

YATAYA YAKIN KALIN KÖMÜR DAMARLARINDA DAMAR EĞİMİNİN UZUNAYAK YÖNTEM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN FİZİKSEL MODEL İLE ARAŞTIRILMASI

Arif ÇELİK^{1*}

¹ Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Çan Linyitleri İşletmesi, Çanakkale
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-2914-3369>

Anahtar Kelimeler	Öz
Uzunayak Fiziksel model Damar eğimi Kaya karışım oranı Tavan kömürü akma sınırları	<i>Göçertmeli uzunayak yöntemi geleneksel yöntemle ek olarak tavan kömürü göçertme işleminin yapıldığı etkili bir yeraltı üretim yöntemidir. Yöntem kömür damarının eğiminde ya da yatay kalınlığında ayak oluşturulmak suretiyle iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bu çalışmada damarın eğiminde ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yöntemi araştırılmıştır. Yapılan araştırmada, yataya yakın kalın kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde damar eğiminin yöntem verimliliğine etkisi çalışma kapsamında geliştirilen 2 boyutlu fiziksel bir model ile incelenmiştir. Fiziksel model çalışmaları sonucunda, çekilen tavan kömürü miktarı ile damar eğimi arasında doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. Buna karşın kaya karışım oranının damar eğimindeki artışa bağlı olarak belirli bir noktaya kadar arttığı sonrasında ise azalmaya başladığı belirlenmiştir. Ayrıca tavan kömürü akma sınırlarının da damar eğimindeki artışa bağlı olarak ayak ilerleme yönüne doğru yöneldiği gözlemlenmiştir.</i>

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SEAM INCLINATION ON LONGWALL METHOD WITH A PHYSICAL MODEL IN THICK COAL SEAMS CLOSE TO HORIZONTAL

Keywords	Abstract
Longwall Physical model Seam slope Rock mixture ratio Top coal flow boundaries	<i>The longwall top coal caving is an effective underground production method in which the top coal caving process is in addition to the traditional method. The method can be applied in two different ways by forming a face in the inclination of the coal seam or in the horizontal thickness. In this study, the longwall top coal caving method, which is applied by creating a face on the slope of the seam, was investigated. In the research, the effect of the seam slope on the method efficiency in the longwall top coal caving method applied in thick coal seams close to horizontal was investigated with a 2D physical model developed within the scope of the study. As a result of the physical model studies, a linear relationship was determined between the amount of top coal drawn and the inclination of the seam. On the other hand, it was determined that the rock mixture ratio increased up to a certain point depending on the increase in seam slope, and then started to decrease. In addition, it has been observed that the top coal flow boundaries are also oriented towards the face progression direction depending on the increase in the seam slope.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 13.03.2023

: 20.07.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 13.03.2023

: 20.07.2023

* Sorumlu yazar: arif.Rester@hotmail.com
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1264290>

1. Giriş

Küresel ısınma ve iklim krizi problemlerinden kaynaklı olarak dünya çapında kullanımı azaltılmaya çalışılan kömürün üretimi, Rusya-Ukrayna savaşının neden olduğu enerji krizinden dolayı 2022 yılında bir önceki yıla kıyasla %5,70 oranında artarak 8,17 milyar tona ulaşmıştır (BP, 2022). Günümüzde yaşanan enerji krizi

kömürün önemini dünya çapında bir kez daha gündeme getirmiş ve kömüre dayalı enerji üretimindeki stratejilerin/politikaların yeniden gözden geçirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Önemli bir enerji kaynağı olan kömürün üretimi açık ocak ve yeraltı işletmecilik yöntemleri ile gerçekleştirilmekte olup, günümüzde açık ocak



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

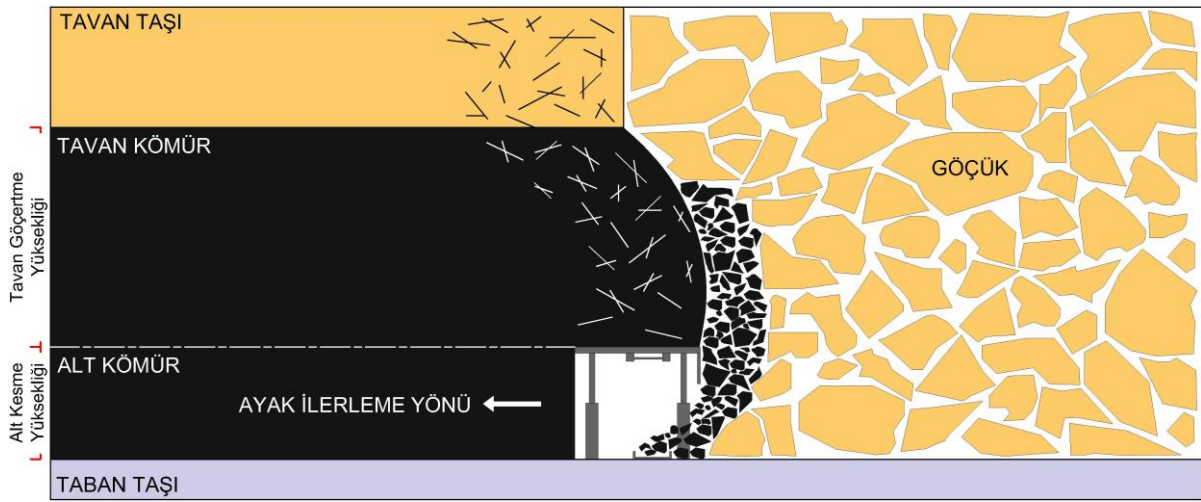
This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

işletmeciliği ile üretilen kömür rezervlerindeki azalmaya bağlı olarak yeraltı işletmeciliği her geçen gün önem kazanmaktadır (Çelik, 2022).

Kömür üretiminin büyük bir çoğunluğu kalın kömür damarlarından (Xu, 2004; Quang, 2010; Singh, 2011; Çelik, 2022) sağlanmakta olup, bu damarların üretiminde oda-topuk, hidrolik kazı ve uzunayak yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Tian, Chen ve Liu, 1979; Ünver, 1997; Garcia, Camara ve Torres, 2019; Çelik, 2022). Bu yöntemler arasında uzunayak yöntemlerinden biri olan göçertmeli uzunayak yöntemi dünya genelinde en yaygın kullanılan yeraltı üretim yöntemidir (Schneiderman, 1980; Tien 1998; Öğretmen, 2003; Klishin ve Klishin, 2010; Tarakki, Quamruzzaman, Ahmed, Rahman, Alam ve Rayhan, 2016; Guo, Feng, Wang, Qi, Zhang, ve Yan 2018;

Mesutoğlu, 2019; Shahani, Wan, Zheng, Guichen, Liu, Siddiqui ve Bin, 2020; Çelik ve Özçelik, 2022).

Göçertmeli uzunayak yöntemi geleneksel uzunayak yöntemine ek olarak tavan kömürü göçertme işleminin yapıldığı etkili bir yeraltı üretim yöntemidir. Yöntemde kömür damarının alt kısmı (kesme yüksekliği) geleneksel uzunayak yönteminde olduğu gibi ayak içerisinde 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 (Çelik, 2022). Bu yöntemdeki genel madencilik operasyonları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Göçertmeli Uzunayak Yöntemi

Göçertmeli uzunayak yönteminde tavan kömürünün ayak içerisinde göçertilerek üretimi, kömür üretim maliyetini önemli ölçüde azalttığından dolayı yöntemin dünya çapında kullanımı hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Ayrıca, yöntemin popülerliği akademik alanda da ses getirmiş olup, günümüzde yeraltı kömür madenciliği ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunu göçertmeli uzunayak yöntemi araştırmaları oluşturmaktadır. (Zhang, Zhao ve Gao, 2011; Guo, Ma, Wang, ve Wang, 2017; Zhu, Chen, Du, Zhang, ve Zhou, 2018; Song ve Konietzky, 2019; Song, Konietzky ve Herbst, 2020; Çelik ve Özçelik 2021; Wang, Yang, Wei, Zhang ve Song, 2021)

Göçertmeli uzunayak yöntemi her ne kadar dünya çapında yaygın bir şekilde kullanılan yeraltı üretim yöntemi olsa da yöntemin kullanıldığı kömür damarlarının kalınlığı ve eğimi ile ilgili literatürde herkesçe kabul görmüş net bir sınıflama sistemi bulunmaktadır.

Singh (2004), kömür damarı kalınlıklarının ülkeden ülkeye değiştiğini ortaya koyduğu çalışmasında bazı ülkelerin kalın kömür damarı alt sınırlarını Tablo 1’de özetlemiştir.

Tablo 1. Kalın Kömür Damarının 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	3,0
Kanada	4,0	Japonya	2,25
Fransa	4,0	Polonya	3,3
Hindistan	4,8	Macaristan	3,5

Kömür damarı kalınlığında olduğu gibi damar eğiminde de durum aynıdır. Dünya çapında bazı araştırmacılar tarafından önerilen kömür damarının eğim sınıflaması ile ilgili yapılan çalışmalar Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 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, Wang, Liu, Wang, Guo ve Sun, 2014

Tablo 1 ve 2'den de görüleceği üzere dünya çapında kömür damarının eğim ve kalınlığı ile ilgili net bir sınıflama bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmada kömür damarının eğimi ile ilgili yataya yakın terimi kullanılmış ve bu terim 20 dereceden daha düşük damarlar olarak ifade edilmiştir.

Göçertmeli uzunayak yöntemi damar eğimine bağlı olarak uygulamada farklılık gösterebilmektedir. Genellikle dik eğimli kalın kömür damarlarında damarın yatay kalınlığında düz ayaklar oluşturulmakta iken yataya yakın kalın kömür damarlarında damarın eğimi boyunca eğimli ayaklar oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada yataya yakın kalın kömür damarlarında damarın eğimi boyunca ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde damar eğiminin yöntem verimliliğine etkisi fiziksel model ile araştırılmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Göçermeli uzunayak yönteminde karşılaşılan problemlerin çözümünde yeraltı üretim koşullarının belirli ölçeklerde simüle edildiği sayısal ve fiziksel modeller günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yaşılı ve Ünver, 2005; Zhang vd., 2011; Zhang, Liu ve Pei, 2015; Kang, Lou, Gao, Yanga ve Lia, 2018; Zhu vd., 2018; Song ve Konietzky, 2019; Wang, Wei ve Zhang, 2019a; Kang, Yang, Zhan ve Li, 2020; Zhang, Yuan, Wang, Li, Li ve Zhang 2020; Çelik ve Özçelik 2023). Bu çalışmada özellikle dünya kömür üretiminin büyük bir çoğunluğunu tek başına karşılayan Çin'de yaygın bir şekilde kullanılan fiziksel modelleme çalışmaları tercih edilmiştir (Huang, Liu, Wu ve Wang, 2006; Wang, 2008; Wang, Yang, Li, Wei ve Liui 2014; Zhu vd., 2018).

2.1. Fiziksel Modelleme

Fiziksel modelleme çalışmalarında kullanılan fiziksel modeller araştırılacak konuya uygun olarak geliştirilen laboratuvar test cihazlarıdır. Bu cihazların gelişiminde ölçek ve boyut faktörü son derece önemli iki parametre olup, alt bölümlerde kısaca açıklanmıştır.

2.1.1. Ölçek Faktörü

Göçertmeli uzunayak yönteminde kullanılan fiziksel modeller ölçek bakımından değerlendirildiğinde genel olarak 2 grup oluşmaktadır. Birinci gruptaki fiziksel

modellerin ölçeği genel olarak 1/100'den daha küçüktür. Bu modellerde göçertmeli uzunayak yöntemindeki tasman ve tabaka hareketleri ile üretim bölgesi basınç dağılımları araştırılmaktadır (Wang, Zhao, Chugh ve Wang, 2017; Li, Wang ve Zhang, 2017; Kang vd., 2018; Yang, Ma, Ji, Kang ve Guo, 2018; Yang, Guo ve Tan., 2019; Lang, Wu, Wu, Lin ve Luo, 2021). İkinci gruptaki fiziksel modellerin ölçeği ise genel olarak 1/40'dan daha büyüktür. Bu tip modellerde, tavan kömürü çekim mekanizması, çekim gövdesi, çekim sınırları, tavan kömürü kaybı, kömür seyrelmesi gibi konular araştırılmaktadır (Huang, Liu, Niu ve Wang, 2008; Wang, 2008; Liu, Huang ve Wu, 2009; Wang vd., 2014; Wang ve Song, 2015; Zhu vd., 2018; Liang, Li, Li, Wang, Chen, Sun ve Yang, 2019; Çelik ve Özçelik, 2023)

2.1.2. Boyut Faktörü

Fiziksel model test cihazları 2 ve 3 boyutlu olarak geliştirilebilmektedir. Burada, tasman ve tabaka hareketleri gibi büyük çaplı konuların araştırıldığı fiziksel modeller 2 boyutlu olarak geliştirilmekte (Wang, Zhao, Chugh ve Wang, 2017; Yang vd., 2019; Lang vd., 2021) iken tavan kömürü göçme mekanizması, tavan kömürü kaybı ve kömür seyrelmesi gibi üretim bölgesi problemleri 2 ve 3 boyutlu fiziksel modeller ile araştırılmaktadır (Zhang vd., 2011; Zhu vd., 2018; Wang vd., 2019a; Çelik ve Özçelik 2023).

2.2. Fiziksel Model Çalışmaları

Fiziksel modeller, birçok madencilik probleminin araştırılmasında yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, bu bölümde yalnızca çalışmada kapsamında değerlendirilen probleme benzer problemlerin araştırılmasında kullanılan fiziksel modellere ilişkin örnekler sunulmuştur.

Özırat, Şimşir, Gönen ve Pamukçu (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yatay kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde yürüyen tahkimat penceresinin kömür kaybına etkisi fiziksel bir model ile araştırılmıştır. Çalışma sonucunda tahkimat pencere alanının büyütülmesi doğrultusunda kömür kaybında %30'luk bir azalma tespit edilmiştir.

Zhang ve diğerleri (2011), geliştirdikleri 2 boyutlu fiziksel model ile yatay kömür damarlarında ayak ilerleme miktarının göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında ayak ilerleme miktarındaki artışın kömür kaybını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

Zhu ve diğerleri (2018) yatay kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde stokastik ortam teorisinin uygulanabilirliğini geliştirdikleri fiziksel model ile test etmişlerdir. Çalışma sonucunda teorisinin yumuşak kömür damarlarındaki göçme mekanizmasının araştırılmasında uygulanabileceği değerlendirilmiştir.

Song ve Konietzky (2019) yatay kömür damarlarındaki göçme mekanizmasını sayısal modelleme ile araştırdıkları çalışmalarında sayısal modelleme sonuçlarını fiziksel modelleme sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda çekim turlarından çekilen malzemelerin çekim turu bazında dağılımlarının fiziksel model ve sayısal model çalışmalarında örtüştüğü tespit edilmiştir.

Wang, Wei ve Zhang (2019b) eğimli kömür damarlarında çekim gövdesinin şeklini teorik olarak tanımlamaya çalıştıkları çalışmalarında fiziksel modellemeden yararlanmışlardır.

Wang ve diğerleri (2021), yatay kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde tavan kömür geri kazanım oranı ile tahkimat ünitesi çekim sırası arasındaki ilişkiyi fiziksel bir model ile incelemişlerdir. Çalışmalarında tahkimat ünitelerinin aralıklı çekimlerinin tavan kömür geri kazanım oranını arttırdığı tespit edilmiştir.

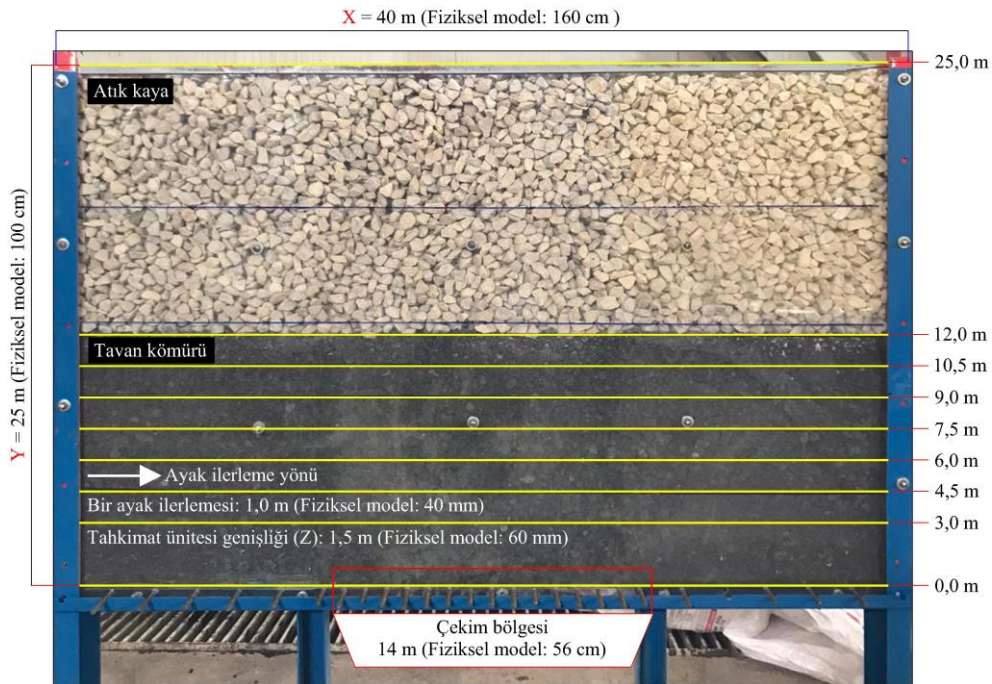
Çelik ve Özçelik (2022), dik eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğini, geliştirdikleri fiziksel bir model ile

araştırmışlardır. Çalışmalarında damar eğimindeki artışın kömür kaybını önemli ölçüde azalttığı buna karşın göçertme yüksekliğindeki artışın kömür kaybını önemli derecede arttırdığı tespit edilmiştir.

Göçertmeli uzunayak yöntemi ve fiziksel model çalışmaları değerlendirildiğinde, yataya yakın kömür damarlarında kömür damarı eğiminin yöntem verimliliği üzerindeki etkisine dair bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmada sırasıyla 1°, 8°, 14° ve 20° damar eğimlerinde göçertmeli uzunayak yöntem uygulaması fiziksel bir model ile test edilmiş ve test sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak damar eğiminin yöntem verimliliği üzerindeki etkisine dair değerlendirmeler yapılmıştır.

3. Yöntem

Çalışma kapsamında araştırma yöntemi olarak tercih edilen fiziksel model araştırma konusuna uygun olarak 2 boyutlu ve 1/25 ölçeğinde geliştirilmiştir. Şekil 2'de geliştirilen fiziksel modele ait görsel verilmiştir.



Şekil 2. Fiziksel Modelin Atölyede Oluşturulmuş Test Öncesi Görünümü

Fiziksel model çalışmalarında ölçek ve boyut faktörü kadar önemli diğer bir faktörde modelde kullanılacak malzemelerdir. Çalışmada, göçme mekanizmasına ilişkin problemler incelendiğinden dolayı fiziksel modelde yerindeki koşulları yansıtabilecek ölçüde malzemelerin kullanımı değerlendirilmiştir. Göçertme işleminde tavan kömürü, ya tabaka basınçları altında kendiliğinden, ya da gevşetme patlatması ile akmaya

uygun hale gelmektedir/getirilmiştir. Bu nedenle fiziksel modelde de yerindeki koşullara uygun olarak akmaya uygun kırılmış malzemeler kullanılmıştır. Kırılmış malzemelerin parça boyut dağılımı da göçme mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kvapil, 1992). Bu nedenle malzeme seçimi aşamasında fiziksel modelde kullanılacak kömür malzemesi için 0-5, 5-12 ve 12-20 mm parça boyut dağılımları ve kireçtaşı

malzemesi için 12-20, 20-25 ve 20-30 mm parça boyut dağılımları ön teste tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen testlerde malzemelerin akma açısı, akma sürekliliği ve çekim bölgesindeki tıkanma durumları dikkate alınmıştır. Arazi tecrübelerine dayalı olarak; tavan kömürünün akma açısının 65-80° arasında olması, tavan kömürü çekim işleminde çekilen kömür ve atık kaya karışımı malzemenin akışının kısmen kesikli olması ve birlikte çekilen malzemelerin çekim bölgesini ara ara müdahale edilerek açılabilir şekilde tıkanması gerekmektedir. Bu bilgiler ışığında gerçekleştirilen ön

testler sonucunda uygun tavan kömürü çekim mekanizması 12-20 mm parça boyut dağılımına sahip kömür malzemesi ile 20-25 mm parça boyut dağılımına sahip kireçtaşının malzemesinin birlikte kullanımı ile sağlanmıştır. Test malzemelerine ilişkin görseller Şekil 3'de verilmiştir.

Fiziksel modelde kullanılan kömürün, yoğunluğu 1,45 t/m³ (yığın yoğunluğu 0,741 t/m³) iken kireçtaşının yoğunluğu 2,72 t/m³ (yığın yoğunluğu 1,533 t/m³)'dür.



Şekil 3. Fiziksel Model Test Malzemeleri

4. Laboratuvar Testleri

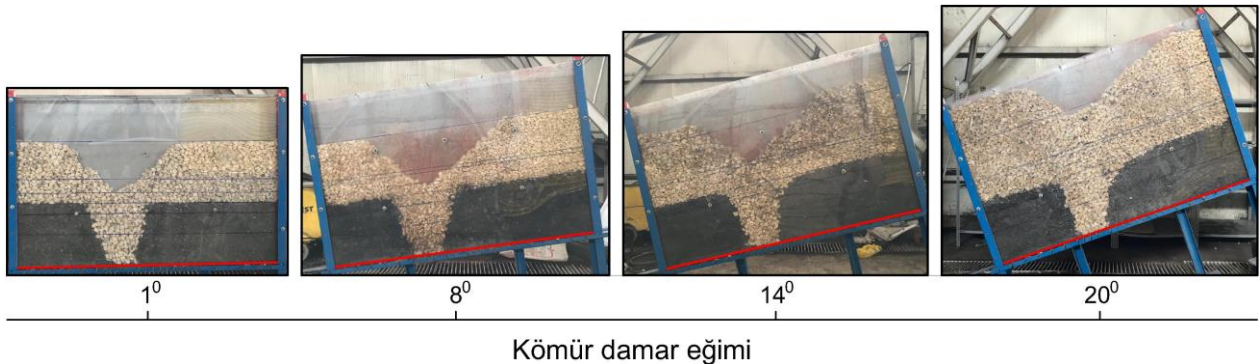
Yataya yakın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğini araştırmak için gerçekleştirilen fiziksel model testleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Fiziksel Model Test Verileri

Laboratuvar testleri					Tekrar testleri				
Test no	D _E (°)	G _Y (m)	T _Y (m)	C _T	Test no	D _E (°)	G _Y (m)	T _Y (m)	C _T
1	1,0	9,0	9,0	14	1a	1,0	9,0	9,0	14
2	8,0	9,0	9,0	14	2a	8,0	9,0	9,0	14
3	14,0	9,0	11,2	14	3a	14,0	9,0	11,2	14
4	20,0	9,0	14,3	14	4a	20,0	9,0	14,3	14

Tablo 3'de damar eğimi D_E, göçertme yüksekliği G_Y, tavan taşı yüksekliği T_Y ve çekim turu C_T olarak ifade edilmiştir. Fiziksel model testlerinde tavan kömürü çekim işleminden kaynaklı oluşabilecek hatalarının test sonuçları üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak için tekrar testleri gerçekleştirilmiştir. Benzer parametreler ile gerçekleştirilen tekrar testlerinde test sonuçlarının laboratuvar test sonuçlarına kıyasla, çekilen kömür miktarında %5 ve çekilen atık kaya miktarında %10'dan fazla farklılık göstermesi durumunda testin tekrarlanması değerlendirilmiştir.

Fiziksel modelde yürütülen testlere ait test cihazının görselleri Şekil 4'de verilmiştir.

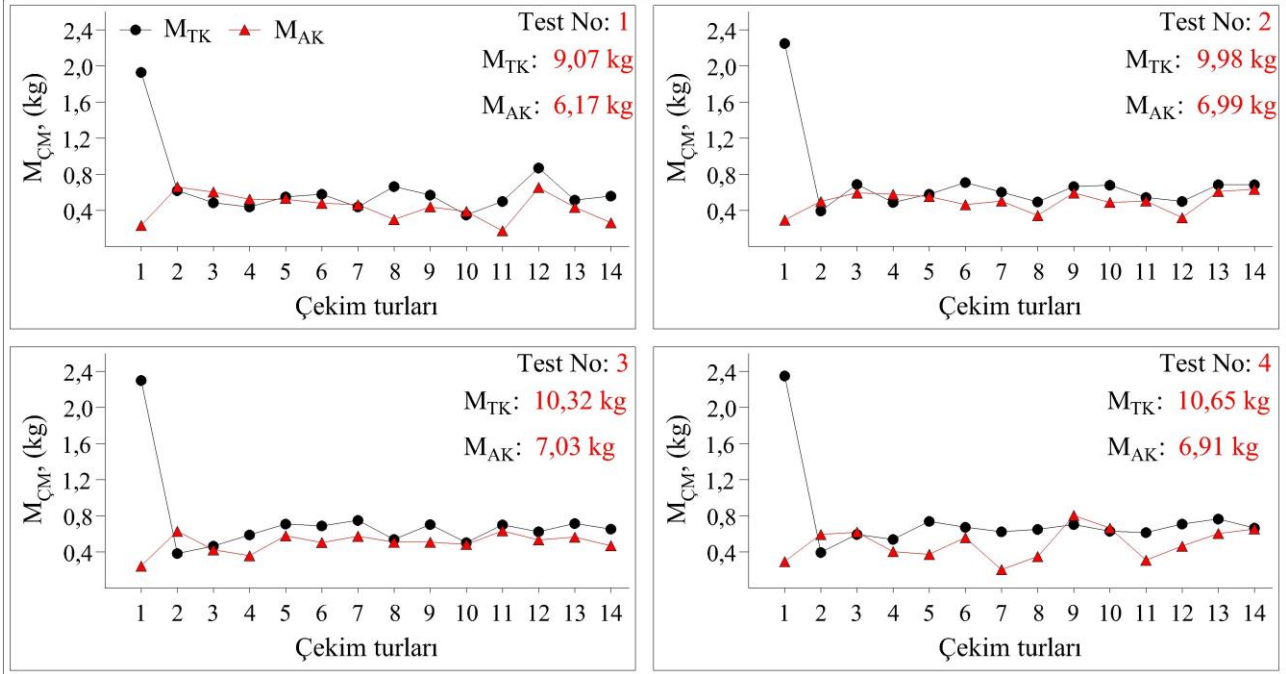


Şekil 4. Fiziksel Model Testlerine Ait Test Cihazı Görselleri

4.1. Çekim Turlarının Değerlendirilmesi

Fiziksel modelde gerçekleştirilen 4 testin her bir çekim turundan çekilen malzeme miktarları Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5'de fiziksel model testlerinden

çekilen malzeme miktarı $M_{ÇM}$, çekilen tavan kömürü miktarı M_{TK} ve çekilen atık kaya miktarı M_{AK} olarak ifade edilmiştir.



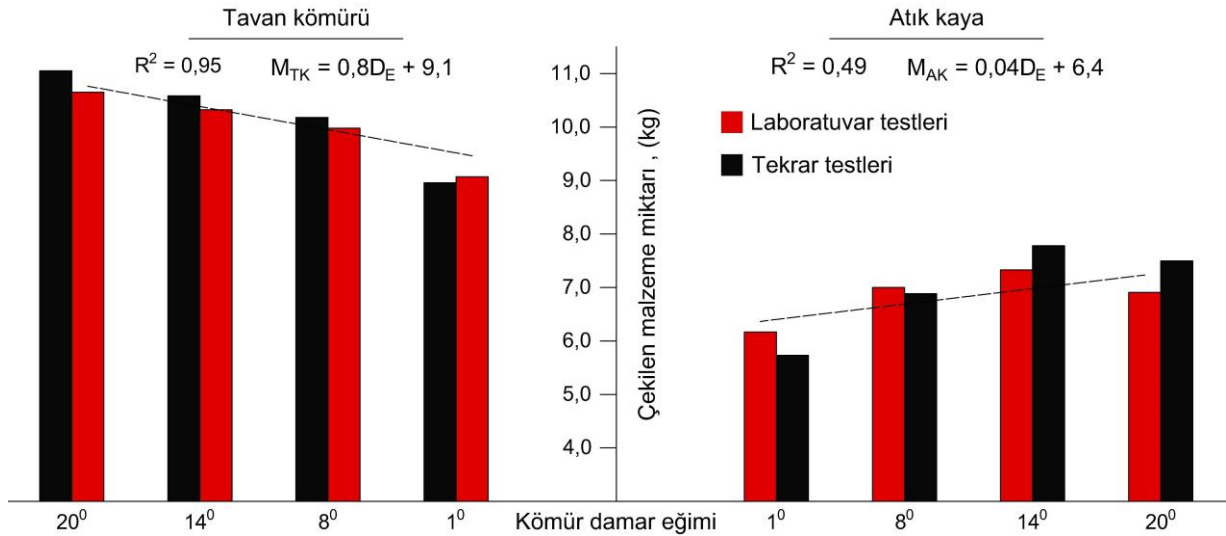
Şekil 5. Çekim Turu Sonuçları

Tavan kömürü çekim işleminin ilk çekim turunda, tavan kömürü ve tavan taşı (atık kaya) arasındaki akma sınırları oluşmakta ve sonraki çekimler bu akma sınırları dahilinde gerçekleşmektedir. Bu durum, Şekil 5'den net bir şekilde gözlemlenebilir. Ayrıca fiziksel model testlerinin ilk çekim turundan çekilen tavan kömürü miktarı 1,93 – 2,35 kg arasında değişmekte iken

sonraki çekimlerden çekilen tavan kömürü miktarı 0,35 – 0,87 kg arasında değişmektedir.

4.2. Çekilen Malzeme Miktarlarının Değerlendirilmesi

Fiziksel model testlerinden çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Damar Eğimi ve Çekilen Malzeme Miktarları Arasındaki İlişki

Şekil 6'dan görüleceği üzere, damar eğimindeki artışa bağlı olarak çekilen tavan kömürü miktarı yüksek bir korelasyon ilişkisi ($R^2 = 0,95$) ile doğrusal olarak artmaktadır. Buna karşın çekilen atık kaya miktarı, 14° damar eğimine kadar gerçekleştirilen testlerde damar eğimindeki artışa bağlı olarak artmakta iken 20° damar eğiminde gerçekleştirilen testlerde bir önceki teste kıyasla azalmaktadır. Çekilen kömür miktarındaki anlamlı ilişki ile çekilen atık kaya miktarındaki anlamsız ilişkinin temel nedeni tavan kömür çekim sınırları ve damar eğimi arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Bu nedenle buradaki ilişkilerin değerlendirilmesi, tavan kömürü akma sınırlarının değerlendirildiği Bölüm 4.5'de yapılmıştır.

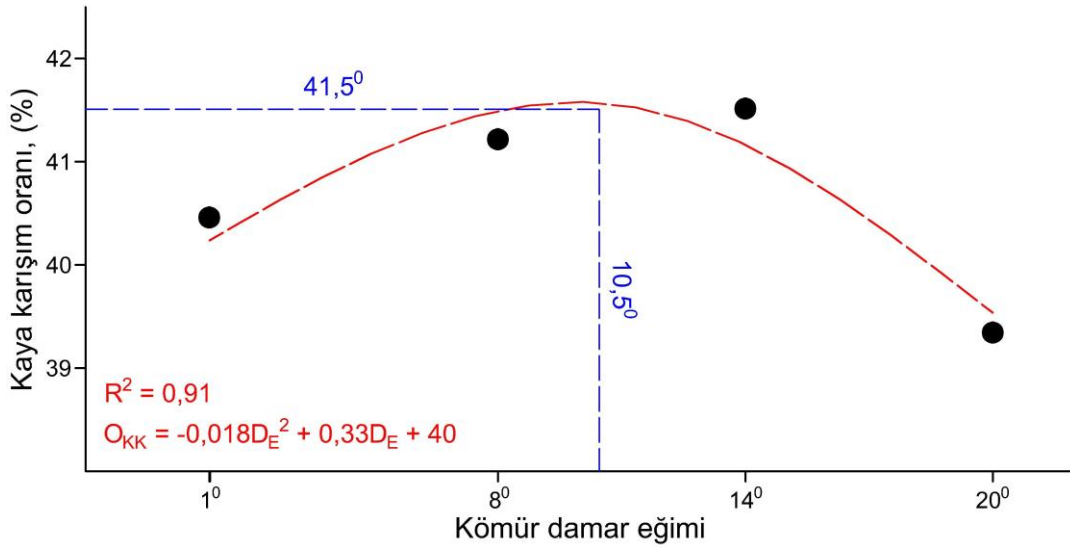
Laboratuvar testlerinin güvenilirliği açısından gerçekleştirilen tekrar testlerinin test sonuçları ile

laboratuvar test sonuçları arasında; çekilen tavan kömürü miktarında en fazla %3,76 ve çekilen atık kaya miktarında en fazla %8,54 farklılık tespit edilmiştir. Bu değerler kabul edilebilir değer aralıkları içerisinde kaldığından dolayı çalışmada herhangi bir fiziksel model testi iptal edilmemiştir.

4.3. Kaya karışım oranının değerlendirilmesi

Kaya karışım oranı (O_{KK}) Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmış olup, her bir testten belirlenen kaya karışım oranları Şekil 7'de gösterilmiştir.

$$O_{KK} = 100 \times \frac{M_{AK}}{M_{TK} + M_{AK}} \quad (1)$$



Şekil 7. Kaya Karışım Oranı ve Damar Eğimi Arasındaki İlişki

Şekil 7'den görüleceği üzere, kömür damar eğiminin yataydan 10,5°'ye kadar yükseltilmesi sonucunda damar eğimindeki artış ile kaya karışım oranının arttığı, 10,5° kömür damar eğiminden sonra ise damar eğimindeki artışa bağlı olarak kaya karışım oranının azaldığı tespit edilmiştir. Damar eğiminin 10,5° olduğu durumda en yüksek kaya karışım oranı %41,5 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca en düşük kaya karışım oranı 20° damar eğiminde %39,3 olarak tespit edilmiştir.

Göçertmeli uzunayak yönteminde, herhangi bir sebeple üretim bölgesinin genişletilmesi doğrudan çekilen kömür miktarının ve dolaylı olarak da çekilen tavan taşı miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu durum 14° damar eğimine kadar gerçekleştirilen testlerde beklenildiği gibi sonuçlanmış ve damar eğimindeki artışa bağlı olarak meydana gelen tavan kömürü akma sınırlarındaki pozitif değişim, üretim bölgesinin genişlemesini sağlamakla birlikte çekilen tavan kömürü ve çekilen tavan taşı miktarını arttırmıştır. Buna karşın

20° damar eğiminde gerçekleştirilen testte çekilen tavan kömürü miktarı beklenildiği gibi artmasına rağmen çekilen tavan taşı miktarı bir önceki teste kıyasla azalmıştır. Fiziksel model testlerinden gerçekleştirilen gözlemlerde, 20° damar eğiminde gerçekleştirilen tavan kömürü çekim sürecinde, çekilen tavan taşlarının önemli bir kısmının çekim bölgesi merkezinden göçük bölgesine doğru yöneldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak çekim mekanizmasında meydana gelen pozitif yönelim hem çekilen tavan taşı miktarının hem de kaya karışım oranının düşmesini mümkün kılmıştır.

4.4. Tavan Kömürü Kaybının Değerlendirilmesi

Fiziksel model sonuçlarının birbirleri ile mukayese edilebilmesi için tavan kömürü kayıp oranı ile kaya karışım oranından herhangi birinin tüm testlerde birbirlerine yakın sonuçlar vermesi gerekmektedir. Fiziksel model testlerinde bu durumu sağlayabilmenin en basit yolu tavan kömürünün tamamının

üretilesidir. Bu kapsamda gerçekleştirilen fiziksel model testlerinde tavan kömürü kaybının %5'den daha fazla olması durumunda testin iptali değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen testlerden tavan kömürü kaybı aşağıda belirtilen Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmış olup, her bir testten belirlenen tavan kömürü kayıp oranları Tablo 4'de verilmiştir.

$$O_{TK} = 100 \times \frac{M_{TKK}}{M_{TKK} + M_{TK}} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de tavan kömürü kayıp oranı O_{TK} ve tavan kömürü kayıp miktarı M_{TKK} olarak ifade edilmiştir.

Tablo 4. Tavan Kömürü Kayıp Oranları

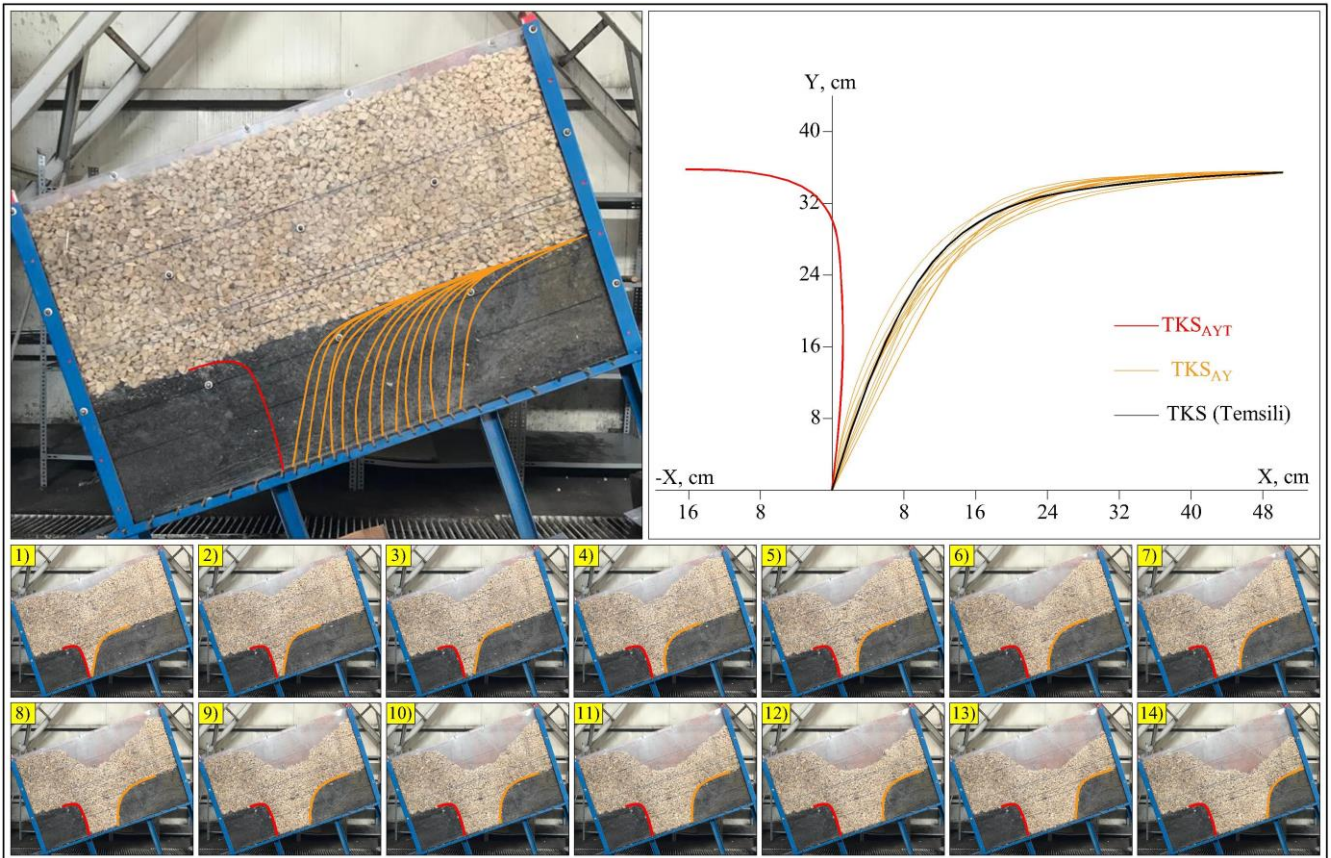
Test no	M_{TK} , (kg)	M_{TKK} , (kg)	O_{TK} , (%)
1	9,07	0,25	2,68
2	9,98	0,16	1,58
3	10,32	0,33	3,10
4	10,65	0,25	1,34

Tablo 4'den görüleceği üzere test sonuçlarının birbirleri ile mukayesesi açısından en fazla %5 olarak belirlenen tavan kömürü kaybı, gerçekleştirilen testlerde en yüksek %3,10 olarak tespit edildiğinden dolayı

çalışmada tavan kömürü kaybına bağlı olarak herhangi bir test iptal edilmemiştir.

4.5. Tavan Kömürü Akma Sınırlarının Değerlendirilmesi

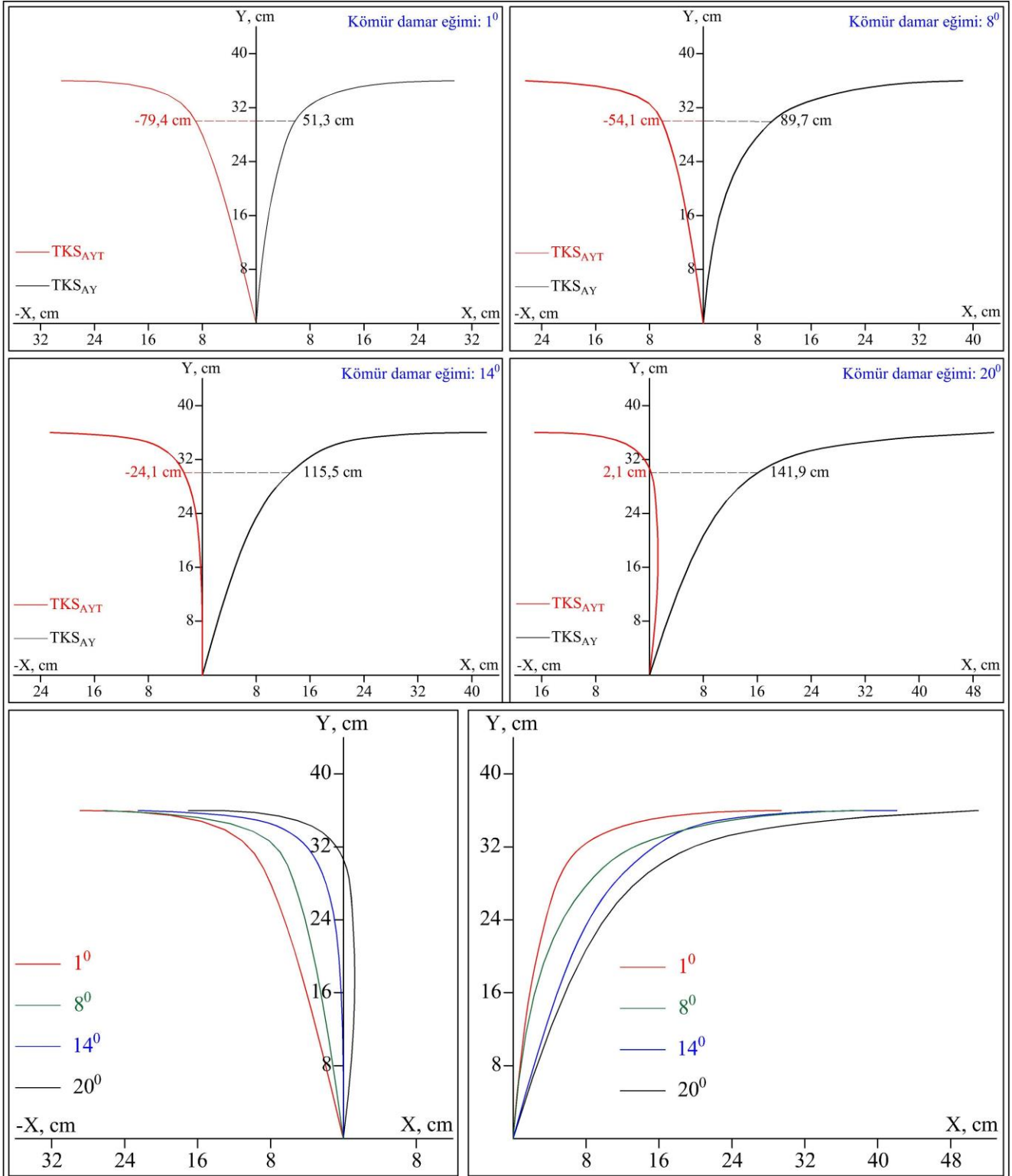
Tavan kömürü göçme mekanizması literatürde "top coal boundary" (Song ve Konietzky, 2019; Song vd., 2020; Wang vd., 2021) olarak adlandırılan tavan kömürü akma sınırlarının kontrolünde gerçekleşmektedir. Bu sınırların oluşumunda yer çekimi kuvveti ana etken parametredir. Ayrıca malzemelerin içsel sürtünme açısı ve parça boyut dağılımı da bu sınırların oluşumunda etkili parametrelerdir. Bu nedenle çalışma kapsamında tavan kömürü akma sınırları fiziksel model üzerinden gözlemlenmiştir. Burada, her bir fiziksel model testinde gerçekleştirilen tavan kömürü çekim işlemi modelin hemen karşısında konumlanan kamera ile fotoğraflanmakta ve ardından çekilen fotoğraflar üzerinden tavan kömürü akma sınırları bir bilgisayar programı vasıtasıyla sayısallaştırılmaktadır. Tavan kömürü akma sınırının sayısallaştırılması işlemlerine ait görseller Şekil 8'de her bir fiziksel model testinden belirlenen akma sınırları ise Şekil 9'de verilmiştir.



Şekil 8. Tavan Kömürü Akma Sınırlarının Sayısallaştırılması

Şekil 8'de ayak ilerleme yönünde oluşan tavan kömürü akma sınırı TKS_{AY} ve ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırı TKS_{AYT} olarak ifade edilmiştir. Ayrıca her bir çekim turundan belirlenen ayak ilerleme yönünde oluşan tavan kömürü akma

sınırları koordinat sistemi üzerinde bir noktada birleştirilerek tüm akma sınırlarının ortalamasından temsili bir TKS_{AY} sınırı oluşturulmuştur. Bu sınır Şekil 8'de TKS olarak ifade edilmiştir.



Şekil 9. Tavan Kömür Akma Sınırları ile Damar Eğimi Arasındaki İlişki

Şekil 9'dan görüleceği üzere damar eğimi artışına bağlı olarak tavan kömürü akma sınırları ayak ilerleme yönüne (+X) doğru kaymaktadır. Örneğin, ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırının -X yönündeki koordinat sistemine uzaklığı, referans değer olarak belirlenen 7,5 metre yüksekliğinde (fiziksel modelde 30 cm) 1° damar eğiminde 7,7 cm iken 20° damar eğiminde 0,0 cm'dir.

Damar eğimindeki artışa bağlı olarak tavan kömürü akma sınırlarının ayak ilerleme yönüne doğru yönelmesi çekim bölgesinin genişlemesine neden olmaktadır. Şekil 9'dan görüleceği üzere 1° damar eğiminde 291 cm² olan çekim bölgesi hacmi 20° damar eğiminde %15,12 oranında artarak 335 cm²'ye ulaşmaktadır. Çekim bölgesinde oluşan artış çekilen tavan kömürü miktarı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu durumun sonucu Şekil 6'da belirtilen damar eğimi ve çekilen kömür miktarı arasındaki anlamlı ilişkiden gözlemlenebilir. Ayrıca fiziksel model testlerinde akma sınırlarında meydana gelen %15,12'lik artışa paralel olarak çekilen tavan kömürü miktarında %17,41'lik bir artış tespit edilmiştir.

Ek olarak, Şekil 9'da belirtilen tavan kömürü akma sınırlarından görüleceği üzere, ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırının tamamı, 14° damar eğimine kadar gerçekleştirilen fiziksel model testlerinde -X yönünde iken 20° damar eğiminde gerçekleştirilen fiziksel model testinde bu sınırının büyük bir kısmı +X yönündedir. Ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan akma sınırının ayak ilerleme yönüne doğru yönelimi üst bölümlerde de belirtildiği üzere çekilen tavan taşı miktarının ve kaya karışım oranının düşmesine neden olmuştur.

5. Sonuçlar

Damar eğiminde ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde ayak eğimi, üretim organizasyonunu, iş verimini ve iş sağlığı ve güvenliği koşullarını önemli derecede etkileyen bir parametredir. Bu nedenle dünya çapında eğimli ve dik kömür damarlarının üretiminde göçertmeli uzunayak yöntemi genellikle damarın eğimi boyunca ayak oluşturmak yerine damarın yatay kalınlığında düzayaklar oluşturularak uygulanmaktadır. Ancak bu uygulama yataya yakın kömür damarlarında, damarın kalınlığına da bağlı olarak genellikle teknik ve ekonomik açıdan mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla yataya yakın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak yöntemi damarın eğimi boyunca ayak oluşturularak uygulanmaktadır. Bu çalışma da yataya yakın kalın kömür damarlarında damarın eğimi boyunca ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde damar eğiminin göçme mekanizmasına olan etkilerinin araştırılması için gerçekleştirilmiştir.

Yapılan araştırma sonucunda, damar eğimindeki artışa bağlı olarak çekim bölgesini hacminin genişlediği ve çekilen tavan kömürü miktarının arttığı tespit edilmiştir.

Ayrıca 20° damar eğiminde gerçekleştirilen testte ayak ilerleme yönü tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırının bir kısmının diğer testlere kıyasla +X yönüne kaydığı belirlenmiştir. Tavan kömürü akma sınırında görülen bu yer değiştirme çekilen tavan taşının bir kısmının çekim bölgesi merkezinden göçük bölgesine doğru yöneldiğinin göstergesidir. Tavan kömürü akma sınırındaki pozitif yönlü yönelim çekilen tavan taşı miktarının düşmesine neden olmakla birlikte ve kaya karışım oranının azalmasını mümkün kılmıştır.

6. Öneriler

Günümüzde gelişen teknolojiye bağlı olarak damarın eğimi boyunca göçertmeli uzunayak yönteminin tam mekanize olarak uygulanması dik eğimli kalın kömür damarlarında da mümkün hale gelmiştir. Yöntemin uygulaması yeni yeni popülerlik kazandığından dolayı akademik alanda yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışma paralelinde damar eğiminin dik eğimli kalın kömür damarlarında da göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğine etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Yazar, fiziksel model test sürecinde yardımlarını esirgemeyen Oktay TÜRK'e teşekkürlerini sunar.

Araştırmacıların Katkısı

Makale tek yazarlıdır.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Akcın, N. A. (1986). Batı Karadeniz taşkömürü havzasında hidrolik kömür madenciliğinin uygulanabilirliği, Türkiye 5. Kömür Kongresinde Sunulmuş Bildiri, Zonguldak.

BP. (2022) Statistical Review of World Energy 2022. Erişim adresi : <https://www.bp.com>.

Çelik, A. (2022). Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğinin fiziksel modelleme ile araştırılması (Doktora Tezi). Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çelik, A. ve Özçelik Y. (2021). 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, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104917>.
- Çelik, A. ve Özçelik Y. (2022). 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, 181. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09466-9>.
- Çelik, A. ve Özçelik Y. (2023). Investigation of the effect of caving height on the efficiency of the longwall top coal caving production method applied in inclined and thick coal seams by physical modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 162, 105304. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105304>.
- Garcia, G. F. N., Camara, T. R. ve Torres, V. F. N. (2019). Optimization of room and pillar dimensions using automated numerical models. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29, 797-801.
- Guo, J., Feng, G., Wang, P., Qi, T., Zhang, X. ve Yan, Y. (2018). 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, 1041. <https://doi.org/10.3390/en11051041>.
- Guo, J., Ma, L., Wang, Y. ve Wang, F. (2017). 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, 1371. <https://doi.org/10.3390/en10091371>.
- Huang, B., Liu, C., Niu, H. ve Wang, J. (2008). Research on coal-gangue flow field character resulted from great cutting height fully mechanized. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 25, 415-419.
- Huang, B., Liu, C., Wu, F. ve Wang, Z. (2006). Experimental research on drawing top-coal with loose medium model under dead-unconsolidated sandstone roof. *Journal of China University of Mining and Technology*, 35, 351-355.
- Kang, H., Lou, J., Gao, F., Yanga, J. ve Lia, J. (2018). A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining. *International Journal of Coal Geology*, 188, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.01.013>.
- Kang, X., Yang, S., Zhan, P. ve Li, L. (2020). Simulation study of roof fracture pattern of a horizontal sublevel caving a steeply inclined thick coal seam. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 8370634. <https://doi.org/10.1155/2020/8370634>.
- Klishin, V. I. ve Klishin, S.V. (2010). Coal extraction from thick flat and steep beds. *Journal of Mining Science*, 46, 149-159. <https://doi.org/10.1007/s10913-010-0020-y>.
- Kvapil, R. (1992). *Sublevel Caving*, SME Mining Engineering Handbook. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Colorado.
- Lang, D., Wu, X., Wu, Y., Lin, H. ve Luo, S. (2021). Boundary distribution of top-coal limit-equilibrium zone in fully mechanized caving in steeply dipping coal seams. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12, 2561-2589. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1969450>.
- Li, X., Wang, Z. ve Zhang, J. (2017). Stability of roof structure and its control in steeply inclined coal seams. *International Journal of Mining Sciences and Technology*, 27, 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.018>.
- Liang, Y., Li, L., Li, X., Wang, K., Chen, J., Sun, Z. ve Yang, X. (2019). Study on roof-coal caving characteristics with complicated structure by fully mechanized caving mining. *Shock and Vibration*, 2019, 6519213. <https://doi.org/10.1155/2019/6519213>.
- Liu, C., Huang, B. ve Wu, F. (2009). 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, 549-555. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60103-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60103-4).
- Liu, C., Wang, X. H., Liu, K., Wang, J., Guo, H. ve Sun, Z. Q. (2014). Occurrence features of coalbed methane in inclined coal seam of Junggar basin, Xinjiang. *Advanced Materials Research*, 868, 696-699.
- Mesutoğlu, M. (2019). Uzunayak tabanyolu galerisi tavan tabaka kontrolünde kullanılan kaya saplama ve demir bağ davranışlarının sayısal analizler ile belirlenmesi (Doktora Tezi). Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Nicholas, D. E. (1993). *Selection procedure*, SME Mining Engineering Handbook, Vol. 2, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Nieto, A. (2011). *Selection methods*, SME Mining Engineering Handbook, Vol. 3, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Öğretmen, S. (2003). Ömerler mekanize uzunayakta yürüyen tahkimatlar üzerindeki basınçların analizi

- (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özfirat, M. K., Şimşir, F., Gönen, A. ve Pamukçu, C. (2008). Yürüyen tahkimat penceresinin kömür kaybına etkisi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 10(1), 15-26.
- Quang, D. H. (2010). 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, Sydney.
- Shahani, N. M., Wan, Z., Zheng, X., Guichen, L., Liu, C., Siddiqui, F. I. ve Bin, G. (2020). Numerical modeling of longwall top coal caving method at Thar coalfield. Journal of Metals, Materials and Minerals, 30, 57-72.
- Shevyakov, L. (1958). Mining of mineral deposits, Foreign Languages Publishing House, Moscow.
- Singh, R. (2004). 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, 745-759. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.01.008>.
- Singh, S. K. (2011). Extraction of thick coal seams (MSc Thesis). National Institute of Technology, Rourkela.
- Song, Z. ve Konietzky, H. (2019). A particle-based numerical investigation on longwall top coal caving mining. Arabian Journal of Geosciences, 12, 556. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4743-z>.
- Song, Z., Konietzky, H. ve Herbst, M. (2020). Drawing mechanism of fractured top coal in longwall top coal caving. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 130, 104329. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104329>.
- Tarakki, N. S., Quamruzzaman, C., Ahmed, M. T., Rahman, M., Alam, B. ve Rayhan C. (2016). Longwall top coal caving method for Barapukuria coal field, Dinajpur, Bangladesh. International Journal of Scientific and Engineering Research. 7, 285-293.
- Tian, J., Chen, J. ve Liu, Y. (1979). Mining of thick seams in Chinese coal mines. Journal of Mines, Metals and Fuels, 27, 278-284.
- Tien, J. (1998). Longwall caving in thick seams. Coal Age, 103, 52-54.
- Ünver, B. (1997). Arakatlı göçertme uygulanan kalın kömür damarlarında işletme veriminin artırılması, Türkiye 15. Madencilik Kongresinde Sunulmuş Bildiri, Ankara.
- Wang, J. (2008) 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, Beijing.
- Wang, J. ve Song, Z. (2015). Characteristic and control method of initial interface between coal and rock under fully mechanized loose top coal caving. Journal of Coal Science and Engineering, 47, 1-4.
- Wang, J., Wei, W. ve Zhang, J. (2019a). Effect of the size distribution of granular top coal on the drawing mechanism in LTCC. Granular Matter, 21, 70. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0923-5>.
- Wang, J., Wei, W. ve Zhang, J. (2019b) 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), 182-195. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00286-z>.
- Wang, J., Yang, S., Li, Y., Wei, L. ve Liu, H. (2014). Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining method. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 71, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.024>
- Wang, J., Yang, S., Wei, W., Zhang, J. ve Song, Z. (2021). 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, 1171-1196. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00453-1>.
- Wang, P., Zhao, J., Chugh, Y. P. ve Wang, Z. (2017). A novel longwall mining layout approach for extraction of deep coal deposits. Minerals, 7, 60. <https://doi.org/10.3390/min7040060>.
- Xu, B. (2004). Application of the longwall top coal caving system in Australian thick seam coal mines (MSc Thesis). The University of New South Wales, Sydney.
- Yang, D., Guo, W. ve Tan, Y. (2019). Study on evolution characteristics of two-zone failure mode of the overburden strata under shallow buried thick seam mining. Advances in Civil Engineering, 2019, 9874769. <https://doi.org/10.1155/2019/9874769>.
- Yang, Y., Ma, Y., Ji, C., Kang, T. ve Guo, X. (2018). 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, 6871820. <https://doi.org/10.1155/2018/6871820>.

- Yaşıtılı, N. E. ve Ünver, B. (2005). 3D numerical modeling of longwall with top coal caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 219-235.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.08.007>
- Zhang, J., Zhao, Z. ve Gao, Y. (2011). Research on top coal caving technique in step and extra-thick coal seam. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2, 145-149.
<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.024>.
- Zhang, N., Liu, C. ve Pei, M. (2015). 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, 145-150.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.11.014>
- Zhang, Q., Yuan, R., Wang, S., Li, D., Li, H. ve Zhang, X. (2020). Optimizing simulation and analysis of automated top-coal drawing technique in extra-thick coal seams. *Energies*, 13, 232.
<https://doi.org/10.3390/en13010232>.
- Zhu, D., Chen, Z., Du, W., Zhang, L. ve Zhou, Z. (2018). Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining based on stochastic medium theory. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 621.
<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3987-3>.