AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 065801 (1459-1468)

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 065801 (1459-1468) DOI: 10.35414/ akufemubid.1148884

Araştırma Makalesi / Research Article

Metalik Madenlerde Topuk Boyutlarındaki Değişimin Gerilme Dağılımına Etkisi

Mustafa Emre YETKIN¹

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

Anahtar kelimeler Topuk boyutu; Sayısal

analiz; Gerilme dağılımı; Metalik maden

Öz

Yeraltı metal madenciliğinde cevher kazanımı sırasında tavanın etkili bir şeklide desteklenmesi ve güvenliğin 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

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

Abstract

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 occured surround of pillars.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Oda topuk yöntemlerinde oda ve topukların planlanması ve kontrolü çok önemlidir. Topuk boyutları bulundukları bölgelerde meydana gelen gerilmelerin değişiminde önemli rol oynar. Topukların boyutları belirlenirken kaya kütlesinin 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 odaların parametreleri olan 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 madenciliğinde 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 venilmelerine 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 yankayacın 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; Malli 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 yankayacın 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.

Kayaç Malzemesi	Topuk	Yank	ayaç
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/m³)	3,4	2,7

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



Şekil 3. Deneylerden 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 l	kaya kütle	verileri
--------------------	--------------	------------	----------

Kaya Kütlesi		Topuk	Yankayaç
Elastisite Modülü	Е _м (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/m³)	3,400	2,700
Poisson Oranı	v	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.

$$\sigma h = k.\sigma v \tag{1}$$

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 hesaplamıştır. 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

	<u></u>	E a sel de la la serve d	(1) an also is the little is a start.			at a sel a sera a sur al a sa a	and a second distance of	
ſ	170100 4	E ARKII TODI	ik genisiikierini	ιο ταναή νο τ	anan nolgeler	inde mevdana	σειεή απιςεν	geriimeier
•		• I UI KII LOPL				muc mcyuumu	SCICII GUSCY	SCHINCICI

Image Image <t< th=""><th>J0-</th><th>1 m topul</th><th>k genisliği</th><th></th><th>2 m topu</th><th>k genisliği</th><th></th><th>3 m topu</th><th colspan="2">topuk genisliži 4 m to</th><th colspan="2">4 m topuk genisliği</th><th>5 m topu</th><th colspan="2">topuk genisliği</th><th colspan="2">6 m topuk genisliği</th></t<>	J0-	1 m topul	k genisliği		2 m topu	k genisliği		3 m topu	topuk genisliži 4 m to		4 m topuk genisliği		5 m topu	topuk genisliği		6 m topuk genisliği		
Metale Gentimeter Metale Gentimeter		Tavan	Taban	-	Tavan	Taban	-	Tavan	Taban		Tavan	Taban		Tavan	Taban	-	Tavan	Taban
Imp imp <th>Mesafe</th> <th>Geril</th> <th>meler</th> <th> Mesafe </th> <th>Geril</th> <th>meler</th> <th>- Mesafe</th> <th>Geril</th> <th>meler</th> <th> Mesafe </th> <th colspan="2">Gerilmeler Me</th> <th colspan="2">Mesafe Gerilmeler</th> <th> Mesafe </th> <th>Geril</th> <th colspan="2">Gerilmeler</th>	Mesafe	Geril	meler	 Mesafe 	Geril	meler	- Mesafe	Geril	meler	 Mesafe 	Gerilmeler Me		Mesafe Gerilmeler		 Mesafe 	Geril	Gerilmeler	
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	()	M	Pa	-	M	Pa		M	IPa	-	M	IPa	-	MPa		MPa		Pa
0.0 3.6 3.10 2.00 3.6 2.60 3.60 3.10 3.	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
0.0 3.269 3.290 2.491 2.495 2.495 2.495 1.4 2.881 2.68 1.6 2.772 2.837 1.4 2.968 2.68 2.77 2.18 2.66 2.63 2.35 2.14 2.875 2.14 2.875 2.14 2.875 2.14 2.875 2.47 2.477 2.43 2.435 2.485 2.470 2.47 2.37 2.88 2.470 3.62 2.68 3.70 5.0 2.285 2.470 3.62 2.887 4.64 3.12 2.881 3.39 2.862 3.444 5.7 2.981 3.89 2.42 3.70 3.51 4.84 3.489 5.7 3.51 3.48 3.83 5.7 3.51 3.51 3.48 3.49 5.7 3.62 3.504 4.70 3.507 3.62 3.504 3.60 4.7 3.50 2.288 2.281 2.284 2.284 2.284 2.284 2.284 2.284 2.284 2.284	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
14 2968 268 1.6 2.700 2.701 2.407 2.401 2.31 2.401 13 2.458 2.618 2.11 2.42 2.315 2.420 3.31 2.511 2.420 3.31 2.511 2.420 3.45 2.661 3.45 2.561 2.570 2.620 3.45 2.685 3.45 2.685 3.45 2.680 3.40 5.40 3.45 3.301 3.51 5.23 3.51 4.285 3.51 5.23 3.51 5.51 3.777 3.41 4.42 5.40 3.501 5.51 3.777 3.40 5.51 5.77 7.44 7.43 7.43 2.404 5.51 5.77 7.44 2.404 5.42 3.51 5.51 7.77 3.401 3.51 5.51 7.71 3.401 5.51 7.71 3.401 5.51 7.71 3.401 5.51 7.71 3.401 5.51 7.71 3.401 5.51 7.71 3.401 5.51	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
1.9 2.46 2.11 2.30 2.66 2.14 2.31 2.45 2.46 3.0 2.50 3.0 3.0 3.0 3.00 3.0 3.00 3.0 3.00 3.0 3.00 3.0 3.00 <td>1.4</td> <td>2,908</td> <td>2,968</td> <td>1.6</td> <td>2.750</td> <td>2.742</td> <td>1.8</td> <td>2,606</td> <td>2.653</td> <td>2.0</td> <td>2.503</td> <td>2.576</td> <td>2.1</td> <td>2.407</td> <td>2,493</td> <td>2.3</td> <td>2.315</td> <td>2.420</td>	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
2.3 2.18 2.47 2.18 2.264 3.0 2.469 3.3 2.500 2.600 3.6 2.678 3.79 3.80 3.3 2.668 2.472 3.7 2.88 2.87 4.11 2.966 4.78 3.281 4.70 3.81 3.30 3.8 2.672 3.11 4.42 3.18 4.71 3.511 5.9 3.10 4.40 5.7 3.201 4.306 5.2 3.211 4.48 3.48 3.400 5.3 3.211 5.5 2.741 5.22 2.404 5.27 3.251 5.5 2.741 3.355 2.98 3.677 7.8 2.806 3.121 4.062 2.971 3.365 2.98 3.677 3.16 3.98 2.461 3.307 3.77 3.46 3.30 3.51 3.99 3.211 4.070 3.071 3.77 3.46 3.30 3.51 4.06 3.017 3.77 3.46 3.300 3.121 4.050 3.01	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
2.283 2.402 3.2 2.508 2.570 3.6 2.666 2.788 3.9 2.802 4.33 2.928 4.07 3.78 4.33 2.928 3.073 4.47 3.78 3.38 5.23 3.10 5.0 3.024 3.00 5.4 3.48 3.99 3.8 2.662 3.114 4.42 3.323 5.12 3.57 3.105 5.9 3.012 3.860 6.4 2.992 7.8 2.268 4.2 3.977 4.11 3.09 3.175 6.5 2.771 3.266 3.024 2.993 3.101 3.177 3.103 3.553 8.66 3.101 3.177 3.104 3.101 3.277 3.101 3.277 3.101 3.277 3.103 3.34 4.289 1.01 3.101 3.277 3.103 3.284 3.200 1.00 3.217 3.101 3.277 3.101 3.277 3.101 3.277 3.101 3.277 3.101 3.277 3.10	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
3.3 2.638 2.772 3.7 2.83 2.877 4.11 2.969 8.028 4.64 5.7 3.220 3.200 5.4 3.200 5.0 3.200 5.20 3.201 4.305 5.20 3.201 4.204 5.7 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.201 5.20 3.202 7.80 2.468 2.468 2.466 2.468 2.466 2.420 2.488 2.466 2.420 2.568 2.266 2.274 3.213 3.200 3.53 3.206 8.3 3.276 3.218 3.201 3.211 3.200 3.233 1.001 4.268 1.001 4.269 1.01 2.661 2.661 3.461 3.320 3.3276 3.224 2.601 1.21 2.602 2.101 2.11 2.603 2.610 2.114	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
3.8 2.902 3.141 4.2 3.183 3.183 4.7 3.273 3.318 5.2 3.211 4.84 6.7 2.933 3.67 6.2 2.840 3.036 4.7 3.632 3.811 4.8 3.481 5.3 3.211 3.151 6.5 2.774 3.276 7.1 2.541 2.922 7.8 2.268 2.404 5.6 4.206 4.405 6.4 3.484 7.1 3.117 6.5 2.771 3.246 2.404 5.6 4.206 4.406 4.388 7.1 3.103 3.102 3.200 3.533 6.6 2.711 3.383 3.02 3.835 3.60 3.61 3.61 3.61 3.62 3.61 3.62 3.61 3.62 3.61 3.62 3.61 3.62 3.61 3.62 3.62 3.61 3.62 3.62 3.61 3.61	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	4,340	5.4	3.745	3,992
4.2 3.277 5.11 4.48 3.493 3.99 5.3 3.291 5.9 3.012 3.80 6.4 2.77 3.995 7.0 2.408 2.569 5.2 3.997 4.23 5.8 3.79 3.982 6.5 2.811 3.005 7.2 2.668 3.014 7.9 2.566 2.903 8.5 2.812 2.464 5.6 4.208 4.405 6.4 3.484 4.89 3.173 7.82 2.900 3.507 3.172 1.01 3.325 4.928 4.929 3.007 3.177 1.01 3.354 4.929 4.93 1.00 3.354 4.929 1.03 3.344 4.93 1.00 1.44 2.955 1.14 2.408 1.01 2.109 2.101 2.124 2.205 1.24 2.952 1.44 2.952 1.44 2.952 1.42 2.952 1.44 2.952 1.44 2.952 1.46 2.477 2.494 1.83 3.100	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
n n	4.2	3 297	3 511	4.8	3 483	3 490	53	3 291	3 351	5.9	3 012	3,850	6.4	2 767	3,395	7.0	2 408	2 569
5.2 3.97 4.33 5.6 3.97 3.982 6.5 2.871 3.005 7.2 2.668 3.011 7.9 2.564 2.903 6.5 2.281 4.46 5.6 4.208 4.406 6.4 3.483 4.489 7.1 3.109 3.173 7.8 2.900 3.53 6.6 2.781 3.338 9.3 2.666 2.628 6.6 3.423 3.667 7.4 3.995 3.296 8.3 3.767 3.484 3.440 8.5 1.00 4.170 3.335 1.0,9 3.344 4.290 7.0 2.944 3.167 7.4 3.952 2.522 2.521 9.5 2.477 2.66 2.492 2.893 1.0,0 2.193 1.2,2 2.128 2.205 2.202 2.201 2.188 1.40 2.055 2.469 2.803 1.43 2.402 2.939 1.55 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107 3.107	47	3,632	3,881	53	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
5.6 4.08 4.08 4.08 4.38 7.1 3.109 3.172 7.8 2.00 3.53 6.6 2.781 3.38 9.3 2.456 2.228 6.1 3.861 4.447 6.9 3.702 5.433 7.7 3.46 3.448 9.1 3.211 3.66 2.971 2.971 1.1 2.66 3.66 6.6 3.423 3.677 2.877 2.877 2.872 3.81 1.42 2.951 1.14 2.692 2.953 1.24 2.552 2.572 2.544 7.0 2.545 2.707 2.181 1.01 2.075 1.14 2.468 2.573 1.24 2.575 2.544 2.001 2.076 2.144 2.010 2.076 1.24 2.377 2.440 1.36 2.477 2.588 1.40 2.269 1.53 1.50 3.224 1.53 3.073 3.073 3.073 3.073 3.073 3.074 3.65 1.74 3.073	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	85	2 281	2 464
1 1	5.6	4 208	4 406	64	3 483	4 389	7.1	3 109	3 173	7.8	2 900	3 553	86	2 781	3 338	93	2 456	2 629
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	6.1	3,861	4 147	69	3 702	5 493	77	3 346	3 340	85	3 132	4 092	93	3 017	3 772	10 1	2,866	3 368
0.7 0.7 0.2 0.8 <td>6.6</td> <td>3 473</td> <td>3 667</td> <td>74</td> <td>3 395</td> <td>3 296</td> <td>83</td> <td>3 276</td> <td>3 248</td> <td>9.1</td> <td>3 231</td> <td>3 260</td> <td>10.0</td> <td>4 170</td> <td>3 335</td> <td>10.9</td> <td>3 354</td> <td>4 299</td>	6.6	3 473	3 667	74	3 395	3 296	83	3 276	3 248	9.1	3 231	3 260	10.0	4 170	3 335	10.9	3 354	4 299
7.5 2.545 2.707 8.5 2.807 2.506 1.04 2.488 2.527 11.4 2.490 2.573 12.4 2.595 2.424 8.0 2.107 2.226 9.0 2.101 2.133 10.1 2.007 2.136 11.4 2.080 12.4 2.195 11.4 2.105 11.8 1.0.1 2.007 2.108 12.8 1.2.0 2.227 2.318 11.2 2.271 2.318 12.4 2.377 2.400 13.6 2.477 2.588 14.4 2.471 2.318 12.4 2.471 2.318 12.4 2.471 2.316 15.6 3.022 3.299 15.5 3.107 3.007 3.869 3.441 3.17 3.127 3.161 15.0 3.222 3.003 3.860 3.360 3.304 3.323 3.155 2.575 3.748 16.4 2.782 3.060 3.283 15.4 3.253 15.5 2.575 3.717 1.6 1.73 3.622 2.941 1.84 2.744 2.811 1.71 2.522 2.941 1.84	7.0	2 984	3 187	80	2 964	2 908	89	2 877	2 877	9.8	2 849	2 893	10,0	2 871	2 954	11.6	3 062	3 087
h b< b<< b<< b< b<< b< b<< b<< b<<	7.5	2,504	2 707	85	2,501	2,500	9.5	2,077	2,506	10.4	2,015	2,000	11 4	2,071	2,554	12.4	2 595	2 644
6.8 1,668 1,748 9,60 1,752 1,812 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 1,07 1,882 2,000 1,412 2,403 1,43 2,493 1,43 2,493 1,44 3,117 3,185 1,50 3,253 3,000 3,037 2,854 1,44 3,117 4,134 1,57 3,000 3,864 1,61 1,71 3,037 2,854 10,8 3,664 4,162 1,22 3,693 3,554 1,42 3,122 3,107 1,79 2,562 2,941 1,86 2,284 2,441 2,573 3,771 1,81 3,162 1,71 3,503 3,562 1,42 2,441 1,81 3,128 3,161 1,71 2,562 2,927 <t< td=""><td>80</td><td>2,343</td><td>2,707</td><td>9.0</td><td>2,002</td><td>2,321</td><td>10.1</td><td>2,077</td><td>2,300</td><td>11 1</td><td>2,100</td><td>2,527</td><td>12.1</td><td>2,450</td><td>2,373</td><td>13.2</td><td>2,333</td><td>2,011</td></t<>	80	2,343	2,707	9.0	2,002	2,321	10.1	2,077	2,300	11 1	2,100	2,527	12.1	2,450	2,373	13.2	2,333	2,011
6.9 2.047 2.148 0.205 1.0 2.007 2.104 2.375 2.400 1.0 2.258 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 2.558 1.4,7 3.259 1.5,3 3.960 3.233 10.3 3.485 3.657 11,7 3.493 3.60 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 3.64 4.162 1.2,7 3.516 3.545 1.4,2 3.267 1.7,0 2.957 3.748 1.64 2.782 3.462 2.222 2.419 2.665 11.7 6.447 1.93 3.033 3.493 3.54 4.152 3.267 1.70 2.957 3.748 1.61 2.782 3.62 2.22 2.419 2.665 12.7 3.521 3.629 1.53	8.4	1 668	1 746	9.6	1 752	1 819	10,1	1 882	1 955	11.8	2,007	2,100	12.9	2,105	2,133	14.0	2,120	2,269
0.5 2.576 2.674 2.673 2.673 2.674 <th2.67< th=""> <th2.67< th=""> <th2.67< <="" td=""><td>89</td><td>2 047</td><td>2 144</td><td>10.1</td><td>2 188</td><td>2 205</td><td>11.2</td><td>2 271</td><td>2 318</td><td>12.4</td><td>2,001</td><td>2,070</td><td>13.6</td><td>2,103</td><td>2,100</td><td>14,0</td><td>2,205</td><td>2,205</td></th2.67<></th2.67<></th2.67<>	89	2 047	2 144	10.1	2 188	2 205	11.2	2 271	2 318	12.4	2,001	2,070	13.6	2,103	2,100	14,0	2,205	2,205
b, 9 3,060 3,153 1,10 3,068 2,907 1,24 3,007 1,24 3,007 1,24 3,007 1,24 3,007 1,24 3,007 2,254 3,299 1,16 3,037 2,285 10,3 3,465 3,667 11,7 3,403 3,360 13,0 4,790 3,389 14,4 15,7 3,127 4,314 15,7 3,002 3,869 17,1 3,037 2,854 11,3 6,332 4,540 12,7 3,516 3,545 14,2 3,922 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 3,511 14,8 3,412 3,122 16,3 3,167 17,9 2,62 2,927 19,4 2,561 2,412 2,605 1,73 3,107 1,70 2,562 3,362 2,412 2,605 1,71 2,927 1,70 2,562 2,362 2,02 2,412 2,605 1,71 1,72 2,668 2,707 <t< td=""><td>9.4</td><td>2,576</td><td>2,144</td><td>10.6</td><td>2,100</td><td>2,200</td><td>11.8</td><td>2,660</td><td>2,510</td><td>13 1</td><td>2,577</td><td>2,903</td><td>14 3</td><td>2,477</td><td>2,000</td><td>15 5</td><td>3 107</td><td>3 107</td></t<>	9.4	2,576	2,144	10.6	2,100	2,200	11.8	2,660	2,510	13 1	2,577	2,903	14 3	2,477	2,000	15 5	3 107	3 107
b) b)< </td> <td>3,006</td> <td>3 153</td> <td>11 1</td> <td>3 058</td> <td>2,000</td> <td>12.4</td> <td>3 049</td> <td>3 043</td> <td>13,1</td> <td>3 127</td> <td>3 165</td> <td>15.0</td> <td>3 222</td> <td>3 299</td> <td>16.3</td> <td>3,960</td> <td>3,233</td>	99	3,006	3 153	11 1	3 058	2,000	12.4	3 049	3 043	13,1	3 127	3 165	15.0	3 222	3 299	16.3	3,960	3,233
10,8 3,964 4,162 11,7 5,963 3,862 13,6 4,061 3,253 15,0 2,974 13,1 5,005 17,8 2,047 17,1 2,045 17,1 2,045 17,1 2,044 2,253 11,3 6,332 4,540 12,2 3,516 3,545 14,2 3,392 3,118 15,7 2,743 3,161 17,1 2,562 2,921 18,6 2,214 2,444 2,573 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 2,760 3,123 13,1 3,023 3,133 16,0 4,892 3,413 17,6 3,172 4,247 19,3 3,003 3,798 20,9 2,760 3,195 13,1 3,023 3,133 16,0 3,083 3,062 18,3 3,128 3,169 2,032 2,303 2,170 2,466 2,477 1,50 1,50 2,171 2,122 2,52 3,124 <	10.3	3 485	3 657	11 7	3,000	3 360	13.0	4 790	3,045	14.4	3 171	4 314	15,0	3,002	3,255	17 1	3,037	2 854
11,3 6,332 4,102 1,12 5,051 1,05 4,051 1,05 2,743 3,161 17,1 2,762 2,941 18,6 2,241 2,418 11,7 6,247 4,520 13,3 3,499 3,511 14,8 3,122 1,63 2,743 3,161 17,1 2,562 2,927 19,4 2,254 2,419 12,7 3,521 3,629 14,3 3,445 3,181 16,6 3,052 3,131 17,6 3,172 4,247 19,3 3,003 3,798 20,9 2,760 3,196 13,1 3,022 3,133 14,9 3,014 2,944 16,6 3,085 3,662 18,3 3,128 3,169 20,0 3,223 3,305 21,7 3,237 4,123 13,4 2,056 2,144 15,9 2,171 2,198 17,8 2,286 2,362 2,364 2,14 2,14 2,192 2,313 3,14 3,113 3,16 1,14 2,165 2,117 2,194 4,16 2,147 2,552 2,514 <t< td=""><td>10,5</td><td>3,964</td><td>4 162</td><td>12.2</td><td>3,403</td><td>3,500</td><td>13,0</td><td>4 091</td><td>3,303</td><td>15.0</td><td>2 957</td><td>3 7/8</td><td>16.4</td><td>2 782</td><td>3,005</td><td>17.8</td><td>2 111</td><td>2,004</td></t<>	10,5	3,964	4 162	12.2	3,403	3,500	13,0	4 091	3,303	15.0	2 957	3 7/8	16.4	2 782	3,005	17.8	2 111	2,004
11,7 0,322 7,940 1,1,7 0,321 7,940 3,120 1,1,7 1,1,7 1,2,62 2,941 1,20 2,942 2,451 12,2 4,009 4,124 13,8 3,640 3,543 15,4 4,152 3,677 17,0 2,957 3,077 18,6 2,782 3,362 20,2 2,419 2,656 12,7 3,521 3,629 14,3 3,435 3,131 16,0 4,892 3,413 17,6 3,172 4,247 19,3 3,003 3,798 2,09 2,760 3,181 13,1 3,022 3,133 14,9 3,014 2,944 16,6 3,062 18,3 3,128 3,169 2,07 2,850 2,934 2,25 3,124 3,181 13,1 3,052 2,171 1,750 1,84 18,3 1,889 1,958 2,020 2,000 2,076 2,11 2,105 2,462 2,414 2,478 2,521 2,56 2,579 2,568 2,572 2,56 2,579 2,568 2,525 2,524 2,525	11 3	6 332	4,102	12,2	3,516	3 5/15	14.2	3 302	3,233	15,0	2,557	3 1 2 1	17 1	2,702	2 9/1	18.6	2,777	2,575
12,2 4,09 4,124 13,8 3,640 3,543 15,4 4,152 10,5 2,975 3,077 18,6 2,962 2,922 2,102 2,102 2,102 2,102 2,112 2,022 2,112 2,022 2,112 2,022 2,112 2,021 2,112 3,003 3,788 20,92 2,760 3,105 13,1 3,032 3,133 14,9 3,014 2,944 16,6 3,082 3,128 3,169 2,00 3,233 3,305 2,1,7 3,237 4,123 13,6 2,544 2,667 15,4 2,697 15,4 2,687 17,5 2,686 2,941 18,9 2,752 2,404 2,10 2,190 2,40 2,21 3,128 3,169 3,128 3,169 3,128 3,169 2,052 2,332 2,332 2,68 2,77 1,4 1,4 2,478 2,52 2,404 2,14 2,48 2,126 2,211 1,55 2,574 2,692 1,75 2,502 2,511 19,5 2,482 2,544 2,16 2,467	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	2,041	19.4	2,201	2,410
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	12.2	4 009	4 124	13.8	3 640	3 543	15.4	4 152	3 267	17.0	2,745	3 707	18.6	2,302	3 362	20.2	2,234	2,401
13,1 3,023 3,13 14,9 3,043 3,143 16,06 3,052 3,163 12,07 2,850 2,934 22,5 3,124 3,113 13,6 2,544 2,637 15,4 2,593 2,571 17,2 2,686 2,694 18,9 2,752 2,804 20,0 2,223 3,305 21,7 3,128 2,777 14,6 1,670 1,751 16,4 1,750 1,824 18,8 1,889 1,958 20,02 2,076 2,21 2,105 2,190 24,0 2,212 2,222 15,0 2,122 1,20 2,094 2,081 2,153 2,09 2,066 2,168 2,92 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 2,936 2,24 2,43 2,891 2,951 26,6 3,579 2,668 3,031 3,105 1,64 3,073 3,11 3,101 3,111 2,12 2,244 2,313 3,819 2,551 2,676	12,2	3 521	3 629	14 3	3,040	3,343	16.0	4,152	3,207	17,0	2,557	1 247	10,0	3,003	3,302	20,2	2,415	2,005
13,63,6426,74315,952,5442,65315,453,6455,1652,1711,751,8241,8891,9562,022,0002,0762,112,1502,1922,4002,1222,2022,0002,6722,5622,5722,5622,5722,5622,5722,5622,5752,5622,5711,963,3111,952,4822,5442,162,4672,5522,362,5022,5712,1942,4842,1262,0512,66816,03,0263,16318,062,9462,8902,012,8822,9362,222,8482,9352,432,8912,9512,643,0313,10516,43,4783,63418,663,3713,2692,073,2823,2353,1324,1502,573,6138,402,792,8463,34716,43,4783,6533,1041,3133,2133,2113,2113,2112,222,9003,5882,643,188 </td <td>13.1</td> <td>3 032</td> <td>3 133</td> <td>14,5</td> <td>3 014</td> <td>2 944</td> <td>16.6</td> <td>3 085</td> <td>3,062</td> <td>18 3</td> <td>3 178</td> <td>3 169</td> <td>20.0</td> <td>3 223</td> <td>3 305</td> <td>20,5</td> <td>3 237</td> <td>4 123</td>	13.1	3 032	3 133	14,5	3 014	2 944	16.6	3 085	3,062	18 3	3 178	3 169	20.0	3 223	3 305	20,5	3 237	4 123
14,1 2,056 2,14 15,2 2,17 17,8 2,282 2,326 19,6 2,152 2,164 2,057 2,162 2,263 2,664 2,153 2,164	13,1	2 544	2 637	15.4	2 593	2,571	17.2	2,686	2 694	18.9	2 752	2 804	20,0	2 850	2 934	22,7	3 124	3 181
14,6 1,670 1,751 16,4 1,751 1,64 1,750 1,833 1,889 1,958 2,000 2,170 2,170 2,190 3,190 2,190 3,110 3,110 3,110 3,111 3,211 24,2 2,900 3,588 26,4 3,188 3,379 28,7 2,451 2,624 17,4 5,413 5,571 19,6 3,467 4,435 21,9 3,111 3,111	14 1	2,056	2,037	15.9	2,333	2,371	17.8	2,000	2,004	19,5	2,752	2,004	20,7	2,000	2,554	22,5	2 668	2 727
1,00 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,00 1,00 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,00 1,101 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,000 1,0	14,1	1,670	1 751	16.4	1 750	1 824	18.3	1 889	1 958	20.2	2,000	2,440	22,4	2,470	2,502	23,5	2,000	2,757
15,0 2,122 2,124 2,151 2,153 2,153 2,153 2,150 2,151 2,60 2,150 2,151 2,60 2,151 2,60 2,511 3,150 3,151 3,120 2,50 4,315 2,811 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 2,57 3,631 3,840 27,9 2,846 3,347 17,8 6,635 6,677 20,2	15.0	2 122	2 222	17.0	2 094	2 121	18.0	2 082	2 153	20,2	2,000	2,070	22,1	2,103	2,150	24,0	2,212	2,252
1.5. 2.5.4 1.5.4 2.5.5 2.5.4 3.05 3.	15.5	2 574	2 692	17.5	2,004	2,101	19.5	2,002	2,133	21.6	2,000	2,100	23.6	2,113	2,134	25.6	2,120	2,658
16,0 5,000 6,100	16.0	3 026	3 163	18.0	2,946	2,911	20.1	2,402	2,936	22,0	2,407	2,002	24 3	2,302	2,972	25,0	3 031	3 105
16,9 3,930 4,104 19,1 3,657 5,607 21,3 3,351 3,412 22,5 3,132 4,105 5,031 3,284 27,1 5,044 3,267 16,9 3,930 4,104 19,1 3,657 5,619 21,3 3,351 3,412 22,5 3,132 4,150 25,7 3,631 3,840 27,9 2,846 3,267 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 18,8 3,368 3,489 21,2 3,442 3,473 23,7 3,319 3,552 26,1 3,015 3,276 2,803 3,675 3,800 31,8 2,647 2,817 19,2 2,661 2,766 22,3 <	16.4	3 478	3 634	18.6	3 371	3 269	20,1	3 282	3 328	22,2	3 230	3 319	25.0	4 075	3 329	20,4	3 314	4 260
10,0 3,00 4,00 1,00 2,00 3,000 2,00 3,000 2,00 3,000 2,00 3,000 2,00 3,000 2,00 3,000 2,00 3,000 2,00 3,000	16.9	3,930	4 104	19.1	3 675	5,619	21 3	3 351	3 412	22,5	3 132	4 150	25,0	3 631	3,840	27,1	2 846	3 347
17,4 5,457 5,457 5,457 5,457 5,457 5,457 2,42 2,505 3,505 2,04 5,573 2,07 2,454 2,454 17,8 6,635 6,677 20,2 3,363 3,952 22,5 2,871 3,009 24,8 2,665 3,026 27,1 2,744 2,917 29,55 2,279 2,424 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 19,7 2,661 2,766 22,3 2,811 2,871 24,99 2,992 3,030 27,4 3,136 3,247 30,0 3,265 4,245 32,6 3,109 3,268 20,7 2,404 2,28 2,490 2,771 2,812	17 4	5 413	5 571	19.6	3,075	4 435	21,5	3,331	3 211	24.2	2 900	3 588	25,7	3 188	3,040	22,5	2,040	2 624
17,0 0,003 0,07 20,2 3,053 3,052 22,0 3,003 3,003 24,0 3,004 27,1 2,74 2,75 2,909 30,2 2,211 2,372 2,53 18,8 3,368 3,489 21,2 3,442 3,473 23,7 3,319 3,552 2,61 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 3,655 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 2,077 2,920	17.8	6 635	6 677	20.2	3 363	3 952	22,5	2 871	3,009	24,2	2,500	3,000	20,4	2 744	2 917	20,7	2,431	2,024
16,5 3,742 3,647 26,7 3,647 21,7 3,747 22,57 2,747 3,746 2,757 2,755 2,757 3,756 3,705 3,705 3,705 3,705 3,705 3,	18 3	3 722	3 851	20,2	3 /08	5,047	22,5	3 001	3,005	25,5	2,005	3,020	27,1	2,744	2,010	20,0	2,275	2,474
16,8 3,968 3,969 24,2 3,473 25,7 3,515 2,61 3,750 26,0 3,744 5,530 31,0 2,572 2,917 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 3,264 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 2,727 2,33 2,181 2,269 2,60 2,682 2,871 2,523 2,632 31,4 2,655 2,738 34,1 2,846 2,982 21,1 2,567 2,617 2,392 2,611 2,626 30,0 <t< td=""><td>10,5</td><td>3,722</td><td>2,001</td><td>20,7</td><td>2,450</td><td>2 472</td><td>23,1</td><td>2 210</td><td>3,1/7</td><td>25,5</td><td>2,770</td><td>3,230</td><td>27,5</td><td>2,733</td><td>2,505</td><td>21.0</td><td>2,211</td><td>2,373</td></t<>	10,5	3,722	2,001	20,7	2,450	2 472	23,1	2 210	3,1/7	25,5	2,770	3,230	27,5	2,733	2,505	21.0	2,211	2,373
19,7 2,661 2,766 22,3 2,811 2,871 24,9 2,992 3,030 27,4 3,243 4,937 24,93 3,000 3,265 4,245 32,66 3,247 19,7 2,661 2,766 22,3 2,811 2,871 24,9 2,992 3,030 27,4 3,163 3,247 30,0 3,265 4,245 32,66 3,109 3,265 20,2 2,307 2,404 22,8 2,496 2,570 25,4 2,680 2,741 28,1 2,829 2,900 30,7 2,960 3,265 4,245 33,3 3,246 3,352 20,7 2,192 2,272 23,3 2,181 2,699 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 2,66 2,214 2,301 29,4 2,217 2,325 32,1 2,350 2,494 35,7 2,306 2,421 21,6 2,942	10,0	2,015	3,405	21,2	2 126	3,473	23,7	3,315	2 210	20,1	3,013	1 227	20,0	3,214	3,333	31,0	2,372	2,343
15,7 2,001 2,700 22,5 2,011 2,071 2,97 2,92 5,050 27,4 5,150 5,260 5,605 4,243 52,0 5,105 5,205 20,2 2,307 2,404 22,8 2,496 2,570 25,4 2,680 2,741 28,1 2,829 2,900 30,7 2,960 3,025 33,3 3,204 3,208 2,922 20,7 2,192 2,772 23,3 2,181 2,269 26,0 2,214 2,301 29,4 2,172 2,325 32,1 2,350 2,440 3,924 2,921 21,1 2,567 2,615 23,9 2,355 2,414 26,6 2,214 2,301 29,4 2,17 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 35,77 2,306 2,421 22,1 3,18 3,299 24,9 <td< td=""><td>19,2</td><td>3,015</td><td>3,120</td><td>21,0</td><td>3,120</td><td>3,172</td><td>24,5</td><td>3,305</td><td>3,319</td><td>20,0</td><td>3,235</td><td>4,337</td><td>29,5</td><td>3,075</td><td>3,000</td><td>31,0</td><td>2,047</td><td>2,017</td></td<>	19,2	3,015	3,120	21,0	3,120	3,172	24,5	3,305	3,319	20,0	3,235	4,337	29,5	3,075	3,000	31,0	2,047	2,017
20,2 2,902 2,902 2,902 2,902 2,900 30,7 2,900 30,6 2,735 2,440 2,707 2,739 2,72 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 3,064 2,78 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	19,7	2,001	2,700	22,3	2,011	2,8/1	24,9	2,392	3,030	27,4	3,130	3,247	30,0	3,203	4,245	32,0	3,109	3,208
zo,r z,sse	20,2	2,507	2,404	22,0	2,450	2,570	25,4	2,000	2,741	20,1	2,029	2,540	21 /	2,900	3,025	33,5	3,204	3,352
21,1 2,907 2,903 2,957 2,44 2,730 2,714 2,901 2,91 2,91 2,92 3,21 2,490 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 3,080 2,954 30,7 2,889 2,932 33,6 2,792 2,871 36,44 2,735 2,853 22,1 3,693 3,641 25,5 3,471 3,390 2,84 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 3,554 35,05 3,585 3,624 38,0 3,592 3,718 23,0 4,069 3,983 26,0 3,843 <t< td=""><td>20,7</td><td>2,192</td><td>2,212</td><td>23,3</td><td>2,181</td><td>2,209</td><td>20,0</td><td>2,308</td><td>2,452</td><td>28,7</td><td>2,523</td><td>2,032</td><td>31,4</td><td>2,000</td><td>2,/38</td><td>34,1</td><td>2,640</td><td>2,982</td></t<>	20,7	2,192	2,212	23,3	2,181	2,209	20,0	2,308	2,452	28,7	2,523	2,032	31,4	2,000	2,/38	34,1	2,640	2,982
21,0 2,74 2,75 24,4 2,75 27,2 2,011 2,020 30,0 2,492 2,571 32,5 2,952 2,493 35,7 2,305 2,421 22,1 3,318 3,299 24,9 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 3,555 3,525 3,624 38,0 3,592 3,718 Ortalama 3,272 3,133 Ortalama 3,011 2,980 014 2,825 3,133 Ortalama 2,827 3,505 3,624 38,0 3,592 3,718	21,1	2,507	2,013	25,9	2,555	2,414	20,0	2,214	2,501	29,4	2,21/	2,525	32,1	2,550	2,450	34,9 2F 7	2,400	2,011
22,1 3,257 24,75 3,009 3,009 27,0 3,000 2,394 30,7 2,009 2,352 35,0 2,792 2,871 35,4 2,755 3,643 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 3,652 3,505 3,564 38,0 3,592 3,718 Ortalama 3,272 3,133 Ortalama 3,001 2,098 Ortalama 2,825 3,133 0,142 3,126 3,1	21,0	2,942	2,957	24,4	2,727	2,759	27,2	2,011	2,028	20.7	2,492	2,5/1	32,9	2,393	2,494	35,7	2,500	2,421
zz,s s,ors s,ors z,ors s,ors z,ors s,ors z,ors s,ors z,ds s,ds s,ds <thd>s,ds s,ds</thd>	22,1	3,318	3,299	24,9	3,099	3,064	27,8	3,008	2,954	30,7	2,889	2,932	33,0	2,792	2,8/1	30,4	2,/35	2,600
とう、 いっいつ うっつう どり、 うらやう うっしう どういう とういう ういし ういい うたい うよし うんち ういち うちち うし ううちち うちと うちと うちと うちと うちと うちと うちと うちと うち	22,5	3,093	3,041	25,5	3,4/1	3,390	20,4	3,405	3,201	27,5	3,203	3,293	34,3	3,109	3,24/	37,2	3,103	3,203
Antipational and a state and a stat	Ortalama	4,009	3,983	Ortalanta	3,843	3,/13	Ortalama	3,001	3,007	Ortalama	3,082	3,034	Ortalam-	3,383	3,024	Ortalarra	3,392	2,021

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

Topuk Conicliži	Tavan	Taban
Topuk Gemişilgi	Gerilmel	er (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

	Тој	ouk	Oda		
Topuk	Tavan	Taban	Tavan	Taban	
Genişliği	Geril	meler	Geril	meler	
	(M	Pa)	(№	1Pa)	
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 gerilmelerinde 2,80 MPa olarak 4 metre topuk genişliğinde meydana görülmektedir. Genel olarak geldiği değerlendirildiğinde odalar ve topuklar üzerinde meydana gelen en düşük gerilme dağılımlarının, topuk genişliklerinin 6 metre olduğu durumda meydana geldiği görülmektedir.

Taban bölgesinde meydana gelen düsev gerilmelerin en yüksek 6,68 MPa ile 1 metre topuk genişliği durumunda oluştuğu ve gerilmelerin stabil bir sekilde seyretmesi açısından en iyi durumun ise 3 metre topuk genişliğinde oluştuğu 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 oluştuğu 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. İs güvenliği acısından 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 transverseley 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. Longterm 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.