemede cevherin bakır tenörü en az %1,0'a yükseltilmiştir. Çizelge 4.17'den, 29.622.059 t cevher ve 44.587.567 t pasa üretilecektir. Bakır miktarı 321.201 t'a düşmüştür. Cevherin ağırlıklı ortalama tenörü %1,0843, seyreltilmiş tenörü %0,4328'dir.

Çizelge 4.16 Beşinci optimizasyon denemesinde bakır ocağının yıllık üretim bilgileri

Yıllar	Periyod	Cevher kütlesi (t)	Dekapaj kütlesi (t)	Toplam kütle (t)	Bakır kütlesi (t)	Tenör (%Cu)	Seyrelmiş tenör (%Cu)	Yoğunluk (t/m³)
2025	1	-	252.150	252.150	-		-	2,7500
2026	2	-	1.925.019	1.925.019	-		-	2,7500
2027	3	-	802.656	802.656	-		-	2,7500
2028	4	-	1.947.902	1.947.902	-		-	2,7500
2029	5	-	894.372	894.372	-		-	2,7500
2030	6	28	646.165	646.193	1	2,9035	0,0001	2,7500
2031	7	2.967	5.127.925	5.130.892	32	1,0697	0,0006	2,7500
2032	8	95.343	7.241.968	7.337.311	989	1,0370	0,0135	2,7493
2033	9	911.602	6.518.356	7.429.958	9.268	1,0167	0,1247	2,7438
2034	10	2.716.084	5.275.229	7.991.313	29.456	1,0845	0,3686	2,7328
2035	11	3.511.901	4.375.072	7.886.974	41.059	1,1691	0,5206	2,7275
2036	12	4.165.645	3.824.856	7.990.501	48.073	1,1540	0,6016	2,7237
2037	13	5.596.381	2.379.888	7.976.269	57.643	1,0300	0,7227	2,7147
2038	14	6.276.513	1.722.452	7.998.965	64.961	1,0350	0,8121	2,7106
2039	15	6.345.593	1.653.556	7.999.149	69.719	1,0987	0,8716	2,7102
2040	16							
2041	17							
2042	18							
2043	19							
2044	20							
2045	21							
2046	22							
2047	23							
2048	24							
2049	25							
2050	26							
2051	27							
2052	28							
2053	29							
2054	30							
2055	31							
2056	32							
2057	33							
2058	34							
2059	35							
2060	36							
2061	37							
2062	38							
2063	39							
2064	40							
2065	41							
2066	42							
2067	43							
2068	44							
2069	45							
Toplam		**29.622.059**	**44.587.567**	**74.209.626**	**321.201**	**1,0843**	**0,4328**	**2,7298**

Bu yıllar arasında cevher üretimi ve dekapaj yapılmamıştır.

4.8.3 Optimizasyona Dönük Değerlendirme

Maden bloklarına tenör ve tonaj atama işlemleri tamamlandıktan sonra ocaktaki üretim çizelgelenmiştir. Yıllık en fazla 7,5 mt üretim oranı ile ocak 50 yıl boyunca çalıştırılacak ve ortalama %1,3566 Cu tenörüne sahip 158.754.208 t cevher üretilecek, 173.428.495 t dekapaj yapılacak ve 2.153.604 t metalik bakır elde edilecektir.

Maden planlama paketi ile çizelgelenen üretim, tanımlanan kısıt(lar) ve bir amaç doğrultusunda optimize edilebilmektedir. Böylece, beş ardışık optimizasyon denemesi yapılarak önceden belirlenmiş yıllık üretim miktarı ile ortalama tenör kısıdını sağlayan en büyük cevher miktarını üretmek amaçlanmıştır.

Tümünde ocaktan yapılan cevher üretiminin enbüyüklenmesi amaçlanan denemelerin sonuçları Çizelge 4.17'de toplu halde verilmiştir. Tenör kısıdı getirilmeyen 2. denemede yıllık üretim miktarının artırılması, ocak ömrü boyunca yapılan üretimi ve ortalama tenörü artırmıştır. En küçük %0,40 tenörlü cevher üretimini amaçlayan 3. denemede ocak ömrü 45 yıla düşürülmüş olmakla birlikte erişilen tonajlar azalmamıştır. 4. denemede en küçük cevher tenörü %0,70 Cu'ya çıkarıldığında, düşük tenörlü cevher ile temsil edilen ocağın bu koşullar altında işletilmesi güçleşmiş ve bunun sonucunda cevher, bakır ve dekapaj tonajları %10 kadar azalmıştır. En az %1,0 tenörlü cevher üretimi istenilen 5. denemede ise çizelgelenen üretimin %20 kadarı sağlanabilmiştir.

Çizelgeleme optimizasyonu cevher tenörüne hassastır. Yüksek tenörlü cevher üretimi talebi, ocaktan yapılabilecek cevher üretimini düşürmekte ve cevherin bir bölümünün dekapaja dönüşmesine neden olmaktadır. Sonuçta, 3. denemedeki kısıtlar altında üretim yapılması, ocaktaki tüm cevherin çıkartılmasını sağlayacaktır.

Çizelge 4.17 Optimizasyon aşamaları ve üretime dönük bilgiler

Deneme	1	2	3	4	5
Amaç	Ocaktan yapılan cevher üretimini enbüyüklemek				
Kısıt	7 mt/yıl üretim 50 yıl ocak ömrü	8 mt/yıl üretim 50 yıl ocak ömrü	8 mt/yıl üretim Tenör > %0,4 Cu 45 yıl ocak ömrü	8 mt/yıl üretim Tenör > %0,7 Cu 45 yıl ocak ömrü	8 mt/yıl üretim Tenör > %1,0 Cu 45 yıl ocak ömrü
Toplam cevher üretimi (t)	142.524.927	159.776.716	159.928.919	139.490.587	29.622.059
Toplam dekapaj (t)	164.087.196	173.753.957	173.682.974	159.861.264	44.587.567
Toplam üretim (t)	306.612.123	333.530.673	333.611.893	299.351.851	74.209.626
Toplam bakır üretimi (t)	1.924.007	2.172.481	2.172.775	1.870.358	321.201
Ort. tenör (%)	1,3499	1,3597	1,3586	1,3408	1,0843
Min tenör (%)	0,6275	0,6514	0,6513	0,6248	0,4328
Mak tenör (%)	2,7265	2,7258	2,7258	2,7265	2,7298

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında bir bakır maden kaynağının açık işletme üretim yöntemi ile üretilebilmesi için kaynak kestirimi, en uygun ocak sınırlarının belirlenmesi, ocak tasarımı ve üretim çizelgelemesi işlemleri yapılmıştır.

Çalışma sahasına ait 213 adet sondaj verisinden faydalanılarak veri tabanı oluşturulmuştur. Sondajlar üç boyutlu olarak incelenmiş, cevherin doğrultusu eğim yönü ve eğimi ile dalımı dikkate alınarak dört sektörden oluşan arama elipsoidi tasarlanmıştır. Arama elipsoidi özellikleri kullanılarak cevher sahası içinde arama sondajları tarafından kesilen bakır, biyotit, andezit, granodiyorit ve örtü toprağı birimlerine ait katı gövde modelleri, telkafes biçiminde oluşturulmuştur. Cevher katı modelinin hacmi 112.544.854,4 m^3 olarak hesaplanmıştır.

Katı gövde modelleme aşamasından sonra boş blok model ve jeolojik blok model hazırlanmıştır. Her bir bloğun tenör dağılımları ters mesafe ile ağırlıklandırma kestirim yöntemi yatağın toplam maden kaynağı, ortalama 0,74% bakır tenörü ile 1.057.972.927 ton cevher ve toplam bakır kaynağı 7.912.802,0 ton olarak tahmin edilmiştir.

Ocak optimizasyonunda Lerchs-Grosmann algoritması kullanılmış ve ardışık senaryolar oluşturularak bakır maden kaynağının en büyük bölümünün kazançlı biçimde işletilebileceği en derin ocak kabuğu ve en geniş ocak sınırları belirlenmiştir. Belirlenen ocak derinliği 405 m olup üretim katları 2685 m ile 2280 m arasında yer almaktadır. 2,4298 t/t örtükazı oranı ile 98.591.725,86 ton seyrelmiş cevher çıkartılmış ve 239.557.910,20 ton dekapaj (toplam 338.149.636,06 t cevher + dekapaj) yapılmıştır. Netice itibariyle, 7.680.348.689,0 US$ maliyet ve 11.550.512.671,0 US$ gelir oluşmakta ve paranın zaman değeri dikkate alınmadığında 3.870.163.982,0 US$ kâr elde edilmektedir.

Yuvalı ocak optimizasyonunda gelir katsayısı 0,6 – 1,4 aralığında değiştirilmiş ve her yuvalı ocak, bir sonrakine doğru büyürken en az 50000 ton'luk üretim kısıdına göre planlanmıştır. Üretim süreci 50 yıla yayılan 17 adet iç içe ocak ile sonuçlanmıştır. Ocaktaki işletme faaliyetlerinin en iyi durum ve eşzamanlı çoklu kat senaryolarına göre yapılması durumunda üretimin safhalar ve yıllar bazındaki değişimleri incelenmiştir. En iyi durum senaryosu ile kazancın net bugünkü değeri (NPV) 19.009.284 US$ iken, ilk altı yılda yapılan toplam 300.000.000,0 US$ değerindeki sabit yatırımlar da dikkate

alındığında kazancın net bugünkü değeri -9.584.820 US$'a düşmektedir. Diğer yandan eşzamanlı çoklu basamak senaryosu ile aynı yatırımlar dâhil 17.146.508 US$ net bugünkü değer sağlanmıştır.

Yuvalı ocakların sonuncusu olan 17. ocak kabuğu, 8975 US$/ton olarak belirlenen satış fiyatındaki değerde oluşmuştur. Yıllar bazında elde edilen gelir artmakta ancak günümüze indirgenmiş net gelir 6. ocak kabuğundan sonra sabit kaldığı görülmüştür. Ancak sahadaki bakır kaynağının en büyük bölümünün çıkartılmasına olanak sağladığı için bundan sonra yapılacak ocak tasarımında altıncı (6) ocağın kullanılmasına karar verilmiştir.

Açık işletme tasarımında, 2290 kotu olan ocak tabanından başlatılmış, topografyayı kesecek biçimde yüzeye doğru yükselerek oluşturulan basamaklar ve basamaklar arasında yukarı doğrultuda ilerleyen taşıma yolları ile eşzamanlı olarak hazırlanmıştır. Basamak yüksekliği ve genişliği 10 m ve 9 m, basamak şev açısı 50° olarak alınmıştır.

Çizelgeleme işlemleri sonucunda bakır ocağının yıllık cevher+dekapaj olmak üzere toplam 6.000.000,0 ton üretim yapılması koşulu ile 2025 - 2074 yılları arasında çalışacağı ve 2.172.481 ton bakır üretilebileceği ortaya çıkmıştır.

Maden planlama aşamalarının en önemli girdi parametreleri sondajlardan elde edilen veriler (litolojik birim, kalınlık, öznitelik değerleri vb.) ile nihai ocak optimizasyonunda kullanılan girdi parametreler (maden işletme ve zenginleştirme maliyeti, satış fiyatı, satış maliyeti vb.) oluşturmaktadır. İşaret edilen parametrelerinin doğru bir şekilde elde edilmesi için ön fizibilite ve araştırma çalışmalarına yeterince önem verilmelidir.

KAYNAKLAR

Açan, H. (2013). Bir demir sahasının Surpac entegre madencilik yazılımı ile değerlendirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 184 s, İstanbul.

Akisa, D.M., Mireku-Gyimah, D. (2015). Application of Surpac and Whittle software in open pit optimisation and design. *Ghana Mining Journal*, 15(1), 35-43.

Aliyazıcıoğlu, Ş. (2011). Örnek bir madenin Surpac programı ile modellenmesi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 95 s, Trabzon.

Arıoğlu, E. (1986). Jeoloji mühendisleri için madencilik bilgisi. İstanbul: *İ.T.Ü. Madencilik Fakültesi* Ofset Atölyesi.

Beck, D.M.B. (2013). Determination of optimal mining cut-off grades: mathematical formulation and solution algorithm: (case study: Hinoba copper mine in the Philippines). *New Mexico Institute of Mining and Technology* (Master's Thesis), 50 p, New Mexico.

Ceylanoğlu, A. (1991). Açık işletme yöntemleri ders notları, *Cumhuriyet Üniversitesi*, 71 s, Sivas.

Demirci, A., Şengün, B. (2018). Krom yataklarının kazanılmasında uygulama bulan üretim yöntemleri, *Krom Çalıştayı Bildiriler Kitabı*, Maden Mühendisleri Odası Adana Şubesi, 13 Ekim, 89-108, Adana.

Ergin, H., Kırmanlı, C., Erdoğan, T. (1998). Yeni bilgisayar teknikleri ile kaliteye bağlı olarak sınıflandırılmış kömür rezervlerinin belirlenmesi. *Madencilik*, 37(4), 13-22.

Eşiyok, A. (2019). Micromine, yer altı maden işletmelerinde optimizasyon, stratejik ve operasyonel maden planlama. *Madencilik Türkiye*, 83, 58-60.

Fenerli, U.R., Güven, S., (2019). Maden planlama ve önemi. *Madencilik Türkiye*, 79, 86-95.

Fidan, F., Dağ, A., Ayhan, M. (2011). Hınıs-Zırnak (Erzurum) yöresi linyit yatağının değerlendirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 115-124.

Göksüner, E. (2010). Bilgisayar destekli maden işletme tasarımının kalker ocaklarına uygulanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden İşletme Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 85 s, İzmir

Göktürk, V. (2004). Açık ocak işletmeciliğinde otomasyon ve GPS uygulaması. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul.

Hasözdemir, K. (2019). Açık ocak üretim yöntemi ile üretim yapacak olan bir maden ocağının üretim planlamasının optimizasyonu, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek lisans tezi) 83s, İstanbul.

Hustrulid, W., Kuchta, M., Martin, R. (2013). Open pit mine planning and design, 3rd ed. *CRC Press, Taylor and Francis Group*, pp 450-451, London.

Indian Bureau of Mines, (2016). Indian Minerals Yearbook 2014, Copper, Part- II: Metals & Alloys, 53rd Edition, *Government of India, Ministry of Mines*, Nagpur.

Indian Bureau of Mines, (2020). Indian Minerals Yearbook 2019, Copper, Part- II: Metals & Alloys, 58rd Edition, *Government of India, Ministry of Mines*, Nagpur.

Japan International Cooperation Agency, (1990). Report on the Mineral Exploration in the Rakah area, Sultanate of Oman. *Final Report, Vol. 3 Japan International Cooperation Agency*.

Karakurt, E. (2019). Metalik açık ocak madenlerinde üretim planı optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden İşletme Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 51 s, İzmir.

Karakurt, E., Onur, A.H. (2019). Açık ocak üretim planlaması için örnek bir uygulama. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34, 85-94. https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.637626

Karim, Md.M., Howladar, M.F. (2013). Volumetric estimation of coal resources in seam VI for require backfill materials of Barapukuria coal mine, Dinajpur, Bangladesh, *Earth Sciences*, 2(6), 113-119.

Khezrawi, L. (2022). Bir açık cevher ocağının nihai ve optimum sınırlarının belirlenmesi. *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü* (Yüksek Lisans Tezi), 53 s, Sivas.

Kim, Y. C., Knudsen, H.P. (1975). Comparative study of the geostatistical ore reserve estimation method over the conventional methods. *Arizona University, Tucson*.

Knudsen, H.P. (1975). A comparison of the geostatistical ore reserve estimation method over the conventional methods. *The University of Arizona*, (Master of Science Thesis), Arizona.

Lerchs, H., Grossmann, I.F. (1965). Optimum design of open pit mines. *Transactions, CIM*, Volume LXVII, 17-24.

Lotfian, R., Gholamnejad, J., Mirzaeian Lardkeyvan, Y. (2020). Effective solution of the long-term open pit production planning problem using block clustering. Engineering Optimization, *53*(7), 1119–1134. https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1771703

Maleki, B., Mozaffari, E., Mahdavipour, M.J. (2016). Optimizing the cut off grade in Sarcheshmeh copper mine using Lane Quartet model. *Journal of Mining and Metallurgy*, 52A(1), 27-35.

Moharaj, M.C., Wangmo, Y. (2014). Ore body modeling and comparison of different reserve estimation techniques. *National Institute of Technology of Rourkela* (Bachelor of Technology Thesis), 42 p, India.

Organ, A., Ertuğrul, İ., Gürel, S.G. (2013). Bütünleşik üretim planlamasının hedef programlamayla optimizasyonu ve Denizli imalat sanayiinde uygulanması. *Niğde Üniversitesi İİBF Dergisi*, 6(1), 96-115.

Osanloo, M., Gholamnejad, J., Karimi, B. (2008). Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *22*(1), 3–35. https://doi.org/10.1080/17480930601118947

Öngen, Ö. (2008). Madencilikte bilgisayar uygulamaları ve Surpac yazılımı ile bir ocak planlaması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden İşletme Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 139 s, İzmir.

Özkan, M. (2006). Açık ocak işletmelerinde optimum nihai sınırın belirlenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi) 120 s, İstanbul.

Özkan, M. (2015). Açık işletmelerinde optimum üretim planlamasında yeni bir yöntem geliştirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı* (Doktora Tezi) 186 s, İstanbul.

Özkan, M., **Erçelebi, S.** (2014). Açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemler, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2(3), 38-53.

Özkan, Y.Z., Akbaba, M.A. (2013). Örneklemeden rapor etmeye adım adım maden kaynak tahmini. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*. 37(2), 141-158.

Revuelta, M.B. (2018). Mineral resources: from exploration to sustainability assessment. *Springer International Publishing AG*, 663 p, Switzerland.

Saban, M. (2016). Yer üstü maden işletmelerinde dekapaj maliyetlerinin muhasebeleştirilmesi ve raporlanması, *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 12(30), 39-61.

Schodde, R. (2010). The key drivers behind resource growth: an analysis of the copper industry over the last 100 years. *Proceedings of the 2010 MEMS Conference Mineral and Metal Markets over the Long Term Joint Program*, February 28-March 3, Phoenix.

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of ACM National Conference*, August 27-29, New York, 517-524.

Shishvan, M.S., Sattarvand, J. (2015). Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 825-836. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.040

T.C. Kalkınma Bakanlığı (2018). Madencilik Politikaları, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), Özel İhtisas Komisyonu Raporu. *T.C. Kalkınma Bakanlığı, Ankara*, 161-162.

Tercan, E., Akçan, E. (2005). Linyit kalitesi-rezerv eğrilerindeki belirsizliğin jeoistatistiksel benzetimle değerlendirilmesi: örnek bir çalışma. *Madencilik*, 44(2), 1-14.

Topal, E., Ramazan, S. (2012). Strategic mine planning model using network flow model and real case application. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26(1), 29-37.

Url-1 <*https://www.micromine.com/*> alındığı tarih: 01.01.2024.

Url-2 <*https://www.furkankasa.net/lerchs-and-grossman-2d-mine-optimization-algorithm-with-excel*> alındığı tarih: 20.02.2024.

Url-3 <https://whittleconsulting.com.au/livebook/downloads/Milawa-brochure.PDF>; alındığı tarih: 22.02.2024

Üredi, T. (2018). Bilgisayar destekli cevher modellemesi ve açık işletme tasarımı. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 86 s, Sivas.

Visser, R., Pretorius, J.H.C., Pretorius, L. (2013). A case study in developing a life of mine plan. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, February 25-28, 1438-1442, South Africa.

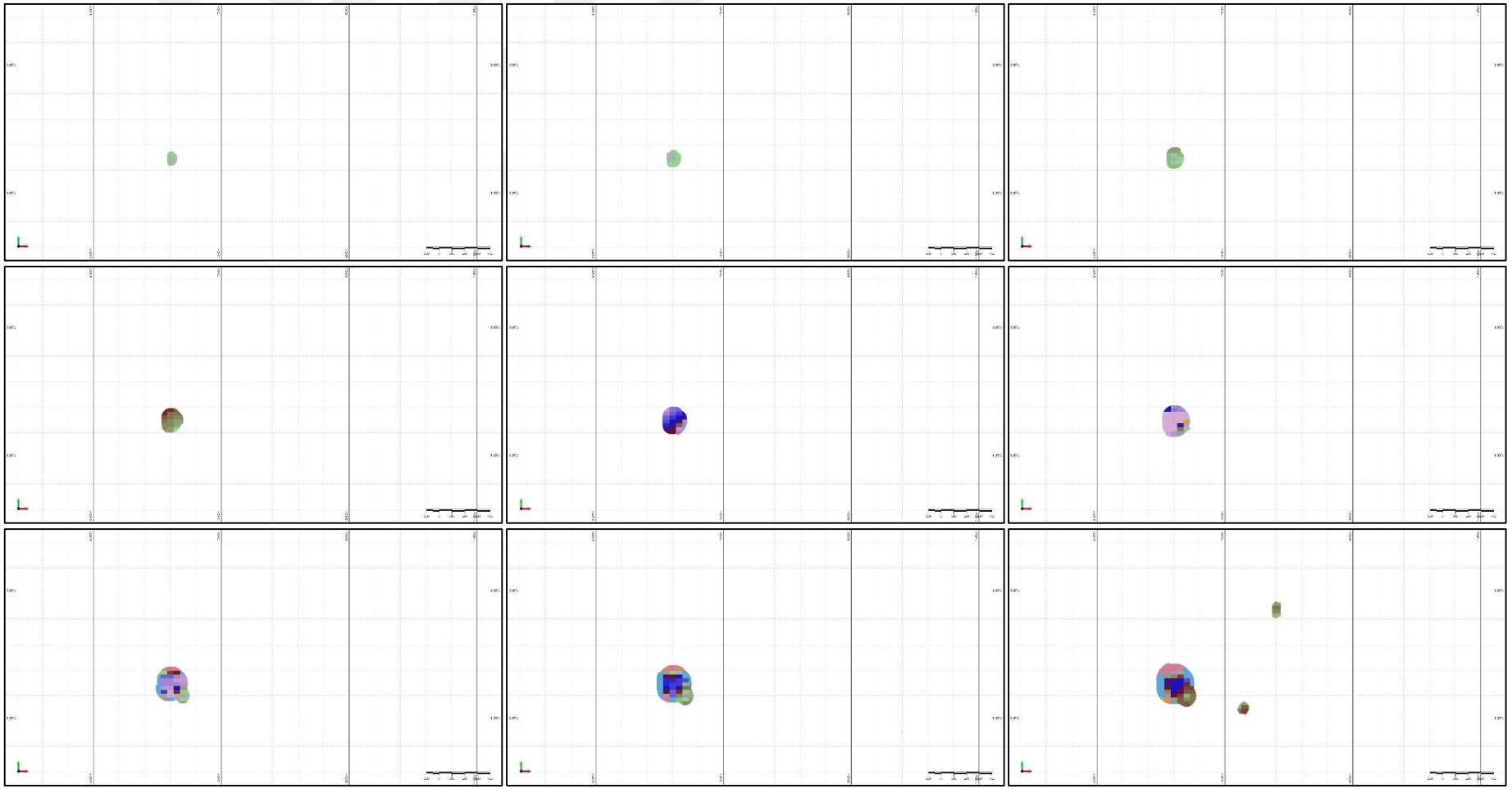
Westman, E. C. (1999). A characterization and determination of the coal reserves and resources of southwest Virginia. Dissertation submitted to the Faculty of the *Virginia Polytechnic Institute and State University* (Doctoral Thesis), 154 p, Virginia.

Whittle, D., Whittle, J., Wharton, C., Hall, G. (2005). Strategic mine planning. *Gemcom Software International Inc*., 233 s, Australia.

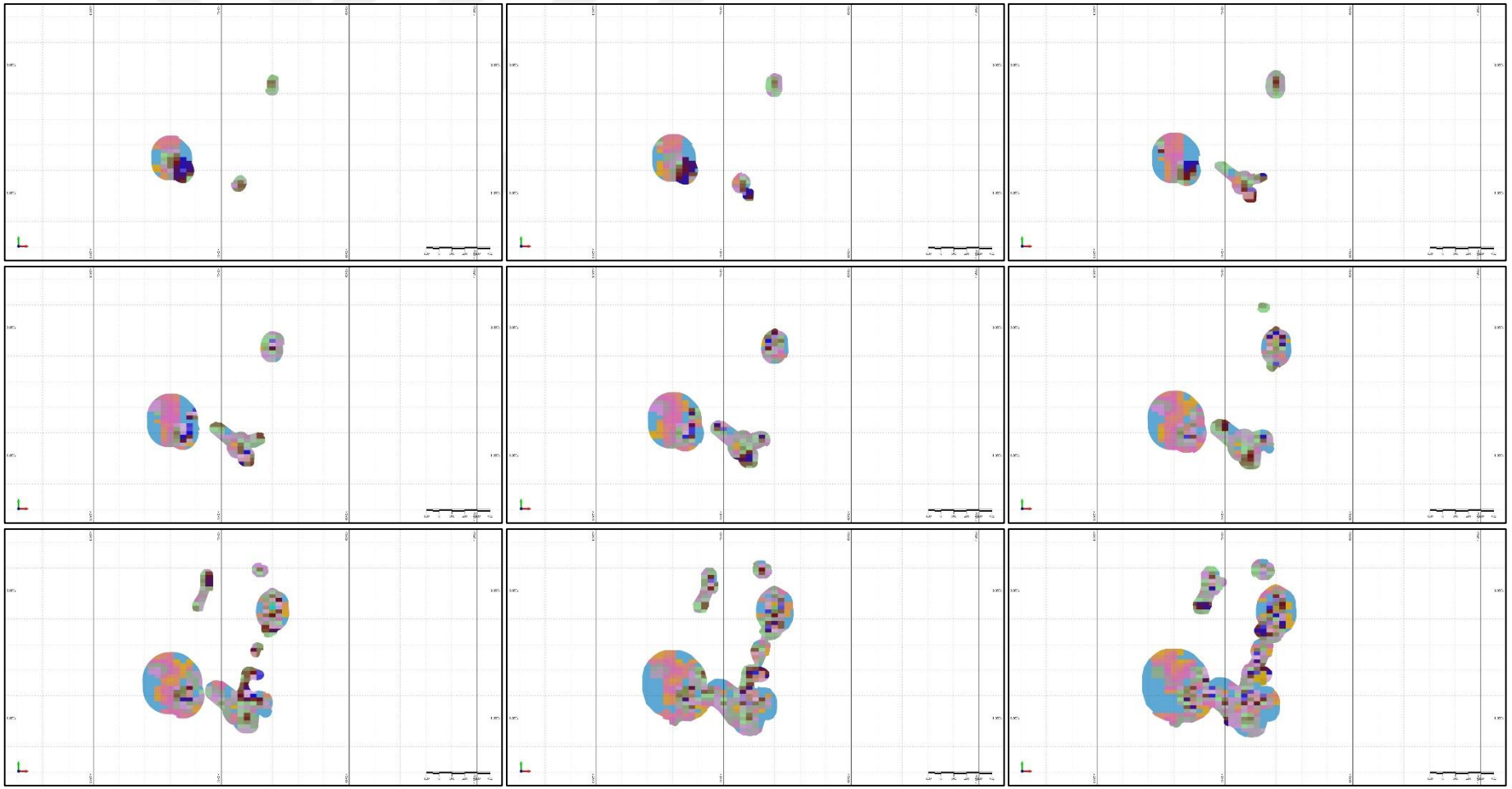
Yalçın, E. (1993). Kömür rezerv tahmininde variogram etki mesafesinin önemi. *Madencilik*, 22(3-4), 15-21.

Yünsel, T.Y. (2007). Maden yataklarının jeoistatistiksel yöntemlerle analizi ve modellenmesi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı* (Doktora Tezi), 232 s, Adana.

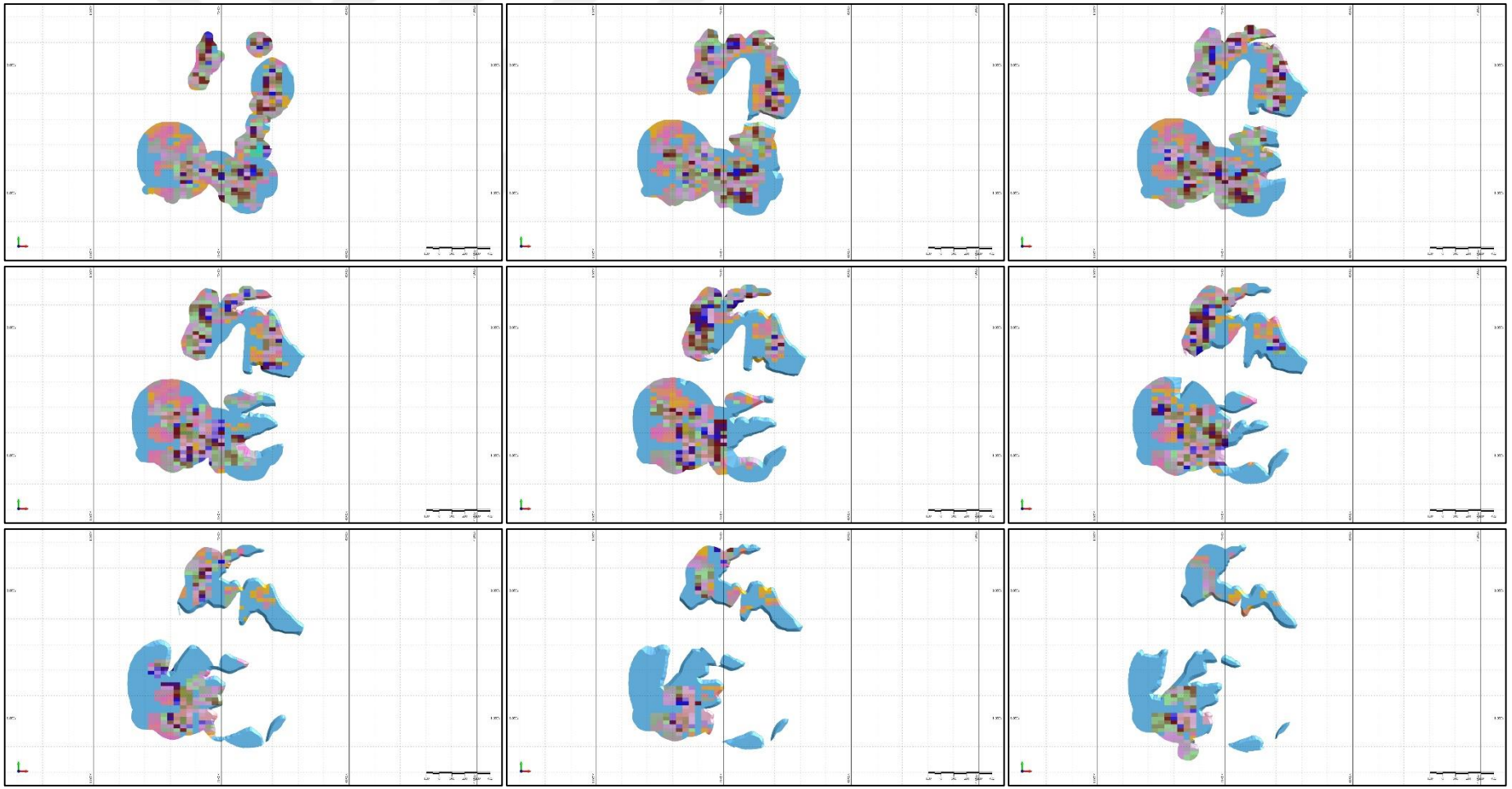
EK- MADEN BLOKLARININ KATLARA DAĞILIMI



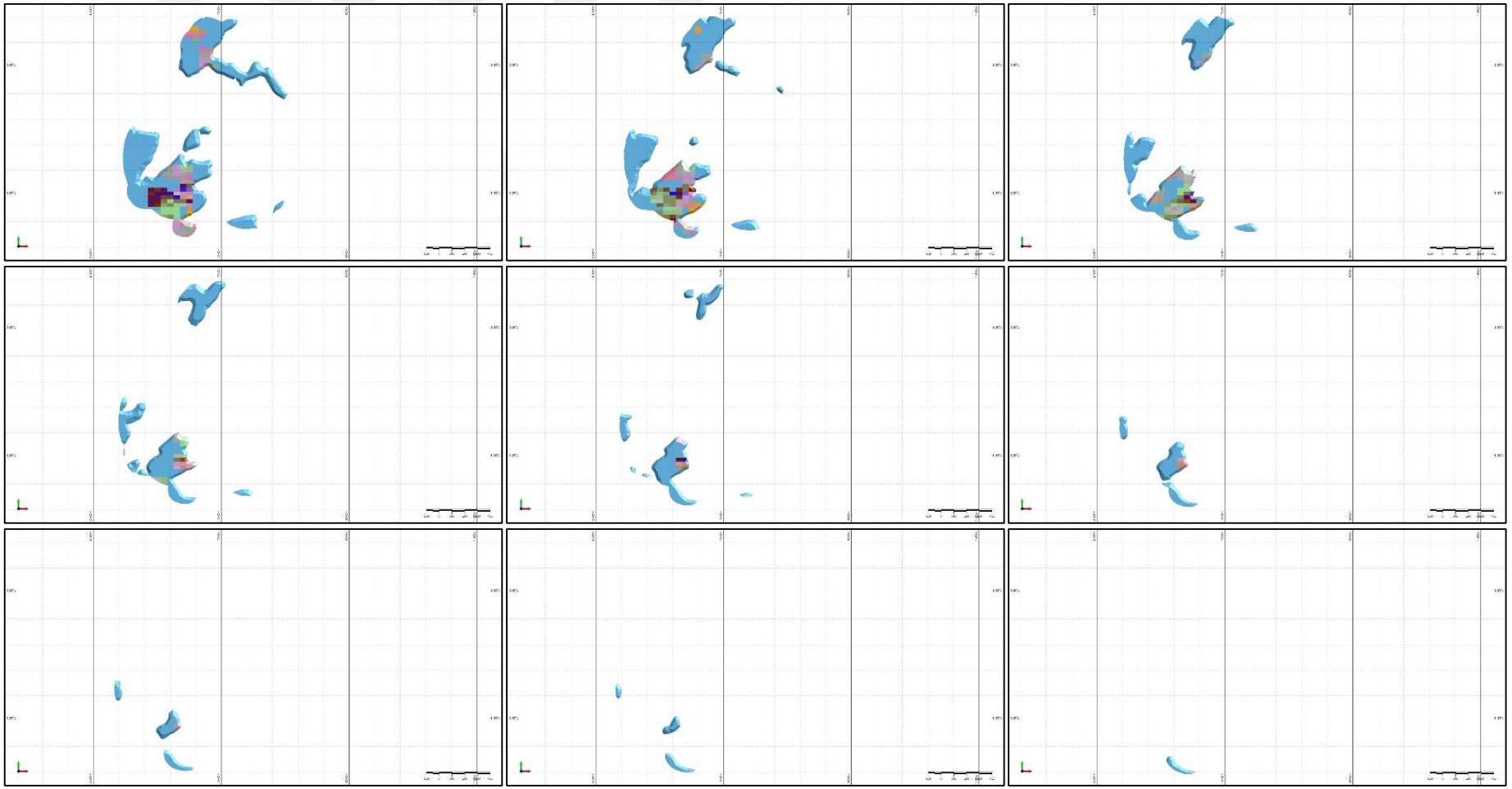
Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2290 katı (üst sol), 2300 katı (üst orta), 2310 katı (üst sağ), 2320 katı (orta sol), 2330 katı (orta orta), 2340 katı (orta sağ), 2350 katı (alt sol), 2360 katı (alt orta), 2370 katı (alt sağ)



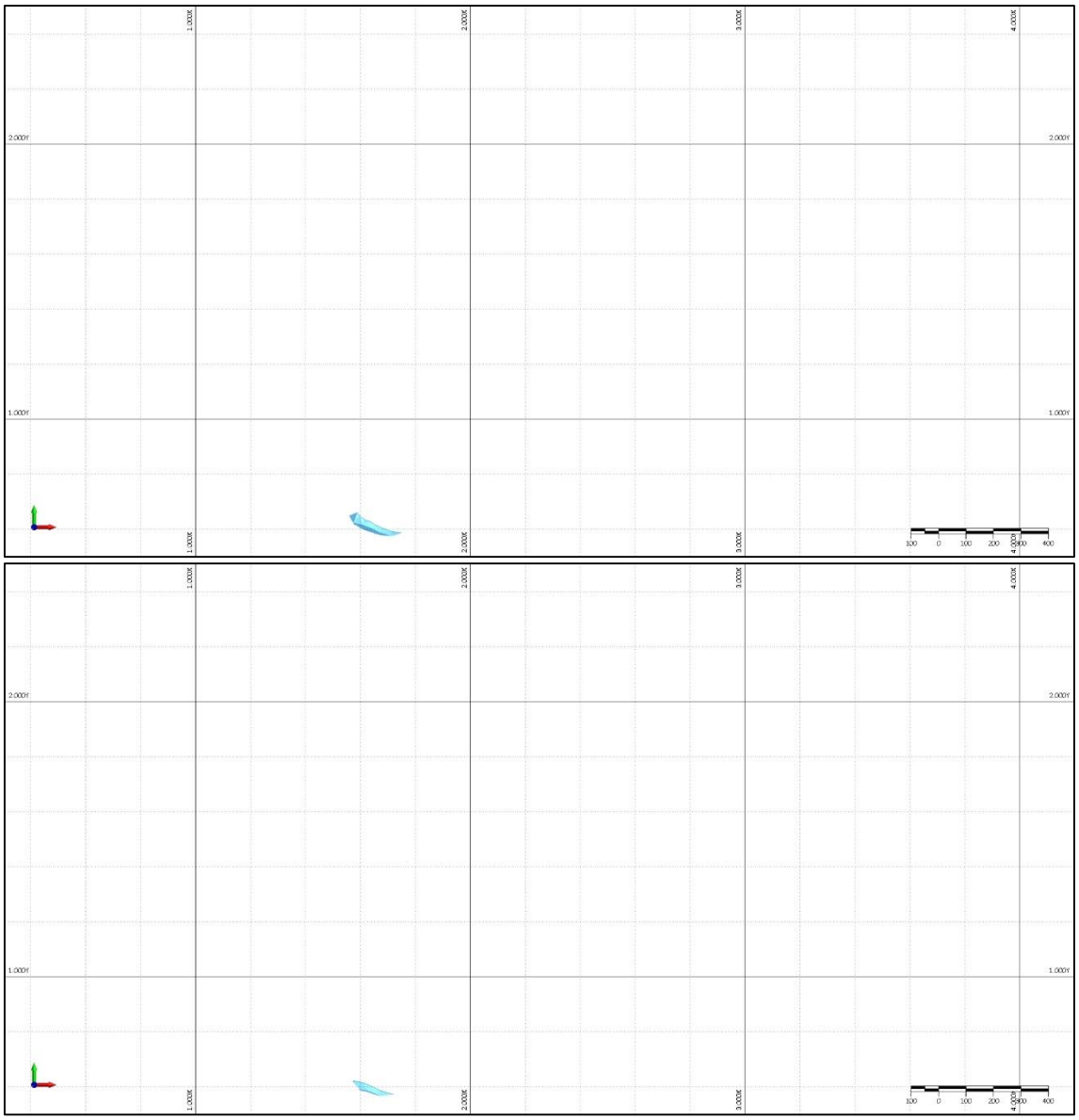
Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2380 katı (üst sol), 2390 katı (üst orta), 2400 katı (üst sağ), 2410 katı (orta sol), 2420 katı (orta orta), 2430 katı (orta sağ), 2440 katı (alt sol), 2450 katı (alt orta), 2460 katı (alt sağ) (devam ediyor)



Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2470 katı (üst sol), 2480 katı (üst orta), 2490 katı (üst sağ), 2500 katı (orta sol), 2510 katı (orta orta), 2520 katı (orta sağ), 2530 katı (alt sol), 2540 katı (alt orta), 2550 katı (alt sağ) (devam ediyor)



Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2560 katı (üst sol), 2570 katı (üst orta), 2580 katı (üst sağ), 2590 katı (orta sol), 2600 katı (orta orta), 2610 katı (orta sağ), 2620 katı (alt sol), 2630 katı (alt orta), 2640 katı (alt sağ) (devam ediyor)



Şekil E.1 Maden bloklarının katlara dağılımı; 2650 katı (üstte), 2660 katı (altta) (devam ediyor)