

Yeraltı Ocaklarında Bilgisayar Destekli Maden Tasarımı ve Kazı Arınlarının
Optimizasyonu

Gamze Erdoğan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan 2017

Computer Based Mine Design and Stope Boundary Optimization in Underground Mines

Gamze Erdoğan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

April 2017

Yeraltı Ocaklarında Bilgisayar Destekli Maden Tasarımı ve Kazı Arınlarının
Optimizasyonu

Gamze Erdoğan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Maden İşletme Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Mahmut Yavuz

Bu Tez ESOGU BAP tarafından “2015-622” no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir

Nisan 2017

ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Gamze Erdoğan'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yeraltı Ocaklarında Bilgisayar Destekli Maden Tasarımı ve Kazı Arınlarının Optimizasyonu” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mahmut Yavuz

İkinci Danışman : --

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Mahmut Yavuz

Üye: Prof. Dr. Adnan Konuk

Üye: Prof. Dr. Erkin Nasuf

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Mahmut Yavuz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yeraltı Ocaklarında Bilgisayar Destekli Maden Tasarımı ve Kazı Arınlarının Optimizasyonu” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 10/04/2017

Gamze Erdoğan

İmza

ÖZET

Maden planlama ve tasarlama sürecindeki optimizasyon çalışmaları, doğal kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak ve madencilik sırasında ortaya çıkan maliyetlerin tümünü azaltmak için oldukça önemlidir. Yeraltı maden planlamalarında optimizasyon; kazı arını sınırlarının optimizasyonu, hazırlık işlemlerinin optimizasyonu ve üretimin planlamasının optimizasyonu olmak üzere temelde üç ana alana ayrılmaktadır. Bunlardan kazı arını sınırının optimizasyonu, maden ekonomisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olması ve maden planlamanın temelini oluşturması nedeniyle yeraltı maden optimizasyonları içerisinde kritik öneme sahiptir. Optimizasyon mümkün olan en iyi kazı arını düzenini madenin işletme, jeoteknik ve fiziksel kısıtlamalarını hesaba katarak seçmekte ve ekonomik kârın en üst düzeye çıkarılmasına odaklanmaktadır. Ancak yeraltı madenlerinde karşılaşılan tasarım problemlerinin değişkenliği ve optimizasyon problemlerinin karmaşıklığından dolayı, bu konudaki çalışmalar açık ocak madenciliğinin gerisinde kalmıştır. Bunun yanında, şimdiye kadar kazı arını sınırlarının optimizasyonu için geliştirilmiş yöntemlerin hiçbiri henüz üç boyutta (3D) tam optimum sonuçları garanti edememiştir.

Bu tez çalışmasında, üç boyutlu kazı arını sınırı problemleri için tasarlanmış yöntemlerden Hareketli Kazı Arını algoritması, Maksimum Değerli Komşuluk algoritması, Sens ve Topal (2009) ve Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) yaklaşımları ile DATAMINE yazılımının kazı arını tasarım aracı incelenmiştir. Seçilen yöntemler ara katlı kazı yöntemi uygulanan bir yeraltı altın madeni blok model verisi üzerinde uygulanmış, sonuçlar birbiriyle ve klasik yöntemlerle tasarlanmış kazı arını sınırı tasarımıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu yöntemlerin yeraltı maden planlama ve tasarlamaadaki yeterlilikleri, uygulanabilirlikleri, becerileri ve sınırları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı madenciliği, kazı arını sınırı, optimizasyon yöntemleri

SUMMARY

Optimization studies in mine planning and design process are crucial to ensure efficient use of natural resources and reduce the overall mining cost. Optimization in underground mine planning is divided basically into three main areas that are optimisation of stope boundaries, optimisation of development and optimisation of production schedule. Stope boundary optimisation from these is of critical importance in underground mine optimization as it has a significant influence on the mining economy and is the basis of mine planning. The optimisation focuses on maximizing the economic profit by selecting the best possible stope layout; by considering operational, geotechnical and physical constraints. However, due to the variability in design problems and the complexity of optimisation problems encountered in underground design, the studies in this area has lagged behind open pit mining. Furthermore, none of the methods developed for the stope boundary optimization up to now have yet guaranteed the exact optimum results in three dimensions (3D).

In the scope of this thesis, from the methods designed for three-dimensional stope boundary problems; Floating Stope Algorithm, Maximum Value Neighbourhood Algorithm, Sens and Topal and Sandanayake et.al' s approach and DATAMINE software's stope design tool were examined. The selected methods were implemented on block model data of an underground gold mine where sublevel stoping mining method is applied and the results were compared with each other and with the manually designed stope boundary design. Then qualifications, applicability, capabilities and limitations of these methods in underground mine planning and designs were discussed.

Keywords: Underground mining, stope boundary, optimisation methods

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam süresince, bilgi ve tecrübesiyle bana danışmanlık eden beni yönlendiren, hiç bir zaman desteğini üzerimden esirgemeyen ve beni sürekli teşvik eden çok değerli hocam Prof. Dr. Mahmut Yavuz' a teşekkür ederim.

Curtin Üniversitesi'nde bulunduğum süre boyunca bilgi ve birikimini benimle paylaşan Prof. Dr. Erkan Topal'a, Dr. Mehmet Çığla' ya ve Dr. Sameera Sandanayake' ye teşekkür ederim.

Bu çalışmada sağladıkları destekten dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na (Proje no: 1517049) teşekkür ederim.

Hayatımın her anında hep yanımda olan, benden sevgi, destek ve anlayışlarını esirgemeyen sevgili annem Mevlüdiye Erdoğan'a, ablam Mehtap Erdoğan'a, çok sevgili kardeşlerime, dostlarıma ve sevgili Oktay Erten' e teşekkür ederim.

Her zaman varlığını yanımda hissettiğim babam Cemal Erdoğan'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Maden Kaynağının Modellenmesi ve Blok Model	5
2.1.1. Ekonomik blok model	7
2.1.2. Blok ekonomik değerinin tespiti	8
2.1.3. Eşdeğer tenör.....	10
2.2. Üretimin Planlaması Optimizasyonu	12
2.3. Hazırlık ve Altyapıların Optimizasyonu	20
2.3.1. Baş aşacağının tasarımı.....	23
2.4. Kazı Arını Sınırları Optimizasyonu	26
2.4.1. Dinamik Programlama çözümü.....	27
2.4.2. Jeostatistiksel yaklaşım	31
2.4.3. Dal ve sınır (Branch and Bound) algoritması	32
2.4.4. Şebeke Akış (Network Flow) algoritması	34
2.4.5. Sekizli Ağaç Bölme (Octree Division) algoritması	37
2.4.6. Hareketli Kazı Arını algoritması	40
2.4.6.1. DATAMINE yazılımının MRO (Mineable Reserve Optimisier) tasarım aracı	40
2.4.7. Çok Geçişli Hareketli Kazı Arını algoritması (Multiple Pass Floating Stope Algorithm)	40
2.4.8. Maksimum Değerli Komşuluk (Maximum Value Neighbourhood) algoritması	41
2.4.9. Aday Gösterilmiş Bir Sınır Tenör Aralığı İçin Kazı Arını Şekillerinin Üretilmesi yöntemi (Generation of Stope Shapes for a Nominated Range of Cut-off Grades)	41

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.4.10. Sens ve Topal sezgisel yaklaşımı	43
2.4.11. Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımı	43
2.4.12. DATAMINE yazılımının MSO (Mineable Shape Optimisier) tasarım aracı	44
3. MATERYAL VE YÖNTEM	45
3.1. Ara-Katlı Kazı Yöntemi (Sublevel Open Stopping)	45
3.2. Jeotekniksel Kazı Arını Tasarımı	48
3.3. İncelenen Madenin Tanıtılması	56
3.3.1. Madenin jeoteknik özellikleri	57
3.3.2. Madenin hazırlık işlemleri	58
3.3.3. Madenin kazı arını tasarımı	59
3.3.4. Madenin blok modeli	60
3.3.4.1. İncelenen madenin ekonomik blok modeli	63
3.4. İncelenen Madenin Optimum Kazı Arını Sınırını Bulmak Üzere Seçilen Çalışmalar	64
3.4.1. Hareketli Kazı Arını algoritması	65
3.4.1.1. MRO (Mineable Reserve Optimisier) tasarım aracı	70
3.4.2. Maksimum Değerli Komşuluk algoritması	74
3.4.3. Sens ve Topal sezgisel yaklaşımı	78
3.4.4. Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımı	81
3.4.5. MSO (Mineable Shape Optimisier) tasarım aracı	86
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	91
4.1. Madenin Manuel Kazı Arını Tasarımı	91
4.2. Hareketli Kazı Arını Algoritmasının Uygulanması	94
4.3. Maksimum Değerli Komşuluk Algoritmasının Uygulanması	96
4.4. Sens ve Topal Sezgisel Yaklaşımının Uygulanması	99
4.5. Sandanayake vd. Sezgisel Yaklaşımının Uygulanması	102
4.6. MSO (Mineable Shape Optimisier) Tasarım Aracının Uygulanması	104
4.7. Uygulamaların Karşılaştırılması	107
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2.1. Genel hatlarıyla yeraltı maden planlama süreci	4
2.2. Bir bakır yatağının temsili üç boyutlu blok modeli (Dağdelen’den, 2001).....	5
2.3. Jeolojik yorumlamanın blok modele kodlanması ile ilgili bir örnek a) Jeolojik yorumlama b) Blok model (Noble’ den, 1992: Ataee-Pour’ dan, 2000)	6
2.4. Tenör değerlerine göre sınırlandırılmış ve renklendirilmiş sondaj izlerinin de göründüğü blok model örneği (Gemcom’ dan, 2013)	6
2.5. Kiruna madeninde 1 045 m ana taşıma katı ve bazı tanımların gösterilmesi (Topal’dan, 2008).....	18
2.6. Basit bir yeraltı madenin şematik gösterimi (Sirinanda vd.’den, 2014).....	21
2.7. Örnek çalışma için bulunan optimum tasarım (Brazil ve Thomas’ dan, 2007).....	24
2.8. Değişken rekup uzunluk yaklaşımıyla nakliye ve hazırlık maliyetlerinin toplamı için optimize edilmiş bir başaşağı (Brazil ve Thomas’ dan, 2007).	25
2.9. Açık ocak ve Blok göçertmede bitişik blokların gösterimi (Ataee- Pour’dan, 2000)..	29
2.10. Blok göçertme yöntemi kullanılarak elde edilen nihai sınırları gösteren bir örnek (Riddle’ dan, 1977).....	30
2.11. Bir dizi bloğa uygulanan kümülatif blok değer fonksiyonu	33
2.12. a) Silindirik şekilli koordinat sistemini kullanan blok model b) düşey bağların önceliği ile tipik arklar (Bai’ den, 2013).	35
2.13. Yatay düzlemde (a) Silindirik sistemde tanımlanan bloklar ve bağlar (b) Kartezyen sisteminde yerini tutan bloklar ve bağlar. Gölge blok A bloğuna ulaşmak için kaldırılması gereken blokları göstermektedir. (c) Silindirik sistemde yanal bağlar ile tanımlanan bürümlerin (Envelope) izi (d) ve izlerin Kartezyen sisteminde gösterimi (Bai’ den, 2013).	36
2.14. a) Sekizli bölme b) alt hacimlerin kaldırılması	38
2.15. Şekil üreticinin takip ettiği adımlar (Cheimanoff vd.’ den, 1989).	39
2.16. Alt hacimlerin birbiriyle bağlantısı (Ataee-Pour’dan, 2000).....	39
2.17. Açık ocak sınırı altında kazı arını şekillerinin enine kesit görüntüsü (verilen düzlem için sınır tenör değeri üzerindeki bloklar) (Alford ve Hall’dan, 2009)	42
2.18. Kazı arını şekillerinin plan görünümü (gösterilen düzlem için sınır tenör değeri üzerindeki bloklar) (Alford ve Hall’dan, 2009).....	43
3.1. Ara katlı Kazı Yönteminin Perspektif Görünüşü (Gertsch ve Bullock’ dan, 1988).....	46

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

3.2. Stabil kazı arını şekilleri (Villaescusa'dan, 2014).....	48
3.3. Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde kaya gerilme faktörü A (Potvin'den, 1988).....	51
3.4. Açık kazı arını yüzeyine göre kritik süreksizlik yönü (Potvin 1988).....	51
3.5. Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde süreksizlik yönelim faktörü B (Potvin'den 1988), b)Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde süreksizlik yönelim faktörü B için çeşitli örnekler (Potvin'den, 1988).	52
3.6. Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde a) yerçekimi kaynaklı ve kavlakma nedenli b) kayma nedenli potansiyel yenilme faktörleri (Potvin'den, 1988).	53
3.7. Sabit ve izin verilen kazı arını boyutları (Villaescusa' den, 2014).	55
3.8. Stabil, göçük ve tahkimat gerektiren bölgeleri gösteren duraylılık grafiği [Potvin (1988) ve Nickson'dan (1992)].	56
3.9. Tez kapsamında incelenen maden projesinin konumu	57
3.10. Yatağın cevher kaynaklarının ana hattını ve farklı noktalarda ki sondajlarını gösteren izdüşümü görüntüsü.....	58
3.11. Maden tasarımının hazırlık işlemlerini gösteren 3 boyutlu görünümü.....	59
3.12. Blok modelin 3 boyutta görüntüsü a) Üç eksenin görüntüsü b) Plan görüntüsü.	62
3.13. Ekonomik değeri 0' dan büyük olan blokların gösterildiği üç boyutlu ekonomik blok model.	64
3.14. Hareketli Kazı Arını algoritması örneği (a) iki boyutlu blok model (b) uygun kazı arınları (c) ekonomik nihai kazı arını (d) Algoritmanın kazı arınları testi	66
3.15. Tek bir bloğa ait iç ve dış bürüm.....	67
3.16. Örtüşen Kazı Arınları	69
3.17. 45° kazı arını yüzeyi eğimini dikdörtgen ve eliptik biçimde gösteren bir örnek (Datamine'dan, 2016a)	71
3.18. Örnek bir minimum (mavi) ve maksimum (sarı) bürümlerin plan ve kesit görüntüsü (Datamine'dan, 2016a).	73
3.19. B ₄ bloğu için, üç ve dört komşuluk düzeninde, mümkün komşuluklar	75
3.20. B ₃₅ bloğuna ait 2 boyutta ki mümkün tüm komşuluklar.....	76
3.21. (B _{ijk}) bloğunun ortak üyesi olduğu iki komşuluk	76
3.22. Maksimum Değerli Komşulukların bulunması	77

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

3.23. Sens ve Topal yaklaşımı için kullanılan a) bir test test blok modeli b) bu modelin optimize edilmiş kazı arını tasarımı (Sens ve Topal'dan, 2009).	80
3.24. Sens ve Topal yaklaşımının optimizasyonda işlemindeki problemi	81
3.25. İki boyutlu bir örnek için dokuz olası kazı arınının oluşturulması.....	82
3.26. Değişken kazı arınlarının oluşturulması.....	83
3.27.a., b., c., d., e. Z eksenı boyunca kazı arınlarının kat bazında ve blok bazında oluşturulmasının karşılaştırılması.....	84
3.28. Sunulan örnek için a. Optimum kazı arını sınırı b. Yeniden düzenlenmiş kazı arını sınırı.....	85
3.29. MSO tasarım aracının a) Dilimleme b) Çekirdek şekil oluşturma uygulamalarının kesit görüntüsünü veren bir örnek.	87
3.30. Kazı arını tavlama işleminin a) 2 boyutta ki b) 3 Boyutta ki görsel sonuçlarını veren bir örnek.....	88
3.31. Kazı arını tasarımlarında dikkate alınan yakın duvar seyrelme oranlarını gösteren bir örnek (Datamine'dan, 2016b).....	88
3.32. Kazı arını tasarımlarında dikkate minimum dalım açısını gösteren bir örnek (Datamine'dan, 2016b).....	89
4.1. Verileri sağlanan bölge için şirketin tasarladığı kazı arınları	92
4.2. Şirket tarafından tasarlanmış kazı arınlarının numaralandırılması.....	92
4.3. MRO tasarım aracı yardımıyla uygulanan Hareketli Kazı Arını algoritmasının sonuçlarının a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü	95
4.4. MSSTOPE tasarım aracı yardımıyla uygulanan Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının sonuçlarının blokların ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü	97
4.5. MSSTOPE tasarım aracı yardımıyla uygulanan Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının sonuçlarının sınır grup numarası ile birlikte gösterilmesi	98
4.6. Sens ve Topal yaklaşımı sonuçlarının, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü.....	101
4.7. Sandanayake vd. yaklaşımı sonuçlarının, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü.	103
4.8. MSO tasarım aracının sonuçlarının, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. Eş değer tenör hesabını gösteren basit bir örnek	12
2.2. Kazı Arını sınırı optimizasyon algoritmaları.....	28
3.1. Tez Kapsamında kullanılan bölgeye ait kazı arını boyutlarının bilgileri	60
3.2. Jeolojik blok modele ait özet bilgiler	61
3.3. Blok model için ekonomik parametreler	63
3.4. Minimum ve maksimum bürümler için 1 boyutlu bir örnek	72
4.1. Şirket tarafından tasarlanmış kazı arınlarının ekonomik bilgileri	93
4.2. MRO tasarım aracı yardımıyla uygulanan Hareketli Kazı Arını algoritmasının sonuçları	96
4.3. MSSTOPE tasarım aracı yardımıyla uygulanan Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının sonuçları	99
4.4. Sens ve Topal sezgisel yaklaşımından elde edilen sonuçlar.....	100
4.5. Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımından elde edilen sonuçlar	104
4.6. MSO tasarım aracının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar	105
4.7. Uygulamaların kazı arını sayısı sonuçlarının karşılaştırılması.....	108
4.8. Uygulamaların tonaj değeri sonuçlarının karşılaştırılması.....	108
4.9. Uygulamaların ekonomik kâr değeri sonuçlarının karşılaştırılması.....	109
4.10. Uygulamaların çözüm süresi sonuçlarının karşılaştırılması.....	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B_{ijk}	i, j, k konumundaki Blok
NED_{ijk}	i, j, k konumundaki Bloğun Net Ekonomik Değeri
D_{ko}	Komşuluk Düzeni

Kisaltmalar

Açıklama

EQU	Altın eşdeğer tenörü
AÜET	Ana Ürün Eşdeğer Tenörü
EVAL	Blokların Ekonomik Değerleri
DP	Doğrusal Programlama
EF	Eşdeğerlik Faktörü
KTP	Karışık Tamsayı Programlama
KO	Komşuluk
KEDs	Komşuluk Değer Seti
KED	Komşuluğun Ekonomik Değeri
MMB	Minimum Madencilik Birimi
MRO	Mineable Reserve Optimisier
MSO	Mineable Shape Optimizer
NBD	Net Bugünkü Değer
NED	Net Ekonomik Değer
NİG	Net İzabe Geliri
TSP	Tam Sayı Programlama
YA	Yöneylem Araştırması
YTB	Yükle-Taşı-Boşalt

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Madencilik sektörü yatırım odaklı bir sektör olup oldukça büyük bütçelerle faaliyetlerini sürdürmektedir. Yüksek yatırım maliyetleri ve gelirlerin olduğu bu endüstride verimli çalışmak son derece önemli olup, süreçte yapılacak küçük bir iyileştirme önemli miktarda paranın tasarruf edilmesini veya kazanılmasını sağlayabilecektir. Bir maden projesinin verimini etkileyen en büyük faktörlerden biri de madenin tasarımıdır. Açık ocak madenciliğinde maden tasarımlarının optimizasyonu, endüstri tarafından sürekli kullanılan farklı ticari yazılım paketleriyle yapılabilmekte ve kesin sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak yeraltı işletmeleri için bu tür yazılım paketleri halen gelişme aşamasında olup maden tasarımları genellikle standart ampirik kurallarla yürütülmektedir.

Yeraltı madenciliğinde en uygun kazı arını sınırlarının belirlenmesi, maden tasarımlarının önemli bir adımıdır. Burada kazı arını, yeraltı üretim yöntemlerini kullanarak cevheri, onu çevreleyen kaya kütlelerinden çıkarmak için oluşturulan üretim bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Kazı arını sınırının en uygun olarak belirlenmesi ise bir maden projesinin jeolojik, fiziksel ve jeoteknik kısıtlar altında Net Bugünkü Değer (NBD)'ini veya ekonomik kârını en büyükleyecektir. Ayrıca en iyi kazı arını tasarımları göz önüne alınarak maden faaliyetlerinin yönlendirilmesi, insan kaynaklarının ve finansal kaynakların en iyi şekilde kullanılmasını ve yönetilmesini de sağlayacaktır. Bu yüzden, kazı arınlarının optimizasyonu yeraltı madenlerinin fizibilite çalışmalarında son derece önemlidir.

Kazı arını tasarımı bir kara kutu olarak düşünülürse, bu kutunun girdisi blokların ekonomik ve tenör bilgilerini içeren bir blok modeldir. Çıktısı ise bu modelden birlikte çıkarılması gereken blokları gösteren kazı arınlarıdır (Bai, 2013). Kazı arınının içerebileceği blok sayısı jeoteknik sınırlamalar, kullanılan makine boyutları gibi bazı faktörlere bağlıdır (Alford vd., 2007; Ataee-Pour, 2004). Yeraltında uygulanacak üretim yöntemine bağlı olarak jeoteknik sınırlamaların farklılaşmasından dolayı tüm madencilik yöntemlerinde uygulanabilecek, kazı arını sınırlarını belirleyen tek bir algoritma

bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında var olan çok sayıdaki yeraltı üretim yöntemleri içerisinde, ara katlı kazı arını yöntemiyle yapılan üretimler üzerinde yoğunlaşmıştır.

Bugüne kadar kazı arını sınırlarını belirlemek için çok sayıda algoritma geliştirilmiştir. Ancak açık ocak madenciliği ile karşılaştırıldığında, yeraltı üretim yöntemlerinin karmaşıklığı ve ilgilenilen problemin boyutunun büyüklüğü nedeniyle geliştirilen algoritmaların hiç biri (üç boyutta) gerçek optimumluğu sağlamayı garanti edememiştir. Bu tez kapsamında, hedefleri optimuma en yakın nihai kazı arını sınırını bulmak olan literatürdeki bazı algoritmalar ele alınmıştır. Bunun için ara katlı kazı yöntemi ile üretim yapan gerçek bir yeraltı madenine ait blok model incelenmiş ve bu model üzerinde seçilen algoritmaların uygulanması yapılmıştır. Algoritmaların seçiminde güncellik ve yazımlarla ulaşılabilirlik esas alınmıştır. Problemin çözümünde kullanılan algoritmalar sırayla; Hareketli Kazı Arını algoritması, Maksimum Değerli Komşuluk algoritması, Sens ve Topal (2009) yaklaşımı, Sandanayake vd. yaklaşımı (2015.a, 2015.b) ile ayrıca bir entegre maden yazılım paketinin kazı arınları tasarımı için son yıllarda geliştirdiği bir tasarım aracı olan Mineable Shape Optimizer (MSO)'dır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tecrübeler ve standart kurallar yardımıyla tasarlanan madene ait kazı arını tasarım sonuçlarıyla ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmaların yeraltı üretim yöntemlerinin tasarlanmasındaki yeterlilikleri, uygulanabilirlikleri, eksikleri, avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tipik bir yeraltı maden üretim projesi temelde birbirini takip eden; madenlerin araması, madenlerin planlaması, üretim hazırlığı, madenin üretilmesi ve üretim sonunda madenin kapatılmasını içeren çok sayıda adımdan oluşmaktadır (Sandanayake vd., 2015.a). Maden arama esnasında elde edilen örnekler ve bunu takip eden jeolojik yorumlamalar, istatistiksel modelleme teknikleri ile birleştirilerek yeraltı kaynakları modellenmektedir. Bu modeller cevher bölgeleri, pasa bölgeleri ve jeolojik olarak önemli diğer bölgeleri içeren katıların şekil, hacim, ton ve gramını temsil eden 3 boyutlu blokların toplamıdır. Aslında, kullanılan modeller maden yataklarının ve çevresinin küçük ölçekli temsilleridir.

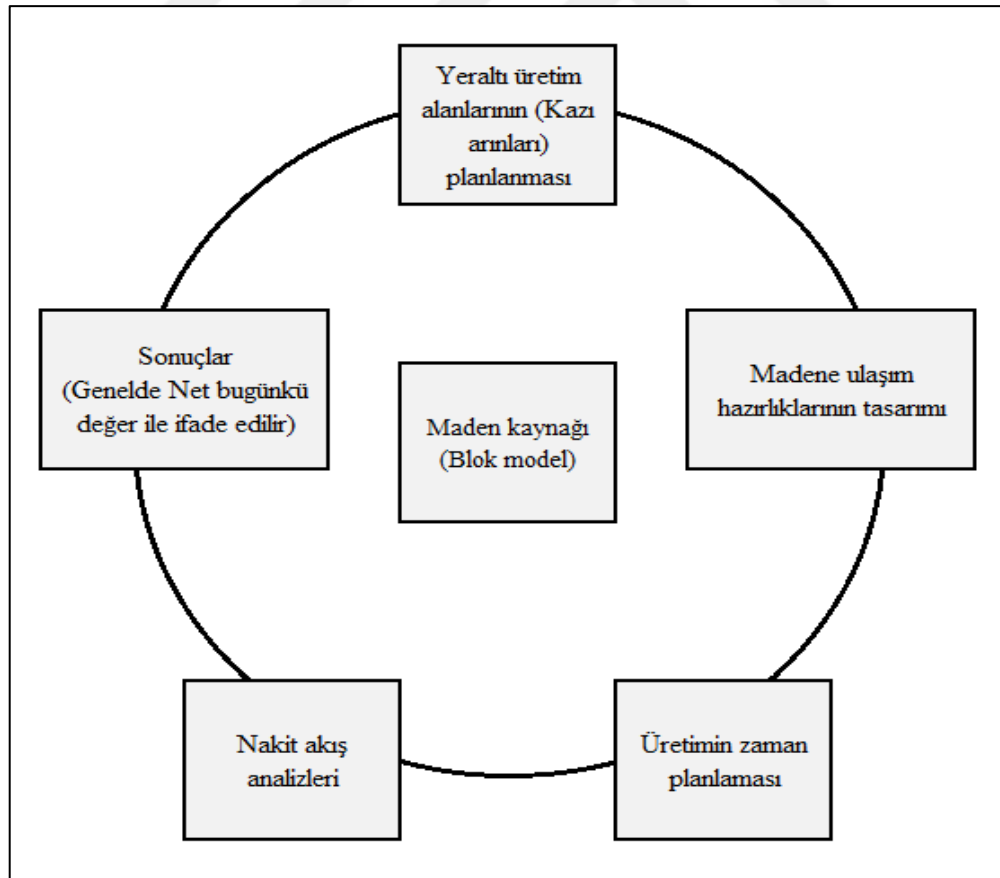
Elde edilen ön araştırma sonuçlarına bağlı olarak maden üretim planına başlanır, bu esnada öncelikle madenin tasarımı üzerinde bir çalışma yürütülmektedir. Ardından tasarımın üretilmesi için bir zaman planlaması yapılır. Hazırlık aşamasında ise cevhere ulaşabilecek bir altyapı hazırlanır. Bu aşamayı, seçilen madencilik yöntemine bağlı olarak, cevherin alınması ve yüklenip taşınmasını içeren üretim aşaması takip eder. Sürekli etkileşim halinde olan bu sürecin her aşamadaki optimizasyon işlemi, doğal kaynakların etkin kullanımı ve üretim maliyetinin en aza indirebilmesi için büyük önem taşımaktadır.

Maden optimizasyon teknikleri 1960'ların başından beri çok sayıda maden probleminin çözümünde kullanılmıştır. Bu optimizasyon teknikleri maden işletme sürecinin en önemli basamağı olan maden planlama aşamasında büyük öneme sahiptir. Nitekim daha önce de değinildiği gibi, açık ocak madenciliğinin planlanması ve üretimin programlanması amacıyla geliştirilen çeşitli algoritmalar geçmişten bu yana çok sayıda değişim ve gelişim göstererek bugün etkili bir şekilde madencilik camiasında kullanılabilmektedir. Öte yandan, yeraltı maden optimizasyonları üzerinde ancak son 20 yıldır çalışılmaya başlanmış ve bu konudaki mevcut literatür çok gelişmemiştir.

Yeraltı maden optimizasyonları esasında üç ana başlık altında toplanmaktadır (Sens ve Topal, 2009). Bunlar;

1. Kazı arını sınırları optimizasyonu,
2. Üretim planlaması optimizasyonu,
3. Hazırlık ve altyapı optimizasyonu' dur.

Yeraltı maden planlaması bu üç aşamada gerçekleşen ve birbiriyle sürekli etkileşim halinde olan karmaşık bir süreçtir. Ancak bahsedilen üç konu başlığı üzerine çalışmalar ayrı ayrı, sırayla ve birinin çıktısı diğerinin girdisi olacak şekilde yapılmaktadır (Little vd., 2013). Ana hatlarıyla bir yeraltı madenin modellenmesi Şekil 2.1' deki gibi birbirini takip eden bir süreç ile yürütülmektedir (Bootsma vd., 2014). Süreçte yeraltı maden projeleri için kazı arınlarının sınırının optimizasyonu özellikle önemlidir, çünkü en uygun kazı arını tasarımları cevherin en az pasa ile birlikte en uygun üretim oranlarını sağlamakta ve sonraki süreçlere rehberlik etmektedir. Bu tez kapsamında, yeraltı maden planlama sürecinin ilk basamağı olarak kabul edilen kazı arını sınırlarının optimizasyonu üzerine bir çalışma yapılmıştır.

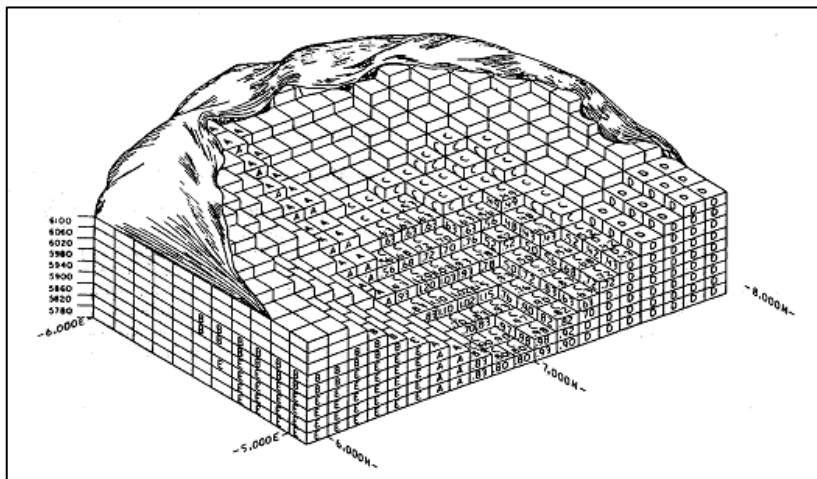


Şekil 2.1. Genel hatlarıyla yeraltı maden planlama süreci

2.1. Maden Kaynağının Modellenmesi ve Blok Model

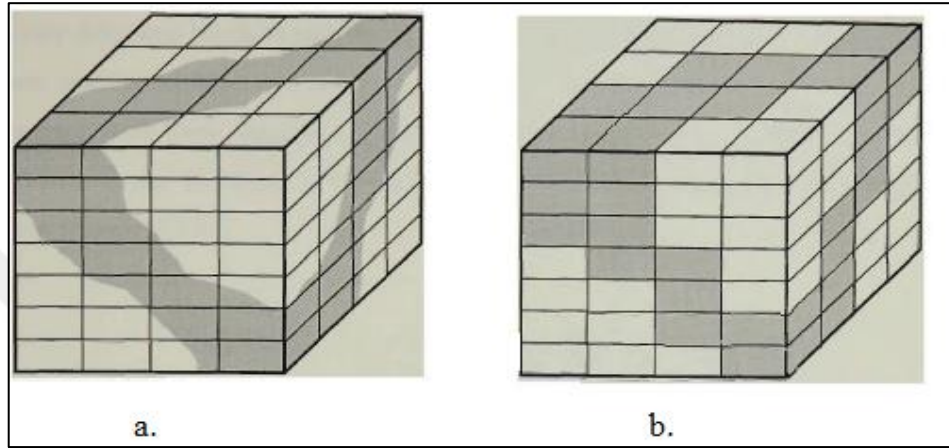
Bir maden işletmesinin faaliyetlerini başlatılabilmesi için öncelikle yeterli miktarda mineral kaynağının sağlanıyor olması gerekmektedir. Jeolojik ve jeostatistiksel araştırmalar bu kaynakların üç boyuttaki (boyut, şekil, derinlik, vb.) karakterini betimler, mineral rezervini tanımlar ve bu rezervi binlerce maden bloğuna bölerek üç boyutlu bir cevher kütlesi modeli oluşturur. Maden tasarımlarını optimize etmek için geliştirilen algoritmaların çoğu sadece bu cevher kütlesi modeli üzerinde çalışmaktadır. Madencilik yapılacak sahada cevher kütlesinin ve onu çevreleyen yan kayacın üç boyutta modellenmiş bu hali de “blok model” olarak adlandırılmaktadır.

Bir blok model; boyutların X (genişlik), Y (uzunluk) ve Z (derinlik) ile ifade edildiği, dikdörtgen prizma veya küp şeklindeki üç boyutlu bloklar dizisinin toplamıdır. Örnek olarak, Şekil 2.2’ de bir bakır yatağının temsili üç boyutlu blok modeli gösterilmiştir. Blok model içerisindeki her blok, o bloğun merkezindeki X , Y ve Z koordinatları ile tanımlanmakta ve tahmin edilen yoğunluk, kayaç türü ve tenör gibi önemli özellikleri içermektedir. Genellikle istatistiksel ve jeostatistiksel yöntemler, sondaj bilgisi gibi araştırma bilgilerini temel alarak blokların yoğunluk, kayaç türü ve tenör gibi özelliklerini tahmin etmeye çalışır. Burada jeostatistiksel yöntemlere krigleme, p-field benzetimi ve Gaussian benzetimi örnek olarak verilebilmektedir.

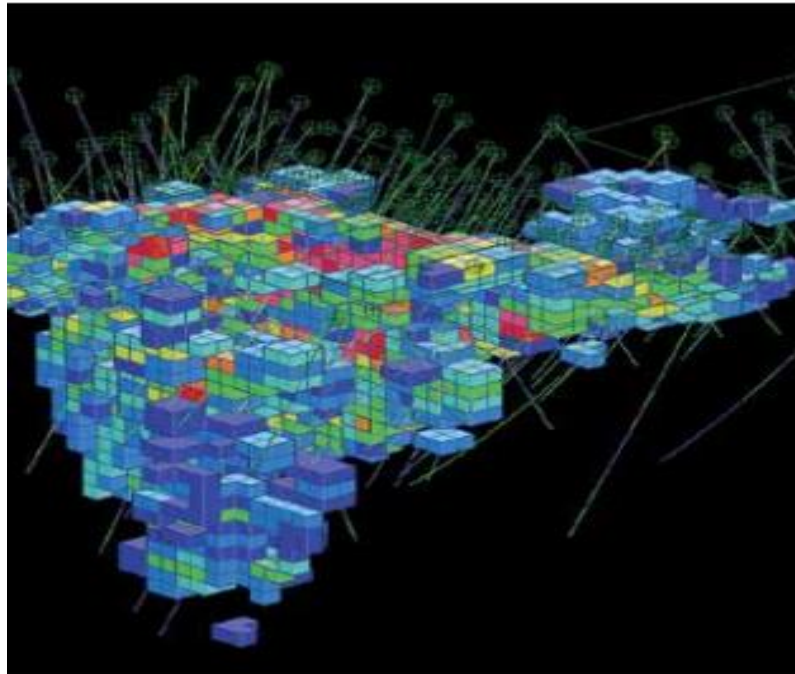


Şekil 2.2. Bir bakır yatağının temsili üç boyutlu blok modeli (Dağdelen’den, 2001).

Jeostatistiksel yöntemler bir bloğun içerisindeki tenör, kalori, öz kütle gibi özelliklerin dağılımının genellikle homojen olduğunu kabul etmektedir. Şekil 2.3.a ve Şekil 2.3.b jeolojik bir yorumlamanın blok modelde gösterimi örneklendirilmektedir. Ayrıca Şekil 2.4’ de tenörlerine göre sınırlandırılmış ve renklendirilmiş, sondaj izlerinin de görülebildiği bir blok model görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.3. Jeolojik yorumlamanın blok modele kodlanması ile ilgili bir örnek a) Jeolojik yorumlama b) Blok model (Noble’ den, 1992: Ataee-Pour’ dan, 2000)



Şekil 2.4. Tenör değerlerine göre sınırlandırılmış ve renklendirilmiş sondaj izlerinin de görüldüğü blok model örneği (Gemcom’ dan, 2013)

Uygun blok boyutunun seçimi, cevher kütlesini en doğru şekilde temsil etmek zorunda olan modellerin oluşturulmasında oldukça önemlidir. Blok boyutu seçimi, çok büyük veya çok küçük olmayan bloklar üretmek arasındaki dengeleyici bir harekettir. Bloklar çok büyük olduğunda verilerin varyasyonları kaybedilebilir. Öte yandan blok boyutu küçük olduğunda blok sayısı artar, bu da sonraki adımlarda yapılacak işlemlerin hesaplama süresinde bir artışa neden olur.

Blok boyutları cevher kütlesinin jeolojik formasyonuna, sondaj verilerinin düzenine, yatağın tenör değişkenliğine ve maden ekipmanının boyutuna bağlı olarak seçilir. Bunların yanında, blok boyutu önerilen bir madencilik yöntemi ile de ilgili olabilir. Örneğin, genellikle blokların düşey yüksekliği, açık ocak yöntemleriyle çıkarılacak bir yatağın basamak yüksekliğiyle aynı olmaktadır. Pratik olarak minimum blok boyutu, araştırma sondajları arasındaki ortalama mesafesinin dörtte birinden az olmamalıdır (Hustrulid vd., 2013). Hassasiyetin artırılması için daha küçük blok boyutlarına gidilebilir. Ancak bir bloğun boyutu azaldığında, o bloğun tahmin hata varyansının da arttığı bilinmektedir (David, 2012). Bunun yanında, blok boyutu arttıkça bloğun karakterize edilmesindeki doğruluk da azalmaktadır. Her bloğa yalnızca bir tenör değeri atandığı ve bu değerin blok içerisinde homojen olarak dağıldığı kabul edildiğinden, blok boyutu arttıkça maden seçimliliği azalmaktadır (Boland vd., 2007; Nogholi, 2015). Bu nedenle optimum blok boyutları tahmin hatasının en aza indirildiği, yatağın temsilinin gerçeğe yakın olduğu ve makul çözüm sürelerinin kaydedildiği blok boyutları olarak belirlenmelidir.

2.1.1. Ekonomik blok model

Blok model, her biri tahmin edilmiş bir veri setinden ve en önemlisi cevher örnek değerleri içeren üç boyutta bir dizi bloktan oluşur. Bu örnek değerler, blokların sınır tenöre göre cevher veya pasa olarak ayrılmasında kullanılır. Ancak maden tasarımlarının optimizasyonunda blokların ekonomik terimler ile (bloklara ait parasal değerler) ifade edilmesi gerekmektedir, çünkü aynı tenöre sahip bloklar farklı ekonomik değerler alabilirler. Blokların net değerleri; bu blokların konumu, blokların çıkarılma zamanı ve uygulanan madencilik yöntemi gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Ataee-Pour, 2000).

Blokların konumları, blokların yükleme noktalarına olan mesafesine bağlı olarak ekonomik net değerlerini etkileyebilmektedir. Bu etki blok konumlarındaki küçük farklar için düşünülmez ancak döküm sahası, kırıcı gibi noktaların çok uzağında olan bloklar için önemli olabilmektedir. Özellikle bloğun bulunduğu derinlik, her bir üretim katında ayrı bir yükleme maliyeti uygulanacak farklı kategoriler ile temsil edilmektedir. Blok net ekonomik değeri blokların çıkarılma programından da etkilenebilmektedir. Bir bloktan elde edilecek gelir, bloğun içerdiği ürünün (metal) fiyatına bağlıdır ve bu fiyat genellikle zaman içindeki ekonomik belirsizlik olarak düşünülmektedir. Donanım, malzeme ve ücret ödemelerini içeren blok maliyeti için harcanan miktar da zamanla değişmektedir. Blok ekonomik değerlerinin hesabında, enflasyon oranları ve paranın zamana bağlı değeri mutlaka hesaba katılmalıdır. Zira, zaman arttıkça gelir ve maliyetlerin miktarı bir faktör çarpanı (iskonto oranı) ile düşürülmektedir. Yani bir bloğun çıkarılmasından daha önce elde edilen parasal değer, aynı blok daha sonra çıkarıldığında farklı (daha düşük) olabilmektedir.

Bloğun ekonomik değeri uygulanan maden yönteminden de etkilenmektedir. Bir bloğun değeri, açık ocak yöntemi kullanılarak alındığında farklı, yeraltı üretim yöntemleri kullanılarak alındığında farklı olmaktadır. Ayrıca bu değer, kullanılan yeraltı üretim yöntemine göre de farklılık göstermektedir. Örneğin, dolgulu tavan arınlı ayak gibi seçimli madencilik yöntemi ile alınacak bir blok için gereken madencilik maliyeti, aynı bloğun blok göçertme veya arakatlı kazı yöntemi ile alınmasından farklılık gösterebilmektedir. Maden tasarım optimizasyonlarında, genellikle blokların ekonomik değerleri kullanılmaktadır. Blokların ekonomik değerlerinin gösterildiği model de “ekonomik blok model” olarak adlandırılmaktadır. Ekonomik blok model her bloğa tahmin edilen net ekonomik değerlerin (genellikle dolar olarak) atandığı bir blok modeldir.

2.1.2. Blok ekonomik değerinin tespiti

Blokların ekonomik değerlerini hesaplamak için bugüne kadar çeşitli bağıntılar geliştirilmiştir. Genel bir ifadeyle blokların ekonomik değerleri, o bloktan kazanılan metalin satılmasıyla elde edilecek gelirden o bloğu çıkarmak için gereken tüm giderlerin farkıyla bulunmaktadır. Burada maliyetler bloğu çıkarmak için gereken tüm madencilik giderlerini, metalin (ürünün) cevher hazırlama giderlerini ve satışa hazırlanması esnasında

gereken zenginleştirme giderlerin tamamını içermektedir. En basit ifade ile blok ekonomik değerinin hesabı şu şekilde formüle edilebilir (2.1):

$$\text{Blok Ekonomik Değeri} = \text{Blok Geliri} - \text{Blok Gideri} \quad (2.1)$$

Blok geliri doğrudan bloğun metal içeriği ve ürünlerin pazar fiyatı ile ilişkilidir ve basitçe denklem (2.2)'deki gibi hesaplanır. Burada "Fiyat", satılacak metalin (ürünün) ton başına dolar cinsinden değerini (\$/ton) ifade etmektedir. "Randıman"; madencilik, cevher hazırlama ve zenginleştirme randımanlarının tümünü içermekte ve cevherden elde edilen toplam metal oranını ifade etmektedir. "Tenör" her blok için tahmin edilen metal tenörünü, % veya ppm ile ifade etmektedir. Son olarak "Cevher", bloğun hacminin (m^3) ve yoğunluğun (t/m^3) çarpılmasıyla bulunan o bloğun ton cinsinden ifadesini göstermektedir.

$$\text{Blok Geliri} = \text{Fiyat} \times \text{Randıman} \times \text{Tenör} \times \text{Cevher} \quad (2.2)$$

Blok giderin hesabı, madencilik ve cevher hazırlama maliyetlerini içeren iki ana kategoriden oluşmaktadır. (2.3). İlk kategori herhangi bir bloğun yeraltı veya yerüstü üretim yöntemleriyle çıkarılması ve döküm sahası (pasa bloğu) ya da tesise (cevher bloğu) gönderilmesi için gereken maliyetlerini göstermektedir.

$$\text{Blok Gideri} = \text{Madencilik Giderleri} + \text{Cevher hazırlama Giderleri} \quad (2.3)$$

Madencilik maliyetleri bloğun içerdiği her ton başına kayaç (cevher veya pasa) için hesaplanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (2.4). Burada birim üretim maliyeti bir ton cevher veya pasa çıkarmak için gereken maliyet "\$/ton" cinsinden ifade edilir.

$$\text{Madencilik Giderleri} = \text{Birim üretim maliyeti} \times \text{Tonaj (Kayaç)} \quad (2.4)$$

İkinci kategori cevherin metal içeriğini çıkarmak ve satışa hazır hale getirmek için gereken maliyetleri içermektedir. Cevher hazırlama maliyetleri de bloğun içerdiği her ton başına kayaç (cevher veya pasa) için hesaplanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (2.5). Burada birim maliyet bir ton metali işlemek, zenginleştirmek ve satışa hazır hale getirmek için gereken maliyeti "\$/ton" cinsinden ifade etmektedir.

$$\text{Cevher Hazırlama Giderleri} = \text{Birim maliyeti} \times \text{Proses randımanı} \times \text{Tonaj (Kayaç)} \quad (2.5)$$

Bu bölümde blok değerlerinin hesabı en basit şekilde ifadeler kullanılarak anlatılmıştır. Bu ifadeler 2.6' daki bağıntı da özetlenmektedir.

$$\text{Blok Ekonomik Değeri} = (\text{Fiyat} \times \text{Randıman} \times \text{Tenör} \times \text{Cevher}) - (\text{Madencilik Giderleri} + \text{Cevher Hazırlama Giderleri}) \quad (2.6)$$

2.1.3. Eşdeğer tenör

Blok ekonomik değerleri klasik uygulamalarda yalnızca bir metal tenör değeri kullanılarak hesaplanabilir, bu yüzden çok metalli yataklarda her bir metalin tenörünü ana cevher tenöründe ifade edebilecek tek bir değer gerekmektedir. Bu işlem her metal tenörüne bir faktör uygulanarak hesaplanır ve genellikle üretimi yapılacak ana metalin eş değer tenöründe toplanır. Metal eşdeğer tenörü durağan bir tenör değeri verir ve metallerin ekonomik değerlerinin oranlarında önemli değişimler olmadıkça her defasında güncellenmesine gerek olmayabilir. Bu tez kapsamında incelenen yeraltı ocağı; çinko, kurşun, gümüş ve altın içeren çok metalli bir yatağa sahip olduğundan altına göre eşdeğer tenör hesaplanmıştır.

Eşdeğer tenörün hesabı için literatürde çok sayıda yöntem bulunmasına karşın bu çalışma kapsamında Atee Pour (2000)'un sunduğu yöntem kullanılmıştır. Burada eşdeğer tenör değerinin hesaplanabilmesi için, her metalin satış fiyatlarının, tenörlerinin ve kazanım oranlarının hesaba katılması gerekmektedir ve metal içeriğinden elde edilen brüt değer bir denklem yardımıyla (2.7) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Atee-Pour, 2000) :

$$\text{Brüt Değer} = \text{Tenör} \times \text{Kazanım} \times \text{Satış Fiyatı} \quad (2.7)$$

Bu ifade maden yatağında yer alan her metal için ayrıca bağıntı 2.8 ile ifade edilebilir (2.8):

$$BD_i = t_i \times k_i \times F_i \quad i = 0,1,\dots,n \quad (2.8)$$

Burada BD_i , i ' ninci ürünün brüt değerini; t_i i ' ninci ürünün tenörünü; k_i i ' ninci ürünün toplam kazanımını; F_i i ' ninci ürünün satış fiyatını ve “ n ” yan ürünlerin toplam sayısını ifade etmektedir (ana ürün için $n = 0$ ’ dır).

Ana ürün eşdeğer tenörünü elde etmek için, bu ana ürün temel alınıp diğer ürünlerin her biri için bir faktör belirlenmektedir. Bu faktör “Eşdeğerlik Faktörü (EF)” olarak adlandırılır ve yan ürünlerin brüt değerinin ana ürünün brüt değerine oranı ile hesaplanıp sırasıyla (2.9) ve (2.10)’deki denklemlerle ifade edilir. Ayrıca EF değeri ana ürün için 1’ e eşittir.

$$EF = \frac{\text{Yan üründen elde edilen brüt değer}}{\text{Ana üründen elde edilen brüt değer}} \quad (2.9)$$

$$EF_i = \frac{YD_i}{AD_0} = \frac{t_i \times k_i \times F_i}{t_0 \times k_0 \times F_0} \quad i= 0, 1, \dots, n \quad (2.10)$$

Yan ürünlerin her biri için hesaplanan eşdeğerlik faktörü ana ürünün tenörü ile çarpılır böylece o yan ürün için Ana Ürün Eşdeğer Tenörü (AÜET) hesaplanmış olur (2.11). Son olarak ana ürünün toplam eşdeğer tenörü, tüm ürünlerin AÜET değerlerinin toplanması ile elde edilir (2.12).

$$AÜET_i = EF_i (t_0) = \frac{t_i \times k_i \times F_i}{t_0 \times k_0 \times F_0} \times g_0 \quad i= 0, 1, \dots, n \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} AÜET_{\text{toplam}} &= \sum_{i=0}^n AÜET_i = \sum_{i=0}^n EF_i (t_0) = EF_0 (t_0) + \sum_{i=1}^n EF_i (t_0) \\ &= (t_0) \times (1 + \sum_{i=1}^n EF_i) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Eşdeğer tenörün hesabı basitçe, bir ana ürün ve üç yan ürün içerdiği varsayılan bir cevher yatağı örneğiyle Çizelge 2.1’de anlatılmıştır. Tenör, kazanım ve metallerin fiyatı bilinerek brüt değerler ve eşdeğerlik faktörleri ayrıca AÜET yukarıdaki işlemler kullanılarak hesaplanmış, sonuçlar özet halinde yine Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Eş değer tenör hesabını gösteren basit bir örnek

	Ana Ürün	1.Yan Ürün	2.Yan Ürün	3.Yan Ürün	Toplam
Tenör (%)	25	6	5	4	
Toplam Kazanım %	90	80	85	80	
Fiyatlar (\$/t)	200	250	220	230	
Net değer (\$)	45	12	9,35	7,36	73,71
Eşdeğerlik Faktörü	1	0,27	0,21	0,16	1,64

2.2. Üretimin Planlaması Optimizasyonu

Üretimin planlaması, kaynakların/rezervlerin belirli kısıtlar çerçevesinde bir zaman periyoduna bölünmesi olarak tanımlanabilir (Martinez ve Newman, 2011). Maden üretiminin planlaması; üretim yöntemi, kazı arını boyutu, eğim gibi birçok sınırlamayı temel alarak maden bloklarının belirli bir sırada çıkarılmasını belirleyen bir optimizasyon işlemidir. Bu optimizasyonda en büyük hedef madenin NBD' sinin en büyükleme olmasıdır (Kuchta vd., 2004). Bunun yanında planlanan üretim hedeflerinden sapmaların en küçükleme gibi diğer birçok en küçükleme ve en büyükleme hedefleri de üretimin planlaması esnasında ortaya konmaktadır.

Üretim planlamasının optimizasyonu sırasında temelde iki ana kısıt vardır: (1) kaynak kısıtları, burada kullanılabilir bir kaynak için bir zaman periyodunda yürütülen faaliyetlerin sayısı sınırlanır ve (2) öncelik kısıtları, burada da belirlenen bir faaliyetin öncesinde tamamlanması gereken faaliyetlerin sırası belirlenir (O'Sullivan ve Newman, 2014). Üretimin planlaması, uygulandığı madende yapılması planlanan çalışmaların zaman aralığına bağlı olarak uzun, orta ve kısa vadeli programlama olarak üçe ayrılabilir. Bunlardan uzun vadeli programlama madenin ömrü boyunca yapılan planlamalar ile ilgilidir. Diğer yandan kısa vadeli programlamada, uzun vadeli programlamadan elde edilen sonuçların çalışılacak zaman periyodu veya işe bölünüp değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ayrıca, önceden tanımlanan üretim kapasitelerinde oluşacak sapmaları en küçükleme, kısa vadeli programlamada aktif, farklı kısıtlamaların uygulanması işlemi de kısa vadeli programlamada ele alınır. Bir madenin işletme aşamasında yapılacak zaman planlamasının kalitesi hem verilen modelin doğruluğuna hem de planlamacıların incelediği

alternatif zaman planlarının sayısına bağlıdır. Birçok maden planlama yazılımı çok daha fazla sayıda zaman planının incelenmesine olanak sağlamasına rağmen, işlemlerin karmaşıklığı ve madene özgü yapıların değişikliği hem optimale yakın üretim planlamaların oluşmasına hem de tüm alternatiflerin hızlı bir şekilde incelenmesine engel olmaktadır.

Üretim planlama genel anlamda Yöneylem Araştırması (YA) tekniklerinin uygulandığı en önemli alanlardan biridir. Üretimin planlaması problemlerinde uygulanan en yaygın YA yöntemi, Doğrusal Programlama (DP) olarak bilinmektedir ve ilk kez yeraltı üretim planlaması için Williams vd. (1973) tarafından kullanılmıştır. Bu DP modeli bağıntı 2.13’ de verilmiştir (Topal, 2008):

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

....

....

....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Koşulları altında:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n \quad (2.13)$$

Bazı koşullarda, karar değişkenleri tam sayı değerleri olmak zorundadır. Bu sınırlama probleme eklendiğinde, model Tamsayı Programlama (TSP) olarak adlandırılır. Tam sayılar özellikle ikili değişkenleri, örneğin cevherin özel bir bloktan verilen bir zaman periyodunda çıkarılıp çıkarılmaması kararını veren evet/hayır seçimini yansıtmak için kullanılmaktadır. Eğer bazı değişkenlerin sürekli olmasına izin verilirken diğerlerinin tam sayı olması zorunluluğu varsa, model Karışık Tamsayı Programlama (KTP) haline gelmektedir. KTP yeraltı maden üretiminin planlamasında kullanılan en yaygın matematiksel programlama aracıdır. Yöntem planlanan hedefe uygun çok dönemli üretimin programlanması sağlarken, çok kısıtlı problemleri ele alma yeteneğine sahiptir.

Yeraltı metalik maden işletmelerinde, üretimin uzun vadeli zaman planlaması alanında halen gelişmeler devam ediyor olmasına rağmen, günümüzde ticari ulaşılabilirliği olan herhangi yaklaşım bulunmamaktadır ve genellikle özel maden alanlarında uygulanmış çok az sayıda endüstriyel uygulama vardır. Sonuç olarak, yeraltı madenlerinin üretim zaman planlaması başlıca klasik yöntemlerle sürdürülmektedir. Bu teknikler, tüm zaman planlama kurallarının birleşiminin yarattığı karmaşıklığı sağlayamadığından, optimal sonuçları da garanti edememektedir (Little vd., 2013). Bu bölümde zaman planlamasıyla ilgili günümüze kadar yapılmış önemli çalışmalar aşağıda sırayla özetlenmiştir.

Trout (1995) ara katlı kazı yönteminde zaman planlaması için KTP modelini kullanmıştır. Model her aşamanın optimal zamanlamasının yanı sıra cevher ve dolgu miktarlarını da belirlemektedir. Problem kazı, boşluk, dolgu, kazının başlaması ve dolgunun başlaması olmak üzere beş farklı ikili değişken, cevher tonajı ve dolgu miktarlarını gösteren iki tam sayı değişkeni kullanmaktadır. Bunun yanında, pratik madencilik limitlerini gösteren yirmi bir ayrık kısıt uygulanmış ve amaç fonksiyonu NBD' nin en büyüklmesi olarak belirlenmiştir.

Model Avustralya' da bulunan Mount Isa Mines bakır işletmesinden alınan ve 55 kazı arını içeren temsili bir veri seti üzerinde uygulanmıştır. Burada iki yıllık bir zaman planı için 13 tane dört haftalık dönem düşünülmüştür. Model C programlama diliyle yazılmış ve CPLEX yazılımı aracılığıyla çözdürülmüştür. Yapılan çalışma, üretimin planlaması için uygulanan KTP tekniklerinin klasik teknikler üzerinde göreceli olarak daha başarılı olduğunu göstermiştir. Aynı işlemsel koşullar altında klasik yöntemlerle oluşturulan plan da yaklaşık 237 bin \$ NBD üretilirken, KTP ile yaklaşık 337 bin \$ lık üretim yapılmıştır, yani bu çalışma aracılığıyla %23 lük bir gelişme sağlanmıştır. **Winkler (1996)** Almanya' daki bir kömür ocağı üzerinde yaptığı çalışmayla, KTP modelinin yeraltı üretim zamanının planlanmasında kullanılabilirliği bir kez daha test etmiştir.

Nehring ve Topal (2006), Trout (1995)' un geliştirdiği modeli daha uygulanabilir yapmak amacıyla diğer sınırlar ihmal edilmeden, birden çok dolgu kütlesi mostirasını sınırlayan yeni bir kısıtı formüle etmişlerdir. Bu kısıt ara katlı kazı yönteminde dolgu kütlelerinin aşırı yüklemesi olmaması için oldukça önemli bir işlevsel sınırlamadır. Modifiye edilmiş KTP modeli küçük bir örnek (yalnız dokuz kazı arını içeren) çalışma

üzerinde uygulanmış ve sonuçlar kazı arınlarının yüksek nakit akışından başlanarak azalan sırada seçildiği klasik yöntem uygulamalarıyla karşılaştırılmıştır. Burada KTP modelinin yaklaşık % 66 daha fazla NBD verdiğini gözlenmiştir. KTP modelindeki her kazı arınının çıkarılmasıyla ilgili sabit ve değişken maliyet değerlerinin hesaplanması ve madenin geleceğindeki sınırlamaların hesaba katılması NBD için bu denli farkı ortaya koymaktadır. Klasik yöntemlerde, bir planlama mühendisinin tüm bu gelecek planlarını hesaba katması beklenememektedir (Little, 2012).

KTP daha önceden de bahsedildiği üzere üretimin planlamasının optimizasyonu için önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak, KTP modelinin çözüm süresi tam sayı değişkeninin ve uygulanacak kısıtların sayısına bağlı olarak değişmektedir. Modelin çözüm süresi tam sayı değişkenlerinin sayısı arttığında çoğu zaman üssel olarak artmaktadır. Burada en kötü senaryo tüm aday problemlerinin değerlendirilmesi gerektiği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Büyük problemlerin çözümü, problemin boyutunun artmasıyla birlikte üssel olarak daha karmaşık hale gelmektedir.

Little (2007) tarafından yapılan farklı bir çalışmayla Trout (1995)'un geliştirdiği ve Nehring (2006)' in yeniden düzenlediği KTP modelinin çözüm süresi başarılı bir şekilde azaltmıştır. Çözüm süresinin azaltılması, 5 setten oluşan ikili karar değişkenlerinin (kazı, boşluk, dolgu, kazının başlaması ve dolgunun başlaması) tek bir sete indirilmesiyle başarılmıştır. Bu azaltma için geliştirilen düşünce doğal sıralama ve doğal başlangıcı kapsayan iki ana teoriyi temel almaktadır. Doğal başlangıç teorisi ilk üretim başlama değişkeninin bir fonksiyonu olarak tanımlanacak çeşitli üretim aşamalarına izin vermektedir (Nehring vd., 2009). Beş setten oluşan örnek için boşluk ve dolgu aşamaları, üretim başlama değişkeninin bir fonksiyonu olarak tanımlanır ve diğer aşamalar elimine edilir. Bu çalışma amaç fonksiyonun NBD' sinin en büyüklenmesi olarak bahsi geçen dokuz kazı arını örneği üzerinde uygulanmıştır. Hem orijinal hem de yenilenmiş uygulamalar tamamen aynı NBD sonuçlarını verse de farklı çözüm süreleri sunmuşlardır. Sonuç olarak ikili değişkenlerin sayısı orijinal modelden %80 azaltılmış ve bu da çözüm süresinde %92' lik bir iyileşme getirmiştir (Little vd., 2008).

Carlyle ve Eaves (2001), Amerika' da bulunan ve ara katlı kazı üretim yöntemi uygulanan Stillwater Madeni için üretim planlarını yapan bir KTP modeli oluşturmuşlardır.

Şirket platin ve paladyum yatağı içeren bu madenin üretim oranları ve kârını artırma yollarını arayan bir planlama aracına ihtiyaç duymuştur. Bu noktada yazarlar KTP modeliyle üretim faaliyetlerinin zaman planlarını optimize ederek geliri en büyüklenmeye çalışmıştır. Modelin ana odağı en verimli ve kârlı olacak şekilde altyapı hazırlık faaliyetlerinin, delme faaliyetlerinin, üretime hazırlık faaliyetlerinin ve üretim faaliyetlerinin zaman planlamasıdır. Zaman 10 tane üç aylık dönem için çeyrek yıllık bölümlere ayrılmıştır ve bahsedilen faaliyetlerin her birinin tam bir çeyrek yıl zaman aldığı varsayılmıştır. Modelde alınacak karar, verilen bir çeyrek yıllık periyotta herhangi faaliyetin yürütülüp yürütülmeyeceğidir. Eğer i periyodunda j faaliyeti seçilirse karar değişkeni bu faaliyet için (x_{ij}) 1' e eşit olacaktır. Modelin amaç fonksiyonu, platin grup metallerinin indirgenmiş üç aylık üretim onslarının toplamını planlama zamanı boyunca en aza indirmeyi, aynı zamanda iskonto edilmiş kârın azami düzeye çıkarılmasını sağlamaktır.

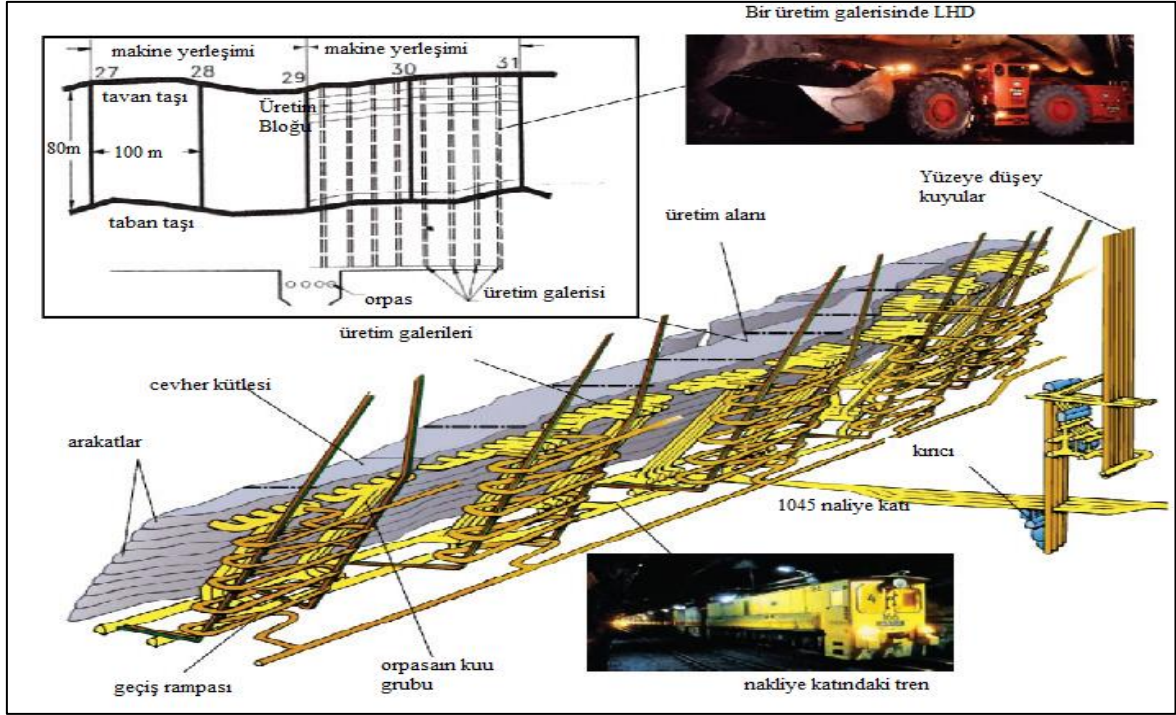
Model AMPL kodu kullanarak CPLEX yazılımında çözdürülmüş ve neredeyse optimale yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bunu yanında yazarlar geliştirdikleri modelin kısa ve orta vadeli zaman programların yanı sıra rutin ekonomik analizlerde de kullanabileceğini ortaya koymuşlardır (Carlyle ve Eaves, 2001). Ancak yayınlarındaki çözüm süresini hızlandırmak için kullandıkları özel tekniklerden veya modelin detaylı açıklamalarından bahsetmemişlerdir.

Smith vd. (2003), Avustralya'da yer alan Mount Isa bakır ve çinko yeraltı madeni için bir üretim programlama modeli geliştirmiştir. Modeldeki karar değişkeni, maden işletme koşulları altında NBD' nin en büyüklenme için çıkarılabilir her elemanın (üretim bloğu) üretim zamanını göstermektedir. Bu çalışmada maden işletme koşulları cevherin mevcudiyetini, değirmen kapasitesini, maden altyapı üretim kapasitesini, tenör limitlerini, üretim sürekliliği kurallarını ve üretim blokları arasındaki öncelik ilişkisini göstermektedir. Bununla birlikte, yazarlar problemin tüm örnekleri için makul sürelerde bir çözüm sunamamışlardır (Newman vd., 2011)

Topal (2003) en uygun üretim zaman planlamasını geliştirmek ve belirlenmiş üretim hedeflerinden sapmaları en küçüklemenin yollarını aramak için, büyük ölçekli demir cevheri yatağına ara katlı göçertme yöntemi uygulayan Kiruna Madeninde (İsveç)

KTP modelini kullanmıştır. Bu çalışmada, maden on farklı üretim alanına bölünmüştür. Alanların her biri ait olduğu grubun cevher oluklarına ve havalandırma kuyularına sahip olup bu gruplar aynı zamanda kuyu grubu olarak da bilinmektedir. Üretim alanları yaklaşık olarak 400-500 m genişliğinde ve bu alanlar yaklaşık 1 ile 3 milyon ton/m³ arasında cevher ve pasa tonajı içermektedir. Madende bir veya iki adet 25 ton kapasiteli Yükle-Taşı-Boşalt (YTB) makinesi üretim yapılan alanlar içindeki her ara katta, cevheri rekuplardan cevher oluşuna taşımak için kullanılmaktadır. YTB' nin çalıştığı yer aynı zamanda "makine yerleşimi" olarak bilinir ve yaklaşık 200-500 metre genişliğindedir. Her makine yerleşim bölgesi yaklaşık olarak ara katlarla aynı yükseklikte (yaklaşık 28,5) 10-12 üretim bloğu içerir (Topal, 2003). Şekil 2.5' de kuyu grupları, makine yerleşimleri, üretim alanları, üretim blokları ve LHD' ler görülebilir.

Model önceden belirlenen üretim hedeflerinden sapmaları en küçükleme için cevherin hangi bölümünün üretileceğini ve üretime ne zaman başlanacağını belirler. Bu esnada jeoteknik ve makinelerin var olan kısıtlarını da göz önünde bulundurur. Modelde tek tek üretim blokları yerine makine yerleşimlerinin tanımlanması, ayrıca erken ve geç başlama zamanları olarak adlandırılan iki algoritmanın geliştirilmesiyle boyutları oldukça büyük olan modelin boyutu azaltılabilmektedir (Topal, 2008). Çalışma 36-aylık zaman periyodu üzerinde uygulandığında (256 MB RAM kapasiteli Sun Ultra 10 makinesinde) yaklaşık olarak 100 saniyenin altında en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Hedeflenen üretimlerden sapmalar, klasik yöntemlerle yapılan programlarla karşılaştırıldığında herhangi kısıt ihmal edilmeden %10 ile %20 arasındaki değerlerden %6'lara kadar düşmüştür. Model aynı zamanda verilen zaman periyodundaki uzun dönemli üretim zaman planlaması için 5 dakika içerisinde çözüm üretilmesine de olanak sağlamıştır. Sonuç olarak bu model, bahsedilen madenin üretim zaman planlamasının bir kısmında uygulanabilmektedir.



Şekil 2.5. Kiruna madeninde 1045 m ana taşıma katı ve bazı tanımların gösterilmesi (Topal'dan, 2008).

McIsaac (2005) çok metalli ve dar damarlı bir madende, uzun vadeli üretimin programlaması için KTP modelini kullanmıştır. Bu maden yatağın içerisinde her bir farklı jeolojik karakterlerle tanımlanan on bir farklı bölge bulunmakta ve bölgelerin her biri farklı üretim yöntemlerine gerek duymaktadır. Her bölgenin üretimine, diğer üretim bölgelerinin üretim kapasitelerini etkilemeyecek herhangi bir zamanda başlanabilmektedir. Model yedi bölgenin hazırlık işlemleri sırasını ve üretim aktivitelerini, dört yıllık bir zaman periyodu için üç aylık aralıkları temel alarak ve üretim oranını günde 500 tona ayarlayarak belirlemektedir.

Her bölge için günlük üretim, üretim öncesi hazırlık işleri, üretim hazırlığı ve sabit gider olarak adlandırılan dört farklı karar değişkeni kullanılmaktadır. Bunlardan sabit gider ikili tam sayı değişkeni olarak tanımlanır ve yalnızca cevher kazıldığında sabit üretim maliyetlerini sağlamak için kullanılır. Her zaman periyodunda tüm kazı arınları için de beş ikili değişken üretim öncesi hazırlık işleri envanterini, üretim öncesi hazırlık aktivitesini, üretim hazırlık envanterini, üretim aktivitesini ve üretim envanterini belirlemek için kullanılır. Burada amaç fonksiyonu maden işletme koşulları sağlanırken, madenin ömrü boyunca işletmenin nakit akışını en büyükmektir. McIsaac (2005) nakit akışını en

büyükleme için yatağın kazısı için gereken zamanı en küçüklemenin gerektiğini, çünkü bunun tüm sabit maliyeti düşüreceğini ifade etmiştir. Bu yüzden amaç fonksiyonu hazırlık zamanının en küçüklenmesine odaklanmıştır. MsIsaac (2005)' in geliştirdiği bu model Microsoft Excel' de hazırlanmış ve Frontline'nin Xpress Solver' da çözülmüştür. Yayınlanan çalışmada 1200 değişken olduğu söylene de bunlardan kaçının tam sayı değişkeni olduğu belirtilmemiş ve KTP sonuçlarını karşılaştırmak için önceden yapılan üretimin planlamasından bahsedilmemiştir.

Bu çalışmada, daha küçük alanların belirlenmesi yerine, kazı arını gruplarından oluşan madencilik sektörlerinin tanımlanması, KTP model için değişkenlerin sayısını önemli ölçüde azaltmıştır, bu da optimal sonuçların sağlanmasına yardım etmiştir. Ancak bu genellemeye başvurmak, yalnızca büyük alanlar programlandığı ve her alan için yalnızca geniş varsayımlar yapıldığından sonuçların optimal olma durumu sektöre ugramaktadır. Örneğin, her kazı arınına atanmış bir tenör değerine sahip olmaya karşın burada her sektöre bir tenör değeri atanmak zorundadır. Böyle bir durum eğer madencilik sektörlerinin tenörleri geniş bir aralıkta değişiyorsa, cevher hazırlama tesisi için ters bir etkiye sahip olacaktır.

Nehring vd. (2012) ara katlı kazı yöntemi için üretimin planlamasıyla ilgili ileriye sürmüş bir KTP optimizasyon modelini sunmuştur. Burada kısa ve uzun vadeli üretim programlarının aynı anda oluşturulmasının faydaları üzerinde durulmuştur. Kısa vadedeki hedeflenen değirmen besleme tenörlerindeki sapmaları en küçüklemeye çalışan amaç fonksiyonuyla uzun vadedeki NBD' yi en büyüklemeye çalışan amaç fonksiyonu KTP modelinde birleştirilmiştir. Bir bakır yatağına uygulanan ara katlı kazı çalışması, entegre olmuş optimizasyon yaklaşımının (kısa ve uzun vadenin birlikte düşünüldüğü), kısa ve uzun vadeli programlamaların ayrı ayrı optimize edilmesinin yerine kullanılmasında oluşacak değeri göstermek için ele alınmıştır. Sonuçlar entegre edilmiş optimizasyon yaklaşımının kaynak, jeoteknik, zamanlama ve alma sırası kısıtlarını sağladığını ve ayrık optimizasyonla karşılaştırıldığında daha iyi NBD verdiğini göstermiştir.

Üretim planlamasının optimizasyonu için geliştirilen tüm bu çalışmalar temelde NBD' nin en büyüklemesi ve üretim hedeflerinden sapmaların en küçüklenmesi hedeflerini taşımaktadır. KTP karmaşık ve çok dönemli senaryolarını verimli bir şekilde

modelleme kapasitesine sahip olduğundan, yeraltı maden planlamanın üretim programlamanın optimizasyonu için yapılan çalışmaların da temelini oluşturmuştur. Çalışmalar modelin tam bir üretim programı oluştururken veya basit bir üretim programının oluşturulmasına yardımcı olarak kullanılabildiğini göstermiştir. Ancak bu konuda matematiksel modeller tarafından değerlendirilemeyen koşulların mevcudiyeti devam ettiğinden, üretim planlaması optimizasyonları halen maden mühendislerinin bilgi ve birikimine ihtiyaç duyularak sürdürülmektedir.

2.3. Hazırlık ve Altyapıların Optimizasyonu

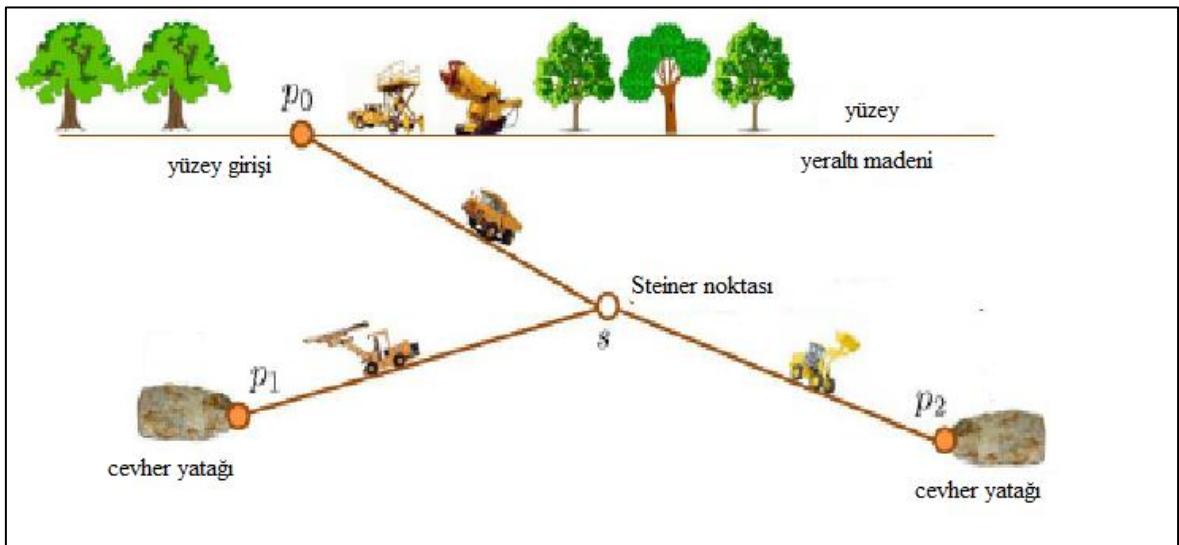
Açık ocak ve yeraltı maden işletmelerinin modellenmesi arasındaki en temel fark cevhere erişim ile ilgili maliyetlerin gerçeğe uygun olarak modellenmesindeki karmaşıklıktır. Bu durum yeraltı üretim yöntemleri için çok daha önemli bir problemdir. Yeraltı madencilik cevherin çıkarılması ve yeraltından yeryüzündeki değirmen veya cevher hazırlama tesisine taşınması olarak basitçe tanımlansa da, bu tanımın altında yatan karmaşıklık oldukça üst düzeydedir. Başta cevherin nasıl çıkarılacağı belirleyen sınırların karmaşık bir sistemi vardır. Bu sınırlar fiziksel faktörlerden cevherleşme türüne, cevherleşmenin lokasyonuna, yeraltı gerilimi gibi birçok faktörü içeren jeoteknik özelliklere, genel ekonomik faktörlere, mevcut ve gelecekteki metal fiyatlarına kadar daha birçok alanı kapsamaktadır (Brazil ve Grossman, 2008).

Hazırlık faaliyetlerinin optimizasyon araştırmaları temel olarak maliyetleri en aza indirmeye odaklanmaktadır. Başka bir ifadeyle, yeraltında elverişli çözüm alanlarının üzerinde bir maliyet fonksiyonunu optimize etmeye çalışmaktadır. Bu nokta da probleme önerilen analitik çözümler genellikle şebeke optimizasyon modelini temel almaktadır. Bir maden hazırlık şebekesi genel olarak yatay galeriler, eğimli rampalar ve düşey kuyuları içermektedir. Bu şebekeyi belirleyecek ana tasarım, cevher çekme noktalarına ulaşımı ve çıkarılan cevheri yeryüzünde bulunan cevher hazırlama tesislerine ulaştıracak nakliye yollarını sağlamalıdır. Burada cevher çekme noktaları ve yüzey başlangıç noktaları, kazı arılarının tasarımlarından sonra tahmin edilebilmektedir (Brazil ve Thomas, 2007).

Galerilerin ve açılan ocak içi yolların hem yapım hem de nakliye maliyetleri tüm maden harcamaları içerisinde çok önemli bir kısmı kaplamaktadır. Bu yüzden rampaların

ve galerilerin tasarımı ile bağlantılı maliyetlerin en az indirgenmesi, madenin ekonomik verimliliği üzerinde çok büyük öneme sahiptir (Brazil vd. , 2002). Buna rağmen yeraltı üretimlerinin hazırlık faaliyetlerinin optimizasyonu ile ilgili yapılan sistematik çalışmalar sınırlı olup halen gelişme aşamasındadır. İlk olarak Lee (1989), yeraltı maden tasarımlarının hazırlık maliyetlerinin üç boyutlu şebeke modellemesi ve optimize edilmesi problemini ele almış ve bazı sezgisel yaklaşımlar ortaya koymuştur. Bunu sırayla (temel olarak) Brazil ve arkadaşlarının (1998), (2001), (2002), (2005), ve Brazil ve Thomas (2007)' in çalışmaları takip etmiştir.

Şimdiye kadar yeraltı maden üretimi için optimum altyapılarının belirlenmesi probleminde bir çözüm tekniği bulmanın yolu, yukarıda da bahsedildiği üzere, problemi bir şebeke optimizasyon problemi olarak modellemekten ve daha sonra uygun bir metrik alanda üç boyutlu Steiner ağları teorisi geliştirmekten geçmiştir. (Alford vd., 2007). Burada maden ağırlıklı bir şebeke modeli kullanılarak temsil edilmektedir. Şebeke, Öklid 3 boyutlu uzayda gömülü olarak ele alınabilmekte ve madenin koordinatlarına göre koordine edilebilmektedir. Bu modelde, verilen cevher çekme noktaları ve yüzey girişleri terminal olarak bilinen şebekenin sabit düğümlere karşılık gelmektedir. Madende rampalar, şebekede yerleşimleri rampaların merkez çizgisine karşılık gelen bağlarla gösterilir. Son olarak üç veya daha fazla rampanın birleşme noktası, şebeke içerisinde Steiner noktası olarak bilinen değişken düğümlerle gösterilmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Basit bir yeraltı madenin şematik gösterimi (Sirinanda vd.'den, 2014)

Şebeke modelinde yapılan en önemli varsayım verilen kazı arınlarındaki tüm çekme noktalarının konumlarının, her çekme noktası için beklenen tonajla birlikte verildiğidir. Yüzey çıkış noktalarının da sabit veya en azından konumunun güçlü bir şekilde kısıtlı olduğu varsayılmaktadır. Şebeke içerisinde her bağlantının maliyeti, nakliye ve yapı maliyetlerinin bir kombinasyonu olarak modellenmektedir. Bu maliyetin değişken bileşeninin, bağlantının Öklid uzunluğuyla orantılı olduğu varsayılabilir. Bununla birlikte, bu oran, nakliyesi yapılacak cevherin tonajına bağlı olarak her bağlantı için farklı olacaktır (Alford vd., 2007).

Şebeke modelleme çalışmalarında bazı işlevsel kısıtlamalar uygulanmaktadır. Başta şebekenin bir bileşeni olan rampanın eğimi izin verilen maksimum bir eğimle kısıtlanmıştır. Eğim “ m ” ile ifade edilmekte ve maden makinesine bağlı olarak $1/9$ - $1/7$ aralığında sınırlandırılmaktadır. Bunun yanında; eğer kuyu varsa bunların dik olması gerektiği, galerilerin maden ekipmanlarının gelip gitmesine izin verecek minimum bir dönüş açısında (15-30 m yarıçap aralığında) belirlenmesi gibi daha birçok kısıt bulunmaktadır. Ancak Brazil ve arkadaşlarının tanımladığı yöntemlerde bu kısıtlar, özellikle büyük ölçekli madenlerde ikincil kısıt olarak ele alınmaktadır.

Şebeke optimizasyon modelinde amaç, daha önce de bahsedildiği üzere yeraltı altyapı ve nakliye maliyetlerinin en aza indirilmesini sağlamaktır. Teorik olarak optimizasyon problemi maliyet fonksiyonunu, şebekenin toplam uzunluğu ile orantılı olacağı şekilde aşağıdaki gibi formüle etmektedir:

I) Üç boyutlu Öklid uzayında bir set nokta (N) verilir ve eğimin 0 ’ dan büyük olduğu kısıt ele alınır ($m > 0$).

II) Üç boyutlu Öklid uzayına gömülmüş nokta setleri (N) birbirine bağlanarak bir şebeke (T) bulunur. Öyle ki:

i) Gömülü bağlantılar, türevlenebilir her noktada mutlak eğimi en fazla “ m ” olan parçalı pürüzsüz eğrilerden oluşur,

ii) Yapım ve nakliye maliyetlerinin toplamı en küçüklenir.

Yukarıda bahsedilen formülasyon, Steiner şebeke problemlerinin etkili bir varyasyonudur ve verilen nokta setlerini, maliyeti en aza indirecek şekilde birleştirerek bir

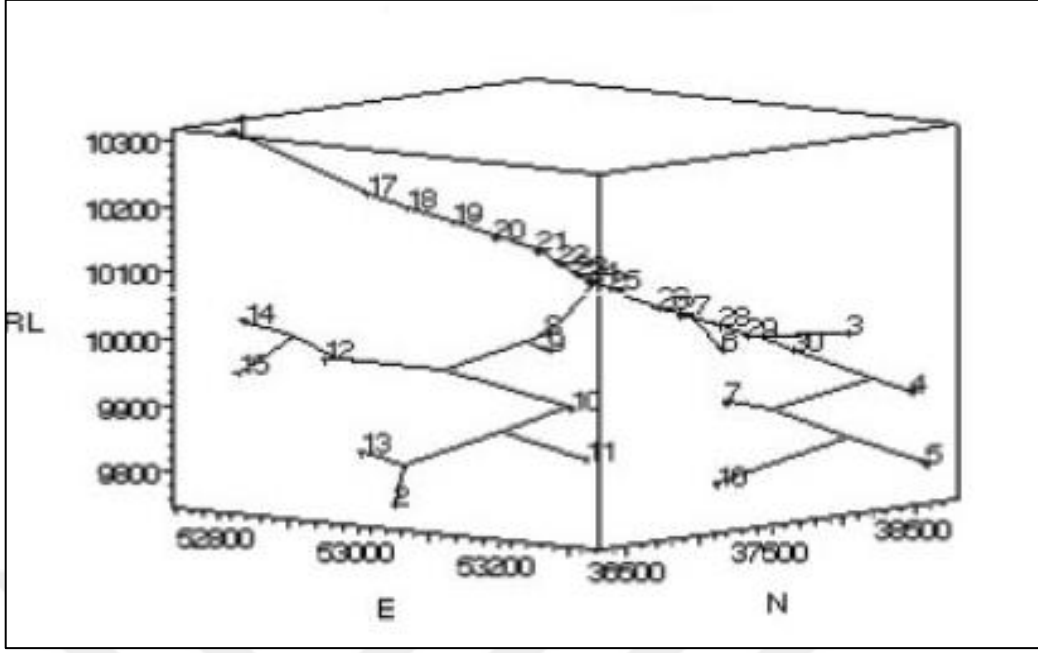
şebeke oluşturmak üzere tanımlanır. Buradaki kontrol değişkenleri; şebekenin topolojisi (yani grafik yapısı), madende bağlantı noktalarına karşılık gelen değişken düğümlerin (Steiner puanları) yerleri ve 3 boyutlu Öklid uzayında her bağlantının yerleşimidir.

Teorisi kısaca anlatılan şebeke yöntemi, “Yeraltı Şebeke Optimize Aracı” olarak adlandırılan (Brazil vd., 2000) bir bilgisayar yazılım aracıyla örnek bir çalışma üzerine uygulanmıştır (Brazil ve Thomas, 2007). Bu örnek çalışma, yeraltı madeninin mevcut bir bölümündeki baş aşağıdan genişletilen yeni bir bölümünün tasarımını kapsamaktadır. Hazırlık tasarımı, verilen 15 ayrık cevher kütesine yayılmayı ve hazırlık yapım ve nakliye maliyetlerinin en aza indirilmesi hedeflerini taşımıştır. Tasarımda araştırma sondaj gerekliliklerinden dolayı, madenin yeni bölümünün tepe noktasının (nerdeyse yüzey giriş noktasına yakın) tasarımında güçlü kısıtlar ele alınmıştır. Bu kısıtların kapsanması için tasarım problemi, verilen 30 noktayı birbirine bağlayan eğim kısıtlı ve minimum maliyetli bir şebeke bulmak olarak modellenmiştir.

Tasarımda hem nakliye hem de hazırlık yapım işlerinin maliyeti, maliyet fonksiyonuna eklenmiş ve maksimum eğim 1: 6,5 olarak belirlenmiştir. Örnek çalışmanın sonucu Şekil 2.7’ de görülebilmektedir. Burada nokta 1 yüzey giriş noktasını, 2 den 16’ ya kadarki noktalar 15 cevher kütesini göstermektedir. Ayrıca 17 den 30’a kadarki noktalar sondaj için gereken izleği modellemede kullanılmıştır. Sondaj izleğini modelleyen noktalar birbirine çok yakın olduğundan, minimal şebeke onları ardışık olarak bağlamıştır. Brazil ve Thomas (2007), bu çalışmanın sonucunun minimum maliyeti garanti etmediğini ancak sonradan yaptıkları çalışmalar ile en uygunluğu sağladığını doğrulamışlardır.

2.3.1. Baş aşağı tasarım

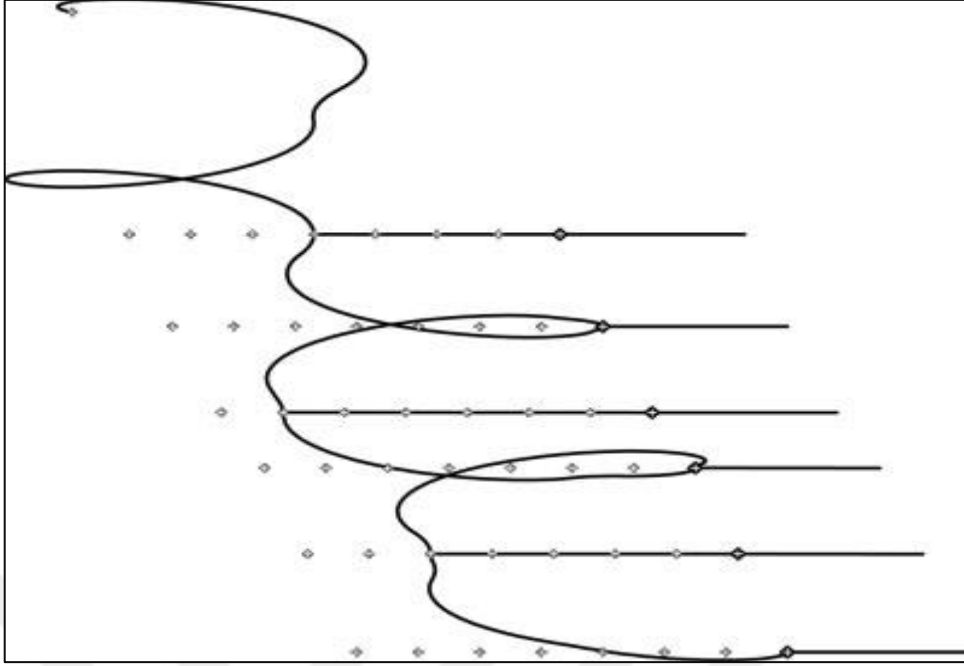
Yukarıdaki bölümde anlatılan yaklaşım, çoklu cevher kütesi içeren büyük ölçekli maden tasarımlarında oldukça etkilidir. Ancak önerilen yeni bir yeraltı madeni için tek bir cevher bölgesinin olduğu ve bu bölgeye ulaşımın ardışık katlar arasında ya rekuplarla ya da kat geçiş noktalarıyla sağlandığı durumlarda vardır. Bu durumlar için ulaşım ve cevher çekme noktalarını yüzey başlangıç noktalarına bağlayan ve temelde rampa ve rekup sistemlerinden oluşan baş aşağılar tasarlanmıştır (Şekil 2.7). Baş aşağı tasarımlarında şebekenin topolojisi artık önemli bir husus olmaktan çıkmıştır, çünkü nakliye rampalarının



Şekil 2.7. Örnek çalışma için bulunan optimum tasarım (Brazil ve Thomas' dan, 2007).

(başasağı olarak bilinen) ana şebekesi zaten tek bir yol oluşturmaktadır. Bunun yanında, gidiş geliş uygunluk ve engelden kaçınma kısıtları bu tasarımın amaç fonksiyonunun önemli faktörleridir. Örneğin cevherin verimsizleştirilmesinden kaçınmak ve rekuplarda minimum çalışma uzunluğuna izin verebilmek için, bir baş aşağıının cevher bölgesine belli uzaklık mesafesinden daha yakınında tasarlanmaması genel bir gerekliliktir (Alford vd., 2007). Bu pratik kısıtlar ve tasarım özellikleri Şekil 2.8' de görülebilmektedir.

Brazil ve Thomas (2007) yukarıda tanımlanan problemi modellemişlerdir. Modelde baş aşağıının yüzey başlangıç noktaları ya sabitlenmiş ya da bir konumla sınırlandırılmıştır. Daha sonra başasağı, düz ve kavisli rampa bağlarının değişken uzunluktaki rekup bağlarıyla birleşimi olarak modellenmiştir. Burada, rekup bağları modelde Steiner köşeleri olarak bilinen noktalara bağlıdır. Genelde rekupların verilen belli bir tolerans açısında baş aşağıına dik olduğu ve bunların her üretim katında cevher kütlesine sabit bir noktada eriştiği varsayılır. Bunlara ek olarak modelde örneğin üretimi daha önceden yapılmış “olasılıksız” bölgeler tanımlanmaktadır. Ayrıca, maksimum eğim ve dönüş açıları da model için diğer önemli kısıtlardır (Brazil vd., 2008). Problem bu bilgiler ışığında tam olarak aşağıdaki gibi modellenmiştir:



Şekil 2.8. Değişken rekup uzunluk yaklaşımıyla nakliye ve hazırlık maliyetlerinin toplamı için optimize edilmiş bir başaşağı (Brazil ve Thomas’ dan, 2007).

I) Üç boyutlu Öklid uzayında bir set nokta (N), üzerlerine yerleştirilen bir sıralama ile verilir ve eğimin “0” ‘dan büyük olduğu ($m > 0$), kıvrıklık sınırının minimum yarıçapının tanımlandığı ve bir set “olasılıksız” bölgenin belirlendiği kısıtlar ele alınır.

II) Üç boyutlu Öklid uzayına gömülmüş nokta setleri (N) birbirine bağlanarak bir şebeke (T) bulunur. Öyle ki, şebekenin verilen maliyet fonksiyonu aşağıdaki kısıtları sağlayarak en aza indirilir:

- i)** “ T ” ilk ve son terminalleri bağlayan düzgün bir yol (başaşağı) içerir. Başaşağı tüm Steiner noktalarını ve (baş aşağına dik olan) yatay düz bağlarla (rekübe tekabül eden) baş aşağına bağlanan terminalleri içerir.
- ii)** Her bağlantının eğimi en çok “ m ” kadardır.
- iii)** Başaşağı kıvrıklık sınırının minimum yarıçapını sağlar.
- iv)** “ T ” ‘nin olasılıksız bölgelerde tanımlanmasından kaçınılır.

Böyle bir şebeke tasarımını optimal maliyeti sağlayacak şekilde tasarlamak oldukça zor bir problemdir. Bu problemin matematiksel olarak çözülebilmesi için, çözüme giden ilk adım “ i ” de anlatılan kısıtlamaların basitleştirilmesi olmuştur. Bu adımda, “ T ” üç boyutu uzayda “ s ” ve “ t ” olarak verilen iki noktayı bağlar, “ s ” ‘de ve “ t ” ‘de verilen iki yön vektörü içermektedir.

Modifiye edilmiş bu problemi çözmenin yolu geliştirildiğinde, orijinal problemi çözmeye dinamik bir programlama metodolojisi ile devam edilebileceği ön görülmektedir (Alford vd., 2007). Brazil vd. (2003) modifiye edilmiş problemin çözümü için temeli geometrik metotlara dayanan analitik tekniklerin uygulanmasını tavsiye etmişlerdir Bu teknikleri bir algoritmaya dâhil etmişler ve “Başaşığı Optimizasyon Aracı” ismiyle geliştirdikleri bir araç vasıtaıyla başarıyla uygulanmıştır. Bu konudaki çalışmalar takip eden yıllarda Brazil vd. (2008, 2013) tarafından geliştirilmeye devam edilmiştir.

Yeraltı üretim yöntemlerinde, cevhere ulaşmak ve onu yeryüzüne çıkarmak için sürdürülen hazırlık faaliyetlerinin optimizasyon işlemleri, temelde yeraltı üretim maliyetlerini en aza indirmeye böylece madenin ekonomik verimliliğini artırmaya odaklanmaktadır. Bu konuda şimdiye kadar yapılan çalışmaların sayısı sınırlı olmakla birlikte, problem genellikle şebeke modelleme ile çözülmeye çalışılmıştır. Ancak, maden planlama sürecine önemli etkisi olan bu optimizasyon alanı halen her kısıdı aynı anda değerlendiremeyen klasik yöntemlerle sürdürülmektedir ve endüstride üretim faaliyetlerinin hazırlık işleri için ticari bir yazılıma olan ihtiyaç henüz giderilememiştir.

2.4. Kazı Arını Sınırları Optimizasyonu

Önceki bölümde de bahsedildiği üzere yeraltı madenleri için tasarım problemlerinin formülasyonu ve optimizasyonu, açık ocak madenciliği için yapılan çalışmaların çok daha gerisinde kalmıştır. 1960’ lı yılların başından beri geliştirilen çeşitli maden optimizasyon teknikleri, genellikle açık ocak maden planlaması ve tasarlanmasındaki gelişmeleri tetiklemiştir. Örneğin günümüzde ticari ulaşılabilirliği bulunan Lerchs-Grossmann algoritması, açık ocakların nihai sınırını çizmek üzere başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Buna karşılık nihai kazı arını sınırlarının optimizasyonu yeni yeni dikkat çekmeye başlamış ve bu optimizasyonla ilgili daha sınırlı sayıda algoritma geliştirilmiştir.

Yeraltı madenlerinin optimizasyonunda araştırmaların sınırlı olması çeşitli nedenlere dayanmaktadır (Ovanic ve Young, 1995; Ataee-Pour, 2000). Öncelikle yeraltı maden üretimi için çok sayıda yöntem olduğundan burada genellemeler yapılamamaktadır. Her yöntem kendi koşullarını ve sınırlamalarını da beraberinde getirdiğinden, tüm

yöntemler için kazı arını sınırlarını optimize eden tek bir algoritma geliştirmek zordur. Bunun yanında yeraltı madenlerinin jeolojik, jeoteknik ve ekonomik parametreleri oldukça karışık yapıdadır. Bu yüzden yeraltı tasarım problemlerinin çoğu için basit bir matematiksel formülasyon yoktur.

Genel amacı çıkarılacak cevher kütesinden elde edilen ekonomik sonuçları en üst düzeyde tutmak olan ve yeraltı maden planlama sürecinde kritik bir rol oynayan kazı arını sınırının optimizasyonu için geliştirilen algoritmalar, kesin (rigorous) ve sezgisel (heuristic) olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Ataee-Pour, 2005). Kesin algoritmalar matematiksel kanıtlarla desteklenir ve yeterli zaman verilirse bulacağı çözümler her zaman optimaldir. Öte yandan sezgisel algoritmalar optimal çözümleri üretmeyi garanti etmez, sadece yaklaşık çözümler verir. Yeraltı maden tasarım probleminin hesaplama karmaşıklığı ve boyutu göz önüne alındığında, üç boyutlu (3D) uzay düşünülerek geliştirilen algoritmaların hepsi sezgisel yöntem olarak kalmıştır. Çizelge 2.2. bu iki sınıfa ait şimdiye kadar yapılmış tüm algoritmaları göstermekte ve takip eden bölüm algoritmaları sırayla anlatmaktadır.

2.4.1. Dinamik Programlama çözümü

Dinamik Programlama tekniğinin nihai yeraltı maden sınırının optimizasyonuna uygulanması, sadece blok göçertmeli madenlerin tasarımları için ortaya konmuştur (Riddle, 1977) Bu yaklaşım yeraltı maden sınırlarını optimize eden ilk girişimlerden biridir ve nihai ocak sınır optimizasyonu için geliştirilen bir algoritmanın (Johnson ve Sharp, 1971) modifikasyonudur. Algoritmayı yeraltı blok göçertme yöntemlerine uyacak şekilde değiştirmek için, blok göçertmenin dayattığı belirli maden kısıtlamaları tanımlanmıştır, çünkü açık ocak optimizasyonunda kullanılan kısıtlar blok göçertmede kullanılanlardan oldukça farklıdır. Örneğin, açık ocak madenciliğine yüzeyden başlamak ve tek blok basamak halinde (45° genel şev açısı ile) ilerlemek gerekir. Bunun yanında blok göçertme yöntemi düşey bir sınır içerebilir ve böylece madencilik herhangi bir yükseklikten başlayabilir. Burada giriş noktası yatay olarak değişebilir (herhangi bir sütunda), yani madenciliğin ilk cevher çekme noktasından başlamasına gerek yoktur. Kazı yüksekliği şev açısından ziyade çekme kontrolü ile sınırlandırılır. Bunlara ek olarak, düşey sınırlar bir

kesit bıyınca belirli koşullar altında birkaç bölgede konumlandırılabilir, böylece değersiz bölgeler taban taşı olarak bırakılabilir.

Çizelge 2.2. Kazı Arını sınırı optimizasyon algoritmaları

KAZI ARINI SINIRI OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI	
Kesin Algoritmalar	Sezgisel Algoritmalar
Dinamik Programlama Yaklaşımı (1977)	Sekizli Ağaç Bölme Algoritması (1989)
	Hareketli Kazı Arını Algoritması(1995)
Jeoistatistiksel Yaklaşım (1984)	Maksimum Değerli Komşuluk Algoritması (2000)
	Çok Geçişli Hareketli Kazı Arını Algoritması(2001)
Dal ve Sınır Algoritması (1995, 1999)	Aday Gösterilmiş Bir Sınır Tenör Aralığı İçin Kazı Arını Şekillerinin Üretilmesi Yöntemi (2009)
	Sens ve Topal Yaklaşımı (2009)
Network Akış Algoritması (2013)	Sandayake vd. Yaklaşımı (2015)

Yaklaşım temelde şu iki basamağı takip eder: çizim kontrolüne izin vermek için “ r ” varyasyonunun geliştirilmesi (bağıntı 2.14) ve düşey sınırların kullanılmasıyla herhangi bir blok yüksekliğine giriş ve çıkışın göz önünde bulundurulması. Burada “ r ” maksimum eğim

kısıtını sağlamak için komşu bloklara dâhil edilmesi gereken, bir önceki sütunun blok sıralarının aralığını ifade etmektedir. Açık ocak madenciliği için “ r ” değeri bloklar eşit boyutta kabul edildiğinde, 45°’ lik bir şev açısı için sırayla -1, 0 veya 1 dir. Ancak blok göçertme durumunda “ r ” değeri satır dizisinin (yükseklik) ve madende kullanılan çekme kontrol yüzdesinin bir fonksiyonudur. Çekme kontrol yüzdesi ardışık çekme noktaları arasındaki varyasyonu sınırlar. Örneğin 18. satır dizisinde ve % 10 çekme kontrolünde incelen bir blok için varyasyon $\pm 1,8$ den büyük olamaz. Hem açık ocak hem de blok göçertme yöntemlerinde bitişik blok konseptini gösteren bir örnek Şekil 2.9’ da görülebilir.

$r = r_{min}$ ve r_{max} arasındaki tüm tam sayı değerleri

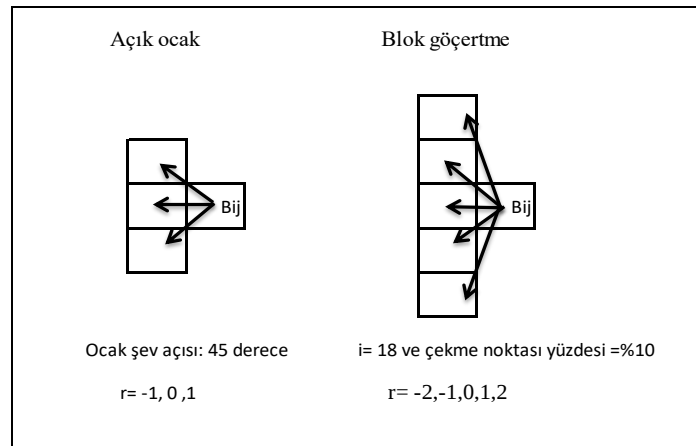
$$r_{min} = -\text{Max}(1, (\% \text{ çekme kontrolü}) \times i)$$

$$r_{max} = +\text{Max}(1, (\% \text{ çekme kontrolü}) \times i) \quad (2.14)$$

Bağıntı 2.14’ de “ i ” incelenen bloğun satır numarasını göstermektedir. Başlangıç bloğunun yatay değişimini ele almak ve blok göçertme yönteminde başlangıç bloğunu tanımlamak için “ P_{ijo} ” parametresi tanımlanır (2.15).

$$P_{ijo} = M_{ij} + \text{Max}(P_{i+r, j-1}) \quad (2.15)$$

Burada M_{ij} blokların net kümülatif değerini, “ r ” bitişik blokların aralığını ve “ P_{ijo} ”, herhangi bir çekme noktası seviyesinden (“ o ”) başlayarak “ j ” çekme noktası ve “ i ” satırındaki bloktan elde edilen kârı göstermektedir.



Şekil 2.9. Açık ocak ve Blok göçertmede bitişik blokların gösterimi (Ataee- Pour’dan, 2000).

Algoritma “ T ” satırları ve “ J ” sütunlarıyla blokların 2 boyutlu bölümünü ele alarak aşağıdaki adımlarda özetlenebilir:

1. Tüm $P_{ij,1}$ ler hesaplanır (diğer bir deyişle, maden, 1. çekme noktasının herhangi seviyesinden başlayacağı şekilde tüm bloklar için P_{ij} hesaplanır).
2. Sütun 1 çıkarılır ve $P_{ij,2}$ ler hesaplanır. (1. sütun haricinde tüm bloklar için P_{ij} hesaplanır; maden, 2. çekme noktasının herhangi seviyesinden başlayacağı şekilde).
3. Sütun “ J ” ye kadar ikinci basamak tekrar edilir ve $P_{i,J,J} = M_{ij}$ elde edilir.
4. $k = 1, 2, \dots, I$; $m = 1, 2, \dots, J$; $n = 1, 2, \dots, j$ için $\text{Max} (P_{k,m,n})$ bulunur.

Bu dört basamak tamamlandıktan sonra çıkış bloğu B_{km} ’ dir ve oklar başlangıç çekme noktası olarak “ n ” sütunundaki giriş noktasına doğru geriye izlenebilir. Şekil 2.10 bir blok model bölümü üzerinde, blok göçertme yöntemiyle optimize edilmiş nihai en uygun sınırları göstermektedir.

Kat	5	-3	11	0	0	4	0	-3	2	0	-5
	4	-5	-5	2	-3	2	2	8	17	2	0
	3	2	-3	13	-3	-5	-5	4	13	2	6
	2	2	6	6	-5	-3	-3	4	8	4	4
	1	6	8	11	-3	-3	-9	2	4	22	2
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Cevher çekme noktası									

Şekil 2.10. Blok göçertme yöntemi kullanılarak elde edilen nihai sınırları gösteren bir örnek (Riddle’ dan, 1977)

Dinamik Programlama yaklaşımını optimizasyonun başlangıcında hiç taban taşı olmadığını varsayar ve maksimum kârı herhangi bir taban taşı tasarımı olmaksızın elde eder. Daha sonra, bölge tanımlanan bir taban taşı ile ayrılır ve madencilik yapılacak ve yapılmayacak bölgelerin tüm elverişli kombinasyonları incelenir. Eğer elde edilen kâr, başlangıçta hiç taban taşı yokken varsayılan maksimum kârdan daha yüksek veya eşitse işlem tekrar ettirilir, fakat bu sefer taban taşı ile bölünmüş iki alana uygulanacaktır. Bu

durum artık daha kârlı veya daha elverişli taban taşı durumu kalmayıncaya kadar devam ettirilir (Riddle 1977). Yaklaşımın en büyük dezavantajı yalnızca iki boyutta en uygun kazı arını tasarımlarını belirleyebilmesidir. İki boyutlu bölümler, üç boyutlu kazı arını sınırların elde etmek için birleştirildiğinde, kazı arını kısıtları ihmal edilir ve optimal olma durumu garanti edilemez. Bir diğer dezavantaj ise yöntemin genel uygulamasındaki sınırlamadır çünkü yöntem yalnızca blok göçertme yöntemi için geliştirilmiştir.

2.4.2. Jeostatistiksel yaklaşım

Yeraltı madenlerinde kazılabilir cevherin sınırını belirlemek amacıyla jeostatistiksel yöntemlerin uygulaması Deraisme vd. (1984) tarafından ortaya konmuştur. Bu yazarlar bir jeostatistik yöntemini, yatağın iki boyutlu sayısal modelini oluşturmak ve kazılabilir cevher sınırı tanımlamak için kullanmışlardır. Yaklaşım, Kaz-Doldur ve ara katlı kazı yöntemlerinde kullanılabilmektedir. Geliştirilen yöntem, optimizasyon esnasında jeostatistiksel olarak oluşturulmuş tenör değerlerini girdi olarak kullanmaktadır, böylece optimizasyon tenör belirsizliğini içererek bir üstünlük kazanmıştır (Ataee-Pour, 2000). Gerçek tenör değişkenliği tenörlerin üç boyutta koşullu benzetimi kullanılarak tekrar üretilmiştir. Koşullu benzetim istenen herhangi bir ölçekte bir set tenör değeri üretmekte ve bu değerler ölçülen değerler ile aynı istatistikleri ve değişkenlikleri içermektedir.

Yöntem Avustralya’ da bulunan Ben Lomond Mine’a ait bir uranyum yatağının iki boyutlu sayısal modelinde uygulanmıştır. Matematiksel biçimbilim içerisinde bulunan “imge dönüştürme” teknikleri (Serra, 1982) sınır tenör değeri üzerinde bulunan cevher bloklarının imgelerini kazı arını geometrisi kısıtlarını sağlayan imgelere dönüştürür. Burada geometrik kısıtlar bahsedilen iki yeraltı üretim yöntemi için tanımlanmıştır. Kaz-Doldur yöntemi için geometrik kısıtlar minimal kazı arını ve topuk boyutudur. Cevher blok boyutları minimum bir kazı arını oluşturmak için yeterince büyük olmadığında, kazılmamak üzere bırakılır. Pasa blok boyutları da bir minimum topuk oluşturmak için yeterince büyük olmadığında, bir kazı arınına katılır. Başlangıç imgesi ve geometrik operasyonlardan elde edilen imge arasındaki fark, serbest ve koşullar altında seçimden dolayı oluşan ekonomik kayıpları belirtir. Bunun yanında, eğer kazı arını dışında kalmış cevher bloklarını bitişigindeki en iyi bloklara eklemek ekonomik ise bu bloklar final

tasarımına girer. Ayrıca önceden kazı arınına dâhil olan pasa blokları ekonomik parametreler düşünülerek final tasarımından çıkarılabilir.

Ara katlı kazı yöntemi için 45° eğimli olacak şekilde bir taban taşı, izin verilen minimum boyutlara ek olarak kullanılır. Aynı algoritma çalıştırılır ve Dinamik Programlama optimum tasarımı incelemek üzere uygulanır. Ancak, optimum sınırlar tüm geometrik kısıtları yerine getirmez bu yüzden tasarımı sonlandırmak için maden planlamacılar sağlanacak girdilere ihtiyaç bulunmaktadır. Geometrik kısıtların neden sağlanmadığı ilgili detaylar verilen çalışmadan temin edilmemiştir (Little, 2012).

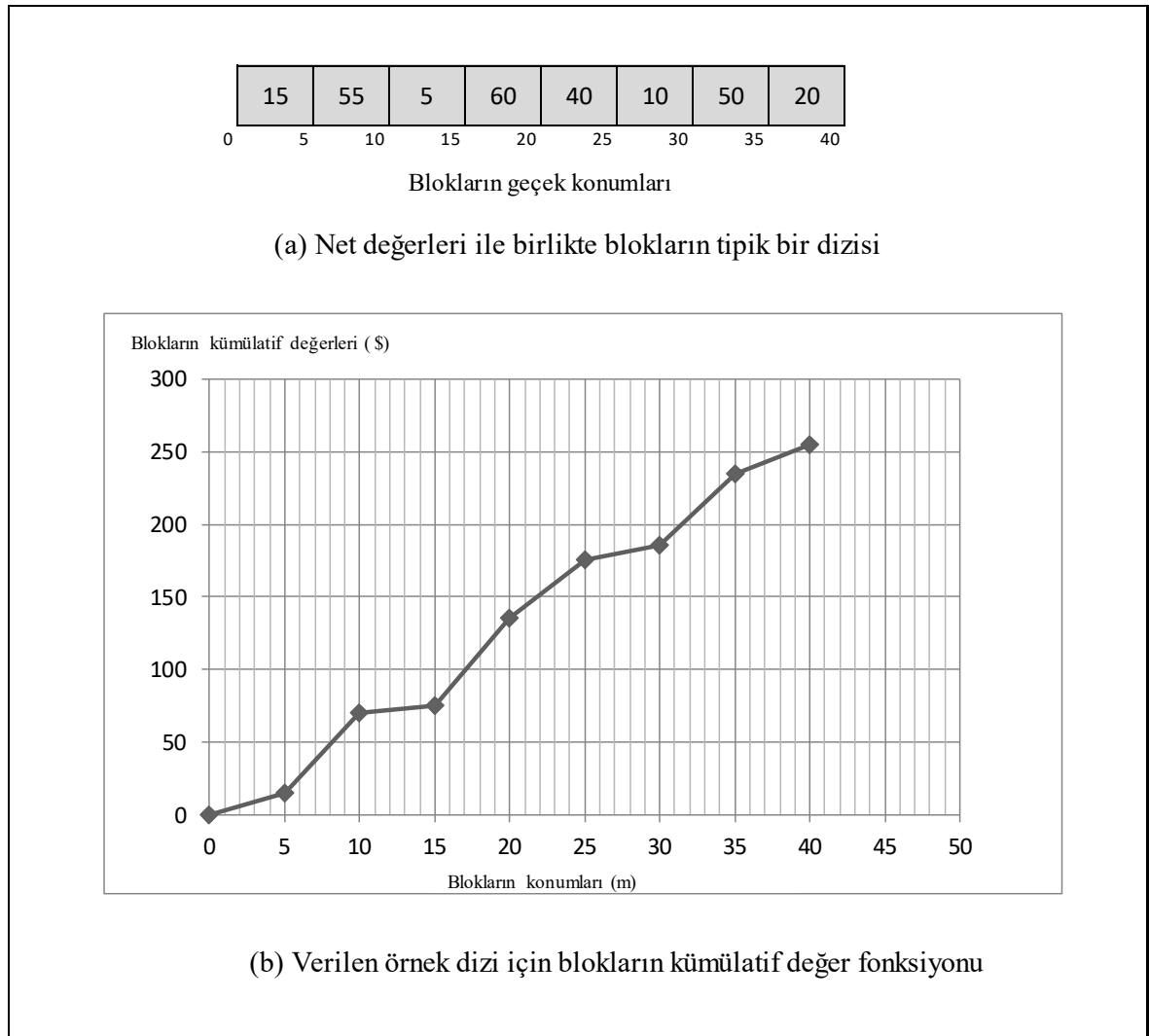
Bu yaklaşımın en büyük avantajı tenör belirsizliğini optimizasyon aşamasına katabiliyor olmasıdır. Ancak yöntemde matematiksel biçimbilim işlemleri yalnızca kazı arını geometrisini kontrol eder, ilgili ekonomik kârı dikkate almaz. Burada kazı arını geometrisi en kârlı kazı arını araştırmalarından bağımsız olarak sağlanması, sonuçların optimum olma durumu engeller (Bai, 2013). Dahası yöntem, yalnızca iki boyutla sınırlı kalmıştır ve üç boyuttaki kullanışlı değildir.

2.4.3. Dal ve sınır (Branch and Bound) algoritması

Kazı arını düzenin belirlenmesi için Dal ve Sınır Algoritmasının kullanılması Ovanic ve Young (1995) tarafından ortaya konmuştur. Yazarlar optimum kazı arını sınırını madenin başlangıç ve bitiş (blokların her dizisinde) konumlarını optimize ederek geliştirmiştir. Bu iki konumun belirlenebilmesi için, blokların her dizisinde iki parçalı doğrusal kümülatif fonksiyonlar kullanılmıştır. Fonksiyonlardan ilki başlangıç konumunu ikincisi ise bitiş konumunu optimize etmekte ve bu iki fonksiyon modelin her dizisinde blokların kümülatif ekonomik değerlerini hesaplamaktadır. Kümülatif ekonomik değerlendirme işleminin uygulanması Şekil 2.11' de sekiz blok içeren hipotetik bir örnek üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.11 a' da içerlerinde ekonomik değerleri belirtilmiş bloklar 5' er metre arayla ayrılmıştır. Şekil 2.11 b' de ise birbirini takip eden her blok konumu için kümülatif ekonomik değerlerin doğrusal fonksiyonu gösterilmiştir.

Parçalı doğrusal fonksiyonları optimize etmek ve kazı arını boyu gibi madencilik kısıtları ile bütünleştirmeye yardımcı olmak amacıyla "İkinci Tür Özel Sıralı Set" işlemi

uygulanır. Bu set çözümü en fazla iki değişkenin sıfır olmamasına izin verecek, özel değişkenlerin sıralı bir seti olarak tanımlanmaktadır. Eğer iki özel değişkenin sıfır olmamasına izin veriliyorsa bunlar sınırdaş olacak demektir (Atee-Pour, 2000). Buradan sonra kazı arının aranması KTP problemi olarak formüle edilmektedir. Problem, başlangıç ve bitiş konumlarını belirlemek amacıyla elde edilen kümülatif değerler arasındaki farkın en büyükleme olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.11. Bir dizi bloğa uygulanan kümülatif blok değer fonksiyonu

Bu algoritma çeşitli yeraltı kazı yöntemlerine uygulanabilmekte olup ayrıca veri azaltma, optimizasyon ve grafiksel sunum için ticari olarak kullanılmaktadır. Dal ve Sınır Algoritması maden tasarımları için özellikle geometrik optimizasyon gibi bazı kısıtlamaları ortadan kaldırmaktadır. Burada blokların tüm halde değerlendirilme zorunluluğu

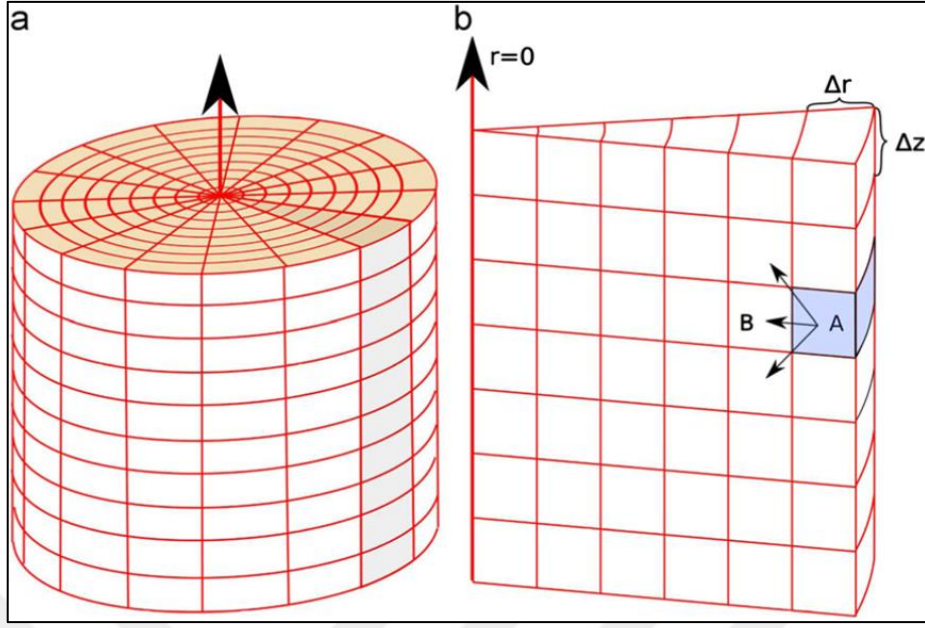
bulunmamakta, bloklar parçalı halde nihai tasarıma katılabilmektedir. Böylece bloklar jeolojik değişkenlikleri ve düzensizleri takip edebilmektedir. Bunlara rağmen, algoritmanın uygulanması basit cevher kütleleri ile sınırlı kalmıştır ve madencilik yönü boyunca tek boyutta modellenmektedir. Taban ve taşı eğimleri ihmal edilmekte ve özellikle blok sayısı arttığında KTP' nin problem çözüm süresi de artmaktadır.

2.4.4. Şebeke Akış (Network Flow) algoritması

Bai ve arkadaşları (2013) yeraltı kazı arını optimizasyonu için grafik teorisi ve Şebeke Akış (network flow) metodunu temel alan yeni bir algoritma tanımlamıştır. Bu algoritma özellikle ara katlı kazı madencilik yöntemini kullanan yeraltı madenlerinde uygulanmıştır. Grafik teorisi ve ağ akış kavramlarını temel alan yöntemler genellikle açık ocak optimizasyonları için öne çıkan başarılı uygulamalardır. Açık ocak optimizasyonlarında başarı ile uygulanan bu yöntem, yeraltı madenlerinin optimizasyonu için direk kullanılamasa da Bai' nin (2013) çalışması için bir fikir oluşturmuştur.

Kazı arını optimizasyonuna Şebeke Akış kavramını uygulamak için, kazıya başlanacak serbest yüzeyi bulmak yöntemin kilit noktasıdır. Ara katlı kazı yöntemi için baş yukarının başlangıç serbest yüzey rolü oynayacağı düşünülmüştür. Yöntemde silindirik şekilli bir koordinat sistemi tanımlanmakta ve koordinat sisteminin girişine baş yukarıdan başlanmaktadır. Bu koşul geometrik kısıtların kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır, çünkü kazı yapma dizilişi silindirik şekilli blokların başyukarıya doğru bağlantılarıyla ifade edilebilmektedir. Şekil 2.12.a silindirik şekilli koordinat sistemini kullanan bir blok model göstermektedir.

Bai ve arkadaşları (2013) genel kazı arını kısıtlarının, bir grafikte farklı bağlantılar ile nasıl uygulanacağını belirlemişlerdir. Tavan taşı ve taban taşı eğim kısıtları, düşey yönde öncelikli bağları tanımlar (Şekil 2.12.b). Silindirik şekilli sistem için bloklar r , Δr , Δz ile ifade edilir bunlar sırasıyla bloğun başyukarı merkezine uzaklığını, boyunu ve düşey yüksekliğini gösterir. Bir bağın yukarı ve iki bağın aşağıya doğru olması, $\Delta z/\Delta r = 1$, tavan taşının 45° ve de taban taşının $63,4^\circ$ eğimli olduğunu gösterir.

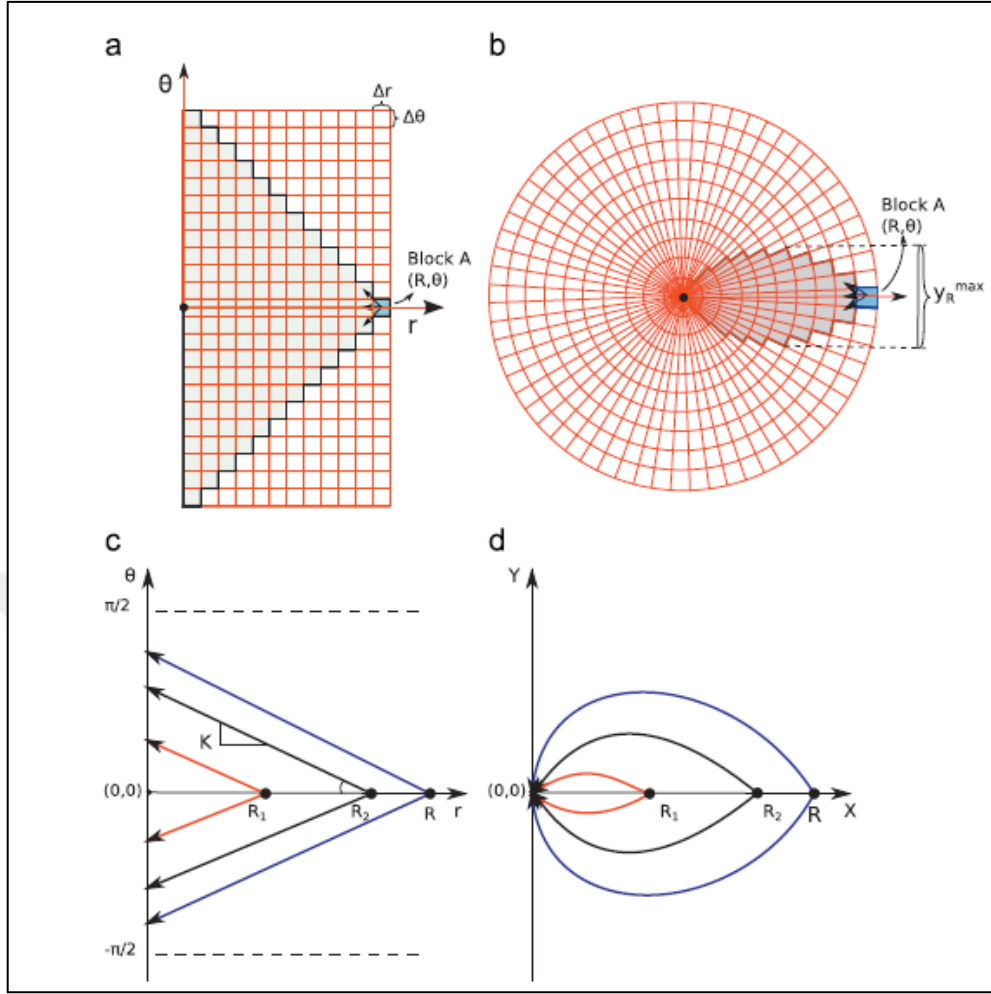


Şekil 2.12. a) Silindirik şekilli koordinat sistemini kullanan blok model b) düşey bağların önceliği ile tipik arklar (Bai’ den, 2013).

Kazı arını genişliği yatay düzlemde, her blok için bir merkez-açılımlı ve iki yanıl bağ olmak üzere özel bağlantılar ile kontrol edilir (Şekil 2.13.a). Bunun yanında kazı arını genişliği iki tasarım parametresi ile de kontrol edilir: kazı arınının başyukarıdan olan maksimum uzantısı (veya başyukarının etki mesafesi, R) ve başyukarıya en uzak mesafede olan bloğun, yerçekimi etkisiyle, kaldırılması için gereken minimum genişlik (Y_R) (Şekil 2.13). Bir diğer jeoteknik kısıt olan maksimum kazı arını yüksekliği, basit bir şekilde başyukarının boyu ile kontrol edilir. Başyukarının tepesinin üzerinde veya dibinin altında bulunan bloklar şebeke sisteminin parçası olmazlar, böylece kazı arınına dâhil edilmezler.

Algoritmanın optimizasyon işlemi iki ana parçadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki algoritmanın temelini oluşturur ve kazı arını optimize eder. Belirlenmiş başyukarı konumu ve yüksekliği için, seçilen R ve Y_R tasarım parametreleri ile optimal bir kazı arını yaratır. Bunun için şu adımları takip eder:

1. Verilen başyukarı konumu ve yüksekliği ile silindirik koordinatlarda ekonomik bir blok model yaratılır.
2. Eğim kısıtlarını uygulamak için düşey arklar ve genişlik kısıtlarını uygulamak için yatay arklar ile grafik oluşturulur.



Şekil 2.13. Yatay düzlemde (a) Silindirik sistemde tanımlanan bloklar ve bağlar (b) Kartezyen sistemde yerini tutan bloklar ve bağlar. Gölge blok A bloğuna ulaşmak için kaldırılması gereken blokları göstermektedir. (c) Silindirik sistemde yanal bağlar ile tanımlanan bürümlerin (Envelope) izi (d) ve izlerin Kartezyen sisteminde gösterimi (Bai' den, 2013).

3. Grafiğe giriş ve çıkış (source ve sink) düğümleri eklenerek akış şebekesi oluşturulur.

4. Son olarak maksimum akış problemi çözülür. Oluşturulan kazı arını, başyukarı konumuna ve yüksekliğine koşullu olarak optimaldir.

Algoritmanın ikinci bölümü, en iyi başyukarı konumunu ve yüksekliğini aramaktadır. Bunu yaparken algoritmanın ilk bölümünde bulunan kazı arını değerini kullanır. Kazı arını kârını, başyukarı konumu ve yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak optimize eder ve en iyi başyukarı konumunu ve yüksekliğini bulur (Bai vd., 2014) Algoritmanın performansı Hareketli Kazı Arını algoritmasıyla karşılaştırılmış ve daha iyi

sonuçların bulunduğu gözlenmiştir. Buna rağmen, algoritmanın daha geniş çaplı cevher kütlelerinde ve diğer maden üretim yöntemlerinde kullanılabilmesi için genişletilmesi ve bunlara uyarlanması gerekmektedir. Dahası, algoritma düşey başyukarı ile kısıtlanmaktadır bu da gerçekte çoğunlukla görülen eğimli yataklarda yüksek oranda seyrelmelere neden olacaktır.

2.4.5. Sekizli Ağaç Bölme (Octree Division) algoritması

Cheimanoff vd. (1989) tarafından sunulan Sekizli Ağaç Bölme Algoritması üç boyutta cevherin işletilebilir hacimlerini tanımlar. Algoritma GEOCAD yazılım paketinin içinde yer alır ve bu paket ile jeolojik kaynakları maden rezervlerine çevirir (Ataee-Pour 2005). Ancak yazılım şuan ticari olarak pazarlanmamaktadır. Algoritma, değerlendirmelerinde blok modelden ziyade damar birleştirme olarak adlandırılan bir işlem ile oluşturulan bir set yatay kesit kullanır.

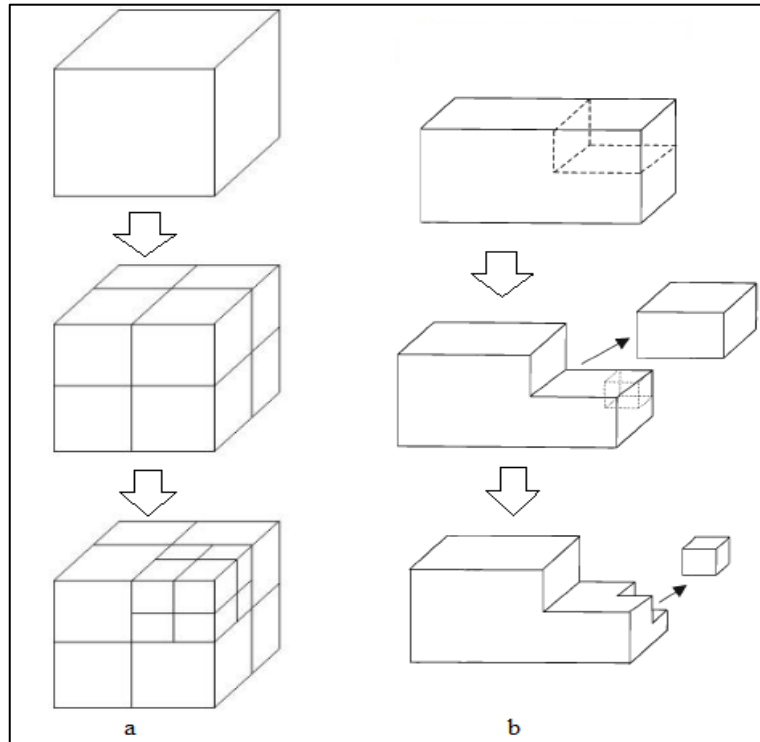
Sekizli Ağaç Bölme Algoritması öncelikle sondaj verileri, jeostatistiksel analiz verileri ve jeolojik objelerin şekillerini kullanarak geometrik bir model oluşturur. Daha sonra modellenmiş jeolojik kaynakları işletilebilir rezervlere dönüştürür. Bu adımda farklı üretim faktörleri mevcut jeolojik kaynağı kullanarak, çalışılabilir olası hacimlerin oluşturulması için simüle edilir. Son olarak jeolojik kaynak, çalışılabilir rezervleri ve maden üretim sırasını belirlemek için ekonomik olarak değerlendirir.

İşletilebilir hacimler geometrik ve ekonomik kısıtlarla uyumludur ve “Obj e Manipülatörü” ve “Şekil Üretici” tarafında belirlenir. Obj e manipülatörün prensibi, damarları konveks bloklar içerisinde toplamaktır, ayrıca Şekil Üretici modülünden geri gelecek bloğun tenör ve hacmini inceleyerek onun ödenebilirliğini kısaca değerlendirir. Bunu başarabilmek için, yeterince büyük ve değerli damarlardan başlanarak bir birleştirme işlemi yürütür. İşlem birbirine yakın damarları tek bir blokta birleştirerek ve birbirinden çok uzak olan damarları farklı bloklara ayırarak devam eder. Daha sonra tek başına düşünüldüğünde yeterli değeri sağlamayan daha küçük damarların değerlendirmesi yapılır, işlem tüm damar seti değerlendirilene kadar devam eder.

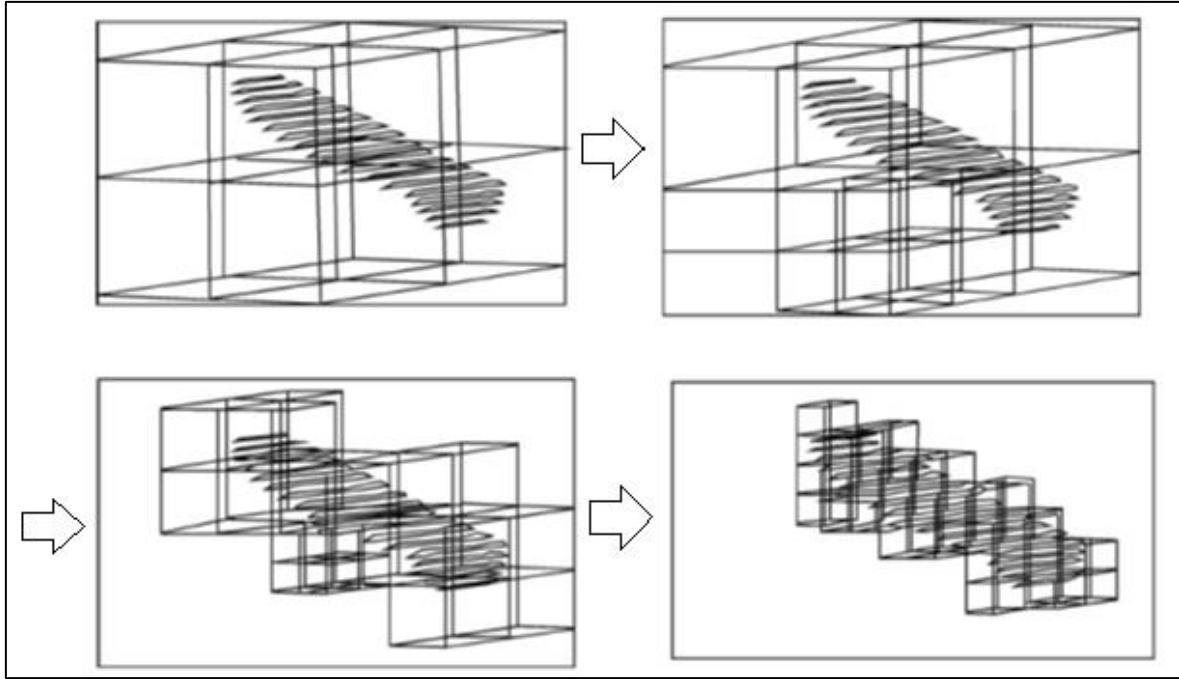
Şekil üretme modülü, Obje Manipülatörü tarafından yaratılan damar birleştirme ile işletilebilir bir blok oluşturur. Bu modül başlangıçta damar birleştirmenin etrafını işletilebilir büyük bir hacim ile sarar ve bu hacmi alt sekiz hacme böler. Daha sonra bu alt hacimleri aşağıda sıralan kurallara göre değerlendirilir ve nihai işletilebilir blokta kalmasına, çıkarılmasına ya da bölünüp tekrar değerlendirilmesine karar verir:

- Tüm kısıtları sağlayan ve hiç cevher içermeyen alt hacimler nihai işletilebilir bloktan çıkarılır.
- Minimum kazı arınıni sağlayan ve tamamen cevher içeren alt hacimler nihai işletilebilir bloğa eklenir.
- Minimum kazı arınıni sağlamayan ve bir kısım cevher içeren alt kacimler sekiz eşit hacme bölünür.

Bu işlem artık incelenmek üzere hiç alt birim kalmayınca sonlandırılır Şekil 2.14.a bir bloğun sekiz alt hacme bölünmesini ve Şekil 2.14.b Sekizli ağaç algoritması ile alt hacimlerin kaldırılmasını gösterir. Bunun yanında Şekil 2.15 Şekil üretme modülüne ait adımları içeren başarılı bir uygulama göstermektedir.

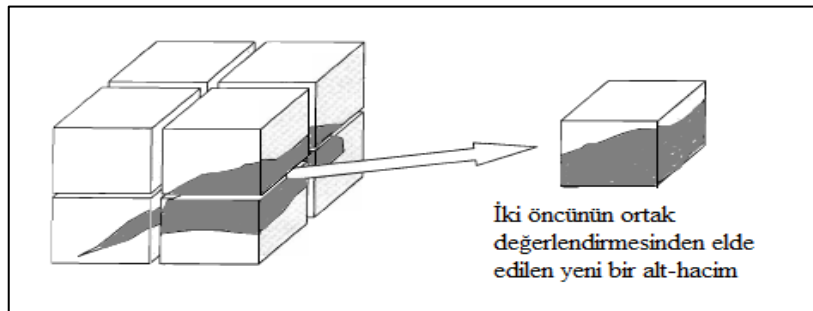


Şekil 2.14. a) Sekizli bölme b) alt hacimlerin kaldırılması



Şekil 2.15. Şekil üreticinin takip ettiği adımlar (Cheimanoff vd.' den, 1989).

Sekizlik ağaç bölümü algoritması kazı arını geometrisi için üç boyutta sezgisel bir sonuç sağlayabilmektedir. Ancak algoritma, alt hacimlerin birbiriyle olan ilişkisini düşünmediğinden nihai maden tasarımı daha fazla pasa içermesine neden olur. Örneğin Şekil 2.16' da minimal boyutları sağlayan ve nihai kazı tasarımına dâhil edilen bitişik iki alt hacim değerlendirilmiştir. Görüleceği üzere üstteki alt hacim cevherden daha fazla pasa içermesine rağmen minimal boyutları sağladığı için bu tasarıma dâhil edilmiştir. Bu hacim altındaki hacimle bağlantı olarak değerlendirilmiş olsaydı, yine minimal kazı boyutunu sağlayabilir ve pasa oranı algoritmanın hesapladığına göre daha düşük olabilirdi (Ataee, 2000). Bundan ziyade, algoritma optimal maden tasarımı garanti etmemekte ve kazı arını tavan ve taban taşı eğimlerini gibi bazı maden kısıtlamalarını dikkate almamaktadır.



Şekil 2.16. Alt hacimlerin birbiriyle bağlantısı (Ataee-Pour'dan, 2000).

2.4.6. Hareketli Kazı Arını algoritması

Hareketli Kazı Arını algoritması, yeraltı üretim yöntemleri ile ekonomik olarak işletebilecek cevhere ait en uygun nihai sınırı belirlemeyi amaçlayan bir algoritmadır (Alford, 1995). Bu algoritma üç boyutta çalışmakta ve CAE MINING yazılım şirketinin geliştirdiği DATAMINE adlı yazılım programında ticari ulaşılabilirliği bulunmaktadır. Hareketli Kazı Arını algoritmasının tasarımı, açık ocak optimizasyonları için geliştirilmiş Hareketli Koni yöntemine benzer ve onun gibi sezgisel bir yaklaşım olarak tanımlanır. Bu bölümle ilgili detaylar Bölüm 3’ de verilecektir.

2.4.6.1. DATAMINE yazılımının MRO (Mineable Reserve Optimisier) tasarım aracı

CAE MINING, yeraltı maden planlama ve tasarlama işlemleri için yazılımlar sağlayan bir şirkettir. Bu şirket, bölüm 2.4.6’ da bahsedilen Hareketli Kazı Arını algoritmasını temel olarak bir tasarım aracı geliştirmiştir. MRO (Mineable Reserve Optimisier) olarak adlandırılan bu tasarım aracı şuan DATAMINE yazılımıyla kullanılabilmektedir. MRO tasarım aracı yeraltı madenciliği için kazı arınlarının minimum boyut, şekil ve yönelimini ve işletilen cevherin minimum baş tenörü gibi faktörleri hesaba katarak materyalin üç boyutlu bürümelerini oluşturur ve değerlendirir (CAE Mining, 2016). Başka bir ifadeyle bir bölgenin jeolojik modelini analiz eder ve pratik madencilik kısıtlamalarını uygulayarak optimal işletilebilir rezervlerin ana hattını çizer (Anonymous, 2016a). Ayrıca bu tasarım aracı yeraltı madenciliği yöntemlerinin yanı sıra açık ocak tasarımlarında da kullanılabilmektedir. Bu çalışmanın detayları Bölüm 3’ de anlatılmaktadır.

2.4.7. Çok Geçişli Hareketli Kazı Arını algoritması (Multiple Pass Floating Stope Algorithm)

Cawrse (2001) Hareketli Kazı Arını algoritmasının başarısızlıklarının üstesinden gelmeye ve Datamine yazılımının işlevselliğini arttırmaya yardımcı olmak için Çok Geçişli Hareketli Kazı Arını algoritmasını geliştirmiştir. Geliştirilen bu algoritma, Hareketli Kazı

Arını algoritmasıyla aynı ilkelere dayanmakta ve çoklu optimizasyon işlemi uygulayarak daha fazla bürüm oluşturulmasına izin vermektedir.

Bu yöntemde, girdi parametreleri kullanıcı tarafından tanımlanır ve örneğin baş tenör, sınır tenör, maksimum pasa gibi birden fazla parametre setine sahip olabilir. Bununla birlikte değerlendirmeye dahil edilen parametre setlerinin sayısı için bir sınır yoktur. Girdi parametrelerinin tanımlanmasının ardından, algoritma her bir parametre seti için ekonomik bürümler oluşturur. Oluşturulan bürümler cevher kütlesi hakkında ekstra bilgi sağlar. Bu bilgi tasarımcıların maden tasarım süreci boyunca kullanılabileceği gibi, maden tasarımlarının verimliliğini ve dolayısıyla kârlılığını geliştirmeye de yardımcı olacaktır. Buna rağmen geliştirilen bu yöntem “Hareketli Kazı Arını” algoritmasının eksikliklerini ortadan kaldırmamıştır. Kazı arını sınırının seçimi ve tasarımını kolaylaştırabilmiş, ancak optimum kazı arını düzeni konusunda eksik kalmıştır (Cawrse, 2007).

2.4.8. Maksimum Değerli Komşuluk (Maximum Value Neighbourhood) algoritması

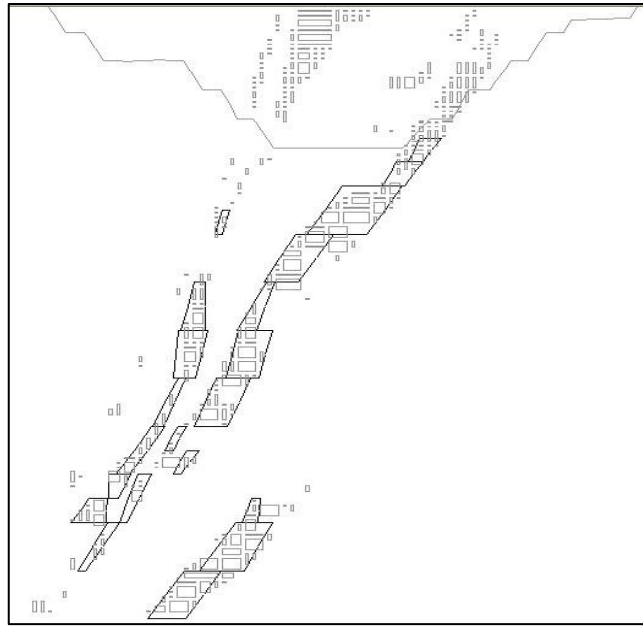
Ataee-Pour (2000), kazı arını sınırlarını üç boyutta optimize etmek amacıyla Maksimum Değerli Komşuluk algoritması (MVN) olarak adlandırılan sezgisel bir algoritma geliştirmiştir. MVN algoritması cevher kütlesinin üç boyutlu ekonomik blok modeli üzerinde çalışmakta ve belirli jeoteknik ve madencilik kısıtları (minimum kazı arını boyutu gibi) altında blokların en iyi kombinasyonunu, maksimum net değeri sağlamak amacıyla aramaktadır. Bölüm 3’ de bu algoritmayla ilgili detaylar verilmektedir.

2.4.9. Aday Gösterilmiş Bir Sınır Tenör Aralığı İçin Kazı Arını Şekillerinin Üretilmesi yöntemi (Generation of Stope Shapes for a Nominated Range of Cut-off Grades)

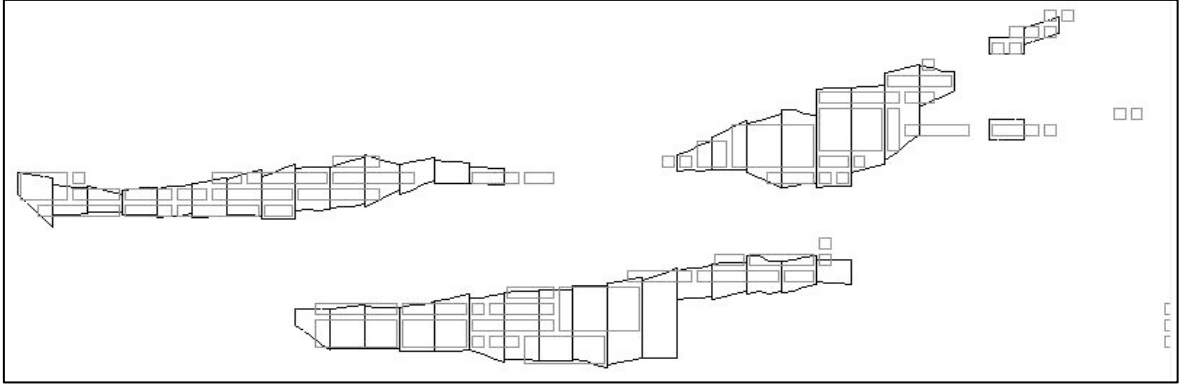
Alford ve Hall (2009) belirli bir sınır tenör aralığı için, kazı arını şekillerinin bir setini oluşturan bir yöntem sunmuşlardır. Yöntem yeraltı madenleri için, açık ocak madenlerinde kullanılan iç içe ocaklara eşdeğer, iç içe kazı arınlarını kullanmaktadır.

Yaklaşım birbirini takip eden üç ana basamaktan oluşmaktadır. İlk adımda, ekonomik bölgeleri tanımlamak için düzenli bir kılavuz üzerinde mineralizasyon örneklenir. Daha sonra, kazı arını şeklini yerel maksimuma ayarlamak amacıyla “kazı arını şekli tavlama” olarak adlandırılan bir teknik kullanılır. Teknik, kazı arınıni yaklaşık olarak şekillendiren küresel bir matematiksel optimizasyon sürecidir ve şekil parametrelendirme formülasyonu kullanır. Ayrıca nihai kazı arını şeklini, jeoloji kontrollerine ve mineralizasyona daha yakın modellemek için düzene sokar. Üçüncü adımda ise kazı arını şekillerinin birbirlerine olan konumlarını dikkate alarak kazı arını grupları oluşturur, ulaşılması zor veya boyut olarak işletilebilir olmayan kazı arınları hesaplamaz. Süreç en iyi kazı arını yüksekliği ve kazı yapılacak kat setlerini belirleyebilmektedir. Kazı arını optimizasyonu, iç içe kazı arınlarını oluşturmak için bir dizi sınır tenör değeri üzerinde çalıştırılır (Alford ve Hall, 2009).

Yöntem, Güney Avustralya’da bulunan OZ’ Minerals Prominent Hill altın ve bakır madenlerinde uygulanmıştır. Ticari güvenilirlikten dolayı, yalnızca yaklaşımın kullanılmasından elde edilen grafiksel çıktılar sonuçların bir göstergesi olarak sunulmuştur. Kazı arını şekli tavlama adımından sonra elde edilen kazı arın sonuçları Şekil 2.17’de enine kesitte, Şekil 2.18’de ise plan kesitinde gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Açık ocak sınırı altında kazı arını şekillerinin enine kesit görüntüsü (verilen düzlem için sınır tenör değeri üzerindeki bloklar) (Alford ve Hall’dan, 2009)



Şekil 2.18. Kazı arını şekillerinin plan görünümü (gösterilen düzlem için sınır tenör değeri üzerindeki bloklar) (Alford ve Hall'dan, 2009)

Sunulan bu yöntem otomatik bir tasarım prosedürü olarak görülebilir ancak tasarım aşamasında sınır tenöre ihtiyaç duymakta ve bu da optimum olma durumunu otomatik olarak ihlal etmektedir. Örneğin, bir kazı arını madencilik için tüm metal miktarı hedefini karşılayıp kârlı olabilirken sınır tenörü karşılayamayabilmektedir. Dahası sınır tenör uygulaması ekonomik olarak geçerli tasarımlar yapabilirken, bu tasarımlar pratik olmayabilmektedir. Ayrıca, Smith ve O'Rourke (2005) tarafından yapılan çalışma sınır tenör değerleri kullanılarak yapılan maden planlama ve tasarım optimizasyonlarının yatağın bir bölümü için yapılacağını ve bu bölümün işletme limitleri içinde yatağın en ekonomik kısmı olacağını ortaya koymuştur.

2.4.10. Sens ve Topal sezgisel yaklaşımı

Sens ve Topal (2009), üç boyutta kazı arını sınırları maksimum kârı verecek şekilde üreten ve kazı arınlarının seçimini kullanıcının tercih sırasına göre yapan bir algoritma geliştirmişlerdir. Yazarlar kazı arınlarının sınır ve tasarımlarının oluşturulma metodolojisini üç ana başlıkta ortaya koymuşlardır. Bunlar sırayla; blok dönüştürücü, kazı arını optimize aracı ve son olarak görselleştirme aracıdır. Bu bölümle ilgili detaylı bir çalışma Bölüm 3' de sunulmaktadır.

2.4.11. Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımı

Kazı arını tasarım problemini üç boyutta optimize etmek amacıyla Sandanayake vd. (2015 a, 2015 b) tarafından yenilikçi sezgisel bir algoritma sunulmuştur. Bu algoritma

fiziksel ve jeoteknik kısıtlamalar altında, kazı arını tasarımının ekonomik değerini en büyükleyen tek bir çözüm sunmaktadır. Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b)' nin geliştirdiği bu algoritma Bölüm 3' de detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

2.4.12. DATAMINE yazılımının MSO (Mineable Shape Optimisier) tasarım aracı

Bu bölüme kadar bahsedilen ve kesin ve sezgisel kategoriye dahil edilen tüm bu algoritmaların yanı sıra, bazı entegre madencilik yazılımları da kazı arını sınırlarının optimize edilebilmesi üzerine araçlar geliştirmeye başlamışlardır. Bunlara DATAMINE yazılımının henüz geliştirdiği MSO (Mineable Shape Optimisier) tasarım aracı önemli bir örnektir. Bu araç verilen geometri, jeolojik, jeoteknik ve tasarım sınırları içerisinde ekonomik kârı maksimize edecek kazı arını tasarımlarını otomatik olarak bulmaya çalışmaktadır (Walker, 2013). Bunun yanında cevher geometrisini dikkate alarak, işletilebilir maden şekillerini aramakta ve yeraltı maden tasarımları için kazı arınlarının optimal şekil, boyut ve konumlarını hesaplamaktadır (Datamine, 2016c). Bu bölümle ilgili detaylı bir anlatım Bölüm 3' de sunulmuştur.

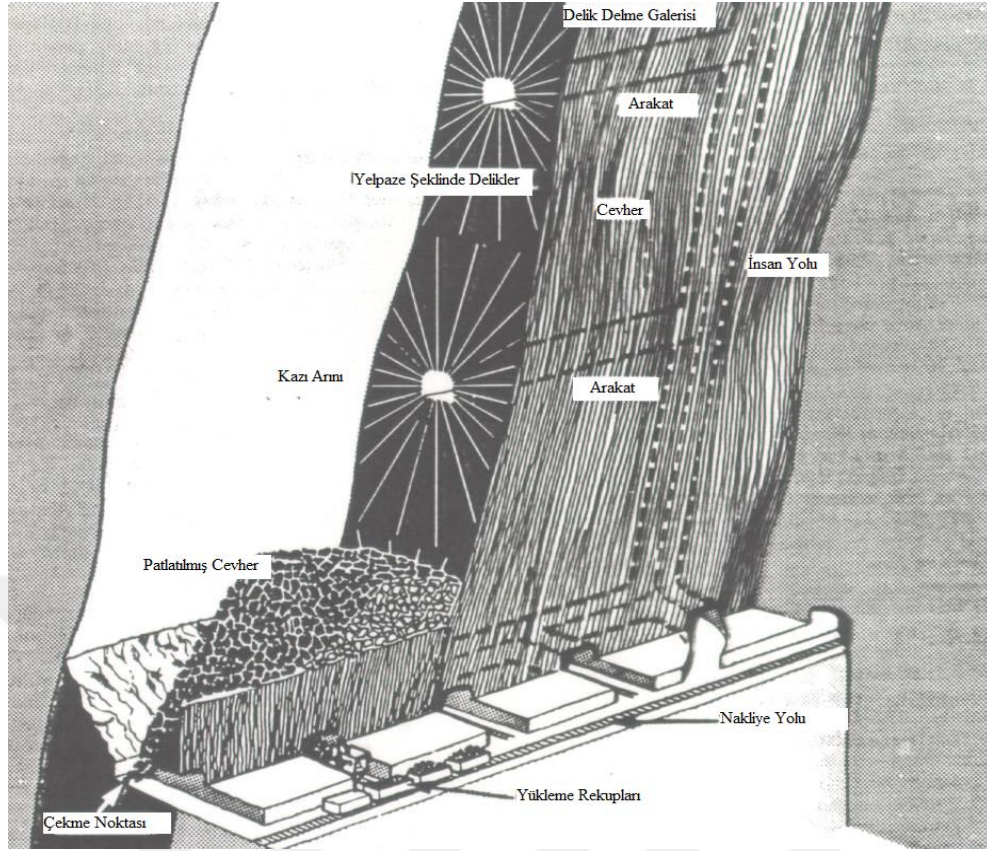
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Ara-Katlı Kazı Yöntemi (Sublevel Open Stoping)

Bu çalışma kapsamında ele alınan algoritmaların uygulanması ve karşılaştırılması için ara katlı kazı yöntemi (Sublevel Open Stoping) ile üretim yapmış bir maden işletmesinin verileri kullanılmıştır. Ara katlı kazı üretim yöntemi büyük masif veya damar şeklinde, sıkça dik eğimli, dayanımı yüksek yan kayaçla çevrelenmiş, dayanımlı cevher kütlerini çıkarmak için kullanılır (Villaescusa, 2014). Yöntem dünyada açık kazı yöntemi (open stoping), ara katlı kazı yöntemi (sublevel stoping) ve uzun delik ya da patlatma deliği kazı yöntemi (longhole or blasthole stoping) olarak tanınmaktadır.

Bu üretim yönteminde (Şekil 3.1) cevher, planlı bir şekilde hazırlanmış kazı arını açıklıkları vasıtasıyla kazanılmaktadır ve genellikle bu açıklıklar cevher alındıktan sonra doldurulmaktadır. Cevher kütlesi farklı kazı arınlarına bölünmekte ve kazı arınlarının arası tavanı kontrol etmek amacıyla topuk olarak bırakılabilmektedir. Kazı arını boyutlarının artırılması madencilik verimini büyük ölçüde etkiler, bu nedenle maden planlayıcılar kazı arını boyutlarında mümkün olan en büyük değerleri hedeflemektedir. Kaya kütlelerinin sağlamlığı, kazı arını ve topukların boyutlarının seçilmesinde hesaba katılması gereken sınırlayıcı bir faktördür (Hamrin, 2001). İyi kalitedeki kaya kütlelerinde kazı arınlarının boyutu görece olarak daha büyük olmaktadır. Ara katlı kazı yönteminin uygulanabilmesi için gereken koşullar aşağıda sıralanmıştır:

- Cevherin damar kalınlığının yeterli olması gerekir.
- Cevher damar kalınlığı yeterli olduğunda dalım açısının yeterince dik (en az 60°) olması gerekir.
- Hem tavan hem de taban taşında sağlam bir kayaç yapısı olmalıdır.
- Cevher ve yan taşı birbirini tamamlamalı, çatlak fay gibi yapısal bozukluklar olmamalıdır.
- Cevher sınırlarının düzenli ve cevher yapısının selektif bir cevher zenginleştirme yöntemine ihtiyaç duymuyor olması gerekir (Tatar ve Köse, 2011).



Şekil 3.1. Ara katlı Kazı Yönteminin Perspektif Görünüşü (Gertsch ve Bullock' dan, 1988)

Ara katlı kazı üretim yönteminde kaya parçalamadaki temel yöntem delme ve patlatmadır. Yöntem kazı arını sınırlarındaki düşük tenör, pasa veya dolgu malzemesinden dolayı çoğunlukla kazanılan cevherde seyrelmeye neden olur. Ayrıca kazı arını sınırlarındaki yeterli olmayan kayaç parçalanmaları da cevher kayıplarına neden olmaktadır. Bu sebeple, kazı arını sınırlarının belirlenmesi yöntem için ciddi öneme sahiptir.

Yöntemde ana galeriler arasında kalan cevherin içerisinde derin delik delme işlemleri (longhole drilling) için ara katlar oluşturulmaktadır. Ara katlarda delme ve patlatma düzeni oluşturulacağı için, bu katların konumları stratejik öneme sahiptir. Alt kazı arınlarının altından, kazanılmış olan cevherin YTB' ler ile güvenli bir şekilde nakliyesi için çekme noktaları hazırlanır. YTB sistemleri daha uzun ulaşım için kamyonlarla veya raylı sistemler ile birleştirilebilir. Çekme noktaları için farklı tasarımlar kullanılmaktadır. Genellikle oluk şekilli alt kazı arınlarına, belli aralıklarda açılmış yükleme galerileri ile ulaşılmaktadır. Kazı arınlarının altında yatay galeri setlerinin ve çekme noktalarının

geliştirilmesi geniş kapsamlı ve oldukça pahalı bir işlemdir. Aşağıda arakatlı kazı yönteminin temel ortak unsurları sıralanmıştır (Mathews, 1978 ve Villaescusa, 2014):

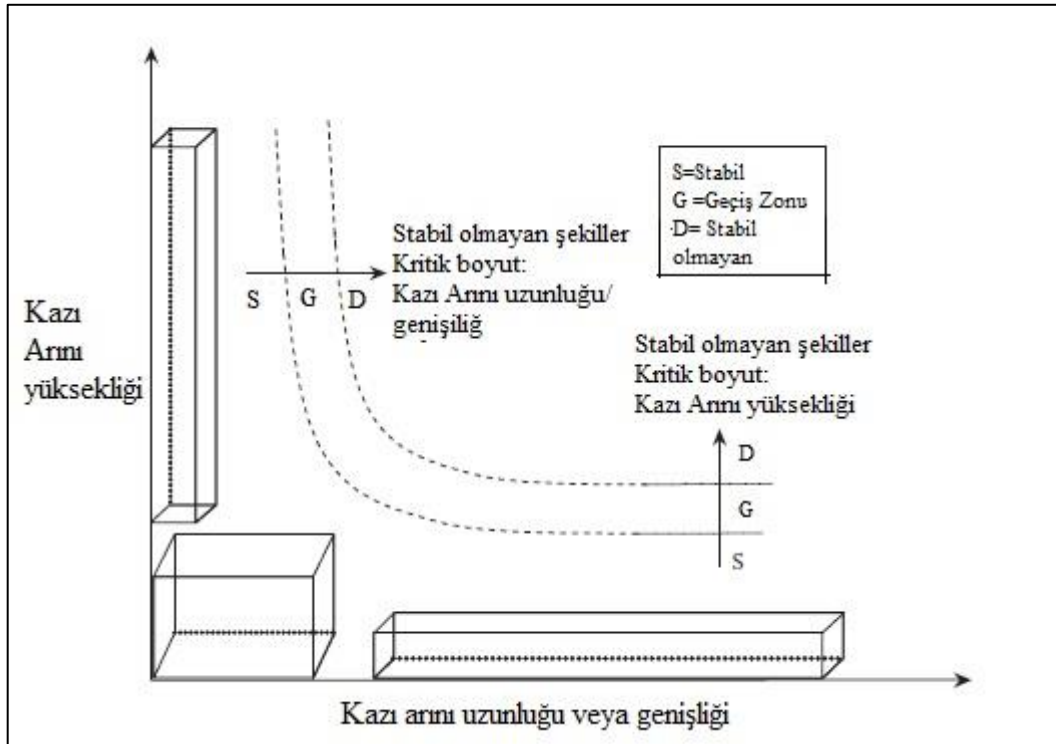
- Kazı arınları açıktır ve göçertme olmaksızın çıkartılır.
- Kazı arınları bir ara kattan diğer bir ara kata uzanır ve işlemler yalnızca bu katlar arasında sürdürülür.
- Patlatılmış kayaç yalnızca yerçekimi ile kazı arını çekme noktalarına doğru hareket eder.
- Yöntem kayaçları parçalamak için uzun patlatma delikleri kullanarak etkin bir parçalanma sağlar.
- Delikler yukarı ya da aşağı yönlü olabilir.
- Başlangıç yarığı (slot) kazı arının kenarında, merkezinde ya da altında olabilir.

Ara katlı kazı arını yönteminde, bu temel unsurların ortak olduğu, boylamasına (longitudinal) ve enlemesine (transverse) olmak üzere iki farklı kazı arını yapısı mümkündür. Boylamasına kazı yöntemi daha dar, genellikle 15 m'den az, dik eğimli cevher kütleleri için kullanılır. Burada kazı arınları cevher kütlelerinin doğrultusuna paralel olarak tasarlanır. Daha kalın cevher kütlelerinde, kazı arınları cevher kütlelerinin doğrultusuna dik (enlemesine) uyumlandırılır ve birincil kazı arınları arasına topuk bırakılır. Bu tez kapsamında incelenen madende, boylamasına kazı arını yapısı bulunmaktadır.

Yöntemin dünyada geniş bir kullanımı vardır ve düşük maliyetli ve verimli bir üretim sağlamasını da içeren birçok avantaj sunmaktadır. Avantajlardan biri; işçiler kazı boşluğunda çalışmadıkları için yöntemin oldukça emniyetli olmasıdır. Bunun yanı sıra, yöntemde kazı ve yükleme işlerini mekanize etmek oldukça kolaydır. Tahkimat yapılmadığı için malzeme sarfiyatı da azdır. Dahası, kazı ve yükleme işleri farklı yerlerde yapıldığından bu iki süreç birbirini etkilemez. Bunların yanında, yöntemin üretim başlamadan önce önemli oranlarda hazırlık gerektirmesi bunun da yüksek yatırım maliyetine neden olması onun için bir dezavantajdır. Ancak hazırlık işlerin büyük bir kısmı cevherin içerisinde yapılmaktadır. Bunlara ek olarak; yöntemde kazı arınları düzenli sınırlar ile tasarlanmalıdır, iç bir pasa cebi patlatılacak cevherden ayrılamayacağı için yöntem bu noktada da dezavantajlıdır.

3.2. Jeotekniksel Kazı Arını Tasarımı

Bu tez kapsamında incelenen madenin klasik yöntemlerle yapılan kazı arını tasarımında, jeotekniksel yöntemden yararlanılmıştır. Bu yöntemde ara katlı kazı teknikleri, kazı arını yüzeylerinin tahkimatsız ve açık olması özelliğiyle karakterize edilmektedir. Kazı arınlarına ulaşım sadece ara katlardaki cevher galerileri ile sınırlı olduğundan, açıkta kalan yüzeyleri desteklemek de sadece sınırlı bir olasılık ile mümkündür. Buradan eğer kazı arını yüzeyleri doğal olarak stabil değilse yöntemin başarılı bir şekilde uygulanamayacağı anlamı çıkarılmıştır (Bootsma, 2013). Villaescusa (2014) tarafından bu bağlamda çeşitli araştırmalar ortaya konmuştur. Araştırmalar genellikle minimum seyrelmeler ile kazı arını yüzeylerinin stabilitesinin düşey de yüksek ve yatayda kısa veya yatayda uzun ve düşeyde kısa boyutlarda oluşturulacak açıklıklar ile sağlanabileceğini göstermiştir. Yatayda uzun boyutlara örnek olarak stabil uzun bir tünelde, stabletenin düşey yönde izin verdiği ölçüde sağlanabileceği ve yüksekliğin stabilite bozulana kadar artırılabilmesi verilebilir. Kare şekilli kazı arınların potansiyel stabil hacimler açısından en etkisiz olduğu görülmüştür. Şekil 3.2’ de bu anlatım hiperbolik bir grafikte gösterilmektedir (Villaescusa, 2014).



Şekil 3.2. Stabil kazı arını şekilleri (Villaescusa'dan, 2014)

Ekonomik göstergeler dikkate alındığında, her bir kazı arınının hazırlığı ciddi maliyetler taşıdığından, sayıca az ve büyük kazı arınları oluşturmak konusunda madencilik camiasında önemli bir yönelim vardır. Ancak burada maksimum kritik stabil kazı arını boyutlarının aşılması çok daha büyük zararlar doğurabilir. Kazı arınları etrafında oluşacak duraysızlık ekstra iyileştirici maliyetler gerektirebilir, üretimi geciktirebilir, cevher kaybına ve maden makinesi daha da önemlisi insan kaybına neden olabilir. Bunlar düşünüldüğünde stabil kazı arınlarını tasarlamak için çeşitli yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur (Potvin, 1988).

Duraylılık grafiği yöntemi bu anlamada kazı arınlarını tasarlamak için geliştirilen deneysel bir yöntemdir. Yöntem kazı arınlarının stabilitesini etkileyecek ana faktörleri ortaya koymayı ve niceliğini açıklamayı amaçlamaktadır. Mathews vd. (1978) tarafından sunulan bu yöntem daha sonra Potvin (1988), Bawden vd. (1988, 1989), Nickson (1992) tarafından uygulanıp geliştirilmiş ve dünyaca kabul gören bir tasarım aracı haline gelmiştir. Yöntem, geleneksel kaya sınıflandırılma ilkelerini takip edip, kazı arını tasarımını etkileyecek en önemli faktörleri dikkate almaktadır.

Duraylılık grafiği yöntemi kaya kütlelerinin özelliklerinin ve tünel tahkimat gereksinimlerinin belirlenmesi için Barton tarafından (1974) ortaya konan tünelcilik niteliği indeksi Q 'yu kullanmaktadır. Bu indeksin hesabı eşitlik (3.1)'deki gibi gösterilmektedir. Burada RQD kaya niteliği belirteci, J_n süreksizlik takımı sayısı, J_r süreksizlik pürüzlülük sayısı, J_a süreksizlik ayrışma sayısı, J_w süreksizlik su indirgeme değişken faktörünü ve SRF gerilme indirgeme kat sayısını göstermektedir (Karpuz ve Hindistan, 2008). Özetle tünelcilik niteliği belirteci Q üç faktöre bağlıdır (3.1):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Q bağıntısında kaya kütlesi yapısını temsil eden birinci bölüm (RQD/J_n) blok veya parça büyüklüğünün kaba ölçüsüdür. İkinci bölüm (J_r / J_a) süreksizlik duvarlarının pürüzlülük ve sürtünme özelliklerini temsil etmektedir. Bu bölüm pürüzlü, bozulmamış kapalı süreksizlik üzerine dayandırılmıştır. Süreksizlik yüzeyleri ince kil mineral sıvıları ve dolgularıyla kaplandığında dayanım oldukça azalacaktır. Bununla birlikte küçük

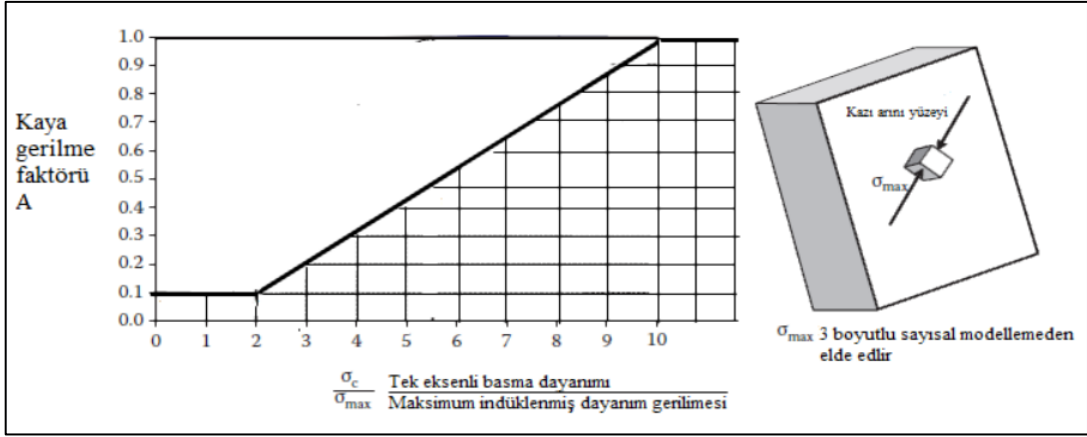
makaslama yer değiştirmeleri meydana geldiğinde oluşacak kaya duvar teması kazının stabilizemesini artıracaktır, hiğbir şekilde eklem yzeylerinin teması olmadığı durumda (açık eklemler) stabilize bozulabilir. Son bolum (J_w/SRF) iki farklı gerilme parametresinden oluşan ve aktif gerilmeyi ifade eden karmaşık bir ampirik faktördür.

Mathews (1978) modifiye edilmiş tünelcilik niteliği indeksini (Q') orijinal Q sisteminden yararlanarak denklem (3.2)'deki gibi yeniden tanımlanmıştır. Orijinal sistemden, toplam gerilme değişkeni (SRF) için orta derecede gerilim ve su azaltma faktörü (J_w) için kuru kaya kütlesi şartlarını kabul ederek bu parametrelere 1.0. değerini verip sistemden çıkarmıştır. Yöntem daha sonra duraylılık sayısını (N') hesaplamak üzere gerilim faktörünü, süreksizlik yönelim faktörünü ve yüzey tasarım yönelim faktörlerini hesaba katarak geliştirilmiştir. Duraylılık sayısı verilen gerilme koşulları altında kaya kütlesinin dayanabilme yeteneğini gösterir ve ęalıřılan bir kazı ağıklığının yüzeyinin hidrolik yarığapına (yüzey alanı/ęevre) karşı ęizdirilip ağıklığın duraylılığı hakkında yorum yapılabilir. Her kazı arını yüzeyi için, duraylılık sayısı (N') denklem (3.3)'deki gibi modifiye edilmiş tünelcilik niteliği indeksinin sırayla A , B ve C faktörleriyle ęarpılarak hesaplanır. Burada yer alan A , B ve C faktörleri ilerleyen bölümde anlatılmıştır.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (3.2)$$

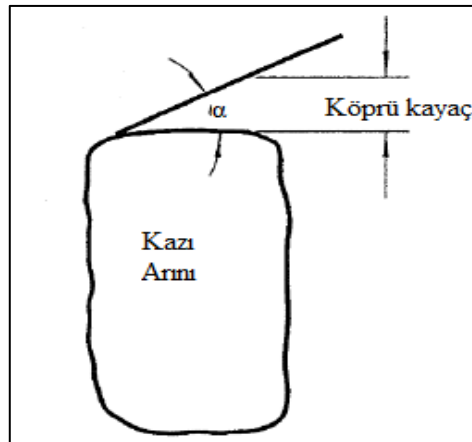
$$N' = Q' \times A \times B \times C \quad (3.3)$$

Faktör A: Kaya gerilim faktörü A , başlangığta orijinal Q sistemindeki (Barton, 1974) SRF yani gerilme indirgeme kat sayısıyla yer değiştirmek için tasarlanmıştır. SRF' e benzer bir şekilde, bu faktör de sağlam kaya geriliminin indüklenmiş madencilik basınę gerilmesine bölünmesi ile bulunur. Burada kazı arını yüzeyinin merkezinde olduğu düşünölen maksimum indüklenmiş yüzey gerilimi belirlenir. Kayaç için tek eksenli basma dayanımı elde edilir ve şekil 3.3' de gösterilen grafik yardımıyla A faktörü bulunur.

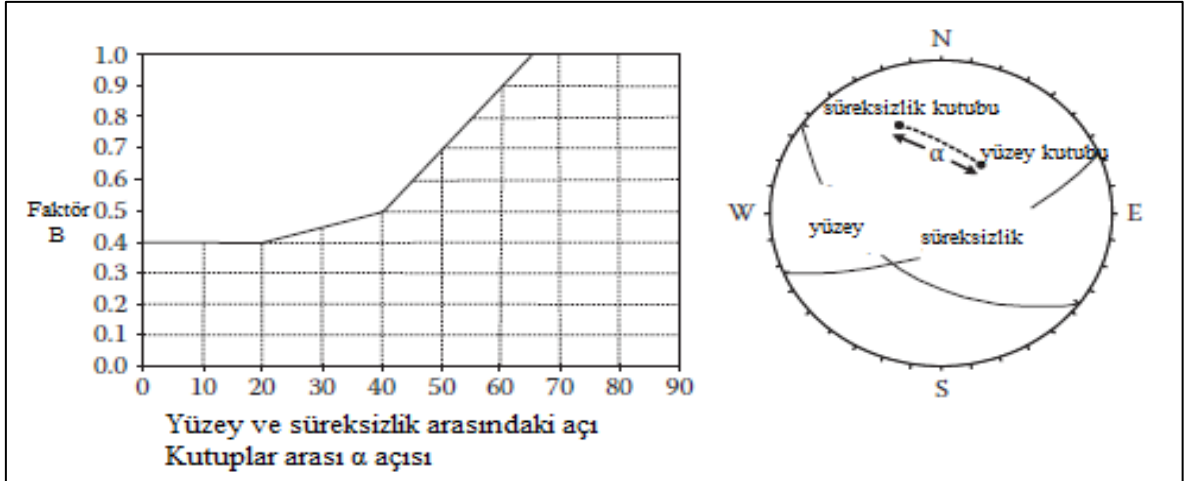


Şekil 3.3. Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde kaya gerilme faktörü A (Potvin'den, 1988)

Faktör B: Süreksizlik yönelim faktörü B, her kazı arını yüzeyinin stabilitesini muhtemelen azaltacağı düşünülen süreksizlik setlerin yönelimini temel alan bir ağırlıklandırma faktörüdür. Kontrollü yapısal yenilmelerin çoğu, serbest yüzeye sığ açılarla oluşan kritik süreksizlikler boyunca meydana gelmektedir. Süreksizlik ile yüzey arasındaki açı sığlaştıkça, bozulmamış köprü kayacın patlatma, stres ya da bir başka bağlantı seti ile parçalanması daha kolay olacaktır (Şekil 3.4). Aradaki açı (α) sıfıra yaklaştıkça, eklemlili kaya blokları bir kiriş gibi hareket ettiği için hafif bir mukavemet artışı oluşacaktır. Kazı açıklığı yüzeyinin stabilitesi üzerinde kritik süreksizliklerin etkisi eğer doğrultu serbest yüzeye paralel ise en yüksek, tabakalar birbirine dik açıyla konumlanıyorsa en düşüktür (Hoek vd.,1993). Şekil 3.5.a'da faktör B için geliştirilen grafik ve Şekil 3.5.b'de bu faktör için çeşitli örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Açık kazı arını yüzeyine göre kritik süreksizlik yönü (Potvin 1988).



a

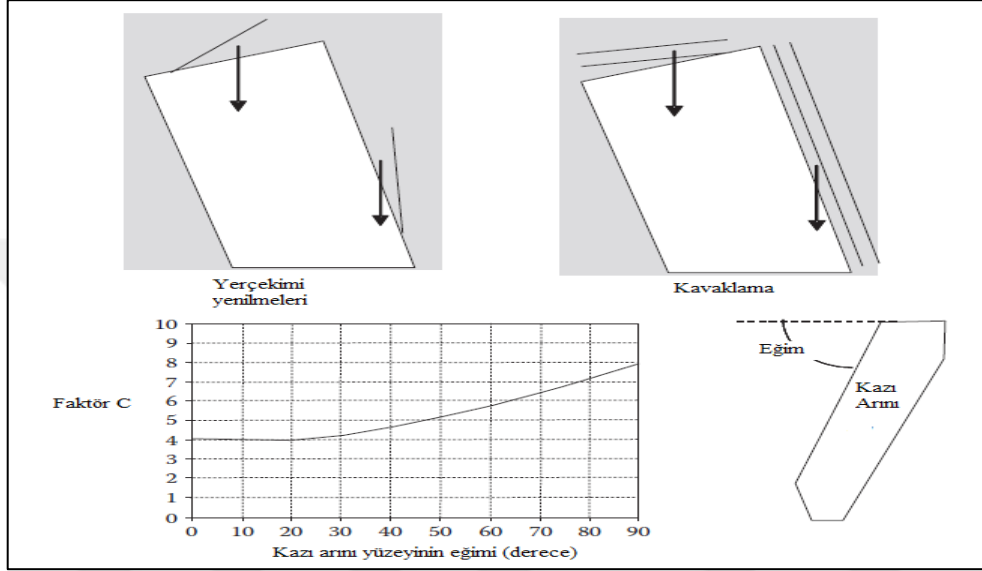
Yatay Sırt	Eğimli Yüzey	Düştür Yüzey	Yüzey ve Süreksizlik arasında ki açı	Potvin Faktörü B
			$\alpha = 90^\circ$	1.0
			$\alpha = 60^\circ$	0.8
			$\alpha = 45^\circ$	0.5
			$\alpha = 30^\circ$	0.2
			$\alpha = 0^\circ$	0.3

b

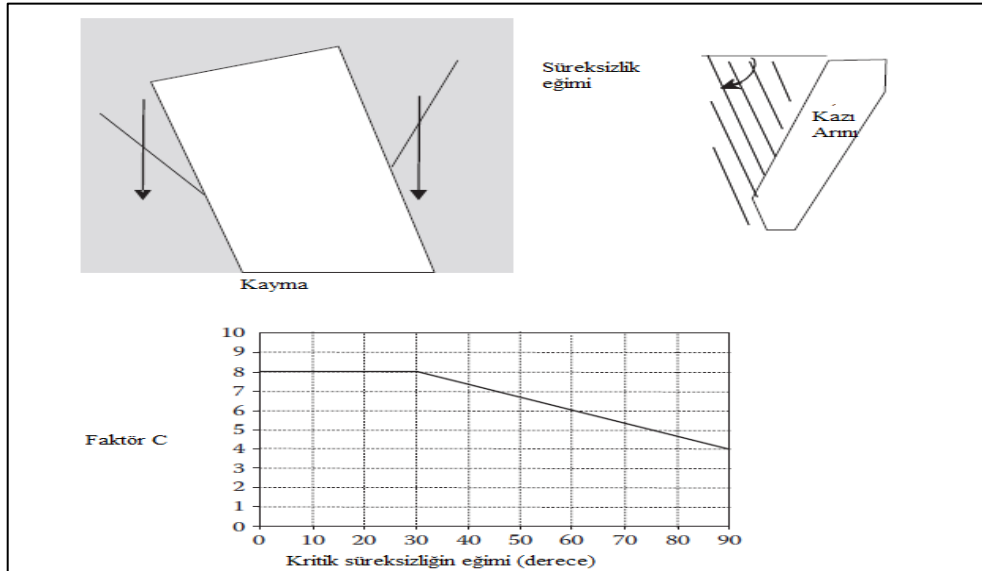
Şekil 3.5. Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde süreksizlik yönelim faktörü B (Potvin'den 1988), b)Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde süreksizlik yönelim faktörü B için çeşitli örnekler (Potvin'den, 1988).

Faktör C: Yüzey tasarım yönelim faktörü C, kazı arını yüzeyinin stabilitesi üzerinde yer çekiminin etkisini hesaba katmak için geliştirilmiştir. Yenilme tavandan yerçekimi kaynaklı olarak veya kazı arını yüzeylerinin kayma veya kavlaklanmasıyla

meydana gelebilmektedir. Potvin (1988) hem yerçekimi hem de kavlaklama yenilmelerinin kazı arını yüzeyinin eğim açısına bağlı olabileceğini söylemiştir. Faktör C burada düşey yüzeylerle maksimum 8 ve yatay kazı arını tavanlarıyla minimum 4 değerini alabilir (Şekil 3.6.a). Kayma yenilmeleri ise kritik süreksizlerin eğim açısına bağlı olarak Şekil 3.6.b’ de gösterildiği gibi değişmektedir.



a



b

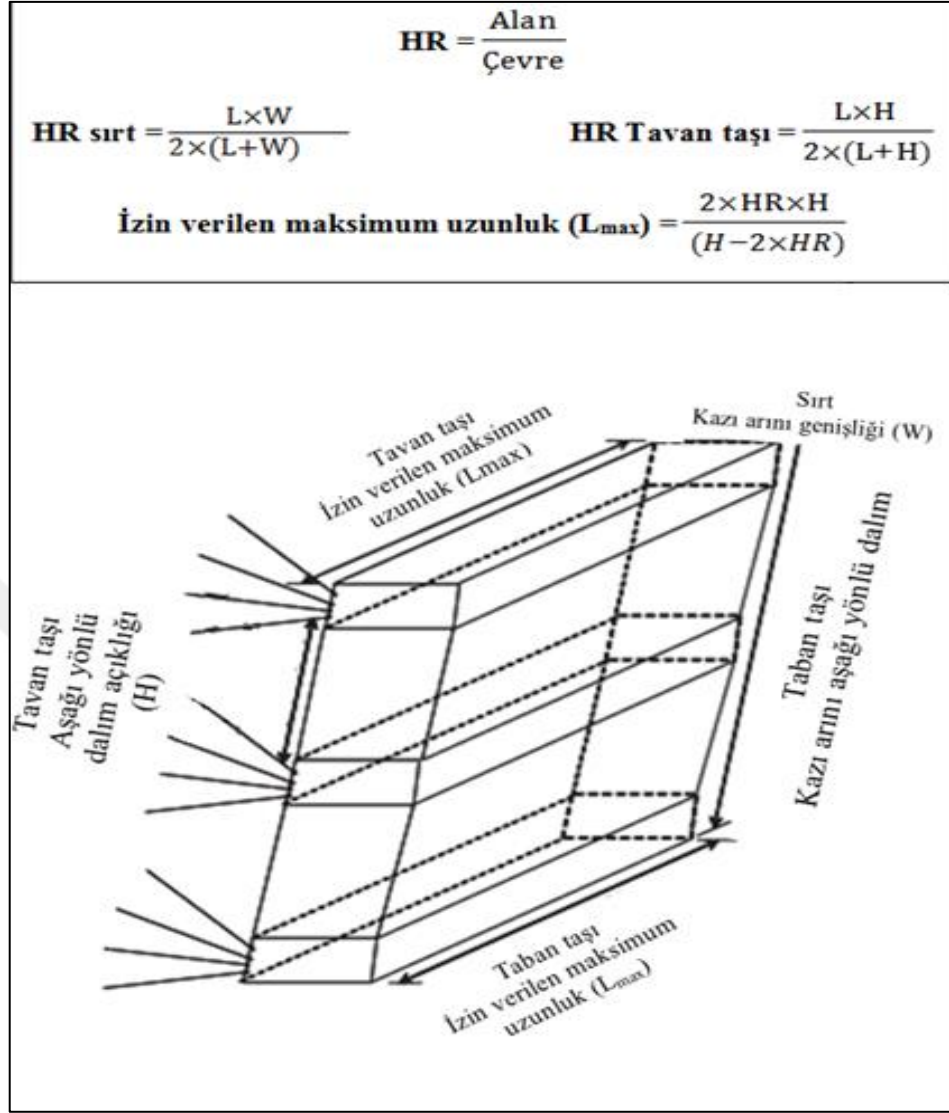
Şekil 3.6. Modifiye edilmiş duraylılık grafiği yönteminde a) yerçekimi kaynaklı ve kavlaklama nedenli b) kayma nedenli potansiyel yenilme faktörleri (Potvin'den, 1988).

Hidrolik yarıçap: Duraylılık grafiği yönteminde yukarıda bahsedilen girdi parametrelerinin yanında hidrolik yarıçap tanımına da ihtiyaç bulunmaktadır. Hidrolik yarıçap Laubscher ve Taylor (1976) tarafından kazı arını yüzeylerinin şekil ve boyutunu karakterize etmek üzerine tanımlanmıştır ve analiz edilen kazı arını yüzeyinin kesit alanın bu yüzeyin çevresine olan oranını ifade eder. Çoğu kazı arını şekli çok karmaşık olmadığından hidrolik yarıçapı değerlendirmek de kolaydır. Bu yöntem kazı arınılarının yüzeyden yüzeye analiz edilmesine izin verir. Hidrolik yarıçap ve kazı alanı genişliği arasındaki ilişki (sabit bir kazı yüksekliğinde) genellikle ara kat aralığında ve (3.4) ve (3.5)' deki bağıntılarda ki gibi tanımlanır (Villaescusa, 2014). Burada HR , hidrolik yarıçapı ve H ve L sırayla kazı arını yüzeyinin yükseklik ve uzunluğunu ifade eder.

$$HR = \frac{(H)(L)}{2(H+L)} \quad (3.4)$$

$$L = \frac{2(H)(L)}{H - 2(HR)} \quad (3.5)$$

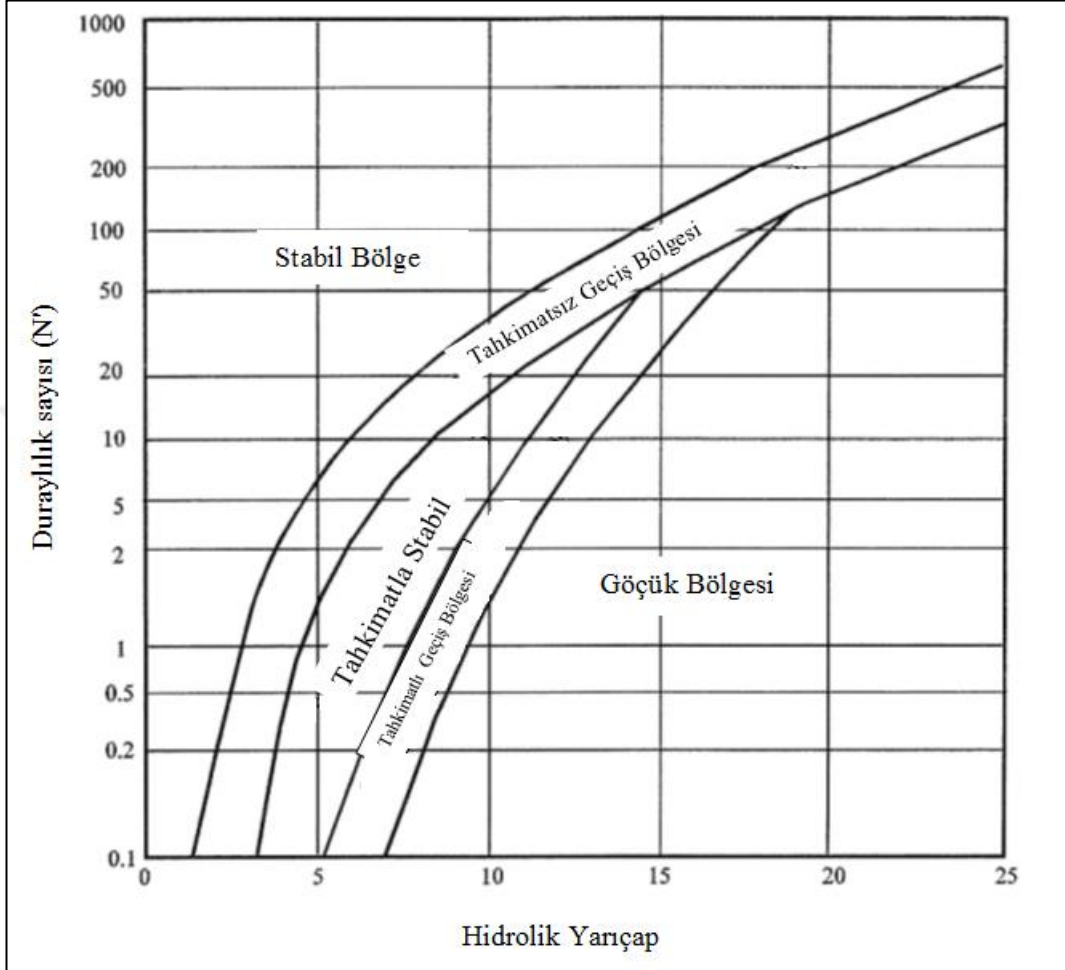
Tahkimatsız izin verilebilir maksimum uzunluğun belirlenmesi için öncelikle açıklığın genişliği ve yüksekliğinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu da düşey yüzeylerde, incelenen kazı arını için genellikle tabandan tabana olan boyutlarla ilişkilidir. Örneğin Şekil 3.7'de bir taban taşına ait görsel sunulmaktadır (Villaescusa, 2014). Burada aşağı yönlü dalım açıklığı (H) sabitlenmiştir çünkü bu değer seçilen ara kat aralığına göre belirlenmektedir. Kazı arını sırtları ve bitiş yüzeyleri için, genişlik genellikle cevher veya kazı arını genişliğiyle kontrol edilir. Dar damarlar için genellikle kazı arınları cevher genişliğinden daha fazla olmayacak şekilde ayarlanır. Tavan taşı için her ara kat aralığında kablolu cıvata ile güçlendirme yapıldığından, sabit boyut kablolu cıvatalar arasındaki kazı arını aşağı yönlü dalım açıklığı (H)' dır. Dik cevher kütleleri için bu boyut yaklaşık olarak kat aralığına eşittir.



Şekil 3.7. Sabit ve izin verilen kazı arını boyutları (Villaescusa' den, 2014).

Belirli bir kazı arını yüzeyi için duraylılık sayısının (N') hesabı, jeoteknik parametrelere açıklık getiren değişkenlerin çarpılmasıyla (3.3) elde edilir. Daha sonra duraylılık sayısı (N') ve hidrolik yarıçap (HR) kullanılarak bir kazı arının stabilitesi Şekil 3.8' deki grafikten tahmin edilir. Bu grafik birçok Kanada madeninin gözlenen kazı arını performanslarını yansıtmaktadır ve Potvin (1988) tarafından analiz edildikten sonra Nickson (1992) tarafından da güncellenmiştir. Nickson (1992) tarafından geliştirilen istatistiksel sınır, özel bir duraylılık sayısı ile maksimum izin verilen kazı arını stabilitesini tahmin etmede kullanılabilir. Örneğin duraylılık sayısının 9 hesaplandığı bir durumda hidrolik yarıçapın 10 olması kazı arını açıklık tasarımının ilk tahmini için tavsiye edilecektir. Özetle, grafikte çizildiği yere bağlı olarak kazı arını

şeklinin stabil (stabil bölge), duraysız (göçük bölgesi) veya potansiyel olarak tahkimatlı olması hakkında tahminde bulunabilmektedir.

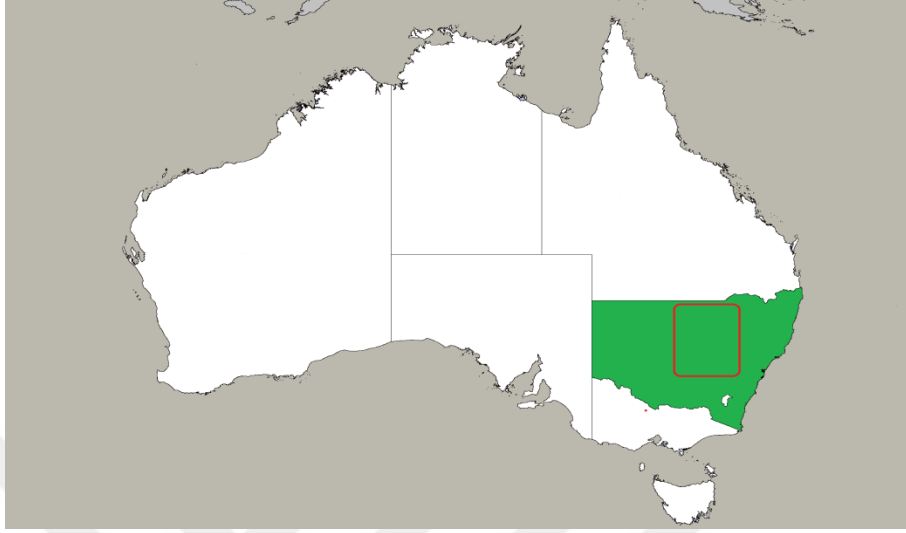


Şekil 3.8. Stabil, göçük ve tahkimat gerektiren bölgeleri gösteren duraylılık grafiği [Potvin (1988) ve Nickson'dan (1992)].

3.3. İncelenen Madenin Tanıtılması

Bu çalışmada kullanılmak üzere incelenen maden Avustralya' da, yaklaşık olarak Yeni Güney Galler bölgesinin merkezine yakın bir konumdadır. Halen üretimine devam edilen madenin bu konumu Şekil 3.9' daki haritada gösterilmektedir. İncelenen madenin projesinin başlatılması, yine bu bölgedeki yüksek tenörlü bakır yatağının üretimi esnasında altın-kurşun-çinko cevherleşmesinin keşfedilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan fizibilite çalışmalarından sonra finansal ve teknik açıdan bu yatağın yeraltı üretim yöntemleriyle çıkarılmasına karar verilmiştir. Üretim planlamaları yapılırken aynı zamanda bir cevher

hazırlama tesisinin, altın ve gümüş barları ve yığın-kurşun-çinko konsantresini satışa sunmak üzere kurulması planlanmıştır.



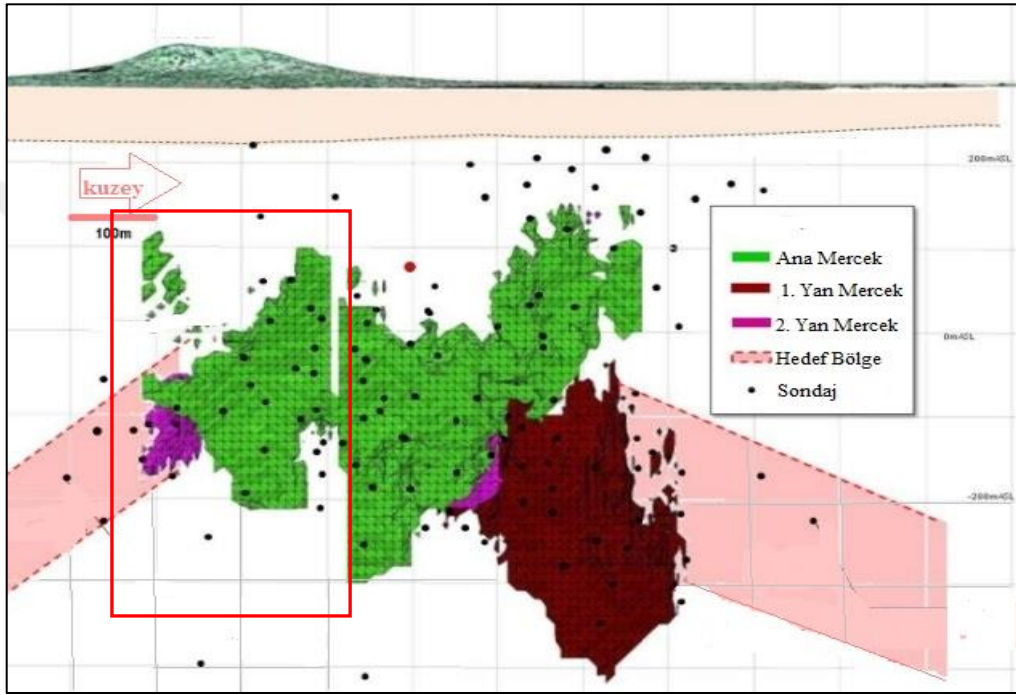
Şekil 3.9. Tez kapsamında incelenen maden projesinin konumu

3.3.1. Madenin jeoteknik özellikleri

İncelen maden, ekonomik cevherin yüzeyin 150 m aşağısından başlayarak 600 m derinliğe kadar tanımladığı oldukça derinde bulunan yataktır. Cevher mercekleri, neredeyse dikey ve 2 m ile 10 m aralığında, tenör dağılımına göre değişiklik gösteren genişliklere sahiptir. Yatağın cevher merceklerine ait izdüşümü görüntüsü Şekil 3.10’ da verilmiştir. Bu madene ait projeyi yürüten şirket, ticari gizlilik politikalarından dolayı cevhere ait tüm bilgileri vermekten ziyade, yalnızca Şekil 3.10’ da kırmızı kutu ile işaretlenen kısmın verilerini bu tez kapsamında kullanılmak üzere tarafımıza sağlamıştır.

Cevherin bahsedilen şekli, üretim yönteminin Ara-Katlı Kazı olmasını gerektirmiştir. Yöntemin birçok değişik alt yöntemi bulunuyor olsa da, bu maden planında düşük tenörlü bölgeler yukarıdan aşağıya ve yüksek tenörlü bölgeler aşağıdan yukarıya olacak şekilde üretilmiştir. Böyle bir üretim şeklinin bu madende gerçekleştiriliyor olmasını, projeyi gerçekleştiren şirket şöyle açıklamıştır (Şirket ticari gizlilik politikasından dolayı isminin yayınlanmasını istememiştir):

- Bu tarz bir üretim yöntemi ile hazırlık işlemleri ve cevher hazırlama işlemleri arasındaki zaman farkının en küçüklenmesi amaçlanmıştır.
- Yüksek tenörlü veya yüksek değerli cevherin kazanımı en büyüklenmeye çalışılmıştır.
- Son olarak, maden üretim verimliliğinin jeoteknik kısıtlar içerisinde optimize edilmesi istenmiştir.

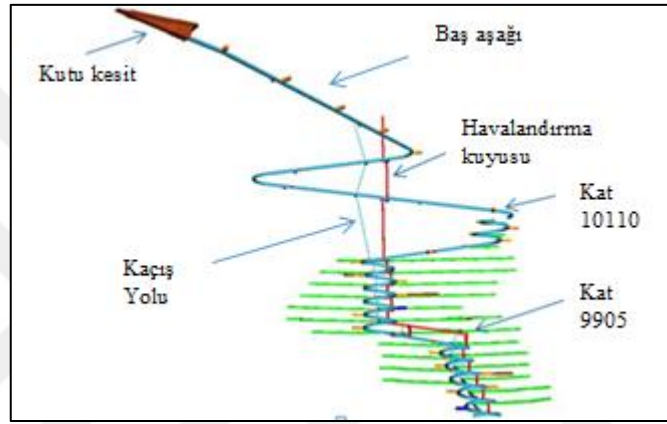


Şekil 3.10. Yatağın cevher kaynaklarının ana hattını ve farklı noktalarda ki sondajlarını gösteren izdüşümü görüntüsü.

3.3.2. Madenin hazırlık işlemleri

Bu tez kapsamında, madenin hazırlık işlemleri yapılan optimizasyon çalışmalarının herhangi bir adımına dahil edilmemiştir. Ancak madeni ve madenin üretim şeklini daha iyi anlamak adına bu başlık altında kısaca madenin hazırlık çalışmalarına değinilmiştir. Hazırlık işlemleri, Avustralya yeraltı metalik madenlerinde genellikle kullanılan, geleneksel ve çok iyi anlaşılmış delme patlatma kazı işlemlerine dayanmaktadır. Yeraltı üretim hazırlıklarına başlamak için öncelikle bir kutu kesit (boxcut) açılmıştır. Bu kesit, delme patlatma işlemlerine başlamak için gereken sağlam yüzeyi sağlamakta ve zemin sağlamlaştırma gerekliliklerini en küçüklemektedir.

Bir başaşağı daha sonra ilk kazı arını katına gelinceye kadar olabildiğince düz bir şekilde, hazırlık hızlarına ve madenden taşıma işlemlerine yardım etmek amacıyla, tasarlanmıştır ve Şekil 3.11’de de görüldüğü üzere 10110 katından sonra bu başaşağı spiral şeklinde yapılandırılmıştır. Burada her kat için baş aşağıının yakın kenarının katlardan gelen geçitlere en kısa mesafede olması amaçlanmıştır. Yine 9905 katından sonra cevher kütlelerinin şekli baş aşağıının sağa hareket ettirilmesini gerektirmiştir ve bu geçişten sonra başaşağı tekrar spiral şeklinde tasarlanmıştır. Şekil 3.11’ de bu tasarımların özet bir görüntüsünü sunulmaktadır.



Şekil 3.11. Maden tasarımının hazırlık işlemlerini gösteren 3 boyutlu görünümü

3.3.3. Madenin kazı arını tasarımı

İncelenen madende, cevher kütlesi boyunca jeoteknik özellikler ve tenör değerleri gibi birçok parametre değişmektedir. Bununla paralel olarak kazı arını tasarımlarında uygulanan kısıtlar değişmiş ve sonuç olarak çok sayıda değişken özellikte kazı arınları oluşturulmuştur. Tüm maden boyunca genel olarak, açık kazı arınlarının uzantısı dolgunsuz halde düşeyde yaklaşık 100 m ile sınırlamak istenmiştir. Bu yüzden cevher kütlesi her mercede çimento dolgu topuk kullanılarak farklı bölgelere ayrılmıştır. Bunun yanında, çimento dolgu malzemesi yüksek tenörlü bölgeler alındıktan sonra, topuğa gerek kalmaksızın art arda bir üretim şekli için bu bölgelerle yer değiştirmiştir. Ayrıca düşük tenörlü bölgelerde bazı cevher içeren kazı arınları stabiliteyi artırmak için topuk olarak bırakılmıştır.

Bölüm 3.2’ de açıklanan seçim ölçütlerine ve planlama mühendislerinin tecrübelerine dayanarak kazı arını boyutları belirlenmiştir. Burada, ara katlar delik delme makinalarının delici uzunluğu ile sınırlandırılıp 25 m aralıklarla oluşturmuşlardır. Kazı arınlarının yüksekliğinin yanı sıra, bu arınların uzunluğu hidrolik çap ile sınırlandırılmıştır. Cevher kütlelerinin tamamında kazı arınlarının boyutları bulundukları bölgelere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu tez kapsamında verileri paylaşılan bölgeye ait kazı arını boyutları Çizelge 3.1’ de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Tez Kapsamında kullanılan bölgeye ait kazı arını boyutlarının bilgileri

Parametre	Birim	Değer
Kazı Arını Yüksekliği (Z)	m	25
Kazı Arını Boyu (Y)	m	20
Kazı Arını Genişliği (X)	m	6
Topuk Kalınlığı	-	1:1

Bu bilgilere ek olarak kazı arını şekillerinin tasarımı esnasında önemli bir parametre olan ortalama seyrelme miktarı, incelenen maden için kazı arını şekillerinde %13 olarak modellenmiştir. Bu miktar yan kayacın yapısı dayanımlı/sağlam kabul edilerek ve tüm kazı arınlarının halat türü kaya saplama ile desteklendiği bilgisine dayanarak makul kabul edilmiştir. Seyrelme miktarının yanı sıra, kazı arını tasarımlarında değişen kazı koşullarına göre bir kazanım oranının da modellenmesi gerekmektedir. Kazanım oranı, bu çalışmada tasarım kısıtları ve çalışanların deneysel tecrübelerinden yola çıkılarak %77 olarak şirket tarafından modellenmiştir.

3.3.4. Madenin blok modeli

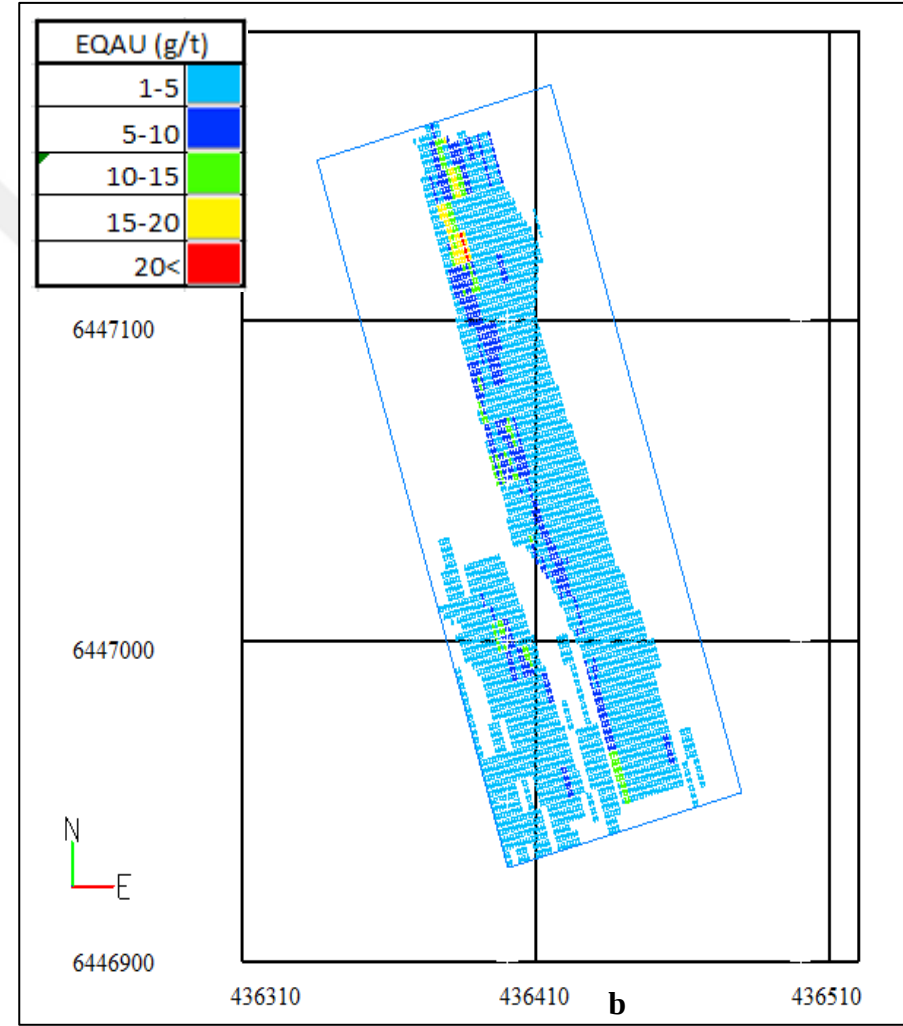
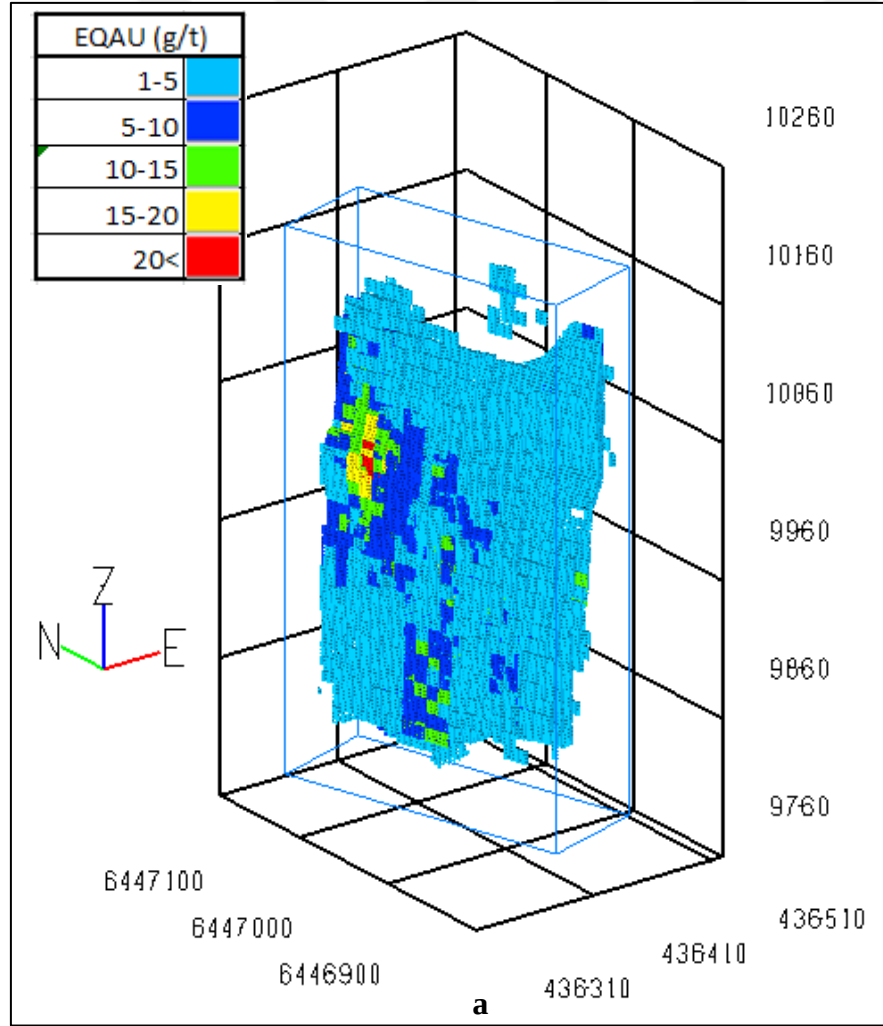
Şirket bu çalışma kapsamında izin verilen bölge sınırlarında, kendi çalışanlarının hesapladığı jeolojik bir blok model sunmuştur. Üç boyutlu bu modelde her bir bloğa jeolojik karakteristikler, metalürjik özellikler ve jeomekanik parametreler atamıştır. Blokların tamamı aynı boyutta olmak üzere oldukça küçük ($1 \times 2,5 \times 2,5$ m) tutulmuştur. Blok boylarının küçük tutulmasındaki amaç, sonraki yapılacak işlemlerin doğruluğunu artırmaktır.

Jeolojik blok modelde en önemli parametreler öncelikle metallerin tenör değerleridir. Burada cevher yatağı altın, gümüş, çinko ve kurşun içeren çok metalli bir yatak olduğundan, her blok ayrı ayrı tüm metallerin tenör değerlerini ve özgül ağırlıklarını içermektedir. Çizelge 3.2’ de jeolojik blok modele ait önemli parametreler özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Jeolojik blok modele ait özet bilgiler

Parametre	Birim	Değer
Blok sayısı	-	1 214 124
X yönünde blok boyutu	m	1
Y yönünde blok boyutu	m	2,5
Z yönünde blok boyutu	m	2,5
Altın tenör değişimi	ppm	0 dan 22,06 ya kadar
Gümüş tenör değişimi	ppm	0 dan 115,2 ye kadar
Kurşun tenör değişimi	g/t	0 dan 14,73 e kadar
Çinko tenör değişimi	g/t	0 dan 23,19 a kadar
Öz kütle değişimi	ton/m ³	2,5 ten 3,73 e kadar

Yeraltı madenlerinin optimizasyonları üzerine şimdiye kadar geliştirilen çalışmaların çoğu, yatağı oluşturan her cevherin tenör değerinden ziyade halen seçilen tek bir tenör değeri üzerinde çalışmalarını yürütebilmektedir. Bu yüzden bu çalışma kapsamında her blok için dört farklı metal tenör değerinin tek bir tenör değeriyle ifade edildiği eş değer tenörlere ihtiyaç duyulmuştur. Eşdeğer tenör hesabında birincil metal altın olduğundan, Çizelge 3.2’ de yer alan metal tenörleri ve Çizelge 3.3’de yer alan metal satış fiyatları ve kazanım oranları kullanılarak altın eşdeğer tenörleri Bölüm 2.1.3 deki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonunda, EQAU ile ifade edilen altın eşdeğer tenörü 0 g/t ve 30,46 g/t aralığında çıkmış ve bu değerler blok modele eklenmiştir. Jeolojik blok model, Şekil 3.12.a ve Şekil 3.12.b’ de üç boyutlu olarak iki farklı yönde gösterilmiştir. Şekil 3.12.b’ de blok modelin cevher kütlelerini takip ederek kuzeyle yaptığı 343,59° görülebilmektedir.



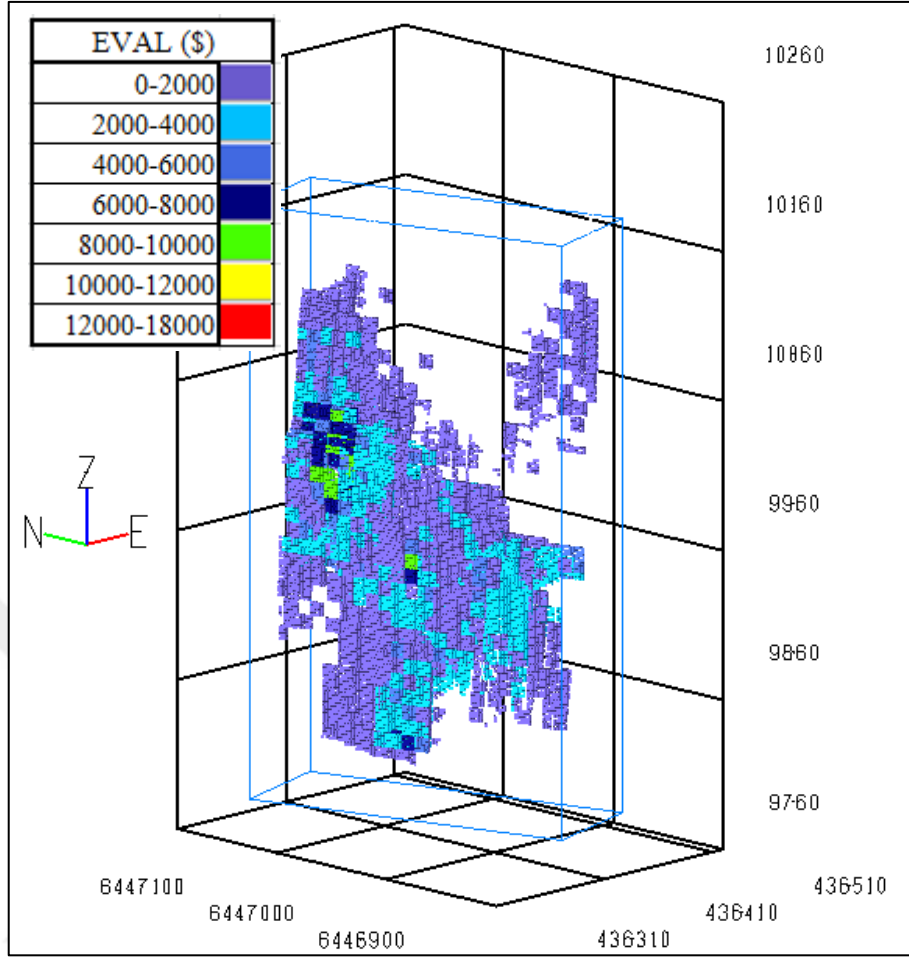
Şekil 3.12. Blok modelin 3 boyutta görüntüsü a) Üç eksenin görüntüsü b) Plan görüntüsü.

Çizelge 3.3. Blok model için ekonomik parametreler

Parametre	Birim	Değer
Altın fiyatı	\$/ons	1143,2
Kurşun fiyatı	\$/lb	0,77
Gümüş fiyatı	\$/ons	12,84
Çinko fiyatı	\$/lb	0,64
Sabit madencilik maliyeti	\$/ton	72,79
Sabit cevher hazırlama maliyeti	\$/ton	34,549
Genel bir kazanım oranı	%	77
Genel bir seyrelme oranı	%	13

3.3.4.1. İncelenen madenin ekonomik blok modeli

Bu tez kapsamında çalışmaların yürütülebilmesi amacıyla jeolojik blok modelin yanı sıra ekonomik blok modele de ihtiyaç duyulmuştur. Ekonomik blok model, bloklara atanmış ekonomik değerle ifade edilmektedir. Bu ekonomik değerlerin hesabında, blokların eş değer tenörleri ve Çizelge 3.3’ de yer alan ekonomik parametreler kullanılmış ve Bölüm 2.1.2’ deki eşitliklerden yararlanılmıştır. Ekonomik blok model oluşturma sürecinde, MINESIGHT yazılımından yararlanılmış ve bloklara atanan yeni ekonomik değerlerle Şekil 3.13’ deki gibi bir ekonomik blok model oluşturulmuştur. Bu modelde blokların ekonomik değerlerinin (EVAL), -1458,99 \$ ile 17796,375 \$ arasında değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir (Burada \$, Avustralya dolarını göstermektedir).



Şekil 3.13. Ekonomik değeri 0' dan büyük olan blokların gösterildiği üç boyutlu ekonomik blok model.

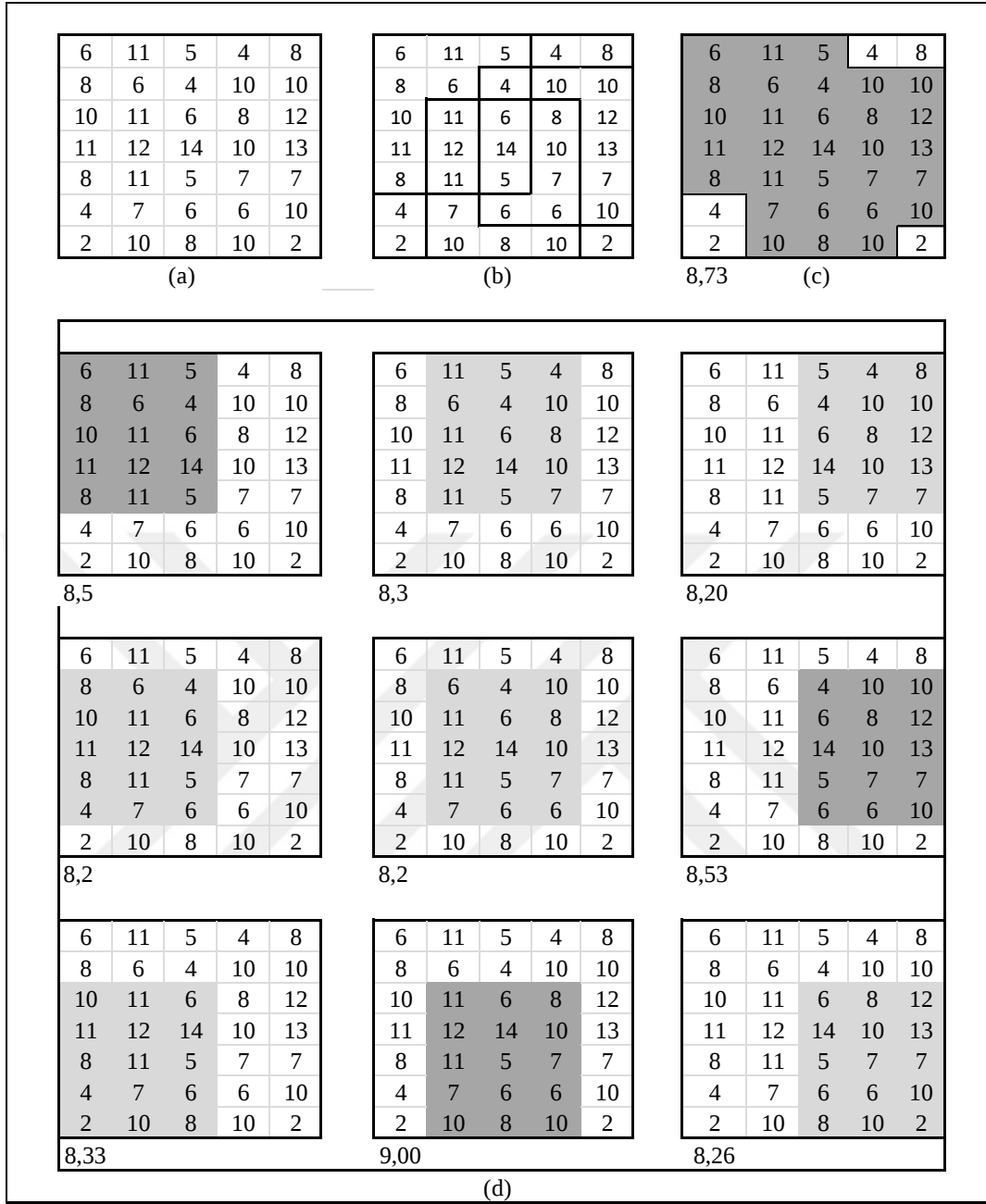
3.4. İncelenen Madenin Optimum Kazı Arını Sınırını Bulmak Üzere Seçilen Çalışmalar

Şirket tarafından yapılan tasarımlar göz önünde bulundurularak, incelenen madenin izin verilen kısmı üzerinde bu tezin 2.4. kısmında açıklanan algoritmalarından bazıları seçilerek uygulanmıştır. Algoritmaların seçilmesindeki en önemli ölçüt, güncellikleri ve ulaşılabilir hazır bir yazılım ile uygulanabiliyor olmalarıdır. Algoritmalar sırasıyla; Hareketli Kazı Arını algoritması, Maksimum Değerli Komşuluk algoritması, Sens ve Topal (2009) yaklaşımı ve son olarak Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) yaklaşımıdır. Bu algoritmalara ek olarak, bu tezin yine 2.4. bölümünde bahsedilen ve yeni bir kazı arını tasarım aracı olan MSO, incelenen maden verileri üzerinde uygulanmıştır. İlerleyen bölümde ele alınan çalışmalar detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

3.4.1. Hareketli Kazı Arını algoritması

Hareketli Kazı Arını algoritması belirli bir cevher kütlesinin sabit blok modeline uygulanmakta ve bütünsel olmayan (parçalı) blokların hesaba katılmasına izin vermektedir. Algoritma, optimizasyonun başında cevher ve pasa bloklarını sınıflandırabilmek için bir sınır tenör (cut-off grade) değeri belirlemektedir. Ayrıca, kazı arını veya farklı madencilik bölgelerine has, değirmene ya da cevher hazırlama tesisine gönderilecek her metalin ortalama tenörünü ifade eden, bir baş tenöre (head grade) de ihtiyaç duymaktadır. Bunların yanı sıra, algoritmanın optimizasyon için bir kazı arını geometrisini de belirlemesi gerekmektedir. Bu geometri üç dikey yönde (X, Y ve Z düzlemleri) minimum kazı arını boyutlarıyla ifade edilmektedir. Kazı arını boyutu yeraltı maden üretim yöntemine bağlı olarak değişen seçimli bir madencilik birimidir (Bai vd., 2013). Algoritma daha sonra bu girdi parametreleriyle optimizasyon problemini, sınır tenör üzerinde bulunan herhangi bir bloğun, seçilen baş tenör değerini sağlayan kazı arınına dâhil edilebilirliğini belirlemek olarak tanımlamaktadır. Çoğu durumda aynı blok için birkaç alternatif kazı arını bulunabilmektedir, böyle durumlarda incelenen blok en yüksek baş tenöre sahip olan kazı arınına dâhil edilmektedir.

Hareketli Kazı Arını algoritması, en yüksek değere sahip kazı arını konumunu bulmak için bir kazı arını şeklinin blok model boyunca hareket ettirilmesi tekniğinden ortaya çıkmıştır. Kazı arını şekli, bir blok üzerinde belirlenen artış miktarına bağlı olarak üç dikey yönde hareket ettirilmekte ve tüm alternatif kazı arınları bu yolla belirlenmektedir. Kazı arınlarının ortalama tenörü, içerisinde ki blokların ortalamasıyla hesaplanmaktadır. Bu noktada hangi kazı arınının seçileceğine sınır tenör (cut-off) ve baş tenör karar vermektedir. Şekil 3.14’ de iki boyutlu bir model üzerinde Hareketli Kazı Arını algoritmasının sabit bir blok modeli kullanarak ekonomik kazı arını sınırını nasıl bulduğunu gösteren bir örnek sunulmaktadır.

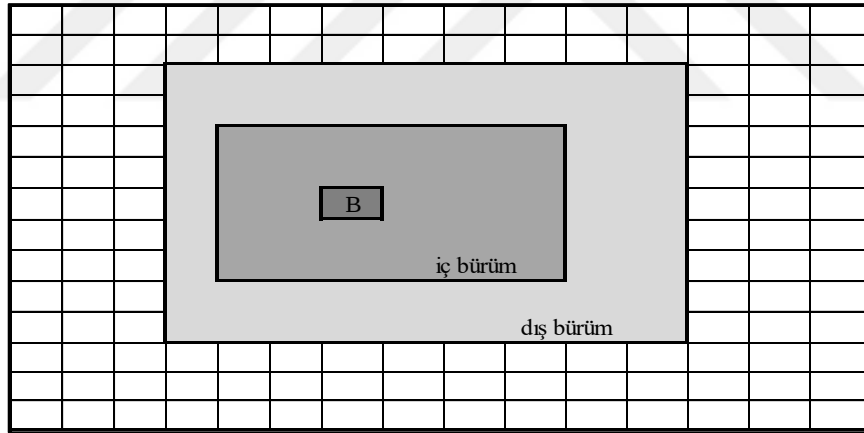


Şekil 3.14. Hareketli Kazı Arını algoritması örneği (a) iki boyutlu blok model (b) uygun kazı arınları (c) ekonomik nihai kazı arını (d) Algoritmanın kazı arınları testi

Bu örnekte bloklar 5×4 metre boyutunda, model üzerinde hareket ettirilecek kazı arını 15×20 m boyutundadır. Hareket ettirilme miktarı “x” yönünde 4m, “y” yönünde 5m’ dir. Bu durumda kazı arının boyutu “x” eksenı boyunca üç birim, “y” eksenı boyunca beş birim ve hareket ettirilme miktarı her yön için bir birim olarak belirlenir. Tenör değerleri bu örnek için gram/ton cinsinden ifade edilmiş, pasa bloklarının dâhil edilmesiyle ilgili herhangi bir sınırlama getirilmemiş ve baş tenör 8,4 g/ton olarak verilmiştir. Belirlenen kazı arını blok model üzerinde (Şekil 3.14. a) üzerinde hareket ettirilmiş ve üç uygun kazı

arını seçilmiştir (Şekil 3.14.b). Daha sonra maden sınırı Şekil 3.14.c’ de koyu renkle ifade edilerek, 8,73 gram/ton ortalama tenör ile gösterilmiştir. Şekil 3.14.d her kazı arını konumunun algoritmada değerlendirme basamaklarını göstermektedir. 8,4 gram/ton ve daha fazla baş tenöre sahip kazı arınlarının elverişli olduğu düşünülerek işaretlenmiştir.

Kazı arını şeklinin hareket ettirilmesi işlemi esnasında “iç” ve “dış” olarak ifade edilen iki bürüm (envelope) tanımlanmaktadır. İç bürüm kazılabilir sınır tenör üzerindeki tüm bloklardan ifade edilir ve en iyi tenör değerli kazı arını şekillerinin birleşimidir. Dış bürüm ise birlikte baş tenörü sağlayan olası tüm kazı arını konumlarının birleşimidir. Nihai kazı arını iç bürüm olduğca yakın dış bürüm ve içi bürüm sınırları arasında yer almalıdır. Şekil 3.15’ de tek bir blok için iç ve dış bürümleri gösteren olası bir örnek gösterilmektedir. Bunun yanında, nihai kazı arını tasarımına dahil edilecek kazı arınlarının seçimi bazı optimizasyon hedeflerine göre değişmektedir. Bu hedefler; (a) pasa tonajı en küçüklenirken cevher tonajının en büyüklenmesi (b) tenör ve metal içeriği miktarının en büyüklenmesi (c) birikmiş değer (dolar) en büyüklenmesi olarak sıralanmaktadır.



Şekil 3.15. Tek bir bloğa ait iç ve dış bürüm

İki bürüm arasındaki farkı basitçe anlatan bir örnekte aşağıda gösterilmektedir. Örnek model, “x” ve “y” yönünde 3’ er blok olmak üzere toplam 9 bloktan oluşmaktadır, bu blokların I,J,K değerleri ve altın tenör değerleri (g/t cinsinden) blokların içinde şöyle ifade edilmiştir:

2	5	8
1	4	7
0	3	6

IJK değerleri

0	2	6
2	20	2
8	2	2

Au değerleri

Minimum kazı arını boyutu X ve Y yönünde iki birim Z yönünde 1 birim olacak şekilde belirlenmiş, artış miktarı blok boyuna eşit tutulmuştur. Hem sınır tenör hem de baş tenör 4g/t' da sabitlenmiş ve optimizasyon kriteri olarak tenörün en büyüklemesi seçilmiştir. Bu koşullar altında 4 farklı kazı arını oluşturulmuştur:

0	2	6
2	20	2
8	2	2
1	Au=8	

0	2	6
2	20	2
8	2	2
2	Au=6	

0	2	6
2	20	2
8	2	2
3	Au=6.5	

0	2	6
2	20	2
8	2	2
3	Au=7.5	

İç bürümün hesaplanması için yalnızca sınır tenör değerlerinin üzerindeki bloklar değerlendirilir, bu örnekte 0, 4 ve 8 numaralı bloklar değerlendirilmiştir. 0 numaralı blok için en iyi (ve tek) kazı arını 1. durumdadır bu yüzden 0, 1, 3 ve 4 numaralı bloklar işaretlenmiştir. 4 numaralı blok için de önceden blokları işaretlenmiş 1. koşul en iyi durumdur. 8 numaralı blok için ise en iyi kazı arını 4. Durumdur ve 4, 5, 7 ve 8 numaralı bloklar işaretlenmiştir. Bu işlemler sonucunda iç bürüm aşağıdaki gibi gösterilir:

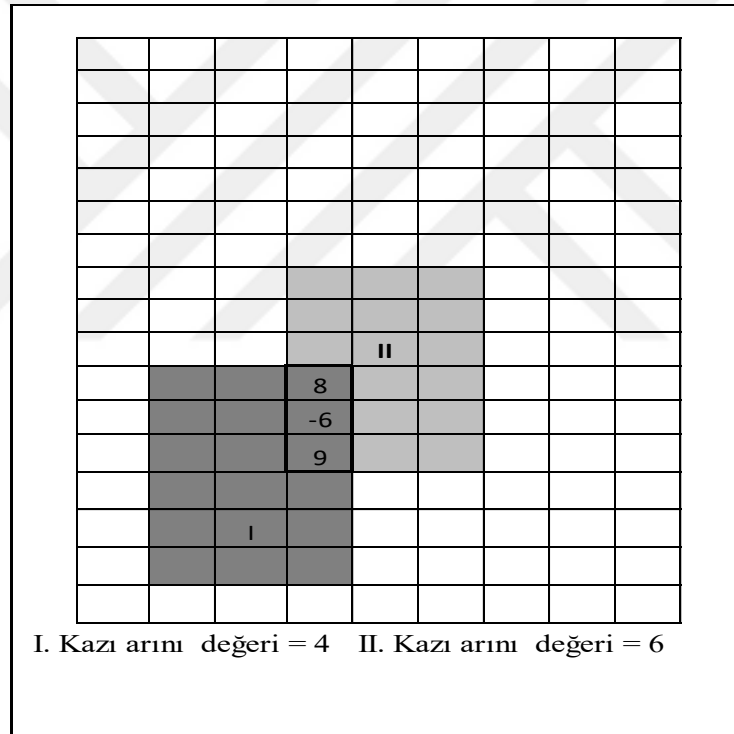
0	2	6
2	20	2
8	2	2

Dış bürüm için tüm bloklar değerlendirilmiştir. Her blok dört farklı kazı arını olasılığından birine dâhildir, bu kazı arınlarının hepsi ekonomiktir ve bu yüzden blokların hepsi dış bürüme dâhil edilmiştir:

0	2	6
2	20	2
8	2	2

Algoritma, işletilebilir rezerv ve kazı arını geometrisi için optimizasyon ve duyarlılık analizlerini üzerinde üç boyutlu bir değerlendirme sağlamaktadır. Yeraltı üretimlerinde farklı madencilik yöntemleri için özelleştirilmemiştir, genellikle yararlanır. Algoritma ticari ulaşılabilirliği olan yazılımlar ile kolaylıkla kullanılabilir olmasına rağmen maden tasarımları için yalnızca sezgisel bir yaklaşım getirmektedir. Daha önemlisi,

blokların paylaşıldığı üst üste örtüşen kazı arınları oluşturmaktadır. Bu sebeple kazı arınları tarafından paylaşılan blokların, el yordamı ile nihai sınırlardan çıkarılması gerekebilir, çünkü fiziksel olarak bir blok birden fazla kazı arınına dâhil olamamaktadır. Paylaşılan blokların ekonomik değerleri bu blokların ait olduğu kazı arını sayısına bağlı olarak o ölçüde birden fazla kez toplanmaktadır. Bu değerlendirme Şekil 3.16'da iki boyutlu hipotetik bir örnek kullanılarak anlatılmıştır. Bu örnekte, sırasıyla toplam ekonomik değerleri 4 ve 6 olan 3×6 blok ölçüsünde ekonomik iki kazı arını gösterilmektedir. Algoritma nihai toplam değeri sanki $6 + 4 = 10$ olarak hesaplar ancak gerçek ekonomik değer bundan farklıdır: $(6+4) - (8-6+9) = -1$. Kazı arınlarının birleşiminin toplam ekonomik değeri, gerçek toplam değerden oldukça farklı olabilmektedir.



Şekil 3.16. Örtüşen Kazı Arınları

Hareketli Kazı Arını algoritması birçok madencilik yönteminde kullanılan tavan ve taban taşı eğimlerini dikkate almamaktadır. Algoritma maden tasarımına ait kesin bir sonuç vermektense nihai kazı arını sınırının yalnızca iç ve dış bürümler arasında olduğunu belirtmekte ve mühendislerin el yordamıyla ayarlamalarına ihtiyaç duymaktadır (Alford vd., 2007).

3.4.1.1. MRO (Mineable Reserve Optimisier) tasarım aracı

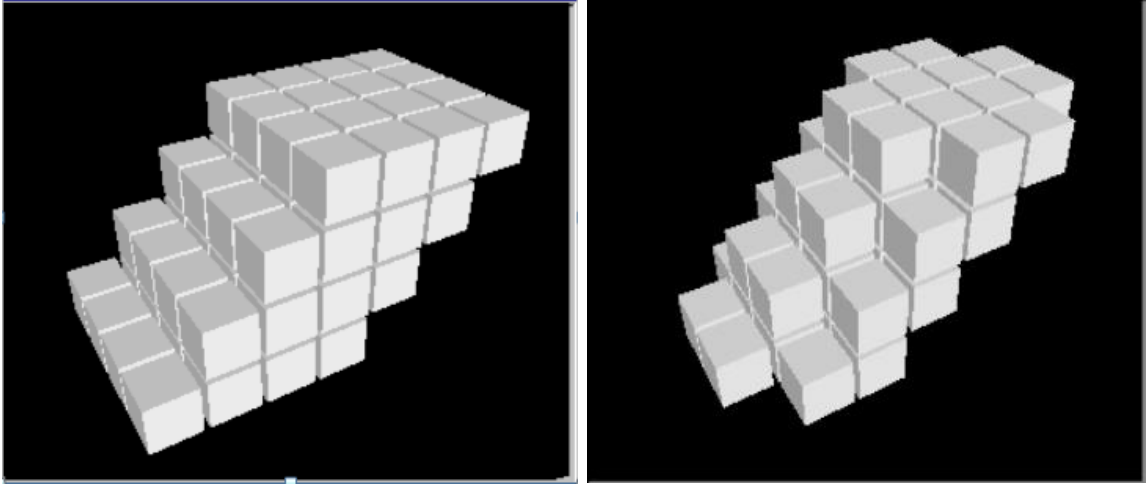
MRO tasarım aracı öncelikle bir blok modeli analiz etmekte, tek başına veya ardışık şekilde alındığında minimum tenörü (sınır tenör veya baş tenör) veya ekonomik değeri, tanımlanan bir hacim içerisinde, sağlayan blokları işaretlemektedir. Burada hacim “Minimum Madencilik Birimi (MMB)” olarak adlandırılmakta ve pratik olarak kazılabilecek en küçük hacim ve şekli ifade etmektedir. Yeraltı üretim yöntemleri için MMB genellikle minimum kazı arını boyutudur. MMB jeolojik model üzerinde kullanıcı tarafından belirlenen küçük artış miktarlarında (alt birimler) hareket ettirilir ve tenör veya madencilik kriterlerini sağlayıp sağlamadığı test edilir. Burada artış miktarı örneğin X, Y ve Z yönünde 5’ er metre ise, minimum madencilik birimi olası tüm pozisyonlarda $5 \times 5 \times 5$ ’ lik bir grid üzerinde hareket ettirilecek ve minimum madencilik birimlerinin bu pozisyonlarda, ekonomi ve madencilik kriterlerini sağlayıp sağlamadığı değerlendirilecektir.

Bahsedilen MMB şekil ve oryantasyonu aşağıdaki üç yöntemden birini kullanılarak belirlenmektedir:

1. Girdi modelinin eksenlerine dikey üç boyutlu dikdörtgen biçiminde MMB,
2. İki boyutlu dikdörtgenlerle tanımlanabilen ve dikgen olmayan şekiller,
3. Maksimum yükseklik ve dörtkenarın her biri için ifade edilen eğim açıları.

Üçüncü durumda kazı arınının her yüzeyinin eğimi, yatay uzantının düşey uzantıya oranı olan bir eğim faktörüyle belirlenmektedir. Örneğin, eğim faktörü 1 olduğunda kazı arını yüzeyinin eğim açısı 45° olacak demektir. Şekil 3.17’ deki örnek 45° kazı arını yüzeyi eğimini dikdörtgen ve eliptik biçimde göstermektedir. Örnek için, minimum madencilik birimi X, Y ve Z yönünde 20’ şer metre olarak belirlenmiş ve her yönde 4 artış miktarı düşünülmüştür. Bu durum alt birim boyutları $5 \times 5 \times 5$ olmaktadır.

Hangi cevher bloklarının çıkarılabileceği düşünülürken, her blok için bir veya daha fazla potansiyel MMB pozisyonu değerlendirilip bunların arasından en iyi durum seçilmektedir. Optimal MMB pozisyonu aşağıdaki kriterlerden birine göre seçilebilmektedir:



Şekil 3.17. 45° kazı arını yüzeyi eğimini dikdörtgen ve eliptik biçimde gösteren bir örnek (Datamine'dan, 2016a)

- Maksimum cevher tonajı (bu durum minimum pasa veya seyrelti oranının minimum olmasına eşdeğerdir). Eğer birkaç MMB aynı tonaja sahipse, bunların arasından maksimum tenörlü olanı tercih edilir,
- MMB için maksimum baş tenör,
- MMB için maksimum metal içeriği,
- Maksimum birikmiş değer, örneğin dolar değerine göre seçilmektedir.

Bu işlem ile bitişik alt birimler değerlendirilip işletilebilir bürümler meydana getirilmektedir. MRO tasarım aracı bu noktada üç tür bürüm meydana getirebilir. Bunlar; sıraya konulmuş, minimum veya maksimum bürümlerdir. Bürüm türlerinin tamamı MMB'nin geometrik kriterlerini sağlamaktadır. Sıraya konulmuş bürümler yalnızca baş tenöre bağlıken, minimum ve maksimum bürümler hem sınır tenörün hem de baş tenörün bir fonksiyonudur. Hem sıraya konulmuş hem de minimum bürümler, maksimum bürümün bir alt grubudur. Genel olarak minimum/sıraya konulmuş ve maksimum bürümler arasındaki artış, tanımlı alanda ek tonaj gerekirse eklenebilecek uç materyali göstermektedir. Ancak böyle bir ekleme durumunda tüm bürümün ortalama tenörü, baş tenörün altına düşebilmektedir.

Sıraya konulmuş bürüm: Bu bürümün oluşturulmasında öncelikle baş tenör kriterini sağlayan tüm ekonomik MMB'ler tanımlanmakta ve belirlenen bir optimizasyon kriterine göre sıralanmaktadır. Sıralamada en yüksek MMB seçilerek işaretlenmekte,

ardından sıralamadaki ikinci en yüksek MMB değerlendirilmektedir. Bu MMB eklendiğinde mevcut bürüm değerinin artışı baş tenörün üzerinde oluyorsa, ikinci MMB de seçilip işaretlenmektedir. İşlem buradan sonra aynı şekilde devam etmektedir.

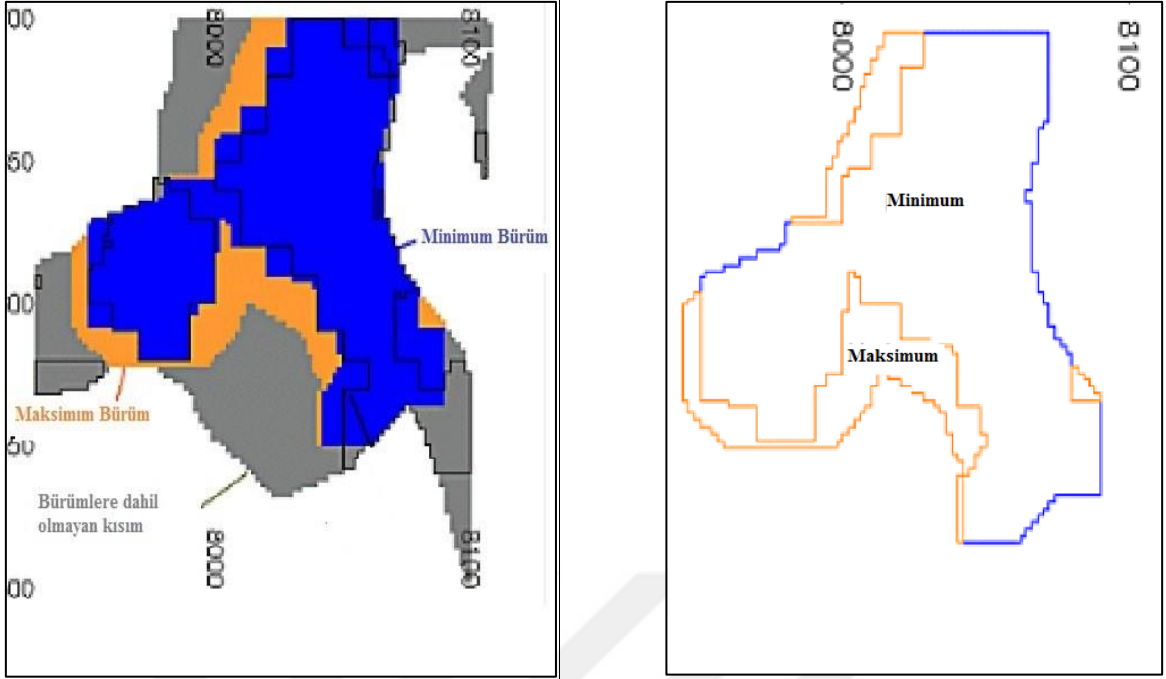
Minimum bürüm: Bu bürüm yalnızca cevher blokları (sınır tenör üzerindeki bloklar) test edildiğinde bulunan en iyi MMB' lerinin sınırını göstermektedir.

Maksimum Bürüm: Bu bürüm ise hem cevher hem de pasa blokları test edildiğinde baş tenörü sağlayan MMB' lerinin sınırını göstermektedir. Burada cevher veya pasa bloğu olduğuna bakılmaksızın her blok, seçilecek bir ekonomik MMB' ye katılabilmektedir.

Minimum bürümlerin hesaplanmasını göstermek amacıyla 6 bloktan oluşan tek boyutlu bir örnek Çizelge 3.4' de sunulmaktadır. Bu örnekte, MMB boyutu ve artış miktarı 2 blok olarak belirlenmiş yani alt MMB' nin boyutu jeolojik model üzerindeki blok boyutuna eşit tutulmuştur. Tabloda her bloğun tenörü ve alt MMB' lerin dâhil olduğu en iyi MMB değerleri sırasıyla gösterilmektedir. Örneğin 2 numaralı alt MMB, ilkinin tenörü $(4+8)/2=6$ ve ikincinin tenörü $(8+24)/2=16$ olmak üzere iki olası MMB' ye katılabilir. Bu durumda iki numaralı alt MMB' nin katılacağı en iyi MMB tenörü 16' dır. Örnekte eğer sınır tenör değeri 10 ve baş tenör değeri 12 olarak alınırsa, 2 numaralı alt MMB maksimum bürüme dâhil edilir, çünkü en iyi MMB tenörü baş tenörden yüksek olmasına rağmen bloğun tenörü sınır tenörün altındadır. 3, 4 ve 5 numaralı alt MMB ler hem en iyi MMB tenörünü sağladığından hem de blokların tenörleri sınır tenörün üzerinde olduğundan minimum bürüme dâhil edilir. Minimum ve maksimum bürümler arasındaki fark Şekil 3.18'de plan ve kesit görüntüleri ile daha detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

Çizelge 3.4. Minimum ve maksimum bürümler için 1 boyutlu bir örnek

Blok numarası	1	2	3	4	5	6
Blok	4	8	24	20	16	4
En iyi alt MMB	6	16	22	22	18	10
Bürüm	-	Mak.	Min.	Min.	Min.	-



Şekil 3.18.  rnek bir minimum (mavi) ve maksimum (sarı) bürümlerin plan ve kesit görüntüsü (Datamine'dan, 2016a).

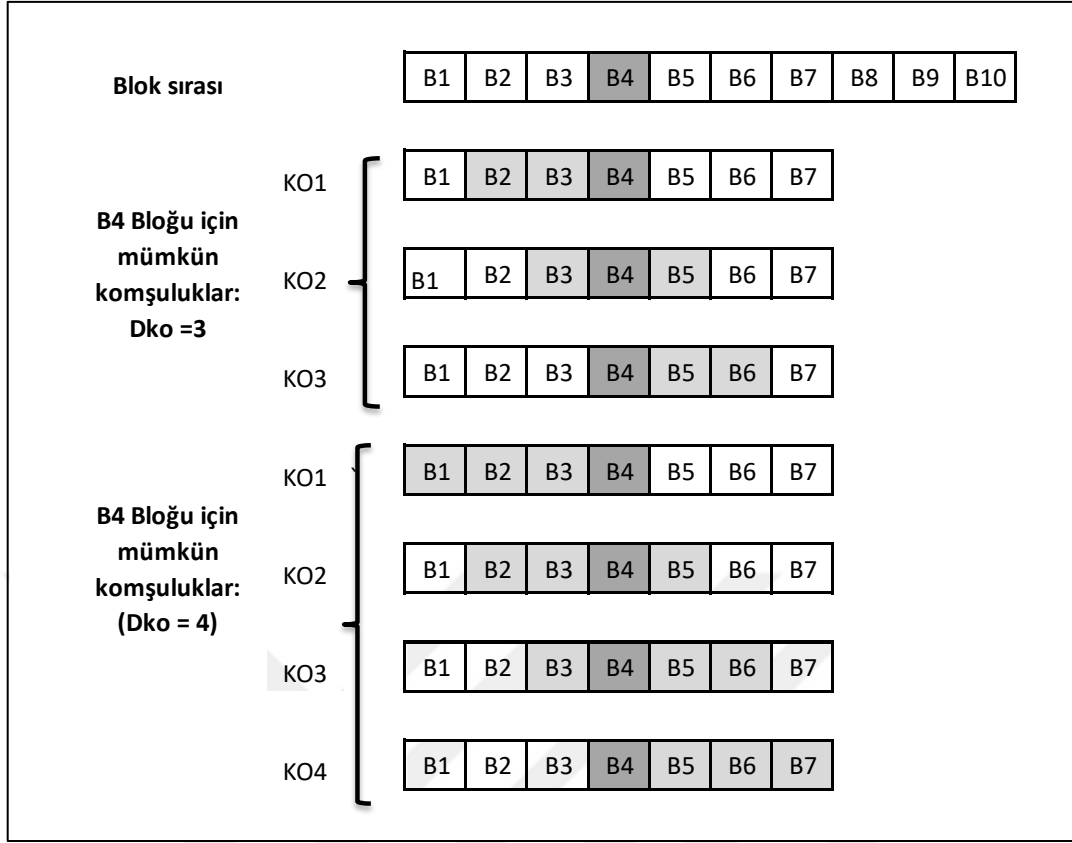
MRO optimizasyonu esnasında yinelemeli bir yaklaşım uygun olabilmektedir. Program ilk çalıştırıldığında seçilen maden yöntemi için madencilik maliyetlerinin de yansıtıldığı ekonomik bölgelerin yeri bulunacaktır. Bu ekonomik bölgeler belirlendiğinde; sermaye, hazırlık ve yol maliyetleri tahmin edilebilmekte ve yeni bir baş tenör bulmak için cevhere pay edilebilmektedir. Yeni baş tenör ile program yeniden çalıştırılıp optimum sonuçlar elde edilene kadar bu işlemler tekrar ettirilebilmektedir.

DATAMINE yazılımının MRO optimizasyon metodu ilk rezerv tahminleri için uygundur ancak detaylı bir kazı arını tasarımını desteklememektedir. Ayrıca, kazanılan ekonomik değerin en b y klemesine yardım etmemekte, dar eğimli yataklar ve topuk gerektiren koşullar için zayıf bir yaklaşım getirmektedir. Dahası bu metot yalnızca tek bir kazı arını boyutunda çalışmakta, farklı kazı arınlarını hesaba katmamakta ve madencilik yapılacak katların belirlenmesini optimizasyon işlemlerine dahil etmemektedir. Hareketli Kazı Arını algoritmasını temel alan bu metod (CAE Mining, 2016), algoritmanın en büyük sorunu olan kazı arınlarının üst üste oluşması sorusunu da beraberinde getirmektedir.

3.4.2. Maksimum Değerli Komşuluk algoritması

Maksimum Değerli Komşuluk Algoritması temelde girdi parametreleri ekonomik blok model ve kazı arının geometrik kısıtlamaları olan komşuluk kavramına dayanmaktadır. Ekonomik blok modelde, her bloğa hesaplanan bir Net Ekonomik Değer (NED) atanmakta ve i, j, k düzleminde her bloğun değeri NED_{ijk} ile gösterilmektedir. Bölüm 2.1.1. de daha detaylı anlatılan bu ekonomik değerler negatif, pozitif veya sıfır olabilmekte ve blok alındığında elde edilecek kârı ya da kaybı göstermektedir. Blokların ekonomik değerlerini hesaplamak için çeşitli formüller üretilmiş olsa da (Camus, 1992: Whittle, 1993), MVN algoritması bloğun ekonomik değerini kısaca bloğun kazanılan metal (ürün) içeriğinin satışından elde edilen kârdan, o bloğu kazmak için gereken tüm madencilik maliyetleri ve metalin satışa hazır olması için gereken (ürünün) zenginleştirme maliyetlerinin farkından elde etmektedir. İkinci girdi olan kazı arının geometrisi ise her dikey yönde, hem minimum hem de maksimum boyutlar ile sınırlandırılmaktadır. Minimum kazı arını boyutu delme patlatma ve yükleme aktivitelerinin yanı sıra kazı arını içerisinde insan ve makine hareketlerini hesaba katan yeterli alanı garanti etmelidir (Ataee-Pour, 2000). Maksimum kazı arını ise genellikle jeoteknik faktörlere bağlı olmaktadır.

Komşuluk (KO) kavramı, komşuluk faktörüyle her blok için minimum bir kazı arını boyutu formüle eder. Burada madencilik kısıtlamalarını sağlamak için kazılabilecek ardışık bloklardan oluşan set, verilen bir blok için komşuluğu ifade etmektedir ve bu setin boyutu “Komşuluk Düzeni” (D_{ko}) olarak adlandırılır. Şekil 3.19’ da tek sırada 10 bloktan oluşan ($B_j ; j = 1, 2, \dots, 10$) bir boyutlu komşuluk örneği gösterilmektedir. Bu örnekte bloklar 10 m uzunluğunda iken minimum kazı arını uzunluğu 30 m ve 40 m koşulları ile sınırlandırılmıştır. Daha sonra kazı arını blok oranı $30/10 = 3$ ve $40/10 = 4$ ile hesaplanmış ve D_{ko} sayısı blok sırası boyunca 3 ve 4 olmuştur. B4 bloğuna ait mümkün tüm komşuluklar Şekil 3.19’de sırasıyla gösterilmektedir.

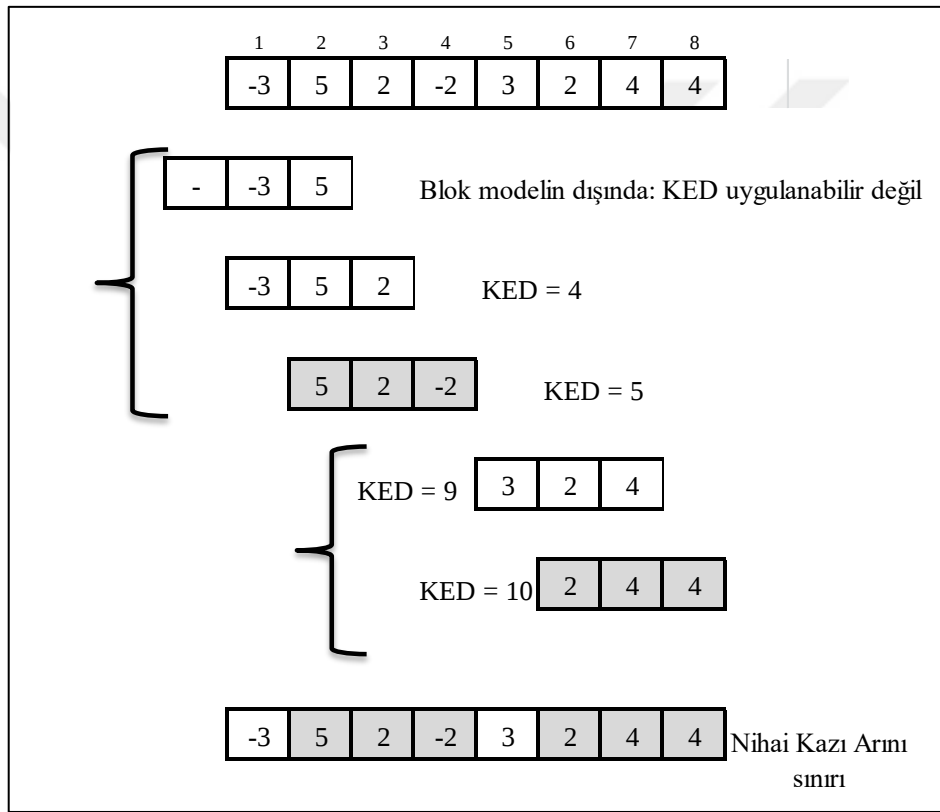


Şekil 3.19. B_4 bloğu için, üç ve dört komşuluk düzeninde, mümkün komşuluklar

Algoritmanın iki boyutlu basit bir örneği de Şekil 3.20’ de görülebilir. Bu örnekte ekonomik blok model altı satır ve yedi sütundan oluşmakta ve minimum kazı arını boyutu iki blok uzunluk, iki blok genişlik ile ifade edilmektedir. Böylece 2 boyuttaki D_{ko} (2,2) dört mümkün komşuluk geliştirmektedir. Şekil 3.20’ de B_{35} (3. satır 5. sütun) bloğu için mümkün olan 2 boyuttaki tüm komşuluklar (4 adet) bir arada gösterilmektedir. Son olarak mümkün komşuluk kavramı için Şekil 3.21, algoritmanın gerçekte uygulandığı 3 boyuttaki haline bir örnek sunmaktadır. Bu örnekte D_{ko} sayısı (2, 2, 2) ile ifade edilerek her yönde iki blok olarak varsayılmış ve Şekil 3.21’ de (B_{ijk}) bloğunun ortak üyesi olduğu iki komşuluk gösterilmiştir.

Optimizasyon aşamasında, bir bloğun en uygun komşuluğunu belirlemek için, her Komşuluğun Ekonomik Değeri (KED) hesaplanmakta ve bu hesaplardan bir Komşuluk Değer Seti (KEDs) oluşturulmaktadır. Daha sonra bu komşuluk değerleri maksimum komşuluk değerini (en yüksek değere sahip komşuluk) bulmak için birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Son olarak belirlenen maksimum KED, kazı arınına dâhil edilip

komşuluklar oluşturulmuştur. Ancak ilk blok negatif olduğundan ikinci bloğa geçilmiş ve KED değerleri üç komşuluk için hesaplanmıştır. Bu üç komşuluktan, üçüncü komşuluk en yüksek değere sahip olduğundan işaretlenerek kazı arını sınırına dâhil edilmiştir. Daha sonra 2. , 3. ve 4. bloklar işaretlenmiş olduğundan 5. bloğa geçilmiştir. Burada 4. blok işaretli olduğundan iki komşuluk bulunmaktadır. Bunlardan ikinci komşuluk en yüksek değere sahip olduğundan onu oluşturan bloklar işaretlenerek kazı arını sınırına dâhil edilmiştir. Son adımdan sonra artık incelenecek blok kalmadığından işaretlenmiş bloklarla nihai bir kazı arını sınırı çizilmiştir.



Şekil 3.22. Maksimum Değerli Komşulukların bulunması

Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının en önemli avantajı kolaylığı ve bir yazılım içerisinde uygulanabilirliğidir. Hareketli Kazı Arını algoritmasındaki kazı arınlarının üst üste oluşması ve örtüşmesi, sorunu bu algorithmada giderilmiştir. Ancak yine de bu algoritma çok sayıda dezavantaj taşımaktadır. Bunlardan ilki başlangıç noktası değiştirildiğinde aynı cevher kütlesi için nihai kazı arını sınırlarının setinin değişmesidir. İkinci dezavantajı da daha önceden incelenen bloklara haksız bir avantaj sağlaması ve tek bir sonuç verememesidir. Ayrıca, bu algorithmada kazı arını duvarı eğim kısıtlaması dikkate

alınmamaktadır. Son olarak, MVN algoritması sabit bir blok modeli kullanmakta ve bu model kazı arını boyutlarını temel alan kazı arını maliyet faktörlerini incelememekte, yalnızca blokların tek tek olan maliyetlerini hesaba katmaktadır. Gerçekte bir bloğun dâhil olduğu kazı arını boyutu toplam madencilik maliyetini belirlemektedir. Bu boyutun dikkate alınması, önerilen komşulukların değişmesine neden olabilir çünkü daha büyük kazı arınlarının ton başına maliyeti daha küçük kazı arınlarınınkinden önemli ölçüde az olabilir (Little, 2012).

3.4.3. Sens ve Topal sezgisel yaklaşımı

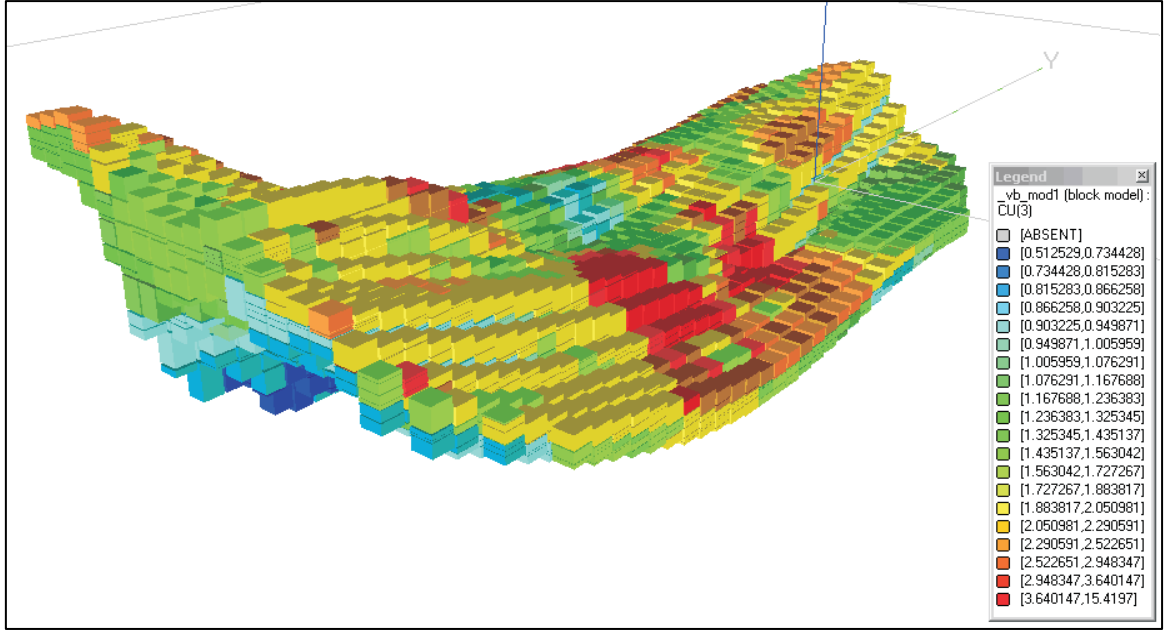
Algoritmanın kazı arını sınır optimizasyonu yapılabilmesi için, kullanılacak blok modelin yalnızca tek bir boyuttaki bloklardan oluşması gerekmektedir. Bu yüzden ilk basamakta blok dönüştürücü aracı birden fazla blok boyutu içeren modeli, blokların tek bir boyutta olduğu modele çevirir. Blok dönüştürücü aracı aynı zamanda blokların mümkün olan her boyutta oluşturulmasına izin vermektedir. Bu da kazı arınlarının her boyutta oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. İkinci basamak olan kazı arını optimize aracı blok dönüştürücü tarafından oluşturulan bu modeli kullanmaktadır. Optimize aracı Matlab yazılımıyla oluşturulmuş olup girdi parametreleri olası tüm kazı arını boyut aralığını, cevher fiyatlarını, metre küp başına madencilik maliyetlerini ve kazı arını üretimi başlatma maliyetini içermektedir. Algoritma bu değerleri kullanarak verilen bir cevher kütlesi için optimum kazı arını sınırlarını ve tasarımını belirlemeye çalışmaktadır (Sens, 2008).

Kazı arını optimize basamağı, öncelikle mevcut en küçük kazı arını blok model boyunca hareket ettirmekte ve olası her konumda bir değer hesaplamaktadır. Ardından bu hesaplamalardan, pozitif değerli kazı arınlarının konumları ve gelirlerini içeren bir kazı arını listesi oluşturmaktadır. Listeye not edilme işlemi tamamlandıktan sonra, bir sonraki en büyük kazı arını boyutuna geçip aynı işlemleri tekrarlamaktadır. Bu işlem tüm farklı kazı arını boyutları değerlendirilinceye kadar devam etmektedir. Böylece kazı arını listesi olası tüm kazı arınlarını gelirleri ve konumları ile birlikte içerecek şekilde oluşturulmuş olmaktadır. Daha sonra farklı kazı arını seçme kriterleri uygulanarak, oluşturulmuş bu listeden ilk kazı arını seçilmektedir. Seçme kriterlerine örnek olarak kazı arını kârı, metre kare başına kazı arını kârı ve toplam madencilik zamanına bölünmüş kazı arını kârı

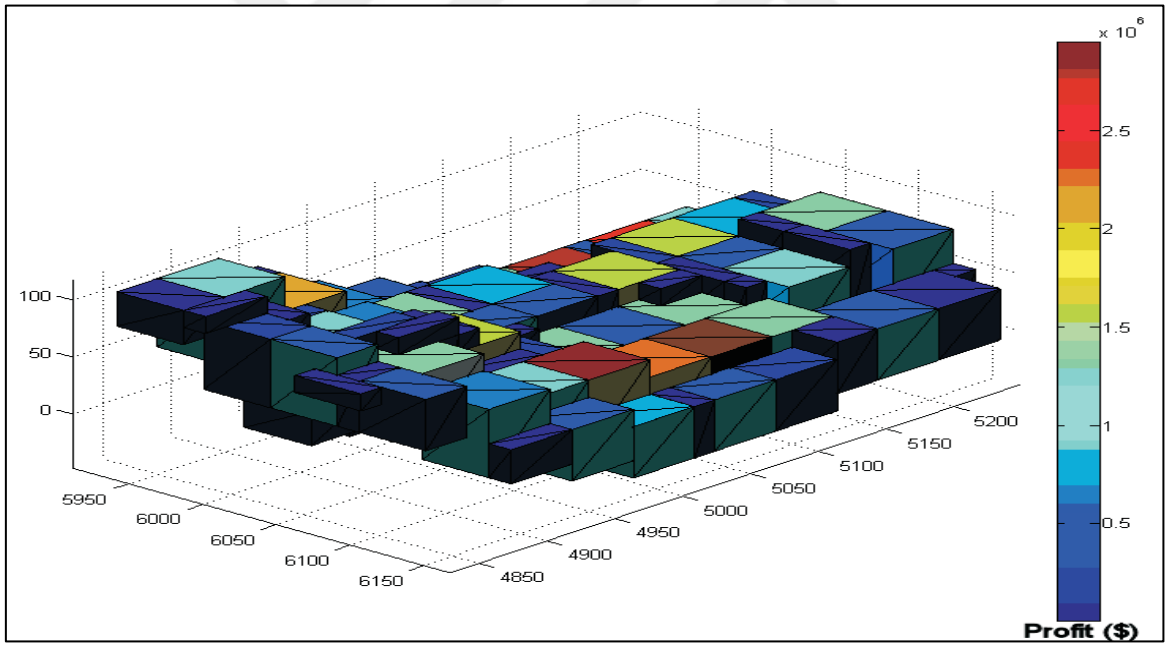
verilebilir (bunu yapabilmek için de toplam kazı zamanını tahmin eden ekstra bir hesap yapılmaktadır).

İkinci basamağın son adımı, bir kazı arını seçildikten sonra bu kazı arınına ait gelir ve konum bilgilerinin nihai kazı arını tablosuna not edilmesidir. Seçilen kazı arınına dâhil olan bloklar, blok model içerisinde özel olarak işaretlenmekte ve bu kazı arını sonraki işlemlerde tekrar seçilmemek üzere kazı arını listesinden kaldırılmaktadır. Bundan sonra kazı arını listesinden bir diğer mevcut en iyi kazı arını seçilmekte ve bu kazı arınına dâhil blokların işaretlenip işaretlenmediği, kazı arını listeden kaldırılıp kaldırılmadığı kontrol edilip nihai kazı arını tablosuna eklenmektedir. Bu yolla listede yer alan tüm kazı arınları incelenmiş olup yalnızca pozitif değerli, örtüşmeyen kazı arınlarını içeren bir nihai kazı arını tablosu oluşturulabilmektedir. Üç adımdan sonuncusu olan görselleştirme aracı, tüm kazı arınlarının nihai sınırının üç boyutlu modeli oluşturan bir programdır. Kazı arınlarından elde edilen kâr, bu kâr ile bağlantılı olacak şekilde bir renk göstergesi ile ifade edilmektedir. Şekil 3.23.a ve Şekil 3.23.b algoritmanın bir uygulamasını göstermektedir.

Sunulan algoritma kazı arını sınırlarının birçok kazı arını tasarım stratejisine bağlı olarak oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Algoritma tek sabit bir kazı arını boyutu veya bir dizi kazı arını boyutu kullanarak optimizasyon işlemini gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca en uygun kazı arını boyutunu bulup buna göre kazı arınlarının sınırını da oluşturabilmektedir. Hareketli Kazı Arını algoritmasının aksine çözümünde üst üste örtüşen kazı arınları olasılığını içermemektedir. Bunlara rağmen, yaklaşımın önemli bir dezavantajı vardır. Kazı arınları kullanıcının tercih sırasına göre, örneğin kazı arını kâr değerlerinin azalacak sırada olduğu durumda seçilebilmektedir. Bu durumda kazı arını tasarımlarının tüm kombinasyonları hesaba katılamamaktadır. Şekil 3.24’ de kâr sırasına göre kazı arını seçmenin dezavantajıyla ilgili iki boyutlu bir örnek gösterilmektedir. Örnekte örtüşen tek boyutta dört farklı kazı arını şekli gösterilmektedir. Yaklaşım öncelikle en yüksek ekonomik değere sahip 1 numaralı kazı arını seçmekte, 3 ve 4 numaralı kazı arınları 1 numaralı kazı arını ile örtüştüğü için otomatik olarak final tablosundan kaldırmaktadır. Bu durumda 1 ve 2 numaralı kazı arınları nihai kazı arını tasarımında birlikte değerlendirilmektedir. Ancak Şekil 3.24’ de görüldüğü üzere 3 ve 4 numaralı kazı arınlarının toplamı aslında daha kârlı sonuç verebilecektir, bu sebeple algoritma en kârlı kazı arını kombinasyonunu oluşturmada başarısızdır denebilir.

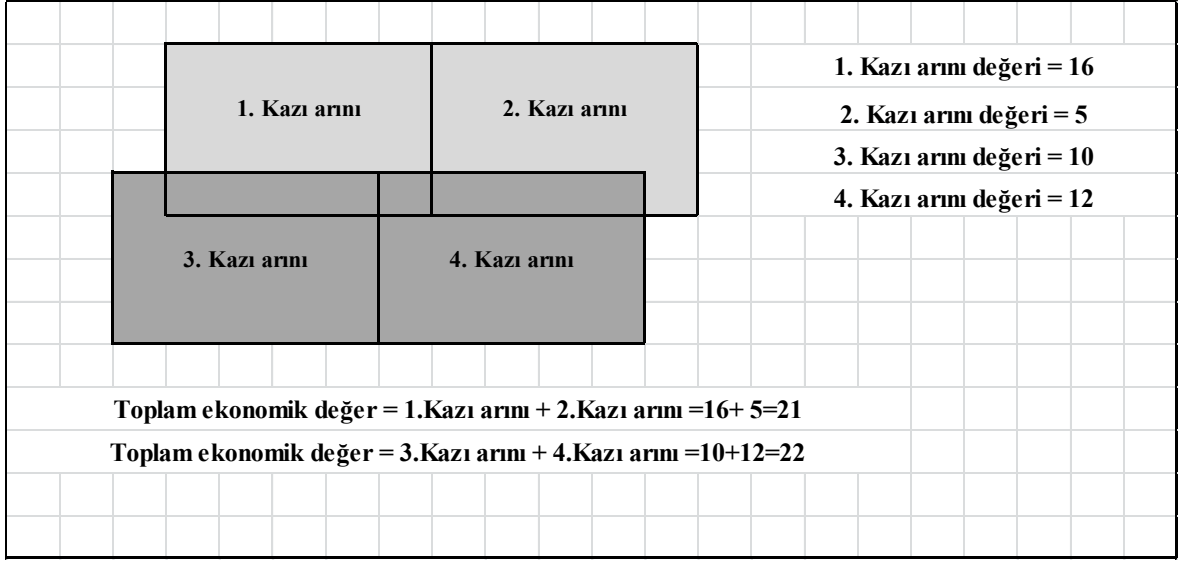


a



b

Şekil 3.23. Sens ve Topal yaklaşımı için kullanılan a) bir test test blok modeli b) bu modelin optimize edilmiş kazı arını tasarımı (Sens ve Topal'dan, 2009).



Şekil 3.24. Sens ve Topal yaklaşımının optimizasyonda işlemindeki problemi

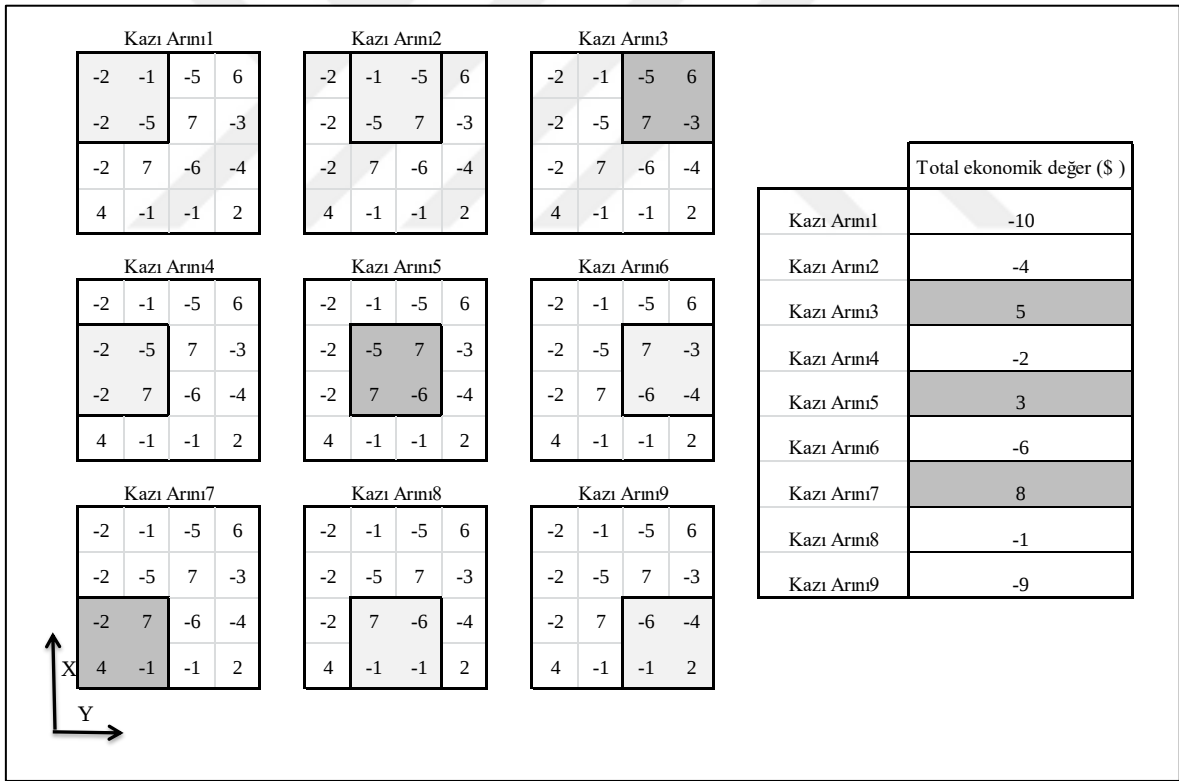
Topal ve Sens (2010), kazı arını seçim sırasını kullanıcının tercihiine bıraktığından dolayı oluşan dezavantajı gidermek için, önceki çalışmaya (Sens ve Topal, 2009) yeni bir kriter daha eklemiştir. Bir önceki çalışmada farklı kriterlere göre kazı arınlarını seçmeden önce, olası her kazı arının etrafında bir bürüm oluşturmuşlardır. Sonra bürümün içerisinde yer alan tüm kazı arınlarının değeri toplanmış ve toplam kazı arını sayısına bölünerek ortalama bir değer bulunmuştur. Bu ortalama bürüm değeri olası her kazı arını için kazı arını listesine eklenmiştir. Geliştirilmiş yeni çalışmada kazı arınlarını seçilirken, artık onun en yüksek ortalama bürüm değerine de sahip olup olmadığını kontrol edilmiştir. Seçim esnasında ortalama bürüm değerinin kullanılmasında, algoritmanın optimum kazı arını kombinasyonu seçmesine yardımcı olması amaçlanmıştır.

3.4.4. Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımı

Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b)' nin geliştirdiği algoritma, optimizasyon işlemine farklı boyutlarda blok içeren düzensiz denebilecek bir kaynak modeli, eşit boyutlu bloklar içeren bir modele dönüştürerek başlamaktadır. Ardından düzenlemiş olduğu bu jeolojik modeli, verilen ekonomik parametreler ile bir ekonomik blok modele dönüştürmektedir. Ekonomik blok modeli girdi olarak kullanarak, istenilen kazı arını boyutlarında olası tüm kazı arınlarının bir setini oluşturmakta ve bu kazı arınlarına ekonomik değer, öz kütle, tenör gibi özellikler atamaktadır. Daha sonra, olası tüm kazı

arınlarını değerlendirmekte ve negatif değerli kazı arınlarını hesaplamalardan çıkararak bir set pozitif değerli kazı arını oluşturmaktadır

Şekil 3.25 bu süreci iki boyutlu basit bir örnek ile anlatmaktadır. Örnekte ekonomik bir blok modelin 4 satır 4 sütundan oluşan bir kesiti gösterilmekte ve blokların ekonomik değerleri her bloğun içerisinde ayrıca ifade edilmektedir. Bu model üzerinde kazı arını boyutu sabit tutulmuş ve X ve Y yönünde sırasıyla iki blok olarak belirlenmiştir. Ardından, kazı arınları ardışık bir sırayla ele alınmış ve dokuz olası kazı arını oluşturulup bunların ekonomik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan kazı arınlarının değerleri şekillerin yanındaki listede görülebilmektedir. Tüm bu kazı arınları içerisinde, yalnızca 3, 5 ve 7 numaralı kazı arınları pozitif ekonomik değere sahiptir. Bu durumda belirlenen üç pozitif değerli kazı arını olası dokuz kazı arını arasından seçilmiştir.

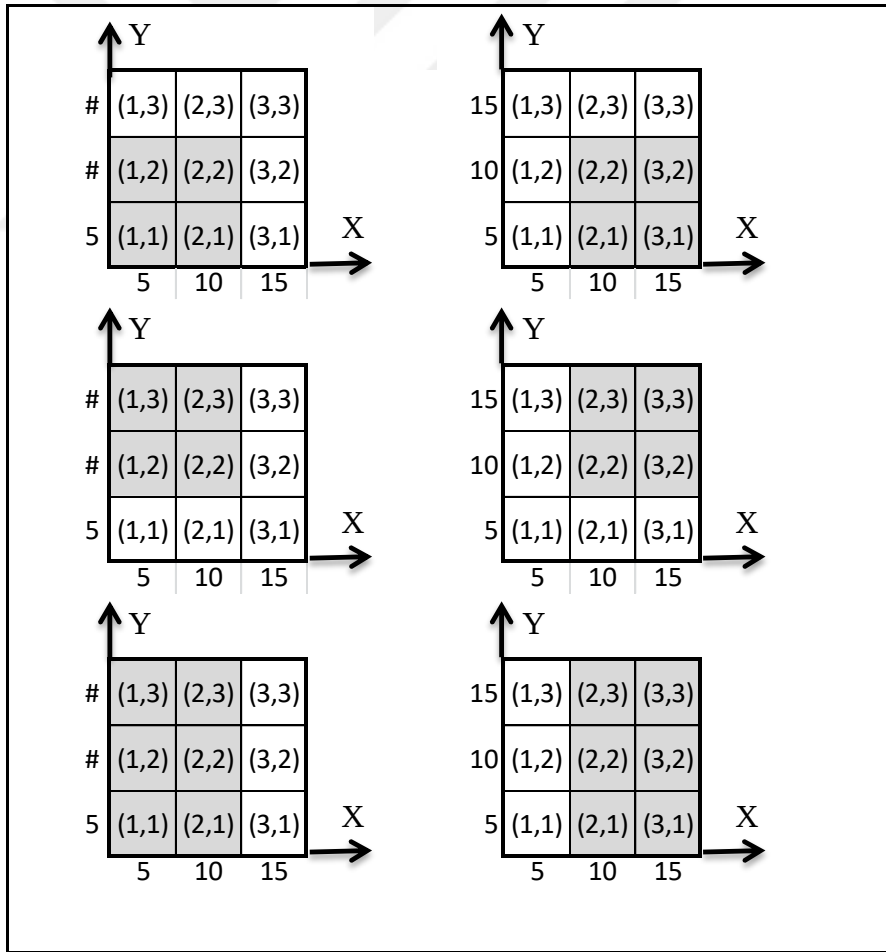


Şekil 3.25. İki boyutlu bir örnek için dokuz olası kazı arınının oluşturulması.

Algoritma daha sonra pozitif değerli kazı arınlarının seti üzerinde, verilen maden senaryoları için kazı arınlarının üst üste örtüşmediği farklı çözümler üretmektedir. Olası çözümler arasından en yüksek ekonomik değere sahip olanı seçmekte ve bu seçimi görselleştirmektedir. Burada ele alınan maden senaryoları; değişken boyutlarda ki kazı

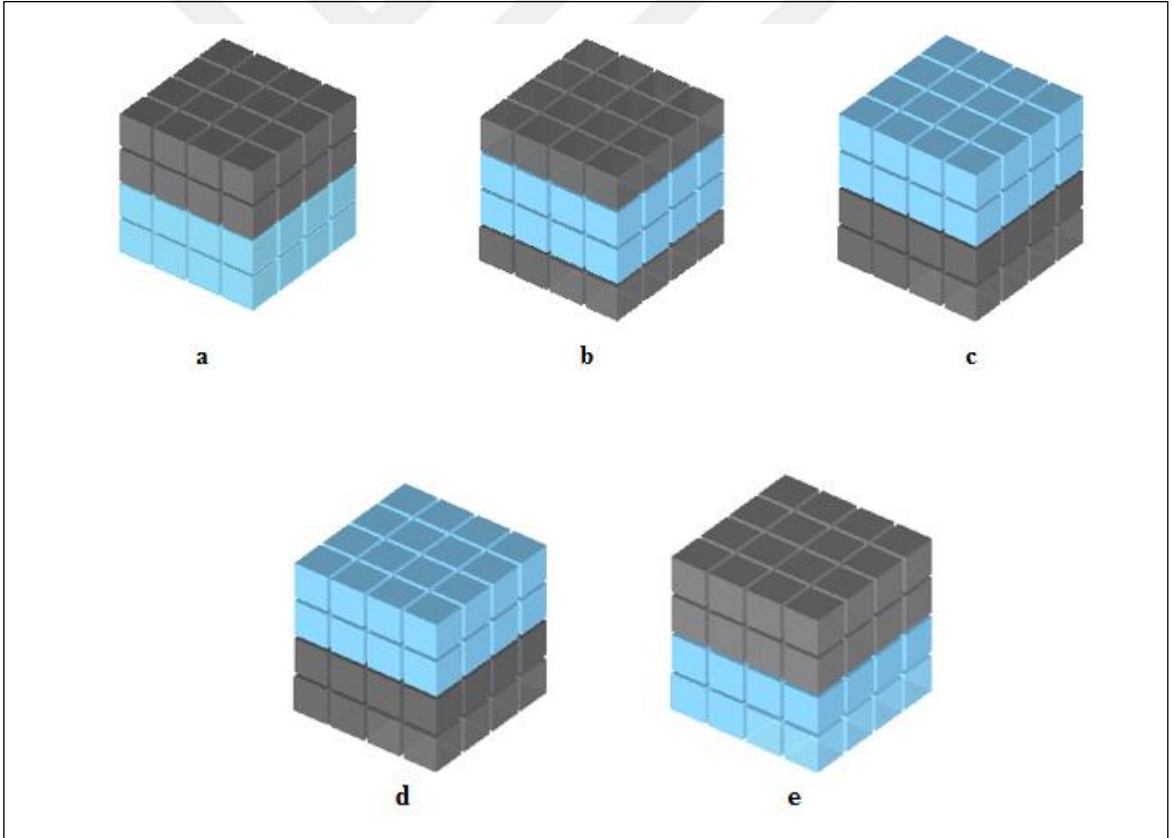
arınlarının, maden üretim katlarının, topukların tasarımını içermektedir. Bunlara ek olarak algoritma, optimizasyon işlemi tamamlandıktan sonra kazı arını şekillendirici olarak adlandırılan bir süreç ile nihai şekli düzenlenebilmektedir. (Sandayaneke, 2014).

Algoritma kazı arını sınırını oluşturma işlemleri esnasında öncelikle, değişken kazı arını boyutlarının olduğu maden senaryosu ele alabilmiştir. Farklı boyutlarda kazı arını oluşturma işlemini gösteren ilgili bir örnek, Şekil 3.26’ da dokuz bloktan oluşan iki boyutlu bir blok model kullanarak ifade edilmiştir. Model, X ve Y yönünde sırayla 3’ er bloktan oluşmakta ve hücrelerin içerisinde blokların konumlarını göstermektedir. Kazı arını boyutları bu model için 2×2 ve 2×3 olarak belirlenmiştir. Sonuçta gösterilen hipotetik örnek için, dört tanesi 2×2 ve iki tanesi 2×3 boyutlarında olmak üzere altı olası kazı arını oluşturulmuş ve kazı arını oluşturulan bloklar koyu bir renkle gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Değişken kazı arınlarının oluşturulması.

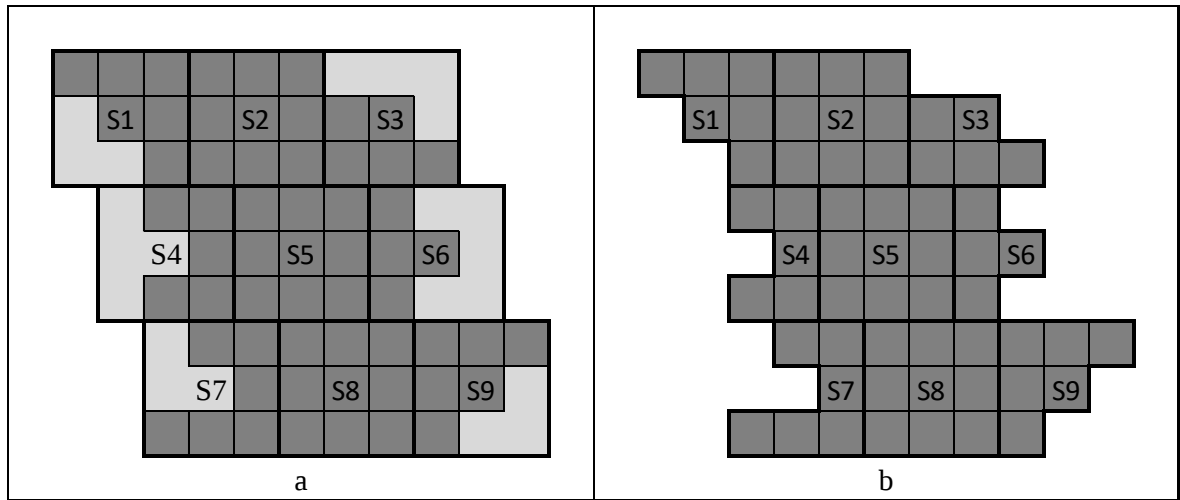
Kazı arını sınırının optimizasyonunda, bir diğer maden senaryosu olan maden üretim katlarının tanımı da algoritmaya dahil edilebilmiş ve tanım “kazı yüksekliği eşittir kat yüksekliği” olarak yapılmıştır (Sandayaneke, 2014). Böylece algoritma kazı arınlarını, blok yükseklik aralığından ziyade kazı arını yükseklik aralığına göre oluşturmuştur. Şekil 3.27’ de $5 \times 5 \times 2$ kazı arını boyutunu kullanarak farklı yükseklik parametrelerine göre kazı arınlarının oluşturulması gösterilmektedir. Kazı arınların blok yükseklik aralığına göre oluşturulduğu durum Şekil 3.27.a, 3.27.b ve 3.27.c’ de ifade edilmiştir. Şekil 3.27 d ve 3.27.e’ de ise kazı arınlarının, tanımlanmış bir kat yükseklik aralığına göre oluşturulduğu durum gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, ilk durumda üç olası ve son durumda iki olası kazı arını oluşturulabilmiştir. Sandayaneke (2014) tarafından, bu durumun algoritmanın çözümünde azaltılmış sayıda kazı arını içerip, çözüm süresini kısaltılabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 3.27.a, b., c., d., e. Z eksenı boyunca kazı arınlarının kat bazında ve blok bazında oluşturulmasının karşılaştırılması.

Bunlara ek olarak, algoritma gereken durumlarda topukların oluşturulabileceği alanların sağlanmasına olanak sağlayabilmiştir. Tasarım esnasında bu maden senaryosu, yeraltı üretim yöntemlerinde hazırlık işlemleri için gereken topukların durağanlığının

artırılması durumuna yardımcı olabilecektir. Son olarak optimum düzenlemelerden sonra, cevher kütle modelinin düzensiz sınırlarını takip eden kazı arını şekillendirici, bir başka maden senaryosu olarak algoritma tarafından tanımlanabilmiştir. Şekil 3.28.a bu durumu cevher (koyu gri) ve pasa blokları (açık gri) içeren iki boyutlu bir örnek üzerinde göstermektedir. Kazı arını boyutu X ve Y düzlemleri için 3 blok olacak şekilde sabitlenmiş, böylece dokuz kazı arını oluşturulmuştur. Şekil 3.28.a'da görüleceği üzere, kazı arınlarının sınırı toplam ekonomik değeri azaltacak pasa bloklar içermektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için, kazı arını şekillendirici pasa blokları kazı arınlarının sınırından kaldırmak ve sınırı yeniden oluşturmak için tanımlanmıştır (Şekil 3.28.b).



Şekil 3.28. Sunulan örnek için a. Optimum kazı arını sınırı b. Yeniden düzenlenmiş kazı arını sınırı

Sandanayake vd. (205.a, 2015.b)'nin geliştirdiği bu sezgisel yaklaşım, yeraltı üretim yöntemini kullanan madenler için kazı arını tasarım problemini çözmeye çalışmaktadır. Yaklaşım değişken kazı arını boyutlarını topukları hesaba katarak veya katmayarak ele almakta, işletmenin ekonomik değerini en büyükmeye çalışıp, istenen maden ve jeoteknik kısıtlamaları sağlamaktadır Yöntem tek ve örtüşmeyen kazı arınları oluşturmaktadır (Sandanayake, 2014). Bunlara rağmen, optimal çözümü bulmak için algoritmanın tüm olası tek kombinasyonları değerlendirmesi gerekmektedir. Değerlendirme geniş skaladaki uygulamalarda önemli ölçüde bilgisayar gücü gerektirmektedir. Bu da algoritmanın optimal çözümleri, daha geniş veri setlerinde bulmasını sınırlamaktadır. Ek olarak algoritma, yalnızca bir tür mineral tipi içeren kaynak

modeller için çözüm oluşturmaktadır. Algoritmanın çoklu mineral yataklarda kullanılması için çalışmanın ilerletilmesi gerekmektedir.

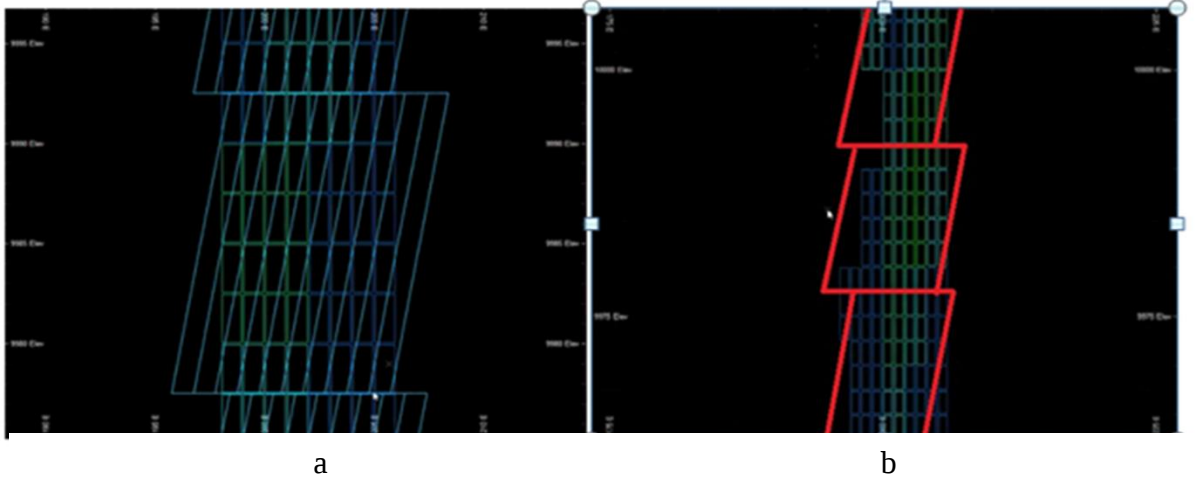
3.4.5. MSO (Mineable Shape Optimisier) tasarım aracı

İşletilebilir maden şekillerinin optimizasyonunu yapan bu tasarım aracı, maden kaynağının ekonomik değer veya tenör ve yoğunluk değerlerini sağlayan bir blok modeli girdi olarak kullanmakta, ardından sunduğu farklı optimizasyon yöntemlerinden birini bu model üzerinde uygulamaktadır. Üç farklı seçeneği olan optimizasyon yöntemleri ise sırayla; sınır tenör değer optimizasyonu (en çok kullanılan yöntem), sınır ekonomik değer optimizasyonu ve hesaplanmış ekonomik değer optimizasyonudur. Sınır tenör değerinin kararı, optimal kazı arını tasarımını ve maden planlama işlemlerinin sonraki optimizasyon basamaklarını doğrudan etkiler. Bu sebeple bu tenör değerinin çok iyi tanımlanmış olması gerekmektedir. MSO tasarım aracı ayrıca optimal sonuçları elde etmek için kazı arını genişliği, pasa topuk genişliği gibi teknik kısıtları hesaba katabilmekte ve bunları final kazı arınının eğim ve doğrultusu boyunca da uygulayabilmektedir (Keane, 2010).

DATAMINE yazılımının bu tasarım aracı blok modeli kullanarak birbirini takip eden kesitlerde, tavanda dört ve tabanda dört nokta ile tanımlanan dizgiler oluşturmakta ve bu dizgileri birbirine bağlayarak bir tel kafes şekli çıkarmaktadır. Bu şekil blok model boyunca, içerisinde işletilebilir cevher şekillerinin oluşturulacağı hacmi tanımlamakta ve taslak şekil olarak adlandırılmaktadır. Kazı arını yüksekliği ve genişliğine eşit olarak kabul edilen kat ve kesit aralığı, bu taslak şekilde belirlenmektedir. Ayrıca MSO tasarım aracı, taslak şekil oluşturulurken cevher kütlelerinin eğim ve doğrultu bilgilerini içeren oryantasyon ayarlarını da yapmaktadır. Ayarlama doğrudan optimal kazı arını şekillerinin sonuçlarına etki ettiğinden oldukça kritiktir.

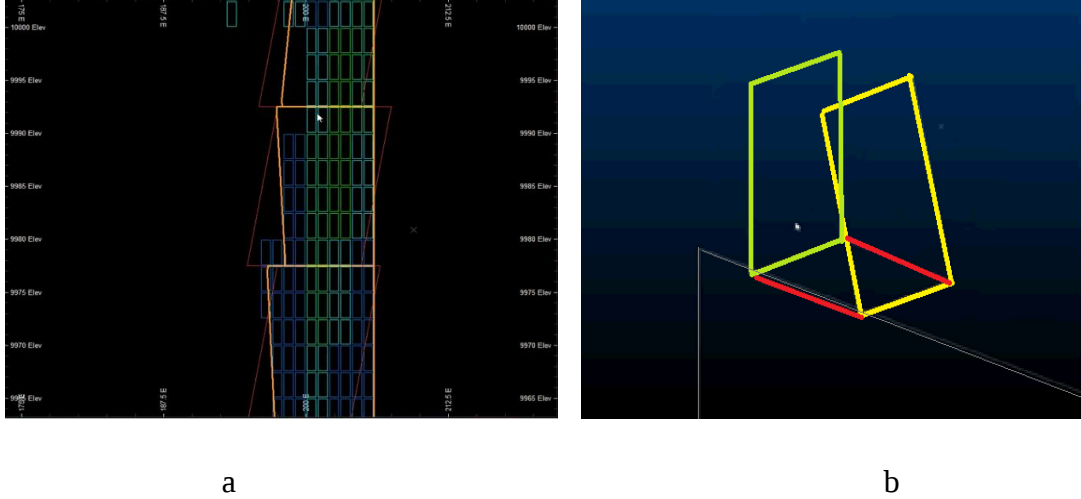
Taslak şekil içerisinde; öncelikle yaklaşık boyut, konum ve temel kazı arını şekilleri (çekirdek şekil), kullanıcı tarafından ayarlanan bazı tasarım sınırlarına uyarak belirlenmektedir. Bu çekirdek şekil, cevher kütlelerinin bahsedilen eğim ve doğrultusu boyunca atanmış dilimler kullanılarak oluşturulmaktadır. Şekil 3.29 tipik bir dilimleme ve çekirdek şekli oluşturma işlemini, örnek bir kesit şekli kullanarak göstermektedir. Şekil 3.29.a' da blok model içerisinde iç bir prosedür kullanılarak oluşturulan 80° dalım açılı

dilimler mavi ile gösterilmekte, Şekil 3.29.b’ de ise bu dilimler kullanılarak oluşturulan çekirdek şekiller gösterilmektedir. MSO sınır tenörün üzerinde, dilimlerin optimal birleşiminden çekirdek şekiller oluşturmayı hedefler ancak bu şekiller oldukça basit ve yalnızca potansiyel kazı arınları ve topukları tanımlayabilmektedir.



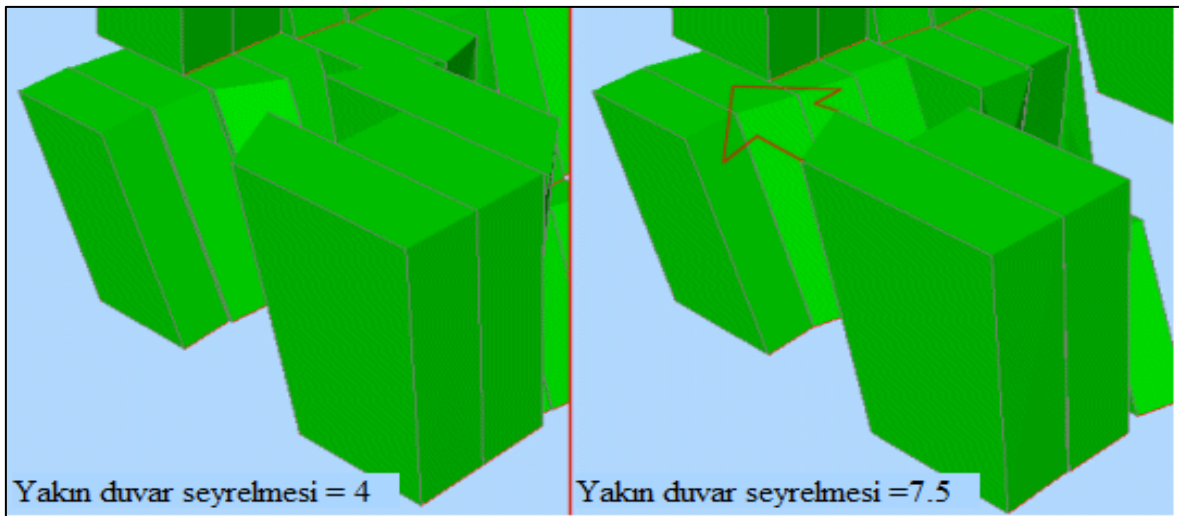
Şekil 3.29. MSO tasarım aracının **a) Dilimleme** **b) Çekirdek şekil oluşturma** uygulamalarının kesit görüntüsünü veren bir örnek.

Çekirdek şekil oluşturulduktan sonra, ikinci adım da bir tavlama işlemine başlanmaktadır. Burada çekirdek şekiller kazı ve topuk geometri sınırlarına uyan final kazı arını şekline tavlanylacaktır. Optimizasyonun bu basamağı, jeolojiye tam olarak uyan pratik kazı arını şekilleri oluşturabilmektedir. Burada sabit kazı arını yüksekliği ve enlemesine yönde kazı arını boyu dikkate alınarak köşe noktaları hareket ettirilmektedir. Bu işlemin sonucu iki boyutlu bir kesitte Şekil 3.30.a’daki gibi bir örnekle gösterilebilir. Örnekte turuncu şekiller kazı arını kârını en büyükmek amacıyla cevher kütlesine en iyi şekilde uyum sağlamaya çalışmaktadır. Takip eden Şekil 3.30.b ise bir kazı arınının ön, arka ve altı gösterilmekte ve sınır tenör değerini yakalayan en büyük kazı arını şekli aranmaktadır. MSO optimizasyon işlemini blok model koordinatları boyunca uygulamaktadır, bu döndürülmüş blok modeller içinde geçerlidir.



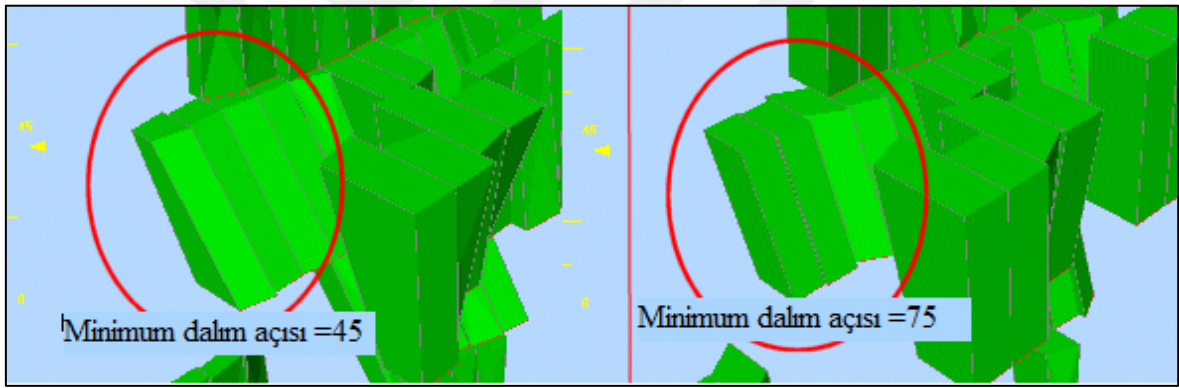
Şekil 3.30. Kazı arını tavlama işleminin **a)** 2 boyutta ki **b)** 3 Boyutta ki görsel sonuçlarını veren bir örnek.

Bu optimizasyon aracı kazı arını tasarım hesaplamalarında, oluşturulan kazı arını şekilleri için önemli etkiye sahip bir çok parametre kullanmaktadır. İşletilebilir cevher şekillerinin minimum ve maksimum genişliği ve yan yana kazı arınları arasında minimum pasa topuk genişliği bu geometrik parametrelerinin en önemlilerindendir. Dahası, işletilebilir cevher hacimlerinin yakın kenarında duvar seyrelmesine izin veren yakın duvar seyrelmesi ve uzak kenarlarında izin verilen uzak duvar seyrelmesi de bu parametreler arasındadır. Şekil 3.31’ de yakın duvar seyrelme oranlarının farkını ortaya koyan bir örnek gösterilmektedir. Örnek yakın duvarın kazı arını merkezinden uzaklaştırılmasının etkisini, seyrelme oranının sağdaki şekilde artırılmasıyla ortaya koymaktadır.



Şekil 3.31. Kazı arını tasarımlarında dikkate alınan yakın duvar seyrelme oranlarını gösteren bir örnek (Datamine’dan, 2016b)

Bunlara ek olarak, herhangi çekirdek şekil için minimum ve maksimum dalım açıları da kazı arını tasarım hesapları için kritik parametrelerdir. Eğer bu açılar yanlış seçilirse, olası tüm kazı arınları tasarımdan kaldırılabilir. Şekil 3.32’ de farklı minimum dalım açılarını gösteren bir örnek verilmiştir. Maksimum doğrultu açısının değişimi de hesaplamalarda dikkate alınan bir diğer önemli parametredir ve kazı arını şeklinin yan kenarlarının üst ve alt kenarı arasındaki açıdaki maksimum farkı göstermektedir. Bununla beraber maksimum yan uzunluk oranı da (side length ratio) kazı arını tasarımlarında dikkate alınmakta ve bir kazı arını şeklinin ön ve arka yüzünün üst ve alt kenarlarının oranının üst sınırıyla ifade edilmektedir. Örneğin maksimum oran '3' olarak ayarlanırsa üst kenar, alt kenar genişliğinin 3 katından daha fazla olmayacaktır. Son olarak, herhangi kazı arınına dahil edilebilecek maksimum pasa oranı da tasarımlar için bir diğer kontrol parametresidir.



Şekil 3.32. Kazı arını tasarımlarında dikkate minimum dalım açısını gösteren bir örnek (Datamine’dan, 2016b)

MSO tasarım aracı ekonomik değeri en büyükleen optimal kazı arını ve topuk şekillerini oluşturmak için kazı arını geometrisi sınırlamaları, jeolojik ve jeoteknik kısıtlamaları göz önünde bulunduran binlerce iterasyon gerçekleştirip bunları değerlendirebilmektedir (Alford Mining Systems, 2016). Bu tasarım aracı tavan ve taban taşı eğimlerine, kazı arını genişliklerine, paralel kazı arınları arasında ki topuk kısıtları gibi birçok sınırlamanın tanımlanmasına izin veren oldukça detaylı bir optimizasyon işlemidir. Daha önemlisi bu optimizasyon aracı geniş bir yelpazede bir çok yeraltı maden üretim yöntemi için kullanılabilmekte ve masif, dikey ve düşey yataklar için çözümler sağlayabilmektedir. Tüm bunlara rağmen, tasarımın büyük bir kusuru bulunmaktadır. Çalışma maden planlama ve tasarım işlemlerinin en başında bir sınır tenörün

belirlenmesini gerektirir, ancak bu durum sonuçların otomatik olarak optimal olmamasına neden olmaktadır (Little, 2012). Sonuç olarak MSO direk final kazı arını tasarımında kullanılmaktansa, maden tasarım işlemleri esnasında bir rehber olarak kullanılmalıdır (Wang ve Webber, 2012).

Bu çalışmada, incelenen madenin verisi üzerinde, öncelikle Hareketli Kazı Arını algoritmasının DATAMINE Software içerisinde yer alan ve MRO olarak adlandırılan araç vasıtasıyla uygulanması tamamlanmıştır. Bu uygulamayı MINESIGT yazılımı içerisinde, MSSTOPE ara yüzü aracılığıyla Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının uygulanması takip etmiştir. Bu iki uygulamanın ardından sırasıyla Sens ve Topal (2009) ve Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) yaklaşımları ticari olmayan ve yine yazarların kendileri tarafından geliştirilmiş yazılımlar aracılığıyla blok model üzerine uygulanmıştır. Tüm bunların ardından DATAMINE yazılımı içerisinde yer alan ve MSO olarak adlandırılan yeni aracın uygulanması gerçekleştirilmiştir. Tüm çalışmaların optimizasyon işlemleri için sahaya ait ekonomik blok model ve kazı arınına ilişkin jeoteknik kısıt ve boyut gibi bilgiler girdi olarak kullanılmaktadır. Daha sonra çalışmalar, kendi optimizasyon teknikleriyle optimum olduklarını düşündükleri kazı arını sınırlarını tasarlamaya çalışmaktadırlar.

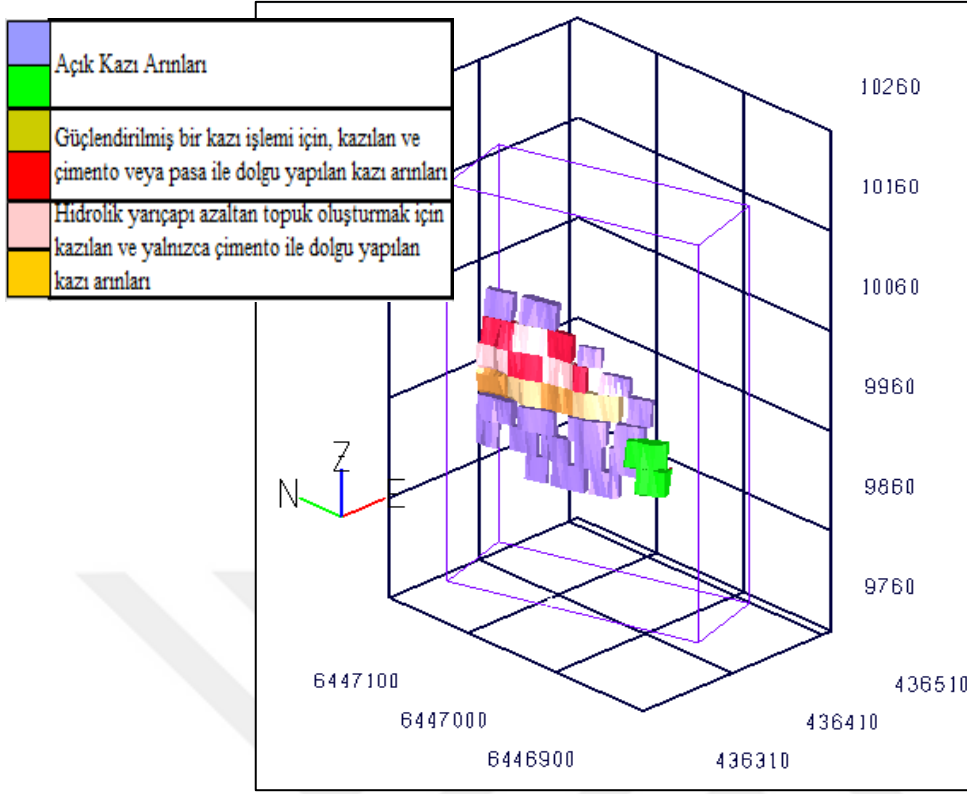
Bu çalışmaların uygulamalarından elde edilen sonuçlar birbiriyle ve madenden elde edilen kazı arını tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çalışmaların yeraltı maden planlama ve tasarım işlerinde uygulanabilirliği incelenmiş, becerileri ve sınırları tartışılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

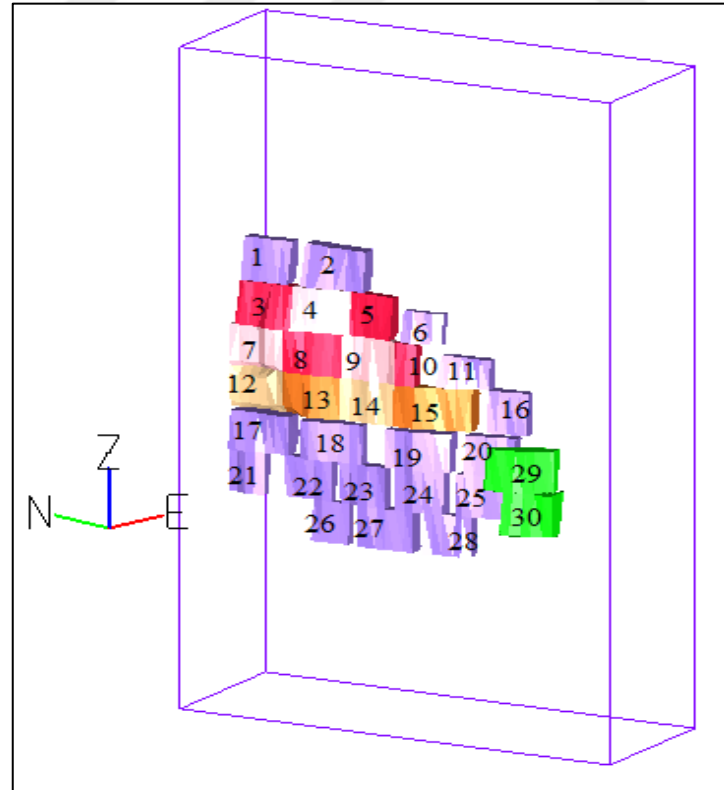
4.1. Madenin Manuel Kazı Arını Tasarımı

Tez çalışmasının uygulamasının yapıldığı madende nihai kazı arını sınırı, blok modele ve bir sınır değerine (cut-off) dayanarak sahada çalışan mühendisler tarafından klasik yöntemlerle tasarlanmıştır. Burada sınır değer, cevher yatağının metal ve özellikle altın cevherinin doğasını en iyi şekilde yansıttığı düşünülen Net İzabe Geliri (NİG) değerleri olmuştur. İncelenen maden çok metalli bir yatak olduğundan, her bloğun NİG değeri tüm metal tenörleri ve elbette verilerin sağlandığı yıla ilişkin metal fiyatları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin yanında madencilik ve cevher hazırlama maliyet değerleri de hesaba katılarak 140\$ NSR/ton sınır değeri cevher rezervinin nihai sınırını çizmek için belirlenmiştir.

Mühendisler kazı arınlarının uç bölümlerini tanımlamak için genellikle bitişik kesitlerde ana hatlar tasarlamış ve bunları bir tel örgü şekli ile birbirine bağlayarak üç boyutlu tasarımlar (kazı arınları) oluşturmuşlardır. Oluşturulan tasarımların tenör ve ekonomiklikleri değerlendirdikten sonra da, konumları ve şekilleri jeoteknik kısıtları da dikkate alarak en uygun şekilde bulunmaya ve nihai sınır oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu işlemler uzun bir deneme yanılma sürecinin ardından ancak aylar sonra tamamlanabilmiştir. Tasarımlar buna rağmen, kesitler arasındaki blok model içeriğine bakılmaksızın tek bir dikey düzlemdeki blok model görüntüsüne dayandığından çoğu durumda optimal olamamaktadır. Klasik yöntemlerle tasarlanmış kazı arınları Minesight yazılımına taşınmış ve sonuçlar Şekil 4.1’ deki gibi gösterilmiştir. Görsel değerlendirmenin yanı sıra, Şekil 4.2’ de sırası verilen kazı arınlarına ilişkin değerler Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.



Şekil 4.1. Verileri sağlanan bölge için şirketin tasarladığı kazı arınları



Şekil 4.2. Şirket tarafından tasarlanmış kazı arınlarının numaralandırılması

Çizelge 4.1. Şirket tarafından tasarlanmış kazı arınlarının ekonomik bilgileri

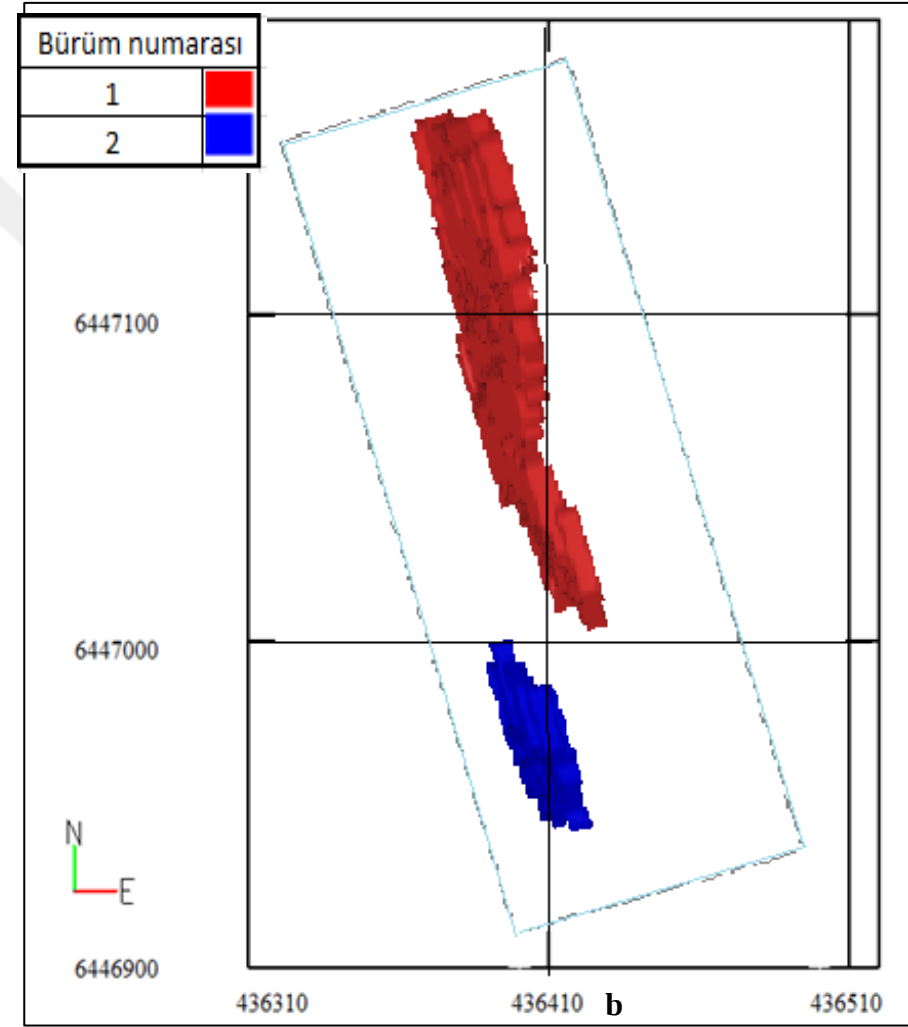
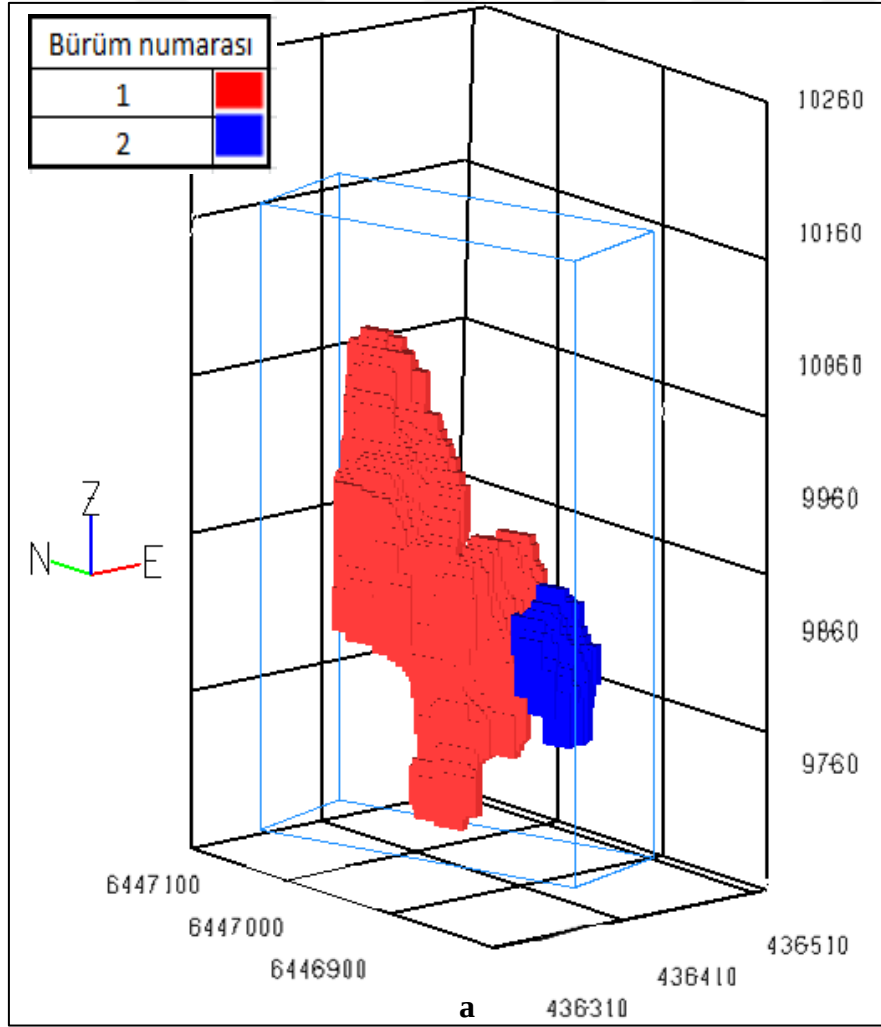
Kazı Arını	EVAL (\$)	TONAJ (t)
1	1 604 502,33	10 192,64
2	1 456 671,13	15 659,06
3	3 568 555,92	16 378,64
4	3 969 006,22	16 688,49
5	836 906,31	10 268,42
6	132 928,30	3 524,02
7	5 407 931,58	17 645,99
8	6 373 629,41	15 508,37
9	937 375,81	12 047,57
10	85 752,32	3 523,31
11	263 852,88	6 594,50
12	3 314 724,00	16 924,69
13	2 703 653,31	15 508,06
14	916 680,21	11 378,58
15	690 245,92	17 758,81
16	211 320,18	6 901,86
17	1 402 304,35	16 424,09
18	1 461 578,55	15 229,11
19	1 716 212,48	11 447,98
20	222 228,29	7 861,45
21	27 869,91	6 431,29
22	269 193,28	7 945,14
23	628 893,89	8 384,63
24	925 588,33	9 234,24
25	193 804,46	8 774,21
26	159 575,05	5 726,22
27	1 171 976,64	11 130,35
28	682 188,79	9 404,83
29	1 727 932,19	15 005,87
30	1 147 359,59	11 184,93
TOPLAM	44 210 441,63	340 687,34

4.2. Hareketli Kazı Arını Algoritmasının Uygulanması

Hareketli Kazı Arını algoritmasının uygulanması DATAMINE Studio RM (2015) yazılımıyla sağlanmıştır. Bu yazılımın içerisinde yer alan MRO tasarım aracıyla bölüm 3.1.4.1.' de anlatılan ekonomik blok model analiz edilmiştir. Algoritma optimizasyon işlemleri için bir sınır ve baş tenöre ihtiyaç duymaktadır. Burada her iki tenör değeri de aynı tutulmuş ve 3,85 g/t' a ayarlanmıştır. Optimal işletilebilir üretim alanlarının ana hattını çizmek için optimizasyon yöntemlerinden, tenörün en büyükleme seçeneği ele alınmıştır. Bu girdi ve optimizasyon parametrelerine, kazı arını boyutları Çizelge 3.1' deki gibi dahil edilmiş ayrıca kazı arını boyutunun blok model üzerindeki hareket ettirilme miktarı (artış miktarı) her yönde bir blok boyutunda ($1 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$) tutulmuştur.

Optimizasyon işlemlerinin sonunda Şekil 4.3' de gösterildiği gibi, kazı arınlarından ziyade bürüm numarasıyla renklendirilmiş iki farklı bürüm oluşturulmuştur. Bu bürümler algoritmada en kârlı bölgeyi ifade eden minimum bürümlerdir ve içerisinde çok sayıda üst üste oluşmuş kazı arınları içermektedir. Tasarım sonunda elde edilen bilgiler Çizelge 4.2' de özetlenmiş ve şirketten alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çizelgede görüldüğü üzere MRO tasarım aracı yardımıyla uygulanan Hareketli Kazı Arını algoritmasının hesapladığı kâr (AUD \$), şirketin sağladığı kazı arını tasarımlarından elde edilen kârdan yaklaşık olarak %3,135 daha düşük çıkmıştır. Bunun yanında iki bürümün toplam tonaj değeri çizelgede 705 684 ton olarak gösterilmektedir. Bu değer, şirketin hesaplamalarının neredeyse iki katıdır, çünkü yöntem üst üste örtüşen çok sayıda kazı arını içermekte ve tonajları tekrar tekrar hesaplamaktadır. Son olarak incelenen madene ilişkin çözüm uzun bir deneme yanılma sürecinden sonra elde edilmişken algoritma optimizasyon işlemini yaklaşık 2 dakikada bitirmiştir.

Algoritmanın uygulanması her ne kadar kolay ve kısa sürede tamamlanabiliyor olsa da, kazı arını sınırlarının tasarımları yapılırken kazı arını boyutu ve sınır tenörler dışında herhangi madencilik kısıtı dikkate alınmamaktadır. Bu sebeple sonuçlar optimum kazı arınlarının sınırından ziyade, sadece ekonomik olduğunu düşünülen alanlar etrafındaki bürümlerini içermektedir. Dahası bu bürümler üst üste oluşmuş çok sayıda kazı arınından oluştuğundan sonuçlar gerçek hesaplamalardan daha kârlıymış gibi görünmemektedir. Eski bir yöntem olarak kalan bu algoritma, ekonomik değerin en büyükleme hedefini de



Şekil 4.3. MRO tasarım aracı yardımıyla uygulanan Hareketli Kazı Arını algoritmasının sonuçlarının a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü

taşımadığından, sonuçlar optimalden oldukça uzakta kalmıştır. Son olarak bu algoritma, ilerdeki maden tasarımları için bir yol gösterici olsa da geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır.

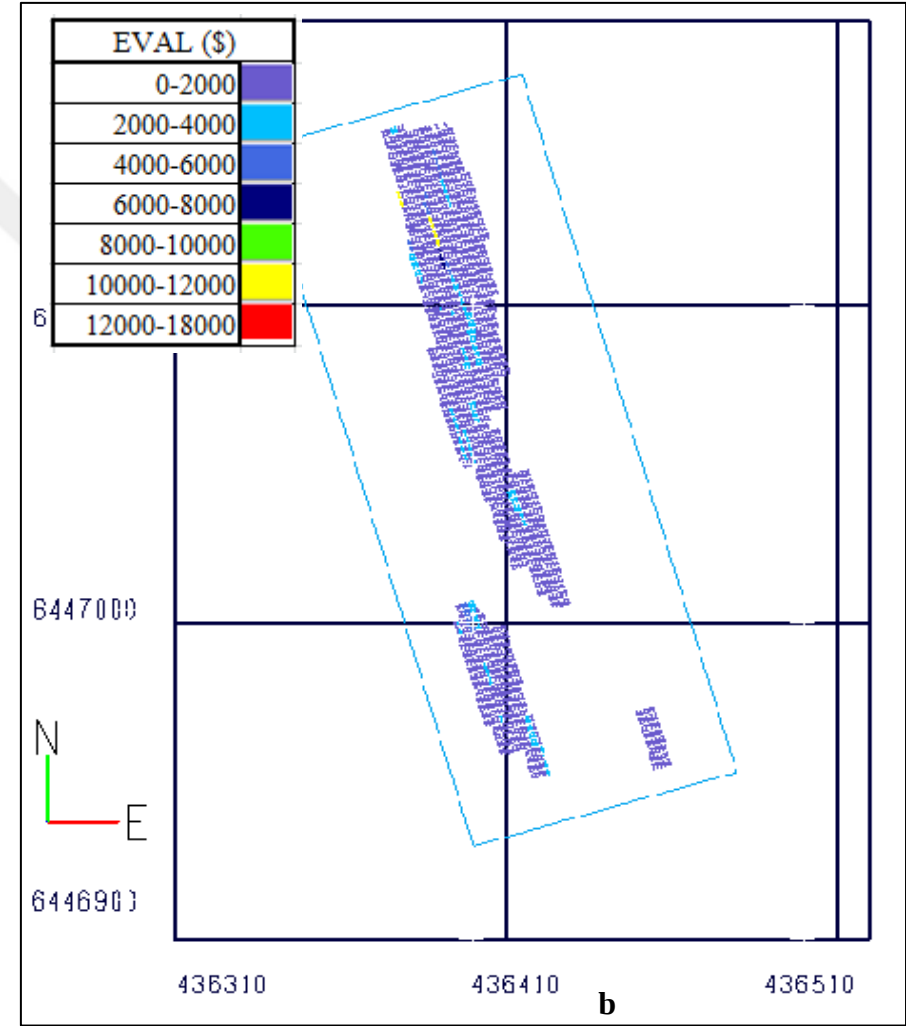
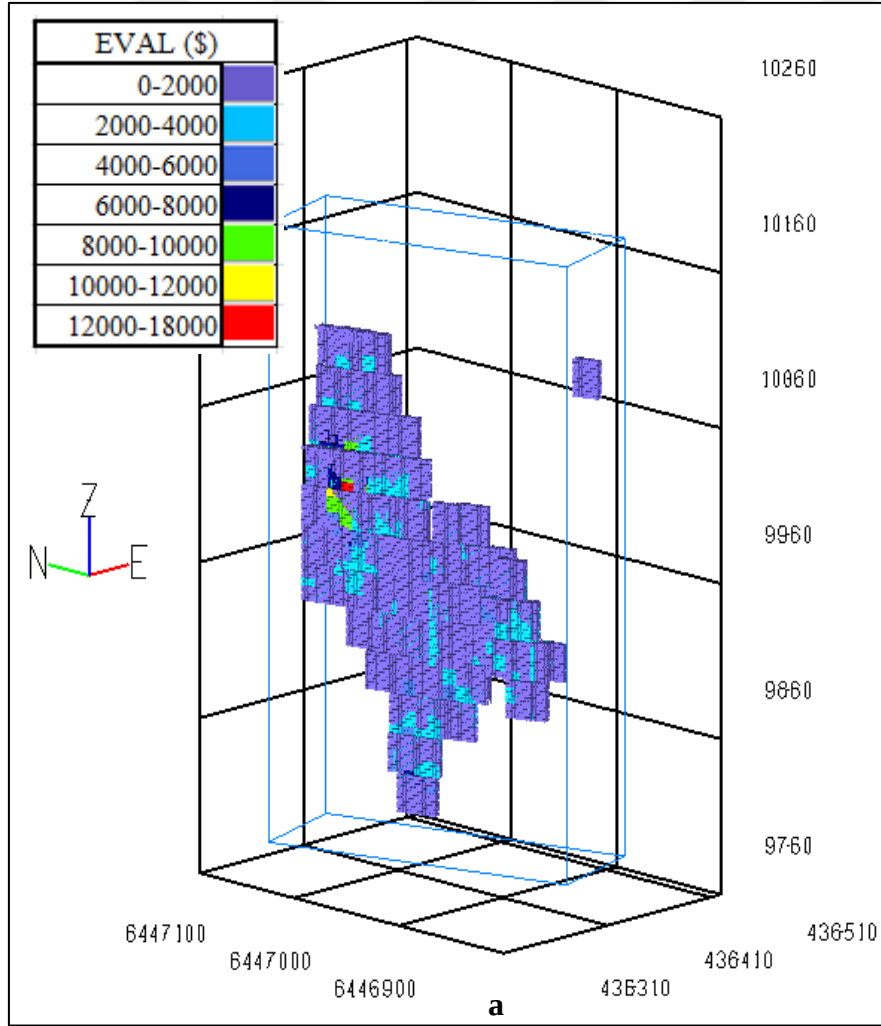
Çizelge 4.2. MRO tasarım aracı yardımıyla uygulanan Hareketli Kazı Arını algoritmasının sonuçları

Parametre	İncelenen madenden alınan sonuçlar	Hareketli Kazı Arını algoritmasından elde edilen sonuçlar
Kazı Arını Sayısı	30	-
Tonaj (t)	340 687	705 684
Kâr (\$)	44 210 442	42 826 547
Çözüm süresi (sa:dak:sn)	-	00:02:13

4.3. Maksimum Değerli Komşuluk Algoritmasının Uygulanması

Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının uygulanması MINESIGHT yazılımı içerisinde yer alan MSSTOPE tasarım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. MSSTOPE yeraltı madenlerinin değerlendirilmesi ve üretimin planlaması işlemlerini yapabilen bir tasarım aracıdır. Bu yazılım aracılığıyla uygulaması yapılan Maksimum Değerli Komşuluk algoritması, incelenen madenin ekonomik modeli üzerinde çalışmaktadır. Bunun yanında optimizasyon işlerini tamamlayabilmek için MSSTOPE bir de kazı arını boyutlarına ihtiyaç duymaktadır. Ancak diğer algoritmalarından farklı olarak burada kazı arını boyutlarının blok sayısı cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden Çizelge 3.1’ de X, Y ve Z yönünde sırayla 6 m × 20 m × 25 m boyutlarında verilen kazı arınları, blok modeldeki blok boyutlarına (1 m × 2,5 m × 2,5 m) bölünmüş ve kazı arınları verilen yönlerde sırayla 6 × 8 × 10 blok sayısı ile ifade edilmiştir.

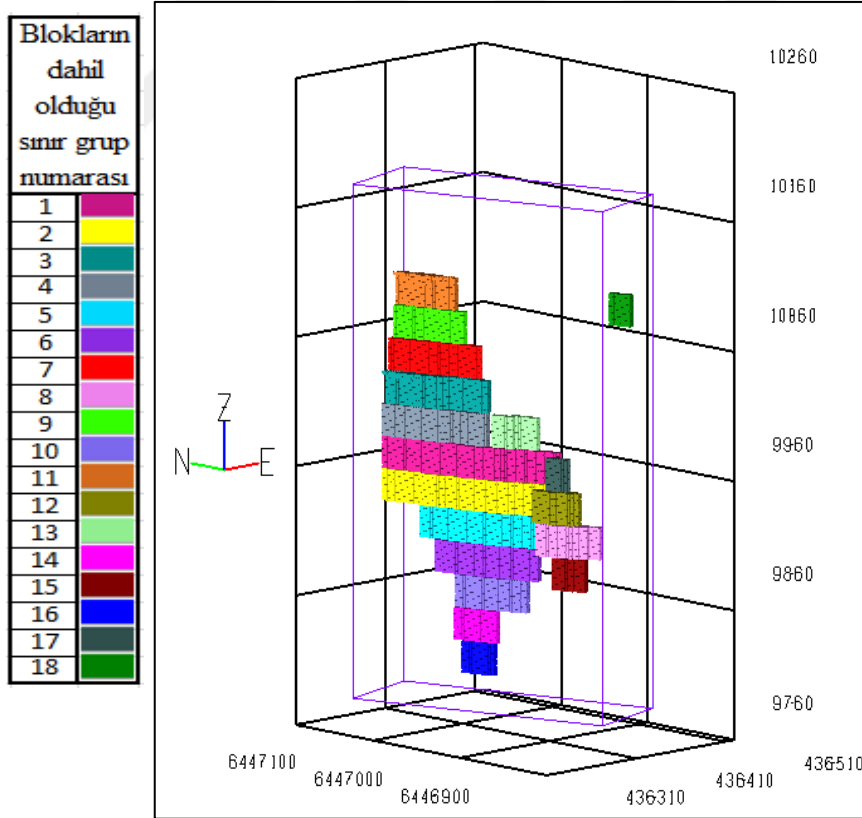
Optimizasyon işlemlerinin sonunda kazı arınlarının oluşturacağı bir sınırdan ise ekonomik ve fiziksel kısıtları sağlayan bir set blok oluşturulmuştur. Bu blok seti, blokların ekonomik değerleri ile birlikte Şekil 4.4’ de verilmiştir. MSSTOPE tasarım aracı algoritmanın hesaplamalarından sonra, ekonomik blok modelde her bloğa bir sınır ögesi atamaktadır. Bu sınır ögesi blokların dâhil olduğu bitişik blok gruplarının sayısını



Şekil 4.4. MSSTOPE tasarım aracı yardımıyla uygulanan Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının sonuçlarının blokların ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü

göstermektedir. İncelenen maden için sınırdaki bitişik blok grup sayısı 18 olarak belirlenmiştir. Gerçekte bu sayı madenlerde kazı arını sayısına tam olarak karşılık gelmemektedir. Ekonomik blok model, blokların dâhil olduğu grup numarası ile birlikte Şekil 4.5’ de gösterilmiştir.

Tasarım sonunda elde edilen bilgiler Çizelge 4.3’de özetlenmiş ve şirketten alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çizelgede görüldüğü üzere MSSTOPE tasarım aracı yardımıyla uygulanan Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının hesapladığı kâr (AUD \$), şirketin sağladığı kazı arını tasarımlarından elde edilen kâr ile neredeyse aynıdır. Algoritmanın uygulanmasıyla yaklaşık 580 932 tonluk bir bölgede kazı arını sınırının tasarlanması düşünülmüştür. Bu değer, şirketin hesaplamalarından biraz daha fazla çıkmıştır. Son olarak algoritma optimizasyon işlemini yaklaşık 2 dakika gibi çok kısa bir sürede bitirmiştir.



Şekil 4.5. MSSTOPE tasarım aracı yardımıyla uygulanan Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının sonuçlarının sınır grup numarası ile birlikte gösterilmesi

Çizelge 4.3. MSSTOPE tasarım aracı yardımıyla uygulanan Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasının sonuçları

Parametre	İncelenen madenden alınan sonuçlar	Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasından elde edilen sonuçlar
Kazı Arını Sayısı	30	18
Tonaj (t)	340 687	580 932
Kâr (\$)	42 826 547	44 998 078
Çözüm süresi (sa:dak:sn)	-	00:01:56

Algoritmanın uygulanması oldukça kolaydır. Bunun yanında madenlerin üretim katlarını tanımlayıp, kazı arını sınırının tasarımını bu katlar üzerinde gerçekleştirebilir. Ancak pratik madencilik uygulamaları için gereken kazı arını tanımını yapamamaktadır. Esasında algoritma, bölüm 3.4.2’de de anlatılan komşuluk değerlerini her blok için maksimum (optimum) değerle bulabilse de bunların birleşimden oluşacak tasarımda optimum sonuçları yakalayamamaktadır. Çünkü algoritma farklı yönlerden başladığında farklı sonuçlar oluşturmaktadır. Tüm bu sebeplerden algoritma sezgisel bir yöntem olarak kalmıştır.

4.4. Sens ve Topal Sezgisel Yaklaşımının Uygulanması

Sens ve Topal (2009) sezgisel yaklaşımının uygulanması Matlab yazılım paketi aracılığıyla sağlanmıştır. Sens (2008) bu yazılım ile blok model bilgilerini içeren çok boyutlu dizeleri kolayca oluşturup, değiştirebileceğini söylemiştir. Hareketli kazı arını ve Maksimum Değerli Komşuluk algoritmaları gibi burada da optimizasyon işlemleri için, incelenen madenin ekonomik blok modeli kullanılmıştır. En önemli girdi parametresi olarak Çizelge 3.1’ de X, Y ve Z yönünde sırayla 6 m × 20 m × 25 m olarak verilen sabit kazı arını boyutları kullanılmıştır. Bölüm 3.4.3’ de anlatılan kazı arını listesi oluşturulduktan sonra, birçok yöntem arasından kazı arınların azalan kâr sırasında seçilmesi yöntemi ele alınmıştır.

Algoritma optimizasyon işlemlerine farklı boyuttaki blokların tek bir boyuta dönüştürülmesi süreciyle başlasa da, incelenen madenin blok modeli zaten aynı boyuttaki

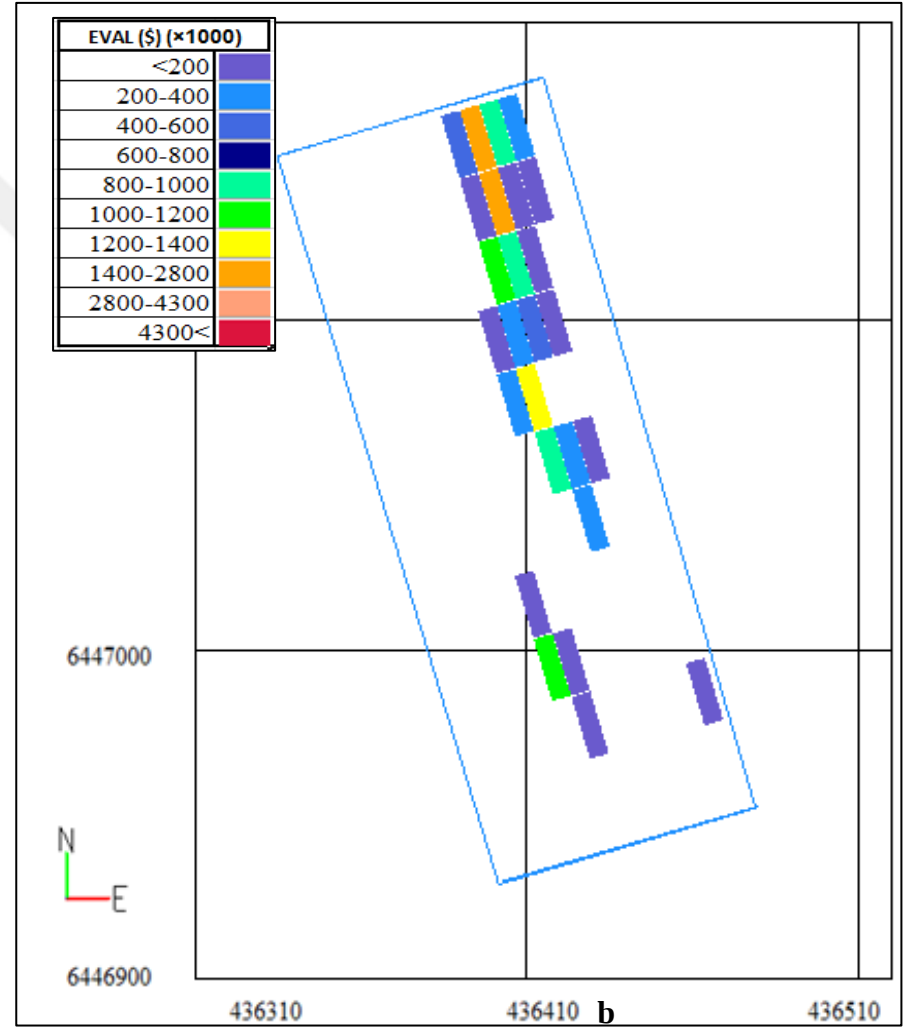
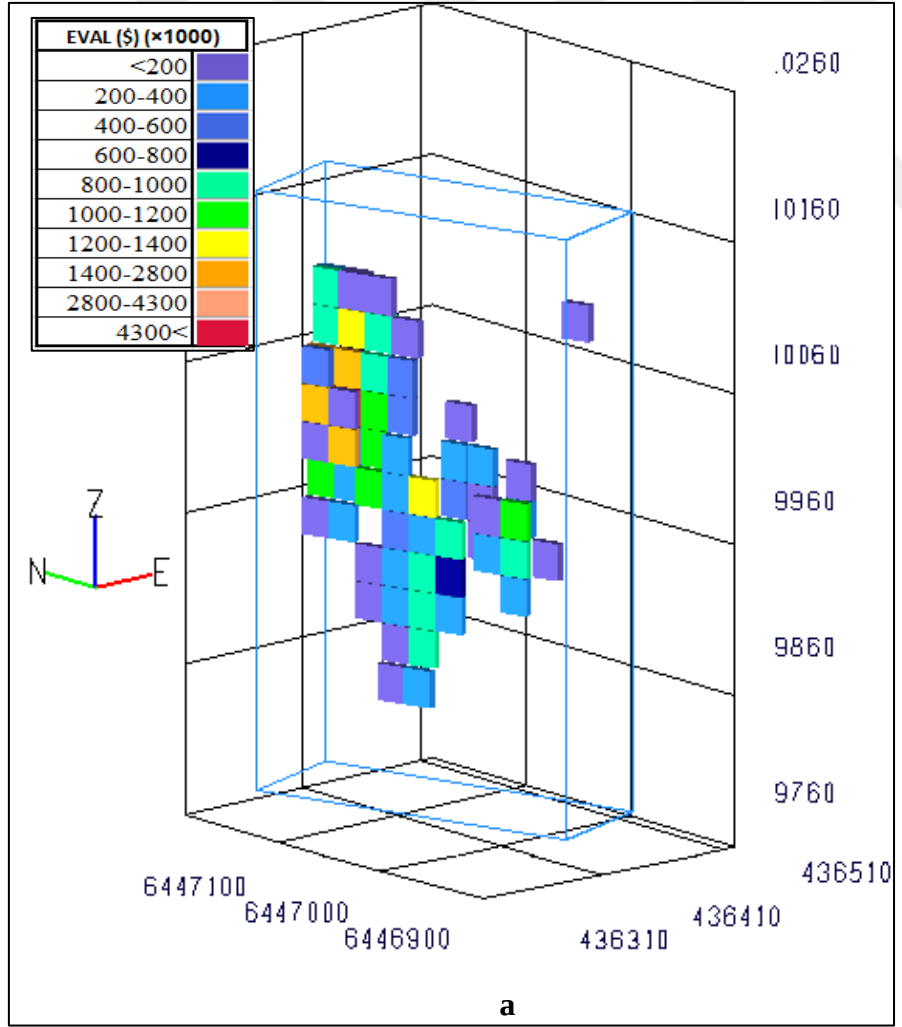
bloklardan oluştuğundan bu adım atlanmıştır. Sonrasında bölüm 3.4.3’ de anlatılan adımlar sırayla takip edilmiş ve sonuçlar MINESIGHT yazılımı kullanılarak görselleştirilmiştir. Yaklaşımın üç boyutlu çıktısı Şekil 4.6’da, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte görülebilmektedir.

İncelenen ekonomik blok model için Sens ve Topal (2009) yaklaşımından elde edilen değerler aynı zamanda Çizelge 4.4’ de özetlenmiş ve sonuçlar şirketin verileri ile karşılaştırılmıştır. Çizelgede görüldüğü üzere algoritma toplam 66 noktaya kazı arını yerleştirmiştir. Bu kazı arınlarının sınırladığı alandan elde edilen kâr şirketin hesapladığı kârdan biraz daha düşük çıkmıştır ve algoritmanın uygulanmasıyla 447 817 tonluk bölgenin üretiminin yapılması düşünülmüştür. Optimizasyon işlemleri oldukça kısa sürede, yaklaşık 10 saniyede çözülmüştür.

Çizelge 4.4. Sens ve Topal sezgisel yaklaşımından elde edilen sonuçlar

Parametre	İncelenen madenden alınan sonuçlar	Sens ve Topal sezgisel yaklaşımından elde edilen sonuçlar
Kazı Arını Sayısı	30	66
Tonaj (t)	340 687	447 817
Kâr (\$)	42 826 547	43 666 673
Çözüm süresi (sa:dak:sn)	-	00:00:12

Sens ve Topal (2009)’ın geliştirdiği algoritma, optimizasyonda hem sabit hem de değişken boyutlarda kazı arınlarını işlemlerine katabilmektedir. Farklı kazı arını boyutlarının tanımlanmasının optimizasyona bir esneklik kattığı düşünülebilir. Bu çalışmada algoritmalar arasında sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek için, yalnızca şirket tarafından sağlanan sabit kazı arını boyutu kullanılmıştır. Algoritmanın nihai sınırı oluşturmak için kazı arınlarını tercih sırasına göre seçmesi, sonuçların kesin optimum olduğunu söylemeye engel olmaktadır. Sonuç olarak, algoritma verilen girdi parametreleri ile en ekonomik olduğunu düşündüğü bölgenin etrafında bir sınır oluşturmaya çalışırken sezgisel yöntemlerden yararlanmaktadır. Bu sebeplerden, incelenen madenin ekonomik blok modeli



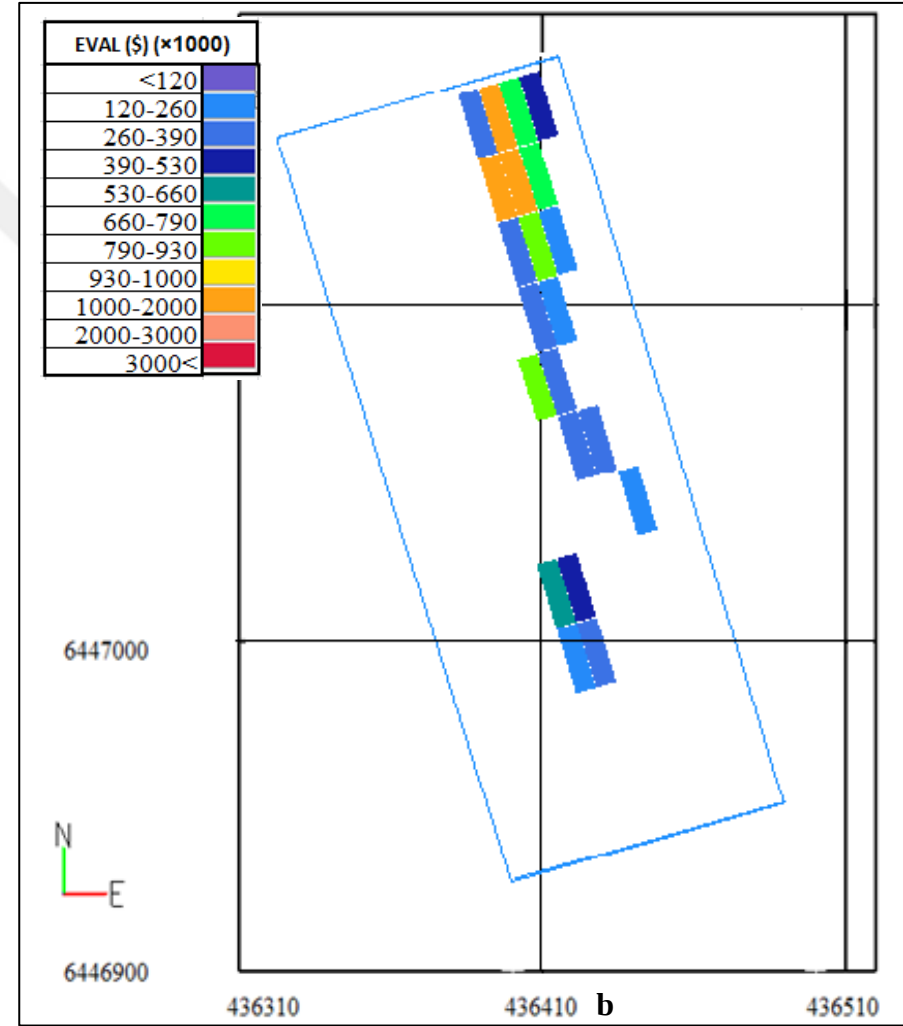
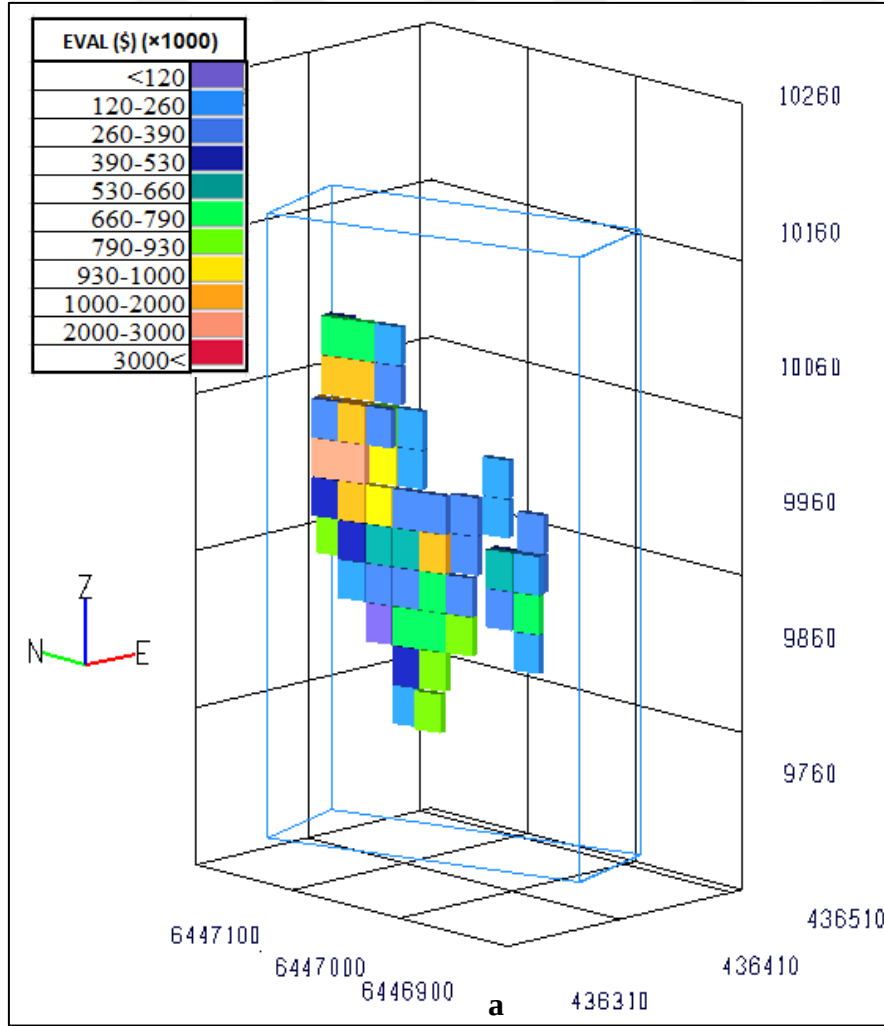
Şekil 4.6. Sens ve Topal yaklaşımı sonuçlarının, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü

üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların da optimum olduğu söylenememektedir.

4.5. Sandanayake vd. Sezgisel Yaklaşımının Uygulanması

Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımı (2015a, 2016b), Visual Studio 2010' da C# nesne yönelimli bilgisayar dili kullanılarak uygulanabilmektedir. Yaklaşım ayrıca, blok model verisini saklamaya ve geri çağırmaya yardım etmek için Microsoft SQL Server 2008' i değerlendirmektedir. Geliştirilen algoritma, optimizasyon işlemlerini bu yazılımları kullanarak incelenen madenin ekonomik blok modeli üzerinde gerçekleştirmiş, diğer algoritmalar gibi modelin üzerinde tek bir kazı arını boyutu (X, Y ve Z yönünde sırayla 6 m $\times$ 20 m $\times$ 25 m) tanımlamıştır. Bunun yanında, algoritmanın değerlendirebileceği topuk tasarımı ve kazı arını şekillendirme senaryoları optimizasyona dâhil edilmemiştir.

Algoritma, incelenen blok model tek boyuttaki bloklardan oluştuğundan blok düzenleme basamağını atlamıştır. Ayrıca ekonomik blok model bu çalışmada zaten girdi olarak kullanıldığından, ikinci basamak (ekonomik model hesaplama) da geçilmiş ve optimizasyon işlemlerine başlanmıştır. Burada öncelikle ekonomik blok model üzerinde, bölüm 3.4.4' de anlatıldığı gibi pozitif değerli kazı arınlarını çıkarılmıştır. Algoritma bunların arasından en iyi değeri (ekonomik olarak) veren kazı arını setini bulmak için, sırasıyla (x, y, z), (x, z, y), (y, x, z), (y, z, x), (z, x, y) ve (z, y, z) olmak üzere üç boyutta farklı mekânsal araştırmalar yapmıştır. Yaklaşık 10.000 iterasyondan sonra en yüksek kârı veren yönelimi (y, z, x) yönünde bulmuştur. Bunun yanında, pozitif değerli kazı arınlarını birleştirmeden önce ekonomik olarak azalacak şekilde sıralamış ve kazı arınlarının %10 ile %100 aralığında kullanılmasıyla elde edilecek ekonomik değerleri hesaplamıştır. Bunların arasında da en yüksek ekonomik değeri veren kazı arını yüzdesini %80 olarak bulmuştur. Bu bilgiler ışığında oluşturulan kazı arınlarının tasarımı, MINESIGHT yazılım aracılığıyla görselleştirilmiş ve Şekil 4.7'de kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Sandanayake vd. yaklaşımı sonuçlarının, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü.

Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) sezgisel yaklaşımının uygulanmasından elde edilen değerler Çizelge 4.5’de özetlenmiş ve sonuçlar şirketin verileri ile karşılaştırılmıştır. Çizelgede görüldüğü üzere algoritma toplam 64 noktada kazı arını tasarlamının optimum olacağı düşünmüştür. Ayrıca bu algoritmanın hesapladığı kâr, şirketin kâr verilerinden yaklaşık olarak %8,71 daha büyüktür ve kazı arınlarının üretim tonajı toplam 434 247 ton olarak belirlenmiştir. Optimizasyon işlemleri diğer algoritmalarından farklı olarak oldukça uzun bir sürede tamamlanmıştır.

Çizelge 4.5. Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımından elde edilen sonuçlar

Parametre	İncelenen madenden alınan sonuçlar	Sandanayake vd. sezgisel yaklaşımından elde edilen sonuçlar
Kazı Arını Sayısı	30	64
Tonaj (t)	340 687	434 247
Kâr (\$)	42 826 547	48 450 122
Çözüm süresi (sa:dak:sn)	-	05:17:00

Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b)’ nin geliştirdiği algoritma, tasarımlarında hem topukları hem de katları hesaba katarak veya katmayarak sonuçlar elde etmeye çalışmaktadır. Ayrıca hem sabit hem de değişken boyutlarda kazı arınlarını optimizasyon işlemlerine katabilmektedir. Farklı maden senaryolarını tasarımlarında düşünebilen algoritmanın bu çalışmadaki uygulamasında, karşılaştırmada tüm girdilerin aynı olması istendiğinden topuk ve kat tasarımları ele alınmamış ayrıca tek bir kazı arını boyutu kullanılmıştır. Sonuçlar yine de optimuma oldukça yakın çıkmıştır. Tüm bunlara rağmen yöntem sezgisel olduğundan sonuçların kesinlik taşımadığı bilinmektedir.

4.6. MSO (Mineable Shape Optimisier) Tasarım Aracının Uygulanması

İşletilebilir maden şekillerinin optimizasyonunu yapmaya çalışan MSO tasarım aracı DATAMINE Studio RM (2015) yazılımıyla, incelenen madenin ekonomik blok modeli üzerinde uygulanabilmiştir. Yazılım blok model için farklı optimizasyon yöntemleri sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında yöntemlerden sınır tenör değerinin

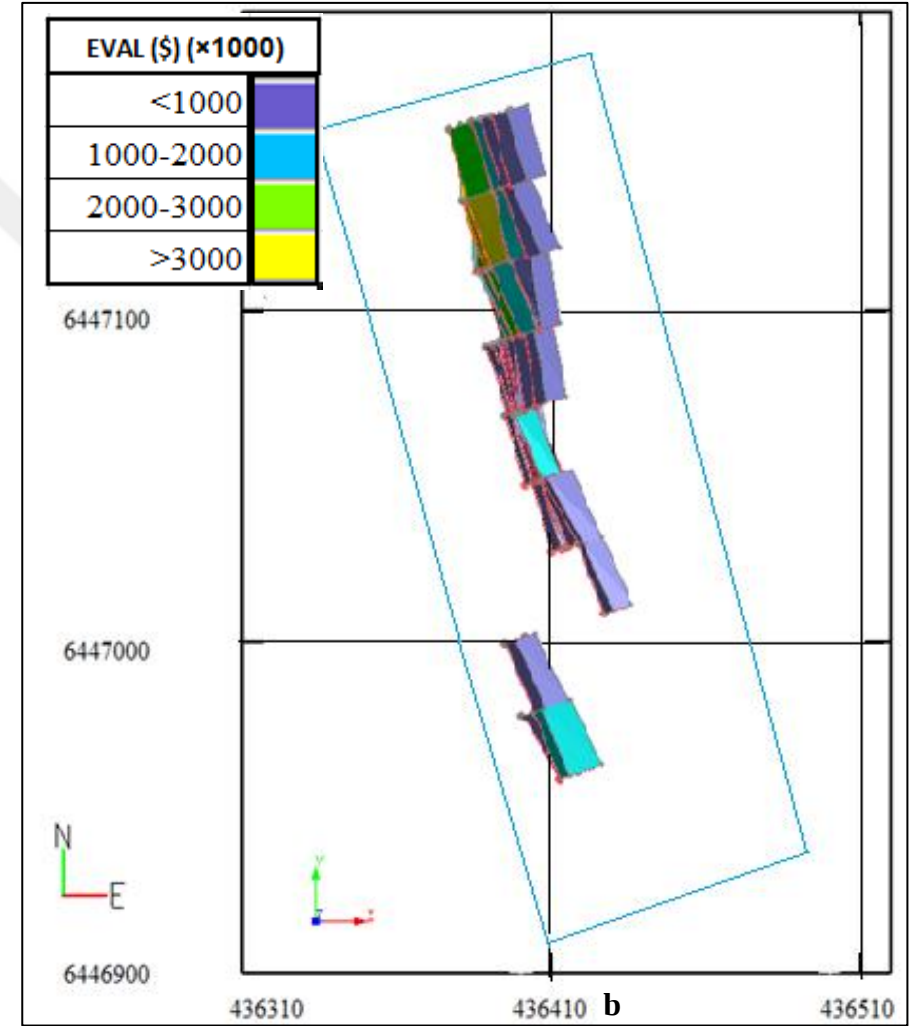
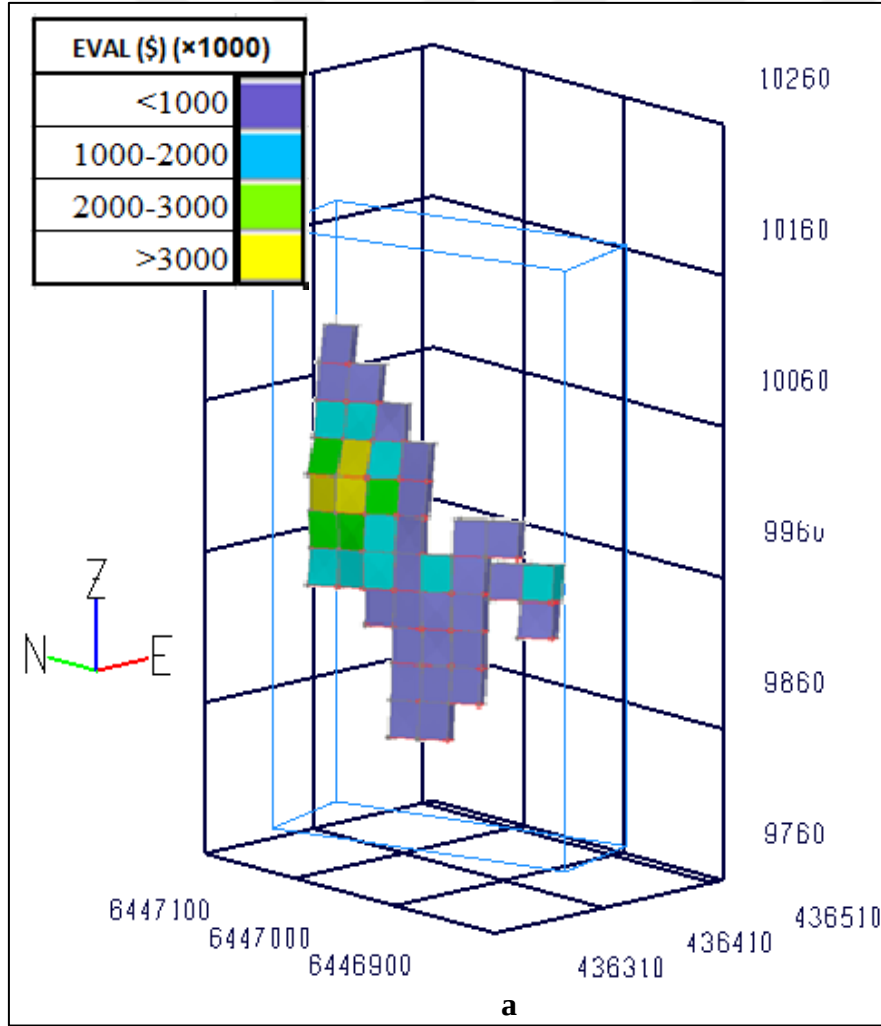
optimizasyonu seçilip, bu değer 3,85 g/t' a ayarlanmıştır. Bunun yanında bölüm 3.4.5' de anlatılan taslak şekli, modelin döndürülme (kuzeyden 343,59°) ve orijin bilgilerini kullanmıştır. Ek olarak, cevherin doğrultu bilgisi YZ (Kuzey) yönünde ayarlanmıştır. Kazı arını boyutları MSO tasarım aracında diğer algoritmalarından farklı olarak, kat ve kesit aralığıyla ifade edilmektir ve bu değerler sırasıyla 25 m ve 20 m' ye ayarlanmıştır.

Kazı arını şeklini kontrol için minimum ve maksimum kazı arını genişliği sırasıyla 6 ve 20 m arasında sınırlandırılmaya çalışılmıştır. Ayrıca tasarımda gerekli minimum ve maksimum dalım açısı 60° ve 120°, maksimum kenar uzunluğu oranı 2,25 m, maksimum doğrultu açısı 45° ve bu açının maksimum değişimi 20° varsayılan değer olarak belirlenmiştir. Ancak şekillerin kontrolü için Bölüm 3.4.5' de bahsedilen, minimum pasa topuk genişliği ve yakın ve uzak duvar seyrelmesi oranları tanımlanmamıştır.

Optimizasyon işlemlerinin sonunda oluşturulan kazı arınları Şekil 4.8' de, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Tasarım sonunda elde edilen bilgiler de Çizelge 4.6'de özetlenmiş ve şirketten alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çizelge MSO tasarım aracının, verilen blok model üzerinde toplam 41 kazı arını tasarladığını ve bunların toplam kârının şirketin verilerinden yaklaşık olarak %12 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Hesaplamalar sonunda kazı arınlarının 406 509 tonluk bir bölgeyi sınırladığı belirtilmiştir. Son olarak MSO tasarımları çok hızlı bir sürede, yaklaşık 50 saniye de tamamlamıştır.

Çizelge 4.6. MSO tasarım aracının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar

Parametre	İncelenen madenden alınan sonuçlar	MSO tasarım aracının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar
Kazı Arını Sayısı	30	41
Tonaj (t)	340 687	406 509
Kâr (\$)	42 826 547	50 294 808,84
Çözüm süresi (sa:dak:sn)	-	00:00:50



Şekil 4.8. MSO tasarım aracının sonuçlarının, kazı arınlarının ekonomik değerleri ile birlikte a) üç boyutlu görüntüsü b) plan görüntüsü

MSO tasarım aracı kazı arınlarının tasarımında topukların, katların yanı sıra tavan ve taban taşı eğimini, cevher doğrultu ve dalımını (eğimini) ve kazı arını duvarlarındaki (yüzeylerindeki) seyrelme kısıtlarını hesaba katabilmektedir. Sunulan tasarım aracı farklı maden kısıtlarını dikkate alabiliyor olsa da, bu çalışmada sağlıklı bir karşılaştırma için tüm girdiler ortak olacak şekilde ele alınmıştır. Maden kısıtları diğer tüm çalışmalarla ortak tutulduğunda dahi, kâr oranı şirket tarafından sağlanan kazı arını tasarım sonuçlarından oldukça yüksek çıkmıştır. Buna rağmen optimizasyonun en başında bir sınır tenör değerinin belirlenmesi sonuçların optimum olmasını engellemekte ve yöntemin sezgisel bir yaklaşım olarak kalmasına neden olmaktadır.

4.7. Uygulamaların Karşılaştırılması

Yeraltı maden tasarımlarının klasik yöntemlerle yürütülmesi mühendislerin tecrübelerine ve yargılarına dayanmaktadır. Bunun yanında maden yataklarının her biri diğerine göre benzersiz olduğu için, maden mühendisleri kendi planlarını sınırlı bilgi ile yapmak zorundalar, bazen de kazı arını tasarımları sırasında belirsizlik ve tutarsızlıktan kaçınamamaktadırlar. Klasik yöntemlerle yürütülen kazı arını tasarımları çok uzun zamanlar aldığından, genellikle mühendisler tasarım esnasında olası tüm seçenekleri de dikkate alamamaktadırlar. Bu bilgiler ışığında, çoğu durumda sonuçların optimal olmadığı söylenebilmektedir. Her ne kadar bu tez kapsamında incelenen madenin kazı arını tasarımları da klasik yöntemlerle yürütülse de, sonuçlar kesin olamamakla seçilen optimizasyon çalışmalarının değerlendirilebilmesi için bir referans olmuştur.

Tez kapsamında incelenen optimizasyon çalışmalarının her biri klasik yöntemlerle yapılan tasarımla ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma klasik yöntemlerle tasarlanan kazı arını sınırının, uygulanan her bir optimizasyon çalışmasından elde edilen sonuçlardan oldukça farklı olduğunu göstermiştir. Bu noktada tüm çalışmalar klasik yöntemlerle yapılan tasarımların dikkate almadığı bölgeleri de değerlendirmiş ve sonuçlarını optimuma daha yakın hale getirmeye çalışmıştır. Arakatlı kazı üretiminde mutlaka belirtilmesi gereken kazı arını sayısı da bununla paralel olarak, Hareketli Kazı Arını algoritması dışındaki tüm çalışmalarda klasik yöntemlerle yapılan tasarım sonuçlarından daha farklı çıkmıştır. Hareketli Kazı Arını algoritmasında kazı arını sayısı hiç belirtilmemiş bu da algoritmayı optimum sonuçlar vermekten oldukça uzaklaştırmıştır.

Maksimum değerli komşuluk algoritması ise sonuçlarında net kazı arını sayısından ziyade birlikte kazı arınlarını ifade eden bir set blok oluşturulmuştur. En yüksek kazı arını sayısı 66 kazı arını ile Sens ve Topal (2009) yaklaşımdan elde edilmiştir. Ancak bu sayının artması sonuçların daha optimum olduğunu göstermemektedir, çünkü pratik madencilikte bir cevher bölgesi için üretim bölgesinin fazlalığı genellikle istenen bir durum değildir. Çizelge 4.7’ de kazı arını sayılarını özetleyen bir tablo sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Uygulamaların kazı arını sayısı sonuçlarının karşılaştırılması

Uygulanan çalışma	Kazı Arını Sayısı
Hareketli Kazı Arını Algoritması	-
Maksimum Değerli Komşuluk Algoritması	18
Sens ve Topal Sezgisel Yaklaşımı	66
Sandanayake vd. Sezgisel Yaklaşımı	64
MSO Tasarım Aracı	41

Kazı arınlarının toplam tonajları da klasik yöntemlerle yapılan tasarımla ve birbiriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar Hareketli Kazı Arını algoritması dışında genellikle kazı arını sayısına paralel olacak şekilde birbirinden çok da farklı çıkmamıştır. Hareketli Kazı Arını algoritmasında üst üste örtüşen çok sayıda kazı arını, tonaj değerlerini neredeyse klasik yöntemlerle yapılan tasarım sonuçlarının iki katına çıkarmıştır. Tonaj değerlerine ilişkin bilgiler Çizelge 4.8’de özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Uygulamaların tonaj değeri sonuçlarının karşılaştırılması

Uygulanan çalışma	Tonaj
Hareketli Kazı Arını Algoritması	705 684
Maksimum Değerli Komşuluk Algoritması	580 932
Sens ve Topal Sezgisel Yaklaşımı	447 817
Sandanayake vd. Sezgisel Yaklaşımı	434 247
MSO Tasarım Aracı	406 509

Ekonomik kâr açısından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, klasik yöntemlerle yapılan tasarımın Maksimum Değerli Komşuluk algoritmasınıninkine oldukça benzediği ancak diğer çalışmalardan farklı olduğu görülmektedir. Sonuçlar aynı zamanda klasik yöntemlerle yapılan tasarımın yanında aynı bölge için daha ekonomik tasarım sonuçlarının olabileceğini göstermiştir. Tüm optimizasyon çalışmaları karşılaştırıldığında ise en yüksek ekonomik kârı, MSO tasarım aracının verdiği ve bu değerın klasik yöntemlerle yapılan tasarımlardan neredeyse %12 daha fazla olduğu görülmüştür. Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) yaklaşımı da klasik yöntemlerle yapılan tasarımdan daha yüksek ekonomik değer verirken diğer optimizasyon çalışmaların sonuçları bu değerın biraz altında kalmıştır. Uygulamaların ekonomik değerlere ilişkin bir karşılaştırması Çizelge 4.9’ da özetlenmiştir.

Çizelge 4.9. Uygulamaların ekonomik kâr değeri sonuçlarının karşılaştırılması

Uygulanan çalışma	Kâr (\$)
Hareketli Kazı Arını Algoritması	42 826 547
Maksimum Değerli Komşuluk Algoritması	44 998 078
Sens ve Topal Sezgisel Yaklaşımı	43 666 673
Sandanayake vd. Sezgisel Yaklaşımı	48 450 122
MSO Tasarım Aracı	50 294 808

Klasik yöntemlerle yapılan tasarımların sonuçları yukarıda da belirtildiği üzere aylar sürmüştür. Bunun yanında Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) yaklaşımı dışındaki tüm çalışmalar birkaç dakikayı geçmeden optimum olduğunu düşündükleri sonuçları vermişlerdir. Optimizasyon çalışmalarını en kısa sürede yaklaşık 12 saniyelik süreyle Sens ve Topal (2009) yaklaşımı tamamlarken, Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) yaklaşımı yaklaşık 5 saatlik süreyle en yüksek zamanı harcamıştır. KTP yöntemini kullanan bu yaklaşımda, blok sayısı arttıkça çözüm süresinin de üssel olarak arttığı bilinmektedir. Yaklaşımın bu denli bir çözüm süresine ihtiyacı olması, yine kendi optimizasyon yönteminden ileri gelmektedir. Çünkü yaklaşım öncelikle çok sayıda kazı arını kombinasyonu oluşturmakta ve bunlar arasından en iyisini birçok yönü dikkate alarak bulmaya çalışmaktadır. Yine de klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında bu yöntem zaman

açısından bir üstünlük sağlamaktadır. Uygulamaların çözüm süreleriyle ilgili karşılaştırması Çizelge 4.10'da özetlenmiştir

Çizelge 4.10. Uygulamaların çözüm süresi sonuçlarının karşılaştırılması

Uygulanan çalışma	Çözüm süresi (sa:dak:sn)
Hareketli Kazı Arını Algoritması	00:02:13
Maksimum Değerli Komşuluk Algoritması	00:01:56
Sens ve Topal Sezgisel Yaklaşımı	00:00:12
Sandanayake vd. Sezgisel Yaklaşımı	05:17:00
MSO Tasarım Aracı	00:00:50

Pratik maden tasarımlarında kazı arını boyut değişkenliği ve topukların, katların yanı sıra tavan ve taban taşı eğimi, cevher doğrultu ve dalımı (eğimini), kazı arını duvarlarındaki (yüzeylerindeki) seyrelme kısıtları gibi bir çok parametrenin hesaba katılabilmesi optimizasyon çalışmasının sonuçlarını optimuma yaklaştırmaktadır. Hareketli Kazı Arını algoritması tasarımlarında bu parametrelerin hiç birini hesaba katamamaktadır. Maksimum Değerli Komşuluk algoritması kazı arını tasarımlarını diğer parametreleri dikkate almadan yalnızca belirlenen kat seviyelerinde yapabilmektedir. Sens ve Topal (2009) yaklaşımı ise bir cevher bölgesi için tasarımlarında yalnızca farklı kazı arını boyutlarını hesaba katabilmektedir. Sandanayake vd. (2015.a, 2015.b) yaklaşımı farklı kazı arını boyutlarını, topuk ve kat tasarımlarını dikkate alarak kazı arını sınırı oluşturmaktadır. Son olarak MSO tasarım aracı belirtilen tüm tasarım parametrelerini dikkate almaktadır. Bu bilgiler göz önünde bulundurulduğunda optimuma en yakın sonucu MSO tasarım aracının verdiği söylenebilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kazı arını sınırı optimizasyonu için geliştirilen yöntemlerden bazılarının işletim halindeki bir madene uygulanması, performanslarının incelenmesi ve sonuçların birbirleriyle ve klasik yöntemlerle yapılan tasarımla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu maksatla seçilen yöntemler sırayla; Hareketli Kazı Arını algoritması, Maksimum Değerli Komşuluk Algoritması, Sens ve Topal (2009) ve Sandanayake vd. (2015a, 2016b) yaklaşımları ve son olarak DATAMINE yazılımının geliştirdiği MSO tasarım aracıdır. Yöntemler yaklaşımlarını tanımlamak için her ne kadar optimizasyon terimini kullansa da, hiçbiri üç boyutta gerçek optimum sonuç verememekte ve sezgisel birer yöntem olarak kalmaktadırlar.

Aynı verileri kullanarak kazı arını sınırını tasarlamaya çalışan yöntemler arasından en yüksek ekonomik kâr MSO tasarım aracılığıyla sağlanmıştır. Ayrıca tasarım esnasında daha fazla jeoteknik ve fiziksel kısıdı hesaba kattığı düşünülürse, optimuma en yakın sonuçları MSO tasarım aracının verdiği söylenebilir. Böylece yeraltı madenciliğinin doğası gereği karmaşık blok modellerin klasik yöntemlerle tasarlanmasındaki zaman ve ekonomik kayıpların önüne geçmede MSO tasarım aracı bir alternatif olarak düşünülebilir, ancak yöntem matematiksel kanıtlar içermediğinden yeraltı maden tasarımlarında sadece bir yol gösterici olarak kullanılmalıdır. Tüm yöntemler tekrar göz önüne alındığında optimumdan en uzak sonuçları ise, hem ekonomik hem de pratik madencilik kısıtları açısından en geride olan Hareketli Kazı Arını algoritması (MRO ile uygulanmış) vermiştir. Yöntem ekonomik bölgeler hakkında genel bir bilgi vermenin ötesine geçememiştir.

Şimdiye kadar üç boyutlu kazı arını sınırı optimizasyonu için geliştirilen yöntemlerin hepsi, kazı arını tasarım esnasında yalnızca tek bir mineral türü içeren kaynak modelleri için çözümler üretebilmiştir. Bu yüzden sonraki çalışmalar polimetallik yataklar için kazı arınlarının değer hesabında, birleştirilmiş tenörlere dayanmak yerine her bir cevher türünün kazı arınına katkısını hesaba katabilmelidir. Bunun yanında yöntemler, cevher tenörü ve ekonomik faktörlerin belirsizliğinin etkisini de tasarımlarına dâhil edebilirlerse, sonuçları optimuma daha da yaklaşacaktır. Ayrıca yöntemler

optimizasyonları esnasında ekonomik parametrelerine paranın zaman değerini ve hazırlık maliyetlerini de eklemelidir.

Gerçekte yeraltı maden planlama sürecinde kazı arını sınırının optimizasyonu, üretimin planlanması ve hazırlık işlemlerinin optimizasyonu ile sürekli etkileşim halindedir. Bu yüzden bir yeraltı madenin optimizasyonunda, şuanda her biri ayrı ayrı optimize edilmeye çalışılan ancak birbiri üzerinde etkisi olan bu üç alan mutlaka entegre edilmelidir. Entegre edilmiş bir optimizasyonda, sonuçlar tam anlamıyla optimal olup ekonomik kâr da maksimum seviyelere ulaşacaktır. Nitekim Little ve arkadaşlarının (2013) kazı arını sınırı ve üretimin planlanmasını bir arada düşündüğü çalışmalarında, ayrı ayrı optimizasyonun yanı sıra daha ekonomik sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca Sirinanda vd. (2014) hazırlık işlemlerinin optimizasyonunda ekonomik kârı yükseltmek için çalışmalarına üretimin planlamasını entegre etmişlerdir.

Bu tez kapsamında, yeraltı optimizasyon problemlerinin ilk basamağı olarak kabul edilen kazı arını sınırının optimizasyonu için şimdiye kadar geliştirilmiş yöntemlerin hiç birinin üç boyutta optimum çözümler sunamadığını gösterilmektedir. Yani, bir maden projesinin ekonomik kârı üzerinde direk etkisi olan optimum kazı arını sınırlarının, matematiksel programlamalara ve yazılımlara olan ihtiyacı halen devam etmektedir. İlerleyen yıllarda bu konuda yapılacak optimizasyon çalışmalarının, açık ocak madenciliğinde elde edilebilmiş optimum sonuçları yakalayabilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alford, C., 1995, Optimisation in underground mine design, 25th Application Of Computers and Operations Research In The Mineral Industry, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 213-218.
- Alford, C., Brazil, M., Lee, D. H., 2007, Optimisation in underground mining, Handbook of Operations Research in Natural Resources, Springer, pp. 561-577.
- Alford, C., Hall, B., 2009, Stope optimisation tools for selection of optimum cut-off grade in underground mine design, The Project Evaluation Conference, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 137-44.
- Anonymous, Datamine, 2016a, MRO Help File, Datamine Corporate Limited, erişim tarihi: 09.10.2016
- Anonymous, Datamine, 2016b, MSO Help File, Datamine Corporate Limited, erişim tarihi: 09.10.2016
- Anonymous, 2016c, Datamine Corporate Limited, <http://www.dataminesoftware.com/wp-content/brochures/MSO.pdf>, erişim tarihi: 11.02.2017
- Alford Mining Systems, 2016, http://alfordminingsystems.com/?page_id=74, erişim tarih: 10.12.2016
- Ataee-Pour, M., 2000, A heuristic algorithm to optimise stope boundaries, PhD thesis, University of Wollongong, Australia, pp. (2) 24-60, (3) 18-36.
- Ataee-Pour, M., 2004, Optimisation of stope limits using a heuristic approach, Mining Technology, Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, 113 (2): 123-128.
- Ataee-Pour, M., 2005, A critical survey of the existing stope layout optimization techniques, Journal of Mining Science, 41(5):447-466.
- Bai, X., Marcotte, D., Simon, R., 2013, Underground stope optimization with network flow method, Computer and Geoscience, (52): 361–371.
- Bai, X., 2013, Optimization of underground stope with network flow method, PhD Thesis, Université Montreal, pp. 4-35
- Bai, X., Marcotte, D., Simon, R., 2014, A heuristic sublevel stope optimizer with multiple raises, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, (114): 427- 434

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Barton, N.R., 1974, A review of the shear strength of filled discontinuities in rock, Norwegian Geotechnical Institute Publication, Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, No. 105.
- Bawden, W. F., Nantel, J., Sprott, D., 1988, Practical rock engineering in the optimisation of stope dimensions—Application and cost effectiveness, CIM Bulletin, 82(926): 63–70.
- Bawden, W. F., Sauriol, G., Milne, D., Germain, P., 1989, Practical rock engineering stope design case histories from Noranda Minerals,. CIM Bulletin, 82(927): 37–45.
- Boland, N., Dumitrescu, I., Froyland, G., Gleixner, A. M., 2007, LP-Based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity, Computers & Operations Research, 36, pp. 1064-1089.
- Bootsma, M.T., 2013, Cut-off grade based sublevel stope mine optimization, Report, Delft University of Technology, pp. 23-26.
- Bootsma, M.T., Alford, C., Benndorf, J., Buxton M.W.N., 2014, Introduction and evaluation of an optimisation approach and method for grade risk quantification, SMP Conference, pp. 8
- Brazil, M., Thomas, D.A., Weng, J.F., 1998, Gradient-constrained minimal Steiner trees, DIMACS: Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 40: 23–38
- Brazil, M. , Rubinstein, J.H. , Thomas, D.A. , Lee, D. , Weng, J.F., Wormald, N.C. , 2000, Network optimization of underground mine design, The Australian Institute for Mining and Metallurgy Proceedings, 305(1): 57–65.
- Brazil, M., Rubinstein, J. H., Thomas, D. A., Weng J. F., Wormald, N. C., 2001, Gradient-constrained minimum networks. I. Fundamentals, Journal of Global Optimization, 21 (2):139-155
- Brazil, M., Lee D.H., Rubinstein, J. H., Thomas, D.A., Weng, J.F., et. al., 2002, Optimisation in the Design of Underground Mine Access, The Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers, 93(2): 97-103.
- Brazil, M., Lee D.H., Rubinstein, J. H., Thomas, D.A., Weng, J.F., et. al., 2003, Optimization in the design of underground mine access, Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A, (112):164-170.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brazil, M. , Thomas, D.A. , Weng, J.F., Lee, D.H., Rubinstein, J.H., 2005, Cost optimization for underground mining networks, *Optimization and Engineering*, 6(2): 241–256.
- Brazil, M., Thomas, D.A., 2007, Network optimisation for the design of underground mines, *Networks* ,49: 40–50.
- Brazil, M., Grossman, P.A., 2008, Access Layout Optimisation for Underground Mines, *Australian Mining Technology Conference*, pp. 119-128
- Brazil, M., Grossman, P.A., Lee, D., Rubinstein, J.H., Thomas, D.A., Wormald, N. C., 2008, Decline design in underground mines using constrained path optimisation, *Mining Technology*, 117(2): 93-99.
- Brazil, M., Lee D.H., Leuven, J. ., Rubinstein, J.H., Thomas, D.A., Wormald, N. C., 2013, Optimising declines in underground mines, *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, Section A, 12: 164-170.
- Carlyle, M., Eaves, 2001, Underground planning at Stillwater Mining Company, *Interfaces*, 31(4): 50-60.
- Camus, J. P., 1992, Open Pit Optimisation Considering an Underground Alternative, 23th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), Colorado, pp. 435-441
- Cawrse, I, 2001, Multiple pass floating stope process, 4th Biennial Strategic Mine Planning Conference, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 87-94.
- Cawrse, I., 2007, Multiple pass floating stope process, Strategic Mine Planning Conference, Perth, Australia, pp. 87–94.
- CAE Mining,, 2016, Underground Planning Solutions, <http://www.cae.com/mining/software/underground-planning-solution/> , erişim tarihi: 11.11.2016.
- Cheimanoff, N. M., Deliac, E. P., Mallet, J. L., 1989, GEOCAD : An alternative CAD and artificial intelligence tool that helps moving from geological resources to mineable reserves, 21st Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry : 21st International APCOM Symposium, pp. 471-478

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- DATAMINE Studio RM v1.1, 2015, CAE Studio 3, www.dataminesoftware.com (erişim tarihi: 20.05.2016).
- Dağdelen, K, 2001, Open pit optimization -strategies for improving economics of mining projects through mine planning, 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey- IMCET2001, pp. 117-121.
- David, M., 2012, Geostatistical ore reserve estimation, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 364 pp.
- Deraisme, J., De Fouquet, C., Fraisse, H, 1984, Geostatistical orebody model for computer optimization of profits from different underground mining methods, 18th APCOM Symposium London, England, pp. 583-590.
- Gemcom Surpac, 2013, Geology and mine planning, Brochure, http://www.geovia.com/sites/default/files/products/surpac/Gemcom_Surpac_Brochure.pdf?WT.ac=%20Surpac%20Brochure%20CTA, erişim tarihi: 11.12.2016.
- Hamrin, H., 2001, Underground mining methods and applications, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, pp. 3-28.
- Hustrulid, W. A., Kuchta, M, Martin, R., 2013, Open pit mine planning & design , CRC Press, 3rd edition, pp. 245-249
- Hoek, E., Kaiser P.K., Bawden, W.F., 1993, Support of underground excavations in hard rock, Funding by Mining Research Directorate and Universities Research Incentive Fund, pp. 176-189
- Johnson, T.B., Sharp, W.R., 1971, A three-dimensional dynamic programming method for determining ultimate open pit design, Report of Investigation 7553, U.S. Bureau of Mines, Michigan.
- Karpuz, C., Hindistan M. A., 2008, Kaya mekaniği ilkeleri ve uygulamaları, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, s.233.
- Keane, S., 2010, Optimisation improvements in whittle using stope optimisation software, Mine Planning And Equipment Selection (MPES) Conference, Fremantle, WA, pp. 121-128
- Kuchta M., Newman, A., Topal, E, 2004, Implementing a production schedule at LKAB's Kiruna mine, Interfaces, 34(2): 124-134.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Laubscher, D. H., Taylor, H. W., 1976 , The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations, The Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, South Africa, pp. 119–128.
- Lee, D. H., 1989 , Industrial case studies of Steiner trees, NATO Advanced Research Workshop on Topological Network Design, Denmark.
- Little J., 2007, A new approach to using mixed-integer programming for scheduling optimisation in sublevel stope mining, Bachelor thesis, University of Queensland, Brisbane.
- Little, J., Nehring M., Topal, E., 2008, A new mixed-integer programming model for mine production scheduling in sublevel stope mining, Proceedings of the 2008 Australian Mining Technologies Conference, Queensland, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 157–172.
- Little, J., 2012, Simultaneous optimisation of stope layouts and production schedules for long-term underground mine planning, PhD thesis, The University of Queensland, pp.15-38
- Little, J., P. Knights, E. Topal, 2013, Integrated optimization of underground mine design and scheduling, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 113: 775–785.
- Mathews, K. E., 1978, Design of underground mining layouts, Underground Space, 2(4): 195–209
- Mathews, K. E., Hoek, E., Wyllie, D. C., Stewart, 1980, Prediction of Stable Excavation Spans for Mining at Depths below 1,000 Metres in Hard Rock, Ottawa, Ontario, Canada, Golder Associates Report to Canada Centre for Mining and Energy Technology (CANMET), Department of Energy and Resources.
- Martinez, M.A., Newman, A. M., 2011, A solution approach for optimizing long and short term production scheduling at LKAB's Kiruna mine, European Journal Of Operational Research, pp 184-197.
- McIsaac, G., 2005, Long-term planning of an underground mine using mixed-integer linear programming, Canadian Institute of Mining Bulletin, 98(1089): 1-6.
- Nehring, M., 2006, Stope Sequencing and Optimisation in Underground Hardrock Mining, Bachelor thesis, University of Queensland, Brisbane.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nehring, M., Topal E., 2006, Production schedule optimisation in underground hard rock mining using mixed integer programming, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Project Evaluation, Melbourne, Australia, pp. 169-175
- Nehring, M., Topal, E., Little, J., 2009, A new mathematical programming model for production schedule optimisation in underground mining operations, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 110 (8): 437–446.
- Nehring, M., Topal, E., Kizil, M., Knights, P., 2012, Integrated short- and medium-term underground mine production scheduling, The Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy, 112, pp 365-378.
- Newman, A., Kuchta, M., Martinez, M. M., 2011, Long- and short-term production scheduling at LKAB's Kiruna mine, Handbook of Operations Research In Natural Resources, 99: 579-593.
- Nickson, S. D., 1992, Cablebolt support guidelines for underground hard rock mine operations, MASc thesis, University of British Columbia. (unpublished)
- Noble, A.C., 1992, Ore reserve/resource estimation, SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Littleton, Colorado, USA, pp. 344-359.
- Nogholi, A., 2015, Optimisation of open pit mine block sequencing, PhD Thesis, Statistics and Operations Research Discipline, Queensland University of Technology, pp.2-5
- O'Sullivan D., Newman A., 2014, Optimization-based heuristics for underground mine scheduling, European Journal of Operational Research, 241, pp. 248–259
- Ovanic, J., Young, D. S., 1995, Economic optimisation of stope geometry using separable programming with special branch and bound techniques, Third Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, McGill University, Montreal, pp. 129-35.
- Potvin, Y., 1988, Empirical open-stope design in Canada, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada, 350 pp.
- Riddle, JM., 1977, A dynamic programming solution of a block caving mine layout, Proceedings in the 14th APCOM Symposium, Society of Mining Engineers-American Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum Engineers, New York, pp. 767-780.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Richard E. Gertsch, Richard L. Bullock, 1988, Techniques in Underground Mining, the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, pp. 223-227.
- Sandanayake, D., 2014, Stope Boundary Optimisation in Underground Mining Based on a Heuristic Approach, PhD Thesis, Curtin University.
- Sandanayake D, Topal E, Asad M., 2015a, Designing an optimal stope layout for underground mining based on a heuristic algorithm, International Journal of Mining Science and Technology 25, pp. 767–772.
- Sandanayake D, Topal E, Asad M., 2015b, A heuristic approach to optimal design of an underground mine stope layout, Applied Soft Computing, 30, pp. 595–603.
- Sens, J., 2008, Stope boundary optimisation, Bachelor thesis, University of Queensland, Brisbane, pp. 33-40
- Sens, J., Topal, E., 2009. A New Algorithm for Stope Boundary Optimisation, AUSIMM New Leaders Conference, 2009(4): 25-28.
- Serra, J., 1982, Image Analysis and Mathematical Morphology, Academic Press, New York.
- Smith, M., Sheppard, I., Karunatillake, G., 2003, Using MIP for strategic life-of-mine planning of the lead/zinc stream at Mount Isa Mines, 31st International APCOM Symposium Proceedings, Capetown, South Africa, pp. 465–474.
- Smith, M.L., O'Rourke, A., 2005, The connection between production schedule and cut-off optimization in underground mines, 32nd International APCOM Symposium, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 643-54.
- Sirinanda, K.G., Brazil, M., Grossman, P.A., Rubinstein, J.H., Thomas, D.A., 2014, Optimally locating a junction point for an underground mine to maximise the net present value, Anziam Journal, (55): 315-328
- Tatar, Ç., Köse, H., 2011, Madenlerde Yeraltı Üretim Yöntemleri, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, s. 30-35
- Topal E., 2003, Advanced underground mine scheduling using mixed integer programming, PhD thesis, Colorado School of Mines.
- Topal, E., 2008, Early start and late start algorithms to improve the solution time for long-term underground mine production scheduling, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(2): 99-107

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Topal, E., Sens, J., 2010, A new algorithm for stope boundary optimization, Journal of Coal Science & Engineering, 16 (2): 113-119
- Trout L.P., 1995, Underground mine production scheduling using mixed integer programming, Proceedings in the 25th International APCOM Symposium, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 395-400.
- Villaescusa E., 2014, Geotechnical Design for Sublevel Open Stoping, Taylor & Francis Group, CRC Press, pp. 7 -16 , 197-213
- Walker S., 2013, Tools to Assist in Planning and Design, Engineering and Mining Journal, pp. 34-39, <http://emj.epubxp.com/i/102812-jan-2013/39>, erişim tarihi: 28.09.2016.
- Wang, H., Webber, T., 2012 An innovation of practical underground stope design optimization and cut-off grade calculation, SME Annual Meeting, WA
- Winkler, B., 1996, Using MILP to optimize period fix costs in complex mine sequencing and scheduling problems, APCOM Symposium, Pennsylvania State University, pp. 441–446
- Williams, J. K., Smith, L., Wells, P. M., 1973, Planning of underground copper mining, (APCOM) Symposium, South Africa, Johannesburg, pp. 251–254
- Whittle, J., 1993, Open Pit Design, Short Course Notes in Pit Optimisation, Whittle Programming Pty Ltd, Melbourne, p. 40.