

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AÇIK OCAK İŞLETMELERİNDE OPTİMUM ORTA VE UZUN DÖNEM
ÜRETİM PLANLAMASI**



DOKTORA TEZİ

Kürşat HASÖZDEMİR

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AÇIK OCAK İŞLETMELERİNDE OPTİMUM ORTA VE UZUN DÖNEM
ÜRETİM PLANLAMASI**



DOKTORA TEZİ

**Kürşat HASÖZDEMİR
(505192001)**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selamet G. ERÇELEBİ

TEMMUZ 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**OPTIMUM MEDIUM & LONG TERM PRODUCTION SCHEDULING OF
OPEN PIT MINES**



Ph. D. THESIS

**Kürşat HASÖZDEMİR
(505192001)**

Department of Mining Engineering

Mining Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Selamet G. ERÇELEBİ

JULY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505192001 numaralı Doktora Öğrencisi Kürşat HASÖZDEMİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "AÇIK OCAK İŞLETMELERİNDE OPTİMUM ORTA VE UZUN DÖNEM ÜRETİM PLANLAMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Selamet G. ERÇELEBİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mahmut YAVUZ
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Doç. Dr. Muhammet M. KAHRAMAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 3 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 2 Temmuz 2024



Eşime ve kızıma,



ÖNSÖZ

Bu çalışmayı destekleyen İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında tecrübe ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Selamet ERÇELEBİ'ye saygı ve hürmetlerimi sunarım. Ayrıca bu süreçte hep yanımda olan sevgili eşim Uzman Fizyoterapist Süheda HASÖZDEMİR'e, Annem Göksel HASÖZDEMİR ve Babam Yemliha HASÖZDEMİR'e, Teyzem Maile PAKTEN'e, Kayınvalidem Reyhan DOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bu çalışmanın son senesinde hayatıma giren kızım Ayşe Umay'a da kucak dolusu sevgilerimi sunarım.

Temmuz 2024

Kürşat HASÖZDEMİR
(Maden Yük. Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xviii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Madencilik İşletmelerinde Üretim Planlamasının Önemi.....	2
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Literatür Araştırması	4
2. AÇIK OCAK İŞLETMELERİNDE ÜRETİM PLANLAMASI	19
2.1 Kullanılan Kavramlar ve Açıklamaları	20
2.1.1 Blok model.....	21
2.1.2 Blokların cevher içeriği ve belirleme yöntemleri.....	21
2.1.2.1 Ters mesafe ağırlık enterpolasyonu (IDW).....	22
2.1.2.2 Kriging yöntemi	23
2.1.3 Blokların ekonomik değerleri ve hesaplanması	25
2.1.3.1 Cevher bloğu değerlerinin (CBD) hesaplanması	26
2.1.3.2 Atık bloğu değerlerinin (ABD) hesaplanması.....	26
2.1.4 Net bugünkü değer (NBD) kavramı ve hesaplanması	26
2.2 Nihai Ocak Sınırı ve Belirlenmesi İçin Kullanılan Yöntemler	27
2.2.1 Hareketli koni yöntemi.....	27
2.2.2 Lerch grossmann yöntemi	30
2.2.3 Maksimum akış yöntemi	36
2.3 Açık Ocak Üretim Planlamasında Kullanılan Yöntemler	44
2.3.1 Geleneksel yöntem (Yuvalanmış açık ocak sınırları yöntemi)	45
2.3.2 Sayısal modelleme ve optimizasyon yöntemleri	47
2.3.2.1 Doğrusal programlama yöntemi.....	47
2.3.2.2 Tam sayı programlama yöntemi.....	51
2.3.2.3 Karışık tam sayı programlama yöntemi	54
2.3.2.4 Metasezgisel yöntemler.....	59
2.4 Açık İşletme Üretim Planlamasında Kullanılan Kısıtlar.....	62
3. AÇIK OCAK İŞLETMELERİNDE UVÜP İÇİN KULLANILAN TAM SAYILI MODELLERİN ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN YÖNTEMLER	65
3.1 Lagrange Rahatlatma Yaklaşımı	66
3.2 Kesme Düzlemleri ve Dallandır ve Kes Yaklaşımı (Branch and Cut).....	68
3.3 Değişken Sabitleme Yaklaşımı	75
4. AÇIK İŞLETMELERDE ÜRETİM PLANLAMASI İÇİN ÖNERİLEN YENİ YÖNTEM	79

4.1 Açık Ocak İşletmelerinde Uzun Vade Üretim Planlaması İçin Önerilen Algoritmanın Aşamaları	83
4.2 Önerilen Yöntemin 2 Boyutlu Bir Maden Ocağına Uygulama Örneği	88
5. ÖNERİLEN YÖNTEMİN UYGULANDIĞI VERİ SETİ.....	103
5.1 Zuck_Small Blok Modeline Ait Detaylar.....	104
5.2 Kd Blok Modeline Ait Detaylar	105
5.3 Zuck_Medium Blok Modeline Ait Detaylar	107
5.4 Marvin Blok Modeline Ait Detaylar	109
5.5 Zuck_large Blok Modeline Ait Detaylar.....	111
5.6 McLaughlin Blok Modeline Ait Detaylar	113
6. ELDE EDİLEN SONUÇLAR ve ALTERNATİF YÖNTEMLERLE KİYASLAMASI	117
6.1 Zuck_Small Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması.....	117
6.2 Kd Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması	121
6.3 Zuck_Medium Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması.....	127
6.4 Marvin Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması	131
6.5 Zuck_large Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması	135
6.6 McLaughlin Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması.....	139
7. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	145
KAYNAKLAR.....	149
ÖZGEÇMİŞ.....	157

KISALTMALAR

ABD	: Atık Blok Değeri
BFS	: Breadt First Search
CBD	: Cevher Blok Değeri
DFS	: Depth First Search
DP	: Dinamik Programlama
GA	: Genetik Algoritması
IDW	: Inverse Distance Weight
ILP	: Tam Sayılı Doğrusal Programlama
LG	: Lerch Grossman
LP	: Doğrusal Programlama
NBD	: Net Bugünkü Değer
UVÜP	: Uzun Vade Üretim Planlaması



SEMBOLLER

X_{ijk}	: i, j, k bloğunun tamsayılı modeldeki karar değişkeni
C_{ij}	: i bloğunun j periyodundaki net bugünkü değeri
A_{ij}	: i, j bloğunun öncelik kısıtlarını gösteren blok kümesi
T	: Periyot
$\gamma(h)$	: h lag mesafesindeki semivarogram değeri
NV_n^t	: n bloğunun t periyodundaki net bugünkü değeri



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Bazı teorik variogram modelleri.....	25
Çizelge 4.1: Gelir ayarlama faktörüne göre elde edilen iç içe ocak sınırları içerisinde yer alan blok sayıları.	91
Çizelge 5.1: Kullanılan veri seti ve karışık tam sayı modeline uygulanan kısıtların özet gösterimi.....	103

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 2 boyutlu blok model.....	10
Şekil 1.2 : Temel ağaç örnekleri.	10
Şekil 1.3 : 2 boyutlu bir açık işletme örneği.	12
Şekil 1.4 : Açık işletme modelinin şebeke görünümü (Düğüm noktaları ve bağlantı kapasiteleriyle).	13
Şekil 1.5 : 2 boyutlu örnek modelde nihai sınır görseli.	13
Şekil 2.1 : Örnek bir blok model	21
Şekil 2.2 : Mesafenin tersi yönteminin uygulanma prensibi.	23
Şekil 2.3 : Hareketli koni yöntemi akış şeması.	28
Şekil 2.4 : Hareketli koni yöntemi örnek uygulama	29
Şekil 2.5 : Lerch & Grossman algoritmasının 2 boyutlu uygulama adımları.	30
Şekil 2.6 : 3B LG algoritmasının uygulamasında kullanılacak örnek blok model....	32
Şekil 2.7 : 3B LG algoritmasının ilk adımı	32
Şekil 2.8 : 2. seviyedeki bloklar eklendikten sonraki ocağın ağ görünümü.	33
Şekil 2.9 : 3B LG algoritmasının 3.adımının ilk döngüsü.	33
Şekil 2.10 : 3B LG algoritmasının 3.adımının ikinci döngüsü.....	34
Şekil 2.11 : 3B LG algoritmasının 3.döngüsü başında ocak ağının durumu.	34
Şekil 2.12 : 3B LG algoritmasının 3.döngüsünün ilk aşaması sonunda ocak ağının durumu.....	35
Şekil 2.13 : 3B LG algoritmasının 3.döngüsünün ikinci aşaması sonunda ocak ağının durumu.	36
Şekil 2.14 : 3B LG algoritması ile elde edilen nihai ocak sınırlarının görünümü.	36
Şekil 2.15: Pseudoflow algoritmasının uygulandığı ağ digram örneği.....	38
Şekil 2.16 : Pseudoflow algoritmasının uygulandığı 2 boyutlu açık işletme kesiti...	39
Şekil 2.17 : Pseudoflow algoritmasının başlangıç durumu..	40
Şekil 2.18 : Pseudoflow algoritması 1. Döngü sonunda ocak ağının durumu.....	41
Şekil 2.19 : Pseudoflow algoritması 2. Döngü sonunda ocak ağının durumu.....	42
Şekil 2.20 : Pseudoflow algoritması 3. Döngü sonunda ocak ağının durumu.....	43
Şekil 2.21 : Pseudoflow algoritması ile elde edilen nihai ocak sınırı.....	43
Şekil 2.22 : İç içe yuvalanmış açık ocaklar (sol) ve üretim planı olarak seçilmiş ocak kabukları (sağ).	47
Şekil 2.23 : Doğrusal Programlama Örnek Blok Modeli.	49
Şekil 2.24 : Tamsayı Programlama Örnek Blok Modeli.	52
Şekil 2.25 : Karışık Tamsayı Programlama Örnek Blok Modeli.....	57
Şekil 2.26 : Öncelik kısıtlamalarının temsili görseli (5 blok uygulaması (sol), 9 blok uygulaması (sağ)).	62
Şekil 3.1 : Dallandır ve Kes yönteminin uygulama örneği.....	69
Şekil 3.2 : Dallandır ve Kes örnek problem başlangıç durumu.	72
Şekil 3.3 : Dallandır ve Kes örnek problem 1.adım.	72
Şekil 3.4 : Dallandır ve Kes örnek problem 2.adım.	73
Şekil 3.5 : Dallandır ve Kes örnek problem 3.adım.	74

Şekil 3.6 : Karar değişkeni sabitleme yönteminin genel akım şeması.....	77
Şekil 4.1 : Boşluk probleminin ifade edilmesi için kullanılan histogram.....	81
Şekil 4.2 : Örnek iç içe çukurların 2 boyutlu kesiti (periyotlar için aday çukur kabukları ile birlikte).....	84
Şekil 4.3 : 1. periyot için değişken sabitleme örneği.....	85
Şekil 4.4 : 2. Periyot için değişken sabitleme örneği.....	85
Şekil 4.5 : Cevher bolluğu (pembe bloklar) ve cevher yetersizliği (mavi bloklar) durumlarında değişken sabitleme.....	86
Şekil 4.6 : Önerilen yöntemin uygulama adımlarının akım şeması.....	87
Şekil 4.7 : 2 boyutlu blok model için oluşturulan ocak ağ diagramı (Örnek bağlantılar ile birlikte).....	89
Şekil 4.8 : 2 boyutlu blok modelin nihai ocak sınırları içinde kalan bloklar.....	90
Şekil 4.9 : Periyotlar için aday olarak belirlenen ocak kabuklarının toplu gösterimi..	93
Şekil 4.10 : RAF=0.4 ile elde edilen ve 1.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (yeşil).....	94
Şekil 4.11 : 1 periyot için karar değişkenlerle sabitlenen bloklar (gri).....	94
Şekil 4.12 : RAF=0.6 ile elde edilen ve 2.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (mavi).....	95
Şekil 4.13 : 2 periyot için karar değişkenlerle sabitlenen bloklar (gri).....	95
Şekil 4.14 : RAF=0.7 ile elde edilen ve 3.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (turuncu).....	96
Şekil 4.15 : 3 periyot için karar değişkenlerle sabitlenen bloklar (gri).....	96
Şekil 4.16 : RAF=0.8 ile elde edilen ve 4.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (pembe).....	97
Şekil 4.17 : 4. periyot için karar değişkenlerle sabitlenen bloklar (gri).....	97
Şekil 4.18 : RAF=0.85 ile elde edilen ve 5.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (sarı).....	98
Şekil 4.19 : 5. periyot için karar değişkenlerle sabitlenen bloklar (gri).....	98
Şekil 4.20 : RAF=0.9 ile elde edilen ve 6.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (turkuaz).....	99
Şekil 4.21 : 6. periyot için karar değişkenlerle sabitlenen bloklar (gri).....	99
Şekil 4.22 : 2 boyutlu örnek problemin çözümünde yıllara göre blok sayısı kıyaslamaları.....	101
Şekil 4.23 : Standart tam sayılı model ile elde edilen üretim planlamasının kesit görünümü.....	102
Şekil 4.24 : Önerilen yeni yöntem ile elde edilen üretim planlamasının kesit görünümü.....	102
Şekil 5.1 : Zuck_small blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).....	104
Şekil 5.2 : Zuck_small nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.....	105
Şekil 5.3 : Kd_medium blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).....	106
Şekil 5.4 : Kd blok modeli, nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.....	107
Şekil 5.5 : Zuck_medium blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).....	108
Şekil 5.6 : Zuck_medium blok modeli, nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.....	109
Şekil 5.7 : Marvin_medium blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).....	110

Şekil 5.8 :	Marvin blok modeli nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.	111
Şekil 5.9 :	Zuck_large blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).	112
Şekil 5.10 :	Zuck_large blok modeli nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.	113
Şekil 5.11 :	McLaughlin blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).	114
Şekil 5.12 :	McLaughlin blok modeli nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.	115
Şekil 6.1 :	Zuck_small blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslaması.	118
Şekil 6.2 :	Zuck_small malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.	118
Şekil 6.3 :	Zuck_small_standart_ILP model çözümünün plan görünümü.	119
Şekil 6.4 :	Zuck_small blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.	119
Şekil 6.5 :	Zuck_small blok modelinde alınan kesit hatları.	120
Şekil 6.6 :	Zuck_small blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	120
Şekil 6.7 :	Zuck_small blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	121
Şekil 6.8 :	Kd blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslaması.	122
Şekil 6.9 :	Kd malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.	122
Şekil 6.10 :	Kd blok modeli standart_ILP model çözümünün plan görünümü.	123
Şekil 6.11 :	Kd blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.	123
Şekil 6.12 :	Kd blok modelinde alınan kesit hatları.	124
Şekil 6.13 :	Kd blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	125
Şekil 6.14 :	Kd blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	126
Şekil 6.15 :	Zuck_medium blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslama.	127
Şekil 6.16 :	Zuck_medium malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.	128
Şekil 6.17 :	Zuck_medium blok modeli standart model çözümünün plan görünümü.	128
Şekil 6.18 :	Zuck_medium blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.	129
Şekil 6.19 :	Zuck_medium blok modelinde alınan kesit hatları.	129
Şekil 6.20 :	Zuck_medium blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	130
Şekil 6.21 :	Zuck_medium blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	130
Şekil 6.22 :	Marvin blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslaması.	131
Şekil 6.23 :	Marvin malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.	132
Şekil 6.24 :	Marvin blok modeli standart model çözümünün plan görünümü.	132
Şekil 6.25 :	Marvin blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.	133
Şekil 6.26 :	Marvin blok modelinde alınan kesit hatları.	133
Şekil 6.27 :	Marvin blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	134
Şekil 6.28 :	Marvin blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).	134
Şekil 6.29 :	Zuck_large blok modelinin önerilen yöntemle çözülmesi ile elde edilen malzeme miktarları ve net bugünkü değerler.	135

Şekil 6.30 : Zuck_large blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.	136
Şekil 6.31 : Zuck_large blok modelinde alınan kesit hatları.	137
Şekil 6.32 : Zuck_large blok modeli tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun A-A' kesiti. (üst), B-B' kesiti (alt).	138
Şekil 6.33 : McLaughlin blok modelinin önerilen yöntemle çözülmesi ile elde edilen malzeme miktarları ve net bugünkü değerler.	140
Şekil 6.34 : McLaughlin blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.	141
Şekil 6.35 : McLaughlin blok modelinde alınan kesit hatları.	142
Şekil 6.36 : McLaughlin blok modeli tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun A-A' kesiti. (üst), B-B' kesiti (alt).	143
Şekil 6.37 : Blok model ve çözüm süresi bazında önerilen yöntemin tam sayı modelleme ile kıyaslanması.	144
Şekil 6.38 : Blok model ve net bugünkü değer bazında önerilen yöntemin tam sayı modelleme ile kıyaslanması.	144

ACIK OCAK ISLETMELERİNDE OPTİMUM ORTA VE UZUN DÖNEM ÜRETİM PLANLAMASI

ÖZET

Maden üretim projelerinin ekonomik olarak sürdürülebilir olması hem işletmelerin hem de yer altı kaynaklarına sahip olan ülkelerin ekonomik gelişimleri açısından büyük önem arz etmektedir. Yüksek tenörlü cevher yataklarının sınırlı olması nedeniyle madencilik yatırımlarının uzun vadede zarara uğramaması adına, açık ocak madenciliğindeki çalışmaların uzun ve orta vadeli üretim planlamaları stratejik olarak yürütülmelidir. Bu bağlamda açık ocak işletmeceliğinde uzun vade üretim planlaması, maden sahasının hangi bölgesinin kazılacağı, kazılacak bölgelerin üretimin hangi aşamasında kazılacağı ve hangi yöntemle zenginleştirileceğini belirleme çalışmalarını içermektedir ve bu planlama sırasında öncelikli hedef, maden yatağının ekonomik değerinin maksimize edilmesidir. Bu prosedürün yönetilebilirliğini arttırmak için, maden yatakları blok model olarak bilinen 3 boyutlu veri setleri olarak tanımlanmaktadır. Bu model içindeki her bir blok, mevcut cevher miktarı, atık malzeme miktarı, içerdiği değerli mineralin tenörü ve bu bloğun kazılması ile elde edilmesi beklenen ekonomik değeri dahil olmak üzere cevher kütlesine ilişkin farklı özellikleri içermektedir. Büyük ölçekli maden yatakları yüz binlerce veya milyonlarca bloktan oluşabilmekte olup bu blok modeller kullanılarak yapılacak uzun vadeli üretim planlaması çalışmaları, kullanılan bilgisayarların donanım kapasitelerini aşabilmektedir. Bu sebeple bazı problemlerin çözümü çok uzun sürebilmekte hatta bazen çözülmesi mümkün olmamaktadır. Bu çalışmanın amacı büyük ölçekli açık ocak işletmelerinin uzun vade üretim planlaması yapılırken karşılaşılan problemlerin üstesinden gelebilecek bir yöntem geliştirilmesidir. Bu amaçla, geleneksel olarak kullanılan iç-içe geçmiş açık ocaklar yöntemi ve karışık tam sayı programlama modelinin bir arada kullanıldığı hibrit bir yöntem önerilmiştir. Problemin karmaşıklığını ve boyutunu azaltmak için nihai ocak sınırı içerisinde kalan blokların parametrik analizi sonucu elde edilen yuvalanmış açık ocak sınırlarından faydalanılarak tam sayılı modelin bazı karar değişkenleri önceden belirlenmekte ve optimuma yakın sonuçların daha kısa sürede çözülmesi hedeflenmektedir. Önerilen yöntemin uygulamalarına ilişkin detaylı açıklamalara yer verildikten sonra, uygulanabilirliğinin ve efektifliğinin gösterilmesi amacıyla benzer çalışmalarda kullanılan MineLib isimli veri setinden faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geleneksel tamsayı programlama modeli kullanılarak üretilen çözüm ve bu alandaki diğer ilgili çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin parametrik analiz ve blokların öncelik kısıtlarının belirlenme aşamaları programlanırken C++ programlama dili kullanılırken, tam sayı modelleme, çözümlerin ayıklanması ve görselleştirilmesi aşamaları için Python programlama dili kullanılmıştır. Tam sayı programlama modelinin çözülmesi için GUROBI çözücüsü kullanılmıştır. Kullanılan bilgisayar Intel(R) Xeon(R) W-1350 @ 3,30 GHz işlemci ve 16 GB RAM kapasitesine sahiptir. Elde edilen bulgulara göre önerilen yöntem, nispeten küçük ve orta ölçekli maden yataklarının uzun vade üretim planlaması problemini çözerken net bugünkü değeri

%98'e kadar korunurken çözüm süresini %95'e kadar kısaltabilmektedir. Ayrıca önerilen yöntemin uygulanması ile, standart karışık tam sayılı model ile çözülmesi donanımsal eksiklikler sebebiyle mümkün olmayan büyük ölçekli maden yatakları için makul zaman dilimi içinde uygulanabilir çözümler elde edilebilmektedir. Bu sayede değişik üretim kapasiteleri, değişen cevher satış fiyatı veya üretim maliyeti gibi durumlarda oluşabilecek değişik üretim planlaması senaryolarının hesaba katılmaları mümkün olabilmektedir. Önerilen yöntemin en belirgin dezavantajı, karışık tam sayı modelin kısıtlarının sabitlenmesi sebebiyle olası çözüm alternatiflerinin sınırlandırılmasıdır. Bu durum bazı blok modeller için elde edilen net bugünkü değerin düşük olmasına sebep olmaktadır. Son olarak önerilen yöntem için iyileştirme olanakları ve gelecek araştırma olasılıkları paylaşılmıştır.



OPTIMUM MEDIUM & LONG TERM PRODUCTION SCHEDULING OF OPEN PIT MINES

SUMMARY

Open-pit mine production scheduling (OPMPS) involves determining which blocks within the final pit limit should be mined each year and where the blocks should be transported, such as to a mill, trash dump, or stockpile, to maximize the net present value (NPV), which plays a crucial role in the assessment of mining projects. To enhance the manageability of this procedure, the mineral deposit was partitioned into discrete units known as blocks, which are typically modest in size and may not necessarily have cubic dimensions. Each individual block inside the dataset contains distinct properties pertaining to the ore body, including the quantity of ore present, quantity of waste material, grade of the valuable mineral contained within, and anticipated value of this mineral following the extraction process. Geostatistical approaches have been employed to determine these properties. The importance of strategic mine planning has significantly increased in order to ensure the long-term viability of mining projects due to the limited availability of high-grade ore deposits. The conventional approach employed in addressing the OPMPS problem involves dividing the primary problem into smaller subproblems, which were subsequently addressed individually. The subproblems include determining the ultimate pit limit, constructing nested pits based on the ore selling price, applying a revenue adjustment factor, establishing push-backs and developing a production scheduling plan. The primary objective of this study was to propose a method that combines a nested pit strategy with integer linear programming (ILP) models to overcome computational limitations by reducing the problem's complexity, decreasing solution times, and providing insights into alternative production schedules for large-scale open-pit mines.

The steps of the suggested method are outlined as:

1. Utilization of Hochbaum's pseudoflow algorithm to determine the limits of the ultimate pit.
2. The generation of nested pits by the utilization of parametric analysis on the blocks located within the boundaries of the ultimate pit, scaling the RAF
3. Computation of the material quantities within the nested pits and, identification of potential pit shells that can fulfill the intended annual production capacity.
4. In each period, the decision variables of the blocks located beyond the limits of the candidate nested pit are fixed.
5. A different strategy was implemented to fix the variables in the context of ore abundance within a candidate shell over a certain period. In this procedure, if there is an excess amount of ore within the shell, the decision variables of the blocks within that shell are fixed as 1.

6. The final process for fixing variables is implemented as follows. If the amount of ore in a candidate shell is less than the ore production capacity, the decision variable for all blocks within that shell is fixed at 1 because these blocks can be excavated within that time frame.
7. Solving the problem with reduced size, which is obtained by fixing the decision variables.

The proposed methodology aims to obtain optimal or near-optimal solutions within a short computational time. This is achieved by strategically limiting the range of possible solutions of the ILP model that defines the open-pit mine production-scheduling (OPMPS) problem. A comprehensive explanation is provided regarding the flowchart of the proposed approach for addressing this problem. The computational results are provided for six block models derived from MineLib. The obtained results are compared with the solution produced using the conventional integer programming model, along with other relevant works in this area. The benefits and drawbacks of the proposed algorithm have been addressed. The scheduling horizon is set between 9 and 15 periods, and the ore capacity constraint is set relative to the total quantity of ore in the example block models. By applying the suggested technique to various block models, we observed significant improvements in the duration of solution time. This demonstrated the effectiveness and practicality of the proposed method in real-world scenarios. In addition, some of the problems that are intractable with the standard ILP model were solved using the proposed method, which depicts the efficiency of the proposed method. The outcomes of the proposed algorithm, in terms of NPV, are compared with the results achieved by the modified TopoSort (TS) algorithm in and the Bienstock and Zuckerberg (BZ) algorithm. The TopoSort findings are the most optimal and feasible known outcomes of the relevant block models. However, the BZ algorithm solves the LP relaxation of the mixed-integer programming model of the OPMPS problem, but these results are deemed infeasible. The algorithm's precedence calculation and parametric analysis components are implemented in C++ due to the programming language's greater performance. Python is utilized for the integer modeling aspect. The GUROBI solver is employed to solve an integer model with fixed parameters on a PC set up with an Intel(R) Xeon(R) W-1350 @ 3.30 GHz processor and 16 GB of RAM. The findings indicate that the proposed approach is capable of effectively dealing with real-size problems of significant scale that are infeasible to solve within a reasonable timeframe or may be intractable entirely. On average, there is a 90% reduction in the time required to find a solution for block models that are relatively small or average in size. Additionally, there is an observed rise in the net present value (NPV) for certain block models. Moreover, practical solutions for the larger block models can be acquired within a reasonable timeframe, allowing planners to explore alternate scheduling choices based on varying production rates and the selling price of valuable minerals.

The NPV decreased for some block models, which is a drawback of the proposed methodology. This situation arises because of the limitations of the solution alternatives with fixed variables. Although the decrease in net present value for some models may appear to be a drawback of this method, it is a significant contribution to the mining industry that various production scheduling alternatives can be examined in a short period of time based on varying mining capacities and ore sales prices. An additional limitation of the proposed algorithm is its reliance on constraints concerning ore production capacity. The solutions derived from this methodology may be unfeasible when there are constraints on total production capacity. To address this limitation, a potential solution is to incorporate relaxation techniques into the ILP model. Additionally, various heuristic approaches can be used to ensure compliance with the limitations of the total production capacity following the suggested strategy. Lastly, potential enhancements and directions for future research are provided. Future research possibilities include incorporating operational parameters with capacity constraints. In addition, further research could explore the effects of the techniques employed to meet the constraints of total production capacity, and it is worth considering the inclusion of metaheuristic approaches as potential avenues for future research. Although it is challenging to develop a viable production plan initially, these methods can be investigated in subsequent studies, where the initial results obtained from the proposed method are utilized as input for these techniques.



1. GİRİŞ

Açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlaması, minerallerin uzun bir süre (genellikle birkaç yıl) boyunca çıkarılmasına yönelik bir plan oluşturulmasını içerir. Amaç, jeoteknik, operasyonel ve piyasa faktörleri gibi çeşitli kısıtlamaları göz önünde bulundurarak madenin ekonomik değerini en üst düzeye çıkarmak için madencilik faaliyetlerinin sırasını ve zamanlamasını optimize etmektir. Bu planlama süreci, cevher kalitesi, üretim kapasitesi, ekipman kullanılabilirliği ve pazar talebi gibi faktörleri dikkate alır. En uygun madencilik programlarını oluşturmak için genellikle karmaşık matematiksel modellerin ve algoritmaların kullanımını içerir. Bu süreçte alınan planlama kararları madencilik operasyonunun karlılığı ve sürdürülebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlamasında temel amaç, madencilik işleminin net bugünkü değerini (NBD) en üst düzeye çıkarmaktır. Bu, mineralleri en uygun maliyetli şekilde çıkarmak için maden ocağındaki madencilik bloklarının optimal sırasını ve zamanlamasını belirlemeyi içerir.

Bu süreçteki bazı önemli hususlar şunlardır:

Jeolojik Veriler: Süreç, maden yataklarını, tenörlerini ve maden içindeki dağılımını anlamak için jeolojik verilerin toplanması ve analiz edilmesiyle başlar. Bu veriler, farklı madencilik bloklarının ekonomik değerlerini belirlemek için gereklidir.

Blok Modelleme: Maden yatağı bloklardan oluşan 3 boyutlu bir nokta bulutu olarak ifade edilebilir ve her bir bloğa cevher tenörü, atık içeriği ve kaya sertliği gibi özellikler atanmıştır. Bu blok modeli daha sonraki planlama kararlarının temelini oluşturur.

Madencilik Kısıtlamaları: Planlama sırasında, ekipman kapasiteleri, erişim yolları ve güvenlik düzenlemeleri gibi pratik madencilik kısıtlamaları dahil olmak üzere çeşitli kısıtlamaların dikkate alınması gerekir. Diğer kısıtlamalar, harmanlama gerekliliklerini, işleme kapasitelerini ve çevresel hususları içerebilir.

Optimizasyon Algoritmaları: Optimum madencilik programlarını oluşturmak için matematiksel optimizasyon algoritmaları kullanılır. Bu algoritmalar blok ekonomisi, madencilik maliyetleri, ekipman kullanılabilirliği ve madencilik kapasitesi kısıtlamaları gibi faktörleri dikkate alır. Planlama problemini çözmek için Tamsayılı Doğrusal Programlama (IP), Karışık Tamsayılı Programlama (ILP) gibi farklı algoritmalar veya Genetik Algoritmalar (GA) gibi metasezgisel teknikler kullanılabilir.

Duyarlılık Analizi: Oluşturulan planlamalar, farklı senaryolardaki hallerinin değerlendirilmesi için duyarlılık analizine tabi tutulur. Bu analiz, uzun vadeli planlama planındaki potansiyel risklerin ve belirsizliklerin belirlenmesine yardımcı olur.

Yinelemeli Süreç: Uzun vadeli üretim planlama yinelemeli bir süreçtir. Yeni veriler elde edildikçe veya piyasa koşulları değiştikçe üretim planının yeni bilgileri yansıtacak şekilde güncellenmesi ve optimize edilmesi gerekebilir.

Genel olarak, açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlaması, uzun bir süre boyunca madencilik faaliyetleri için optimize edilmiş bir plan oluşturmak amacıyla jeolojik, operasyonel ve ekonomik faktörlerin entegre edilmesini içeren karmaşık bir süreçtir. Amaç, karlılığı ve sürdürülebilirliği en üst düzeye çıkarmak için çeşitli kısıtlamaları göz önünde bulundurarak değerli madenlerin çıkarılma sürecini planlamaktır.

1.1 Madencilik İşletmelerinde Üretim Planlamasının Önemi

Açık ocak yöntemi ile üretim yapan madenlerde kazı işlerinin planlaması, üretim hedeflerini verimli bir şekilde karşılamak için maden kaynaklarının madenden çıkarılmasının optimize edilmesi sürecini ifade eder. Çeşitli kısıtlamalar ve hedefler göz önünde bulundurularak madenin ekonomik değerini en üst düzeye çıkarmak için delme, patlatma, yükleme ve taşıma gibi madencilik faaliyetlerinin sırasını ve zamanlamasını belirlemeyi içerir. Üretim planlamanın temel amacı, madencilik ekipmanlarının optimum kullanımını sağlamak, atık miktarı ve cevher seyrelmesini en aza indirmek ve değerli minerallerin geri kazanımını en üst düzeye çıkarmaktır.

Cevher kalitesi, maden geometrisi, ekipman kullanılabilirliği, işletme maliyetleri ve pazar talebi gibi faktörler dikkate alınır.

Üretim planlaması tipik olarak ayrıntılı bir madencilik planı oluşturmak için matematiksel optimizasyon modellerinin ve algoritmalarının kullanımını içerir. Bu modeller madenin fiziksel özellikleri, madencilik düzenlemeleri, ekipman kapasiteleri ve üretim hedefleri gibi çeşitli faktörleri ve kısıtlamaları dikkate alır. Açık ocak madenleri, üretim programını optimize ederek operasyonel verimliliği artırabilir, maliyetleri azaltabilir ve karlılığı artırabilir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması yapmakta kullanılabilecek bir yöntem geliştirmektir. Tavsiye edilen yöntem ile uzun vade üretim planlaması yapılırken karşılaşılan problemlere çözüm sağlanması hedeflenmektedir. Bu süreçte karşılaşılan bazı yaygın sorunlar şunlardır:

Ölçek ve Karmaşıklık: Büyük ölçekli açık ocak madenleri, her biri çeşitli nitelik ve kısıtlamalara sahip önemli sayıda madencilik bloğu içerir. Sorunun büyüklüğü ve karmaşıklığı, optimizasyon modelini verimli bir şekilde formüle etmeyi ve çözmeyi zorlaştırabilir.

Kombinatoryal Patlama: Potansiyel madencilik planlamalarının sayısı, madencilik bloklarının sayısı ile birlikte katlanarak artar. Bu kombinatoryal patlama, tüm olası çözümleri keşfetmeyi ve makul bir zaman dilimi içinde en uygun planlamayı bulmayı hesaplama açısından zorlu hale getirmektedir.

Zaman ve Kaynak Kısıtlamaları: Sorunun karmaşıklığı ve hesaplama gereksinimleri, özellikle büyük ölçekli madenlerde uzun çözüm sürelerine neden olabilir. Sınırlı hesaplama kaynakları ve zaman kısıtlamaları, çözüm alanını kapsamlı bir şekilde keşfetme veya pratik zaman dilimleri içinde optimuma yakın çözümler bulma yeteneğini sınırlamaktadır.

Bahsi geçen bu sorunların üstesinden gelebilmek adına karışık tam sayı modellerin çözümleri için kullanılan bir yöntem olan değişken sabitleme yönteminden

faydalanılması hedeflenmektedir. Değişken sabitleme, optimizasyon problemini çözmeden önce bazı değişkenleri belirli değerlere sabitleyerek tamsayılı doğrusal programlama (ILP) modellerini daha verimli bir şekilde çözmek için kullanılan bir yaklaşımdır. ILP modellerinde değişken sabitleme kullanmanın amacı, problemin karmaşıklığını azaltmak ve potansiyel olarak çözüm süresini iyileştirmektir. Belirli değişkenlerin sabitlenmesiyle arama alanı azaltılır, bu da daha hızlı hesaplamalara ve potansiyel olarak optimal veya optimale yakın çözümlerin daha hızlı bulunmasına olanak sağlar. Genel olarak ILP modellerinde değişken sabitleme kullanmanın amacı, arama alanını azaltarak ve hesaplama verimliliğini artırarak çözüm sürecini hızlandırmaktır. Bu teknik, açık ocak madenlerindeki uzun vadeli üretim planlama problemi gibi karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde özellikle yararlı olabilir; burada makul bir zaman dilimi içerisinde optimum çözümlerin bulunması, etkili karar verme ve kaynak tahsisi için çok önemlidir.

1.3 Literatür Araştırması

Açık Ocak Üretim Planlaması Probleminin çözümünde kullanılan Deterministik Yaklaşımlar:

Doğrusal programlama modeli

Johnson (1968), Açık ocak işletmelerindeki uzun vade üretim planlaması problemini doğrusal programlama modeli kullanarak çözmeyi hedeflemiştir. Bu model paranın zaman değerini, alternatif zenginleştirme yöntemlerini ve dinamik sınır tenör stratejilerini hesaba katmaktadır. Bu yöntemle elde edilen çözümlere göre bazı blokların parçalı olarak üretilmesi sonucu ortaya çıkmakta ve bu sebeple bazı blokların havada asılı kalıyor olmaları gibi bir problem ortaya çıkmaktadır.

Hedef Fonksiyon:

$$\text{Max } Z = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N C_i^{tm} \cdot TB_i \cdot x_i^{tm} \quad (1.1)$$

Kısıtlar:

$$G_{\min}^{tm} \leq \left(\sum_{i=1}^N g_i \cdot TB_i \cdot x_i^{tm} / \sum_{i=1}^N TB_i \cdot x_i^{tm} \right) \leq G_{\max}^{tm} \quad t = 1, 2, \dots, T \text{ \& } m = 2, 3, \dots, M \quad (1.2)$$

$$PC_{\min}^{tm} \leq \sum_{i=1}^N TB_i \cdot x_i^{tm} \leq PC_{\max}^{tm} \quad t = 1, 2, \dots, T \text{ \& } m = 2, 3, \dots, M \quad (1.3)$$

$$MC_{min}^t \leq \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M TB_i \cdot x_i^{tm} \leq MC_{max}^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (1.4)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M x_i^{tm} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.5)$$

$$\sum_{m=1}^M x_b^{tm} - \sum_{r=1}^T \sum_{m=1}^M x_l^{rm} \leq 0 \quad t = 1, 2, \dots, T, b = 1, \dots, N \text{ \& } \forall l \in Pb \quad (1.6)$$

$$0 \leq x_i^{tm} \leq 1 \quad t = 1, 2, \dots, T, b = 1, 2, \dots, N \text{ \& } m = 1, \dots, M \quad (1.7)$$

Yukarıda paylaşılan doğrusal programlama modelinde yer alan değerlerin tanımları aşağıdaki gibidir.

T = Periyot sayısı

N = Planlamaya konu olan madencilik bloklarının sayısını

i = blok indekslerini (i = 1, 2, ... , N)

C_i^{tm} = m zenginleştirme prosesi ile zenginleştirilecek, t periyodu içerisinde kazılmalı i indeksli bloktan elde edilecek net bugünkü değer (TL, \$)

x_i^{tm} = i indeksli bloğun kazılma yüzdesi (üçte birinin kazılması durumunda $x_i^{tm} = 1/3$)

g_i = i bloğunda bulunan cevher tenörü (ppm, ppb, %)

TB_i = i bloğunun tonajı (ton)

MC_{max}^t = t periyodundaki maksimum maden üretim kapasitesi

MC_{min}^t = t periyodundaki minimum maden üretim kapasitesi

PC_{max}^{tm} = m malzemesini zenginleştirecek cevher hazırlama tesisinin t periyodundaki maksimum kapasitesi

PC_{min}^{tm} = m malzemesini zenginleştirecek cevher hazırlama tesisinin t periyodundaki minimum kapasitesi

G_{max}^{tm} = m cevherinin t periyodu içerisindeki maksimum tenörü

G_{min}^{tm} = m cevherinin t periyodu içerisindeki minimum tenörü

b = t periyodu içerisinde üretilmesi planlanan bir bloğun indeksi

m = malzeme veya zenginleştirme çeşidi (cevher = 1, atık = 2)

Pb = maksimum şev açısı kısıtını sağlarken, herhangi bir b bloğunun üretilmesi için üretilmesi gereken diğer blokların indislerini içeren seti göstermektedir.

Karışık Tam Sayı Programlama (MIP) modeli

Gershon (1982), Johnson'ın doğrusal modelinde yer alan kısmi blok kazısının ortaya çıkardığı blokların havada asılı kalması sorununa çözüm olarak bir karışık tam sayı modeli önermiştir. Bu model Johnson'ın doğrusal programlama modeline ekstra karar

verme kısıtları ekleyerek üstteki bloklar tam olarak kazılmadıysa, alttaki blokların kazılmasının önüne geçmeyi hedeflemektedir.

Bu amaçla her blok için aşağıda paylaşılan kısıtları kullanmıştır:

$$B_{ijk}^{(t)} + C_{ijk}^{(t)} - C_{ijk}^{(t-1)} - X_{ijk}^{(t)} \geq 0 \quad (1.8)$$

$$D_{ijk}^{(t)} + \sum_{l=i-1}^{i+1} X_{ijk-1}^{(t)} - D_{ijk}^{(t+1)} - 9B_{ijk}^{(t)} \geq 0 \quad (1.9)$$

$B_{ijk}^{(t)}$ = ijk bloğunun üstündeki bloklar t periyodunda yüzde yüz kazılmışlarsa sıfır, aksi takdirde 1

$X_{ijk}^{(t)}$ = kazılmışlık yüzdesi (örneğin ijk bloğunun yüzde onu kazılmış ise $X_{ijk}^{(t)} = 0.1$)

$C_{ijk}^{(t)}$ = ijk bloğunun t periyodunda kazılmayan yüzdesi

$D_{ijk}^{(t)}$ = ijk bloğunun üstündeki blokların t periyodu başlarkenki kazılmışlık yüzdeleri

Dagdelen ve Johnson (1986), büyük ölçekli açık ocak işletmelerindeki üretim planlaması problemlerini karışık tamsayı programlama modeli ile çözmek amacıyla lagrange rahatlatma (Lagrange Relaxation) yaklaşımından faydalanmıştır. Bu yaklaşımın dezavantajı, uygulanabilir olmayan çözümler sunması halinde her zaman optimum sonucu verememesidir. Gershon (1987), üretim planlaması probleminin çözümü için kullanılabilir ve madencilik bloklarının konumlarına göre öncelendirildikleri sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Bu yönteme göre en yüksek öncelik değerine sahip blok kazıldıktan sonra kalan blokların öncelikleri tekrar hesaplanır ve bu döngü, üretim planlamasında kullanılacak bütün bloklar bitene kadar devam eder.

Caccetta ve Hill (2003), açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması problemlerinin karışık tam sayı modellerinin çözülmesi için Dal-Kesme (Branch and Cut) algoritmasından faydalanmışlar ve yöntemlerini bir yazılım haline getirmişlerdir. Jamshidi ve Osanloo (2018), Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü sırasında birden fazla zenginleştirme seçeneğinin olduğu bir işletmedeki üretim planını karışık tam sayı modeli kullanarak çözmeye çalışmıştır. Paricheh ve Osanloo (2020), Açık işletmelerde uzun vade üretim planlaması problemini çözerken ekipman

ihtiyaçlarını da göz önünde bulunduran karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli kullanmışlardır. Çalışmalarını kuramsal bir ocakta hem iki problemi ayrı hem de bir arada çözerek problemin bir arada çözülerek NBD'nin %3.3'e kadar iyileştirebildiğini kaydetmişlerdir. Khan ve Asad (2020), Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü sırasında dinamik sınır tenör kavramını hesaba kattıkları bir karışık tam sayı modeli paylaşmışlardır. Paithankar, A., vd. (2020a), Paithankar, A. vd. (2020b) Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü sırasında dinamik sınır tenör konseptini hesaba kattıkları bir karışık tam sayı modeli paylaşmışlardır. Modelin çözümünde genetik algoritması ve maksimum akış algoritması karışımı bir çözüm yöntemi kullanmışlardır. Altın ve bakır yataklarına uyguladıkları modelin sonuçlarını paylaşarak önerdikleri metodun performansını ortaya koymuşlardır. Ben-Awuah, E. vd, (2018) Petrol Şeyli üreten bir işletmede yapılan üretim planlaması için karışık tam sayılı bir hedef programlama modeli önermişlerdir. Modellerini bir maden yatağına uygulayarak Whittle yazılımı ile yapılan planlama ile kıyaslamışlardır.

Tam sayı programlama modeli (IP)

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması probleminin tam sayı programlama modelinin genel hali şu şekildedir:

Hedef Fonksiyon:

$$\text{Max}Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_TX_T \quad (1.10)$$

Kısıtlar:

Madencilik ve Boyutlandırma kısıtları:

$$\begin{cases} A_1X_1 \leq b_1 \\ A_2X_2 \leq b_2 \\ \vdots \\ A_TX_T \leq b_T \end{cases} \quad (1.11)$$

Sıralama kısıtları:

$$\begin{cases} EX_1 \leq 0 \\ EX_1 + EX_2 \leq 0 \\ \vdots \\ EX_1 + EX_2 + \dots + EX_T \leq 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

Rezerv kısıtları:

$$\sum_{t=1}^t x_i^t = 1 \quad \forall i \quad (1.13)$$

Karar değişkenlerinin tam sayı olmasını sağlayan kısıt:

$$X_i^t = \{0,1\} \quad \forall i, \forall t \quad (1.14)$$

Burada:

T= Periyot sayısı

N = Blok modelde yer alan blok sayısı

K = Kapasite kısıtları

$X_t = N$ değişken içeren bir sütun vektör , x_i^t

C_t = blokların t periyodunda kazılması sonucu elde edilecek NBD'leri gösteren bir satır vektörü, (c_i^t sayıda eleman içerir)

A_t = Blokların kapasite kısıtlarını ne kadar kullandığını gösteren KN boyutunda bir matris

b_t = Kapasite kısıtlarını içeren gösteren sütun vektörü

E = Öncelik kısıtları matrisi

(1.11) numaralı kısıtlar kapasite kısıtlarının sağlanmasının garanti ederken (1.14) numaralı kısıt, blokların üretim süreci boyunca bir kere kazılmasını garanti eder. Bir tam sayı modeli çok sayıda 0,1 değişkeni içerdiğinden halihazırda bulunan üretim planlaması yazılımlarıyla çözümleri sırasında bilgisayar donanım kapasitesini aşma veya sonuca ulaşamama gibi problemler yaşanabilmektedir. Bu sebeple, böyle bir modelin çözülebilmesi için bazı rahatlatma yaklaşımları ortaya atılmıştır. Caccetta ve Hill (2003), çalışmalarında dallandır-ve-kes prosedürünün uzun vade üretim planlaması (UVÜP) probleminde tam sayı programlama modeline nasıl uyarlanacağını

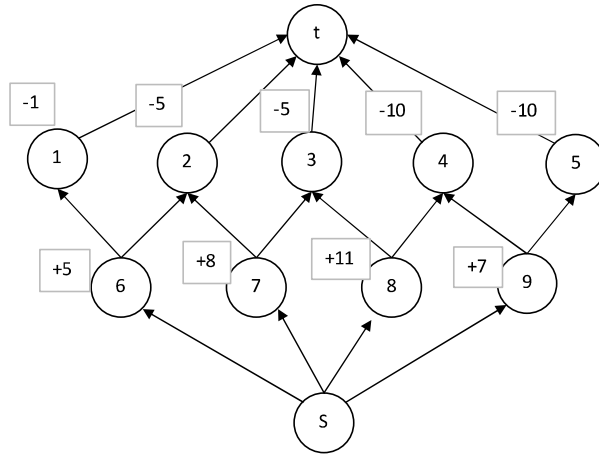
özetlemişlerdir fakat bu çalışmadaki model de çok sayıda bloktan oluşan blok modeller için yetersiz kalabilmektedir.

Kümeleme yaklaşımı (Clustering)

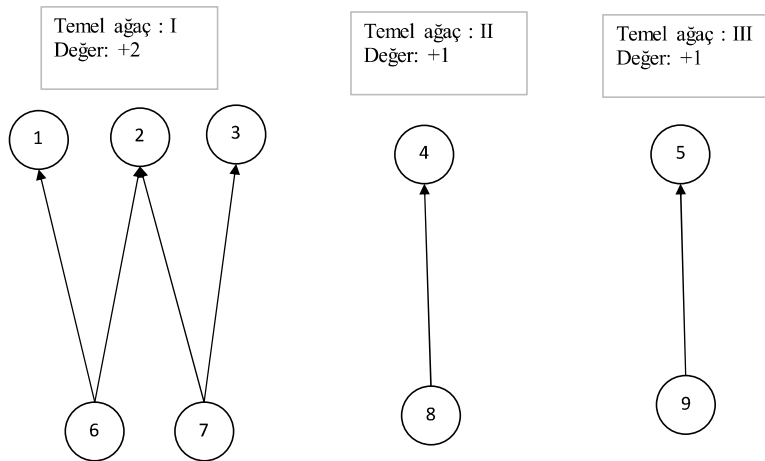
Ramazan vd. (2005), Açık ocak işletmelerindeki üretim planması probleminin çözümünde kullanmak amacıyla kümeleme yaklaşımından faydalanmaya çalışmışlardır. Kümelemek; benzer özellikteki verileri bir araya getirerek problem karmaşıklığını azaltmayı hedefleyen bir yaklaşımdır. Bu sayede karar verme sürecinin hızlandırılabilceği düşünülmektedir. Ramazan vd. tam sayı modelini kurdukları blok modelde yer alan atık ve cevher bloklarını kümeleyerek tam sayı modelin ikili değişken sayısını azaltmışlardır. Kümelenen bloklar için “temel ağaç” olarak adlandırdıkları bir blok kombinasyonu tanımlamışlar ve bu “temel ağaç”ın sahip olması gereken özellikleri şu şekilde belirtmişlerdir:

1. Üretildiğinde kar elde edilmeli.
2. Üretim kapasitesi ve şev stabilitesi kısıtlarını bozmamalı
3. Herhangi bir temel ağaç içerisinde, 1 ve 2 numaralı özelliği taşıyan başka bir temel ağaç bulunmamalı.

Bu kümeleme işleminin yapılabilmesi için bir doğrusal programlama modelinden faydalanmışlardır. Örnek bir blok modelin 2 boyutlu gösterimi Şekil 1.1’de ve 3 adet temel ağaç örneği Şekil 1.2’de paylaşılmıştır.



Şekil 1.1: 2 boyutlu blok model (Ramazan vd. 2005).



Şekil 1.2: Temel ağaç örnekleri (Ramazan vd. 2005).

Tüm temel ağaçlar, cevher tonajı, içinde bulunan metal miktarı ve değeri bilinen bir blok olarak düşünülerek, madencilik kapasitesi, zenginleştirme tesisi kapasitesi ve üretim kısıtlarını sağlayacak bir tam sayı modeli ile üretim sıralamaları belirlenmelidir.

Tam sayı programlama modelinin açık ocak işletmelerindeki üretim planlaması probleminin çözümünde kullanılmasına dair diğer örnekler: Rezakhah, M. vd. (2020) Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü için stok sahası ve harmanlama

seçeneklerini göz önünde bulunduran tamsayı-doğrusal programlama modeli paylaştımlardır. Modelin zm için sezgisel bir yöntemden faydalanmıştırlardır. Fathollahzadeh, K. vd. (2021) Açık ocak iştletmelerinde UVP probleminin zm sırasında atık madde yönetimini malzeme tipine göre ayırarak hesaba katan bir tamsayılı model paylaştımlardır.

Dinamik Programlama (DP)

Bu yöntemin kendine has bir matematiksel formülü yoktur. DP'nin açık ocak iştletmelerinin uzun vade üretim planlaması probleminde ilk örneklerinden birine Roman (1974)'te rastlanmaktadır. Bu çalışmada, üretim planlaması problemi ve nihai ocak sınırı optimizasyonu aynı anda yapılmaya çalışılmıştır. En yüksek net bugünkü değere sahip sıralama seçilerek, başlangıç ocak sınırı şekli olarak belirlenir. Ocak sınırı çevresindeki blokların NBD'yi arttırıp arttırmadıklarına bakılarak NBD'ye katkısı olmayan bloklar ocak sınırı içerisinden çıkartılır. Bu süre sınır içerisinde çıkarılacak blok kalmayana kadar tekrarlanır. Bu yöntemin avantajı paranın zaman değeri hesaba katmasının yanında ve üretim planlaması ve nihai ocak sınırı problemini bir arada üzüyor olmasıdır.

Dezavantajları ise şu şekilde sıralanır;

- büyük ölçekli yatalara uygulanması performans açısından uygun değildir.
- Kapasite kısıtlarının sağlanma garantisi yoktur
- Ocak hacminin artmasının maliyetler üzerindeki etkisini hesaba katmaz.

Onur ve Dowd (1993), UVP probleminin zm için DP'dan faydalanmıştırlardır. Hesaplanması gereken alernatiflerin bilgisayar donanım kapasitesini aştığını ortaya koyarken, değişik kısıtlar yardımı ile uygulanabilir olmayan alernatifler elenerek, hesaplanacak ihtimallerin sayısının azaltılabileceğini belirlemişlerdir. Elevli (1995) DP'yi, nihai açık ocak sınırı ve üretim planlaması probleminin eş zamanlı zm için kullanmıştır. Lerch ve Grossmann (1965) açık ocak nihai sınırlarını belirlemek için dinamik programlama yöntemini kullanmış ve Johnson ve Sharp (1971), alışmalarında Lerch Grossman algoritmasının 2 boyutlu ve 3 boyutlu uygulamasına yer vermişlerdir. De Lara vd. (2017) Açık ocak iştletmelerinde UVP probleminin zm sırasında kullanılan dinamik ve deterministik bir optimizasyon süreci önermişlerdir. Rimélé vd. (2020) Açık ocak iştletmelerinde UVP probleminin

çözümü için dinamik programlamadan faydalandıkları bir stokastik model paylaşmışlardır. Modellerinde tenör belirsizliği ve fiyat belirsizliğinin etkilerini minimize edecek ikinci aşamalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir.

Grafik Teorisi ve Network akış temelli yaklaşımlar

Grafik teorisi temelli algoritmalarından biri olan Lerchs-Grosmann algoritması nihai ocak sınırlarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu algoritmanın amacı karı maksimize etmektir. Bu algortmada grafiğin düğüm noktaları maden bloklarını ifade ederken, bu düğüm noktaları arasındaki yönlendirilmiş arklar ise bir blok üretilmeden önce üretilmesi gereken bloklar arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bu teknikte arklar yönleri ve değerlerine göre güçlü veya zayıf olarak ifade edilirken bütün düğüm noktaları kaynağa güçlü bir ark ile bağlanana kadar algoritma çalışmaya devam eder, Lerchs ve Grosmann (1965). Zhao ve Kim (1992) grafik teorisine ekledikleri bazı ekstra özellikler ile benzer bir bakış açısı ortaya koymuş ve önerdikleri yöntem ile problemin daha hızlı çözülebileceğini iddia etmişlerdir. Tolwinski ve Underwood (1992), UVÜP problemini çözebilmek için DP, yapay zeka, stokastik optimizasyon ve sezgisel yöntemlerin bir arada kullanıldığı çözecek bir metod önermişler ve problemin aslında $G = (S, E, W)$ grafiğindeki kapasitesi en yüksek yolu bulmakla eşdeğer olduğunu belirtmişlerdir.

Burada:

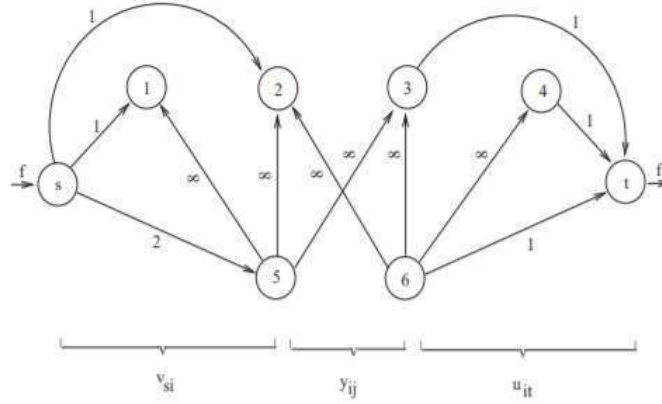
S: Nihai ocak sınırı içerisinde yer alan blokların oluşturduğu düğüm noktaları seti

E: Düğüm noktalarını birbirine bağlayan arkları gösteren set

W: Arklar üzerinden geçebilecek akış miktarını gösteren seti ifade etmektedir.

+1 x_1	+1 x_2	-1 x_3	-1 x_4
	+2 x_5	-1 x_6	

Şekil 1.3: 2 boyutlu bir açık işletme örneği.



Şekil 1.4: Açık işletme modelinin network görünümü (Düğüm noktaları ve bağlantı kapasiteleriyle).

+1 x_1	+1 x_2	-1 x_3	-1 x_4
	+2 x_5	-1 x_6	

Şekil 1.5: 2 boyutlu örnek modelde nihai ocak sınırı görseli.

Eğer S_0 ocağın başlangıç halini temsil eden düğüm noktası olursa UVÜP problemi, G grafiği içerisinde W 'yi minimize ederken optimum $S_0, S_1, \dots, S_T$ yolunu bulmaya dönüşür. Paithankar ve Chatterjee (2019), Çalışmalarında açık ocak üretim planlaması probleminin çözümü için maksimum akış ve genetik algoritmasının bir arada kullanıldığı bir model paylaşmışlar ve sayısal bir örnek üzerinde uygulamasını paylaşarak çözümün etkinliğini ortaya koymuşlardır. Gamache ve Auger (2000) Çalışmalarında farklı maksimum akış algoritmalarının performanslarını inceleyerek nihai ocak sınırlarının bulunması için kullanılmaları konusunda farklı alternatifler önermişlerdir. Hochbaum ve Chen (2000) maksimum akış probleminin çözümü için çalışma süresi açısından efektif bir yöntem olan push-relabel algoritmasını önermişlerdir. Hochbaum (2001), Etkin bir parametrik analiz yapılmasını sağlayacak şekilde Lerchs Grosmann algoritması ve maksimum akış problemi arasında bir ilişki kurmuştur. Picard and Smith (2004) parametrik maksimum akış analizi ile

fayda/maliyet oranını maksimize edecek ocak sınırlarının belirlenmesiyle ilgili bir çalışma paylaşmışlardır.

Açık Ocak Üretim Planlaması Probleminin çözümünde kullanılan belirsizlik temelli yaklaşımlar:

Bu yaklaşıma göre, farklı blok modeli alternatiflerinin simülasyon teknikleri ile oluşturulması, blokların bir değere sahip olma olasılıklarının hesaplanması ve planlama problemi çözülürken bu olasılıkların da hesaba katılması ile açık ocak üretim planlaması probleminin belirsizlik kaynaklı dezavantajlarının etkilerinin azaltılabileceği düşünülmektedir. Daha sonra bu alternatiflere göre bir bloğun belli bir periyotta üretilebilme olasılığı 0 ile 1 arasında olacak şekilde hesaplanır.

Olasılıkları hesaplanmış bloklar hedef fonksiyonu:

$$\max \sum_{t=1}^T [\sum_{n=1}^N (v_n^t \cdot p_n^t) \cdot x_n^t] - \sum_{m=1}^M w \cdot d_m^t \quad (1.15)$$

olan bir model içerisinde optimize edilir.

Burada:

T = Periyot sayısı

N = Blok sayısı

v_n^t = n bloğunun t periyodu içerisinde kazılmasından kazanılacak gelir

p_n^t = i bloğunun, t periyodunda kazılma olasılığı

x_n^t = n bloğu t periyodu içerisinde kazılacaksa 1, aksi halde 0

w = modelin uygulanabilir olması için yapılması gereken değişikliğin birim maliyeti

d_m^t = m bloğunun üretim planına eklenmesi sonucu NBD’de meydana gelen deviasyon miktarı

Dimitrakopoulos & Ramazan (2008), tenör belirsizliği ve ekipmanların yer değiştirmelerinin hesaba katıldığı bir Doğrusal Programlama modeli paylaşmışlardır. Bu model, blok modelde yer alan blok tenörlerinin beklenen ve simüle edilmiş hallerinin belirli bir sınır değer üzerinde olup olmadıklarına göre oluşturulmuştur. Tenör olasılıkları, kapasite kısıtları ve madencilik çalışmalarının uygulanabilirliği aynı

anda değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımın kilit noktası, belirli bölgelerin madencilik sürecinin daha erken aşamalarında üretilebilme olasılıklarıdır. Gilani ve Sattarvand (2016), Çalışmalarında jeolojik belirsizlikleri entegre etmek amacıyla simüle edilmiş cevher kütleleri kullanılan, karınca kolonisi optimizasyonu sezgiseli temelli bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Deterministik karınca kolonisi yöntemiyle elde edilen sonuçların iyileştirilmesi amacıyla iki farklı strateji kullanmışlardır. İlk olarak önceden belirlenmiş tek bir olasılık değerine göre belirlenen planlama modeline ek olarak bir de birden fazla olasılık değerine göre belirlenen bir planlama modeli kullanmışlardır. Çalışmalarını İran sınırları içerisindeki bir bakır madeninde uygulayarak sonuçları paylaşmışlardır. Kakha ve Monjazi (2017), Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü sırasında kullanılan geleneksel yöntemlerde tenör belirsizliğini hesaba katan bir model önermişlerdir. Moreno vd. (2017), Montiel ve Dimitrakopoulos (2017) , Kumral ve Sari (2017), Quigley vd. (2018), Navarra vd. (2018), Tahernejad vd. (2018), Vallejo ve Dimitrakopoulos (2019), Gilani vd. (2020), Lago vd. (2020), Lamghari ve Dimitrakopoulo (2020), Sepúlveda vd. (2020) Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü sırasında belirsizliklerin hesaba katılması sırasında izlenecek prosedürler ve katılmaması durumunda ne gibi etkiler olduğu hakkında çalışmalar paylaşmışlardır. de Carvalho ve Dimitrakopoulos (2019), Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü sırasında belirsizliklerin etkisini ortaya konması için kullanılan simülasyon yöntemlerinde yüksek dereceli simülasyonlar kullanmanın yapılan planlamaların NBD'lerini arttırdığını paylaşmışlardır. Morales vd. (2019) Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü sırasında belirsizlikleri hesaba katan stokastik bir model paylaşmışlar ve UVÜP problemini önce nihai sınırları bulup sonra bu sınırlar içinde kaan blokları sıralayacak şekilde iki aşamada çözmüşlerdir. Sepulveda vd. (2019) Jeolojik, teknik ve sektörel belirsizliklerin hesaba katılarak NBD maksimizasyonu ve risk minimizasyonu hedefleyen bir model paylaşmışlardır. Belirsizliklerin ortaya çıkartacağı riskin etkisini azaltmak için simülasyon tekniğinden ve büyük boyutlu problemlerin çözülebilmesi için sezgisel yöntemlerden faydalanmışlardır. Modellerini bir polimetallik yatakta uygulayarak sonuçlarını paylaşmışlardır. Senecal ve Dimitrakopoulos (2019) Çalışmalarında uzun vade üretim planlaması problemini birden fazla zenginleştirme seçeneği olması halinde ve tenör belirsizliğinin hesaba katıldığı bir model paylaşmışlardır. Modelin çözümü için Tabu araması sezgiselinden faydalanmışlardır. Rimele vd. (2020) Çalışmalarında jeolojik belirsizlikler ve maden

fiyatlarındaki belirsizliklerin etkilerini bir arada hesaba katan bir iki aşamalı Stokastik tam sayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Gholamnejad vd. (2020) Uzun vade üretim planlaması problemini çözerken belirsizlikleri hesaba katmanın yanında stok sahası seçeneğini de hesaba katmışlardır. Modellerini bir altın madenine uygulamışlar ve stokastik model ile deterministik model arasındaki farkları ortaya koymuşlardır. Alipour vd. (2020) Belirsizliklerin etkisini hesaba kattıkları bir model kullanmışlar ve çözümünde genetik algoritması ve deterministik yöntemlerden faydalanarak sonuçları paylaşmışlardır. Modellerini kuramsal bir cevher modeli üzerinde uygulayarak sezgisel ve deterministik yöntemler arasındaki farkları ortaya koymuşlardır. Gilani vd. (2020) Çalışmalarında jeolojik belirsizliklerin etkisini hesaba katacak bir stokastik tam sayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Simüle edilmiş cevher kütleleri kullanarak risk blok modeli ve ekonomik blok modeli oluşturmuşlardır. Daha sonra oluşturdukları modeli parçacık sürü optimizasyonu temelli bir algoritma ile çözmüşlerdir. Gholamnejad vd. (2020) çalışmalarında üretim planlamasının yanında stok sahasında bekletilerek daha sonra tekrar zenginleştirilecek malzemenin NBD üzerindeki etkisini stokastik olarak gösterdikleri bir model paylaşmışlardır. Çalışmalarını bir demir yatağı ve bir altın yatağına uygulayarak sonuçları paylaşmışlardır. Toloui vd. (2020a & 2020b) çalışmalarında açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü için tam sayılı bir model önermişler ve bu modelin çözümü için kullanılacak meta sezgisel yöntemler ve Lagrange rahatlatma yaklaşımı karışımı bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Kullandıkları meta sezgisel yöntemler yarasa algoritması ve parçacık sürü optimizasyonudur. Meta sezgisel yöntemler Lagrange çarpanlarının güncellenmesi sırasında kullanılmıştır. Önerdikleri hibrit metod ile elde ettikleri sonucu diğer hibrit meta sezgisel yöntemlerle ve geleneksel yöntemlerle kıyaslayarak sonuçları paylaşmışlardır. Buna göre önerdikleri model diğer yöntemlere göre sonuca daha hızlı ulaşmış ve en iyi optimum çözümü aramada daha etkili olduğu paylaşılmıştır. Kullandıkları modelde tenör belirsizliğini hesaba katmak adına her bloğa bir olasılık değeri atamışlar ve tenör belirsizlik riski yüksek olan blokları üretim planlamasının sonraki periyotlarında hesaba katmayı hedefleyen ikinci bir hedef fonksiyonu modele dahil etmişlerdir. Chatterjee ve Dimitrakopoulos (2020), Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin çözümü için jeolojik belirsizliklerin simülasyon ile hesaba katıldığı bir karışık tam sayı modeli önermişler ve çözümü için deterministik yöntemlerden faydalanmışlardır. Maleki vd. (2020) Cevher tenörü ve jeolojik belirsizliklerin simüle edilmiş cevher yatakları ile belirlenip riski minimize

eden iki hedefli bir stokastik model önermişlerdir. Modellerini bir demir madeni üzerinde uygulamış ve deterministik yöntemle karşılaştırıp NBD’de %6’lık ve üretilen demir miktarında %16’lık bir iyileşme kaydetmişlerdir.





2. AÇIK OCAK İŞLETMELERİNDE ÜRETİM PLANLAMASI

Açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlaması, genellikle birkaç aydan onlarca yıla kadar uzanan uzun bir süre boyunca madencilik faaliyetlerinin yapılacağı bölgenin neresi olacağı ve belirlenen bölgede yapılacak çalışmaların üretimin hangi döneminde yapılacağını belirlemeyi amaçlamaktadır. Planlama sürecinin öncelikli hedefi üretimi yapılmasına karar verilen maden yatağının ekonomik değerini en üst düzeye çıkartmak ve bu süreçte, ekipman kapasitesi, zenginleştirme kapasitesi, şev stabilitesi gibi çeşitli kısıtlamaları göz önünde bulundurmaktır.

Açık ocak madenlerinde uzun vadeli üretim planlamasının dezavantajları şunlardır ve etkili maden planlaması yapmak için bu faktörleri dikkate almak ve bunları ele alacak uygun stratejileri uygulamak önemlidir.

Belirsizlik: Gelecekteki piyasa koşulları maden satış fiyatları ve üretim maliyetleri gibi ekonomik parametrelerin belirsiz olmasına sebep olarak üretim planlarını doğru bir şekilde tahmin etmeyi ve optimize etmeyi zorlaştırır.

Karmaşıklık: Açık ocak madenlerinde genellikle birden fazla üretim alanı, stok, işleme tesisi ve altyapı bulunur ve bu da planlama sürecine karmaşıklık katar.

Ödün verme: Üretim miktarını en üst düzeye çıkarmak, kayıpları en aza indirmek ve ekipman kullanımını optimize etmek gibi çelişen hedefleri dengelemek, tüm paydaşları her zaman tatmin etmeyebilecek planlamaların yapılmasını gerektirir.

Sınırlı esneklik: Uzun vadeli bir üretim programı belirlendikten sonra değişen koşullara veya yeni fırsatlara göre ayarlamalar yapmak zor olabilir.

Veri ulaşılabilirliği: Jeolojik koşullar, ekipman kullanılabilirliği ve üretim kısıtlamaları hakkında doğru ve güncel verilerin elde edilmesi, planlama sürecinin doğruluğunu etkileyerek zorlayıcı olabilir.

Hesaplama karmaşıklığı: Büyük ölçekli optimizasyon problemlerini gerçek zamanlı olarak çözmek, hesaplama açısından yoğun olabilir ve gelişmiş algoritmalar ve hesaplama kaynakları gerektirebilir.

Çevresel hususlar: Açık ocak madenciliğinin önemli çevresel etkileri olabilir ve çevresel kısıtlamaları ve düzenlemeleri planlama sürecine dahil etmek, karmaşıklığı ve sınırlamaları artırır.

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması yapılmasının amacı belirlenen üretim miktarı karşılanırken ocaktan elde edilecek net bugünkü değerin maksimum düzeye çıkarılmasıdır. 1960'lı yıllardan bugüne dek bu sürecin optimize edilmesi amacıyla yapılmış pek çok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Aşağıda listelenen durumlar açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması yapılırken karşılaşılabilecek olumsuzlukları belirtmektedir.

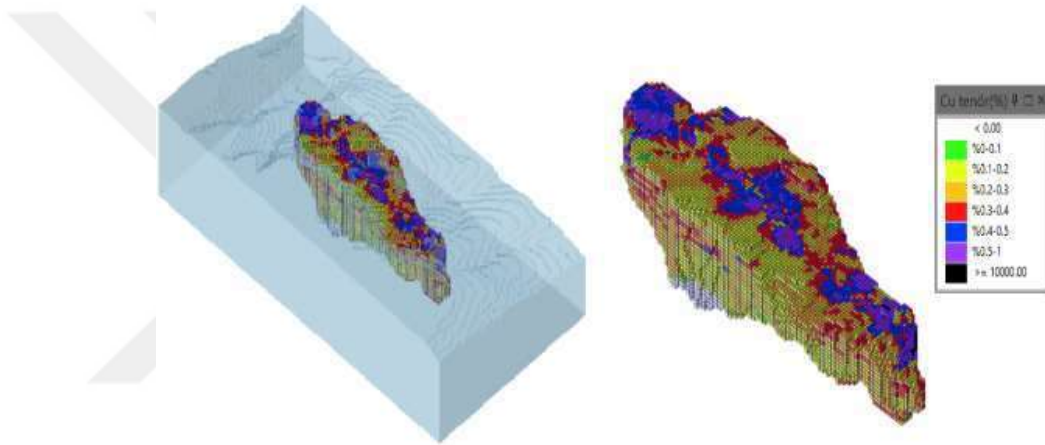
- Üretim planlaması ve nihai ocak sınırı problemlerinin eş zamanlı olarak incelenmesi problemin boyutunun büyümesi sebebiyle zorlayıcı olmakta ve büyük ölçekli maden sahalarının üretim planlaması yapılırken çoğu zaman mümkün olmamaktadır.
- Sabit bir sınır tenör değerine göre çözüm üretilmesi
- Bazı yöntemlerin uygulaması sırasında şev açılarının hesaba katılabılme zorluğu
- Çok sayıda bloktan meydana gelen blok modellerin kullanıldığı problemlerin çözümlerinin çok uzun sürmesi ve bilgisayarların donanım kapasitelerinin yetersiz kalması

2.1 Kullanılan Kavramlar ve Açıklamaları

Bu bölümde açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması yapılırken karşılaşılan teknik terimler ve açıklamalarına yer verilmiştir.

2.1.1 Blok model

Maden yatakları ve çevrelerindeki jeolojik birimlerin bilgisayar uygulamalarında tasviri sırasında kullanılan modeller olup 2 boyutlu veya 3 boyutlu olarak kullanılan alternatifleri mevcuttur. Eş büyüklükte bloklardan oluşabilecekleri gibi, bazı bölgelerin daha hassas bir şekilde tasvir edilebilmesi için farklı boyutlarda blokların bir arada kullanılabilmesi de mümkündür. Blok modelde yer alan her bir blok, kapladığı hacim veya alana dair jeolojik, ekonomik ve fiziksel parametreleri bünyesinde barındıran bir veriyi ifade eder. Blok modellere ait bir örnek Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1: Örnek bir blok model (Hasözdemir ve Erçelebi (2019)).

Blok modeller, temsil ettikleri bölgenin boyutuna ve detayına göre yüzlerce bloktan milyonlarca bloğa kadar farklı sayılarda olabilirler (Erarslan, 1996). Düzenli bir blok model üzerinde üretim planlaması yapılması durumunda, maden yatağının en iyi şekilde temsil edilebilmesi için blok model boyutlarının daha küçük seçilmesi gereklidir. Blok boyutlarının küçülmesinin toplam blok sayısını arttırması ve bunun da uygulamalardaki işlem sürelerini hızlı bir şekilde arttırması gibi bir dezavantajı olduğu göz ardı edilmemelidir.

2.1.2 Blokların cevher içeriği ve belirleme yöntemleri

Üretim planlaması optimizasyonu çalışmalarında blokların sahip olduğu en önemli değişkenlerden biri tenör değerleridir, Özkan ve Erçelebi (2014). Bu değerlerin elde edilebilmesi için maden yatağının belirli bölgelerinde sondaj çalışmaları yapılarak karot örnekleri alınmalı ve bunların cevher içeren kısımlarının laboratuvarlarda analiz

edilmeleri gerekmektedir. Bir bloğun cevher bloğu mu yoksa dekapaj bloğu mu olduğunun temel belirleyicisi içerdiği değerli mineralin tenör değeridir. Buna ek olarak bir bloğun değerinin hesaplanmasında ve zenginleştirme tesisine gönderilecek cevher kalitesinin belirlenmesinde de tenör değeri, önemli rol oynamaktadır. Blok tenörleri belirlenirken sıklıkla kullanılan yöntemler ağırlıklı ters mesafe yöntemi (Inverse distance weighting) ve jeoistatistiksel (Kriging) yöntemleridir, Özkan ve Erçelebi, (2014). Blokların ekonomik değerleri, tenör değerlerinin atanmasından sonra, üretim, zenginleştirme reklamasyon ve satış masrafları gibi maliyetler dikkate alınarak hesaplanabilir hale gelir.

2.1.2.1 Ters mesafe ağırlık enterpolasyonu (IDW)

Ters Mesafe Ağırlık Enterpolasyon (IDW) yöntemi, noktasal verilerin enterpolasyonunda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, bir noktanın değerini bulmak için o noktaya en yakın olan noktaların değerlerini kullanır ve bu değerleri ağırlıklandırır. Ters Mesafe Ağırlık Enterpolasyon yöntemi, dayanak noktalar ile kestirim yapılacak nokta arasındaki mesafenin tersinin ağırlıklandırılması esasına dayanır. IDW yönteminde, dayanak noktalara olan mesafe arttıkça uzaktaki noktanın kestirilecek değere olan etkisinin azaltılması amaçlanmıştır. Bir başka ifadeyle, uzaktaki noktalardan elde edilecek verilerin enterpolasyon noktasının bulunduğu konumdaki yüzeyin modellenmesinde olumsuz etkilerin en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır. Literatürde p değerinin genellikle 2 olarak kullanıldığı görülmektedir.

IDW yöntemi, bir noktadaki değeri hesaplamak için aşağıdaki formülü (2.1) kullanır:

$$X^* = (w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + \dots + w_nx_n)/(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n) \quad (2.1)$$

$$w_1 = \frac{1}{d_{ix}^p} \quad (2.2)$$

Burada:

X^* : hedef noktadaki tahmin edilen değerdir.

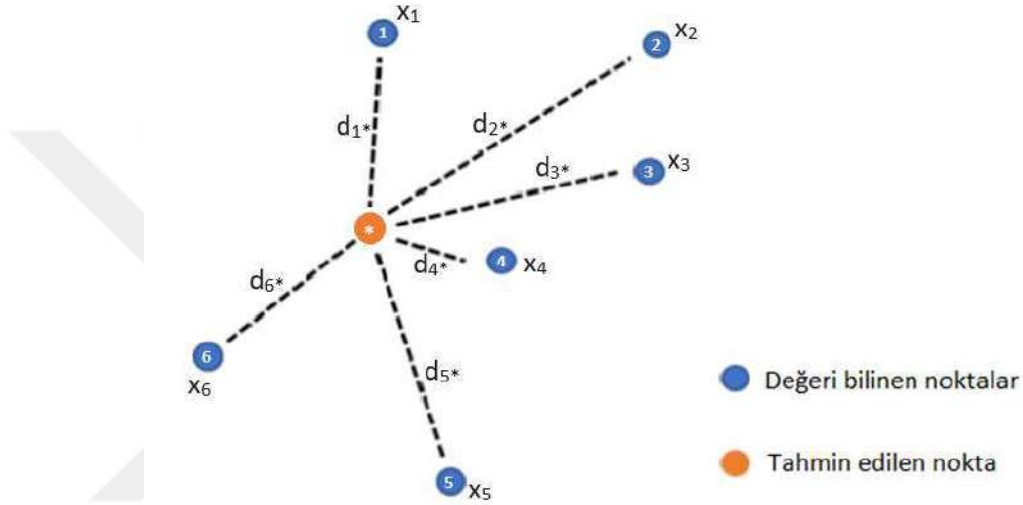
x_i : komşu noktalardaki gerçek değerlerdir $i = 1, 2, 3, \dots, n$

d_{ix} : hedef noktaya olan mesafelerdir $i = 1, 2, 3, \dots, n$

p: değeri bilinen noktanın, tahmin edilen nokta üzerindeki etkisini kontrol eden bir parametredir. Genellikle 2 veya 3 olarak kullanılır.

IDW yönteminin çalışma prensibi, daha yakın noktaların daha büyük bir ağırlığa sahip olduğu ve daha uzak noktaların daha küçük bir ağırlığa sahip olduğu bir ağırlıklandırma yaklaşımı kullanmasıdır.

Aşağıda, IDW yönteminin çalışma prensibini gösteren bir görsel (Şekil 2.2) bulunmaktadır:



Şekil 2.2: Mesafenin tersi yönteminin uygulanma prensibi.

Bu görsel, bir hedef nokta (turuncu nokta) etrafındaki komşu noktaların (mavi noktalar) değerlerini ve mesafelerini göstermektedir. IDW yöntemi, bu komşu noktaların değerlerini ve mesafelerini kullanarak hedef noktanın tahmin edilen değerini hesaplar. Hesaplamalara çalışma sahası içerisinde bulunan tüm noktaların dahil edilmesi hem hesaplama güçlüğüne neden olmakta hem de enterpolasyon noktasının tahmin edilecek değerine olumsuz yönde etki edebilmektedir. Uygulamada genellikle enterpolasyon noktası merkezli daire ya da dikdörtgen alan içerisinde kalan dayanak noktalarına göre hesaplamalar yapılmaktadır, (Yanalak, 2002).

2.1.2.2 Kriging yöntemi

Kriging enterpolasyon yöntemi, örneklenmiş konumlardan toplanan verilere dayanarak örneklenmemiş konumlardaki bir değişkenin değerini tahmin etmek için kullanılan bir jeoistatistik yöntemidir. Yöntem, örneklenmemiş bir konumdaki bir değişkenin değerinin, en yakın örneklenmiş konumların değerlerinin

ağırlıklandırılmasıyla tahmin edilebileceği fikrine dayanmaktadır. Ağırlıklar, örneklenen konumlar ile örneklenmeyen konum arasındaki mesafenin yanı sıra değişkenin variogramına göre belirlenir. Variogram, değişken ile onun uzaysal otokorelasyonu arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel bir fonksiyondur. Kriging enterpolasyon yöntemi jeostatistik, çevre bilimi, madencilik ve mekansal verilerin toplandığı diğer alanlarda yaygın olarak kullanılır. Topraktaki kirlетici maddenin dağılımı veya cevherdeki mineral konsantrasyonu gibi geniş bir alandaki değişkenin değerini tahmin etmek için güçlü bir araçtır.

Kriging enterpolasyon yönteminin adımları aşağıda paylaşıldığı gibidir:

I. Bölgesel değerler arasındaki ilişkinin mesafeye bağlı olan değişimlerini belirlemekte kullanılan yarıvariogram modellerinin oluşturulması.

II. Bu modellerin test edilmesi

III. Kriging enterpolasyon yöntemi ile 1, 2 veya 3 boyutlu bir bölgede yer alan değişkenlerin değerlerinin tahmin edilmesi

IV. Tahminler sırasında ortaya çıkabilecek hata miktarlarının ortaya konulması

Geoistatistik yöntemlerde, mekansal değişkenlerin, mesafeye bağlı değişimleri variogram fonksiyonları ile ortaya konmaktadır. Variografi, örnek noktalar arasındaki konumsal korelasyonu hesaplama ve modelleme imkanı sağlamaktadır. Yarıvariogram, eşit mesafeler ile ayrılmış nokta ikilileri arasındaki değer farklarının varyanslarının yarısı demektir. Yarıvariogram değeri belirlenirken eşitlik (2.3)'ten faydalanılmaktadır. Deneysel variogram yapısını temsil eden variogram modelinin teorik olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple teorik variogram modelleri ve parametrelerini iyi anlaşılması önem arz etmektedir..

$$\gamma(h) = 0.5 * Var(Z(x) - Z(x + h)) \quad (2.3)$$

Burada:

$\gamma(h)$: aralarında h mesafe bulunan noktaların semivariogram değeridir

Var : varyans değeridir.

$Z(x)$: x konumundaki değer

$Z(x+h)$: x noktasından h kadar mesafede bulunan konumdaki değerdir

Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan variogram model denklemleri Çizelge 2.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 2.1: Bazı teorik variogram modelleri.

Variogram Modeli	Denklemi
Küresel	$\gamma(s) = C_0 + C[3/2 * (s/a)^2 * (s/2a)^3]$
Üssel	$\gamma(s) = C_0 + C[1 - e^{-(s/a)}]$
Gauss	$\gamma(s) = C_0 + C[1 - e^{-(s^2/a^2)}]$
Doğrusal	$\gamma(s) = C_0 + C[s/a]$
Hole Effect	$\gamma(s) = C_0 + C[1 - e^{n * \cos(\text{teta})}]$

Bugün yaygın olarak kullanılan Kriging yöntemleri aşağıda sıralanmıştır (Yiğit, 2003):

- Simple Kriging
- Ordinary Kriging
- Universal Kriging
- Block Kriging
- Indicator Kriging
- Disjunctive Kriging
- Cokriging

2.1.3 Blokların ekonomik değerleri ve hesaplanması

Bir bloğun ekonomik değerini belirleyen temel parametreler maliyet ve gelirlerdir. Blok değerleri hesaplanırken kullanılan birim maliyet değeri benzer uygulamalardan, cevher satış değeri ise güncel fiyatlardan faydalanılarak belirlenir, (Özkan ve Erçelebi, 2014). Bir cevher bloğunun değeri, o bloğun satılması sonucu elde edilecek gelir ile o bloğun kazılması ve içerisindeki madenin kazanılması için yapılması gereken maliyet arasındaki farka eşittir. Bir dekapaj bloğunun değerini ise o bloğun kazılması ve kazılan malzemenin nakliyatı için yapılması gereken maliyete eşit olacaktır, (Erarslan, 1996). Özetle, bir bloğun değeri o bloğun getirisi ile maliyeti arasındaki farka eşittir

(Eşitlik 2.5). Kazanç, bir blokta yer alan bir ya da daha fazla cevherin zenginleştirilip ve satılması sonucu elde edilirken (Eşitlik 2.6), Maliyet ise o bloğun türüne göre (cevher veya atık) ortaya çıkabilecek farklı maliyetler olarak ifade edilmektedir (Eşitlik 2.7), (Özkan, 2015).

$$\text{Blok Değeri (BD)} = [\text{Kazanç} - \text{Maliyet}] \quad (2.5)$$

$$\text{Kazanç (\$)} = [\text{Cevher Tonajı} \times \text{Cevher Satış Fiyatı}] \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Maliyet (\$)} = & [\text{Cevher Tonajı} \times (\text{Kazı} + \text{Zenginleştirme maliyeti}) \\ & + [\text{Dekapaj miktarı} \times \text{Dekapaj maliyeti}] \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.1.3.1 Atık bloğu değerlerinin (ABD) hesaplanması

Atık blokların ekonomik değeri (ABD) aşağıdaki eşitlik (2.8) yardımıyla hesaplanır.

$$\text{ABD} = [- \text{Blok Tonajı} \times \text{Madencilik Maliyeti}] \quad (2.8)$$

2.1.3.2 Cevher bloğu değerlerinin (CBD) hesaplanması

Cevher blokların ekonomik değeri (CBD) aşağıdaki eşitlik (2.9) yardımıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned} \text{CBD} = & [\text{Cevher Tonajı} \times \text{Cevher Geri Kazanım Oranı} \times (\text{Cevher Satış} \\ & \text{Fiyatı} - \text{Cevher Satış Maliyeti})] - [[\text{Blok Tonajı} \times (\text{Zenginleştirme} \\ & \text{Maliyeti} + \text{Madencilik Maliyeti})]] \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.1.4 Net bugünkü değer (NBD) kavramı ve hesaplanması

Net bugünkü değer, tanım olarak bir kazancın gelecekte kazanılması veya maliyetin gelecekte yapılması sonucu ortaya çıkacak gerçek değer demektir. Bu kavram açık ocak işletmeleri gibi uzun bir zaman dilimi içinde tamamlanan projelerde karşımıza çıkmaktadır. Bir projenin karlı olup olmayacağı veya ne kadar zamanda tamamlanırsa karlı olabileceği gibi kararların verilebilmesi açısından bu değerın hesaplanması büyük önem arz etmektedir. Açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması probleminin temel amacı bu değerin maksimizasyonudur. Bir projenin net bugünkü değerin pozitif çıkması o projeden kar elde edilebileceğini ifade ederken, bu değerin negatif olması ise o projenin kazanç elde edilebilecek bir proje olmadığını ifade etmektedir.

Bir para akışının net bugünkü değeri hesaplanırken, Eşitlik (2.10)'dan faydalanılmaktadır.

$$NBD = \frac{NV_n^t}{(1+r)^t} \quad (2.10)$$

Burada:

NBD : Net bugünkü değer

n : Gelir getiren birim n= 1, 2, 3, ..., N

r : İskonto oranı (%)

t : Dönem, t = 1, 2, 3, ..., T

NV_n^t : n biriminden t döneminde elde edilen net gelir

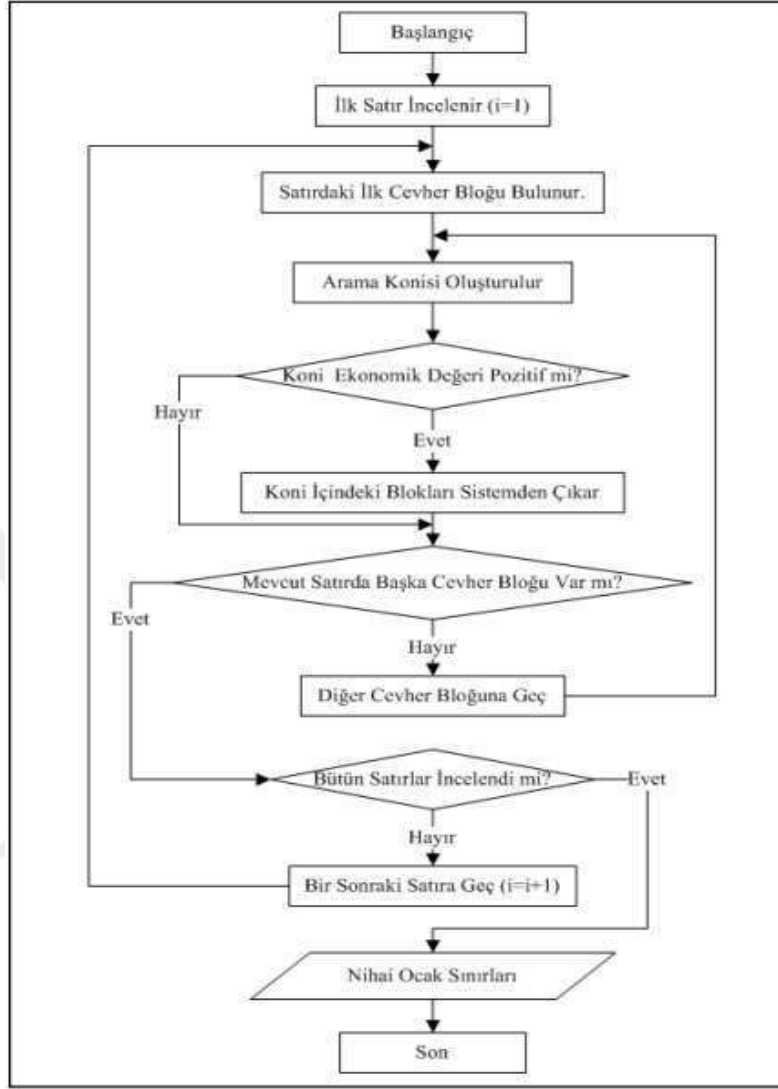
Bir proje ile bir kazanç sağlanıp sağlanmayacağı veya ne kadar zamanda ne kadar kazanç sağlanabileceği gibi göstergeler, o projenin Net Bugünkü Değerinin hesaplanması ile ortaya konulabilmektedir.

2.2 Nihai ocak sınırı ve belirlenmesi için kullanılan yöntemler

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması hakkındaki kararları etkileyen önemli parametrelerden biri kazılması sonucu en çok gelirin elde edileceği sınırları gösteren nihai ocak sınırlarıdır. Bu sınırların belirlenmesi için kullanılan yöntemler ve detayları aşağıdaki bölümlerde paylaşılmıştır.

2.2.1 Hareketli koni yöntemi

Bu yöntemde uç kısmı aşağıya bakan hayali bir arama konisi kullanılmakta ve bir açık işletmenin nihai ocak sınırları belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu koninin şekli ocak şev açılarını temsil etmekte ve pozitif değerli blok kümelerini belirlemek amacıyla blok model içinde yer alan cevher blokları üzerinde konumlandırılmaktadır. Bu süreç blok modelin en üst kotundan başlamakta ve blok model içeriisinde pozitif değerli blok kalmayana kadar bütün cevher blokları üzerinde gezerek nihai ocak sınırı belirlemeye çalışılmaktadır. Uygulama sırasında takip edilen adımların akış şeması şekilde (Şekil 2.3)'de görüldüğü gibidir.



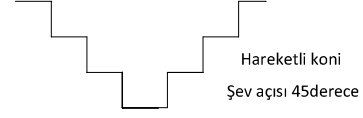
Şekil 2.3: Hareketli Koni yönteminin akış şeması.

Uygulaması kolay olan bu yöntem aşağıda sıralanan sebepler dolayısıyla nihai ocak sınırı problemini optimum olarak çözememektedir.

- Kesişen konilerin birbirleri üzerindeki etkilerin hesaba katılmaması
- Bütün blok kombinasyonlarının değerlendirilememesi

Yöntemin 2 boyutlu bir maden kesitinde uygulama örneği Şekil 2.4'te paylaşıldığı gibidir.

-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
	-2	-2	4	-2	-2	
		7	1	-3		



-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
	-2	-2	4	-2	-2	
		7	1	-3		

1. kat konisi

-1	-1	-1	-1	-1		-1
	-2	-2	4	-2	-2	
		7	1	-3		

2. kat konisi

-1	-1					-1
	-2	-2	4	-2	-2	
		7	1	-3		

3. kat 1. koni

						-1
			-2	-2		
		1	-3			

3. kat 2. koni
negatif değerli
olduğu için
nihai sınır
içine katılmaz

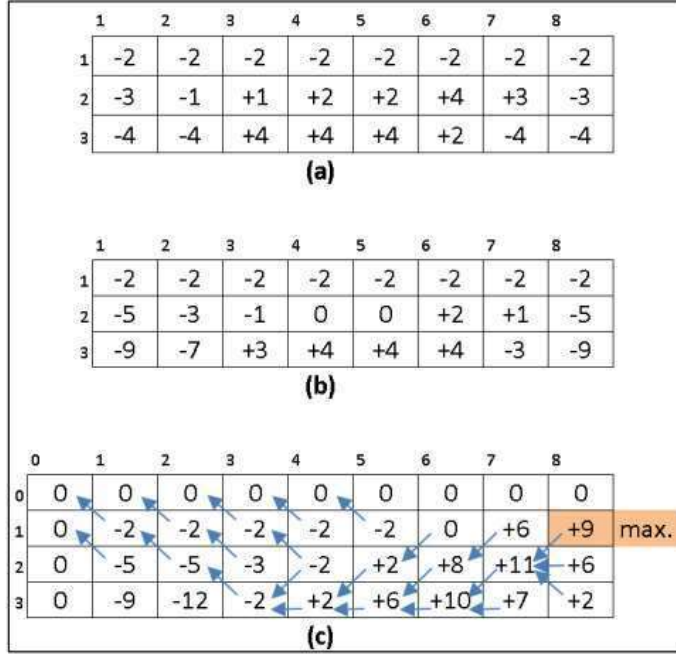
-1	-1	-1	-1	-1	1	-1
	-2	-2	4	-2	-2	
		7	1	-3		

Nihai ocak
sınırı

Şekil 2.4: Hareketli koni yöntemi örnek uygulama.

2.2.2 Lerch Grossmann yöntemi

Dinamik programlama, nihai açık ocak sınırlarının bulunması için ilk defa Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulama adımlarının tarifi için 2 boyutlu bir açık ocak kesiti (Şekil 2.5) üzerinde şu şekilde özetlenmiştir.



Şekil 2.5: Lerch & Grossman algoritmasının 2 boyutlu kesitte uygulama adımları.

1. i, j, k koordinat sisteminde m_{ijk} değeri, i kesitinin, j sütununun, k satırında bulunan bloğun değerini ifade etmektedir (Şekil 2.5a).

2. Her i kesitinde, tüm jk blokları için yukarıdan, aşağıya doğru ekonomik değerler toplanarak ilgili bloğun kümülatif değeri olarak belirlenir (Şekil 2.5b).

$$M_{ijk} = \sum m_{ijk} \quad (2.11)$$

3. Bütün j sütunları ve k satırlarının başlarına değerleri 0 olan $j=0$ ve $k=0$ blokları, eklenir (Şekil 2.5c).

4. Her i kesitinde, en sol ve en üstte yer alan bloktan başlanarak her jk bloğu için P_{jk} değerleri belirlenir. P_{jk} değeri bir bloğun sol üst, sol alt ve sol bitişiğinde bulunan üç

bloktan değeri en büyük olanın değeriyle incelenen bloğun değerinin toplamına eşittir. Sonra, P_{jk} değeri belirlenen ve bu değere katkı sağlayan blok arasına da bir ok çizilerek kayıt altına alınır. (Şekil 2.5c).

5. Tüm blokların P_{jk} değerlerinin ve blokları arasındaki okların belirlenmesinin ardından, $k=1$ seviyesindeki en yüksek P_{jk} (Eşitlik 2.13) değerine sahip bloktan başlanarak çizilen oklar boyunca takip edilip elde edilen ocak kümesi, nihai ocak sınırlarını belirleyen blokları göstermektedir. Bu bloklar içinde kalan bloklar, maksimum ocak değerine sahip bloklardır (Şekil 2.5c). $k=1$ satırındaki en yüksek değerli bloğun değeri negatif veya sıfır ise, bu kesit içerisinde üretilmesi sonucu kar elde edilebilecek bir blok kümesi bulunmuyor demektir.

$$P_{max} = \text{Max } P_{ij} \quad (2.13)$$

Lerch Grossman algoritmasının 3 boyutlu bir maden yatağına uygulanması için kullanılan adımların 2 boyutlu temsili bir ocak üzerinde uygulanması:

Yukarıda 2 boyutlu uygulaması verilen LG algoritmasının 3 boyutlu bir maden ocağına uygulanması sırasında kullanılacak adımlar aşağıda özetlenmiştir.

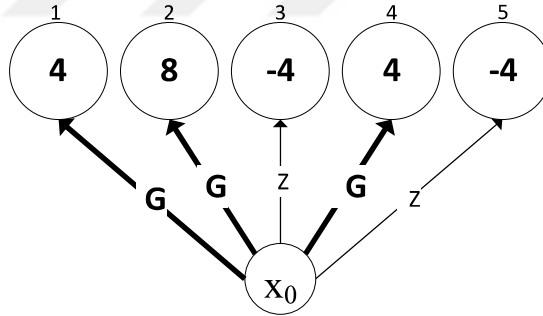
1. x_0 isimli bir başlangıç düğümü ile algoritmanın uygulandığı seviyedeki blokları ifade eden düğümler arasına bağlantılar eklenir.
2. 1.adımda eklenen bağlantılar güçlü veya zayıf olarak sınıflandırılır.
3. Güçlü bağlantı olarak belirlenmiş olan bir bağlantı üzerinde bulunan negatif ağırlık kontrol edilir. Eğer hiç negatif ağırlık yoksa 5.adıma geçilir. Eğer güçlü bir k bağlantısı üzerinde, zayıf bir j bağlantısı var ise, başlangıç ağacı içerisine (k,j) noktaları arasındaki bağlantı noktası eklenir. x_0 ile k arasındaki bağlantı kopartılarak, x_0 ile j arasına bir bağlantı eklenir.
4. T_i ağacı içerisinde güçlü bir bağlantı üzerinde, zayıf bağlantı kalmayana ve bütün güçlü bağlantılar x_0 'a bağlanana kadar 3. Adım tekrarlanır.
5. Bu aşamada T_i ağacı içerisindeki güçlü bağlantıya sahip düğüm noktaları ağaçtan çıkartılır ve bir sonraki $i+1$ katına geçilerek 1. Adımdaki işlemlerden tekrar başlanır. Bu adımların daha iyi anlaşılabilmesi için uygulama adımları 2 boyutlu bir maden kesiti üzerinde adım adım gösterilerek açıklanmıştır. Bu amaçla şekil 2.6'de yer alan

blok model kullanılacak olup blokların sol üst köşesindeki sayı blok indislerini, ortalarındaki sayı ise kazılmaları sonucu elde edilecek gelir miktarını ifade etmektedir.

¹ 4	² 8	³ -4	⁴ 4	⁵ -4
⁶ -6	⁷ 14	⁸ -2	⁹ 7	¹⁰ -3
¹¹ -4	¹² 6	¹³ 6	¹⁴ -9	¹⁵ -2

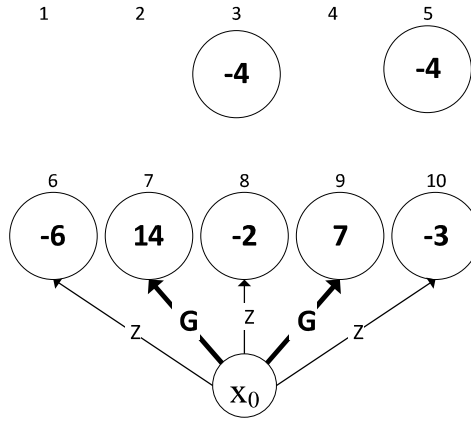
Şekil 2.6: 3B LG algoritmasının uygulamasında kullanılacak örnek blok model.

Algoritmanın ilk adımında Şekil 2.6’de yer alan blokların 1. Seviyesinde yer alan blokları (blok indisleri 1’den 5’e kadar olanlar) temsil eden düğüm noktaları ve x_0 düğüm noktası arasında bağlantılar çizilerek güçlü (G) veya zayıf (Z) olarak sınıflandırılır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: 3B LG algoritmasının ilk adımı.

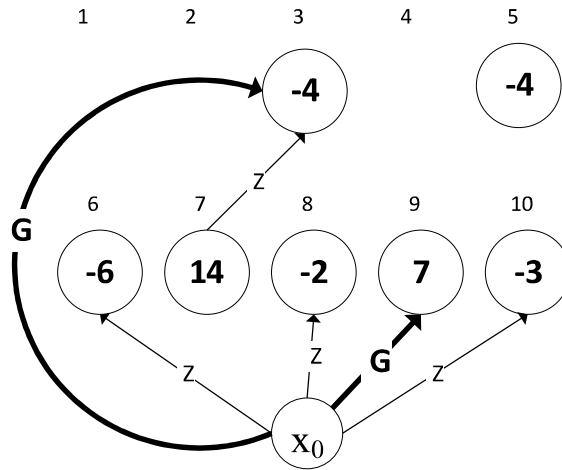
Bu aşamadaki ağ içerisinde sadece en üst kademedeki bloklar yer aldığı için hiçbir güçlü düğüm üzerinde yer alan zayıf düğüm bulunmamaktadır. Bu sebeple güçlü düğüm noktaları (blok indisi 1, 2 ve 4 olan bloklar) ağaçtan çıkartılarak 2. Kademedeki bloklar ağaç içerisine eklenmelidir. Yeni eklenen bloklar ile x_0 düğüm noktası arasında da bağlantılar eklenerek güçlü veya zayıf olarak sınıflandırılmalıdır. Bu adımlardan sonra ocak ağının alacağı hal Şekil 2.8’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.8: 2. seviyedeki bloklar eklendikten sonraki ocağın ağ görünümü.

Bu aşamada algoritmanın 3. Adımında tarif edilen, güçlü bağlantılar üzerinde yer alan negatif ağırlığın kontrol edilmesi gerekmektedir. Buna göre 3 numaralı düğüm noktası 7 numaralı güçlü düğüm noktasının üzerinde yer almaktadır. Bu sebeple 7 numaralı düğüm ile 3 numaralı düğüm arasına bir bağlantı eklenir ve x_0 ile 7 numaralı düğüm arasındaki bağlantı 3 numaralı düğüm noktasına taşınır. Bu bağlantının güçlü veya zayıf olmasıyla ilgili kontrol şu şekilde yapılır.

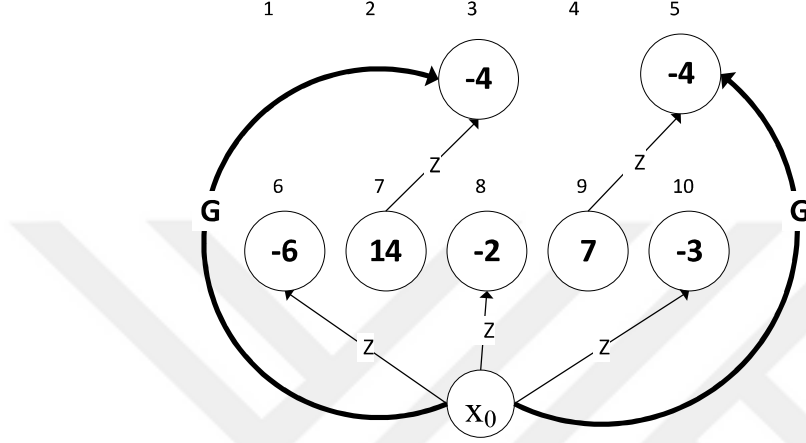
x_0 ile 3 numaralı düğüm arasındaki toplam ağırlık miktarı $+14+(-4) = +10$ olduğundan bu eklenen bağlantı güçlü olarak işaretlenir. Bu aşama sonunda ocak ağının aldığı hal Şekil 2.9'da paylaşılmıştır.



Şekil 2.9: 3B LG algoritmasının 3.adımının ilk döngüsü.

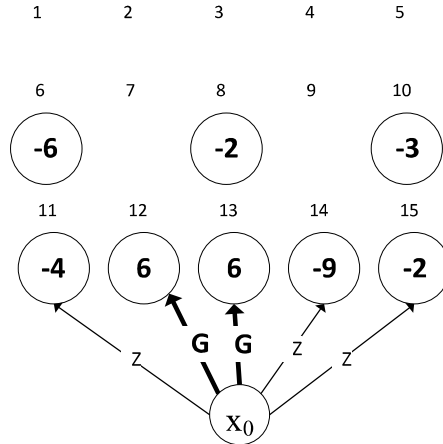
Aynı döngü içerisinde bu sefer 5 numaralı düğüm noktası 9 numaralı güçlü düğüm noktasının üzerinde yer almaktadır. Aynı şekilde 9 numaralı düğüm noktası ile 5

numaralı düğüm noktası arasına bir bağlantı eklenmesi gerekmektedir. Ardından x_0 ile 9 numaralı düğüm arasındaki bağlantı 5 numaralı düğüm noktasına taşınmalıdır. Bu bağlantının güçlü veya zayıf olması ile ilgili hesap $+7+(-4) = +3$ şeklinde yapılır ve bu bağlantının da güçlü bir bağlantı olduğu belirlenir. Ocak ağının bu aşamadaki durumu Şekil 2.10'da paylaşılmıştır.



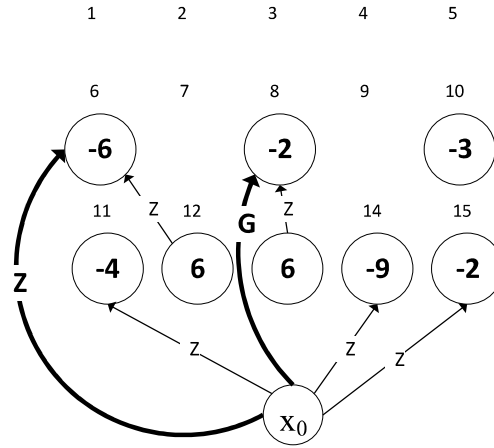
Şekil 2.10: 3B LG algoritmasının 3.adımının ikinci döngüsü.

Şekil 2.10'da yer alan ocak ağı için, güçlü bir ağ noktası üzerinde yer alan negatif ağırlık kalmadığı ve bütün güçlü bağlantılar x_0 düğümüne bağlı olduğu için algoritmanın 3. ve 4. aşamaları tamamlanmış durumdadır. Sıradaki adımda güçlü bağlantılar ile x_0 düğümüne bağlı düğüm noktaları ağ içerisinde çıkarılarak nihai ocak sınırları içerisinde dahil edilmeli ve bir sonraki döngü için ocak kesitinin bir sonraki kademesinde yer alan bloklar ocak ağı içine dahil edilmelidir. Ocak ağının bu aşamada alacağı hal Şekil 2.11'te paylaşılmıştır.



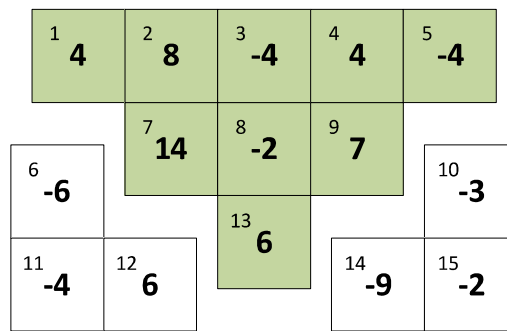
Şekil 2.11: 3B LG algoritmasının 3.döngüsü başında ocak ağının durumu.

Bir sonraki aşamada 13 numaralı güçlü bağlantı üzerinde yer alan 8 numaralı düğüm noktası için bu düğüm noktaları arasına zayıf bir bağlantı eklenmeli ve x_0 ile 13 numaralı düğümler arasındaki güçlü bağlantı 8 numaralı düğüm noktasına taşınmalıdır. Bu bağlantının güçlülük hesabı $+6 + (-2) = +4$ şeklinde yapılarak bu bağlantının güçlü bir bağlantı olması gerektiği belirlenir. Bu aşamada ocak ağının alacağı durumu Şekil 2.13’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.13: 3B LG algoritmasının 3.döngüsünün ikinci aşaması sonunda ocak ağının durumu.

Şekil 2.13’de yer alan ocak ağı için, güçlü bir ağ noktası üzerinde yer alan negatif ağırlık kalmadığı ve bütün güçlü bağlantılar x_0 düğümüne bağlı olduğu için algoritmanın 3. ve 4. aşamaları bu döngü için de tamamlanmış durumdadır. Sıradaki adımda güçlü bağlantılar ile x_0 düğümüne bağlı düğüm noktaları ağ içerisinde çıkartılarak nihai ocak sınırları içerisinde dahil edilmeli ve ocak kesitinin son kademesine ulaşıldığı için algoritma sonlandırılarak nihai ocak sınırlarının işaretlenmesi gerekmektedir. Buna göre nihai ocak sınırları içerisinde kalan blok indisleri 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 ve 13 olarak belirlenmiştir. Nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklara ait görüntü Şekil 2.14’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.14: 3B LG algoritması ile elde edilen nihai ocak sınırlarının görünümü.

2.2.3 Maksimum akış yöntemi

Maksimum akış algoritmaları, grafik teorisindeki maksimum akış problemlerini çözmek için kullanılan bir algoritma sınıfıdır. Maksimum akış problemi, bir akış ağındaki bir kaynak düğümden bir bitiş düğüme gönderilebilecek maksimum akışı

veya minimum kesik bulma problemidir. Akış ağı, her arkın bir kapasiteye sahip olduğu ve her düğümün gelen ve giden bir akışa sahip olduğu bir grafikte temsil edilir. Amaç, arkların kapasitelerini dikkate alarak kaynak düğümden bitiş düğüme gönderilebilecek maksimum akışı bulmaktır. Bu yöntemin açık ocak işletmelerindeki nihai ocak sınırlarının belirlenmesi sırasında kullanılmasına dair görsel Şekil 2.15 ile 2.21 arasında paylaşılmıştır.

Ford-Fulkerson algoritması: Bu algoritma maksimum akış problemlerini çözmek için popüler bir yöntemdir. Grafikte kaynak düğümden kullanılmayan kapasiteye sahip havuz düğüme giden yollar olan artırıcı yolları yinelemeli olarak bularak çalışır. Algoritma daha sonra bu yollardaki akışı artırır ve işlemi, artan yol kalmayınca kadar tekrarlar.

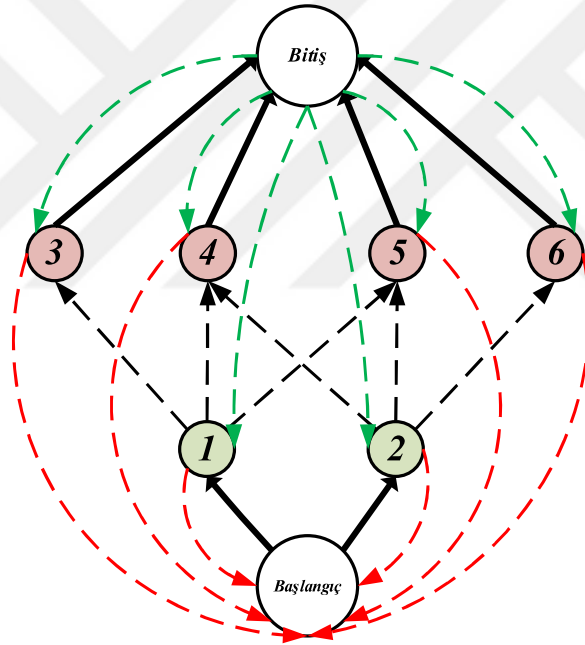
Edmonds-Karp algoritması: Bu algoritma maksimum akış problemlerini çözmek için kullanılan diğer bir popüler yöntemdir. Grafikte genişleyen yolları bulmak için önce genişlik araması kullanarak ve ardından bu yollardaki akışı artırarak çalışır. Algoritma bu işlemi artan yol kalmayınca kadar tekrarlar.

Dinic algoritması: Bu algoritma yüksek bağlantılı grafiklerdeki maksimum akış problemlerini çözmek için etkili bir yöntemdir. İlk önce grafikteki en yüksek düğümün seviyesini bularak ve ardından o düğümden çıkan kenarlardaki akışı yinelemeli olarak artırarak çalışır. Algoritma bu işlemi artan yol kalmayınca kadar tekrarlar.

Push Re-label algoritması: Bu algoritma, yüksek bağlantılı grafiklerde maksimum akış problemlerini çözmek için etkili bir yöntemdir. İlk önce grafikteki en yüksek düğümün seviyesini bularak ve ardından kenarların kapasitelerine saygı göstererek akışı kaynak düğümden havuz düğüme yinelemeli olarak iterek çalışır. Algoritma bu işlemi artan yol kalmayınca kadar tekrarlar.

Pseudoflow algoritması: Ağ diagramları üzerindeki maksimum akış veya (minimum kesik) problemlerinin çözümü için kullanılan ve literatürde yer alan en etkin algoritmalarından birisi Hochbaum (2008) tarafından paylaşılan Pseudoflow algoritmasıdır. Lerch Grossman algoritması ile benzer özellikleri bulunan Pseudoflow algoritması maksimum akış problemini optimize ederken düğüm noktalarının

ağırlıkları yerine düğümler arasındaki akışlardan faydalanmaktadır. Maksimum akış problemlerinde standart olarak kullanılan ağ diagramında pozitif değerli düğüm noktaları kaynak düğümü ile bağlanırken, negatif değerli düğüm noktaları ise bitiş düğümüyle bağlanmaktadır. Pseudoflow algoritması için kurulan ağ diagramında ise her düğüm noktası için ekstra 2 bağlantı daha kullanılmaktadır. Bunlardan birisi kaynak düğümüne giderken, diğeri ise bitiş düğümünden bahsi geçen düğüm noktasına gelmektedir. Bu bağlantıların amacı düğüm üzerinden geçen fazla bir akış miktarı varsa bunu kaynak düğümüne geri yönlendirmek veya aynı düğüm noktası için eksik bir akış miktarı varsa bunu bitiş düğümünden temin etmektir. Ekstra bağlantı noktalarıyla oluşturulan ağ diagramının örnek bir gösterimi Şekil 2.15’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.15: Pseudoflow algoritmasının uygulandığı ağ diagramı örneği.

Şekil 2.15’de paylaşılan temsili ağ diagramında yer alan kırmızı düğüm noktaları negatif değerli, yeşil düğüm noktaları pozitif değerli düğüm noktalarını göstermektedir. Aynı şekilde yer alan kesik çizgili bağlantı noktaları sınırsız kapasiteli bağlantıları temsil ederken, düz çizgili bağlantılar sınırlı kapasiteli bağlantıları temsil etmektedir. Kesik çizgili bağlantılardan kırmızı olanlar başlangıç noktasına giden ve fazla akış miktarını kaynağa yönlendiren bağlantıları temsil ederken, yeşil bağlantılar eksik akış miktarını bitiş noktasından temin edecek bağlantıları göstermektedir. Son olarak siyah kesik çizgiler ise açık ocak işletmelerine özgü öncelik kısıtlarının

uygulanmasını sağlayan bağlantıları ifade etmektedir. Pseudoflow algoritması ile maksimum akış problem çözülürken uygulanan adımlar aşağıda paylaşılmıştır.

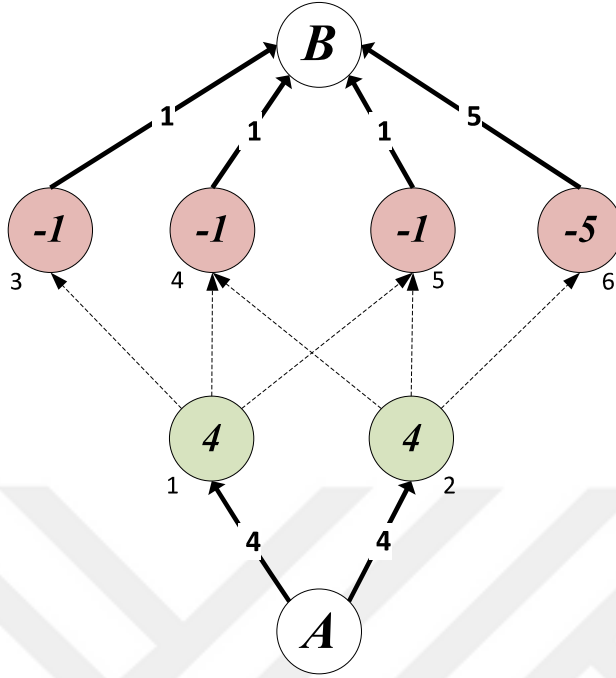
Pseudoflow algoritmasının açık ocak işletmelerinde nihai ocak sınırı bulunması için kullanılmasına dair örnek uygulama:

Algoritmanın adımlarının daha rahat anlaşılabilir olması amacıyla 2 boyutlu örnek bir maden yatağına uygulanması sırasında açıklanmıştır. Bu amaçla kullanılan 2 boyutlu ocak kesiti Şekil 2.16’de paylaşılmıştır. Şekilde yer alan blokların kazılması sonucu elde edilecek blok değerleri bloklar üzerinde gösterilmiş olup, blok indisleri ise blokların sol üst köşesinde gösterilmiştir.

3 -1	4 -1	5 -1	6 -5
	1 4	2 4	

Şekil 2.16: Pseudoflow algoritmasının uygulandığı 2 boyutlu açık işletme kesiti.

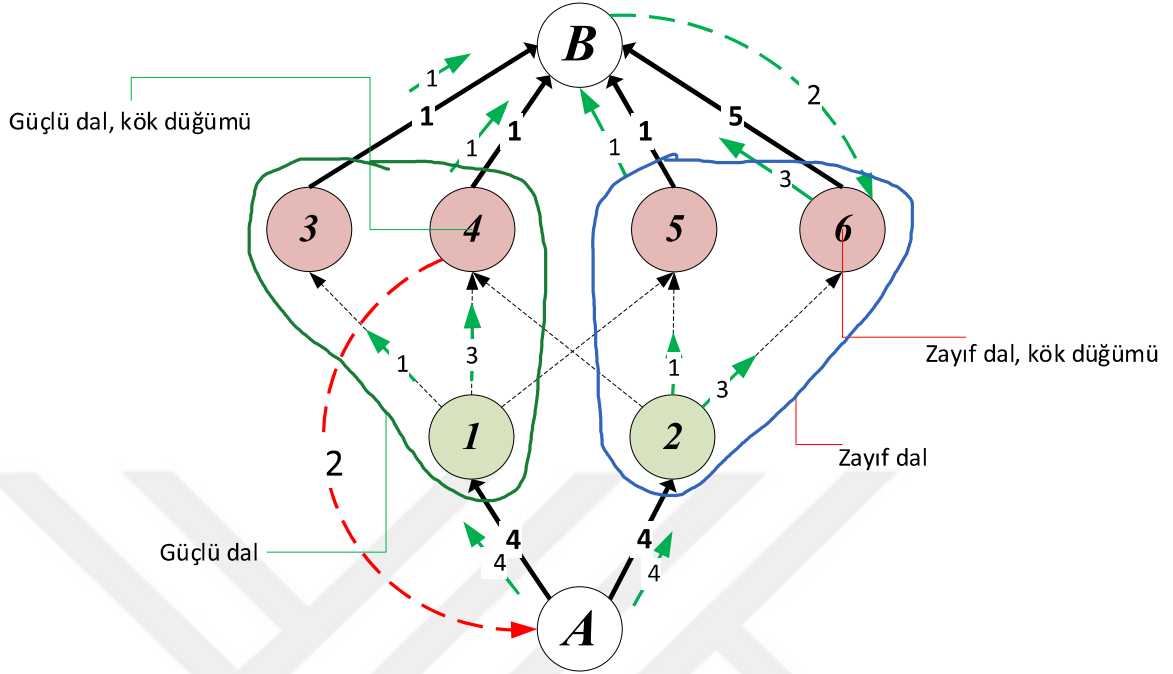
Algoritmayı kullanmadan önce ocak ağının kurulması gerekmektedir. Şekil 2.17’de paylaşılan ağ içerisinde A düğümü başlangıç düğümünü, B düğümü bitiş düğümünü ifade etmektedir. Negatif değerli atık blokları ile bitiş düğümü arasına kapasiteleri atık bloklarının değerlerinin mutlak değeri kadar olan bağlantılar eklenirken, başlangıç düğümü ile pozitif değerli cevher blokları arasına da kapasiteleri cevher bloklarının değerleri kadar olan bağlantılar eklenmiştir. Bloklar arasındaki öncelik kısıtlarının uygulanması içinse bloklar arasına sonsuz kapasiteli bağlantı noktaları eklenerek ocak ağının kurulması tamamlanmıştır. Algoritma başlangıcı için genel olarak kullanılan standart ağaç biçimi A ve B düğümlerine bağlı olan bütün bağlantıların tamamen kullanıldığı ve Şekil 2.17’de paylaşılan ağaç şeklindedir. Başlangıç, bitiş düğümleri ve diğer düğümler arasında yer alan fazla veya eksik akış miktarlarının yönlendirildiği ekstra bağlantılar görsellerde karmaşıklığa sebep olmamaları açısından iterasyonlar sırasında kullanıldıkları yerlerde eklenmiştir.



Şekil 2.17: Pseudoflow algoritmasının başlangıç durumu.

1. Döngü

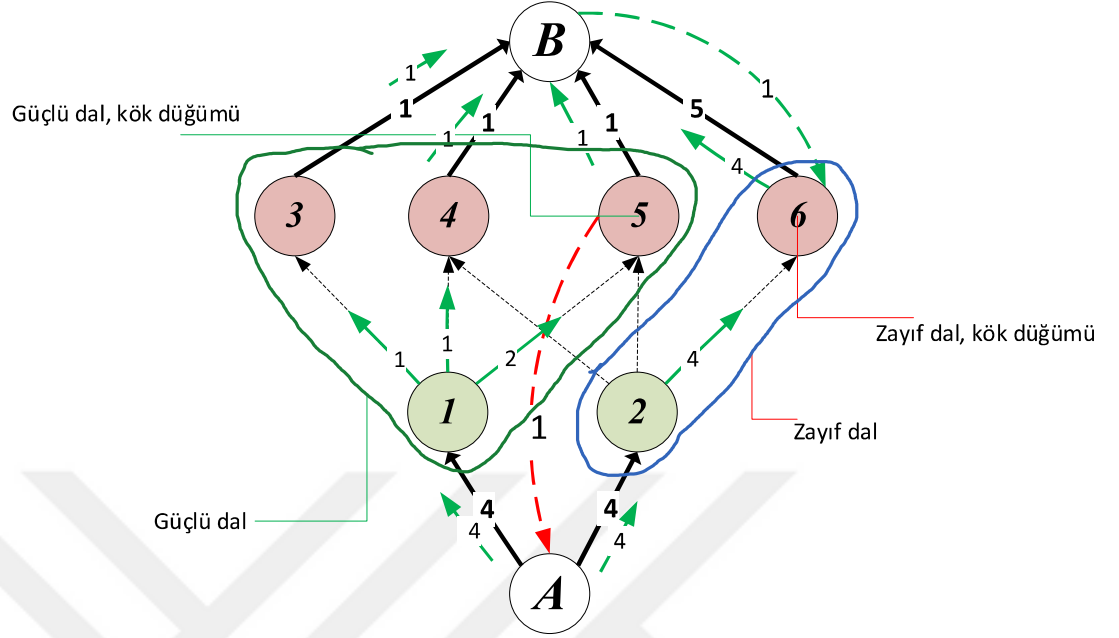
Şekil 2.17’de başlangıç durumu verilen ağ diagram için pseudoflow algoritmasının ilk iterasyonu A düğümü ve 1 numaralı düğüm noktaları arasında 4 birimlik akışın gönderilmesi ile başlamaktadır. Bu akışın 4 birimi de 1 numaralı düğüm noktasına ulaşmaktadır. Bu akış sonrasında 3 numaralı düğüm noktasına ulaşmakta ve oradan da 1 birimi B düğümüne ulaşmaktadır. Bu aşamada 3 numaralı düğüm üzerinde 3 birim fazla akış miktarı kaldığından bu akış ilgili bağlantı noktası üzerinden kaynağa geri döndürülmüştür. Bu aşamada kök düğümü 3 numaralı olan ve 1 ve 3 numaralı düğüm noktalarından oluşan güçlü bir dal oluşmuştur. Benzer bir şekilde A ile 2 numaralı düğüm arasında ağ içerisine giren 4 birimlik akışın ise 1 er birimi 4 ve 5 numaralı düğümler üzerinden geçerek B düğümüne ulaşırken 6 numaralı düğüm üzerinden geçen 2 birimlik akış B noktasına giden bağlantıdaki 5 birimlik talebi karşılamadığından B düğümü ile 6 numaralı düğüm noktası arasındaki eksik akışın tamamlanması için B düğümünden 6 numralı düğüm üzerine 3 birimlik bir akış meydana gelmiştir. Bu aşamada ise kök düğümü 6 numara olan ve 2, 4, 5 ve 6 numaralı düğümlerden oluşan zayıf bir dal meydana gelmiştir. 1. Döngü sonunda ağ diagramının yeni hali Şekil 2.18’te paylaşılmıştır.



Şekil 2.19: Pseudoflow algoritması 2. döngü sonunda ocak ağının durumu.

3. Döngü

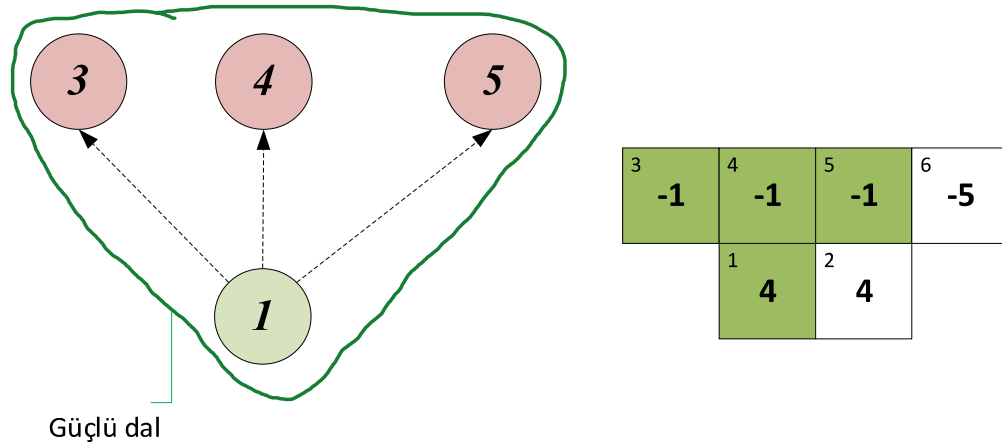
Şekil 2.19’da 2. Döngü sonundaki hali paylaşılan ocak diagram içerisinde bu kez güçlü bir dal ile zayıf bir dal arasındaki bağlantı noktası 1 ve 5. Düğüm noktaları arasında bulunmaktadır. Tekrar A düğümü üzerinde bulunan 2 birimlik fazla akış bu bağlantı üzerinden 5 numaralı düğüm noktasına ulaştırılabilir durumdadır. Bu 2 birimlik akışın 1 birimi tekrar ilgili bağlantı üzerinden A düğümüne döndürülmüş ve güçlü dal ile zayıf dalın bu döngü sonundaki durumları güncellenerek Şekil 2.20’te paylaşılmıştır.



Şekil 2.20: Pseudoflow algoritması 3. döngü sonunda ocak ağının durumu.

4. Döngü

Şekil 2.20’de 3. Döngü sonundaki hali paylaşılan ocak ağı içerisinde güçlü bir dal ile zayıf bir dal arasında bağlantı kurabilecek bir bağlantı kalmadığı için ocak ağının şu anki durumu optimum sonucu göstermektedir. Yani 2 boyutlu kesit için nihai ocak sınırını gösteren bloklar güçlü dal içerisinde yer alan 1, 3, 4 ve 5 numaralı bloklardır. Bu sınırın görseli Şekil 2.21’de paylaşıldığı gibidir.



Şekil 2.21: Pseudoflow algoritması ile elde edilen nihai ocak sınırı.

2.3 Açık Ocak Üretim Planlamasında Kullanılan Yöntemler

Bu yöntemler, madencilik operasyonunun özel gereksinimlerine ve kısıtlamalarına bağlı olarak ayrı ayrı veya kombinasyon halinde kullanılabilir. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır ve yöntemin seçimi madenin büyüklüğü, programın karmaşıklığı ve mevcut kaynaklar gibi faktörlere bağlıdır. Açık ocak madenciliği planlamasında yaygın olarak kullanılan bazı yöntemler şunlardır.

Geleneksel Yöntem (Yuvalanmış Açık Ocak sınırları Yöntemi): Bu yöntem, uzmanların deneyimlerini ve bilgilerini kullanarak üretim planlamasının manuel olarak oluşturulup, güncellemesini içerir. Cevher kalitesi, ekipman mevcudiyeti ve pazar talebi gibi çeşitli faktörlere dayalı olarak kararlar almak için maden mühendislerinin ve jeologların uzmanlığına güvenilir.

Sezgisel Algoritmalar: Sezgisel algoritmalar, madencilik planlama problemine yaklaşık çözümler bulmak için kullanılır. Bu algoritmalar, hızlı bir şekilde uygulanabilir bir program oluşturmak için kurallardan, yönergelerden ve alana özgü bilgilerden yararlanır. Sezgisel algoritmaların örnekleri arasında Genetik Algoritmalar, Tavlama Simülasyonu ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu yer alır.

Tamsayı Doğrusal Programlama (ILP): ILP modelleri, madencilik planlama problemini doğrusal kısıtlamalara sahip bir optimizasyon problemi olarak formüle eder. Bu modeller, çeşitli kısıtlamaları ve hedefleri göz önünde bulundurarak madencilik faaliyetlerinin en uygun sırasını ve zamanlamasını bulmayı amaçlamaktadır. ILP modelleri ticari çözücüler veya açık kaynak kitaplıklar kullanılarak çözülebilir.

Karışık Tam Sayılı Programlama (MIP): MIP, ILP'nin hem tamsayı hem de sürekli karar değişkenlerine izin veren bir uzantısıdır. Madencilik programında harmanlama ve işleme kısıtlamaları gibi ek kısıtlamaların dikkate alınması gerektiğinde sıklıkla kullanılır.

Simülasyon Tabanlı Planlama: Simülasyon tabanlı planlama, madencilik operasyonlarını modellemek ve farklı planlama senaryolarını değerlendirmek için

bilgisayar simülasyonlarının kullanılmasını içerir. Farklı madencilik faaliyetleri arasındaki karmaşık etkileşimlerin dikkate alınmasına olanak tanır ve çeşitli koşullar altında programın performansına ilişkin öngörüler sağlar.

2.3.1 Geleneksel yöntem (yuvalanmış açık ocak sınırları yöntemi)

İç içe ocak planlamasında, madencilik operasyonu, her biri ardışık bir madencilik aşamasını temsil eden birden fazla iç içe geçmiş ocaklara bölünür. Ocaklar tipik olarak maden kaynaklarının farklı derinliklerde veya derecelerde çıkarılmasının ekonomik uygulanabilirliğine göre tasarlanmaktadır. Amaç, bu iç içe geçmiş ocakların etkileşimi ve sıralamasını dikkate alarak madencilik operasyonunun ekonomik değerini en üst düzeye çıkarmaktır.

İç içe ocak planlama yöntemi, cevher tenör dağılımı, madencilik maliyetleri, ekipman kapasiteleri ve üretim hedefleri gibi çeşitli faktörleri ve kısıtlamaları dikkate alır. Amaç, operasyonun net bugünkü değerini (NPV) en üst düzeye çıkarmak için madencilik aşamalarının en uygun zamanlamasını ve sıralamasını belirlemektir. Planlama süreci, matematiksel optimizasyon modelleri veya simülasyon tabanlı yaklaşımlar kullanılarak farklı senaryoların değerlendirilmesini ve planlama alternatiflerini içerir. Bu modeller, iç içe geçmiş ocakların geometrisi ve özellikleri, üretim oranları ve ekipman kapasiteleri ve operasyonel gereksinimlerin getirdiği kısıtlamalar gibi faktörleri dikkate alır. Madencilik şirketlerinin, madenin ömrü boyunca birden fazla ocağın geliştirilmesi ve madenciliği konusunda bilinçli kararlar almasına olanak tanır.

İç içe geçmiş ocaklar, ekonomik değerlendirmelere dayalı olarak farklı ocak kabuklarının tasarlanmasını ve değerlendirilmesini içeren, ocak optimizasyonu adı verilen bir süreçle elde edilir. İç içe geçmiş çukurların elde edilmesi ve uygun olanların uzun vade üretim planlaması olarak seçilmesi sürecine ilişkin genel bir bakış aşağıda paylaşılmıştır. Temsili bir görsel Şekil 2.22’de paylaşılmıştır.

Kaynak Değerlendirmesi: İlk adım, yataktaki maden kaynaklarının dağılımını ve miktarını tahmin etmek için jeolojik verileri toplamak ve kaynak değerlendirme yapmaktır. Bu, cevher kütlelerinin özelliklerini belirlemek için sondaj verilerinin, jeolojik modellerin ve tenör tahmin tekniklerinin analizini içerir.

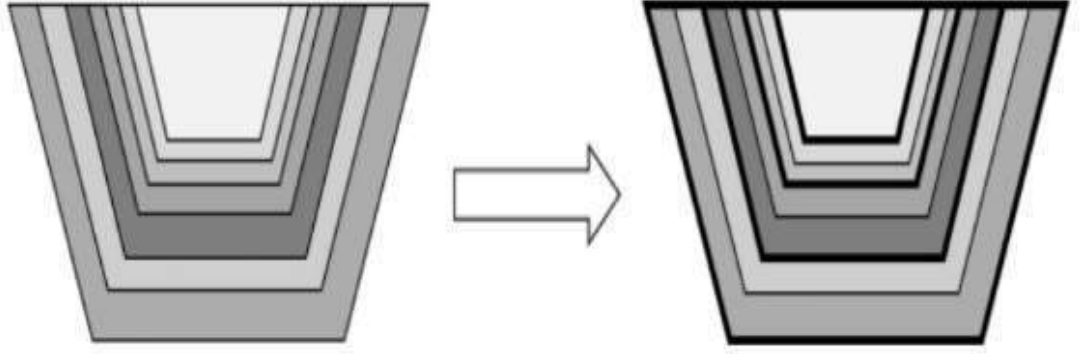
Ocak Kabuklarının Tasarlanması: Ocak kabukları, maden fiyatları, madencilik maliyetleri, işleme maliyetleri ve geri kazanım oranları gibi ekonomik parametrelere göre tasarlanır. Bu parametreler maden kaynaklarının çıkarılmasına yönelik ekonomik sınırların tanımlanmasına yardımcı olur.

Ekonomik Değerlendirme: Her ocak kabuğu, net bugünkü değer (NBD) veya diğer finansal ölçütler hesaplanarak ekonomik uygulanabilirliği açısından değerlendirilir. Bu değerlendirmede maden satışlarından elde edilen gelir, işletme maliyetleri, sermaye maliyetleri ve iskonto oranları gibi faktörler dikkate alınır. Ocak optimizasyon süreci bu hesaplamaları gerçekleştirebilir ve ocak kabuklarını ekonomik potansiyellerine göre sıralayabilir.

İç İçe Ocakların Seçimi: Ekonomik değerlendirmeye dayanarak, daha ileri analiz ve değerlendirme için bir maden ocağı kabukları alt kümesi seçilir. Bu ocak kabukları, madenciliğin farklı aşamalarını veya aşamalarını temsil eder.

Ayrıntılı Maden Planlaması: Seçilen iç içe geçmiş ocaklar, ayrıntılı maden planlamasıyla daha da iyileştirilir. Bu, optimum çıkarma sırasının, madencilik yöntemlerinin, ocak eğimlerinin, erişim yollarının ve diğer operasyonel hususların belirlenmesini içerir. İç içe geçmiş her ocak için ayrıntılı bir plan oluşturmak amacıyla maden planlama yazılımı ve mühendislik uzmanlığından yararlanılır.

Yinelemeli Süreç: Ocak optimizasyonu ve iç içe geçmiş ocakların seçimi, ekonomik faktörler, madencilik kısıtlamaları ve operasyonel gereksinimler arasındaki dengeleri dikkate alan yinelemeli bir süreçtir. İç içe geçmiş çukurların tasarımı ve değerlendirilmesi, yeni bilgiler elde edildikçe veya piyasa koşulları değiştikçe geliştirilebilir ve ayarlanabilir.



Şekil 2.22: İç içe yuvalanmış açık ocaklar (sol) ve üretim planı olarak seçilmiş ocak kabukları (sağ).

2.3.2 Sayısal modelleme ve optimizasyon yöntemleri

Açık ocak işletmelerinin uzun veya orta vadeli üretim planlaması probleminin çözümü için yaygın olarak kullanılan matematiksel modeller ve örnek uygulamaları devam eden bölümlerde yapılmıştır. Bu modellerin ortak özellikleri bir amaç fonksiyonu, karar değişkeni ve yapılacak üretim çeşidine göre kısıtlara sahip olmalarıdır.

2.3.2.1 Doğrusal programlama yöntemi

Doğrusal programlama, sınırlı kaynakların kullanımını optimize etmek için kullanılan matematiksel bir tekniktir. Açık ocak maden üretim planlaması bağlamında, ekipmanın kullanılabilirliği, cevher kalitesi ve işleme kapasitesi gibi çeşitli kısıtlamalar göz önünde bulundurularak, istenilen üretim miktarı sağlanırken, net bugünkü değeri en üst düzeye çıkarmak için madencilik faaliyetlerinin en uygun sırasını ve zamanlamasını belirlemek için doğrusal programlama kullanılabilir.

Problemi doğrusal bir programlama modeli olarak formüle ederek, net bugünkü değeri en üst düzeye çıkarmak için amaç fonksiyonunu tanımlayabilir ve her oaktan çıkarılabilecek cevher miktarı, işleme tesislerinin kapasitesi ve madencilik ekipmanının mevcudiyeti gibi faktörler üzerindeki kısıtlamalar belirlenebilir. Model daha sonra bu kısıtlamaları karşılayan ve üretim çıktısını maksimuma çıkaran en iyi üretim planını bulmak için optimizasyon algoritmaları kullanılarak çözülebilir.

Doğrusal programlama, maden planlayıcılarının, yer altı kaynaklarının kazılma sırası, zamanlaması ve zenginleştirilmesi işlemleri hakkında bilinçli kararlar almasına

yardımcı olabilir ve sonuçta açık ocak madenciliği operasyonlarında verimliliğin ve kârlılığın artmasını sağlayabilir. Açık ocak maden üretim planlaması için birden fazla periyot içeren doğrusal programlama modelinin örnek bir uygulaması aşağıda paylaşılmıştır.

T dönem (örneğin, yıllar) ve kazılacak N adet bloktan oluşan bir açık ocak madeninde her bloğun cevher içeriği ve kazıldığı döneme göre değişiklik gösteren bir karlılık değeri vardır (C_{ij}). Amaç fonksiyonunun T dönem boyunca çıkarılan cevherin toplam değerini maksimuma çıkarmak olduğu ve kısıt olarak yıllık üretim kapasitesi dikkate alınan bir probleme ait doğrusal programlama modeli aşağıdaki gibidir.

Karar Değişkenleri:

X_{ij} : i bloğundan j periyodu içerisinde kazılan malzeme miktarı

C_{ij} : i bloğu içerisindeki cevherin j periyodu içerisinde kazılması ile ton başına elde edilen gelir

P_i : T periyodu içerisinde kazılabilecek toplam malzeme miktarı

S_i : i bloğunun üzerinde yer alan bloklar kümesi

T: periyot sayısı

N: blok sayısı

Hedef Fonksiyon:

$$\text{Maks } \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N C_{ij} * X_{ij}$$

Bu doğrusal programlama modelinde, maden üretim planlamasının zaman boyutunu temsil etmek için çoklu dönemler ($t = 1$ 'den T 'ye) yer almaktadır. Amaç, her dönemde her ocağın çıkarılan cevherin net bugünkü değerini dikkate alarak, tüm dönemlerde toplam net bugünkü değeri maksimuma çıkarmaktır.

Kısıtlar:

Üretim kapasitesi kısıtı:

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} \leq P_i, \forall i,j$$

Bu kısıtlar her periyot için üretim kapasitesi kısıtının aşılmamasını garanti eder.

Öncelik kısıtları:

$$X_{ij} - X_{ik} \leq 0, X_{ik} \in S_i$$

Bu kısıtlar her blok kazılmadan önce üzerlerindeki blokların kazılmasını garanti eder.

Pozitif olma kısıtı:

$$X_{ij} \geq 0 \forall i,j$$

Bu kısıtlar her periyot için üretilecek malzeme miktarının negatif bir sayı olmamasını garanti eder.

Bu basitleştirilmiş doğrusal programlama modelini çözerek, verilen kısıtlamaları karşılarken toplam net bugünkü değeri maksimuma çıkaran her dönem için X_{ij} optimal değerleri bulunabilir. Mevcut maksimum cevher miktarı, işleme kapasitesi ve NBD hesaplamasına ilişkin spesifik değerlerin, madenin özelliklerine ve her dönem için mali hususlara dayalı olarak belirlenmesi gerekir. Bu doğrusal programlama modeli aslında oldukça büyük ve çok dönemli (multi-period) bir üretim planlaması problemidir.

Yukarıda hedef fonksiyon ve karar değişkenleri paylaşılan ve açık ocak işletmelerinde üretim planlaması probleminin çözümünde kullanılan doğrusal programlama modelinin örnek uygulaması Şekil 2.23’de verilen 2 boyutlu blok model üzerinde gösterilmiştir. Blokların sol üst köşelerinde yazan sayılar blok indislerini, ortalarında yazan sayılar ise o bloğun kazılması sonucu ton başına elde edilecek geliri ifade etmektedir.

İndis numarası Ton başına elde edilecek gelir	3	6	9
	-2	-2	1
	2	5	8
	-2	4	-2
	1	4	7
	-2	5	3

Şekil 2.23: Doğrusal programlama örnek blok modeli.

Planlama parametreleri:

T (Planlama Periyodu) = 2 periyot

P (Periyod başına madencilik kapasitesi) = 20 ton/periyot

d (İndirim oranı) = %10

Karar değişkenleri:

X_{11} : 1 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{12} : 1 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{21} : 2 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{22} : 2 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{31} : 3 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{32} : 3 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{41} : 4 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{42} : 4 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{51} : 5 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{52} : 5 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{61} : 6 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{62} : 6 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{71} : 7 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{72} : 7 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{81} : 8 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{82} : 8 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{91} : 9 numaralı bloğun içinden 1. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

X_{92} : 9 numaralı bloğun içinden 2. Periyotta kazılacak malzeme miktarı

Hedef Fonksiyon:

Maks

$$(-2X_{11}) + (-2,2X_{12}) + (-2X_{21}) + (-2,2X_{22}) + (-2X_{31}) + (-2,2X_{32}) + (5X_{41}) + (4,5X_{42}) + (4X_{51}) + (3,6X_{52}) + (-2X_{61}) + (-2,2X_{62}) + (3X_{71}) + (2,7X_{72}) + (-2X_{81}) + (-2,2X_{82}) + (1X_{91}) + (0,9X_{92})$$

Kısıtlar:

Kapasite kısıtları:

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} + X_{51} + X_{61} + X_{71} + X_{81} + X_{91} \leq 20$$

$$X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} + X_{52} + X_{62} + X_{72} + X_{82} + X_{92} \leq 20$$

Öncelik kısıtları:

$$X_{11} \leq X_{21}, X_{11} \leq X_{51}, X_{12} \leq X_{22}, X_{12} \leq X_{52} \quad - S_1 : \{2,5\}$$

$$X_{41} \leq X_{21}, X_{41} \leq X_{51}, X_{41} \leq X_{81}, X_{42} \leq X_{22}, X_{42} \leq X_{52}, X_{42} \leq X_{82}, \quad - S_4 : \{2,5,8\}$$

$$X_{71} \leq X_{51}, X_{71} \leq X_{81}, X_{72} \leq X_{52}, X_{72} \leq X_{82} \quad - S_7 : \{5,8\}$$

$$X_{21} \leq X_{31}, X_{21} \leq X_{61}, X_{22} \leq X_{32}, X_{22} \leq X_{62} \quad - S_2 : \{3,6\}$$

$$X_{51} \leq X_{31}, X_{51} \leq X_{61}, X_{51} \leq X_{91}, X_{52} \leq X_{32}, X_{52} \leq X_{62}, X_{52} \leq X_{92} \quad - S_5 : \{3,6,9\}$$

$$X_{81} \leq X_{61}, X_{81} \leq X_{91}, X_{82} \leq X_{62}, X_{82} \leq X_{92}$$

$$-S_8 : \{6,9\}$$

Pozitiflik kısıtları:

$$X_{11}, X_{21}, X_{31}, X_{41}, X_{51}, X_{61}, X_{71}, X_{81}, X_{91}, X_{12}, X_{22}, X_{32}, X_{42}, X_{52}, X_{62}, X_{72}, X_{82}, X_{92} \geq 0$$

2.3.2.2 Tam sayı programlama yöntemi

Açık ocak üretim planlaması yapılırken kullanılan tam sayı programlamanın genel formülü eşitlik (2.14)' daki gibidir.

Parametre tanımları:

V_{ij} : i bloğunun j periyodunda kazılmasıyla elde edilecek gelir

C_{ij} : i bloğunun j periyodunda kazılma maliyeti

B_i : i bloğunun türü (cevher veya atık)

P_{ik} : Sıralama kısıtı göstergesi (eğer i bloğu k bloğundan önce kazılmalıysa 1, aksi takdirde 0 değerini alır.

K_j : j periyodundaki üretim kapasitesi

Karar değişkenleri

X_{ij} : eğer i bloğu j periyodu içerisinde kazılacaksa 1, kazılmayacaksa 0 değerini alır.

$$\text{Maks } \sum_i \sum_j V_{ij} * X_{ij} - \sum_i \sum_j C_{ij} * X_{ij} \quad (2.14)$$

Bu denklem için belirlenmiş kısıtlar 3 ayrı bölüme ayrılabilir:

Kapasite kısıtları eşitlik (2.15) ile ifade edilir.

$$\sum_i B_i * X_{ij} \leq K_j \quad \forall j \quad (2.15)$$

Sıralama kısıtları eşitlik (2.16) ile ifade edilir.

$$\sum_j X_{ij} \leq \sum_j X_{kj} \quad \forall i, k: P_{ik}=1 \quad (2.16)$$

Her bloğun sadece bir periyotta üretilmesi kısıtı eşitlik (2.17) ve karar değişkenlerinin 1 veya 0 değerini alması kısıtı ise eşitlik (2.18) ile ifade edilir.

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad (2.17)$$

son olarak:

$$X_{ij} = \{0,1\} \forall i, \forall j \quad (2.18)$$

Eşitlik (2.15)'de verilen kısıtlar madencilik kapasiteleri sınırlarının sağlanmasını garanti eder. Eşitlik (2.16)'da paylaşılan kısıt, bir bloğun üzerindeki bloklar kazılmadan, kazılmamasını garanti eder. Eşitlik (2.17)'de verilen kısıtlar, model içerisinde hesaplara katılan blokların sadece 1 kere kazılmalarını garanti eder. Bir tamsayı programlama (IP) modeli genellikle çok sayıda 0-1 değişkeni içerdiğinden hali hazırda bulunan yazılımların kapasitelerini aşmaktadır. Bu açıdan, bu tarz bir modelin çözülebilmesi için bazı rahatlatma yaklaşımları ortaya atılmıştır.

Yukarıda hedef fonksiyon ve karar değişkenleri paylaşılan ve açık ocak işletmelerinde üretim planlaması probleminin çözümünde kullanılan tamsayı programlama modelinin örnek uygulaması Şekil 2.24'de verilen 2 boyutlu blok model üzerinde gösterilmiştir. Blokların sol üst köşelerinde yazan sayılar blok indislerini, sağ alt köşelerinde yazan sayılar kazılma maliyetlerini ve ortalarında yazan sayılar ise o bloğun kazılması sonucu elde edilecek geliri ifade etmektedir.



Şekil 2.24: Tamsayı programlama örnek blok modeli.

Planlama parametreleri:

T (Planlama Periyodu) = 2 periyot

P (Periyod başına madencilik kapasitesi) = 2 blok/periyot

d (İndirim oranı) = %10

$$P_{ik} \text{ matrisi: } \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Karar değişkenleri:

X₁₁: 1 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₁₂: 1 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₂₁: 2 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₂₂: 2 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₃₁: 3 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₃₂: 3 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₄₁: 4 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₄₂: 4 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₅₁: 5 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₅₂: 5 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₆₁: 6 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₆₂: 6 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₇₁: 7 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₇₂: 7 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₈₁: 8 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₈₂: 8 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₉₁: 9 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X₉₂: 9 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

Hedef fonksiyon:

$$\begin{aligned} \text{Maks } & (0X_{11} - 2X_{11}) + (0X_{21} - 2X_{21}) + (0X_{31} - 2X_{31}) + (7X_{41} - 2X_{41}) + (6X_{51} - 2X_{51}) \\ & + (0X_{61} - 2X_{61}) + (5X_{71} - 2X_{71}) + (0X_{81} - 2X_{81}) + (3X_{91} - 2X_{91}) + (0X_{12} - 2,2X_{12}) + \\ & (0X_{22} - 2,2X_{22}) + (0X_{32} - 2,2X_{32}) + (6,3X_{42} - 2,2X_{42}) + (5,4X_{52} - 2,2X_{52}) + (X_{62} - \\ & 2,2X_{62}) + (4,5X_{72} - 2,2X_{72}) + (0X_{82} - 2,2X_{82}) + (2,7X_{92} - 2,2X_{92}) \end{aligned}$$

Kısıtlar:

Kapasite kısıtları:

$$X_{41} + X_{51} + X_{71} + X_{91} \leq 2$$

$$X_{42} + X_{52} + X_{72} + X_{92} \leq 2$$

Her bloğun sadece 1 periyotta kazılmış olma kısıtları:

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{12} = 1, X_{21} + X_{22} = 1, X_{31} + X_{32} = 1, X_{41} + X_{42} = 1, X_{51} + X_{52} = 1, X_{61} + X_{62} = 1, \\ X_{71} + X_{72} = 1, X_{81} + X_{82} = 1, X_{91} + X_{92} = 1 \end{aligned}$$

Öncelik kısıtları:

$$X_{11} \leq X_{21}, X_{11} \leq X_{51}, X_{12} \leq X_{22}, X_{12} \leq X_{51} \quad - P_{12} \text{ \& } P_{15} = 1$$

$$X_{41} \leq X_{21}, X_{41} \leq X_{51}, X_{41} \leq X_{81}, X_{42} \leq X_{22}, X_{42} \leq X_{52}, X_{42} \leq X_{82} \quad - P_{42} \text{ \& } P_{45} \text{ \& } P_{48} = 1$$

$$X_{71} \leq X_{51}, X_{71} \leq X_{81}, X_{72} \leq X_{52}, X_{72} \leq X_{82} \quad - P_{75} \text{ \& } P_{78} = 1$$

$$X_{21} \leq X_{31}, X_{21} \leq X_{61}, X_{22} \leq X_{32}, X_{22} \leq X_{62} \quad - P_{23} \text{ \& } P_{26} = 1$$

$$X_{51} \leq X_{31}, X_{51} \leq X_{61}, X_{51} \leq X_{91}, X_{52} \leq X_{32}, X_{52} \leq X_{62}, X_{52} \leq X_{92} \quad - P_{53} \text{ \& } P_{56} \text{ \& } P_{59} = 1$$

$$X_{81} \leq X_{61}, X_{81} \leq X_{91}, X_{82} \leq X_{62}, X_{82} \leq X_{91} \quad - P_{86} \text{ \& } P_{89} = 1$$

İkili değişken olma kısıtları:

$$X_{11}, X_{21}, X_{31}, X_{41}, X_{51}, X_{61}, X_{71}, X_{81}, X_{91}, X_{12}, X_{22}, X_{32}, X_{42}, X_{52}, X_{62}, X_{72}, X_{82}, X_{92} \in \{0,1\}$$

2.3.2.3 Karışık tam sayı programlama yöntemi

Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama (MILP), hem sürekli hem de ayrık karar değişkenlerini içeren problemleri çözmek için kullanılan matematiksel bir optimizasyon tekniğidir. Açık ocak maden planlaması bağlamında MILP, madencilik faaliyetlerinin optimal sırasını ve zamanlamasını belirleyen bir matematiksel model oluşturmak için kullanılabilir. Tipik bir açık ocak maden planlama probleminde amaç, üretim kapasitesi, ekipman kullanılabilirliği ve malzeme kalitesi gereksinimleri gibi

çeşitli kısıtlamaları karşılarken madenin net bugünkü değerini (NBD) maksimuma çıkarmaktır.

Açık ocak maden planlama problemi için MILP modeli aşağıdaki gibi değişkenleri içerebilir:

Karar değişkenleri: Bu değişkenler, madencilik faaliyetlerinin zamanlaması ve sırası gibi verilecek ayrık kararları temsil eder. Örneğin, belirli bir cevher bloğunun belirli bir zaman diliminde çıkarılıp çıkarılmadığını gösteren ikili bir değişkeniniz olabilir.

Sürekli değişkenler: Bu değişkenler, çıkarılan malzemenin miktarı veya belirli bir faaliyet için harcanan zaman gibi sorunun sürekli yönlerini temsil eder.

MILP modeli ayrıca, NPV'yi en üst düzeye çıkarmak gibi optimize edilecek hedefi ölçen bir amaç fonksiyonu da içerir. Modelin üretim kapasitesi, ekipman kullanılabilirliği ve malzeme kalitesi gereksinimleri gibi çeşitli operasyonel sınırlamalara uymasını sağlamak için kısıtlamalar eklenir.

Açık ocak maden planlama problemine yönelik MILP modelini çözmek için Gurobi, CPLEX veya SCIP gibi özel optimizasyon çözücüler kullanılabilir. Bu çözücüler, kısıtlamalara saygı göstererek hem ayrık hem de sürekli değişkenleri göz önünde bulundurarak en uygun çözümü aramak için gelişmiş algoritmalar kullanır. Açık ocak maden planlama problemi için bir MILP modeli geliştirmenin, problem alanının, veri kullanılabilirliğinin ve maden operasyonunun spesifik kısıtlamalarının ve hedeflerinin iyi anlaşılmasını gerektirdiğini belirtmek önemlidir. Sorunu doğru bir şekilde temsil etmek ve pratik çözümler sağlamak için modelin dikkatli bir şekilde formüle edilmesi gerekir.

Karışık tamsayı programlaması için genel formül Caccetta ve Hill (2003) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir:

Amaç fonksiyonu:

$$Max Z = \sum \sum (c_{it-1} - c_{it}) x_{it-1} + \sum c_{it} x_{it} \quad i=1,..., N \quad t=1,..., T \quad (2.19)$$

Kısıtlar:

$$\sum t_i (x_{it} - x_{it-1}) - m_t = 0 \quad i \in O, t = 2, 3, \dots, T \quad (2.20)$$

$$\sum t_i (x_{it} - x_{it-1}) \leq uw_t \quad i \in W, t = 2, 3, \dots, T \quad (2.21)$$

$$x_{it-1} \leq x_{it} \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (2.22)$$

$$x_{it} \leq x_{jt} \quad t = 1, 2, \dots, T, j \in S_i; i = 1, 2, \dots, N \quad (2.23)$$

$$x_{it} = \{0, 1\} \quad \forall i, \forall t \quad (2.24)$$

Burada;

T: üretim planı yapılacak periyot sayısı

N: cevher damarını temsil eden toplam blok sayısı

c_{it} : i bloğunun t periyodunda kazılmasıyla sonucu elde edilebilecek kazanç

O: cevher blokları

W: dekapaj blokları

t_i : i bloğunun tonajı

m_t : t periyodunda zenginleştirilen cevherin tonajı

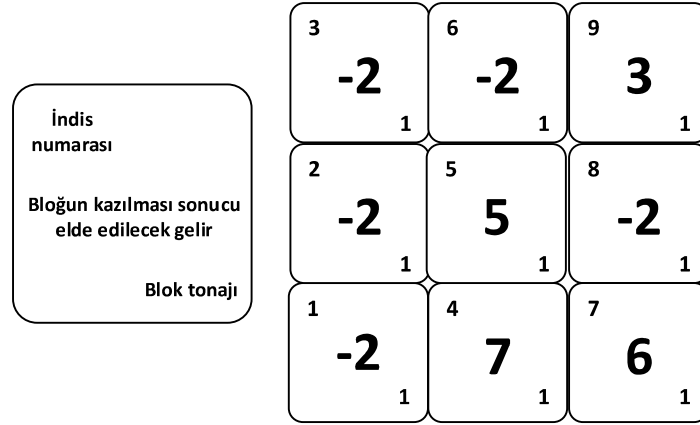
S_i : i bloğu kazılmadan önce çıkarılması gereken blokların kümesi

$x_{it} = 1$: i bloğu t periyodunda kazılırsa 1, aksi takdirde 0

uw_t : t periyodunda kazılan maksimum dekapaj miktarı

Yukarıdaki formülasyonda NBD'yi maksimize etmeyi hedefleyen amaç fonksiyonu Eşitlik (2.19) da verilmiştir. Eşitlik (2.20), zenginleştirme tesisi kapasitesini ifade ederken, eşitlik (2.21) ise dekapaj kazısı kapasitesinin üst sınırını ifade etmektedir. Eşitlik (2.22), her bloğun üretim işleri boyunca bir defa kazılması kısıtını sağlamaktadır. Şev açısı kısıtları eşitlik (2.23)'te paylaşılmıştır.

Yukarıda hedef fonksiyon ve karar değişkenleri paylaşılan ve açık ocak işletmelerinde üretim planlaması probleminin çözümünde kullanılan karışık tamsayı programlama modelinin örnek uygulaması Şekil 2.25'de verilen 2 boyutlu blok model üzerinde gösterilmiştir. Blokların sol üst köşelerinde yazan sayılar blok indislerini, sağ alt köşelerinde yazan sayılar blok tonajlarını ve ortalarında yazan sayılar ise o bloğun kazılması sonucu elde edilecek geliri ifade etmektedir.



Şekil 2.25: Karışık tamsayı programlama örnek blok modeli.

Planlama parametreleri:

T (Planlama Periyodu) = 2 periyot

P (Periyot başına zenginleştirme kapasitesi) = 2 ton/periyot

W (Periyot başına dekapaj kapasitesi) = 2 ton/periyot

d (İndirim oranı) = %10

Cevher blokları kümesi = i : 4, 5, 7, 9

Dekapaj blokları kümesi = i : 1, 2, 3, 6, 8

Karar değişkenleri:

X_{11} : 1 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{12} : 1 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{21} : 2 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{22} : 2 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{31} : 3 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{32} : 3 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{41} : 4 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{42} : 4 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{51} : 5 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{52} : 5 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{61} : 6 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{62} : 6 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{71} : 7 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{72} : 7 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{81} : 8 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{82} : 8 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{91} : 9 numaralı blok 1. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

X_{92} : 9 numaralı blok 2. periyotta kazılacak ise 1, aksi takdirde 0 değerini alır

Hedef fonksiyon:

$$\begin{aligned} \text{Maks} + & (-2(X_{11} - X_{10})) + (-2,2(X_{12} - X_{11})) + (-2(X_{21} - X_{20})) + (-2,2(X_{22} - X_{21})) + (- \\ & 2(X_{31} - X_{30})) + (-2,2(X_{32} - X_{31})) + (7(X_{41} - X_{40})) + (6,3(X_{42} - X_{41})) + (5(X_{51} - X_{50})) + \\ & (4,5(X_{52} - X_{51})) + (-2(X_{61} - X_{60})) + (-2,2(X_{62} - X_{61})) + (6(X_{71} - X_{70})) + (6,4(X_{72} - \\ & X_{71})) + (-2(X_{81} - X_{80})) + (-2,2(X_{82} - X_{81})) + (3(X_{91} - X_{90})) + (2,7(X_{92} - X_{91})) \end{aligned}$$

Kısıtlar:

Zenginleştirme kısıtları:

$$1(X_{41} - X_{40}) + 1(X_{51} - X_{50}) + 1(X_{71} - X_{70}) + 1(X_{91} - X_{90}) = 2$$

$$1(X_{42} - X_{41}) + 1(X_{52} - X_{51}) + 1(X_{72} - X_{71}) + 1(X_{92} - X_{91}) = 2$$

Dekapaj kısıtları:

$$1(X_{11} - X_{10}) + 1(X_{21} - X_{20}) + 1(X_{31} - X_{30}) + 1(X_{61} - X_{60}) + 1(X_{81} - X_{80}) \leq 2$$

$$1(X_{12} - X_{11}) + 1(X_{22} - X_{21}) + 1(X_{32} - X_{31}) + 1(X_{62} - X_{61}) + 1(X_{82} - X_{81}) \leq 2$$

Her bloğun 1 periyotta üretilmiş olma kısıtları:

$$X_{10} \leq X_{11}, X_{11} \leq X_{12}$$

$$X_{20} \leq X_{11}, X_{21} \leq X_{22}$$

$$X_{30} \leq X_{31}, X_{31} \leq X_{32}$$

$$X_{40} \leq X_{41}, X_{41} \leq X_{42}$$

$$X_{50} \leq X_{51}, X_{51} \leq X_{52}$$

$$X_{60} \leq X_{61}, X_{61} \leq X_{62}$$

$$X_{70} \leq X_{71}, X_{71} \leq X_{72}$$

$$X_{80} \leq X_{81}, X_{81} \leq X_{82}$$

$$X_{90} \leq X_{91}, X_{91} \leq X_{92}$$

Öncelik kısıtları:

$$X_{11} \leq X_{21}, X_{11} \leq X_{51}, X_{12} \leq X_{22}, X_{12} \leq X_{52} \quad - S_1 : \{2,5\}$$

$$X_{41} \leq X_{21}, X_{41} \leq X_{51}, X_{41} \leq X_{81}, X_{42} \leq X_{22}, X_{42} \leq X_{52}, X_{42} \leq X_{82}, \quad - S_4 : \{2,5,8\}$$

$$X_{71} \leq X_{51}, X_{71} \leq X_{81}, X_{72} \leq X_{52}, X_{72} \leq X_{82} \quad - S_7 : \{5,8\}$$

$$X_{21} \leq X_{31}, X_{21} \leq X_{61}, X_{22} \leq X_{32}, X_{22} \leq X_{62} \quad - S_2 : \{3,6\}$$

$$X_{51} \leq X_{31}, X_{51} \leq X_{61}, X_{51} \leq X_{91}, X_{52} \leq X_{32}, X_{52} \leq X_{62}, X_{52} \leq X_{92}, \quad - S_5 : \{3,6,9\}$$

$$X_{81} \leq X_{61}, X_{81} \leq X_{91}, X_{82} \leq X_{62}, X_{82} \leq X_{92} \quad - S_8 : \{6,9\}$$

İkili değişken olma kısıtları:

$X_{11}, X_{21}, X_{31}, X_{41}, X_{51}, X_{61}, X_{71}, X_{81}, X_{91}, X_{12}, X_{22}, X_{32}, X_{42}, X_{52}, X_{62}, X_{72}, X_{82}, X_{92} \in \{0,1\}$

2.3.2.4 Metasezgisel yöntemler

Metasezgisel algoritmalar, açık ocak madenlerindeki uzun vadeli üretim planlama problemi gibi karmaşık problemleri çözmek için kullanılan bir optimizasyon algoritmaları sınıfıdır. Bu algoritmalar, optimuma yakın çözümler bulmak için geniş bir çözüm uzayını araştırmak ve aramak üzere tasarlanmıştır. Açık ocak madenleri bağlamında, uzun vadeli üretim planlama problemi, uzun bir süre boyunca madencilik faaliyetlerinin optimal sırasını ve zamanlamasını belirlemeyi içerir. Bu, madenin hangi alanlarının kazılacağına, ne zaman kazılacağına ve ne kadar malzeme çıkarılacağına ilişkin kararları da içerir. Genetik algoritmalar, benzetilmiş tavlama, parçacık sürüşü optimizasyonu ve karınca kolonisi optimizasyonu gibi metasezgisel algoritmalar bu sorunu çözmek için yaygın olarak kullanılır. Bu algoritmalar doğal süreçlerden veya sosyal davranışlardan ilham alır ve iyi çözümler bulmak için çözüm alanını verimli bir şekilde araştırabilir.

Madencilik şirketleri, meta-sezgisel algoritmalar kullanarak, üretimi en üst düzeye çıkarmak, maliyetleri en aza indirmek ve cevher derecelerini dengelemek gibi çeşitli kısıtlamaları ve hedefleri hesaba katarak uzun vadeli üretim planlamalarını optimize edebilir. Açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması için kullanılan metasezgisel yöntemi örnekleri aşağıda sıralanmıştır.

Genetik Algoritmalar: Genetik algoritmalar, açık ocak maden üretim planlamasında yaygın olarak kullanılır. Çözümleri yinelemeli olarak iyileştirmek için doğal seçim ve evrim sürecini taklit ederler. Algoritma, çözümlerin başlangıç popülasyonu ile başlar ve yeni çözümler üretmek için seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörleri uygular. Her çözümün uygunluğu, üretimi en üst düzeye çıkarmak ve maliyetleri en aza indirmek gibi önceden tanımlanmış hedeflere göre değerlendirilir. Algoritma, optimuma yakın çözümler bulmak için popülasyonu birden fazla nesil boyunca geliştirmeye devam eder.

Tavlama Simülasyonu: Tavlama simülasyonu, açık ocak maden üretim planlamasında kullanılan başka bir meta-sezgisel algoritmadır. Metalurjideki bir malzemenin ısıtıldığı ve ardından kusurları azaltmak için yavaşça soğutulduğu tavlama işleminden

ilham alınmıştır. Çizelgeleme bağlamında tavlama benzetimi bir başlangıç çözümüyle başlar ve küçük değişiklikler yaparak komşu çözümleri yinelemeli olarak araştırır. Algoritma, amaç fonksiyonunu iyileştiren çözümleri kabul eder ve bazen zamanla azalan olasılıkla daha kötü çözümleri de kabul eder. Bu, algoritmanın yerel optimumdan kaçmasına ve küresel veya optimuma yakın çözümler bulmasına olanak tanır.

Parçacık Sürü Optimizasyonu: Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), açık ocak maden üretim planlamasında sıklıkla kullanılan, popülasyona dayalı bir meta-sezgisel algoritmadır. Kuş sürüsü veya balık eğitiminin sosyal davranışından ilham almıştır. PSO'da bir parçacık popülasyonu potansiyel çözümleri temsil eder ve her parçacık kendi deneyimine ve yakınındaki en iyi performans gösteren parçacığın deneyimine göre konumunu ayarlar. Parçacıklar yüksek kaliteli çözümler bulmak için toplu olarak çözüm uzayını ararlar.

Bunlar meta-sezgisel algoritmaların açık ocak maden üretim planlamasına nasıl uygulanabileceğine dair sadece birkaç örnektir. Her algoritmanın kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri vardır ve algoritma seçimi, madencilik operasyonunun özel gereksinimlerine ve hedeflerine bağlıdır.

Açık ocak maden üretim planlamasına yönelik meta-sezgisel algoritmalar birçok avantaj ve dezavantaj sunmaktadır.

Avantajları:

Karmaşık sorunları ele alma yeteneği: Meta-sezgisel algoritmalar, açık ocak maden üretim planlaması gibi karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için çok uygundur. Büyük çözüm alanlarını verimli bir şekilde keşfedebilir, birden fazla hedefi göz önünde bulundurabilir ve çeşitli kısıtlamalarla başa çıkabilirler.

Küresel optimizasyon: Metasezgisel algoritmalar, yerel optimumlara takılıp kalmak yerine küresel veya optimuma yakın çözümler aramak için tasarlanmıştır. Çözüm uzayının farklı bölümlerini keşfedebilir ve hemen belli olmayan çözümleri bulabilirler.

Esneklik ve uyarlanabilirlik: Metasezgisel algoritmalar farklı problem alanlarına ve hedeflere uyarlanabilir. Madenin ve üretim planlama probleminin özel gereksinimlerine daha iyi uyacak şekilde parametreler, operatörler ve kısıtlamalar ayarlanarak özelleştirilebilirler.

Paralleleştirme: Birçok meta-sezgisel algoritma paralel hale getirilerek modern bilgi işlem kaynaklarından yararlanmalarına ve optimizasyon sürecini hızlandırmalarına olanak sağlanır.

Dezavantajları:

Optimalliğin garantisi yoktur: Metasezgisel algoritmalar mutlak optimal çözümü bulmayı garanti etmez. Genellikle pratik amaçlar için yeterince iyi olan optimale yakın çözümler sunarlar. Çözümlerin kalitesi spesifik algoritmaya, parametre ayarlarına ve problem özelliklerine bağlıdır.

Hesaplama kaynağı gereksinimi: Bazı meta-sezgisel algoritmalar, özellikle büyük ölçekli problemler için hesaplama açısından pahalı olabilir. İyi çözümlere yakınsama için önemli miktarda hesaplama kaynağı ve zaman gerekebilir.

Parametre ayarlama: Meta-sezgisel algoritmalar genellikle en iyi performansı elde etmek için ayarlanması gereken çeşitli parametrelere sahiptir. Doğru parametre değerlerini bulmak bir deneme-yanılma süreci olabilir ve bazı alanlara özgü uzmanlık gerektirebilir.

Probleme özgü bilgi eksikliği: Metasezgisel algoritmalar genel amaçlı optimizasyon teknikleridir ve varsayılan olarak probleme özgü bilgiyi içermemektedir. Bu, daha iyi çözümlere yol açabilecek belirli alan bilgilerinin avantajlarından yararlanamayabilecekleri anlamına gelir.

Açık ocak maden üretim planlaması için meta-sezgisel algoritmalar kullanmaya karar verirken bu avantaj ve dezavantajları dikkate almak önemlidir. Algoritma seçimi, madencilik operasyonunun özel gereksinimlerine, kısıtlamalarına ve hedeflerine dayanmalıdır.

2.4 Açık İşletme Üretim Planlamasında Kullanılan Kısıtlar

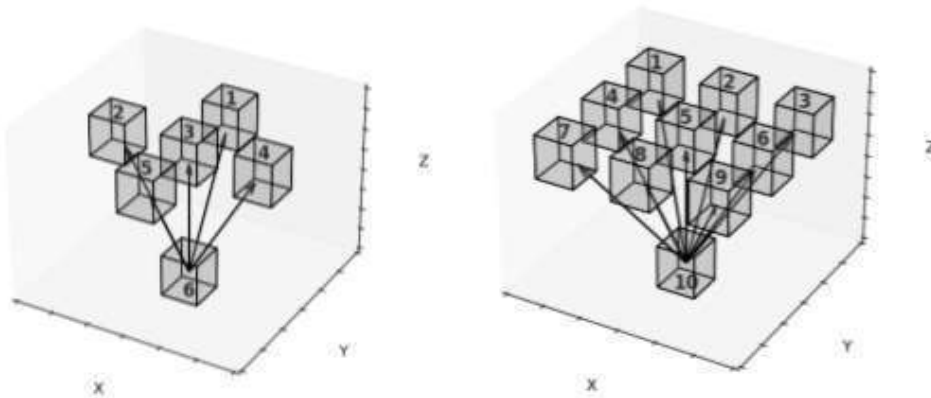
Açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlama problemi için bir matematiksel programlama modeli formüle ederken dikkate alınması gereken bazı genel kısıtlamalar şunlardır:

Kaynak kısıtlamaları: Bu kısıtlamalar, madencilik operasyonları için gereken kaynakların sınırlamalarını ve kullanılabilirliğini hesaba katar. Bunlar, mevcut maksimum kamyon veya kepçe sayısı veya belirli ekipmanların maksimum çalışma saatleri gibi madencilik ekipmanının kapasitesine ilişkin kısıtlamaları içerebilir. Bu kısıtlamalar madencilik operasyonlarının mevcut kaynakları aşmamasını sağlar.

Üretim kapasitesi kısıtlamaları: Bu kısıtlamalar, kazılan cevher miktarının, zenginleştirme tesisinin işleme kapasitesini aşmamasını sağlar. Birim zaman başına işlenebilecek maksimum malzeme miktarı gibi kısıtlamaları içerebilirler.

Kalite kısıtlamaları: Bu kısıtlamalar, kazılan malzemenin zenginleştirme tesisine gönderilmeden önce ihtiyaç duyulan tenör değerine sahip olmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

Sıra ve öncelik kısıtlamaları: Açık ocak madenciliğinde kazı işlemleri yüzeyden başlayarak derine doğru ilerlemektedir ve bu kısıtlamalar bu durumun uygulanmasını sağlamak amacıyla blokların kazılma sırası kısıtlamalarını sağlayan kısıtları içerirler. Bu kısıtların 3 boyutlu bir maden ocağındaki tasviri Şekil 2.26'da yapılmıştır.



Şekil 2.26: Öncelik kısıtlamalarının temsili görseli (5 blok uygulaması (sol), 9 blok uygulaması (sağ)).

Açık ocak işletmelerinde öncelik kısıtlamalarının belirlenmesi sırasında 5 blok ve 9 blok şeklinde iki farklı uygulama bulunmaktadır. Şekil 2.26 (sol)'da 5 blok uygulama şekli paylaşılan yöntemle göre, 6 numaralı blok kazılmadan önce, 1,2,3,4,5 numaralı blokların kazılmış olması gerekmektedir. Şekil 2.26 (sağ)'da görülen 9 bloklu uygulamada ise 10 numaralı blok kazılmadan önce 1'den 9'a kadar numaralandırılmış bloklar kazılmış olmalıdır.

Bunlar, açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlama problemi için doğrusal programlama modeline dahil edilebilecek ortak kısıtlamalardan bazılarıdır. Belirli kısıtlamalar madenin özelliklerine ve sorunun özel gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir.



3. AÇIK OCAK İŞLETMELERİNDE UVÜP İÇİN KULLANILAN TAM SAYILI MODELLERİN ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması probleminin modellenmesinde kullanılan modelleri çözmek, hem sürekli hem de ayrık karar değişkenlerini içeren bir matematiksel modele en uygun çözümü bulmayı içerir. Amaç, bir dizi kısıtlamayı karşılarken amaç fonksiyonunu en aza indirmek veya en üst düzeye çıkarmaktır. Bu modelleri çözmek için pratikte kullanılan çeşitli yaklaşımlar genel hatlarıyla aşağıda sıralanmıştır. Yaklaşımın seçimi problemin boyutuna, karmaşıklığına ve mevcut hesaplama kaynaklarına bağlıdır.

Kesin Yöntemler: Bu yöntemler en uygun çözümü bulmayı garanti eder ancak büyük ölçekli problemler için hesaplama kapasitesi açısından yüksek gereksinimlere ihtiyaç duyulabilir. Yaygın olarak kullanılan yöntemler Lagrange Rahatlatma yaklaşımı, dallanma ve sınırlanma (Branch and Bound), kesme düzlemleri (Cutting Planes) ve dallanma ve kesim (Branch and Cut) olarak sıralanabilir.

Sezgisel Yöntemler: Bu yöntemler hızlı bir şekilde kaliteli çözümler sağlar ancak en uygun çözümü bulmayı garanti etmez. Örnekler arasında greedy algoritmalar, yerel arama ve genetik algoritmalar ve tavlama simülasyonu gibi metasezgisel yöntemler yer alır.

Hedef Programlama: Bu yaklaşım, kısıtlamaları kullanarak problemlerin modellenmesine ve çözülmesine odaklanır. Sorunun karmaşık mantıksal kısıtlamaları olduğu durumlarda özellikle faydalıdır.

Ayrıştırma Yöntemleri: Bu yöntemler problemi daha küçük alt problemlere ayırıştırır ve bunları bağımsız olarak çözer. Örnekler arasında Benders ayrıştırması ve Dantzig-Wolfe ayrıştırması yer alır.

Hibrit Yöntemler: Bu yöntemler, güçlü yönlerinden yararlanmak için birden fazla yaklaşımı birleştirir. Örneğin, hibrit bir yöntem, problemin rahat bir versiyonunu çözmek için kesin bir yöntem kullanabilir ve daha sonra bir tamsayılı çözüm elde etmek için sezgisel bir yöntem kullanabilir.

3.1 Lagrange Rahatlatma Yaklaşımı

Bu yaklaşım büyük ölçekli optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan ve kesin yöntemler sınıfına giren bir yaklaşımdır. Bu yaklaşıma göre asıl probleme ait kısıtlar, uygun katsayılarla çarpılarak hedef fonksiyon içerisine dahil edilmektedir. Kısıtların hedef fonksiyona eklenmesi sırasında kullanılan katsayılara Lagrange çarpanları denilmekte ve kısıtların sağlanamadığı haller, ana problemin optimum değerini düşürecek şekilde hedef fonksiyona dahil edilmektedir.

Lagrange rahatlatma yaklaşımının uygulama adımları ve açıklamaları aşağıdaki gibidir.

1. Orijinal Problem: Hem amaç fonksiyonu hem de kısıtlamaları olan bir optimizasyon problemiyle başlanır.

2. Rahatlatma: İkili değişkenler olarak da bilinen Lagrange çarpanlarını modele ekleyerek kısıtlamaları gevşetin. Her kısıta bir Lagrange çarpanı ile ilişkilendirilir.

3. Lagrangian Fonksiyonu: Her bir Lagrange çarpanını ve bununla ilişkili kısıtlamayı orijinal amaç fonksiyonuna ekleyerek Lagrangian fonksiyonunu oluşturun.

4. Dual Problem: Lagrange çarpanlarına göre Lagrangian fonksiyonunun maksimize edilmesini içeren dual problemin çözümü.

5. Alt Problem Çözme: Dual probleminden elde edilen her bir Lagrange çarpanı seti için, Lagrange çarpanlarını sabit tutarken karar değişkenlerine göre Lagrange fonksiyonunu en aza indirecek bir alt problem çözülmesi

6. Çarpanların Güncellenmesi: Lagrange çarpanları, problemin kısıtları sağlanana kadar güncellenir.

7. Yakınsama: Lagrange çarpanları bir çözüme yaklaşıp veya bir sonlandırma kriteri karşılanana kadar 5. ve 6. Adımlar tekrarlanır.

8. Çözümlerin Belirlenmesi: Lagrange çarpanlarından gelen kısıtlamaları alt problem çözümlerine dahil ederek orijinal problem için uygun bir çözüm elde edilir.

Yukarıda uygulama adımları paylaşılan yaklaşımın açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması probleminin çözümünde kullanılmasına yönelik ilk örneklerden biri Dagdelen ve Johnson (1986)'da paylaşılmıştır. Bu çalışmada paylaşılan örnek bir probleme göre, tenör içerikleri bilinen ve 6 bloktan oluşan bir blok modelde metal üretimini maksimize edecek bir problem çözülmek istenmektedir. Problemin hedef fonksiyonu Eşitlik (3.1)'de paylaşıldığı gibidir.

$$Max Z = G_1X_1 + G_2X_2 + G_3X_3 + G_4X_4 + G_5X_5 + G_6X_6 \quad (3.1)$$

Burada;

$G_{1,6}$: 1'den 6 ya kadar olan blokların tenör değerleri

$X_{1,6}$: 1'den 6'ya kadar olan bloklar kazılacaksa 1, kazılmayacaksa 0 değerini alan bir değişkeni temsil etmektedir.

Problemin kısıtı:

$$\sum Xi \leq N \text{ Şeklinde verilmiştir.}$$

Bu kısıtın hedef fonksiyona dahil edilmesi için ilk iterasyonda “u1” katsayısı ile çarpılmış kısıt denklemi hedef fonksiyona dahil edilerek Eşitlik (3.2)'deki halini alır.

$$Max Z = (G_1-u_1)X_1 + (G_2-u_1)X_2 + (G_3-u_1)X_3 + (G_4-u_1)X_4 + (G_5-u_1)X_5 + (G_6-u_1)X_6 \quad (3.2)$$

Bu problemin çözülmesi ile elde edilen sonuç kontrol edilerek $\sum Xi \leq N$ kısıtının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Eğer bu kısıt sağlanmıyorsa “u1” katsayısı artırılarak “c1” katsayısı haline getirilir ($c1 > u1$) ve problemin yeni hedef fonksiyonu eşitlik (3.3)'teki halini alarak tekrar çözülür.

$$Max Z = (G_1-c_1)X_1 + (G_2-c_1)X_2 + (G_3-c_1)X_3 + (G_4-c_1)X_4 + (G_5-c_1)X_5 + (G_6-c_1)X_6 \quad (3.3)$$

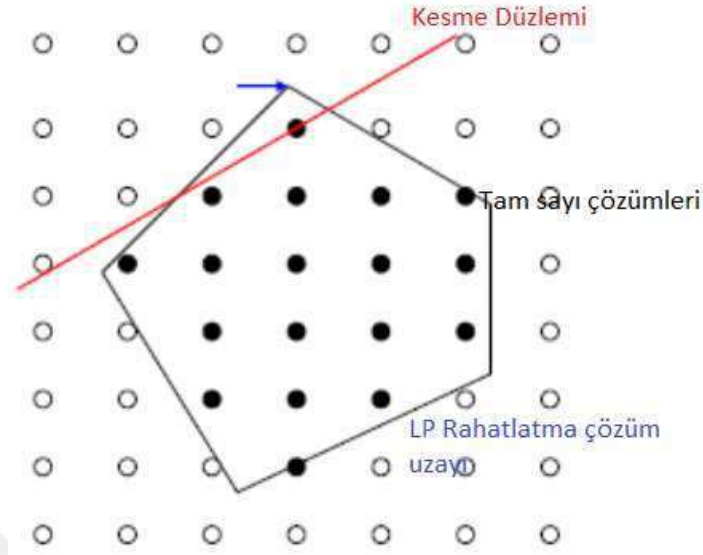
Bu prosedür kazılan toplam blok sayısı $\sum Xi \leq N$ (kapasite sınırlaması) ve optimalite koşulları sağlanana kadar devam eder.

3.2 Kesme Düzlemleri ve Dallandır ve Kes Yaklaşımı (Branch and Cut)

Dal ve kesme algoritması dal ve sınır ve kesme düzlemleri yaklaşımlarının bir arada kullanıldığı hibrit bir yöntemdir. Dal ve sınır tekniğinde problem, dal adı verilen daha küçük alt problemlere bölünür. Algoritma her bir dalı araştırır ve o ana kadar bulunan en iyi çözümü takip eder. Mevcut en iyi çözümlerden daha iyi çözümler içermemesi garanti edilen dalları budamak için sınırları kullanır. Kesme düzlemleri tekniği, kesme düzlemleri adı verilen ek kısıtlamalar ekleyerek sınırları güçlendirmek için kullanılır. Bu kesme düzlemleri problemin doğrusal programlama gevşemesinden türetilir. Sınırları sıkılaştırmaya ve dal ve sınır algoritmasının verimliliğini artırmaya yardımcı olurlar. Bu teknikleri birleştirerek dal ve kes algoritması, tamsayı değişkenli optimizasyon problemlerini verimli bir şekilde çözebilir. Kesme düzlemleri yöntemi, tamsayı programlamada, kesme düzlemleri adı verilen ek kısıtlamalar ekleyerek bir problemin sınırlarını güçlendirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu kesme düzlemleri problemin doğrusal programlama gevşemesinden türetilir. Düzlemleri kesmenin ardındaki fikir, tamsayı çözümler için geçerli olan ancak doğrusal programlama gevşemesinin kesirli çözümleri için geçerli olmayan kısıtlamalar eklemektir. Bunu yaparak, kesme düzlemleri tam sayı çözümleri üzerindeki sınırların sıkılaştırılmasına yardımcı olur, arama alanını azaltır ve algoritmanın verimliliğini artırır.

Caccetta ve Hill (2003), açık ocak işletmelerindeki üretim planlaması problemlerini tamsayı programlama ile çözmek amacıyla Dallandır ve Kes yaklaşımını kullanmışlardır, çalışmalarında 209.664 bloktan oluşan bir blok modelin 10 periyot için üretim planlamasını paylaşmışlardır.

Kesme düzlemleri yönteminde kesme düzlemleri oluşturmanın çeşitli yöntemleri vardır. Yaygın olarak kullanılan bazı yöntemler aşağıda paylaşılmıştır. Kesme düzlemlerinin temsili bir görüntüsü Şekil 3.1’de paylaşılmıştır. Burada mavi çizgili sınır problemin doğrusal programlama ile rahatlatılmış halinin çözüm uzayını göstermektedir. Siyah noktalar ise bu uzay içerisindeki tam sayılı çözümleri göstermektedir. Kırmızı çizgi ile gösterilen bölge ise kesme düzlemi olarak adlandırılır. Mavi poligon içerisinde kalan bölgenin kırmızı çizgi ile sınırlandırılması ile çözüm uzayı daraltılmış olur ve dallandırma metodunun çözüm performansı iyileştirilmiş olur.



Şekil 3.1: Dallandır ve Kes yönteminin uygulama örneği.

Gomory'nin Karışık Tamsayı (Kesme) Yöntemi: Bu yöntem, Gomory'nin kesirli kesimleri kavramını kullanarak kesme düzlemleri üretir. Doğrusal programlama gevşemesinin kesirli çözümlerine dayalı olarak yinelemeli olarak kısıtlamalar ekler.

Kaldır ve Yansıt Yöntemi: Bu yöntem, uygun bölgeyi daha düşük boyutlu bir uzaya yansıtarak kesme düzlemleri oluşturur. Değişkenleri daha yüksek boyutlara çıkarmayı ve sonra onları geriye yansıtmayı içerir.

Chvatal-Gomory (CG) Kesikleri: CG kesimleri, Gomory'nin kesirli kesimleri kavramından türetilmiştir ancak farklı bir yaklaşım kullanılarak oluşturulmuştur. Doğrusal gevşemede ihlal edilen kısıtlamaları bulma fikrine dayanmaktadırlar.

Karışık Tam Sayı Yuvarlama (MIR) Kesimleri: MIR kesimleri, kesirli çözümlerin en yakın tam sayı değerlerine yuvarlanması ve yuvarlama işlemine dayalı olarak kısıtlamaların eklenmesiyle oluşturulur.

Ayırıcı Kesimler: Ayırıcı kesimler, ikili değişkenler arasındaki mantıksal ilişkiler dikkate alınarak ve bu ilişkileri zorlayan kısıtlamalar eklenerek oluşturulur.

Dallandırma ve kesme yönteminin bazı avantaj ve dezavantajları şunlardır:

Avantajlar:

Dal ve Sınırın Kesme Düzlemleri ile Entegrasyonu: Dal ve kesme yöntemi hem dal ve sınır hem de kesme düzlemleri tekniklerinin güçlü yönlerini birleştirir. Dal ve sınırın verimli arama ve budama yeteneklerinden yararlanırken aynı zamanda sınırları sıkılaştırmak ve çözüm kalitesini artırmak için kesme düzlemlerini kullanır.

İyileştirilmiş Sınırlar: Kesme düzlemlerinin dahil edilmesi, tamsayılı çözümlerdeki sınırların sıkılaştırılmasına yardımcı olur, arama alanını azaltır ve potansiyel olarak en uygun çözümlerin daha hızlı bulunmasına yol açar.

Esneklik: Dal ve kes yöntemi, problemin özelliklerine ve kısıtlamalarına göre farklı türde kesme düzlemlerinin oluşturulmasına olanak tanır ve belirli bir problem için en etkili kesimlerin bulunmasında esneklik sağlar.

Kombinatoryal Karmaşıklığın Azaltılması: Dal ve kesme yöntemi, problemi daha küçük alt problemlere (dallara) bölerek kombinatoryal karmaşıklığı azaltır ve çözümü daha izlenebilir ve verimli hale getirir.

Ölçeklenebilirlik: Dal ve kesme yöntemi, büyük ölçekli optimizasyon problemlerini daha küçük alt problemlere bölerek ve her dallara kesme düzlemleri uygulayarak çözebilir.

Dezavantajları:

Hesaplama Yükü: Kesme düzlemlerinin dahil edilmesi ve doğrusal programlama gevşemesini çözme ihtiyacı, ek hesaplama yükü getirebilir, bu da algoritmayı basit dal ve sınır yaklaşımlarına kıyasla daha yavaş hale getirir.

Etkili Kesimler Oluşturmadaki Zorluk: Sınırları iyileştiren ve arama alanını azaltan etkili kesme düzlemleri oluşturmak zorlayıcı olabilir ve problem yapısının ve kısıtlamalarının derinlemesine anlaşılmasını gerektirir.

Algoritmik Karmaşıklık: Dal ve kes yöntemi, genel optimizasyon algoritmasına ek bir karmaşıklık katmanı ekler ve bu da algoritmanın uygulanmasını ve analizini daha kapsamlı hale getirebilir.

Dallanma ve Kesme Arasındaki Denge: Dallanma ve kesme düzlemlerinin dahil edilmesi arasında doğru dengeyi bulmak hassas bir iş olabilir; çünkü çok fazla kesme algoritmayı yavaşlatabilir, çok az kesme ise yeterli sınır iyileştirmesi sağlayamayabilir.

Dallandırma ve kesme yönteminin etkililiğinin, problem örneğine ve formülasyona bağlı olarak değişebileceğini unutmamak önemlidir. Belirli bir problem için en iyi sonuçları elde etmek amacıyla genellikle farklı kesme düzlemi yöntemleri, dallanma stratejileri ve parametre ayarlarıyla denemeler yapılması önerilir.

Kesme düzlemi algoritmasının tam sayılı doğrusal programlama modellerinin çözülmesi sırasında kullanımına dair örnek bir uygulama aşağıda paylaşılmıştır.

Hedef fonksiyon:

$$\text{Maks } 7 X_1 + 10 X_2$$

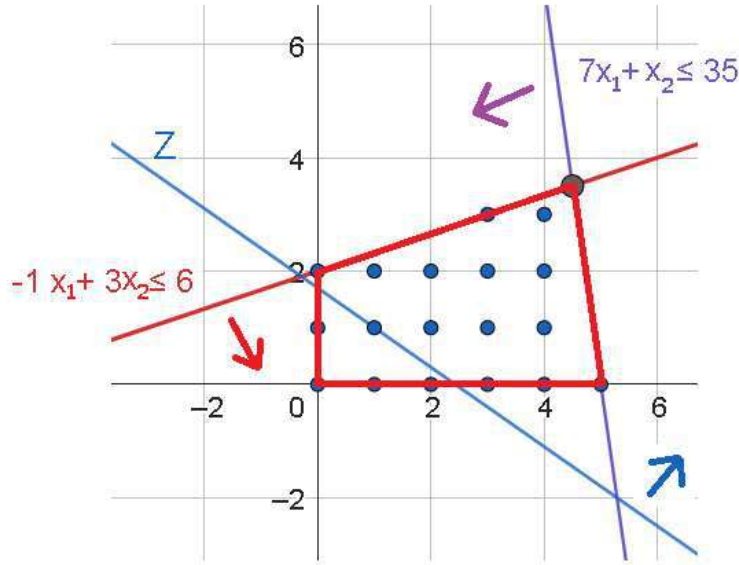
Kısıtlar:

$$- X_1 + 3 X_2 \leq 6$$

$$7 X_1 + X_2 \leq 35$$

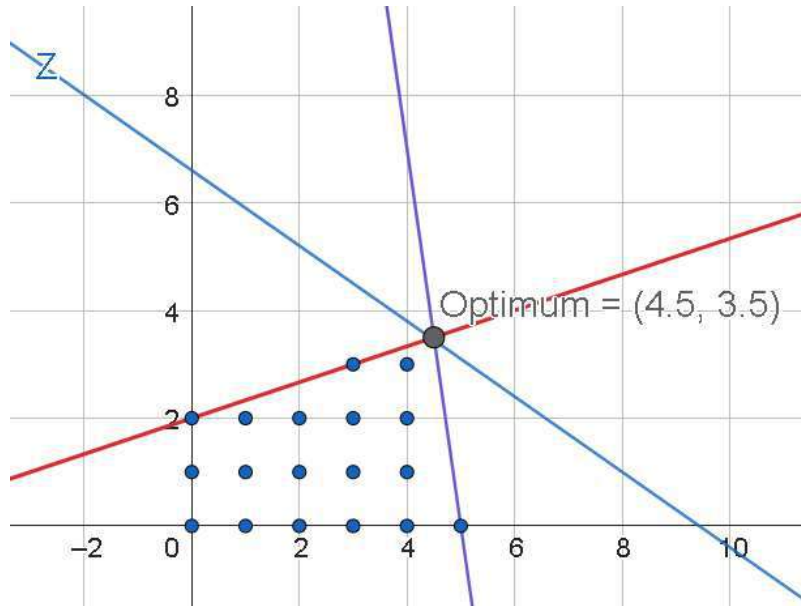
$$X_1, X_2 \geq 0 \text{ \& } \in Z^+$$

Uygulama adımlarının anlaşılabilmesi adına problem grafik metodu ile çözülecektir. Problemin çözümü ilk olarak tam sayı olma kısıtları rahatlatılarak doğrusal programlama modelinin çözülmesi ile başlamaktadır. Bu aşamada kısıt denklemlerinin grafikleri çizilerek problemin çözüm uzayı belirlenmektedir. Şekil 3.2 'de görülen ve kırmızı çizgiler arasında kalan bölge doğrusal programlama modelinin olası çözümler kümesini ifade etmektedir. Mavi noktalar ise problemin tam sayı çözümler kümesi içinde kalan noktaları göstermektedir.



Şekil 3.2: Dallandır kes örnek problem başlangıç durumu.

Z hedef fonksiyonu bu bölge içerisinde kalacak şekilde mavi ok ile belirlenen yönde giderek artan değerlere sahip olabilir. Bu problemin optimum değeri 66 olarak bulunmuş ve X_1 değeri 4.5, X_2 değeri 3.5 olarak belirlenmiştir. Bu aşamada Optimum sonuca ulaşılsa da karar değişkenlerinin tam sayı olma kısıtı sağlanmış değildir. Bu kısıtın sağlanması için ana probleme kesme düzlemleri eklenerek karar değişkenlerinin tam sayı olması sağlanmalıdır.



Şekil 3.3: Dallandır kes örnek problem 1.adım.

Probleme ilk eklenecek kesme düzleminin denklemi $X_2 \leq 3$ olarak belirlenmiş ve aşağıda paylaşılan problem tekrar çözülerek hedef fonksiyonun değeri 62 olarak bulunmuştur. Karar değişkenleri $X_1 = 4.57$, $X_2 = 3$ olarak belirlenmiştir. Bu aşamada da X_1 değişkeninin tam sayı olma şartını sağlanmadığı için probleme bir kesme düzlemi daha eklenmesi gerekmektedir. Eklenen 1. kesme düzlemi sonrası problemin grafik metodu ile çözümüne dair görsel şekil 3.4 'de paylaşıldığı gibidir.

Hedef fonksiyon:

$$\text{Maks } 7 X_1 + 10 X_2$$

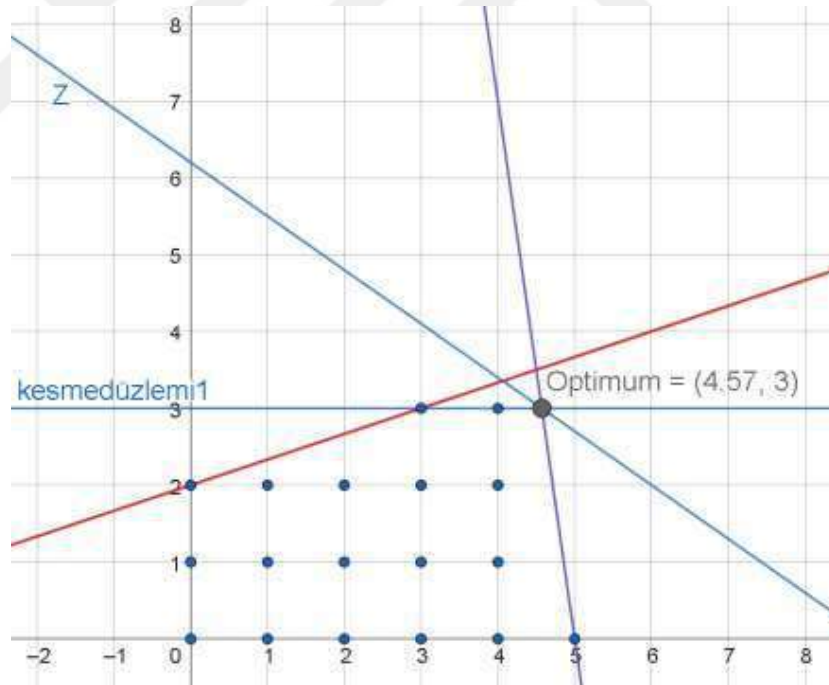
Kısıtlar:

$$- X_1 + 3 X_2 \leq 6$$

$$7 X_1 + X_2 \leq 35$$

$$X_2 \leq 3 \text{ (kesme düzlemi 1)}$$

$$X_1, X_2 \geq 0 \text{ \& } \in Z^+$$



Şekil 3.4: Dallandır kes örnek problem 2.adım.

Bir sonraki aşamada eklenen 2. Kesme düzleminin denklemi $3 X_1 + X_2 \leq 15$ olarak belirlenmiştir. Bu kesme düzleminin de eklenmesi ile problem aşağıda paylaşıldığı halini almıştır. Bu problemin çözülmesi sonucu hedef fonksiyonun değeri 58 olarak bulunmuştur. Karar değişkenlerinin değerleri ise $X_1 = 4$, $X_2 = 3$ olarak belirlenmiştir.

Eklenen kesme düzlemleri sonrası problemin grafik çözümünün son hali Şekil 3.5’de paylaşıldığı halini almıştır.

Hedef fonksiyon:

$$\text{Maks } 7 X_1 + 10 X_2$$

Kısıtlar:

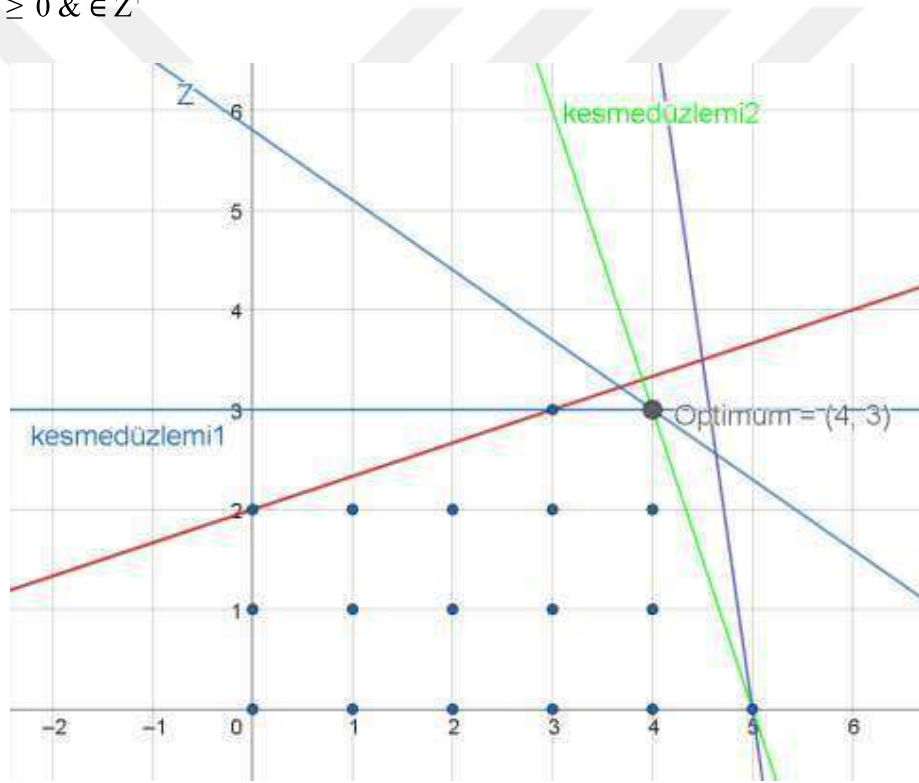
$$- X_1 + 3 X_2 \leq 6$$

$$7 X_1 + X_2 \leq 35$$

$$X_2 \leq 3 \text{ (kesme düzlemi 1)}$$

$$3 X_1 + X_2 \leq 15 \text{ (kesme düzlemi 2)}$$

$$X_1, X_2 \geq 0 \text{ \& } \in \mathbb{Z}^+$$



Şekil 3.5: Dallandır kes örnek problem 3.adım.

Eklenmesi gereken kesme düzlemi sayısı karar değişkeni sayısından bağımsız olup kesme düzlemi eklenirken dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Eklenecek kesme düzlemi problemin tam sayılı çözüm alternatiflerinden hiçbirini çözüm kümesi dışında bırakmamalı
2. Eklenecek kesme düzlemi en az bir tam sayılı çözüm alternatifi üzerinden geçmelidir.

3.3 Değişken Sabitleme Yaklaşımı

Değişken sabitleme, belirli değişkenlerin değerlerini diğer değişkenlerle ilişkilerine göre 0 veya 1'e sabitleyerek tamsayı programlama modellerini çözmek için kullanılan bir yöntemdir. Tamsayı programlamada amaç, değişkenlerin bir kısmının veya tamamının tamsayı değerleri almasının gerekli olduğu belirli kısıtlamalara tabi bir doğrusal fonksiyonu optimize etmektir. Ancak tamsayılı programlama problemlerini çözmek hesaplama açısından zorlayıcı olabilir. Değişken sabitleme, diğer değişkenlerin değerlerine dayalı olarak belirli bir değerde sabitlenebilecek değişkenleri tanımlayarak sorunu basitleştirmek için kullanılabilir. Bu, sorunun boyutunu azaltır ve çözülmesini kolaylaştırabilir.

Aşağıdakileri içeren değişken sabitleme için farklı teknikler vardır:

Baskınlığa dayalı sabitleme: Bu teknik, diğer değişkenlerle ilişkilerine göre düzeltilebilecek değişkenleri tanımlamayı içerir. Örneğin, bir değişkeni 1'e sabitlemek her zaman daha iyi bir amaç değeri sağlıyorsa 1'e sabitlenebilir. Benzer şekilde bir değişkeni 0'a sabitlemek her zaman daha iyi bir amaç değerine yol açıyorsa 0'a sabitlenebilir.

Sınır bazlı sabitleme: Bu teknik, değişkenlerin üst ve alt sınırlarına göre sabitlenmesini içerir. Bir değişkenin üst sınırı 1'den küçükse 0'a sabitlenebilir. Bir değişkenin alt sınırı 0'dan büyükse 1'e sabitlenebilir. Bu teknikleri kullanarak değişkenlerin sabitlenmesi ile sorun basitleştirilebilir ve potansiyel olarak daha verimli bir şekilde çözülebilir. Ancak değişken sabitlemenin her zaman optimal çözümle sonuçlanmayabileceğini ve tamsayı programlamada sıklıkla diğer çözüm yöntemleriyle birlikte kullanıldığını unutmamak önemlidir.

Tamsayılı programlama modellerinin çözümünde değişken sabitleme kullanmanın bazı avantaj ve dezavantajları şunlardır:

Avantajlar:

Azaltılmış problem boyutu: Değişken sabitleme, dikkate alınması gereken değişkenlerin sayısını azaltarak sorunu basitleştirebilir, bu da daha hızlı hesaplama sürelerine yol açabilir

Geliştirilmiş çözüm kalitesi: Değişkenleri diğer değişkenlerle olan ilişkilerine göre sabitleyerek çözümün amaç değerini artırmak mümkündür. Bu potansiyel olarak daha iyi genel çözümlere yol açabilir.

Daha kolay problem formülasyonu: Değişkenlerin düzeltilmesi, modelin karmaşıklığını azaltarak problem formülasyonunu kolaylaştırabilir. Bu, sorunu anlamayı ve analiz etmeyi kolaylaştırabilir.

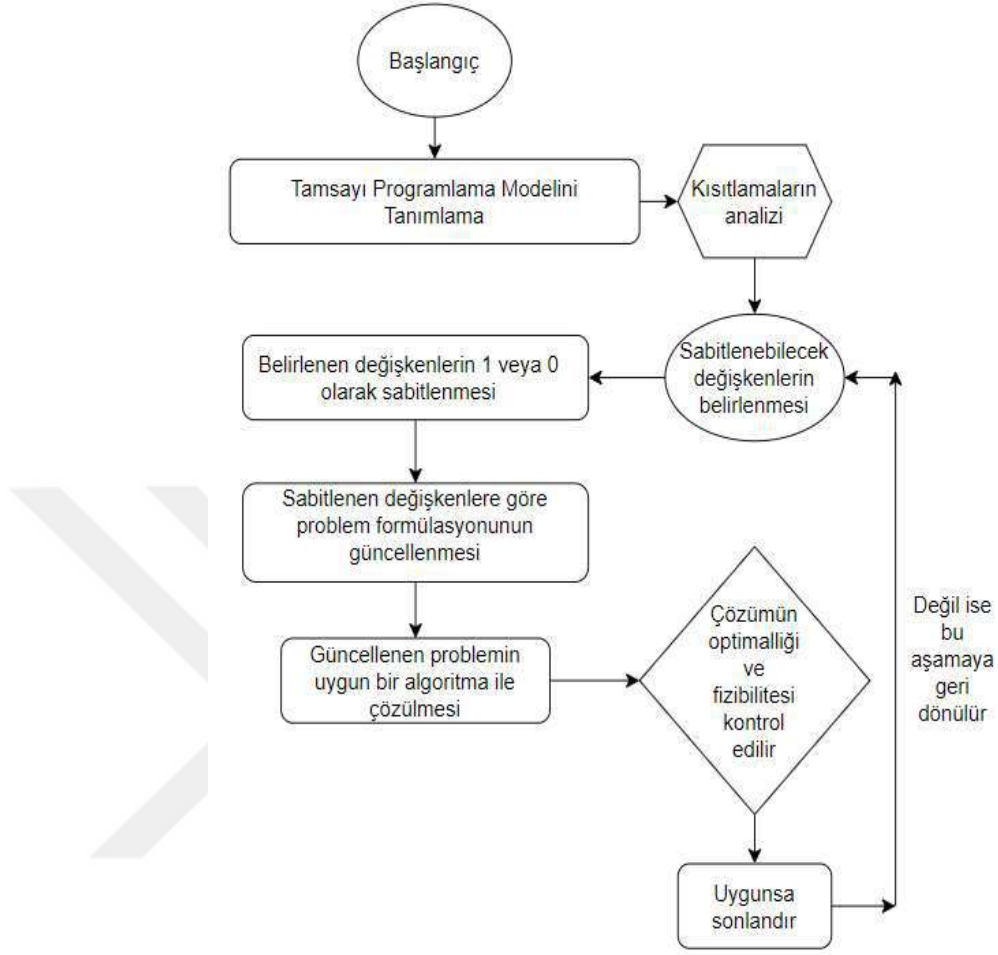
Dezavantajlar:

Esneklik kaybı: Değişkenlerin sabitlenmesi olası çözümlerin aralığını sınırlandırır ve bu da optimal olmayan çözümlerle sonuçlanabilir. Sabitlenmeden bırakılırsa daha iyi bir çözüme katkıda bulunabilecek değişkenleri düzeltmek mümkündür.

Uygulanamazlık riskinin artması: Sorunun kısıtlamaları dikkate alınmadan değişkenlerin düzeltilmesi, gerçekleştirilemez çözümlere yol açabilir. Değişkenleri düzeltmenin sorunun fizibilitesine etkisini dikkatlice analiz etmek önemlidir.

Sınırlı uygulanabilirlik: Değişken sabitleme, tüm tamsayı programlama modeli türleri için geçerli veya etkili olmayabilir. Etkinliği problemin spesifik özelliklerine ve değişkenler arasındaki ilişkilere bağlıdır.

Değişken sabitlemeyi kullanıp kullanmama kararının eldeki spesifik soruna bağlı olduğunu unutmamak önemlidir. Çözümün verimliliğini ve kalitesini artırmak için sıklıkla diğer teknikler ve çözüm yöntemleriyle birlikte kullanılır. Bu yöntemde izlenecek adımları gösteren akım şeması Şekil 3.6'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.6: Karar değişkeni sabitleme yönteminin genel akım şeması.

Tamsayılı programlama modellerinde değişken sabitlemenin kullanımını gösteren iki örnek aşağıda paylaşılmıştır.

Örnek 1: Üretim Planlama

Bir şirket için üretim planlamasını optimizasyonu sürecinde, üretilecek her ürünün miktarını temsil eden değişkenler bulunmaktadır. Talebi olmayan veya kârlı olmayan ürünlere karşılık gelen değişkenler sabitlenerek sorun basitleştirilebilir ve geri kalan ürünlerin üretimini optimize etmeye odaklanılabilir.

Örnek 2: Tesis Yeri

Bir tesis yeri probleminde, tesislerin konumunu temsil eden karar değişkenleri vardır. Coğrafi veya maliyet kısıtlamaları nedeniyle mümkün olmayan belirli konumlara

karşılık gelen değişkenler sabitleyerek problem boyutu azaltılabilir ve kalan uygun konumları optimize etmeye odaklanılabilir.

Bu örneklerin her birinde, problemi basitleştirmek ve dikkate alınması gereken değişken sayısını azaltmak için değişken sabitleme kullanılmıştır. Bu, daha hızlı hesaplama sürelerine ve potansiyel olarak iyileştirilmiş çözümlere yol açabilir. Ancak değişkenleri sabitlemenin çözümlerin fizibilitesi ve optimallliği üzerindeki etkisini dikkatli bir şekilde analiz etmek önemlidir. Yukarıda paylaşılan örneklerden anlaşılacağı üzere uzun vade üretim planlaması problemlerinde, bazı karar değişkenlerinin belli zamanlardaki değerlerinin önceden tahmin edilebilecek olması, büyük ölçekli problemlerin daha kolay çözülmesine yardımcı olabilmektedir. Bu kapsamda büyük ölçekli açık ocak işletmelerinin uzun vade üretim planlaması problemi çözülürken bu yaklaşımdan faydalanılabileceği düşünülmektedir. Yıllık üretim kapasitesi, zenginleştirme tesisinin kapasitesi, şev stabilitesi gibi kısıtlar sebebiyle maden yatağının bazı bölgelerinin üretimin belli zamanlarından önce kazılamayacağı bilgisinden faydalanarak, bu bölgeleri temsil eden bloklara ait karar değişkenlerinin önceden belirlenmesi sayesinde açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması probleminin karmaşıklığının azaltılabileceği ve çözülme performansının iyileştirilebileceği öngörülmektedir.

4. AÇIK İŞLETMELERDE ÜRETİM PLANLAMASI İÇİN ÖNERİLEN YENİ YÖNTEM

Açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlaması, değerli minerallerin uzun bir süre boyunca çıkarılmasını ve işlenmesi sürecini optimize etmeyi içeren karmaşık bir iştir. Tamsayılı Doğrusal Programlama (ILP), bu zorluğun üstesinden gelmek için kullanılabilecek güçlü bir matematiksel modelleme tekniğidir. Problemi, bir ILP olarak formüle ederek, üretimi en üst düzeye çıkarmak, maliyetleri en aza indirmek ve belirli kalite gerekliliklerini karşılamak gibi çeşitli kısıtlamaları ve hedefleri hesaba katarak madencilik operasyonlarının en uygun sırasını ve zamanlamasını belirlemek mümkün hale gelir. Bu yaklaşım, madencilik şirketlerinin bilinçli kararlar almasına ve kaynakların verimli kullanımına olanak tanıyarak sonuçta madencilik sektöründe karlılığın ve sürdürülebilirliğin artmasına yol açar. Tamsayılı Doğrusal Programlama (ILP), büyük ölçekli madenlerin üretim planlaması için güçlü bir teknik olmasına rağmen bazı dezavantajları da beraberinde getirir. En büyük dezavantajlardan biri, özellikle maden yatağını temsil eden blok sayılarının ve karar değişkenlerinin sayısının artmasıyla ortaya çıkan, ILP problemlerinin çözümüyle ilgili hesaplama karmaşıklığıdır. Sorun karmaşıklaştıkça çözüm süresi aşırı derecede uzayabilir, bu da makul bir zamanda sonuç almayı zorlaştırır hatta kimi zaman imkansız hale getirebilir. Açık ocak madenlerinin uzun vadeli üretim planlaması bağlamında değişken sabitleme metodolojisi, optimizasyon sürecinin verimliliğini ve doğruluğunu artırmak için değerli bir teknik olabilir. Bu metodoloji, belirli karar değişkenlerini ön bilgi veya kısıtlamalara dayalı olarak önceden belirlenmiş değerlere sabitlemeyi, problemin boyutunu azaltmayı ve hesaplama karmaşıklığını basitleştirmeyi amaçlar. Değişkenleri sabitleyerek ILP modeli daha kolay çözülebilir hale gelir ve daha hızlı çözüm sürelerine ulaşmanın mümkün olmasının yanı sıra, daha büyük problem modellerinin çözülebilmesine de olanak tanır. Ek olarak değişkenlerin sabitlenmesi, operasyonel kısıtlamalar veya pazar talepleri gibi pratik hususların planlama sürecine dahil edilmesine yardımcı olabilir. Bu metodoloji, ILP ile birleştirildiğinde, açık ocak

madenlerinde uzun vadeli üretim planlamasının zorluklarının üstesinden gelmek için güçlü bir yaklaşım sunarak daha sağlam ve pratik çözümler elde edilmesine fırsat sağlayabilir.

Bu kapsamda, yuvalanmış açık ocaklar yöntemi, optimizasyon sürecini iyileştirmek için değişken sabitleme prosedürünün bir yöntemi olarak kullanılabilir. İç içe ocak yöntemi, madeni, her biri madencilik işleminin belirli bir zaman dilimini veya aşamasını temsil eden iç içe geçmiş ocaklara veya aşamalara bölmeye yardımcı olur. Madencilik sırası veya üretim oranları gibi iç içe geçmiş her bir ocaktaki değişkenlerin sabitlenmesiyle optimizasyon problemi daha küçük alt problemlere ayrıştırılabilir, hesaplama karmaşıklığı azaltılabilir ve çözüm sürecinin verimliliği artırılabilir. Bu yaklaşım, değişen cevher tenörleri, piyasa koşulları ve gelişen operasyonel kısıtlamalar gibi faktörleri dikkate alarak madencilik operasyonunun daha ayrıntılı ve gerçekçi modellenmesine olanak tanır. Madencilik şirketleri, ILP ile birlikte değişken sabitleme prosedürünün bir parçası olarak iç içe ocak yöntemini kullanarak daha doğru ve sağlam uzun vadeli üretim planlamaları elde edebilir. Açık ocak madenciliği ortamının dinamik doğasını göz önünde bulundurarak minerallerin çıkarılması ve işlenmesi sürecinde elde edilecek gelirlerin maksimize edilebilmesinin yanı sıra, güncel piyasa koşullarına göre değişen ekonomik değerlere göre optimizasyon süreci kısa sürede güncellenebilir. Açık ocak madenlerinde uzun ve orta vadeli üretim planlaması problemini çözmek için tamsayılı modellerin uygulanması, özellikle büyük ölçekli maden yataklarıyla uğraşırken bir çözüm bulunamaması veya bir çözüm bulmak için gereken uzun süre gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Önerilen yöntem, UVÜP probleminin ILP modelinin karar değişkenlerini stratejik olarak sabitleyerek, problemin çözüm uzayını daraltarak optimum veya optimuma yakın çözümlere daha kısa sürede ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda karar değişkenlerini sabitlemek için kullanılan karar süreci, nihai çukur limitinin parametrik analizi ile oluşturulan iç içe çukurlara dayanmaktadır.

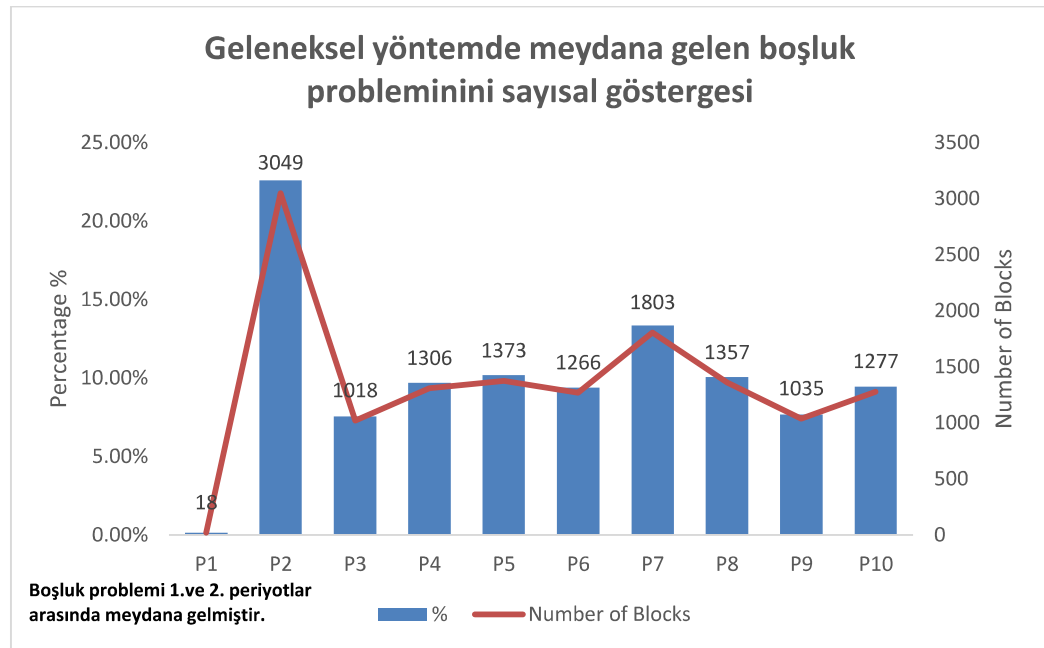
Geleneksel yaklaşım, bir maden yatağının ekonomik blok modelini grafik teorisine dayalı bir ağ olarak temsil etmeyi içerir. Daha sonra bu ağ, en yüksek geliri sağlayan üretim hacmine karşılık gelen nihai ocak limitini bulmak için maksimum akış algoritmaları kullanılarak analize tabi tutulur.

Bir sonraki aşama, nihai ocak sınırı dahilindeki blokların maksimum akış analizine tabi tutulmasını içerir. Bu analiz, ekonomik değerlerinin Gelir Ayarlama Faktörü'ne (RAF) dayalı olarak yeniden hesaplanmasını gerektirir ve bu da giderek daha küçük

açık ocak sınırlarının oluşmasına neden olur. Yukarıda belirtilen sınırlara genellikle iç içe geçmiş çukurlar denir. Bu prosedürde, RAF'ın seçimi, 80 iç içe çukur limiti için yaklaşık bir hesaplama oluşturmak amacıyla, genellikle 0,2 ile 1 aralığında olmak üzere, RAF'ın 0,01 oranında arttırılması şeklinde uygulanır.

Daha sonra cevher ve atık malzeme miktarı, değerli madenin tenörü ve bu iç içe geçmiş ocakların kazılması sonucu ortaya çıkan ekonomik değerin hesaplanması yapılır. Bu hesaplamanın ardından yıllık üretim kapasitesini sağlayan açık ocak limitleri uzun vadeli üretim planını temsil edecek şekilde seçilerek açık ocak üretim planlama probleminde bir çözüm elde edilmesi hedeflenmektedir.

Bu yöntemle ilgili önemli bir sorun, gelir ayarlama faktörüne göre belirlenen açık ocak limitlerindeki önemli değişikliklerle ilgilidir. Belirli bir eşiğe ulaşıldığında bu sınırların boyutları hızla değişir. Sonuç olarak, birbirini takip eden iki limit arasında mevcut olan malzeme miktarı genellikle yıllık üretim kapasitesini önemli miktarda aşmaktadır. Akademik literatürde bu durum boşluk problemi olarak bilinmektedir. Şekil 4.1 'de gösterilen histogram, parametrik analizle elde edilen minimum nihai ocak limitinin 18 blok olduğunu ve buna en yakın ikinci en büyük ocağın ise 3049 blok içerdiğini göstermektedir. Boşluk problemi, geleneksel planlama yöntemi kullanılırken başlangıç dönemi için seçilebilecek uygun bir ocak sınırının bulunmamasını ifade etmektedir.



Şekil 4.1: Boşluk probleminin ifade edilmesi için kullanılan histogram.

Açık işletmelerde UVÜP probleminin genel Tamsayı Programlama modeli

N adet blok içeren bir nihai ocak sınırı içerisinde, T periyotta yapılması planlanan üretim planlamasına ait genel olarak kullanılabilecek bir karışık tam sayı modeli aşağıda paylaşılmıştır. i bloğunun t periyodunda üretilmesi sonucu elde edilecek ve indirgenme oranına göre güncellenmiş getiri miktarı c_i^t ile gösterilmiştir. r indirgenme oranını temsil etmekte ve A kümesi cevher tonajı, atık malzeme tonajı gibi büyüklükleri ifade eden bir kümeyi belirtmektedir. Her i bloğunun, A kümesine ait bir q_i^a değeri bulunmakta ve u_i^t değişkeni bu değerler toplamının t periyodu için üst sınırını göstermektedir. Ayrıca her blok için kendisinden önce kazılması gereken blokları içeren bir S_i bloklar kümesinin de üretim planlaması sırasında hesaba katılması gerekmektedir; bkz. Şekil. 2.26.

Hedef Fonksiyon:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_i^t (x_i^t - x_i^{t-1}) / (1 + r)^t \quad (4.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^N q_i^a (x_i^t - x_i^{t-1}) \leq u_i^t \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T, \quad a \in A \quad (4.2)$$

$$x_i^{t-1} \leq x_i^t \quad t = 1, \dots, T \quad (4.3)$$

$$x_i^t \leq x_i^j \quad t = 1, \dots, T, \quad i = 1, \dots, N, \quad j \in S_i \quad (4.4)$$

$$x_i^0 = 0 \quad (4.5)$$

$$x_i^t \in \{0,1\} \quad t = 1, \dots, T, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.6)$$

Eşitlik (4.1) amaç fonksiyonudur ve madencilik işleminin net bugünkü değerini maksimize etmeye çalışır. Eq. (4.2) kapasite kısıtlamalarını ifade etmektedir. Örneğin, a parametresinin i bloğu içerisindeki cevher tonajı olduğu durumda $\sum_{i=1}^N q_i^a (x_i^t - x_i^{t-1})$ ifadesi t periyodu içerisinde kazılan toplam cevher miktarını ifade etmekte ve u_i^t ifadesi de bu miktarın üst sınırını ifade etmektedir. Eşitlik (4.3)'te paylaşılan kısıt her bloğun bir kez kazılması ve kazılmış olarak kalması gerektiği kuralını uygular, burada eğer i bloğunun $t-1$ periyodunda kazılma durumunu ifade eden x_i^{t-1} değişkeninin 1 olması halinde, bundan sonraki periyodlar için x_i^t değişkeninin 1 olması

gerektiği ifade edilmektedir. Son olarak öncelik kısıtlamaları eşitlik (4.4) tarafından uygulanır. Eşitlik (4.5)'te yer alan $x_i^0 = 0$ ifadesi nihai sınırlar içinde kalan blokların üretim planlamasının başlangıcında kazılmamış olduğunu ifade etmektedir, bir diğer deyişle eşitlik (4.3)'te yer alan x_i^{t-1} değişkeninin problemin başlangıç durumundaki değerlerinin 0 olması gerektiği yani planlama süreci başında nihai ocak sınırı içindeki hiçbir bloğun kazılmamış olduğu ifade edilmektedir. Modelin karar değişkenleri ikili olduğundan, i bloğu t periyodunda çıkarılırsa 1, aksi takdirde 0 olabilirler ve bu kısıtlama da eşitlik (4.6)'da ifade edilmiştir. Açık ocak işletmelerinde UVÜP probleminin böylesine temel bir formülasyonu $N \times T$ adet ikili (0,1) değişkeni içermektedir.

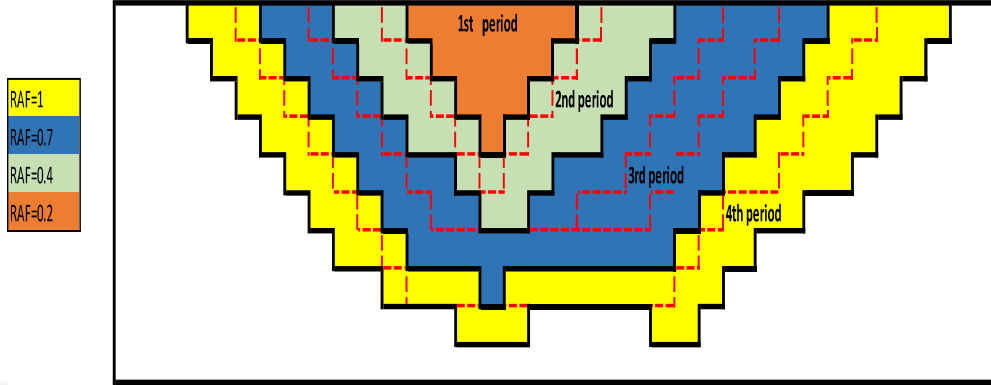
Bu çalışma, yukarıda bahsedilen sorunların etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmak için bir seçenek olarak iç içe çukurlar metodolojisini karışık tam sayı programlama ile birleştiren hibrit bir çözüm önermektedir. Önerilen algoritmanın amacı, parametrik analiz yoluyla oluşturulan iç içe geçmiş çukur limitlerini kullanarak karışık tamsayı programlama (ILP) modelinin karar değişkenlerini sabitlemektir. Bu yaklaşım, problemin model karmaşıklığını azaltarak büyük ölçekli modellerin çözülebilmesine veya çözülmesi uzun süren orta ölçekli modellerin daha kısa sürede çözülebilmesine imkan sağlamaktadır.

Aşağıda, önerilen algoritmanın aşamaları özetlenmektedir.

4.1 Açık Ocak İşletmelerinde Uzun Vade Üretim Planlaması İçin Önerilen Algoritmanın Aşamaları

1. Nihai çukurun limitini belirlemek için Hochbaum'un pseudoflow algoritmasının kullanılması

- Şekil 4.2'deki en dıştaki ocak kabuğu ($RAF = 1$ ile elde edilen, en dıştaki ocak sınırı içindeki tüm bloklar)
- RAF güncellemesi ile nihai ocak sınırları içerisinde yer alan bloklar üzerinde parametrik analiz yapılması yardımıyla iç içe ocakların oluşturulması (Şekil 4.2)



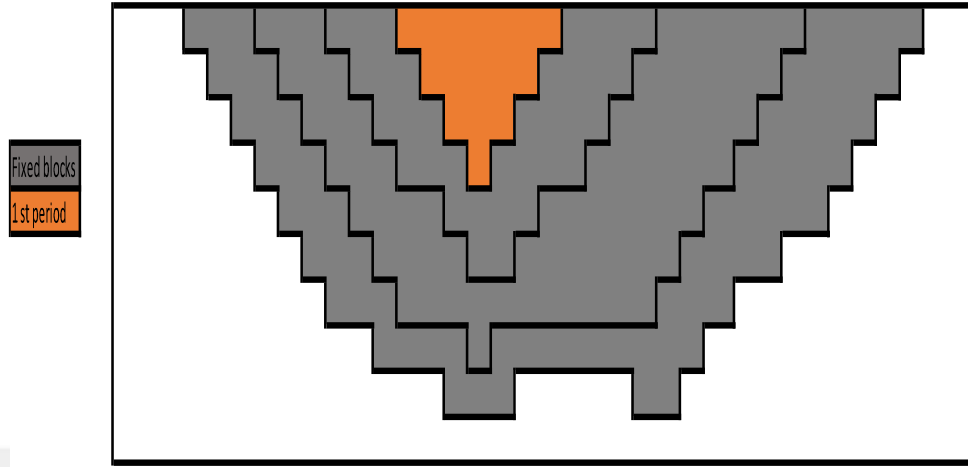
Şekil 4.2: Örnek iç içe ocakların 2 boyutlu kesiti (periyotlar için aday çukur kabukları ile birlikte).

2. İç içe geçmiş ocaklardaki malzeme miktarlarının hesaplanması ve ayrıca amaçlanan yıllık üretim kapasitesini karşılayabilecek potansiyel ocak kabuklarının belirlenmesi. (Şekil 4.2)

- En içteki ocak limiti, ilk periyot için aday ocak kabuğudur. (RAF=0,2 ile elde edilen turuncu bloklar)
- Üçüncü ocak sınırı, ikinci periyot için aday ocak kabuğudur. (RAF=0,4 ile elde edilen yeşil bloklar)

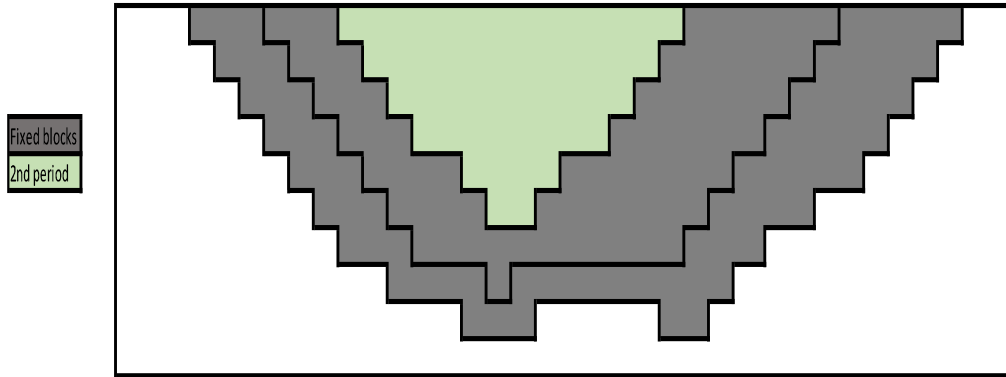
3. Her periyot için, o döneme aday olarak belirlenen iç içe ocak kabuğu sınırları dışında yer alan blokların karar değişkenleri sabitlenir (Şekil 4.3 & Şekil 4.4).

- Örneğin $T=4$ periyotları için gri blokların X_{i1} değişkenleri 0 olarak sabitlenmiştir, çünkü turuncu bloklar 1. periyot için aday ocak kabuğunu temsil etmekte ve kendi içerisinde yeterli miktarda cevher ile en yüksek geliri sağlamaktadır (Şekil 4.3)



Şekil 4.3: 1. periyot için değişken sabitleme örneği.

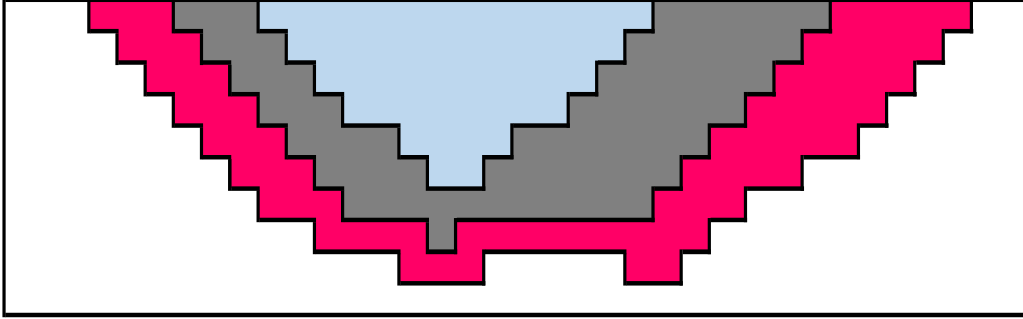
- Başka bir örnek Şekil 4.4'de görülmektedir. Gri blokların X_{12} değişkenleri 0 olarak sabitlenmiştir, dolayısıyla üretimin ikinci döneminde çıkarılacak bloklar yeşil limit içerisinde kalan bloklar arasında aranacaktır. Bu bloklar işleme kapasitesine yetecek kadar cevher bulundurmakta ve en yüksek net bugünkü değere sahip blok kümesinden oluşmaktadır.



Şekil 4.4: 2. Periyot için değişken sabitleme örneği.

4. Aday kabuk içerisinde istenenden fazla miktarda cevher olması durumunda uygulanan bir diğer değişken sabitleme süreci şu şekilde uygulanmaktadır. Eğer aday bir kabuk içerisinde yıllık üretim kapasitesinden fazla miktarda cevher var ise bu blokların sonraki dönem içerisinde üretilmelerini ifade eden değişkenleri 1 olarak

sabitlenir. Bir diğer deyişle $T=4$ periyodu için aday gösterilen kabuk içerisindeki blokları gösteren pembe blokların (Şekil 4.5) x_{is} değişkenleri 1 olarak sabitlenebilir. Çünkü bu blokların 5. periyodun sonunda üretilmiş olmaları beklenmektedir.

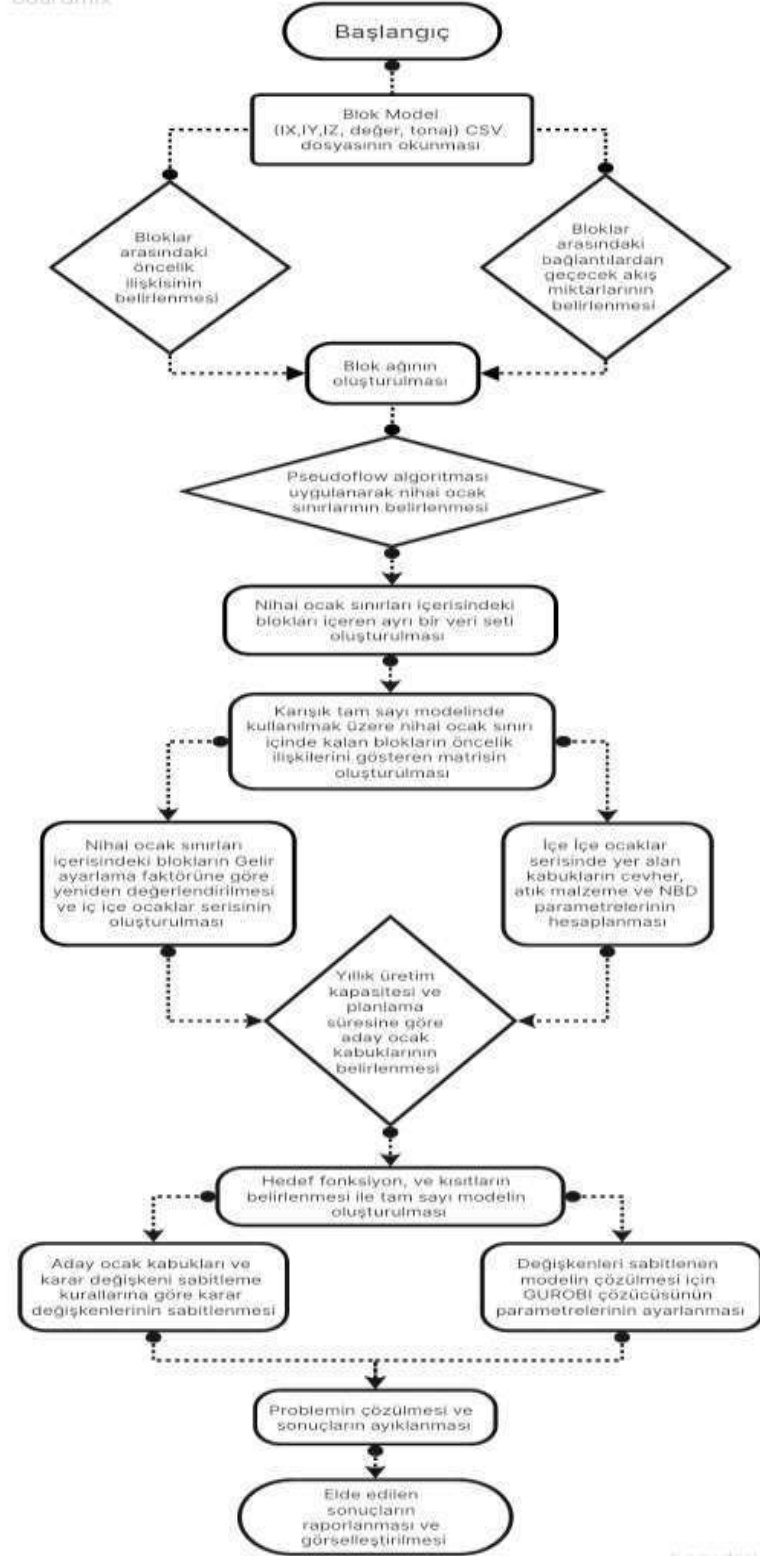


Şekil 4.5: Cevher bolluğu (pembe bloklar) ve cevher yetersizliği (mavi bloklar) durumlarında değişken sabitleme.

5. Değişkenlerin sabitlenmesine yönelik son süreç şu şekilde uygulanır: Aday kabuktaki cevher miktarı, cevher üretim kapasitesinden azsa, o kabuk içindeki tüm bloklar için karar değişkeni, bu bloklar bu süre içinde kazılabileceğinden 1 olarak sabitlenir. Şekil 4.4’ de yer alan mavi bloklar 2. periyot için yeteri kadar cevher içermemesi durumunda sabitlenecek blokları göstermektedir. Aday kabuklar seçilirken ihtiyaç duyulandan fazla miktarda cevher içeren, en az cevher içerikli ocak kabuğunun seçilmesi hedeflendiğinden bu durumla fazla karşılaşılmasa da cevher yatağının tipine göre elde edilebilecek iç içe ocaklar serisinin farklı alternatiflerinden biri olduğu için hesaba katılmaktadır.

6. Önerilen Yöntemin son adımı ise karar değişkenlerinin sabitlenmesiyle elde edilen küçültülmüş boyutta problemin çözülmesi aşamasını içermektedir.

Önerilen yöntemin uygulanabilmesi amacıyla bir bilgisayar programı oluşturulmuş olup programın algoritmayı uygularken takip ettiği adımlar Şekil 4.6’da paylaşılmıştır.

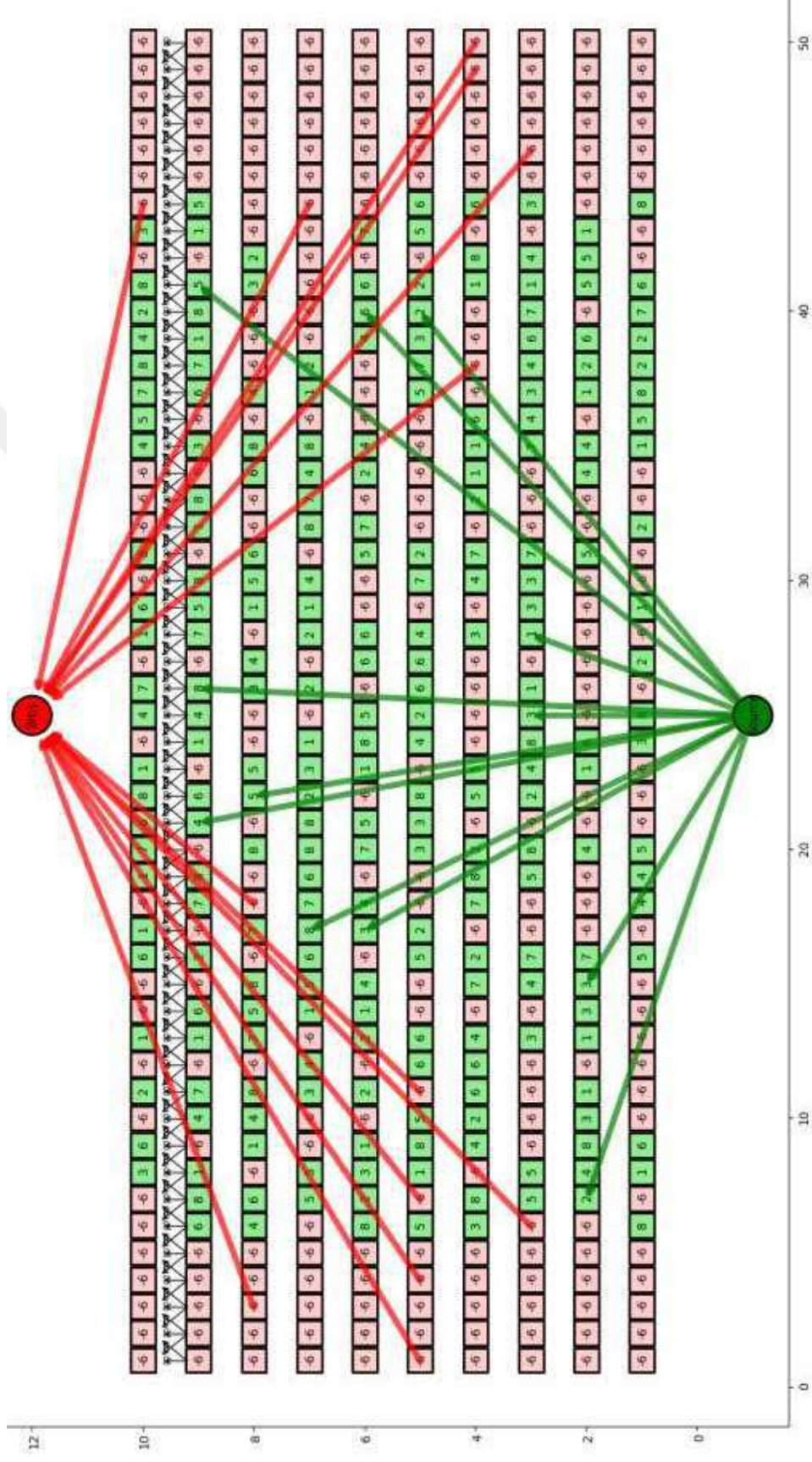


Şekil 4.6: Önerilen yöntemin uygulama adımlarının akım şeması.

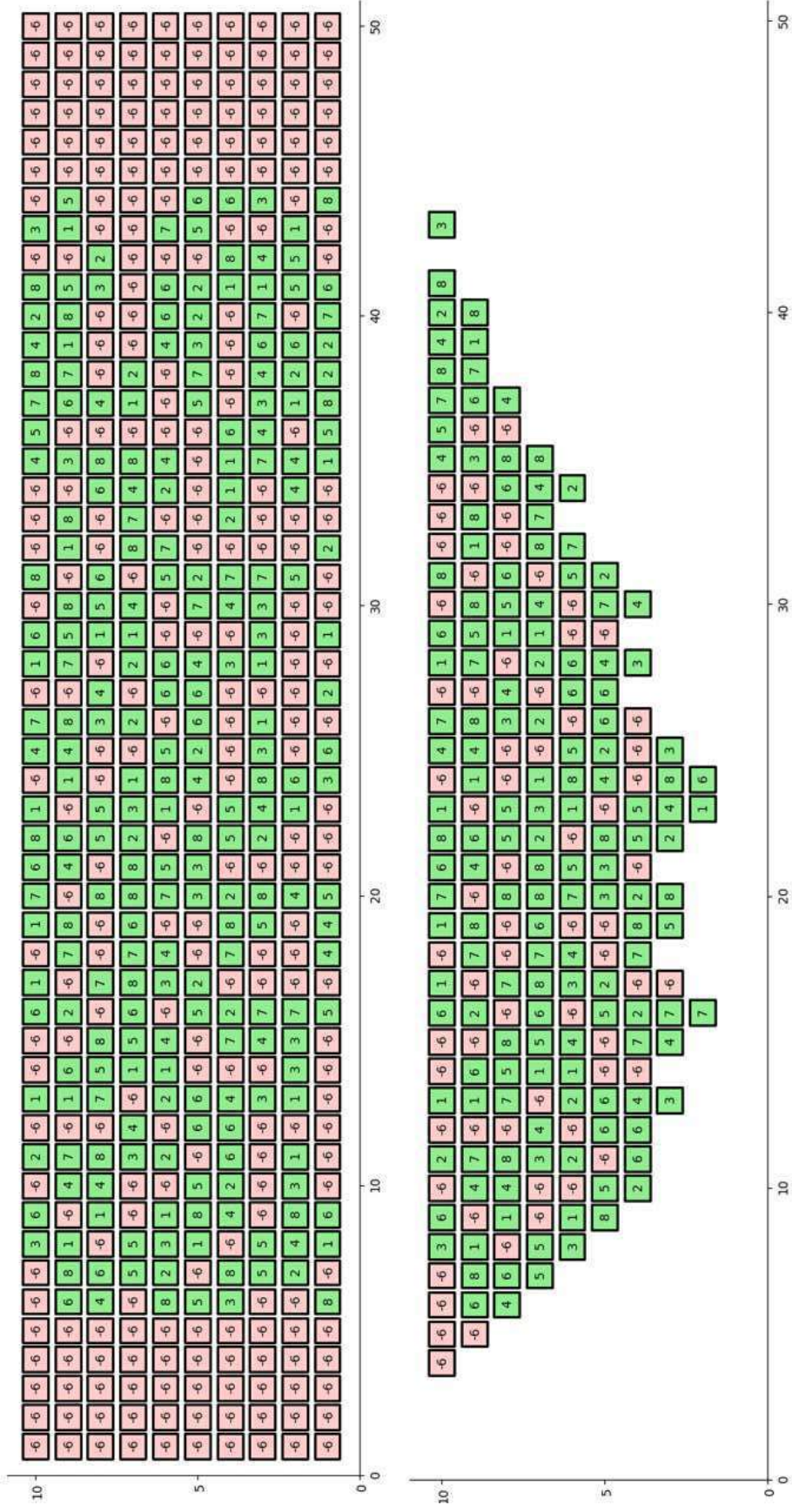
4.2 Önerilen Yöntemin 2 Boyutlu Bir Maden Ocağına Uygulama Örneği

Önerilen yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla yukarıda paylaşılan adımlar 2 boyutlu bir maden yatağı üzerinde uygulamalı olarak gösterilmiştir. Bu amaçla kullanılan 2 boyutlu blok model x yönünde 50, y yönünde ise 10 bloktan olmak üzere toplamda 500 adet bloktan oluşmaktadır. Pozitif değerli cevher blokları yeşil, negatif değerli atık blokları ise kırmızı renkle renklendirilmiş ve blokların kazılması sonucu elde edilecek blok değerleri blokların üzerinde gösterilmiştir. Blok değerleri -6 ile +8 arasında değişkenlik göstermektedir. Blokların tonaj değerleri 1 birim ve şev açıları 45 derece olacak şekilde üretim planlaması yapılması hedeflenmektedir. Planlama yapılacak periyot sayısı 6 periyot olarak belirlenmiş ve periyot başına 30 birim ton üretim kapasite kısıtı uygulanmıştır.

Önerilen yöntemin ilk aşamasında nihai ocak sınırının bulunması gerekmektedir ve bunun için pseudoflow algoritmasından faydalanılmıştır. Bu algoritmanın kullanılabilmesi için 2 boyutlu blok model bir network diagram olarak ifade edilmiştir. Ağ diagramı oluşturulurken, öncelik kısıtlarının ifade edilebilmesi için sonsuz kapasiteli arklardan faydalanılmaktadır. Şekil 4.7’de paylaşılan blok ağında bir kısmı yer alan siyah renkli sonsuz kapasiteli bağlantılar her bloğun kazılabilmesi için üzerlerinde bulunan 3 bloğun kazılmış olması gerektiğini ifade etmektedir. Ocak ağının oluşturulması işlemi için bir sonraki aşama kaynak bloğu ile pozitif değerli cevher blokları arasına kapasiteleri cevher bloklarının değerleri kadar olan arkların yerleştirilmesi işlemidir. Şekil 4.7’de bir bölümü görülen yeşil renkli bağlantılar, blok model içerisinde yer alan bütün cevher blokları ve kaynak düğümü arasına yerleştirilmelidir. Ocak ağı oluşturulurken uygulanması gereken son adım atık blokları ve bitiş düğüm noktası arasına kapasitesi atık blokların değerlerinin mutlak değerleri kadar olan arkların yerleştirilmesi işlemidir. Şekil 4.7’de bir bölümü görülen kırmızı renkli bağlantılar, blok model içerisinde yer alan bütün atık blokları ve bitiş düğümü arasına yerleştirilmelidir. Şekil 4.7’de yer alan ağ diagram üzerinde pseudoflow algoritmasının uygulanması ile nihai ocak sınırları belirlenmiş olup Şekil 4.8’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.7: 2 boyutlu blok model için oluşturulan ocak ağ diagramı (Bazı bağlantılar ile birlikte).



Şekil 4.8: 2 boyutlu blok modelin nihai ocak sınırları içinde kalan bloklar.

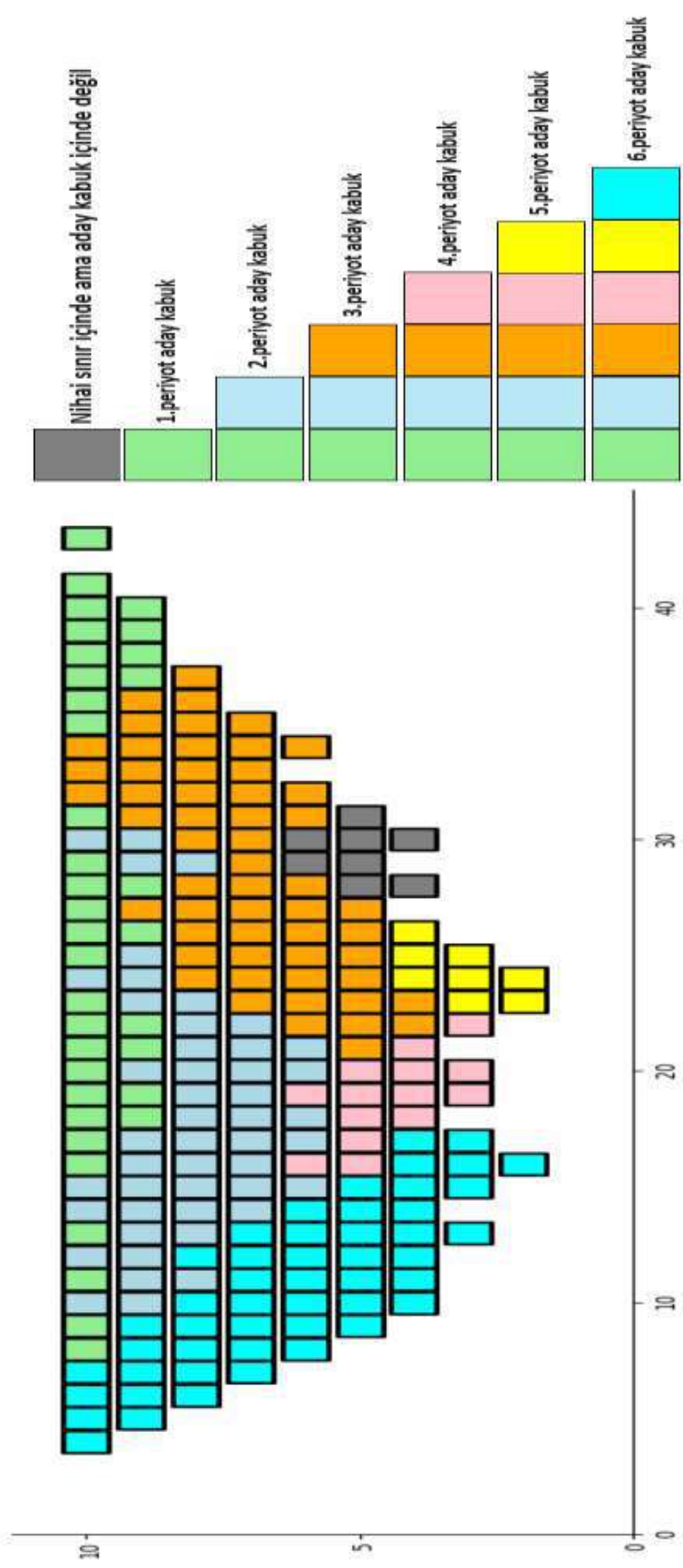
Sonraki adımda nihai ocak sınırı içerisinde kalan blokların gelir ayarlama faktörüne göre parametrisasyonu yapılarak iç içe ocak kabuklarının oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla bloklardan elde edilen gelirler bir gelir ayarlama faktörüne göre tekrar hesaplanarak yukarıda detayları paylaşılan nihai ocak sınırı bulma adımları tekrarlanmaktadır. Uygulamada gelir ayarlama faktörü (RAF) değerleri genellikle 0.2 ile 1 arasında seçilmekte ve 0.01 arttırılarak iç içe ocak kabukları oluşturulmaktadır. Bu aşamada elde edilen ocak kabukları ve içerdikleri blok sayıları Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1: Gelir ayarlama faktörüne göre elde edilen iç içe ocak sınırları içerisinde yer alan blok sayıları.

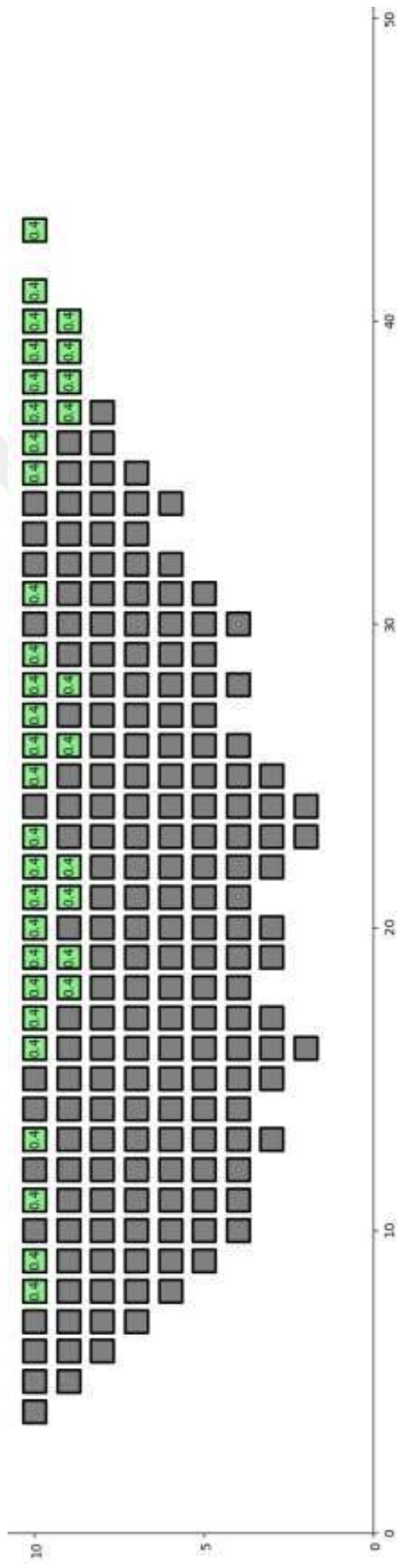
RAF	Blok sayısı	Aday olarak seçildiği periyot
1	217	-
0.95	217	-
0.9	209	6.periyot
0.85	160	5.periyot
0.8	152	4.periyot
0.75	152	-
0.7	138	3.periyot
0.65	83	-
0.6	83	2.periyot
0.55	40	-
0.5	40	-
0.45	40	-
0.4	36	1.periyot
0.35	30	
0.3	30	
0.2	30	

Önerilen yöntemin bir sonraki aşaması için iç içe ocak kabuklarından yıllık üretim kapasitesini karşılayabilecek kadar bloğa sahip olanları o periyot için aday olarak seçilmekte ve bu ocak kabuğu dışında kalan blokların karar değişkenleri ilgili periyot için 0 olarak sabitlenmektedir. Çizelge 4.1’de aday olarak seçilen kabukların toplu

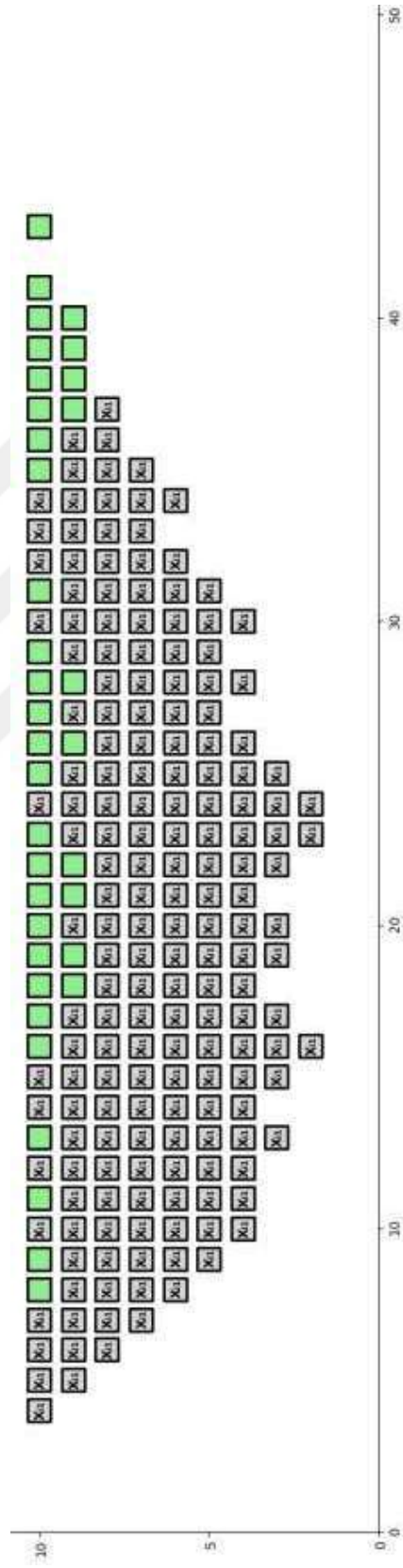
görünümü Şekil 4.9'te paylaşılmıştır. Çizelge 4.1'de yer alan ocak kabuklarından $RAF=0.4$ olanı ile elde edileni 36 adet blok içerdiğinden, üretim planlamasının 1.periyotu için aday olarak seçilmiştir. Buna göre yapılacak üretim planlamasının 1.periyotunda kazılacak bloklar bu sınır içerisinde kalan bloklar arasından aranacaktır. Şekil 4.10'de paylaşılan yeşil renkli bloklar bu ocak kabuğunun içinde yer alan blokları göstermektedir. Şekil 4.11'de yer alan gri bloklar ise bu ocak kabuğunun dışında yer alan blokların sabitlenmesi gereken karar değişkenlerini ifade etmektedir. Buna göre burada yer alan gri renkli blokların X_{i1} değerleri 0 olarak sabitlenmelidir. Bu adım her periyot için aday kabuklarının belirlenmesi ve bu kabuk dışında kalan blokların ilgili periyot için karar değişkenlerinin sabitlenmesi ile tamamlanmaktadır. 6 periyotta ve periyot başına 30 blok üretim sınırı ile yapılması öngörülen üretim planlaması için belirlenen aday ocak kabukları ve sabitlenen karar değişkenleri ile ilgili görseller Şekil 4.10 ile Şekil 4.21 arasında paylaşılmıştır.



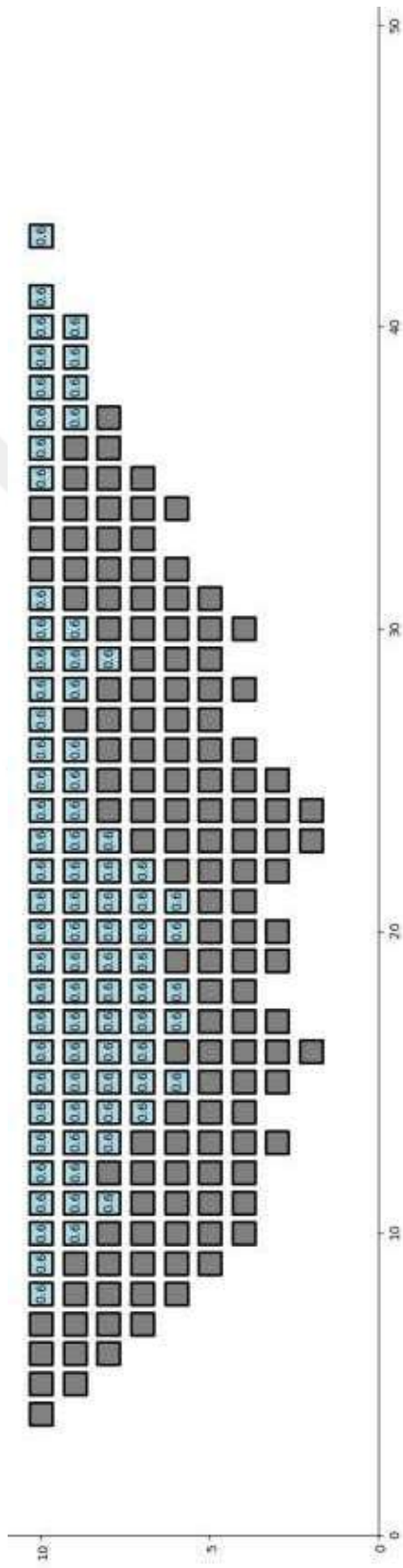
Şekil 4.9: Periyotlar için aday olarak belirlenen ocak kabuklarının toplu gösterimi.



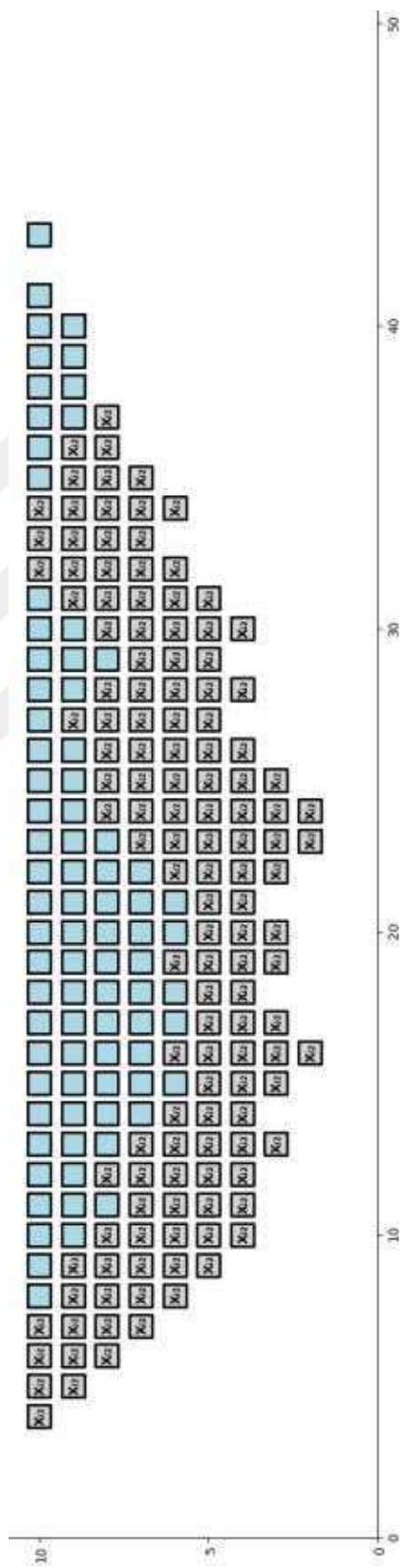
Şekil 4.10: $RAF=0.4$ ile elde edilen ve 1.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (yeşil).



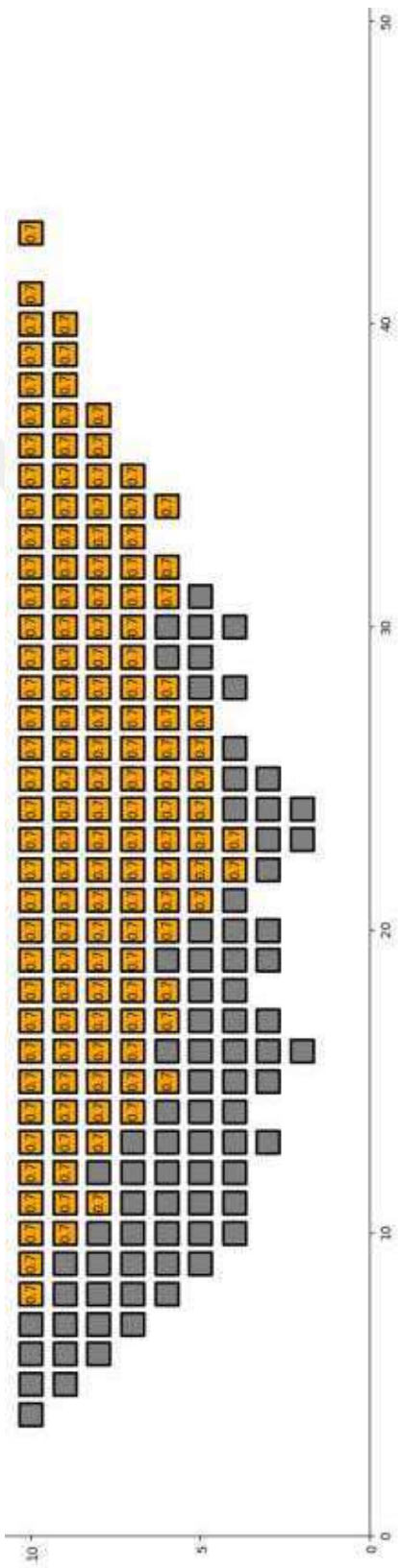
Şekil 4.11: 1 periyot için karar değişkenleri sabitlenen bloklar (gri).



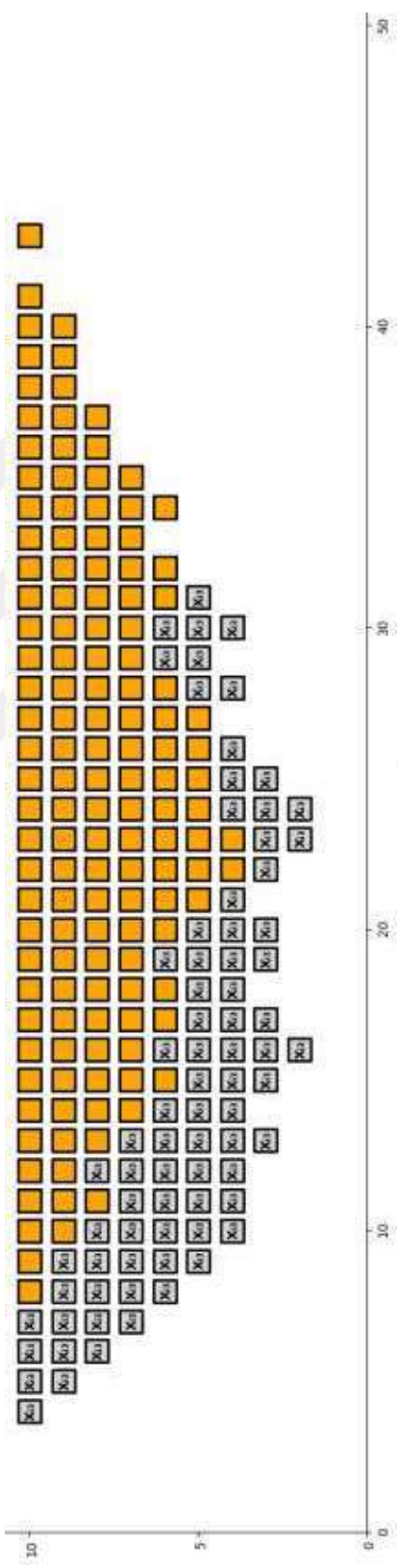
Şekil 4.12: $RAF=0.6$ ile elde edilen ve 2.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (mavi).



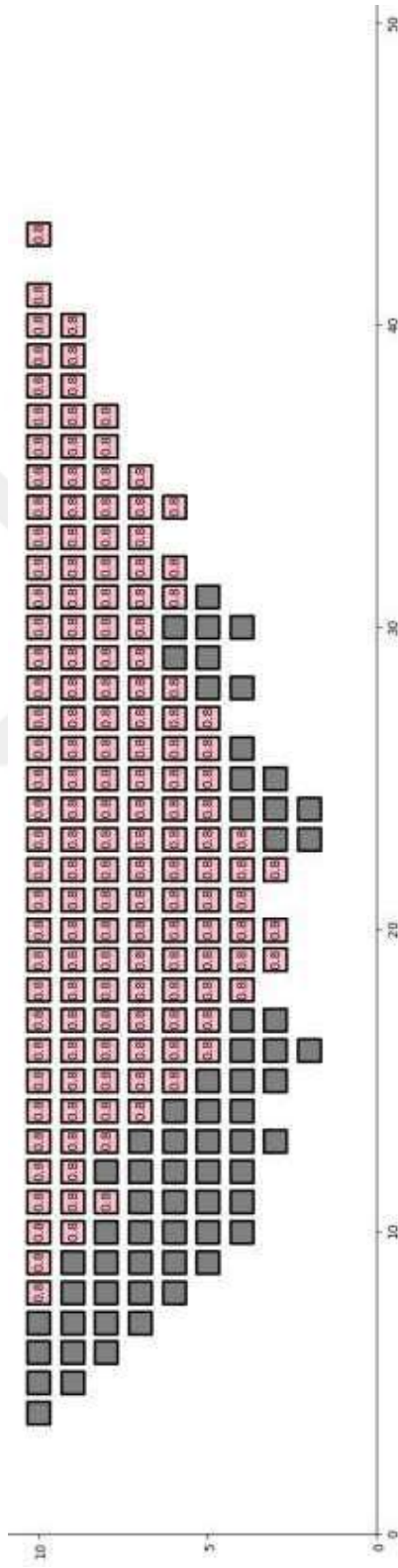
Şekil 4.13: 2 periyot için karar değişkenleri sabitlenen bloklar (gri).



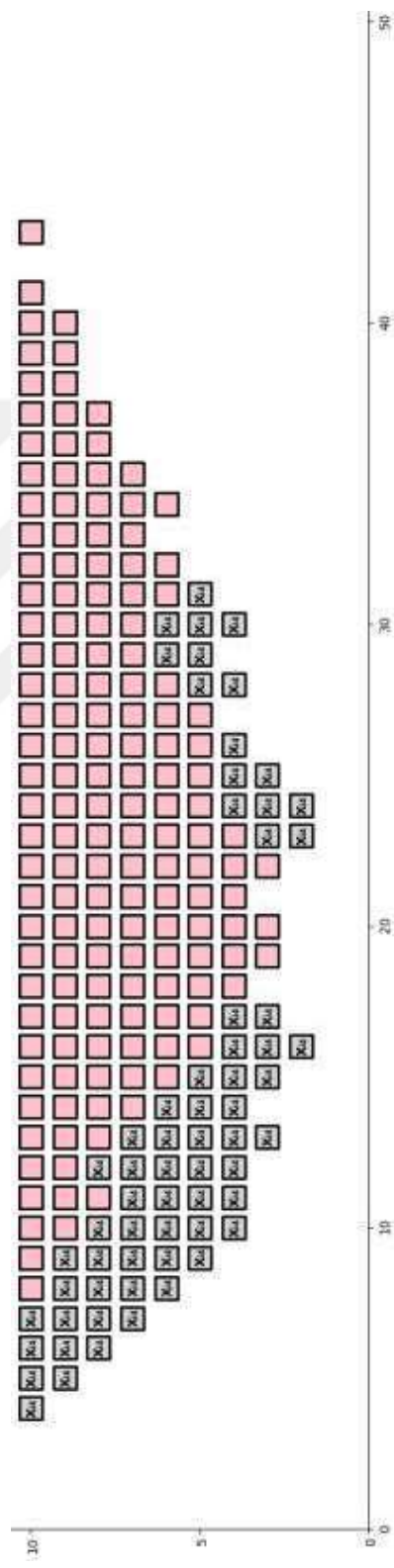
Şekil 4.14: RAF=0.7 ile elde edilen ve 3.periyot için aday ocak kabağını gösteren bloklar (turuncu).



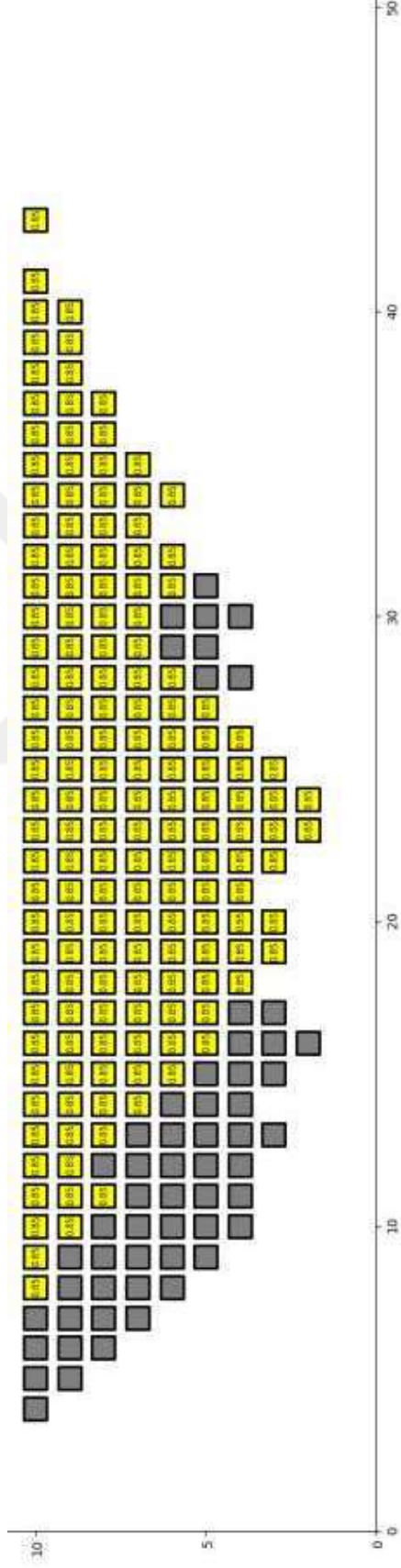
Şekil 4.15: 3 periyot için karar değişkenleri sabitlenen bloklar (gri).



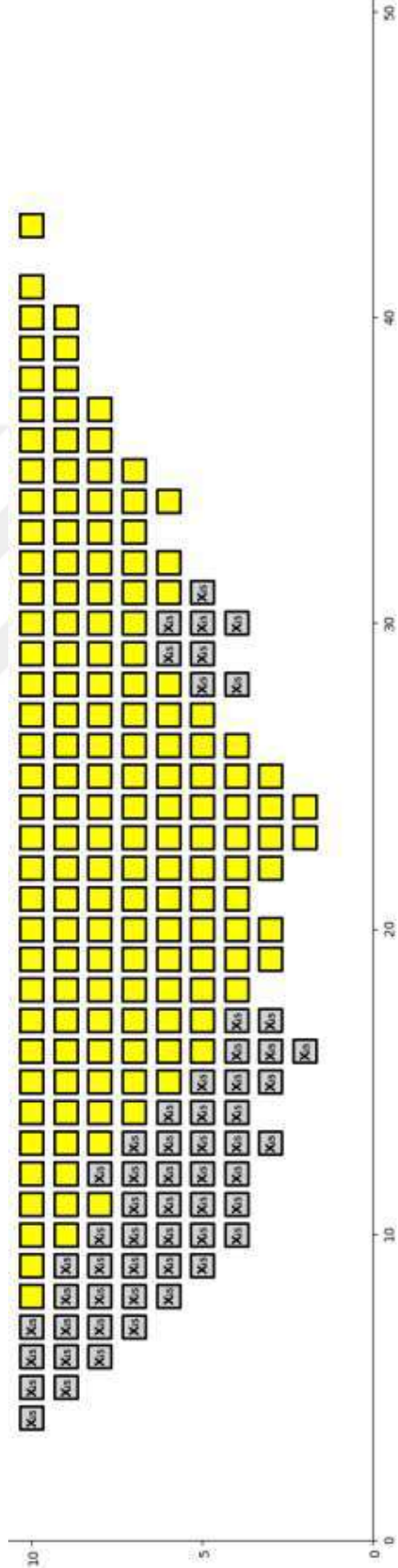
Şekil 4.16: RAF=0.8 ile elde edilen ve 4.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (pembe).



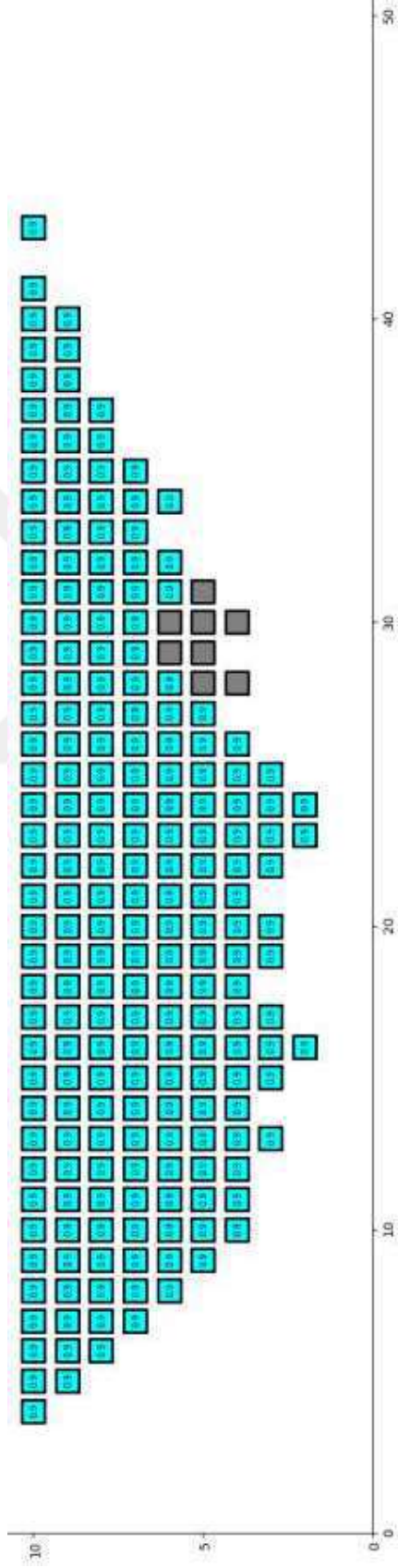
Şekil 4.17: 4. periyot için karar değişkenleri sabitlenen bloklar (gri).



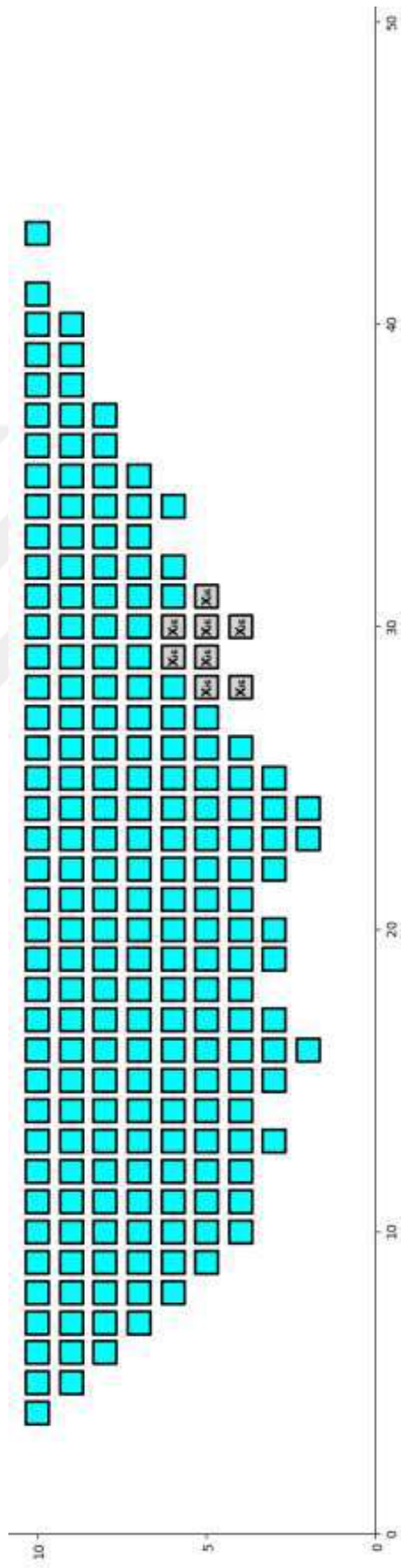
Şekil 4.18: $RAF=0.85$ ile elde edilen ve 5.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (sarı).



Şekil 4.19: 5. periyot için karar değişkenleri sabitlenen bloklar (gri).



Şekil 4.20: RAF=0.9 ile elde edilen ve 6.periyot için aday ocak kabuğunu gösteren bloklar (turkuaz)



Şekil 4.21: 6. periyot için karar değişkenleri sabitlenen bloklar (gri).

Yapılacak üretim planlaması için çözülmesi gereken tam sayılı model ve değişken tanımlamaları aşağıda paylaşılmıştır. Bu tam sayılı modelde 6 periyot ve 217 blok için belirlenmesi gereken 1302 adet karar değişkeni bulunmaktadır.

Değişken tanımlamaları:

x_i^t = i bloğu t periyodu içerisinde üretilcekse 1, aksi takdirde 0 değerini alan ikili karar değişkeni ($i : 1, \dots, 217$, $t : 0, \dots, 6$)

c_i^t = i bloğunun t periyodu içerisinde üretilmesiyle elde edilecek değer (Şekil 4.5'te yer alan blok kesitinde bloklar üzerinde paylaşılmıştır.

Ti = i bloğunun tonajı (Bu örnek için her blok 1 birim ağırlıkta olarak Kabul edilmiştir)

A = Bloklar arasındaki öncelik kısıtlarını gösteren matris

r = indirim oranı (%7 olarak uygulanmıştır)

Hedef Fonksiyon:

$$\max \sum_{t=0}^6 \sum_{i=1}^{217} c_i^t (x_i^t - x_i^{t-1}) / (1 + r)^t$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^N Ti(x_i^t - x_i^{t-1}) \leq 30 \quad i = 1, \dots, 217, \quad t = 0, \dots, 6$$

$$x_i^{t-1} \leq x_i^t \quad t = 1, \dots, T$$

$$x_i^t \leq x_i^j \quad t = 1, \dots, T, \quad i = 1, \dots, N, \quad j \in A_i$$

$$x_i^t \in \{0,1\} \quad t = 1, \dots, T, \quad i = 1, \dots, N$$

Bu model önce karar değişkenleri sabitlenmeden çözülmüş ve belirlenen üretim planlamasının net bugünkü değeri 265.5 birim olarak bulunmuştur. Problemin çözülmesi 12.26 saniye sürmüştür. Elde edilen üretim planlamasının kesit görünümü Şekil 4.23'de paylaşılmıştır.

Önerilen yönteme göre aynı modele;

1.periyot için Şekil 4.11'deki 181 gri bloğun karar değişkenlerini 0 olarak sabitlemek amacıyla $x_i^1 = 0$,

2.periyot için Şekil 4.13'deki 134 gri bloğun karar değişkenlerini 0 olarak sabitlemek amacıyla $x_i^2 = 0$,

3.periyot için Şekil 4.15'deki 79 gri bloğun karar değişkenlerini 0 olarak sabitlemek amacıyla $x_i^3 = 0$,

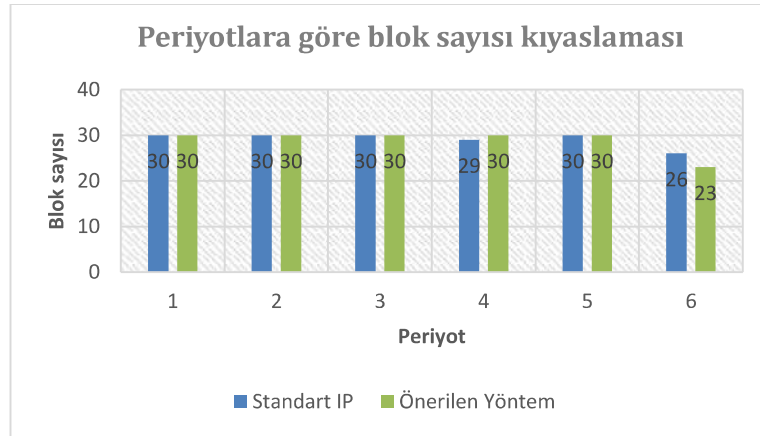
4.periyot için Şekil 4.17'deki 65 gri bloğun karar değişkenlerini 0 olarak sabitlemek amacıyla $x_i^4 = 0$,

5.periyot için Şekil 4.19'daki 57 gri bloğun karar değişkenlerini 0 olarak sabitlemek amacıyla $x_i^5 = 0$,

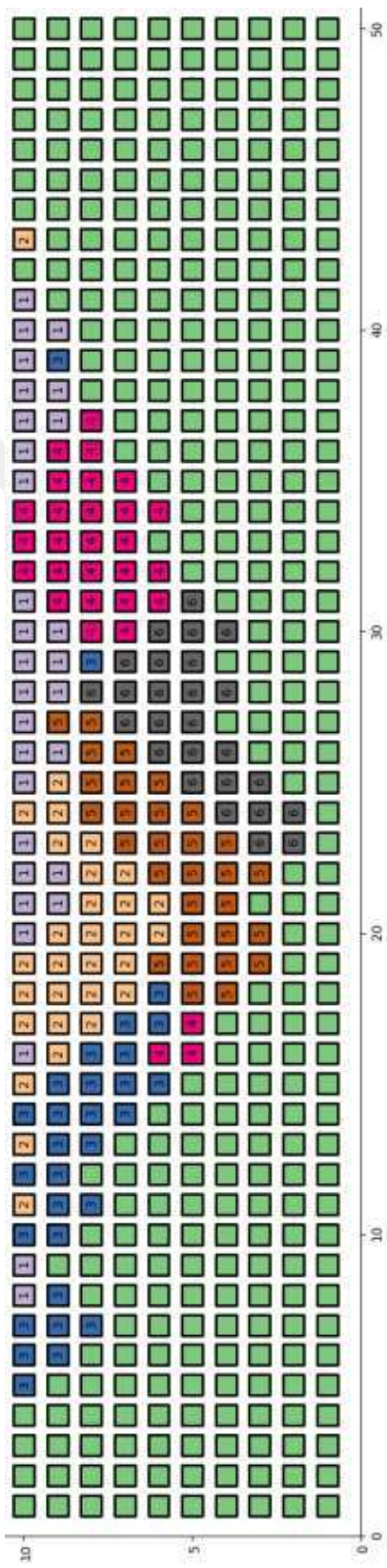
6.periyot için Şekil 4.21'deki 8 gri bloğun karar değişkenlerini 0 olarak sabitlemek amacıyla $x_i^6 = 0$,

kısıtları eklenmiş ve değeri belirlenmesi gereken karar değişkeni sayısı 1302'den 778'e düşürülmüştür. Elde edilen yeni model tekrar çözülerek üretim planlaması yapılmış ve belirlenen üretim planlamasının net bugünkü değeri 264 birim olarak bulunmuştur. Bu problemin çözülmesi ise 4.72 saniye sürmüştür. Elde edilen üretim planlamasının kesit görünümü ise Şekil 4.24'de paylaşılmıştır. 2 yöntem ile elde edilen sonuçta periyotlar içerisinde kazılan blok sayılarının karşılaştırılması Şekil 4.22'de paylaşılmıştır.

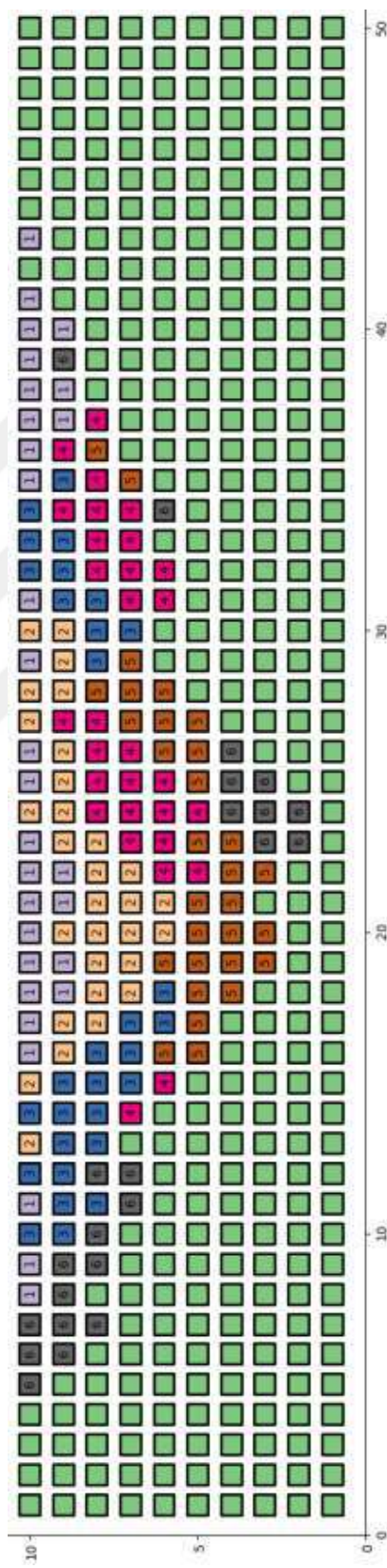
Yukarıda uygulama adımları paylaşılan yeni yöntem ile, açık ocak işletmelerinde uzun vade üretim planlaması yapılırken kullanılan tam sayı programlama modellerinin çözüm süresi açısından efektif bir şekilde çözülmesi sağlanmıştır. Sonuçlar kıyaslandığında, çözüm süresi açısından % 61.5'lik bir azalma sağlayan yeni yöntem net bugünkü değerin ise % 99.4 oranında korunmasını sağlamıştır. İlerleyen bölümlerde, gerçek maden yataklarını temsil eden değişik boyutlarda blok modeller kullanılarak önerilen yöntemin etkinliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.22: 2 boyutlu örnek problemin çözümünde yıllara göre blok sayısı kıyaslamaları



Şekil 4.23: Standart tam sayılı model ile elde edilen üretim planlamasının kesit görünümü.



Şekil 4.24: Önerilen yeni yöntem ile elde edilen üretim planlamasının kesit görünümü.

5. ÖNERİLEN YÖNTEMİN UYGULANDIĞI VERİ SETİ

Bir önceki bölümde detayları paylaşılan yöntemin etkinliğini göstermek amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılmakta olan bir blok model veri seti kullanılmıştır. Blok model setine “<https://mansci-web.uai.cl/minilib/Datasets.xhtml>” adresinden ulaşılabilmekte olup bu veri setine ait detaylar aşağıda paylaşılmıştır. Bu veri seti içerisinde 13 adet blok model bulunmakta olup, önerilen yöntem, bu veri seti içerisindeki küçük, orta ve büyük ölçekli maden yataklarına ait 6 adet veri setine uygulanmıştır.

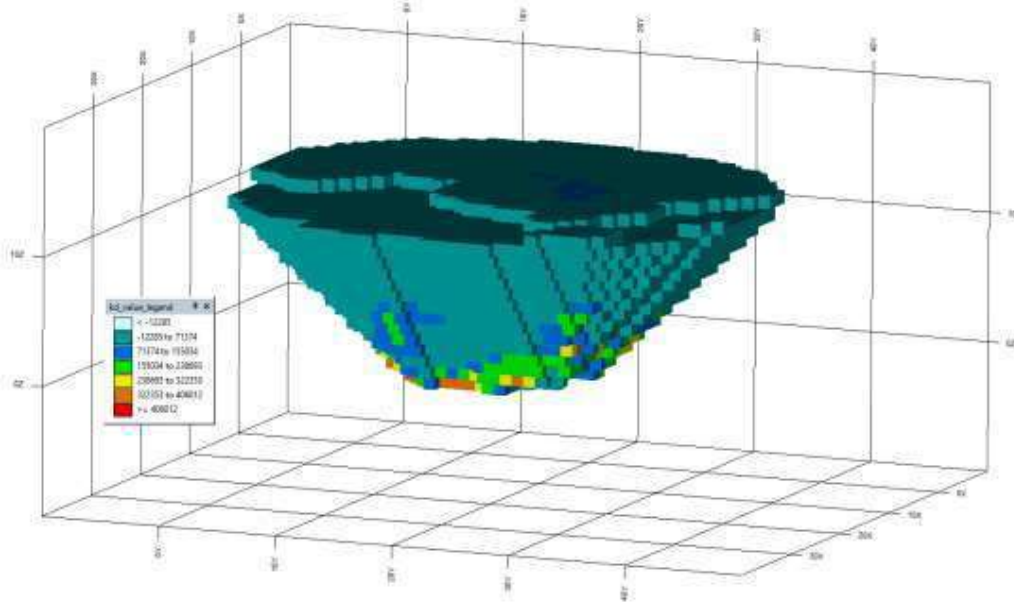
Çizelge 5.1’ de kullanılan veri setine ve karışık tam sayı modelde kullanılan kısıtlara dair özet bir gösterim paylaşılmış olup burada yer alan blok modellerin detayları devam eden bölümlerde paylaşılmıştır.

Çizelge 5.1: Kullanılan veri seti ve karışık tam sayı modeline uygulanan kısıtların özet gösterimi.

ID	Blok Sayısı	Nihai ocak Sınırları içerisindeki blok sayısı	İkili Değişken sayısı	Yıllık Cevher Üretim Sınırı	İndirim Oranı	Periyotlar
Zuck_small	9,400	8,752	122,528	20M	10%	14
Kd	14,153	13,258	132,580	10M	10%	10
Zuck_medium	29,277	29,230	263,880	8M	10%	9
Marvin	53,271	5,324	69,212	20M	10%	13
Zuck_large	96,821	96,821	968,210	3M	10%	10
McLaughlin	2,140,342	112,687	1,126,687	3.5M	10%	10

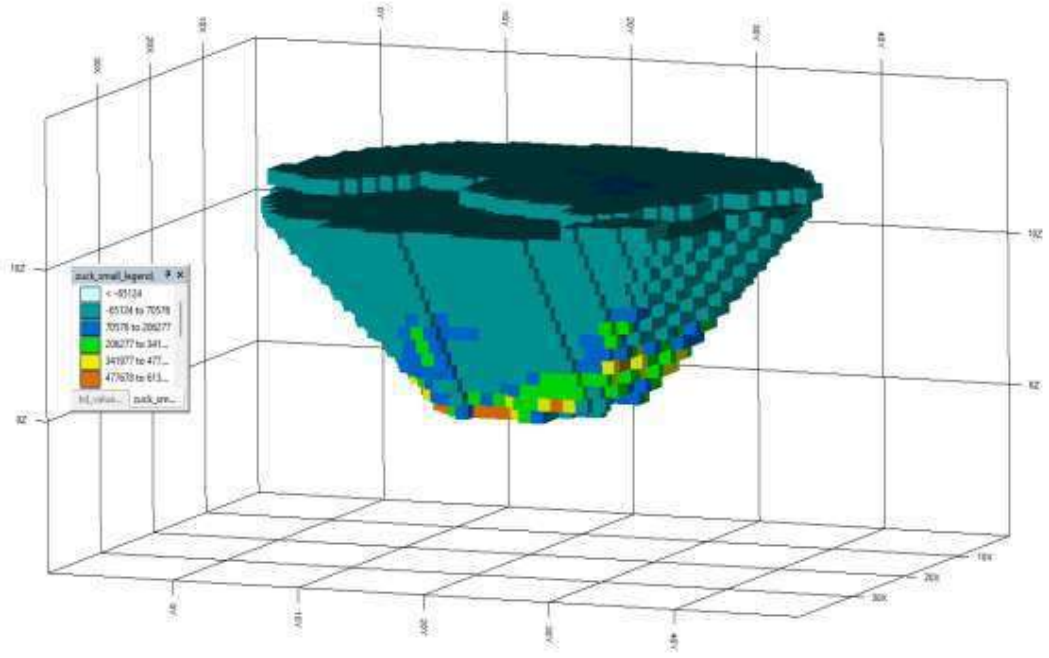
5.1 Zuck_small Blok Modeline Ait Detaylar

Veri seti içerisinde yer alan ilk blok model toplamda 9 400 bloktan oluşan ve küçük ölçekli bir maden işletmesinin temsili görünümünü tasvir eden zuck_small isimli blok modeldir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Zuck_small blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).

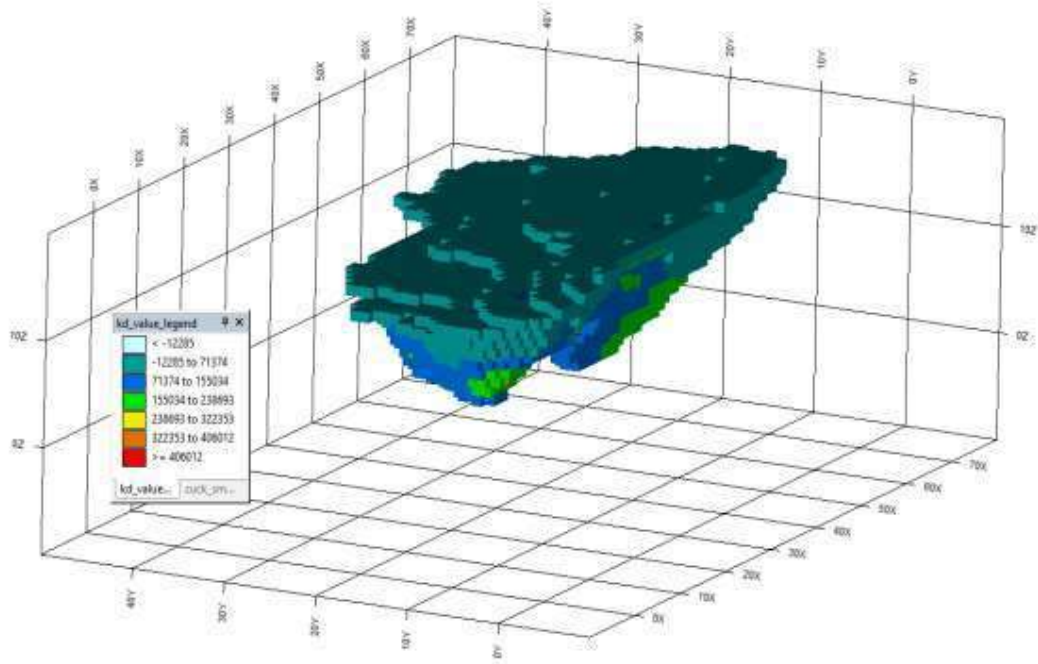
Şekil 5.1’ de izometrik görünümü paylaşılan zuck_small blok modeli x yönünde 38, y yönünde 42 blok, z yönünde 14 bloktan oluşmaktadır. Blok değerleri -65 124 ile 1 291 881 arasında değişmektedir. Önerilen yöntemin ilk aşaması olan nihai ocak sınırı bulunması işleminden sonra blok model içerisinde 8 752 adet blok kalmaktadır (Şekil 5.2). Nihai ocak sınırları içerisinde yer alan malzeme miktarı 263,7 milyon ton cevher, 262,6 milyon ton atık malzeme olarak belirlenmiştir. Buna göre üretim planlaması yapılacak dönem 14 periyot ve yılda 20 milyon ton cevher üretimi yapılacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.2: Zuck_small nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.

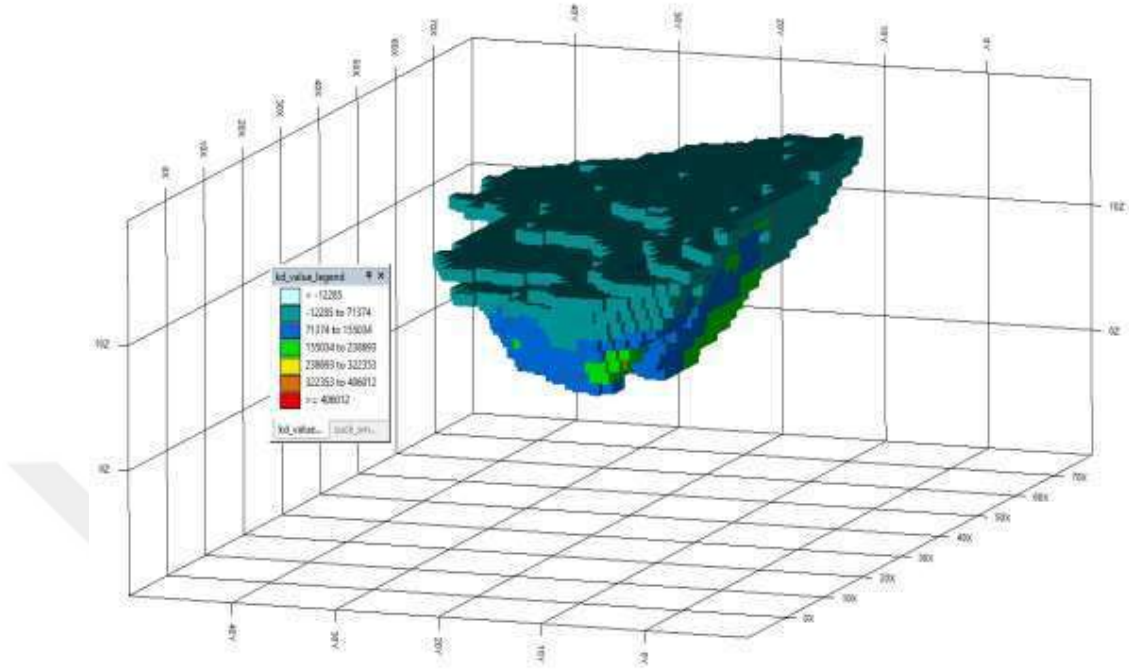
5.2 Kd Blok Modeline Ait Detaylar

Veri seti içerisinde yer alan bir diğer blok model toplamda 14 153 bloktan oluşan ve orta ölçekli bir maden işletmesinin temsili görünümünü tasvir eden kd isimli blok modelidir. (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: Kd blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).

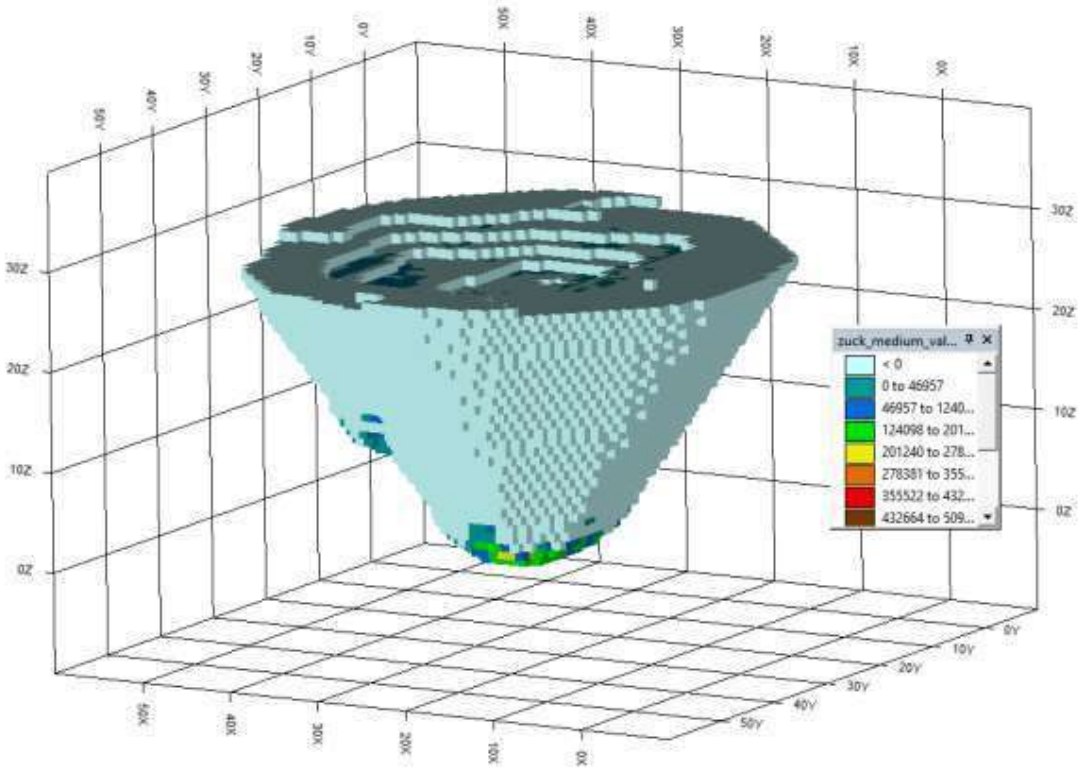
Şekil 5.3’ de izemoterik görünümü paylaşılan kd blok modeli x yönünde 77, y yönünde 41 blok, z yönünde 18 bloktan oluşmaktadır. Blok değerleri -12 285 ile 406 012 arasında değişmektedir. Önerilen yöntemin ilk aşaması olan nihai ocak sınırı bulunması işleminden sonra blok model içerisinde 13 258 adet blok kalmaktadır (Şekil 5.4). Nihai ocak sınırları içerisinde yer alan malzeme miktarı 95,9 milyon ton cevher, 111,2 milyon ton atık malzeme olarak belirlenmiştir. Buna göre üretim planlaması yapılacak dönem 10 periyot ve yılda 10 milyon ton cevher üretimi yapılacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.4: Kd blok modeli, nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.

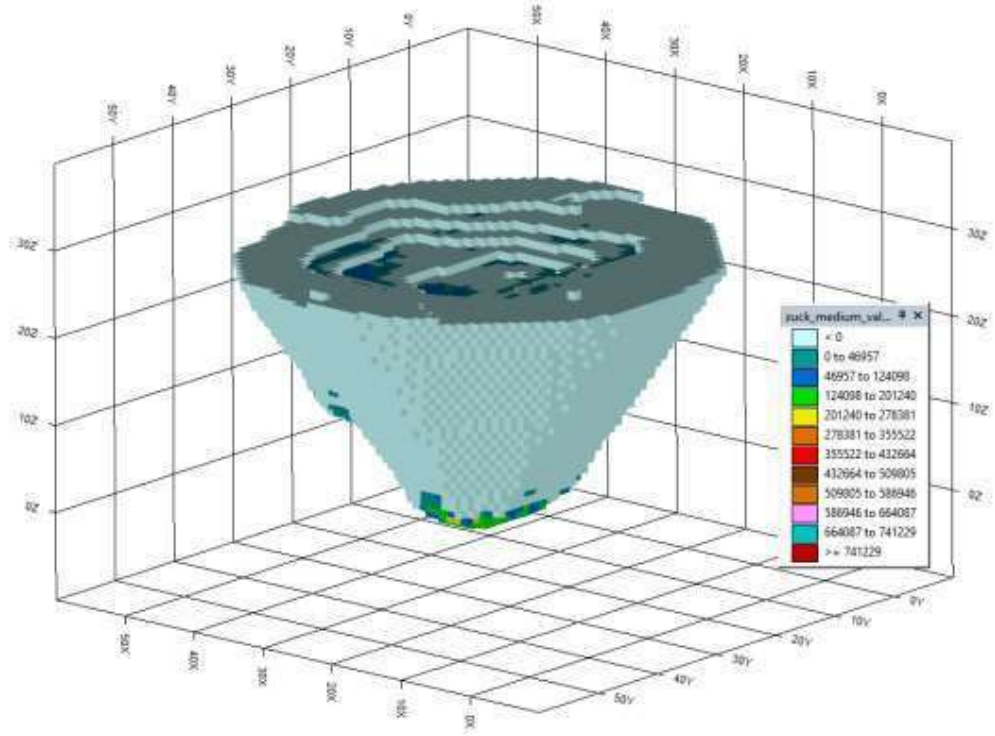
5.3 Zuck_Medium Blok Modeline Ait Detaylar

Veri seti içerisinde yer alan bir diğer blok model toplamda 29 277 bloktan oluşan ve orta ölçekli bir maden işletmesinin temsili görünümünü tasvir eden zuck_medium isimli blok modelidir. (Şekil 5.5).



Şekil 5.5: Zuck_medium blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).

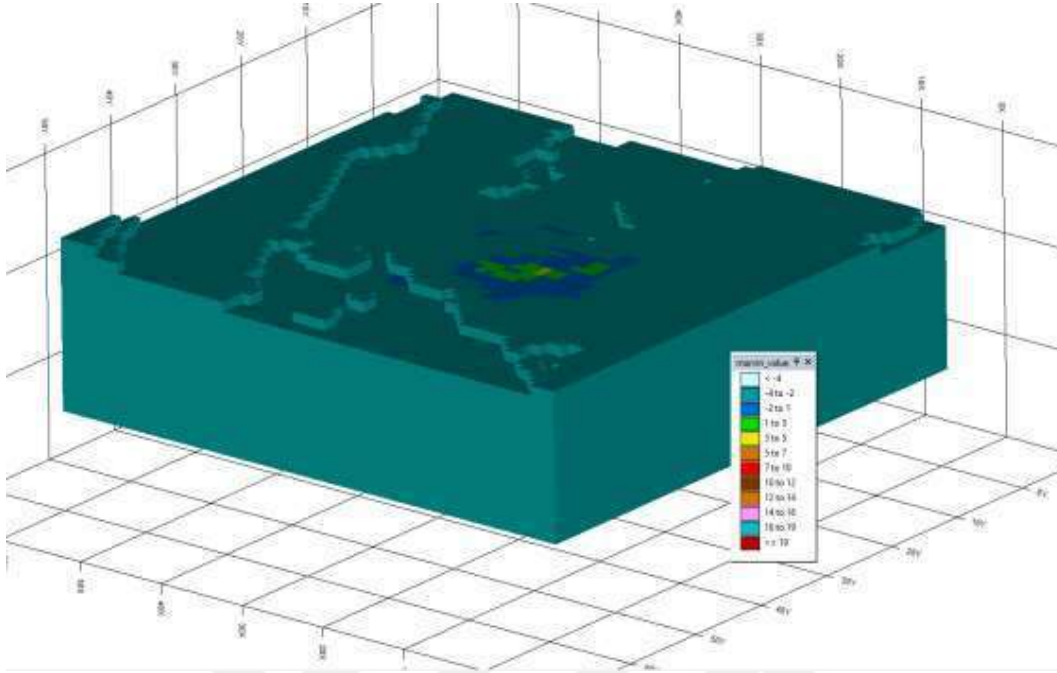
Şekil 5.5’ de izometrik görünümü paylaşılan zuck_medium blok modeli x yönünde 52, y yönünde 56 blok, z yönünde 29 bloktan oluşmaktadır. Blok değerleri -30 184 ile 741 229 arasında değişmektedir. Önerilen yöntemin ilk aşaması olan nihai ocak sınırı bulunması işleminden sonra blok model içerisinde 29 230 adet blok kalmaktadır (Şekil 5.6). Nihai ocak sınırları içerisinde yer alan malzeme miktarı 66,6 milyon ton cevher, 117,3 milyon ton atık malzeme olarak belirlenmiştir. Buna göre üretim planlaması yapılacak dönem 9 periyot ve yılda 8 milyon ton cevher üretimi yapılacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.6: Zuck_medium blok modeli, nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.

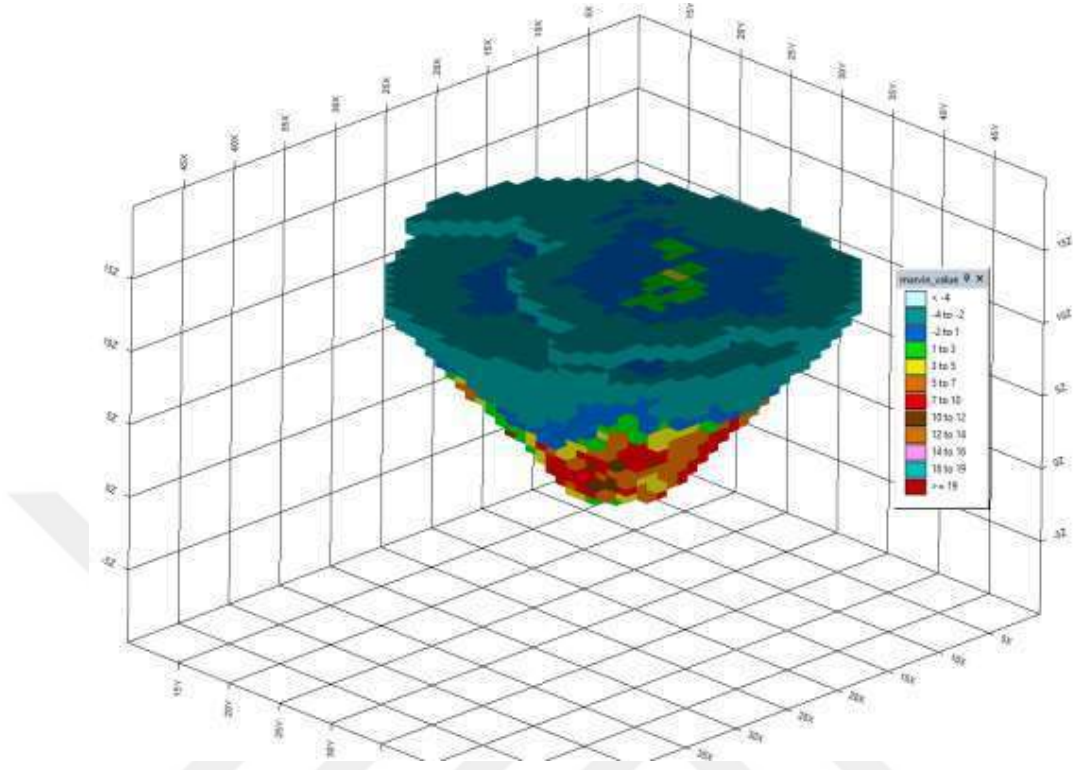
5.4 Marvin Blok Modeline Ait Detaylar

Veri seti içerisinde yer alan bir diğer blok model toplamda 53 271 bloktan oluşan ve orta ölçekli bir maden işletmesinin temsili görünümünü tasvir eden zuck_medium isimli blok modelidir. (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: Marvin blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).

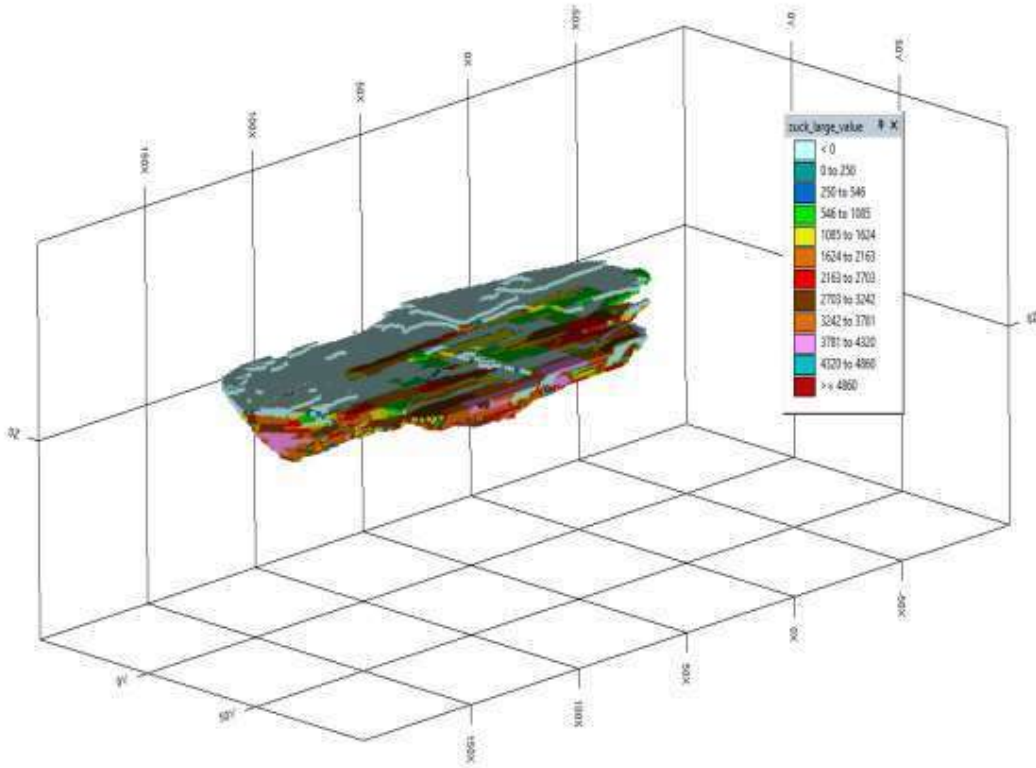
Şekil 5.7’ de izometrik görünümü paylaşılan Marvin blok modeli x yönünde 60, y yönünde 59 blok, z yönünde 16 bloktan oluşmaktadır. Blok değerleri -4 ile 19 arasında değişmektedir. Önerilen yöntemin ilk aşaması olan nihai ocak sınırı bulunması işleminden sonra blok model içerisinde 29 230 adet blok kalmaktadır (Şekil 5.8). Nihai ocak sınırları içerisinde yer alan malzeme miktarı 249,7 milyon ton cevher, 82,8 milyon ton atık malzeme olarak belirlenmiştir. Buna göre üretim planlaması yapılacak dönem 13 periyot ve yılda 20 milyon ton cevher üretimi yapılacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.8: Marvin blok modeli nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.

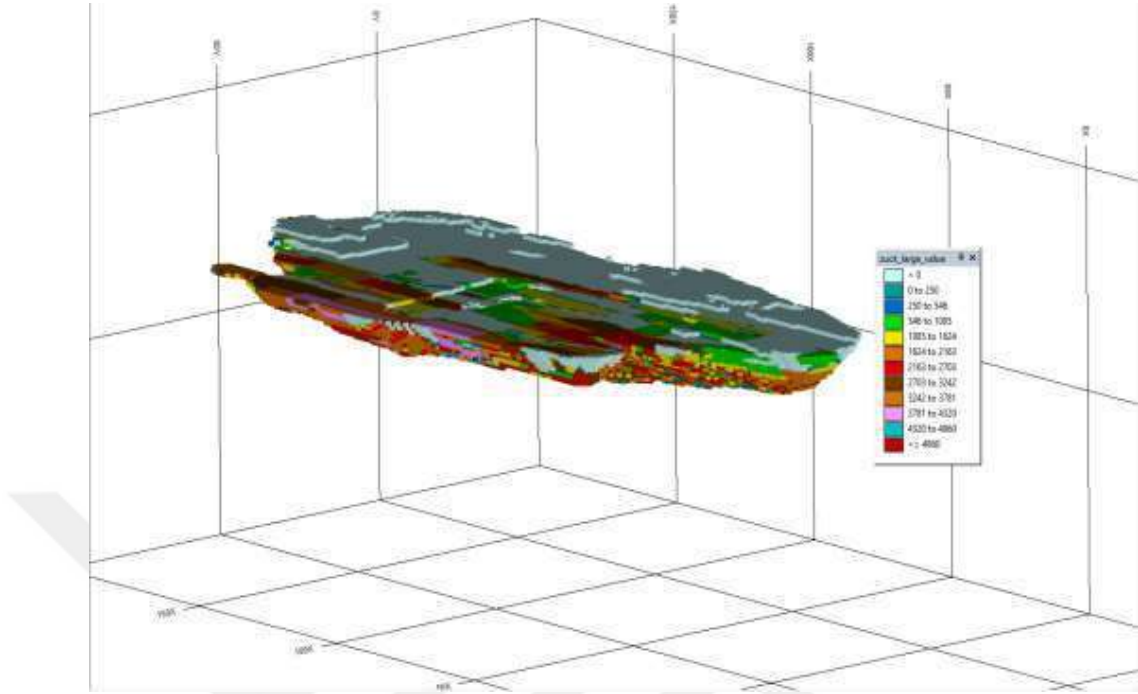
5.5 Zuck_large Blok Modeline Ait Detaylar

Veri seti içerisinde yer alan bir diğer blok model toplamda 96 821 bloktan oluşan ve büyük ölçekli bir maden işletmesinin temsili görünümünü tasvir eden zuck_medium isimli blok modeldir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9: Zuck_large blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).

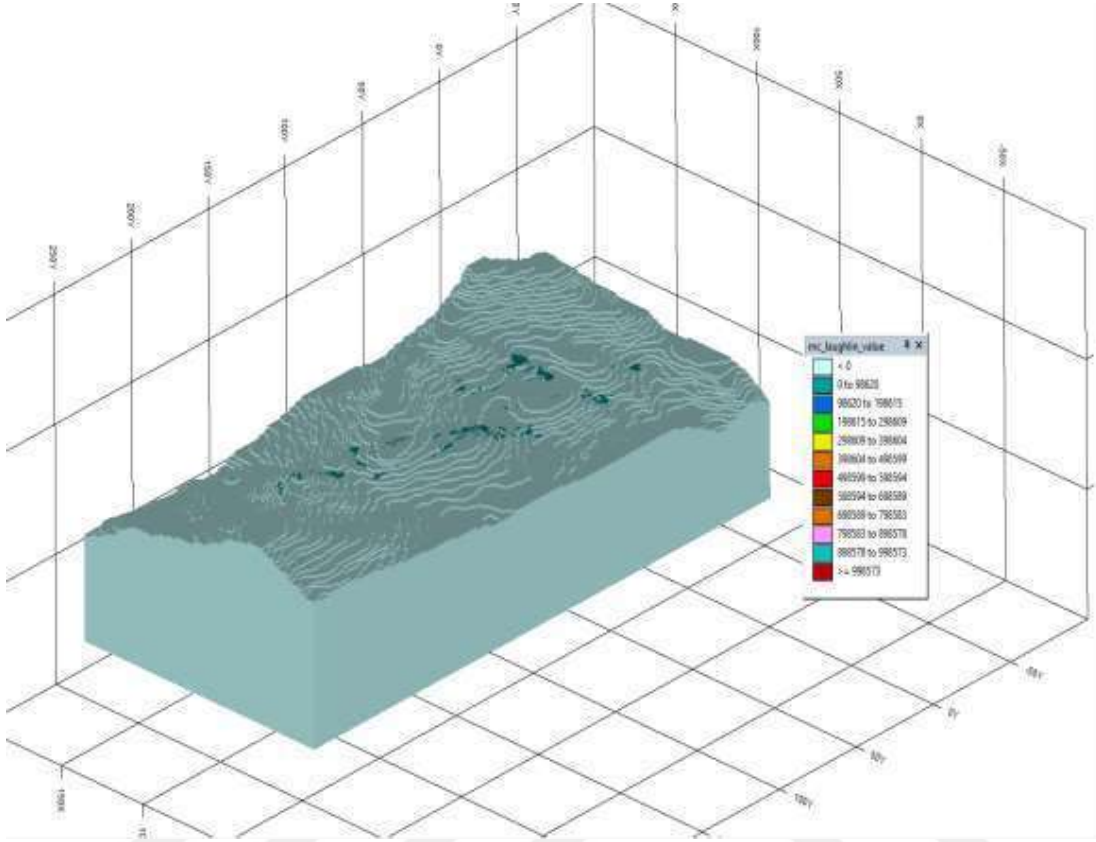
Şekil 5.9’ da izemoterik görünümü paylaşılan zuck_large blok modeli x yönünde 190, y yönünde 85 blok, z yönünde 21 bloktan oluşmaktadır. Blok değerleri -533 ile 4860 arasında değişmektedir. Önerilen yöntemin ilk aşaması olan nihai ocak sınırı bulunması işleminden sonra blok model içerisinde 96 821 adet blok kalmaktadır (Şekil 5.10). Nihai ocak sınırları içerisinde yer alan malzeme miktarı 29,4 milyon ton cevher, 18,9 milyon ton atık malzeme olarak belirlenmiştir. Buna göre üretim planlaması yapılacak dönem 10 periyot ve yılda 3 milyon ton cevher üretimi yapılacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.10: Zuck_large blok modeli nihai ocak sınırlı içerisinde kalan bloklar.

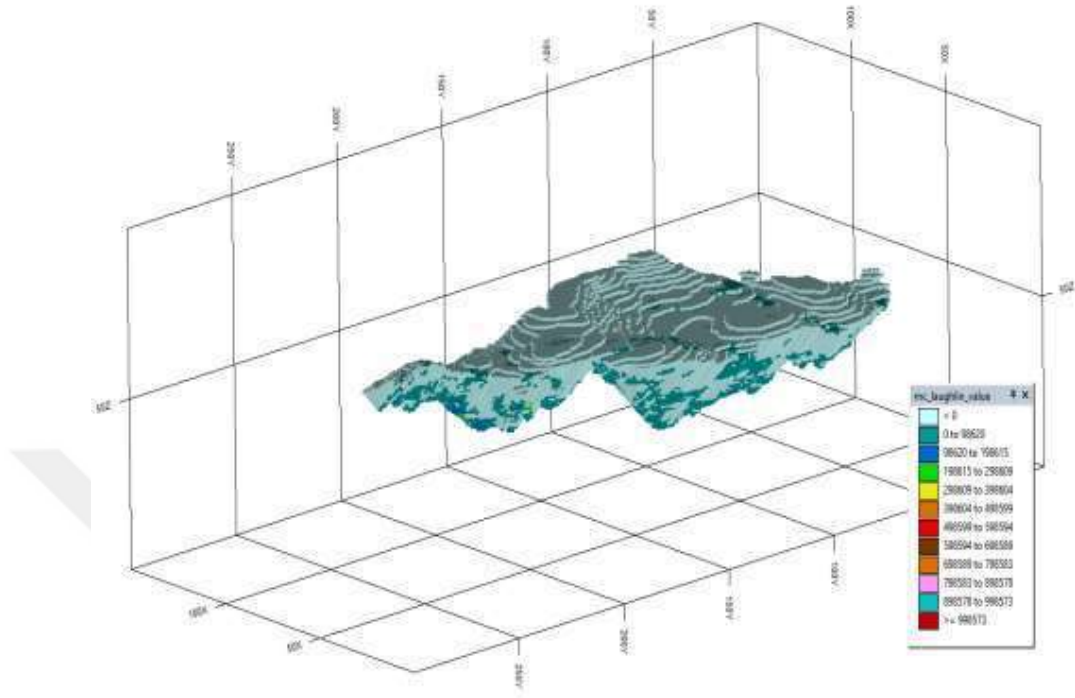
5.6 McLaughlin Blok Modeline Ait Detaylar

Veri seti içerisinde yer alan son blok model toplamda 2 140 342 bloktan oluşan ve büyük ölçekli bir maden işletmesinin temsili görünümünü tasvir eden mcLaughlin isimli blok modelidir. (Şekil 5.11).



Şekil 5.11: McLaughlin blok modelinin girdi veri blok modeli (blok değerlerine göre renklendirilmiş).

Şekil 5.11’ de izemoterik görünümü paylaşılan mcLaughlin blok modeli x yönünde 139, y yönünde 295 blok, z yönünde 67 bloktan oluşmaktadır. Blok değerleri -1375 ile 998 573 arasında değişmektedir. Önerilen yöntemin ilk aşaması olan nihai ocak sınırı bulunması işleminden sonra blok model içerisinde 112 687 adet blok kalmaktadır (Şekil 5.12). Nihai ocak sınırları içerisinde yer alan malzeme miktarı 31,6 milyon ton cevher, 93,2 milyon ton atık malzeme olarak belirlenmiştir. Buna göre üretim planlaması yapılacak dönem 10 periyot ve yılda 3,5 milyon ton cevher üretimi yapılacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.12: McLaughlin blok modeli nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar.



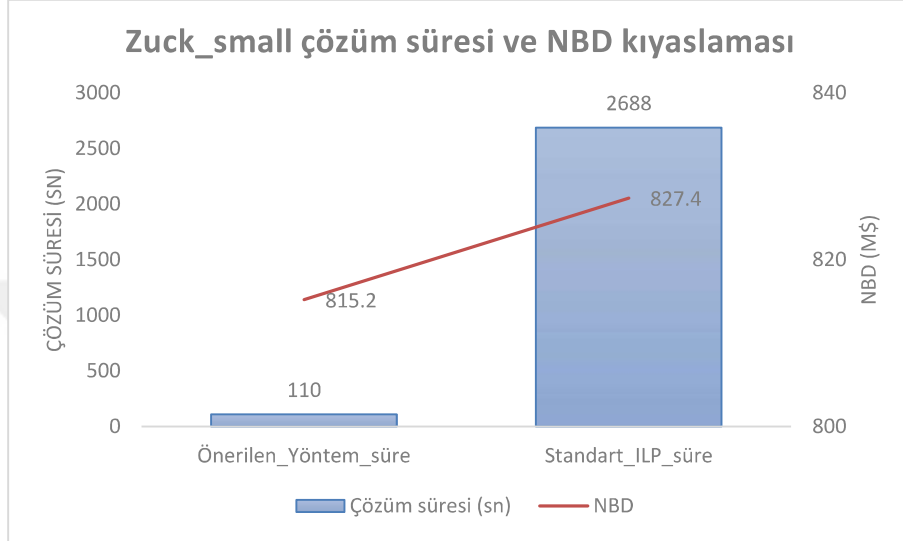
6. ELDE EDİLEN SONUÇLAR ve ALTERNATİF YÖNTEMLERLE KİYASLAMASI

Bu çalışma kapsamında önerilmiş olan ve açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması için kullanılacak olan algoritmanın performansını irdelemek adına, bir önceki bölümde detayları verilen blok model verileri kullanılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek amacıyla, problem önce standart bir karışık tam sayı modeli kullanılarak çözülmüş ve üretim planlaması sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra aynı model üzerinde, önerilen yöntemden faydalanılarak, değişken sabitleme prosedürü uygulanarak problem tekrar çözülmüş ve elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır. Tam sayılı modelin çözüme ulaşamadığı senaryolar için, önerilen yöntemle elde edilen net bugünkü değerler, literatürde yer alan ve problemin doğrusal programlama olarak rahatlatılmış halinin çözümleriyle kıyaslanarak tavsiye edilen yöntemin, etkinliği ve kullanılabilirliği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

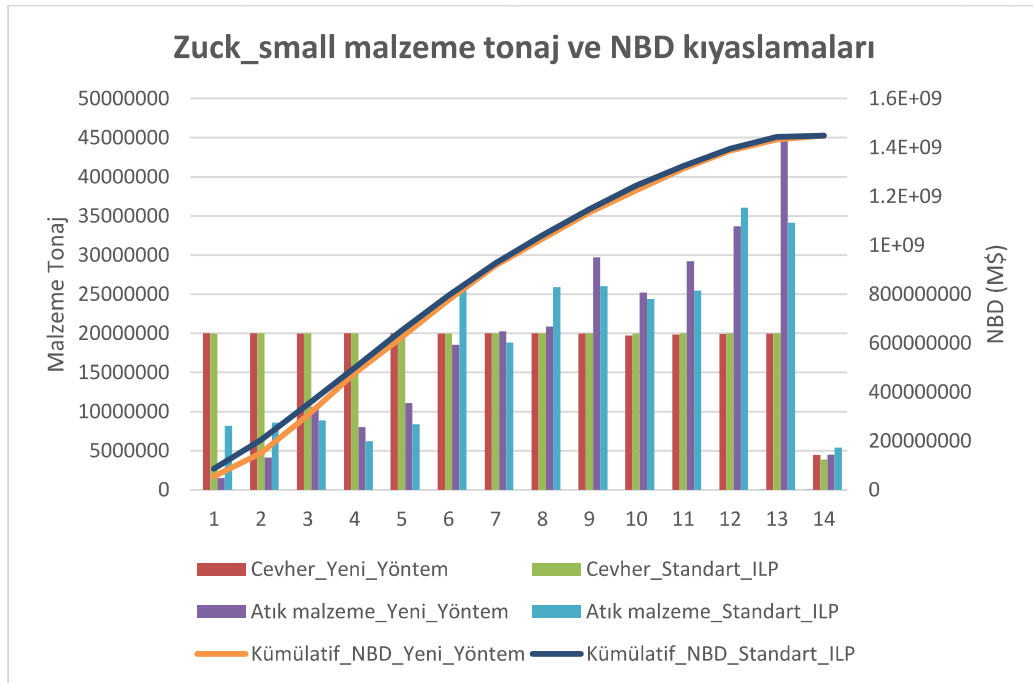
6.1 Zuck_Small Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması

Zuck_small isimli blok modelin standart tam sayı modeli ve önerilen yöntem ile çözülmesi için geçen sürelerin kıyaslaması Şekil 6.1’de paylaşılmıştır. Buna göre 14 periyot için geçen süreler standart model için 2688 sn iken, önerilen yöntem aynı problemi 110 sn’de çözerek, çözüm süresinin %95 oranında kılmasını sağlamıştır. Önerilen yöntemin kullanılması sonucu projenin NBD’i 815.2 M\$ olarak bulunurken, bu rakam standart modelde 827.4 M\$ olarak bulunmuştur. Projenin net bugünkü değerinde %1.47’lik bir düşüş olmuştur ve bunun sebebi olarak değişken sabitleme yönteminin düşük esneklik dezavantajı gösterilebilir. Şekil 6.2’ de paylaşılan grafikte, önerilen yöntem ve standart ILP modelinin periyotlara göre ürettiği cevher miktarı, malzeme miktarı ve kümülatif NBD değerleri kıyaslanmıştır. Her iki yöntemin de cevher üretim kısıtlarını sağlamakta olduğu görülmüş, NBD farkının atık malzeme miktarında meydana gelen farklar sebebiyle ortaya çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil

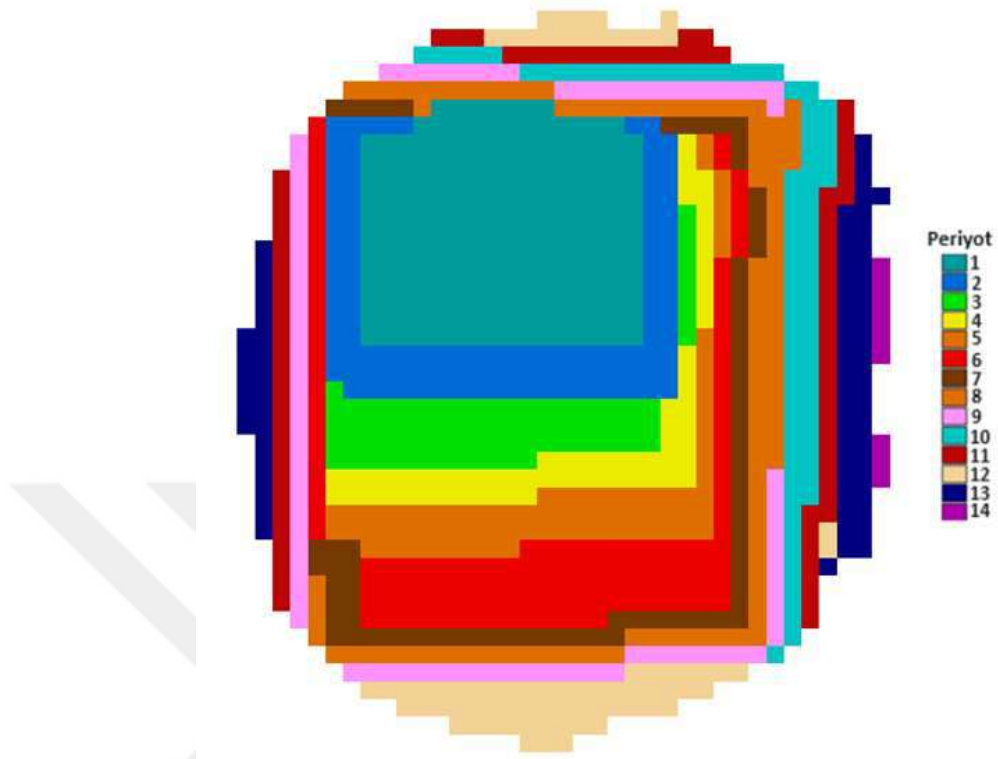
6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de, elde edilen sonuçların görsel olarak kıyaslanabilmesi amacıyla plan ve kesit görüntülerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.



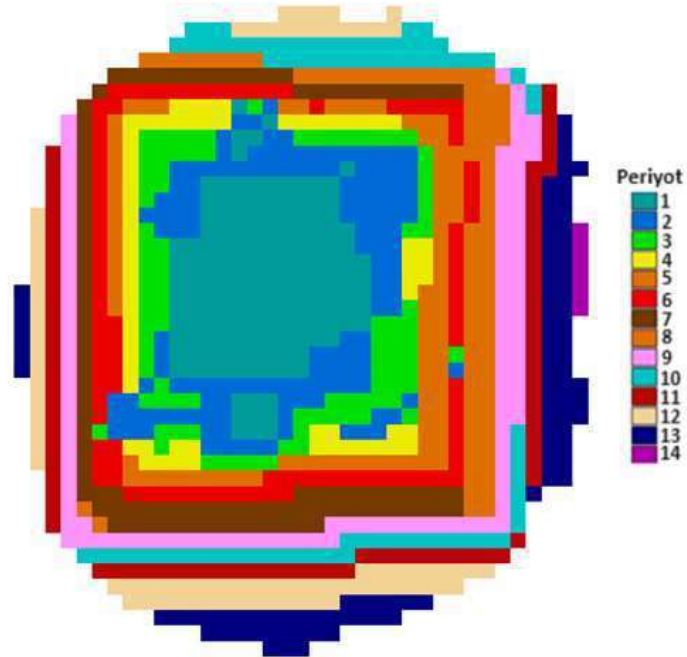
Şekil 6.1: Zuck_small blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslaması.



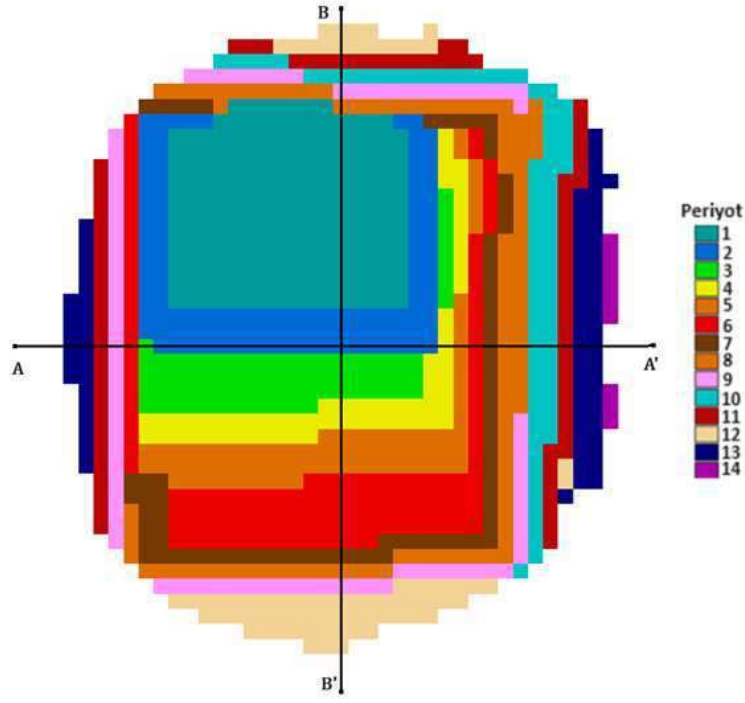
Şekil 6.2: Zuck_small malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.



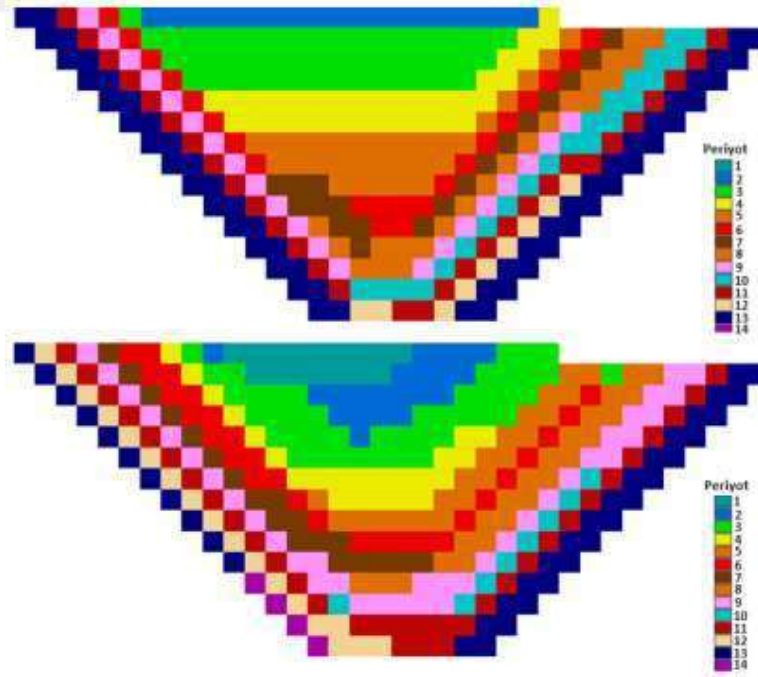
Şekil 6.3: Zuck_small_standart_ILP model çözümünün plan görünümü.



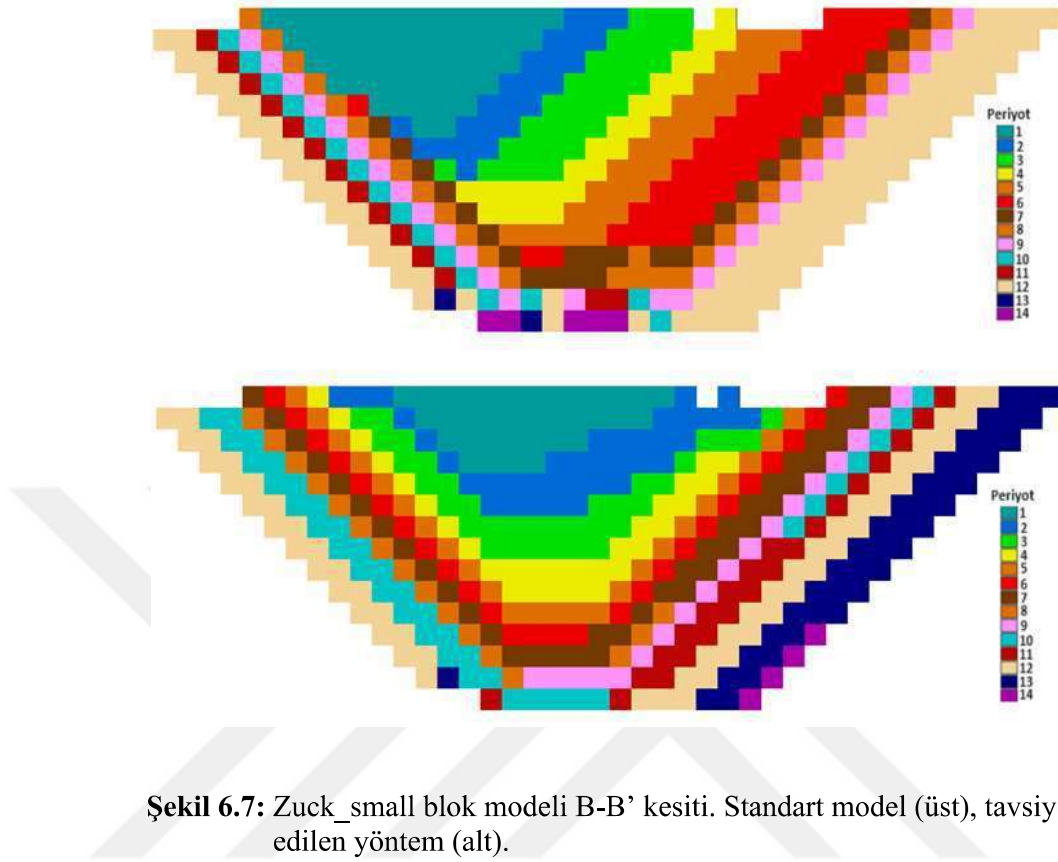
Şekil 6.4: Zuck_small blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.



Şekil 6.5: Zuck_small blok modelinde alınan kesit hatları.



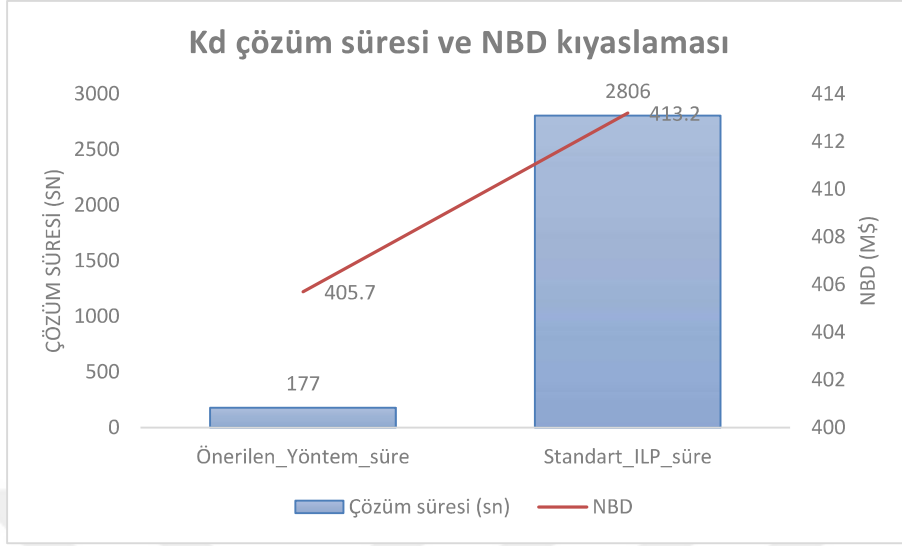
Şekil 6.6: Zuck_small blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).



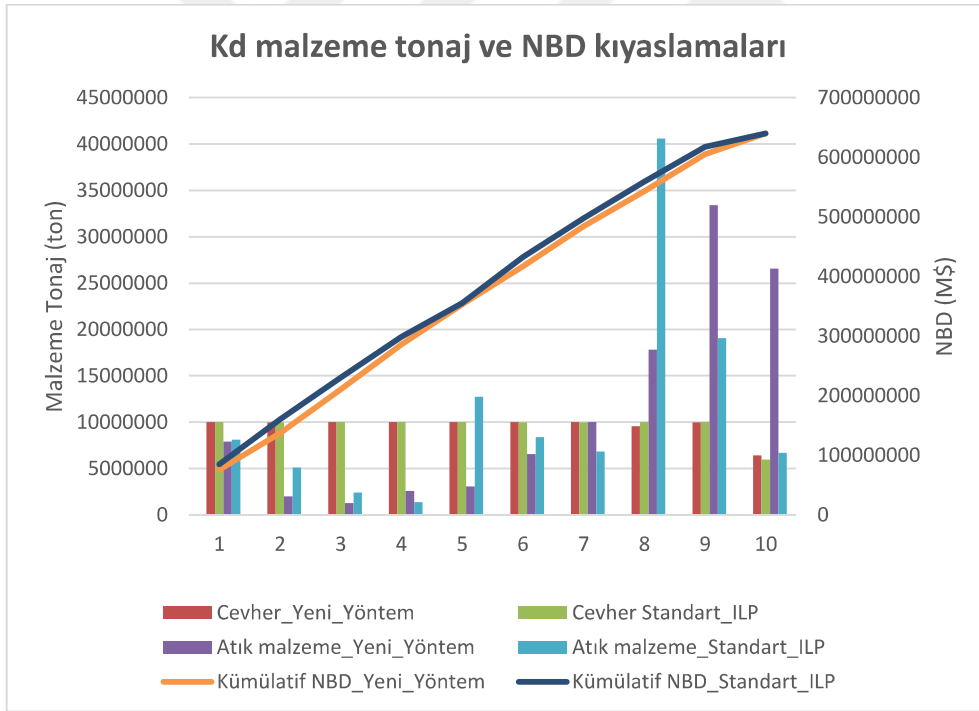
Şekil 6.7: Zuck_small blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).

6.2 Kd Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması

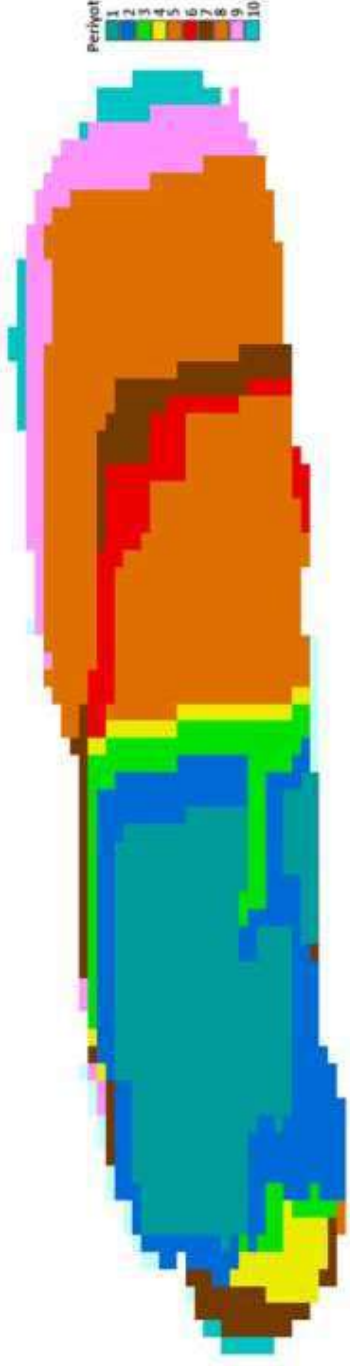
kd isimli blok modelin standart tam sayı modeli ve önerilen yöntem ile çözülmesi için geçen sürelerin kıyaslaması Şekil 6.7'de paylaşılmıştır. Buna göre 10 periyot için geçen süre standart model için 2806 sn iken, önerilen yöntem aynı problemi 177 sn'de çözerek, çözüm süresinin %93 oranında kısılmasını sağlamıştır. Önerilen yöntemin kullanılması sonucu projenin NBD'i 405.7 M\$ olarak bulunurken, bu rakam standart modelde 413.2 M\$ olarak bulunmuştur. Projenin net bugünkü değerinde %1.82'lik bir düşüş olmuştur ve yine bunun sebebi olarak değişken sabitleme yönteminin düşük esneklik dezavantajı ön plana çıkmaktadır. Şekil 6.8' de paylaşılan grafikte, önerilen yöntem ve standart ILP modelinin periyotlara göre ürettiği cevher miktarı, malzeme miktarı ve kümülatif NBD değerleri kıyaslanmıştır. Her iki yöntemin de cevher üretim kısıtlarını sağlamakta olduğu görülmüştür. Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'de, elde edilen sonuçların görsel olarak kıyaslanabilmesi amacıyla plan ve kesit görüntülerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.



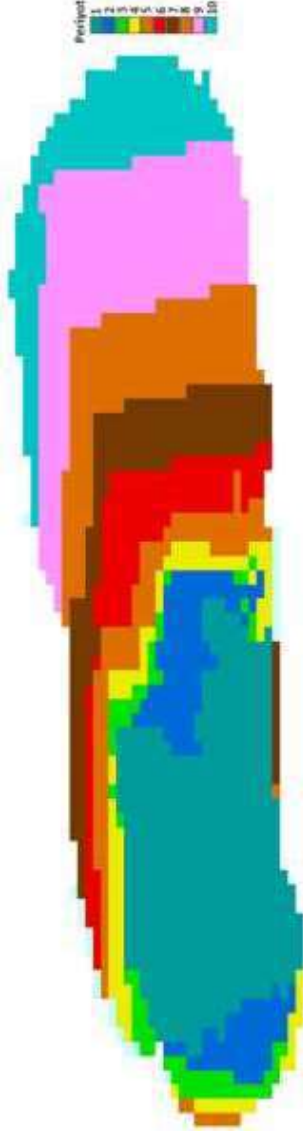
Şekil 6.8: Kd blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslaması.



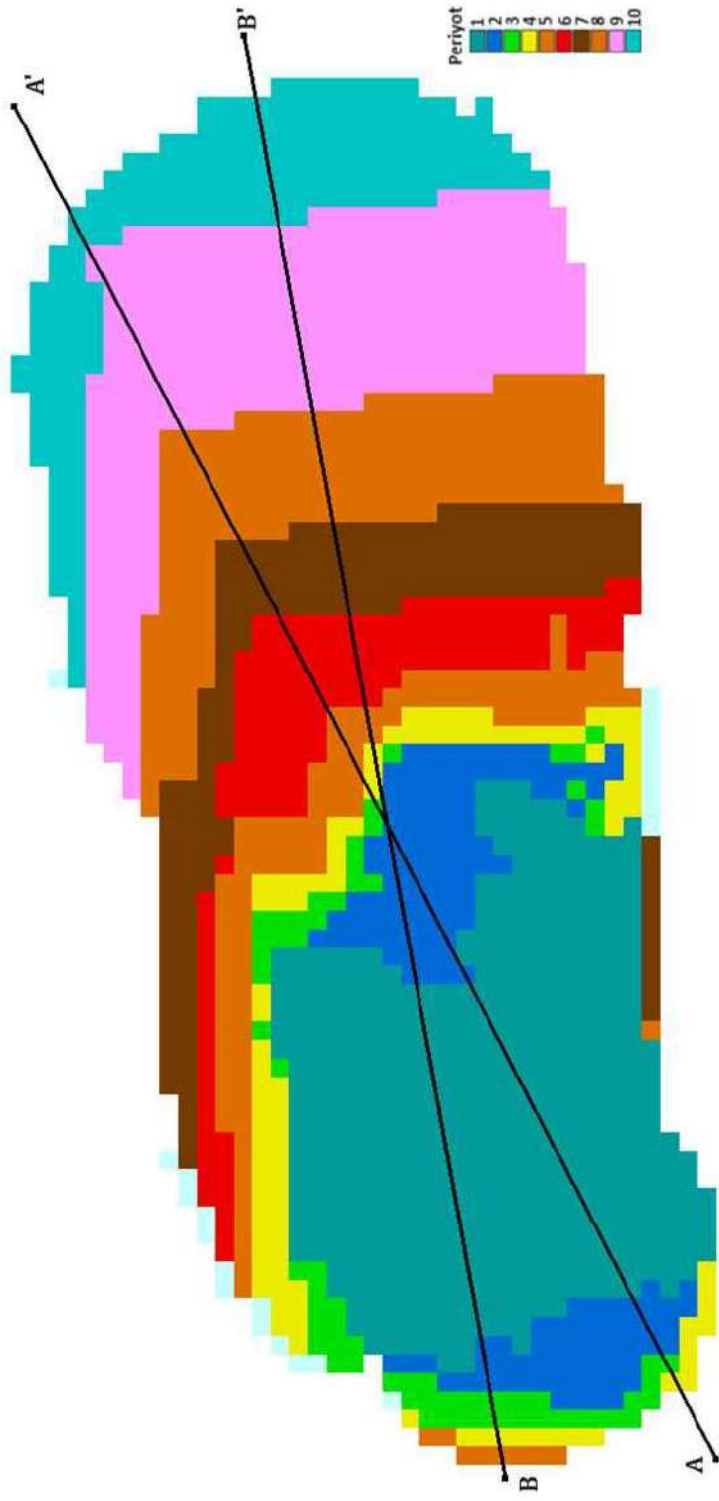
Şekil 6.9: Kd malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.



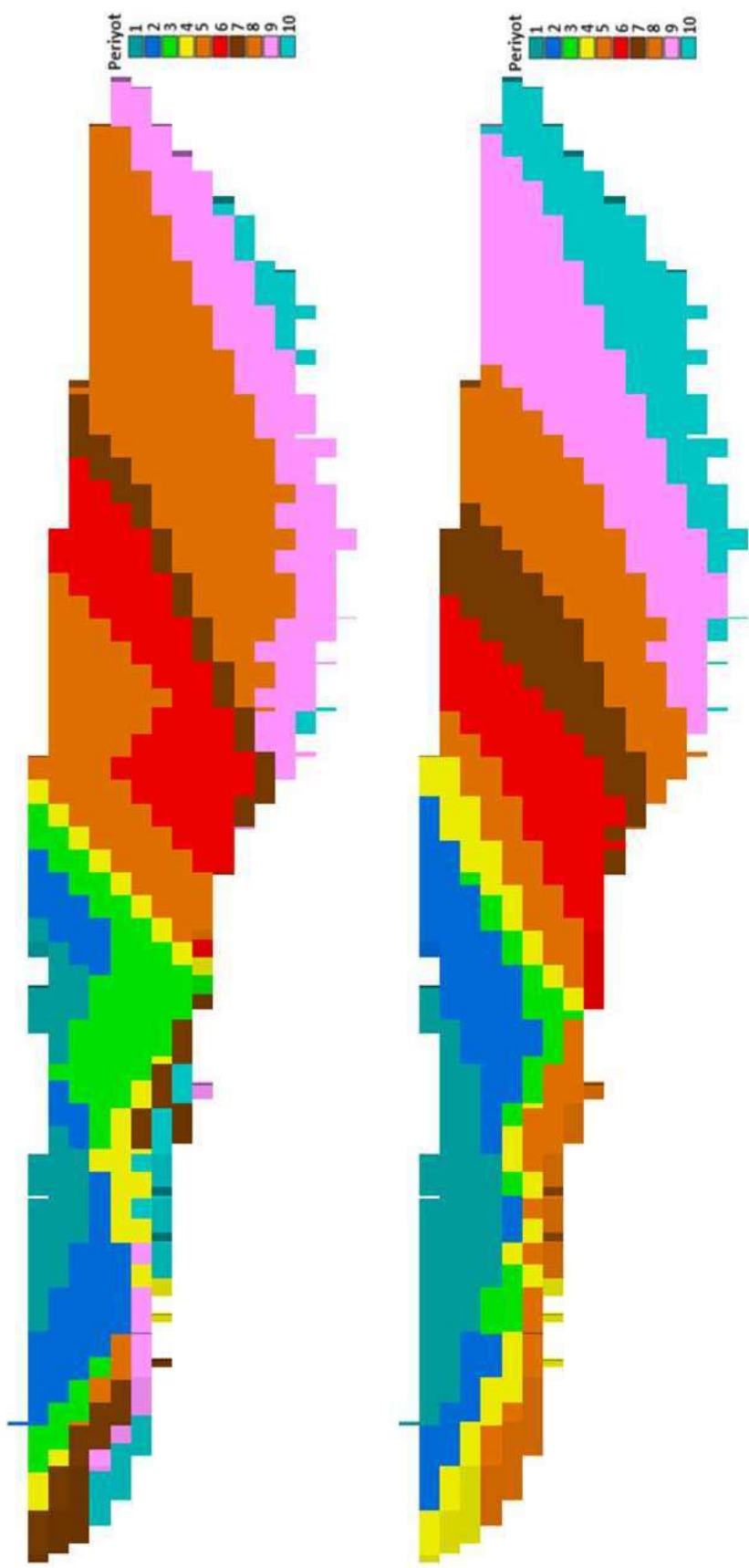
Şekil. 6.10: Kd blok modeli standart_ILP model çözümünün plan görünümü.



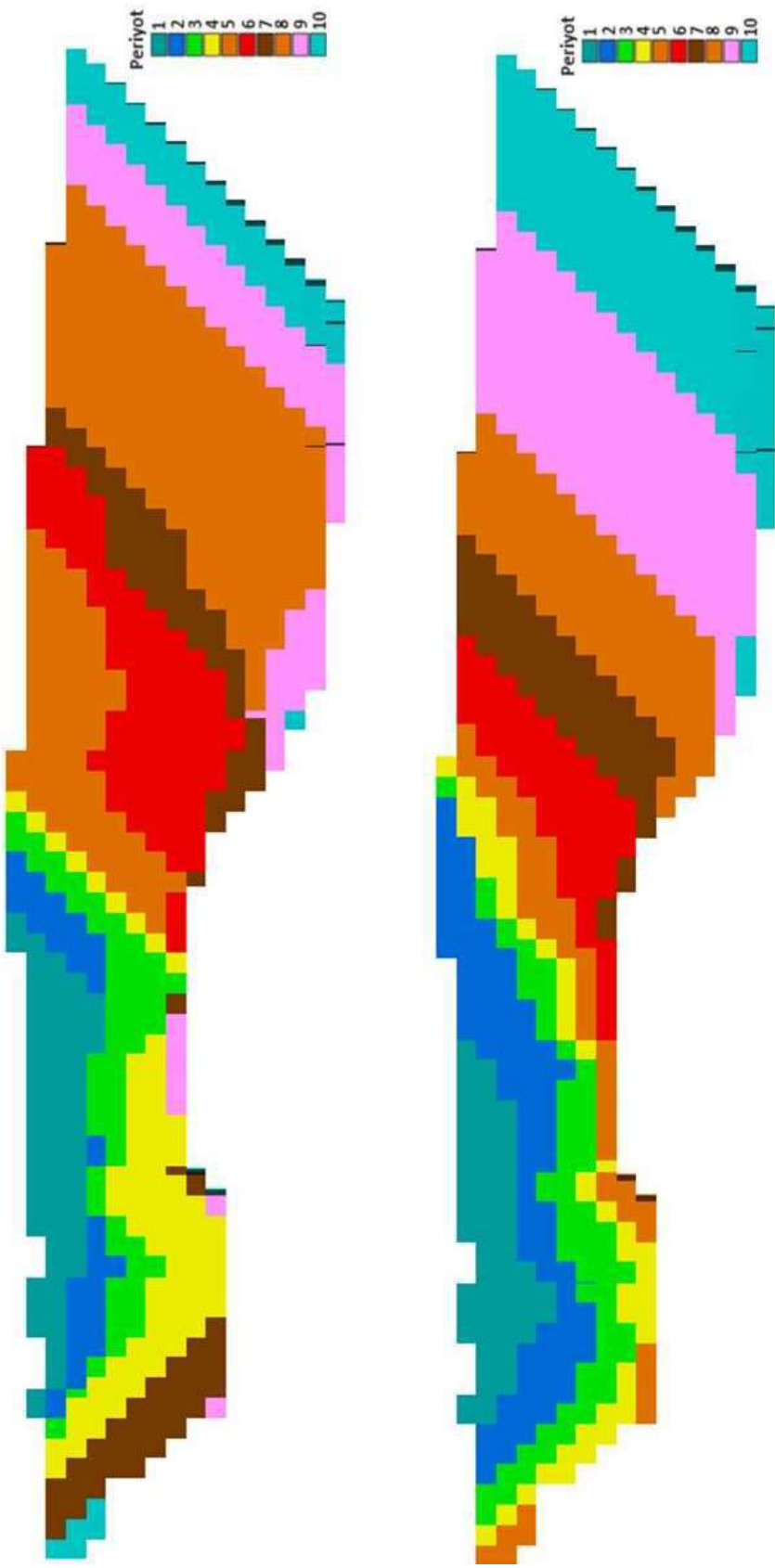
Şekil. 6.11: Kd blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.



Şekil 6.12: Kd blok modelinde alınan kesit hatları...



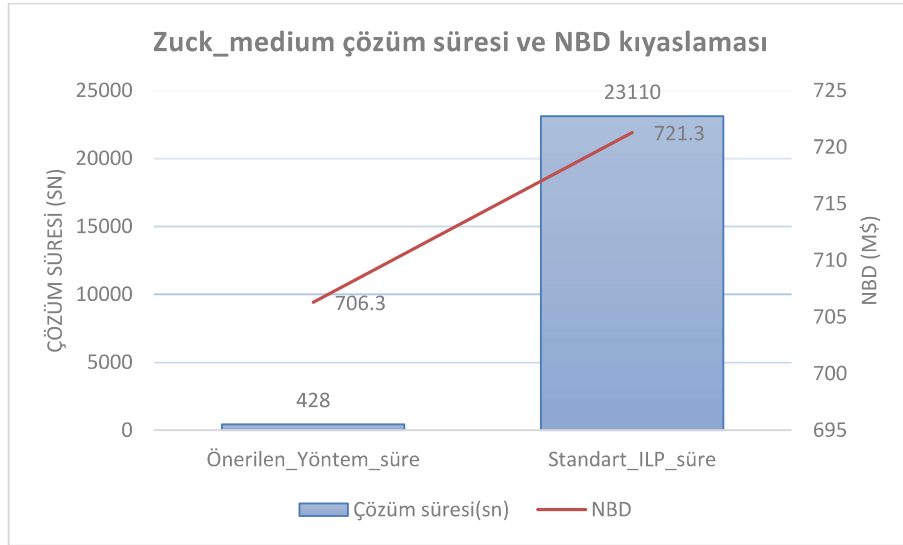
Şekil 6.13: Kd blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).



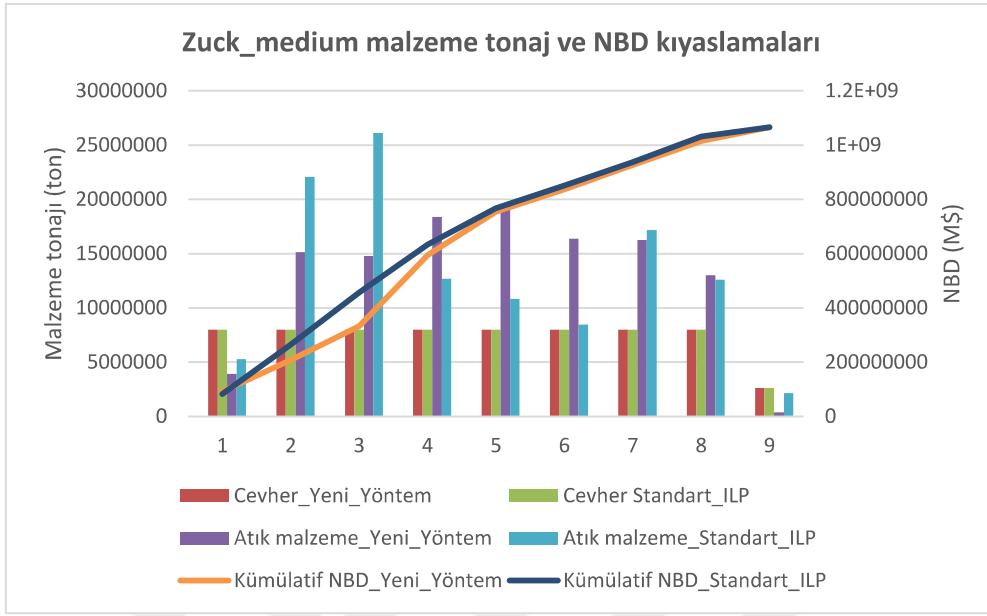
Şekil 6.14: Kd blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).

6.3 Zuck_medium Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması

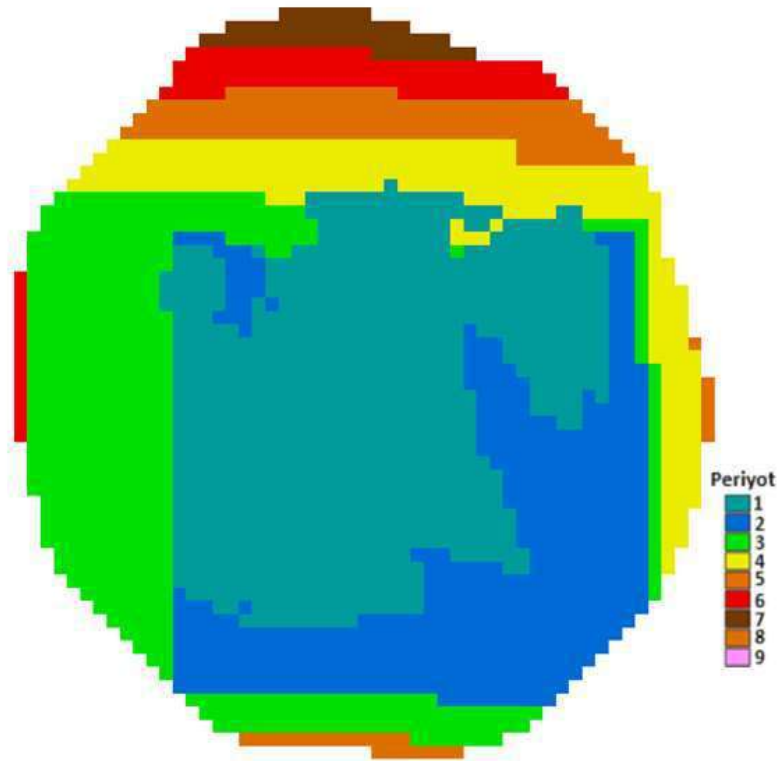
Zuck_Medium isimli blok modelin standart tam sayı modeli ve önerilen yöntem ile çözülmesi için geçen sürelerin kıyaslaması Şekil 6.14’de paylaşılmıştır. Buna göre 9 periyot için geçen süreler standart model için 23110 sn iken, elde edilen yöntem aynı problemi 428 sn’de çözerek, çözüm süresinin %98 oranında kılmasını sağlamıştır. Önerilen yöntemin kullanılması sonucu projenin NBD’i 706.3 M\$ olarak bulunurken, bu rakam standart modelde 721.3 M\$ olarak bulunmuştur. Projenin net bugünkü değerinde %2.08 ’lik bir düşüş olmuştur bu düşüşün de sebebi olarak değişken sabitleme yönteminin düşük esneklik dezavantajı ön plana çıkmaktadır. Şekil 6.15’ te paylaşılan grafikte, önerilen yöntem ve standart tam sayı modelinin periyotlara göre ürettiği cevher miktarı, malzeme miktarı ve kümülatif NBD değerleri kıyaslanmıştır. Her iki yöntemin de cevher üretim kısıtlarını sağlamakta olduğu görülmüştür. Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de, elde edilen sonuçların görsel olarak kıyaslanabilmesi amacıyla plan ve kesit görüntülerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.



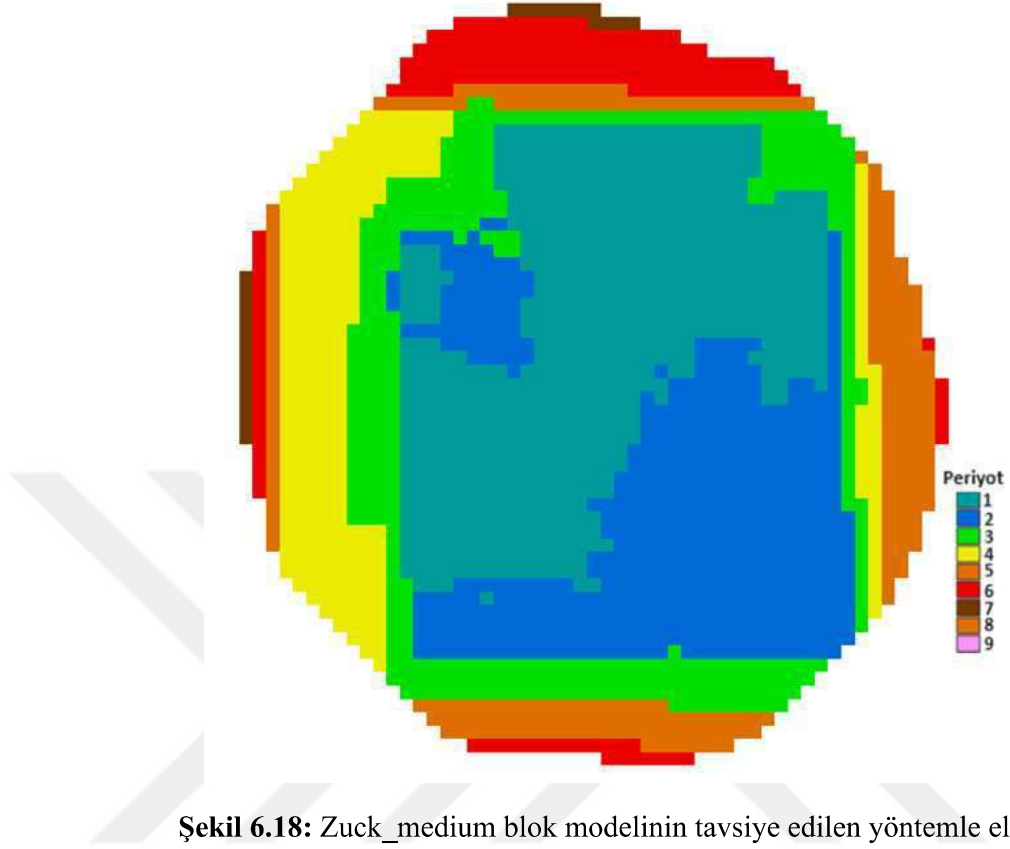
Şekil 6.15: Zuck_medium blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslaması.



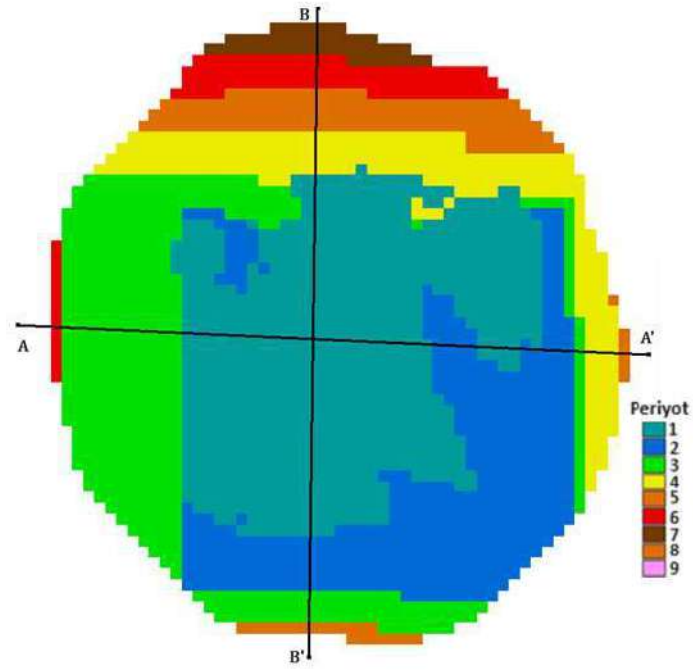
Şekil 6.16: Zuck_medium malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.



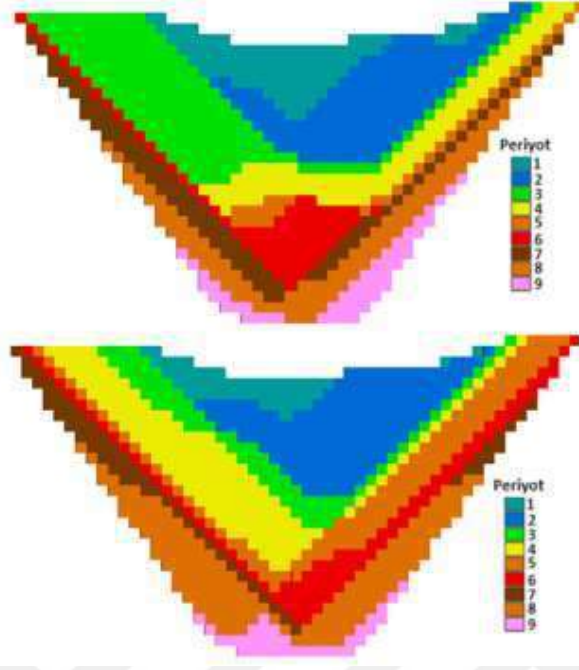
Şekil 6.17: Zuck_medium blok modeli standart_ILP model çözümünün plan görünümü.



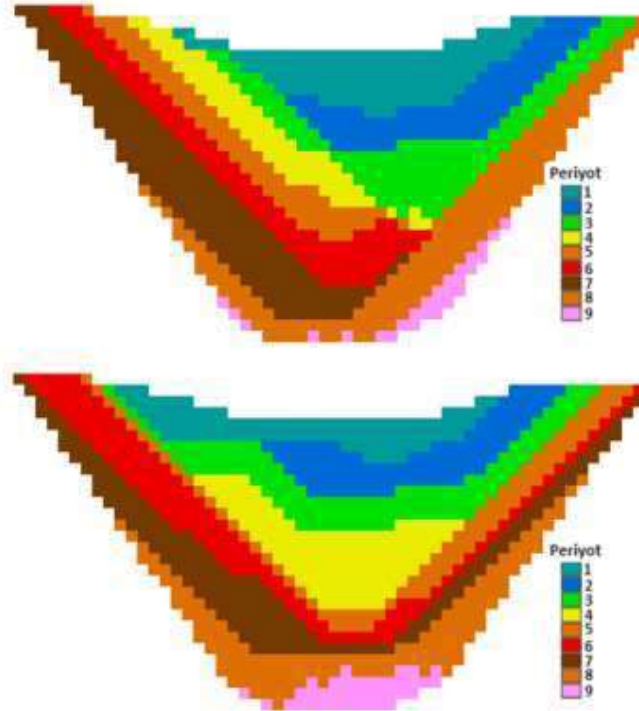
Şekil 6.18: Zuck_medium blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.



Şekil 6.19: Zuck_medium blok modelinde alınan kesit hatları.



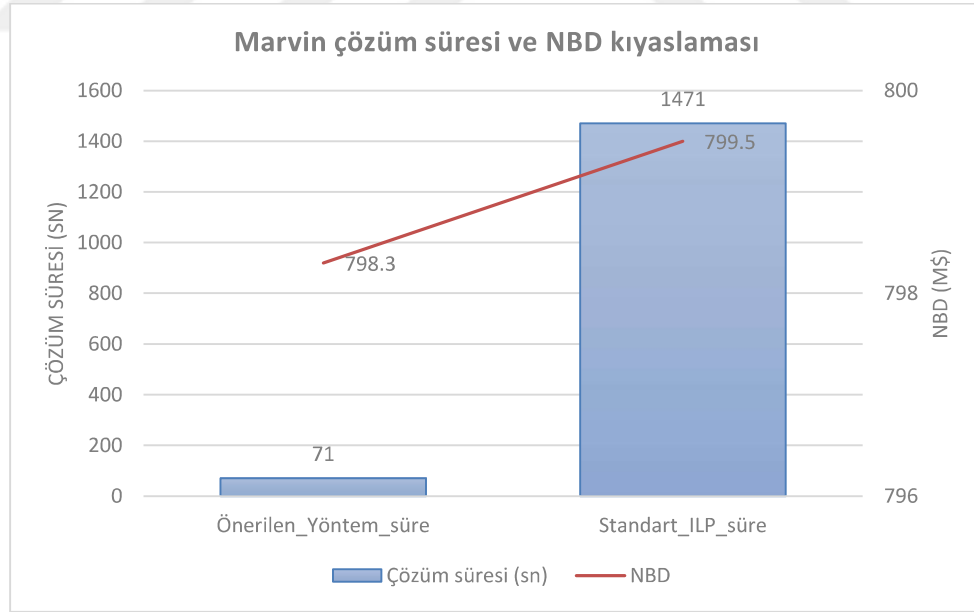
Şekil 6.20: Zuck_medium blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).



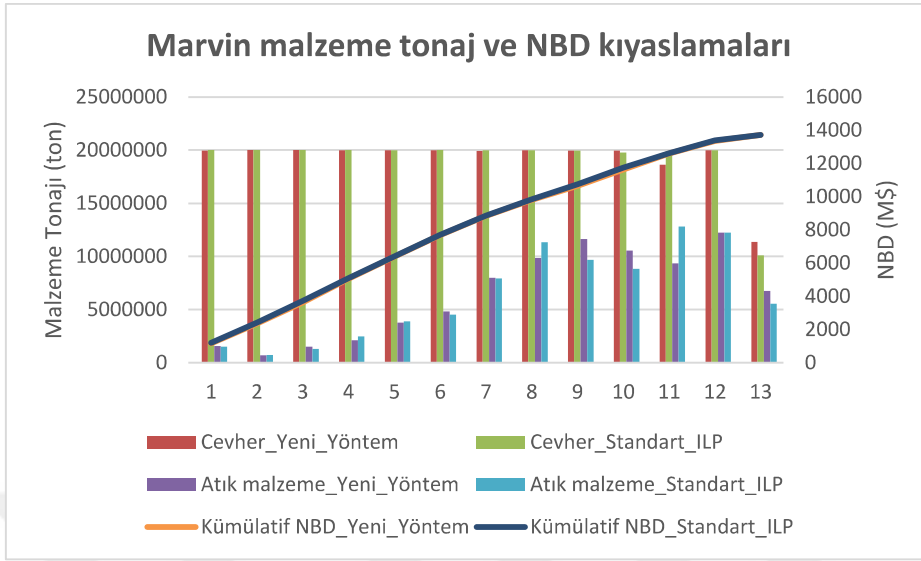
Şekil 6.21: Zuck_medium blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).

6.4 Marvin Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları Ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması

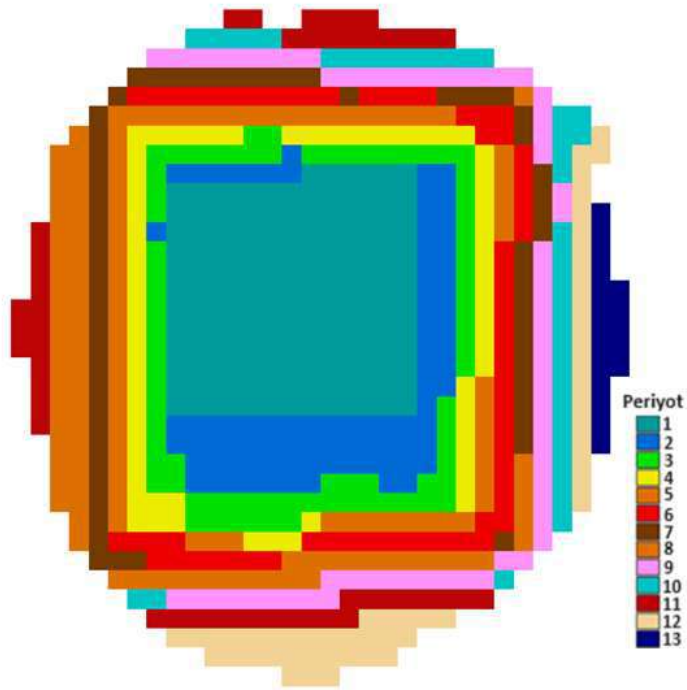
Marvin isimli blok modelin standart tam sayı modeli ve önerilen yöntem ile çözülmesi için geçen sürelerin kıyaslaması Şekil 6.21’de paylaşılmıştır. Buna göre 13 periyot için geçen süre standart model için 1471 sn iken, elde edilen yöntem aynı problemi 71 sn’de çözerek, çözüm süresinin %95 oranında kılmasını sağlamıştır. Önerilen yöntemin kullanılması sonucu projenin NBD’i 798.3 M\$ olarak bulunurken, bu rakam standart modelde 799.5 M\$ olarak bulunmuştur. Projenin net bugünkü değerinde %0.15 ’lik bir düşüş olduğu görölse de bu değer madencilik operasyonları için göz ardı edilebilir bir değerdir. Şekil 6.22’de paylaşılan grafikte, önerilen yöntem ve standart tam sayı modelinin periyotlara göre ürettiği cevher miktarı, malzeme miktarı ve kümülatif NBD değerleri kıyaslanmıştır. Her iki yöntemin de cevher üretim kısıtlarını sağlamakta olduğu görölmüştür. Şekil 6.23, Şekil 6.24, Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’de, elde edilen sonuçların görsel olarak kıyaslanabilmesi amacıyla plan ve kesit görüntülerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.



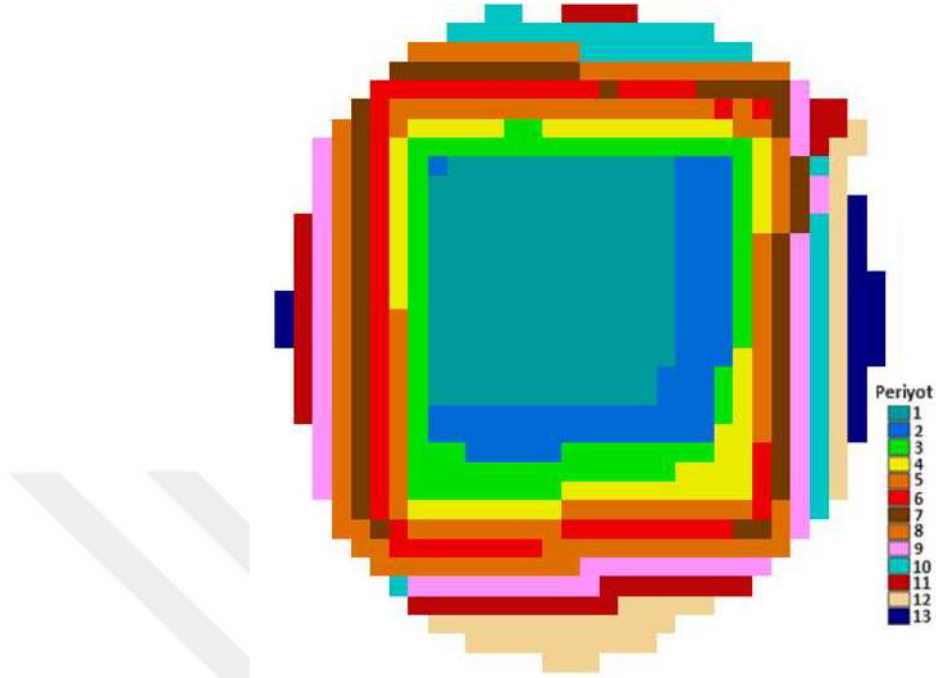
Şekil 6.22: Marvin blok modeli çözüm süresi ve NBD kıyaslaması.



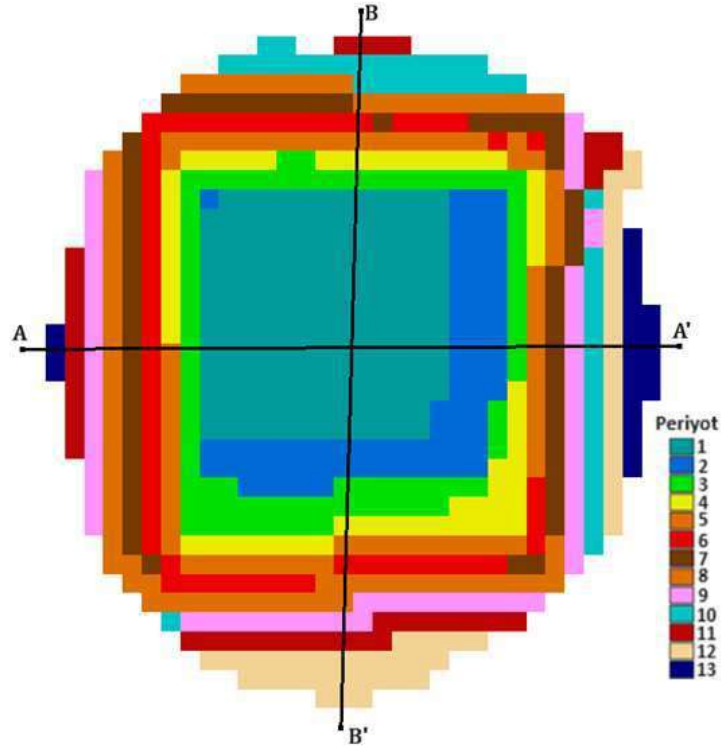
Şekil 6.23: Marvin malzeme tonaj ve NBD kıyaslamaları.



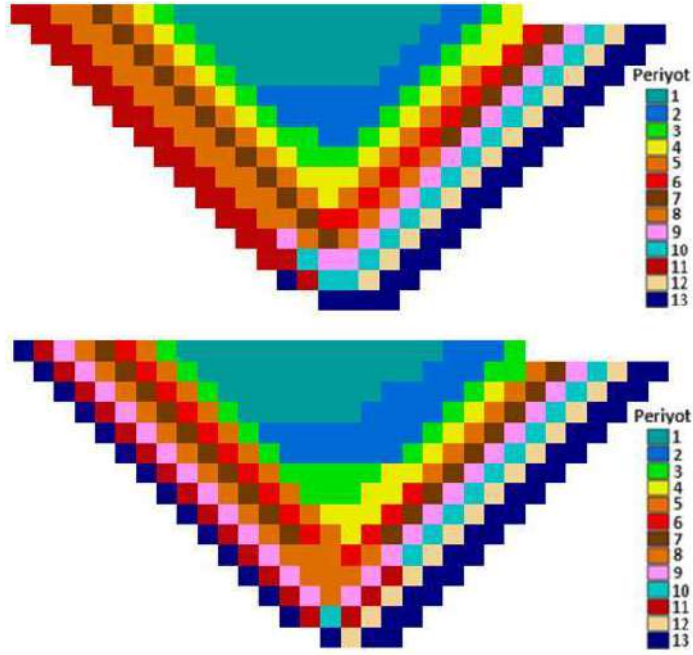
Şekil 6.24: Marvin blok modeli standart model çözümünün plan görünümü.



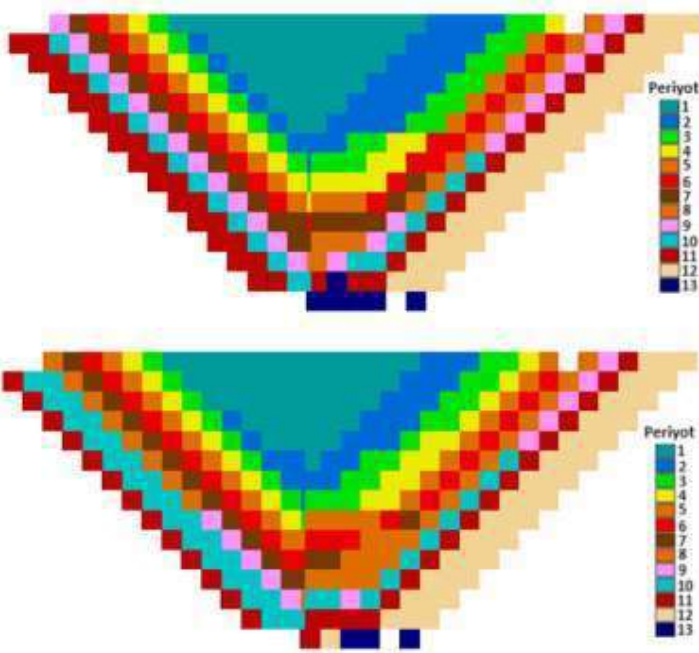
Şekil 6.25: Marvin blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.



Şekil 6.26: Marvin blok modelinde alınan kesit hatları..



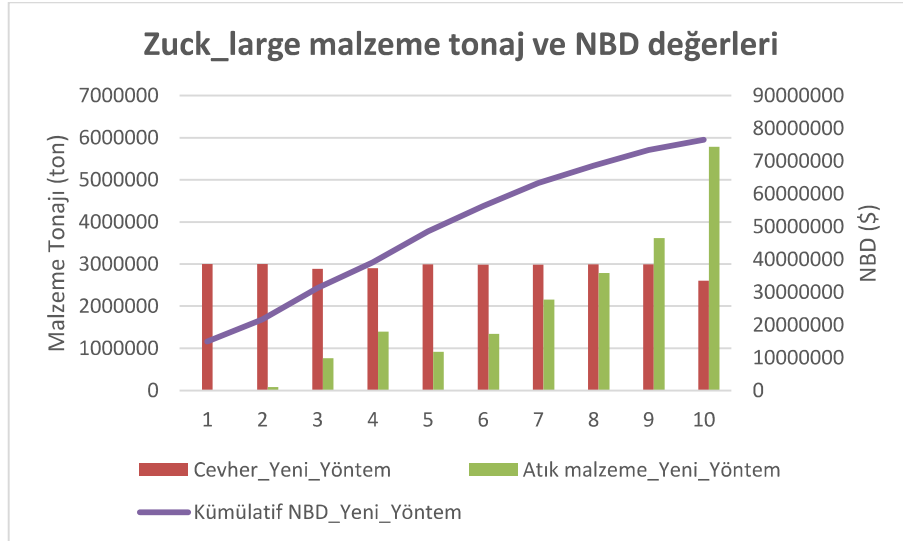
Şekil 6.27: Marvin blok modeli A-A' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).



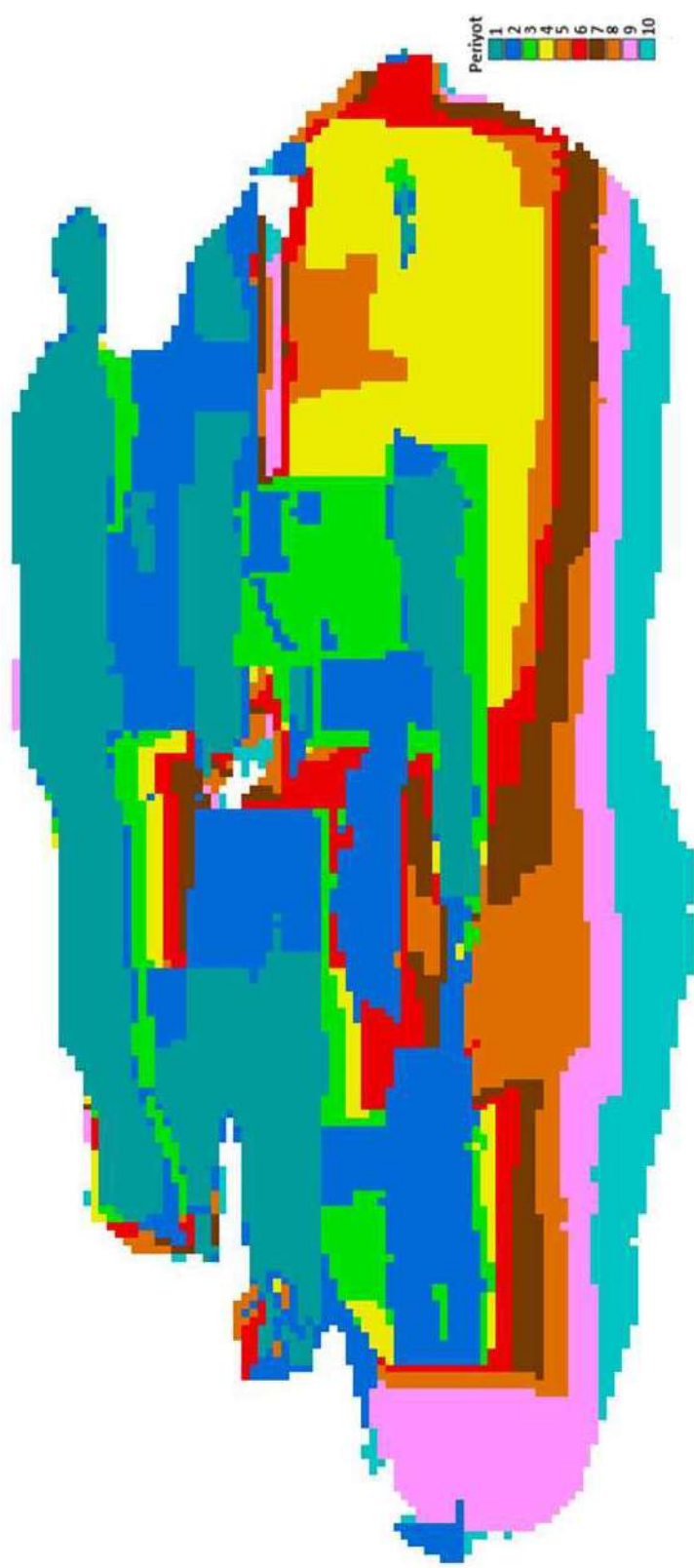
Şekil 6.28: Marvin blok modeli B-B' kesiti. Standart model (üst), tavsiye edilen yöntem (alt).

6.5 Zuck_large Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması

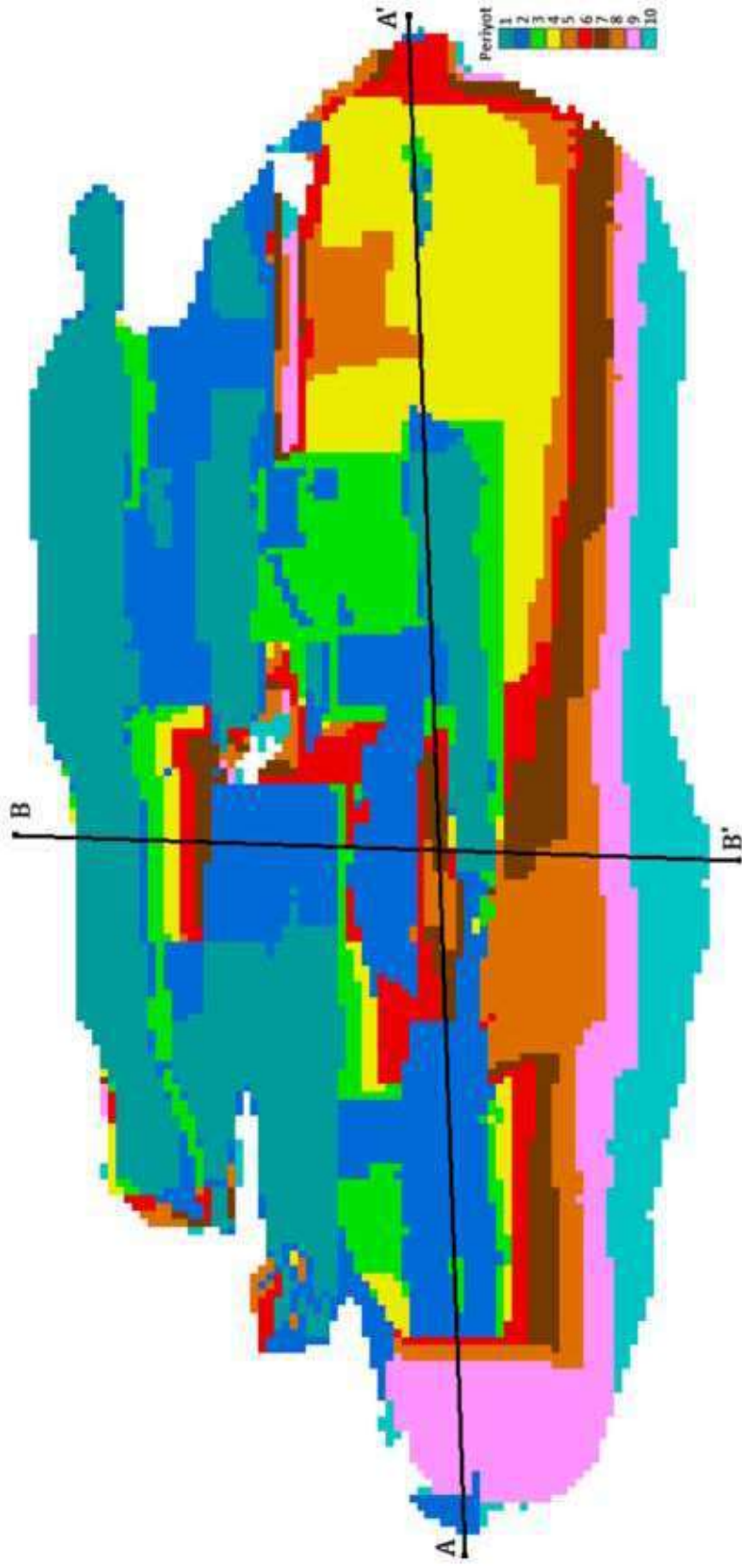
Önerilen yöntemin çözüm süresi üzerindeki etkilerinin gösterilebilmesi için, kullanılan yöntemde çözüm zamanı kısıtlaması olarak ilk önce 36000 sn daha sonra 86400 sn olarak sınırlar belirlenmiş ve standart tam sayı modeli 86400 sn'lik süre içerisinde bir çözüme ulaşamamıştır. Planlama yapılması planlanan periyot sayısı 10 periyot olarak seçilmiş ve önerilen yöntem bu modeli 2221 sn'de çözmeyi başarmıştır. Önerilen yöntemin kullanılması sonucu projenin NBD'i 76.6 M\$ olarak bulunmuştur. Literatürde paylaşılan ve problemin doğrusal programlama olarak rahatlatılmış halinin TopoSort algoritmasıyla elde edilmiş uygulanabilir en yüksek NBD değerinin 56.7 M\$ olduğu görülse de, o modelin çözümü aşamasında bu çalışmadan farklı olarak ekstra zenginleştirme kısıtları da kullanıldığı için TopoSort algoritmasıyla elde edilen sonuçlarla güvenilir bir kıyaslama yapılamamıştır. Fakat standart tam sayılı modelin 86400 sn'de çözüme ulaşamadığı bir senaryoda, tavsiye edilen yöntemin 2221 sn'de pratikte uygulanabilir bir çözüme ulaşabiliyor olması, bu yöntemin açık ocak işletmelerinin uzun vade üretim planlaması için alternatif bir yöntem olarak kullanılabilirliğinin başka bir göstergesidir. Şekil 6.28'de paylaşılan grafikte, önerilen yöntem ile çözülen modelin periyotlara göre ürettiği cevher miktarı, malzeme miktarı ve net bugünkü değerleri paylaşılmıştır. Kullanılan yöntemin cevher üretim kısıtlarını sağlamakta olduğu görülmüştür. Şekil 6.29, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'de yapılan uzun vade planlamasına ait plan, ve kesit görsellerine yer verilmiştir.



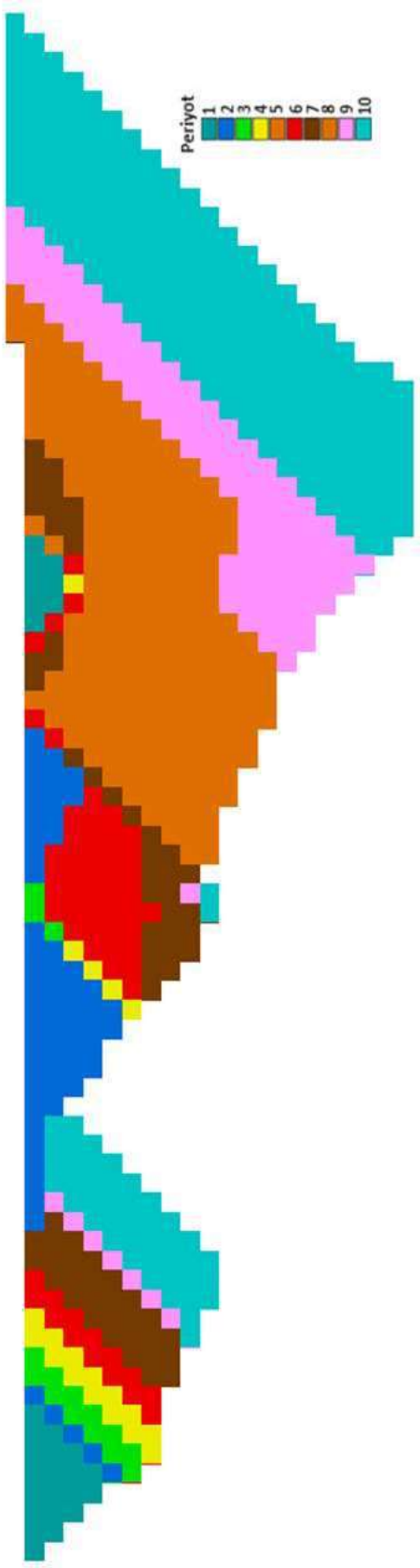
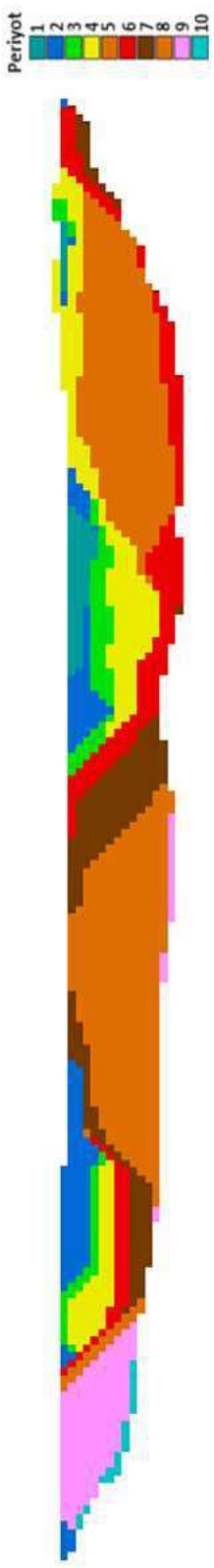
Şekil 6.29: Zuck_large blok modelinin önerilen yöntemle çözülmesi ile elde edilen malzeme miktarları ve net bugünkü değerler.



Şekil 6.30: Zuck_large blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.



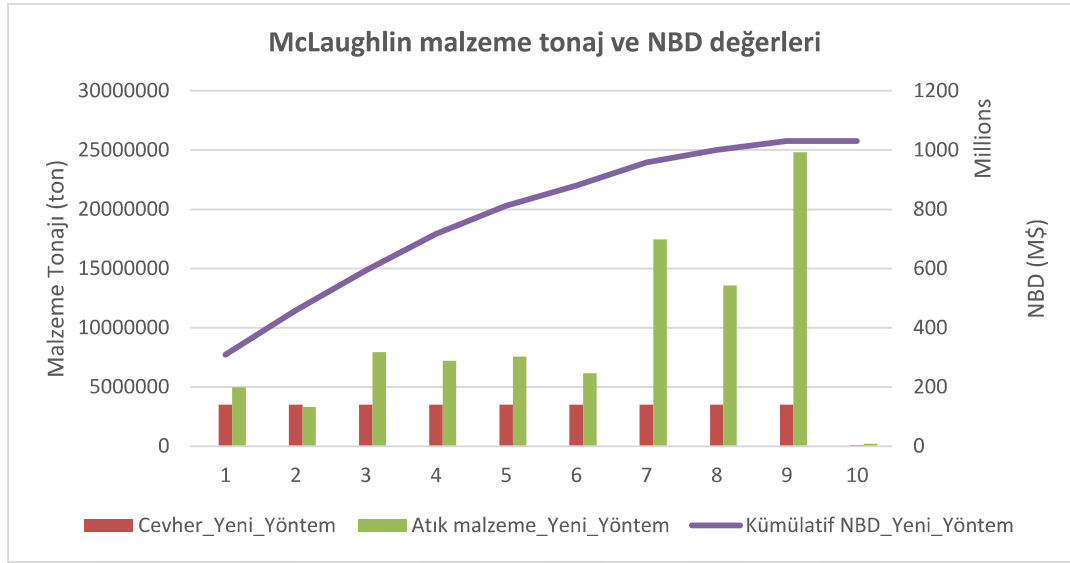
6.31: Zuck_large blok modelinde alınan kesit hatları.



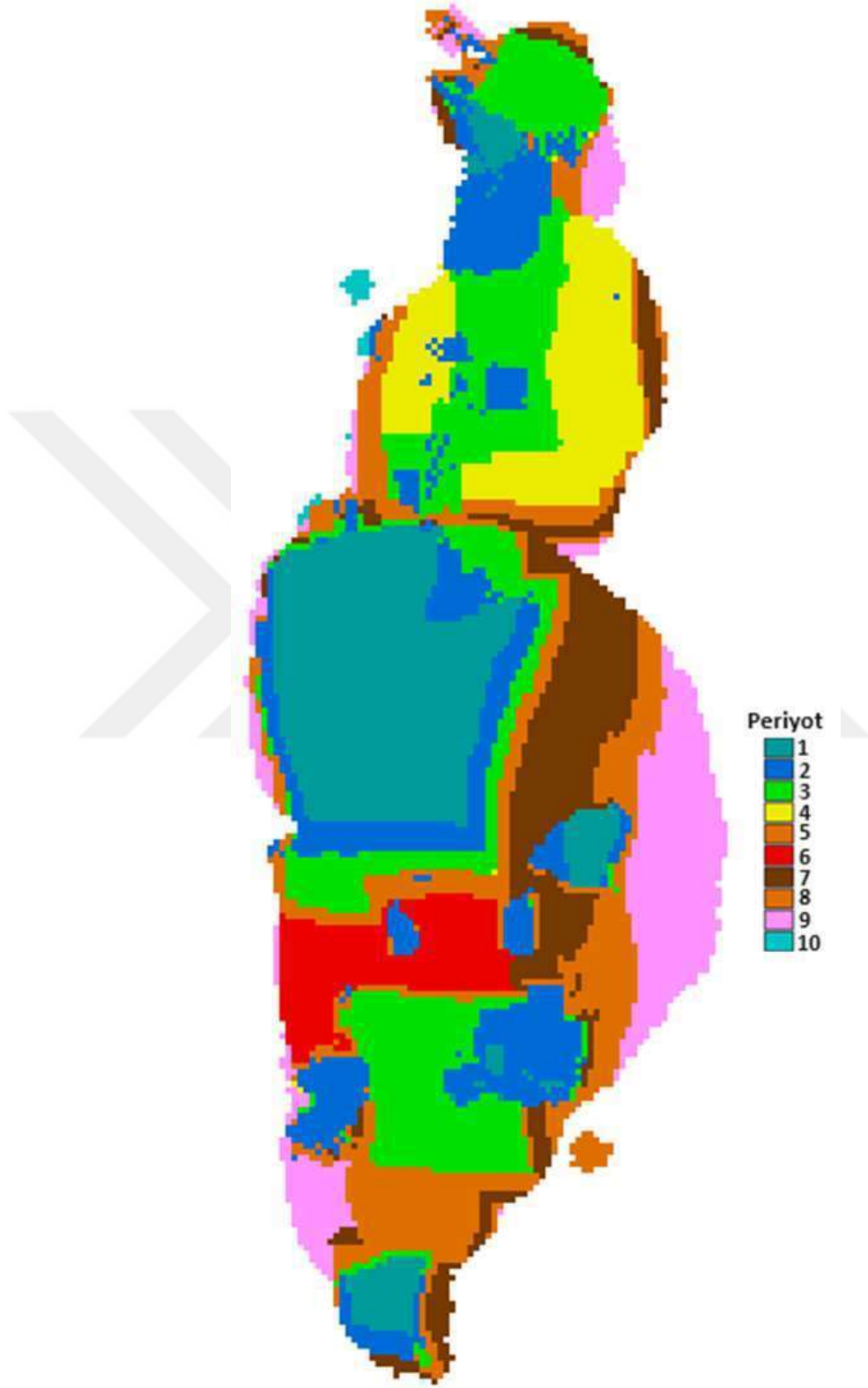
Şekil 6.32: Zuck_large blok modeli tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun A-A' kesiti. (üst), B-B' kesiti (alt).

6.6 McLaguhlin Blok Modelinin Uzun Vade Üretim Planlama Sonuçları ve Alternatif Yöntemlerle Kıyaslanması

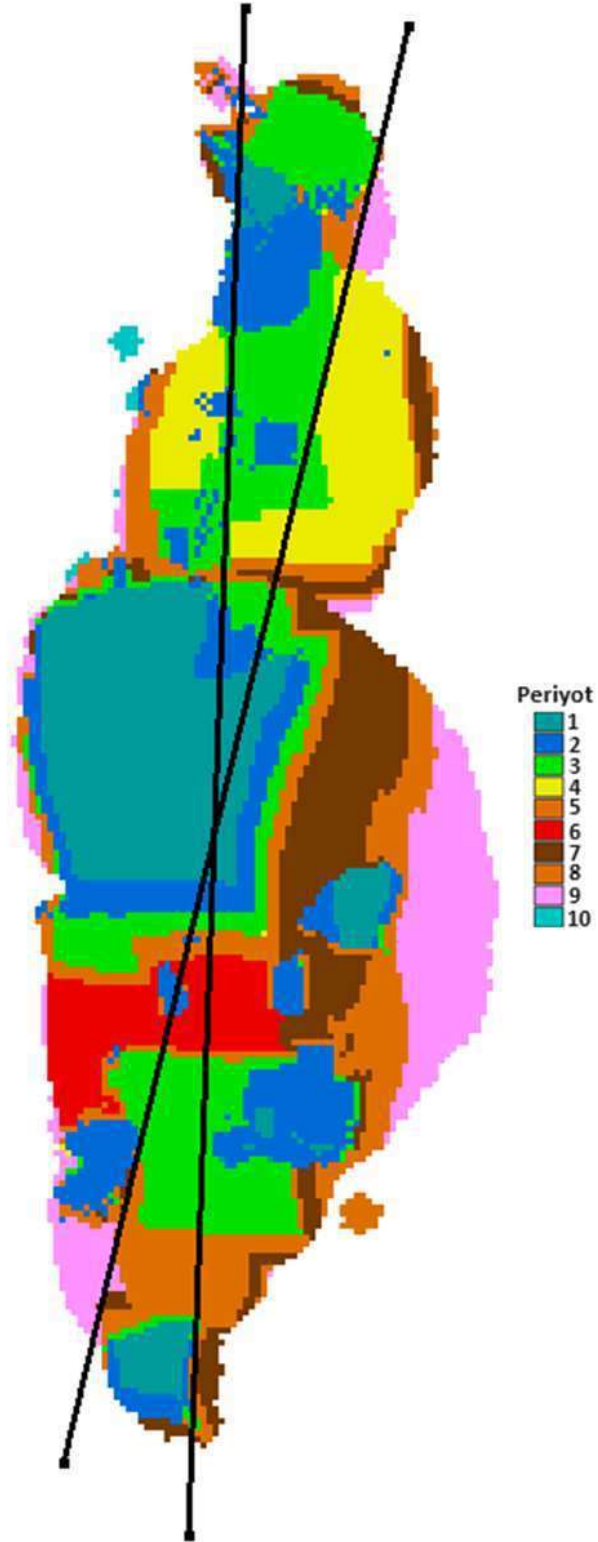
Önerilen yöntem çözüm süresini kısaltmanın yanısıra büyük ölçekli maden yataklarının uzun vade üretim planlaması yapılırken karşılaşılan bir diğer problem olan RAM yetersizliği problemine de bir çözüm üretmektedir. Bununla ilgili olarak paylaşılan sonuçta, veri seti içerisinde yer alan mcLaughlin isimli blok modelin 10 periyot için uzun vade üretim planlaması yapılmak istendiğinde problem çözüm süresinin sonuna gelinmeden, 16 GB RAM'e sahip olan bilgisayarın hafızası çözümü iletmeye yetmediğinden çözülememiştir. Öte yandan aynı modele, önerilen yöntem ile değişken sabitleme prosedürü uygulandığında çözüme ulaşmayı başarmanın yanı sıra, bu çözüme 3332 sn'de ulaşılarak, önerilen yöntemin büyük ölçekli maden yataklarının uzun vade üretim planlaması için etkin bir şekilde kullanılabilecek bir yöntem olduğu bir kez daha ortaya konmuştur. Önerilen yöntemin kullanılması sonucu projenin NBD'i 1031.2 M\$ olarak bulunmuştur. TopoSort algoritmasıyla elde edilen uygulanabilir en yüksek NBD 1073.3 M\$ olarak paylaşılmıştır. NBD'in %4 oranında düşük çıkmasının en büyük sebebi yine önerilen yöntemin esneklik dezavantajıdır. Önerilen yöntem, bu dezavantajını, çözülmesi güç olan problemlere kısa sürede uygulanabilir çözümler üretebiliyor olmasıyla telafi etmektedir. Şekil 6.32'de paylaşılan grafikte, önerilen yöntem ile çözülen modelin periyotlara göre ürettiği cevher miktarı, malzeme miktarı ve net bugünkü değerleri paylaşılmıştır. Kullanılan yöntemin cevher üretim kısıtlarını sağlamakta olduğu görülmüştür. Şekil 6.33, Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'de yapılan uzun vade planlamasına ait plan, ve kesit görsellerine yer verilmiştir.



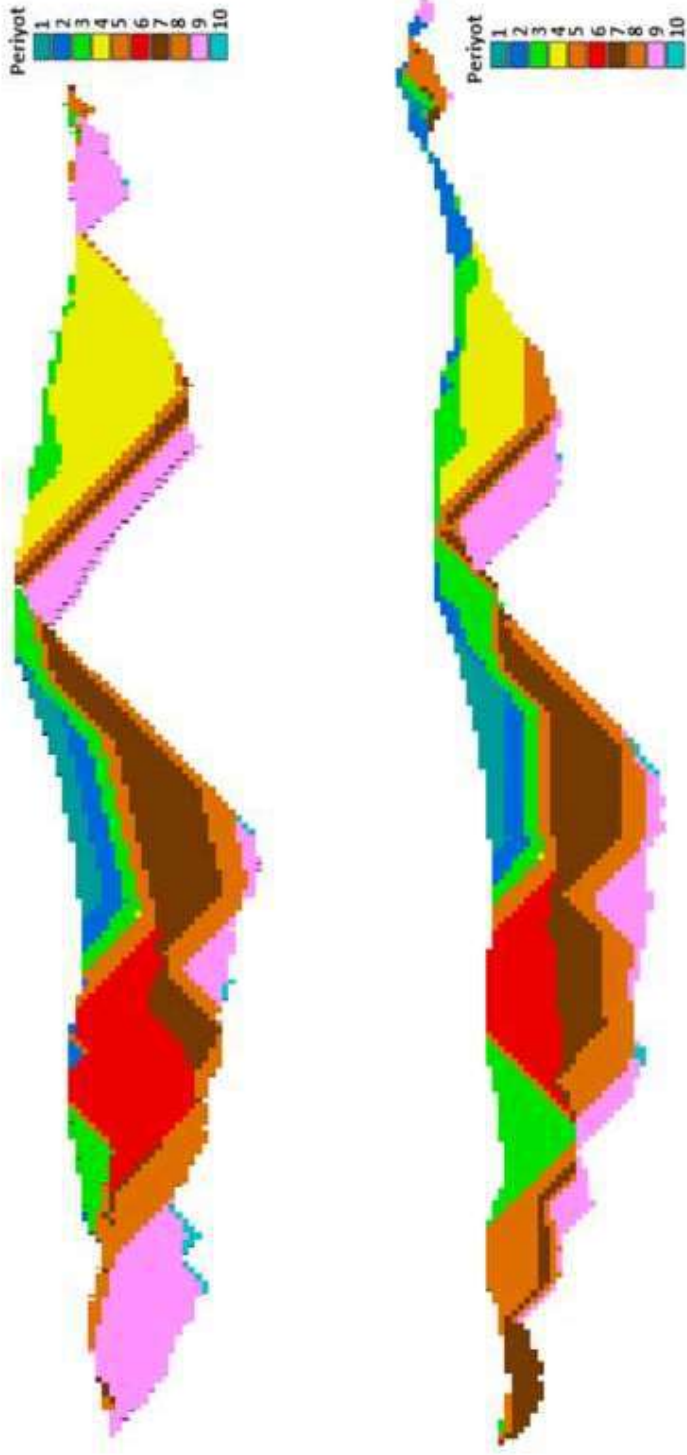
Şekil 6.33: McLaughlin blok modelinin önerilen yöntemle çözülmesi ile elde edilen malzeme miktarları ve net bugünkü değerler.



Şekil 6.34: McLaughlin blok modelinin tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun plan görünümü.

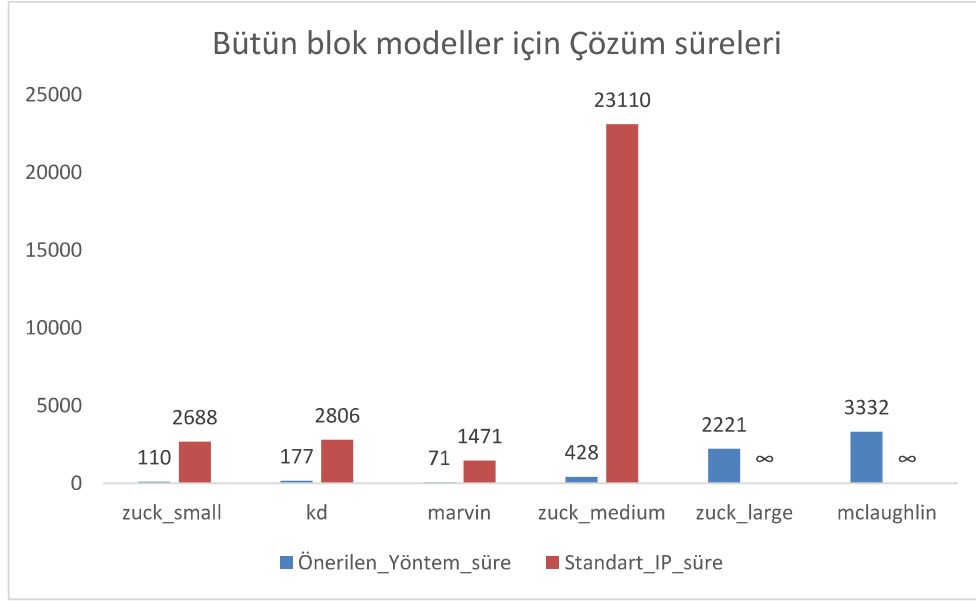


Şekil 6.35: McLaughlin blok modelinde alınan kesit hatları.

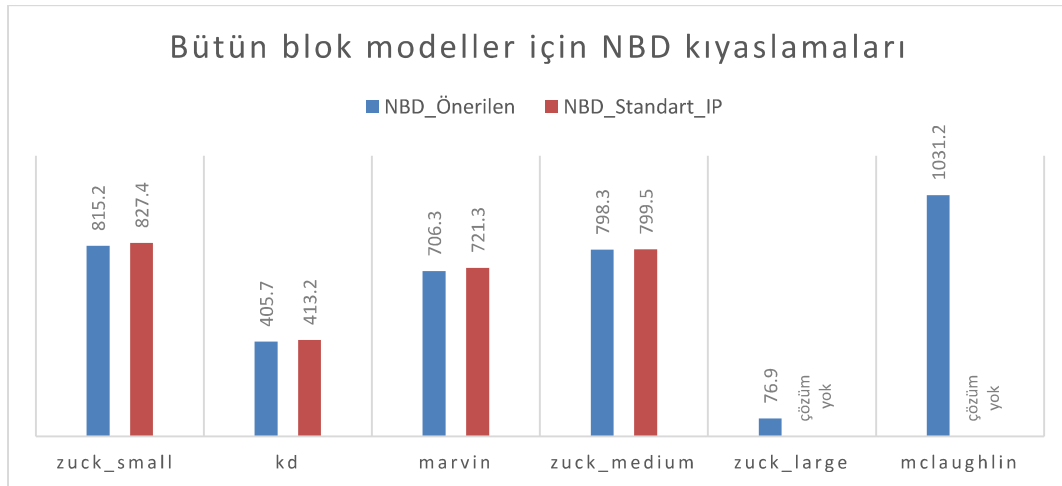


Şekil 6.36: McLaughlin blok modeli tavsiye edilen yöntemle elde edilen sonucun A-A' kesiti. (üst), B-B' kesiti (alt).

Yukarıdaki bölümlerde önerilen yöntemin normal bir karışık tam sayı modelin çözülebilme performansını ne oranda arttırabildiğine dair verilmiş olan detaylı açıklamaların özet bir gösterimi Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’de paylaşılmıştır. Bu şekillerde görüldüğü üzere önerilen yöntem, projelerin net bugünkü değerlerini yüksek oranda korurken problemin çözülme süresini de büyük oranda azaltmayı başarabilmektedir.



Şekil 6.37: Blok model ve çözüm süresi bazında önerilen yöntemin, tam sayı modellerle kıyaslanması.



Şekil 6.38: Blok model ve net bugünkü değer bazında önerilen yöntemin, tam sayı modellerle kıyaslanması.

7. TARTIŞMA ve SONUÇ

Açık ocak madenciliği, değerli madenlerin ekonomiye katılmasını sağlayarak, ulusların sosyo-ekonomik ilerlemesinde ve teknolojilerinin ilerlemesinde önemli bir rol oynamaktadır. Madencilik operasyonlarının ekonomik açıdan etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi, stratejik bir planlama yaklaşımının uygulanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda birçok araştırmacı, açık ocak madenciliği üretim planlaması konusunu ele almak için alternatif yaklaşımlar önermiştir. Bu planlama prosedürünün temel amacı net bugünkü değeri maksimuma çıkarmaktır. Bu amaçla kullanılan yöntemler maksimum akış algoritmaları, doğrusal programlama, tamsayılı programlama, karışık tam sayılı programlama, dinamik programlama, meta-sezgisel yöntemler ve simülasyon tekniklerinden oluşur. Açık ocak madenlerinde uzun vadeli üretim planlaması, maden bloklarının kazılma sırasının onlarca yıl gibi uzun bir süre boyunca optimize edilmesini içerir. Amaç, çeşitli kısıtlamaları ve hedefleri göz önünde bulundurarak operasyonun ekonomik değerini en üst düzeye çıkarmaktır.

Uzun vadeli üretim planlamasında dikkate alınması gereken temel faktörler şunlardır:

- Jeolojik ve jeoteknik veriler: Maden yataklarını, bunların kalitesini ve özelliklerini anlamak, doğru planlama için çok önemlidir.
- Madencilik ekipmanı ve altyapısı: Madencilik ekipmanının, nakliye sistemlerinin ve işleme tesislerinin kullanılabilirliği ve yetenekleri, planlama kararlarını etkiler.
- Üretim hedefleri ve pazar talebi: Üretim hedeflerinin pazar talebi ve fiyat dalgalanmalarıyla dengelenmesi karlılık açısından önemlidir.
- Çevresel ve sosyal hususlar: Çevre düzenlemelerine uyum ve yerel topluluklar üzerindeki etkinin en aza indirilmesi, planlamanın temel unsurlarıdır.
- Operasyonel kısıtlamalar: Şev stabilitesi ve stok yönetimi gibi faktörler dikkate alınmalıdır.

Uzun vadeli bir üretim programı oluşturmak için tamsayılı programlama gibi matematiksel optimizasyon teknikleri yaygın olarak kullanılır. Bu stratejilerin küçük veya orta büyüklükteki cevher yataklarının uzun vade üretim planlamalarının yapılması için başarılı olduğu kanıtlanmış olsa da, daha büyük maden yatakları söz konusu olduğunda etkinlikleri ve verimlilikleri sınırlıdır. Öyle ki blok model içerisindeki blok sayısı belli bir seviyenin üzerine çıktığında tam sayılı modellerin sonuca ulaşma süreleri hızlı bir şekilde artmakta ve hatta problem çözülemez hale gelebilmektedir. Bu tez çalışması, büyük ölçekli açık ocak madenlerinde uzun vade üretim planlaması (UVÜP) yapmak için tam sayılı modellerden faydalanılırken karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmeyi amaçlayan alternatif bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir.

Değişken sabitleme, belirli değişkenlerin değerini 0 veya 1'e sabitleyerek tamsayılı doğrusal programlama (ILP) modellerini çözmek için kullanılan bir tekniktir. Açık ocak madenciliği planlama bağlamında değişken sabitleme, ILP modelini basitleştirmek ve hesaplamayı geliştirmek için kullanılabilir. Değişken sabitleme uygulanarak, belirli değişkenler, probleme özgü özelliklere veya kısıtlamalara dayalı olarak belirli bir değere sabitlenebilir. Örneğin, belirli blokların çıkarılmasını engelleyen bilinen operasyonel kısıtlamalar varsa, bu değişkenler 0'a sabitlenebilir, bu da bu blokların çıkarılmayacağını gösterir. Tersine, özel gereksinimler nedeniyle çıkarılması gereken bloklar varsa, bunlara karşılık gelen değişkenler 1'e sabitlenebilir. Değişkenlerin sabitlenmesiyle ILP modeli küçülür ve basitleşir, bu da hesaplama sürelerinin daha hızlı olmasına yol açabilir. Bununla birlikte, çok fazla değişkenin sabitlenmesi esneklik kaybına ve potansiyel olarak optimal olmayan çözümlere yol açabileceğinden, değişken sabitlemenin dikkatli bir şekilde uygulanması gerektiğine dikkat etmek önemlidir. Genel olarak değişken sabitleme, problem boyutunu ve karmaşıklığını azaltarak açık ocak madenciliği üretim planlamasında ILP modellerinin çözüm verimliliğini artırmak için kullanılabilecek bir tekniktir.

Geleneksel yöntemlerde Açık ocak işletmelerinin UVÜP problemi, maden yatağının üretilmesi sonucu en yüksek getirinin elde edileceği nihai ocak sınırlarının parametrik analizinden oluşturulan iç içe geçmiş açık ocak sınırlarının yıllık üretim kapasitesini karşılayanlarının manuel olarak seçilmesiyle çözülür.

Bu çalışmanın amacı, geleneksel yaklaşımlardan türetilen ocak limitlerini kullanarak tamsayılı programlama modelindeki bazı karar değişkenlerini sabitleyerek problem boyutunu azaltmaktır. Bu sayede, bilgisayar kaynaklarının yetersizliğinden ötürü çözülemeyen veya çözülmesi için çok fazla zaman gereken modellerin, çözülebilmesi veya makul bir zamanda çözülebilmesi hedeflenmektedir.

Önerilen yöntemin etkinliği, mevcut literatürdeki örnek blok modellere uygulanmasıyla ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin çözüm süresini önemli ölçüde, %95'e kadar azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda sınırlı hesaplama kaynakları nedeniyle standart tam sayı programlama tekniğiyle çözülemeyen modellerin çözülmesine de olanak sağladığını göstermektedir. Bazı blok modellerde elde edilen net bugünkü değerin bir miktar azalması, önerilen bu yöntemin bir dezavantajı gibi görünse de, değişen madencilik kapasiteleri ve cevher satış fiyatlarına bağlı olarak çeşitli üretim planı alternatiflerinin kısa sürede incelenebilmesi sayesinde madencilik sektörüne önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Gelecekteki araştırma olanakları, madencilik faaliyetleri sırasında dikkate alınması gereken cevher tenörü, dikey ilerleme hızı ve minimum maden genişliği gibi parametrelerin planlama prosedürüne dahil edilmesini içermektedir. Minimum madencilik genişliği gibi operasyonel faktörlerin planlama sürecine dahil edilmesi, bu faktörlerin, önerilen yöntemin parametrik analiz aşamasına ilgili kısıtlamalar olarak entegre edilmesiyle sağlanabilir. Bu sayede, ilgili periyotlar için aday olarak seçilen kabuklar, tamsayılı doğrusal programlama modelini çözmeden önce verilen kısıtlamaları karşılayacaktır. Buna ek olarak, üretilecek cevher miktarının yanısıra toplam üretim kapasitesi kısıtlamalarını karşılamak için kullanılabilecek tekniklerin etkilerinin incelenmesi, ilerleyen çalışma alternatifleri arasında yer alabilir. Ayrıca meta-sezgisel yaklaşımların gelecekteki araştırma alternatifleri olarak düşünülmeleri dikkate değer olacaktır. Bu yöntemlerle, başlangıç aşamasında uygulanabilir bir üretim planı belirlenmesi zor olsa da, önerilen yöntemden elde edilen sonuçların bu yöntemlerin başlangıç çözümleri olarak kullanıldığı ve tavlama simülasyonu, tabu araması, karınca kolonisi optimizasyonu gibi çeşitli meta-sezgisel tekniklerin uygulanması yoluyla net bugünkü değerin arttırılmaya çalışması gelecek çalışmaların konuları arasında incelenebilir. Uzun vadeli üretim planlamasının ayrıntılarının

madenin özelliklerine, çıkarılan minerale ve sahaya özgü diğer faktörlere bağı olarak değışebileceğini unutmamak önemlidir.



KAYNAKLAR

- Alford, C. G., Whittle J.,** (1986). Application of Lerchs-Grossmann pit optimization to the design of open pit mines. *In AusIMM/IE Aust Newman Combined Group, Large Open Pit Mining Conference* (pp. 201-207).
- Alipour A., Khodaiari A. A., Jafari A., Tavakkoli-Moghaddam R.** (2022). “An integrated approach to open-pit mines production scheduling,” *Resources Policy*, vol. 75, doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102459.
- Ben-Awuah, E., Askari-Nasab, H., Maremi, A., Seyed Hosseini, N.,** (2018). Implementation of a goal programming framework for production and dyke material planning. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 32(8), 536-563.
- Bienstock, D., Zuckerberg, M.** (2010). Solving LP Relaxations of Large-Scale Precedence Constrained Problems. In: Eisenbrand, F., Shepherd, F.B. (eds) *Integer Programming and Combinatorial Optimization. IPCO 2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6080*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13036-6_1.”
- Caccetta L., Hill S. P.,** (2003). “An Application of Branch and Cut to Open Pit Mine Scheduling,” *Journal of Global Optimization*, vol. 27, pp. 346-365, doi: 10.1023/A:1024835022186.
- Carvalho, J. P., & Dimitrakopoulos, R.,** (2019). Effects of High-Order Simulations on the Simultaneous Stochastic Optimization of Mining Complexes. *Minerals*, 9(4), 210.
- Chatterjee, S., Dimitrakopoulos, R.,** (2020). Production scheduling under uncertainty of an open-pit mine using Lagrangian relaxation and branch-and-cut algorithm. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(5), 343-361.
- Dagdelen K., Johnson T. B.,** (1986). “Optimum Open Pit Mine Production Scheduling By Lagrangian Parameterization.”
- De Lara, M., Morales, N., Beeker, N.,** (2017). Adaptive strategies for the open-pit mine optimal scheduling problem. *arXiv preprint arXiv:1706.08264*.
- Dimitrakopoulos R., Ramazan S.,** (2008). “Stochastic integer programming for optimising long term production schedules of open pit mines: Methods, application and value of stochastic solutions,” *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 117, no. 4, pp. 155–160, doi: 10.1179/174328609X417279.

- Elevli, B.,** (1995). Open pit mine design and extraction sequencing by use of OR and AI concepts. *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 9(4), 149-453.
- Elkington T., Durham R.,** (2011). “Integrated Open Pit Pushback Selection And Production Capacity Optimization,” *Journal of Mining Science*, vol.47, pp. 177-190, doi: 10.1134/S1062739147020055.
- Elsayed S., Sarker R., Essam D., Coello C. A.,** (2020). “Evolutionary approach for large-Scale mine scheduling,” *Information Sciences*, vol. 523, pp. 77–90, doi: 10.1016/j.ins.2020.02.074.
- Erarslan, K.** (1996). Development of a model for open pit limits optimization integrated with a sequencing system. [Ph.D. - Doctoral Program]. Middle East Technical University.
- Espinoza D., Goycoolea M., Moreno E., Newman A.,** (2013). “MineLib: A library of open pit mining problems,” *Annals of Operations Research*, vol. 206, no. 1, pp. 93–114, doi: 10.1007/s10479-012-1258-3.
- Fathollahzadeh, K., Cigla, M., Mardaneh, E., Asad, W.,** (2021). A new mathematical model of open pit mine production scheduling with linear stockpile formulation.
- Gamache M., Auger, G.,** (2000). Analysis of maximum flow algorithm for ultimate pit counter problems. *Cahiers du GERAD. Report no: GERAD-G-00-57*.
- Gershon M. E.,** (1982). “Optimal mine production scheduling: evaluation of large-scale mathematical programming approaches”, *International Journal of Mining Engineering*, vol. 1, pp. 315–329, doi: 10.1007/BF00881548.
- Gershon, M.E.,** (1987). An open pit production scheduler: algorithm and implementation. *Mining Engineering*, 793-796.
- Gholamnejad J., Osanloo M.,** (2007). “Using chance constrained binary integer programming in optimising long term production scheduling for open pit mine design,” *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 116, no. 2, pp. 58–66, doi: 10.1179/174328607X191074.
- Gholamnejad J., Azimi A., Lotfian R., Kasmaeeyazdi S., Tinti F.,** (2020). “The application of a stockpile stochastic model into long-term open pit mine production scheduling to improve the feed grade for the processing plant,” *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, vol. 35, no. 4, pp. 115–129, doi: 10.17794/rgn.2020.4.10.
- Gholamnejad J., Lotfian R., Kasmaeeyazdi S.,** (2020). “A practical, long-term production scheduling model in open pit mines using integer linear programming,” *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 120, doi: 10.17159/2411.
- Gilani S. O., Sattarvand J.,** (2016). “Integrating geological uncertainty in long-term open pit mine production planning by ant colony optimization,” *Computers & Geosciences*, vol. 87, pp. 31–40, doi: 10.1016/j.cageo.2015.11.008.
- Gilani, S. O., Sattarvand, J., Hajihassani, M., Abdullah, S. S.,** (2020). A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*, 68, 101738.

- Hasözdemir K., Erçelebi S.G.,** (2019). Açık İşletme Yöntemi İle Üretim Yapacak Olan Bir Maden İşletmesinin Optimum Üretim Planlaması. *Türkiye 26. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*.
- Hochbaum, D. S., Chen, A.,** (2000). Performance analysis and best implementation of old and new algorithms for the open-pit mining problem, *Operations Research*, 48 (6), 894–914.
- Hochbaum, D. S.,** (2001). New-old algorithm for minimum-cut and maximum-flow in closure graphs, *Networks: An International Journal*, 37 (4), 171–193.
- Hochbaum, D. S.,** (2008). “The pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum-flow problem,” *Operations Research*, vol. 56, no. 4, doi: 10.1287/opre.1080.0524.
- Jamshidi M., Osanloo M.,** (2018). “Optimizing mine production scheduling for multiple destinations of ore blocks,” *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 53, no. 2, pp. 99–110, doi: 10.3329/bjsir.v53i2.36670.
- Jélvez E., Morales N., Nancel-Penard P., Peypouquet J., Reyes P.,** (2016). “Aggregation heuristic for the open-pit block scheduling problem,” *European Journal of Operational Research*, vol. 249, no. 3, pp. 1169–1177, doi: 10.1016/j.ejor.2015.10.044.
- Johnson, T. B.,** (1968). “Optimum Open-Pit Mine Production Scheduling,” in *AIME, International Computer Applications and Operations Research in Mineral Industry*, Salt Lake City, Utah, 1969.
- Johnson, T. B., Sharp, W. R.** (1971). A Three-dimensional dynamic programming method for optimal ultimate open pit design (*Vol. 7553*). Bureau of Mines, US Department of the Interior.
- Kakha, G., Monjazi, M.,** (2017). Push Back Design in Two-element Deposits Incorporating Grade Uncertainty (Research Note). *International Journal of Engineering*, 30(8), 1279-1287.
- Khan A.,** (2018). “Long-term production scheduling of open pit mines using particle swarm and bat algorithms under grade uncertainty,” *Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy*, vol. 118, no. 4, pp. 361–368, doi: 10.17159/2411-9717/2018/v118n4a5.
- Khan, A., Asad, M. W. A.,** (2020). An optimal cut-off grade policy under diverse stockpile handling strategies in open-pit mining operations. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1-11.
- Kumral M.,** (2012). “Production planning of mines: Optimisation of block sequencing and destination,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 26, no. 2, pp. 93–103, doi: 10.1080/17480930.2011.644474.
- Kumral, M., & Sari, Y. A.,** (2017). An application of possibilistic programming to production sequencing of mining parcels. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 12(2), 79-88.
- Leite A., Dimitrakopoulos R.,** (2014). “Stochastic optimization of mine production scheduling with uncertain ore/metal/waste supply,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 755–762, doi: 10.1016/j.ijmst.2014.10.004.

- Lagos, T., Armstrong, M., Homem-de-Mello, T., Lagos, G., Sauré, D.,** (2020). A framework for adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Optimization and Engineering*, 1-36.
- Lamghari, A., & Dimitrakopoulos, R.,** (2020). Hyper-heuristic approaches for strategic mine planning under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 115, 104590.
- Lerchs H., Grossmann L.,** (1965). "Optimum Design of Open-Pit Mines," Joint C.O.R.S. and O.R.S.A. Conference, Montreal, vol. 68.
- Liu G., Guo W., Fu E., Yang C., Li J.,** (2023). "Dynamic optimization of open-pit coal mine production scheduling based on ARIMA and fuzzy structured element," *Frontiers in Earth Science*, vol. 10, doi: 10.3389/feart.2022.1040464.
- Liu S.Q., Kozan E., Corry P., Masoud M., Luo K.,** (2023). "A real-world mine excavators timetabling methodology in open-pit mining," *Optimization and Engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 1493–1535, doi: 10.1007/s11081-022-097414.
- Mai N. L., Topal E., Erten O.,** (2018). "A new open-pit mine planning optimization method using block aggregation and integer programming," *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 118, no. 7, pp. 705–714, doi: 10.17159/2411-9717/2018/v118n7a4.
- Mai N. L., Topal E., Erten O., Sommerville B.,** (2019). "A new risk-based optimisation method for the iron ore production scheduling using stochastic integer programming," *Resources Policy*, vol. 62, pp. 571–579, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.11.004.
- Maleki, M., Jélvez, E., Emery, X., Morales, N.,** (2020). Stochastic open-pit mine production scheduling: a case study of an iron deposit. *Minerals*, 10(7), 585.
- Mokhtarian M., Sattarvand J.,** (2018). "Integration of commodity price uncertainty in long-term open pit mine production planning by using an imperialist competitive algorithm," *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 118, no. 2, pp. 165–172, doi: 10.17159/2411-9717/2018/v118n2a10.
- Montiel L., Dimitrakopoulos R.,** (2015). "Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: An uncertainty-based approach," *European Journal of Operations Research*, vol. 247, no. 1, pp. 166–178, doi: 10.1016/j.ejor.2015.05.002.
- Moreno E., Rezakhah M., Newman A., Ferreira F.,** (2017). "Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 260, no. 1, pp. 212–221, doi: 10.1016/j.ejor.2016.12.014.
- Morales, N., Seguel, S., Cáceres, A., Jélvez, E., Alarcón, M.,** (2019). Incorporation of geometallurgical attributes and geological uncertainty into long-term open-pit mine planning. *Minerals*, 9(2), 108.
- Muñoz G., Espinoza D., Goycoolea M., Moreno E., Queyranne M., Letelier O.R.,** (2018). "A study of the Bienstock–Zuckerberg algorithm: applications in mining and resource constrained project scheduling," *Computational*

Optimization and Applications, vol. 69, no. 2, pp. 501–534, doi: 10.1007/s10589-017-9946-1.

Nancel-Penard P., Morales N., Cornillier F., (2022). “A recursive time aggregation-disaggregation heuristic for the multidimensional and multiperiod precedence-constrained knapsack problem: An application to the open-pit mine block sequencing problem,” *European Journal of Operations Research*, vol. 303, no. 3, pp. 1088–1099, doi: 10.1016/j.ejor.2022.04.005.

Navarra, A., Grammatikopoulos, T., & Waters, K., (2018). Incorporation of geometallurgical modelling into long-term production planning. *Minerals Engineering*, 120, 118-126.

Onur, A. H., Dowd, P., (1993). Open-pit optimization- Part 2: Production scheduling and inclusion of roadways. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section A-Mining Industry*, vol. 102, pp. 105-113.

Özkan, M., Erçelebi, S. G., (2014). Açık Ocak Nihai Sınırlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 2(3), 38-53.

Özkan, M., (2015). Açık işletmelerde optimum üretim planlamasında yeni bir yöntem geliştirilmesi.

Paithankar A., Chatterjee S., (2019). “Open pit mine production schedule optimization using a hybrid of maximum-flow and genetic algorithms,” *Applied Soft Computing Journal*, vol. 81, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105507.

Paithankar, A., Chatterjee, S., Goodfellow, R., Asad, M. W. A., (2020a). Simultaneous stochastic optimization of production sequence and dynamic cut-off grades in an open pit mining operation. *Resources Policy*, 66, 101634.

Paithankar, A., Chatterjee, S., Goodfellow, R., (2020b). Open-pit mining complex optimization under uncertainty with integrated cut-off grade based destination policies. *Resources Policy*, 101875.

Paricheh, M., & Osanloo, M., (2020). Concurrent open-pit mine production and in-pit crushing–conveying system planning. *Engineering optimization*, 52(10), 1780-1795.

Picard, J. C., Smith, B. T., (2004). Parametric maximum flows and the calculation of optimal intermediate counters in open pit mine design, *INFOR* 42 (2), 143–153

Quigley, M., Dimitrakopoulos, R., Grammatikopoulos, T., (2018). Risk-resilient mine production schedules with favourable product quality for rare earth element projects. *Mining Technology*, 127(1), 41-55.

Ramazan S., Dagdelen K., Johnson T. B., (2005). “Fundamental tree algorithm in optimising production scheduling for open pit mine design,” Institution of Mining and Metallurgy. *Transactions. Section A: Mining Technology*, vol. 114, no. 1, doi: 10.1179/037178405X44511.

Ramazan S., Dimitrakopoulos R., (2018). “Stochastic optimisation of long-term production scheduling for open pit mines with a new integer programming formulation,” in *Advances in Applied Strategic Mine Planning*, Springer International Publishing, pp. 139–153. doi: 10.1007/978-3-319-69320-0_11.

- Rezakhah, M., Moreno, E., Newman, A.,** (2020). Practical performance of an open pit mine scheduling model considering blending and stockpiling. *Computers & Operations Research*, 115, 104638.
- Rimélé A., Dimitrakopoulos R., Gamache M.,** (2020). “A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty,” *Resources Policy*, vol. 65, doi: 10.1016/j.resourpol.2019.101570.
- Roman, R. J.,** (1974). The role of time value of money in determining an open pit mining sequence and pit limits. In *Proc. 12th Symp. Application Computers and Operation Research in the Mineral Industry*.
- Senécal, R., Dimitrakopoulos, R.,** (2020). Long-term mine production scheduling with multiple processing destinations under mineral supply uncertainty, based on multi-neighbourhood Tabu search. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(7), 459-475.
- Sepúlveda, G. F., Álvarez, P. J., Bedoya, J. B.,** (2020). Stochastic optimization in mine planning scheduling. *Computers & Operations Research*, 115, 104823.
- Tahernejad, M. M., Khalo Kakaei, R., Ataei, M.,** (2018). Analyzing the effect of ore grade uncertainty in open pit mine planning; A case study of Rezvan iron mine, Iran. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 52(1), 53-60.
- Tolouei K., Moosavi E.,** (2020). “Production scheduling problem and solver improvement via integration of the grey wolf optimizer into the augmented Lagrangian relaxation method,” *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 12, doi: 10.1007/s42452-020-03758-z.
- Tolouei, K., Moosavi, E., Tabrizi, A. H. B., Afzal, P., Bazzazi, A. A.,** (2020a). Improving performance of open-pit mine production scheduling problem under grade uncertainty by hybrid algorithms. *Journal of Central South University*, 27(9), 2479-2493.
- Tolouei, K., Moosavi, E., Tabrizi, A. H. B., Afzal, P., Bazzazi, A. A.,** (2020b). An optimisation approach for uncertainty-based long-term production scheduling in open-pit mines using meta-heuristic algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1-26.
- Tolouei K., Moosavi E., Gholinejad M.,** (2021). “An effective MIP model based on grey wolf optimizer for lot-sizing LTPSOP in open-pit mines under uncertainty”, *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, doi: 10.1007/s12517-021-07636-9/Published.
- Tolouei K., Moosavi E.,** (2023). “Optimization of the production scheduling problem in open-pit mines to maximize the net present value using the human mental search algorithm,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 16, no. 1, doi: 10.1007/s12517-022-11067-5.
- Tolwinski, B., Underwood, R.,** (1992). An algorithm to estimate the optimal evaluation of an open pit mine. *Proceedings of the 23rd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in The Mineral Industries*. 399-409.

- Xu X., Gu X., Wang Q., Gao X., Liu J., Wang Z., Wang X.,** (2018). “Production scheduling optimization considering ecological costs for open pit metal mines,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 180, pp. 210–221, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.135.
- Xu X., Gu X., Wang Q., Zhao Y., Kong W., Zhu Z., Wang F.,** (2023). “Enumeration optimization of open pit production scheduling based on mobile capacity search domain,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, doi: 10.1038/s41598-022-27336-y.
- Vallejo, M. N., Dimitrakopoulos, R.,** (2019). Stochastic orebody modelling and stochastic long-term production scheduling at the KéMag iron ore deposit, Quebec, Canada. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(7), 462-479.
- Yanalak, M.,** (2002). Yön ve Ters Uzaklık Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon. *Harita Dergisi*, 127(5).
- Yiğit, C. Ö.,** (2003). Elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliğe dönüşümünde kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhao, H., Kim, Y.C.,** (1992). A new optimum pit limit design algorithm. *Proceedings of the 23rd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in The Mineral Industries*, 423-434.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kürşat HASÖZDEMİR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden
- **Yüksek Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017’ den bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Hasözdemir, K., Ercelebi S.G. 2024.** Enhancing the Performance of Integer Models for Addressing the Long-Term Production Planning Problem in Open Pit Mines by Decision Variable Fixation Based on Parametric Analysis of the Final Pit Limit. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*, vol. 10, in press.