

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÖMÜR DAMARI GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİN
MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samed BOZDOĞAN

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÖMÜR DAMARI GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİN
MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Samed BOZDOĞAN
(505211009)**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdullah FİŞNE

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**ASSESSMENT OF COAL SEAM GAS CONTENT DETERMINATION
METHODS AND DEVELOPMENT OF PREDICTION MODELS USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

M.Sc. THESIS

**Samed BOZDOĞAN
(505211009)**

Department of Mining Engineering

Mining Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Abdullah FİŞNE

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505211009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Samed BOZDOĞAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KÖMÜR DAMARI GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİN MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Abdullah FİŞNE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Türker HÜDAVERDİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ümit ÖZER
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa

Teslim Tarihi : 24 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 12 Haziran 2024





Hüsamettin ÖZİL'in unutulmaz anısına,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen, yeraltı maden havalandırması konusunda yolumu aydınlatarak gelişmemde büyük emek sahibi olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Abdullah FİŞNE'ye sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmaya konu olan kömür havzalarında gaz içeriği belirleme çalışmalarını titizlikle gerçekleştiren ve kullanılan veri setlerinin oluşturulmasında büyük emeği geçen İTÜ Maden Havalandırması ve İş Güvenliği Laboratuvarı'nda çalışan tüm araştırmacı arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Lisansüstü öğrenim sürecimde olduğu gibi, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda maddi ve manevi olarak yanımda olan değerli aileme yürekten teşekkür ederim.

Son olarak, beni daima ileriye taşıyan inancıyla hayatımın her aşamasında yanımda olan, sonsuz desteği sayesinde çalışmalarımı kolaylaştıran sevgili Olcay İrem İREY'e tüm kalbim ve içtenliğimle teşekkür ederim.

Haziran 2024

Samed BOZDOĞAN
Maden Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. KÖMÜRLEŞME SÜRECİNDE GAZIN OLUŞUMU VE DEPOLANMASI ..	3
2.1 Kömürde Gaz Oluşumu.....	6
2.1.1 Termojenik gaz oluşumu.....	7
2.1.2 Biyojenik gaz oluşumu.....	8
2.2 Kömürde Gazın Depolanması	10
2.3 Kömürde Gaz Difüzyonu	16
3. GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİ.....	19
3.1 Doğrudan (Direkt) Yöntemler	20
3.1.1 US Bureau of Mines (USBM) doğrudan yöntemi	23
3.1.1.1 Kayıp gaz miktarının (Q_1) belirlenmesi	24
3.1.1.2 Yayılan gaz miktarının (Q_2) belirlenmesi	27
3.1.1.3 Artık gaz miktarının (Q_3) belirlenmesi	30
3.1.2 Değiştirilmiş US Bureau of Mines doğrudan yöntemi.....	31
3.1.3 Smith & Williams yöntemi	32
3.1.4 Eğri uydurma yöntemleri	35
3.1.5 Gaz Araştırma Enstitüsü (GRI) yöntemi.....	37
3.1.6 Avustralya standart yöntemi	38
3.2 Dolaylı (İndirekt) Yöntemler.....	39
3.2.1 Adsorpsiyon izotermi	39
3.2.2 Kim eşitliği.....	40
4. GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN UYGULAMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	43
4.1 Çalışmada Kullanılan Kömür Örneklerinin Genel Özellikleri.....	44
4.2 USBM Yönteminin Uygulaması	46
4.3 Smith & Williams Yönteminin Uygulaması	49
4.4 Amoco Eğri Uydurma Yönteminin Uygulaması.....	50
4.5 Analitik Yöntemin Uygulaması.....	53
4.6 Kim Eşitliğinin Uygulaması.....	54
4.7 Yöntemlerin Karşılaştırılması	55
5. GAZ İÇERİĞİ TAHMİN MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ	59

5.1 Alpu Havzası A Damarında Gaz İçeriği Tahmin Modelinin Geliştirilmesi.....	60
5.2 Soma Havzası kM2 Damarında Gaz İçeriği Tahmin Modelinin Geliştirilmesi	65
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	73
ZGEMİş.....	81



KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ar	: Orijinal baz
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CBM	: Kömür kökenli metan
d,MMF	: Kuru – mineral maddesiz baz
GRI	: Gaz araştırma enstitüsü
KD	: Kalorifik değer
K	: Kül
LTR	: Kayıp zaman oranı
MDM	: Değiştirilmiş US Bureau of Mines yöntemi
m,MMF	: Nemli – mineral maddesiz baz
MM	: Mineral madde
N	: Nem
PVC	: Polivinil klorür
SK	: Sabit karbon
STR	: Yüzey zamanı oranı
S & W	: Smith & Williams
TK	: Toplam kükürt
UM	: Uçucu madde
USBM	: US Bureau of Mines
YSA	: Yapay sinir ağları



SEMBOLLER

CF	: Düzeltme faktörü
CH₄	: Metan
C₂H₆	: Etan
C₃H₈	: Propan
C₄H₁₀	: Bütan
CO₂	: Karbondioksit
D	: Efektif difüzyon
F	: Difüzyon akışı
FC	: Numunenin sabit karbon içeriği
G_{Kim}	: Adsorbe olan gaz miktarı
g	: Yerçekimi ivmesi
g	: Gram
h	: Derinlik
H₂S	: Hidrojen sülfür
K	: Kelvin
kg	: kilogram
kPa	: Kilopascal
M	: Numunenin nem içeriği
M_c	: Öğütülen kömür örneğinin kuru ağırlığı
MJ	: Megajoule
M_t	: Kömür örneğinin kuru ağırlığı
MPa	: Megapascal
N₂	: Azot
nm	: Nanometre
P	: Basınç
P_L	: Langmuir basınç sabiti
R	: Korelasyon katsayısı
R²	: Determinasyon katsayısı
Q₁	: Kayıp gaz miktarı
Q₂	: Yayılan gaz miktarı

Q_3	: Artık gaz miktarı
R_0	: Vitrinit yansıtma
RH	: Bağıl nem
t_1	: Numunenin kömür damarından kesildiği ilk an
t_2	: Numunenin yeryüzüne çıkarılmaya başlandığı an
t_3	: Numunenin yeryüzüne ulaştığı an
t_4	: Numunenin kanistere yerleştirilip, sızdırmazlığını sağlandığı an
$t_{25\%}$	: Yayılan gaz miktarının %25'inin ölçülmesine kadar geçen zaman
t_d	: Numunenin bakir konumundan yüzeye ulaşmasına kadar geçen zaman
t_{lg}	: Kayıp gaz zamanı
t_s	: Numunenin kanistere yerleştirilmesine kadar geçen toplam zaman
V_d	: Kuru numune hacmi
V_{ads}	: Adsorbe olan gaz miktarı
V_{des}	: Numuneden yayılan gaz miktarı
V_L	: Langmuir hacim sabiti
V_l	: Kayıp gaz miktarı
VM	: Numunenin uçucu madde içeriği
V_{tot}	: Numunenin toplam gaz içeriği
V_w	: Yaş numune hacmi
v	: Akış hızı
κ	: Geçirgenlik fonksiyonu
μ_f	: Akışkanın viskozitesi
∇P	: Basınç farkı
ρ_f	: Akışkanın yoğunluğu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: ASTM standardına göre kömürleşme derecesi (rank) sınıflama sistemi (ASTM, 2023).	4
Çizelge 2.2: Nem içeriği ile gaz adsorpsiyonu ilişkisi (Chattaraj ve diğ, 2016).	14
Çizelge 2.3: Kömür damarlarının sorpsiyon kapasitelerine etki eden parametreler (Masoudian, 2016).....	15
Çizelge 3.1: Gaz içeriği belirleme çalışmaları adına farklı sondaj tekniklerinin değerlendirilmesi (Seidle, 2011; Flores, 2014).	22
Çizelge 3.2: Smith ve Williams yönteminde düzeltme faktörleri (Seidle, 2011).	34
Çizelge 4.1: Çalışmada kullanılan kömür örneklerine ait genel bilgiler ve kimyasal analiz sonuçları.	45
Çizelge 4.2: USBM doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemi ile elde edilen sonuçlar.	48
Çizelge 4.3: Alpu, Soma ve Zonguldak örnekleri için kayıp zaman oranı, yüzey zamanı oranı ve düzeltme faktörü değerlerinin belirlenmesi.	49
Çizelge 4.4: Smith & Williams yöntemi ile elde edilen sonuçlar.	50
Çizelge 4.5: Amoco yöntemi ile elde edilen sonuçlar.	52
Çizelge 5.1: Alpu havzası A damarı için geliştirilen YSA modelinde kullanılan veri setine ait tanımlayıcı istatistik bilgileri.	61
Çizelge 5.2: Soma havzası km2 damarı için geliştirilen YSA modelinde kullanılan veri setine ait tanımlayıcı istatistik bilgileri.	65



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Kömürleşme süreci (Greb ve diğ, 2006).	3
Şekil 2.2	: Turbalaşma ve kömürleşme süreci boyunca oluşan ürünler (Flores, 2014).	6
Şekil 2.3	: Kömürleşme sürecinde gaz oluşumu (Flores, 2014).	7
Şekil 2.4	: Biyogenik metan oluşumu (Moore, 2012).	8
Şekil 2.5	: Kömür matrisinde gözenek dağılımı ve klit sistemlerinin birbiri ile olan etkileşimi (Flores, 2014).	10
Şekil 2.6	: Adsorpsiyon ve absorpsiyon mekanizmaları (Zbair ve Bennici, 2021).	11
Şekil 2.7	: Kömürleşme derecesine bağlı olarak gözenek boyut dağılımının değişimi (Levine, 1996; Moore, 2012).	12
Şekil 2.8	: Kömürleşme derecesi ile gaz oluşumu ve depolanması arasındaki ilişki (Rice, 1993; Flores, 2014).	13
Şekil 2.9	: İkili gözenekli sistem ile gaz difüzyon ve akışı (Wang ve diğ, 2021).	16
Şekil 3.1	: Gaz içeriği belirleme yöntemlerinin sınıflandırılması.	20
Şekil 3.2	: USBM doğrudan yöntemi ile kayıp gaz miktarının tahmini (Flores, 2014).	26
Şekil 3.3	: USBM yönteminde ilk olarak kullanılan ölçüm sistemi (a), TRW (1981) tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (b) (ASTM, 2024).	28
Şekil 3.4	: İTÜ Maden Havalandırması ve İş Güvenliği Laboratuvarı'nda kullanılan yayılan gaz miktarı ölçüm sistemi.	29
Şekil 3.5	: Örnek bir yayılan gaz miktarı eğrisi (Hou ve diğ, 2020).	29
Şekil 3.6	: İTÜ Maden Havalandırması ve İş Güvenliği Laboratuvarı'nda kullanılan artık gaz miktarı ölçüm sistemi.	31
Şekil 3.7	: Smith ve Williams düzeltme faktörü grafiği (Hou ve diğ, 2020).	33
Şekil 3.8	: Örnek bir adsorpsiyon izotermi (Flores, 2014).	40
Şekil 4.1	: Alpu numunesine ait kümülatif yayılan gaz ve kayıp gaz tahmin grafiği.	47
Şekil 4.2	: Soma numunesine ait kümülatif yayılan gaz ve kayıp gaz tahmin grafiği.	47
Şekil 4.3	: Zonguldak numunesine ait kümülatif yayılan gaz ve kayıp gaz tahmin grafiği.	48
Şekil 4.4	: Alpu numunesine ait desorpsiyon verileri ile uygulanan Amoco eğri uydurma yöntemi.	51
Şekil 4.5	: Soma numunesine ait desorpsiyon verileri ile uygulanan Amoco eğri uydurma yöntemi.	51
Şekil 4.6	: Zonguldak numunesine ait desorpsiyon verileri ile uygulanan Amoco eğri uydurma yöntemi.	52
Şekil 4.7	: Alpu numunesi desorpsiyon verileri ile analitik yöntem uygulaması.	53
Şekil 4.8	: Soma numunesi desorpsiyon verileri ile analitik yöntem uygulaması.	53

Şekil 4.9	: Zonguldak numunesi desorpsiyon verileri ile analitik yöntem uygulaması.....	54
Şekil 4.10	: Alpu numunesi üzerinde uygulanan farklı yöntemler ile tahmin edilen toplam gaz içeriği değerleri.	55
Şekil 4.11	: Soma numunesi üzerinde uygulanan farklı yöntemler ile tahmin edilen toplam gaz içeriği değerleri.	56
Şekil 4.12	: Zonguldak numunesi üzerinde uygulanan farklı yöntemler ile tahmin edilen toplam gaz içeriği değerleri.	57
Şekil 5.1	: Alpu havzası A damarı tahmin modeli için oluşturulan YSA yapısı. ..	62
Şekil 5.2	: Alpu havzası A damarı modelinin farklı süreçlere ait performans eğrileri.....	62
Şekil 5.3	: Alpu havzası A damarı modelinin farklı süreçlere ait regresyon eğrileri.....	63
Şekil 5.4	: Alpu havzası A damarında farklı yöntemler ile belirlenen gaz içeriği değerleri ile YSA modeli ile tahmin edilen gaz içeriğinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 5.5	: Soma havzası kM2 damarı tahmin modeli için oluşturulan YSA yapısı.....	66
Şekil 5.6	: Soma havzası kM2 damarı modelinin farklı süreçlere ait performans eğrileri.....	67
Şekil 5.7	: Soma havzası kM2 damarı modelinin farklı süreçlere ait regresyon eğrileri.....	68
Şekil 5.8	: Soma havzası kM2 damarında farklı yöntemler ile belirlenen gaz içeriği değerleri ile YSA modeli ile tahmin edilen gaz içeriğinin karşılaştırılması.....	69

KÖMÜR DAMARI GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİN MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Karbon içeriği yüksek, yanıcı, kimsayal ve fiziksel olarak heterojen yapıda organik bir sedimanter kayaç olarak tanımlanan kömür, bitkisel kökenli malzemenin uzun jeolojik zaman dilimleri boyunca yer altına gömülmesi ile ortaya çıkan yüksek basınç ve yüksek sıcaklık etkilerinin beraberinde getirdiği kimyasal, fiziksel ve yapısal bozunmalar sonucunda oluşmaktadır. Kömürleşme olarak isimlendirilen bu süreçte, biyojenik gaz oluşumu ve termojenik gaz oluşumu olarak isimlendirilen iki temel mekanizma sonucunda farklı bileşimlere sahip gazlar oluşmaktadır. Kömür bünyesindeki organik içeriğin mikroorganizmalar tarafından parçalanması esnasında düşük sıcaklıklarda gaz oluşumu biyojenik gaz oluşumu olarak, yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle kömürün kimyasal bağlarında meydana gelen bozunmalar sonucunda gaz oluşumu ise termojenik gaz oluşumu olarak tanımlanmaktadır. Oluşan gazlar, kömürün bünyesinde depolanabilmekte ve bu sebeple kömür damarları gaz ihtiva eden formasyonlar olarak tanımlanmaktadır. Kömür damarlarında gaz sorpsiyonu mikro gözeneklerde (< 2 nm) adsorbe halde, klit – çatlak sistemi ile mezo ($2 - 50$ nm) ve makro gözeneklerde (> 50 nm) serbest halde, çatlak sistemindeki su içerisinde absorbe olmuş halde olmak üzere üç farklı mekanizma ile açıklanmaktadır. Kömür damarlarının sorpsiyon kapasitesi ise sıcaklık, basınç, kömürleşme derecesi, maseral bileşimi, gözeneklilik, nem ve kül içeriği, efektif gerilme gibi çok sayıda parametreden etkilenmektedir. Bu kompleks sorpsiyon mekanizması sonucunda kömür bünyesinde depolanan gaz miktarı genellikle kömürün maksimum gaz tutma kapasitesinin altında kalmakta, kömür damarları doğada çoğunlukla gaz bakımından tamamen doygun halde bulunmamaktadır. Birim kömür kütlesinin ihtiva ettiği gaz hacmi ise “gaz içeriği” olarak tanımlanmaktadır. Kömür damarlarının bünyesinde depolanan bu gaz içeriği, farklı bileşimlere sahip olabilse de yüksek oranlarda metan içermesi sebebiyle kömür kökenli metan olarak da isimlendirilmektedir. Kömür kökenli metan, patlayıcı özelliği sebebiyle madencilik tarihi boyunca çok sayıda ve büyük ölçekte maden kazasının oluşmasında rol oynamıştır. Oluşturduğu risklerin yanı sıra kömür kökenli metan, günümüzde artan enerji taleplerini karşılamak adına ankonvansiyonel gaz kaynağı olarak değerlendirilmekte ve ekonomik olarak üretimi gerçekleştirilmektedir. Yeraltı kömür madenlerinde grizu ile mücadele amacıyla havalandırma ve drenaj sistemlerinin tasarlanmasında, ekonomik olarak üretim gerçekleştirilecek kömür damarlarında rezervuar çalışmalarında ve atmosfere yayılacak metan miktarlarının öngörülmesinde gaz içeriği parametresinin belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Kömürün gözenekli ve heterojen yapısı gereği kömür damarlarında gaz sorpsiyonu, yayılımı ve taşınımı geleneksel gaz rezervuarlarından ayrılmakta ve bu sebeple geleneksel gaz rezervuar değerlendirme yöntemleri kömür damarlarında uygulanamamaktadır. Kömür damarlarında depolanan gaz miktarının belirlenmesi adına günümüze dek çok sayıda gaz içeriği belirleme yöntemi

geliştirilmiştir. Bu yöntemler başlıca doğrudan (direkt) yöntemler ve dolaylı (indirekt) yöntemler olmak üzere iki ana sınıfta incelenmektedir. Temel olarak kömürlerin gaz tutma kapasitesinin tahmin edilmesi veya ölçülmesi amacıyla geliştirilen dolaylı (indirekt) yöntemler, adsorpsiyon izotermi ve ampirik eşitlikleri kapsamakla beraber genellikle gaz içeriğini aşırı tahmin etmektedir. Doğrudan (direkt) yöntemler ise desorpsiyon deneylerinin ihtiyaç duyduğu zamana göre yavaş desorpsiyon yöntemler (USBM yöntemi, Değiştirilmiş USBM yöntemi, GRI yöntemi, Smith & Williams yöntemi, Eğri uydurma yöntemleri) ile hızlı desorpsiyon yöntemler (Avustralya standart yöntemi, CSIRO – CET yöntemi) olmak üzere iki ana başlıkta sınıflandırılmakta ve toplam gaz içeriğini kayıp gaz miktarı (Q_1), yayılan gaz miktarı (Q_2) ve artık gaz miktarı (Q_3) olmak üzere üç ana bileşene ayırarak incelemektedir. Farklı doğrudan yöntemler, bu bileşenlere ait farklı ölçüm ve tahmin prosedürleri barındırmakta veya geliştirilme amacına bağlı olarak bileşenlerin yalnızca ikisinin belirlenmesine gereksinim duymaktadır. Günümüzde bir endüstri standardı haline gelmiş, yaygın kullanım alanı bulunan ve güvenilirliği en yüksek yöntem olarak sınıflandırılan USBM doğrudan yöntemi ise her üç bileşenin yüzeyden alınan karot numuneler kullanılarak belirlenmesini önermekte ve yüksek maliyet ile uzun zaman gerektirmektedir. Hızlı karar ve aksiyonların alınabilmesine adına kömür damarlarında gaz içeriğinin mümkün olan en kısa sürede, düşük maliyetler ve yüksek güvenilirlik ile belirlenmesi maden ve petrol endüstrisinin ortak bir ihtiyacı konumundadır. Bu çalışmada, USBM doğrudan yöntemine kıyasla daha kısa zaman ve düşük maliyet ile güvenilir sonuçlar ortaya koyabilecek gaz içeriği belirleme yöntemleri araştırılmıştır. Bu doğrultuda, farklı kömürleşme derecelerine ve gaz içeriklerine sahip Eskişehir – Alpu, Manisa – Soma ve Zonguldak kömür havzalarından alınan numuneler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya konu olan her bir havzada öncelikle saha çalışmaları gerçekleştirilmiş ve karotlu sondaj faaliyetleri esnasında numuneler alınarak sızdırmaz kanisterlere yerleştirilmiş, USBM yöntemi kullanılarak gaz içeriği belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon ölçümlerinin tamamlanmasının ardından numuneler üzerinde kısa kimyasal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiş ve numunelerin ASTM D388 standardına göre kömürleşme dereceleri Alpu numunesi için linyit B, Soma numunesi için alt Bitümlü C, Zonguldak numunesi için ise düşük uçuculu bitümlü olmak üzere sınıflandırılmıştır. Sonrasında numunelere ait desorpsiyon verileri ile Smith & Williams yöntemi, Amoco eğri uydurma yöntemi, analitik yöntem ve Kim eşitliği yöntemleri uygulanmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizlere göre, Alpu havzasında USBM yöntemi ile $1,12 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak belirlenen gaz içeriğine en yakın sonuç Amoco eğri uydurma yöntemi kullanılarak $1,00 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak, Soma havzasında USBM yöntemi ile $2,78 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak belirlenen gaz içeriğine en yakın sonuç Smith & Williams yöntemi ile $1,96 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak, Zonguldak havzasında USBM yöntemi ile $11,23 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak belirlenen gaz içeriğine en yakın sonuç ise analitik yöntem kullanılarak $10,01 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Farklı kömürleşme dereceleri ve gaz içeriği değerlerine sahip örneklerde her bir yöntemin USBM yöntemine kıyasla gösterdiği performans değişiklik göstermiş, konvansiyonel gaz içeriği belirleme yöntemleri ile tekrarlanabilir ve güvenilir sonuçlar elde etmenin numune özelliklerine bağlı olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, havza özelinde mümkün olan en kısa süre içerisinde sonuç verebilecek, düşük maliyet ve yüksek güvenilirliğin hedeflendiği yapay sinir ağları temelli tahmin modeli geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalara ait veri seti farklı lokasyon ve derinliklere ait, Alpu kömür havzası A damarından toplamda 90 adet numune, Soma kömür havzası kM2 damarından ise toplamda 60 adet numune oluşturmaktadır. Zonguldak havzasına ait veri seti sınırlı olduğu için tahmin modeli

geliştirme çalışmalarına dahil edilmemiştir. Tahmin modellerinde kısa kimyasal analiz sonuçları ve derinlik bilgisi girdi parametresi olarak, USBM doğrudan yöntemi ile elde edilmiş orijinal bazda gaz içeriği değerleri ise çıktı parametresi olarak kullanılmıştır. Model geliştirme sürecinde Matlab R2022b paket programı ve “Neural Net Fitting” araç kutusu kullanılmış ve her iki havzaya ait veri setleri %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test verisi olacak şekilde dağıtılmıştır. Modellerde öğrenme algoritması olarak Lavenberg – Marquardt yöntemi, gizli katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak hiperpolik tanjant fonksiyonu ve çıktı katmanında ise doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Farklı gizli katman ve nöron sayıları seçilerek farklı modeller geliştirilmiş, modellerin hata miktarları ve bellek tüketimleri göz önüne alınarak aşırı uyumdan uzak, uygun gizli katman ve nöron sayıları tercih edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, Alpu havzası A damarı için 1 gizli katman ve 14 nörondan oluşan yapay sinir ağı ile geliştirilen tahmin modelinde yüksek determinasyon katsayısı ($R^2 = 0,90$) elde edilirken, Soma havzası kM2 damarı için 1 gizli katman ve 20 nörondan oluşan yapay sinir ağı ile geliştirilen tahmin modelinde görece daha düşük bir determinasyon katsayısı ($R^2 = 0,76$) elde edilmiştir. Alpu havzası A damarı için geliştirilen tahmin modelinin havzada gerçekleştirilecek çalışmalarda yüksek güvenilirlik ile kullanılabileceği, Soma havzası kM2 damarı için geliştirilen tahmin modelinin ise güçlü bir ön değerlendirme aracı olarak kullanılabileceği görülmüştür.



ASSESSMENT OF COAL SEAM GAS CONTENT DETERMINATION METHODS AND DEVELOPMENT OF PREDICTION MODELS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

SUMMARY

Coal, defined as an organic sedimentary rock with high carbon content, combustible, and chemically and physically heterogeneous structure, is formed through chemical, physical, and structural decomposition resulting from high pressure and high temperature during prolonged geological periods of submersion of plant-derived material. In the process known as coalification, two primary mechanisms result in the generation of gases with different compositions: biogenic gas generation and thermogenic gas generation. The generation of gas at low temperatures during the decomposition of organic matter in coal by microorganisms is termed biogenic gas generation, whereas gas generation resulting from the degradation of chemical bonds in coal under the influence of high temperature and pressure is termed thermogenic gas generation. These gases can be stored within the coal, leading coal seams to be defined as gas-containing formations. Gas sorption in coal seams is explained through three different mechanisms: adsorption in micro-pores (<2 nm), free state in the cleat and fracture system within meso (2-50 nm) and macro pores (>50 nm), and absorption in water within the fracture system. The sorption capacity of coal seams is influenced by numerous parameters such as temperature, pressure, coalification degree, maceral composition, porosity, moisture, and ash content, as well as effective stress. As a result, the quantity of gas stored within coal generally remains below its maximum gas holding capacity, and coal seams are typically not found to be fully saturated with gas in natural settings. The volume of gas contained in a unit mass of coal is termed “gas content.” This gas content, though it may vary in composition, is often referred to as coalbed methane due to its high methane content. Coalbed methane has played a significant role in numerous and large-scale mining accidents throughout mining history due to its explosive nature. Besides posing risks, coalbed methane is currently considered an unconventional gas source to meet increasing energy demands and is produced economically. In underground coal mines, determining the gas content parameter is critically important in designing ventilation and drainage systems to prevent firedamp, conducting reservoir studies in coal seams targeted for economic production, and predicting methane emissions to the atmosphere. Due to the porous and heterogeneous nature of coal, gas sorption, diffusion, and transport in coal seams differ from traditional gas reservoirs, rendering conventional gas reservoir evaluation methods inapplicable to coal seams. Numerous methods for determining the gas content in coal seams have been developed to date, broadly classified into direct and indirect methods. Indirect methods, developed primarily to estimate or measure the gas holding capacity of coals, include adsorption isotherms and empirical equations but generally tend to overestimate gas content. Direct methods, however, are categorized into slow desorption methods (USBM method, Modified USBM method, GRI method, Smith & Williams method, Curve fitting methods) and rapid desorption

methods (Australian standard method, CSIRO – CET method) based on the time required for desorption experiments and evaluate total gas content by dividing it down into three main components: lost gas (Q_1), desorbed gas (Q_2), and residual gas (Q_3). Different direct methods involve various measurement and estimation procedures for these components or, depending on the development purpose, may require determining only two of the components. The USBM direct method, classified as an industry standard with widespread use and high reliability today, proposes determining all three components using core samples taken from the surface, requiring high cost and time. To facilitate quick decision-making and actions, there is a common need in the mining and petroleum industries to determine the gas content in coal seams in the shortest possible time, at low costs, and with high reliability. This study investigated gas content determination methods that could yield reliable results in shorter times and at lower costs compared to the USBM direct method. Accordingly, studies were conducted on samples from the Eskişehir-Alpu, Manisa-Soma, and Zonguldak coal basins, each with different coalification degrees and gas contents. Initially, field studies were conducted in each basin, and samples were taken and placed in sealed canisters during drilling activities, followed by gas content determination studies using the USBM method. After completing desorption measurements, proximate analysis studies were performed on the samples, classifying the coalification degrees according to the ASTM D388 standard as lignite B for the Alpu sample, sub-bituminous C for the Soma sample, and low volatile bituminous for the Zonguldak sample. Subsequently, desorption data for each sample were applied to the Smith & Williams method, Amoco curve fitting method, analytical method, and Kim method, and the results were comparatively analyzed. According to these analyses, the most comparable result to the gas content determined by the USBM method ($1.12 \text{ cm}^3/\text{g}$) in the Alpu basin was obtained using the Amoco curve fitting method ($1.00 \text{ cm}^3/\text{g}$). In the Soma basin, the most comparable result to the USBM method ($2.78 \text{ cm}^3/\text{g}$) was achieved using the Smith & Williams method ($1.96 \text{ cm}^3/\text{g}$). For the Zonguldak basin, the most comparable result to the gas content determined by the USBM method ($11.23 \text{ cm}^3/\text{g}$) was provided by the analytical method ($10.01 \text{ cm}^3/\text{g}$). The performance of each method compared to the USBM method varied among samples with different coalification degrees and gas content values, indicating that obtaining reproducible and reliable results with conventional gas content determination methods depends on sample characteristics. Accordingly, studies were conducted to develop an artificial neural network-based prediction model targeting high reliability, low cost, and quick results specific to each basin. The dataset for these studies comprised a total of 90 samples from seam A of the Alpu coal basin and 60 samples from seam kM2 of the Soma coal basin. Due to limited data, the Zonguldak basin was not included in the prediction model development studies. In the prediction models, proximate analysis results and depth information were used as input parameters, and gas content values obtained by the USBM direct method were used as output parameters. During model development, MATLAB R2022b software and the Neural Net Fitting toolbox were used, with the datasets from both basins divided into 70% training, 15% validation, and 15% test data. The Levenberg-Marquardt method was used as the learning algorithm, the hyperbolic tangent function as the activation function in hidden layers, and the linear function in the output layer. Various models were developed by selecting different numbers of hidden layers and neurons, and models were chosen based on error amounts and memory consumption, avoiding overfitting. As a result of these studies, a high coefficient of determination ($R^2 = 0.90$) was obtained for the prediction model developed with an artificial neural network comprising one hidden layer and 14

neurons for seam A of the Alpu basin, whereas a relatively lower coefficient of determination ($R^2 = 0.76$) was obtained for the prediction model developed with an artificial neural network comprising one hidden layer and 20 neurons for seam kM2 of the Soma basin. The prediction model developed for seam A of the Alpu basin was found to be highly reliable for future studies in the basin, while the prediction model developed for seam kM2 of the Soma basin could be used as a robust preliminary evaluation tool.





1. GİRİŞ

Kömürleşme süreci boyunca çok sayıda parametreye bağlı olarak oluşan ve kömür damarlarının bünyesinde depolanan gaz, farklı bileşimlere sahip olabilse de yüksek oranlarda metan içermesi sebebiyle kömür kökenli metan olarak isimlendirilmektedir (Moore, 2012). Kömür kökenli metan, yeraltı madenlerinde yüzyıllar boyunca büyük ölçekte kazaların meydana gelmesine sebep olmuştur (McPherson, 1993). Günümüzde yeraltı madenlerinde oluşturduğu risk haricinde kömür kökenli metan, ankonvansiyonel bir gaz kaynağı olarak değerlendirilmekte, ABD, Kanada ve Çin Halk Cumhuriyeti başta olmak üzere çok sayıda ülkede ekonomik olarak üretimi gerçekleştirilmektedir (Hou ve diğ, 2020). Buna ek olarak günümüzde artan çevre endişeleri, karbondioksit kısıyasla 21 kat daha fazla sera gazı etkisi bulunan metanın atmosfere salınımının yönetilmesi ile ilgili süreçlere dikkat çekmektedir (Warmuzinski, 2008).

Kömür damarlarının birim kütle başına ihtiva ettiği gaz miktarı olarak tanımlanan gaz içeriğinin bilinmesi, yeraltı maden havalandırma ve drenaj sistemlerinin tasarlanmasında, ekonomik olarak üretilmesi planlanan kömür damarlarında rezervuar çalışmalarında ve atmosfere yayılacak metan miktarlarının kontrol altına alınması süreçlerinde kritik bir öneme sahiptir.

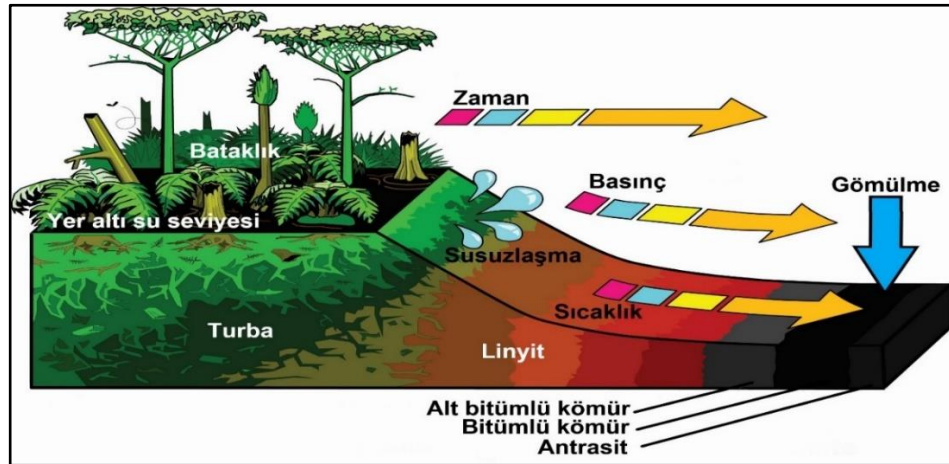
Günümüze dek doğrudan yöntemler ve dolaylı yöntemler olarak sınıflandırılan çok sayıda gaz içeriği belirleme yöntemi geliştirilmiştir. Doğrudan yöntemler, aylarca sürebilen desorpsiyon deneylerine ihtiyaç duyarken, esas olarak kömür damarlarının gaz tutma kapasitesinin tahmininde kullanılmak üzere geliştirilen dolaylı yöntemler çoğunlukla gaz içeriğini hatalı olarak tahmin etmektedir. Günümüzde en güvenilir doğrudan yöntem olarak değerlendirilen ve kapsamlı analizlere ihtiyaç duyan USBM gaz içeriği belirleme yöntemi ise deney sürecinin en uzun olduğu yöntemlerden biridir. Hızlı karar ve aksiyonların alınabilmesi adına kömür damarlarının gaz içeriğini daha kısa zaman dilimlerinde daha düşük maliyetler ile belirleyebilmek ise maden ve petrol endüstrisinin ortak bir ihtiyacıdır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, USBM doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemine kıyasla daha kısa zaman süreçlerinde daha düşük maliyetler ile güvenilir sonuçlar ortaya koyabilecek gaz içeriği belirleme yöntemlerinin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda öncelikle, farklı kömürleşme derecelerine ve farklı gaz içeriği değerlerine sahip Eskişehir – Alpu, Manisa – Soma ve Zonguldak kömür havzalarından alınan numuneler üzerinde geleneksel gaz içeriği belirleme yöntemleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sonrasında, çalışmaya konu olan kömür havzalarında yapay sinir ağları kullanılarak farklı gaz içeriği tahmin modelleri geliştirilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılmış, geleneksel yöntemlerin ve yapay sinir ağları ile geliştirilen tahmin modellerinin farklı havzalar ve farklı gaz içeriği değerlerindeki performansı irdelenmiştir.

2. KÖMÜRLEŞME SÜRECİNDE GAZIN OLUŞUMU VE DEPOLANMASI

Kömür karbon içeriği yüksek, tabakalaşma özelliği gösteren, yanıcı, kimyasal ve fiziksel olarak heterojen yapıda organik bir sedimanter kayaç olarak tanımlanmaktadır. Kömürün bünyesinde organik madde olarak başlıca karbon, hidrojen, azot, kükürt ve oksijen elementleri bulunmakta, inorganik madde olarak ise 60'a varan sayıda farklı mineral türü (kil, pirit, markazit, kalsit, silika vb.) bulunabilmektedir (Riley, 2014). Bitkisel kökenli malzemenin bataklık ortamında birkaç yüz milyon yıla varan uzun jeolojik zaman dilimleri boyunca yer altına gömülmesiyle ortaya çıkan yüksek basınç ve yüksek sıcaklık etkilerinin beraberinde getirdiği kimyasal, fiziksel ve yapısal bozunmalar sonucunda kömür oluşmakta ve tüm bu süreç "kömürleşme" olarak isimlendirilmektedir (Şekil 2.1) (Ward ve Suárez-Ruiz, 2008). Kömürleşme süreci boyunca organik içeriğin özelliklerinde meydana gelen bu değişiklikler sonucunda kömürün yoğunluğu ve karbon içeriği artarken, nem içeriği azalmakta ve kömür dayanım açısından daha sert bir hale gelmektedir (Flores, 2014). Dolayısıyla, kömürün maruz kaldığı alterasyon seviyesine bağlı olarak fiziksel, kimyasal ve petrografik olarak farklı özellikler gösteren kömür çeşitleri oluşmaktadır. Oluşan bu kömür çeşitleri, termal olgunluklarına göre rank (kömürleşme derecesi) sistemleri ile sınıflandırılmakta ve ASTM tarafından geliştirilmiş sabit karbon, uçucu madde ve kalorifik değer gibi kriterlerin göz önüne alındığı rank sınıflama sistemi günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Çizelge 2.1).



Şekil 2.1 : Kömürleşme süreci (Greb ve diğ., 2006).

Çizelge 2.1 : ASTM standardına göre kömürleşme derecesi (rank) sınıflama sistemi (ASTM, 2023).

Sınıf	Grup	Sabit Karbon _{d, MMf} (%)		Uçucu Madde _{d, MMf} (%)		Kalorifik Değer _{m, MMf} (MJ/kg)	
		≥	<	>	≤	≥	<
Antrasit	Meta-Antrasit	98	-	-	2	-	-
	Antrasit	92	98	2	8	-	-
	Yarı-Antrasit	86	92	8	14	-	-
Bitümlü	Düşük Uçuculu	78	86	14	22	-	-
	Orta Uçuculu	69	78	22	31	32,557	-
	Yüksek Uçuculu A	-	69	31	-	30,232	32,557
	Yüksek Uçuculu B	-	-	-	-	26,743	30,232
	Yüksek Uçuculu C	-	-	-	-	24,418	26,743
Alt Bitümlü	Alt Bitümlü A	-	-	-	-	24,418	26,743
	Alt Bitümlü B	-	-	-	-	22,09	24,418
	Alt Bitümlü C	-	-	-	-	19,30	22,09
Linyit	Linyit A	-	-	-	-	14,65	19,30
	Linyit B	-	-	-	-	-	14,65

d, MMf: kuru - mineral maddesiz baz, m, MMf: nemli - mineral maddesiz baz.

Kömür oluşumunun başlangıcında kritik bir öneme sahip olan turbalaşma, bitki ve hayvan kalıntıları gibi organik kökenli malzemenin yapısında meydana gelen humifikasyon, jelleşme gibi kimyasal ve mikrobiyel değişiklikler sonucunda turbaya dönüşme süreci olarak tanımlanmaktadır (Flores, 2014). Turbalaşma süreci boyunca meydana gelen bu bileşimsel değişiklikler kömürleşme sürecinde meydana gelen değişikliklerden temel olarak farklıdır ve bu sebeple turbalaşma, kömürleşme sürecinden bağımsız bir süreç olarak değerlendirilmektedir (Levine, 1993).

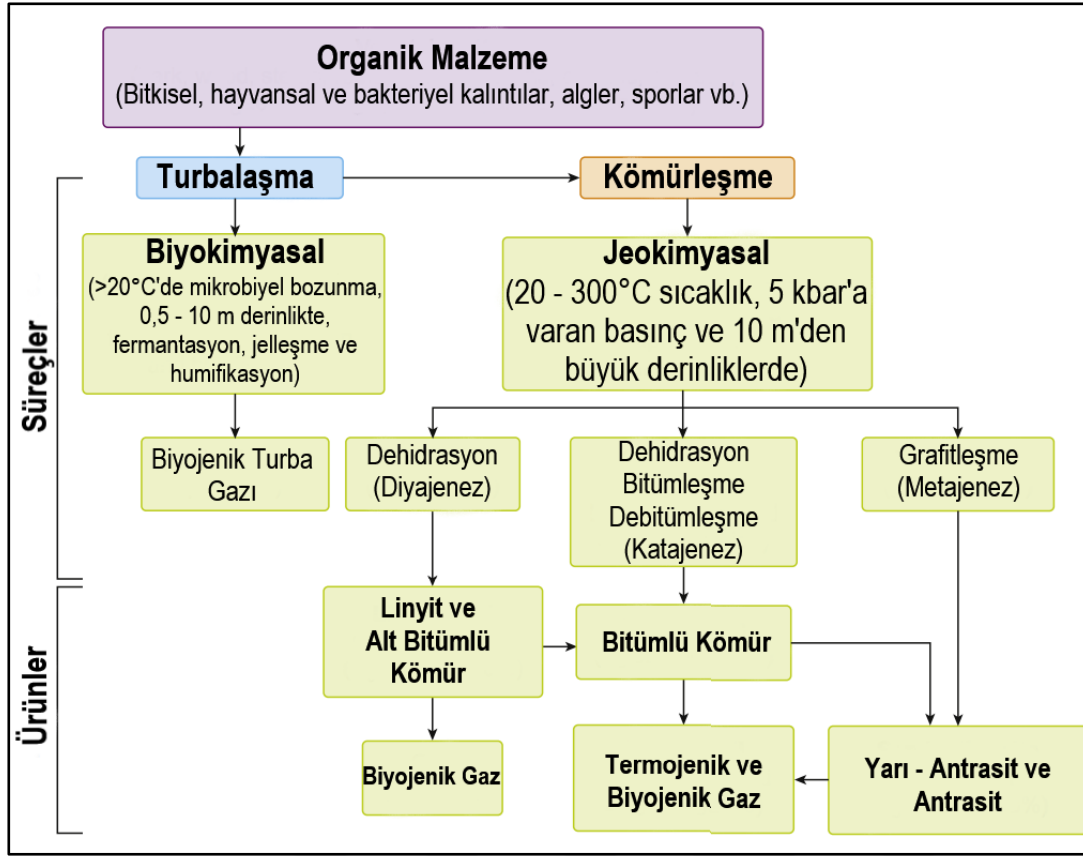
Turbanın olgunlaşma sürecini tanımlayan kömürleşme süreci ise dehidrasyon, bitümleşme, debitümleşme ve grafitizasyon olmak üzere dört farklı aşama altında incelenmektedir ve kömürün olgunlaşma süreci boyunca yaşanan bu aşamalar Çizelge 2.2’de özetlenmiştir (Flores, 2014).

Kömürleşmenin ilk aşaması olan dehidrasyon aşamasında turba fiziksel olarak sıkışmaya uğramakta, kalorifik değeri ve yoğunluğu artmaktadır. Bu aşamada, turba bünyesinde bulunan suyun, karboksilik asitlerin ve karbondioksitin önemli bir bölümünün dışarı atılmasıyla gözeneklilik büyük ölçüde azalmaktadır. Aynı zamanda, turba linyit ve alt bitümlü kömüre dönüşmeye başlamakta ve metan depolama kapasitesi katlanarak artmaktadır.

Kömür olgunlaşmasının bir sonraki aşaması olan bitümleşme aşamasında hidrokarbonlar oluşmaya ve depolanmaya başlanmakta, kömürün hidrojen bağları, mukavemeti, parlaklığı ve maksimum gaz depolama kapasitesi artmaktadır. Bununla beraber, termojenik gaz oluşumu da bu aşamada başlamaktadır.

Debitümleşme aşamasında ise termojenik gazın oluşumu maksimum seviyelere çıkmakta, kömür bünyesindeki kırık-çatlaklar büyümeye başlamakta, mukavemet azalmakta ve bu aşamada tüm kömürleşme süreci boyunca gözlemlenen en düşük bünye nemi değerleri gözlemlenmektedir.

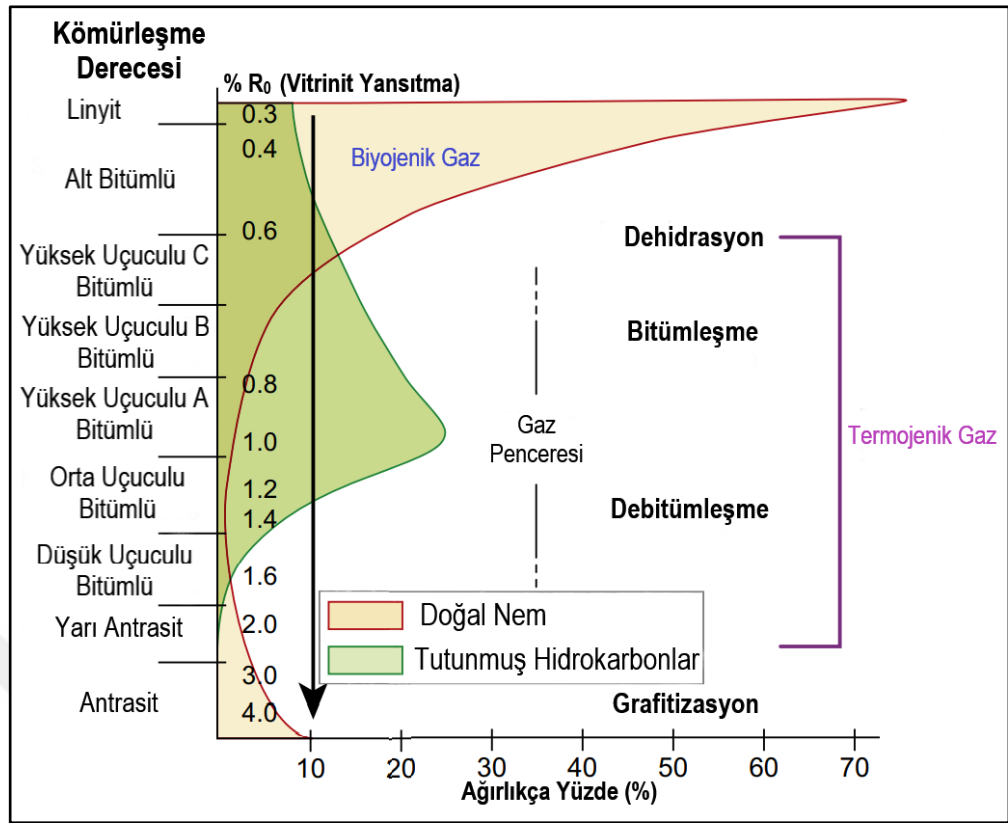
Kömürleşmenin son aşaması olan grafitizasyon aşamasında ise azot ve hidrojen içeriğinin önemli ölçüde azalmasıyla bileşimin hemen hemen tamamı karbon olarak gözlemlenmekte, dayanım artmakta, gaz üretimi azalmakta ancak üretilen gazın depolanma kapasitesi artmaya devam etmektedir. Bu aşamada kömür yarı antrasitten meta antrasit düzeyine doğru gelişmekte ve kömürleşme süreci tamamlanmaktadır.



Şekil 2.2 : Turbalaşma ve kömürleşme süreci boyunca oluşan ürünler (Flores, 2014).

2.1 Kömürde Gaz Oluşumu

Kömürleşme süreci boyunca yaşanan evreler neticesinde gazların oluşması ve oluşan bu gazların kömür bünyesinde depolanabilmesi ile birlikte kömür yatakları, gaz ihtiva eden formasyonlar olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçte gaz, termojenik gaz oluşumu ve biyojenik gaz oluşumu olarak isimlendirilen birbirinden bağımsız iki temel mekanizma sonucunda oluşmaktadır (Şekil 2.3) (Rice, 1993). Kömürün gaz bileşimini %80 – 99 oranında metan (CH_4) oluşturmakta ve bu sebeple kömür gazı, kömür kökenli metan (CBM) olarak da isimlendirilmektedir (Kemp ve Petersen, 1988). Kömürleşme sırasında metanın yanı sıra etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}) gibi ağır hidrokarbonlar, karbondioksit (CO_2), azot (N_2) ve düşük miktarlarda hidrojen sülfür (H_2S) oluşmaktadır (Crosdale ve diğ, 1998). Kömürleşme seviyesi (rank), gaz kökeninin termojenik veya biyojenik olması, kömür maseralinin elementel bileşimi ve kömür matrisinde yüksek karbon sayılı alkanların bulunması kömür gazının bileşimini etkileyen başlıca parametrelerdir (Rigby ve Smith, 1982; Rice ve diğ, 1989; Clayton, 1998).



Şekil 2.3 : Kömürleşme sürecinde gaz oluşumu (Flores, 2014).

2.1.1 Termojenik gaz oluşumu

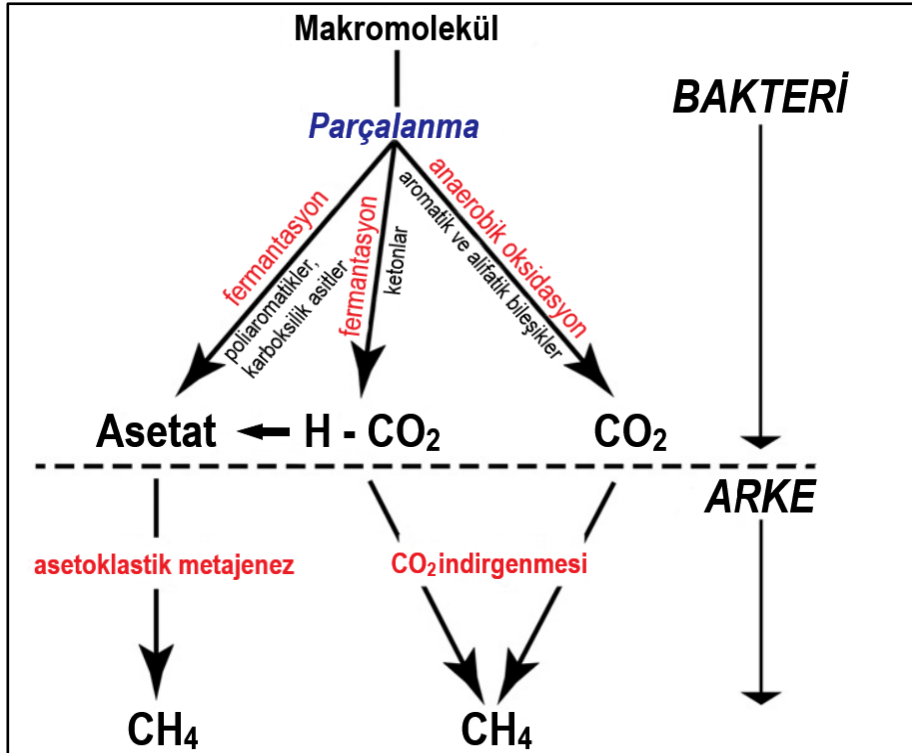
Zaman, sıcaklık ve basıncın etkili olduğu termojenik süreçte gaz oluşumu, kömürleşme derecesi yaklaşık %0,5 – 0,6 vitrinit yansıtma (R_0) seviyesine ulaştığında başlamakta, yaklaşık R_0 %1,2 seviyesinde maksimum oluşum gerçekleşmekte ve R_0 %3,0 seviyesine kadar azalarak devam etmektedir (Clayton, 1998; Gao ve diğ, 2014). Bu süreçte, artan sıcaklığın etkisiyle kömürün kimyasal bağlarında kopmalar meydana gelmekte ve uçucu madde içeriği %35'in altına indiğinde ana olarak metan ve diğer hidrokarbonlar, bunun yanı sıra büyük miktarda su ve karbondioksit oluşumu söz konusu olmaktadır (Karweil, 1969; Juntgen ve Klein, 1975; Hunt, 1979; Johnson ve Flores, 1998).

Termojenik gaz oluşumu temel olarak, erken evre ve ana evre olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Erken termojenik gaz oluşumu, hidrojen bakımından zengin olan yüksek uçuculu bitümlü kömür aşamasında başlamakta ve önemli miktarlarda etan, propan ve diğer yaş hidrokarbonlar oluşmaktadır (Scott ve diğ, 1994). Bu erken evrede yaşanan dekarboksilasyon ve dehidrasyon sonucunda karbondioksit ile su oluşumu da görülmektedir. Ana termojenik evrede ise ($R_0 > \%0,8$), sıcaklık ve basıncın artması ile birlikte oluşan hidrokarbon miktarı da artmaktadır.

Kömürün vitrinit yansıtma değeri %1,2'yi aştığında ise sıvı hidrokarbonların oluşumu azalırken, metan gazının oluşumu artmaktadır. Bu aşamada metan gazı oluşumunun artmasının sebebi, kömür bünyesinde kalan alifatik bileşikler ile önceden oluşmuş hidrokarbonların termal yolla parçalanarak metan oluşturmaları olarak açıklanmaktadır (Gao ve diğ, 2014). Termojenik süreç ile gaz oluşumu her ne kadar kömürün rankına, bileşimine, olgunlaşma seviyesine, zamana ve sıcaklığa bağlı olarak gelişse de bu faktörlerin etkileri havzadan havzaya farklılık göstermektedir (Alsaab ve diğ, 2008; Lo ve diğ, 1997). Bu sebeple, her bir faktörün spesifik kömür damarlarında gaz üretimi ve bileşimine olan etkilerini anlayabilmek için birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.1.2 Biyojenik gaz oluşumu

Turbalaşma ve kömürleşme süreçlerinde, organik içeriğin mikroorganizmalar tarafından parçalanması esnasında düşük sıcaklıklarda gaz oluşması, biyojenik gaz oluşum süreci olarak tanımlanmaktadır (Gao ve diğ, 2014). Biyojenik gaz oluşumunda bakteri ve arkeler önemli rol oynamaktadır. Bakteriler, kömür gözeneklerinde fermentasyon ve anaerobik oksidasyon yoluyla ilk parçalanmayı başlatmakta, sonrasında ise arkeler asetoklastik metajenez veya karbondioksit indirgenmesi yoluyla gaz oluşturmaktadır (Şekil 2.4) (Moore, 2012).



Şekil 2.4 : Biyojenik metan oluşumu (Moore, 2012).

Biyojenik olarak oluşan gazın bileşimini büyük miktarda metan, düşük seviyelerde hidrokarbon gazları (C_2+) ve genellikle hacimce %5'ten daha düşük miktarlarda karbondioksit oluşturmakla birlikte, oluşan gazın miktarını etkileyen başlıca faktörler düşük sülfat konsantrasyonları, anoksik ortam koşulları, düşük sıcaklıklar, yüksek organik madde içeriği, yeterli gözenek hacmi, yüksek pH değerleri ve çökelmenin hızı olarak tanımlanmaktadır (Rice ve Claypool, 1981; Zhang ve Chen, 1985; Rice, 1992; Gao ve diğ, 2014).

Biyojenik gaz oluşumu, erken evre ve geç evre olmak üzere iki aşamada sınıflandırılmaktadır. Erken evre biyojenik gaz oluşumu, gömülmenin ilk aşamalarında turba ve alt bitümlü kömürlerde ($R_0 < \%0,5$) görülmekte ve oluşan bu gaz genellikle kömür damarlarında depolanamamakta, bataklık gazı olarak atmosfere karışmakta veya suda çözünerek  evre formasyonlara aktarılmaktadır (Rice, 1993; Scott ve diğ, 1994; Flores, 2004).

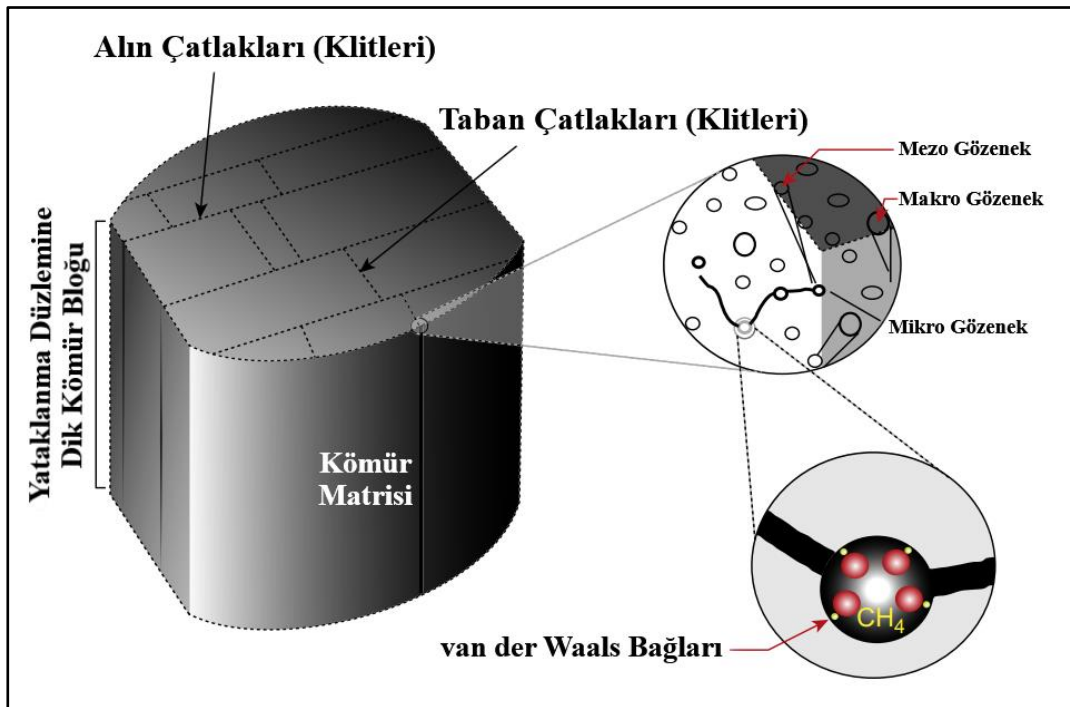
Biyojenik gazın oluşumunu etkileyen faktörlerin sağlanması ile birlikte herhangi bir kömürleşme derecesinde ve görece yakın jeolojik zamanlarda mikroorganizmalar vasıtasıyla gaz oluşması ise geç evre biyojenik gaz oluşumu olarak isimlendirilmektedir (Rice, 1993). Bu aşamada yer altı suları büyük önem taşımakta ve aktif yer altı su sistemleri ile kömür damarlarına taşınan bakteri ve arkeler çoğunlukla karbondioksit indirgenmesi yoluyla gaz oluşurmaktadır (Mares ve Moore, 2008; Gao ve diğ, 2014).

Erken evrede üretilen biyojenik kökenli gazın kömür damarlarında çoğunlukla depolanamaması, geç evrede üretilen biyojenik gazın ise ise çok sayıda çevresel faktörden etkilenmesi sebebiyle kömür damarlarının gaz içeriği çoğunlukla termojenik gaz oluşum süreci ile ilişkilendirilmektedir. Ancak, gaz oluşumunda biyojenik süreçten termojenik sürece uzanan geçişin keskin sınırlara sahip olmaması nedeniyle, biyojenik kökenli ve termojenik kökenli gazların bir aşamada eř zamanlı olarak üretilip, kömür bünyesinde depolanması şüphesiz bir gerçekliktir (Moore, 2012). Buna ek olarak pratik açıdan, tüm çevresel parametrelerin aynı olduğu durumda, sığ kömür damarlarının gaz içeriğinin biyojenik, derin kömür damarlarının gaz içeriğinin ise termojenik kökenli olduğunu söylemek mümkündür (Hackley ve diğ, 2009).

2.2 Kömürde Gazın Depolanması

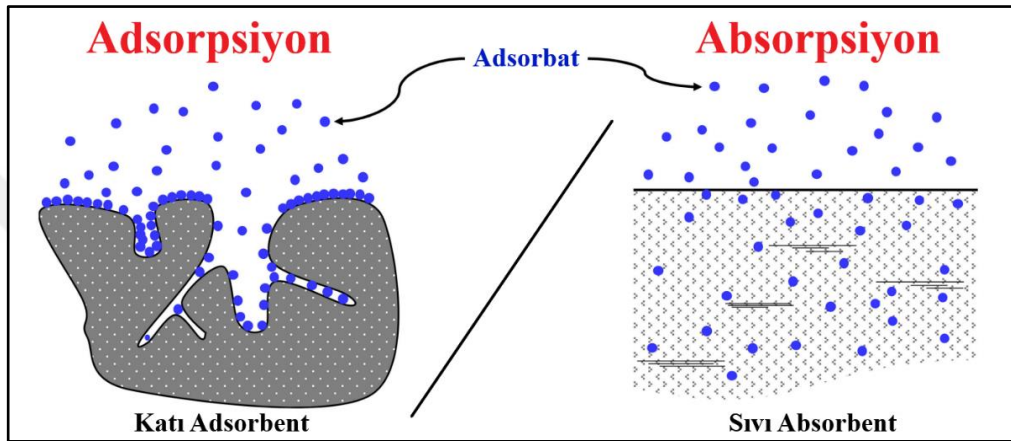
Kömürün gözenekli ve fazlasıyla heterojen yapısı gereği, kömür damarlarında gazın depolanması, yayılması ve taşınımı geleneksel gaz rezervuarlarından ayrılmaktadır. Kömürleşme süreci boyunca termojenik ve biyojenik kökenli olarak oluşan gazların büyük bir bölümü atmosfere veya çevre formasyonlara yayılmakta, geriye kalan gaz miktarı ise kömürün gözeneklerinde ve klit-çatlak sistemlerinde depolanmaktadır (Rice, 1993).

Gözenekler, kömür matrisinde bulunan, genişliği ile şekli değişiklik gösteren ve boyutlarına göre sınıflandırılan açıklıklardır. Buna göre kömür gözenekleri, mikro gözenekler (< 2 nm), mezo gözenekler (2 – 50 nm) ve makro gözenekler (> 50 nm) olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Clarkson ve Bustin, 1996). Klitler ise yataklanma düzlemine ve birbirine dik olarak gelişen ikili (alın klitleri ve taban klitleri) kırık-çatlak sistemleridir. Alın klitleri, tabakalanma düzlemine dik olarak meydana gelmekte ve taban klitlerine nazaran daha sık oluşmakta; taban klitleri ise alın klitlerine dik olarak gelişmekte ve uzunlukları her zaman bir yüzey kliti ile kesiştiği noktada sonlanmaktadır (Moore, 2012). Klit sistemleri ile kömür matrisinde bulunan gözeneklerin görülebileceği bir diyagram Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5 : Kömür matrisinde gözenek dağılımı ve klit sistemlerinin birbiri ile olan etkileşimi (Flores, 2014).

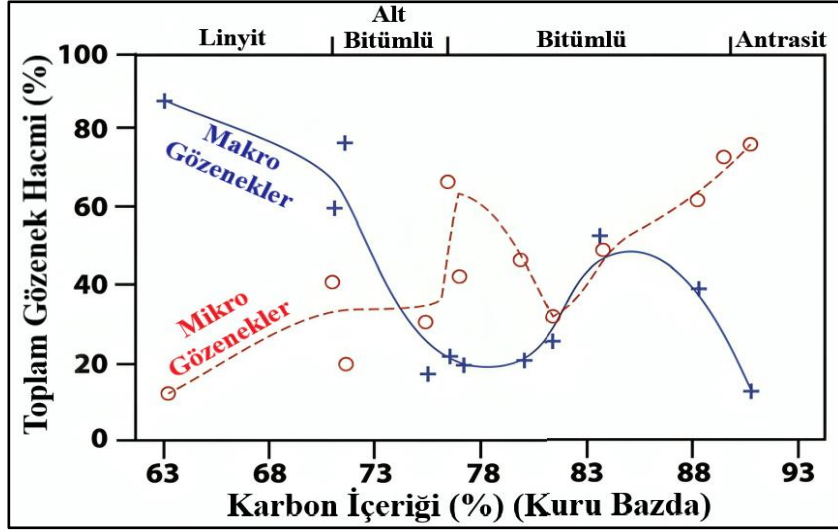
Kömürleşme sürecinde oluşan gaz kömürde sorpsiyon yoluyla depolanmakta, gaz sorpsiyonu ise absorpsiyon ve adsorpsiyon süreçlerini kapsamaktadır. Absorpsiyon, gazın kömürün moleküler yapısında hacimsel bir şekilde çözülme süreci olarak, adsorpsiyon ise gazın kömür gözeneklerinin yüzeyine tutunarak depolanması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.6). Kimyasal adsorpsiyon, gaz molekülleri ile yüzey molekülleri arasında meydana gelen kimyasal bağların bir sonucudur; tersinir bir süreç olan fiziksel adsorpsiyon ise gaz molekülleri ile yüzey molekülleri arasında oluşan zayıf Van der Waals bağlarının sonucunda meydana gelmektedir (Aminian, 2020).



Şekil 2.6 : Adsorpsiyon ve absorpsiyon mekanizmaları (Zbair ve Bennici, 2021).

Kömür bünyesinde gaz sorpsiyonunu açıklayan üç temel mekanizma bulunmaktadır. Buna göre gaz, kömürün mikro gözeneklerinde fiziksel olarak adsorbe halde, klit-çatlak sistemi ile mezo ve makro gözeneklerinde serbest halde ve çatlak sistemindeki su içerisinde çözünmüş (absorbe) halde depolanmaktadır (Bustin ve Clarkson, 1998; Moore, 2012).

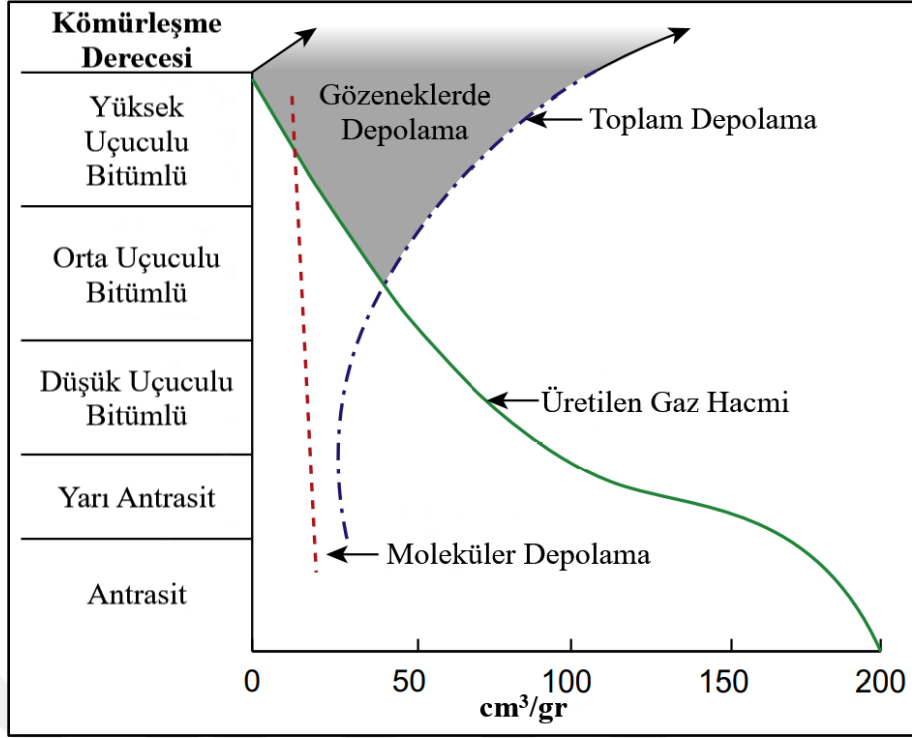
Gözenek boyutlarının dağılımı kömürleşme derecesinin bir fonksiyonu olsa da (Şekil 2.7) yaklaşık olarak kömürdeki açıklıkların %77'sini mikro gözenekler, %5'ini mezo gözenekler, %15'ini makro gözenekler, %3'ünü ise klit-çatlaklar oluşturmakta ve gaz adsorpsiyonunda mikro gözenekler büyük rol oynarken mezo ve makro gözenekler ise gazın taşınım sürecinde etkili olmaktadır (Ceglarska-Stefańska ve Zarębska, 2002; Mardon ve diğ, 2007). Bu dağılımın da etkisiyle, kömür bünyesinde depolanan gazın hacimce %95'ten fazlasını mikro gözeneklerde adsorbe olmuş gaz oluşturmaktadır (Gray, 1987; Harpalani ve Schraufnagel, 1989). Bununla beraber, adsorpsiyon yüzeyde gerçekleşen bir mekanizma olduğundan, kömürlerin gaz tutma kapasitesinde gözenek iç hacminden ziyade gözenek yüzey alanı belirleyici bir faktör olmaktadır (Moore, 2012).



Şekil 2.7 : Kömürleşme derecesine bağlı olarak gözenek boyut dağılımının değişimi (Levine, 1996; Moore, 2012).

Doğada kömür yatakları çoğunlukla gaz açısından tamamen doygun halde bulunmazlar. Bir başka ifade ile, kömür bünyesinde depolanan gaz miktarı genellikle kömürün maksimum gaz tutma kapasitesinin altında kalmakta veya kömürleşme sürecinde depolanabilecek miktardan daha fazla miktarda gaz üretilmektedir. Kömür yataklarında depolanan gaz miktarını (gaz sorpsiyonunu) etkileyen faktörler başlıca kömürleşme derecesi, basınç, sıcaklık, kömürün nem içeriği, maseral bileşimi ve gözenek yapısı olarak sınıflandırılmaktadır (Crosdale ve diğ, 2008).

Artan kömürleşme derecesi ile birlikte kömür yataklarında üretilen gazın miktarı artmakta, ancak kömürleşme derecesi ile gaz sorpsiyonu arasında U-biçimli bir ilişki bulunmaktadır (Yee ve diğ, 1993). Bir noktadan sonra, kömürleşme derecesi arttıkça, kömürün gaz depolama kapasitesi göreceli olarak azalmaktadır. Buna göre, yüksek uçuculu bitümlü kömürlerin sorpsiyon kapasitesi, antrasitin sorpsiyon kapasitesinden yaklaşık dört kat daha fazla olmaktadır (Flores, 2014). Kömürleşme derecesi ile gaz oluşumu ve sorpsiyonu arasındaki ilişki Şekil 2.8’de sunulmuştur. Bununla birlikte, bir kömür damarının gaz sorpsiyon kapasitesini ortaya koymak adına çoğu zaman kömürleşme derecesi tek başına yeterli bir parametre olmamaktadır. Bustin ve Clarkson (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada benzer kömürleşme derecesi ve bileşime sahip Batı Kanada Sedimanter Havzası kömürlerinin gaz depolama kapasitesinin Sidney Havzası’na ait kömürlere kıyasla belirgin seviyede düşük olduğu; Levy ve diğ. (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise benzer kömürleşme derecesine sahip Bowen Havzası kömürlerinin ABD kömürlerine kıyasla %50 daha fazla gaz depolama kapasitesine sahip olduğu ortaya konulmuştur.



Şekil 2.8 : Kömürleşme derecesi ile gaz oluşumu ve depolanması arasındaki ilişki (Rice, 1993; Flores, 2014).

Gaz sorpsiyon mekanizmasının temellerine bağlı olarak, sabit sıcaklık altında basıncın artmasıyla birlikte kömür damarlarının gaz depolama kapasitesi artmakta; kömürün gazca doymun hale gelmeye başlamasıyla birlikte ise bu artış oranı giderek azalmaktadır (Yee ve diğ, 1993). Basınç genellikle derinlik ile ilişkilendirilmekte ve artan derinliğin etkisiyle basınç da artacağından, derinlik ile sorpsiyon kapasitesi arasında doğrudan bir pozitif ilişki olduğu çıkarımı yapılmaktadır. Bu noktada, artan derinlik ile birlikte formasyon sıcaklığı ve kömürleşme derecesinin de artacağı unutulmamalıdır. Yüksek sıcaklık koşulları altında gaz molekülleri çoğunlukla serbest fazda olma eğilimi göstermektedir (Yee ve diğ, 1993). Dolayısıyla, artan sıcaklık ile birlikte kömür damarlarının sorpsiyon kapasitesi azalmaktadır (Busch ve diğ, 2004).

Kömür damarları, kömürleşme derecesine bağlı olarak farklı miktarlarda nem ihtiva etmekte ve kömürleşme derecesi yükseldikçe nem içeriğinin azaldığı bilinmektedir. Artan nem içeriğinin doğal bir sonucu olarak, kömür gözeneklerindeki su miktarı artmakta ve gözeneklerde gaz adsorpsiyonu fiziksel olarak zorlaşmaktadır (Crosdale ve diğ, 2008). Bu sebeple, artan nem içeriği ile birlikte kömür damarlarının sorpsiyon kapasitelerinin azaldığını söylemek mümkündür. Nem içeriği ile adsorpsiyon kapasitesi arasındaki ilişkiyi açıklayan çalışmalardan örnekler Çizelge 2.2’de sunulmuştur.

Çizelge 2.2 : Nem içeriği ile gaz adsorpsiyonu ilişkisi (Chattaraj ve diğ, 2016).

Havza	Gaz	Nem İçeriği Etkisi	Referanslar
Bowen, Avustralya	CH ₄	5 Mpa basınç altında, nem içeriğinde meydana gelen her %1 artış için adsorpsiyon kapasitesi 4,2 m ³ /t azalmıştır.	Levy ve diğ. (1997)
Alt Kretase Gates, Kanada	CO ₂	Kuru kömür örneklerinin gaz tutma kapasitesinin nemli kömür örneklerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.	Clarkson ve Bustin (2000)
Pensilvanya, ABD	CH ₄	40 °C, 60 °C ve 80 °C sıcaklıkları altında kuru kömür örneklerinin sorpsiyon kapasiteleri 11 – 14 cm ³ /g iken, nemli kömür örneklerinde 7 – 11 cm ³ /g olmuştur.	Krooss ve diğ. (2002)
	CO ₂	Nem içeriği yüksek kömürlerde, düşük basınç altında sorpsiyon kapasitesi azalmış; yüksek basınç altında ise (>6 MPa) çift tepeli dağılım görülmüştür.	
Yukarı Silezya, Polonya	CH ₄	Numunelerin gazca doymun hale gelmeleri kuru örneklerde 8 saat, nemli örneklerde ise 45 saat zaman almıştır.	Busch ve diğ. (2004)
	CO ₂	Numunelerin gazca doymun hale gelmeleri kuru örneklerde 2 saat, nemli örneklerde ise 8 saat zaman almıştır.	

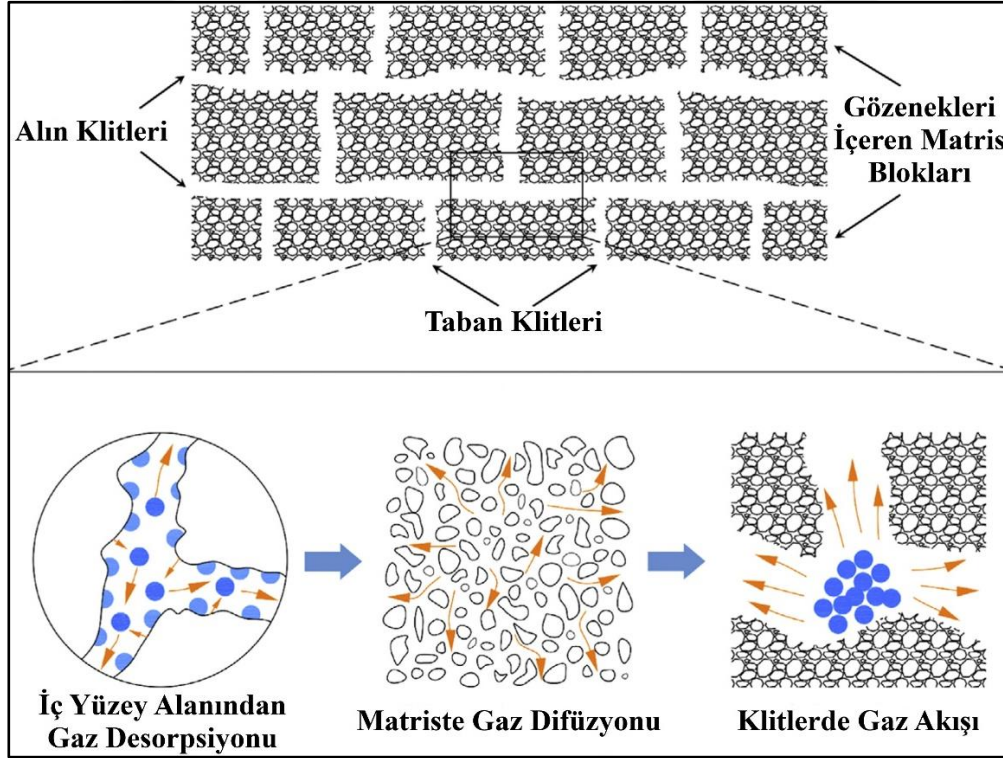
Kömür damarlarının gaz tutma potansiyelini etkileyen bir diğer ana parametre ise kömürün petrografik özellikleridir. Kömür, maseral olarak isimlendirilen organik bileşenler ve mineraller gibi inorganik bileşenlerden meydana gelmektedir. Temelde gaz sorpsiyon mekanizmasının görece karmaşık oluşu ve çok sayıda parametre tarafından etkilenmesi kömür damarlarının bu heterojen yapısının bir sonucudur. Kömür maseralleri mikroskobik organo-petrografik bileşenlerdir ve köken, morfoloji, kimyasal bileşim, reflaktans gibi özelliklere bağlı olarak vitrinit, liptinit ve inertinit olmak üzere üç temel gruba ayrılmaktadır (Flores, 2014). Vitrinit bünyesinde çoğunlukla mikro gözenekler bulunurken, inertinit bünyesinde daha büyük oranda makro gözenek barındırmaktadır (Unsworth ve diğ, 1989). Bahsedildiği üzere, adsorpsiyon süreci mikro gözenekler ile ilişkili olduğundan, kömürün gaz tutma potansiyeli ile vitrinit içeriği arasında pozitif bir ilişki olduğu farklı çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur (Charraraj ve diğ, 2016). Maserale bileşimi de dahil olmak üzere, kömür damarlarında gaz adsorpsiyonunu etkileyen tüm parametreler Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3 : Kömür damarlarının sorpsiyon kapasitelerine etki eden parametreler (Masoudian, 2016).

Parametre	Sorpsiyon Kapasitesi ile İlişki	Referanslar
Kömürleşme Derecesi	Minimum orta ve düşük uçuculu bitümlü kömürlerde olmak üzere U-biçimli ilişki.	Laxminarayana ve Crosdale, 1999; Siemons ve Busch, 2007; Day ve diğ, 2008a; Zhang, 2008; Wang ve diğ, 2015; Weishauptová ve diğ, 2015
Maseral Bileşimi	Vitrinit içeriği yüksek kömürlerde daha yüksek sorpsiyon kapasitesi görülmektedir.	Ceglarska-Stefańska ve Brzóska, 1998; Laxminarayana ve Crosdale, 1999
Kül İçeriği	Kül içeriği arttıkça sorpsiyon kapasitesi azalmaktadır.	Laxminarayana ve Crosdale, 1999; Katyal ve diğ., 2007
Nem İçeriği	Nem içeriği kritik seviyeye (%40 – 80 RH) ulaşana kadar negatif ilişki, nem içeriğinin kritik seviyeyi aştığı durumlarda çok düşük seviyede etki görülmektedir.	Day ve diğ, 2008c; Joubert ve diğ, 1973, 1974; Krooss ve diğ, 2002; Siemons ve Busch, 2007; Weishauptová ve diğ, 2015
Gözeneklilik	Artan gözeneklilik ile birlikte sorpsiyon kapasitesi de artmaktadır.	Day ve diğ, 2008a; Prusty, 2008
Sıcaklık	Sıcaklık arttıkça sorpsiyon kapasitesi azalmaktadır.	Yang ve Saunders, 1985; Azmi ve diğ, 2006; Zhang, 2008
Basınç	Artan basınç ile birlikte sorpsiyon kapasitesi de artmaktadır.	Daines, 1968; Yang ve Saunders, 1985; Krooss ve diğ, 2002; Busch ve diğ, 2003a; Day ve diğ, 2008c; Pune ve diğ, 2009b
Gaz Bileşimi	Metana kıyasla karbondioksit gazı daha kolay adsorbe olmaktadır.	Clarkson ve Bustin, 2000; Krooss ve diğ, 2002; Busch ve diğ, 2006; Brochard ve diğ, 2012
pH Değeri	pH değeri azaldıkça adsorpsiyon kapasitesi artmaktadır.	Schroeder ve diğ, 2001; Azmi ve diğ, 2006
Efektif Gerilme	Artan efektif gerilme ile birlikte adsorpsiyon kapasitesi azalmaktadır.	Hol ve diğ, 2011, 2012a

2.3 Kömürde Gaz Difüzyonu

Kömür damarlarında depolanan gaz molekülleri, yeterli oranda basınç farkı oluştuğunda gözenek ve klit yüzeylerinden ayrılmaya başlamakta, bir başka ifade ile fiziksel adsorpsiyonun tersinir mekanizması olan desorpsiyon süreci başlamaktadır. Kömür damarlarında gaz difüzyonu ve akışını “ikili gözenekli sistem” açıklamakta, akış miktarını ise kömürün difüzyon ve geçirgenlik özellikleri kontrol etmektedir. Buna göre, gaz öncelikle kömür matrisinde bulunan gözeneklerden difüzyon yoluyla ayrılmakta ve buradan klit-çatlak sistemlerine doğru hareket etmektedir (Şekil 2.9) (Flores, 2014). Gazın gözeneklerden matrise difüzyon yolu ile yayılması Fick kanunu ile açıklanırken, klit-çatlak sistemindeki serbest ve laminar akışı Darcy kanunu ile açıklanmaktadır.



Şekil 2.9 : İkili gözenekli sistem ile gaz difüzyon ve akışı (Wang ve diğ, 2021).

Fick kanuna göre, gazın matristeki difüzyonu konsantrasyon farkından kaynaklanmaktadır. Başka bir ifade ile, gaz yüksek konsantrasyonun olduğu bölgeden, düşük konsantrasyonlu bir alana doğru hareket etmektedir. Fick kanunu Eşitlik 2.1’de açıklanmaktadır (Moore, 2012). Buradaki difüzyon oranı ile gözenek sayısı ve dolayısıyla gözenek yüzey alanı arasında da bir ilişki bulunmakta, toplam yüzey alanı arttıkça difüzyon oranı da artmaktadır.

$$F = - D \, dC/dx \quad (2.1)$$

Burada,

F : Difüzyon akışı ($\text{kg/m}^2\text{sn}$),

D : Efektif difüzyon (difüzyon katsayısı) (m^2/sn),

dC/dx : Konsantrasyon farkı ($\text{m}^3 \text{ gaz } / \text{m}^3 \text{ kömür } / \text{m}$).

Darcy kanuna göre ise, gazın kömür klit ve çatlak sistemlerindeki akışı basınç farkından kaynaklanmaktadır. Darcy kanunu Eşitlik 2.2’de sunulmuştur (Flores, 2014). Buna göre, basınç farkı arttığında akış hızı artmakta; kömür geçirgenliği azaldığında ise akış hızı yavaşlamaktadır.

$$v = - \kappa / \mu_f (\nabla P - \rho_f g) \quad (2.2)$$

Burada,

v : Akış hızı (m^3/sn),

κ : Geçirgenlik fonksiyonu (darcy/millidarcy),

μ_f : Akışkanın viskozitesi (kg/ms),

∇P : Basınç farkı,

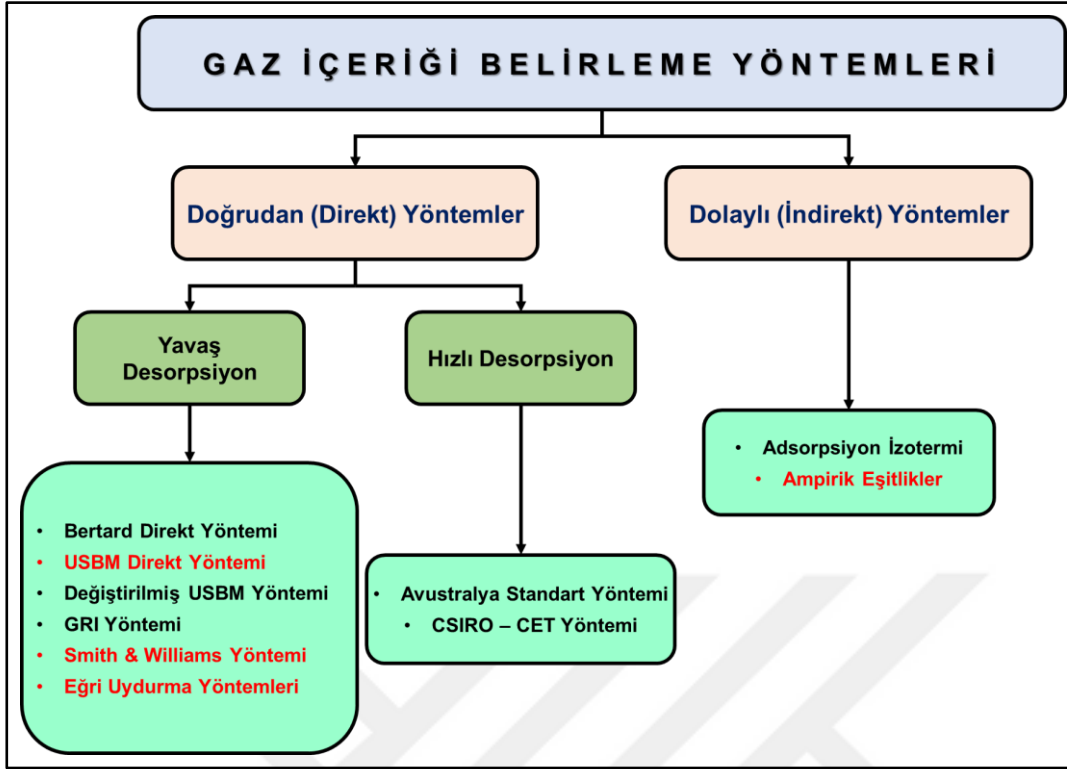
ρ_f : Akışkanın yoğunluğu,

g : Yerçekimi ivmesi.



3. GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİ

Yeterli konsantrasyonlara ulaştığında patlayıcı bir gaz olma özelliği taşıyan metan, basınç dengesinin madencilik faaliyetleri ile birlikte bozulması sonucunda ocak havasına karışarak iş sağlığı koşullarını ve üretim çalışmalarını tehdit etmektedir. Bununla birlikte kömür kökenli metan, ankonvansiyonel bir doğal gaz kaynağı olarak değerlendirilmekte ve madencilik faaliyetlerinden bağımsız olarak üretimi gerçekleştirilmektedir. Birim kömür kütlesinin ihtiva ettiği gaz hacmi (cm^3/g , m^3/t) olarak tanımlanan “gaz içeriği” ise ocak havasına yayılacak gaz miktarının tahmin edilmesinde, yer altı madenlerinde havalandırma sistemlerinin planlanmasında, ani gaz ve kömür püskürmesi risklerinin değerlendirilmesinde, gaz drenaj sistemleri ile üretim kuyularının tasarlanmasında kömür damarlarının rankı, jeolojik özellikleri, geçirgenliği, formasyon basıncı, klit-çatlak özellikleri gibi çok sayıda parametre ile birlikte kullanılmaktadır (Lama ve Bodziony, 1998; Karacan ve diğ, 2011; Li ve diğ, 2018). Gaz içeriği, formasyonun ihtiva ettiği, dolayısıyla üretilebilecek veya ocak havasına karışabilecek toplam gaz miktarını belirleyen ana kriter olmasıyla birlikte bu parametreler arasında en kritik tasarım parametresi olarak tanımlanmaktadır (Hou ve diğ, 2020). Gaz depolama prensiplerinin temel olarak farklılığı nedeniyle, geleneksel petrol ve gaz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan rezervuar değerlendirme yöntemleri kömür damarlarının gaz içeriğini belirlemek adına kullanılamamaktadır (Diamond ve Schatzel, 1998). Bu sebeple, kömür damarlarının gaz içeriğinin doğru belirlenebilmesi adına çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş ve seneler içerisinde farklı ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu gaz içeriği belirleme yöntemleri doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) yöntemler olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Doğrudan yöntemler, çeşitli sondaj yöntemleri ile elde edilip sızdırmaz kanisterlere yerleştirilen kömür numunelerinden yayılan gaz miktarının ölçülmesi prensibine dayanırken; dolaylı yöntemler ampirik eşitlikler ve numunenin gaz tutma kapasitesinin laboratuvar ortamında elde edildiği adsorpsiyon izotermelerini kapsamaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan gaz içeriği belirleme yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1 : Gaz içeriği belirleme yöntemlerinin sınıflandırılması.

3.1 Doğrudan (Direkt) Yöntemler

Kömür damarlarının gaz içeriğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan direkt yöntemler temel olarak, sızdırmaz kanisterlere yerleştirilen taze kömür örneklerinden yayılan gaz miktarının desorpsiyon süreci tamamlanana dek periyodik olarak manometre ile doğrudan ölçülmesini kapsamaktadır. Günümüzde kullanılan direkt yöntemler genellikle toplam gaz içeriğini kayıp gaz miktarı (Q_1), yayılan gaz miktarı (Q_2) ve artık gaz miktarı (Q_3) olmak üzere üç ana bileşene ayırarak incelemektedir. Kayıp gaz miktarı, numunenin kömür damarından kesilip, sızdırmaz kanisterlere yerleştirilene kadar geçen sürede açığa çıkan ve standart karotlu sondaj teknikleri ile doğrudan ölçülmesi mümkün olmayan, bu sebeple de genellikle tahmin edilebilen, gaz içeriğinin güvenilirliği en düşük bileşeni olarak tanımlanmaktadır (Diamond ve Schatzel, 1998). Yayılan gaz miktarı, numunenin sızdırmaz kanisterlere yerleştirilmesinin ardından kullanılan direkt yöntemle göre farklı ölçüm aletleri ve farklı prosedürler ile doğrudan ölçülebilen bileşeni olarak; artık gaz miktarı ise çok düşük difüzyon hızlarına ulaşıp, desorpsiyon sürecinin tamamlanmasının ardından numune içerisinde hapsolmuş gaz miktarı olarak ifade edilmektedir (Diamond ve Schatzel, 1998).

Günümüze dek geliştirilmiş doğrudan yöntemler arasında gaz bileşenlerinin (kayıp gaz, yayılan gaz, artık gaz) ölçüm ve tahmin prosedürleri, örnek özellikleri ve örnek alma yöntemi (yeryüzünden veya yeraltından farklı sondaj uygulamaları ile karot veya kırıntı numune), gaz desorpsiyonunun başlangıç ve bitiş zamanının kabulü gibi farklılıklar bulunmaktadır. Uygulama adımlarındaki bu çeşitlilik nedeniyle yöntemler arasında zaman, maliyet ve güvenilirlik açısından farklılıklar bulunmaktadır.

Doğrudan yöntemler gaz desorpsiyonunun tamamlanması adına geçen süre baz alınarak, yavaş desorpsiyon ve hızlı desorpsiyon yöntemler olmak üzere iki ana sınıfta incelenmektedir. Yavaş desorpsiyon yöntemlerinde genellikle karot numunenin doğal desorpsiyon hızına bağlı olarak yayılan gaz bileşeninin ölçülmesi haftalar ve hatta aylar boyunca sürebilmektedir. Hızlı desorpsiyon yöntemlerinde ise genellikle kırıntı numuneler kullanılmakta, bu sayede artan yüzey alanına bağlı olarak desorpsiyon hızı da artmakta ve yayılan gaz bileşeninin ölçümü bir veya birkaç gün içerisinde tamamlanabilmektedir. Hızlı desorpsiyon yöntemleri ile elde edilen sonuçlar yavaş desorpsiyon yöntemleri ile elde edilen sonuçlara kıyasla daha az güvenilir bulunsa da maliyetleri görece daha düşüktür (Seidle, 2011). Zamanın ve maliyetlerin büyük önem arz ettiği yer altı madencilik operasyonlarında hızlı sonuçlar ve buna bağlı hızlı aksiyonlar alınabilmesine olanak sağladığı için yavaş desorpsiyon yöntemlerine ek olarak hızlı desorpsiyon yöntemleri de yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

Doğrudan gaz içeriği ölçüm yöntemlerinde uygulanacak numune alma ve dolayısıyla sondaj yöntemi, özellikle kayıp gaz bileşeninin tahmin edilmesinde kritik önem taşımaktadır. Gaz içeriği belirleme çalışmalarında yeryüzünden numune alınması adına konvansiyonel karotlu, çelik halatlı karotiyerli (wireline), yan duvar, kırıntılı ve basınç karotiyerli gibi farklı sondaj teknikleri uygulanabildiği gibi hızlı desorpsiyon yöntemlerinde yeraltında kömür arınından gerçekleştirilen sondaj teknikleri de uygulanabilmektedir. Rezervuar basıncında numune alınmasına olanak tanıyan basınç karotiyerli sondaj tekniği ile numunenin sızdırmaz kanistere yerleştirilmesine dek geçen sürede gaz kaybının önüne geçilmekte ve dolayısıyla kayıp gaz bileşeninin bu sondaj tekniği ile tahmin edilmesine gerek kalmayıp, doğrudan ölçümü gerçekleştirilebilmektedir; ancak çok yüksek maliyetler içermekte ve çeşitli uygulama zorlukları barındırmaktadır (Diamond ve Schatzel, 1998). Farklı sondaj tekniklerinin gaz içeriği belirleme çalışmalarında sağladığı avantaj ve dezavantajlar Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 : Gaz içeriği belirleme çalışmaları adına farklı sondaj tekniklerinin değerlendirilmesi (Seidle, 2011; Flores, 2014).

Sondaj Tekniği	Avantajlar	Dezavantajlar
Konvansiyonel Karotlu	Görece düşük maliyetler, hacimce daha büyük örnekler, düşük kontaminasyon.	Kayıp gaz miktarı yüksek, fazla manevra sayısı.
Çelik Halatlı Karotiyerli (Wireline)	Hızlı, düşük manevra süresi, karot verimi yüksek, derin kuyulardan numune almaya uygun, kayıp gaz zamanı ve miktarı görece düşük, jeolojik değerlendirme (klit özellikleri, petrografi vs.) mümkün.	Konvansiyonel karotlu tekniğe kıyasla daha yüksek maliyetler.
Yan Duvar	Düşük maliyetler, düşük manevra süresi ile birlikte düşük kayıp gaz miktarı, derin kuyulardan numune almaya uygun.	Küçük boyutlu (kırıntı) numuneler, genellikle tüm damarı temsil etmek ve ek deneyler adına yeterli değil.
Basınç Karotiyerli	Minimum kayıp gaz miktarı, gaz içeriğinin tamamı doğrudan ölçülebilir, büyük boyutlu numuneler, düşük kontaminasyon, jeolojik değerlendirme mümkün.	Çok yüksek maliyetler ve zorlu operasyon süreci.
Kırıntılı	Düşük maliyetler, yüksek numune alma hızı.	Küçük boyutlu (kırıntı) ve az miktarda numune, çok yüksek kayıp gaz miktarı, yüksek kontaminasyon.

Gaz içeriği belirleme çalışmaları için kullanılan her bir sondaj tekniği maliyet, güvenilirlik, zaman, numune sayısı ve büyüklüğü bakımından farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Dolayısıyla, çalışma gerçekleştirilecek havzaya bağlı olarak uygun tekniğin seçilmesi önem taşımaktadır. Örneğin, az sayıda damara sahip olan sık kömür yataklarında düşük maliyetler ile örnek alınması adına konvansiyonel karotlu tekniğin uygulanması avantaj yaratırken; çok sayıda damara sahip derin kömür yataklarında kayıp gaz zamanını minimize etmek ve ölçüm güvenilirliğini artırmak adına çelik halatlı karotiyerli (wireline) tekniğin kullanılması uygun olacaktır.

3.1.1 US Bureau of Mines (USBM) doğrudan yöntemi

US Bureau of Mines (USBM) doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemi, kömür damarlarından ocak açıklıklarına karışacak gaz miktarını belirlemek amacıyla ilk olarak Bertard ve diğ. (1970) tarafından Fransa’da geliştirilen doğrudan yöntemin daha etkin hale getirilmiş bir varyasyonudur. Kissel ve diğ. (1973) tarafından geliştirilen USBM doğrudan yönteminin ana amacı bakır kömür damarlarından alınan karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilen gaz içeriği belirleme deneyleri ile planlama aşamasındaki yer altı kömür madenlerinin havalandırma ve gaz drenaj gereksinimlerinin belirlenmesidir. Yöntem, ihtiyaç duyduğu numune özellikleri ve kullanılan sızdırmaz kanisterlerin sayısı bakımından Bertard direkt yönteminden ayrılmaktadır; Bertard direkt yönteminde yeraltından alınan kırıntı numuneler ve çoklu kanisterler kullanılırken, USBM direkt yönteminde yeryüzünden alınan karot numunelere ihtiyaç duyulmakta ve her bir numune için tek bir sızdırmaz kanister yeterli olmaktadır (Diamond ve Schatzel, 1998). USBM doğrudan yöntemi Bertard doğrudan yöntemi ile birlikte günümüzde kullanılan birçok doğrudan yöntem ve standardın temellerini oluşturmaktadır. Bununla beraber, her ne kadar madencilik operasyonlarında kullanılmak üzere geliştirilmiş bir yöntem olsa da, seneler içerisinde çok sayıda proje ve kömür havzasında kullanılarak güvenilirliğini kanıtlamasıyla birlikte günümüzde kömür yataklarında gerçekleştirilen rezervuar değerlendirme çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

USBM doğrudan gaz içeriği belirleme yönteminde kömür numunesinin toplam gaz içeriği kayıp gaz miktarı (Q_1), yayılan (desorbe olan) gaz miktarı (Q_2) ve artık gaz miktarı (Q_3) olmak üzere üç ana bileşene ayrılarak incelemektedir. Yöntemin temelini, karotlu sondaj teknikleri ile yeryüzüne çıkarılan kömür numunelerinin olabildiğince hızlı bir şekilde sızdırmaz kanisterlere yerleştirilmesi, periyodik bir şekilde numunelerden yayılan gaz miktarlarının belirlenmiş bir sınır değere ulaşılan kadar ölçülmesi ve sonrasında numunenin sızdırmaz bir değirmende öğütülerek hapsolmuş artık gaz miktarının ölçülmesi süreçleri oluşturmaktadır. Anlaşılabacağı üzere USBM doğrudan yönteminde, yayılan gaz miktarı ve artık gaz miktarı bileşenleri ölçülürken; kayıp gaz miktarı bileşeni süreç sonucunda elde edilmiş desorpsiyon verilerine bağlı kalınarak tahmin edilmektedir. Her bir gaz içeriği bileşeninin belirlenmesinin ardından Eşitlik 3.1 kullanılarak numunenin toplam gaz içeriği elde edilmektedir.

$$Q_t = \frac{(Q_1 + Q_2)}{M_t} + \frac{Q_3}{M_c} \quad (3.1)$$

Burada,

Q_t : Kömür örneğinin toplam gaz içeriği (cm³/g),

Q_1 : Kayıp gaz miktarı (cm³/g),

Q_2 : Yayılan (desorbe olan) gaz miktarı (cm³/g),

Q_3 : Artık gaz miktarı (cm³/g),

M_t : Kömür örneğinin kuru ağırlığı (g),

M_c : Ögütülen kömür örneğinin kuru ağırlığı (g).

3.1.1.1 Kayıp gaz miktarının (Q_1) belirlenmesi

Gaz içeriği belirleme çalışmalarını gerçekleştirmek adına yüzeyden uygulanan karotlu sondaj faaliyetleri esnasında, kömür damarından kesilen karot örneği yeryüzüne çıkarılana dek ihtiva ettiği gazın bir bölümü desorbe olmakta ve örnek sızdırmaz kanistere yerleştirilene dek geçen sürede açığa çıkan gaz hacmini doğrudan ölçmek mümkün olmamaktadır. Bu süreçte desorpsiyonun başladığı an “sıfır zamanı” olarak, sıfır zamanından numunenin kanistere yerleştirilmesine kadar geçen süre “kayıp gaz zamanı” olarak, kayıp gaz zamanı boyunca desorbe olan toplam gaz hacmi ise “kayıp gaz miktarı (Q_1)” olarak tanımlanmaktadır (McLennan ve diğ, 1995). Açığa çıkacak kayıp gaz miktarının; kömür numunesinin fiziksel özelliklerine, su doygunluğuna, serbest gaz oranına, desorpsiyon hızına, kullanılan sondaj akışkanının özelliklerine, kuyu basıncı – sıcaklığına ve kayıp gaz zamanına bağlı olduğu bilinmektedir (McLennan ve diğ, 1995; Diamond ve Schatzel, 1998). Kayıp gaz zamanı ise kömür damarının derinliği ve kullanılan sondaj tekniğinin imkanları ile doğrudan ilişkilidir. Gaz içeriğinin güvenilirliği en düşük bileşeni olarak tanımlanan kayıp gaz miktarının kömürün gaz sorpsiyon karakteristiğine bağlı olarak toplam gaz içeriği içerisinde önemli bir oranda bulunabileceği bilinmektedir. Bu sebeple, gaz içeriği belirleme çalışmaları esnasında kayıp gaz zamanının mümkün olduğunca kısa tutulması sonuçların tutarlılığı açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, kullanılan sondaj tekniğinin imkanlarına ek olarak çalışmaları gerçekleştiren ekibin tecrübesi de kayıp gaz zamanının minimize edilmesinde etkili olmaktadır.

Kuyu içerisinde gaz desorpsiyonunun başladığı anın kabulü kömür damarlarının karmaşık yapısı sebebiyle beraberinde problemler getirmektedir. Teorik olarak numuneden gaz desorpsiyonu, kuyu içerisindeki hidrostatik basıncın kömür gözenekleri içerisindeki gaz basıncından (rezervuar basıncı) düşük olduğu anda başlamaktadır. Pratik uygulamada ise sıfır zamanının tam olarak belirlenememesi nedeniyle farklı sondaj akışkanlarına göre USBM doğrudan yöntemi farklı kabuller ileri sürmüştür. Kissel ve diğ. (1973)'e göre sondaj akışkanı olarak çamur veya su kullanılmakta ise gaz desorpsiyonu numunenin bakir konumu ile yüzey arasındaki dikey mesafenin yarısında; akışkan olarak hava kullanılıyor ise numunenin kömür damarından kesildiği an başlamaktadır. Sondaj akışkanı olarak sıvı veya hava kullanıldığında kayıp gaz zamanının belirlenmesini açıklayan ilişkiler sırasıyla Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3'te sunulmuştur (Diamond ve Schatzel, 1998).

$$t_{lg} = (t_4 - t_3) + (t_3 - t_2) / 2 \quad (3.2)$$

$$t_{lg} = t_4 - t_1 \quad (3.3)$$

Burada,

t_{lg} : Kayıp gaz zamanı,

t_1 : Numunenin kömür damarından kesildiği ilk an,

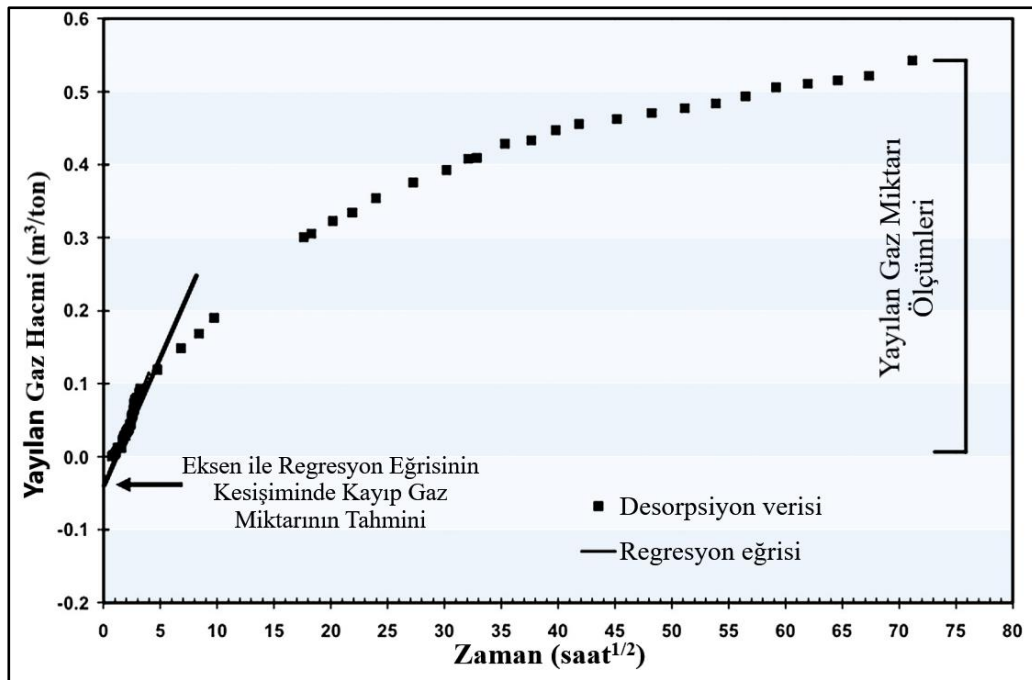
t_2 : Numunenin yeryüzüne çıkarılmaya başlandığı an,

t_3 : Numunenin yeryüzüne ulaştığı an,

t_4 : Numunenin kanistere yerleştirilip, sızdırmazlığının sağlandığı an.

Kayıp gaz miktarının tahmini, homojen gaz konsantrasyonuna sahip olan küresel kömür moleküllerinden sabit sıcaklıkta gazın difüzyonunu tanımlayan kısmi diferansiyel denklemin çözümüne dayanmaktadır (McLennan, 1995). Sıfır zamanında, molekül sınırlarındaki konsantrasyonun anında değiştiği ve sonrasında sabit kaldığı; buna bağlı olarak da difüzyon katsayısının da sabit kaldığı varsayılmaktadır. Söz konusu denklemin çözümü sonucunda, numuneden yayılan gaz hacminin sıfır zamanından itibaren geçen sürenin karekökü ile orantılı olduğu görülmektedir. Bertard ve diğ. (1970) bu ilişkinin toplam desorbe olan gaz hacminin ilk %20'lik bölümünde görüldüğünü, Kissel ve diğ. (1973) ise desorpsiyon başlangıcından itibaren ilk birkaç saatte görüldüğünü raporlamıştır.

USBM doğrudan yöntemi ile kayıp gaz miktarı ekstrapolasyon yoluyla tahmin edilmektedir. Yayılan gaz miktarı ölçümlerinin tamamlanmasının ardından, kümülatif yayılan gaz hacmine karşı geçen zamanın karekökü olmak üzere çizilen grafikten faydalanılmaktadır. Bu doğrultuda, yayılan gaz hacmi verileri üzerinde lineer regresyon analizi gerçekleştirilmekte ve ekstrapolasyon yoluyla desorpsiyonun başladığı sıfır zamanından ilk okumanın gerçekleştirildiği ana kadar geçen sürede açığa çıkan gaz miktarı, bir diğer ifade ile kayıp gaz miktarı tahmin edilmektedir. USBM doğrudan yöntemi ile kayıp gaz miktarının tahmin edilmesini açıklayan örnek bir grafik Şekil 3.2’de sunulmuştur.



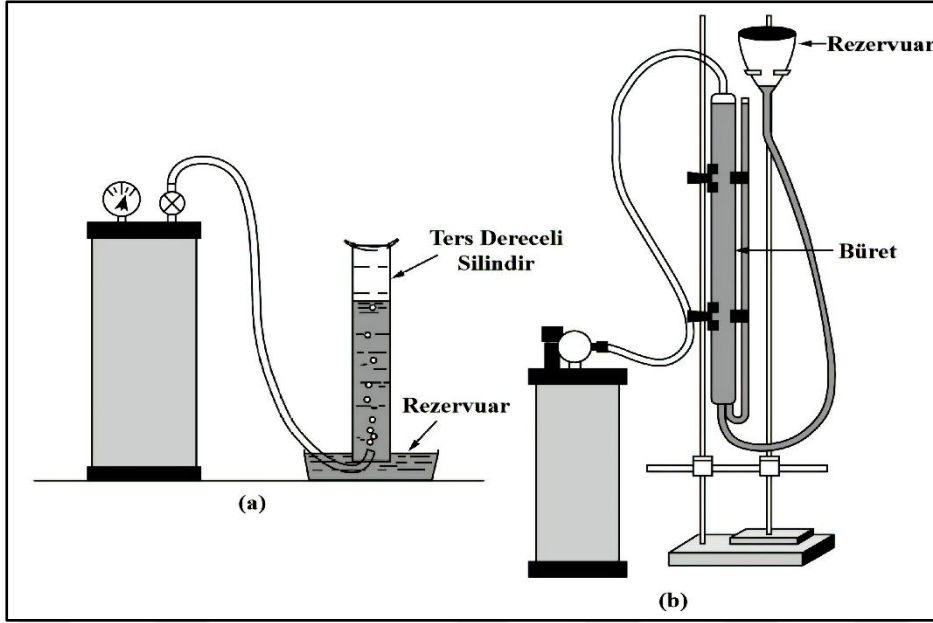
Şekil 3.2 : USBM doğrudan yöntemi ile kayıp gaz miktarının tahmini (Flores, 2014).

Kayıp gaz bileşeninin doğrudan yöntemler ile tahmin edilmesi sürecinde yapılan kabuller, sonuçların kesinliği ve güvenilirliği üzerine literatürde soru işaretleri oluşturmuştur (Saghafi, 2017). Bu noktada belirsizliği yaratan önemli faktörler sıfır zamanının ve desorpsiyon kinetiğinin kabulü üzerine olmuştur. Bahsedildiği üzere doğrudan yöntemler ile kayıp gaz miktarının tahmini, numunelerden gaz difüzyonunun sabit konsantrasyon ve sabit sıcaklık altında gerçekleşmesi kabulüne dayanmaktadır. Ancak gerçek durumda gaz konsantrasyonu ve basıncı ile sıcaklık tüm kuyu boyunca sabit kalmamakta, yeryüzüne yaklaştıkça azalmaktadır (McLennan, 1995). Bu sebeple pratikte gaz difüzyonunun teorik kabulden farklı olduğu düşünülmekte, geliştirilen çeşitli doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemlerinde farklı kabuller ileri sürülmektedir.

3.1.1.2 Yayılan gaz miktarının (Q_2) belirlenmesi

Yayılan (desorbe olan) gaz miktarı (Q_2), yeryüzüne çıkarılan karot kömür numunesinin sızdırmaz kanistere yerleştirilmesi ile birlikte manometre yardımıyla doğrudan ölçülebildiği gaz içeriği bileşeni olarak tanımlanmaktadır. Numunelerin kanisterlere yerleştirilmesi ile birlikte ölçümler başlamakta, gerçekleştirilen her bir ölçüm için zaman, kanisterden yayılan gaz hacmi, atmosferik basınç ve sıcaklık değerleri kayıt altına alınmaktadır (McLennan ve diğ., 1995). Yayılan gaz miktarı verilerinin nitelikli ve analizler için yeterli olabilmesi adına ölçümlerin periyodik olarak gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır. Gaz desorpsiyon başlangıcının ilk saatinde üç veya beş dakikalık periyotlar ile, sonrasındaki birkaç saatte bir saatlik periyotlar ile, ardından ise bir günlük periyotlar halinde kanisterden yayılan gaz hacminin ölçülmesi önerilmektedir (Seidle, 2011). Yayılan gaz miktarı ölçümlerinin sonlandırılması adına kömür bünyesindeki tüm gazın desorbe olması veya desorpsiyon hızının çok düşük seviyelere gelmesi beklenmekte; bu sebeple doğrudan yöntem ile gerçekleştirilen yayılan gaz miktarı ölçümlerinin tamamlanması kömür özelliklerine de bağlı olarak haftalar veya aylarca sürebilmektedir (Xue ve Yuan, 2017). McCulloch ve diğ. (1975) art arda beş gün boyunca günlük bazda yayılan gaz hacminin $0,05 \text{ cm}^3/\text{g'a}$; Diamond ve Levine (1981) ise bir hafta boyunca günlük yayılan gaz hacmi ortalamasının 10 cm^3 'e ulaştığı anda desorpsiyon ölçümlerinin tamamlanabileceği önermiştir. Diamond ve Schatzel (1998) ise önerilen bu ölçüm sonlandırma noktalarının rastgelelik üzerine seçildiğini, dikkat edilmesi gereken hususun desorpsiyon sonlandırma noktası olarak seçilen değer in çalışmaya ait tüm kömür örnekleri üzerinde uygulanması olduğunu vurgulamıştır.

USBM doğrudan yönteminde ilk olarak 0,1 m çapında ve 0,3 m uzunluğunda alüminyum sızdırmaz kanisterler, yayılan gaz hacmini ölçmek adına ise dereceli silindir kullanılmıştır (Şekil 3.3). Ancak, kanister boyutlandırılmasında dikkat edilmesi gereken ana husus, numunenin yerleştirilmesinin ardından kanisterde kalan boşluk hacmidir. Atmosferik basınç ve sıcaklık değişiklikleri sonucunda kanisterde kalan boşluk hacminin miktarı hatalı okumaların gerçekleştirilmesine sebep olabilmektedir (Seidle, 2011). Ulery ve Hyman (1991) çalışmalarında kanisterdeki boşluk hacmi ile numuden yayılan gaz hacmi eşit olduğunda %30'a varan oranda hata gerçekleşebileceğini, boşluk hacminin yayılan gaz hacminden daha az olduğu durumda ise yalnızca düşük oranda hataların gerçekleştiğini göstermiştir.

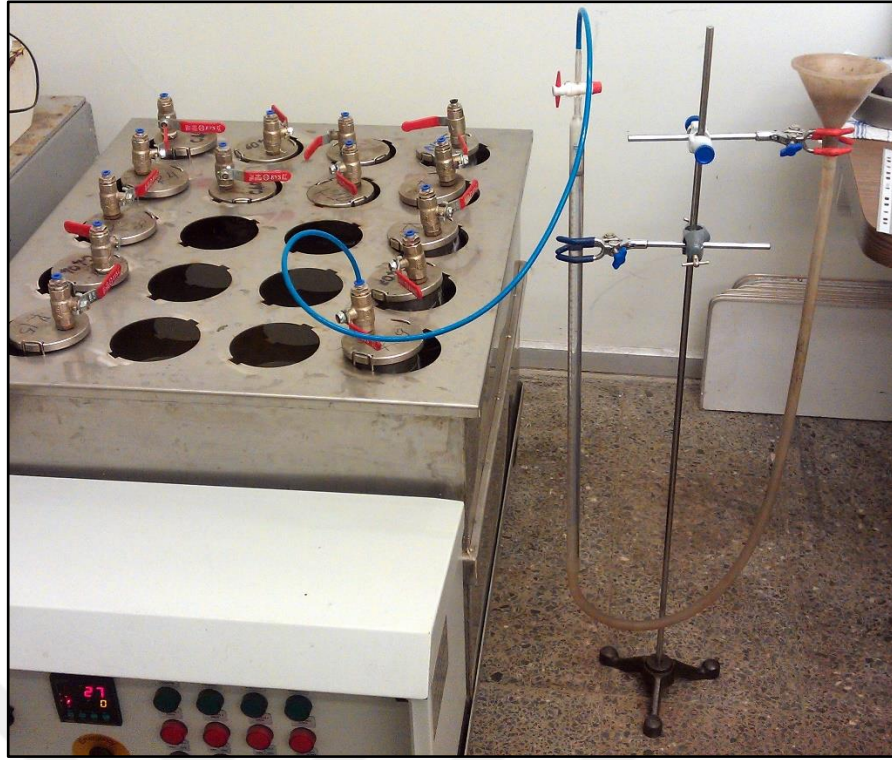


Şekil 3.3 : USBM yönteminde ilk olarak kullanılan ölçüm sistemi (a), TRW (1981) tarafından geliştirilen ölçüm sistemi (b) (ASTM, 2024).

Kanisterde kalan boşluk hacminin ve olası hatalı okumaların minimize edilmesi adına alınması planlanan karot numunelerin boyutları ile uyumlu kanisterler tasarlanarak kullanılması veya numunenin yerleştirilmesinin ardından kanisterde kalan boşluk hacminin saf su kullanılarak doldurulması önerilmektedir (Seidle, 2011).

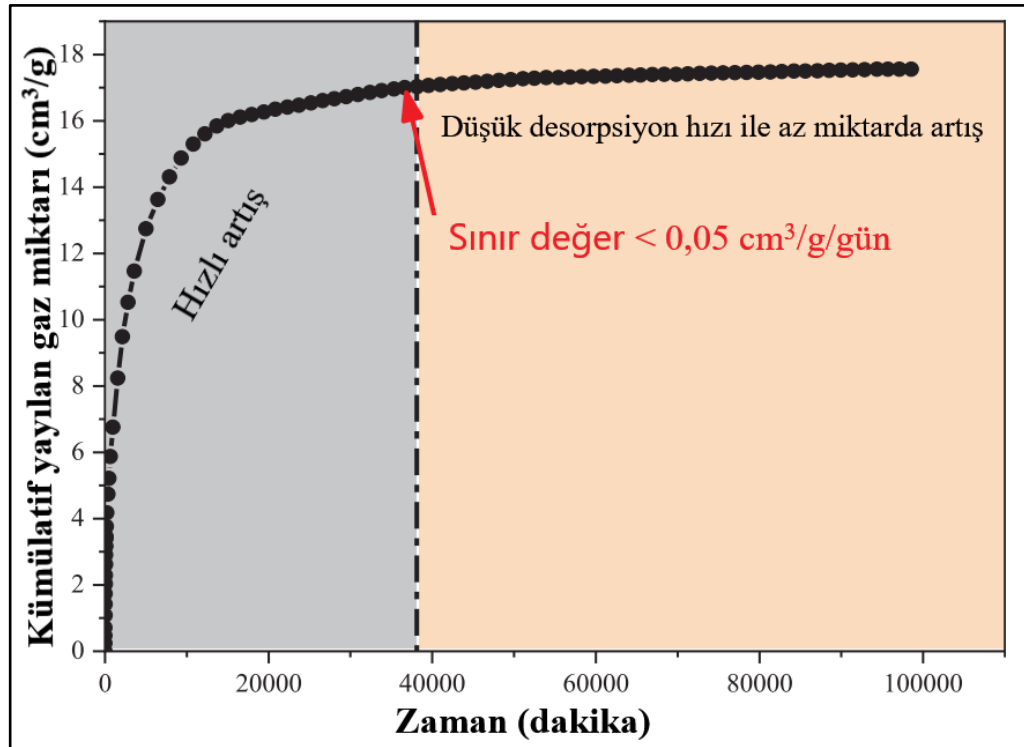
USBM doğrudan yönteminde yayılan gaz hacminin ölçülmesi adına ilk olarak kullanılan ters dereceli silindir de beraberinde birtakım problemler getirmektedir. Kanister içerisindeki su seviyesi ile dereceli silindir içerisindeki su seviyesi farklı olduğunda ortaya çıkan basınç farkı, hacimsel olarak gerçekleştirilen ölçümde hatalara sebebiyet verebilmektedir (McLennan ve diğ, 1995). TRW (1981) gerçekleştirdiği çalışmalarda kullanılan manometrik ölçüm aleti sebebiyle oluşacak hata oranının %4'e varabileceğini göstermiş ve Şekil 3.3 (b)'de sunulan farklı bir manometrik ölçüm aleti ile söz konusu hataların önüne geçilebileceğini önermiştir. Geliştirilen bu ölçüm aletinde bulunan seviyelendirme rezervuarı sayesinde su seviyeleri dengelenmekte ve daha güvenilir ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde uygulanan desorpsiyon deneylerinde de sıklıkla bu ölçüm aleti kullanılmaktadır (Şekil 3.4).

Her bir ölçümün gerçekleştirildiği ortamın atmosferik basınç ve sıcaklık değerleri kanister içerisindeki yayılan gazın hacmini doğrudan etkilemektedir. Bu etkinin ortadan kaldırılması ve gaz içeriği değerlerinin kıyaslanabilir olması adına elde edilen sonuçlar mutlaka standart basınç ve sıcaklık koşullarına (273.15 K ve 101 KPa) göre düzeltilmelidir (Ulery ve Hyman, 1991).



Şekil 3.4 : İTÜ Maden Havalandırması ve İş Güvenliği Laboratuvarı'nda kullanılan yayılan gaz miktarı ölçüm sistemi.

Desorpsiyon ölçümlerinin tamamlanıp, elde edilen verilerin standart basınç ve sıcaklık koşullarına indirgenmesinin ardından elde edilen örnek bir desorpsiyon eğrisi Şekil 3.5'te sunulmuştur.

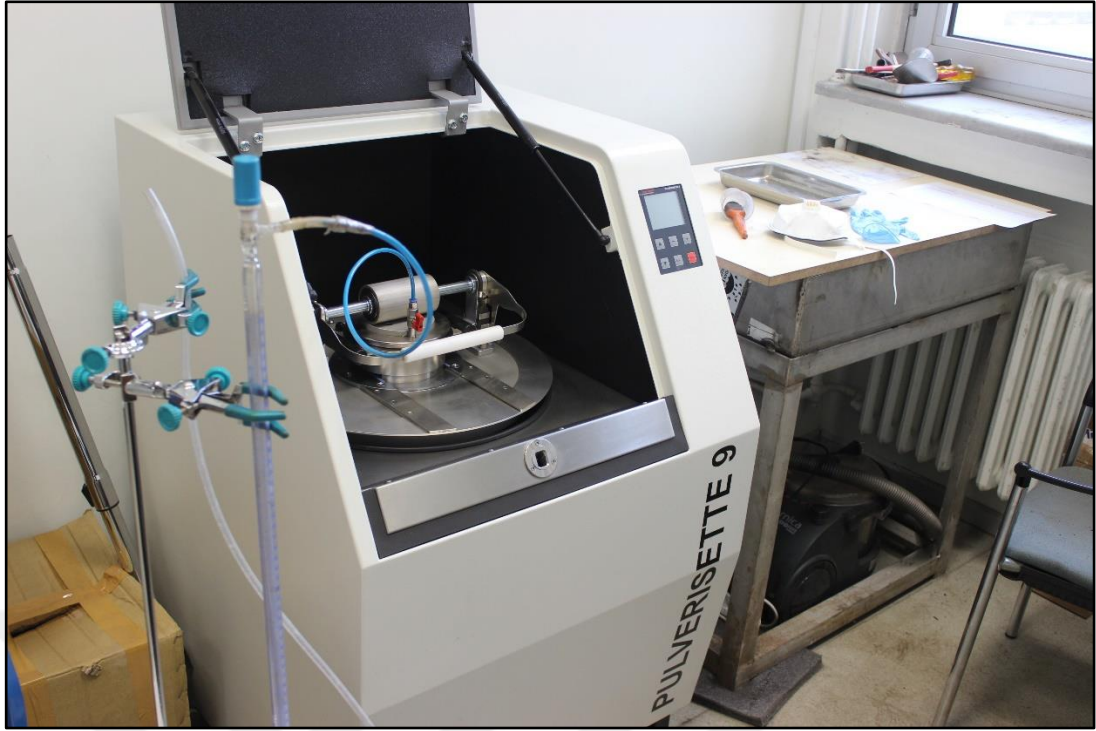


Şekil 3.5 : Örnek bir yayılan gaz miktarı eğrisi (Hou ve diğ, 2020).

3.1.1.3 Artık gaz miktarının (Q_3) belirlenmesi

Sızdırmaz kanisterler içerisindeki kömür numunesinden yayılan gazın miktarı ve yayılma hızı geçen zaman ile birlikte azalmaktadır. Artık gaz miktarı (Q_3) desorpsiyon hızının azalıp, numunenin yayılan gaz miktarı ölçümlerinin tamamlanmasının ardından kömür bünyesinde “hapsolmuş” olarak kalan ve atmosferik koşullar altında desorpsiyonu güç olan gaz içeriği bileşeni olarak tanımlanmaktadır (McLennan ve diğ., 1995; Diamond ve Schatzel, 1998). Bununla birlikte, Bertard ve diğ. (1970) ve Levine (1992) artık gaz bileşenini 1 atmosferik basınç altında kömür bünyesinde denge halinde kalan gaz miktarı olarak tanımlamıştır. Diamond ve diğ. (1986) gerçekleştirdikleri çalışmalarda artık gaz miktarının toplam gaz içeriğine oranının; görece düşük kömürleşme derecesindeki kömürlerde %40 – 50 arasında değiştiğini, yüksek kömürleşme derecesine sahip (bitümlü) kömürlerde ise genellikle %10’un altında olduğunu göstermiştir. Artık gaz miktarı toplam gaz içeriğinde büyük oranlarda bulunabilse de, normal şartlar altında ocak havasına karışması en güç olan gaz içeriği bileşeni olarak tanımlanmakta, ancak ankovansiyonel gaz üretimi için rezervuar çalışmalarında titizlikle belirlenmesi önem taşımaktadır (Diamond ve diğ., 2001).

USBM doğrudan yöntemi ile yayılan gaz miktarı ölçümünde, desorbe olan gazın miktarı önceden belirlenmiş bir sınır değere ulaştığında ölçüm sonlandırılmaktadır. Yayılan gaz miktarı ölçümünün sonlandırılmasının ardından artık gaz miktarı belirleme çalışmaları başlatılmaktadır. USBM doğrudan yöntemine göre artık gaz miktarı bileşenini belirlemek adına, kanisterlerden çıkarılan karot numunenin tamamı veya numuneyi temsil etmek üzere belirlenen bir bölümü sızdırmaz bir hazneye sahip değirmen kullanılarak – 200 mesh tane boyutunun altına indirilmektedir (Diamond ve Levine, 1981). Tane boyutunun azalıp, yüzey alanının artması ile birlikte gözenekler içerisinde kalan artık gaz serbest hale geçmekte ve yayılan gaz miktarı ölçümlerinde kullanılan tipte manometreler ile birlikte sızdırmaz hazne içerisinden artık gaz miktarı doğrudan ölçülmektedir. Şekil 3.6’da artık gaz miktarının ölçülmesinde kullanılan örnek bir sistem sunulmuştur. Gerçekleştirilen her bir artık gaz ölçümünde atmosferik basınç ve sıcaklık değerleri de kayıt altına alınmalı, sonrasında elde edilen sonuçlar standart basınç ve sıcaklığa göre normalize edilmelidir.



Şekil 3.6 : İTÜ Maden Havalandırması ve İş Güvenliği Laboratuvarı'nda kullanılan artık gaz miktarı ölçüm sistemi.

3.1.2 Değiştirilmiş US Bureau of Mines doğrudan yöntemi

Değiştirilmiş US Bureau of Mines doğrudan yöntemi (MDM) özellikle düşük gaz içeriğine sahip kömür havzalarında kullanılmak üzere USBM doğrudan yöntemi temel alınarak ve karot numuneden sızdırmaz kanister içerisine desorbe olan her bir gaz bileşiminin zamana bağlı hacimsel değişiminin izlenmesi prensibine dayanılarak geliştirilmiştir (Ulery ve Hyman, 1991). Değiştirilmiş USBM doğrudan yöntemi, USBM doğrudan yönteminde olduğu gibi numunenin toplam gaz içeriğini kayıp gaz miktarı, yayılan gaz miktarı ve artık gaz miktarı olmak üzere üç ana bileşene ayırarak incelemektedir. Yöntemde kayıp ve artık gaz miktarları USBM doğrudan yönteminde uygulanan yöntem ve teknikler ile benzer şekilde belirlenmektedir (Diamond ve diğ, 2001). Yayılan gaz miktarının ölçümünde ise USBM doğrudan yönteminden farklı bir şekilde, basit manometrelere kıyasla üstün bir ölçüm çözünürlüğü sağlayan, basınç transdüserlerine sahip dijital bir ölçüm aleti kullanılmaktadır (Diamond ve diğ, 2001). Geliştirilen dijital ölçüm aleti ile birlikte her bir okuma arasında meydana gelen basınç farklarından faydalanılarak numuneden yayılan gaz miktarı belirlenmekte, ölçüm aletinin bünyesinde bulunan örneklem haznesi sayesinde her bir ölçümde yayılan gaz miktarları minimum kontaminasyonla toplanabilmektedir (McLennan ve diğ, 1995; Diamond ve Schatzel, 1998).

Değiştirilmiş USBM doğrudan yönteminde, her bir ölçüm esnasında periyodik olarak toplanan gaz numuneleri üzerinde uygulanan gaz kromatografisi deneyleri ile birlikte yayılan gaz bileşiminin zaman bağlı olarak takip ve analiz edilmesi de mümkün olmaktadır (McLennan ve diğ, 1995).

Yöntemde farklı bir ölçüm aleti kullanılmasının yanı sıra, ilk defa polivinil klorürden (PVC) üretilmiş kanisterler kullanılmıştır (Diamond ve diğ, 2001). Kullanılan malzemenin alüminyuma kıyasla kolay işlenebilmesi sayesinde alınan karot numunelerin boyutlarına uygun olarak kanisterler de sahada boyutlandırılabilmekte ve kanisterde kalan boşluk hacminden kaynaklanan hataların önüne geçilebilmektedir (McLennan ve diğ, 1995). PVC kanisterler boşluk hacmini minimize etmekte, operasyonel esneklik sağlamakta ve görece düşük maliyetlere sahip olmakla birlikte dayanım özellikleri görece düşük olmakta, sızdırmazlık ise alüminyum kanisterlere kıyasla daha zor sağlanmaktadır.

3.1.3 Smith & Williams yöntemi

Smith & Williams yöntemi, yeryüzünden alınan kırıntı numuneler üzerinde uygulanmak üzere geliştirilen, ancak karot numuneler üzerinde de uygulanabilen bir doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemidir (Smith ve Williams, 1981; McLennan ve diğ, 1995). Yöntemde yayılan gaz miktarı USBM doğrudan yöntemi ile benzer şekilde, sızdırmaz kanisterler ve manometrik ölçüm aleti kullanılarak ölçülmekte; gaz desorpsiyonunun tamamlanmasının ardından ise kömür bünyesinde herhangi bir artık gazın kalmadığı kabul edilmekte, bu sebeple de Smith & Williams yönteminde artık gaz miktarı ölçülmemektedir (Diamond ve Schatzel, 1998). Kayıp gaz miktarının tahmininde ise, USBM doğrudan yöntemi ile benzer şekilde gazın difüzyonunu açıklayan kısmi diferansiyel denklemin çözümünden faydalanılmış, ancak numunenin bakir konumundan yüzeye alınmasına kadar geçen sürede basıncın zamana bağlı olarak doğrusal bir şekilde azaldığı kabul edilmiştir (Yee ve diğ, 1993). Bu kabul ile birlikte, söz konusu diferansiyel denklemin çözümü üstel olarak azalan sonsuz bir seri olarak ifade edilmekte, bu nedenle pratik uygulamada zorluklar getirmektedir (Seidle, 2011). Smith ve Williams (1981) yöntemin pratik olarak uygulanabilmesi adına “yüzey zamanı oranı (STR)” ve “kayıp zaman oranı (LTR)” olarak isimlendirilen, boyutsuz iki farklı katsayı tanımlamıştır. Yüzey zamanı oranı ve kayıp zaman oranının hesaplanmasıyla ilişkili denklemler sırasıyla Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5’te sunulmuştur.

$$STR = \frac{t_s - t_d}{t_s} \quad (3.4)$$

$$LTR = \frac{t_s}{t_{25\%}} \quad (3.5)$$

Burada,

STR : Yüzey zamanı oranı,

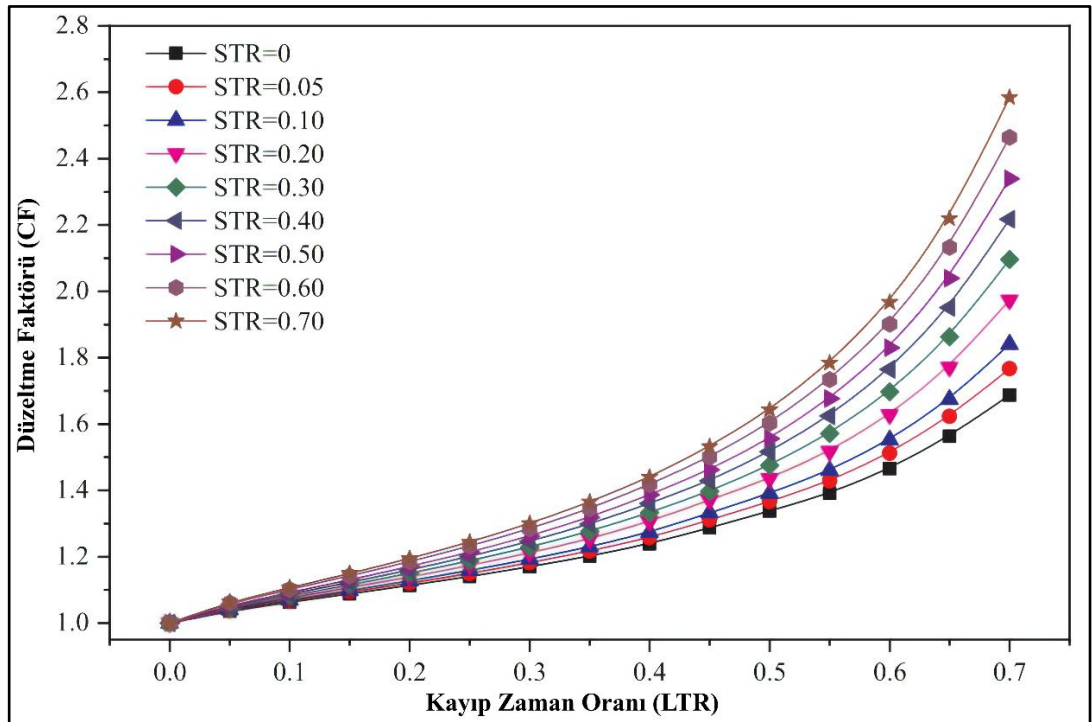
LTR : Kayıp zaman oranı,

t_s : Numunenin kanistere yerleştirilmesine kadar geçen toplam zaman (dk),

t_d : Numunenin bakir konumundan yüzeye ulaşmasına kadar geçen zaman (dk),

$t_{25\%}$: Yayılan gaz miktarının %25'inin ölçülmesine kadar geçen zaman (dk).

Anlaşılabileceği üzere Smith ve Williams yönteminin uygulanabilmesi adına tüm doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemlerinde olduğu gibi, numunenin bakir konumundan kesilip, kanister içerisine yerleştirilmesine kadar olan süreçte ilgili zamanların titizlikle kayıt altına alınması büyük önem taşımaktadır. Yüzey zamanı oranı ve kayıp zaman oranının hesaplanmasının ardından Şekil 3.7'de sunulan abak vasıtasıyla hacimsel bir düzeltme faktörü belirlenmektedir (Smith ve Williams, 1981).



Şekil 3.7 : Smith ve Williams düzeltme faktörü grafiği (Hou ve diğ, 2020).

Smith ve Williams doğrudan yönteminde düzeltme faktörlerinin grafik üzerinden belirlenmesi zaman zaman karmaşık olabilmekte, bu durumda Çizelge 3.2’de sunulan düzeltme faktörü tablosundan faydalanılmaktadır. Buna göre örneğin, yüzey zamanı oranı 0,40 olarak, kayıp gaz oranının ise 0,25 olarak hesaplandığı durumda uygulanacak düzeltme faktörü 1,2014 olarak bulunmaktadır.

Çizelge 3.2 : Smith ve Williams yönteminde düzeltme faktörleri (Seidle, 2011).

LTR	Yüzey Zamanı Oranı (STR)								
	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,05	1,0361	1,0382	1,0401	1,0437	1,0470	1,0501	1,0531	1,0605	1,0633
0,10	1,0630	1,0667	1,0701	1,0763	1,0820	1,0873	1,0923	1,1020	1,1068
0,15	1,0881	1,0936	1,0985	1,1073	1,1154	1,1231	1,1305	1,1426	1,1495
0,20	1,1137	1,1210	1,1275	1,1393	1,1502	1,1606	1,1706	1,1853	1,1947
0,25	1,1405	1,1500	1,1585	1,1738	1,1880	1,2014	1,2142	1,2320	1,2441
0,30	1,1698	1,1819	1,1924	1,2116	1,2295	1,2465	1,2629	1,2843	1,2999
0,35	1,2022	1,2172	1,2304	1,2543	1,2769	1,2984	1,3191	1,3448	1,3646
0,40	1,2391	1,2575	1,2739	1,3060	1,3333	1,3605	1,3868	1,4180	1,4394
0,45	1,2870	1,3114	1,3326	1,3711	1,3970	1,4291	1,4621	1,5000	1,5318
0,50	1,3379	1,3666	1,3913	1,4362	1,4756	1,5163	1,5564	1,6027	1,6427
0,60	1,3910	1,4281	1,4600	1,5179	1,5715	1,6246	1,6768	1,7339	1,7840
0,65	1,4655	1,5120	1,5518	1,6277	1,6971	1,7646	1,8299	1,9012	1,9670
0,70	1,5629	1,6230	1,6742	1,7715	1,8628	1,9513	2,0395	2,1326	2,2193

Düzeltilme faktörünün de elde edilmesinin ardından Eşitlik 3.6’da sunulan ilişkiden faydalanılarak numunenin toplam gaz içeriği belirlenmektedir. Smith ve Williams doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemi ile elde edilen bu gaz içeriği değerinin yalnızca kayıp ve yayılan gaz bileşenlerini içerdiği, artık gaz bileşeninin ölçülmesine ise gerek olmadığı unutulmamalıdır. Bu doğrultuda, Smith ve Williams doğrudan yönteminin USBM doğrudan yöntemi ile arasındaki temel farkın, kayıp gaz bileşeninin farklı bir şekilde tahmin edilmesi ve artık gaz bileşeninin ölçülmemesi olduğu görülmektedir.

$$V_{\text{tot}} = CF \times V_{\text{des}} \quad (3.6)$$

Burada,

V_{tot} : Numunenin toplam gaz içeriği ($Q_1 + Q_2$),

CF : Düzeltme faktörü,

V_{des} : Numuneden yayılan gaz miktarı (Q_2).

3.1.4 Eğri uydurma yöntemleri

Kömür damarlarının gaz içeriğini belirlemek adına çeşitli eşitlik ve ilişkilere dayanan farklı eğri uydurma yöntemleri geliştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, ilk eğri uydurma yöntemi Chase (1979) tarafından, kömür numunesinden yayılan gaz miktarının bir petrol kuyusundan üretilebilecek miktarın tahmininde kullanılan “düşüş eğrisi” yöntemi ile tahmin edilebileceği kabulü ile ileri sürülmüştür. Düşüş eğrisi yönteminde gaz içeriği, numunenin kümülatif yayılan gaz miktarı ile desorpsiyon hızı arasındaki ilişkiye ait yarı logaritmik bir grafik üzerinden en küçük kareler yöntemi ile regresyon analizi uygulanarak tahmin edilmektedir (Diamond ve Schatzel, 1998). Anlaşılabileceği üzere, söz konusu analizin uygulanabilmesi adına numunenin yayılan gaz miktarı bileşeninin ölçülmüş olması gerekmekte, yöntem temel olarak numuneden yayılacak gaz miktarının aylar boyunca ölçülmesinin önüne geçerek ileriye dönük desorpsiyon miktarının tahmin edilmesine dayanmaktadır.

Düşüş eğrisi yöntemi, artık gaz miktarının madencilik operasyonlarını etkilemeyeceğini ileri sürmekte ve artık gaz bileşenine dair herhangi bir ölçüm veya tahmin uygulaması barındırmamakta; kayıp gaz miktarının ise USBM doğrudan yöntemi ile benzer şekilde ölçülmesini önermektedir (Diamond ve Schatzel, 1998).

Dolayısıyla, numunenin toplam gaz içeriğini düşüş eğrisi yöntemi ile tahmin edilen yayılan gaz bileşeni ile USBM doğrudan yöntemi ile tahmin edilen kayıp gaz bileşeni oluşturmaktadır. Yöntem genellikle numunenin gaz içeriğini olduğundan daha fazla olarak belirlemekte, buna bağlı olarak da gaz içeriği belirleme çalışmalarında düşüş eğrisi yönteminin uygulanması genellikle önerilmemektedir (Seidle, 2011).

Kömür damarlarının gaz içeriğini belirlemek amacıyla geliştirilen bir diğer eğri uydurma yöntemi, kayıp gaz miktarının tahmin edilmesi hususunda USBM doğrudan yöntemi ile benzer teorik kabuller üzerine kurulmuş Amoco eğri uydurma yöntemidir (Metcalf ve diğ, 1991). Amoco eğri uydurma yönteminin uygulanabilmesi adına numunenin yayılan gaz miktarının doğrudan yöntemler ile ölçülmesi gerekmektedir. Sonrasında, kümülatif yayılan gaz miktarı verileri üzerinde Eşitlik 3.7’de sunulan doğrusal olmayan denklem en küçük kareler yöntemi ile uyarlanmakta; numunenin kayıp gaz miktarı, yayılan gaz miktarı ve difüzyon gücü tahmin edilmekte, artık gaz miktarı ise ölçülmemektedir (McLennan ve diğ, 1995).

$$V_{\text{des}}(t) = V_{\text{tot}} \left[1 - \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D}{r^2} t\right) \right] - V_1 \quad (3.7)$$

Burada,

V_{des} : Yayılan gaz miktarı,

V_{tot} : Numunenin toplam gaz içeriği ($Q_1 + Q_2$),

$\frac{D}{r^2}$: Difüzyon gücü,

V_1 : Kayıp gaz miktarı.

Geliştirilen bir diğer eğri uydurma yöntemi ise analitik yöntem olarak isimlendirilen, desorpsiyon sürecinin sonlarında kümülatif yayılan gaz miktarının geçen zaman ile doğrusal bir şekilde ilişkili olduğu kabulüne dayanarak numunenin yalnızca artık gaz miktarının tahmin edilmesinde kullanılan bir yöntemdir (Seidle, 2011). Analitik yöntem ile artık gaz miktarı bileşeninin tahmin edilmesi için kümülatif yayılan gaz miktarı ve geçen zamanın tersi grafiği üzerinde bir eğilim çizgisi oluşturulmalı ve sıfır zamanına göre ekstrapolasyon uygulanmalıdır. USBM doğrudan yöntemine göre ölçülen artık gaz miktarlarına kıyasla, analitik yöntem ile artık gaz miktarları genellikle biraz daha fazla tahmin edilmekte; ancak artık gaz bileşeninin toplam gaz içeriğindeki oranı ile analitik yöntemin sunduğu zaman ve maliyet avantajları göz önüne alındığında bu fark önemini yitirebilmektedir (Hou ve diğ, 2020).

3.1.5 Gaz Araştırma Enstitüsü (GRI) yöntemi

Gaz Araştırma Enstitüsü (GRI) tarafından USBM doğrudan yöntemi temel alınarak geliştirilen gaz içeriği belirleme yöntemi, toplam gaz içeriğini kayıp gaz miktarı, yayılan gaz miktarı ve artık gaz miktarı olmak üzere üç ana bileşene ayırarak incelemektedir (McLennan ve diğ., 1995). GRI yöntemi ölçüm prosedürleri bakımından USBM doğrudan yöntemi ile çok sayıda ortak nokta barındırmakta; yöntemin öne çıkardığı ana farklılık ise kayıp gaz miktarının tahmini üzerine olmaktadır (Diamond ve Schatzel, 1998). Kömür numunesinden gaz desorpsiyonu sıfır zamanında yüksek rezervuar sıcaklığında başlamakta, ancak USBM doğrudan yönteminde kayıp gaz miktarı, ortam sıcaklığında ölçülen yayılan gaz miktarı verilerine bağlı kalınarak tahmin edilmektedir. Mavor ve Pratt (1996) gerçekleştirdikleri çalışmalarda, doğrudan yöntemlerin kullanıldığı gaz içeriği belirleme çalışmalarında yayılan gaz miktarının ortam sıcaklığında ölçülmesinin kayıp gaz miktarının eksik ve hatalı tahmin edilmesine yol açabileceğini göstermiştir. GRI yöntemine göre yayılan gaz miktarı ölçümleri, kanisterlerin rezervuar sıcaklığına göre ayarlanmış olan bir ölçüm havuzuna yerleştirilip, sıcaklık dengesinin sağlanmasının ardından gerçekleştirilmektedir (Diamond ve Schatzel, 1998). Rezervuar sıcaklığında elde edilmiş desorpsiyon verilerinin sıfır zamanına ekstrapolasyonu ile kayıp gaz miktarının daha güvenilir bir şekilde tahmin edileceği ileri sürülmüştür. GRI yöntemi, ısıtılmış bir rezervuar havuzunun kullanılmasına ek olarak sıfır zamanının kabulü noktasında da USBM doğrudan yönteminden ayrılmaktadır. McLennan ve diğ. (1995) sıfır zamanını, sondaj akışkanının hidrostatik basıncının rezervuar basıncına eşit olduğu zaman olarak tanımlamıştır. Buna göre, GRI yönteminde sıfır zamanının belirlenmesi adına rezervuar basıncının ölçülmesi ve numunenin kuyu içerisindeki basınç geçmişinin tahmin edilmesi gerekmektedir (Diamond ve Schatzel, 1998). Kömür numunesinin damardan kesilip, yeryüzüne çıkarılması esnasında kuyu içerisindeki basınç geçmişi, kuyu basıncının sürekli olarak ölçülmesi ile, kullanılan sondaj akışkanının yoğunluğu ve manevra sürelerinin takibi üzerinden tahmin yolu ile veya atmosferik basınç ile rezervuar basıncının zamana bağlı değişimi üzerinden interpolasyon yolu ile tahmin edilebilmektedir (McLennan ve diğ., 1995). GRI yönteminin ortaya koyduğu sıfır zamanı ile tahmin edilen kayıp gaz miktarı USBM yöntemine kıyasla daha güvenilir sonuçlar ortaya koysa da, yüksek maliyetlere sahip olduğu unutulmamalıdır (McLennan ve diğ., 1995).

3.1.6 Avustralya standart yöntemi

Yeraltı kömür madenlerinde her geçen gün artan üretim ve ilerleme hızlarının neticesinde araştırmacılar, kömür damarlarının gaz içeriğini belirlemek adına daha hızlı sonuç verebilecek yöntemler üzerinde çalışmalara başlamış, bu süreçte farklı fikirler ileri sürülse de güvenilirlik bakımından en uygun yöntemin kömür numunesinin parça boyutunun azaltılması ile desorpsiyon hızının artırılması yaklaşımının olduğu görülmüştür (Saghafi ve diğ, 1998). Bu doğrultuda bir hızlı desorpsiyon doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemi olan Avustralya standart yöntemi geliştirilmiştir (Williams ve diğ, 1992). Avustralya standart yöntemi farklı laboratuvarlarda çok sayıda tekrarlanabilirlik deneyleri ve karşılaştırılmalı testler sonucunda güvenilirliğini kanıtlamıştır (Saghafi ve diğ, 1998; Danell ve diğ, 2003; Saghafi, 2012). Yöntem sağladığı zaman avantajı ile birlikte günümüzde yeraltı kömür madenlerinde gaz emisyonlarının ve ani gaz püskürmelerinin tahmin edilmesi amacıyla gerçekleştirilen gaz içeriği belirleme çalışmalarında yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Saghafi, 2011).

Avustralya standart yöntemi, temel olarak USBM doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemi üzerine geliştirilmiştir. USBM doğrudan yöntemi ile benzer şekilde, numunenin toplam gaz içeriği üç ana bileşene ayrılarak incelenmekte; numune olarak ise karot veya yığın şeklinde minimum 500 gram kütleyle sahip kömür örnekleri kullanılmaktadır (AS 3980, 2016). Avustralya standart yöntemine göre kayıp gaz miktarı USBM doğrudan yönteminin ileri sürdüğü şekilde, kümülatif yayılan gaz hacmine karşılık geçen zamanın karekökü grafiği üzerinde sıfır zamanına doğru gerçekleştirilen ekstrapolasyon yöntemi ile tahmin edilmektedir (Saghafi ve diğ, 1998). Karot numunenin sızdırmaz kanisterlere yerleştirilmesinin ardından manometrik bir ölçüm aleti kullanılarak yayılan gaz miktarı ölçüm çalışmaları başlatılmakta, kayıp gaz zamanının tahmin edilmesi adına genellikle 20 – 60 dakika boyunca birkaç dakikalık periyotlar halinde okumalar gerçekleştirilmektedir (AS 3980, 2016). Numunenin laboratuvara getirilmesinin ardından, kanister açılmakta ve kömür örneği -200 mesh altına öğütülerek desorpsiyon hızı artırılmakta, bu aşamada yayılan gaz miktarı ölçülmeye devam edilmektedir (Saghafi, 2017). Elde edilen bu üç bileşenin toplamı ile numunenin toplam gaz içeriği birkaç saat veya birkaç günlük bir süreçte belirlenebilmekte; Avustralya standart yöntemi sağladığı zaman avantajının yanı sıra büyük bir maliyet avantajı da sağlamaktadır (Saghafi ve diğ, 1998).

3.2 Dolaylı (İndirekt) Yöntemler

Kömür damarlarının gaz içeriğini belirlemek adına uygulanan doğrudan yöntemler, kapsamlı arazi çalışmalarına ve aylarca sürebilecek maliyetli desorpsiyon ölçümlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu doğrultuda, kömür numunelerinin gaz içeriğini daha kısa zaman dilimlerinde görece düşük maliyetler ile belirleyebilmek adına farklı dolaylı (indirekt) yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen dolaylı yöntemler adsorpsiyon izotermi, jeolojik ve jeofiziksel kuyu logları ile ampirik eşitlikler olarak sınıflandırılmaktadır (Flores, 2014). Dolaylı yöntemler, kömür damarının gaz bakımından tamamen doymuş olduğunu kabul etmekte, doğada ise kömür damarları çoğunlukla gazca doymuş halde bulunmamaktadır. Dolayısıyla, dolaylı yöntemler ile genellikle numunenin gerçek gaz içeriği değerinden ziyade gaz depolama kapasitesi belirlenebilmektedir (Yee ve diğ., 1993). Dolaylı yöntemler, kömür damarlarının gaz depolama kapasitesinin belirlenmesinde etkin çözümler sunsa da; havalandırma planlamaları veya kömür kökenli metanın ekonomik olarak üretilmesi için gerçekleştirilecek çalışmalarda yalnızca bir ön değerlendirme aracı olarak kullanılması, alınacak mühendislik kararlarında gaz içeriğinin mutlaka doğrudan yöntemler kullanılarak ölçülmesi önerilmektedir (Diamond ve Schatzel, 1998).

3.2.1 Adsorpsiyon izotermi

Kömür damarlarının gaz depolama kapasiteleri laboratuvar ortamında sabit sıcaklık altında elde edilen, basınç ve adsorbe edilen gaz miktarı arasındaki ilişkinin ortaya konulduğu adsorpsiyon izotermi ile dolaylı olarak belirlenebilmektedir (Kim, 1997). İzotermi ile belirlenen gaz tutma kapasitesi Eşitlik 3.8’de sunulan, gazın kömür gözenek yüzeylerinde tek tabaklı bir şekilde adsorbe olduğu kabulünü içeren Langmuir denklemi ile açıklanmaktadır (Langmuir, 1918; Seidle, 2011).

$$V_{ads} = V_L \frac{P}{P + P_L} \quad (3.8)$$

Burada,

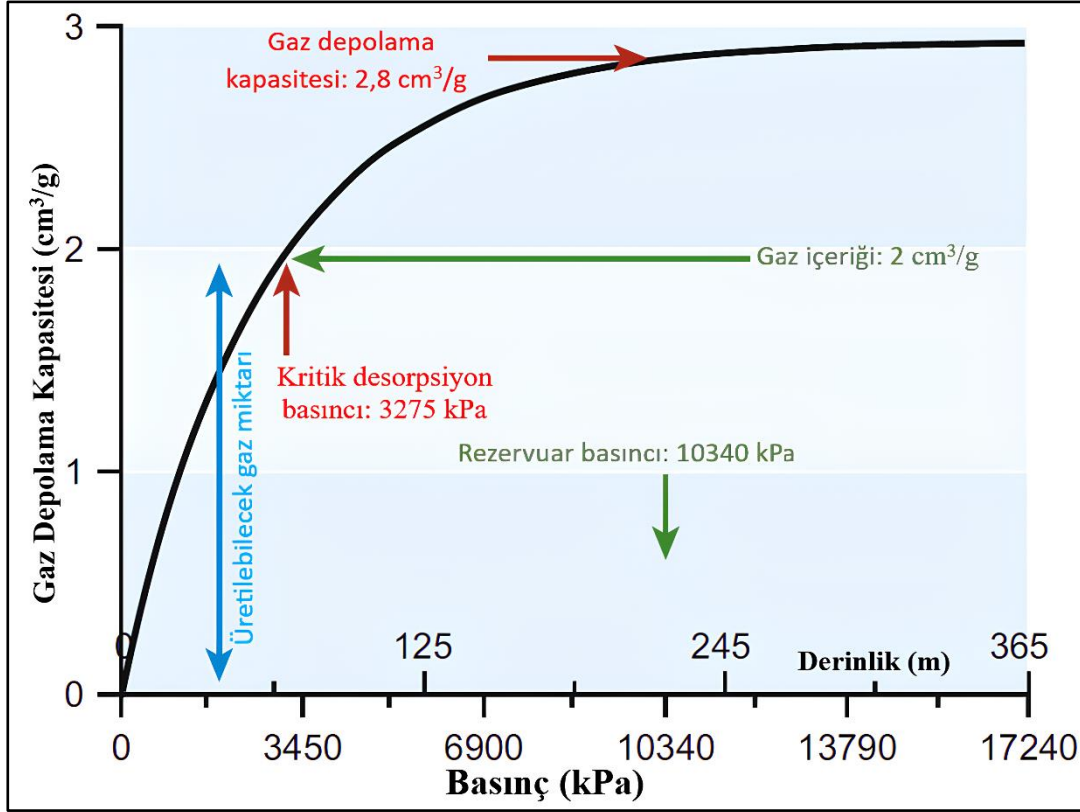
V_{ads} : Adsorbe olan gaz miktarı (cm^3/g),

V_L : Langmuir hacim sabiti (cm^3/g),

P : Basınç (MPa),

P_L : Langmuir basınç sabiti (MPa).

Adsorpsiyon izotermi ile kömür damarının gaz depolama kapasitesini belirleyebilmek adına rezervuar sıcaklığı ve basıncı bilgisine gereksinim duyulmaktadır (Seidle, 2011). İzotermi genellikle gaz üretim ve drenaj sistemlerinin tasarlanmasında, kritik desorpsiyon basıncının ve dolayısıyla üretilebilecek maksimum gaz miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Örnek bir adsorpsiyon izotermi (Flores, 2014).

Rezervuar basıncı ölçümlerinin beraberinde getirdiği zorluklara ek olarak, damarın tamamını karakterize etmek adına çok sayıda deneye ihtiyaç duyulması ve numunenin gaz içeriği yerine yalnızca gaz depolama kapasitesinin belirlenmesinin mümkün olması yöntemin temel dezavantajları olarak sınıflandırılmaktadır (McLennan ve diğ., 1995).

3.2.2 Kim eşitliği

Kömür damarlarının adsorpsiyon kapasitesinin ve dolaylı olarak gaz içeriğinin belirlenmesi adına kullanılan izotermi, yoğun bir deney programının sonucunda elde edilmektedir. Gaz tutma kapasitesinin kısa bir zamanda içerisinde, operasyonel kolaylık ve maliyet avantajı ile birlikte belirlenebilmesi adına farklı tahmin yöntemleri geliştirilmiştir.

Kim (1977) tarafından geliştirilen ve literatürde “Kim eşitliği” veya “Kim yöntemi” olarak anılan ampirik yöntem, çok sayıda bitümlü kömür örneği üzerinde gerçekleştirilen adsorpsiyon izotermi çalışmalarına dayanmaktadır. Kim (1977) gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda, gaz tutma kapasitesinin sıcaklık, basınç, kömürleşme derecesi ve nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır (McLennan ve diğ, 1995). Kim eşitliği Eşitlik 3.9’da sunulmuştur (Kim, 1977). Bu korelasyona göre, kömür numunelerinin gaz tutma kapasitesi örnekler üzerinde gerçekleştirilecek kısa kimyasal analiz çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak tahmin edilebilmektedir.

$$G_{Kim} = \frac{(100 - \%M - \%A)}{100} \frac{V_w}{V_d} \left[K_0 (0,096h)^{n_0} - 0,14 \left(\frac{1,8 h}{100} + 25 \right) \right] \quad (3.9)$$

Burada,

G_{Kim} : Adsorbe olan gaz miktarı (cm^3/g),

$\%M$: Numunenin nem içeriği (%),

$\%A$: Numunenin kül içeriği (%),

$\frac{V_w}{V_d}$: Yaş ve kuru numune hacimlerinin oranı,

K_0 : Sabit ($cm^3/g/atm$),

n_0 : Sabit,

h : Derinlik (m).

Eşitlikte sunulan hacim oranının ve K_0 ile n_0 sabitlerin hesaplanmasında kullanılan denklemler sırasıyla Eşitlik 3.10, Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12’de sunulmuştur (Kim, 1977).

$$\frac{V_w}{V_d} = \frac{1}{C_0 M + 1} \quad (3.10)$$

Burada,

$\frac{V_w}{V_d}$: Yaş ve kuru numune hacimlerinin oranı,

C_0 : Sabit (0,25),

M : Numunenin nem içeriği,

$$K_0 = 0,8 \left(\frac{FC}{VM} \right) + 5,6 \quad (3.11)$$

Burada,

K_0 : Sabit ($\text{cm}^3/\text{g}/\text{atm}$),

FC : Numunenin sabit karbon içeriği,

VM : Numunenin uçucu madde içeriği.

$$n_0 = 0,315 - 0,01 \left(\frac{FC}{VM} \right) \quad (3.12)$$

n_0 : Sabit,

FC : Numunenin sabit karbon içeriği,

VM : Numunenin uçucu madde içeriği.

4. GAZ İÇERİĞİ BELİRLEME YÖNTEMLERİNİN UYGULAMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kömür damarlarının ihtiva ettiği gaz miktarı olarak tanımlanan gaz içeriği, hem yeraltı madenlerinde havalandırma ve drenaj uygulamalarının planlanmasında hem de kömür kökenli metanın ekonomik olarak üretilmesinde öncelikli olarak bilinmesi gereken kritik bir parametredir. Bertard ve diğ. (1970) tarafından ileri sürülen ilk doğrudan gaz içeriği belirleme yönteminden günümüze kadar geçen sürede, farklı amaç ve prosedürlere sahip çok sayıda gaz içeriği belirleme yöntemi geliştirilmiştir. Kömür numunesinin damardan kesilmesiyle birlikte başlayan desorpsiyon sürecinde, kayıp gaz bileşeninin doğrudan ölçülmesi yalnızca yüksek maliyet ve uygulama problemleri barındıran basınç karotiyerli sondaj tekniği ile mümkün olmaktadır (Seidle, 2011). Tekniğin beraberinde getirdiği dezavantajlar neticesinde, basınç karotiyerli teknik ile elde edilen sonuçlara oldukça yakın sonuçlar sunan ve Kissel ve diğ. (1973) tarafından geliştirilen, USBM doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemi günümüzde bir endüstri standardı haline gelmiştir (Seidle, 2011). Kayıp gaz miktarı, yayılan gaz miktarı ve artık gaz miktarı olmak üzere üç bileşen için farklı prosedürler içeren USBM doğrudan yöntemi ile gaz içeriği değerinin belirlenmesi uzun zaman gerektirmekte ve görece yüksek maliyetler içermektedir. Bu sebeplerle, daha kısa zaman dilimlerinde, daha düşük maliyetler ile güvenilir bir şekilde kömür damarlarının gaz içeriğinin belirlenmesi günümüzde halen maden ve petrol endüstrisinin ortak bir ihtiyacıdır. Özellikle, dinamik olarak gelişen yeraltı maden şebekelerinde hızlı aksiyonların alınabilmesi ve iş güvenliğinin maksimize edilmesi adına, ocak içerisine yayılacak gaz miktarının mümkün olan en kısa sürede belirlenebilmesi kritik önem taşımaktadır.

Günümüze dek geliştirilen yöntemler ile elde edilen sonuçların damarın fiziksel ve kimyasal özellikleri, gaz bileşimi, gaz içeriği bileşenlerinin oranı, gaz doygunluğu gibi faktörlerden etkilendiği bilinmektedir. Dolayısıyla, USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen gaz içeriği değerine en yakın sonucu verebilecek yöntem her bir kömür havzası için farklı olabilmektedir.

Bu doğrultuda Türkiye’de bulunan çeşitli havzalara ait kömür örnekleri üzerinde farklı kabul ve uygulamalar içeren, günümüzde yaygın olarak kullanılan USBM doğrudan yöntemi, Smith & Williams yöntemi, Amoco eğri uydurma yöntemi, analitik yöntem ve dolaylı yöntemlerden Kim eşitliği teknikleri uygulanmış, elde edilen sonuçlar zaman ve güvenilirlik açısından kıyaslanmıştır.

4.1 Çalışmada Kullanılan Kömür Örneklerinin Genel Özellikleri

Gaz içeriği belirleme yöntemlerinin farklı kömürleşme derecesi ve farklı gaz içeriği değerlerine sahip kömür damarlarında gösterdiği performansın değerlendirilmesi adına, desorpsiyon ölçümleri ve kimyasal analizleri İTÜ Maden Havalandırması ve İş Güvenliği Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilen Eskişehir – Alpu, Manisa – Soma ve Zonguldak havzalarına ait kömür numuneleri üzerinde analiz ve uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya konu olan her bir havzaya ait karot örnekleri bakir damarlardan, çelik halatlı (wireline) sondaj tekniği ile yeryüzünden elde edilmiştir. Çalışmalarda ilgili kömür damarlarının tamamına ait gaz içeriği değerlerinin ortaya konulabilmesi adına farklı lokasyonlardan, çeşitli aralıklarla, çok sayıda numune alınmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu çalışmada her bir havzaya ait birer adet numune üzerinde gaz içeriği ölçüm yöntemleri değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler adına kullanılan kömür numuneleri; Eskişehir – Alpu havzasında B sektörüne ait A damarından, Manisa – Soma havzasında kM2 damarından, Zonguldak havzasında ise Azdavay kömürlerinden tercih edilmiştir.

Arazi çalışmalarında kömür örneklerinin yeryüzüne ulaşmasıyla birlikte ASTM D7569 standardına göre desorpsiyon ölçümleri, çelik malzemeden imal edilmiş sızdırmaz kanisterler ve büret yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sahada gerçekleştirilen ilk okumaların ardından, numuneler laboratuvara nakledilmiş ve desorpsiyon sürecinin tamamlanmasının ardından artık gaz ölçümleri Fritsch Pulverisette 9 halkalı değirmen ile öğütülerek gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon ölçümleri sonrasında, numunelerin kısa kimyasal analizleri ile kükürt ve kalorifik değer analizleri sırasıyla ASTM D3172, D5016 ve D5865 standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mineral madde içeriği ise Parr eşitliği kullanılarak elde edilmiş (Speight, 2005); ardından numunelerin kömürleşme dereceleri ASTM D388 standardına göre sınıflandırılmıştır. Çalışmada kullanılan kömür numunelerinin genel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan kömür örneklerine ait genel bilgiler ve kimyasal analiz sonuçları.

Havza	Kot (m)		Kimyasal Analiz (%)								KD _{m,MMF} (MJ/kg)	Kömürleşme Derecesi
	Giriş	Çıkış	N _{ar}	K _{ar}	UM _{ar}	SK _{ar}	TK _{ar}	MM _{ar}	UM _{d,MMF}	SK _{d,MMF}		
Alpu	372,65	373,25	32,93	21,35	28,23	17,5	0,32	36,45	60,19	39,81	14,08	Linyit B
Soma	957,60	957,85	11,40	30,83	31,43	26,34	0,93	33,81	52,18	47,82	21,90	Alt Bitümlü C
Zonguldak	177,30	177,60	1,39	11,37	15,24	72,00	0,87	12,75	16,29	83,71	-	Düşük Uçuculu Bitümlü

N: nem, K: kül, UM: uçucu maade, SK: sabit karbon, TK: toplam kükürt, MM: mineral madde, KD: kalorifik değer, ar: orijinal baz, d,MMf: kuru – mineral maddesiz baz, m,MMF: nemli – mineral maddesiz baz.

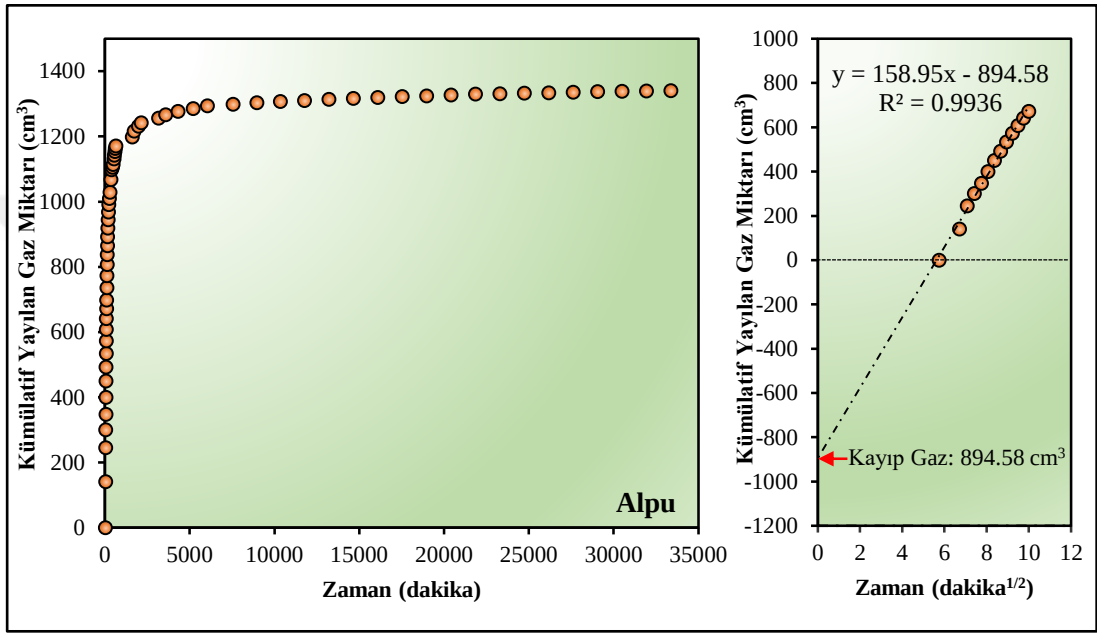
4.2 USBM Yönteminin Uygulaması

Alpu, Soma ve Zonguldak kömür havzalarında, numunenin toplam gaz içeriğini kayıp gaz miktarı (Q_1) , yayılan gaz miktarı (Q_2) ve artık gaz miktarı (Q_3) olmak üzere üç ana bileşene ayırarak inceleyen ve günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahip USBM doğrudan yöntemi ile gaz içeriği belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kayıp gaz zamanını minimize etmek ve kayıp gaz miktarı tahmininin güvenilirliğini artırmak adına, sondaj faaliyetleri esnasında örneklerin damardan kesildikleri ilk zaman, yeryüzüne çıkarıldıkları zaman ve sızdırmaz kanisterlere yerleştirildikleri zamanlar titizlikle kayıt altına alınıp; numuneler mümkün olan en kısa süre içerisinde kanisterlere yerleştirilip, sızdırmazlıkları sağlanmıştır. Numunelerin kanisterlere yerleştirilmesinin ardından ASTM D7569 standardına bağlı kalınarak desorpsiyon ölçümleri bir büret vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Sızdırmaz kanisterlerden ölçümler yaklaşık olarak, ilk 2 saatte 5'er dakikalık periyotlar ile, sonrasındaki 5. saate kadar 10 – 15 dakikalık periyotlar ile, ardından 12. saate kadar 1 saatlik periyotlar halinde gerçekleştirilmiştir. Kanisterlerin sondaj sahasından laboratuvara nakliyatının sağlanmasının ardından ise ölçümler 24 saatlik periyotlar halinde, desorpsiyon günlük bazda $0,05\text{cm}^3/\text{g}$ değerine ulaşıncaya dek sürdürülmüştür. Gerçekleştirilen her bir ölçümde ortam sıcaklığı ve atmosferik basınç değerleri, ölçüm sonuçlarını standart sıcaklık ve basınç değerlerine (273.15 K ve 101 KPa) göre normalize etmek adına kaydedilmiştir. Desorpsiyon okumalarının sonlandırılması ve ölçülen değerlerin standart değerlere göre düzenlenmesi ile birlikte numunelerin kümülatif yayılan gaz miktarı elde edilmiştir. Elde edilen kümülatif yayılan gaz miktarlarının kanistere yerleştirilen numune ağırlıklarına (Alpu: 2444 g, Soma: 405 g, Zonguldak: 2172,34 g) bölünmesi ile birlikte her bir numuneye ait yayılan gaz miktarı belirlenmiştir.

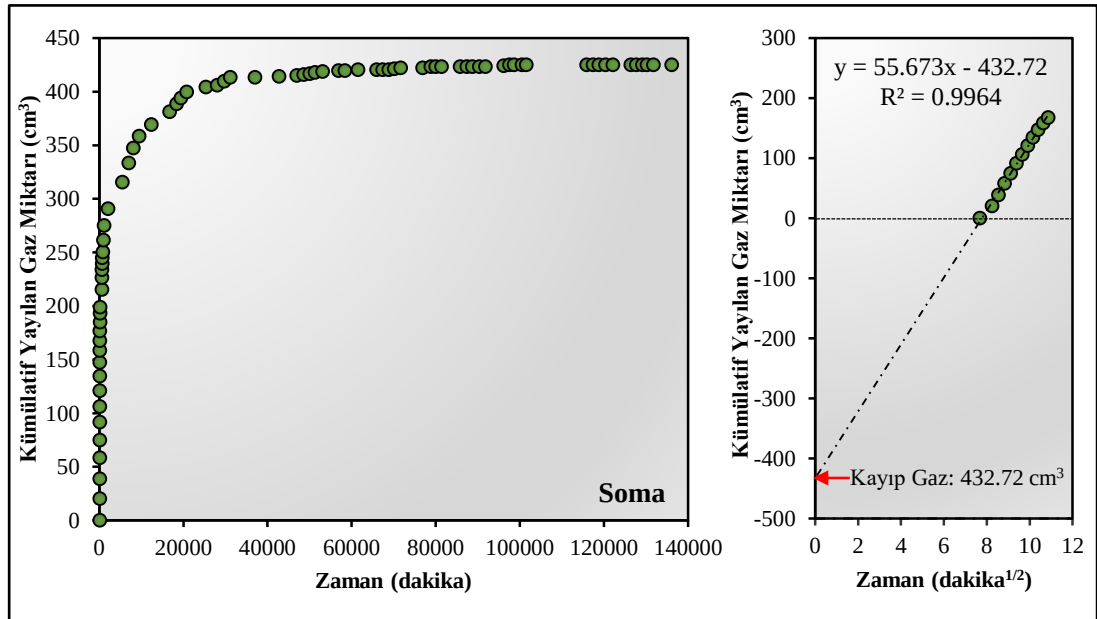
Numunelerin kayıp gaz miktarı USBM doğrudan yöntemine göre, kümülatif yayılan gaz miktarına karşılık geçen zamanın karekökü grafiği üzerinden, sıfır zamanına gerçekleştirilen ekstrapolasyon yoluyla tahmin edilmiştir. Bahsedildiği üzere, kayıp gaz miktarının doğru tahmin edilebilmesi için desorpsiyon ölçümlerinin ilk birkaç saati büyük önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen ölçümlerde bu hususa dikkat edilmesi sayesinde kayıp gaz miktarları yüksek güvenilirlik ile tahmin edilebilmiştir. Kümülatif olarak tahmin edilen kayıp gaz miktarlarının numune ağırlıklarına bölünmesi ile birlikte her bir numuneye ait kayıp gaz miktarları belirlenmiştir.

Artık gaz miktarı ise desorpsiyon ölçümlerinin tamamlanmasının ardından, kanister içerisinden çıkarılan kömür numunelerinden alınan yaklaşık 50 gramlık örneklerin sızdırmaz bir hazneye sahip halkalı değirmen ile öğütülmesi ve bir büret vasıtasıyla açığa çıkan gazın doğrudan ölçülmesi yoluyla belirlenmiştir.

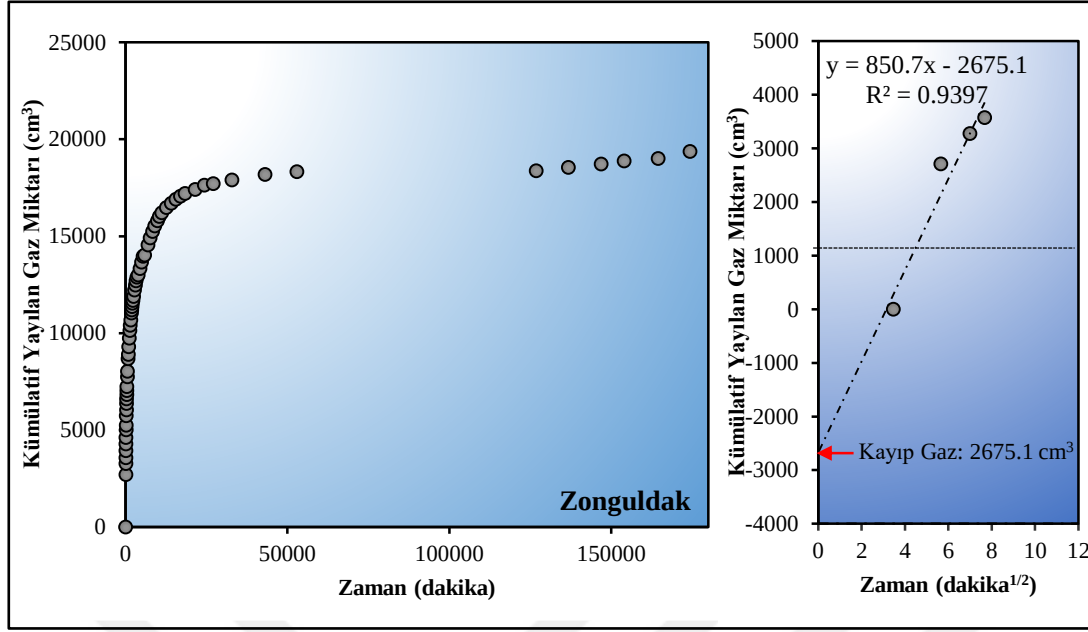
Uygulanan desorpsiyon ölçümleri sonucunda elde edilen desorpsiyon eğrileri ile kayıp gaz miktarlarının tahminine ilişkin grafikler Alpu, Soma ve Zonguldak kömür havzaları için sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.1 : Alpu numunesine ait kümülatif yayılan gaz ve kayıp gaz tahmin grafiği.



Şekil 4.2 : Soma numunesine ait kümülatif yayılan gaz ve kayıp gaz tahmin grafiği.



Şekil 4.3 : Zonguldak numunesine ait kümülatif yayılan gaz ve kayıp gaz tahmin grafiği.

USBM doğrudan yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda orijinal bazda toplam gaz içeriği, Alpu havzasına ait numune için 1,12 cm³/g (m³/ton), Soma havzasına ait numune için 2,78 cm³/g (m³/ton), Zonguldak havzasına ait numune için ise 11,23 cm³/g (m³/ton) olarak belirlenmiş olup, tüm gaz içeriği bileşenlerine ait belirlenen değerler Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 : USBM doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemi ile elde edilen sonuçlar.

Havza	Ort. Derinlik (m)	USBM Gaz İçeriği (cm ³ /g) _{ar}			
		Kayıp Gaz Miktarı	Yayılan Gaz Miktarı	Artık Gaz Miktarı	Toplam Gaz İçeriği
Alpu	372,95	0,37	0,55	0,20	1,12
Soma	957,73	1,07	1,05	0,66	2,78
Zonguldak	177,45	1,23	8,92	1,08	11,23

ar: orijinal baz.

4.3 Smith & Williams Yönteminin Uygulaması

Smith & Williams doğrudan gaz içeriği belirleme yönteminde yayılan gaz miktarı bileşeni USBM doğrudan yöntemi ile benzer şekilde ölçülmekte; kayıp ve artık gaz bileşenlerinin belirlenmesi hususunda ise USBM doğrudan yönteminden ayrılmaktadır. Smith & Williams yönteminde numune alma süreci ile ilgili sürelerden elde edilen boyutsuz katsayılar kullanılarak bir düzeltme faktörü elde edilmektedir. Elde edilen düzeltme faktörünün yayılan gaz miktarı ile çarpılması sonucunda ise numunenin toplam gaz içeriği belirlenebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, Smith & Williams yönteminde belirlenen toplam gaz içeriği değerine artık gaz miktarı bileşeninin dahil olmadığıdır. Yöntem yalnızca, kayıp ve yayılan gaz bileşenlerinin belirlenmesinde kullanılmakta, dolayısıyla USBM doğrudan yöntemine kıyasla zaman ve maliyet avantajı sunmaktadır.

Alpu, Soma ve Zonguldak havzalarından alınan numuneler üzerinde Smith & Williams yöntemi ile gaz içeriği belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiş, yöntemin uygulanabilmesi adına belirlenmesi gereken katsayılar belirlenmiş ve bu katsayılar göre yöntemin sunmuş olduğu abak üzerinden seçilen düzeltme faktörü ile ilgili detaylar Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3 : Alpu, Soma ve Zonguldak örnekleri için kayıp zaman oranı, yüzey zamanı oranı ve düzeltme faktörü değerlerinin belirlenmesi.

Havza	T _s (dk)	T _d (dk)	T _{25%} (dk)	LTR	STR	CF
Alpu	33	27	60	0,55	0,18	1,5179
Soma	59	43	93	0,64	0,27	1,8628
Zonguldak	12	9	116	0,11	0,25	1,082

T_s: numunenin bakir konumundan kanistere yerleştirilmesine kadar geçen süre, T_d: numunenin bakir konumundan yeryüzüne çıkarılmasına kadar geçen süre, T_{25%}: toplam yayılan gaz miktarının %25'inin desorbe olması için geçen süre, LTR: kayıp zaman oranı, STR: yüzey zamanı oranı, CF: düzeltme faktörü.

Smith & Williams doğrudan yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda orijinal bazda toplam gaz içeriği, Alpu havzasına ait numune için 0,83 cm³/g (m³/ton), Soma havzasına ait numune için 1,96 cm³/g (m³/ton), Zonguldak havzasına ait numune için ise 9,65 cm³/g (m³/ton) olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar detaylarıyla birlikte Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

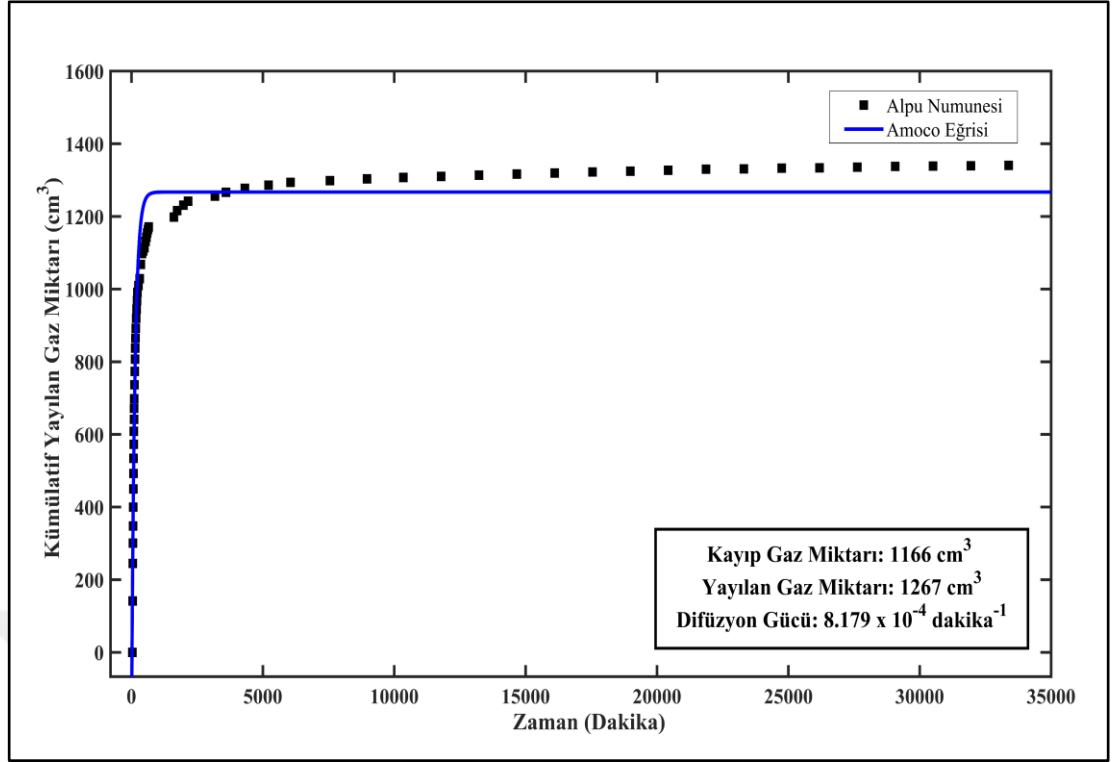
Çizelge 4.4 : Smith & Williams yöntemi ile elde edilen sonuçlar.

Havza	Yayılan Gaz Miktarı (cm ³ /g) _{ar}	CF	S & W Gaz İçeriği (cm ³ /g) _{ar}	
			Toplam Gaz İçeriği	Kayıp Gaz Miktarı
Alpu	0,55	1,5179	0,83	0,28
Soma	1,05	1,8628	1,96	0,91
Zonguldak	8,92	1,082	9,65	0,73

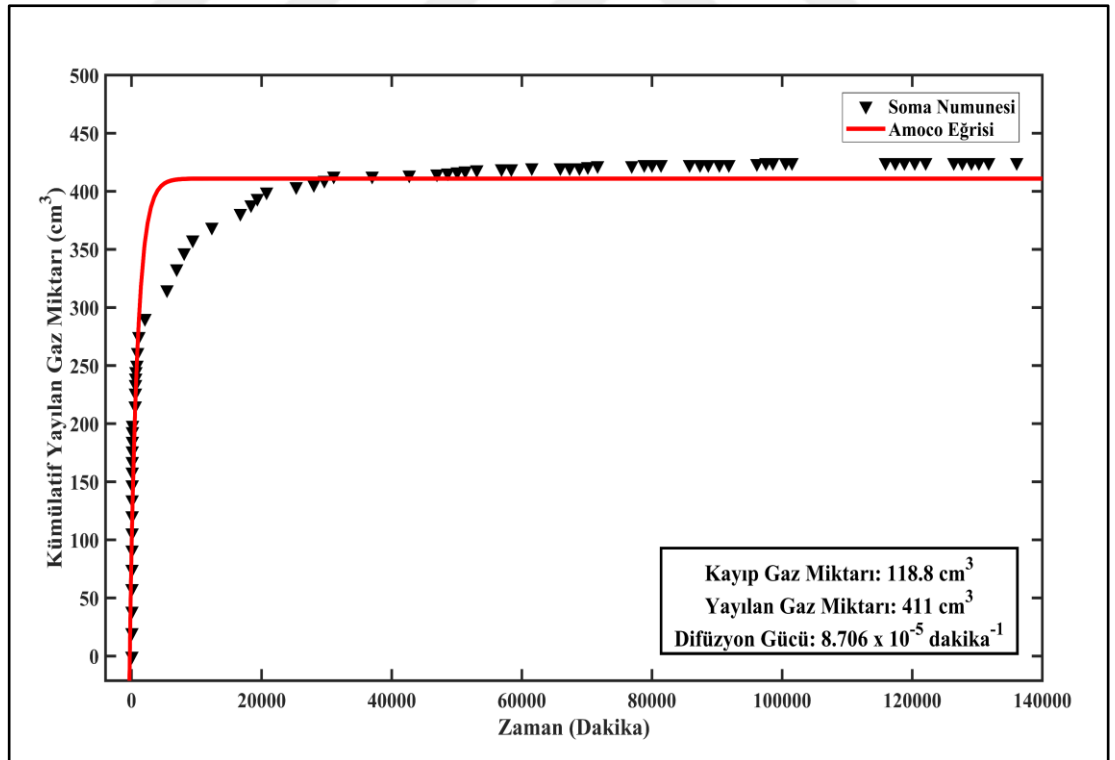
ar: orijinal baz, CF: düzeltme faktörü, S & W: Smith & Williams.

4.4 Amoco Eğri Uydurma Yönteminin Uygulaması

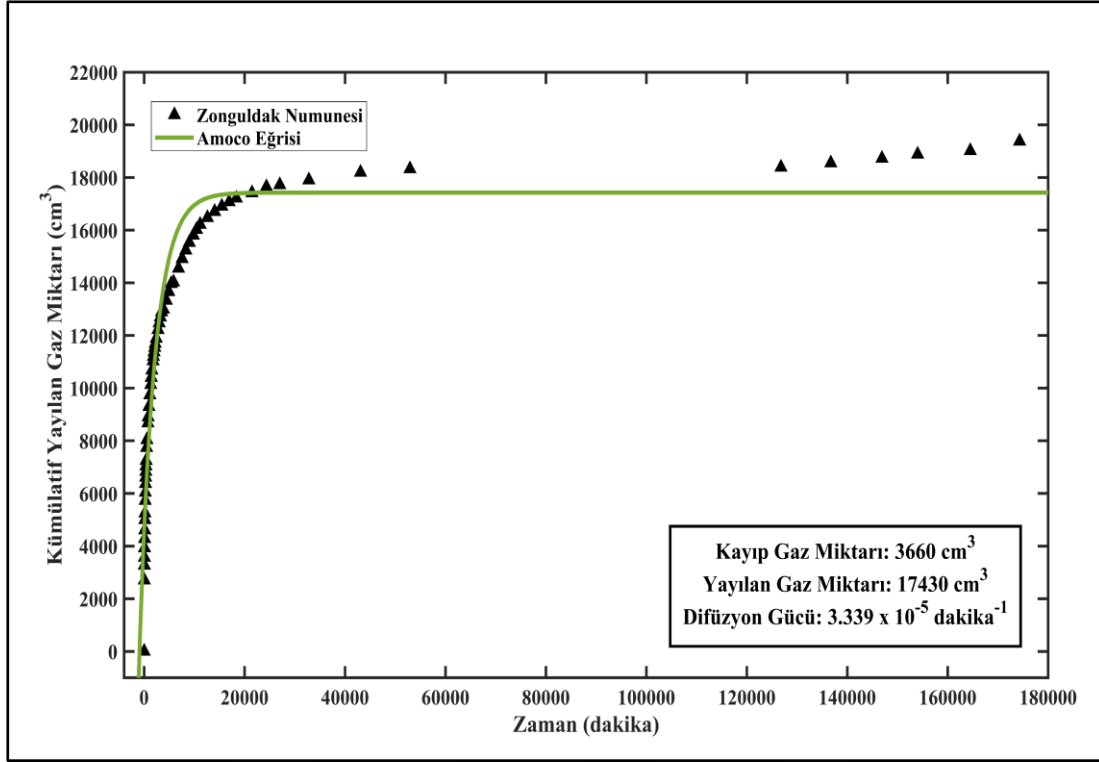
Amoco eğri uydurma yönteminde, desorpsiyon ölçümleri sonucunda elde edilen kümülatif yayılan gaz miktarı verileri üzerinde yöntemin sunmuş olduğu doğrusal olmayan eşitliğin uyarlanması sonucunda kayıp gaz miktarı, yayılan gaz miktarı ve numuneye ait difüzyon gücü tahmin edilebilmektedir. Yöntemin uygulanabilmesi adına bir bilgisayar yazılımından faydalanılması önerilmektedir (Mavor ve Nelson, 1997). Bu doğrultuda , çalışmalar esnasında Matlab R2022b paket programından faydalanılmıştır. Çalışmaya konu olan Alpu, Soma ve Zonguldak kömür havzalarına ait numuneler üzerinde Amoco eğri uydurma yöntemi uygulanmış olup, elde edilen Amoco eğrileri sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulmuştur. Amoco eğri yöntemi ile tahmin edilen gaz içeriği değerlerinin güvenilirliği desorpsiyon verilerinin dağılımı ile yakından ilişkilidir. Bu çalışmada Amoco eğrisinin korelasyon katsayısının (R²) Alpu havzasına ait numune için 0,97, Soma havzasına ait numune için 0,93, Zonguldak havzasına ait numune için ise 0,95 olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4 : Alpu numunesine ait desorpsiyon verileri ile uygulanan Amoco eğri uydurma yöntemi.



Şekil 4.5 : Soma numunesine ait desorpsiyon verileri ile uygulanan Amoco eğri uydurma yöntemi.



Şekil 4.6 : Zonguldak numunesine ait desorpsiyon verileri ile uygulanan Amoco eğri uydurma yöntemi.

Numuneler üzerinde uygulanan Amoco eğri uydurma yöntemi ile elde edilen gaz içeriği ve difüzyon gücü değerlerinin detayları Çizelge 4.5’te sunulmuştur.

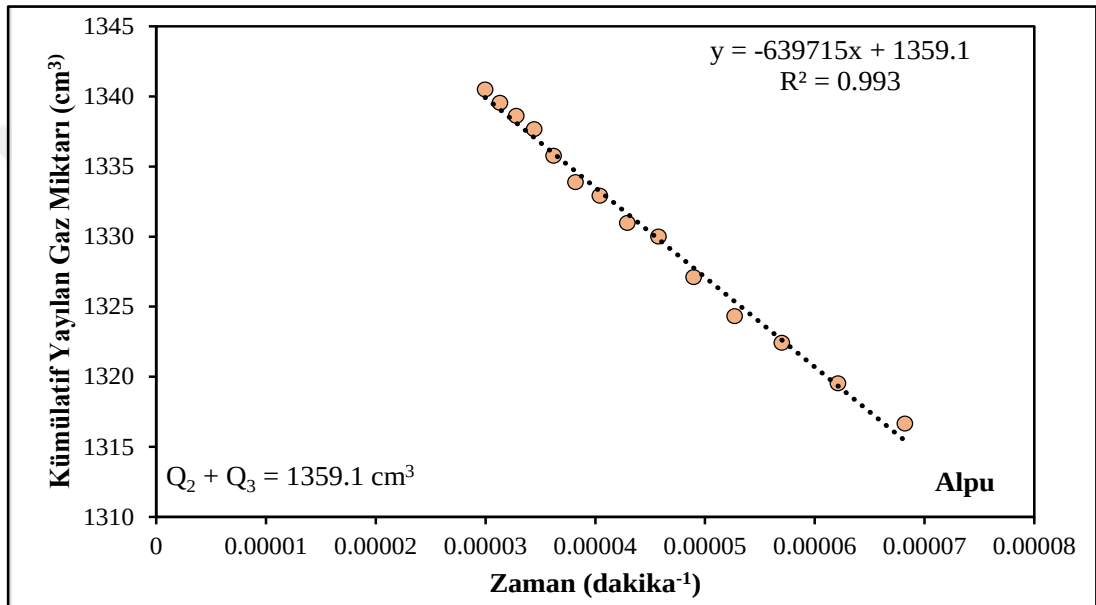
Çizelge 4.5 : Amoco yöntemi ile elde edilen sonuçlar.

Havza	Difüzyon Gücü (dk ⁻¹)	Amoco Gaz İçeriği (cm ³ /g) _{ar}		
		Kayıp Gaz Miktarı	Yayılan Gaz Miktarı	Toplam Gaz İçeriği
Alpu	8,179 x 10 ⁻⁴	0,48	0,52	1,00
Soma	8,706 x 10 ⁻⁵	0,29	1,01	1,31
Zonguldak	3,339 x 10 ⁻⁵	1,68	8,02	9,70

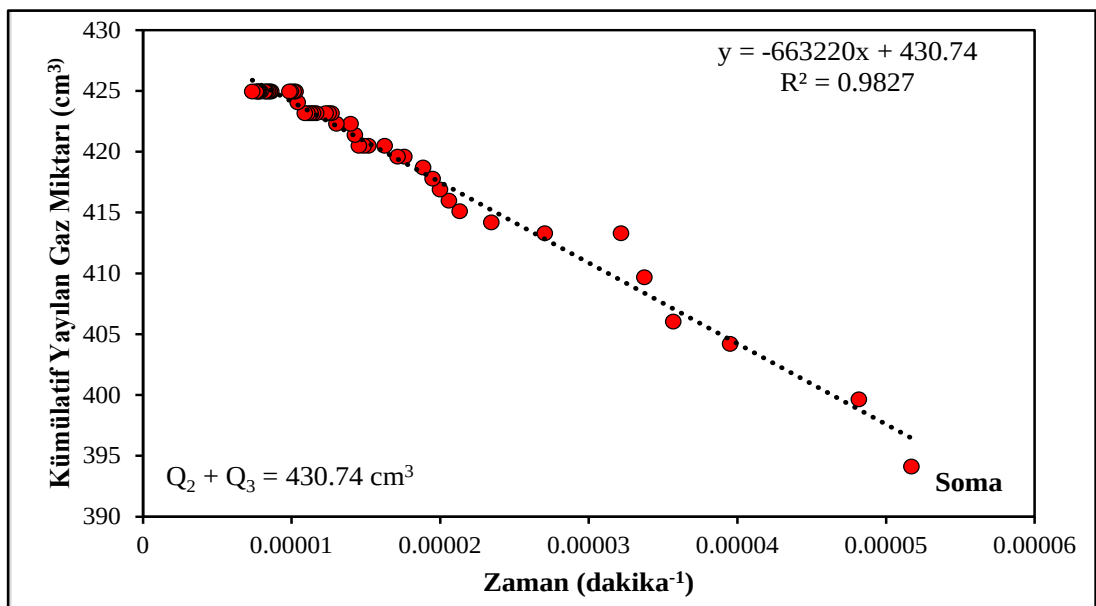
ar: orijinal baz

4.5 Analitik Yöntemin Uygulaması

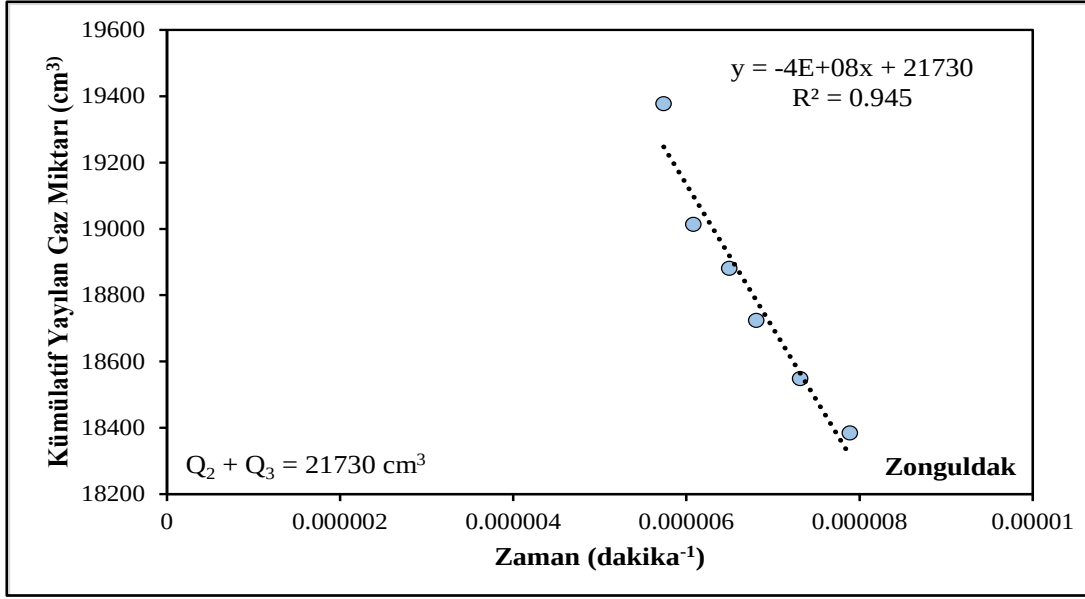
Son desorpsiyon verileri kullanılarak yalnızca artık gaz miktarının tahmin edilmesinde kullanılan analitik yöntem ile Alpu, Soma ve Zonguldak kömür havzalarına ait kömür numuneleri için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Analitik yöntemin uygulanabilmesi adına her bir numuneye ait kümülatif yayılan gaz miktarına karşılık geçen zamanın tersi grafikleri çizilmiş ve ekstrapolasyon yoluyla numunelerin artık gaz miktarları tahmin edilmiştir. Alpu, Soma ve Zonguldak numunelerine ait analitik yöntem grafikleri sırasıyla Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.7 : Alpu numunesi desorpsiyon verileri ile analitik yöntem uygulaması.



Şekil 4.8 : Soma numunesi desorpsiyon verileri ile analitik yöntem uygulaması.



Şekil 4.9 : Zonguldak numunesi desorpsiyon verileri ile analitik yöntem uygulaması.

Analitik yöntem ile gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde artık gaz miktarları orijinal bazda, Alpu havzası numunesi için $0,008 \text{ cm}^3/\text{g}$ (m^3/ton), Soma havzası numunesi için $0,015 \text{ cm}^3/\text{g}$ (m^3/ton) ve Zonguldak havzası numunesi için $1,08 \text{ cm}^3/\text{g}$ (m^3/ton) olarak tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, düşük gaz içeriğine sahip Alpu ve Soma havzası numunelerinde analitik yöntem ile, artık gaz miktarı olduğundan çok daha düşük tahmin edilirken; yüksek gaz içeriğine sahip Zonguldak numunesinde fazlasıyla tutarlı bir tahmin gerçekleştirildiği görülmüştür.

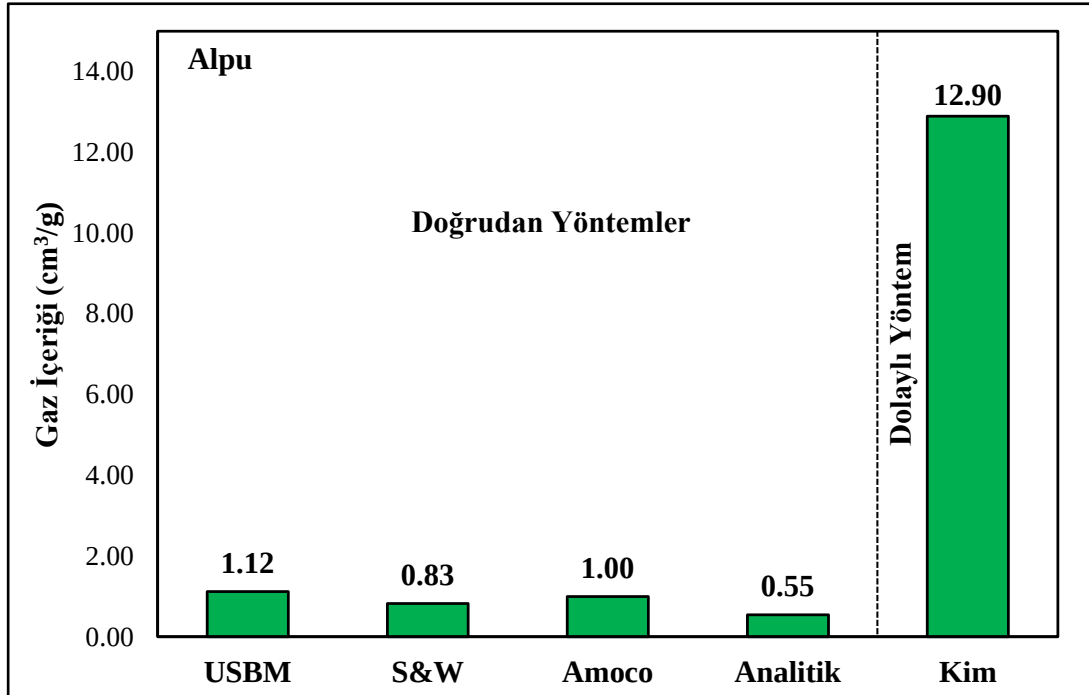
4.6 Kim Eşitliğinin Uygulaması

Dolaylı ve ampirik bir yöntem olan Kim eşitliği temel olarak kömür damarlarının gaz tutma kapasitelerinin tahmin edilmesinde kullanılmakta, ancak damarın gazca doymun olduğu kabulü ile birlikte gaz içeriği tahmin çalışmalarında da uygulama alanına sahip olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda, numulere ait kısa kimyasal analiz sonuçları kullanılarak Kim eşitliği ile gaz içeriği tahmin çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kim eşitliği ile gaz içerikleri orijinal bazda, Alpu havzası numunesi için $12,90 \text{ cm}^3/\text{g}$ (m^3/ton), Soma havzası numunesi için $18,64 \text{ cm}^3/\text{g}$ (m^3/ton) ve Zonguldak havzası numunesi için ise $16,04 \text{ cm}^3/\text{g}$ (m^3/ton) olarak tahmin edilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer yöntemlere kıyasla, Kim eşitliği ile numunelerin tahmin edilmesi için oldukça kısa bir zaman gerekmektedir. Numunelere ait kısa kimyasal analiz çalışmalarının tamamlanmasının ardından herhangi bir desorpsiyon deneyine ihtiyaç duyulmadan, tahmin gerçekleştirilebilmektedir.

4.7 Yöntemlerin Karşılaştırılması

Alpu, Soma ve Zonguldak havzalarına ait kömür numuneleri kullanılarak USBM, Smith & Williams, Amoco eğri uydurma, analitik ve Kim eşitliği yöntemleri ile gaz içeriği tahmin ve belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Günümüzde bir standart haline gelmiş, gaz içeriğine ait tüm bileşenlerin belirlenebildiği fakat zaman ve maliyet dezavantajlarına sahip USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen sonuçlar, kullanılan diğer yöntemler ile karşılaştırılmış; daha düşük maliyetler ve daha kısa zaman dilimlerinde gaz içeriğinin güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla uygulanan diğer yöntemlerin güvenilirliği irdelenmiştir. Çalışmada uygulanan yöntemlerin farklı gaz içeriği bileşenlerine ait sonuçlar üretebilmesi ve farklı kabuller üzerine kurulu olmasına ek olarak kullanılan kömür numunelerinin farklı miktarlarda gaz ihtiva etmesi de her bir yöntem ve numune özelinde hata miktarlarının değişiklik göstermesine sebep olmuştur.

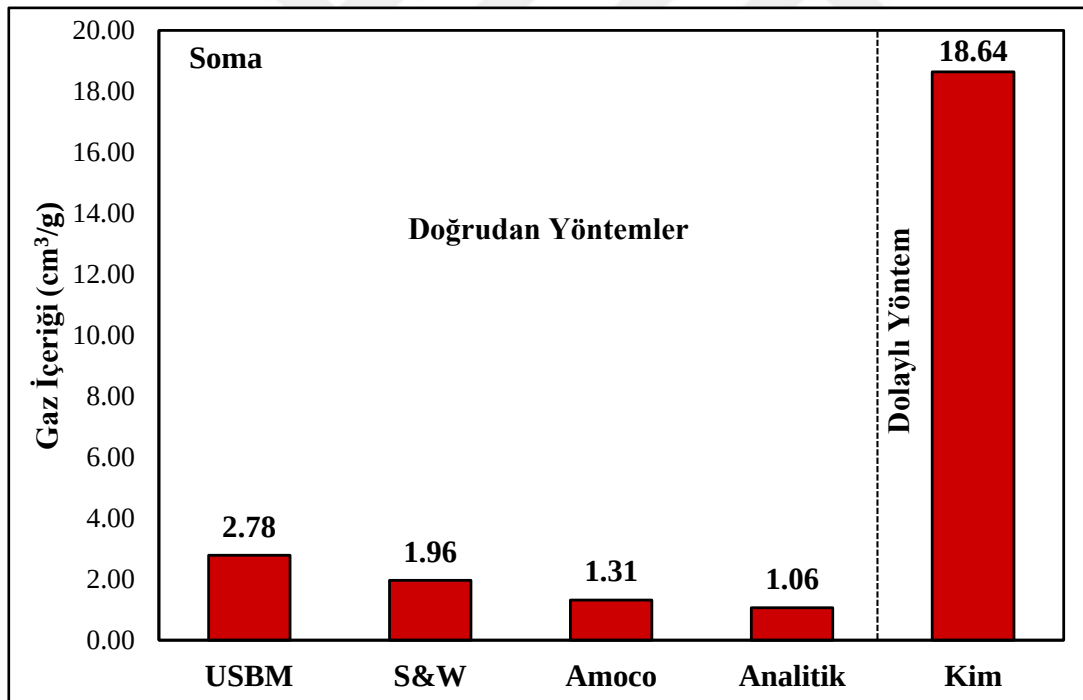
Alpu havzasına ait kömür numunesi üzerinde uygulanan farklı gaz içeriği belirleme yöntemleri sonucunda; USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen 1,12 cm³/g toplam gaz içeriği değerine en yakın sonuç, Amoco eğri uydurma yöntemi kullanılarak %10,7 hata miktarı ile 1,00 cm³/g olarak tahmin edilmiş, tüm yöntemler ile belirlenen gaz içeriği değerleri Şekil 4.10'da özetlenmiştir.



Şekil 4.10 : Alpu numunesi üzerinde uygulanan farklı yöntemler ile tahmin edilen toplam gaz içeriği değerleri.

Alpu numunesinde USBM yöntemi ile belirlenen gaz içeriği değerine kıyasla, Kim eşitliği yöntemi ile gaz içeriği çok yüksek olarak tahmin edilmiştir. Bu durumun temel sebebi, Kim eşitliği ile numunenin maksimum gaz tutma kapasitesinin tahmin edilmesi ve Alpu havzası A damarının gazca tamamen doygun olmaması olarak açıklanabilmektedir. Uygulanan diğer doğrudan yöntemlerde ise gaz içeriği, Smith & Williams ve Amoco yönteminde artık gaz bileşenine, analitik yöntemde ise kayıp gaz bileşenine yönelik herhangi bir ölçüm veya tahmin prosedürünün bulunmaması sebebiyle USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen değere kıyasla daha düşük olarak tahmin edilmiştir.

Soma havzasına ait kömür numunesi üzerinde uygulanan farklı gaz içeriği belirleme yöntemleri sonucunda; USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen $2,78 \text{ cm}^3/\text{g}$ toplam gaz içeriği değerine en yakın sonuç, Smith & Williams yöntemi kullanılarak %29,50 hata miktarı ile $1,96 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak tahmin edilmiş, tüm yöntemler ile belirlenen gaz içeriği değerleri Şekil 4.11’de sunulmuştur.

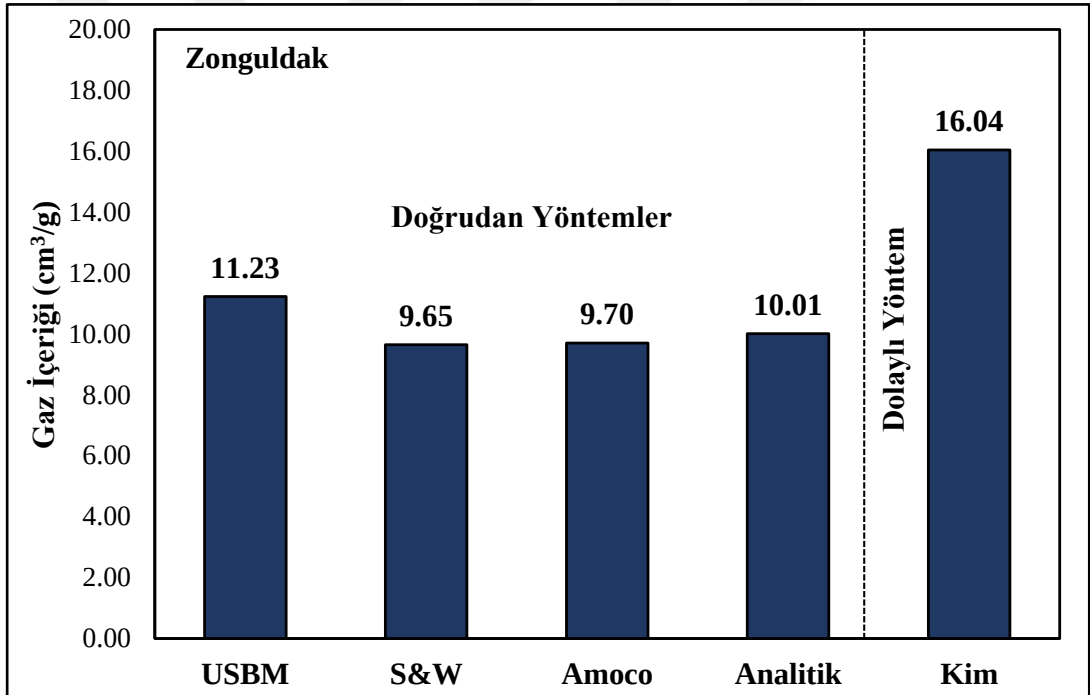


Şekil 4.11 : Soma numunesi üzerinde uygulanan farklı yöntemler ile tahmin edilen toplam gaz içeriği değerleri.

Alpu numunesi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar ile benzer şekilde Soma numunesinde de, Smith & Williams, Amoco ve analitik yöntem uygulanarak tahmin edilen gaz içerikleri, USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen sonuçlara kıyasla daha düşük olarak tahmin edilmiştir.

Kim eşitliği yöntemi ile ise, Soma numunesi özelinde de USBM doğrudan yöntemine kıyasla aşırı bir tahminde bulunulmuştur. Ancak, Esen ve Fişne (2024) tarafından gerçekleştirilen adsorpsiyon izotermi çalışmalarında, Soma havzası kM2 damarına ait numunelerin gaz tutma kapasitelerinin 14,35 – 24,27 cm³/g arasında değiştiği görülmüştür. Dolayısıyla, Kim eşitliği ile, Soma numunesinde gaz içeriği değerinin tahmininde büyük hata oranları gözlemlense de, gaz tutma kapasitesinin tahmininde bir ön çalışma olarak görece güvenilir sonuçlara ulaşılabileceği görülmüştür.

Zonguldak havzasına ait kömür numunesi üzerinde uygulanan farklı gaz içeriği belirleme yöntemleri sonucunda ise; USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen 11,23 cm³/g toplam gaz içeriği değerine en yakın sonuç, analitik yöntem kullanılarak %10,9 hata miktarı ile 10,01 cm³/g olarak tahmin edilmiş, tüm yöntemler ile belirlenen gaz içeriği değerleri Şekil 4.12’de özetlenmiştir.



Şekil 4.12 : Zonguldak numunesi üzerinde uygulanan farklı yöntemler ile tahmin edilen toplam gaz içeriği değerleri.

Benzer şekilde, Zonguldak numunesi üzerinde uygulanan doğrudan yöntemler ile USBM doğrudan yöntemine kıyasla düşük gaz içeriği değerleri tahmin edilmiştir. Zonguldak numunesinin yüksek kömürleşme derecesine ve gaz içeriğine sahip olmasıyla birlikte, Kim eşitliği kullanılarak tahmin edilen gaz tutma kapasitesi ile USBM doğrudan yöntemi ile elde edilen gaz içeriği arasındaki fark, Alpu ve Soma numunelerine kıyasla daha düşük olarak gözlemlenmiştir.

Analitik yöntem ile Alpu ve Soma örneklerinde artık gaz miktarı, ölçülen değerlere kıyasla oldukça düşük olarak tahmin edilmiştir. Bu sebeple, analitik yöntemin düşük gaz içeriğine sahip kömür damarlarında kullanılması önerilmemektedir. Smith & Williams ve Amoco eğri uydurma yöntemleri ile Zonguldak örneğinde tahmin edilen gaz içeriği değerleri ise, analitik yöntem ile elde edilen sonuçlara yakın fakat daha düşük olarak gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler sonucunda, düşük gaz içeriğine sahip kömür damarlarında Smith & Williams ve Amoco eğri uydurma yöntemlerinin; yüksek gaz içeriğine sahip kömür damarlarında ise analitik yöntemin gaz içeriği belirleme çalışmalarında bir ön değerlendirme aracı olarak kullanılabileceği görülmüştür. Ancak, kömür kökenli metan üretimi için gerçekleştirilecek rezervuar çalışmaları ve yeraltı maden havalandırma sistemlerinin planlanması konularında uygulanacak en güvenilir ve tutarlı yöntemin USBM doğrudan yöntemi olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır.

5. GAZ İÇERİĞİ TAHMİN MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Günümüzde kömür damarlarının gaz içeriğini belirlemeye yönelik gerçekleştirilen desorpsiyon deneyleri, yüzeyden numune alınmasına ve laboratuvar olanaklarına gereksinim duymaktadır. Bununla beraber, uygulanabilmesi adına desorpsiyon deneylerine ihtiyaç duyan, yalnızca kayıp gaz ve artık gaz miktarı bileşenlerinin tahmin ve ölçüm yöntemleri hususunda birbirinden ayrılan çok sayıda doğrudan yöntem geliştirilmiştir. Doğrudan yöntemler barındığı kabullere göre, USBM yöntemine kıyasla zaman ve maliyet avantajı sunabilmektedir. Ancak, bu avantajlar özellikle yavaş desorpsiyon süreci içeren doğrudan yöntemlerde önemini yitirebilmektedir. Çünkü, kömür damarlarının gaz içeriğinin belirlenme sürecini asıl olarak uzatan ve maliyetleri artıran husus desorpsiyon deneyleri olmaktadır. Buna ek olarak, Alpu, Soma ve Zonguldak numuneleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda uygulanan yöntemler ile USBM doğrudan yöntemi kıyaslandığında, Smith & Williams, Amoco, analitik ve Kim eşitliği yöntemleri ile elde edilen gaz içeriği değerlerinin belirli oranlarda hata içerdikleri görülmüştür. Bu doğrultuda, özellikle maden operasyonlarında yeraltı havalandırma sistemlerinin tasarlanması hususunda günümüzde büyük bir ihtiyaç olan, kömür damarlarının gaz içeriğini kısa süreler içerisinde ve desorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmeden, güvenilir bir şekilde belirleyebilmek adına yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak tahmin modeli geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Günümüzde tahmin modellerinin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenmesi yöntemi olan yapay sinir ağları (YSA), bilgi işlem süreçlerinin biyolojik sinir ağları ile yakından ilişkili olduğu kabulü üzerine kurulmuştur. Yapay sinir ağlarında, sinir hücreleri (nöronlar) birbirleri arasında sinyaller ileterek, çeşitli girdileri bir veya birden fazla çıktı ile doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları aracılığıyla bağlamaktadır. Bu süreçte, yapay nöronlar, girdilerden aldıkları bilgiyi işleyerek, uygun ağırlıklar ile çıktılara dönüştürmektedir. Veriler yapay sinir ağına sağlandığında, belirli algoritmalar kullanılarak bir öğrenme sürecinden geçmekte ve bu süreç sonucunda, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkileri en iyi şekilde tanımlayan ağırlıklar bulunmaktadır (Belyadi ve Haghighat, 2021).

Yapay sinir ağı ile tahmin modellerinin oluşturulmasında İTÜ Maden Havalandırması ve İş Güvenliği Laboratuvarı bünyesinde USBM doğrudan yöntemi ile gaz içeriği belirleme çalışmalarının gerçekleştirildiği Alpu ve Soma havzalarına ait veri setleri kullanılmıştır. Çalışmaya ait veri setini farklı lokasyon ve derinliklere ait, Alpu kömür havzası A damarından toplamda 90 adet numune, Soma kömür havzasında ise km2 damarından toplamda 60 adet numune oluşturmaktadır. Zonguldak havzası ile ilişkili gaz içeriği veri seti sınırlı olduğundan, tahmin modeli oluşturma çalışmaları yalnızca Alpu ve Soma kömür havzaları özelinde gerçekleştirilmiştir. Tahmin modellerinde girdi parametreleri olarak numunelere ait kısa kimyasal analiz sonuçları (nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içerikleri) ve derinlikler, çıktı parametresi olarak ise USBM doğrudan yöntemi ile belirlenmiş orijinal bazda toplam gaz içeriği değerleri kullanılmıştır. Bu sayede birkaç saat içerisinde elde edilebilecek kısa kimyasal analiz sonuçları ile, Alpu havzası A damarı ve Soma havzası km2 damarında güvenilir bir şekilde gaz içeriği değerlerinin tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır.

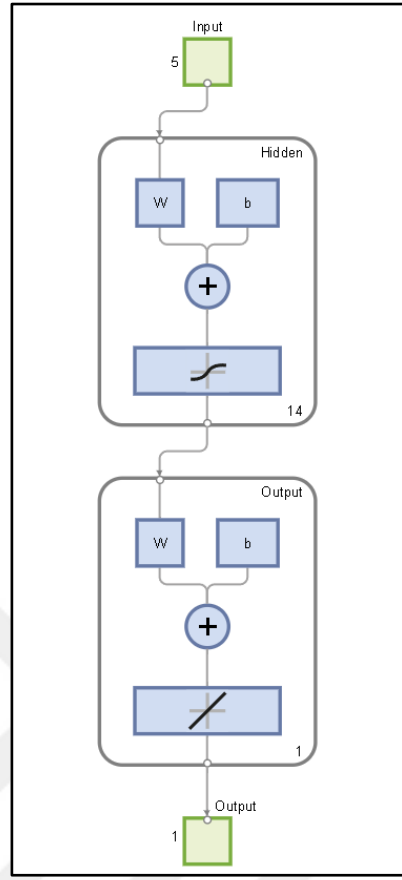
5.1 Alpu Havzası A Damarında Gaz İçeriği Tahmin Modelinin Geliştirilmesi

Alpu havzası A damarına ait USBM doğrudan yöntemi ile gaz içeriği belirlenen 90 adet numune kullanılarak yapay sinir ağı yöntemi ile gaz içeriği tahmin modeli geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Model geliştirme sürecinde Matlab R2022b paket programı ve “Neural Net Fitting” araç kutusu kullanılmıştır. Geliştirilen modelde girdi parametreleri olarak numunelere ait kısa kimyasal analiz sonuçları ve derinlik bilgisi, çıktı parametresi olarak ise USBM doğrudan yöntemi ile belirlenen orijinal bazda gaz içeriği değerleri kullanılmıştır. Girdi ve çıktı parametrelerine ait tanımlayıcı istatistik bilgileri Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Alpu havzasına ait verilerin %70’i eğitim, %15’i doğrulama, geriye kalan %15’lik bölümü ise test verisi olacak şekilde dağıtılmıştır. Yapay sinir ağı modelinin geliştirilmesinde ağ tipi olarak ileri beslemeli yapay sinir ağı tercih edilmiş, öğrenme algoritması olarak hızlı eğitimlere olanak sağlayan Lavenberg – Marquardt yöntemi uygulanmıştır. Gizli katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant fonksiyonu, çıktı katmanında ise doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Yapay sinir ağı modeli oluşturulurken, farklı gizli katman ve nöron sayıları seçilerek farklı modeller oluşturulmuş, modellerin hata miktarları göz önüne alınarak en uygun gizli katman ve nöron sayısı tercih edilmiştir.

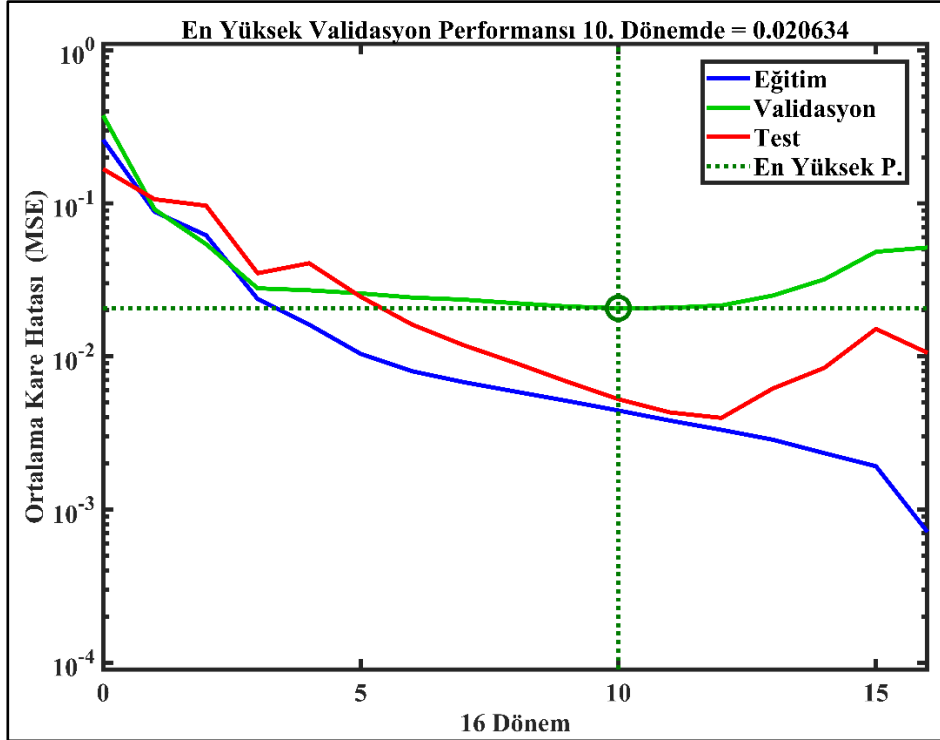
Çizelge 5.1 : Alpu havzası A damarı için geliştirilen YSA modelinde kullanılan veri setine ait tanımlayıcı istatistik bilgileri.

Parametre	Derinlik (m)	Nem İçeriği (%)	Kül İçeriği (%)	Uçucu Madde İçeriği (%)	Sabit Karbon İçeriği (%)	USBM Gaz İçeriği (cm ³ /g) _{ar}
Ortalama	348,60	30,76	28,08	23,18	17,97	0,52
S. Hata	4,41	0,62	1,27	0,57	0,83	0,03
Ortanca	354,60	32,65	26,75	23,47	18,18	0,46
Mod	299,20	23,18	-	20,54	17,13	0,20
S. Sapma	41,80	5,84	12,03	5,44	7,88	0,27
Ö. Varyans	1747,29	34,11	144,82	29,57	62,04	0,07
Basıklık	-0,99	-0,29	-0,83	-0,44	-0,77	-0,85
Çarpıklık	-0,23	-0,76	0,21	-0,19	-0,01	0,54
Aralık	160,55	24,86	49,74	24,65	31,88	0,98
En Büyük	260,80	16,51	4,73	9,89	1,60	0,15
En Küçük	421,35	41,37	54,47	34,54	33,48	1,13
Toplam	31373,56	2768,83	2527,03	2086,62	1617,57	46,67
Veri Sayısı	90	90	90	90	90	90

Çalışmalarda düşük hata miktarları ve yüksek güvenilirlik ile tahmin gerçekleştirebilen ancak aşırı uyumdan uzak bir yapay sinir ağı geliştirmek hedeflenmiştir. Bu doğrultuda Alpu havzası için en küçük hata miktarlarının 1 gizli katman ve 14 nörondan oluşan yapay sinir ağı ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Oluşturulan yapay sinir ağı yapısı Şekil 5.1’de, modelin eğitim, doğrulama ve test süreçlerine ait performans grafiği ise Şekil 5.2’de sunulmuştur.

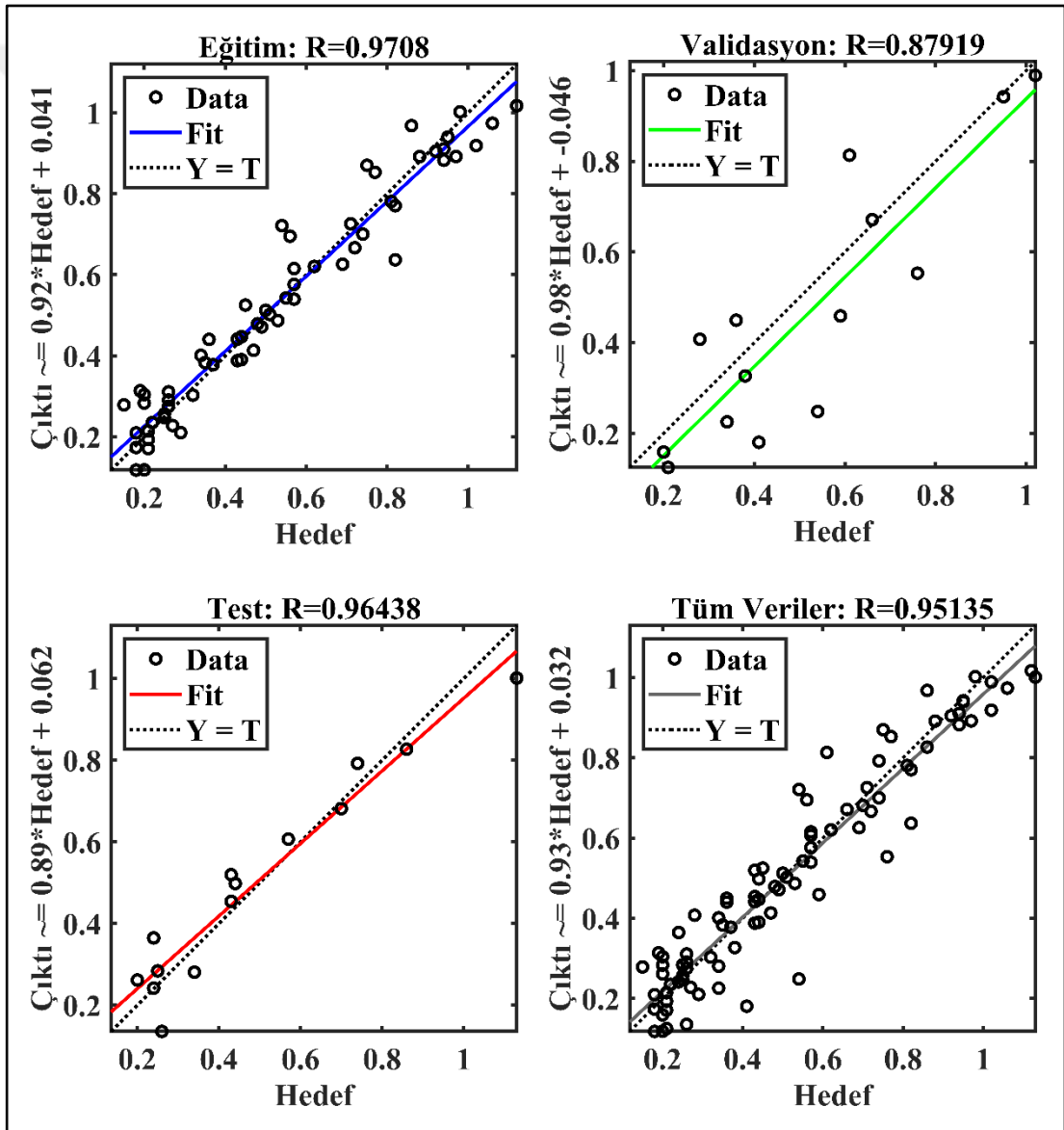


Şekil 5.1 : Alpu havzası A damarı tahmin modeli için oluşturulan YSA yapısı.



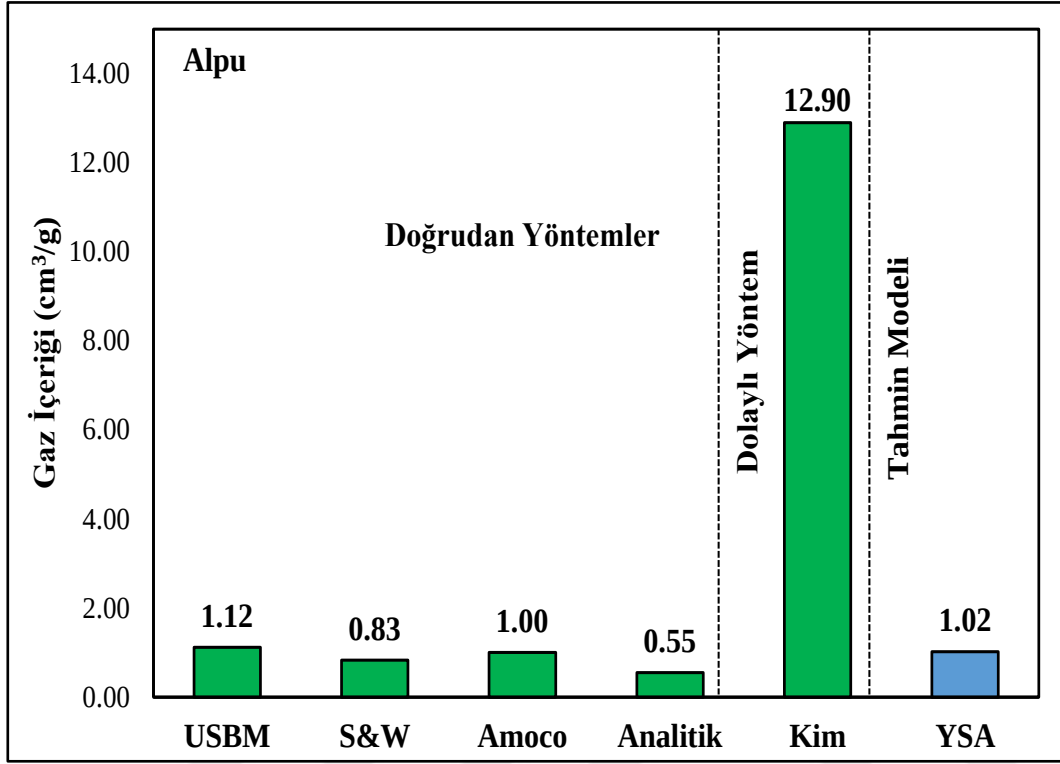
Şekil 5.2 : Alpu havzası A damarı modelinin farklı süreçlere ait performans eğrileri.

Eğitim sonucunda ortalama kare hataları eğitim verileri için 0,0044, validasyon verileri için 0,0206, test verileri için ise 0,0053 olarak; korelasyon katsayıları (R) ise eğitim verileri için 0,97, validasyon verileri için 0,88, test verileri için ise 0,96 olarak elde edilmiştir. Oluşturulan modelin tüm süreçlerine ait regresyon grafikleri Şekil 5.3'te sunulmuştur. Model tüm süreçlerde yüksek korelasyon katsayıları sunmakla birlikte, YSA modeli ile tahmin edilen gaz içeriği değerleri ile gerçek gaz içeriği verileri arasında korelasyon katsayısının (R) 0,95, determinasyon katsayısının (R^2) ise 0,90 olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, Alpu havzası A damarı için oluşturulan YSA modelinin yüksek güvenilirlik ile gaz içeriği değerlerinin tahmininde kullanılabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.3 : Alpu havzası A damarı modelinin farklı süreçlere ait regresyon eğrileri.

Alpu havzasında farklı gaz içeriği belirleme çalışmaları ile elde edilen sonuçlar ve aynı örneğin girdi parametreleri kullanılarak geliştirilen model ile tahmin edilen gaz içeriği değerinin karşılaştırılması Şekil 5.4’de sunulmuştur.



Şekil 5.4 : Alpu havzası A damarında farklı yöntemler ile belirlenen gaz içeriği değerleri ile YSA modeli ile tahmin edilen gaz içeriğinin karşılaştırılması.

Farklı gaz içeriği belirleme yöntemleri ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, yapay sinir ağları ile geliştirilen tahmin modelinin USBM doğrudan yöntemine en yakın sonucu verdiği görülmektedir. Bu tahmin modeli ile birlikte, Eskişehir – Alpu kömür havzası A damarında gerçekleştirilecek madencilik faaliyetleri ve kömür kökenli metan üretim çalışmalarında gaz içeriğinin yüksek güvenilirlik ile belirlenmesi mümkün olacaktır. Yüksek güvenilirlik ile tahmin avantajına ek olarak, tahmin modeli yalnızca kısa kimyasal analiz sonuçlarına ve derinlik bilgisine ihtiyaç duyduğundan, gaz içeriğini belirlemek adına yüzeyden gerçekleştirilecek sondaj faaliyetlerine gereksinim ortadan kalkmaktadır. Bununla beraber, birkaç gün sürecektir kısa kimyasal analiz deneyleri ile birlikte düşük maliyetler ile, oldukça hızlı bir zaman içerisinde herhangi bir gaz içeriği ölçüm ekipmanına ihtiyaç duyulmadan Alpu havzası A damarında gaz içeriği değerleri belirlenebilecektir.

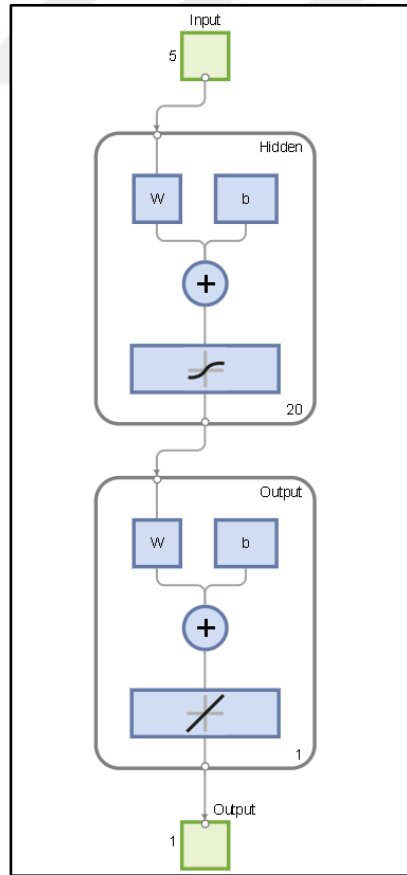
5.2 Soma Havzası kM2 Damarında Gaz İçeriği Tahmin Modelinin Geliştirilmesi

Soma havzası kM2 damarına ait USBM doğrudan yöntemi ile gaz içeriği belirlenen toplamda 60 adet numuneden oluşan veri seti üzerinde yapay sinir ağları yöntemi ile Matlab R2022b paket programı ve “Neural Net Fitting” araç kutusu kullanılarak gaz içeriği tahmin modeli geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Alpu havzası A damarı için geliştirilen modele benzer şekilde, girdi parametreleri olarak kısa kimyasal analiz sonuçları ve derinlik bilgisi, çıktı parametresi olarak ise USBM doğrudan yöntemi ile belirlenen orijinal bazda gaz içeriği değerleri kullanılmış olup, girdi ve çıktı parametrelerine ait tanımlayıcı istatistik bilgileri Çizelge 5.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 : Soma havzası kM2 damarı için geliştirilen YSA modelinde kullanılan veri setine ait tanımlayıcı istatistik bilgileri.

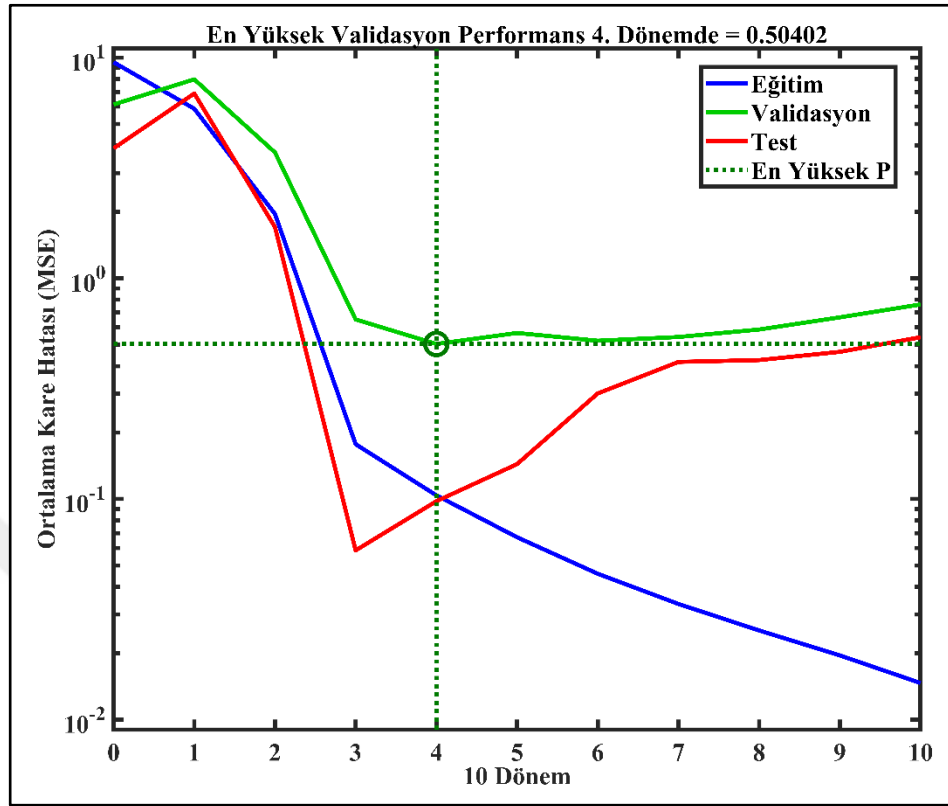
Parametre	Derinlik (m)	Nem İçeriği (%)	Kül İçeriği (%)	Uçucu Madde İçeriği (%)	Sabit Karbon İçeriği (%)	USBM Gaz İçeriği (cm ³ /g) _{ar}
Ortalama	927,58	13,27	24,74	34,74	27,25	1,52
S. Hata	21,93	0,36	1,56	0,71	1,48	0,10
Ortanca	910,35	12,91	27,17	34,80	26,27	1,33
Mod	-	11,89	-	40,58	-	-
S. Sapma	169,85	2,78	12,08	5,53	11,49	0,80
Ö. Varyans	28849,10	7,71	145,94	30,53	132,11	0,65
Basıklık	-0,49	-0,32	-0,88	-0,45	-0,55	2,15
Çarpıklık	0,49	0,31	-0,12	0,01	-0,21	1,35
Aralık	622,85	11,66	49,25	23,58	46,28	3,82
En Büyük	632,60	8,33	2,62	23,82	0,70	0,43
En Küçük	1255,45	19,99	51,87	47,40	46,98	4,25
Toplam	55654,74	796,20	1484,46	2084,43	1634,91	90,94
Veri Sayısı	60	60	60	60	60	60

Soma havzasına ait verilerin %70'i eğitim, %15'i doğrulama, geriye kalan %15'lik bölümü ise test verisi olacak şekilde kullanılmış olup, yapay sinir ağı modelinin geliştirilmesinde ağ tipi olarak ileri beslemeli yapay sinir ağı tercih edilmiş, öğrenme algoritması olarak Lavenberg – Marquardt yöntemi uygulanmıştır. Gizli katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant fonksiyonu, çıktı katmanında ise doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Tahmin modeli, görece küçük ve düzgün dağılımın görülmeyeceği bir veri seti kullanılarak geliştirilmeye çalışıldığından, yüksek güvenilirliğe sahip bir model oluşturmak zorlaşmıştır. İnterpolasyon ile veri seti büyütülüp, standartlaştırılmış; gizli katman ve nöron sayıları artırılarak yüksek korelasyon ile tahmin gerçekleştirebilen bir model oluşturulmaya çalışılmış ancak elde edilen sonuçlar ile görece düşük katman ve nöron sayıları ile elde edilebilen sonuçlar arasında büyük farklar oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bellek tüketiminin artırılmaması hedeflenerek optimum güvenilirlikte ve aşırı uyumdan uzak bir yapay sinir ağı geliştirilmiştir. Soma havzası için bu parametrelerin, 1 gizli katman ve 20 nöronlu oluşan yapay sinir ağı ile sağlanabileceği görülmüştür. Oluşturulan yapay sinir ağı yapısı Şekil 5.5'te sunulmuştur.



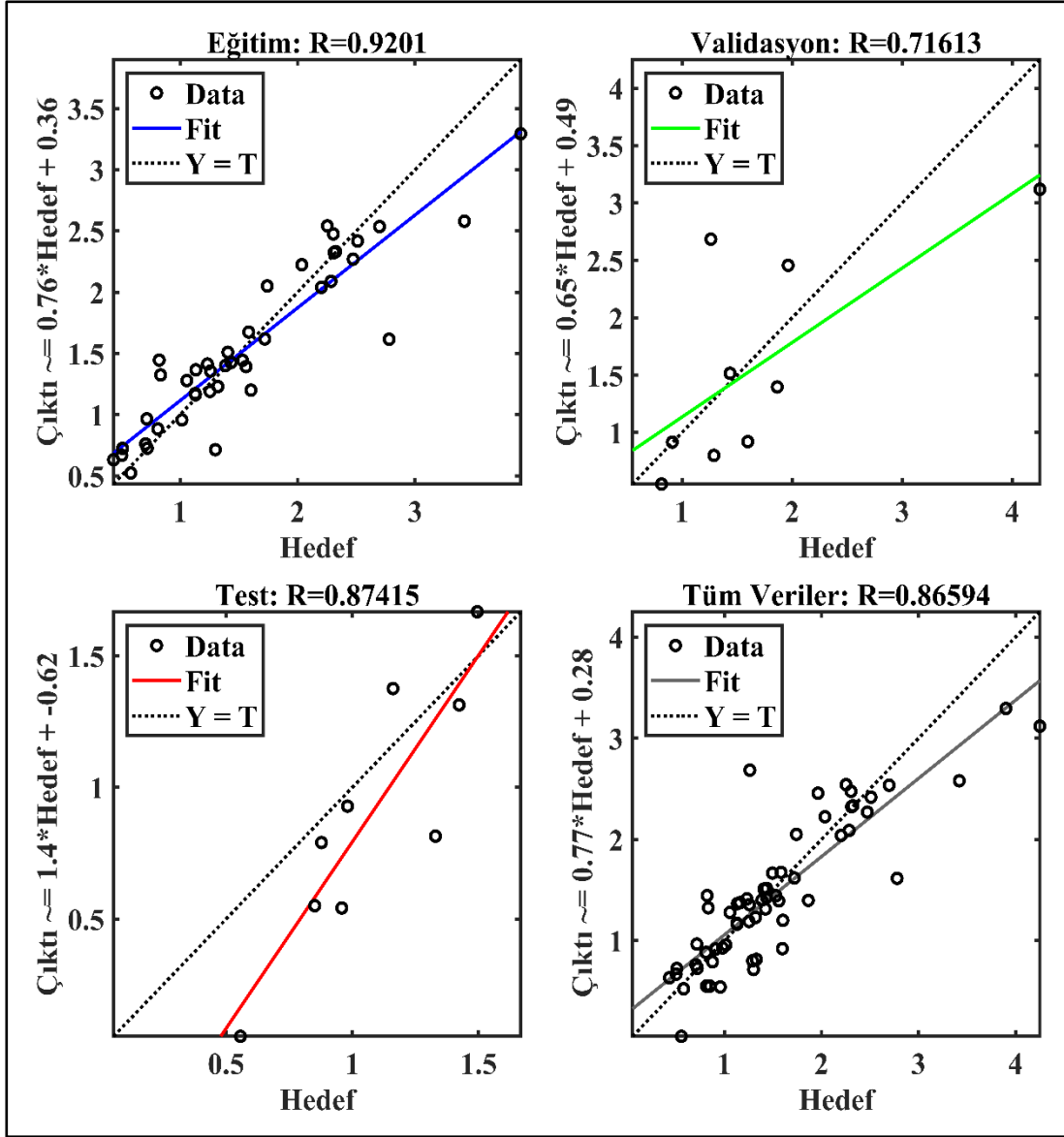
Şekil 5.5 : Soma havzası km2 damarı tahmin modeli için oluşturulan YSA yapısı.

Oluşturulan tahmin modelinin eğitim, doğrulama ve test süreçlerine ait performans grafiği Şekil 5.6’da sunulmuştur.



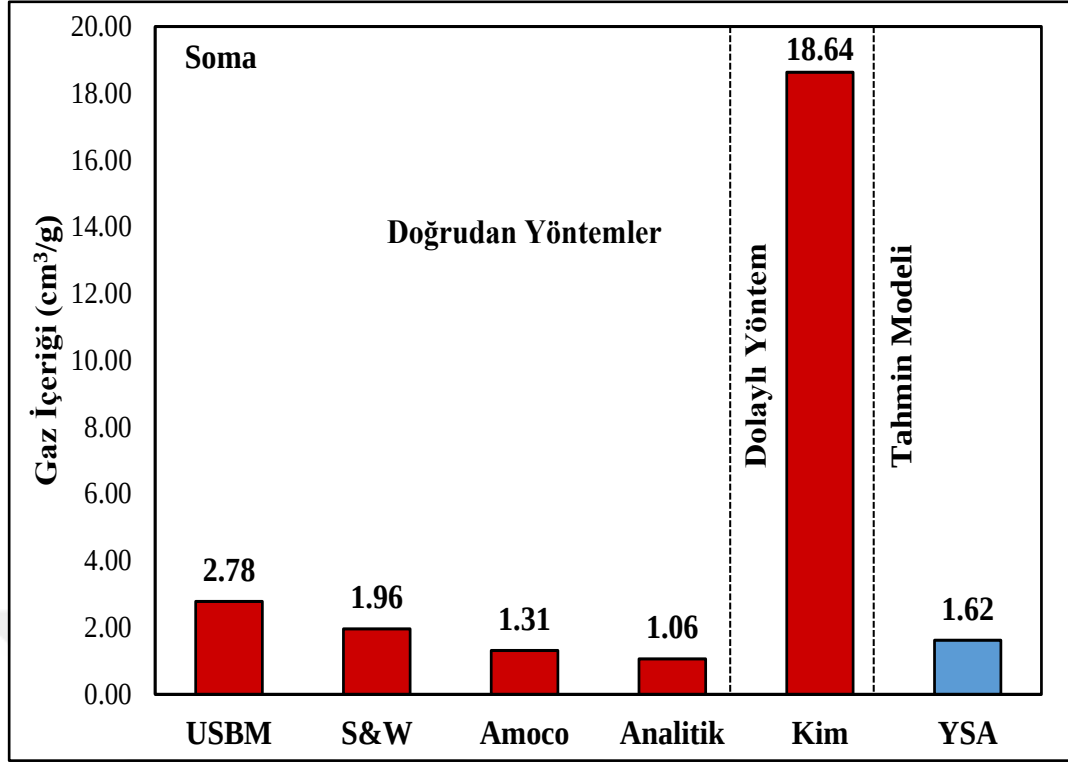
Şekil 5.6 : Soma havzası km2 damarı modelinin farklı süreçlere ait performans eğrileri.

Eğitim sonucunda ortalama kare hataları eğitim verileri için 0,1039, validasyon verileri için 0,5040, test verileri için ise 0,0977 olarak; korelasyon katsayıları (R) ise eğitim verileri için 0,92, validasyon verileri için 0,71, test verileri için ise 0,87 olarak elde edilmiştir. Oluşturulan modelin tüm süreçlerine ait regresyon grafikleri Şekil 5.7’de sunulmuştur. Model tüm süreçlerde kabul edilebilir korelasyon katsayıları sunmakta, doğrulama performansı ise görece düşük kalmakla birlikte aşırı uyum problemi yaratmamak için yeterlidir. Yapay sinir ağı modeli ile Soma havzası km2 damarı için tahmin edilen gaz içeriği değerleri ile gerçek gaz içeriği verileri arasında korelasyon katsayısının (R) 0,87, determinasyon katsayısının ise (R^2) 0,76 olduğu görülmüştür. Geliştirilen YSA temelli tahmin modelinin iyi bir oranda güvenilirlik sunduğu görülmüş olmakla beraber, beraberinde bir takım tahmin hataları oluşturması da öngörülebilirdir. Dolayısıyla, elde edilen korelasyon katsayılarının artırılarak YSA tahmin modelinin iyileştirilmesi adına daha çok sayıda veriye ihtiyaç olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 5.7 : Soma havzası km2 damarı modelinin farklı süreçlere ait regresyon eğrileri.

Soma havzasında farklı gaz içeriği belirleme çalışmaları ile elde edilen sonuçlar ve aynı örneğe ait girdi parametreleri kullanılarak geliştirilen model ile tahmin edilen gaz içeriği değerinin karşılaştırılması Şekil 5.8’de sunulmuştur. Geliştirilen YSA modeli kullanılarak tahmin edilen değer ile USBM doğrudan yöntemi uygulanarak belirlenen gaz içeriği değeri arasındaki farkın görece büyük olduğu; YSA modelinin örneğe ait gaz içeriğinin belirlenmesinde Smith & Williams yönteminin gerisinde ancak Amoco, analitik ve Kim eşitliği yöntemlerine kıyasla daha güvenilir olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, Soma havzası km2 damarı için geliştirilen tahmin modelinin, gerçekleştirilecek çalışmalarda güçlü bir ön değerlendirme yöntemi olarak kullanılabileceği fakat nihai sonuçlara ulaşabilmek adına yeterli olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.8 : Soma havzası kM2 damarında farklı yöntemler ile belirlenen gaz içeriği değerleri ile YSA modeli ile tahmin edilen gaz içeriğinin karşılaştırılması.

Tahmin modelinin iyileştirilmesi adına veri seti büyüklüğünün artırılması veya farklı tahmin ve yapay zeka yöntemleri ile araştırmaların sürdürülmesi önerilmektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, kömür damarlarının gaz içeriğini belirlemek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılan ve günümüzde en güvenilir yöntem olarak kabul edilen, ancak maliyet ve zaman dezavantajına sahip USBM doğrudan gaz içeriği belirleme yöntemine alternatif yöntemler araştırılmıştır. Bu doğrultuda öncelikle farklı kömürleşme derecelerine ve farklı gaz içeriklerine sahip Eskişehir – Alpu, Manisa – Soma, ve Zonguldak havzalarına ait kömür numuneleri üzerinde USBM, Smith & Williams, Amoco eğri uydurma, analitik ve Kim eşitliği yöntemleri uygulanarak elde edilen gaz içeriği sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonrasında, yeterli sayıda veri setinin bulunduğu Alpu ve Soma kömür havzalarında, güçlü bir yapay zeka aracı olan yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak gaz içeriği tahmin modelleri geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

- Kömürleşme derecesi Linyit B olarak sınıflandırılan, Alpu havzası A damarına ait numune üzerinde uygulanan farklı gaz içeriği belirleme yöntemleri sonucunda gaz içeriği; USBM yöntemi ile 1,12 cm³/g, Smith & Williams yöntemi ile 0,83 cm³/g, Amoco eğri uydurma yöntemi ile 1,00 cm³/g, analitik yöntem ile 0,55 cm³/g, Kim eşitliği ile ise 12,90 cm³/g olarak belirlenmiştir. Alpu havzasına ait numune ile USBM doğrudan yöntemine en yakın sonuç Amoco eğri uydurma yöntemi kullanılarak elde edilirken, en fazla miktarda hata kömürlerin gaz tutma kapasitesinin dolaylı olarak tahmin etmek amacıyla geliştirilen Kim eşitliği yönteminde gözlemlenmiştir.
- Kömürleşme derecesi Alt Bitümlü C olarak sınıflandırılan, Soma havzası kM2 damarına ait numune üzerinde uygulanan farklı gaz içeriği belirleme yöntemleri sonucunda gaz içeriği; USBM yöntemi ile 2,78 cm³/g, Smith & Williams yöntemi ile 1,96 cm³/g, Amoco eğri uydurma yöntemi ile 1,31 cm³/g, analitik yöntem ile 1,06 cm³/g, Kim eşitliği ile ise 18,64 cm³/g olarak belirlenmiştir. Soma havzasına ait numune ile USBM doğrudan yöntemine en yakın sonuç Smith & Williams yöntemi kullanılarak elde edilirken, en fazla miktarda hata beklenildiği üzere, Kim eşitliği yönteminde gözlemlenmiştir.

- Kömürleşme derecesi Düşük Uçuculu Bitümlü olarak sınıflandırılan, Zonguldak havzasına ait numune üzerinde uygulanan farklı gaz içeriği belirleme yöntemleri sonucunda gaz içeriği ise; USBM yöntemi ile 11,23 cm³/g, Smith & Williams yöntemi ile 9,65 cm³/g, Amoco eğri uydurma yöntemi ile 9,70 cm³/g, analitik yöntem ile 10,01 cm³/g, Kim eşitliği ile ise 16,04 cm³/g olarak belirlenmiştir. Zonguldak havzasına ait numune ile USBM doğrudan yöntemine en yakın sonuç analitik yöntem kullanılarak elde edilirken, en fazla miktarda hata Kim eşitliği yönteminde gözlemlenmiştir.
- Geleneksel gaz içeriği belirleme yöntemleri değerlendirildiğinde, çalışmaya konu olan her bir örnek için USBM doğrudan yöntemine en yakın sonuçların farklı yöntemler uygulanarak elde edildiği, Kim eşitliğinin ise her örnekte en fazla hataya sebebiyet veren yöntem olduğu görülmüştür.
- Geleneksel yöntemlerin ortaya koyduğu kararsızlık ve maliyet gereksinimleri sebebiyle, numunelere ait kısa kimyasal analiz sonuçları ile derinlik bilgilerinin girdi parametresi, orijinal bazda gaz içeriklerinin ise çıktı parametresi olarak kullanıldığı havzalara özgü tahmin modelleri geliştirilmiştir.
- Alpu havzası A damarında geliştirilen model kullanılarak tahmin edilen gaz içeriği değerleri ile USBM yöntemi uygulanarak ölçülen gaz içerikleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu ($R^2 = 0,90$) görülmüştür. Yapay sinir ağları ile geliştirilen tahmin modelinin havzada gerçekleştirilecek çalışmalarda yüksek güvenilirlik ile kullanılabileceği düşünülmektedir.
- Soma havza kM2 damarında geliştirilen model vasıtasıyla tahmin edilen gaz içeriği değerleri ile USBM yöntemi uygulanarak ölçülen gaz içerikleri arasındaki korelasyon ($R^2 = 0,76$) görece daha düşüktür. Tahmin modelinin havzada gerçekleştirilecek çalışmalarda güçlü bir ön değerlendirme aracı olarak kullanılabileceği, fakat veri setinin artırılması ve farklı yapay zeka araçlarının uygulanması ile daha güvenilir tahmin modellerinin geliştirilebileceği düşünülmektedir.
- Zonguldak havzasına ait veri seti oldukça sınırlı olduğundan herhangi bir tahmin modeli geliştirme çalışması yapılamamıştır. Havzada USBM doğrudan yöntemi uygulanarak kapsamlı gaz içeriği belirleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve daha büyük veri setleri ile tahmin modellerinin oluşturulması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Alsaab, D., Elie, M., Izart, A., Sachsenhofer, R. F., Privalov, V. A., Suarez-Ruiz, I., et al.** (2008). Comparison of hydrocarbon gases (C₁-C₅) production from Carboniferous Donets (Ukraine) and Cretaceous Sabina (Mexico) coals, *International Journal of Coal Geology*, 74, 154-162.
- American Society for Testing and Materials (ASTM).** (2016). *Standard Test Method for Total Sulfur in Coal and Coke Combustion Residues Using a High – Temperature Tube Furnace Combustion Method with Infrared Absorption* (ASTM D5016 – 16). <https://doi.org/10.1520/D5016-16>.
- American Society for Testing and Materials (ASTM).** (2019). *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke* (ASTM D5865/D5865M – 19). https://doi.org/10.1520/D5865_D5865M-19.
- American Society for Testing and Materials (ASTM).** (2021). *Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke* (ASTM D3172 – 13(2021)e1). <https://doi.org/10.1520/D3172-13>.
- American Society for Testing and Materials (ASTM).** (2023). *Standard Classification of Coals by Rank* (ASTM D388 – 23). <https://doi.org/10.1520/D0388-23>.
- American Society for Testing and Materials (ASTM).** (2024). *Standard Practice for Determination of Gas in Coal – Direct Desorption Method* (ASTM D7569/D7569M – 24). https://doi.org/10.1520/D7569_D7569M-24.
- Aminian, K.** (2020). Enhanced Coalbed Methane Recovery. In P. Thakur, S. J. Schatzel, K. Aminian, G. Rodvelt, M. H. Mosser, J. S. D’Amico (Eds.), *Coal Bed Methane: Theory and Applications*, 175.
- Australian Standard (AS).** (2016). *Determination of Gas Content of Coal and Carbonaceous Material – Direct Desorption Method* (AS 3980). Sydney, Australia: Standard Association of Australia.
- Azmi, A. S., Yusup, S., Muhamad, S.** (2006). The influence of temperature on adsorption capacity of Malaysian coal, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(5), 392-396.
- Belyadi, H., Haghighat, A.** (2021). *Machine Learning Guide for Oil and Gas Using Python: A Step-By Step Breakdown with Data, Algorithms, Codes, and Applications*. Gulf Professional Publishing.
- Bertard, C., Bruyet, B., Gunther, J.** (1970). Determination of desorbable gas concentration coal (direct method), *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 7, 43-65.
- Brochard, L., Vandamme, M., Pellenq, R. J. M., Fen-Chong, T.** (2012). Adsorption-induced deformation of microporous materials: coal

swelling induced by CO₂-CH₄ competitive adsorption, *Langmuir*, 28(5), 2659-2670.

- Busch, A., Gensterblum, Y., Krooss, B. M., Littke, R.** (2004). Methane and carbon dioxide adsorption-diffusion experiments on coal: upscaling and modeling, *International Journal of Coal Geology*, 60(2-4), 151-168.
- Busch, A., Gensterblum, Y., Krooss, B. M., Siemons, N.** (2006). Investigation of high-pressure selective adsorption/desorption behaviour of CO₂ and CH₄ on coals: an experimental study, *International Journal of Coal Geology*, 66(1-2), 53-68.
- Busch, A., Krooss, B. M., Gensterblum, Y., van Bergen, F., Pagnier, H. J. M.** (2003a). High-pressure adsorption of methane, carbon dioxide and their mixtures on coals with a special focus on the preferential sorption behaviours, *Journal of Geochemical Exploration*, 78-79, 671-674.
- Bustin, R. M., Clarkson, C. R.** (1998). Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content, *International Journal of Coal Geology*, 38, 3-26.
- Ceglarska-Stefanska, G., Brzóska, K.** (1998). The effect of coal metamorphism on methane desorption, *Fuel*, 77(6), 645-648.
- Ceglarsk-Stefańska, G., Zarębska, K.** (2002). The competitive sorption of CO₂ and CH₄ with regard to the release of methane from coal, *Fuel Processing Technology*, 77-78, 423-429.
- Chase, R. W.** (1979). A comparison of methods used for determining the natural gas content of coalbeds from exploratory cores. *US Dept. of Energy*, METC/CR-79/18, 25.
- Chattaraj, S., Mohanty, D., Kumar, T., & Halder, G.** (2016). Thermodynamics, kinetics and modeling of sorption behaviour of coalbed methane—A review, *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 16, 14-33.
- Clarkson, C. R., Bustin, R. M.** (1996). Variation in micropore capacity and size distribution with composition in bituminous coal of the Western Canadian Sedimentary Basin, *Fuel*, 75, 1483-1498.
- Clarkson, C. R., Bustin, R. M.** (2000). Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane, *International Journal of Coal Geology*, 42, 241-271.
- Clayton, J. L.** (1998). Geochemistry of coalbed gas—a review, *International Journal of Coal Geology*, 35, 159-173.
- Crosdale, P. J., Beamish, B. B., Valix, M.** (1998). Coalbed methane sorption related to coal composition, *International Journal of Coal Geology*, 35, 147-158.
- Crosdale, P. J., Moore, T. A., Mares, T. E.** (2008). Influence of moisture content and temperature on methane adsorption isotherm analysis for coals from a low-rank, biogenically-sourced gas reservoir, *International Journal of Coal Geology*, 76, 166-174.
- Daines, M. E.** (1968). Apparatus for the determination of methane sorption on coal at high pressures by a weighing method, *International Journal of Rock*

- Danell, R. E., Saghafi, A., Williams, R. J., Wood, J.** (2003). Reproducibility of gas content measurements using the fast desorption technique (ACARP Project C8024), *ACARP Publication*, 51.
- Day, S., Duffy, G., Sakurovs, R., Weir, S.** (2008a). Effect of coal properties on CO₂ sorption capacity under supercritical conditions, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(3), 342-352.
- Day, S., Sakurovs, R., Weir, S.** (2008c). Supercritical gas sorption on moist coals, *International Journal of Coal Geology*, 74(3-4), 203-214.
- Diamond, W. P., LaScola, J. C., Hyman, D. M.** (1986). Results of direct-method determination of the gas content of US coalbeds. *US Bur. Mines, Info. Cir*, 9067, 95.
- Diamond, W. P., Levine, J. R.** (1981). Direct method determination of the gas content of coal: procedures and results. *US Bur. Mines, Rep. Invest*, 8515, 36.
- Diamond, W. P., Schatzel, S. J., Garcia, F., & Ulery, J. P.** (2001). The modified direct method: A solution for obtaining accurate coal desorption measurements, *National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)*, Pittsburgh Research Laboratory.
- Diamond, W.P., Schatzel, S.J.** (1998). Measuring the gas content of coal: a review, *International Journal of Coal Geology*, 35, 311–331.
- Esen, O., Fişne, A.** (2024). A comprehensive study on methane adsorption capacities and pore characteristics of coal seams: Implications for efficient coalbed methane development in the Soma Basin, Türkiye, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-21.
- Flores, R. M.** (2004). Coalbed methane in the Powder River Basin, Wyoming and Montana: An assessment of the Tertiary-upper Cretaceous coalbed methane total petroleum system. In *U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-69-C*, version 1. Chapter 2.
- Flores, R.M.** (2014). *Coal and Coalbed Gas*. Elsevier.
- Gao, L., Mastalerz, M., Schimmelmann, A.** (2014). The Origin of Coalbed Methane. In P. Thakur, K. Aminian, and S. Schatzel (Eds.), *Coalbed Methane: From Prospect to Pipeline*, New York, Elsevier, p. 7-29.
- Gray, I.** (1987). Reservoir engineering in coal seams: Part 1. The physical process of gas storage and movement in coal seams, *SPE Reservoir Engineering* 2, 28-34.
- Greb, S. F.** (2006). Coal and the Environment (Vol. 10), *American Geological Institute*.
- Hackley, P. C., Guevara, E. H., Hentz, T. F., & Hook, R. W.** (2009). Thermal maturity and organic composition of Pennsylvanian coals and carbonaceous shales, north-central Texas: implications for coalbed gas potential, *International Journal of Coal Geology*, 77(3-4), 294-309.
- Harpalani, S., & Schraufnagel, R. A.** (1989). Flow of methane in deep coal seams. In *ISRM International Symposium*. ISRM.

- Hol, S., Peach, C. J., Spiers, C. J.** (2011). Applied stress reduces the CO₂ sorption capacity of coal, *International Journal of Coal Geology*, 85(1), 128-142.
- Hol, S., Peach, C. J., Spiers, C. J.** (2012a). Effect of 3-D stress state on adsorption of CO₂ by coal, *International Journal of Coal Geology*, 93, 1-15.
- Hou, X., Liu, S., Zhu, Y., & Yang, Y.** (2020). Evaluation of gas contents for a multi-seam deep coalbed methane reservoir and their geological controls: In situ direct method versus indirect method, *Fuel*, 265, 116917.
- Hunt, J. M.** (1979). Petroleum geochemistry and geology (1st ed.). San Francisco: W. H. Freeman and Co. p. 617.
- Johnson, R. C., & Flores, R. M.** (1998). Developmental geology of coalbed methane from shallow to deep in Rocky Mountain basins and in Cook Inlet–Matanuska basin, Alaska, USA and Canada, *International journal of coal geology*, 35(1-4), 241-282.
- Joubert, J. I., Grein, C. T., Bienstock, D.** (1974). Effect of moisture on the methane capacity of American coals, *Fuel*, 53(3), 186-191.
- Joubert, J. I., Grein, C. T., Bienstock, D.** (1974). Sorption of methane in moist coal, *Fuel*, 52(3), 181-185.
- Juntgen, H., & Klein, J.** (1975). Entstehung von erdgas aus kohligen sedimenten, *Erdol und Kohle Erdgas-Petrochemie*, 28, 52-69.
- Karacan, C.Ö., Ruiz, F.A., Cotè, M., Phipps, S.** (2011). Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction, *International Journal of Coal Geology*, 86, 121-156.
- Karweil, J.** (1969). Aktuelle problem der geochemie der kohle. In P. A. Schenk, & I. Havernaar (Eds.), *Advances in Geochemistry* (pp. 59-84). Oxford: Pergamon Press.
- Katyal, S., Valix, M., Thambimuthu, K.** (2007). Study of parameters affecting enhanced coalbed methane recovery, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(3), 193-205.
- Kemp, J.H., Petersen.** (1988). Coalbed gas development in the San Juan Basin, New Mexico and Colorado: A primer for the lawyer and landman. In: Fassett, J.E. (Eds), Geology and coalbed methane resources of the northern San Juan Basin, Colorado and New Mexico, *Rcky. Mtn. Assoc. Geol.*, 257-280.
- Kim, A.G.** (1977). Estimating methane content of bituminous coalbeds from adsorption data. *US Bur. Mines, Rep. Invest.* 8245, 22.
- Kissell, F. N., McCulloch, C. M., & Elder, C. H.** (1973). The direct method of determining methane content of coalbeds for ventilation design. *U.S. Bureau of Mines Report of Investigations*. 8043, 22.
- Krooss, B. M., Van Bergen, F., Gensterblum, Y., Siemons, N., Pagnier, H. J. M., David, P.** (2002). High-pressure methane and carbon dioxide

- adsorption on dry and moisture-equilibrated Pennsylvanian coals, *International Journal of Coal Geology*, 51, 69-92.
- Lama, R.D., Bodziony, J.** (1998). Management of outburst in underground coal mines, *International Journal of Coal Geology*, 35, 83-115.
- Langmuir, I.** (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *Journal of American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403.
- Laxminarayana, C., Crosdale, P. J.** (1999). Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen Basin, Australia coals, *International Journal of Coal Geology*, 40(4), 309-325.
- Levine, J.R.** (1993). Coalification: the evolution of coal as source rock and reservoir rock for oil and gas. In: Law, B.E., Rice, D.D. (Eds.), *Studies in Geology Series 39-77*, Tulsa.
- Levine, J.R.** (1996). Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs. In: Gayer, R., Harris, I. (Eds.), *Coalbed Methane and Coal Geology: Geological Society Special Publication*, 109, 197-212.
- Levy, J.H., Day, S.J., Killingley, J.S.** (1997). Methane capacities of Bowen Basin coals related to coal properties, *Fuel*, 76, 813-819.
- Li, Z., Liu, D., Ranjith, P. G., Cai, Y., Wang, Y.** (2018). Geological controls on variable gas concentrations: a case study of the northern Gujiao Block, northwestern Qinshui Basin, China, *Marine and Petroleum Geology*, 92, 582-596.
- Lo, H. B., Wilkins, R. W. T., Ellacott, M. V., & Buckingham, C. P.** (1997). Assessing the maturity of coals and other rocks from North America using fluorescence alteration of multiple macerals (FAMM) technique, *International Journal of Coal Geology*, 33, 61-71.
- Mardon, S. M., Takacs, K. G., Eble, C. F., Hower, J. C., & Mastalerz, M.** (2007). Evaluation of coalbed methane potential and gas adsorption capacity in the Western Kentucky coalfield. Lexington, KY: *American Association of Petroleum Geologists, 36th Annual Eastern Section Meeting*, September 16-18.
- Mares, T.E., Moore, T.A.** (2008). The influence of macroscopic texture on biogenically derived coalbed methane, Huntly coalfield, New Zealand, *International Journal of Coal Geology*, 76, 175-185.
- Masoudian, M. S.** (2016). Multiphysics of carbon dioxide sequestration in coalbeds: A review with a focus on geomechanical characteristics of coal, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(1), 93-112.
- Mavor, M. J., Pratt, T. J.** (1996). Improved methodology for determining total gas content. In *Comparative evaluation of the accuracy of gas-in-place estimates and review of lost gas models (Vol. II)*. Gas Research Institute. Topical Report GRI-94/0429.
- McCulloch, C. M., Levine, J. R., Kissell, F. N., Deul, M.** (1975). Measuring the methane content of bituminous coalbeds. *US Bur. Mines, Rep. Invest.*, 8043, 22.

- McLennan, J. D., Schafer, P. S., & Pratt, T. J.** (1995). A guide to determining coalbed gas content. Gas Research Institute. GRI-94/0396.
- McPherson, M. J.** (1993). *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Chapman & Hall.
- Metcalfe, R. S., Yee, D., Seidle, J. P., & Puri, R.** (1991). Review of Research Efforts in Coalbed Methane Recovery. *SPE Asia – Pacific Conference*, (pp. 727 – 740). Perth, Australia, November 1991. <https://doi.org/10.2118/23025-MS>.
- Moore, T. A.** (2012). Coalbed methane: A review, *International Journal of Coal Geology*, 101, 36-81.
- Pone, J. D. N., Hallecka, P. M., Mathews, J. P.** (2009b). Methane and carbon dioxide sorption and transport rates in coal at in-situ conditions. *Energy Procedia*, 1(1), 3121-3128.
- Prusty, B. K.** (2008). Sorption of methane and CO₂ for enhanced coalbed methane recovery and carbon dioxide sequestration, *Journal of Natural Gas Chemistry*, 17(1), 29-38.
- Rice, D. D.** (1992). Controls, habitat, and resource potential of ancient bacterial gas. In R. Vialy (Ed.), *Bacterial gas* (91-118). Editions Technip.
- Rice, D. D., & Claypool, G. E.** (1981). Generations, accumulation, and resource potential of biogenic gas, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 65, 5-25.
- Rice, D.D.** (1993). Composition and origins of coalbed gas. In: Law, B.E., Rice, D.D. (Eds.), *Hydrocarbons from Coal: AAPG Studies in Geology*, 38. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, pp. 159–184.
- Rice, D.D., Clayton, J.L., Pawlewicz, M.J.** (1989). Characterization of coal-derived hydrocarbons and source-rock potential of coal beds, San Juan Basin, New Mexico and Colorado, U.S.A., *International Journal of Coal Geology*, 13, 597-626.
- Rigby, D., & Smith, J. W.** (1982). Reassessment of stable carbon isotopes in hydrocarbon exploration. *Erdoel Kohle, Erdgas, Petrochem. Brennst.-Chem.*, (Germany, Federal Republic of), 35(9).
- Riley, J. T.** (2014). *Routine coal and coke analysis: collection, interpretation, and use of analytical data*. ASTM International.
- Saghafi, A.** (2011). Gas content and emissions from coal mining. In *Proceedings of 11th underground coal operators' conference*, Wollongong, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 285–90.
- Saghafi, A.** (2012). Developing a new method for measurement of gas content of low gas content coals (ACARP Project C18050), *CSIRO Investigation Report EP115419/30*, 70.
- Saghafi, A.** (2017). Discussion on determination of gas content of coal and uncertainties of measurement, *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(5), 741-748.

- Saghafi, A., Williams, D. J.** (1998). Factors influencing the accuracy of measurement of gas content of coal: inter-comparison of the quick crush technique (ACARP Project C6023), Brisbane, Australia, *ACARP Publication*, 70.
- Schroeder, K., Ozdemir, E., Morsi, B., Soylemezoglu, I. M.** (2001). Sequestration of carbon dioxide in coal seams. In: *First National Conference on Carbon Sequestration*, U.S. Department of Energy.
- Scott, A.R., Kaiser, W.R., Ayers Jr., W.B.** (1994). Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan basin, Colorado and New Mexico-implications for coalbed gas producibility. *AAPG Bulletin* 78, 1186-1209.
- Seidle, J.** (2011). *Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering*. Pennwell Books.
- Siemons, N., Busch, A.** (2008). Measurement and interpretation of supercritical CO₂ sorption on various coals, *International Journal of Coal Geology*, 69(4), 229-242.
- Smith, D. M., Williams, F. L.** (1981). A new technique for determining the methane content of coal. *16th. Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. Am. Soc. Mech. Eng.*, New York, 1272-1277.
- Speight, J. G.** (2005). *Handbook of Coal Analysis (Vol. 166)*. Hoboken, New Jersey, U.S.: A John Wiley & Sons, Inc.
- TRW.** (1981). Desorbed gas measurement system — design and application. US Dept. of Energy Contract No. DE-AC21-78MC08089, Morgantown Energy Technology Center, Morgantown, WV.
- Ulery, J. P., Hyman, D. M.** (1991). The modified direct method of gas content determination: Application and results, *The 1991 Coalbed Methane Symp*, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL, pp. 489-500.
- Unsworth, J. F., Fowler, C. S., & Jones, L. F.** (1989). Moisture in coal: 2. maceral effects on pore structure, *Fuel*, 69, 18-26.
- Wang, Q., Zhang, D., Wang, H., Jiang, W., Wu, X., Yang, J., Huo, P.** (2015). Influence of CO₂ exposure on high pressure methane and CO₂ adsorption on various rank coals: implications for CO₂ sequestration in coal seams, *Energy and Fuels*, 29(6), 3785-3795.
- Wang, X., Cheng, Y., Zhang, D., Yang, H., Zhou, X., & Jiang, Z.** (2021). Experimental study on methane adsorption and time-dependent dynamic diffusion coefficient of intact and tectonic coals: Implications for CO₂-enhanced coalbed methane projects, *Process Safety and Environmental Protection*, 156, 568-580.
- Ward, C. R., ve Suárez-Ruiz, I.** (2008). Applied Coal Petrology-The Role of Petrology in Coal Utilization. I. Suárez-Ruiz & J. C. B. T.-A. C. P. Crelling (Eds.), 1-18.
- Warmuzinski, K.** (2008). Harnessing methane emissions from coal mining, *Process safety and environmental protection*, 86(5), 315-320.
- Weishauptová, Z., Pribyl, O., Sýkorová, I., Machovic, V.** (2015). Effect of bituminous coal properties on carbon dioxide and methane high pressure sorption, *Fuel*, 139, 115-124.

- Williams, D. J., Saghafi, A., Drummond, D. B., Roberts, D. B.** (1992). Development of a new equipment for rapid determination of coal gas content, *Symposium on Coalbed Methane Research and Development in Australia*, Townsville, Australia, Vol. 4, 21-30.
- Xue, S., Yuan, L.** (2017). The use of coal cuttings from underground boreholes to determine gas content of coal with direct desorption method, *International Journal of Coal Geology*, 174, 1-7.
- Yang, R. T., Saunders, J. T.** (1985). Adsorption of gases on coals and heat treated coals at elevated temperature and pressure: 1. Adsorption from hydrogen and methane as single gases, *Fuel*, 64(5), 616-620.
- Yee, D., Seidle, J.P., Hanson, W.B.** (1993). Gas sorption on coal and measurement of gas content, in: Law, B.E., Rice, D.D. (Eds.), *Hydrocarbons from Coal*. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology 38, Tulsa, Oklahoma, Studies in Geology 38, pp. 203–218
- Zbair, M., & Bennici, S.** (2021). Survey summary on salts hydrates and composites used in thermochemical sorption heat storage: a review, *Energies*, 14(11), 3105.
- Zhang, Q.** (2008). Adsorption mechanism of different coal ranks under variable temperature and pressure conditions, *Journal of China University of Mining & Technology*, 18(3), 395-400.
- Zhang, Y. G., & Chen, H. J.** (1985). Concepts on the generation and accumulation of biogenic gas, *Journal of Petroleum Geology*, 8, 405-422.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Samed BOZDOĞAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Bozdoğan, S.,** Soylu, A., Fişne, A. (2023). Analysis of gas content determination methods for coal beds in Türkiye. *40th Annual International Pittsburgh Coal Conference*, 4-6 October 2023, İstanbul, Türkiye.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Rend, A. R., Özer, S. C., Esen, O., Soylu, A., **Bozdoğan, S.,** Fişne, A. (2023). Developing basin-specific emission factors for accurate methane inventory and emission reduction strategies in Zonguldak Coal Basin, Turkey: Implications for enhancing safety and sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 426, 139177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139177>
- **Bozdoğan, S.,** Karabey, S. E., Yavaş, Z. C., Fişne, A. (2023). Ventilation system optimization at the Çayeli Bakır Copper-Zinc Mine. *28th International Mining Congress and Exhibition of Türkiye*, 28 November – 1 December 2023, Antalya, Türkiye.
- Çevik, M. H., Soylu, A., **Bozdoğan, S.,** Sarıçam, İ. H., Çınar, M., Fişne, A. (2023). An experimental study on underground coal gasification of soma basin coals. *40th Annual International Pittsburgh Coal Conference*, 4-6 October 2023, İstanbul, Türkiye,
- Özer, S. C., **Bozdoğan, S.,** Karagöz, O., Fişne, A. (2023). The effects of leakages on system performance in auxiliary ventilation systems. *28th International Mining Congress and Exhibition of Türkiye*, 28 November – 1 December 2023, Antalya, Türkiye.
- Soylu, A., **Bozdoğan, S.,** Fişne, A. (2023). An assessment of direct gas content measurement techniques on asphaltite samples. *40th Annual International Pittsburgh Coal Conference*, 4-6 October 2023, İstanbul, Türkiye.
- Ergin, H., **Bozdoğan, S.** (2022). Reduced Drilling Costs Through Optimum Tricone Bit Selection – Using A Horizontal Drill Rig (HDR), *V. International Drilling Congress and Exhibition of Türkiye*, 27 - 28 October 2022, İzmir, Türkiye.