

Metalik Madenlerde Topuk Boyutlarındaki Değişimin Gerilme Dağılımına Etkisi

Mustafa Emre YETKİN¹

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.

e-posta: mustafa.yetkin@deu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4797-3841>

Geliş Tarihi: 26.07.2022

Kabul Tarihi: 29.11.2022

Öz

Anahtar kelimeler

Topuk boyutu; Sayısal analiz; Gerilme dağılımı; Metalik maden

Yeraltı metal madencilğinde cevher kazanımı sırasında tavanın etkili bir şekilde desteklenmesi ve güvenliğinin sağlanması amacıyla üretim alanında cevherlerden oluşan topuklar bırakılmaktadır. Topuk boyutlarının optimum seviyelerde olması cevher kazanımı açısından önemli hale gelmektedir. Gereğinden fazla boyutlarda bırakılacak olan topuk cevher kaybına sebebiyet verecek ve işletmeyi ekonomik yönden olumsuz etkileyecektir. Ayrıca, olması gerekenden az boyutlarda bırakılan topuk ise çalışılan bölgeyi iş güvenliği açısından daha tehlikeli hale getirecektir. Yapılan çalışmada, Phase^{2D} sayısal modelleme programında farklı boyutlarda modellenmiş olan topuklar etrafında meydana gelen gerilmeler hesaplanmış ve topuklar etrafında oluşan gerilme dağılımı dikkate alınarak optimum topuk boyutları önerilmiştir.

Effect Of Pillar Size Change on Stress Distribution in Metalliferous Mines

Abstract

Keywords

Pillar size; Numerical analysis; Stress distribution; Metalliferous mine.

For the purpose of effectively supporting the roof and ensuring safety during ore recovery in underground metal mining, pillars composed of ores are left in production area. Optimum pillar sizes are becoming important for ore recovery. The pillar that will be left in more than necessary dimensions will cause loss of ore and will negatively affect the company economically. In addition, the pillar that is left in smaller sizes than it should be will make the working area more dangerous in terms of work safety. In the study, stresses occurring around pillars modeled in different sizes are calculated in Phase^{2D} numerical modeling program and optimum pillar sizes are proposed considering the stress distribution that are occurred surround of pillars.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Oda topuk yöntemlerinde oda ve topukların planlanması ve kontrolü çok önemlidir. Topuk boyutları buldukları bölgelerde meydana gelen gerilmelerin değişiminde önemli rol oynar. Topukların boyutları belirlenirken kaya kütlelerinin jeomekanik özellikleri/parametreleri tespit edilerek topukların yük altındaki davranışları incelenir ve duraylılıkları belirlenir. Elde edilen jeomekanik özellikler/parametreler sonucunda gerekli topuk boyutları ve aralıkları belirlenir. Oda topuk yönteminde topukların birincil görevi tavanı desteklemektir. Dolayısıyla çalışılan bölge dikkate alınarak yapılacak olan topuk boyutlandırması oldukça önemlidir.

Oda-topuk yöntemi günümüze kadar yaygın bir şekilde kullanılmasına rağmen temel tasarım parametreleri olan odaların ve topukların boyutlarının belirlenmesinde çoğu zaman görgül yöntemler kullanılmaktadır. Günümüzde etkili bir şekilde yapılacak olan işletme planlaması için bu yöntemde oluşturulacak olan odaların ve topukların boyutlarının ve bu oda-topukların etrafında meydana gelen gerilme dağılımlarının detaylı bir şekilde incelenip önceden tahmin edilmesi gerekmektedir.

Bu yöntemde tasarlanan oda ve topuk boyutları, cevherin ve yankayacın jeomekanik özelliklerine göre değişmektedir. Oda yükseklikleri damar kalınlığı kadar olmaktadır. Topukların boyutları

derinlik, cevher damarının kalınlığı ve sağlamlığı, yankayaç yapısı ve kullanılan makine-ekipmana bağlı olarak değişmektedir (Nazarov vd. 2006; Simsir 2015). Yeraltı madencilğinde cevheri güvenli bir şekilde çıkartmak için geçici veya kalıcı olarak topuklar bırakılmaktadır. Üretim bölgesinde tavanın etkili bir şekilde tahkim edilmesi amacıyla bırakılan bu topukların boyutları iş güvenliği açısından önemli olduğu kadar ekonomik olarak da önemli hale gelmektedir. Gereğinden fazla boyutlarda bırakılan topuklar cevher kaybına sebep olmakta, gereğinden daha az boyutlarda bırakılan topuklar ise tavan yenilmelerine sebep olarak iş güvenliği açısından tehlikeli durumlar oluşturmaktadır. Ampirik yöntemlerin kullanımı ile topukların olması gereken optimum boyutlarda dizayn edilmesi oldukça zordur. Bunun yerine, sayısal modelleme yöntemlerini kullanarak ayrıca cevherin ve yankayaçın jeomekanik özelliklerini dikkate alarak oluşturulan saha modelleri üzerinde detaylı inceleme ve değerlendirme yapılabilmektedir. Günümüzde bir çok araştırmacı topuklar etrafında meydana gelen gerilmeleri sayısal modelleme yöntemi kullanarak araştırmışlardır (Brady ve Brown 2006; Iannacchione ve Mark 2009; Tuncay 2009; Tesarik, Seymour, ve Yanske 2009; Jaiswal ve Shrivastva 2009; Poulsen 2010; Esterhuizen, Dolinar, ve Ellenberger 2011; Singh vd. 2012; C. Q. Wang vd. 2013; J. Zhang vd. 2016; Mallı vd. 2017; P. Zhang vd. 2018; Frith ve Reed 2018; R. Wang vd. 2020).

Yapılan bu çalışmada, Phase^{2D} (Phase2, 2014) sayısal modelleme programı kullanılarak farklı boyutlarda modellenen topuklarda ve topukların etrafında meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilme değerlerine göre cevherin ve yankayaçın dayanım parametreleri de dikkate alınarak iş güvenliği ve ekonomik açıdan optimum topuk boyutları belirlenmiştir.

2. Çalışma Sahası

Çalışmada kullanılan örnek numuneler İzmir ili Bayındır ilçesinde bulunan bir kurşun çinko ocağından temin edilmiştir. Halen aktif olarak işletilmekte olan bu ocakta oda-topuk yöntemi ve

makine ile üretim yapılmaktadır. Odaların yüksekliği damar kalınlığı kadardır. Oda genişlikleri ise cevher damar kalınlığının bölgelere göre farklı olmasından dolayı değişkenlik göstermektedir. İşletmede bırakılan bir topuğun görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Topukların boyutları 5,3 metre-5,8 metre arası yükseklikte, 2,6 metre-4,4 metre arası genişliktedir.



Şekil 1. Üretim alanında bırakılan topuğun görüntüsü

Çalışma sahasından alınan örneklerin görüntüsü ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışma sahasından alınan numuneler

3. Kayaç Malzemesi ve Kaya Kütle Parametrelerinin Elde Edilmesi

Sahanın modelinin oluşturulması için çalışma sahasından alınan numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneyler sonuçları Çizelge 1'de ve yapılan deneylere ait görüntüler Şekil 3'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kayaç malzemesine ait veriler (Mallı vd. 2017)

Kayaç Malzemesi	Topuk	Yankayaç
Tek Eksenli Basma Dayanımı	UCS (MPa)	80,32 35,67
Jeolojik Dayanım İndeksi	GSI	72 60
Kaya Kütle Sabiti	mi	20 20
Birim Hacim Kütle	γ (t/m ³)	3,4 2,7

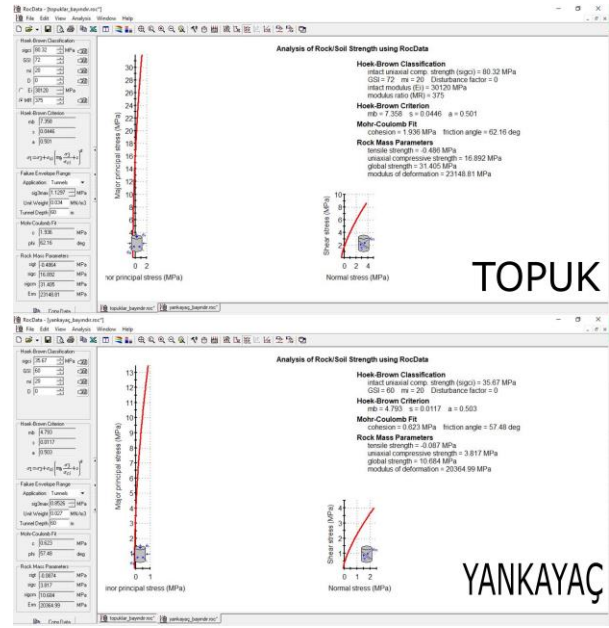


Şekil 3. Deneylemlerden görüntüler

Modelleme çalışmalarının ilk aşaması sahadan alınan kayaç örneklerinin jeomekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Modelleme çalışmalarında oluşturulan saha modeli kütle olarak temsil edildiği için kayaç malzemesine ait veriler kullanılarak kaya kütle verileri elde edilmelidir. Bu amaçla laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler RocData (RocData 2014) yazılımı kullanılarak kaya kütle verilerine dönüştürülmüştür. RocData yazılımı yardımıyla kayaç malzeme özelliklerinin kütle özelliklerine çevrilmesi Şekil 4’de verilmiştir. Modelde kullanılan kaya kütle verileri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Modelde kullanılan kaya kütle verileri

Kaya Kütle	Topuk	Yankayaç
Elastisite Modülü	E_M (MPa)	23148,810 6955,650
Çekme Dayanımı	δ_t (MPa)	0,486 0,087
Kohezyon	c (MPa)	1,936 0,623
İçsel Sürtünme Açısı	ϕ (°)	62,160 57,480
Birim Hacim Kütle	γ (t/m ³)	3,400 2,700
Poisson Oranı	ν	0,250 0,300



Şekil 4. Kaya kütle verilerinin elde edilmesi

4. Model Çalışması

Kaya kütle verilerinin elde edilmesinden sonraki aşama saha modelinin oluşturulması ve oluşturulan model üzerinde ilgili bölgelere bu verilerin girilmesidir. Bu işlemlerden sonra sahanın model üzerinde en iyi şekilde temsil edilmesi sağlanmaktadır. Modelleme çalışmaları sırasında bir diğer önemli adım arazi gerilmelerinin modele girilmesidir. Arazide bulunan hakim kayaç yapısının poisson oranı dikkate alınarak ve aşağıda verilen eşitlikler (Sheorey, 1994) yardımıyla hesaplanan bu değer saha modelinin en iyi şekilde oluşturulması ve doğru sonuçlar elde edilmesi açısından oldukça önemlidir.

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (1)$$

$$k = 0,25 + 7 \cdot E \cdot (0,001 + 1/z) \quad (2)$$

Burada σ_v : Düşey arazi gerilmesi (MPa), σ_h : Yatay arazi gerilmesi (MPa), k : Yatay arazi gerilmesinin düşey arazi gerilmesine oranı, E : Çalışılan derinliğe kadar düşey yönde bulunan kaya kütlelerinin ortalama elastisite modülü (GPa) ve z : Çalışma derinliğidir (m).

Yukarıda verilen eşitlikler yardımıyla derinlikte dikkate alınarak, arazide yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı 1,11 olarak hesaplanmış ve oluşturulan modellere girilmiştir.

Çalışmada Phase^{2D} sayısal modelleme programı kullanılarak, 60 metre derinlikte, 5 metre oda yüksekliğinde ve 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 metre

genişliklerinde toplamda 6 adet oda-topuk modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin görüntüsü Şekil 5’te verilmiştir.

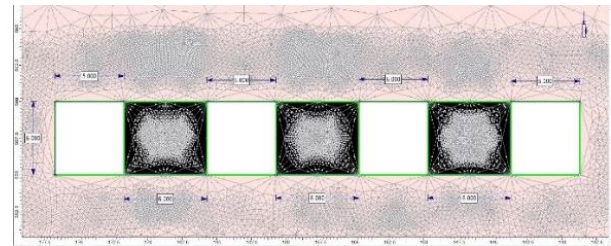


Şekil 5. Oluşturulan modellerin görüntüsü

Oluşturulan modellerde oda boyutları (5x5 metre) sabit tutulmuş bu şekilde topuk genişliklerindeki değişimin aynı oda boyut şartlarındaki gerilme dağılımına etkisinin daha doğru bir şekilde ortaya konulması amaçlanmıştır.

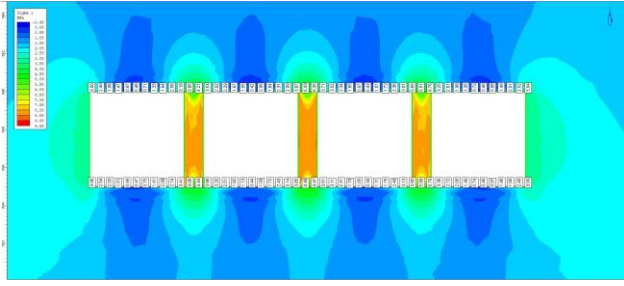
5. Elde Edilen Sonuçlar

Gerilme değerlerinin oluşturulan modellere girilmesinden sonra modeller üzerinde meşleme işlemine geçilmiştir. Meşleme işlemindeki amaç modellenen sahadaki bölgelerin küçük parçalara ayrılarak daha hassas analiz yapılmasına imkan sağlamaktır. Oluşturulan modellerin meşlenmiş görüntüsü Şekil 6’da verilmiştir.

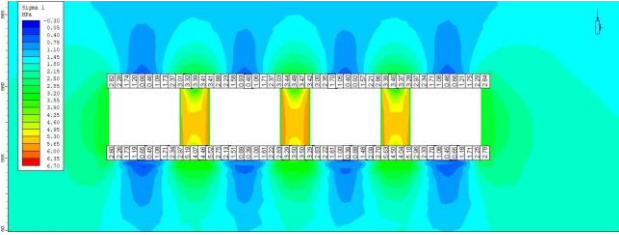


Şekil 6. Meşleme işlemi

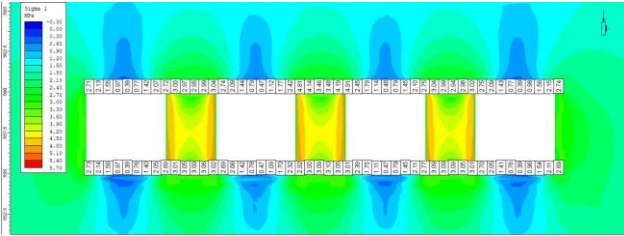
Bu işlemlerin ardından modeller çalıştırılmış, odaların ve topukların tavan-taban bölgelerinde meydana gelen düşey gerilme değerleri hesaplanmıştır. Farklı topuk genişliklerinde topuklar ve topukların çevresinde meydana gelen düşey gerilmeler sırasıyla Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir.



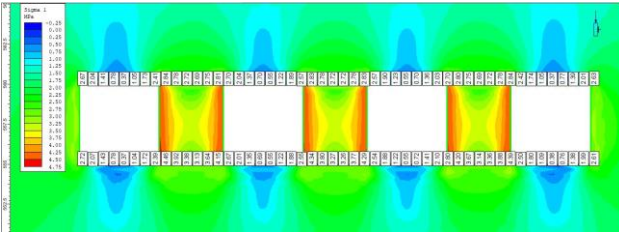
Şekil 7. 1 metre topuk genişliğinde meydana gelen düşey gerilmeler



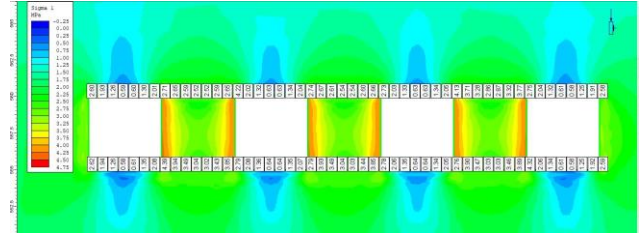
Şekil 8. 2 metre topuk genişliğinde meydana gelen düşey gerilmeler



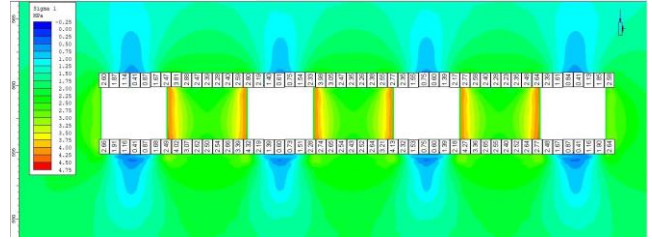
Şekil 9. 3 metre topuk genişliğinde meydana gelen düşey gerilmeler



Şekil 10. 4 metre topuk genişliğinde meydana gelen düşey gerilmeler



Şekil 11. 5 metre topuk genişliğinde meydana gelen düşey gerilmeler

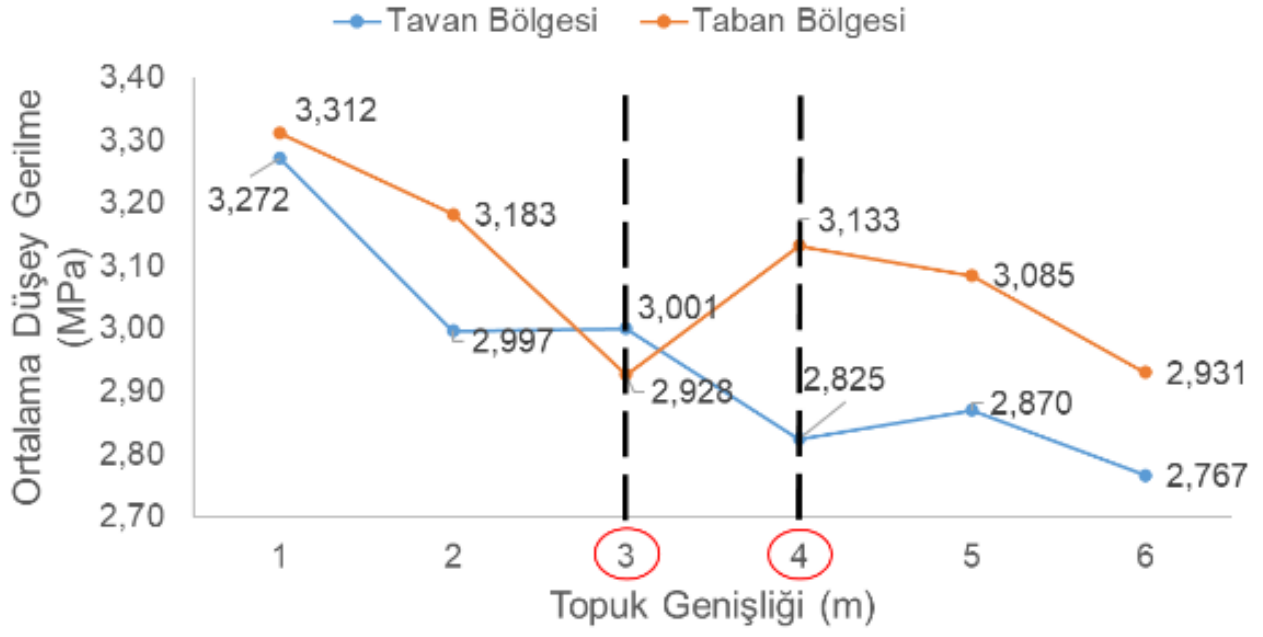


Şekil 12. 6 metre topuk genişliğinde meydana gelen düşey gerilmeler

Oluşturulan modellerde topukların ve odaların tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen düşey gerilmelerin hesaplanabilmesi için tavan ve taban bölgesinde ölçüm hattı oluşturulmuş ve her bir modelde oluşturulan bu ölçüm hatlarından toplamda 50' şer adet gerilme değeri okunmuştur. Bu sayede, 6 adet olan modellerin tavan bölgesinden 300 ve taban bölgesinden 300 olmak üzere toplamda 600 adet gerilme değeri okunmuştur.

Elde edilen düşey gerilme değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Farklı topuk genişliklerinde tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen ortalama düşey gerilme değerleri ise Çizelge 4' de verilmiştir.

Farklı topuk genişliklerinde tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen ortalama düşey gerilmelere ait grafik Şekil 13' de verilmiştir



Şekil 13. Farklı topuk genişliklerinde tavan ve taban bölgesinde meydana gelen ortalama düşey gerilmeler

Çizelge 3. Farklı topuk genişliklerinde tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen düşey gerilmeler

Mesafe		1 m topuk genişliği		Mesafe		2 m topuk genişliği		Mesafe		3 m topuk genişliği		Mesafe		4 m topuk genişliği		5 m topuk genişliği		Mesafe		6 m topuk genişliği					
		Tavan	Taban			Tavan	Taban			Tavan	Taban			Tavan	Taban	Tavan	Taban			Tavan	Taban	Tavan	Taban	Tavan	Taban
		Gerilmeler				Gerilmeler				Gerilmeler				Gerilmeler		Gerilmeler				Gerilmeler		Gerilmeler			
		MPa				MPa				MPa				MPa				MPa							
0,0	3,992	4,020	0,0	3,908	3,736	0,0	3,780	3,703	0,0	3,740	3,698	0,0	3,649	3,581	0,0	3,687	3,671								
0,5	3,631	3,670	0,5	3,522	3,405	0,6	3,389	3,353	0,7	3,328	3,324	0,7	3,235	3,218	0,8	3,229	3,254								
0,9	3,269	3,319	1,1	3,136	3,074	1,2	2,997	3,003	1,3	2,915	2,950	1,4	2,821	2,856	1,6	2,772	2,837								
1,4	2,908	2,968	1,6	2,750	2,742	1,8	2,606	2,653	2,0	2,503	2,576	2,1	2,407	2,493	2,3	2,315	2,420								
1,9	2,546	2,618	2,1	2,364	2,411	2,4	2,214	2,302	2,6	2,214	2,315	2,9	2,345	2,464	3,1	2,511	2,624								
2,3	2,185	2,267	2,7	2,183	2,264	3,0	2,362	2,449	3,3	2,520	2,600	3,6	2,637	2,769	3,9	2,896	3,007								
2,8	2,293	2,402	3,2	2,508	2,570	3,6	2,666	2,738	3,9	2,826	2,885	4,3	2,928	3,073	4,7	3,281	3,390								
3,3	2,628	2,772	3,7	2,833	2,877	4,1	2,969	3,028	4,6	3,132	3,170	5,0	3,220	3,340	5,4	3,745	3,992								
3,8	2,962	3,141	4,2	3,158	3,183	4,7	3,273	3,318	5,2	3,251	4,424	5,7	2,993	3,867	6,2	2,840	3,036								
4,2	3,297	3,511	4,8	3,483	3,490	5,3	3,291	3,351	5,9	3,012	3,850	6,4	2,767	3,395	7,0	2,408	2,569								
4,7	3,632	3,881	5,3	3,532	5,142	5,9	3,077	3,175	6,5	2,774	3,276	7,1	2,541	2,922	7,8	2,268	2,404								
5,2	3,997	4,233	5,8	3,379	3,982	6,5	2,871	3,005	7,2	2,668	3,014	7,9	2,546	2,903	8,5	2,281	2,464								
5,6	4,208	4,406	6,4	3,483	4,389	7,1	3,109	3,173	7,8	2,900	3,553	8,6	2,781	3,338	9,3	2,456	2,629								
6,1	3,861	4,147	6,9	3,702	5,493	7,7	3,346	3,340	8,5	3,132	4,092	9,3	3,017	3,772	10,1	2,866	3,368								
6,6	3,423	3,667	7,4	3,395	3,296	8,3	3,276	3,248	9,1	3,231	3,260	10,0	4,170	3,335	10,9	3,354	4,299								
7,0	2,984	3,187	8,0	2,964	2,908	8,9	2,877	2,877	9,8	2,849	2,893	10,7	2,871	2,954	11,6	3,062	3,087								
7,5	2,545	2,707	8,5	2,532	2,521	9,5	2,477	2,506	10,4	2,468	2,527	11,4	2,490	2,573	12,4	2,595	2,644								
8,0	2,107	2,226	9,0	2,101	2,133	10,1	2,077	2,136	11,1	2,087	2,160	12,1	2,109	2,193	13,2	2,128	2,202								
8,4	1,668	1,746	9,6	1,752	1,819	10,7	1,882	1,955	11,8	2,001	2,078	12,9	2,105	2,188	14,0	2,205	2,269								
8,9	2,047	2,144	10,1	2,188	2,205	11,2	2,271	2,318	12,4	2,377	2,440	13,6	2,477	2,558	14,7	2,656	2,688								
9,4	2,526	2,648	10,6	2,623	2,590	11,8	2,660	2,680	13,1	2,752	2,803	14,3	2,849	2,929	15,5	3,107	3,107								
9,9	3,006	3,153	11,1	3,058	2,975	12,4	3,049	3,043	13,7	3,127	3,165	15,0	3,222	3,299	16,3	3,960	3,233								
10,3	3,485	3,657	11,7	3,493	3,360	13,0	4,790	3,389	14,4	3,171	4,314	15,7	3,002	3,869	17,1	3,037	2,854								
10,8	3,964	4,162	12,2	3,693	3,582	13,6	4,091	3,253	15,0	2,957	3,748	16,4	2,782	3,405	17,8	2,444	2,573								
11,3	6,332	4,540	12,7	3,516	3,545	14,2	3,392	3,118	15,7	2,743	3,181	17,1	2,562	2,941	18,6	2,281	2,418								
11,7	6,247	4,520	13,3	3,499	3,531	14,8	3,412	3,122	16,3	2,743	3,167	17,9	2,562	2,927	19,4	2,254	2,451								
12,2	4,009	4,124	13,8	3,640	3,543	15,4	4,152	3,267	17,0	2,957	3,707	18,6	2,782	3,362	20,2	2,419	2,605								
12,7	3,521	3,629	14,3	3,435	3,318	16,0	4,892	3,413	17,6	3,172	4,247	19,3	3,003	3,798	20,9	2,760	3,196								
13,1	3,032	3,133	14,9	3,014	2,944	16,6	3,085	3,062	18,3	3,128	3,169	20,0	3,223	3,305	21,7	3,237	4,123								
13,6	2,544	2,637	15,4	2,593	2,571	17,2	2,686	2,694	18,9	2,752	2,804	20,7	2,850	2,934	22,5	3,124	3,181								
14,1	2,056	2,142	15,9	2,171	2,198	17,8	2,288	2,326	19,6	2,376	2,440	21,4	2,478	2,562	23,3	2,668	2,737								
14,6	1,670	1,751	16,4	1,750	1,824	18,3	1,889	1,958	20,2	2,000	2,076	22,1	2,105	2,190	24,0	2,212	2,292								
15,0	2,122	2,222	17,0	2,094	2,131	18,9	2,082	2,153	20,9	2,086	2,168	22,9	2,113	2,194	24,8	2,126	2,211								
15,5	2,574	2,692	17,5	2,520	2,511	19,5	2,482	2,544	21,6	2,467	2,552	23,6	2,502	2,572	25,6	2,579	2,658								
16,0	3,026	3,163	18,0	2,946	2,890	20,1	2,882	2,936	22,2	2,848	2,935	24,3	2,891	2,951	26,4	3,031	3,105								
16,4	3,478	3,634	18,6	3,371	3,269	20,7	3,282	3,328	22,9	3,230	3,319	25,0	4,075	3,329	27,1	3,314	4,260								
16,9	3,930	4,104	19,1	3,675	5,619	21,3	3,351	3,412	23,5	3,132	4,150	25,7	3,631	3,840	27,9	2,846	3,347								
17,4	5,413	5,571	19,6	3,467	4,435	21,9	3,111	3,211	24,2	2,900	3,588	26,4	3,188	3,379	28,7	2,451	2,624								
17,8	6,635	6,677	20,2	3,363	3,952	22,5	2,871	3,009	24,8	2,669	3,026	27,1	2,744	2,917	29,5	2,279	2,474								
18,3	3,722	3,851	20,7	3,498	5,047	23,1	3,091	3,177	25,5	2,776	3,256	27,9	2,753	2,909	30,2	2,211	2,379								
18,8	3,368	3,489	21,2	3,442	3,473	23,7	3,319	3,352	26,1	3,015	3,796	28,6	3,214	3,355	31,0	2,372	2,543								
19,2	3,015	3,128	21,8	3,126	3,172	24,3	3,305	3,319	26,8	3,255	4,337	29,3	3,675	3,800	31,8	2,647	2,817								
19,7	2,661	2,766	22,3	2,811	2,871	24,9	2,992	3,030	27,4	3,136	3,247	30,0	3,265	4,245	32,6	3,109	3,268								
20,2	2,307	2,404	22,8	2,496	2,570	25,4	2,680	2,741	28,1	2,829	2,940	30,7	2,960	3,025	33,3	3,204	3,352								
20,7	2,192	2,272	23,3	2,181	2,269	26,0	2,368	2,452	28,7	2,523	2,632	31,4	2,655	2,738	34,1	2,846	2,982								
21,1	2,567	2,615	23,9	2,355	2,414	26,6	2,214	2,301	29,4	2,217	2,325	32,1	2,350	2,450	34,9	2,488	2,611								
21,6	2,942	2,957	24,4	2,727	2,739	27,2	2,611	2,628	30,0	2,492	2,571	32,9	2,395	2,494	35,7	2,306	2,421								
22,1	3,318	3,299	24,9	3,099	3,064	27,8	3,008	2,954	30,7	2,889	2,932	33,6	2,792	2,871	36,4	2,735	2,853								
22,5	3,693	3,641	25,5	3,471	3,390	28,4	3,405	3,281	31,3	3,285	3,293	34,3	3,189	3,247	37,2	3,163	3,285								
23,0	4,069	3,983	26,0	3,843	3,715	29,0	3,801	3,607	32,0	3,682	3,654	35,0	3,585	3,624	38,0	3,592	3,718								
Ortalama	3,272	3,312	Ortalama	2,997	3,183	Ortalama	3,001	2,928	Ortalama	2,825	3,133	Ortalama	2,870	3,085	Ortalama	2,767	2,931								

Çizelge 4. Farklı topuk genişliklerinde tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen ortalama düşey gerilme değerleri

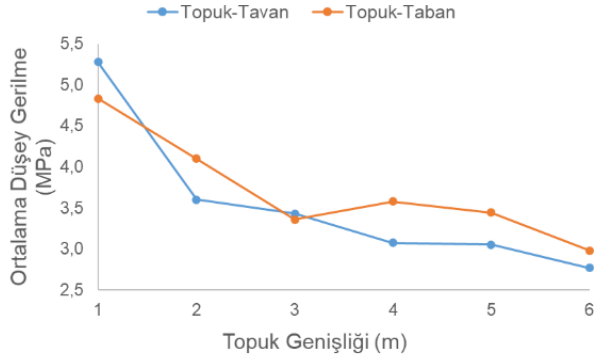
Topuk Genişliği	Tavan	Taban
	Gerilmeler (MPa)	
1	3,272	3,312
2	2,997	3,183
3	3,001	2,928
4	2,825	3,133
5	2,870	3,085
6	2,767	2,931

Farklı topuk genişliklerinde oda ve topukların tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen ortalama düşey gerilme değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

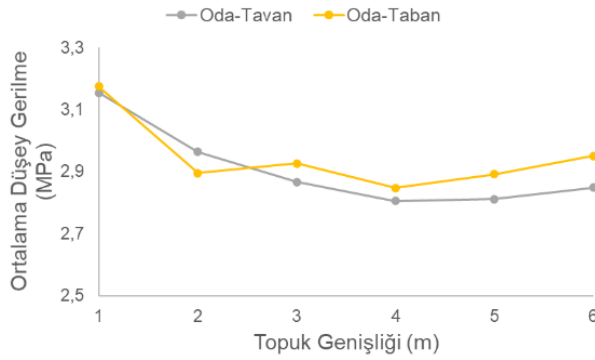
Çizelge 5. Farklı topuk genişliklerinde oda ve topukların tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen ortalama düşey gerilme değerleri

Topuk Genişliği	Topuk		Oda	
	Tavan	Taban	Tavan	Taban
	Gerilmeler (MPa)		Gerilmeler (MPa)	
1	5,276	4,834	3,154	3,175
2	3,601	4,102	2,964	2,895
3	3,429	3,357	2,866	2,927
4	3,076	3,577	2,805	2,848
5	3,054	3,446	2,812	2,892
6	2,768	2,982	2,849	2,950

Farklı topuk genişliklerinde topukların tavanında ve tabanında meydana gelen ortalama düşey gerilmelerin grafiksel gösterimi Şekil 14’de, odaların tavanında ve tabanında meydana gelen ortalama düşey gerilmelerin grafiksel gösterimi Şekil 15’de verilmiştir.



Şekil 14. Farklı topuk genişliklerinde topukların tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen ortalama düşey gerilmeler



Şekil 15. Farklı topuk genişliklerinde odaların tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen ortalama düşey gerilmeler

6. Sonuçların Değerlendirilmesi

1, 2 ve 3 metre topuk genişliklerinde tavan bölgesinde meydana gelen düşey gerilme değerlerine bakıldığında en yüksek gerilmenin 6,63 MPa ile 1 metre topuk genişliğinde, topuklar üzerindeki en düşük düşey gerilmelerin 3 metre topuk genişliklerinde meydana geldiği görülmektedir. Odalar üzerinde meydana gelen düşey gerilmelerin değişen topuk boyutlarına rağmen birbirlerine çok yakın olduğu ve gerilmelerin dengeli bir şekilde değişmesi yönünden en stabil durumun 2 metre topuk genişliğinde sağlandığı görülmektedir.

4, 5 ve 6 metre topuk genişliklerinde tavan bölgesinde meydana gelen düşey gerilme değerlerine bakıldığında en yüksek gerilmenin 4,17 MPa ile 5 metre topuk genişliğinde meydana geldiği görülmektedir. Odalar üzerinde meydana gelen düşey gerilmelerin farklı topuk genişliklerinde de birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Çizelge 5’ de verilen sonuçlara göre, topukların hemen üstünde meydana gelen ortalama düşey gerilmeler 6 metre topuk genişliğinde 2,77 MPa, 5 metre topuk genişliğinde 3,05 MPa, 4 metre topuk genişliğinde 3,08 MPa, 3 metre topuk genişliğinde 3,43 MPa, 2 metre topuk genişliğinde 3,60 MPa ve 1 metre topuk genişliğinde ise 5,28 MPa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında topuklar üzerindeki en düşük gerilmelerin 6 metre topuk genişliğinde sağlandığı, odalar üzerinde meydana gelen en düşük ortalama düşey gerilmelerin 2,80 MPa olarak 4 metre topuk genişliğinde meydana geldiği görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde odalar ve topuklar üzerinde meydana gelen en düşük gerilme dağılımlarının, topuk genişliklerinin 6 metre olduğu durumda meydana geldiği görülmektedir.

Taban bölgesinde meydana gelen düşey gerilmelerin en yüksek 6,68 MPa ile 1 metre topuk genişliği durumunda olduğu ve gerilmelerin stabil bir şekilde seyretmesi açısından en iyi durumun ise 3 metre topuk genişliğinde olduğu görülmektedir. Çizelge 5’ de verilen sonuçlara ve Şekil 15’de verilen grafiğe göre topukların hemen taban bölgesinde meydana gelen en düşük ortalama düşey gerilmelerin 2,98 MPa ile 6 metre topuk genişliğinde, odaların taban bölgesinde meydana gelen en düşük ortalama düşey gerilmelerin ise 2,85 MPa ile 4 metre topuk genişliğinde olduğu görülmektedir. 6 metre topuk genişliğinde ise bu değer 2,95 MPa olarak hesaplanmıştır.

Topukların ve odaların tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen gerilmeler ayrı ayrı değerlendirildiğinde, en düşük gerilmelerin 5 metre oda genişliği ve 6 metre topuk genişliği durumunda meydana geldiği görülmektedir. Ancak çalışma sahası genel olarak değerlendirildiğinde, Çizelge 4 ve Şekil 13’de verilen ve farklı topuk genişliklerinde tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen

ortalama düşey gerilmelere bakıldığında en düşük gerilmelerin 3 metre ve 4 metre topuk genişliği aralığında olacağı hesaplanmıştır. Bu topuk genişliklerinin çalışma sahası için optimum seviyeler olacağı öngörülmektedir.

7. Sonuç

Oda-topuk üretim yöntemi yeraltı metal madenciliğinde yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemin uygulanmaya başlanmasından günümüzde kadar geçen süreçte oda ve topuk boyutlarının ne olması gerektiği her zaman bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle topukların cevherden oluşması durumunda en uygun topuk boyutları önemli hale gelmiştir. Cevherden oluşan topukların boyutlarının minimuma indirilmesi ancak aynı zamanda da tavanın etkili bir şekilde desteklenmesi öne çıkan tercih haline gelmiştir.

Bu amaçlara paralel olarak yapılan çalışmada sahadan alınan kayaçların jeomekanik özellikleri dikkate alınarak 6 adet oda-topuk modeli oluşturulmuştur. Bu modellerin çalıştırılmasıyla tavan-taban bölgelerinde meydana gelen düşey gerilmeler hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda tavan ve taban bölgelerinde meydana gelen en düşük ortalama düşey gerilmelerin 3 metre ve 4 metre topuk genişliklerinde meydana geldiği görülmüştür. İş güvenliği açısından da değerlendirildiğinde üretimin kesintisiz bir şekilde devam edebilmesi ve tavanın en iyi şekilde tahkim edilmesi açısından bırakılacak olan topukların genişliklerinin 3 metre ve 4 metre aralığında olması gerektiği belirlenmiştir.

8. Kaynaklar

- Brady, B. H. G., and Brown, E. T., 2006. Rock Mechanics for underground mining: Third edition. Rock Mechanics for underground mining: Third edition.
- Esterhuizen, G. S., Dolinar, D. R., and Ellenberger, J. L., 2011. Pillar strength in underground stone mines in the United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48**(1), 42–50.
- Frith, R., and Reed, G., 2018. Coal pillar design when considered a reinforcement problem rather than a

suspension problem. *International Journal of Mining Science and Technology*, **28**(1), 11–19.

- Iannacchione, A. T., and Mark, C., 2009. Major hazard risk assessment applied to pillar recovery operations. Proceedings - 28th International Conference on Ground Control in Mining, ICGCM.
- Jaiswal, A., and Shrivastva, B. K., 2009. Numerical simulation of coal pillar strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**(4), 779–788.
- Mallı, T., Yetkin, M. E., Özfırat, M. K., and Kahraman, B., 2017. Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine. *Journal of African Earth Sciences*, **134**, 365–372.
- Nazarov, L. A., Nazarova, L. A., Freidin, A. M., and Alimseitova, Z. K., 2006. Estimating the long-term pillar safety for room-and-pillar ore mining. *Journal of Mining Science*, **42**, 530–539.
- Phase2 8, 2014. Version 8.020, Rocscience Inc, Toronto, Ontario, Canada.
- Poulsen, B. A., 2010. Coal pillar load calculation by pressure arch theory and near field extraction ratio. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **47**(7), 1158–1165.
- RocData, 2014. Rock, Soil and Discontinuity Strength Analysis, Version 5.0.
- Sheorey PR, 1994. A theory for In Situ stresses in isotropic and transverse isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **3**(1), 23–34.
- Simsir, F., 2015. Underground mining methods. DEU Publications, Izmir.
- Singh, R., Singh, S. K., Kushwaha, A., and Sinha, A., 2012. Stability of the parting between coal pillar workings in level contiguous seams during depillaring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **55**, 1–14.
- Tesarik, D. R., Seymour, J. B., and Yanske, T. R. 2009. Long-term stability of a backfilled room-and-pillar test section at the Buick Mine, Missouri, USA. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**(7), 1182–1196.
- Tuncay, E., 2009. Rock rupture phenomenon and pillar failure in tuffs in the Cappadocia region (Turkey).

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **46**(8), 1253–1266.

Wang, C. Q., Gao, L. Q., Chen, S. J., Wang, H. L., and Liu, J. B., 2013. Field research on long-term bearing capacity of strip pillar. *Journal of Mining and Safety Engineering*, **30**(6), 799–804.

Wang, R., biao Bai, J., Yan, S., guo Chang, Z., and yu Wang, X., 2020. An innovative approach to theoretical analysis of partitioned width & stability of strip pillar in strip mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **129**.

Zhang, J., Jiang, F., Zhu, S., and Zhang, L., 2016. Width design for gobs and isolated coal pillars based on overall burst-instability prevention in coal mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**(4), 551–558.

Zhang, P., Tulu, B., Sears, M., and Trackemas, J., 2018. Geotechnical considerations for concurrent pillar recovery in close-distance multiple seams. *International Journal of Mining Science and Technology*, **28**(1), 21–27.