

**EĞİMLİ KALIN KÖMÜR DAMARLARINDA
GÖÇERTMELİ UZUNAYAK YÖNTEM
VERİMLİLİĞİNİN FİZİKSEL MODELLEME İLE
ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF LONGWALL CAVING METHOD
EFFICIENCY IN INCLINED THICK COAL SEAMS
BY PHYSICAL MODELLING**

ARİF ÇELİK

PROF. DR. YILMAZ ÖZÇELİK

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2022

İlmin Yolunda İlerlemeleri Dileğiyle,
Oğullarım **Çınar** ve **Kuzey ÇELİK**'e İthafen...



ÖZET

EĞİMLİ KALIN KÖMÜR DAMARLARINDA GÖÇERTMELİ UZUNAYAK YÖNTEM VERİMLİLİĞİNİN FİZİKSEL MODELLEME İLE ARAŞTIRILMASI

Arif ÇELİK

Doktora, Maden Mühendisliği Bölümü
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK
Mart 2022, 97 sayfa

Kalın kömür damarlarının üretiminde dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılan göçertmeli uzunayak üretim yöntemleri, eğimli kalın kömür damarlarında damarın eğiminde ve literatürde yatay kesitli tavan kömür göçertmeli üretim yöntemi olarak da adlandırılan damarın yatay kalınlığında ayak oluşturulmasıyla 2 farklı şekilde uygulanmaktadır.

Damarın yatay kalınlığından bir ayak oluşturarak uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yönteminde, göçertmeli yöntemlerde en yaygın araştırma yapılan konu olan ayak arkasındaki tavan kömürü kayıplarına ek olarak, ayağın kuyruk kısmının üzerinde bir tavan kömürü kayıp bölgesi daha oluşmaktadır. Bu bölgedeki tavan kömürü kaybı yöntemin verimliliğini önemli ölçüde etkilemesine rağmen, literatürde iki farklı tahkimat ünitesi çekim sırasının bu bölgedeki tavan kömürü kaybına etkisinin 2 boyutlu fiziksel ve sayısal model kullanılarak araştırıldığı çalışma haricinde başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında, göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliği, çalışma kapsamında geliştirilen ve 2 ve 3 boyutlu olarak kullanılabilen fiziksel bir model ile araştırılmıştır.

Geliştirilen fiziksel modelin laboratuvar testlerine uygunluğunun testi için ilk olarak Alpagut Dodurga Linyitleri yer altı işletmesinde saha çalışmaları yürütülmüş ve akabinde sahadan elde edilen veriler ile fiziksel model çalıştırılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde saha verileri ile fiziksel model verileri arasında; tavan kömürü kaybında %93,71, kaya karışım oranında %93,4 ve tavan kömürü akma açısında %93,63 oranında benzerlik tespit edilmiştir. Daha sonra, çalışma kapsamında 7'si 2 boyutlu, 43'ü 3 boyutlu olmak üzere toplamda 50 fiziksel model testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde tavan kömür yüksekliği, kömür damar eğimi ve ayak eğimi parametreleri ile literatürdeki çalışmaya benzer şekilde tahkimat ünitesi çekim sırası değişiminin göçermeli uzunayak üretim yöntem verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

5 farklı tavan kömür yüksekliği (4, 6, 8, 10 ve 12m) ve 6 farklı kömür damar eğiminde (32, 38, 45, 52, 60 ve 70°) yapılan testlerde, damar eğimindeki dikleşmeyle azalan tavan kömürü kaybının, tavan kömür yükseklik artışıyla arttığı tespit edilmiştir.

Yatay ve 10° ayak eğimi ile yapılan testlerde, tavan kömürü kaybında kayda değer bir değişim görülmezken kaya karışım oranının ayak eğimindeki yükselmeye arttığı tespit edilmiştir.

Tahkimat ünitesi çekim sırası değişiminin yöntem verimliliğine etkisi fiziksel modelde 2 ve 3 boyutlu olarak araştırılmıştır. 2 boyutlu testlerde 7 farklı tahkimat ünitesi çekim sırası kullanılmış, en ideal sonuca sahip 5 numaralı tahkimat ünitesi çekim sırası tasarımı (1-5-9-13-3-7-11-2-4-6-8-10-12-14) ile arazide uygulanan tahkimat ünitesi çekim sırasına kıyasla tavan kömürü kaybında %7,89 (%43,1'den %39,7'ye) ve kaya karışım oranında %44,8 (%46,4'den %25,6'ya) azalma sağlandığı tespit edilmiştir. 2 boyutlu fiziksel model testlerinin akabinde 5 numaralı tasarım, fiziksel modelde 3 boyutlu olarak 3 kez test edilmiş ve arazide uygulanan tahkimat ünitesi çekim sırasına kıyasla tavan kömürü kaybında %22,6 (%12,4'dan %9,6'ya) ve kaya karışım oranında %18,3 (%65,4'den %53,4'ye) azalma sağlandığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eğimli kalın kömür damarı, fiziksel modelleme, göçertmeli uzunayak üretim yöntemi, kaya karışım oranı, tavan kömürü kaybı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF LONGWALL CAVING METHOD EFFICIENCY IN INCLINED THICK COAL SEAMS BY PHYSICAL MODELLING

Arif ÇELİK

Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK

March 2022, 97 pages

The longwall top coal caving production methods, which are widely used throughout the world in the production of thick coal seams, are applied in two different ways in the slope of the seam in inclined thick coal seams and by forming a face in the horizontal thickness of the seam, which is also called the horizontal section top coal caving production method in the literature.

In the longwall top coal caving production method, which is applied by forming a face from the horizontal thickness of the seam, in addition to the top coal losses on the back of the face, which is the most widely researched subject in the caving methods, another top coal loss zone is formed above the tail part of the face. Although the top coal loss in this region significantly affects the efficiency of the method, no other study has been found in the literature, except for the study in which the effect of two different support unit drawing sequence on the top coal loss in this region was investigated using a 2D physical and numerical model.

For this reason, within the scope of this thesis, the efficiency of the longwall top coal caving production method was investigated with a physical model developed within the scope of the study and which can be used in 2 and 3 dimensions.

In order to test the suitability of the developed physical model for laboratory tests, firstly, field studies were carried out in Alpagut Dodurga Lignites underground enterprises, and then the physical model was run with the data obtained from the field. As a result of the studies, between the field data and the physical model data; 93.71% of the top coal loss, 93.4% of the rock mix ratio and 93.63% of the top coal flow angle were determined. Then, within the scope of the study, a total of 50 physical model tests were conducted, 7 of which were 2-dimensional and 43 of which were 3-dimensional. In the tests carried out, the effects of the top coal height, coal seam slope and face slope parameters and the change in the drawing sequence of the support unit, similar to the study in the literature, on the efficiency of longwall top coal caving production method were investigated.

In the tests performed at 5 different top coal heights (4, 6, 8, 10 and 12m) and 6 different coal seam slopes (32, 38, 45, 52, 60 and 70°), it was determined that the top coal loss, which decreases with steepening of coal seam slope, increases with an increase in the top coal height.

In horizontal and 10° face slope tests, it was found that the rock mixture ratio increased with an increase in the face slope, while there was no significant change in the top coal loss.

The effect of the change in the drawing sequence of the support unit on the method efficiency was investigated in 2 and 3 dimensions in the physical model. In the 2-dimensional tests, 7 different support unit drawing sequences were used, and it was determined that the most ideal result, the number 5 support unit drawing sequence design (1-5-9-13-3-7-11-2-4-6-8-10-12-14) reduced the top coal loss by 7.89% (from 43,1% to 39,7%) and the rock mixture ratio by 44.8% (from 46,4% to 25,6%) compared to the drawing sequence of the support unit applied in the field. After the 2D physical model tests, the design number 5 was tested 3 times in 3D in the physical model and it was found that there was a 22.6% (from 12.4% to 9.6%) reduction in top coal loss and an 18.3% (from 65.4% to 53.4%) reduction in rock mixture ratio compared to the drawing sequence of the support unit applied on the field.

Keywords: Inclined thick coal seam, longwall top coal caving, physical modelling, rock mixture ratio, top coal loss.

TEŞEKKÜR

Uzun ve zorlu doktora sürecinde beni her daim destekleyen, tez konusunun seçiminden tezin sonuçlanmasına dek beni sınırlamayıp özgür bırakan, tez çalışmasının sonuçlanmasında en büyük paya sahip olan, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum Saygıdeğer Hocam Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK'e

Tez izleme komitemde yer alarak değerli görüşleri ile çalışmalarımın şekillenmesinde önemli rol edinen, Saygıdeğer Hocalarım Prof. Dr. İhsan ÖZKAN'a ve Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER'e,

Tez değerlendirme jürisinin değerli üyeleri Kıymetli Hocalarım Prof. Dr. Yasin Dursun SARI'ya ve Dr. Öğr. Üyesi Emre YILMAZKAYA'ya,

Doktora sürecinin başlamasında büyük bir katkıya sahip olmakla birlikte, Değerli Hocam Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK ile tanışmama vesile olan ve TKİ İşletme Dairesi Başkanlığı görevinde iken desteklerini her daim hissettiğim Bozdağ Madencilik Genel Müdürü Sayın Ali SAĞIR'a,

Tez çalışması sürecinde desteklerini esirgemeyen TKİ İşletme Dairesi Başkanı Sayın Hüsni Erhan ÖZHAN'a ve ÇLİ Açık Ocak Üretim Şube Müdürü Murat İBAR'a,

Alpagut Dodurga Linyitleri yer altı işletmesinde yürütülen arazi çalışmalarında mesleki bilgi ve birikimlerini aktararak, desteklerini esirgemeyen TKİ Dodurga Kontrol Müdürü Sayın Oğuz SEMİZ'e ve YS Maden Genel Koordinatörü Sayın Mehmet Ali KARGI'ya,

Tez çalışması kapsamında yardımlarını esirgemeyen Babam İbrahim ÇELİK'e ve Kayınbabam Vedat GÜRLER'e,

Tez sürecinde ve hayatımın her anında gösterdikleri sabır, anlayış ve manevi desteklerden dolayı başta Sevgili Eşim olmak üzere Aileme,

TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

Arif ÇELİK

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amaç ve Kapsamı	4
1.2. Tezin İçeriği.....	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Kalın Damar Kömür Madenciliği	7
2.1.1. Bütün Damar Kalınlığının Kazısı	7
2.1.2. Dilimler Halinde Kazı	8
2.1.3. Göçertmeli Uzunayak Üretim Yöntemi	9
2.2. Tavan Kömürü Kaybı ve Kaya Karışım Oranı.....	12
2.3. Tavan Kömürü Çekme Mekanizması	17
2.4. Eğimli Kalın Kömür Damarı	22
2.5. Eğimli Kalın Kömür Damarlarında Göçertmeli Uzunayak Üretim Yöntemi ...	23
2.6. Fiziksel Model	27
3. MALZEME VE YÖNTEM	30
3.1. Fiziksel Modelleme.....	31
3.1.1. Fiziksel Model Oluşum Süreci.....	31
3.1.2. Fiziksel Modelde Kullanılacak Malzeme Seçimi	33
3.1.3. Fiziksel Model Uygunluk Testi	35
3.2. Test Süreci.....	35
3.2.1. Fiziksel Model Test Düzenekinin Ayarlanması.....	36
3.2.2. Tavan Kömürü Çekim Süreci	37
3.2.3. Kaya Karışım Oranı Hesabı.....	39
3.2.4. Çekim Bölgesi Üst Yüzeyinin Tespiti.....	40
3.2.5. Çekim Bölgesinin Çizim Programına Aktarımı ve Kömür Kaybının Tespiti.....	41

4. ARAZİ ÇALIŞMALARI	45
4.1. Çalışma Sahasının Genel Tanıtımı	45
4.1.1. Genel Jeoloji	47
4.1.2. Sondaj Çalışmaları ve Linyit Horizonunun Genel Özellikleri	48
4.1.3. Üretim Yöntemi	51
4.2. Arazi Çalışmaları	52
5. FİZİKSEL MODEL UYGUNLUK TESTİ	58
5.1. Fiziksel Model Test Düzenineğinin Ayarlanması	58
5.2. Tavan Kömürü Çekim İşlemi ve Kaya Karışım Oranının Hesabı.....	59
5.3. Tavan Kömürü Kaybının Tespiti.....	60
5.4. Arazi Verileri ile Fiziksel Model Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	61
5.4.1. Kaya Karışım Oranı	61
5.4.2. Tavan Kömürü Kaybı.....	61
5.4.3. Tavan Kömürü Akma Açısı.....	62
6. FİZİKSEL MODEL ÇALIŞMALARI	63
6.1. Kömür Damar Eğimi ve Tavan Kömür Yükseklik Değişiminin İncelenmesi ..	64
6.1.1. Kömür Damar Eğimi ve Tavan Kömür Yükseklik Değişiminin Çekilen Malzeme Miktarlarına Etkisi.....	68
6.1.2. Kömür Damar Eğimi ve Tavan Kömür Yükseklik Değişiminin Tavan Kömürü Kaybı ve Kaya Karışım Oranına Etkisi	69
6.1.3. Tavan Kömürü Miktarları Arasındaki İlişki.....	71
6.1.4. Tavan Kömürü Akma Açısı.....	72
6.2. Ayak Eğim Değişiminin İncelenmesi	74
6.2.1. Ayak Eğim Değişiminin Çekilen Malzeme Miktarlarına Etkisi.....	76
6.2.2. Ayak Eğim Değişiminin Tavan Kömürü Kaybı ve Kaya Karışım Oranına Etkisi	77
6.3. Tahkimat Ünitesi Çekim Sırası Değişiminin İncelenmesi.....	78
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
7.1. Sonuçlar	82
7.2. Öneriler	84
KAYNAKLAR	86
EKLER	96
ÖZGEÇMİŞ	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Bütün damar kalınlığının kazısı (Boughton, 2014).....	8
Şekil 2.2.	Dilimler halinde kazı üretim yöntemi (Yukarıdan aşağıya doğru)	9
Şekil 2.3.	Göçertmeli uzunayak üretim yöntemi	10
Şekil 2.4.	Tavan kömürü geri kazanım oranı ve kaya karışım oranı arasındaki ilişki (Zhu ve ark., 2018)	13
Şekil 2.5.	Tavan kömürü geri kazanım oranına a) kesme-göçertme yüksekliği oranının etkisi b) göçertme yüksekliğinin etkisi.....	14
Şekil 2.6.	Kömür madenlerinde karşılaşılan tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranları.....	15
Şekil 2.7.	Ayak ilerleme miktarının tavan kömürü kaybına etkisi (Zhang, Zhao ve Gao, 2011).....	16
Şekil 2.8.	Tahkimat ünitesi çekim sırasının tavan kömürü geri kazanım oranına etkisi (Wang ve ark., 2021)	17
Şekil 2.9.	Parça boyut dağılımı ve malzeme akma açısı arasındaki ilişki (Kvapil, 1992)	18
Şekil 2.10.	Yerçekimi etkisi ile malzeme akışı (Kvapil, 1965; Janelid ve Kvapil, 1966)	19
Şekil 2.11.	Tavan kömürü çekim gövdesi ve sınırlarına ait görsel (Zhu ve ark., 2018)	20
Şekil 2.12.	Tavan kömürü çekim gövdesi ve sınırlarına ait görsel (Wang ve ark., 2020b)	21
Şekil 2.13.	Tavan kömürü çekim gövdesi ve sınırlarına ait görsel (Zhang ve ark., 2020)	21
Şekil 2.14.	Eğimli damarlarda tavan kömürü çekim gövdesi (Wang, Wei ve Zhang, 2019a)	22
Şekil 2.15.	Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemleri	23
Şekil 2.16.	Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemlerinin uygulandığı kömür madenleri	24
Şekil 2.17.	Damarın yatay kalınlığında bir ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yöntemi.....	25

Şekil 2.18.	Ayağın kuyruk kısmının üzerinde oluşan tavan kömürü kaybı	25
Şekil 2.19.	Damar kalınlığı ve tavan kömürü kaybı arasındaki ilişki.....	26
Şekil 2.20.	Şekil 2.20. Fiziksel model örnekleri (Zhang, Zhao ve Gao, 2011; Fan, Zhang ve Wang, 2015; Kang ve ark., 2018; Liang ve ark., 2019; Song ve Konietzky, 2019; Wang, Wei ve Zhang, 2019a; Kang ve ark., 2020)....	27
Şekil 3.1.	3 boyutlu programda çizilen fiziksel modelin farklı açılardan görüntüsü	32
Şekil 3.2.	Fiziksel modelin imalatı yapıldıktan sonraki test öncesi genel görüntüsü	33
Şekil 3.3.	Fiziksel model test malzemesi	35
Şekil 3.4.	Bir laboratuvar testinde yürütülen birim faaliyetler.....	36
Şekil 3.5.	Fiziksel modelin tavan kömürü ve atık kaya ile doldurulması	37
Şekil 3.6.	Tavan kömürü çekim süreci.....	37
Şekil 3.7.	Çekilen malzemelere ait görsel.....	38
Şekil 3.8.	Bir fiziksel model testine ait çekilen malzeme miktarlarının çekim turu ve çekilen tahkimat ünitesine bağlı olarak değişiminin grafiksel görünümü.....	39
Şekil 3.9.	Çekim bölgesi üst yüzeyinin model üzerindeki konumunun tespiti a) çekim öncesi tavan kömürü üst yüzeyi b) çekim sonrası tavan kömürü üst yüzeyi.....	41
Şekil 3.10.	Taban kömürü alt ve üst yüzeylerinin çizim programına aktarımı a) fiziksel model görüntüsü b) çizim programı görüntüsü	42
Şekil 3.11.	Tavan kömürü çekim bölgesi.....	42
Şekil 3.12.	Tavan kömürü kaybı ve çekim bölgesi arasındaki ilişki	43
Şekil 4.1.	Çalışma sahasına ait yerbulduru haritası	45
Şekil 4.2.	ADL kömür üretim ve satış miktarı	46
Şekil 4.3.	Çalışma sahasına ait jeolojik harita (Kara ve ark., 1990).....	47
Şekil 4.4.	Genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesit (Kara ve ark., 1990).....	48
Şekil 4.5.	Sondaj bilgileri a) sondajların konumu b) jeolojik kesitler c) parçalı damarlara ait örnek sondaj stampları d) tek damara ait örnek sondaj stampları	50
Şekil 4.6.	Göçertmeli uzunayak üretim yöntemine ait örnek üretim panosu	51
Şekil 4.7.	B1 panosunun yer altı imalat planı üzerindeki konumu.....	52
Şekil 4.8.	Ölçüm bölgesinin B1 pano üzerindeki konumu.....	53

Şekil 4.9.	Ölçüm bölgesine ait ortalama kesit	54
Şekil 5.1.	ADL ölçüm bölgesi temsili kesitine uygun şekilde ayarlanan fiziksel model	58
Şekil 5.2.	Fiziksel modelden çekilen malzeme miktarları	59
Şekil 5.3.	Tavan kömürü çekim bölgeleri	60
Şekil 5.4.	Tavan kömürü akma sınırının a) ölçüm bölgesi temsili kesit üzerindeki görünümü b) çizim programı üzerindeki görünümü	62
Şekil 6.1.	Düşük tavan taşı yüksekliğinden kaynaklanan hatalı fiziksel model testi	63
Şekil 6.2.	Fiziksel model ve çizim programından belirlenen tavan kömürü miktarları arasındaki farklılık.....	64
Şekil 6.3.	Fiziksel model testlerinden çekilen malzeme miktarları.....	66
Şekil 6.4.	Son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile son 4 çekim turundan çekilen ortalama malzeme miktarı arasındaki farklılık	68
Şekil 6.5.	Damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin çekilen malzeme miktarlarına etkisi	69
Şekil 6.6.	Damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranına etkisi	70
Şekil 6.7.	Tavan kömür yükseklik değişimine bağlı olarak hesaplanan ve gerçekleşen tavan kömürü miktarlarındaki artış oranı	72
Şekil 6.8.	Fiziksel model testlerinde farklı yönlerde oluşan tavan kömürü akma açıları	73
Şekil 6.9.	Fiziksel model testlerinden çekilen malzeme miktarları.....	75
Şekil 6.10.	Ayak eğiminin çekilen malzeme miktarlarına etkisi.....	76
Şekil 6.11.	Ayak eğiminin tavan kömürü kaybına etkisi	77
Şekil 6.12.	Ayak eğiminin kaya karışım oranına etkisi	78
Şekil 6.13.	Tahkimat ünitesi çekim sırası değişimine ait 2 boyutlu test sonuçları....	79
Şekil 6.14.	Tahkimat ünitesi çekim sırası değişimine ait 3 boyutlu test sonuçları....	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Kömür damarının kalınlık açısından alt sınırı (Singh, 2004)	22
Çizelge 2.2.	Kömür damarının eğim sınıflaması.....	23
Çizelge 2.3.	Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan fiziksel modellere ait genel bilgiler ile araştırma konuları (Wang ve ark., 2021’den düzenlendi)	28
Çizelge 3.1.	Fiziksel ve sayısal modelleme çalışmalarının karşılaştırılması (Song ve Konietztk, 2019’dan düzenlendi).....	30
Çizelge 3.2.	Fiziksel model geometrik ölçek faktörü.....	31
Çizelge 3.3.	Fiziksel modelde denenen malzeme boyutları ve karşılaşılan durumlar	34
Çizelge 4.1.	Ölçüm bölgesinde yer alan kesitlere ait ayrıntılı bilgiler	53
Çizelge 4.2.	Ölçüm bölgesinden alınan numunelere ait analiz sonuçları	55
Çizelge 4.3.	Arazi çalışmalarına ait sonuçlar.....	56
Çizelge 6.1.	Damar eğimi ve tavan kömür yükseklik testlerine ilişkin test parametreleri	65
Çizelge 6.2.	Ayak eğimi testlerine ait test parametreleri.....	74
Çizelge 6.3.	Tahkimat ünitesi çekim sırası testlerine ait test parametreleri.....	78

1. GİRİŞ

Dünya genelinde hızla artan insan nüfusu birçok sektörü doğrudan etkilemekte olup, son 10 yılda (2010-2020) gerçekleşen %12'lik nüfus artış hızı (Worldometer, 2021) paralelinde enerji sektöründe %10,1'lik bir artış (BP, 2021) meydana gelmiştir.

2020 yılı dünya enerji arzının %87,4'ü (BP, 2021) petrol, kömür, doğalgaz ve nükleer enerji gibi yenilenemez enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Enerjiye olan arzın her geçen gün artmasına karşın enerji kaynaklarının tükenebilir nitelikte olması enerjinin verimli bir şekilde kullanımı ile enerji kaynaklarının verimli bir şekilde üretilmesini son derece önemli bir konuma getirmiştir. Günümüzde enerji verimliliği tüm dünya devletlerinin en güncel araştırma konuları arasında yer almakta olup, uluslararası düzeyde enerji verimliliği üzerine gerçekleştirilen çalıştayların sayısı her geçen gün artmaktadır.

2020 yılı dünya enerji arzının karşılanmasında %27,20 gibi ciddi bir paya sahip olan kömürün görünür rezerv miktarı 1.074 milyar ton ve üretim miktarı 7,575 milyar ton olarak kayıtlara geçmiştir (BP, 2021).

Dünya genelinde %69'u (IEA,2018) elektrik ve ticari ısı üretimi amacıyla kullanılan kömürün üretimi, açık ocak ve yer altı işletmeciliği yöntemleri ile yapılmakta olup, açık ocak işletmeciliği ile üretilen kömür rezervlerindeki azalmaya bağlı olarak yer altı işletmeciliği her geçen gün önem kazanmaktadır. Ayrıca zorlu üretim koşullarından dolayı yer altı üretim yöntemleri ile üretimi pek tercih edilmeyen eğimli kalın kömür damarlarının üretimi de günümüzde enerjiye olan talebe bağlı olarak bir zorunluluk haline gelmiştir.

Günümüzde dünya kömür üretiminin büyük bir kısmı kalın kömür damarlarından (Xu, 2004; Le, 2010; Quang, 2010; Singh, 2011; Tercan ve ark., 2013; Bui, 2014; Zhang, Liu ve Pei, 2015 Bhandari ve ark., 2018; Jangara ve Öztürk, 2021) sağlanmakta olup, bu damarların üretiminde göçertmeli uzunayak üretim yöntemi dünya genelinde (Nath, 1979; Schneiderman, 1980; Yaşıtlı, 2002; Ertunç, 2007; Klishin ve Klishin, 2010; Quang, 2010; Singh, 2011; Zhao, Wang ve Su, 2017; Cao ve ark., 2020b; Shahani ve ark., 2020) yaygın bir şekilde kullanılan yer altı üretim yöntemidir. Yöntem eğimli kalın kömür damarlarında, damarın yatay kalınlığında (Uysal ve Demirci, 2006; Lai ve ark., 2014; Tu ve ark., 2015; Onica, Mihailescu ve Andrioni, 2016; Wang, Dou ve Wang, 2019; Rak ve

ark., 2020) ve damarın eğiminde (Yajun, Panfeng ve Fudong, 2014; Li, Wang ve Zhang, 2017; Lv ve ark., 2021) ayak oluşturulmak suretiyle 2 farklı şekilde uygulanmaktadır.

Üretim verimliliğinin son derece önemli olduğu günümüz koşullarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemi ile yürütülen üretim faaliyetlerinde tavan kömürü göçertme işleminin bir sonucu olarak açığa çıkan tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı yöntemin en temel problemlerini oluşturan bir üretim sorunudur (Özfırat 2007; Quang, 2010; Le, 2018). Genel olarak literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde tavan kömürü çekim işlemine bağlı olarak ayağın arkasında %20-35 seviyelerinde bir tavan kömürü kaybı olduğu görülmektedir (Doktan ve İnci, 1986; Özfırat, 2007; Tuan ve Thang, 2003; Quang, 2010; Wang, 2014). Burada belirtilen ayağın arkasında oluşan tavan kömürü kaybına ek olarak eğimli kalın kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayağın kuyruk kısmının üzerinde bir tavan kömürü kayıp bölgesi daha oluşmakta (Wang, Zhang ve Li, 2016) ve bu bölgede oluşan tavan kömürü kaybı üretim yönteminin verimliliğini önemli derecede etkilemektedir.

Göçertmeli yöntemlerde üretim verimliliği açısından ayak arkasında oluşan tavan kömürü kaybı (Huang ve ark., 2006; Özfırat, 2007; Huang ve ark., 2008; Liu, Huang ve Wu, 2009; Wang ve ark., 2014; Wang ve Song, 2015; Zhang ve ark., 2015; Wang, Zhang ve Li, 2016; Zhang, Wang ve Wei, 2018; Song ve Konietzky, 2019; Wang ve ark., 2020a) en yaygın araştırma konusu olmasına rağmen eğimli kalın kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayağın kuyruk kısmının üzerinde oluşan tavan kömürü kaybı ile ilgili literatürde iki farklı tahkimat ünitesi çekim sırasının bu bölgedeki tavan kömürü kaybına etkisinin 2 boyutlu fiziksel ve sayısal model kullanılarak araştırıldığı çalışma haricinde başka bir çalışma bulunmamaktadır (Wang, Zhang ve Li, 2016).

Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayağın kuyruk kısmının üzerinde oluşan tavan kömürü kaybına yönelik bir çalışmaya rastlanmamasının temel nedeninin yöntemin uygulamadaki damar eğimi ve damar kalınlığı olduğu düşünülmektedir.

Tavan kömürü çekim işleminde çekilen malzemenin akma açısı parça boyut dağılımına ve içsel sürtünme açısına bağlı olarak genellikle 55° ila 75° arasında değiştiğinden (Kvapil, 1992; Karadoğan, 2001; Song, Wei ve Zhang, 2018; Zhu ve ark., 2018; Song, Konietzky ve Herbst, 2020) dolaylı 75° 'den daha yüksek eğimli kalın kömür damarlarında

ayağın kuyruk kısmının üzerinde araştırma niteliği oluşturabilecek bir tavan kömürü kaybının oluşması söz konusu değildir.

Öte yandan damarın yatay kalınlığında bir ayak oluşturarak uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yöntemi uygulamada genellikle 30 metreden daha kalın kömür damarlarında (Lai ve ark., 2014; Wang, Dou ve Wang, 2019; Yang ve ark., 2020) tercih edilmekle birlikte yöntemin çok nadir de olsa 15 ila 30 metre arası kömür damar kalınlıklarındaki (Uysal ve Demirci, 2006; Torano ve ark., 2012) uygulamaları da mevcuttur. Burada 30 metreden daha kalın kömür damarlarında ayağın kuyruk kısmının üzerinde oluşan tavan kömürü kaybının tüm üretime oranı genellikle %7'den daha az olduğundan dolayı bu bölgede oluşan tavan kömürü kaybı araştırma konusu niteliği taşımamaktadır. Ayrıca, yöntemin 15 ila 30 metre arası kömür damarı kalınlıklarındaki uygulamalarında da ayak içerisinde farklı tasarımlar geliştirilmektedir. Örneğin Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Ege Linyitleri İşletmesinde 15 metre kömür damarı kalınlığında uygulanan yöntemde ayağın kuyruk kısmının üzerindeki kömür kaybını azaltmak için kömür damarının bitiminden sonra taban taşı üzerinde damar eğimine paralel bir şekilde kısa bir ayak daha oluşturulmaktadır (Doktan ve İnci, 1986; Uysal ve Demirci, 2006). Burada, 15 metreden daha düşük damar kalınlıklarında gelişen teknolojiye bağlı olarak damarın eğiminde ayak oluşturularak uygulanan uzunayak üretim yönteminin tercihi genellikle daha uygun olmaktadır. Ancak damarın eğiminde ayak oluşturarak uygulanan uzunayak üretim yönteminin teknik ve ekonomik olarak uygulanmadığı ve 11 metre damar kalınlığına sahip Alpagut Dodurga Linyitleri (ADL) işletmeleri gibi işletmeler için göçertmeli uzunayak üretim yönteminin etkinliği son derece önemlidir.

Ayrıca yöntemde üretim verimliliği açısından önemli etkiye sahip olan kaya karışım oranının oluşumunda tahkimat ünitelerinin çekim sırası etkili bir parametredir. Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ilk olarak ayağın kuyruk kısmındaki tahkimat ünitesinden tavan kömürü çekim işlemi başlatılmakta ve ardından sırasıyla tüm tahkimat üniteleri ilerletilerek tavan kömürü çekim işlemi tamamlanmaktadır. Tavan kömürü çekim işleminde malzeme akışı belirli sınırlar dahilinde (Wang ve ark., 2016; Zhang ve ark., 2018a; Zhu ve ark., 2018) gerçekleşmekte olup, sıralı çekimlerde akma sınırlarının kesişim noktalarından mükerrer atık kaya çekimi yapılmakta ve bu işlem de kaya karışım oranının artmasına neden olduğundan üretim verimliliğini düşürmektedir.

Kaya karışım oranı üretilen kömürün kalori değerini düşürmekle birlikte kömürden atık kayayı ayırmak için yapılacak faaliyetlerin maliyetini arttırmaktadır. Ancak bu dezavantajına karşın tavan kömürü kaybı ile kaya karışım oranı arasında önemli bir ilişki bulunmakta ve maksimum kaya karışım oranının sağlanması ile ayağın arkasında oluşan tavan kömürü kaybını önlemek mümkün olabilmektedir (Zhu ve ark., 2018).

1.1. Tez Çalışmasının Amaç ve Kapsamı

Eğimli (32-70°) kalın (11 metre) kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yöntemi verimliliğinin araştırıldığı tez çalışmasının önemli amaç ve hedefleri aşağıda verilmiştir.

- Tavan kömür yüksekliğinin tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı üzerindeki etkilerinin ortaya konulması,
- Kömür damar eğiminin (32-70°) tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı üzerindeki etkilerinin ortaya konulması,
- Yer altı işletmeciliği açısından önemli avantaj ve dezavantajlara sahip olan ayak eğiminin tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı üzerindeki etkilerinin ortaya konulması,
- Tahkimat ünitesi çekim sırasının tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı üzerindeki etkisinin ortaya konulması ve buna bağlı olarak ideal bir çekim sırası tasarımının oluşturulması.

Yukarıda belirtilen tezin amaç ve hedefleri doğrultusunda tezin kapsamı aşağıda verilmiştir;

- Tez çalışması kapsamında göçertmeli uzunayak üretim yönteminin uygulandığı A1 panosunda takip edilen üretim faaliyetlerinde göçertmeli yöntemlerin temel sorunu olan tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı değerlerinin literatüre kıyasla oldukça yüksek olduğunun fark edilmesi üzerine tez çalışması kapsamında ilk olarak problemin net bir şekilde tanımlanabilmesi için A1 panosunun hemen karşısında konumlanan B1 panosunda ölçüm bölgesi oluşturulmuş ve üretim faaliyetlerinin detaylı bir şekilde takibine başlanmıştır.
- B1 panosunda oluşturulan ölçüm bölgesinin belirli noktalarından tavana doğru sondajlar yapılmış ve ölçüm bölgesindeki tavan kömürünün şekli ile miktarı tespit edilmiştir.

- Ölçüm bölgesinde yürütülen üretim faaliyetleri esnasında tavan taşı, kömür ve üretilen tüvenan malzemeden numuneler alınmış ve alınan numunelerin kalori ve yoğunluk parametreleri kullanılarak üretilen tüvenan malzeme içerisindeki atık kaya ve kömür miktarları tespit edilmiştir.
- Üretilen tavan kömürü miktarı, toplam üretilen kömür miktarından ayaktan kazılarak üretilen kömür miktarının çıkarılması ile bulunmuştur.
- Kaya karışım oranı, üretilen tavan kömürü miktarı ile atık kaya miktarı arasındaki ilişkiden hesaplanmıştır.
- Tavan kömürü kaybı, tavan kömürü rezervi ile üretilen tavan kömürü miktarı arasındaki ilişkiden hesaplanmıştır.
- ADL işletmelerinde tespit edilen problemin çözümü ilk olarak çalışma kapsamında literatürde aranmış ancak literatürün bu konuda yetersiz kaldığının tespitinden sonra tez çalışması kararlaştırılmıştır.
- Günümüzde göçertmeli uzunayak üretim yöntemlerinde karşılaşılan problemlerin çözümünde fiziksel ve sayısal modelleme çalışmaları etkin bir şekilde kullanılmakta olup, tez çalışmasında arazi çalışmalarına daha benzer olması niteliğiyle araştırma yöntemi olarak fiziksel modelleme tercih edilmiştir.
- Fiziksel modelleme çalışmalarında kullanılmak üzere çalışma dahilinde belirli bir ölçekte araziye yansıtacak şekilde fiziksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen fiziksel modelin laboratuvar testlerine uygunluğunun testi amaçlı B1 panosu verileri ile fiziksel model test edilmiş ve test sonuçları paralelinde laboratuvar testlerine başlanmıştır.
- Fiziksel modelleme ile tavan kömürü kaybını tespit etmek oldukça zor ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu nedenle çalışma içerisinde tavan kömürü kaybını tespit edebilmek için fiziksel model testlerine ek olarak 3 boyutlu bir çizim programı (SketchUp) daha kullanılmıştır.
- Tez çalışması kapsamında tavan kömür yüksekliği, kömür damarı eğimi, ayak eğimi ve tahkimat ünitesi çekim sırasının tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı üzerindeki etkileri fiziksel model ve 3b çizim programı kullanılarak araştırılmış ve araştırma sonuçları dahilinde çeşitli öneriler geliştirilmiştir.

1.2. Tezin İçeriği

Tez çalışması aşağıda belirtilen yedi bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm tez çalışmasına esas genel bilgilerin yer aldığı ve tez çalışmasının amaç, kapsam ve içeriğinin belirtildiği bölümdür.

İkinci bölümde, kalın damar kömür madenciliği, eğimli kalın kömür damarları ve göçertmeli uzunayak üretim yöntemi ile ilgili genel literatür bilgisi verildikten sonra tez çalışması dahilindeki önemli konu başlıkları ile ilgili literatürde yer alan çalışmalara değinilmiş ve literatürdeki çalışmalar ile tez çalışmasının benzerlikleri ve farklılıkları tartışılmıştır.

Üçüncü bölümde, araştırma yönteminde kullanılan fiziksel modelin oluşum süreci, model malzemesi seçim süreci ve bir laboratuvar testine ait iş akışı verilmiştir.

Dördüncü bölüm tez çalışmasına konu olan ADL işletmeleri ile ilgili genel bilgilerin ve arazi çalışmalarının yer aldığı bölümdür.

Beşinci bölümde, ADL işletmeleri B1 panosu ölçüm verileri kullanılarak test edilen fiziksel modele ait test sonuçları ile arazi verileri arasındaki ilişkiye yer verilmiştir.

Altıncı bölüm eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğini araştırmak için yapılan fiziksel model testlerini ve test sonuçlarını içeren bölümdür.

Yedinci bölüm tez çalışmasından elde edilen önemli sonuçların tek başlık altında toparlandığı ve çalışma sonuçları paralelinde çeşitli önerilerin geliştirildiği tez çalışmasının son bölümüdür.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapılan literatür taramasında, eğimli kalın kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayağın kuyruk kısmının üzerinde oluşan tavan kömürü kaybı ile ilgili yalnızca bir çalışmaya rastlanılmıştır. Bu nedenle, bu bölümde araştırma konusunda kritik öneme sahip konu başlıkları ile ilgili literatür değerlendirilmiştir.

2.1. Kalın Damar Kömür Madenciliği

Kömür, bitki kalıntıları ile inorganik minerallerin yüksek basınç ve sıcaklığa maruz kalarak sıkışması ve katılaşması neticesinde oluşan ve dünya genelinde (2020 yılı sonu itibariyle) görünür rezervi 1.074.108.000.000 ton (BP, 2021) olan tortul bir kayadır (TKİ, 2021)

Endüstriyel üretim, ısınma ve bilhassa enerji ihtiyacının karşılanmasında yaygın bir şekilde kullanılan kömürün büyük bir kısmı kalın kömür damarlarından üretilmektedir (Xu, 2004; Le, 2010; Quang, 2010; Singh, 2011; Tercan ve ark., 2013; Bui, 2014; Zhang, Liu ve Pei, 2015 Bhandari ve ark., 2018; Jangara ve Öztürk, 2021).

Günümüzde kalın kömür damarlarının üretiminde oda-topuk (Garcia, Camara ve Torres, 2019), hidrolik kazı (Tian, Chen ve Liu, 1979) ve uzunayak (Ünal, Özkan ve Çakmakçı, 2001; Ünver, 1997; Ünver ve Yaşitli, 2006; Yaşitli ve Ünver, 2005a; Şahin, 2007) üretim yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılan yer altı üretim yöntemleridir. Bu yöntemler arasında dünyada en yaygın kullanılan üretim yöntemi olan uzunayak üretim yöntemleri uygulamada üçe ayrılmaktadır (Demirbilek, 1987; Özfirat, Şimşir ve Gönen, 2005; Le, 2018);

- Bütün damar kalınlığının kazısı,
- Dilimler halinde kazı,
- Göçertmeli uzunayak üretim yöntemi.

2.1.1. Bütün Damar Kalınlığının Kazısı

Bütün damar kalınlığının kazısı esasında uzunayak üretim yönteminin kendisi olup literatürde “Single Pass Longwall” olarak adlandırılmaktadır (Hamilton, 1999; Şimşir ve Özfirat, 2010). Bu yöntemi klasik uzunayak üretim yönteminden ayıran en temel özellik yüksek kesme yüksekliği (Şekil 2.1) olup, literatürde bazı çalışmalarda yöntem “High Reach Single Pass Longwall” olarak da adlandırılmaktadır (Quang, 2010; Le, 2018).

Yöntem günümüzde gelişen teknolojiye bağlı olarak 7 metre kömür damarı kalınlıklarına kadar uygulanabilmektedir (Wang, Pang ve Liu, 2012). Türkiye’de Çayırhan kömür madeninde 4,2 metre kömür damarı kalınlığında uygulanan yöntem (Şimşir ve Özırat, 2010), ABD (Fiscor, 2006), Almanya (Bussmann ve Schroth, 1992), Avustralya (Hebblewhite, 1999), Çin (Xu, 2004), Güney Afrika, Hindistan (Le, 2018), İngiltere (Hamilton, 1999) ve Rusya’da (Reid, 1997) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yöntemin en önemli dezavantajı yüksek kesme yüksekliğini gerçekleştirebilmek için kullanılan ayak içi ekipmanlarının boyutu ve ağırlıklarından kaynaklı madencilik koşullarının zorlaşması ve ayak içi ekipmanlarının yüksek ilk yatırım maliyetidir.



Şekil 2.1. Bütün damar kalınlığının kazısı (Boughton, 2014).

2.1.2. Dilimler Halinde Kazı

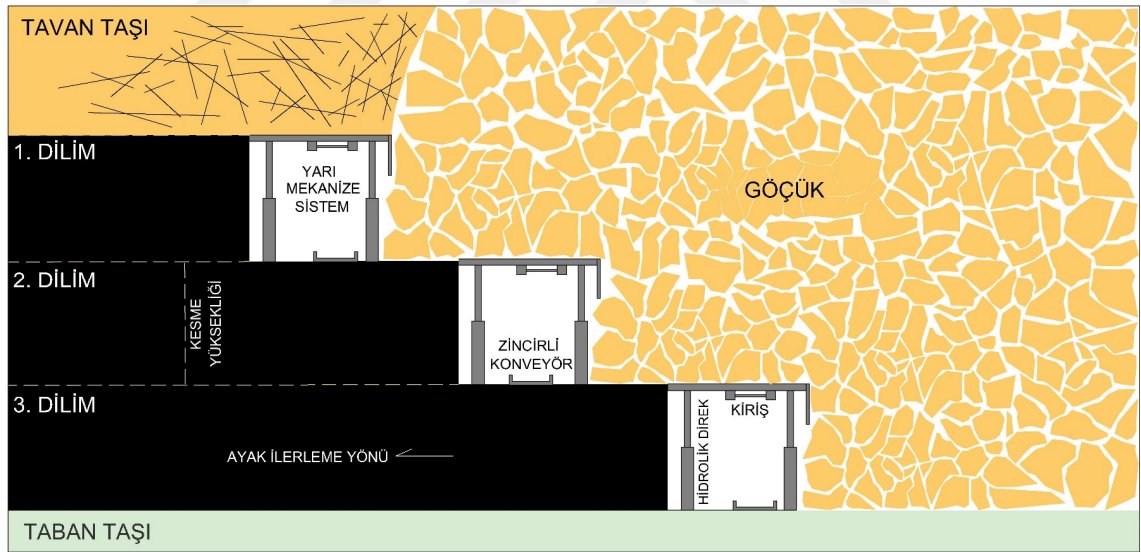
Dilimler halinde kazı (Multi-Slice Longwall) yönteminde kalın kömür damarı 2 veya daha fazla dilime ayrılmakta ve ardından her bir dilim geleneksel uzunayak üretim yöntemi ile üretilmektedir. 1980’lerde ve 1990’ların başlarında Çin’de (Cai, 1992) 5 metreden daha kalın kömür damarlarının kazanılmasında yaygın bir şekilde kullanılan dilimler halinde kazı yöntemi Avustralya, Çin, Hindistan, Polonya ve Rusya gibi birçok

ülkede 6 metreden daha kalın kömür damarlarının üretiminde uygulanmaktadır (Dorling, 1980; Palarski, 1999; Hebblewhite, Simonis ve Cai, 2002, Quang, 2010; Le, 2018).

Yöntemin kalın kömür damarlarındaki genel uygulaması Şekil 2.2’de gösterilmekte olup, burada kalın kömür damarı 3 dilim halinde üretilmektedir.

Bu yöntemde dilim kalınlığı tavan, taban ve kömürün karakteristiğine, işçilik kalitesine, ayak içi ekipman maliyetine ve verimliliğine bağlı olup (Atkinson, 1979), genellikle 2-3 metre arasındadır (Quang, 2010). Yöntemde her bir dilimde taban ve tavan yolu açılması gerektiğinden dolayı bacaların bakım onarım maliyetleri (Quang, 2010) ile genel hazırlık maliyetleri yüksektir (Le, 2018). Yüksek hazırlık maliyetine karşın yöntemde tavan kömür kaybı ve kömür seyrelmesi minimum seviyede tutulabilmektedir.

Dilimler halinde kazı üretim yöntemi uygulamada aşağıdan yukarıya doğru veya tam tersi şekilde yukarıdan aşağıya doğru uygulanabilmektedir. Aşağıdan yukarıya doğru yapılan uygulamada dolgu malzemesi kullanılmakta iken yukarıdan aşağıya doğru yapılan uygulamada göçertme işlemi yapılmaktadır (Demirbilek, 1987).



Şekil 2.2. Dilimler halinde kazı üretim yöntemi (Yukarıdan aşağıya doğru).

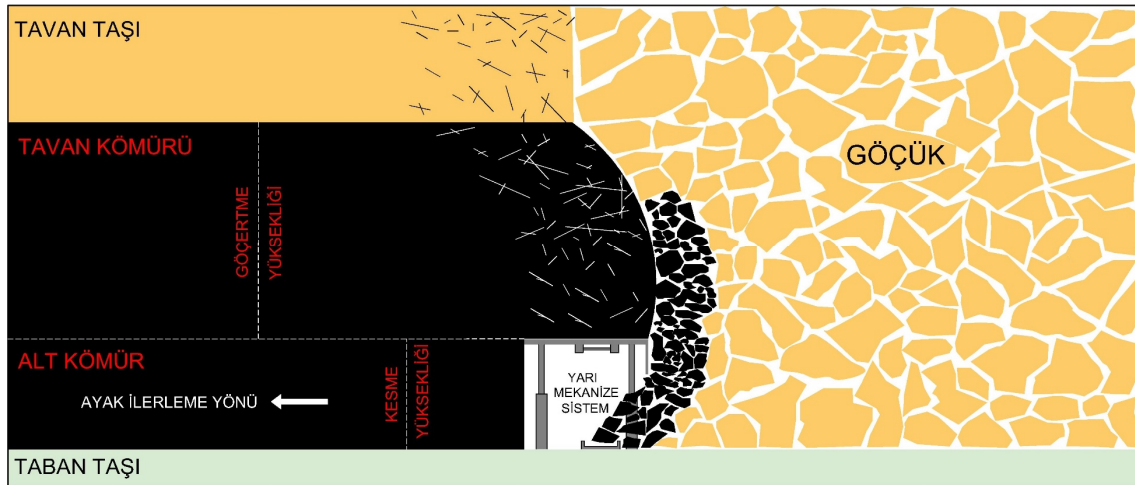
2.1.3. Göçertmeli Uzunayak Üretim Yöntemi

Göçertmeli uzunayak üretim yöntemi geleneksel uzunayak üretim yöntemine ek olarak tavan kömürü göçertme işleminin yapıldığı etkili bir yer altı üretim yöntemidir (Proust, 1979). Yöntem literatürde “Sub-level Caving Method” (Hams, 1976), “The Basic Sub-level Caving” (Bewick, 1983), “Single Sub-level Caving” (Callier, 1972), “Soutirage” (Nath, 1979; Proust, 1979) gibi birçok farklı adla tanımlanmakta olup, günümüzde en

yaygın kullanımı “Longwall Top Coal Caving”dir (Le, 2010; Quang, 2010; Moodie ve Andersen, 2011; Bui, 2014; Feng ve ark., 2018; Guo ve ark., 2018; Le, 2018; Shahani ve ark., 2020; Jangara ve Öztürk, 2021; Liu ve Li, 2021).

Yöntem ilk olarak 1950’lerde Fransa (Schneiderman, 1980) ve Yugoslavya’da (Ahcan, 1979; Tien, 1998; Xu, 2004) ve ardından Türkiye (Öğretmen, 2003; Yaşıtlı ve Ünver, 2005b; Öge, 2017; Ünver ve ark., 2017; Mesutoğlu, 2019), Çin (Wang ve ark., 2015a; Guo ve ark., 2017; Guo ve ark., 2018; Li ve ark., 2018; Liu ve Li, 2021), Vietnam (Quang, 2010), Rusya (Klishin ve Klishin, 2010), Hindistan (Singh, 2011), Slovenya (Cao ve ark., 2020b), Bangladeş (Tarakki ve ark., 2016) ve Pakistan (Shahani ve ark., 2020) gibi birçok ülkede yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Yöntemde kömür damarının alt kısmı (kesme yüksekliği) geleneksel uzunayak üretim yönteminde olduğu gibi ayak içerisinden kazılarak üretilmekte iken kömür damarının tavan kısmı (göçertme yüksekliği) ya madencilik faaliyetlerinin neden olduğu tabaka basınçlarından dolayı ya da ön gevşetme patlatması yapılarak kırılmakta ve kırılan tavan kömürü genellikle ayak içerisindeki tahkimat ünitelerinin arkasından çekilmektedir. Bu yöntemdeki genel madencilik operasyonları Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Göçertmeli uzunayak üretim yöntemi.

Yöntemde tavan kömürünün ayak içerisinden göçertilerek üretilmesi, yöntemi diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha tercih edilebilir yapmakta olup, yöntemin (diğer üretim yöntemlerine kıyasla) genel avantajları aşağıda verilmiştir (Jian, Xianrui ve Yaodong, 1999; Zhongming, 2001; Xu, 2004; Hebblewhite, 2005; Vakili, Cai ve Hebblewhite, 2007; Vakili, 2009; Köse ve Tatar, 2011; Le, 2018);

- Aynı madencilik koşullarında işletme maliyeti daha azdır.
- Kesme yüksekliği düşüktür ve buna bağlı olarak ayak stabilitesi daha kolaydır.
- Ayak içi ekipman kullanımı daha azdır. Buna bağlı olarak da ayak içi ekipman maliyeti düşüktür.
- Kesme ve göçertme işlemleri birlikte yapıldığı için üretim miktarı daha fazladır.

Yukarıda belirtilen avantajlar kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemini diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha tercih edilebilir yapsa da yöntemin aşağıda belirtilen risklerinin de iyi analiz edilmesi gerekmektedir (Xu, 2004; Wang, 2008; Quang, 2010; Köse ve Tatar, 2011; Zhang, Liu ve Pei, 2015; Shi ve Huang, 2015; Le, 2018; Zhu ve ark., 2018; Shahani ve ark., 2020);

Kömür damarının sağlamlık derecesi: Zayıf kömür damarında tahkimat önünde tavan aniden göçebilmekte iken sağlam kömür damarında göçertme işlemi esnasında kömür büyük bloklara ayrılmakta ve çekim işlemini güçleştirmekle birlikte tavan kömürü kaybına neden olmaktadır.

Tavan ve tabanın sağlamlık derecesi: Sağlam tavan, göçme işleminde göçük bölgesinin tamamını dolduramayabilir ve bu durum, ayak ilerlemesine bağlı olarak gaz birikmesi, havalandırma kaçağı ve kontrolsüz tavan çökmesi gibi problemler eşliğinde çalışma bölgesinin ve işçilerin zarar görmesine neden olabilmektedir. Zayıf taban ise, tahkimat ünitelerinin tabana batmasına ve ayak stabilitesinin bozulmasına neden olmaktadır.

Kendiliğinden yanma: Kendiliğinden yanmaya yatkınlığı yüksek olan kömürler için göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayak arkasında (göçük içerisinde) kalan kömürler ocak yangınları oluşumu için ideal bir ortam oluşturmaktadır.

Kömür tozu: Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde hem kesme hem göçertme işleminin yapılmasından kaynaklı diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha fazla kömür tozu oluşmaktadır. Özellikle ayak içinde çalışan işçiler için önemli sağlık sorunlarına sebebiyet veren kömür tozunun ciddi patlama riski de bulunmaktadır.

Metan içeriği: Ayak içerisinde oluşan metan gazının göçük bölgesindeki bir boşlukta birikmesi ve tavan ile üst tabakalarının aniden çökmesi sonucunda, metan gazının ayak içerisine püskürme ve patlama riski bulunmaktadır.

Yer altı suyu: Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde kaya kütesine verilen hasar diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha büyüktür. Burada, damarın üzerinde bir akifer olması durumunda yapılacak bir göçertme işleminde, yer altı suyunun çalışma bölgesine ulaşarak ciddi bir kazaya neden olması kaçınılmaz olabilmektedir.

Kesme/göçertme yüksekliğinin tasarımı: Kesme ve göçertme yükseklikleri arasındaki ilişki göçertmeli uzunayak üretim yönteminin başarısı üzerinde önemli etkiye sahip olup, bu konuda yapılan araştırmaların sayısı günümüzde her geçen gün artmaktadır.

2.2. Tavan Kömürü Kaybı ve Kaya Karışım Oranı

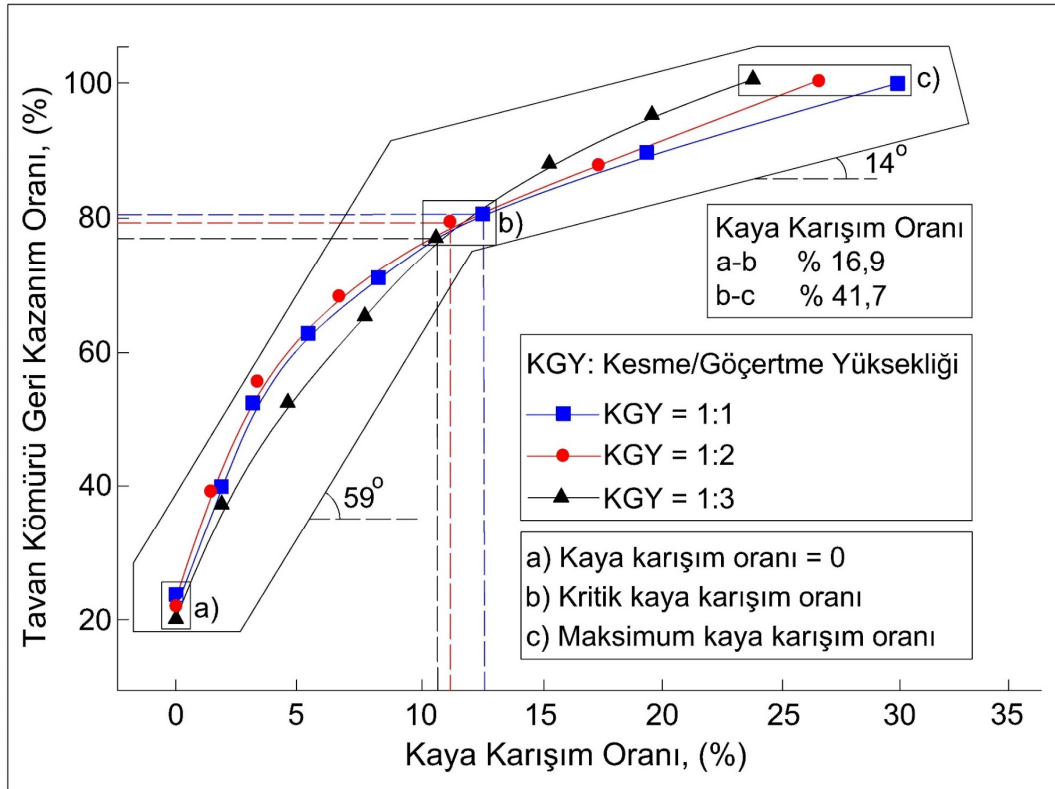
Tavan kömürü kaybı, toplam tavan kömürü miktarından, üretilen tavan kömürü miktarının düşülmesi sonrasında kalan miktarın toplam tavan kömürü miktarına oranının yüzdesel ifadesi olarak tanımlanmakta iken kaya karışım oranı, üretilen malzeme içerisindeki atık kaya miktarının yüzdesel ifadesidir. Literatürde tavan kömürü kaybı terimi yerine tavan kömürü geri kazanım oranı terimi de yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, tavan kömürü geri kazanım oranı, üretilen tavan kömürü miktarının, toplam tavan kömürü miktarına oranının yüzdesel ifadesi olarak tanımlanmaktadır.

Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde yüksek tavan kömürü kaybı yöntemin ekonomik olarak uygulanabilirliğini etkilemekle birlikte önemli bir enerji kaynağı olan kömürün zayi olmasına da neden olmaktadır. Buna karşın yüksek kaya karışım oranı da üretilen kömürün kalori değerini düşürmekle birlikte kömürden atık kayayı ayırmak için yapılacak işlemlerin maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadır (Şenkal, Köse ve Ermişoğlu, 1988; Özfirat, Şimşir ve Gönen, 2005).

Günümüzde göçertmeli uzunayak üretim yönteminin en temel problemlerini oluşturan tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı ile ilgili özellikle 2020 yılı dünya kömür üretiminin %49,7'sini (IEA, 2021) tek başına karşılayan Çin (Xie ve Zhao, 2009; Zhang, Zhao ve Gao, 2011; Wang ve ark., 2014; Zhang, Liu ve Pei, 2015; Guo ve ark., 2017; Zhu ve ark., 2018; Wang ve ark., 2019; Wang ve ark., 2020a; Yang ve ark., 2020; Wang ve ark., 2021) başta olmak üzere birçok ülkede (Doktan ve İnci, 1986; Dac, Tuan ve Thang, 2000; Tuan ve Thang, 2003; Özfirat, 2007; Quang, 2010; Moodie ve Andersen, 2011; Arıtan ve Acar, 2014; Aşmet, 2019; Shahani ve ark., 2019) önemli sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bu konu ile ilgili literatürde öne çıkan çalışmalar derlenerek aşağıda verilmiştir.

Tavan kömürü geri kazanım oranı ile kaya karışım oranı arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulunmakla birlikte (Şekil 2.4) tavan kömürü çekim işlemine bağlı olarak tavan kömürü geri kazanım oranı ve kaya karışım oranı arasında aşağıda belirtilen 3 evre bulunmaktadır (Zhu ve ark., 2018).

- Birinci evre: Kaya karışım oranı sıfır iken oluşan tavan kömürü geri kazanım oranı
- İkinci evre: Kritik tavan kömürü geri kazanım oranı ve kaya karışım oranı
- Üçüncü evre: Tavan kömürünün tamamı üretildiğinde oluşan kaya karışım oranı

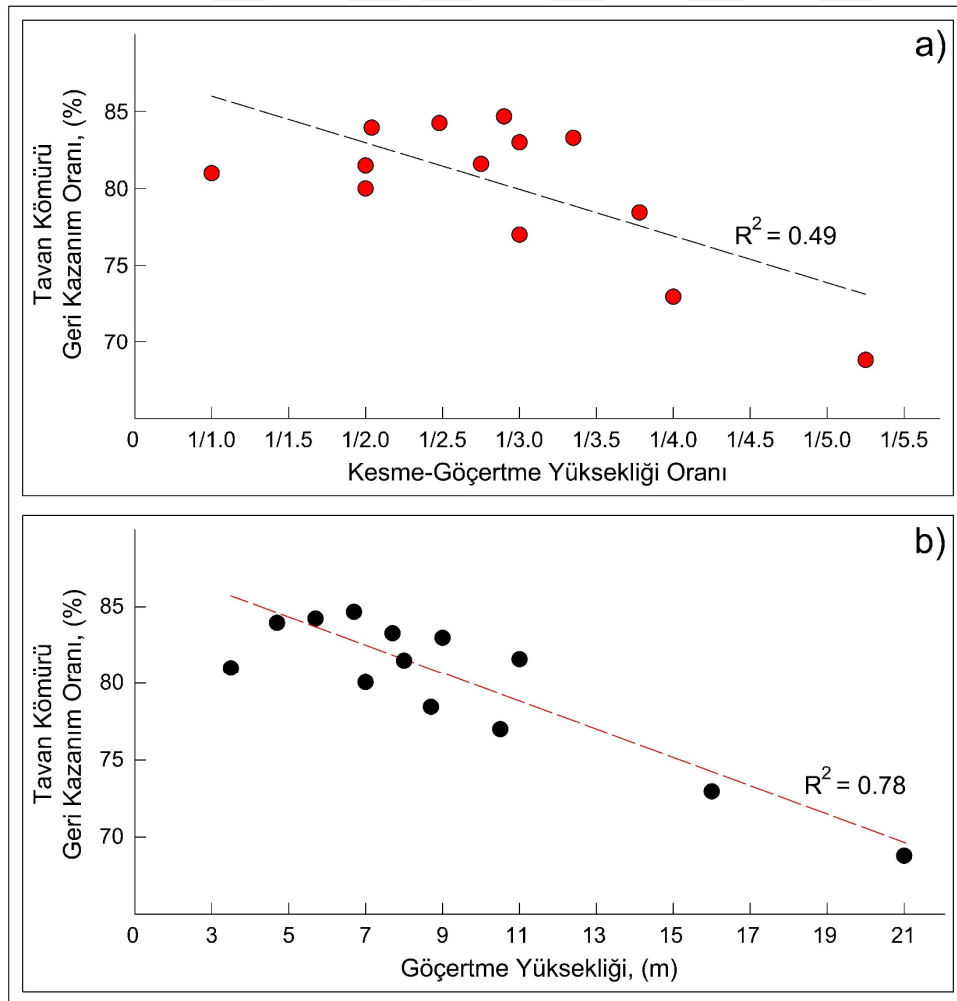


Şekil 2.4. Tavan kömürü geri kazanım oranı ve kaya karışım oranı arasındaki ilişki (Zhu ve ark., 2018).

Grafikten görüleceği üzere çekilen atık kaya miktarına bağlı olarak tavan kömürü geri kazanım oranı doğrusal olmayan bir şekilde artmakta ve maksimum kaya karışım oranının (%23-30) sağlanması ile tavan kömürünün tamamı üretilebilmektedir. Burada tavan kömürü çekim işleminde kritik bölgeye kadar %16,9'luk kaya karışım oranı ile tavan kömürünün %56,5'lik kısmı üretilebilmekte iken tüm kömürün üretilmesi amaçlı kritik seviyenin aşılması durumunda %41,7'lik kaya karışım oranına karşılık tavan kömürünün geriye kalan %21'lik kısmı üretilebilmektedir (Burada kaya karışım oranı ve tavan kömürü geri kazanım oranı sistemden ilk atık kaya çekilmeye başlandığı andaki üretim değeri (%21-24) sıfır kabul edilerek hesaplanmıştır).

Göçertme yüksekliğinin tavan kömürü geri kazanım oranına etkisi Şekil 2.4'den de görüleceği üzere kesme yüksekliği ile ilişkilendirilmekte ve bu durum literatürde “Cutting height/caving height ratio” olarak adlandırılmaktadır (Zhang, Zhao ve Gao, 2011; Wang ve ark., 2014; Zhang, Liu ve Pei, 2015; Zhu ve ark., 2018; Shahani ve ark., 2019; Wang ve ark., 2019). Kesme yüksekliği ve göçertme yüksekliği arasındaki ilişkinin tavan kömürü geri kazanım oranı üzerindeki etkisi dört farklı çalışmadan (Zhang, Zhao ve Gao, 2011; Zhu ve ark., 2018; Shahani ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2020) elde edilen veriler doğrultusunda hazırlanan grafik üzerinden değerlendirilmiştir (Şekil 2.5).

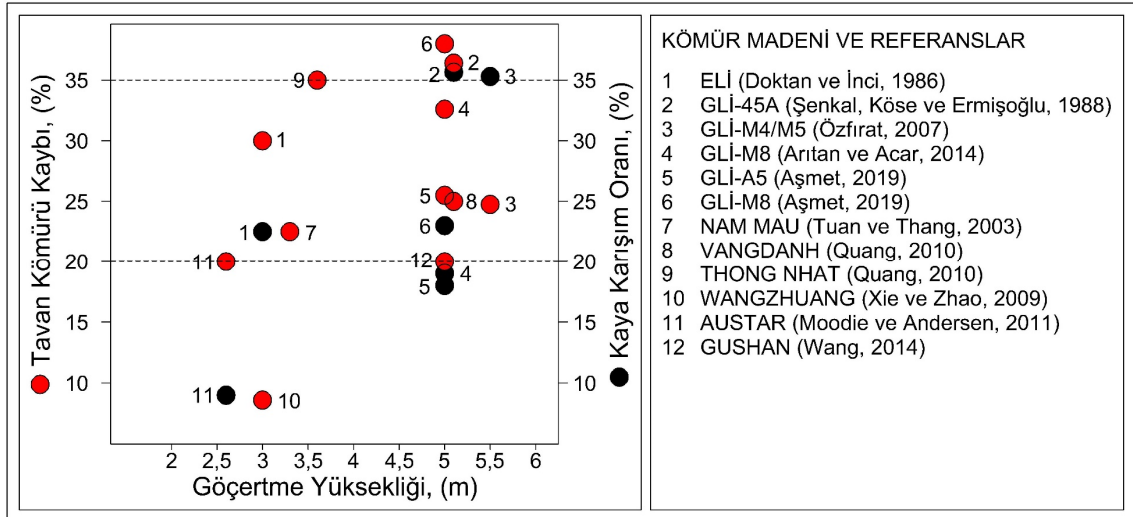
Şekil 2.5’de verilen grafikler incelendiğinde, kesme ve göçertme yüksekliği arasındaki ilişkinin tavan kömürü geri kazanım oranı üzerinde net bir etkisinin bulunmadığı ($R^2 = 0,49$) buna karşın artan göçertme yüksekliği ile tavan kömürü geri kazanım oranının ($R^2 = 0,78$) azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.5. Tavan kömürü geri kazanım oranına a) kesme-göçertme yüksekliği oranının etkisi b) göçertme yüksekliğinin etkisi.

Günümüzde sayısal ve fiziksel modelleme çalışmaları ile kolaylıkla belirlenebilen tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranını, arazi koşullarında belirleyebilmek için ilk olarak üretim panosunda bir ölçüm bölgesi oluşturulmakta ve ölçüm bölgesinden kazılarak ve göçertilerek üretilen kömür miktarları tespit edilmektedir (Şenkal, Köse ve Ermişoğlu, 1988; Özfirat, 2007). Sonrasında ölçüm bölgesinden üretilen tüvenan malzemeden, bölgedeki kömür ile tavan taşından belirli periyotlar ile numuneler alınmakta ve alınan numunelerin kalori (Aritan ve Acar, 2014; Aşmet, 2019) ve kül (Şenkal, Köse ve Ermişoğlu, 1988; Özfirat, 2007) değerleri üretilen malzeme içerisindeki atık kaya ve tavan kömürü miktarını tespit etmede kullanılmaktadır. Son olarak tespit edilen atık kaya ve tavan kömürü miktarı üzerinden tavan kömürü kaybı ile kaya karışım oranı hesaplanmaktadır. Literatürde arazi şartlarında tespit edilen tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranları Şekil 2.6'da verilmiştir.

Tavan kömürü çekim işleminde maksimum kaya karışım oranı ile tavan kömürü kaybına engel olmak mümkün olsa da Şekil 2.6'da görüleceği üzere arazi şartlarında tavan kömürünün bir kısmı yüksek kaya karışım oranının neden olacağı problemlerden dolayı üretilmemektedir.

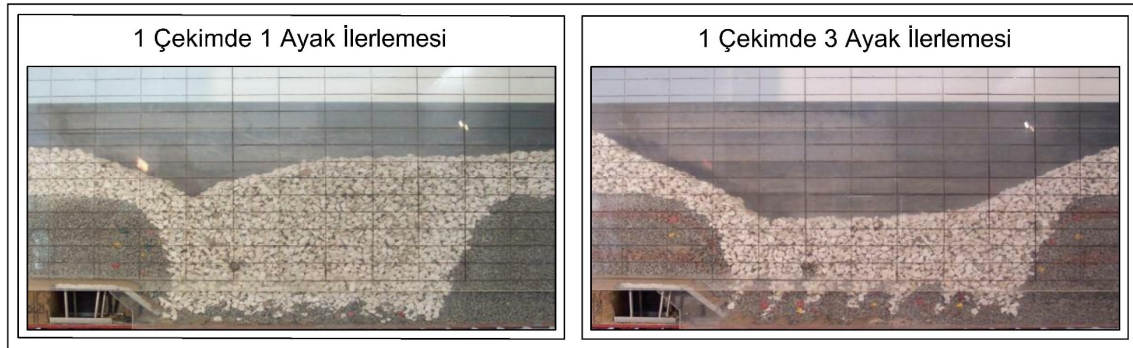


Şekil 2.6. Kömür madenlerinde karşılaşılan tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranları.

Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayak ilerleme miktarı önemli avantaj ve dezavantajlara sahip olup, yüksek ayak ilerleme miktarında ayak ilerleme hızı artmakta ve buna bağlı olarak sabit giderlerin üretim maliyeti üzerindeki etkisi azalmaktadır. Ancak bu avantajına karşın tavan kömürü çekim işleminin ağırlık noktası çekim bölgesinden uzaklaşmakta ve bu da üretilen kömürün geri kazanım oranını düşürerek

Üretim maliyetinin artmasına ve tavan kömürünün zayi olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle tavan kömürü geri kazanım oranının kabul edilebilir bir seviyede tutulabileceği maksimum ayak ilerleme miktarının tespiti son derece önem arz etmektedir (Zhang ve ark., 2011).

Zhang, Zhao ve Gao (2011) ayak ilerleme miktarının tavan kömürü geri kazanım oranına etkisini fiziksel bir model ile inceledikleri çalışmalarında, 0,8 ve 2,4 metre ayak ilerlemelerinde tavan kömürü kaybı sırasıyla %17,9 ve %28,1 olarak tespit edilmiştir. Ayak ilerleme miktarına bağlı olarak ayak arkasında kalan kömürlerin fiziksel model üzerindeki görünümleri şekil 2.7’de verilmiştir.

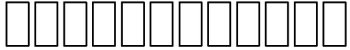


şekil 2.7. Ayak ilerleme miktarının tavan kömürü kaybına etkisi (Zhang, Zhao ve Gao, 2011).

Shahani ve ark. (2019) tarafından 8 ve 9 metre tavan kömürü yüksekliklerinde, 0,8, 1,6 ve 2,4 metre ayak ilerleme miktarlarının tavan kömürü geri kazanım oranına etkisinin incelendiği çalışmada, ayak ilerleme miktarının 0,8 metreden 2,4 metreye çıkartılması durumunda sırasıyla 8 ve 9 metre tavan kömürü yüksekliklerinde tavan kömürü geri kazanım oranı %9,2 ve %4,8 oranında azalmıştır.

Bir uzunayak panosunda her bir tahkimat ünitesinden yapılan tavan kömürü çekim işleminde çekilen malzeme belirli sınırlar (Wang ve ark., 2016; Zhang ve ark., 2018a; Zhu ve ark., 2018) dahilinde akmakta ve bu sınırların keşişim bölgeleri, tavan kömürü geri kazanım oranı ve kaya karışım oranı üzerinde son derece önem arz etmektedir. Tavan kömürü akma sınırlarının keşişim bölgelerinin oluşumunda tahkimat ünitelerinin çekim sırası etkili bir parametre olup, sıralı çekimlerde aralıklı çekimlere kıyasla daha yüksek kaya karışım oranı ve daha düşük tavan kömürü geri kazanım oranı elde edilmektedir. Bu konu ile ilgili şekil 2.8’de (Wang ve ark., 2021) tahkimat nitesi çekim sırası ile birden

fazla tahkimat ünitesinin birlikte çekilmesinin tavan kömürü geri kazanım oranı üzerindeki etkileri verilmiştir.

Sıra No	Tahkimat Ünitesi Çekim Sırası	Araştırma Yöntemi	TKGKO	Tahkimat Düzeni
1	[1]-[2]-[3]-[4]-[5]	Fiziksel Model	%80,7	1-3
2	[1]-[3]-[5]-[2]-[4]	Fiziksel Model	%87,4	
3	[1]-[5]-[3]-[2]-[4]	Fiziksel Model	%95,4	4 ve 7
4	[1]-[2]-[3]-[4]-[5]-[6]-[7]-[8]-[9]-[10]-[11]-[12]	Sayısal Model	%77,59	
5	[1-2]-[3-4]-[5-6]-[7-8]-[9-10]-[11-12]	Sayısal Model	%80,32	
6	[1-3]-[4-6]-[7-9]-[10-12]	Sayısal Model	%81,07	5 ve 8
7	[1]-[2]-[3]-[4]-[5]-[6]-[7]-[8]-[9]-[10]-[11]-[12]	Fiziksel Model	%70,24	
8	[1-2]-[3-4]-[5-6]-[7-8]-[9-10]-[11-12]	Fiziksel Model	%78,57	6 ve 9
9	[1-3]-[4-6]-[7-9]-[10-12]	Fiziksel Model	%89,68	
TKGKO: Tavan Kömürü Geri Kazanım Oranı				

Şekil 2.8. Tahkimat ünitesi çekim sırasının tavan kömürü geri kazanım oranına etkisi (Wang ve ark., 2021).

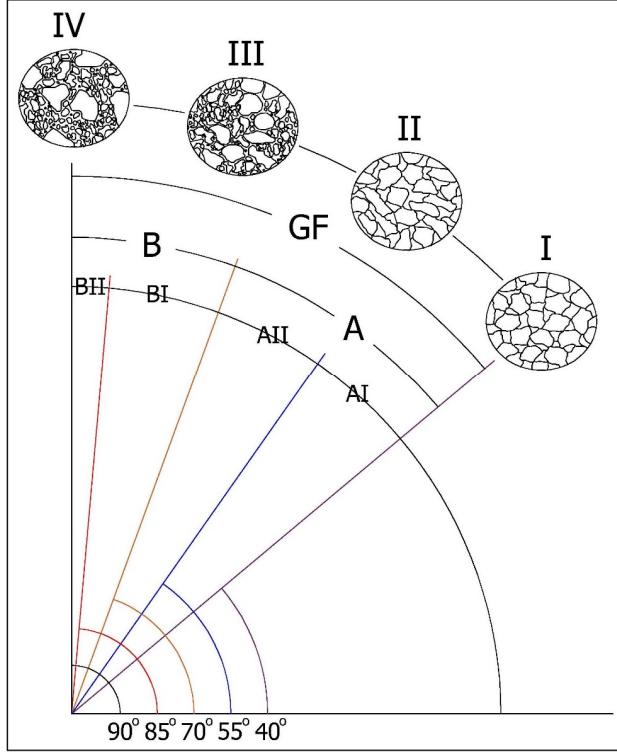
Şekil 2.8’den görüleceği üzere tahkimat ünitelerinin aralıklı çekilmesi ile birden fazla tahkimat ünitesinin birlikte çekilmesi durumlarında tavan kömürü geri kazanım oranı artmaktadır.

2.3. Tavan Kömürü Çekme Mekanizması

Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ilk olarak bir ayak (have) ilerlemesine karşılık gelecek miktarda alt kesme işlemi yapılmakta ve sonrasında tavan kömürü çekme işlemi, tahkimat ünitesinin kesilen bölgeye doğru ilerletilmesi neticesinde ayağın arkasında oluşan boşlukta başlatılmakta ve çekim işlemini yapan personelin kontrolünde sonlandırılmaktadır. Çekim işleminin sonlandırılması, tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı arasındaki ilişkiyi kontrol eden etkili bir parametre (Zhu ve ark., 2018) olup, Çin’de son yıllarda çekim işleminin otomatik olarak sonlandırılabilmesi akıllı sistemler geliştirilmeye başlanmıştır (Wang ve ark., 2021).

Tavan kömürü çekim işlemi, literatürde “Top coal boundary” (Song ve Konietzky, 2019; Song, Konietzky ve Herbst, 2020; Wang ve ark., 2021) olarak adlandırılan tavan kömürü akma sınırı kontrolünde gerçekleşmekte olup, tavan kömürü akma sınırı ayak ilerlemesine bağlı olarak sürekli gelişen dinamik bir sınırdır (Wang ve ark., 2021) ve doğrudan çekme hacmini belirlemektedir (Zhu ve ark., 2018). Bu sınırın oluşumunda

yerçekimi kuvveti etken parametre olup, yerçekimine ek olarak akan malzemenin içsel sürtünme açısı ve parça boyut dağılımı da (Şekil 2.9) son derece önemlidir (Kvapil, 1992; Wang ve ark., 2015b; Wang, Zhang ve Li, 2016; Zhang ve ark., 2018a; Wang, Wei ve Zhang, 2019b).

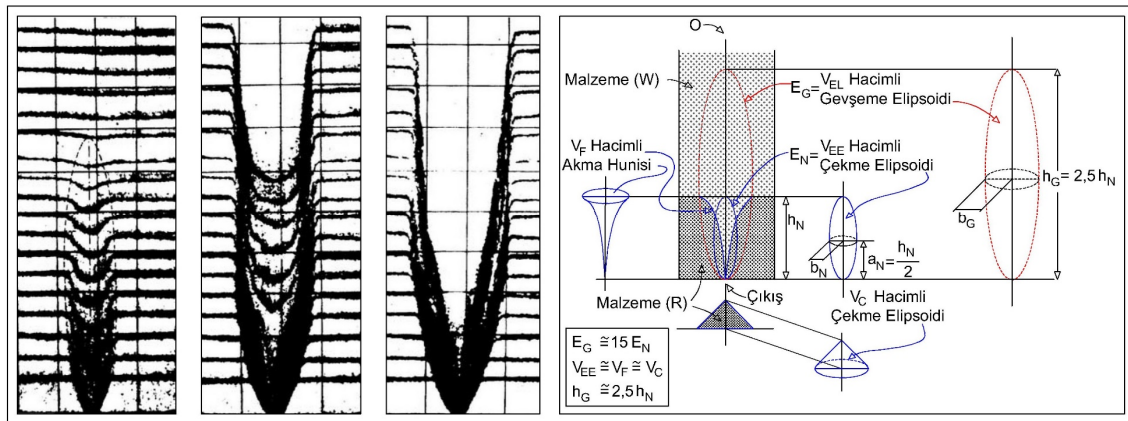


Şekil 2.9. Parça boyut dağılımı ve malzeme akma açısı arasındaki ilişki (Kvapil, 1992).

Şekil 2.9’da birinci grup malzeme iri, yaklaşık yuvarlak ve aynı boy tanelerden oluşmaktadır. İkinci grup malzeme, yaklaşık aynı boylarda, ancak değişik geometrik şekilli tanelerin bir arada olduğu durumu temsil etmektedir. Üçüncü grup malzeme iri, ufalanmış ve küçük parçalı tanelerden oluşmaktadır. Dördüncü grup ise büyük parçalar, orta boyda kırıklar, ufalanmış kum ve/veya kaya tozları ve kil içeren heterojen bir malzemedir. Ayrıca şekilde GF ile gösterilen kısımda yerçekimi etkisi ile oluk veya bür ile nakliyat yapılabilir. A ile gösterilen kısımda açık oluk kullanımı önerilirken, B kısmında daha dik ve kapalı oluk kullanımı önerilmektedir (Kvapil, 1992; Ünver, 1997).

Çekim işleminin başlatılmasından sonlandırılmasına kadar geçen süre zarfında çekilen tavan kömürü, tavan kömürü çekim gövdesi (Top coal drawbody) olarak ifade edilmekte olup, (Song, Konietzky ve Herbst, 2020; Wang ve ark., 2021) çekim gövdesi şeklinin tanımlanması, tavan kömürü geri kazanım oranının iyileştirilmesi için temel teşkil etmektedir (Zhu ve ark., 2018).

Kırılmış kayanın yerçekimi ile akışını nicel bir yaklaşım olarak araştıran Kvapil (1965, 1992), bu konuda çalışma yapan ilk araştırmacılardan biridir. Silolardaki granüler malzemenin akışıyla ilgili matematiksel ilişkiler kurmayı amaçlayan araştırmacı, katmanlı beyaz ve siyah dolgulu basit bir dikey cam model üzerinden yapılan çekim işlemini ve çekim işlemi esnasında oluşan çekme ve gevşeme elipsoitleri arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak tanımlamıştır (Şekil 2.10).

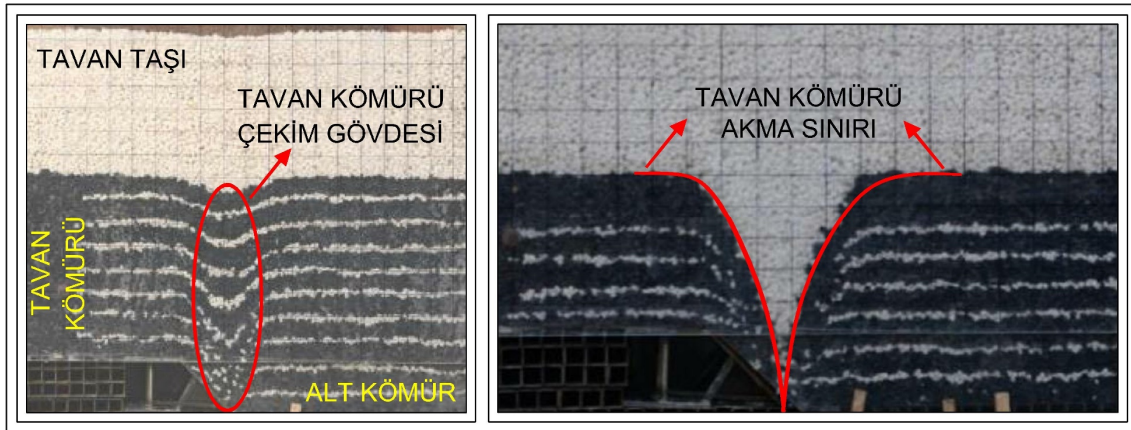


Kuru kumun akışını tanımlamak ve çekim gövdesinin şeklini tahmin etmek için Litwiniszyn (1956) tarafından önerilen ve sonrasında birçok araştırmacı tarafından sürekli geliştirilerek olgunlaştırılan (David, 1968; Liu ve Zhang 1995; Oiao, Sun ve Ren, 2003) stokastik ortam teorisi, blok göçertme yönteminde başarılı sonuçlar verdikten sonra göçertmeli uzunayak üretim yönteminde de denenmiş ve tavan kömürü çekim gövdesinin

şeklini yeterince tanımlayabildiği tespit edilmiştir (Yu, Zhu ve Chen, 2017; Zhu ve ark., 2018). Teoride yapılan varsayımlar aşağıda belirtilmiştir (Wang ve ark., 2021);

- Tavan kömürü ve yan kayaç granül bloklardır.
- Tavan kömürü ve yan kayaç sürekli olarak akabilir ve rastgele bir ortam olarak kabul edilir.
- Tavan kömürü ve yan kayacın hareketleri farklı yönlerde bağımsızdır.

Stokastik ortam teorisinin göçertmeli uzunayak üretim yöntemindeki uygulanabilirliğinin araştırıldığı çalışmada, tavan kömürü çekim işlemi esnasında tavan kömürünün hareket sınırlarının daha iyi izlenebilmesi için Şekil 2.11’de verilen 2 boyutlu fiziksel model tasarlanmış ve fiziksel model ile teori arasındaki ilişki incelenmiştir. Tavan kömürünün çekme mekanizmasının analizinde, teorinin yumuşak kömür damarlarında uygulanabileceği ve buna karşın sert kömür damarlarında hata payının nispeten büyük olacağı belirtilmiştir (Zhu ve ark., 2018).

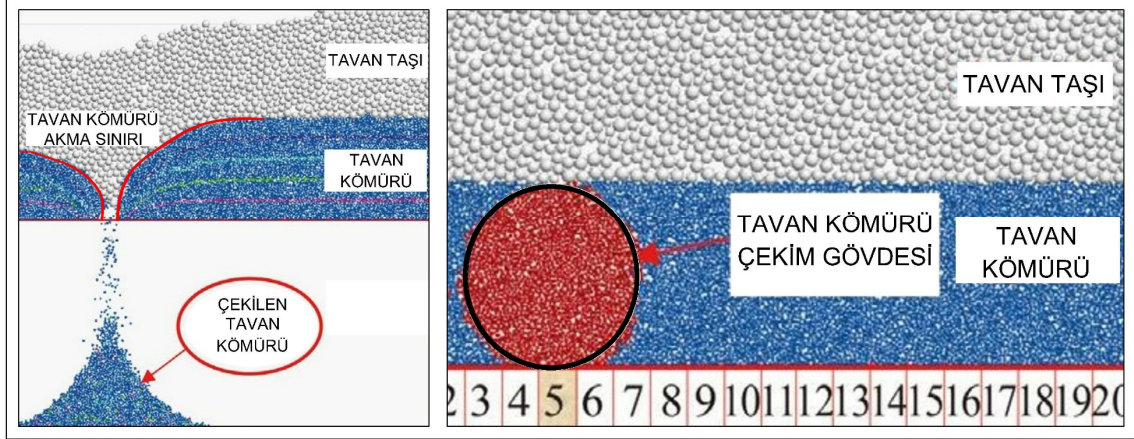


Şekil 2.11. Tavan kömürü çekim gövdesi ve sınırlarına ait görsel (Zhu ve ark., 2018).

Benzer tavan kömürü boyut aralığına (0-0,4m) ve farklı tavan kömürü boyutu standart sapmalarına sahip 9 farklı malzemenin tavan kömürü çekim mekanizması üzerindeki etkilerinin sayısal modelleme kullanılarak incelendiği çalışmada, tavan kömürü çekim sınırı ve çekim gövdesinin sayısal model üzerindeki görünümü Şekil 2.12’de verilmiştir (Wang ve ark., 2020b).

Çalışmada maden işletmelerinden elde edilen verilere dayalı olarak çekilmiş tavan kömürünün parça boyut dağılımının 0-0,4 metre arasında değiştiği belirtilmekte olup, tavan kömürünün ortalama parça boyutu 0,2 metre olarak kabul edilmiş ve çalışmada oluşturulan 9 farklı parça boyut dağılımına sahip malzemenin ortalama parça boyutu olan

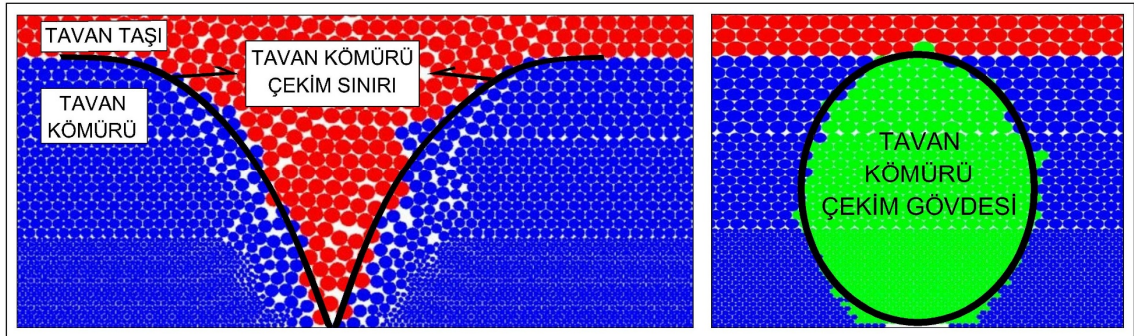
0,2 metreden sapma miktarlarının tavan kömürü geri kazanım oranı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sapma miktarının 0,1'den küçük olduğu durumda tavan kömürü geri kazanım oranının önce arttığı ve sonra artan sapma miktarı ile azaldığı bunun yanı sıra sapma miktarı 0,1'den büyük olduğunda tavan kömürü geri kazanım oranının önce azaldığı sonra artan sapma miktarı ile arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.12. Tavan kömürü çekim gövdesi ve sınırlarına ait görsel (Wang ve ark., 2020b).

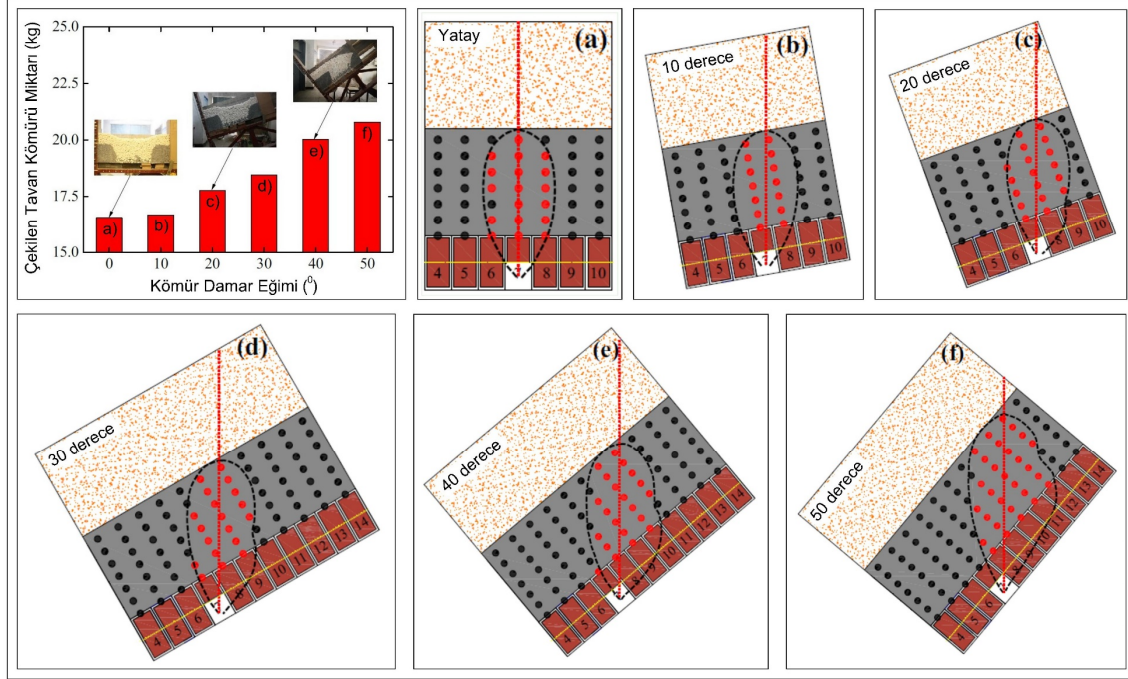
Wang, Wei ve Zhang (2019b) tarafından yapılan çalışmada tavan kömürü parça boyutunun 0,2 metre olduğu durumda tavan kömürü geri kazanım oranının diğer boyutlara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde farklı tavan kömürü kalınlıklarının tavan kömürü geri kazanım oranı üzerindeki etkilerinin sayısal modelleme kullanılarak incelendiği çalışmada, tavan kömür yüksekliğinin 11 metreden 21 metreye çıkartılması durumunda tavan kömürü geri kazanım oranının %81,6'dan %68,8'e düştüğü tespit edilmiştir. Çalışmada sayısal model üzerinde oluşan tavan kömürü çekim sınırı ve çekim gövdesi Şekil 2.13'de verilmiştir (Zhang ve ark., 2020).



Şekil 2.13. Tavan kömürü çekim gövdesi ve sınırlarına ait görsel (Zhang ve ark., 2020).

Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde damar eğiminin çekim gövdesinin şekli üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada, damar eğimine bağlı olarak çekim gövdesinde meydana gelen değişim Şekil 2.14’de verilmiştir (Wang, Wei ve Zhang, 2019a). Şekil 2.14’den görüleceği üzere damar eğimi artışına bağlı olarak çekim gövdesi genişlemekte ve buna bağlı olarak da çekilen malzeme miktarı artmaktadır.



Şekil 2.14. Eğimli damarlarda tavan kömürü çekim gövdesi (Wang, Wei ve Zhang, 2019a).

2.4. Eğimli Kalın Kömür Damarı

Eğimli kalın kömür damarı ifadesi literatürde genel bir terim olarak kullanılmasına rağmen (Ju ve ark., 2006; Guo ve ark., 2017; Cui ve ark., 2019; Wang, Dou ve Wang, 2019; Cao ve ark., 2020a; Huang, Li ve Tian, 2020; Kang ve ark., 2020; Sun, 2020) kömür damarının kalınlık (Çizelge 2.1) ve eğim sınıflaması (Çizelge 2.2) ile ilgili literatürde herkesçe kabul görmüş ortak bir sınıflama bulunmamaktadır.

Çizelge 2.1. Kömür damarının kalınlık açısından alt sınırı (Singh, 2004).

Ülke	Kalın kömür damarının alt sınırı, (m)	Ülke	Kalın kömür damarının alt sınırı, (m)
Türkiye	3,5	Avustralya	4,0
Çin	3,5	ABD	3
Kanada	4,0	Japonya	2,25
Fransa	4,0	Polonya	3,3
Hindistan	4,8	Macaristan	3,5

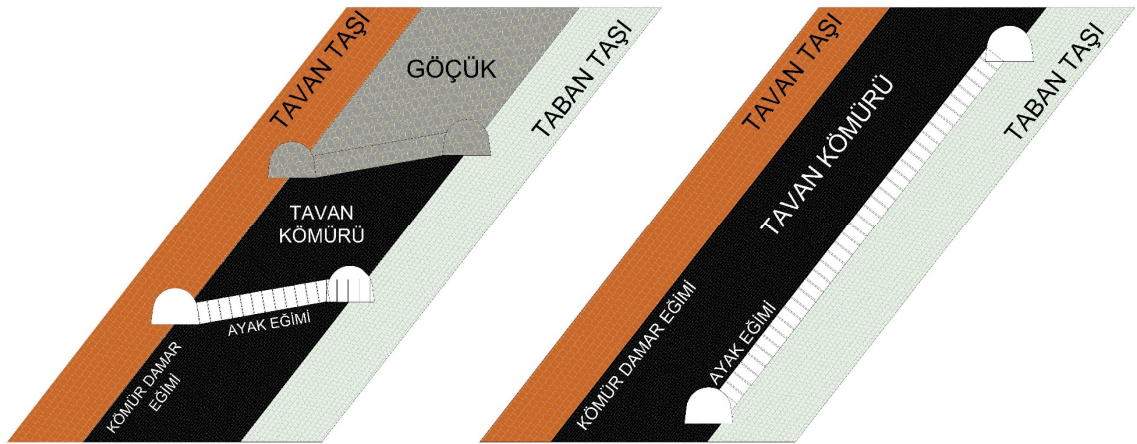
Çizelge 2.2. Kömür damarının eğim sınıflaması.

Düz (°)	Orta (°)	Eğimli (°)	Dik eğimli (°)	Referans
<25	-	25-45	>45	Shevyakov, 1958
<6	7-17	18-45	>46	Akçın, 1986
<20	-	20-55	>55	Nicholas, 1993
<15	15-35	35-55	>55	Quang, 2010
<5	5-25	25-45	>45	Nieto, 2011
<8	8-25	25-45	>45	Liu ve ark., 2014

Eğimli kalın kömür damarı rezervleri dünya çapında Çin’de Urumçi, Ukrayna’da Donbass, Kazakistan’da Karaganda, Almanya’da Ruhr, Fransa’da Loren ve Amerika’da Batı Virjinya’da bulunmakta (Wu, Yun ve Zhang, 2000) olup, Çin Urumçi kömür havzasındaki eğimli kalın kömür damarları, benzer damarlardaki dünya kömür rezervlerinin %30’unu aşan rezervlere sahiptir (Guo ve ark., 2017).

2.5. Eğimli Kalın Kömür Damarlarında Göçertmeli Uzunayak Üretim Yöntemi

Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemi, damarın yatay kalınlığında (Uysal ve Demirci, 2006; Lai ve ark., 2014; Tu ve ark., 2015; Onica, Mihailescu ve Andrioni, 2016; Wang, Dou ve Wang, 2019; Rak ve ark., 2020; Çelik ve Özçelik, 2021) ve damarın eğiminde (Yajun, Panfeng ve Fudong, 2014; Li, Wang ve Zhang, 2017; Lv ve ark., 2021) ayak oluşturulmak suretiyle 2 farklı şekilde uygulanmakta olup, yöntemin uygulamalarına ait görseller Şekil 2.15’de verilmiştir



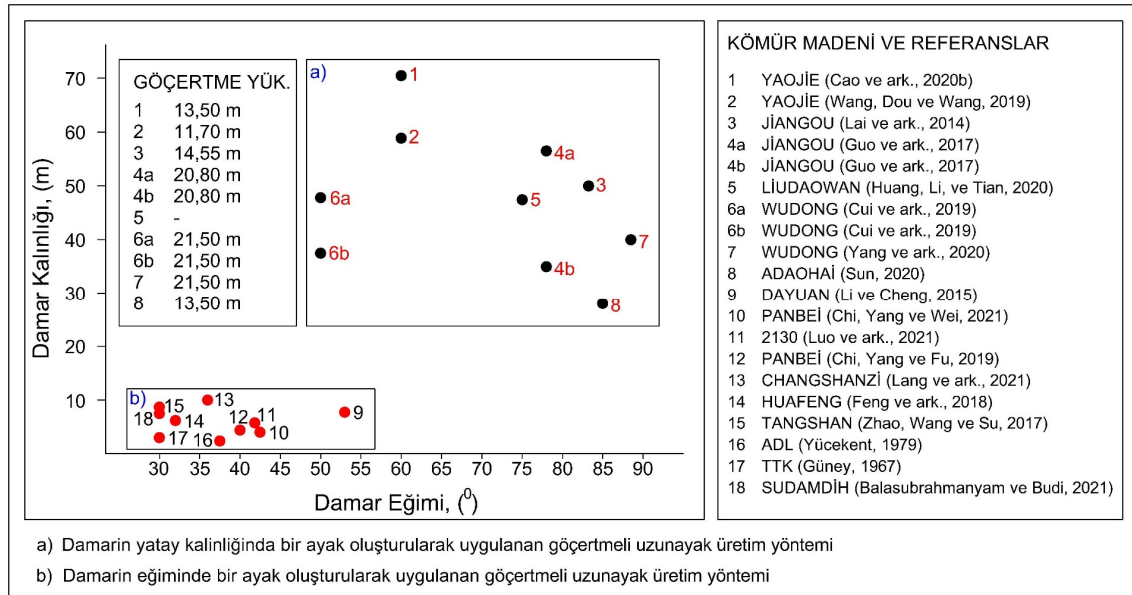
Şekil 2.15. Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemleri.

Damarın yatay kalınlığında ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yöntemi, özellikle Çin kaynaklı çalışmalarda, yatay kesitli tavan kömür göçertmeli (Horizontal section top coal caving) yöntem olarak da tanımlanmakta ve alt kesme ile

tavan yüksekliklerin toplamı kesit yüksekliği olarak ifade edilmektedir (Zhao ve Lai, 2011; Lai ve ark., 2014; Guo ve ark., 2017).

Yer altı üretim yöntemlerinin karşılaştırılmasında her bir üretim yöntemi için farklı etkilere sahip (yatak şekli, derinlik, damar kalınlığı, damar eğimi, tasman etkisi, ocak gazları, oksidasyon riski, vb.) birçok etken parametre bulunmakta (Demirbilek, 1987; Karadoğan, 2001; Özyurt, 2018) olup, eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemlerinin karşılaştırılmasında kömür damarının kalınlığı ve eğimi iki etken parametredir.

Şekil 2.16'da eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemlerinin uygulandığı kömür madenleri gösterilmekte olup, ince kömür damarlarında ekonomik olarak uygulanması mümkün olmayan damarın yatay kalınlığında bir ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak üretiminin 30 metreden daha kalın ve 50°'den daha yüksek eğimli kömür damarlarında tercih edildiği görülmektedir

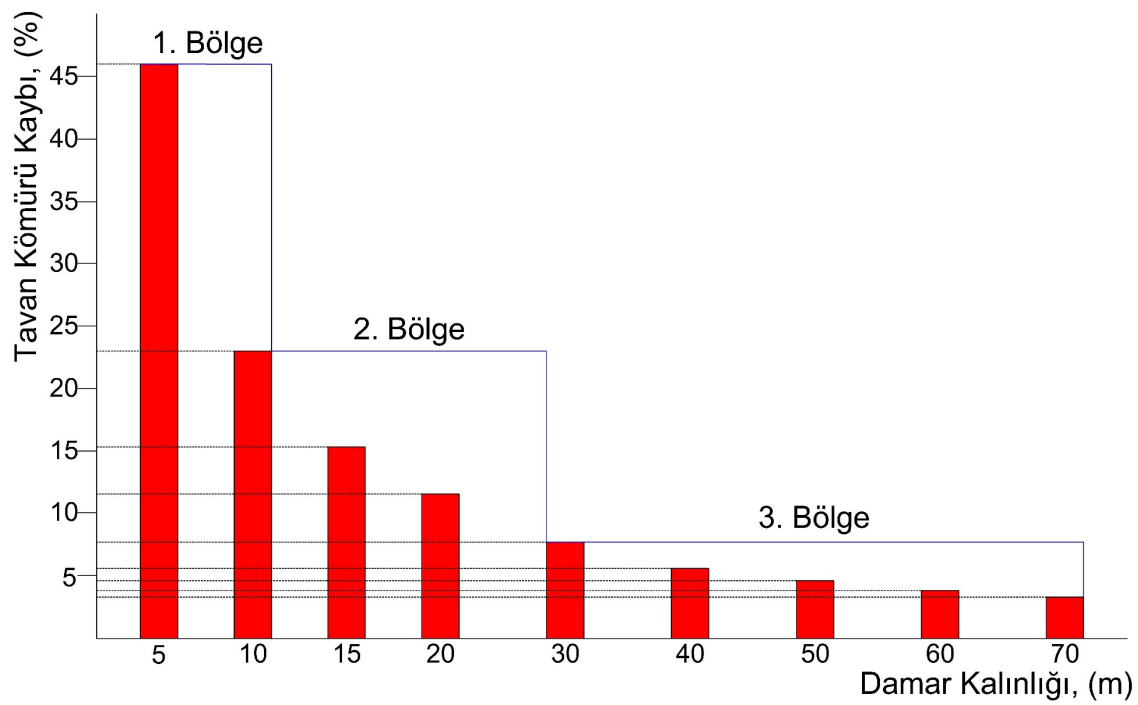


Şekil 2.16. Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntemlerinin uygulandığı kömür madenleri.

Yöntemde eğimli kalın kömür damarı öncelikli olarak dilimlere ayrılmakta ve ardından her bir dilimde üretim faaliyetleri, geleneksel göçertmeli uzunayak üretim yöntemine (alt kesme ve tavan göçertme) benzer şekilde yürütülmektedir (Şekil 2.17).

ayağın kuyruk kısmının üzerinde araştırma niteliği oluşturabilecek bir tavan kömürü kaybının oluşması söz konusu değildir.

Öte yandan damar kalınlığı ile ayağın kuyruk kısmının üzerinde oluşan tavan kömürü kaybı arasındaki ilişki Şekil 2.19'da verilmiştir. Burada verilen grafik, göçertmeli uzunayak üretim yönteminde 50° kömür damar eğimi ve 6 metre tavan kömür yüksekliğinde Şekil 2.18'de gösterilen temsili bir tavan kömürü çekim bölgesi sınırları ile geometrik olarak hazırlanmış olup, damar kalınlığının tavan kömürü kaybı üzerindeki etkisi 3 bölgede değerlendirilmiştir.



Şekil 2.19. Damar kalınlığı ve tavan kömürü kaybı arasındaki ilişki.

Birinci bölgede (<10 m damar kalınlığı) meydana gelen tavan kömürü kaybı yöntemin uygulanabilirliğini önemli ölçüde kısıtlamakla birlikte, literatürde bu bölgedeki damar kalınlıklarında damarın yatay kalınlığında bir ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yöntemi uygulaması bulunmamaktadır.

İkinci bölgede (10-30 m damar kalınlığı) üretim yönteminin uygulanabilirliğinin teknik açıdan irdelenmesi gerekmektedir. Örneğin, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Ege Linyit İşletmelerinde 15 metre damar kalınlığında uygulanan yöntemde, ayağın kuyruk kısmının üzerindeki kömür kaybını azaltmak için kömür damarının bitiminden sonra taban taşı üzerinde bir ayak daha oluşturulmaktadır (Doktan ve İnci, 1986; Uysal ve

Demirci, 2006). Üretim yönteminin bu bölgedeki uygulamaları literatürde oldukça kısıtlıdır (Uysal ve Demirci, 2006; Torano ve ark., 2012).

Üçüncü bölge (>30 m damar kalınlığı) yöntemin en etkin uygulandığı bölge olup (Lai ve ark., 2014; Wang, Dou ve Wang, 2019; Yang ve ark., 2020), bu bölgede ayağın kuyruk kısmının üzerinde oluşan tavan kömürü kaybının tüm üretime oranı %7'den daha azdır.

2.6. Fiziksel Model

Yer altı madencilik uygulamalarında arazi şartlarında araştırılması güç olan problemlerin çözümünde, arazi şartlarının belirli bir ölçekte küçültülmesi doğrultusunda oluşturulan fiziksel modeller günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmakta olup (Zhang, Wang ve Wei, 2018; Zhu ve ark., 2018; Yang, Guo ve Tan, 2019; Wang ve ark., 2020a; Lang ve ark., 2021), Şekil 2.20'de göçertmeli uzunayak üretim yöntemlerinde karşılaşılan problemlerin araştırılmasında kullanılan fiziksel model örnekleri verilmiştir



Şekil 2.20. Fiziksel model örnekleri (Zhang, Zhao ve Gao, 2011; Fan, Zhang ve Wang, 2015; Kang ve ark., 2018; Liang ve ark., 2019; Song ve Konietzky, 2019; Wang, Wei ve Zhang, 2019a; Kang ve ark., 2020).

Arazi koşullarında oluşan problemlerin araştırılmasında kullanılacak fiziksel modellerin araziyi en iyi şekilde temsil edebilecek minimum ölçekte tasarlanması gerekmektedir. Burada büyük ölçekli fiziksel modellerde, modelin ebatları, modelin maliyeti, iş gücü gereksinimi ve test süresi artmakta iken küçük ölçekli modellerde, modelin yerindeki koşulları temsil edebilme özelliği kaybolmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan fiziksel modellere ait genel bilgiler ile araştırma konuları Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan fiziksel modellere ait genel bilgiler ile araştırma konuları (Wang ve ark., 2021’den düzenlendi).

Ölçek	Parça boyutu (mm)	Çalışılan konu				Referans
		Kömür Kaybı	Çekim gövdesi	Çekim sınırları	Diğer	
1/200	-				✓	Wang ve ark., 2017
1/200	-				✓	Yang ve ark., 2018
1/100	-				✓	Li, Wang ve Zhang, 2017
1/100	-				✓	Lang ve ark., 2021
1/100	-				✓	Yang, Guo ve Tan, 2019
1/40	-				✓	Kang ve ark., 2018
1/37,5	-	✓		✓		Huang ve ark., 2008
1/37,5	4-11,3	✓		✓		Wang, 2008
1/37,5	4-26,7	✓		✓		Liu, Huang ve Wu, 2009
1/30	2-20			✓		Wang ve Song, 2015
1/30	5-12	✓	✓	✓		Zhang ve ark., 2015
1/30	5-30	✓	✓	✓		Wang, Zhang ve Li, 2016
1/30	5-20	✓	✓	✓		Zhang, Wang ve Wei, 2018b
1/30	4-9		✓	✓		Song ve Konietzky, 2019
1/30	5-12		✓			Wang, Wei ve Zhang, 2019a
1/30	1-15	✓	✓			Wang, Wei ve Zhang, 2019b
1/30	6,62	✓	✓			Wang ve ark., 2020a
1/28	5-12	✓	✓			Zhu ve ark., 2018
1/25	-	✓		✓		Huang ve ark., 2006
1/25	5-17,5	✓		✓		Huang, Liu ve Cheng, 2007
1/25	-				✓	Liang ve ark., 2019
1/20	-	✓				Özfırat, 2007
1/20	10-20	✓		✓		Wang ve ark., 2014
1/20	5-20		✓			Wang ve ark., 2015b
1/10,5	27-90		✓			Zhang ve ark., 2018b
1/10	-	✓				Özfırat, 2007

Literatürde uzunayak üretim yöntemlerinde karşılaşılan problemlerin çözümüne yönelik geliştirilen fiziksel modeller geometrik ölçek bakımından genel olarak 2 gruba ayrılmaktadır;

- Küçük ölçekli ($<1/40$) modellerde, ayak ilerlemesine bağlı olarak oluşan tabaka ve tasman hareketleri ile yer altı basınç dağılımları,
- Büyük ölçekli ($>1/40$) modellerde, tavan kömürü çekim mekanizmasına bağlı olarak tavan kömürü çekim gövdesi ve sınırları ile tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı araştırılmaktadır.



3. MALZEME VE YÖNTEM

Tavan kömürünün göçertilerek üretildiği üretim yöntemlerinde tavan kömürü kaybı ve kömür seyrelmesi kaçınılmaz problemlerdir. Birçok araştırmacı tavan kömürü kaybını ve kömür seyrelmesini tanımlamak ve iyileştirmek için arazi (Özfırat, 2007; Arıtan ve Acar, 2014; Aşmet, 2019), teorik (Zhu ve ark., 2018; Wang, Wei ve Zhang, 2020), sayısal (Yaşıtlı, 2002; Zhang, Liu ve Pei, 2015; Shahani ve ark., 2019) ve fiziksel (Zhu ve ark., 2018; Liang ve ark., 2019; Song ve Konietzky, 2019; Wang, Wei ve Zhang, 2020; Çelik ve Özçelik, 2022) modelleme çalışmaları ile tavan kömürü çekim mekanizmasını araştırmıştır.

Günümüzde tavan kömürü çekim mekanizmasının araştırılmasında fiziksel modele dayalı laboratuvar testleri ile parçacık akış kodu tabanlı sayısal simülasyonların kullanımı her geçen gün artmakta olup, fiziksel ve sayısal modelleme çalışmalarındaki genel farklılıklar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Fiziksel ve sayısal modelleme çalışmalarının karşılaştırılması (Song ve Konietzky, 2019’dan düzenlendi).

Fiziksel model	Sayısal model
Avantaj	
1 Malzeme akışı arazi koşullarına benzer şekilde kesiklidir.	1 Testlerin tamamlanma süresi kısadır.
2 Test malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri arazideki koşullara yakın seçilebilir.	2 Çekim bölgesinin şeklini belirlemek kolaydır.
3 Çekim işleminin durdurulması arazideki gibi çekim işlemi yapanın kontrolündedir.	3 Çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarının hesabı otomatiktir.
	4 Tavan kömürü kaybının hesabı kolay ve otomatiktir.
	5 Çekim işleminde herhangi bir tanenin hareketini incelemek mümkündür.
Dezavantaj	
1 İşçilik maliyeti yüksektir.	1 Bilgisayar ve sayısal modelleme programının maliyeti yüksektir.
2 Test süresi uzundur.	2 Her bir işlem kodlar vasıtasıyla yapılır.
3 Çekim bölgesinin şeklini ve tavan kömürü kaybını belirlemek zordur.	3 Test parametrelerinin kalibresi zordur.
4 Tavan kömürü ve atık kaya miktarlarının tespiti için çekilen malzemenin elenmesi gerekmektedir.	4 Çekim işleminde malzeme sürekli akmaya zorlanır ve çekimi durdurma işlemi kodlar aracılığıyla yapılır.

Tez çalışmasında arazi koşullarını daha iyi yansıtmaları nedeniyle araştırma yöntemi olarak fiziksel modelleme tercih edilmiştir.

3.1. Fiziksel Modelleme

Bir problemi/sorunu çözümlenmede fiziksel modellemenin tercih edilmesinin birçok nedeni bulunmakla birlikte madencilik uygulamalarında tercih edilmesinin en önemli nedeni üretim faaliyetlerinde karşılaşılan problemlerin arazi koşullarında çözümlenmeye çalışılmasının oldukça maliyetli ve uzun zaman almasıdır. Böylesi güçlüklerin yaşanacağı her koşulda sistemlerin nasıl davranacağını kestirebilmek için fiziksel modellemeye ihtiyaç duyulmaktadır (Tutak ve Güder, 2015).

3.1.1. Fiziksel Model Oluşum Süreci

Fiziksel modelleme çalışmalarında kullanılacak fiziksel modelin gerçek veya gerçeğe yakın verilere dayandırılması ile birlikte modelin kullanımının basit ve problemlerin çözümünde etkin olması gerekmektedir.

Fiziksel bir modelin kullanımının basit olabilmesindeki en önemli parametrelerden biri modelin geometrik ölçeğidir. Geometrik ölçeğe bağlı olarak fiziksel modelin boyutları ve modelde kullanılacak toplam malzeme miktarı farklılık göstermektedir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Fiziksel model geometrik ölçek faktörü.

Ölçek	Model boyutları			*Toplam malzeme miktarı (kg)	**Tahkimat ünitesi genişliği (mm)	**Bir ayak ilerleme miktarı (mm)
	En (m)	Boy (m)	Yükseklik (m)			
1/10	2.4	6.4	2.0	89.088	100	80
1/20	1.2	3.2	1.0	11.136	50	40
1/30	0.8	2.13	0.67	3.311	33.3	26.7
1/40	0.6	1.6	0.5	1.392	25	20
1/50	0.48	1.28	0.4	713	20	16

*Toplam malzeme miktarı hesabında malzeme yoğunluğu 2.9 t/m³ alınmıştır.

**Arazi verileri referans alınmıştır.

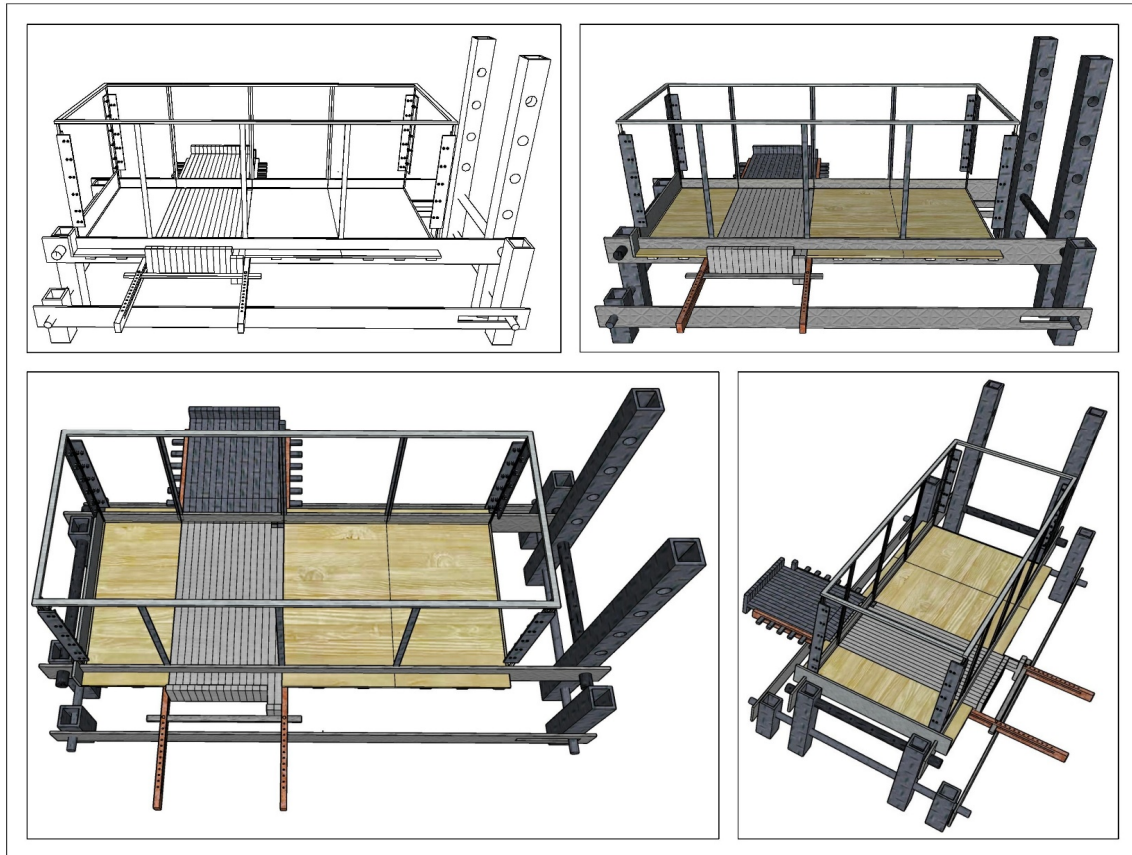
Fiziksel modelde ölçeğe bağlı olarak modelin boyutları ve modelde kullanılacak malzeme miktarı önemli ölçüde değişmektedir. Modelin boyutları genel olarak modelin maliyeti ve kurulum sürecini etkilemekte iken modelde kullanılacak malzeme miktarı test süresi ve iş gücü gereksinimi açısından önem arz etmektedir. Bu açıdan Çizelge 3.2 değerlendirildiğinde;

1/10 ölçekli model, bir teste kullanılacak malzeme miktarı (50-90 ton) ve model maliyetine bağlı olarak elenmiştir.

1/20 ve 1/30 ölçekli modeller, maliyet ve kurulum süreci bakımından uygun olmasına karşın bir testte kullanılacak malzeme miktarından dolayı tercih edilmemiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda bir testte kullanılan toplam malzeme miktarı 1.000 kg'dan daha azdır (Özfırat, 2007; Wang ve ark., 2015b; Zhu ve ark., 2018; Song ve Konietzky, 2019; Wang, Wei ve Zhang, 2019b). Bu miktarın üzerinde fiziksel model testleri güçleşmekte ve test süresi ile iş gücü gereksinimi ciddi derecede artmaktadır.

1/40 ölçekli model, maliyet, kurulum süreci ve modelde kullanılacak malzeme miktarı açısından uygun olup, tez çalışması kapsamında tercih edilen modeldir. Bu ölçekte tasarlanan modelde bir testte 700 ila 1.400 kg arası malzeme kullanılmaktadır.

Fiziksel model çalışmalarında tavan kömürü ve atık kayayı temsilen kullanılan malzemelerin parça boyut dağılımı, çekim bölgesi boyutları üzerinde etkili bir parametredir. Bu nedenle 1/50 ölçeğinde tasarlanacak model, maliyet, kurulum ve malzeme miktarı açısından uygun görülmesine rağmen malzeme akışının sağlanacağı çekim bölgesinin dar olmasından kaynaklı tercih edilmemiştir.



Şekil 3.1. 3 boyutlu programda çizilen fiziksel modelin farklı açılardan görüntüsü.

Geometrik ölçeği 1/40 olarak belirlenen fiziksel model 3 boyutlu bilgisayar programında (SketchUp) çizildikten (Şekil 3.1) sonra atölye ortamında oluşturulmuştur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Fiziksel modelin imalatı yapıldıktan sonraki test öncesi genel görüntüsü.

3.1.2. Fiziksel Modelde Kullanılacak Malzemenin Seçimi

Fiziksel modelleme çalışmalarının gerçek veya gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi için tavan kömürü çekim mekanizmasının yerindeki koşullara olabildiğince benzer olması gerekmektedir.

Arazi şartlarında ölçülmesi pek mümkün olmamakla birlikte tavan kömürü çekim işleminde tavanın kırılmadığı durumlarda yapılan gözlemlere ve ölçümlere bağlı olarak tavan kömürünün akma açısının 65° ila 75° arasında olduğu bilinmektedir.

Öte yandan tavan kömürü çekim işleminde 3 evre bulunmaktadır. Birinci evre çekim işleminin başlatıldığı ve yalnızca tavan kömürünün çekildiği evredir. İkinci evrede devam eden tavan kömürü çekim işleminde tavan kömürü ve atık kaya birlikte çekilmektedir. Üçüncü evre çekim işleminin sonlandırıldığı evredir. Burada ikinci evrenin başlarında çekilen malzeme içerisinde tavan kömürü ağırlıklı iken evrenin sonlarına doğru çekilen malzeme içerisindeki kömür oranı azalmakta ve atık kaya miktarı artmaktadır (Bkz. Şekil 2.4). Literatürde genel olarak tavan kömürünün %80'i çekildiğinde üçüncü evreye geçilmekte ve çekim işlemi durdurulmaktadır. Ancak ADL işletmelerinde üretim kaybını

önlemek amacıyla ayak arkasında kömür bırakmamak için tavan kömürünün tamamı çekilmektedir. Bu işlemde ikinci evrenin sonlarına doğru çekilen malzeme içerisindeki atık kaya miktarı ciddi oranda artmakta ve çekilen atık kayanın parça boyut dağılımının tavan kömürüne kıyasla daha büyük olmasından kaynaklı çekim bölgesi tıkanmakta ve bu da ayak bölgesinden çekim bölgesine müdahale edilerek aşılmaktadır.

Bu bilgiler ışığında fiziksel modelde kullanılacak malzemelerin, akma açısının 65° ile 75° 'ye olabildiğince yakın ve ikinci evrenin sonlarına doğru çekim bölgesinde tıkanma oluşturabilecek özellikte olması modelin doğruluğu için son derece önem arz etmektedir. Tez çalışması kapsamında fiziksel modelde yapılan ön deneme çalışmalarında malzeme testleri ve karşılaşılan durumlar Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Fiziksel modelde denenen malzeme boyutları ve karşılaşılan durumlar.

Malzeme	Fiziksel modelde karşılaşılan durum
15-22 mm kireçtaşı	Malzeme akışı sağlanamamıştır.
5-15 mm kireçtaşı	Malzeme akışı 15-22 mm malzemeye göre nispeten sağlanmış olsa da yerindeki koşulları temsil etmemektedir.
0-5 mm kireçtaşı	Malzeme akışında sorun olmamakla birlikte malzemenin 0-2 mm'lik kısmı tahkimat ünitelerinin sıkışmasına neden olmaktadır. Ayrıca testlerde malzemenin akma açısının 75° ile 85° arasında olduğu gözlemlenmiştir.
3-5 mm kireçtaşı	Malzeme akışı yerindeki koşullara benzer şekilde sürekli akmaya eğilimli ve akma açısı 62° ile 78° arasındadır.
5-8 mm bazalt	Malzeme akışı sırasında oluşan tıkanma yerindeki koşullara yakın olmakla birlikte malzeme sürekli akmaya eğilimlidir.
5-10 mm bazalt	Malzeme akışı sırasında oluşan tıkanma yerindeki koşullara benzer olmakla birlikte malzeme akışı kesiklidir.

Fiziksel modelde yapılan malzeme testlerinde, yerindeki koşullara daha yakın sonuçlar elde edilen 3-5 mm boyutlarında gri renkli kireçtaşı tavan kömürünü temsilen, 5-10 mm boyutlarındaki siyah renkli bazalt ise atık kayayı temsilen fiziksel modelde test malzemesi olarak tercih edilmiştir.

Fiziksel model test malzemeleri Şekil 3.3'de gösterilmekte olup, malzeme özellikleri aşağıda belirtilmiştir;

- Kireçtaşı (3-5mm);
 - ✓ Yoğunluğu $2,82 \text{ t/m}^3$,
 - ✓ İçsel sürtünme açısı $37,3^\circ$.

- Bazalt (5-10mm);
 - ✓ Yoğunluğu 2,99 t/m³,
 - ✓ İçsel sürtünme açısı 48,7°.

Fiziksel model testlerinde, tavan kömürü temsilen kullanılan 3-5 mm boyutlarındaki kireçtaşının yığın yoğunluğu son derece önemli bir parametre olup, yapılan testlerde kireçtaşının yığın yoğunluğu 1,78 kg/cm³ ila 1,88 kg/cm³ arasında, ortalama 1,82 kg/cm³ olarak tespit edilmiştir.



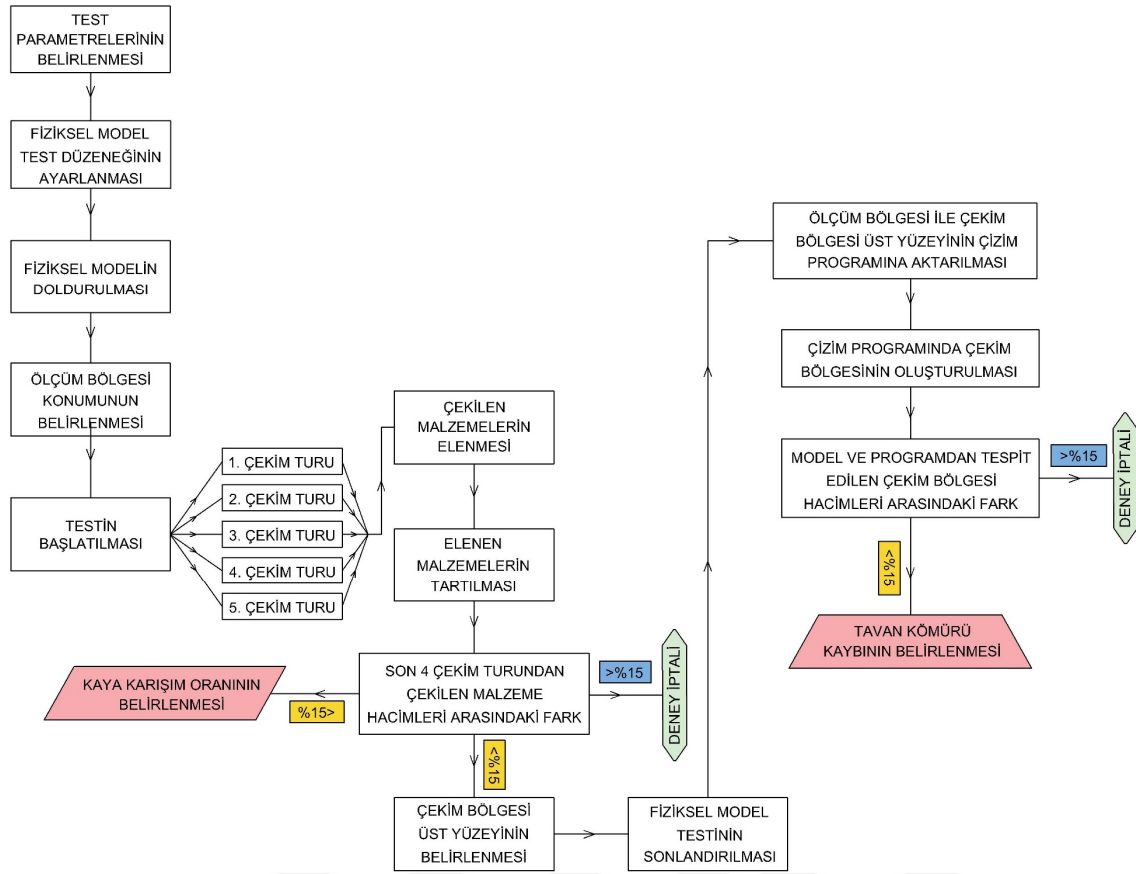
Şekil 3.3. Fiziksel model test malzemesi.

3.1.3. Fiziksel Model Uygunluk Testi

Fiziksel modelin uygunluk testi için Alpagut Dodurga Linyitleri yer altı işletmesinde yerinde arazi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Arazi ölçümlerine ait detay bilgiler Bölüm 4’de arazi verileri ile test edilen fiziksel modele ait detay bilgiler ise Bölüm 5’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.2. Test Süreci

Bir laboratuvar testinde kaya karışım oranı ve tavan kömürü kaybını belirlemek için öncelikli olarak fiziksel model çalışması gerçekleştirilmekte (kaya karışım oranı yalnızca fiziksel model çalışmalarından belirlenebilmektedir) ve sonrasında fiziksel modelden elde edilen veriler 3 boyutlu çizim programına aktarılarak program üzerinden tavan kömürü kaybı hesaplanmaktadır. Bu bölümde bir laboratuvar testinde yürütülen birim faaliyetler ayrıntılı olarak açıklanmış olup, Şekil 3.4’de birim faaliyetlerin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4. Bir laboratuvar testinde yürütülen birim faaliyetler.

3.2.1. Fiziksel Model Test Düzenliğinin Ayarlanması

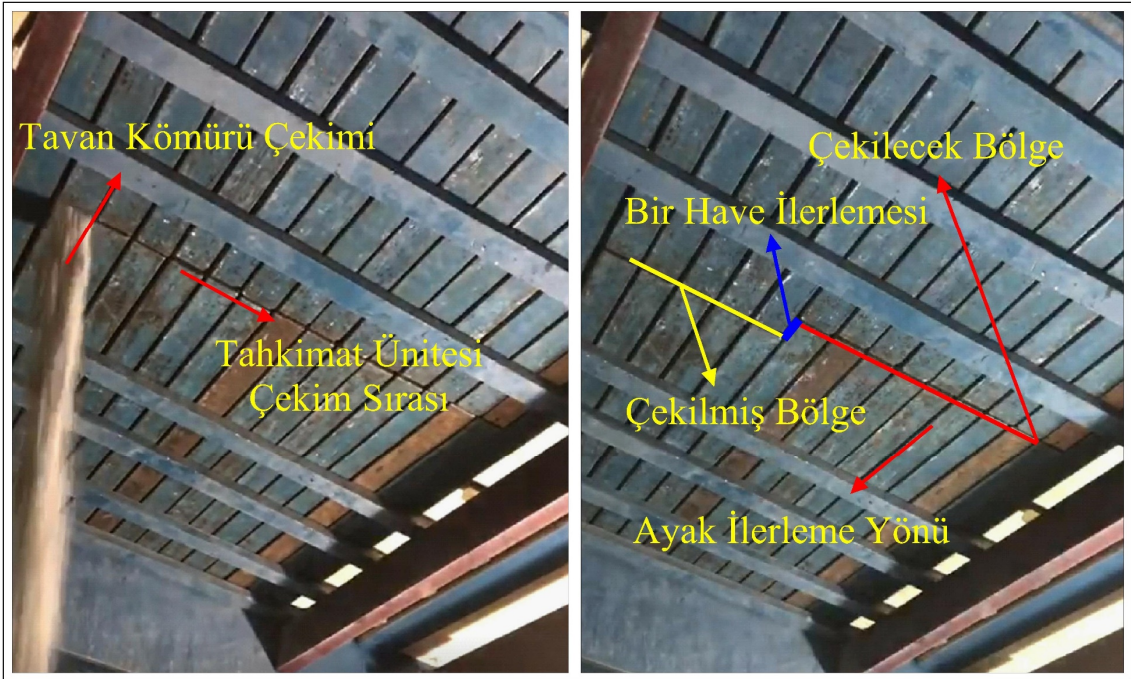
Test parametrelerinin belirlenmesi ile başlayan test sürecinde ilk olarak fiziksel model test düzeneği test parametrelerine uygun şekilde ayarlanmaktadır. Bu aşamada model düzeneğinde ayak boyu, ayak eğimi, tavan kömür yüksekliği, kömür damarı eğimi ve ölçüm bölgesinin konumu ayarlanmakta ve sonrasında fiziksel model, test malzemeleri ile doldurulmaktadır (Şekil 3.5). Fiziksel modelin doldurulması aşamasında kömür damarı eğiminin ayarlanabilmesi için kömür ve yan kayaç (atık kaya) arasına damar eğimini yansıtacak şekilde plaka konmakta ve sonrasında kömür ve yan kayacı temsilen kullanılan malzemeler ile fiziksel model kademeli olarak doldurulmaktadır. Modelde kömürün tamamının doldurulması sonrasında kömür ve yan kayacı ayıran plaka kaldırılmaktadır. Bu aşamada plakanın düzgün ve yavaş bir şekilde çıkarılması son derece önem arz etmekte olup, bu kısımda yapılacak bir hatada kömür damarının eğimi değişeceğinden dolayı testin tekrarlanması gerekecektir. Bu aşamadan sonra fiziksel modelde kömürün tavan kısmı atık kaya ile doldurularak teste hazır hale getirilmektedir.



Şekil 3.5. Fiziksel modelin tavan kömürü ve atık kaya ile doldurulması.

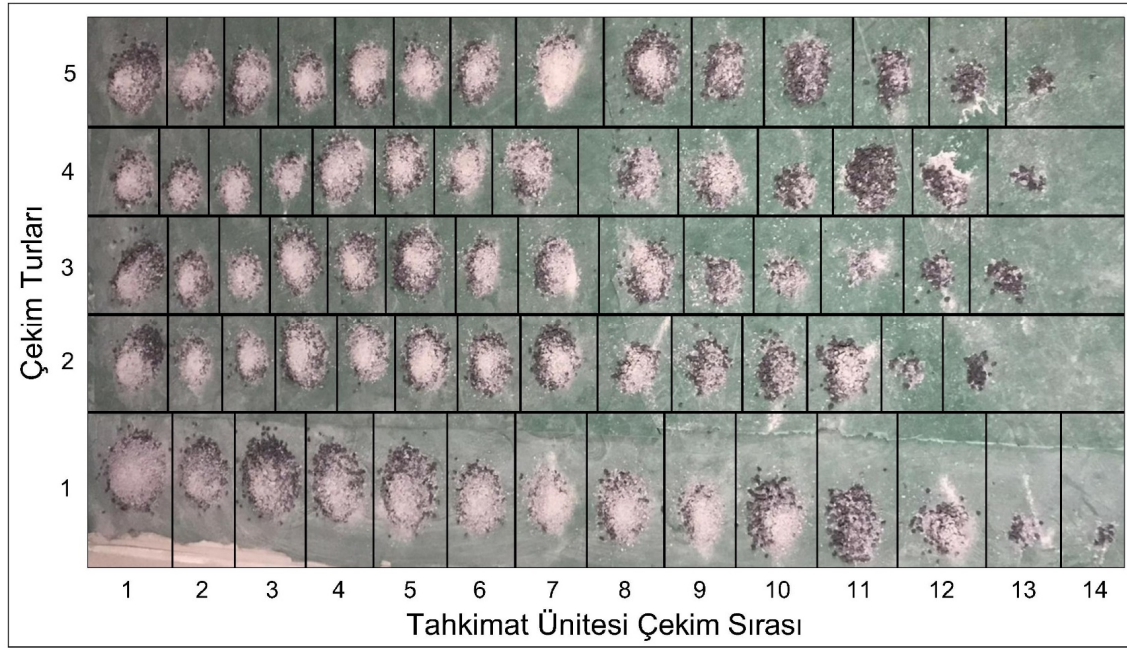
3.2.2. Tavan Kömürü Çekim Süreci

Fiziksel modelin doldurulması sonrasında ölçüm bölgesinin fiziksel model üzerindeki konumu kaydedilerek (alt yüzey) fiziksel model testi başlatılmaktadır. Testte tavan kömürü çekim işlemine ilk olarak ayağın kuyruk kısmındaki tahkimat ünitesinden başlanmakta ve sonrasında sırasıyla tüm tahkimat üniteleri çekilmektedir (Şekil 3.6)



Şekil 3.6. Tavan kömürü çekim süreci.

Tahkimat ünitelerinin tamamının ilerletilmesi bir çekim turu olarak adlandırılmakta olup, tez çalışmasında 3 boyutlu fiziksel model testlerinde 5 çekim turu gerçekleştirilmiştir. Her bir çekim turundan çekilen malzemelere ait görsel Şekil 3.7’de verilmiştir.



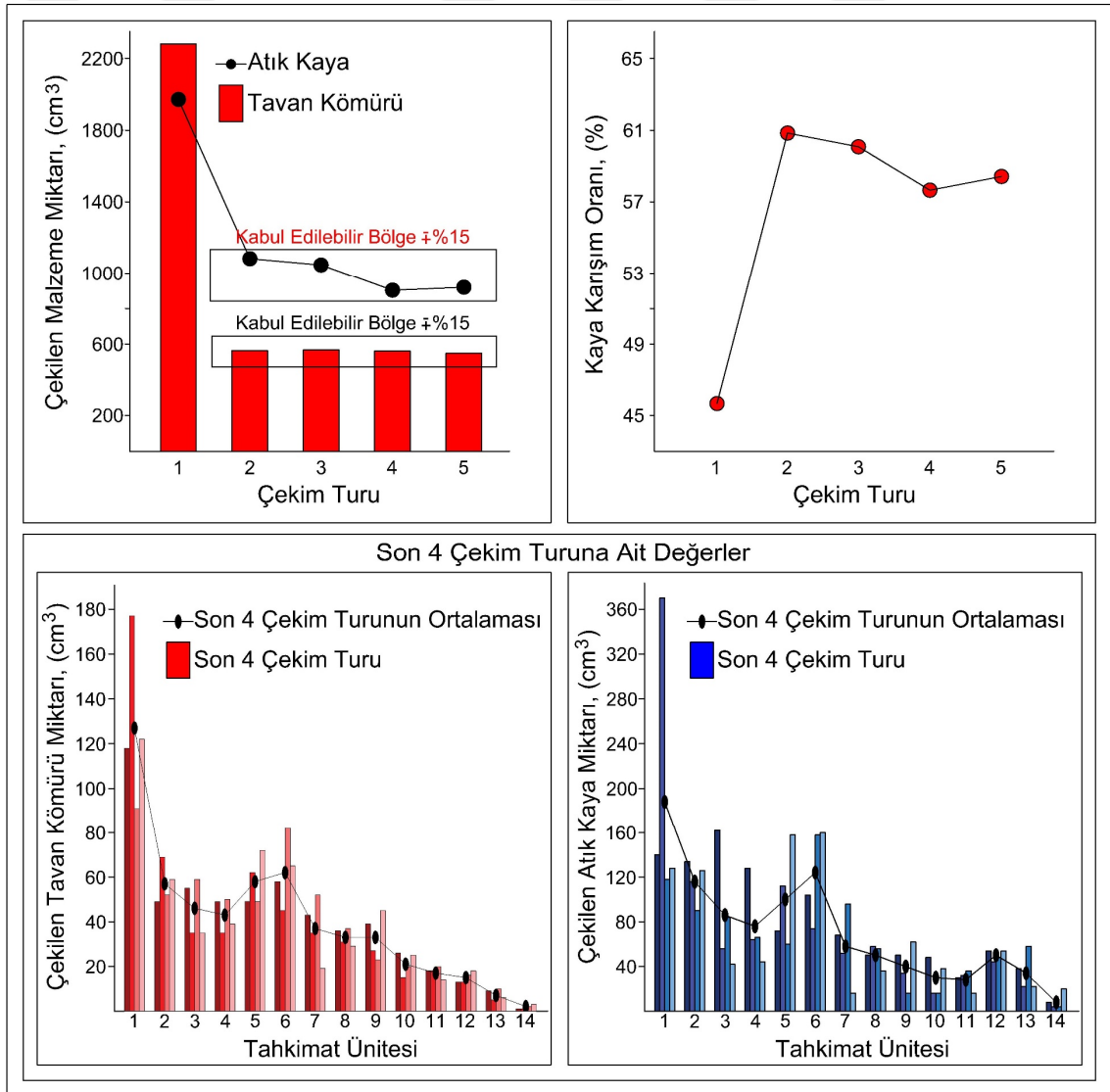
Şekil 3.7. Çekilen malzemelere ait görsel.

Fiziksel model testinde en önemli süreç çekim işleminin sonlandırılacağı zamandır. Bu zamanın her bir çekim işleminde benzer olması test sonuçlarının doğruyu yansıtması açısından son derece önemlidir. Dolayısıyla bu parametrede araştırmacının etkisinin minimuma indirileceği bir sistemin kurulması gerekmektedir. Tez çalışmasında çekim işleminin durdurulacağı zaman çekim bölgesinin tıkanma olayı ile kontrol edilmektedir. Burada, fiziksel model malzeme testlerinde 5-8 mm ve 5-10 mm bazaltın kullanımı ile yerindeki koşullara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak 5-8 mm malzeme ile yapılan testlerde çekim işleminin durdurulması gereken zamanın tıkanma olayından ziyade araştırmacının kontrolünde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan tekrar testlerinde araştırmacının sonuçlar üzerinde %15'den daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. 5-8 mm malzeme ile yapılan testler sonrasında fiziksel modelde 5-10 mm bazalt, test malzemesi olarak denenmiş ve yapılan testlerde çekim işleminin durdurulacağı zaman, tıkanma olayı ile kontrol altına alınabilmektedir. Ayrıca yapılan tekrar testlerinde araştırmacının test sonuçları üzerindeki etkisinin %5'den daha az olduğu tespit edilmiştir. Çekim sürecinin kontrolü ile ilgili olarak tavan kömürü çekim işlemi esnasında çekilen tavan kömürü ve atık kaya karışımı içerisindeki atık kaya miktarı arttıkça çekim bölgesinde tıkanmakta ve bu tıkanıklık sisteme müdahale edilerek aşılmakta ve malzeme akışı sağlanmaktadır. Burada her bir müdahalede malzeme miktarı bir önceki tıkanmaya kıyasla azalmakta ve tıkanma sıklığı artmaktadır. En nihayetinde çekilen malzeme içerisindeki 3-5 mm boyutlarındaki malzeme tükendiğinde oluşan tıkanma sisteme

müdahale edilerek aşılsa da sonuçları etkileyebilecek bir malzeme akışı sağlanmamaktadır. Ayrıca burada oluşan tıkanma sıklığı ve çekilen malzeme miktarındaki azalma çekim sürecinin sonlandırılması gerekliliğini belirten en önemli koşuldur.

3.2.3. Kaya Karışım Oranının Hesabı

Çekim turlarının tamamlanması sonrasında çekilen malzemeler elenmekte ve elek altı (tavan kömürü) ile elek üstü (atık kaya) malzemeler tartılarak çekilen malzeme içerisindeki tavan kömürü ve atık kaya miktarları tespit edilmektedir. Şekil 3.8’de bir fiziksel model testinden çekilen malzeme miktarlarının çekim turu ve çekilen tahkimat ünitesine bağlı olarak değişiminin grafiksel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.8. Bir fiziksel model testine ait çekilen malzeme miktarlarının çekim turu ve çekilen tahkimat ünitesine bağlı olarak değişiminin grafiksel görünümü.

Fiziksel model testlerinde ilk çekim turunda tavan kömürü ve yan kayaç arasındaki sınırlar oluşmakta ve sonraki 4 çekim turu bu sınırlar dahilinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle son 4 çekim turundan çekilen malzeme miktarlarının birbirlerine yakın olması gerekmektedir. Tez çalışmasında fiziksel model testlerinde son 4 çekim turundan çekilen malzeme miktarlarının ortalamadan %15 (bu değer arazi çalışmalarından edinilen tecrübelerle dayanılarak belirlenmiştir) farklı olması durumunda test iptal edilmektedir.

Test malzemelerinin yoğunluk farkının kaya karışım oranı üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak için tespit edilen tavan kömürü ve atık kaya miktarlarının hacim değerleri hesaplamalarda kullanılmaktadır.

Kaya karışım oranının hesabında (Eşitlik 3.1) son 4 çekim turundan çekilen malzemelerin hacim değerleri kullanılmaktadır.

$$\text{Kaya karışım oranı} = O_{KK} = \frac{V_{AK}}{V_{TM}} \times 100 \quad (3.1)$$

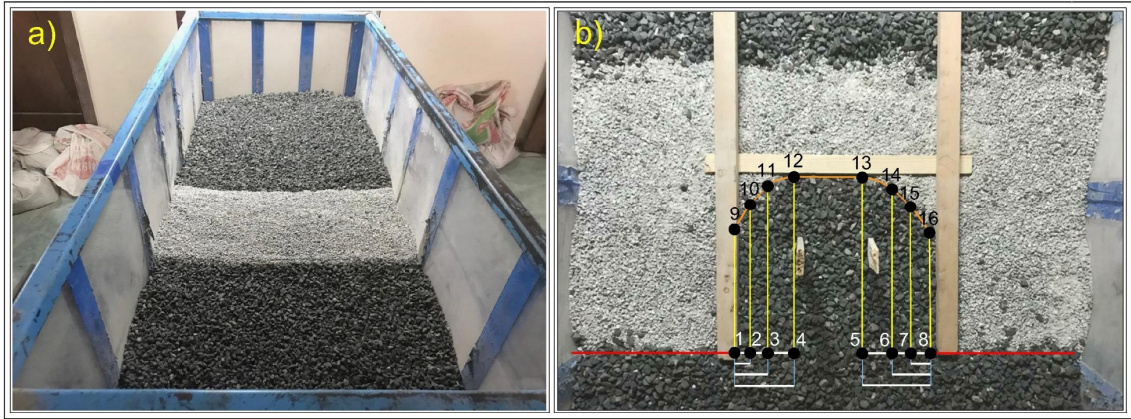
Eşitlik 3.1’de;

- ✓ Çekilen toplam malzeme miktarının hacmi V_{TM} ,
- ✓ Çekilen toplam malzeme içerisindeki atık kaya miktarının hacmi V_{AK} olarak ifade edilmektedir.

3.2.4. Çekim Bölgesi Üst Yüzeyinin Tespiti

Fiziksel modelde çekim turları tamamlandıktan sonra çekim bölgesi üst yüzeyinin fiziksel model üzerindeki konumunu tespit edebilmek amacıyla fiziksel model, üst kısımdan tavan kömürü üst yüzeyine denk gelinceye kadar kademeli olarak boşaltılmaktadır. Bu aşamada çekim bölgesi üst yüzeyinin zarar görmemesi önem arz etmekte olup, olası bir hatada test tekrarlanmaktadır. Boşaltma işlemi sonrasında tavan kömürü üst yüzeyinde görülen çekim bölgesi sınırlarının (üst yüzey) fiziksel model üzerindeki konumu Şekil 3.9’da gösterildiği gibi titizlikle kaydedilmektedir. Bu aşama, tavan kömürü kaybının tespitinde son derece önemli olduğundan dolayı çekim bölgesi üst yüzeyine ait en az 16 farklı noktanın model üzerindeki konumu kaydedilerek üst yüzeyi tespit edilmektedir.

Ayrıca çekim bölgesi üst yüzeyinin tespitinde fark edilemeyen bir hata oluştuğunda bu durum, fiziksel modelden çekilen tavan kömürü miktarı ile çizim programından tespit edilen tavan kömürü miktarının karşılaştırıldığı aşamada ortaya çıkmakta ve test tekrarlanmaktadır.



Şekil 3.9. Çekim bölgesi üst yüzeyinin model üzerindeki konumunun tespiti a) çekim öncesi tavan kömürü üst yüzeyi b) çekim sonrası tavan kömürü üst yüzeyi.

Çekim bölgesi üst yüzeyinin tespiti, test sürecinin fiziksel model ile ilgili son aşamasıdır. Bu aşamadan sonra fiziksel model içerisindeki malzeme tamamen boşaltılmakta ve fiziksel model temizlenerek diğer testlere hazırlanmaktadır.

Fiziksel model testlerinde kullanılan kireçtaşı ve bazaltın test aşamasında yıpranmasından kaynaklı malzemenin test sürecini etkilememesi için test malzemesi en fazla 3 testte kullanıldıktan sonra yeni test malzemesi ile değiştirilmektedir.

3.2.5. Çekim Bölgesinin Çizim Programına Aktarımı ve Kömür Kaybının Tespiti

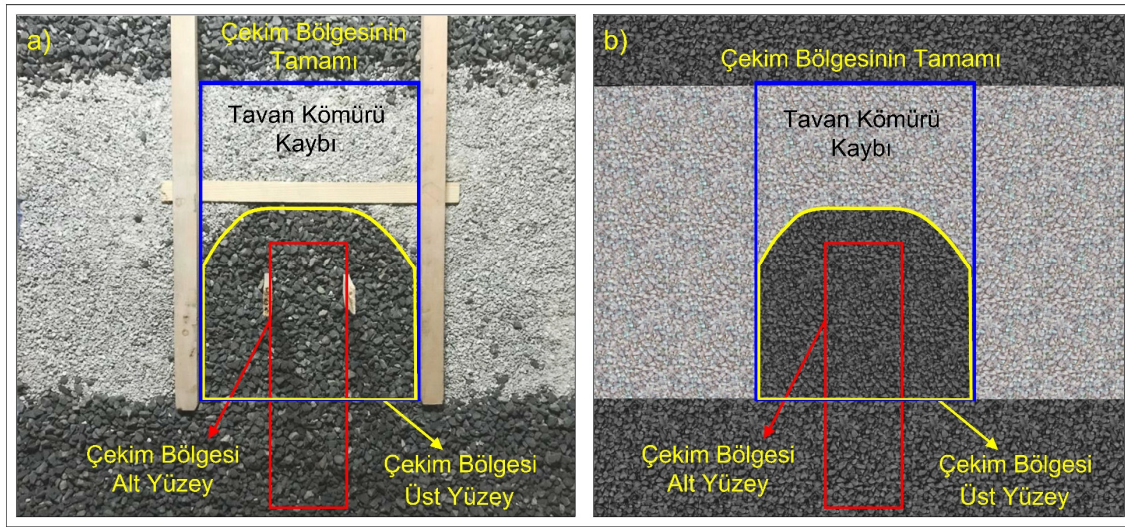
Fiziksel model testinde ölçüm bölgesinin model üzerindeki konumu tavan kömürü çekim bölgesinin alt yüzeyini oluşturmakta iken testin tamamlanması sonrasında tavan kömürü üst yüzeyinde oluşan çekim bölgesi sınırları tavan kömürü çekim bölgesinin üst yüzeyini oluşturmaktadır.

Fiziksel model testinden tespit edilen alt ve üst yüzeyler Şekil 3.10’da gösterildiği gibi 3 boyutlu çizim programına (SketchUp) aktarılmakta ve programda yüzeyler birleştirilerek tavan kömürü çekim bölgesi oluşturulmaktadır. Çizim programında oluşturulan çekim bölgesi Şekil 3.11’de verilmiştir.

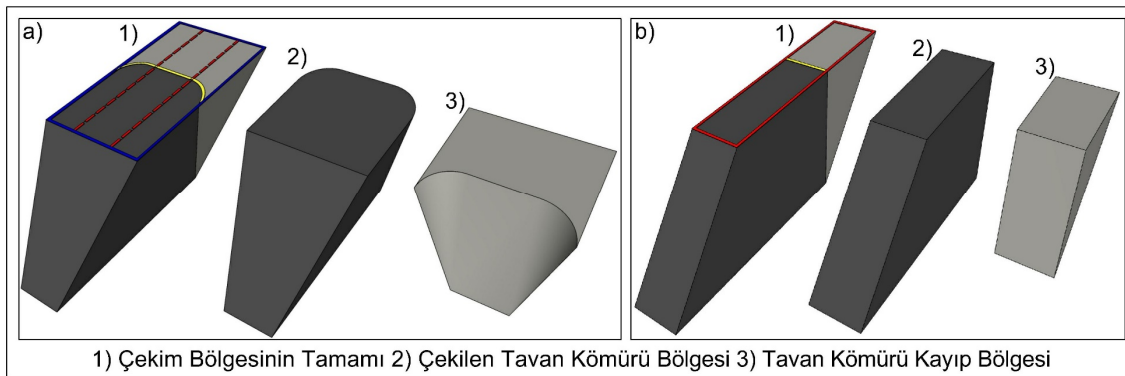
Çizim programında oluşturulan çekim bölgesinin uygunluğunun tespiti için çizim programdan tespit edilen çekim bölgesindeki kömür miktarı ile fiziksel modelden çekilen kömür miktarı karşılaştırılmakta ve iki değer arasında %15’den fazla fark oluşması durumunda test iptal edilmektedir. Burada %15’lik hata payının belirlenmesindeki etkin faktörler aşağıda verilmiştir;

- Fiziksel modelde tavan kömürünü temsilen kullanılan kireçtaşının yığın yoğunluğu,
- Fiziksel modelde çekim bölgesi üst yüzeyinin tespiti aşamasında yaşanan problemler,
- Fiziksel modelden tespit edilen tavan kömürü üst yüzeyinin çizim programına aktarılması aşamasında yaşanan problemler.

Çizim programından tespit edilen çekim bölgesindeki kömür miktarı, çekim bölgesi hacminin malzemenin yığın yoğunluğuna ($1,82 \text{ kg/cm}^3$) bölünmesi ile bulunmaktadır.



Şekil 3.10. Tavan kömürü alt ve üst yüzeylerinin çizim programına aktarımı a) fiziksel model görüntüsü b) çizim programı görüntüsü.



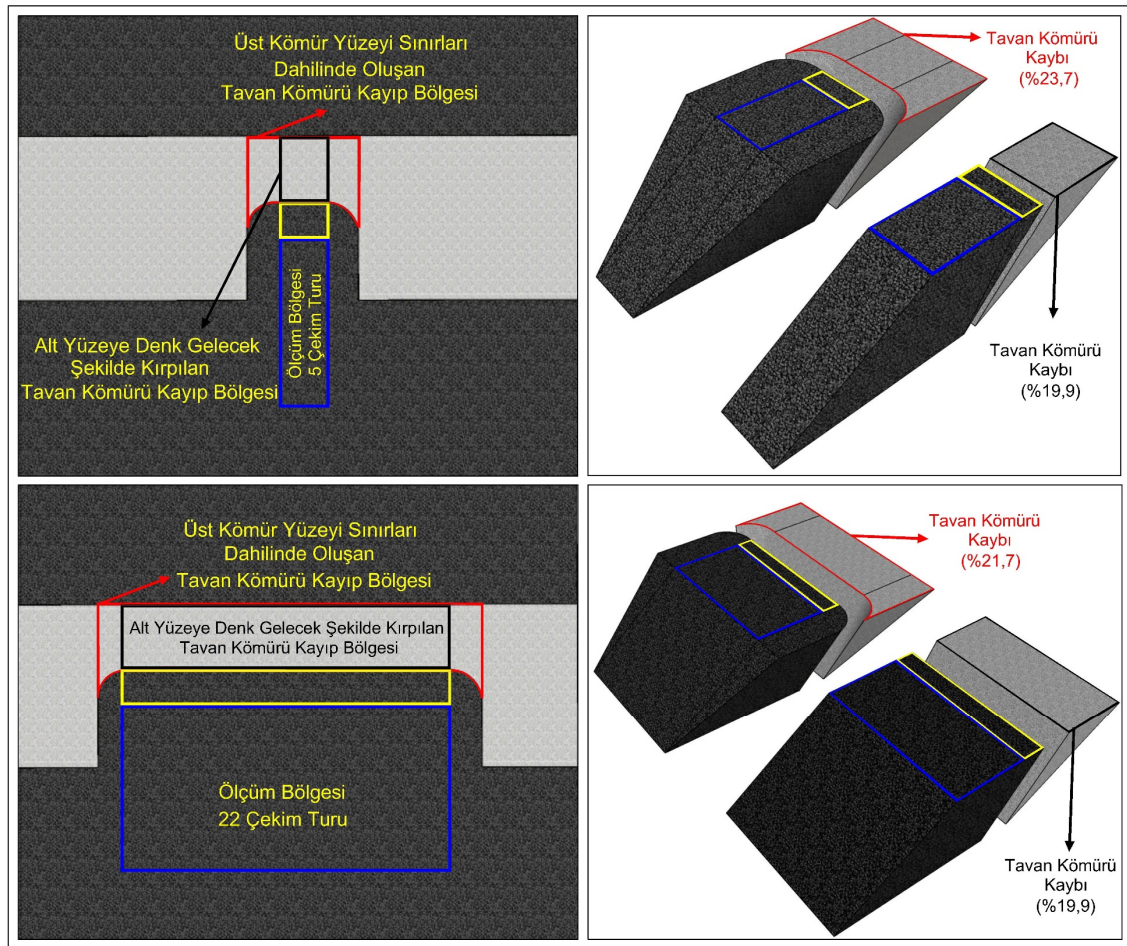
Şekil 3.11. Tavan kömürü çekim bölgesi.

Fiziksel modelden tespit edilen alt ve üst yüzeylerin programda birleştirilmesi sonucunda oluşan çekim bölgesi, Şekil 3.11a'da gösterilmekte iken, Şekil 3.11b'de üst yüzeyin alt yüzeye denk gelecek şekilde kırılması ile oluşturulan çekim bölgesi gösterilmektedir.

Tavan kömürü kaybı Eşitlik 3.2 yardımıyla hesaplanmakta olup, Eşitlik 3.2’de tavan kömürü miktarı (çekim bölgesinin tamamının hacmi) $V_{ÜK}$ ve üretilemeyen tavan kömürü miktarı (tavan kömür kayıp bölgesinin hacmi) $V_{ÜKK}$ olarak ifade edilmektedir.

$$\text{Tavan Kömürü Kaybı} = O_{ÜKK} = \frac{V_{ÜKK}}{V_{ÜK}} \times 100 \quad (3.2)$$

Tavan kömürü kaybının hesabı Şekil 3.11’den görüleceği üzere iki farklı şekil üzerinden yapılabilir. Burada Şekil 3.11a’dan tespit edilen tavan kömürü kaybı çekim turu sayısından etkilenmekte ve çekim turu sayısı artışına bağlı olarak Şekil 3.11b’den tespit edilen tavan kömürü kaybına yaklaşmaktadır. Çekim turu sayısına bağlı olarak tavan kömürü kaybında oluşan değişim Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Tavan kömürü kaybı ve çekim bölgesi arasındaki ilişki.

Şekil 3.12’den görüleceği üzere 5 çekim turu sonunda tavan kömürü kaybı Şekil 3.11a’da gösterildiği gibi hesaplandığında %23,7, Şekil 3.11b’de gösterildiği gibi hesaplandığında

%19,9 olarak belirlenmiştir. Buna karşın çekim turu sayısı 22'ye yükseltildiğinde tavan kömürü kaybı ilk durumda %21,7 ve ikinci durumda ise yine %19,9 olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak tavan kömürü kaybının hesabı alt ve üst yüzeylerin birleştirilmesi sonucunda oluşan şekil üzerinden yapıldığında çekim turu sayısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle tez çalışmasında tavan kömürü kaybının hesabı Şekil 3.11b'de gösterildiği gibi üst yüzeyin alt yüzeye denk gelecek şekilde kırılması ile oluşturulan çekim bölgesi üzerinden yapılmıştır.

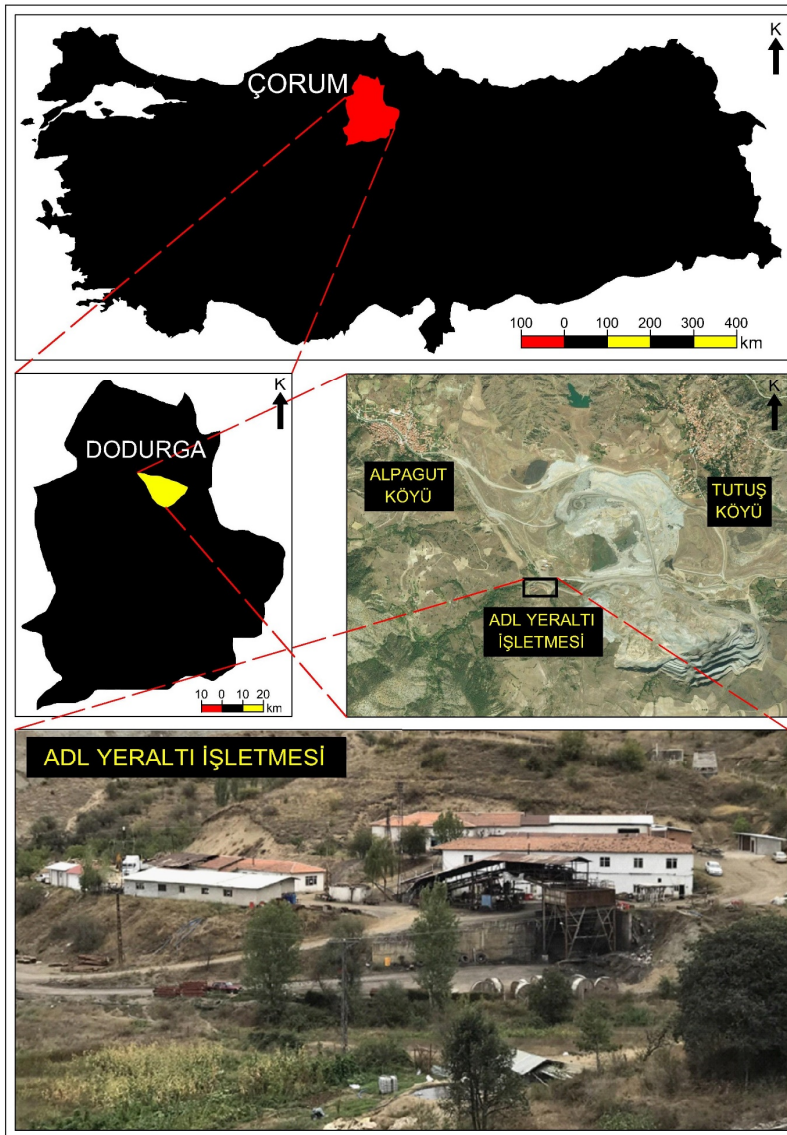


4. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Arazi çalışmaları, Alpagut Dodurga Linyitleri yer altı işletmesinde gerçekleştirilmiş olup, bu bölümde, çalışma sahasının genel tanıtımı ile çalışma sahasında yürütülen arazi çalışmalarına yer verilmiştir.

4.1. Çalışma Sahasının Genel Tanıtımı

Çalışma sahası, Çorum ili Dodurga ilçesine bağlı Alpagut ve Tutuş köyleri arasında yer almakta olup, sahaya ait yerbulduru haritası Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışma sahasına ait yerbulduru haritası.

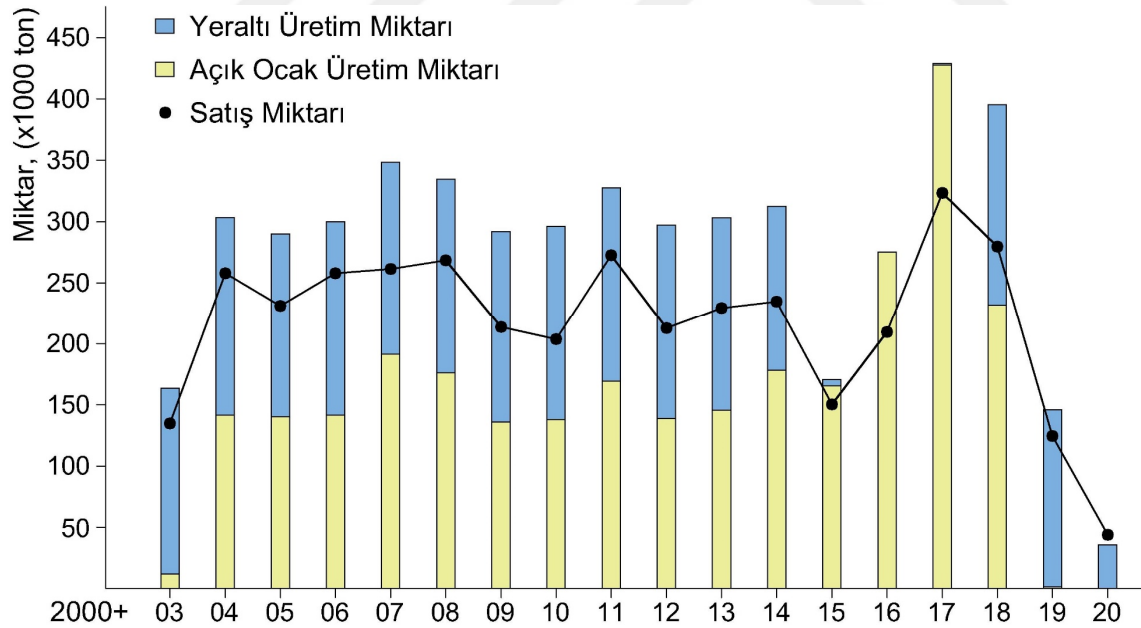
Günümüzde Alpagut Dodurga Linyitleri (ADL) olarak adlandırılan saha esasında çalışma sahasında bulunan Dodurga ve Alpagut ocaklarının 1964 ve 1970 yıllarında Maden

Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü ve Tutuş köyü muhtarlığından TKİ'ye devredilmesiyle oluşturulmuştur (Yücekent, 1979).

Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Kurumu çalışma sahasındaki üretim faaliyetlerini 2002 yılına kadar açık ocak ve yer altı işletmeciliği ile ADL İşletmesi Bölge Müdürlüğü tarafından yürütmüş ve 2002 yılında sahanın işletmeciliğini rodövans usulüyle özel bir firmaya devretmiştir.

Çalışma sahasında 2014 yılına kadar açık ocak ve yer altı işletmecilik yöntemleri ile üretim faaliyetlerinde bulunan firma, 2014 yılı sonunda yer altı üretim faaliyetlerini durdurarak çalışmalarına açık ocak işletmeciliği ile devam etmiştir.

Yaklaşık 3 yıl boyunca kapalı kalan yer altı işletmesi 2017 yılında yine rodövans usulüyle TKİ Kurumunca, iştiraki olan Kömür İşletmeleri Anonim Şirketine devredilmiştir. Günümüzde yer altı üretim faaliyetleri halen Kömür İşletmeleri Anonim Şirketi tarafından yürütülmekte olan çalışma sahasında, 2002-2020 yılları arasında gerçekleşen üretim ve satış miktarları Şekil 4.2'de verilmiştir.

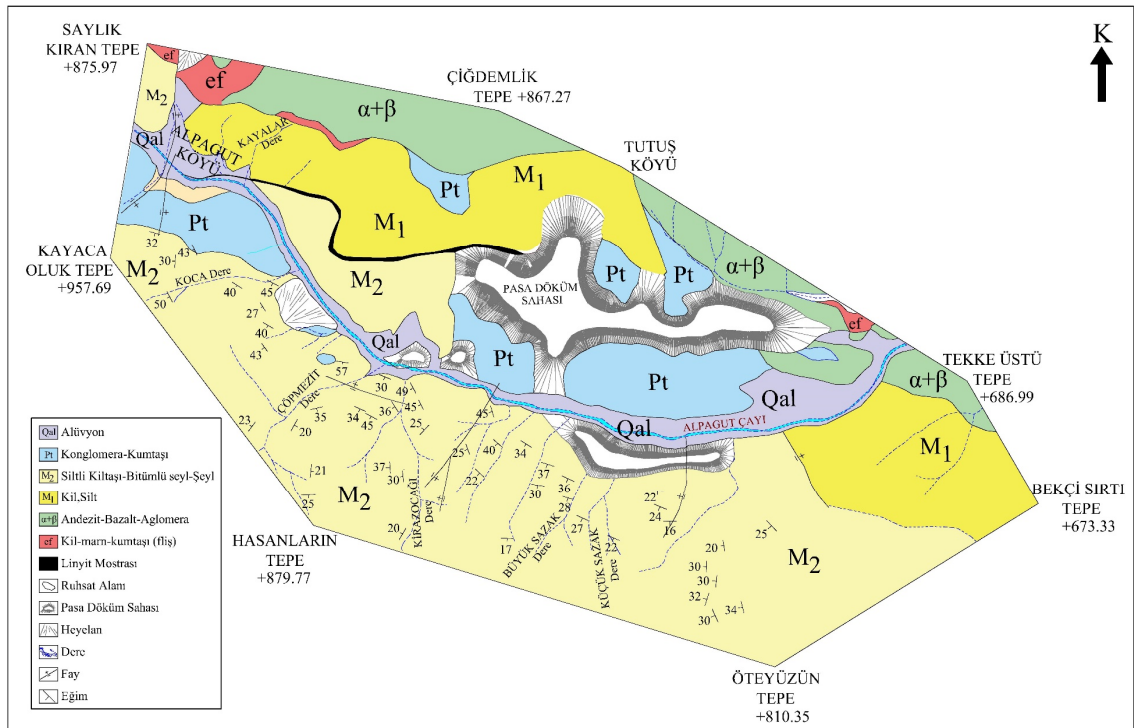


Şekil 4.2. ADL kömür üretim ve satış miktarı.

Çalışma sahası konumu gereğince Çorum ili ve civar bölgelerdeki sanayilerin ihtiyacı olan kömürün karşılanması aşamasında önem arz etmekte olup, günümüzde sahadan üretilen kömürün büyük bir çoğunluğu Sosyal Yardımlaşma ve Dayanışma Vakıf Başkanlıklarınca muhtaç ailelere sevk edilmektedir.

4.1.1. Genel Jeoloji

Çalışma sahası Eosen'in başlarında sular altında iken, sonlarına doğru kara haline geçmeye başlamış ve Oligosen'de tamamen kara haline gelmiştir. Bölgedeki linyit oluşumunda Miyosen'de başlayan çökmeler etkili olmuş ve bu dönemde bölgenin duraylı hale gelmesiyle havzada linyit oluşumu başlamıştır (Kara ve ark., 1990; Uğur, 1994). Linyit damarını içeren birimin tabanında Eosen yaşlı kil, kumtaşı, marn ve yer yer konglomeralar bulunmakta (Yücekent, 1979) olup, çalışma sahasına ait jeoloji haritası Şekil 4.3'de ve stratigrafik kesit Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Çalışma sahasına ait jeolojik harita (Kara ve ark., 1990).

Çalışma sahasında linyit horizonunun tabanında yer alan kayaçlar (M₁) Alpogut ve Tutuş köyleri arasında ve Bekçi Sirtı Tepenin batısında yüzeylenmekte iken linyit horizonu ve horizonun tavanında yer alan kayaçlar (M₂) Alpogut köyünün güneyinde, Koca Dere, Çöpmezit Dere ve Öteyüzün Tepenin kuzeyinde yüzeylenmektedir. Andezit, bazalt ve aglomeralardan oluşan volkanik kayaçlar (α+β) çalışma sahasının kuzeyinde Çığdemlik Tepe ve Teke Üstü Tepe ile Tutuş köyü arasında yüzeylenmekte iken gevşek çimentolu konglomera ve kumtaşlarından oluşan Pleistosen yaşlı taraçalar (Pt) Alpogut ve Tutuş köyleri güneyinde yüzeylenmektedir (Kara ve ark., 1990). Ek olarak kum ve çakıl bloklardan oluşan alüvyonlar (Qal) Alpogut Çayı boyunca depolanmıştır.

ÜST SİSTEM	SİSTEM	ALT SİSTEM	SERİ	KALINLIK	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK (66 Milyon yıl öncesinden günümüze kadar olan zaman)	KUVATERNER		HOLOS- EN			P Pasa
			PLEİSTO- SEN	50m		Qal Alüvyon (kum, çakıl, silt) Gevşek çimentolu, konglomera-kumtaşı Pt Diskordans Silt, kıltaşı, şeyl Bitümlü şeyl, renk gri açık kahve
		NEOJEN (23,03-2,58 milyon yıl öncesi zaman)				M ₂ Böcek kitüküllü
	TERSİYER (66-2,588 milyon öncesi zaman)	MIYÖSEN (23,5-5,3 milyon yıl öncesi zaman)		500m		M ₁ Kil-kumtaşı Linyit horizonu Kil-silt mavimsi yeşil Kil hamurlu breş Alacalı killler, kızıl kahve renkli killler arada linyit damarları var
		PALEOJEN (66-23,03 milyon yıl öncesi zaman)				α+β Konglomera, iri taneli çakıl-blok boyutları arası polijenik Diskordans Andezit-Bazalt-Aglomera
		EOSEN (56-33,9 milyon yıl öncesi zaman)				ef Fliş (kıltaşı-kumtaşı) koyu gri renkli Konglomera sıkı çimentolu, iyi yuvarlanmış çakıllar, boyutlar çok değişken polijenik

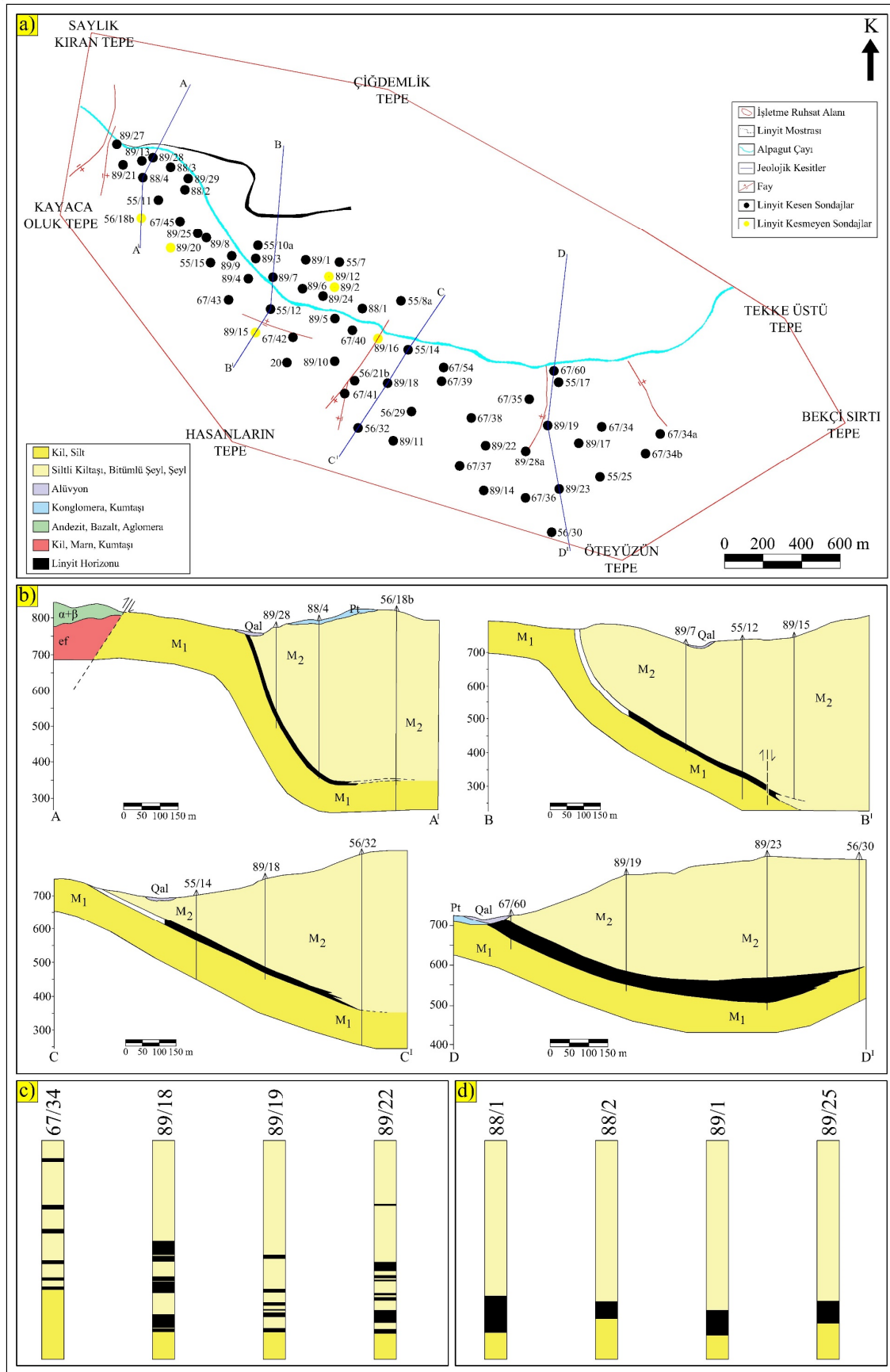
Şekil 4.3. Genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesit (Kara ve ark., 1990).

4.1.2. Sondaj Çalışmaları ve Linyit Horizonunun Genel Özellikleri

Çalışma sahasında Maden Tetkik ve Arama (99 adet), Devlet Su İşleri (30 adet) ve Türkiye Kömür İşletmeleri (45 adet) Kurum'larınca toplamda 174 adet sondaj yapılmış olup, yapılan sondajların 111 tanesini açık ocak işletmeciliğine yönelik yapılan sığ sondajlar oluşturmaktadır. Geriye kalan 63 adet sondaj (Şekil 4.5a) ise MTA tarafından yer altı kaynak miktarını belirlemeye yönelik yapılmış derin sondajlardır.

MTA tarafından yer altı kaynak miktarını belirlemeye yönelik yapılmış 63 adet sondajdan çalışma sahasının kaynak kestirim raporu (Kara ve ark., 1990) hazırlanmış olup, hazırlanan kaynak kestirim raporundan ve yapılan sondajlardan çıkarılan önemli bilgiler aşağıda sıralanmıştır;

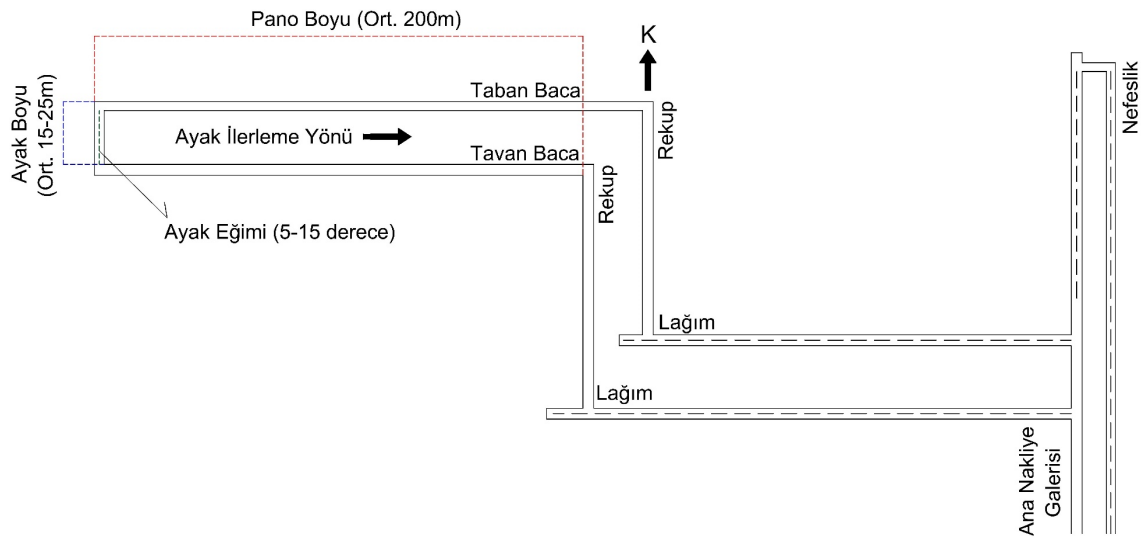
- Çalışma sahasında yapılan en sığ sondaj 84,1 metre (sondaj no: 67/60) ve en derin sondaj 700 metredir (sondaj no: 56/18b). Ortalama sondaj derinliği 352,5 metre olup, toplam sondaj uzunluğu 21.150,13 metredir.
- Yüzeye en yakın linyit damarı 55 metre (sondaj no: 67/60) derinlikte olup, gerçek damar kalınlığı 3,05 metredir. Buna karşın yüzeye en uzak linyit damarı 547,4 (sondaj no: 67/42) metre derinlikte olup, gerçek damar kalınlığı 27,33 metredir.
- Çalışma sahasında kuzey-güney uzanımlı, atımları yaklaşık 20 ila 50 metre arasında değişen 6 fay ile doğu-batı uzanımlı, atımı yaklaşık 10 metre olan bir fay mevcuttur. Tespit edilen fayların çalışma sahasındaki konumu Şekil 4.5a'da verilmiştir.
- Şekil 4.5a'da gösterilen B-B^I ve C-C^I kesitleri arasında kalan bölgede, linyitsiz alanlar (sondaj no: 89/2, 89/12 ve 89/16) mevcuttur.
- Alpagut Dodurga linyit havzası kuzeybatı güneydoğu uzanımlı olup, havzanın kuzeybatı kesiminde linyit damarı eğimi 75°'ye kadar ulaşmakta ve ortalama eğim 40° ila 60° arasında değişmektedir. Buna karşın havzanın güneydoğusunda linyit damarı eğimi ortalama 20° ila 40° arasına düşmektedir. (Şekil 4.5b).
- Havzanın güney ve güneydoğusunda birden çok parçaya ayrılan linyit damarı (Şekil 4.5c) havzanın kuzey ve kuzeybatısında tek parçadır (Şekil 4.5d).
- Havzanın batısında yaklaşık 20 metre olan linyit horizonu kalınlığı, havzanın doğusunda 70 metreye kadar ulaşmaktadır (Kara ve ark., 1990). Buna karşın havzadaki kömür damarı kalınlığı ortalama 13 metredir (Küçükkarasu, 2019).
- Havzada 1989 yılında yapılan 24 adet sondajdan alınan numunelerde kömür damarının orjinal bazda;
 - ✓ Alt ısı değeri 3151 kalori,
 - ✓ Kül değeri %23,47,
 - ✓ Nem değeri %25,41 olarak belirlenmiştir.
- Hazırlanan kaynak kestirim raporunda çalışma sahasının kaynak miktarı poligon yöntemiyle 24.223.078 ton olarak belirlenmiştir. Yapılan kaynak hesabında, 1 metreden daha kalın ve 1500 kaloriden daha yüksek kömür damarları hesaba katılmıştır.



Şekil 4.5. Sondaj bilgileri a) sondajların konumu b) jeolojik kesitler c) parçalı damarlara ait örnek sondaj stampları d) tek damara ait örnek sondaj stampları

4.1.3. Üretim Yöntemi

ADL yer altı işletmesinde geri dönüşlü göçertmeli uzunayak üretim yöntemi ile üretim faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Yöntemde ana nakliye desandresinden kömür damarının doğrultusuna paralel iki lağım sürülmekte ve bu lağımın her birinden kömür damarının doğrultusuna dik rekuplar sürülerek kömür damarına girilmektedir. Kömür damarı içerisinde kömür ve tavan taşı kontak noktasından tavan baca, kömür ve taban taşı kontak noktasından ise taban baca, ortalama pano boyu olan 200 metre boyunca sürülmekte ve pano sonunda Şekil 4.6’da gösterildiği gibi birleştirilerek üretim ayağı oluşturulmaktadır.



Şekil 4.6. Göçertmeli uzunayak üretim yöntemine ait örnek üretim panosu.

Yöntemde ayak boyu, ayak eğimine, damar kalınlığına, damar eğimine ve jeolojik arızalara bağlı olarak çalışma sahası genelinde 40 metreye kadar ulaşmakta olup, ortalama 15 ila 25 metre arasındadır.

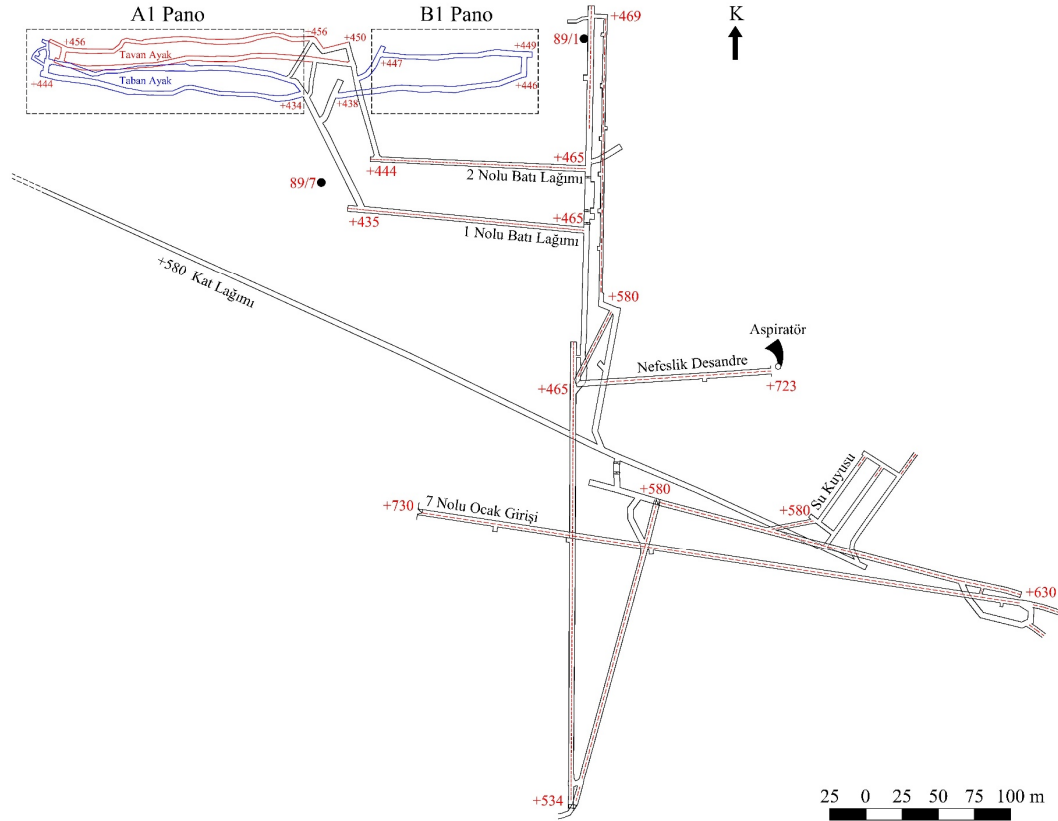
Uygulamada 5° ila 15° arasında değişen ayak eğimleri ile 8 ila 12 metre arasında değişen göçertme yükseklikleri ile yürütülen üretim faaliyetlerinde ayak ilerleme hızı yaklaşık 0,8 metre/gündür.

Yöntemde ayak içi tahkimatında yürüyen tahkimat üniteleri kullanılmakta olup, kazı işlemi delme-patlatma ve martopikör ile yapılmaktadır.

Malzeme nakli için vinç-ray ve monoray sistemlerinin kullanıldığı üretim yönteminde kömür nakli, zincirli ve bantlı konveyörler ile yapılmaktadır.

4.2. Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmaları, ADL yer altı işletmesinin kuzeybatı kesiminde bulunan B1 nolu üretim panosunda gerçekleştirilmiş olup, panonun yer altı imalat planı üzerindeki konumu Şekil 4.7’de verilmiştir.



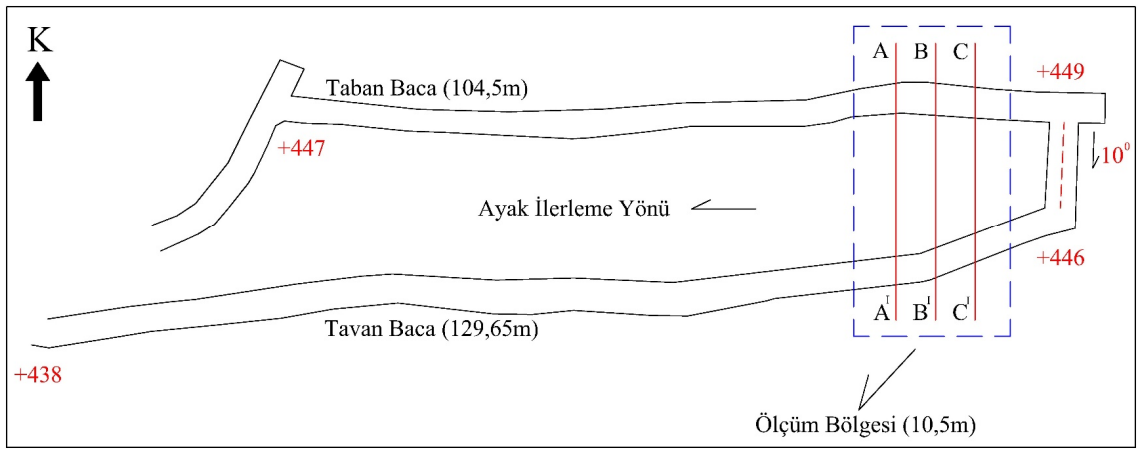
Şekil 4.7. B1 panosunun yer altı imalat planı üzerindeki konumu.

Hazırlık faaliyetleri Ocak-Mart/2019 döneminde tamamlanan B1 nolu üretim panosuna ait genel bilgiler aşağıda verilmiştir;

- Taban baca uzunluğu 104,5 metre olup, 37 günde tamamlanmıştır (Günlük baca ilerlemesi 2,82 metredir). TH29 çelik kavisli bağların kullanıldığı bacada, bağlar arası mesafe 0,60 metre ve baca kesiti 9 m²'dir.
- Tavan baca uzunluğu 128,65 metre olup, 37 günde tamamlanmıştır (Günlük baca ilerlemesi 3,48 metredir). TH29 çelik kavisli bağların kullanıldığı bacada, bağlar arası mesafe 0,60 metre ve baca kesiti 12 m²'dir.
- B1 panosunun bitiminden doğuya doğru gidildikçe kömür sıkılaşmaya girmekte ve kaybolmaktadır. Burada B1 panosunda üretim ayağının oluşturulduğu bölgede tavan kömür yüksekliği yaklaşık 4 metre iken ayağın 5 metre ilerlemesi durumunda tavan kömür yüksekliği 12 metreye kadar ulaşmaktadır.

- B1 panoda ayak içi tahkimatı olarak yürüyen tahkimat üniteleri kullanılmakta olup, tahkimat ünitelerinin genişliği 0,95 metre ve ilerleme miktarı 0,80 metredir.
- Pano başlangıcında yaklaşık 10° ile oluşturulan üretim ayağı, pano sonunda 16° 'ye kadar yükselmektedir.
- B1 panoda Nisan/2019 ayında başlayan üretim faaliyetleri Ekim/2019 ayında tamamlanmış olup, günlük ayak ilerleme hızı 0,83 metredir.

B1 panoda yürütülen arazi çalışmaları, Şekil 4.8'de gösterilen 10,5 metre ($U_{\text{öB}}$) uzunluğundaki ölçüm bölgesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Ölçüm bölgesinin B1 pano üzerindeki konumu.

Ölçüm bölgesine ait üretim geometrisini ortaya çıkarabilmek için ölçüm bölgesinden 5 metre aralıklar ile toplamda 3 adet kesit alınmış olup, her bir kesite ait ayrıntılı bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ölçüm bölgesinde yer alan kesitlere ait ayrıntılı bilgiler.

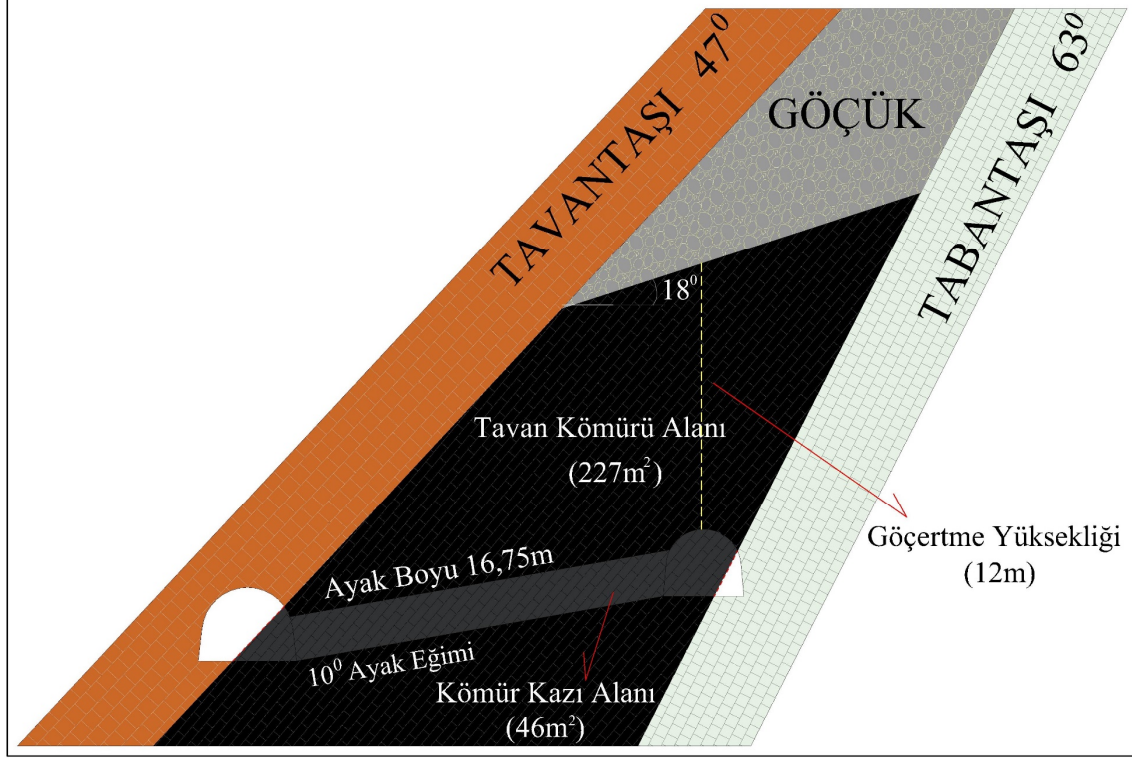
	A-A ^I Kesiti	B-B ^I Kesiti	C-C ^I Kesiti
Tavan taşı eğimi	46°	47°	47°
Taban taşı eğimi	58°	65°	63°
Ayak boyu	18,4m	16,8m	14,8m
Ayak eğimi	10°	10°	11°
*Göçertme yüksekliği	12,5m	12,0m	11,6m
**Tavan kömürü alanı	271m ²	228m ²	194m ²
***Kazı alanı	50m ²	47m ²	40m ²

*Göçertme yüksekliği, taban bacadan tavan taşına doğru yapılan sondajda kesilen kömür yüksekliğidir.

**Tavan kömürü alanı, ayaktan göçertilerek üretilebilecek tavan kömürü yüzey alanına karşılık gelmektedir.

***Kazı alanı, ayaktan kazılarak üretilebilecek kömür yüzey alanına karşılık gelmektedir.

Ölçüm bölgesinden alınan kesitler doğrultusunda oluşturulan ölçüm bölgesi temsili kesiti Şekil 4.9’da verilmiş olup, temsili kesitten tavan kömürü miktarı $227 \text{ m}^3/\text{m}$ ($M_{ÜK}$) ve kömür kazı miktarı $46 \text{ m}^3/\text{m}$ (M_{KK}) olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Ölçüm bölgesine ait ortalama kesit.

Ölçüm bölgesinde 18.04.2019 tarihinde başlayan üretim faaliyetleri yaklaşık 16 gün sürmüş olup, bu süre zarfında ölçüm bölgesinden 13.691 ton ($T_{Tüv}$) tüvenan kömür üretimi gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm bölgesinde yürütülen üretim faaliyetlerinin sonucunda oluşan tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranını tespit edebilmek için ölçüm bölgesindeki kömür ve tavan taşından 2 adet ve üretilen tüvenan kömürden 4 adet olmak üzere toplamda 8 adet numune alınmış olup, alınan numunelere ilişkin analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Tüvenan kömür numunelerine ait analiz sonuçlarından ölçüm bölgesinden üretilen 13.691 ton tüvenan kömürün ortalama yoğunluğu $1,928 \text{ t/m}^3$ olarak belirlenmiş olup, üretilen tüvenan kömürün hacmi ($V_{Tüv}$) Eşitlik 4.1’den 7.101 m^3 olarak hesaplanmıştır.

$$V_{Tüv} = \frac{T_{Tüv}}{Y_{Tüv}} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.2. Ölçüm bölgesinden alınan numunelere ait analiz sonuçları.

Numune no	Numune adı	Yoğunluk (t/m ³)	Alt ısı değeri (kcal/kg)
1	Tüvenan kömür	1,92	1.559
2	Tüvenan kömür	1,95	1.399
3	Tüvenan kömür	1,90	1.639
4	Tüvenan kömür	1,94	1.391
5	Kömür	1,46	4.145
6	Kömür	1,44	4.291
7	Tavan taşı	2,19	-
8	Tavan taşı	2,20	-
Ortalama-1	Tüvenan kömür	1,928 (Y _{Tüv})	1.497 (K _{Tüv})
Ortalama-2	Kömür	1,45 (Y _{Kömür})	4.218 (K _{Kömür})
Ortalama-3	Tavan taşı	2,20 (Y _{TT})	-

Üretilen tüvenan malzeme içerisindeki kömür oranı (O_{Kömür}), kömür ve tavan taşı numunelerinin ortalama yoğunluk değerleri ile kömür ve üretilen tüvenan malzemenin ortalama kalori değerleri üzerinden iki farklı şekilde hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiş olup, hesaplama sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

$$O_{Kömür} = 100 \times \frac{Y_{TT} - Y_{Tüv}}{Y_{TT} - Y_{Kömür}} \quad (4.2)$$

$$O_{Kömür} = 100 \times \frac{K_{Tüv}}{K_{Kömür}} \quad (4.3)$$

Kömür ve tavan taşının yoğunluk değerlerinin farklı olmasından dolayı kaya karışım oranı, kömür ve tavan taşının hacim değerleri üzerinden aşağıda belirtilen eşitlik yardımıyla hesaplanmış olup, hesaplama sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

$$O_{TKK} = 100 - O_{Kömür} \quad (\text{Üretilen tüm kömürdeki kaya karışım oranı}) \quad (4.4)$$

$$O_{ÜKK} = \frac{V_{mix} \times O_{TKK}}{V_{mix} - \left(\frac{T_{Altkömür}}{Y_{Kömür}} \right)} \quad (\text{Üretilen tavan kömürdeki kaya karışım oranı}) \quad (4.5)$$

Ölçüm bölgesinden üretilen kömür miktarı ile üretilen kömür içerisinde kazılarak ve göçertilerek üretilen kömür miktarları aşağıda belirtilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmış olup, hesaplama sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

$$T_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} = V_{T\ddot{u}v} \times O_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} \times Y_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} \quad (4.6)$$

$$T_{AltK\ddot{o}m\ddot{u}r} = M_{KK} \times U_{\ddot{O}B} \times Y_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} \quad (4.7)$$

$$T_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}} = T_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} - T_{AltK\ddot{o}m\ddot{u}r} \quad (4.8)$$

Ölçüm bölgesindeki kömür miktarı ($R_{K\ddot{o}m\ddot{u}r}$) ile ölçüm bölgesindeki üretim faaliyetlerinin sonucunda oluşan tavan kömürü kayıp miktarı ($T_{ÜKK}$) ve kayıp oranı aşağıda belirtilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmış olup, hesaplama sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

$$R_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} = M_{ÜK} \times U_{\ddot{O}B} \times Y_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} \quad (4.9)$$

$$R_{AltK\ddot{o}m\ddot{u}r} = T_{AltK\ddot{o}m\ddot{u}r} \quad (4.10)$$

$$R_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}} = R_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} - R_{AltK\ddot{o}m\ddot{u}r} \quad (4.11)$$

$$T_{ÜKK} = R_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}} - T_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}} \quad (4.12)$$

$$O_{TÜKK} = 100 \times \frac{R_{K\ddot{o}m\ddot{u}r} - T_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}}}{R_{K\ddot{o}m\ddot{u}r}} \quad (\text{Tüm kömürde kayıp oranı}) \quad (4.13)$$

$$O_{ÜKK} = 100 \times \frac{R_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}} - T_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}}}{R_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r\ddot{u}}} \quad (\text{Tavan kömüründe kayıp oranı}) \quad (4.14)$$

Çizelge 4.3. Arazi çalışmalarına ait sonuçlar.

Parametre	Kısaltma	Eşitlik no	Yoğunluk	Alt ısııl değer
Üretilen malzemedeki kömür oranı	($O_{K\ddot{o}m\ddot{u}r}$)	4.2-4.3	%36,27	%35,49
Tüm kömürde kaya karışım oranı	(O_{TKK})	4.4	%63,73	%64,51
Tavan kömüründe kaya karışım oranı	($O_{ÜKK}$)	4.5	%68,38	%69,21
Üretilen kömür miktarı	($T_{K\ddot{o}m\ddot{u}r}$)	4.6	3.735 ton	3.654 ton
Kazılarak üretilen kömür miktarı	($T_{AltK\ddot{o}m\ddot{u}r}$)	4.7	700 ton	700 ton
Göçertilerek üretilen kömür miktarı	($T_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r}$)	4.8	3.035 ton	2.954 ton
Ölçüm bölgesi kömür miktarı	($R_{K\ddot{o}m\ddot{u}r}$)	4.9	4.156 ton	
Ölçüm bölgesi alt kömür miktarı	($R_{AltK\ddot{o}m\ddot{u}r}$)	4.10	700 ton	
Ölçüm bölgesi tavan kömürü miktarı	($R_{TavanK\ddot{o}m\ddot{u}r}$)	4.11	3.456 ton	
Tavan kömürü kayıp miktarı	($T_{ÜKK}$)	4.12	421 ton	502 ton
Tüm kömürde kayıp oranı	($O_{TÜKK}$)	4.13	%10,13	%12,08
Tavan kömüründe kayıp oranı	($O_{ÜKK}$)	4.14	%12,18	%14,52

Yoğunluk ve alt ısı değeri parametreleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda;

- Üretilen tüm kömürdeki kaya karışım oranı ortalama %64,12 ve üretilen tavan kömüründeki kaya karışım oranı %68,79 olarak hesaplanmıştır.
- Kömür kayıp oranı, tüm kömürde ortalama %11,10 ve tavan kömüründe ortalama %13,35 olarak hesaplanmıştır.



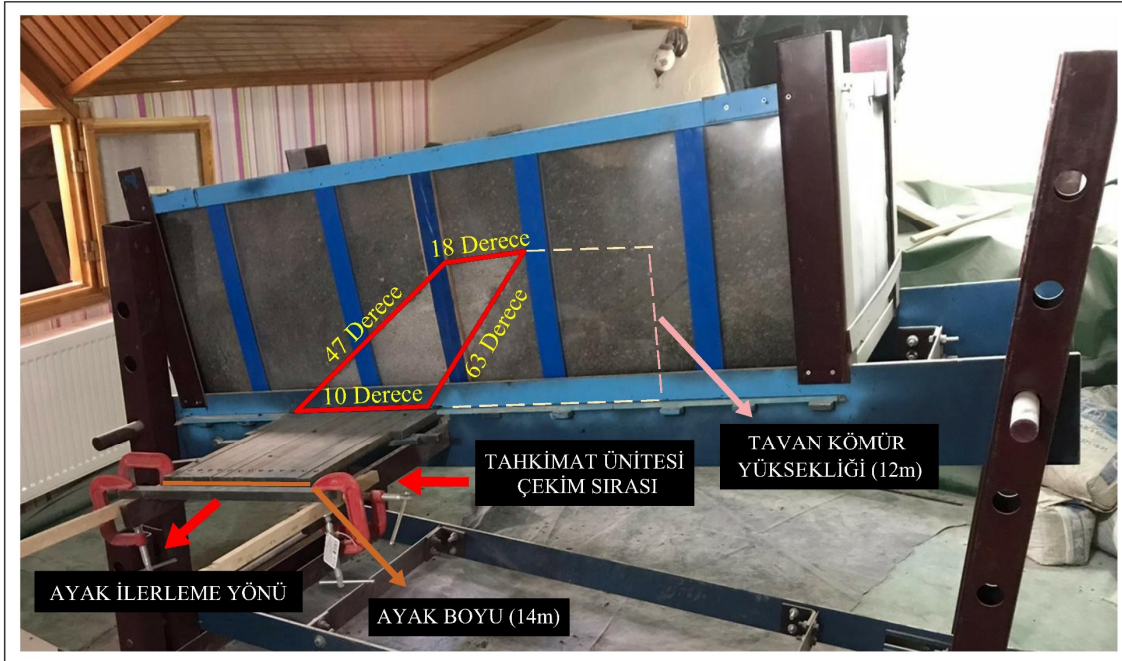
5. FİZİKSEL MODEL UYGUNLUK TESTİ

Tez çalışması kapsamında geliştirilen fiziksel model laboratuvar testlerinde kullanılmadan önce detayları Bölüm 4’de verilen ADL yer altı işletmesi arazi verileri ile test edilmiş olup, bu bölümde fiziksel modelin test sürecine ilişkin ayrıntılı bilgilere yer verilmiştir.

5.1. Fiziksel Model Test Düzenekinin Ayarlanması

ADL yer altı işletmesi B1 panoda yürütülen çalışmalardan oluşturulan ölçüm bölgesi temsili kesitine uygun şekilde ayarlanan test düzeneği Şekil 5.1’de verilmiştir. Burada ölçüm bölgesinde 16,75 metre olan ayak boyu, fiziksel modelde en yüksek ayak boyu olan 14 metreye düşürülmüş olup, diğer parametrelerde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

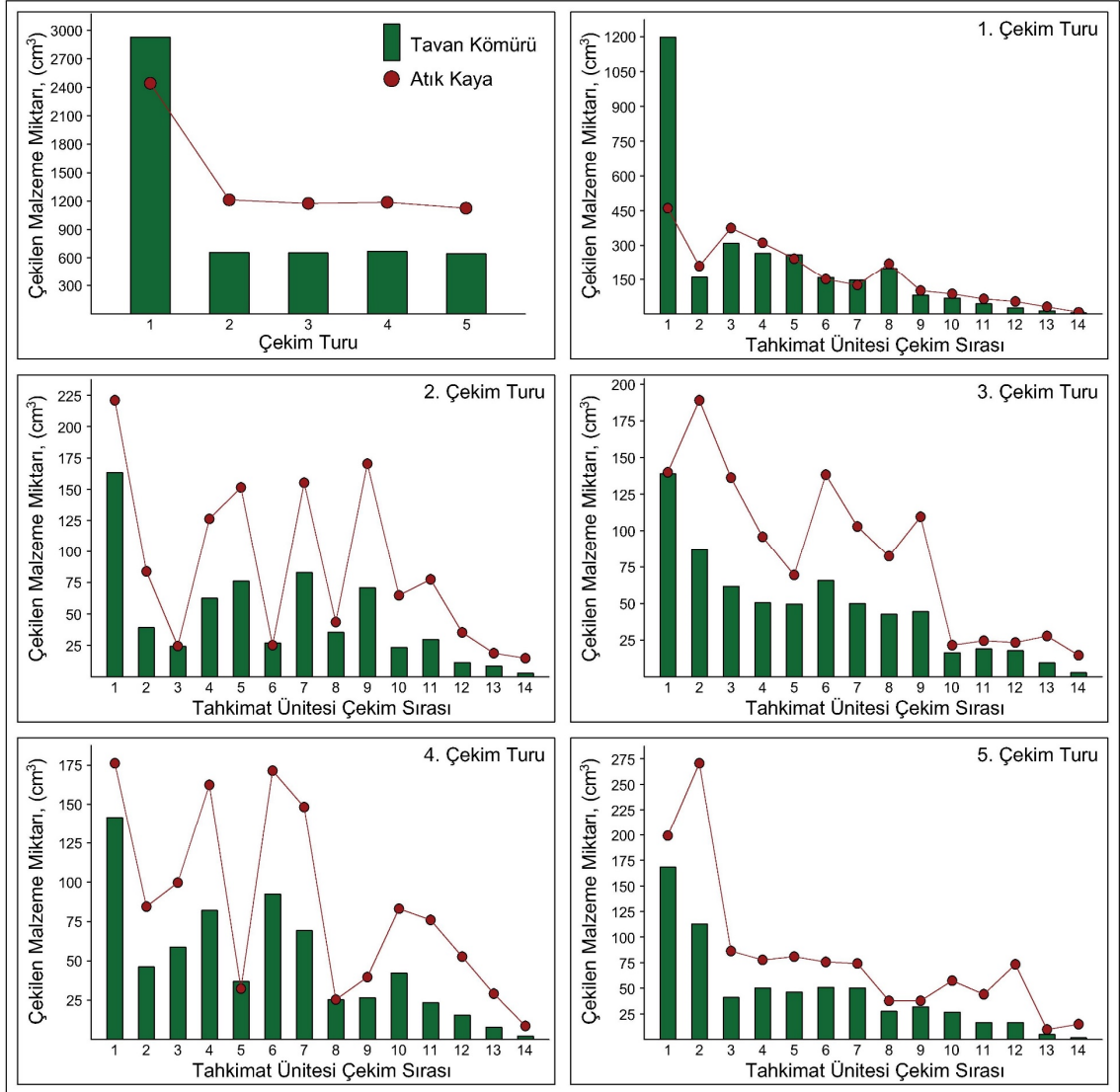
Ayak boyunun 16,75 metreden 14 metreye düşürülmesi, arazi ve fiziksel model sonuçlarının karşılaştırılması aşamasında önem arz etmekte olduğundan dolayı Bölüm 5.4.3’de arazi ve fiziksel model çalışmalarından belirlenen tavan kömürü akma açıları arasındaki benzerlik de incelenmiştir.



Şekil 5.1. ADL ölçüm bölgesi temsili kesitine uygun şekilde ayarlanan fiziksel model.

5.2. Tavan Kömürü Çekim İşlemi ve Kaya Karışım Oranının Hesabı

Arazi verilerine uygun şekilde ayarlanan fiziksel modelde 14 tahkimat ünitesi ile 5 çekim turu (5 ayak ilerlemesi) gerçekleştirilmiş olup, her bir çekim turundan çekilen malzeme miktarlarına ait grafikler Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Fiziksel modelden çekilen malzeme miktarları.

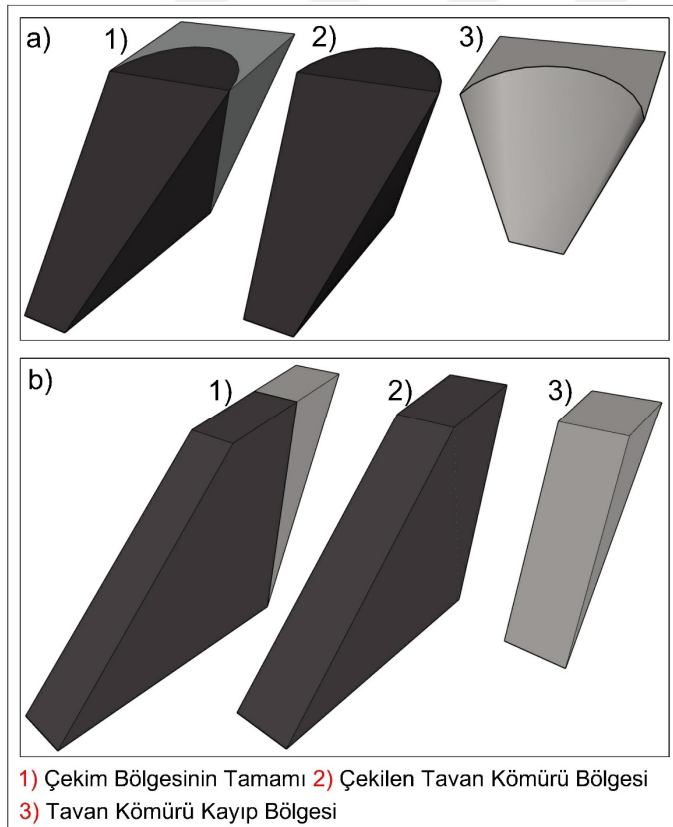
Fiziksel model testinde, ilk çekim turunda kömür ve atık kaya arasındaki akma sınırlarının oluştuğu ve sonraki çekimlerin ise bu sınırlar dahilinde gerçekleştiği Şekil 5.2’de görülmekte olup, fiziksel model testinden elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Çekilen tavan kömürü miktarı, ilk çekim turunda 2.927 cm^3 ve sonraki 4 çekim turunda ortalama 657 cm^3 olarak gerçekleşmiştir.

- Çekilen tavan kömürü miktarı en düşük 5. çekim turunda gerçekleşmiştir. 5. çekim turunda çekilen tavan kömürü miktarı 645 cm^3 olup, ortalamadan farkı %1,83'dür.
- Çekilen tavan kömürü miktarı en yüksek 4. çekim turunda gerçekleşmiştir. 4. çekim turunda çekilen tavan kömürü miktarı 670 cm^3 olup, ortalamadan farkı %1,98'dir.
- Çekilen atık kaya miktarı, ilk çekim turunda 2.445 cm^3 ve sonraki 4 çekim turunda ortalama $1.181,5 \text{ cm}^3$ olarak gerçekleşmiştir.
- Çekilen atık kaya miktarı en düşük 5. çekim turunda gerçekleşmiştir. 5. çekim turunda çekilen atık kaya miktarı 1.144 cm^3 olup, ortalamadan farkı %3,17'dir.
- Çekilen atık kaya miktarı en yüksek 2. çekim turunda gerçekleşmiştir. 2. çekim turunda çekilen atık kaya miktarı 1.214 cm^3 olup, ortalamadan farkı %2,75'dir.
- Fiziksel model testinde son 4 çekim turunda 2.629 cm^3 tavan kömürü ve 4.726 cm^3 atık kaya olmak üzere toplamda 7.355 cm^3 malzeme çekilmiştir. Bu değerler üzerinden Eşitlik 3.1 yardımıyla hesaplanan kaya karışım oranı %64,25'dir.

5.3. Tavan Kömürü Kaybının Tespiti

Fiziksel model çalışmalarından tespit edilen alt ve üst yüzeylerin çizim programında birleştirilmesi ile oluşturulan çekim bölgeleri Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Tavan kömürü çekim bölgeleri.

Çekim bölgesi alt ve üst yüzeylerinin birleştirilmesi ile oluşturulan ve Şekil 5.3a2’de gösterilen tavan kömürü çekim bölgesinin hacmi 6.124 cm^3 ’dür. Buna karşın fiziksel modelde gerçekleştirilen 5 çekim turundan tespit edilen çekilen toplam tavan kömürü miktarı 5.556 cm^3 ’dür. Bu değerler üzerinden fiziksel model ile çizim programı arasındaki hacim farkı %9,27 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.3a1’de belirtilen çekim bölgesinin, çekim bölgesi alt yüzeyine denk gelecek şekilde kırılmasıyla oluşturulan ve Şekil 5.3b1’de gösterilen tavan kömürü çekim bölgesindeki toplam tavan kömürü miktarı 5.330 cm^3 ’dür. Toplam tavan kömürü miktarı içerisindeki çekilen tavan kömürü miktarı (Şekil 5.3b2) 4.663 cm^3 iken, tavan kömürü kayıp miktarı (Şekil 5.3b3) 666.7 cm^3 ’dür. Bu değerler üzerinden tavan kömürü kayıp oranı Eşitlik 3.2 yardımıyla %12,51 olarak hesaplanmıştır.

5.4. Arazi Verileri ile Fiziksel Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Fiziksel modelin uygunluğunun tespiti için arazi çalışmalarından tespit edilen kaya karışım oranı, tavan kömürü kaybı ve tavan kömürü akma açısı değerleri, arazi verileri ile test edilen fiziksel modelden tespit edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Üç farklı parametre üzerinden yapılan uygunluk testinde, fiziksel model sonuçlarının arazi verilerine benzerlik oranı en düşük %93,4, en yüksek %93,71 ve ortalama %93,58 olarak gerçekleşmiş olup, yapılan karşılaştırma ve hesaplamalar alt bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

5.4.1. Kaya Karışım Oranı

Arazi çalışmalarından %68,79 (O_{AKK}) olarak tespit edilen kaya karışım oranı fiziksel model çalışmalarından %64,25 (O_{FKK}) olarak tespit edilmiştir. Bu değerler üzerinden Eşitlik 5.1 yardımıyla hesaplanan arazi ve fiziksel model verileri arasındaki benzerlik oranı (B_{KKO}) %93,4’dır.

$$B_{KKO} = 100 - \left(\frac{|O_{AKK} - O_{FKK}|}{O_{AKK}} \times 100 \right) \quad (5.1)$$

5.4.2. Tavan Kömürü Kaybı

Arazi çalışmalarından %13,35 ($O_{AÜKK}$) olarak tespit edilen tavan kömürü kayıp oranı fiziksel model çalışmalarından %12,51 ($O_{FÜKK}$) olarak tespit edilmiştir. Bu değerler

üzerinden Eşitlik 5.2 yardımıyla hesaplanan arazi ve fiziksel model verileri arasındaki benzerlik oranı ($B_{ÜKK}$) %93,71'dir.

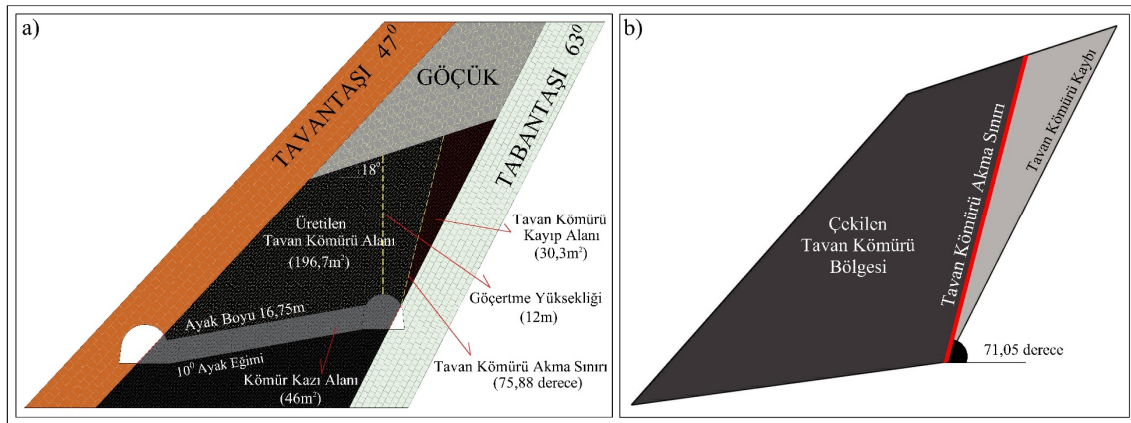
$$B_{ÜKK} = 100 - \left(\frac{|O_{AÜKK} - O_{FÜKK}|}{O_{AÜKK}} \times 100 \right) \quad (5.2)$$

5.4.3. Tavan Kömürü Akma Açısı

Arazi çalışmalarından 16,75 metre olarak belirlenen ayak boyu, fiziksel modele modelin teknik özelliklerinden dolayı 14 metre olarak yansıtılabilmektedir. Bu durumun fiziksel modelin uygunluğunun testi aşamasında sorun yaratmaması adına, arazi ve fiziksel model çalışmalarından belirlenen tavan kömürünün akma açıları da karşılaştırılmıştır.

Arazi çalışmalarından belirlenen ortalama tavan kömürü kaybının (%13,35) temsili kesit üzerindeki görünümü Şekil 5.4a'da verilmiş olup, kesit üzerinden tavan kömürünün akma açısı ($A_{AAÇ}$) $75,88^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Buna karşın çizim programından tespit edilen tavan kömürü akma açısı ($A_{FAÇ}$) $71,05^\circ$ (Şekil 5.4b) olup, bu değerler üzerinden Eşitlik 5.3 yardımıyla hesaplanan arazi ve fiziksel model verileri arasındaki benzerlik oranı ($B_{AÇ}$) %93,63'dur.

$$B_{AÇ} = 100 - \left(\frac{|A_{AAÇ} - A_{FAÇ}|}{A_{AAÇ}} \times 100 \right) \quad (5.3)$$



Şekil 5.4. Tavan kömürü akma sınırının a) ölçüm bölgesi temsili kesit üzerindeki görünümü b) çizim programı üzerindeki görünümü.

6. FİZİKSEL MODEL ÇALIŞMALARI

Eğimli kalın kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yönteminde kömür damar eğimi, tavan kömür yüksekliği, ayak eğimi ve tahkimat ünitesi çekim sırası parametrelerinin göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğine etkisini tespit edebilmek için tez çalışması kapsamında geliştirilen ve detayı 3. bölümde verilen fiziksel model ile 7'si 2 boyutlu 43'ü 3 boyutlu olmak üzere toplamda 50 test yapılmış olup, yapılan testlere ilişkin ayrıntılı test sonuçları alt bölümlerde verilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan 50 testten 6'sı hata ile sonuçlanmış olup, hatalı testlerde karşılaşılan problemler aşağıda detaylı olarak verilmiştir;

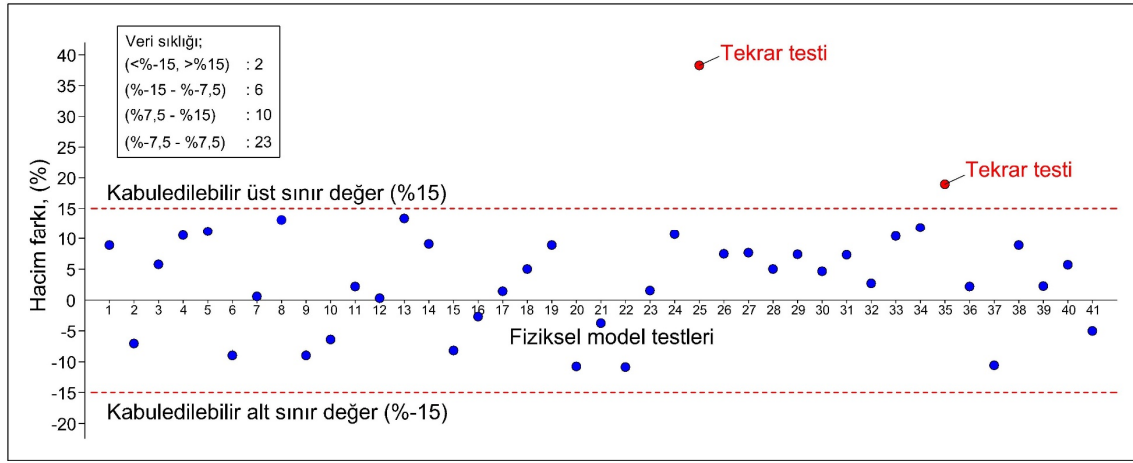
Fiziksel model ile yapılan ilk testte tavan taşı yüksekliği, kömür yüksekliğinin %30'u olacak şekilde ayarlanmıştır. 10 metre tavan kömür yüksekliğine karşın 3 metre tavan taşı yüksekliği ile yapılan fiziksel model testinin 5. çekim turunda, tavan taşının yetersiz olduğunun model üzerinden fark edilmesi (Şekil 6.1) üzerine test iptal edilmiştir. Sonraki fiziksel model testlerinde tavan taşı yüksekliği, kömür yüksekliğinin minimum %65'i olacak şekilde tasarlanmış ve sonrasında yapılan testlerde herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.



Şekil 6.1. Düşük tavan taşı yüksekliğinden kaynaklanan hatalı fiziksel model testi.

Tahkimat ünitelerinin altında, tahkimatlara gelecek yükü dağıtması amacıyla 5-8 cm aralıklar ile yerleştirilmiş lamalar bulunmaktadır. Yapılan testlerin birinde, lamaların model üzerindeki konumlarının ayarlanmasının unutulmasından kaynaklı tahkimat üniteleri, modelin doldurulması aşamasında üzerlerine gelen yükü karşılayamamış ve göçme oluşmuştur. Göçme olayı sonucunda test iptal edilerek tekrarlanmıştır.

Tavan kömürü kaybını belirlemek için kullanılan çizim programının uygunluğunu tespit etmek için fiziksel modelden çekilen kömür miktarı ile çizim programından tespit edilen kömür miktarı karşılaştırılmakta ve yapılan karşılaştırmada, %15’den fazla hacim farklılığı oluşması durumunda ise test iptal edilmektedir (Bkz. Bölüm 3.2.6). Bu kapsamda, fiziksel modelden çekilen tavan kömürü miktarları ile çizim programından belirlenen tavan kömürü miktarları arasındaki karşılaştırma sonuçları Şekil 6.2’de verilmiş olup, yapılan testler içerisinde %15 hata payından daha yüksek orana sahip 2 test iptal edilerek tekrarlanmıştır. Ayrıca yapılan 41 fiziksel model testinde fiziksel modelden çekilen kömür miktarı ile çizim programından belirlenen kömür miktarı arasındaki farklılık, ortalama %6,87 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.2. Fiziksel model ve çizim programından belirlenen tavan kömürü miktarları arasındaki farklılık.

Fiziksel model testlerinin 2 tanesinde test süreci, tek kişinin kontrolünde gerçekleştirilmiştir. Tek kişi kontrolünde yapılan 2 fiziksel model testinden elde edilen sonuçların diğer test sonuçları ile uyumsuz olduğunun fark edilmesi üzerine testler iptal edilerek, iki kişi kontrolünde tekrarlanmıştır.

6.1. Kömür Damar Eğimi ve Tavan Kömür Yükseklik Değişiminin İncelenmesi

Damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğine etkisini tespit edebilmek için fiziksel modelde toplamda 24 test gerçekleştirilmiş olup, test parametreleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

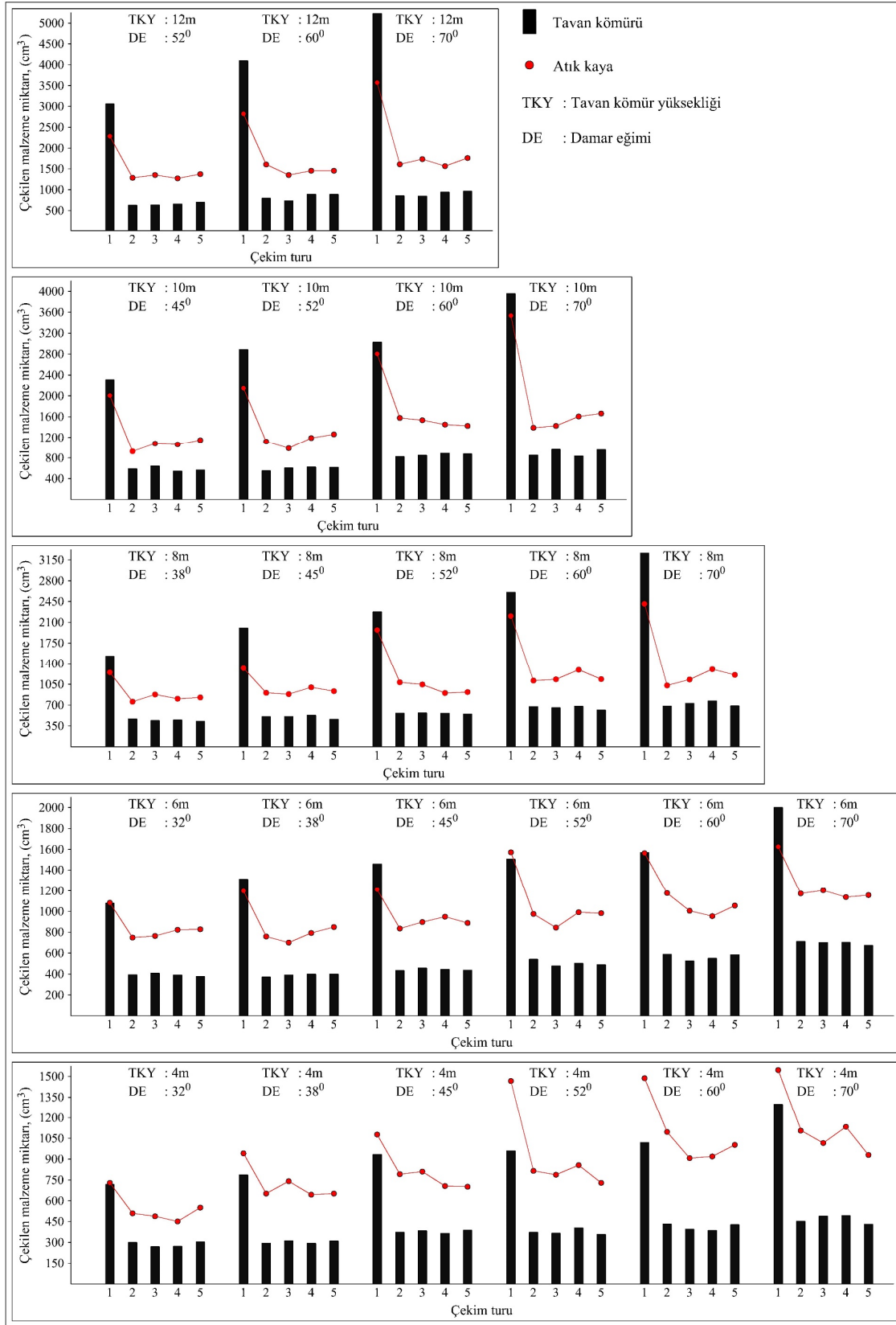
Çizelge 6.1. Damar eğimi ve tavan kömür yükseklik testlerine ilişkin test parametreleri.

Test no	Yerindeki değerler					Modeldeki değerler		
	Damar eğimi (°)	Ayak eğimi (°)	Ayak boyu (m)	Tavan kömürü yük. (m)	Tavan taşı yük. (m)	Ayak boyu (cm)	Tavan kömürü yük. (cm)	Tavan taşı yük. (cm)
1	32,0	10,0	14,0	4,0	4,0	35,0	10,0	10,0
2	32,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
3	38,0	10,0	14,0	4,0	4,0	35,0	10,0	10,0
4	38,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
5	38,0	10,0	14,0	8,0	6,4	35,0	20,0	16,0
6	45,0	10,0	14,0	4,0	4,0	35,0	10,0	10,0
7	45,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
8	45,0	10,0	14,0	8,0	6,4	35,0	20,0	16,0
9	45,0	10,0	14,0	10,0	7,5	35,0	25,0	18,75
10	52,0	10,0	14,0	4,0	4,0	35,0	10,0	10,0
11	52,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
12	52,0	10,0	14,0	8,0	6,4	35,0	20,0	16,0
13	52,0	10,0	14,0	10,0	7,5	35,0	25,0	18,75
14	52,0	10,0	14,0	12,0	8,0	35,0	30,0	20,0
15	60,0	10,0	14,0	4,0	4,0	35,0	10,0	10,0
16	60,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
17	60,0	10,0	14,0	8,0	6,4	35,0	20,0	16,0
18	60,0	10,0	14,0	10,0	7,5	35,0	25,0	18,75
19	60,0	10,0	14,0	12,0	8,0	35,0	30,0	20,0
20	70,0	10,0	14,0	4,0	4,0	35,0	10,0	10,0
21	70,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
22	70,0	10,0	14,0	8,0	6,4	35,0	20,0	16,0
23	70,0	10,0	14,0	10,0	7,5	35,0	25,0	18,75
24	70,0	10,0	14,0	12,0	8,0	35,0	30,0	20,0

Fiziksel model ile yapılan laboratuvar testleri sonucunda, 5 çekim turundan çekilen malzeme miktarları Şekil 6.3’de verilmiştir. Burada, ilk çekim turunda kömür ve atık kaya arasındaki sınırların oluştuğu ve sonraki çekim turlarının ise bu sınırlar dahilinde gerçekleştiği, birinci çekim turundan çekilen malzeme miktarı ile sonraki 4 çekim turundan çekilen malzeme miktarları arasındaki belirgin farklılıktan anlaşılmaktadır.

Ayrıca bu kısımda, fiziksel model testlerinin son 4 çekim turlarının belirli sınırlar dahilinde gerçekleşip gerçekleşmediğinin tespiti amaçlı, Eşitlik 6.1-6.4 yardımıyla hesaplanan son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile

son 4 çekim turundan çekilen ortalama malzeme miktarı karşılaştırılmakta ve iki değer arasında %15’den fazla fark oluşması durumunda test iptal edilerek tekrarlanmaktadır.



Şekil 6.3. Fiziksel model testlerinden çekilen malzeme miktarları.

$$FK_{Min} = \frac{|K_{min} - K_{ort}|}{K_{Ort}} \times 100 \quad (6.1)$$

$$FK_{Max} = \frac{(K_{max} - K_{ort})}{K_{Ort}} \times 100 \quad (6.2)$$

$$FA_{Min} = \frac{|A_{min} - A_{ort}|}{A_{Ort}} \times 100 \quad (6.3)$$

$$FA_{Max} = \frac{(A_{max} - A_{ort})}{A_{Ort}} \times 100 \quad (6.4)$$

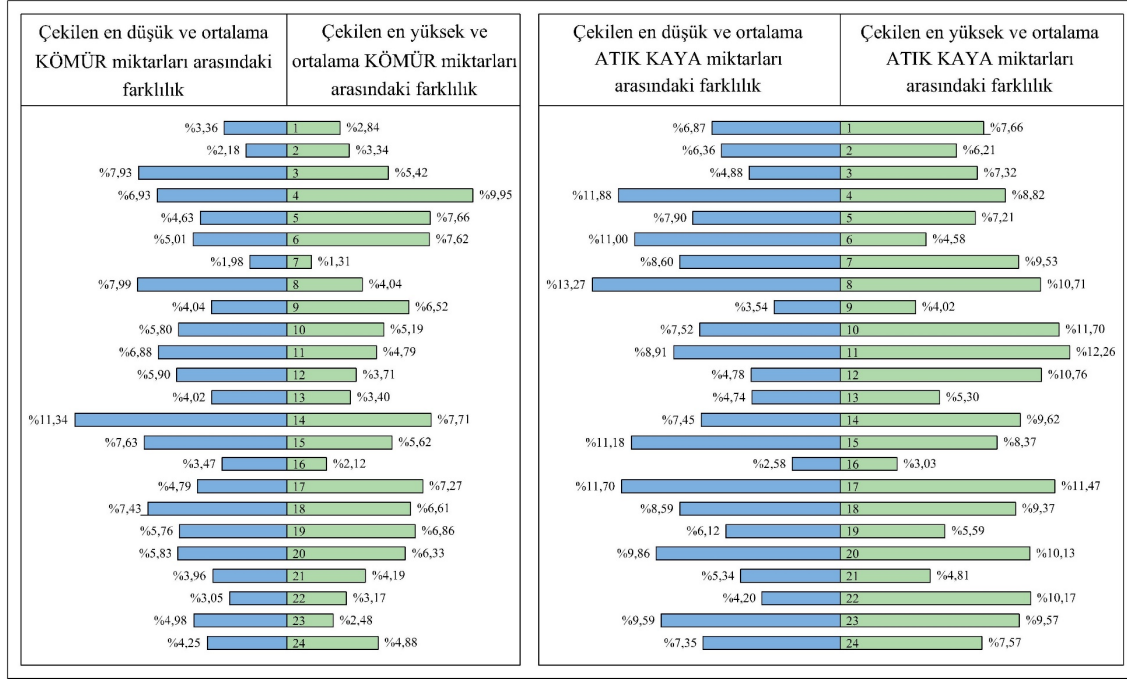
Eşitlik 6.1-6.4’de belirtilen ifadelere ilişkin açıklamalar aşağıda verilmiştir;

- Son 4 çekim turundan çekilen en düşük kömür miktarı K_{Min} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen en yüksek kömür miktarı K_{max} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen ortalama kömür miktarı K_{Ort} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen en düşük atık kaya miktarı A_{Min} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen en yüksek atık kaya miktarı A_{max} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen ortalama atık kaya miktarı A_{Ort} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen en düşük kömür miktarı ile çekilen ortalama kömür miktarı arasındaki farklılık FK_{min} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen en yüksek kömür miktarı ile çekilen ortalama kömür miktarı arasındaki farklılık FK_{max} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen en düşük atık kaya miktarı ile çekilen ortalama atık kaya miktarı arasındaki farklılık FA_{min} ,
- Son 4 çekim turundan çekilen en yüksek atık kaya miktarı ile çekilen ortalama atık kaya miktarı arasındaki farklılık FA_{min} .

Fiziksel model testlerinde Eşitlik 6.1-6.4 yardımıyla hesaplanan son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile son 4 çekim turundan çekilen ortalama malzeme miktarı arasındaki farklılıklar (hesaplamalar malzemelerin hacim değerleri üzerinden yapılmıştır) Şekil 6.4’de verilmiş olup, Şekil 6.4 incelendiğinde aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır;

- Son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek kömür miktarları ile son 4 çekim turundan çekilen ortalama kömür miktarı arasındaki farklılık;
 - ✓ En düşük %1,31,
 - ✓ En yüksek %11,34,

- ✓ Ortalama %5,50.
- Son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek atık kaya miktarları ile son 4 çekim turundan çekilen ortalama atık kaya miktarı arasındaki farklılık;
 - ✓ En düşük %2,58,
 - ✓ En yüksek %13,27,
 - ✓ Ortalama %7,93.



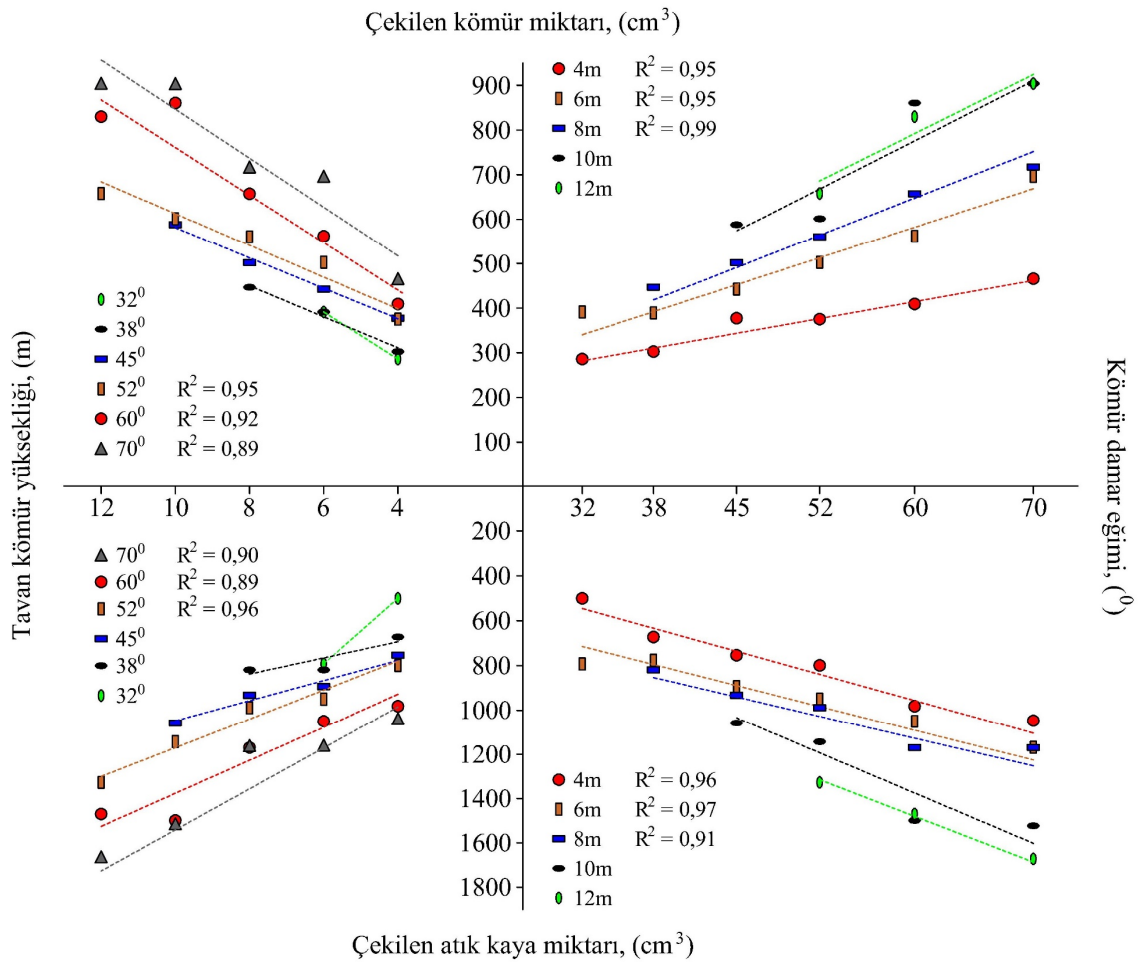
Şekil 6.4. Son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile son 4 çekim turundan çekilen ortalama malzeme miktarı arasındaki farklılık.

6.1.1. Kömür Damar Eğimi ve Tavan Kömür Yükseklik Değişiminin Çekilen Malzeme Miktarlarına Etkisi

Fiziksel model testlerine ait son 4 çekim turundan çekilen ortalama malzeme miktarları kullanılarak oluşturulan, damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin çekilen malzeme miktarlarına etkisi Şekil 6.5’de verilmiş olup, Şekil 6.5 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Tavan kömürü çekim bölgesi, damar eğiminden etkilenmemesine rağmen, damar eğimindeki dikleşmeye bağlı olarak çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarları artmaktadır. Buradaki artışın temel sebebi, ayağın kuyruk kısmının üzerinde kalan tavan kömürü kayıp miktarının çekilen malzeme miktarları üzerindeki etkisinden kaynaklı olup, damar eğimi ve tavan kömürü kaybı arasındaki ilişki Bölüm 6.1.2’de verilmiştir.

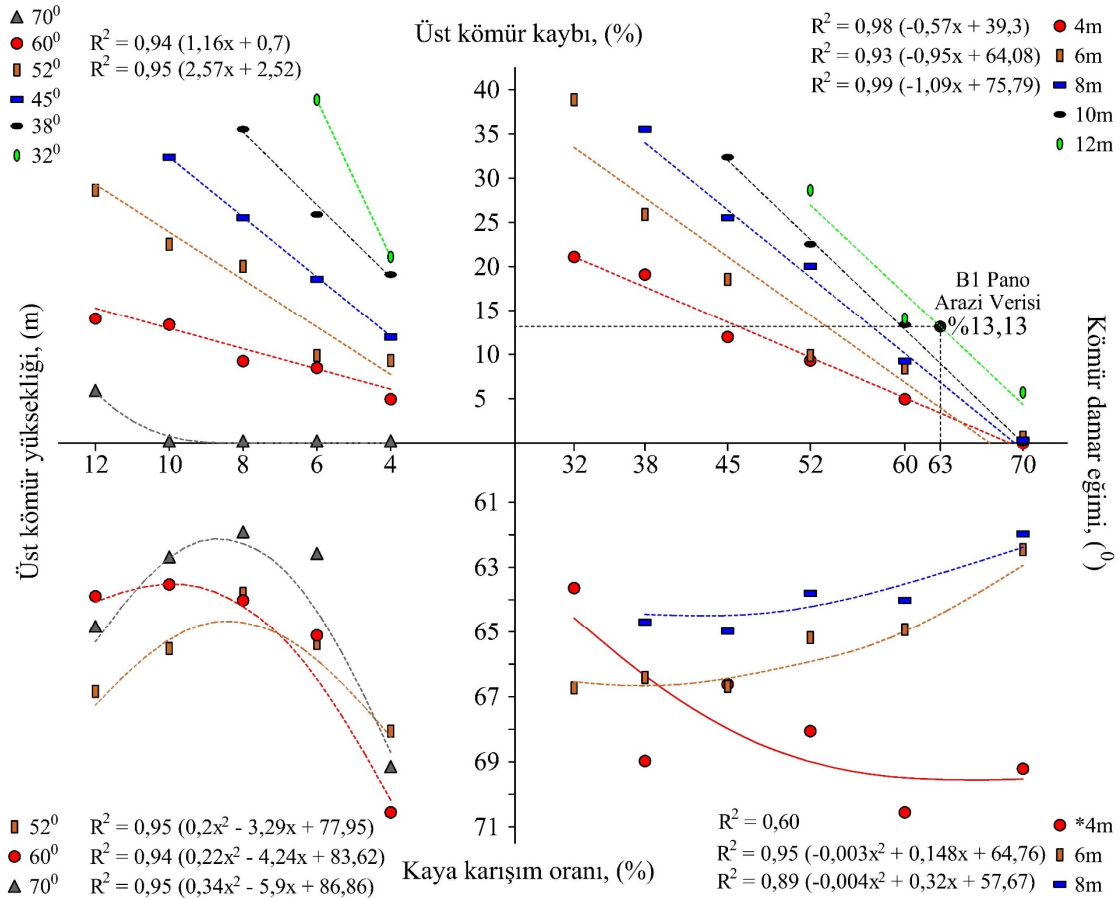
- Tavan kömür yükseklik değerinin artırılması doğrultusunda, tavan kömürü çekim bölgesi yükselmekte ve yükselen çekim bölgesindeki kömürü üretmek için genişletilen çekim gövdesi de çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarlarının artmasına neden olmaktadır (Zhu ve ark., 2018). Bu durum, fiziksel model testlerinde de literatüre benzer şekilde gerçekleşmiş olup, yapılan testlerde çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarlarının tavan kömür yükseklik değerindeki artış ile arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.5. Damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin çekilen malzeme miktarlarına etkisi.

6.1.2. Kömür Damar Eğimi ve Tavan Kömür Yükseklik Değişiminin Tavan Kömürü Kaybı ve Kaya Karışım Oranına Etkisi

Damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin tavan kömürü kaybı ile kaya karışım oranına etkisi Şekil 6.6'da verilmiştir.



*4 metre tavan kömür yüksekliğinde gerçekleştirilen testler için yapılan açıklamanın dikkate alınması tavsiye edilmektedir.

Şekil 6.6. Damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranına etkisi.

Şekil 6.6 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Damar eğimi dikleşmesine bağlı olarak tavan kömürü kaybı azalmakta iken tavan kömür yüksekliğindeki artışa bağlı olarak tavan kömürü kaybı artmaktadır.
- 70° damar eğiminde yapılan testlerde 10 metre tavan kömür yüksekliğine kadar tavan kömürü kaybı oluşmamaktadır.
- Damar eğimi dikleşmesine bağlı olarak 6 ve 8 metre tavan kömür yükseklik değerlerinde kaya karışım oranı artmakta iken 4 metre tavan kömür yükseklik değerinde yapılan fiziksel model testlerinde kaya karışım oranı azalmaktadır. Bunun temel nedeni, 4 metre tavan kömür yükseklik değeri ile yapılan fiziksel model testlerinde, fiziksel model ölçeğine bağlı olarak çekim işleminin istenildiği gibi kontrol edilememesidir. Fiziksel model testlerinde çekim işleminin durdurulması işlemi, çekim bölgesinin tıkanma olayı ile kontrol edilmekte iken 4 metre tavan kömür yüksekliğinde yapılan testlerde diğer testlere kıyasla tıkanma olayı geç olduğu için çekim işlemi istenilen zamanda durdurulamamıştır. Bu

nedenle 4 metre tavan kömür yükseklik değerinde yapılan testleri birbirleri ile ilişkilendirmek ve değerlendirmeye almak yanlış sonuçlara sebebiyet vermektedir.

- Tavan kömür yükseklik değerinin 4 metreden 8 metreye kadar yükseltilmesi durumunda azalan kaya karışım oranı, 8 metre tavan kömür yükseklik değerinden sonra tavan kömür yükseklik değerindeki artış ile artmaktadır. Burada, 8 metre tavan kömür yükseklik değerinin kaya karışım oranı için en ideal tavan kömür yükseklik değeri olduğu belirtilebilir.

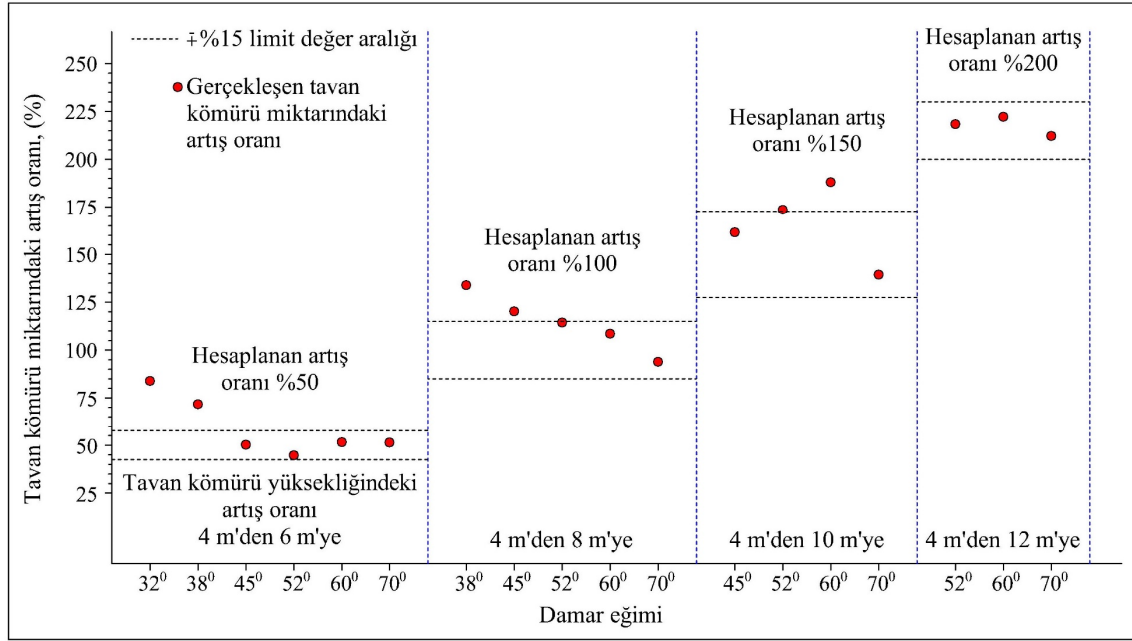
Fiziksel model sonuçlarına ek olarak ADL yer altı işletmesinde gerçekleştirilen arazi ölçümlerinden %13,35 olarak belirlenen tavan kömürü kaybı, fiziksel model çalışmaları neticesinde oluşturulan abaktan %13,13 olarak belirlenmiş olup, arazi verisi grafik üzerinde gösterilmiştir.

6.1.3. Tavan Kömürü Miktarları Arasındaki İlişki

Fiziksel model çalışmalarından elde edilen verilerin güvenilirliğini test etmenin diğer bir yolu da tavan kömür yükseklik artışına bağlı olarak çekilen tavan kömürü ve tavan kömürü kayıp miktarlarının toplamının irdelenmesidir. Örneğin, tavan kömür yüksekliğinin 4 metreden 6 metreye yükseltilmesi durumunda, tavan kömürü üretim bölgesi geometrik olarak %50 oranında genişleyeceğinden dolayı fiziksel model testlerinden çekilen tavan kömürü ile tavan kömürü kayıp miktarlarının toplamının da %50'ye yakın bir artış göstermesi gerekmektedir.

Damar eğimi ve tavan kömür yükseklik değişimini incelemek için yapılan 24 fiziksel model testinden elde edilen çekilen tavan kömürü ve tavan kömürü kayıp miktarları toplamındaki artış oranı ile hesaplanan artış oranları arasındaki ilişki Şekil 6.7'de verilmiştir. Burada, tavan kömürü miktarındaki artış oranının belirlenmesinde, 5 çekim turundan çekilen toplam tavan kömürü miktarı ile 5 çekim turundan belirlenen tavan kömürü kayıp miktarlarının toplamı baz alınmıştır.

4 metre tavan kömür yükseklik değerinde yapılan testlerden elde edilen veriler baz alınarak oluşturulan grafikten (Şekil 6.7) görüleceği üzere, 32° ve 38° damar eğimlerinde yapılan fiziksel model testlerinde hesaplanan ve gerçekleşen tavan kömürü miktarları arasındaki fark yüksek iken diğer testlerin %86,7'sinde iki değer arasındaki fark %15'den daha azdır.



Şekil 6.7. Tavan kömür yükseklik değişimine bağlı olarak hesaplanan ve gerçekleşen tavan kömürü miktarlarındaki artış oranı.

Ayrıca 32° ve 38° damar eğimlerinde yapılan testler hariç tutulduğunda tüm testlerdeki hesaplanan ve gerçekleşen tavan kömürü miktarları arasındaki fark ortalama %9,95 iken 32° ve 38° damar eğimlerinde yapılan testler dahil edildiğinde, tüm testlerdeki hesaplanan ve gerçekleşen tavan kömürü miktarları arasındaki fark ortalama %16,36'dır.

6.1.4. Tavan Kömürü Akma Açısı

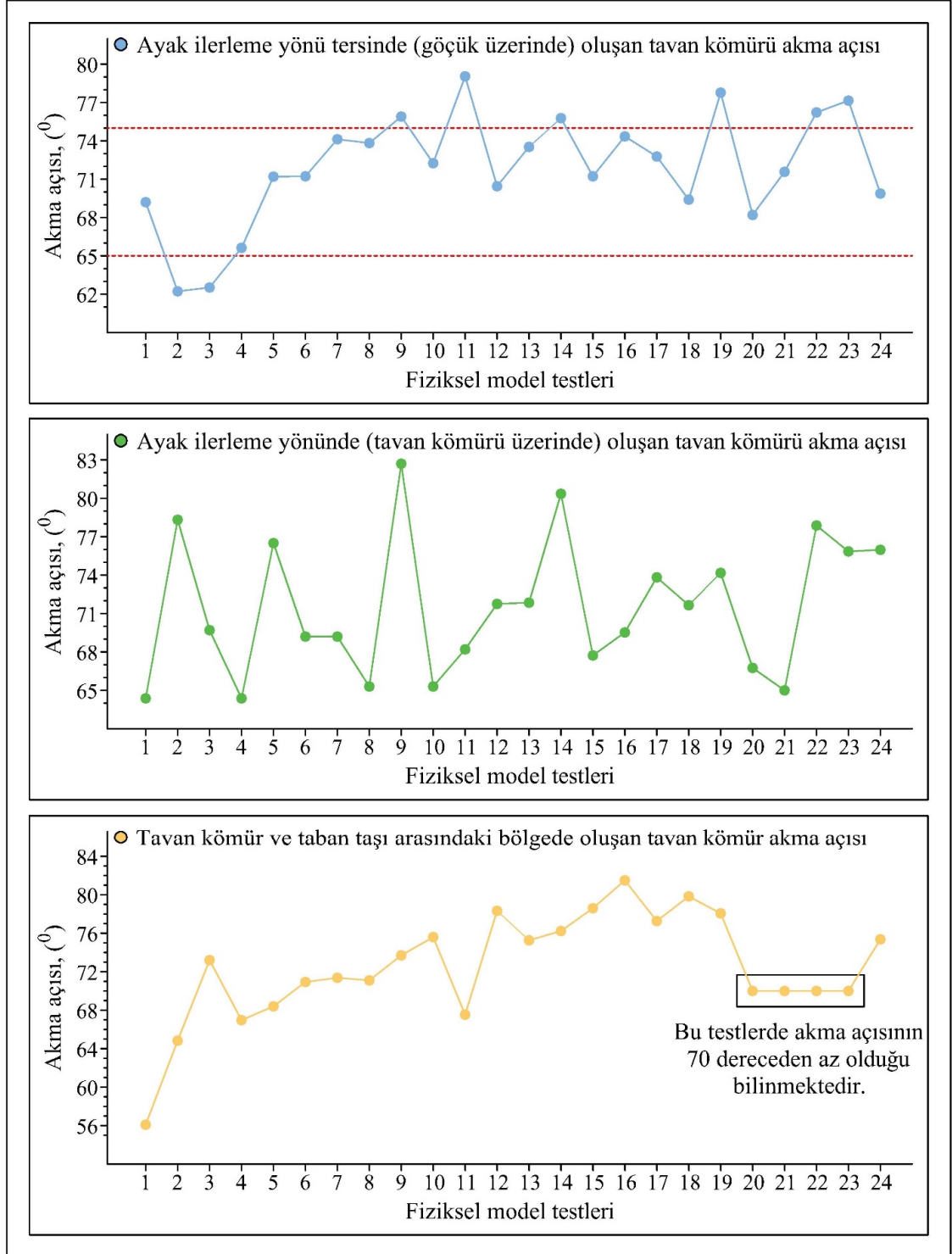
Fiziksel model testlerinde farklı yönlerde oluşan tavan kömürü akma açıları Şekil 6.8'de verilmiştir.

ADL işletmelerinde ayak ilerleme yönünün tersinde (göçük üzerinde) oluşan tavan kömürü akma açısı 65° ile 75° arasında değişmekte iken, fiziksel model testlerinden tespit edilen tavan kömürü akma açısı 62,2° ile 79,1° arasında değişmektedir ve ortalama 71,9°'dir.

Öte yandan ayak ilerleme yönünde (tavan kömür üzerinde) tavan kömürü akma açısı 64,4° ile 82,7° arasında değişmekte olup, ortalama 71,5° olarak belirlenmiştir.

Tavan kömürü ve taban taşı arasında kalan kömür kayıp bölgesinde ise tavan kömürünün akma açısı 32°, 38°, 45°, 52° ve 60° damar eğimlerinde 56,1° ile 81,5° arasında, ortalama 72,9° olarak tespit edilmiştir. 70° damar eğiminde ise 10 metre tavan kömür yükseklik

değerine kadar yapılan testlerde tavan kömürü kaybı oluşmadığı için tavan kömürünün akma açısı net bir şekilde tespit edilememiştir. Ancak tavan kömürü kaybı oluşmadığı için tavan kömürünün akma açısının 70° damar eğimi değerinden daha az olduğu bilinmektedir. Ayrıca 12 metre tavan kömür yükseklik değerinde yapılan fiziksel model testinde de tavan kömürünün akma açısı, $75,4^\circ$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.8. Fiziksel model testlerinde farklı yönlerde oluşan tavan kömürü akma açıları.

6.2. Ayak Eğim Değişiminin İncelenmesi

Ayak eğiminin göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğine etkisini tespit edebilmek için fiziksel modelde toplamda 20 test gerçekleştirilmiş olup, test parametreleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Ayak eğimi testlerine ait test parametreleri.

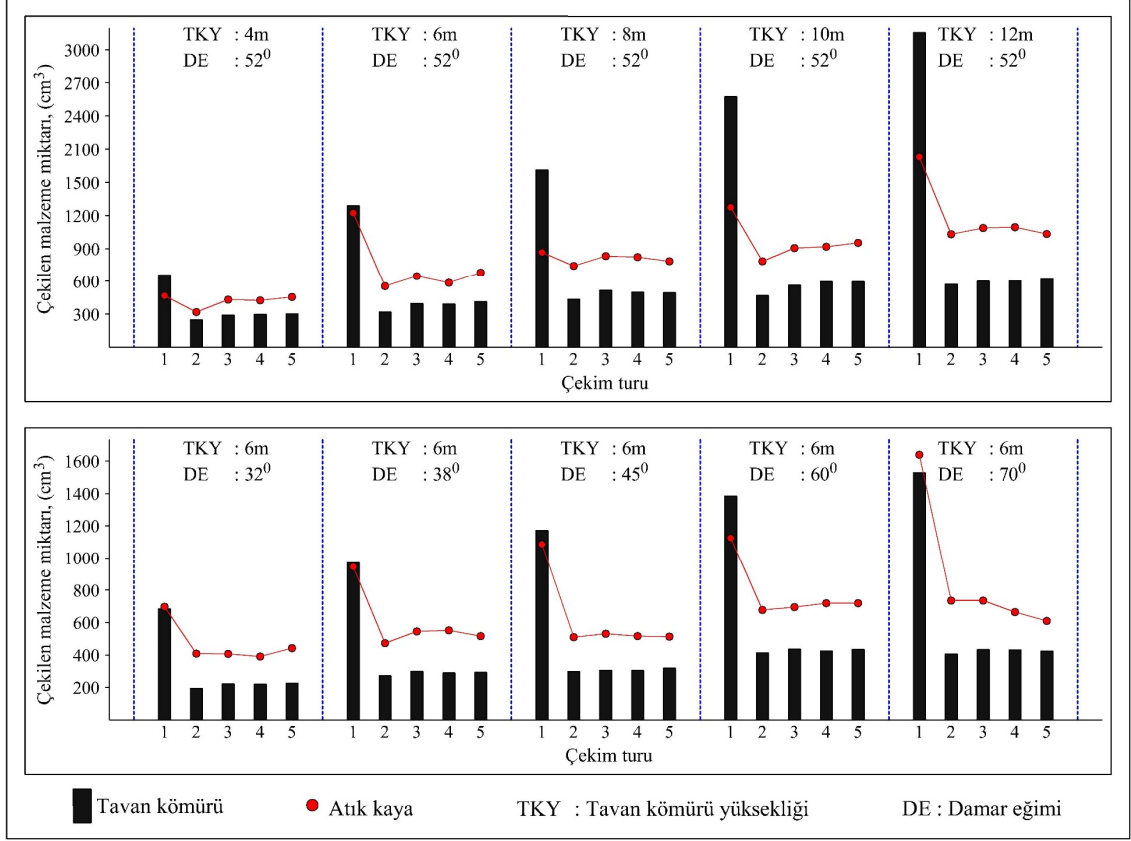
Test no	Yerindeki değerler					Modeldeki değerler		
	Damar eğimi (°)	Ayak eğimi (°)	Ayak boyu (m)	Tavan kömür yük. (m)	Tavan taşı yük. (m)	Ayak boyu (m)	Tavan kömür yük. (m)	Tavan taşı yük. (m)
1	52,0	Yatay	11,9	4,0	4,0	29,75	10,0	10,0
2	52,0	Yatay	11,9	6,0	5,5	29,75	15,0	13,75
3	52,0	Yatay	11,9	8,0	6,4	29,75	20,0	16,0
4	52,0	Yatay	11,9	10,0	7,5	29,75	25,0	18,75
5	52,0	Yatay	11,9	12,0	8,0	29,75	30,0	20,0
6	32,0	Yatay	9,9	6,0	5,5	24,75	15,0	13,75
7	38,0	Yatay	10,6	6,0	5,5	26,50	15,0	13,75
8	45,0	Yatay	11,4	6,0	5,5	28,50	15,0	13,75
9	60,0	Yatay	12,4	6,0	5,5	31,0	15,0	13,75
10	70,0	Yatay	12,9	6,0	5,5	32,25	15,0	13,75
*11	52,0	10,0	14,0	4,0	4,0	35,0	10,0	10,0
*12	52,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
*13	52,0	10,0	14,0	8,0	6,4	35,0	20,0	16,0
*14	52,0	10,0	14,0	10,0	7,5	35,0	25,0	18,75
*15	52,0	10,0	14,0	12,0	8,0	35,0	30,0	20,0
*16	32,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
*17	38,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
*18	45,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
*19	60,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75
*20	70,0	10,0	14,0	6,0	5,5	35,0	15,0	13,75

*Bu testler, damar eğimi ve tavan kömür yükseklik değişiminin etkisini belirlemek için de kullanılmıştır.

Çizelge 6.2’de belirtilen fiziksel model testleri içerisinde yer alan 10° ayak eğimindeki testler ile ilgili genel bilgiler Bölüm 6.1’de verilmiş olup, yatay ayakta gerçekleştirilen fiziksel model testlerinde, 5 çekim turundan çekilen malzeme miktarları Şekil 6.9’da verilmiştir.

Yatay ayakta gerçekleştirilen fiziksel model testlerinde son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek kömür miktarları ile son 4 çekim turundan çekilen ortalama kömür miktarı arasındaki farklılık (Eşitlik 6.1 ve 6.2);

- En düşük %2,05,
- En yüksek %16,31,
- Ortalama %6,70 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.9. Fiziksel model testlerinden çekilen malzeme miktarları.

Tez çalışması kapsamında çekilen malzeme miktarlarının çekilen ortalama malzeme miktarından %15 farklı olması durumunda test iptal edilmesine rağmen yatay ayakta gerçekleştirilen testlerde bu işlem uygulanmamıştır. Burada, yatay ayakta yapılan testlerde çekim turları, diğer testlere kıyasla ilk çekim turundan sonra değil, ikinci çekim turundan sonra belirli bir düzen halinde çekilmeye başlanmaktadır. Son 3 çekim turu incelendiğinde ise, son 3 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek kömür miktarları ile son 3 çekim turundan çekilen ortalama kömür miktarı arasındaki farklılık;

- En düşük %0,88,
- En yüksek %7,45
- Ortalama %2,32 olarak tespit edilmiştir.

Eğimli ayakta 1. çekim turundan sonra belirli bir düzen halinde çekilmeye başlanan çekim turlarının yatay ayakta 2. çekim turundan sonra belirli bir düzen halinde çekilmeye

başlaması durumu, Song ve Konietzky (2019) tarafından yapılan çalışmada da belirtilmiştir.

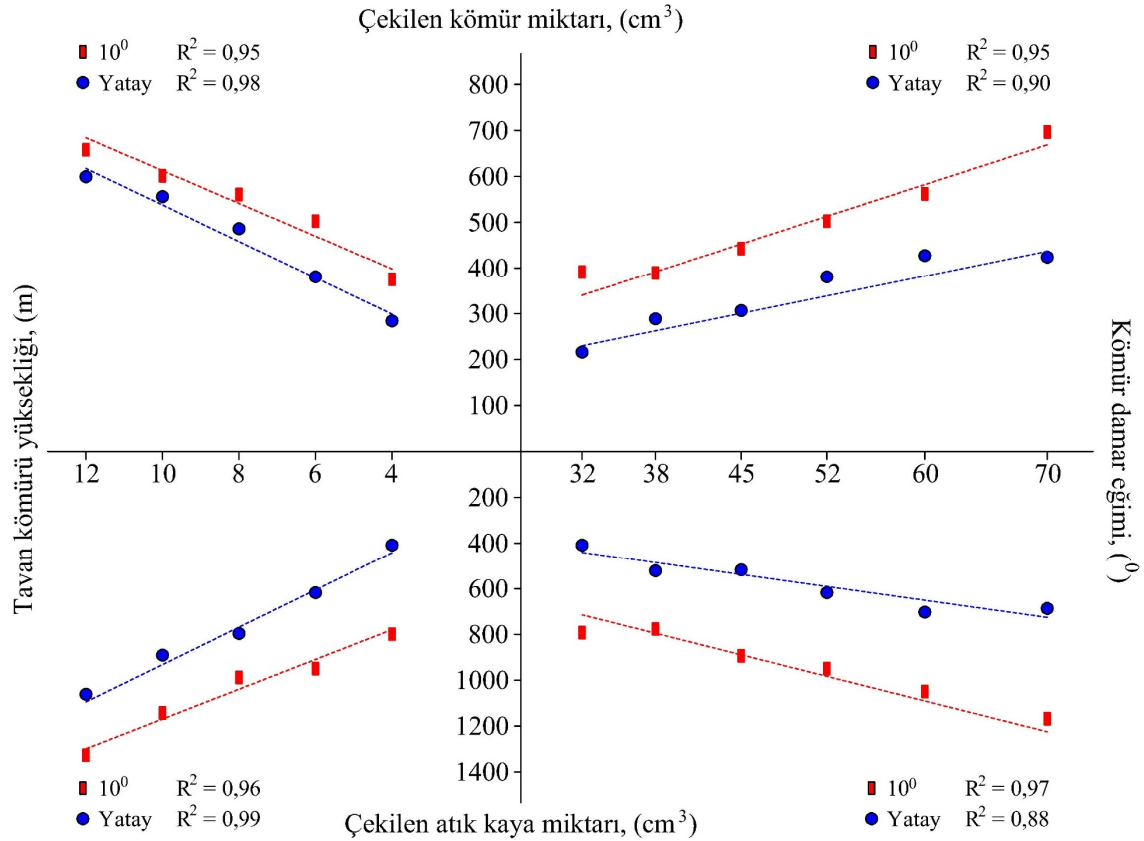
Fiziksel model testlerinde son 3 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek atık kaya miktarları ile son 3 çekim turundan çekilen ortalama atık kaya miktarı arasındaki farklılık ise;

- En düşük %1,31,
- En yüksek %9,78,
- Ortalama %4,43 olarak tespit edilmiştir.

Fiziksel model testlerinde çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile çekilen ortalama malzeme miktarları arasındaki farklılık, Eşitlik 6.1-6.4 yardımıyla hesaplanmış olup, bu eşitliklerde son 4 çekim turundan çekilen malzeme miktarları yerine son 3 çekim turundan çekilen malzeme miktarları kullanılmıştır.

6.2.1. Ayak Eğim Değişiminin Çekilen Malzeme Miktarlarına Etkisi

Ayak eğiminin çekilen malzeme miktarlarına etkisi Şekil 6.10'da verilmiştir.

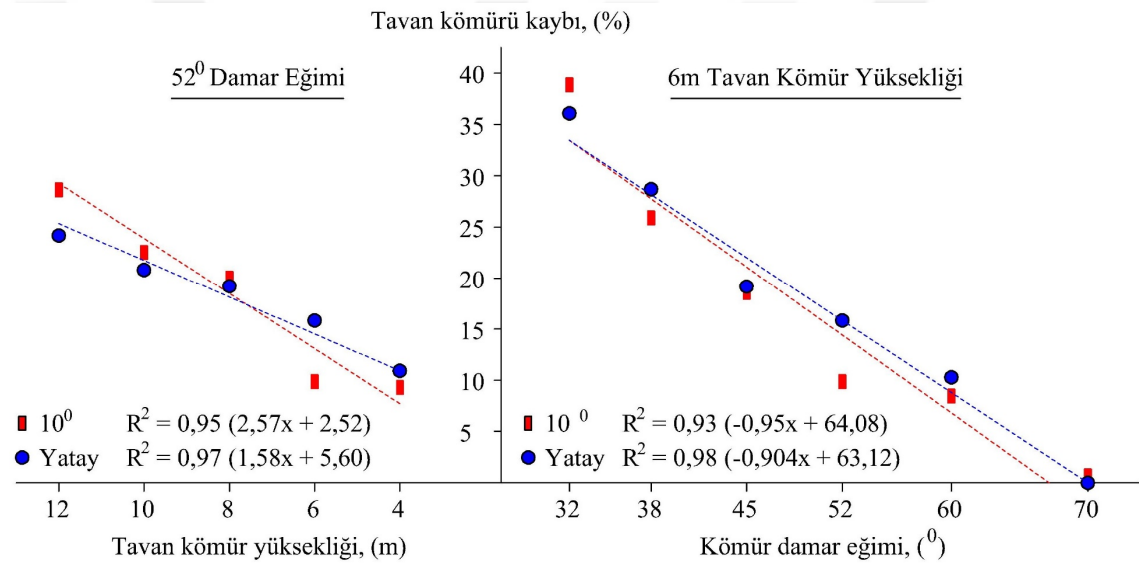


Şekil 6.10. Ayak eğiminin çekilen malzeme miktarlarına etkisi.

Şekil 6.10'dan görüleceği üzere, ayak eğimindeki artışa bağlı olarak uzayan ayak boyu çekilen malzeme miktarlarını arttırmaktadır. Örneğin, 52° damar eğiminde ayak boyu, yatay ayakta 11,9 metre iken, ayağın 10°'ye yükseltilmesi durumunda ayak boyu, 2,1 metre artarak 14 metreye çıkmaktadır. Burada, 52° damar eğiminde 11.9 metre (yatay ayak) ve 14 metre (10° eğimli ayak) ayak boylarında yapılan fiziksel model testlerinde, ayak boyundaki artışa bağlı olarak çekilen kömür miktarı %32,0 oranında, çekilen atık kaya miktarı ise %53,7 oranında artış göstermiştir.

6.2.2. Ayak Eğim Değişiminin Tavan Kömürü Kaybı ve Kaya Karışım Oranına Etkisi

Ayak eğiminin tavan kömürü kaybına etkisi Şekil 6.11'de verilmiştir.

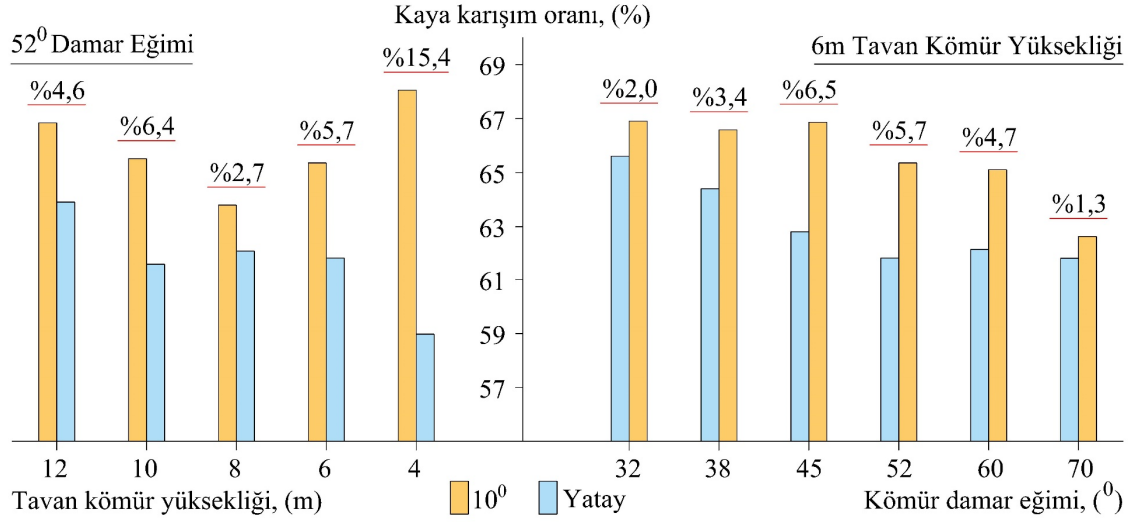


Şekil 6.11. Ayak eğiminin tavan kömürü kaybına etkisi.

Şekil 6.11 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Tavan kömürü kaybında ayak eğiminin etkisi farklı damar eğimlerinde test edilmiş olup, yapılan testlerde kayda değer bir farklılık görülmemiştir.
- Ayak eğiminin tavan kömür yükseklik değişimine bağlı olarak tavan kömürü kaybı üzerindeki etkisi 2 bölgede değerlendirilmiştir. Burada 4 ila 8 metre arası tavan kömür yükseklik değerlerinde ayak eğiminin yataydan 10°'ye yükseltilmesi durumunda olumlu sonuçlar elde edildiği görülmekte iken, 8 metre tavan kömür yükseklik değerinden sonra sonuçların tersine döndüğü görülmektedir.

Ayak eğiminin kaya karışım oranı üzerindeki etkisi Şekil 6.12’de verilmiş olup, şekilde sütunların üzerinde görülen yüzdesel değerler, ayak eğiminin yataydan 10°’ye çıkarılması durumunda kaya karışım oranında meydana gelen değişimi göstermektedir.



Şekil 6.12. Ayak eğiminin kaya karışım oranına etkisi.

Yapılan testler neticesinde ayak eğiminin yataydan 10°’ye çıkarılması durumunda kaya karışım oranında en düşük %1,3 ve en yüksek %15,4 olmak üzere ortalama %5,27 artış sağlandığı tespit edilmiştir.

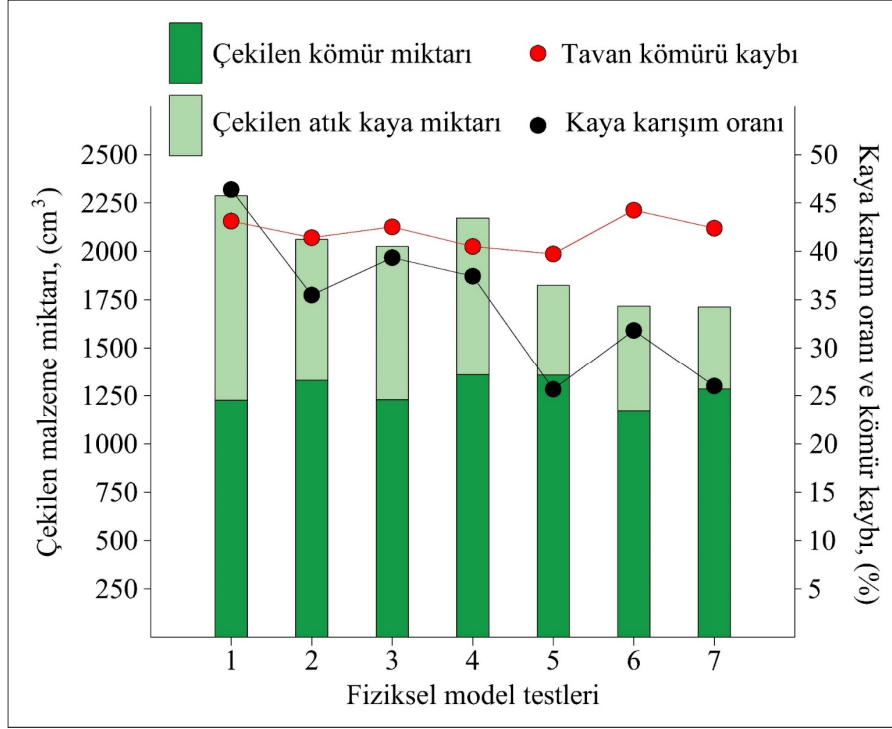
6.3. Tahkimat Ünitesi Çekim Sırası Değişiminin İncelenmesi

Tahkimat ünitesi çekim sırası değişiminin göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğine etkisini tespit edebilmek için fiziksel modelde ilk aşamada (ön fikir vermesi amacıyla) 2 boyutlu 7 test gerçekleştirilmiş olup, testlerde kullanılan tahkimat ünitesi çekim sıraları ve test parametreleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Tahkimat ünitesi çekim sırası testlerine ait test parametreleri.

Test no	Tahkimat ünitesi çekim sırası tasarımı	Damar eğimi	Tavan kömür yüksekliği	Ayak eğimi	Ayak boyu
1	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14	52,0°	12,0m	10,0°	14,0m
2	1-3-5-7-9-11-13-2-4-6-8-10-12-14	52,0°	12,0m	10,0°	14,0m
3	1-4-7-10-13-2-5-8-11-14-3-6-9-12	52,0°	12,0m	10,0°	14,0m
4	1-5-10-3-7-12-2-6-11-4-8-13-9-14	52,0°	12,0m	10,0°	14,0m
5	1-5-9-13-3-7-11-2-4-6-8-10-12-14	52,0°	12,0m	10,0°	14,0m
6	1-6-11-12-13-14-3-5-4-2-8-10-9-7	52,0°	12,0m	10,0°	14,0m
7	Kademeli tahkimat ünitesi çekimi	52,0°	12,0m	10,0°	14,0m

Fiziksel modelde 2 boyutlu olarak gerçekleştirilen testlerden çekilen malzeme miktarları ile testlerde karşılaşılan tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranları Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.13. Tahkimat ünitesi çekim sırası değişimine ait 2 boyutlu test sonuçları.

Şekil 6.13’de verilen fiziksel model test sonuçlarından da görüleceği üzere tahkimat ünitesi çekim sırasında yapılan değişim doğrultusunda;

- Tavan kömürü kaybı;
 - ✓ En düşük %39,7 (KK_{Min}),
 - ✓ En yüksek %44,3 (KK_{Max}),
 - ✓ Ortalama %42,0,
 - ✓ En düşük ve en yüksek değerler arasındaki farklılık (F_{KK}) %10,38, (Eşitlik 6.5),
- Kaya karışım oranı;
 - ✓ En düşük %25,6 (KKO_{Min}),
 - ✓ En yüksek %46,4 (KKO_{Max}),
 - ✓ Ortalama %37,4,
 - ✓ En düşük ve en yüksek değerler arasındaki farklılık (F_{KKO}) %44,83 (Eşitlik 6.6) olarak belirlenmiştir.

$$F_{KK} = \frac{(KK_{Max} - KK_{Min})}{KK_{Max}} \times 100 \quad (6.5)$$

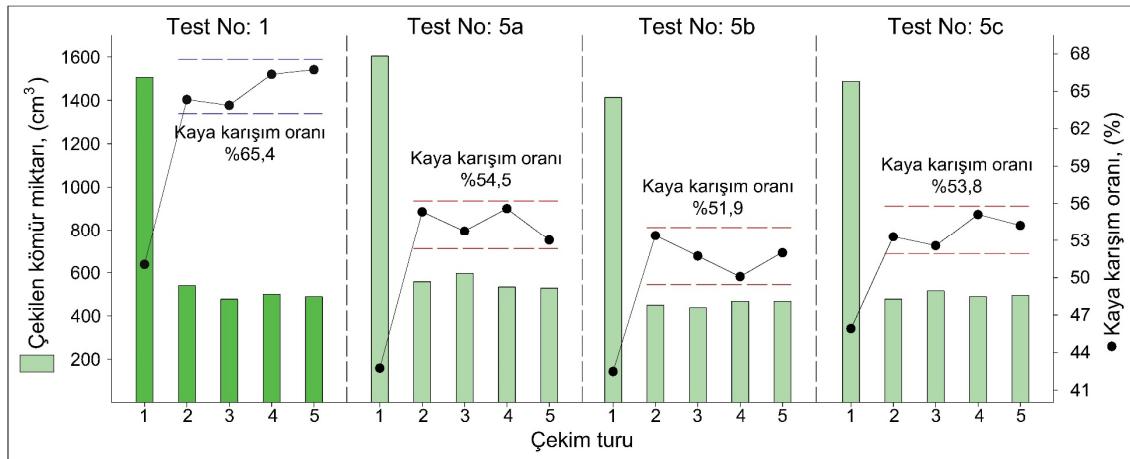
$$F_{KKO} = \frac{(KKO_{Max} - KKO_{Min})}{KKO_{Max}} \times 100 \quad (6.6)$$

Yapılan 2 boyutlu testler sonucunda en düşük tavan kömürü kaybı %39,7'lik oranı ile 5 numaralı testten, en düşük kaya karışım oranı ise %25,6 ve %26,0'lık oranlarıyla 5 ve 7 numaralı fiziksel model testlerinden elde edilmiştir.

7 numaralı testte tavan kömürü çekim işlemi tüm tahkimat ünitelerinden kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan testte tavan kömürünün kademeli olarak çekilmesi işleminin modelin yüzeyinden görünebilir olması son derece önem arz etmekte olup, bu tarzda bir tavan kömürü çekim işlemini 3 boyutlu modelde veya arazide en doğru şekliyle uygulamak mümkün değildir. Bu test yalnızca tahkimat ünitelerinin kademeli olarak çekilmesinin önemini vurgulamak için tez çalışması kapsamına dahil edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında 2 boyutta en ideal sonuçları veren 5 numaralı tahkimat ünitesi çekim sırası ile arazide uygulanan 1 numaralı tahkimat ünitesi çekim sırası, fiziksel modelde 3 boyutlu olarak test edilmiştir. 3 boyutta yapılan testler, 52° damar eğimi, 6 metre tavan kömür yüksekliği, 10° ayak eğimi ve 14 metre ayak boyunda 5 çekim turu üzerinden gerçekleştirilmiş olup, test sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 6.14'de verilmiştir.

Şekil 6.14'den de görüleceği üzere, 1 numaralı tasarım fiziksel modelde 1 kez, 5 numaralı tasarım ise fiziksel modelde 3 kez test edilmiştir.



Şekil 6.14. Tahkimat ünitesi çekim sırası değişimine ait 3 boyutlu test sonuçları.

Yapılan 3 boyutlu testlerde, arazide uygulanan tahkimat ünitesi çekim sırasına kıyasla tavan kömürü kaybında, %22,6 (%12,4'dan %9,6'ya) kaya karışım oranında ise %18,3 (%65,4'den %53,4'ye) oranında azalma sağlandığı tespit edilmiştir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Eğimli kalın kömür damarlarında dünya genelinde yaygın olarak kullanılan göçertmeli uzunayak üretim yönteminde,

- a) Kömür damar eğimi,
- b) Tavan kömür yüksekliği,
- c) Ayak eğimi,
- d) Tahkimat ünitesi çekim sırası,

parametreleri yöntemin verimli bir şekilde uygulanabilirliği açısından son derece önemli olup, bu parametrelerin göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğine etkisinin fiziksel bir model ile araştırıldığı tez çalışmasından elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- a) Tez çalışması kapsamında geliştirilen fiziksel model verileri ile detayları 4. Bölümde verilen Alpagut Dodurga Linyitleri yer altı işletmesi B1 nolu üretim panosunda oluşturulan ölçüm bölgesi verileri arasında;
 - ✓ Kaya karışım oranında, %93,40,
 - ✓ Tavan kömürü kaybında, %93,71,
 - ✓ Tavan kömürü akma açısından, %93,63'lük bir benzerlik tespit edilmiştir.
- b) Fiziksel modelin arazi verileri ile en az %93,40'ın üzerinde bir benzerlik göstermesindeki en önemli parametrenin modelde kullanılan malzemenin boyut aralığı olduğu görülmüştür. 1/40 ölçeğinde tasarlanan fiziksel modelde tavan kömürünü temsilen 3-5 mm boyut aralığındaki kireçtaşı ile atık kayayı temsilen 5-10 mm boyut aralığındaki bazalt, arazideki durumu en iyi yansıtan malzemeler olarak belirlenmiştir.
- c) Geliştirilen fiziksel modelde, damar eğimi ve tavan kömür yüksekliğinin göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğine etkisini tespit etmek için 24 test gerçekleştirilmiş olup, yapılan testler sonucunda;
 - ✓ Damar eğimindeki dikleşmeye bağlı olarak çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarlarının arttığı ve buna karşın tavan kömürü kaybı ile kaya karışım oranının ise azaldığı tespit edilmiştir.
 - ✓ 70° damar eğiminde 10 metre tavan kömür yükseklik değerine kadar yapılan testlerde tavan kömürü kaybı oluşmadığı belirlenmiştir.

- ✓ Tavan kömür yükseklik değerindeki artışa bağlı olarak; çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarları ile tavan kömürü kaybının arttığı, kaya karışım oranının ise, 8 metre tavan kömür yükseklik değerine kadar azaldığı, 8 metre tavan kömür yükseklik değerinden sonra ise tavan kömür yükseklik değerindeki artışa bağlı olarak arttığı görülmüştür.
 - ✓ Arazi çalışmalarında 65° ila 75° arasında tespit edilen tavan kömürünün ayak ilerleme yönünün tersinde (göçük üzerinde) oluşan akma açısı, fiziksel model testlerinde ortalama 71,9° olarak tespit edilmiştir.
- d) Ayak eğiminin göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğine etkisini tespit etmek için 20 fiziksel model testi gerçekleştirilmiş olup, yapılan testler sonucunda;
- ✓ Ayak eğimindeki artışa bağlı olarak uzayan ayak boyundan kaynaklı, çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarlarının literatüre benzer şekilde arttığı tespit edilmiştir.
 - ✓ Ayak eğimindeki değişim ile tavan kömürü kaybında önemli bir değişim görülmezken kaya karışım oranının artan ayak eğimi ile birlikte arttığı belirlenmiştir.
- e) Tahkimat ünitesi çekim sırası değişiminin etkisi fiziksel modelde 2 ve 3 boyutlu olarak araştırılmış olup, yapılan 2 boyutlu testlerde arazide uygulanan tahkimat ünitesi çekim sırasına kıyasla tavan kömürü kaybında %7,89 (%43,1'den %39,7'ye) ve kaya karışım oranında ise %44,8 (%46,4'den %25,6'ya) azalma sağlandığı tespit edilmiştir. 2 boyutlu fiziksel model testlerinde en ideal sonuca sahip 5 numaralı tahkimat ünitesi çekim sırası tasarımı (1-5-9-13-3-7-11-2-4-6-8-10-12-14) 3 boyutlu fiziksel modelde 3 kez test edilmiş ve yapılan testlerde arazide uygulanan tahkimat ünitesi çekim sırasına kıyasla tavan kömürü kaybında %22,6 (% %12,4'dan %9,6'ya) kaya karışım oranında ise %18,3 (%65,4'den %53,4'ye) oranında azalma sağlandığı tespit edilmiştir.
- f) Fiziksel model testlerinin güvenilirliğini ortaya koymak için fiziksel model test sonuçları 2 farklı doğrulama aşamasından geçmekte ve herhangi bir aşamada sonuçların %15'den farklı olması durumunda test iptal edilmektedir. Bu kapsamda;
- ✓ Damar eğimi ve tavan kömür yükseklik parametrelerinin etkisini tespit etmek için yapılan 24 fiziksel model testinde;
 - ❖ Son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile çekilen ortalama malzeme miktarı arasındaki farklılık;
 - Tavan kömüründe, ortalama %5,50,

- Atık kayada, ortalama %7,93 olarak tespit edilmiştir.
- ❖ Fiziksel modelden tespit edilen çekim bölgesi ile 3 boyutlu çizim programından belirlenen çekim bölgesi arasındaki farklılık;
 - Ortalama %7,17 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Ayak eğiminin etkisini tespit etmek için yapılan 20 fiziksel model testinde;
 - ❖ Son 3 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile çekilen ortalama malzeme miktarı arasındaki farklılık;
 - Tavan kömüründe, ortalama %2,56,
 - Atık kayada, ortalama %5,44 olarak tespit edilmiştir.
 - ❖ Fiziksel modelden tespit edilen çekim bölgesi ile 3 boyutlu çizim programından belirlenen çekim bölgesi arasındaki farklılık;
 - Ortalama %6,67 olarak tespit edilmiştir.
- ✓ Tahkimat ünitesi çekim sırasının etkisini tespit etmek için yapılan 3 boyutlu 4 fiziksel model testinde;
 - ❖ Son 4 çekim turundan çekilen en düşük ve en yüksek malzeme miktarları ile çekilen ortalama malzeme miktarı arasındaki farklılık;
 - Tavan kömüründe, ortalama %4,90,
 - Atık kayada, ortalama %6,22 olarak tespit edilmiştir.
 - ❖ Fiziksel modelden tespit edilen çekim bölgesi ile 3 boyutlu çizim programından belirlenen çekim bölgesi arasındaki farklılık;
 - Ortalama %7,24 olarak tespit edilmiştir.

7.2. Öneriler

Tez çalışması sonuçları doğrultusunda yapılan öneriler aşağıda verilmiştir;

- a) Tez çalışması sonuçlarından da görüleceği üzere fiziksel modelleme çalışmaları arazi koşullarında çözümü zor ve uzun zaman alacak problemlerin araştırılmasında ve çözümünde etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilir. Bu kapsamda, aşağıda belirtilen konularda fiziksel modelleme çalışmalarının yürütülmesi tavsiye edilmektedir;
 - ✓ Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayak arkasında oluşan tavan kömürü kaybında, tavan kömür yüksekliği, ayak ilerleme miktarı, ayak eğimi ve benzeri parametrelerin etkilerinin araştırılması,
 - ✓ Göçertmeli uzunayak üretim yöntemlerinde tavan kömürü çekim işleminin gerçekleştirildiği çekim bölgesinin (Pencereli yürüyen tahkimat ünitesinden

- gerçekleştirilen tavan kömürü çekimi, arka konveyörlü yürüyen tahkimat ünitesinden gerçekleştirilen tavan kömürü çekimi, yarı mekanize yürüyen tahkimat ünitesinden gerçekleştirilen tavan kömürü çekimi, vb.) tavan kömürü çekim mekanizması ve tavan kömürü kaybı üzerindeki etkisinin araştırılması,
- ✓ Modelde kullanılacak farklı malzeme boyutlarının tavan kömürü çekim işlemi üzerindeki etkisinin araştırılması,
 - ✓ Tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranı arasındaki ilişkinin irdelenmesi ve kritik tavan kömürü kaybı ve kaya karışım oranının belirlenmesi,
 - ✓ Tavan kömürü çekim bölgesinde oluşan kemerlenme olayının araştırılması,
 - ✓ Göçertmeli yöntemlerde ayak ilerlemesine bağlı olarak oluşan tabaka ve tasman hareketleri ile ayak ve bacalara gelen yüklerin araştırılması.
- b) Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayağın kuyruk kısmının üzerinde kalan kömür kayıp bölgesi üzerinde kömür damar eğimi, tavan kömür yüksekliği ve ayak eğimi parametrelerinin etkisinin sayısal modelleme yöntemleri ile araştırılması ve elde edilen sonuçların fiziksel model sonuçları ile karşılaştırılması,
- c) Eğimli kömür damarlarında damarın yatay kalınlığında bir ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak üretim yönteminin;
- ✓ 10 metreden daha düşük kömür damarı kalınlıklarındaki uygulanmaması
 - ✓ 10 metre kömür damarı kalınlığında ise damar eğiminin 70 dereceden daha yüksek eğimli olması durumunda uygulanması,
 - ✓ 70 dereceden daha düşük damar eğimlerinde ise yasal mevzuatlar çerçevesinde farklı alternatiflerinin geliştirilerek uygulanması,
- d) Göçertmeli uzunayak üretim yönteminde tavan kömürü kaybında etkili olan tavan kömür yüksekliği ve kömür damar eğimi parametreleri bu etkilerinin yanı sıra ana tavanın göçme karakteristiği üzerinde de son derece önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle tavan kömür yüksekliği ve kömür damar eğimi parametrelerinin göçertmeli uzunayak üretim yönteminde ayak ilerlemesine bağlı olarak ana tavanın göçme karakteristiği üzerindeki etkisinin araştırılması.

KAYNAKLAR

- Ahcan, R., Development of the Velenje mining method as a solution for mining thick coal seams, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 27(9) **(1979)** 369-376.
- Akçın, N.A., Batı Karadeniz taşkömürü havzasında hidrolik kömür madenciliğinin uygulanabilirliği, Türkiye 5. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, **1986**, s. 24.
- Arıtan, A.E., Acar, G., Ömerler yeraltı ocağında arka kömür kazanma veriminin araştırılması, Bilir, M.E., Kel, K. ve Kaymakçı, E. (Eds.), Türkiye 19. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı Zonguldak, **2014**, s. 10.
- Aşmet, A., GLİ Müdürlüğü Ömerler yeraltı ocağında çalıştırılan tam mekanize kömür kazı sistemlerinin pencere tahkimat sistemi ile arka konveyörlü tahkimat sisteminin arka kömür verimlerinin karşılaştırılması ve değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, **2019**.
- Atkinson, T., Thick steep and irregular coal seams mining, *The Mining Engineer*, 139(218) **(1979)** 421-430.
- Bewick, D., Roof support systems for seams over 5 metres, *Mining Engineer* 142(158) **(1983)** 507-511.
- Bhandari, T., Upadhyay, S., Dash, A.K., Dewangan, P., Pradhan, M., Thick coal seam mining challenges and prospect, National Conference on Current Practices in Mining and Allied Industries, Keonjhar, 6-7 Ekim 2018, Keonjhar, **2018**.
- Boughton, P., A supporting role in long wall mining, 2014, <https://www.engineerlive.com/con-tent/supporting-role-long-wall-mining> (Erişim tarihi: **10.11.2021**).
- BP, Statistical Review of World Energy 2021, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-coal.pdf> (Erişim tarihi: **28.09.2021**).
- Bui, M.T., Effect of cutting-caving height ratio on pressure and caving in fully-mechanized longwall top coal caving technology for extra-thick seams, PhD Thesis, China University of Mining and Technology, China, **2014**.
- Bussmann, H., Schroth, W., Longwalling with shearer loaders experiences in seams up to 6 metres in thickness, International Symposium on Thick Seam Mining, Dhanbad, India, **1992**, p. 9.
- Cai, D., The state of the art and future of China thick seam mining technology, International Symposium on Thick Seam Mining, Dhanbad, India, **1992**, p. 12.
- Callier, R., Longwall mining with sublevel caving, *Mining Congress Journal* 58(12) **(1972)** 43-48.
- Cao, J., Dou L., Zhu, G., He, J., Wang, S., Zhou, K., Mechanisms of rock burst in horizontal section mining of a steeply inclined extra-thick coal seam and prevention technology, *Energies*, 13 **(2020a)** 6043.
- Cao, W., Durucan, S., Cai, W., Shi, J.Q., Korre, A., Jamnikar, S., Roser, J., Lurka, A., Siata, R., The role of mining intensity and pre-existing fracture attributes on spatial,

- temporal and magnitude characteristics of microseismicity in longwall coal caving, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53 (2020b) 4139-4162.
- Cui, F., Lei, Z., Chen, J., Chang, B., Yang, Y., Li, C., Jia, C., Research on reducing mining-induced disasters by filling in steeply inclined thick coal seams, *Sustainability*, 11 (2019) 5802.
- Çelik, A., Özçelik Y., Investigation of the efficiency of longwall top coal caving method applied by forming a face in horizontal thickness of the seam in steeply inclined thick coal seams by using a physical model, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 148 (2021) 104917.
- Çelik, A., Özçelik Y., Investigation of the effects of coal seam slope and top coal drawn height on top coal recovery ratio in longwall top coal caving method applied in steep inclined thick coal seams, *Arabian Journal of Geosciences*, 15 (2022) 181.
- Dac, P., Tuan, N., Thang, D., The experimental application of semi-mechanized shields into no.7 seam Thanhung, Nammau Coal Mine, Technical Report, Institute of Mining Science and Technology, Hanoi, Vietnam, 2000.
- David, J., Computer simulation of the movement of ore and waste in an underground mining pillar, *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 67(2) (1968) 854-859.
- Demirbilek, S., Kalın kömür damarlarında yeraltı üretim yöntemi tasarımına genel bir yaklaşım, *Madencilik*, 26(4) (1987) 23-30.
- Doktan, M., İnci, Y.S., ELİ Soma bölgesi yeraltı ocaklarında uygulanan üretim yöntemi, sorunları ve mekanizasyon imkanları, *Madencilik*, 25(4) (1986) 5-20.
- Dorling, I., How Soviets mine a thick seam at Kostenko, *World Coal*, 6(5) (1980) 22-26.
- Ertunç, G., Uzunayak panosunda ilerleme ile ilk göçme arasındaki ilişkinin 3 boyutlu sayısal modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- Fan, G., Zhang, D., Wang, X., Mechanism of roof shock in longwall coal mining under surface gully, *Shock and Vibration*, 2015 (2015) 803071.
- Feng, G., Wang, P., Chugh, Y.P., Zhao, J., Wang, Z., Zhang, Z., A coal burst mitigation strategy for tailgate during deep mining of inclined longwall top coal caving panels at Huafeng coal mine, *Shock and Vibration*, 2018 (2018) 5929785.
- Fiscor, S., Coal companies invest in more longwall capacity, *Coal Age*, 111(2) (2006) 26-30.
- Garcia, G.F.N., Camara, T.R., Torres, V.F.N., Optimization of room and pillar dimensions using automated numerical models, *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(5) (2019) 797-801.
- Guo, J., Ma, L., Wang, Y., Wang, F., Hanging wall pressure relief mechanism of horizontal section top-coal caving face and its application-a case study of the Urumqi coalfield, China, *Energies*, 10(9) (2017) 1371.
- Guo, J., Feng, G., Wang, P., Qi, T., Zhang, X., Yan, Y., Roof strata behavior and support resistance determination for ultra-thick longwall top coal caving panel: A case study of the Tashan coal mine, *Energies*, 11(5) (2018) 1041.
- Hamilton, N., Single pass thick seam longwall experience at West Wallsend Colliery, Hebblewhite, B., Galvin, J. and Broome A., (Eds.) 2nd International Underground Coal Conference, Sydney, Australia, 1999, p. 7.

- Hams, A., A case for coam mining research in Australia, The Symposium on Thick Seam Mining by Underground Methods, Queensland, Australia, **1976**, p. 9.
- Hebblewhite, B., Overview of Australian thick seam mining prospects, Hebblewhite, B., Galvin, J. and Broome A., (Eds.) 2nd International Underground Coal Conference, Sydney, Australia, **1999**, p. 8
- Hebblewhite, B., Status and prospects of underground thick coal seam mining methods, The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, Izmir, Turkey, **2005**, p. 10.
- Hebblewhite, B., Simonis, A., Cai, Y., Technology and feasibility of potential underground thick seam mining methods, Technical Report, The University of New South Wales and Centre for Mining Technology and Equipment CRC, Australia, **2002**.
- Huang, B., Liu, C., Cheng, Q., Relation between top-coal drawing ratio and refuse content for fully mechanized top coal caving, Journal of China Coal Society, 32(8) (**2007**) 789-793.
- Huang, B., Liu, C., Wu, F., Wang, Z., Experimental research on drawing top-coal with loose medium model under dead-unconsolidated sandstone roof, Journal of China University of Mining and Technology, 35(3) (**2006**) 351-355.
- Huang, B., Liu, C., Niu, H., Wang, J., Research on coal-gangue flow field character resulted from great cutting height fully mechanized, Journal of Mining and Safety Engineering, 25(4) (**2008**) 415-419.
- Huang, C., Li, Q., Tian, S., Research on prediction of residual deformation in goaf of steeply inclined extra-thick coal seam, Plus One, 15(10) (**2020**) e0240428.
- IEA, Coal Information 2017, International Energy Agency, **2018**.
- IEA, Key World Energy Statistics 2021, Statistics Report, **2021**.
- Kang, H., Lou, J., Gao, F., Yang, J., Li, J., A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining, International Journal of Coal Geology, 188 (**2018**) 25-36.
- Kang, X., Yang, S., Zhan, P., Li, L., Simulation study of roof fracture pattern of a horizontal sublevel caving a steeply inclined thick coal seam, Advances in Civil Engineering, 2020 (**2020**) 8370634.
- Kara, H., Erten, H., Karaosmanoğlu, A., Gürsoy, B., Güçlüer, N., Polat, N., Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Çorum-Osmancık-Dodurga-Alpagut linyit sahasının jeoloji raporu, Teknik Rapor, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, **1990**.
- Karadoğan, A., Çiftalan linyit sahası için optimum yeraltı üretim yöntemi seçimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2001**.
- Klishin, V.I., Klishin, S.V., Coal extraction from thick flat and steep beds, Journal of Mining Science, 46(2) (**2010**) 149-159.
- Köse, H., Tatar, Ç., Madenlerde Yeraltı Üretim Yöntemleri, 6. Baskı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, **2011**.
- Küçükkarasu, O., Alpagut-Dodurga linyitleri kaynak kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, **2019**.

- Kvapil, R., Gravity flow of granular material in hoppers and bins part 1, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2 **(1965)** 35-41.
- Kvapil, R., Sublevel Caving, *SME Mining Engineering Handbook*, Hartman, H.L. (Eds.), Society for Mining Metallurgy and Exploration: Littleton, Colorado. **1992** p. 25.
- Janelid, I., Kvaşil, R., Sublevel caving, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 3 **(1966)** 129-153.
- Jangara, H., Öztürk, C.A., Longwall top coal caving design for thick coal seam in very poor strength surrounding strata, *International Journal of Coal Science and Technology*, 8 **(2021)** 641-658.
- Jian, W., Xianrui, M., Yaodong, J., Development of longwall top coal caving technology in China, Jian, W. and Jiachen, W. (Eds.), *Proceedings of the 1999 International Workshop on Underground Thick Seam Mining*, Beijing, China, **1999**, p. 12.
- Jin, A., Sun, H., Wu, S., Gao, Y., Confirmation of the upside-down drop shape theory in gravity flow and development of a new empirical equation to calculate the shape, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 92 **(2017)** 91-98.
- Ju, J.W., Li, Q., Wei, D., Dai, H., Pressure Character in caving steep-inclined and extremely thick coal seams with horizontally grouped top-coal drawing mining method, *Journal of the China Coal Society*, 31(5) **(2006)** 558-561.
- Lai, X., Shan, P., Cao, J., Sun, H., Suo, Z., Cui F., Hybrid assessment of pre-blasting weakening to horizontal section top coal caving (HSTCC) in steep and thick seams, *International Journal of Mining Science and Technology*, 24 **(2014)** 31-37.
- Lang, D., Wu, X., Wu, Y., Lin, H., Luo, S., Boundary distribution of top-coal limit-equilibrium zone in fully mechanized caving in steeply dipping coal seams, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(21) **(2021)** 2561-2589.
- Le, T.D., Improvement of the fully-mechanised longwall top coal caving method at seam 8 Vangdanh coal mine, MSc Thesis, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam, **2010**.
- Le, T.D., Longwall top coal caving mechanism and cavability assessment, PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia, **2018**.
- Li, X., Wang, Z., Zhang, J., Stability of roof structure and its control in steeply inclined coal seams, *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(2) **(2017)** 359-364.
- Li, Z., Xu, J., Yu, S., Ju, J., Xu, J., Mechanism and prevention of a chock support failure in the longwall top-coal caving faces: A case study in Datong coalfield, China, *Energies*, 11(2) **(2018)** 288.
- Liang, Y., Li, L., Li, X., Wang, K., Chen, J., Sun, Z., Yang, X., Study on roof-coal characteristics with complicated structure by fully mechanized caving mining, *Shock and Vibration*, 2019 **(2019)** 6519213.
- Litwiniszyn, J., Application of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies, *Archives of Mechanics*, 8(4) **(1956)** 393-411.
- Liu, B.C., Zhang, J.S., Stochastic method for ground subsidence due to near surface excavation, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 14(4) **(1995)** 289-295.

- Liu, C., Huang, B., Wu, F., Technical parameters of drawing and coal-gangue field movements of a fully mechanized large mining height top coal caving working face, *Mining Science and Technology*, 15(5) **(2009)** 549-555.
- Liu, C., Li, H., Numerical simulation of realistic top coal caving intervals under different top coal thicknesses in longwall top coal caving working face, *Scientific Reports*, 11 **(2021)** 13254.
- Liu, C., Wang, X.H., Liu, K., Wang, J., Guo, H., Sun, Z.Q., Occurrence features of coalbed methane in inclined coal seam of Junggar basin, Xinjiang, *Advanced Materials Research*, 868 **(2014)** 696-699.
- Lv, W., Guo, K., Yu, J., Du, X., Feng, K., Surrounding rock movement of steeply dipping coal seam using backfill mining, *Shock and Vibration*, 2021 **(2021)** 5574563.
- Mesutoğlu, M., Uzunayak tabanyolu galerisi tavan tabaka kontrolünde kullanılan kaya saplama ve demir bağ davranışlarının sayısal analizler ile belirlenmesi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, **2019**.
- Moodie, A., Andersen, J., Geotechnical considerations for longwall top coal caving at Austar coal mine, Aziz, N. and Kininmonth, B. (Eds.) *Proceedings of the 2011 Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong*, 10-11 Şubat 2011, Australia, **2011**, p. 11.
- Nath, P., Thick seam mining in India by underground methods, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 27(9) **(1979)** 300-306.
- Nicholas, D.E., Selection procedure, *SME Mining Engineering Handbook*, Vol. 2, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), **1993**.
- Nieto, A., Selection methods, *SME Mining Engineering Handbook*, Vol. 3, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Chapter 6.7, **2011**.
- Palarski, J., Multi-slice longwalling with backfill, Hebblewhite, B., Galvin, J. and Broome A., (Eds.) *2nd International Underground Coal Conference*, Sydney, Australia, **1999**, p. 10.
- Proust, A., Thick seam mining method at the Charbonnage de France, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 27(9) **(1979)** 285-292.
- Oiao, D., Sun, Y., Ren, F., Study on movement probability density equation of ore-drawing stochastic theory, *Journal of China Coal Society*, 28(4) **(2003)** 361-365.
- Onica, I., Mihailescu, V., Andrioni, F., Economical optimization of the mechanized longwall faces with top coal caving mining, in horizontal slices, *Archives of Mining Sciences*, 61(3) **(2016)** 651-676.
- Öge I.F., Investigation of top coal cavability and roof behavior by ground response curves, *Journal of Underground Resources*, 6(11) **(2017)** 25-35.
- Öğretmen, S., Ömerler mekanize uzunayakta yürüyen tahkimatlar üzerindeki basınçların analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, **2003**.
- Özfırat, M.K., Şimşir, F., Gönen, A., A brief comparison of longwall methods used at mining of thick coal seams, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, İzmir, **2005**, s. 4.

- Özfiat, M.K., Ömerler yeraltı kömür ocağında tam mekanize üretimde oluşan kayıpların belirlenmesi ve azaltılması üzerine araştırmalar, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, **2007**.
- Özyurt, M.C., Yeraltı üretim yöntemi seçiminde yapay sinir ağları ve oyun teorisinin kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2018**.
- Quang, D.H., The effect of seam dip on the application of the longwall top coal caving method for inclined thick seams, PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia, **2010**.
- Rak, Z., Stasica, J., Burtan, Z., Chlebowski, D., Technical aspects of mining rate improvement in steeply inclined coal seams: a case study, Resources, 9(12) **(2020)** 138.
- Reid, B., International longwall census part2, Coal Age, 102(10) **1997** 34-39.
- Schneiderman, S.J., 'Soutirage mining' in France, World Coal, 6(9) **(1980)** 46-49.
- Shahani, N.M., Wan, Z., Guichen, L., Siddiqui, F.I., Pathan, A.G., Yang, P., Liu, S., Numerical analysis of top coal recovery ratio by using discrete element method, Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences, 25 **(2019)** 26-35.
- Shahani, N.M., Wan, Z., Zheng, X., Guichen, L., Liu, C., Siddiqui, F.I., Bin, G., Numerical modeling of longwall top coal caving method at Thar coalfield, Journal of Metals, Materials and Minerals, 30(1) **(2020)** 57-72.
- Shevyakov, L., Mining of mineral deposits, Foreign Languages Publishing House, Moscow, **1958**.
- Shi, N., Huang, Z., Application of longwall top coal caving in challenging geological conditions, Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, Barcelona, Spain, **2015**, p. 8.
- Singh, R., Staggered development of a thick coal seam for full height working in a single lift by the blasting gallery method, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41 **(2004)** 745-759.
- Singh, S.K., Extraction of Thick Coal Seams, MSc Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, **2011**.
- Song, Z., Konietzky, H., A particle-based numerical investigation on longwall top coal caving mining, Arabian Journal of Geosciences, 12 **(2019)** 556.
- Song, Z., Konietzky, H., Herbst, M., Drawing mechanism of fractured top coal in longwall top coal caving, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 130 **(2020)** 104329.
- Song, Z., Wei, W., Zhang, J., Numerical investigation of effect of particle shape on isolated extracted zone (IEZ) in block caving, Arabian Journal of Geosciences, 11(12) **(2018)** 310.
- Sun, B., Gas drainage technology in fully mechanized caving face with horizontal sublevel mining in steep and extra-thick coal seam, Open Journal of Geology, 10 **(2020)** 957-970.
- Şahin, M., Bir yeraltı kömür ocağının planlanması ve Büyükdüz sahası uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2007**.

- Şenkal, S., Köse, H., Ermişoğlu, N., GLİ Tunçbilek bölgesinde uygulanmakta olan yeraltı üretim yönteminde oluşan kömür kaybının ve seyrelmesinin etüd edilmesi, *Madencilik*, 27(4) **(1988)** 5-12.
- Şimşir, F., Özfirat, M.K., Efficiency of single pass longwall (SPL) method in Çayırhan colliery, *Journal of Mining Science*, 46 **(2010)** 404-410.
- Tarakki, N.S., Quamruzzaman, C., Ahmed, M.T., Rahman, M., Alam, B., Rayhan C., Longwall top coal caving method for Barapukuria coal field, Dinajpur, Bangladesh, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 7(4) **(2016)** 285-293.
- Tercan, A.E., Ünver, B., Hindistan M.A., Ertunç, G., Atalay, F., Ünal, S., Kılıoğlu, Y., Seam modeling and resource estimation in the coalfields of western Anatolia, *International Journal of Coal Geology*, 112(1) **(2013)** 94-106.
- Tian, J., Chen, J., Liu, Y., Mining of thick seams in Chinese coal mines, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 27(9) **(1979)** 278-284.
- Tien, J., Longwall caving in thick seams, *Coal Age*, 103(4) **(1998)** 52-54.
- TKİ, Enerji ve kömür, <https://www.tki.gov.tr/enerji-ve-komur>, (Erişim tarihi: **02.11.2021**).
- Torano, J., Torno, S., Alvarez, E., Riesgo, P., Application of outburst risk indices in the underground coal mines by sublevel caving, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 50 **(2012)** 94-101.
- Tu, H., Tu, S., Yuan, Y., Wang, F., Bai, Q., Present situation of fully mechanized mining technology for steeply inclined coal seams in China, *Arabian Journal of Geosciences*, 8(7) **(2015)** 4485-4494.
- Tuan, N., Thang, D., Reports of results on experimental application of semi-mechanized shields into no.7 seam Thanhung, Nammau Coal Mine, Technical Report, Institute of Mining Science and Technology, Hanoi, Vietnam, **2003**.
- Tutak, T., Güder, Y., Matematiksel modellemenin tanımı, kapsamı ve önemi, *Turkish Journal of Educational Studies*, 1(1) **(2014)** 173-190.
- Uğur, H., Çorum-Osmancık-Dodurga-Alpagut linyit sahasının jeoloji raporu, Teknik Rapor, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, **1994**.
- Uysal, O., Demirci, A., Shortwall stoping versus sub-level longwall caving-retreat in ELİ coal fields, *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106(6) **(2006)** 425-432.
- Ünal, E., Özkan, İ., Çakmakçı, G., Modelling the behavior of longwall coal mine gate roadways subjected to dynamic loading, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(2) **(2001)** 181-197.
- Ünver, B., Kalın damar kömür madenciliğinde tabaka kontrolü ve göçme mekanizmasına pratik bir yaklaşım, *Türkiye 14. Madencilik Kongresi, Zonguldak*, **1995** s. 8.
- Ünver, B., Arakatlı göçertme uygulanan kalın kömür damarlarında işletme veriminin artırılması, Güyagüler, T., Ersayın, S. ve Bilgen, S. (Eds.), *Türkiye 15. Madencilik Kongresi, Ankara*, **1997**, s. 5.
- Ünver, B., Hindistan, M.A., Tercan, A.E., Ertunç, G., Ünal, M.S., Kılıoğlu, S.Y., Atalay, F., Soma Eynez kömür sahası için farklı bir üretim yöntemi önerisi, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 56(1) **(2017)** 5-12.

- Ünver, B., Yaşıtlı, N.E., Modelling of strata movement with special reference to caving mechanism in thick seam coal mining, *International Journal of Coal Geology*, 66(4) **(2006)** 227-252.
- Vakili, A., Cavability assessment in longwall top coal caving technology, PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, **2009**.
- Vakili, A., Cai, Y., Hebblewhite, B., New era in longwall top coal caving geomechanics, Peng, S.S., Mark, C., Finfinger, G. and Tadolini, S. (Eds.), *The 26th International Conference on Ground Control in Mining*, West Virginia, USA, **2007**, p. 7.
- Wang, G.F., Pang, Y.H., Liu, J.F., Determination and influence of cutting height of coal by top coal caving method with great mining height in extra thick coal seam. *Journal of China Coal Society*, 37(11) **(2012)** 1777-1782.
- Wang, J., Study on coal rock caving laws and technological parameters of top coal caving of fully-mechanized mining with great cutting height for thick coal seam, PhD Thesis, China University of Mining and Technology, China, **2008**.
- Wang, J., Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines, *International Journal of Coal Science and Technology*, 1(3) **(2014)** 253-260.
- Wang, J., Song, Z., Characteristic and control method of initial interface between coal and rock under fully mechanized loose top coal caving, *Journal of China Coal Science and Engineering*, 47(4) **(2015)** 1-4.
- Wang, J., Song, Z., Zhang, J., Chen, Y., Theoretical model of drawing body in LTCC mining, *Journal of China Coal Society*, 41(2) **(2016)** 352-358.
- Wang, J., Wei, W., Zhang, J., Theoretical description of drawing body shape in an inclined seam with longwall top coal caving mining, *International Journal of Coal Science and Technology*, 7(1) **(2019a)** 182-195.
- Wang, J., Wei, W., Zhang, J., Effect of the size distribution of granular top coal on the drawing mechanism in LTCC, *Granul Matter*, 21(3) **(2019b)** 70.
- Wang, J., Wei, W., Zhang, J., Mishra, B., Laboratory and field validation of a LTCC recovery prediction model using relative size of the top coal blocks, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2) **(2020a)** 1389-1401.
- Wang, J., Wei, W., Zhang, J., Mishra, B., Li, A., Numerical investigation on the caving mechanism with different standart deviations of top coal block size in LTCC, *International Journal of Mining Science and Technology*, 30 **(2020b)** 583-891.
- Wang, J., Yang, S., Li, Y., Wei, L., Liu, H., Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71 **(2014)** 160-170.
- Wang, J., Yang, S., Wei, W., Zhang, J., Song, Z., Drawing mechanisms for top coal in longwall top coal caving (LTCC): A review of two decades of literature, *International Journal of Coal Science and Technology*, 8 **(2021)** 1171-1196.
- Wang, J., Yu, B., Kang, H., Wang, G., Mao, D., Liang, Y., Jiang, P., Key technologies and equipment for a fully mechanized top-coal caving operation with a large mining height at ultra-thick coal seams, *International Journal of Coal Science and Technology*, 2(2) **(2015a)** 97-161.

- Wang, J., Zhang, J., Song, Z., Li, Z., Three-dimensional experimental study of loose top-coal drawing law for longwall top-coal caving mining technology, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(3) **(2015b)** 318-326.
- Wang, J., Zhang, J., Li, Z., A new research system for caving mechanism analysis and its application to sublevel top-coal caving mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88 **(2016)** 273-285.
- Wang, K., Zhao, T., Yetilmezsoy, K., Zhang, X., Cutting-caving ratio optimization of fully mechanized caving mining with large mining height of extremely thick coal seam, *Advances in Civil Engineering*, 2019 **(2019)** 7246841.
- Wang, P., Zhao, J., Chugh, Y.P., Wang, Z., A novel longwall mining layout approach for extraction of deep coal deposits, *Minerals*, 7(4) **(2017)** 60.
- Wang, Z., Dou, L., Wang, G., Coal burst induced by horizontal section mining of a steeply inclined, extra-thick coal seam and its prevention: a case study from Yaojie no. 3 coal mine, China, *Shock and Vibration*, 2019 **(2019)** 8469019.
- Worldometer, World Population (2020 and historical), <https://www.worldometers.info/world-population/#table-historical>, (Erişim tarihi: **08.11.2021**).
- Wu, Y.P., Yun, D.F., Zhang, M.F., Study on the elementary problems of full-mechanized coal mining in greater pitching seam, *Journal of China Coal Society*, 25 **(2000)** 465-468.
- Xie, Y.S., Zhao, Y.S., Technique of top coal caving with vibration, Ge, S., Liu, J. and Guo, C. (Eds.), *The 6th International Conference on Mining Science & Technology*, Eylül 2009, Elsevier, **2009**, p. 8.
- Xu, B., Application of the longwall top coal caving system in Australian thick seam coal mines, MSc Thesis, The University of New South Wales, Australia, **2004**.
- Yajun, X., Panfeng, G., Fudong, G., Analysis of stability of support and surrounding rock in mining top coal of inclined coal seam, *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(1) **(2014)** 63-68.
- Yang, D., Guo, W., Tan, Y., Study on evolution characteristics of two-zone failure mode of the overburden strata under shallow buried thick seam mining, *Advances in Civil Engineering*, 2019 **(2019)** 9874769.
- Yang, W., Lii, X., Shan, P., Cui, F., Yang, Y., Study on the characteristics of top-coal caving and optimization of recovery ratio in steeply inclined residual high sectional coal pillar, *Geofluids*, 2020 **(2020)** 8883784.
- Yang, Y., Ma, Y., Ji, C., Kang, T., Guo, X., Effect of mining thickness on overburden movement and underground pressure characteristics for extra thick coal seam by sublevel caving with high bottom cutting height, *Advances in Civil Engineering*, 2018 **(2018)** 6871820.
- Yaşıtlı, N.E., Tavan kömürü göçertmeli uzunayak yönteminin sayısal modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2002**.
- Yaşıtlı, N.E., Ünver, B., 3D numerical modeling of longwall with top coal caving, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(2) **(2005a)** 219-235.

- Yaşıtlı, N.E., Ünver, B., 3D numerical modeling of stresses around a longwall panel with top coal caving, *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 105 **(2005b)** 287-300.
- Yu, B., Zhu, D., Chen, Z., Top-coal drawing law of LTCC mining based on stochastic medium theory, *Journal of China Coal Society*, 42(6) **(2017)** 1366-1371.
- Yücekent, U., ADL ocaklarındaki taban yollarında taban kabarmaları, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, **1979**.
- Zhao, J.H., Lai, X.P., Application of preblasting to high-section top coal caving for steep-thick coal seam, *Journal of Coal Science and Engineering*, 17 **(2011)** 113-118.
- Zhao, J., Wang, P., Su, Y., An innovative longwall mining technology in Tangshan coal mine, China, *Minerals*, 7 **(2017)** 14.
- Zhang, J., Pan, W., Li, Z., Song, Z., Development and application of 3d simulation test device for loose top-coal drawing under caving mining technique, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34 **(2015)** 3871-3879.
- Zhang, J., Wang, J., Wei, W., Effect of face dip angle on the drawing mechanism in longwall top-coal caving mining, *Journal of China University of Mining and Technology*, 47(4) **(2018)** 805-814.
- Zhang, J., Wang, J., Wei, W., Chen, Y., Song, Z., Experimental and numerical investigation on coal drawing from thick steep seam with longwall top coal caving method, *Arabian Journal of Geosciences*, 11 **(2018a)** 96.
- Zhang, J., Zhao, Z., Gao, Y., Research on top coal caving technique in step and extra-thick coal seam, *Procedia Earth and Planetary Science*, 2 **(2011)** 145-149.
- Zhang, N., Liu, C., Pei, M., Effects of caving-mining ratio on the coal and waste rocks gangue flows and the amount of cyclically caved coal in fully mechanized mining of super-thick coal seams, *International Journal of Mining Science and Technology*, 25 **(2015)** 145-150.
- Zhang, N., Liu, C., Wu, X., Ren, T., Dynamic random arching in the flow field of top-coal caving mining, *Energies*, 11(5) **(2018b)** 1106.
- Zhang, Q., Yuan, R., Wang, S., Li, D., Li, H., Zhang, X., Optimizing simulation and analysis of automated top-coal drawing technique in extra-thick coal seams, *Energies*, 13 **(2020)** 232.
- Zhang, Y., Li, C., Si, Y., Zhang, X., Liu, C., Wang, Z., Xu, L., Influence of refuse content on economic benefits for fully mechanized top coal caving, *Procedia Engineering*, 26(8) **(2011)** 2391-2399.
- Zhongming, J., Longwal top coal caving (LTCC) – theory and application, China Coal Industry Publish House, **2001**.
- Zhu, D., Chen, Z., Du, W., Zhang, L., Zhou, Z., Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining based on stochastic medium theory, *Arabian Journal of Geosciences*, 11 **(2018)** 621.

EKLER

EK 1 – Tezden Türetilmiş Yayınlar

Çelik, A., Özçelik Y., Investigation of the efficiency of longwall top coal caving method applied by forming a face in horizontal thickness of the seam in steeply inclined thick coal seams by using a physical model, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 148 (2021) 104917.

Çelik, A., Özçelik Y., Investigation of the effects of coal seam slope and top coal drawn height on top coal recovery ratio in longwall top coal caving method applied in steep inclined thick coal seams, Arabian Journal of Geosciences, 15 (2022) 181.

