

# *Zonguldak - Kozlu Bölgesi Kömürlerinin Radyal Geçirgenlik ve Gaz Emisyon Özellikleri*

Radial Permeability and Gas Emission Properties of Kozlu District Coals,  
Zonguldak Coalfield

İ. Göktay EDİZ\*  
Şevket DURUCAN\*\*

## ÖZET

Bu araştırma başlıca Zonguldak havzası — Kozlu bölgesinden alınan kömür numunelerinin radyal geçirgenliklerinin belirlenmesi ile ilgilidir. Kömür numunelerinin radyal geçirgenlikleri; akış ölçümleri ve basınç yükselme testlerinin laboratuvar koşullarında modellenmesiyle belirlenmiştir. Geçirgenlik ölçmelerinde akış tabakalanma düzlemlerine dik olarak, radyal yönde oluşturulmuştur. Bu, karotların tabakalanma düzlemlerine paralel olarak alınmasıyla elde edilmiştir. Denenen kömür numuneleri için, gaz basıncı - geçirgenlik ilişkileri de incelenmiştir. Bu çalışmalarda metan basıncı 4 MN/m<sup>2</sup>'ye kadar artırılmış ve deneylerden elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Bunun yanı sıra, sözü edilen kömür damarlarının emisyon özellikleri deneysel ve Airey'nin Emisyon Teorisi kullanılarak teorik olarak incelenmiş, ikisi arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Kömürlerin radyal geçirgenliğine gerilme ve yenilmenin etkileri, gaz basıncı-geçmişinin etkileri ile birlikte araştırılmıştır.

## ABSTRACT

This research was primarily concerned with determining the radial permeabilities of coal samples taken from Kozlu district, Zonguldak coalfield. Radial permeabilities of these coal samples were determined both by flow measurements and simulating the pressure build-up tests in laboratory conditions. During the permeability measurements, flow was created in radial direction, perpendicular the bedding planes. This was achieved by preparing the cores parallel to the bedding planes. Gas pressure-permeability relationships for the coals tested were also studied. In these measurements, methane pressures were increased up to 4 MN/m<sup>2</sup> and the results obtained from these tests were discussed. Together with these, the emission properties of the mentioned coal seams were investigated both experimentally and theoretically using Airey's Emission Theory and comparisons between these two were made. The effect of stress and failure on the radial permeability of coal together with the effect of gas pressure-history were also considered.

(\*) Maden Y. Müh., Araştırma Görevlisi, A.Ü. MMF Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

(\*\*) Dr. Maden Y. Müh., O.D.T.O. Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara.

(Yeni adresi: Department of Mining Engineering, University of Nottingham, UK)

## 1. GİRİŞ

Kömür madenlerinde metan gazının varlığı yeraltı madencilik tarihi boyunca patlama, yangın ve boğulma gibi birçok tehlikeli olaylara neden olmuştur. Hernekadar gazlı kömür madenleri için, çalışma yöntemleri ve ekipmanlar geliştirilmiş, standart ve nizamnameler hazırlanmış ve düzenli kontroller yapılageliyor olsa da, aşırı metan emisyonunun neden olduğu kazalar hâlâ olmaktadır. Günümüz kömür madenciliğinde, yüksek ilerleme hızına ve üretim kapasitesine sahip makinaların kullanılması ve madencilik faaliyetlerinin daha derinlere kayması metan emisyonu üe jlgHi sorunların artmasına neden olmuştur(1).

Metan gazı, kömürleşme olayı olarak adlandırılan uzun süreli bir proses sonucunda kömür maddesiyle birlikte oluşmuştur (2). Bu prosesin ilk aşamalarında oluşan gazın büyük kısmı kaçmıştır. Kalan gaz ise bir denge basıncında, kömürün mikro yapısında adsorbe edilmiştir. Fakat madencilik faaliyetleri sonucu tabakaların kırılmasıyla denge bozulur ve metan gazı çalışma sahasına doğru hareket eder (1).

Herhangi bir damar gazının serbest kalışı ve onu takiben ocak havasına doğru geçişi, kömür damarlarının ve civar kayaların geçirgenliklerine bağlı olmaktadır (3). Araştırmalar çalışılan bir uzunayak alınının çevresinde metan emisyonunun başlıca üç kaynaktan geliştiğini göstermiştir (4):

- (i) çalışılan damar,
- (ii) ayak arkası, göçük,
- (iii) çalışılan damarın alt ve üstündeki kaynak damarlardan.

Günümüz kömür madenciliğinde metan emisyonu ile ilgili sorunların çözümünde metan drenajı yöntemi gittikçe önem kazanmaktadır. Metan drenajı yönteminin uygulanmasıyla, gazlı kömür madenlerinde yüksek ilerleme hızıyla fazla üretim, güvenli olarak elde edilebilmektedir (5).

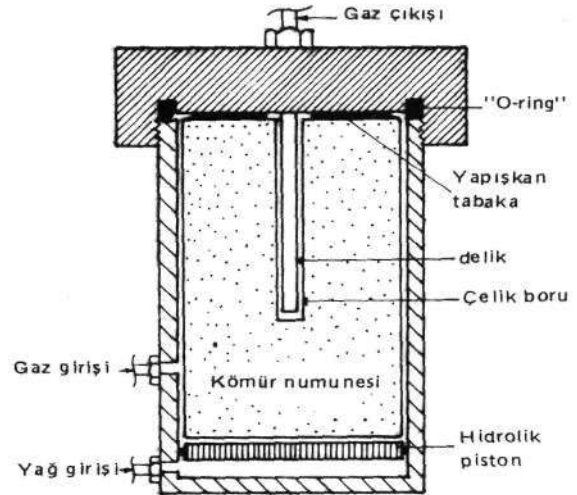
Metan drenajı tasarımında ve yeraltı havalandırma koşullarının düzenlenmesi çalışmalarında kömür damarlarının ve çevre kayaların geçirgenlik ve emisyon özeliMerinin anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle, makaleye konu olan bu araştırmada, Zonguldak havzası — Kozlu bölgesi

Çay, Acılık ve Kılıç damarlarından alınan karotların radyal geçirgenlik ve emisyon özellikleri ile bunları etkileyen faktörlerin belirlenmesine çalışılmıştır. Zonguldak havzasında aşırı metan emisyonu ile ilgili sorunların çözümü için, havzadaki kömür damarlarının bu çeşit özelliklerinin yerinde araştırılması gerekmektedir.

## 2. DEME Y YÖNTEMLERİ

Bu araştırmada seçilen kömür damarlarından alınan karot numunelerinin, drenaj deliklerine doğru olan akışın radyal biçimde olması ve aynı kömürlerin eksensel (axial) geçirgenliklerinin önceden belirlenmiş olması (6) dolayısıyla radyal geçirgenlikleri belirlenmiştir. Radyal geçirgenlikler hem akış ölçümleri (flow measurements) hem de basınç yükselme testlerinin (pressure build-up tests) laboratuvarında modellenmesiyle belirlenmiştir. Kömür numunelerinin gaz basıncı-geçirgenlik ilişkileri ve emisyon özellikleri araştırılıp, deneysel ve teorik emisyon oranları bulunmuştur. Bunun yantsıra, numunelerin radyal geçirgenliğine eksensel (axial) gerilme ve gaz basıncı-gçmişinin etkileri saptanmaya çalışılmıştır.

Bütün bu sayılan deneyleri gerçekleştirebilmek amacıyla bir geçirgenlik belirleme kabı (permeametre) tasarlanmış ve yapılmıştır (Şekil 1). Kömür numuneleri bu permeametre içine konarak deneyler birbiri arkasından yürütülmüştür.



Şekil 1— Permeametre'nin şematik görünümü.

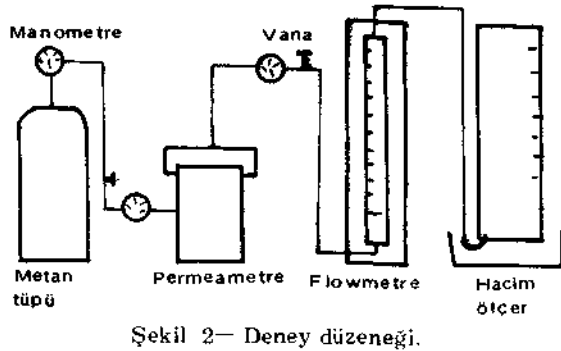
## 2.1. Numunelerin Hazırlanması

Kolaylıkla kırılabilme özelliğinden ötürü kömürden karot almak oldukça zordur. Bu zorluğu yenmek için gözle görülür kırık ve çatlağı olmayan kömür parçaları 30 cm'lik küb boyutlarında kesilip, çevresi çimentolanmıştır. Karot almada daha iyi sonuç verdiği için, karotlar kömürlerin tabakalanma düzlemlerine paralel alınmıştır.

Karot alma işlemleri bittikten sonra kömür numuneleri  $L/D = 2$  olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Daha sonra kömür damarı içine delinmiş bir drenaj deliğini temsil eden 6 mm çapında bir delik, radyal akış koşullarını tam gerçekleştirmek için, numune uzunluğunun  $2/3$ 'üne kadar eksen boyunca delinmiştir (5).

## 2.2. Deney Düzenegi

Araştırmada kullanılan deney düzenegi Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi deney düzenegi bir metan tüpü, permeametre, flowmetre, hacim ölçer ve eksensel (axial) yüklem için bir hidrolik pompadan oluşmaktadır.



### 2.2.1. Permeametre

Araştırmada kullanılan permeametre'nin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Permeametre dört kısımdan oluşmaktadır; giriş kısmı, kapak sistemi, çıkış ve hidrolik piston bağlantı kısımları.

Giriş kısmına metan tüpü bağlanır ve giriş basıncını kontrol etmek ve ölçmek amacıyla bir vana ve manometre bağlanır. Kapak kısmında, kaçakları önlemek amacıyla 'O-ring' kullanılmıştır. Çıkış kısmında, yine çıkış basıncını ölçmek için bir manometre ile flowmetre ve hacim ölçer'e

bağlantı bulunmaktadır. Hidrolik kısım ise, çevresi yağ haznesinden numune bölümüne yağ kaçağını önlemek için "O-ring" ile sarılı bir piston ve pompa bağlantısından oluşur.

### 2.2.2. Flowmetre

Araştırmada metan debisini belirlemek için A-10 tipi (GAPlaton Şirketinden sağlanan) flowmetre kullanılmıştır. Bu flowmetre hava'ya göre kalibre edilmiş olduğundan, gerçek metan debisini bulabilmek için, ölçülen değer 1,8 olan düzeltme faktörüyle çarpılmıştır. Bu düzeltme faktörü metan ve havanın yoğunluklarının oranı alınarak belirlenmiştir.

## 3. LABORATUVAR OENEYLERİNİN YÜRÜTÜLÜŞÜ

### 3.1. Radyal Geçirgenlik Oeneyleeri

#### 3.1.1. Akış Ölçümleri Yöntemiyle Radyal Geçirgenlik Belirlenmesi

Deneylerde ölçmelere başlamadan önce permeametre'den gaz kaçağının olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu kontrol, kömür numunesini permeametre içine koyup, metana doyurulduktan sonra ya su tankı içine sokularak ya da sabun köpüğü kullanılarak yapılır. Bundan sonra metan tüpünden sağlanan gaz belirli basınç değerlerinde kömürden geçirilip, bunlara karşılık gelen metan debileri flowmetre yardımıyla saptılır.

Belirli metan basınçlarında gözlenen metan debileri yardımıyla kömür numunelerinin radyal geçirgenlikleri aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır (7).

$$k = \frac{O \mu T z \ln(r_2/r_1)}{16 \times 10^{-3} (P_2^2 - P_1^2) L} \quad (1)$$

Bu bağıntıda;

- O : Hacimsel akış debisi,  $m^3/s$
- k : Kömür geçirgenliği,  $m^2$
- M : Metanın viskozitesi,  $Ns/m^2$
- T : Oda sıcaklığı (kömür), °R
- L : Kömür numunesinin uzunluğu, m
- $r_1$  : Delik yarıçapı, m
- $r_2$  : Kömür numunesinin yarıçapı, m
- f\ : Atmosferik basınç,  $N/m^2$
- $P_2$  : Gaz basıncı,  $N/m^2$
- Z : Metanın sıkışabilirliği (1 alınmıştır).

### 3.1.2. Basınç Yükselme Testlerinin Modellenmesiyle Radyal Geçirgenliğin Belirlenmesi

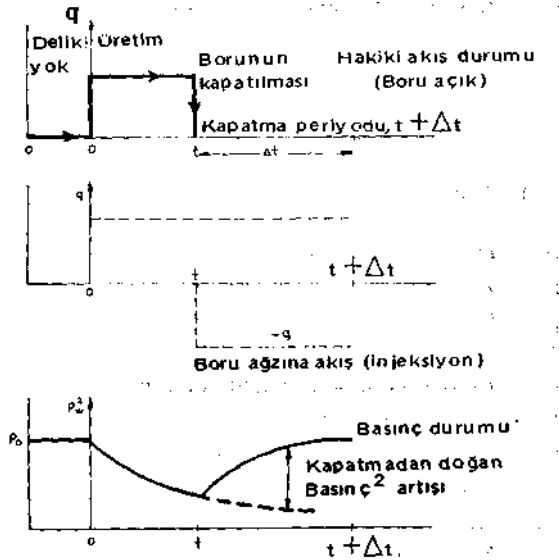
Basınç yükselme testleri petrol mühendisliğinde birçok amaçlar için kullanılmaktadır. Bunlar (8);

- 1) Kuyu çevresindeki statik basıncın belirlenmesinde,
- 2) Formasyon geçirgenliğinin belirlenmesinde,
- 3) Fay sınırlarının saptanmasında,
- 4) Formasyon gözenekliliğinin belirlenmesinde kullanılır.

Bu yöntem, madencilikte kömür damarlarının yerinde gaz geçirgenliklerinin belirlenmesinde de kullanılmıştır (9).

#### 3.1.2.1. Basınç Yükselme Testlerinin Yerinde Uygulanışı

Bir basınç yükselme testinde geçirgenliği belirlenecek formasyona kadar delik delinir ve sondaj borusunun gerekli sıkılması yapılır. Daha sonra borudan belirli bir  $t$  süresince sabit bir  $Q$  debisi ile üretim yapılır ve kapatılır. Kapatma sonra delikteki basıncın artışı (delik ağzına doğru çevreden olan gaz enjeksiyonu nedeniyle) zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Zamana bağlı olarak belirlenen bu basınç artışları formasyonun geçirgenliğinin hesaplanmasına olanak verir. Bu işlem Şekil 3'de şematik olarak verilmiştir (10).



Şekil 3— Basınç yükseltme testlerinde zaman-basınç-debi ilişkileri.

Kapatma süresince zamanın bir fonksiyonu olarak artan basınç şu şekilde tanımlanır (8) (9):

$$P_w^2 = P_o - 71,44 \frac{\mu z T Q}{k L} \log \left( \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

Bu bağıntıda ;

	Kapatmadan sonraki gaz basıncı, $N/m^2$
$P_o$ :	Kapatmadan önceki formasyon basıncı, $N/m^2$
$\Delta t$	Kapatma periyodu, dakika
$t$	Kuyunun kapatılmadan önceki toplam açık tutulma süresi, dakika
$z$	Gazın sıkışabilirliği, 1 alınacak
	Gazın vizkozitesi, $Ns/m^2$
$T$	Formasyon sıcaklığı, °R
$Q$	Kapatmadan önceki sabit gaz debisi, $m^3/s$
$L$	Formasyon kalınlığı, m
$k$	Formasyon geçirgenliği, $m^2$

Eğer Eşitlik 2'de  $P_w$  değerleri  $\log$  (————) değerlerine karşı çizilirse, elde edilen doğrunun kesimi  $P_o$  olur. Bu doğrunun eğimi ise ;

$$M = - 71,44 \frac{\beta z T Q}{k L} \quad (3)$$

buradan;

$$k = - 71,44 \frac{M L}{\beta z T Q} \quad (4)$$

olarak, formasyon geçirgenliği  $k$ , bulunur.

#### 3.1.2.2. Basınç Yükselme Testlerinin Laboratuvarında Modellenmesi

Yukarıda yerinde uygulanış yöntemi anlatılan testler, laboratuvar koşulları altında modellenerek yürütülmüştür. Hernekadar, numune boyutlarının küçük olması dolayısıyla test koşulları tam anlamıyla gerçekleştirilememiş olsa da, (5) her iki yöntemle bulunan geçirgenlik sonuçları birbirine uyum göstermiştir.

Önce, kömür numuneleri belirli bir denge basıncına kadar metan gazına doyurulmuştur. Denge basıncına erişildikten sonra, çıkış kısmındaki vana açılarak kısa bir süre gaz çıkışı sağlanır (5-10 saniye) ve kapatılır. Açık kalma süresindeki orta-

lama metan debisi bir hacimölçer yardımıyla saptanır. Kapatma süresince delikteki gaz basıncının artışı ise delikle irtibatlı çıkış manometresi yardımıyla zamana bağlı olarak belirlenir. Böylelikle, kömür numunelerinin radyal geçirgenlik değerleri kapatma süresince zamanın bir fonksiyonu olarak saptanan basınç artışları yardımıyla Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

### 3.2. Kömürlerin Metan Emisyon Özelliklerinin Araştırılması

Kömür numunelerinin geçirgenlik ölçmeleri tamamlandıktan sonra, emisyon özelliklerinin araştırılması deneyleri yürütülmüştür. Araştırmada kömür numunelerinin emisyon özellikleri hem deneysel hemde teorik olarak çalışılmıştır. Bunun için kömür numuneleri önce yeniden belirli bir denge basıncına getirilmiştir. Daha sonra çıkış vanası açılarak, gazın çıkışı zamana bağlı olarak, bir hacimölçer yardımıyla belirlenir. Böylelikle, gözlenen değerler yardımıyla her bir kömür numunesi için, zaman-emisyon eğrileri çizilmiştir.

#### 3.2.1. Parça Kömürden Gaz Emisyonuna Teorik Yaklaşım

Kömür numunelerinden ve damarından gaz akışının teorik olarak hesaplanması için birçok matematiksel formül geliştirilmiştir (11) (1).

Airey parça kömürden metan emisyonunu deneysel ve teorik olarak incelemiş ve aşağıda verilen eşitliği önermiştir :

$$V_t = A(1 - \exp(-t/t_0))^{1/3} \quad (5)$$

Bu bağlantıda ;

- $V_t$  : t zamanına kadar olan gaz emisyonu, m<sup>3</sup>/t  
 $A$  : Toplam gaz içeriği, m<sup>3</sup>/t  
 $t_0$  : Başlıca kömür parça boyutu ve gaz basıncına bağlı olan bir zaman sabiti, saniye  
 $t$  : Gazın desorbe olmaya başlamasından sonra geçen süre, saniye.

Bu araştırmada, çalışılan kömür numuneleri için "t<sub>0</sub>", zaman sabitleri, bulunmuş ve Airey eşitliği kullanılarak teorik emisyon miktarları hesaplanmıştır.

### 3.3. Gerilme-Geçirgenlik Deneyleri

Emisyon özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar tamamlandıktan sonra, numuneler tek eksenli olarak yüklenerek, geçirgenliğine olan etkileri saptanmıştır. Numunelerden değişik tek eksenli gerilme koşullarında gaz geçirilerek, her durumdaki metan debileri gözlenmiştir. Gözlenen bu değerler yardımıyla gerilme-geçirgenlik eğrileri çizilmiştir.

Deneyler sırasında uygulanan basınç miktarı numunenin kırılmasına kadar artırılmıştır. Genelde, kömürlerin 10 MN/m<sup>2</sup>'lik bir eksenel gerilme altında kırıldıkları gözlenmiştir.

## 4. DENEY SONUÇLARININ ÖZETLENMESİ

### 4.1. Akış Ölçümleri İle Belirlenen Radyal Geçirgenlik Sonuçları

Çizelge 1a - 1b - 1c herbir numune için radyal geçirgenlik ölçmeleri sonuçlarını göstermektedir. Çizelgenin üstünde deney koşulları; atmosferik basınç, oda sıcaklığı, numune uzunluğu, delinen delik uzunluğu ve numune ağırlığı verilmiştir.

Yürütülen radyal geçirgenlik ölçmeleri sonuçlarından, çalışılan kömürlerin geçirgenliklerinin uygulanan gaz basıncına bağlı olarak 10<sup>-16</sup>-10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup> arasında değiştiği gözlenmiştir. Çizelgelerden de anlaşıldığı gibi kömür numuneleri düşük gaz basınçlarında yüksek geçirgenlik göstermişlerdir. Uygulanan gaz basıncı arttıkça, geçirgenlik değerlerinin azaldığı görülmüştür.

"Geçirgenlik—ortalama basıncın tersi" grafiklerinden (Şekil 4a, 4b, 4c) görüldüğü gibi Klinkenberg'in (12) kumtaşlarında gözlediği gaz basıncı ile geçirgenlik arasındaki doğrusal ilişki (Şekil 5) kömürlerde görülmemektedir. Yüksek gaz basınçlarında geçirgenlikteki azalma oldukça önemsiz olmaktadır. Bu nedenlerle, bu kömürler için grafikte düz bir doğru ve kesim noktası bulunmadığından gerçek ya da sıvı geçirgenliği (liquid permeability) elde edilememiştir. Araştırmada uygulanan gaz basıncı 2-4 MN/m<sup>2</sup> olmuştur. Eğer bu basınç 10 MN/m<sup>2</sup>'ye kadar artırılabilmiş olsaydı, büyük bir olasılıkla gaz başındaki artışla birlikte geçirgenliğinde artması gözlenebilecekti (Şekil 6,7) (13)(14).

Çizelge la— Çay Numunesi için Geçirgenlik Deney Sonuçları

$P_1 = 9,40 \times 10^4 \text{ N/m}^2$   $T = 15^\circ\text{C}$   $L = 84,20 \text{ mm.}$   
 $P_2 = 8,83 \times 10^9 (\text{N/m}^2)^2$   $h = 54,25 \text{ mm.}$   $W = 161 \text{ gr.}$

$P_2$ ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )	$P_2^2$ ( $10^{10} \text{ N}^2/\text{m}^4$ )	$\frac{1}{P}$ ( $10^{-6} (\text{N/m}^2)^{-1}$ )	$Q$ ( $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )	$k$ ( $10^{-15} \text{ m}^2$ )
$E_{OM}$	$E_Z$	$E_0$	$Q^*$	$k$
2,96	8,64	6,89	3,19	59,62
3,96	13,86	4,12	2,42	38,47
4,90	24,01	3,42	4,42	28,00
6,36	47,05	2,56	5,50	17,50
7,85	61,62	2,27	6,00	14,45
8,83	77,96	2,04	6,75	12,82
9,80	96,04	1,86	7,00	10,81
14,70	216,38	1,28	9,60	6,51
18,63	347,07	1,02	13,67	5,79

Çizelge lb— Acılık Numunesi için Geçirgenlik Deney Sonuçları.

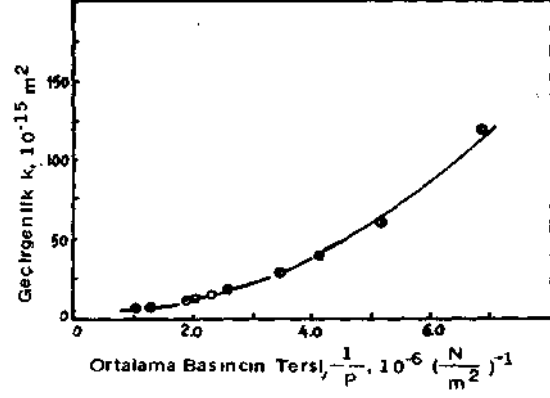
$P_j = 9,34 \times 10 \text{ N/m}^2$   $T = 15^\circ\text{C}$   $L = 84,10 \text{ mm.}$   
 $P_j = 8,76 \times 10^9 (\text{N/m}^2)^2$   $h = 53,20 \text{ mm.}$   $W = 165 \text{ gr.}$

2,44	5,93	5,94	1,33	32,31
2,94	8,62	5,17	1,58	29,48
3,94	15,49	4,11	1,92	18,90
4,94	24,36	3,41	2,25	13,81
5,94	35,24	2,91	2,58	10,84
6,94	48,11	2,54	3,33	10,17
7,44	55,29	2,39	3,67	9,72
7,94	63,48	2,25	3,83	8,47
8,44	71,16	2,13	4,08	8,38
8,94	79,85	2,02	4,33	7,08

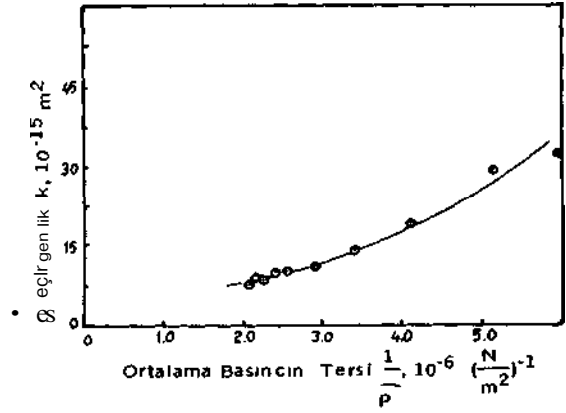
Çizelge lc— Kılıç Numunesi için Geçirgenlik Deney Sonuçları.

$T = 11 \text{ C}$   $L = 84,85 \text{ mm.}$   
 $P^2 = 8,81 \times 10^9 (\text{N/m}^2)^2$   $h = 54,60 \text{ mm.}$   $W = 165 \text{ gr.}$

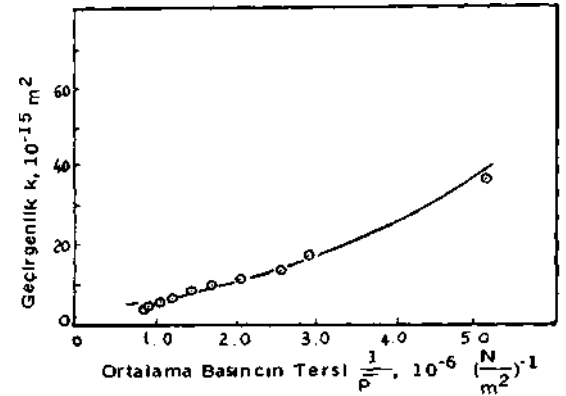
2,93	8,63	5,16	2,00	37,15
5,93	15,51	2,91	4,16	17,37
6,93	48,14	2,54	4,66	14,15
8,93	79,90	2,02	6,16	11,23
10,93	119,65	1,68	8,25	10,00
12,93	167,41	1,44	9,50	8,21
15,93	254,04	1,19	11,00	6,26
17,93	321,79	1,06	12,00	5,43
20,93	438,42	0,91	13,30	4,54
22,93	526,17	0,84	14,61	4,00



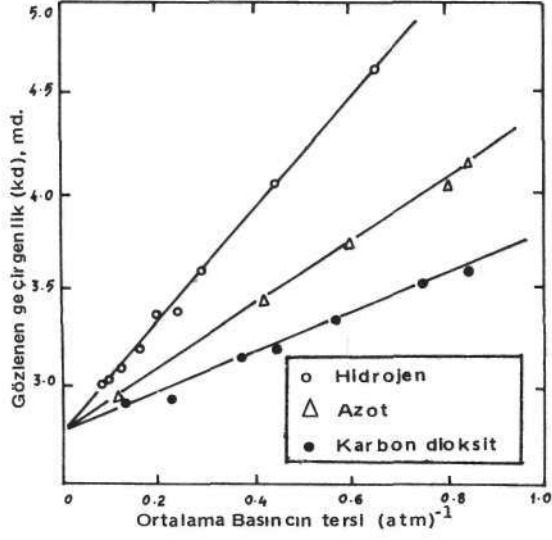
Şekil 4a—Çay numunesi için ortalama basıncın tersine karşı çizilen geçirgenlik eğrisi.



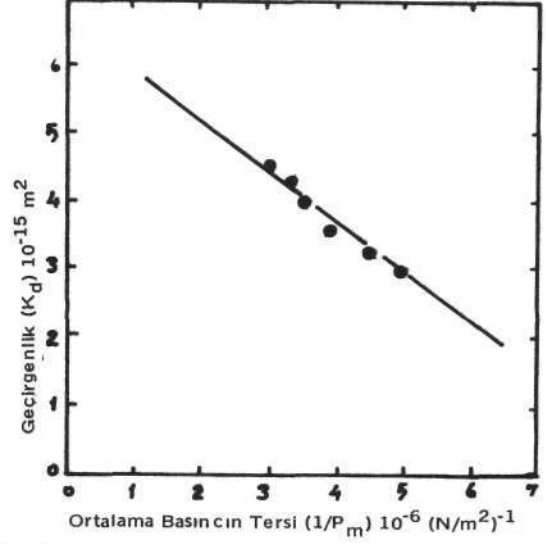
Şekil 4b—Acılık numunesi için ortalama basıncın tersine karşı çizilen geçirgenlik eğrisi.



Şekil 4c—Kılıç numunesi için ortalama basıncın tersine karşı çizilen geçirgenlik eğrisi.



Şekil 5— Değişik basınçlarda hidrojen azot ve karbondioksit için geçirgenlik sabitleri, "L"



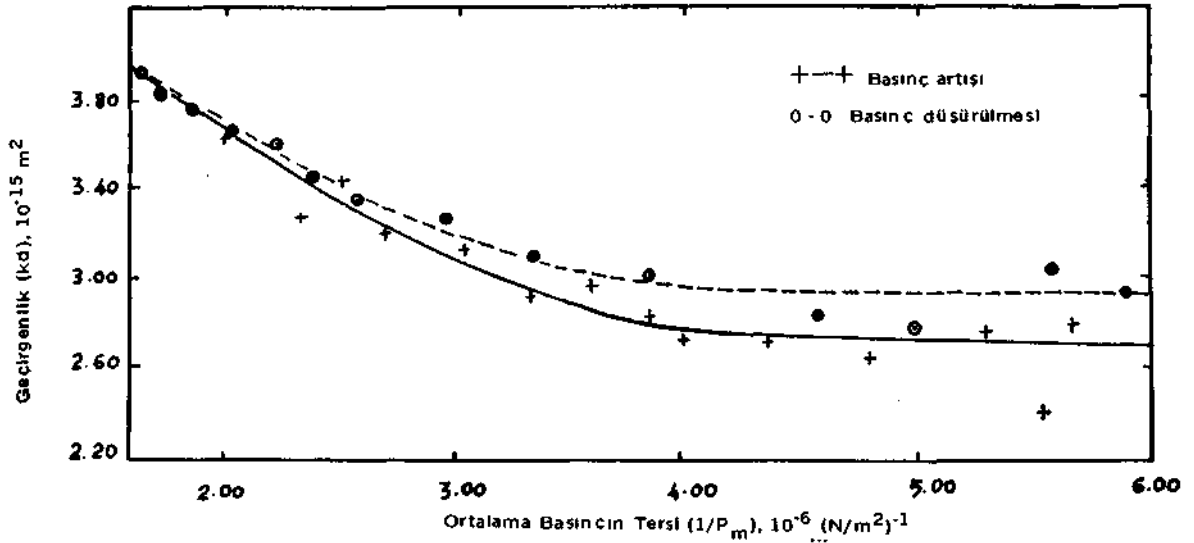
Şekil 6— Gerilme altında olmayan bir kömür numunesi için gaz basıncı ve geçirgenliğin değişimi, (13).

Gaz başımdaki artış ile geçirgenliğin değişmesi "slip" olayı ile açıklanır (15) (13). Bu olay kumtaşları ve kömür katmanları için geçerli olurken, kömür sözkonusu olduğunda, artan gaz basıncı kömürün iç yapısında değişiklik yaptığından (deformasyon) geçirgenliği artmaktadır. Yüksek gaz basınçlarında kömür maddesinin sıkışabilirlik özelliğinden, gözeneklerin açılması nedeniyle geçirgenlik slip etkisine karşın artmaktadır.

#### 4.2. Basıncı Yükselme Testlerinin Modellenmesi Sonuçları

Bu yöntemle radyal geçirgenlikler zamanın fonksiyonu olarak belirlenen, basınç artışları ve verileri ile Eşitlik 4 kullanılarak bulunmuştur.

Çizelge 2a-2b-2c her bir numune için basınç yükselme verilerini göstermektedir. Bunlar; metan sorbsiyon denge basıncı, kapatmadan önceki sa-



Şekil 7— Gerilme altında olmayan Acılık kömürü için gaz basıncı ile geçirgenliğin değişimi (14).

bit debi, kömürün deney anındaki sıcaklığı, gazın saliverildiği süre ve belirlenen radyal geçirgenlik değeridir.

Çizelge 2a— Çay Numunesi İçin Basınç Yükselme Verileri.

$$P = 1,9 \times 10^5 \text{ N/m}^2, \quad k = 8,444 \times 10^{-15} \text{ m}^2, \quad t = 5 \text{ sn.}$$

$$T = 15^\circ\text{C}, \quad Q = 1,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$\Delta t$ (min.)	$P_w$ ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )	$P_w^2$ ( $10^{10} \text{ N}^2/\text{m}^4$ )	$\log \left( \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right)$
1	1,00	1,00	0,0347
3	1,40	1,96	0,0118
5	1,50	2,25	0,0071
7	1,60	2,56	0,0051
10	1,70	2,89	0,0036
15	1,85	3,42	0,0024

Çizelge 2b— Acılık Numunesi İçin Basınç Yükselme Verileri

$$P = 25 \times 10^5 \text{ N/m}^2, \quad k = 42,36 \times 10^{-15} \text{ m}^2, \quad t = 5 \text{ sn.}$$

$$T = 15^\circ\text{C}, \quad Q = 2,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

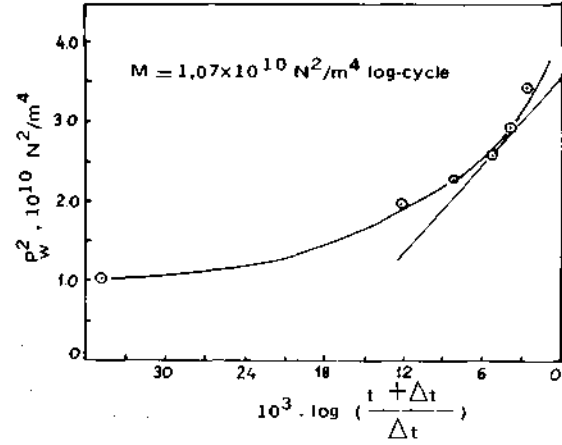
$\Delta t$ (min.)	$P_w$ ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )	$P_w^2$ ( $10^{10} \text{ N}^2/\text{m}^4$ )	$\log \left( \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right)$
1	0,35	0,12	0,0347
3	0,70	0,49	0,0118
5	0,90	0,81	0,0071
7	1,10	1,21	0,0051
10	1,35	1,82	0,0036
15	1,50	2,25	0,0024

Çizelge 2c— Kılıç Numunesi İçin Basınç Yükselme Verileri

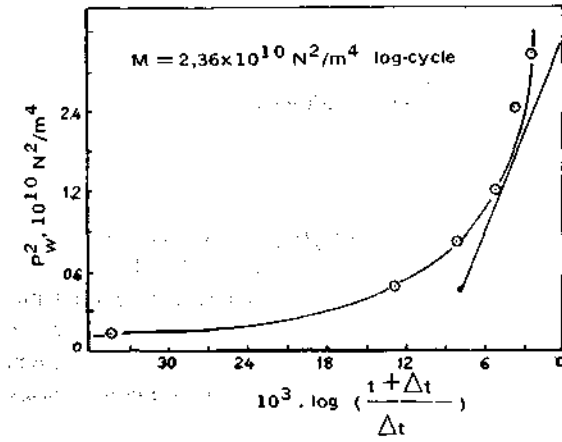
$$P = 24 \times 10^5 \text{ N/m}^2, \quad k = 49,47 \times 10^{-15} \text{ m}^2, \quad t = 10 \text{ sn.}$$

$$T = 15^\circ\text{C}, \quad Q = 1,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

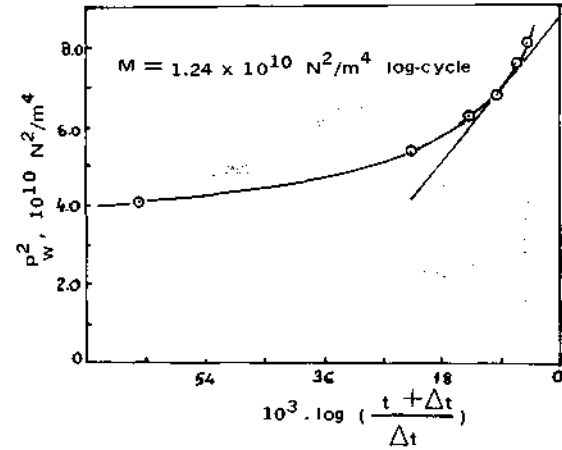
$\Delta t$ (min.)	$P_w$ ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )	$P_w^2$ ( $10^{10} \text{ N}^2/\text{m}^4$ )	$\log \left( \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \right)$
1	2,00	4,00	0,0644
3	2,30	5,29	0,0225
5	2,50	6,25	0,0136
7	2,60	6,76	0,0098
10	2,75	7,56	0,0068
15	2,85	8,12	0,0046



Şekil 8— Çay numunesi için basınç yükselme eğrisi.



Şekil 8b— Acılık numunesi için basınç yükselme eğrisi.



Şekil 8c— Kılıç numunesi için basınç yükselme eğrisi.



Şekil 8a-8b-8c,  $P^{\wedge}$  değerlerine karşı çizilen  $\log \left( \frac{A}{t} \right)$  eğrilerini vermektedir. Bu eğrilerin eğimleri bulunarak, her bir kömür numunesi için radyal geçirgenlik değeri Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanmıştır.

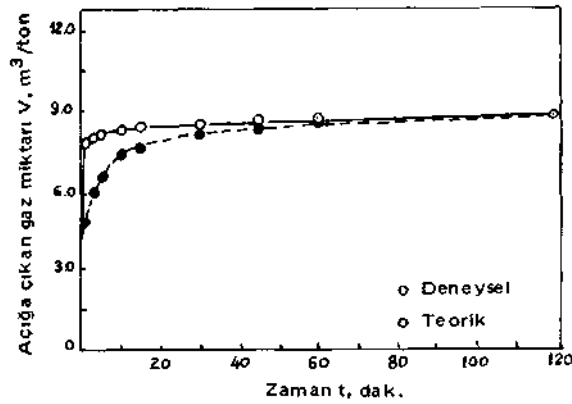
#### 4.3. Araştırmada Kullanılan Kömürlerin Emisyon Özelliklerinin Araştırılması Sonuçları

Bu araştırmada, söz konusu kömürlerin deneysel ve teorik emisyon oranları saptanmıştır. Çizelge 3a-3b-3c her bir numune için zamanın bir fonksiyonu olarak gözlenen, deneysel ve hesaplanan teorik emisyon oranlarını vermektedir. Metan sorpsiyon denge basıncı, numune ağırlığı ve hesaplanan zaman sabitleri çizelgelerin üst kısmında verilmiştir. Bu zaman sabitleri ve Eşitlik 5 kullanılarak, teorik emisyon oranları hesaplanmıştır.

Çizelge 3a- Çay Numunesi İçin Metan Emisyon Oranları.

$P = 21 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .  $W = 161 \text{ gr}$   $t_0 = 135,63 \text{ sn.}$

Zaman t (dak)	Açığa çıkan Gaz Miktarı V (m <sup>3</sup> /ton)	
	Deneysel	Teorik
1	7,82	4,47
3	7,98	5,96
5	8,10	6,51
10	8,22	7,21
15	8,32	7,57
30	8,47	8,10
45	8,60	8,35
60	8,69	8,49
120	8,94	8,73

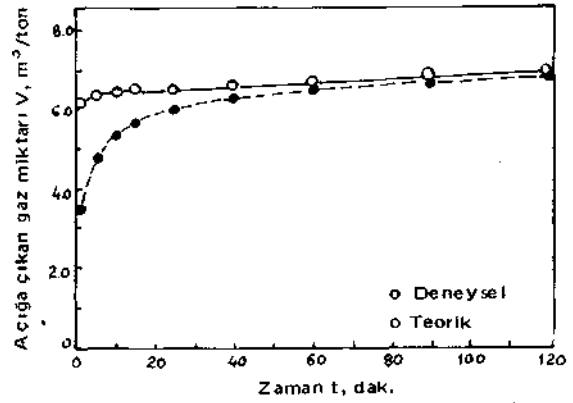


Şekil 9a—Çay numunesi için zaman emisyon eğrisi.

Çizelge 3b—Açlık Numunesi İçin Metan Emisyon Oranları.

$P = 20 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .  $W = 165 \text{ gr}$   $t_0 = 179,80 \text{ sn.}$

Zaman t (dak)	Açığa çıkan Gaz Miktarı V (m <sup>3</sup> /ton)	
	Deneysel	Teorik
1	6,18	3,46
5	6,33	4,79
10	6,42	5,35
15	6,48	5,64
25	6,51	5,98
40	6,60	6,25
60	6,69	6,44
90	6,81	6,59
120	6,91	6,67

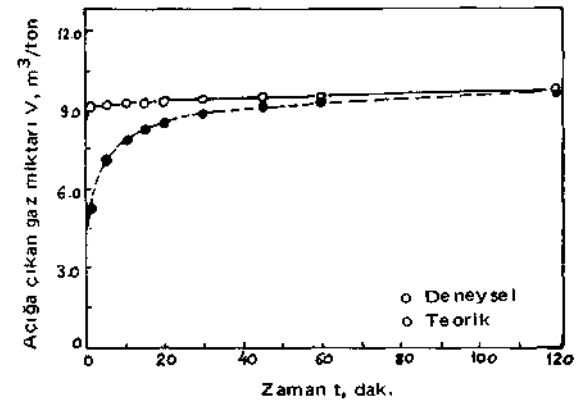


Şekil 9b—Açlık numunesi için zaman emisyon eğrisi.

Çizelge 3c—Kılıç Numunesi İçin Metan Emisyon Oranları.

$P = 24 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .  $W = 165 \text{ gr}$   $t_0 = 131,09 \text{ sn.}$

Zaman t (dak)	Açığa çıkan Gaz Miktarı V (m <sup>3</sup> /ton)	
	Deneysel	Teorik
1	9,09	5,24
5	9,21	7,13
10	9,27	7,88
15	9,33	8,27
20	9,36	8,52
30	9,42	8,84
45	9,51	9,10
60	9,57	9,27
120	9,75	9,52



Şekil 9c—Kılıç numunesi için zaman emisyon eğrisi.

DeneySEL ve teorik olarak belirlenen emisyon oranlarına göre çizilen zaman-emisyon eğrileri karşılaştırıldığında, aralarındaki ilk andaki önemli farkın zamanla azalıp, eğrilerin birbirine yaklaşıtları görülmüştür (Şekil 9a-9b-9c). İlk andaki bu Önemli farkın numune kabının içinde biriken, serbest gazın hızlı emisyonu olarak açıklanabilir ve eğrinin bu kısmı kömürün gerçek emisyon karakterini temsil etmez.

#### 4.4. Gerilme - Geçirgenlik Deneyleri Sonuçları

Araştırmada kömürlerin radyal geçirgenliğine eksenel gerilmenin etkilerini saptamak için bir seri deney yapılmıştır. Kömür numunelerinin geçirgenliği önce gerilme etkisi olmadan belirlenmiş, daha sonra numunenin kırılmasına kadar artan gerilme seviyelerinde gaz geçirgenliği saptanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4a-4b-4c 'de verilmiştir.

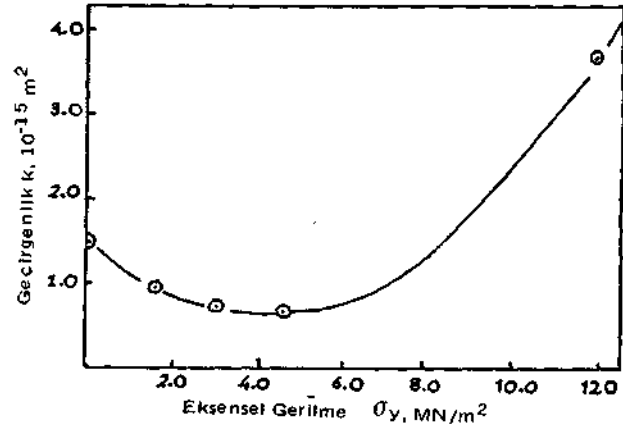
Radyal geçirgenlik üzerine eksenel gerilme etkileri Şekil 10a-10b-10c 'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar diğer kömür ve kömür katmanlarıyla yapılan, gerilme-geçirgenlik sonuçlarıyla uyum göstermektedir (16) (17) (18). Bu sonuçlardan, radyal geçirgenliğin artan gerilme etkisiyle numune yenilene kadar azaldığı söylenebilir. Yenilme oluştuktan sonra ise geçirgenlik önemli oranda artmaktadır (10 katına kadar).

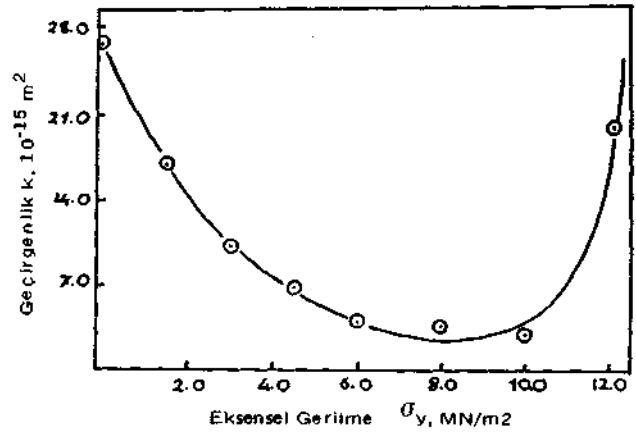
Yenilmeden sonraki geçirgenliğin değişimi sonuçları, önceki araştırmacıların bulduğu sonuçlar ile karşılaştırıldığında, geçirgenlikteki artışın göreceli olarak düşük olduğu söylenebilir (üç eksenli gerilme altında kırılmadan sonra geçirgenlik 100-500 kat artmıştır) (18). Bu sonuç yaratılan akış koşullarının karakteriyle açıklanabilir. Önceki araştırmalarda olduğu gibi eğer gerilme etkisi ve gaz akışı aynı yönde olursa, geçirgenlikteki artış daha yüksek olmaktadır. Eğer uygulanan gerilme tabakalanma düzlemlerine paralel olursa, kırılmalar aynı yönde oluşmakta ve ana kırılma düzlemine dik yöndeki geçirgenlikteki artış küçük olmaktadır.

#### 4.5. Gaz Basıncı - Geçmişinin Geçirgenliğe Etkisi

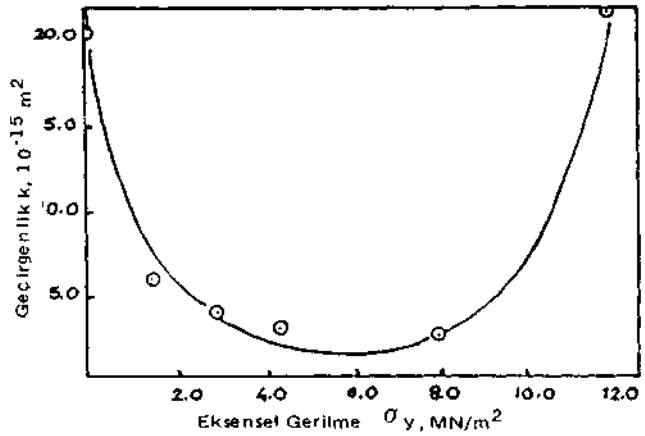
Araştırma boyunca kömür numuneleri önce radyal geçirgenlik ölçülmesi deneylerine bağımlı tutuldu. Daha sonra gerek basınç yükselme testleri için gerekse emisyon özelliklerinin araştırıl-



Şekil 10a- Çay numunesi için eksenel gerilme-geçirgenlik eğrisi.



Şekil 10b- Acılık numunesi için eksenel gerilme-geçirgenlik eğrisi.



Şekil 10c- Kılıç numunesi için eksenel gerilme-geçirgenlik eğrisi.

Çizelge 4a– Çay Numunesi İçin Gerilme - Geçirgenlik Deney Sonuçları.

$\sigma_y = 0$				$\sigma_y = 1,5 \text{ MN/m}^2$					
$P_2$	$p_2$	Q	k	Q	k				
$(10^5 \text{ N/m}^2)$	$(10^{10} \text{ N}^2/\text{m}^4)$	$(10^{m^4} \text{ m}^3/\text{s})$	$(10^{n^{15}} \text{ m}^2)$						
10,94	119,59	1,83	3,51						
15,94	253,95	2,16	1,94						
20,94	438,31	2,83	1,47						
25,94	672,67	3,66	1,24						



ması amacıyla iki kez denge basıncına kadar gazı doyurulmuştur. Bu testler tamamlandıktan sonra aynı kömür numunelerinin radyal geçirgenlikleri gaz basıncı-geçmişinin etkilerinin belirlenmesi amacıyla yeniden akış ölçümleri yöntemiyle hesaplanmıştır.

Çizelge 5a-5b-5c kömür numuneleri için ilk ölçülen geçirgenlik değerleri ve çeşitli gaz basıncı işlemlerinden sonra belirlenen geçirgenlik değerlerini vermektedir. Çizelgelerden görüldüğü gibi değişik gaz basıncı işlemlerinden sonra kömür numunelerinin geçirgenlikleri artmıştır. Bu sonuç kömürlerin sıkışabilirlik özellikleri ile açıklanabilir (yüksek gaz basınçlarının uygulanması kömür yapısında kalıcı plastik deformasyonların oluşumuna neden olmaktadır).

Çizelge 5a— Acılık Numunesi İçin Gaz Basıncı - Geçmişinin Geçirgenliğe Etkisi.

$p_2$ ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )	$i$ ( $10^{10} (\text{N/m}^2)^2$ )	$k_1$ ( $10^{-15} \text{ m}^2$ )	$k_2$ ( $10^{-15} \text{ m}^2$ )
5,94	35,28	1838	53,1
10,94	119,68	9,83	26,5

Çizelge 5b— Çay Numunesi İçin Gaz Basıncı - Geçmişinin Geçirgenliğe Etkisi.

( $10^5 \text{ N/m}^2$ )	( $10^{10} (\text{N/m}^2)^2$ )	( $10^{-15} \text{ m}^2$ )	( $10^{-15} \text{ m}^2$ )
10,94	119,68	1,59	3,51
15,94	253,95	0,86	1,94
20,94	43831	0,64	1,47
25,94	672,67	0,53	1,24

Çizelge 5c— Kılıç Numunesi İçin Gaz Basıncı - Geçmişinin Geçirgenliğe Etkisi,

$p_2$ ( $10^5 \text{ N/m}^2$ )	$i$ ( $10^{10} (\text{N/m}^2)^2$ )	$k_1$ ( $10^{-15} \text{ m}^2$ )	$k_2$ ( $10^{-15} \text{ m}^2$ )
10,93	119,68	10,00	20,0
15,93	254,05	6,26	11,9
20,93	438,45	4,54	8,2

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırma Zonguldak havzası kömürlerinin radyal geçirgenlik ve emisyon özelliklerinin araştırılması ile ilgilidir. Bu amaç için Zonguldak havzası Kozlu bölgesinden 3 kömür damarı; Çay, Kılıç ve Acılık seçilmiştir.

Kömürlerin radyal geçirgenliklerinin uygulanan gaz basıncına bağlı olarak  $10^{-16}$  -  $10^{-13} \text{ m}^2$  arasında değiştiği gözlenmiştir. Kömürlerin sıvı geçirgenliği (Liquid permeability), geçirgenlik ile değişen metan basıncı Klinkenberg'in önerdiği gibi doğrusal bir ilişki göstermediğinden bulunamamıştır. Bu sonuç ise kömür iç yapısının deformasyonu (gözenek ve kırıkların açılması) ve yüksek gaz basıncı değerlerinde slip etkisinin azalması ile açıklanmıştır.

Üç kömür damarından alınan numunelerin geçirgenlik sonuçları karşılaştırıldığında kömürlerin geçirgenliklerinin sırasıyla; Çay, Acılık ve Kılıç olarak azaldığı saptanmıştır. Çay ve Acılık kömürlerinin geçirgenlik değerleri arasındaki farkın fazla olmamasına karşın, Kılıç numuneleri en düşük geçirgenlik ve emisyon oranları göstermiştir.

Akış ölçümleri ve basınç yükselme testlerinin modellenmesiyle elde edilen geçirgenlik değerleri birbiriyle uyum göstermektedir. Bu model çalışmaları basınç yükselme testlerinin yerinde başarı ile uygulanabileceğini kanıtlamıştır.

Emisyon deneyleri sonuçları göz önünde bulundurulduğunda en yüksek metan emisyonunun, Çay, en düşük emisyonun ise Kılıç damarında olması beklenmektedir.

Radyal geçirgenlik-eksensel gerilme deneyleri sonucunda kömür numunelerinde yenilme oluşana değin, artan gerilme altında geçirgenliğin azaldığı saptanmıştır. Yenilmeden sonra bu kömürlerin geçirgenliği önemli ölçüde artmıştır.

Araştırma boyunca yürütülen deneyler sonunda kömür geçirgenliğinin oldukça gaz basıncı geçmişine bağımlı olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada kömürlerin gaz geçirgenlik ve emisyon özellikleri laboratuvarında modellenerek belirlenmiştir. Daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için Zonguldak kömürlerinin

geçirgenlik değerlerinin, laboratuvar sonuçlarının yerindeki koşulları tam temsil edemediğinden, yerinde ölçülmesi gerekmektedir. Yerinde testlerin laboratuvarında yapılan modelleme çalışmaları bu testlerin yerinde başarı ile yürütülebileceğini göstermiştir.

## KAYNAKLAR

1. PATCHING, T.H. "The Retention and Release of Gas in Coal", Canadian Min. and Met. (CIM) Bulletin, pp. 1302-1308, 1970.
2. GÜNEY, M., "An Assesment of the Methane Content and the Firedamp Emission from Certain Coal Seams in Kozlu District, Zonguldak Coalfield", A Habilitation Thesis, Middle East Tecncal University, Ankara, 197 2.
3. PATCHING, T.H., "Variations in the Permeability of Coal", Proc. 3'rd Rock Mech. Symp., University of Toronto, pp. 185-189, 196 5.
4. JOLLY, D.C., "Emission of Firedamp in Longwall Workings", Colliery Guardian, pp. 771-774, 1965.
5. EDİZ, İ.G., "A Laboratory Investigation into the Radial Flow of Methane through Zonguldak Coals", M. Sc. Thesis, Middle East Technical University, 1984.
6. DURUCAN, Ş., "Zonguldak Havzası Acılık ve Çay Kömürlerinin Gerilme-Geçirgenlik Özellikleri", TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 8. Kongresi, Ankara, 1983.
7. SLIDER, H.C., "Practical Petroleum Reservoir Engineering Methods", Petroleum Publishing Comp., Tulsa, 1976.
8. DAVIT, A.T., ERTEKİN, T., "Gas Well Testing", IHRDC, Boston, 1982.
9. WOLSTENHOLME, E.F., "A Study of the Movement of Firedamp within the Floor Strata of a Coal Seam Liabile to Outburs", P.h.D. Thesis, University of Nottingham, 1968.
10. EDİZ, İ.G., DURUCAN, Ş., "Kömür Damarlarının Yerinde Metan Basıncının ve Geçirgenliğinin Belirlenmesi Yöntemleri", TMMOB Maden Mühendisleri Odası Zonguldak Şubesi, Türkiye 4. Kömür Kongresi, Mayıs 1984.
11. AIREY. E.M., "Gas Emission from Broken Coal. An Experimental and Theoretical **Investigation**", Int. J. of Rock Mech. Min. Sei., Vol. 5, pp. 475-496, 1968.
12. KLINKENBERG, L.J., "The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases", Drilling and Production Practice, Published by the American Petroleum Institute, pp. 200-211, 1941.
13. GAWUGA, J.K., "Flow of Gas Through Stressed Carboniferous Strata", Ph.D Thesis, University of Nottingham, 1979.
14. YEREBASMAZ, G., "An Investigation into the Flow of Methane through Coal Samples, M.Phil. Thesis, University of Nottingham, 1981.
15. ADZUMİ, H., "On the Flow of Gases through a Porous Wall", Bulletin of Chemical Society of Japan, Vol. 12, No. 6, pp. 304-312, 1937.
16. SOMERTON, W.H., SÖYLEMEZOĞLU, İ.M., DUDLEY, R.C., "Effect of Stress on Permeability of Coal", Int. J. Rock Mech. Mia Sei. Geomech. Abstr., Vol. 12, pp. 129-145, 1975.
17. MORDECAI, M., MORRIS, L.H., "The Effects of Stress on the Flow of Gas through Coal Measure Strata", Trans. Inst. Min. Engrs., Vol. 133, pp. 435-443, 1974.
18. DURUCAN. Ş., "An Investigation into the Stress-Permeability Relationships of Coals and Flow Patterns Around Working Longwall Faces", Ph. D. Thesis, University of Nottingham, **1981**.

