

Yeraltı Kömür Ocaklarında Ocak Yangınlarının Bulanık Mantık Yöntemi ile Tahmin Edilmesi

Esmatullah Danish

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2019

Application of Fuzzy Logic for Predicting of Mine Fire in Underground Coal Mine

Esmatullah Danish

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

May 2019

Yeraltı Kömür Ocaklarında Ocak Yangınlarının Bulanık Mantık Yöntemi ile Tahmin
Edilmesi

Esmatullah Danish

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Maden İşletme Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Mustafa nder

Mayıs 2019

ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Esmatullah Danish'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yeraltı Kömür Ocaklarında Ocak Yangınlarının Bulanık Mantık Yöntemi ile Tahmin Edilmesi ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Önder

İkinci Danışman: -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Mustafa Önder

Üye: Prof. Dr. Melih İphar

Üye: Prof. Dr. Yaşar Kasap

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Mustafa Önder danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yeraltı Kömür Ocaklarında Ocak Yangınlarının Bulanık Mantık Yöntemi ile Tahmin Edilmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 13/05/2019

Esmatullah Danish

İmza

ÖZET

Kömürün kendiliğinden yanması, gaz ve toz patlamasına, maden yangınlarına, zehirli gazların yayılmasına, rezerv kaybına ve madencilerin hayat kaybına doğrudan veya dolaylı neden olan faktörlerden biridir. Bu kazaları önlemek için kömürün kendiliğinden yanmasının tahmin edilmesi önemlidir. Ayrıca, kömürün kendiliğinden yanmasının tahmin edilmesi erken aşamalarda, maden çalışanlarının emniyeti açısından da önemlidir. Bu çalışmada, tam mekanize uzunayak üretim yöntemine sahip olan Adularya yeraltı kömür madeni işyeri olarak seçilmiş ve 2017 yılı boyunca 10 adet gaz izleme istasyonu tarafından ölçülen veriler alınmıştır. Verilerdeki belirsizlikler, doğrusal ve kesin olmayan değişkenler nedeniyle, bu çalışmada, bulanık mantık modeli kullanılmıştır. Kendiliğinden yanmayı tahmin etmek için, CO, O₂, N₂ ve sıcaklık girdi değişkenleri, yangın yoğunluğu ise çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır. Bulanık modelinde Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmış ve simülasyon için MATLAB ortamında Bulanık Mantık Araç Kutusu kullanılmıştır. Sonuç olarak, bulanık mantık sisteminin, belirsiz ve doğrusal olmayan verileri ile yangın yoğunluğunun belirlenmesinde daha güvenilir olduğu bulunmuştur. İşletmenin, 1409 ve 610/2B gaz izleme istasyonu noktaları kendiliğinden yanma açısından şüpheli olduğundan uygun önlemlerin alınması gereklidir. Bulanık mantık modelinin Graham oranına göre, yangın yoğunluğunu belirlemede, birçok değişkeni eşzamanlı olarak analiz etmesi ve değerlendirmesinden dolayı güvenilir sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık modeli; Yangın yoğunluğu; Kendiliğinden yanma; Ocak yangınının tahmin edilmesi.

SUMMARY

Coal spontaneous combustion is one of the factors which causes direct or indirect gas and dust explosion, mine fire, the release of toxic gases, loss of reserve and loss of miners' life. To avoid these incidents, the prediction of coal spontaneous combustion is essential. The safety of miner's in the mining field can be assured if the prediction of a coal fire is carried out at an early stage. Adularya underground coal mine which is fully mechanized with longwall mining method was selected as a case study. The data collected for 2017, by sensors from ten gas stations were used for the simulation and prediction of a coal fire. In this study, the fuzzy logic model is used due to the uncertainties, nonlinearity and imprecise variables in the data. For coal fire prediction, CO, O₂, N₂, and temperature were used as input variables whilst fire intensity was considered as the output variable. The simulation of the model is carried out using the Mamdani inference system and run by the Fuzzy Logic Toolbox in MATLAB. The results showed that the fuzzy logic system is more reliable in predicting fire intensity with respect to uncertainties and nonlinearities of the data. It also indicates that the 1409 and 610/2B gas station points have a greater chance of causing spontaneous combustion and therefore require precautional measured. The Fuzzy logic model shows higher probability in predicting fire intensity with the simultaneous application of many variables compared to Graham's index.

Keywords: Fuzzy logic model; Fire intensity; Spontaneous combustion; Mine fire prediction.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada ve yüksek lisans döneminde desteklerini esirgemeyen, grubunda çalışmama izin veren, değerli tavsiyeler veren ve elverişli bir ortamı oluşturan, başta Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ve, M.M.F. Maden Mühendisliği öğretim üyesi Hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa Önder'e teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca verdiği destek, güven ve sabır için Sayın Prof. Dr. Melih İphar'a teşekkür ederim. Bu kurumda kaldığım süre boyunca misafirperverliklerini ve desteklerini eksik etmeyen maden mühendisliği bölümünün üyelerine de teşekkür ederim.

Beni bu aşamaya kadar getiren ve burs sunduğundan dolayı Türkiye Devletine teşekkür ederim. Ayrıca, Türk milletine misafirperverlikleri ve sıcak davranışları için teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında maddi, manevi, hayır dualarını ve teşviklerini eksik etmeyen aileme çok teşekkür ederim.

Ayrıca, Adularya yeraltı maden işletmeciliği ve enerji elektrik üretimi A.Ş. idaresine ve özellikle Sayın Şafak Gülügüzel'e veri ve bilgi toplamama ve maden ziyaretinin imkânları sağladıkları için şükranlarımı sunarım.

Esmatullah Danish, Eskişehir

Mayıs 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. OCAK YANGINLARI	5
2.1. Yeraltı Madenlerinde Yangın Türleri	6
2.1.1. Kömürün kendiliğinden yanması	6
2.1.2. Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler	9
2.1.3. Yeraltı madenlerinde kendiliğinden yanma için alınacak önlemler.....	11
2.1.4. Açık Yangınlar.....	11
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	12
3.1. Bulanık Mantık Yöntemi	12
3.2. Elektromanyetik Radyasyon Tekniği.....	13
3.3. Gaz Konsantrasyonunun İzlenmesi.....	13
3.4. Gaz Oranları.....	14
3.5. Yangın Oranları	14
3.5.1. Graham oranı (GR)	15
3.5.2. Young oranı (YR)	16
3.5.3. CO/CO ₂ oranı.....	17
3.5.4. Jones ve Trickett oranı (JTR).....	17
3.5.5. N ₂ /(CO+CO ₂) oranı.....	18
3.5.6. Hidrokarbon oranı (RI)	18
3.5.7. Kuru kül içermeyen oksijen oranı ((dry ash-free) (DAF) Oxygen index)	19
3.5.8. Wilett oranı	19
3.5.9. C/H oranı.....	20
3.5.10. Litton oranı	21
3.5.11. H/CH ₄ oranı	23
3.5.12. Üretilen karbon monoksit	23

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.5.13. CO veya CO ₂ /Metan oranı	23
3.5.14. C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ ve C ₃ H ₈ /C ₂ H ₆ oranları	24
4. ADULARYA MADENCİLİK A.Ş. VE ENERJİ ELEKTRİK ÜRETİMİNİN TANITIMI	28
4.1. Koyunağlı Linyit Havzasının Genel Jeolojik Özellikleri.....	32
4.1.1. Genel jeoloji.....	32
4.1.1.1. <u>Stratigrafi</u>	32
4.1.2. Yapısal jeoloji.....	35
4.1.2.1. <u>Kuzey-güney fayı (K-G)</u>	35
4.1.2.2. <u>Karakaş tepe fayı (Ka-T)</u>	35
4.1.2.3. <u>Kırmızı tepe fayı (K1-T)</u>	36
4.1.2.4. <u>Doğrultu atımlı faylar (D-A)</u>	36
4.1.3. Linyit jeolojisi.....	36
4.1.3.1. <u>Üst damar</u>	37
4.1.3.2. <u>Orta damar</u>	37
4.1.3.3. <u>Alt damar</u>	37
4.1.4. Hidroloji.....	38
5. MATERYAL VE YÖNTEM	39
5.1. Materyal	39
5.2. Bulanık Mantık Yöntemi	48
5.2.1. Bulanık mantığın gelişimi.....	48
5.2.2. Bulanık mantık ve madencilik uygulaması.....	50
5.2.3. Bulanık çıkarım sistemleri	50
5.2.4. Bulanık küme ve klasik küme teorisi.....	51
5.2.4.1. <u>Klasik küme</u>	51
5.2.4.2. <u>Bulanık küme</u>	54
5.2.5. Bulanık kümelerinde temel işlemler	56
5.2.5.1. <u>Birleşim</u>	56
5.2.5.2. <u>Kesişme</u>	57
5.2.5.3. <u>Tümleyen</u>	59
5.2.6. Üyelik fonksiyonunun türleri.....	61
5.2.6.1. <u>Üçgen üyelik fonksiyonu</u>	61
5.2.6.2. <u>Gauss üyelik fonksiyonu</u>	61

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2.6.3. <u>Genelleştirilmiş Çan Eğrisi üyelik fonksiyonu</u>	62
5.2.6.4. <u>Sigmoidal üyelik fonksiyonu</u>	62
5.2.6.5. <u>Trapez üyelik fonksiyonu</u>	63
5.2.7. <u>Bulanık sistem bileşenleri</u>	67
5.2.7.1. <u>Bulanıklaştırma</u>	67
5.2.7.2. <u>Bulanık kurallar ve çıkarım motoru</u>	69
5.2.7.3. <u>Durulaştırma</u>	72
5.2.8. <u>Bulanık çıkarım sistemlerinin türleri</u>	73
5.2.8.1. <u>Mamdani bulanık çıkarım sistemi</u>	73
5.2.8.2. <u>Sugeno bulanık çıkarım sistemi</u>	75
5.2.8.3. <u>Tsukamoto bulanık çıkarım sistemi</u>	76
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	77
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	86
KAYNAKLAR DİZİNİ	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yeraltı madenlerinde yangın türleri, alanları ve nedenleri.....	6
4.1. Adularya yeraltı kömür madeni ve elektrik enerjisi santralinin yerleşkesi.	28
4.2. Adularya termik santrali (Gülüzüzel'den, 2018).	29
4.3. A sektörünün yeraltı hazırlık, havalandırma ve üretim genel planı.	31
4.4. Dosco marka kollu galeri açma makinesi.....	32
4.5. Koyunağılı linyit havzasının stratigrafik kesiti.	34
4.6. Koyunağılı linyit sahasının hidrojeolojik stratigrafi dikme kesiti.	38
5.1. Gaz ve sıcaklık sensörleri.....	39
5.2. Adularya yeraltı kömür madeni A sektörünün genel havalandırma sistemi ve gaz ölçüm istasyon noktaları.	40
5.3. Cat Electro 2000 kesici yükleyici makinesi.	46
5.4. Paralel çalışmakta olan iki emici vantilatör.	47
5.5. Kuzey girişi.	47
5.6. Bulanık mantık modelinin genel yapısı.....	51
5.7. (a) Bulanık küme ve (b) klasik küme.	56
5.8. A ve B bulanık kümeleri ve birleşimi.	57
5.9. A ve B bulanık kümeleri ve kesişimi.	58
5.10. A ve B bulanık kümeleri ve tümleyenleri.	59
5.11. Üyelik fonksiyonlarının grafik gösterimi.	63
5.12. Girdi değişkenlerinin trapez üyelik fonksiyonları grafik gösterimi; (a) azot konsantrasyonu, (b) oksijen konsantrasyonu, (c) sıcaklık ve (d) karbon monoksit konsantrasyonu.	65
5.13. Çıktı değişkeninin trapez üyelik fonksiyonları grafik gösterimi; yangın yoğunluğu.	66
5.14. Bulanık denetleyici sisteminin ana yapısı ve durulaştırma aşaması.....	70
5.15. Alanın merkezi durulaştırma yönteminin grafiği (İphar'dan, 2004).	72
5.16. Minimum ve maksimum operatörlerinin kullanıldığı 2 kuralı Mamdani bulanık çıkarım sistemi.....	74
6.1. Dört girdi ve bir çıktı değişkene sahip olan bulanık simülasyon modelinin ana yapısı.	78
6.2. Çeşitli bulanık girdi kombinasyonları ile birlikte bulanık kurallarına göre grafik olarak yangın yoğunluğunun yorumlanması; (a) oksijen ve azot, (b) oksijen ve sıcaklık, (c) oksijen ve karbon monoksit, (d) azot ve sıcaklık, (e) azot ve karbon monoksit, (f) sıcaklık ve karbon monoksit.	79
6.3. Kendiliğinden yanmaya yatkın ve tehlikeli alanların gösterimi.	82
6.4. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz izleme istasyonu için bulanık modelinin değerleri.....	83
6.5. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz izleme istasyonu için Graham oranının değerleri.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Türkiye’deki meydana gelen maden kazaları (Yaşar vd., 2015).....	3
2.1. Kendiliğinden yanmayı etkileyen faktörler (Uludağ, vd., 2001).....	9
3.1. Kendiliğinden tahmininde kullanılan yöntemler.....	12
3.2. Kömür kendiliğinden yanmasını tahmin etmek için kullanılan yangın oranları.....	15
3.3. Graham oranı ile yangın yoğunluğunun derecelendirilmesi.....	16
3.4. Young oranının sınıflandırılması.....	17
3.5. Karbon oksitler oranına göre yangın durumunun sınıflanması.....	17
3.6. Jones ve Trickett oranının sınıflandırılması.....	18
3.7. Bitümlü kömür için RI değerinin sınıflandırılması.....	19
3.8. Kapatılmış alanlar için C/H oranının değerlerinin sınıflandırılması.....	20
3.9. C/H oranının değerlerinin sınıflandırılması.....	20
3.10. Litton oranının değerlerinin sınıflandırılması.....	21
3.11. Yangın oranlarının avantajları ve dezavantajları.....	25
5.1. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz istasyonu için 2017 yılı aylık ortalama değerleri.....	41
5.2. Klasik kümenin temel işlemleri ve özellikleri.....	53
5.3. Bulanık ve klasik mantık temel farklılıkları (Çobanoğlu, 2000).....	55
5.4. Standart bulanık küme operatörlerinin özellikleri ve temel işlemleri.....	60
5.5. Bulanık modeline göre yangın yoğunluğunun derecelendirilmesi.....	66
5.6. Girdi ve çıktı değişkenleri, dilsel değerleri, üyelik fonksiyonunun şekli, aralık ve üyelik fonksiyonunun parametreleri.....	68
5.7. Bulanık kurallarının tam versiyonunun bazı örnekleri.....	70
5.8. Kömürün yangını tahmin etmek için tüm kısaltılmış bulanık kuralları.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
O ₂	Oksijen
C	Karbon
H	Hidrojen
CH ₄	Metan
C ₂ H ₄	Etilen
C ₂ H ₆	Etan
C ₃ H ₈	Propan
N ₂	Azot
510	Gaz izleme istasyonu
1410	Gaz izleme istasyonu
1409	Gaz izleme istasyonu
610/2B	Gaz izleme istasyonu
610	Gaz izleme istasyonu
A06	Gaz izleme istasyonu
D	Gaz izleme istasyonu
D210	Gaz izleme istasyonu
GR	Graham oranı
YR	Young oranı
JTR	Jones ve Trickett oranı
RI	Hidrokarbon oranı
ppm	Milyon başına (Part per million)
Blackdamp	Ortamda Azot ve Karbon dioksitin varlığını gösterir
Yanabilir gazlar	Metan, Hidrojen, Karbon monoksit
R _g	Atık gazlar
(R _I) _{eq}	Maksimum denge değeri
((R _I) _{act})	Gerçek R-indeksin değeri
m	Metre

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
∨	Maksimum operatörü (VEYA operatörü)
∧	Minimum operatörü (VE operatörü)
a, b, c	Üçgen üyelik fonksiyonunun parametreleri
c, σ	Gauss üyelik fonksiyonunun parametreleri
a, b, c, d	Trapez üyelik fonksiyonunun parametreleri
D	Düşük
O	Orta
Y	Yüksek
ND	Normal Durum
BI	Belirli Isınma
GI	Gelişmiş Isınma
AK	Aktif Yangın
AÇ	Açık Yangın
YY	Yangın Yoğunluğu
S	Sıcaklık
R#	Kural numarası
Z_{COA}	Alanın merkezi yöntemine göre durulaştırılmış değer (kesin değer)

Kısaltmalar

Açıklama

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
TTK	Türkiye Taşkömürü Kurumu
DAF	Kuru Kül içermeyen oksijen oranı (Dry Ash-Free)
THC	Toplam hidrokarbon konsantrasyonu
K-G	Kuzey-Güney
KB-GD	Kuzeybatı-Güneydoğu
D-B	Doğu-Batı
GD-KB	Güneydoğu-Kuzeybatı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar****Açıklama**

MAX	Maksimum
MİN	Minimum
COA	Alanın merkezi (centroid of area)
TSK	Takagi, Sugeno ve Kang



1. GİRİŞ VE AMAÇ

Doğal kaynaklar her ülkenin ekonomik büyümesi için omurga olarak tanımlanır. Kömür, dünyanın birçok yerinde en önemli ana enerji kaynağı olarak kullanılan kaynaklardan biridir. Kömür dünyanın birçok ülkesinde üretilir ve bu ülkelerin ekonomilerinde büyük rol oynamaktadır. Kömür yenilenemez bir enerji kaynağı olup, yalnızca ülkenin enerji ihtiyaçlarının karşılamasında değil aynı zamanda ülkenin ekonomik büyümesinde de büyük rol oynayabilir. Yıllardır, insanoğlu tarafından kömür, ortamların ısıtmasının sağlanması, çimento ve çelik üretimi, elektrik üretimi ve taşımacılık gibi endüstrilerde kullanılmıştır.

Son yıllarda, nüfustaki büyük bir artıştan dolayı dünya, enerji sorunları ile karşı karşıya kalmaktadır. Kömür hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde kullanılan enerji kaynaklarından biridir. Örneğin, Türkiye'nin 2023 vizyonunda, kömür santrallerinin kapasitelerinin 2015'te 15 GW'dan 2023'te 30 GW'a çıkacağı öngörülmekte ve sadece kömürün elektrik talebinin % 25'ini karşılayabileceği tahmin edilmektedir. Bu durum, Türkiye'de 2023 yılına kadar kömür tüketiminde bir artış olacağını göstermektedir (Melikoglu, 2017).

Kömürün kendiliğinden yanması, gaz ve toz patlamasına, maden yangınlarına, zehirli gazların yayılmasına, rezerv kaybına ve madencilerin hayat kaybına doğrudan veya dolaylı neden olan faktörlerden biridir. Bu sorunlarla mücadele etmek için kömürün kendiliğinden yanmasının erken aşamalarda değerlendirmelerinin yapılması ve öngörülmesi, önemli bir rol oynar.

Dünya çapında, kendiliğinden yanma, tüm yeraltı kömür madenlerindeki yangınlarının % 75-90'ını ve tüm yeraltı metal maden yangınlarının % 20'sini oluşturmaktadır (Ramlu, 2007). ABD'de 1990 ile 1999 yılları arasında, yeraltı kömür madenlerinde 87 rapor edilmiş yangından % 17'si, açık kömür madenlerinde ise 215 rapor edilmiş yangından % 10'unun kömürün kendiliğinden yanmasından dolayı meydana geldiği bildirilmiştir. Benzer şekilde, tüm kömür işletme tesislerinde, 91 rapor edilmiş yangından % 17'si ve yeraltı kömür madenlerinden rapor edilmiş 65 yangından % 17'sinin

kömürün kendiliğinden yanmasından meydana geldiğini bildirilmiştir (Rosa, 2004). Çin'de, maden kazalarının oranı yüksek olup, yeraltı kömür madenlerinin % 56'sının kömürün kendiliğinden yanmasından etkilenebileceği (Liang ve Wang, 2017) ve ayrıca, maden yangınlarının yaklaşık % 90'ının kömürün kendiliğinden yanmasından kaynaklandığı bildirilmiştir.

Kömür üreten ülkelerden, Çin, ABD, Hindistan, Avustralya, Almanya gibi ülkeler için, kömürün kendiliğinden yanmasının sonucundan ortaya çıkan maden yangınları büyük bir problemdir (Muduli vd., 2018). Örneğin, Almanya'nın Ruhr bölgesinde, kömürün kendiliğinden yanmasından dolayı yılda yaklaşık 10 kömür yangını meydana gelmektedir (Stracher ve Taylor, 2004). Hindistan kömür madenlerinde, kömürün kendiliğinden yanması, tüm yangınların % 75'ini oluşturur (Singh ve Singh, 2004). Kömür stok alanlarında kömürün kendiliğinden yanması sonucunda Garp Linyitleri Tunçbilek Kömür İşletmeleri'nde 10 yıl içerisinde 500 000 ile 1 000 000 ton kömür kaybedilmesi öngörülmüştür (Özdeniz, 2003). 1990 ile 2000 yılları arasında 6 adet kendiliğinden yanma olayı, Zonguldak Havzası'ndaki TTK işletmesi Karadon kömür ocağından bildirilmiştir (Baris ve Didari, 2009). Bu nedenle, Türkiye'deki diğer kömür madenleri de bu olaydan istisna değildir.

Kömürün kendiliğinden yanması sadece kömür rezervini tahrip etmekle kalmaz, aynı zamanda çevreye sera ve zehirli gazları da yayar. Kömür ve kömür madenlerinin yangınları fiziksel tehlikesine ve düşük hava kalitesine de neden olur. Kömürün ve kömür madenlerinin yangınları çevrenin ve topluluğun yüksek miktarda kirleticilere maruz kalma riskini artırmaktadır (Melody ve Johnston, 2015). Çin'de, her yıl 20 ile 200 milyon ton kömürün yanmasının sonucunda yaklaşık olarak % 1 oranında küresel karbon dioksitin yayılması bildirilmektedir (Kajick, 2005). Ayrıca, kömür yangını nedeniyle, dünya çapında bir yılda atmosfere yaklaşık 40 ton cıva ve % 3 küresel karbon dioksitin yayıldığı bildirilmektedir (Cray, 2010).

Soma yeraltı kömür madeninin kazası 13.05.2014 tarihinde, kömürün kendiliğinden yanması sonucunda meydana gelmiş olup, 1375 yılından beri kayıt altına alınmış maden kazalarına göre can kayıpları açısından dünyadaki maden kazaları içinde 25. sıradadır (Yaşar vd., 2015). Soma kömür madeninde meydana gelen kaza sonucunda 301 kişi

hayatını kaybetmiş, yaklaşık 90 kişi yaralanmıştır. Türkiye'deki maden kazalarının içerisinde en büyük maden kazası sayılmıştır (TBB, 2014). Türkiye'de meydana gelmiş olan büyük ölümlü iş kazaları Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Türkiye'deki meydana gelen maden kazaları (Yaşar vd., 2015).

Maden	Tarih	Kazanın nedeni	Ölü sayısı	Kurum
Armutçuk	1983	Grizu	103	Kamu
Kozlu	1983	Grizu	10	Kamu
Yeni Çeltek	1983	Grizu	5	Kamu
Kozlu	1987	Göçük	8	Kamu
Amasra	1990	Grizu	5	Kamu
Yeni Çeltek	1990	Grizu	68	Kamu
Kozlu	1992	Grizu	263	Kamu
Sorgun	1995	Grizu	37	Özel
Aşkale	2003	Grizu	8	Taşeron
Ermenek	2003	Grizu	10	Taşeron
Bayat	2004	Grizu	3	Özel
Küre	2004	Yangın	19	Taşeron
Gediz	2005	Grizu	18	Kamu
Dursunbey	2006	Grizu	17	Özel
M. Kemalpaşa	2009	Grizu	19	Özel
Dursunbey	2010	Grizu	13	Özel
Karadon	2010	Grizu	30	Taşeron
Elbistan	2011	Şev kayması	11	Taşeron
Kozlu	2013	Metan degajı	8	Taşeron
Soma	2014	Ocak yangını	301	Taşeron
Ermenek	2014	Su baskını	18	Taşeron

Çizelge 1.1 incelendiğinde, maden kazalarının % 71,43'üne grizu patlamasının, % 9,523'üne yangının ve % 19,047'sine göçüğün, şev kaymasının, metan degajının ve su baskınının neden olduğu bulunmuştur. Türkiye Cumhuriyet tarihinin en büyük ölümlü

kazası da kömürün kendiliğinden yanmasının sonucu olarak 2014 yılında Soma'da yaşanmıştır.

1941'den bu yana kadar farklı Türk madenlerinde gaz patlaması, göçük ve maden yangınları nedeniyle tahminen 3 bin madenci hayatını kaybetmiş ve 100 binden fazla madenci yaralanmıştır (Ankara, 2014). Yeraltı kömür madeninin güvenliğini sağlamak için, erken aşamalarda kömürün kendiliğinden yanmasının tahmini de çok önemlidir.

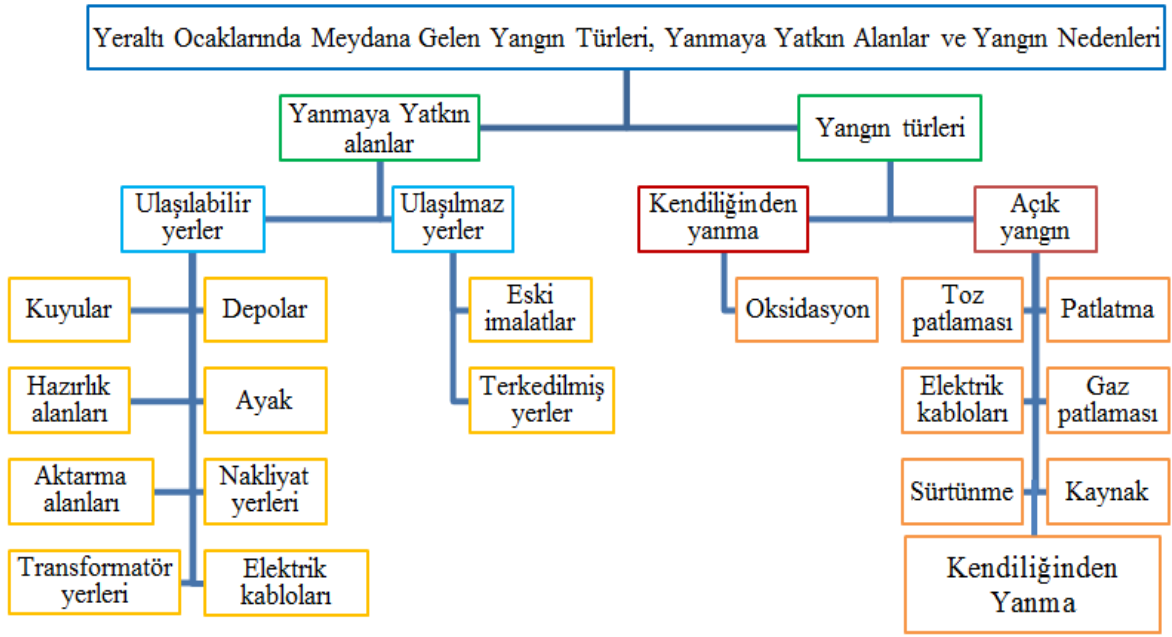
Bu çalışmada, kömürün kendiliğinden yanmasını erken evrede doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin etmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Oluşturulan bulanık mantık modeli, kömürün kendiliğinden yanmasını belirlemede en çok kullanılan Graham İndeksi esas alınarak geliştirilmiştir. Bulanık mantık yöntemi ile kendiliğinden yanmanın tahmin edilmesi ve yangın durumunun izlenmesi daha hızlı bir şekilde yapıldığından, karar vermede zaman kaybı azaltılabilir. Böylece alınan kararlar kendiliğinden yanma ile mücadele çalışmaları başlatılabilir.

2. OCAK YANGINLARI

Dünyada madencilik hem açık işletme hem de yeraltı işletme şekillerinde yapılır. Tasarımının karmaşıklığı ve yüksek üretim maliyetleri yeraltı madenlerinin özellikleri arasında yer alırken, meydana gelen kazalar da göz önüne alınmalıdır. Kömür madenciliğinden kaynaklanan tehlikeler, yeraltı kömür madenlerinin tasarımını sınırlayan faktörlerden biridir. Yeraltı madenlerinde bulunan en önemli tehlikeler arasında tavan çökmesi, kendiliğinden patlamalar, kömürün kendiliğinden yanması, gaz emisyonları vb. sayılabilir. Bu nedenle, bu tehlikelerin doğru bir şekilde tanımlanması ve tehlikelerin tahmin edilmesi, önlenmesi ve kontrol edilmesi için önleyici yöntemler bulunmalıdır. Bu nedenle, bu çalışmada yeraltı madenlerinde kömürün kendiliğinden yanma tehlikesinin tahmini ele alınmıştır. Yangın, hem açık hem de yeraltı kömür madenlerinde en büyük sorunlardan biridir. Kömür madenciliğinde kömürün kendiliğinden yanması kömürün doğasından gerçekleşen bir olay olup, madencilik sırasında tehlike olarak kabul edilir. Kömürün kendiliğinden yanması, kömür oksijene maruz kaldığında meydana gelen fiziksel ve kimyasal bir reaksiyonudur. Kömürün kendiliğinden yanması hidrojen, karbon, nem, uçucu madde, pirit ve kükürt varlığı ve ayrıca, kül içeriğindeki düşüş ile hızlanabilir (Onifade ve Genc, 2018).

Kömür üreten ülkelerden, Çin, ABD, Hindistan, Avustralya, Almanya gibi ülkelerde kömürün kendiliğinden yanmasının sonucu ortaya çıkan maden yangınları büyük bir problemdir (Muduli vd., 2018). Kömürün kendiliğinden yanması, yeraltı ve açık madenlerdeki kömür yataklarında, taşıma sırasında ve kömür depolarında meydana gelebilir.

Kendiliğinden yanma dışındaki yangınlara, kıvılcım, uygun olmayan elektrik tesisatı, sıvı yakıtlar, sürtünme ve personelin ihmalinden kaynaklanan yangınlar örnek olarak verilebilir. Yeraltı madenlerinin yangınları açık işletme yangınlardan daha ciddi ve tehlikelidir. Kömürün yanmasının sonucunda ortaya çıkan ısı, patlayabilir ve zehirli gazları galeriler içerisinde biriktirir ve dolayısıyla, çalışanların hayatlarını riske atar. Yeraltı ocaklarında meydana gelen yangın türleri, yanmaya yatkın alanlar ve yangın nedenleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Yeraltı madenlerinde yangın türleri, alanları ve nedenleri.

2.1. Yeraltı Madenlerinde Yangın Türleri

Genel olarak yeraltı madenlerinde meydana gelen yangınlar aşağıdaki gibi iki bölüme ayrılır.

- 1- İçsel yangınlar veya kendiliğinden yanma (oksidasyon sonucunda meydana gelen yangınlar),
- 2- Açık yangınlar (ekzotermik kaynaklardan meydana gelen yangınlar).

2.1.1. Kömürün kendiliğinden yanması

Kendiliğinden yanma, harici bir ısı kaynağı uygulanmadan, iç oksidasyon işlemlerinin bir sonucu olarak bir maddenin tutuşmasıdır.

Kömürün kendiliğinden ısınması, bir dizi karmaşık fiziksel ve kimyasal işlemi içerir ve bu işleme kömür ve oksijen arasında kimyasal reaksiyon ve ortama yayılmış sıcaklık neden olur. Kömürün kendiliğinden ısınması ortam sıcaklığında başlayıp üretilmiş olan ısının ortamdaki uzaklaştırılmaması nedeniyle kömürün yanmasına yol açar. Ortamda yeterli oksijen mevcutsa ve yayılmış sıcaklık enerji iletimi, konveksiyon veya radyasyon

yoluyla yeterince uzaklaştırılmıyorsa sıcaklıktaki artış, kömür oksidasyonu ve ısı birikiminin hızını arttırıp kömürün yanmasına neden olur. Isı biriktiğinde sıcaklık yükselir ve Arrhenius kuralına göre (Eşitlik 2.1), reaksiyon hızı katlanarak artar.

$$V = C_r \times C_o A \times e^{\frac{Ea}{RT}} \quad (2.1)$$

Burada:

V - Reaksiyon, $mol\ g^{-1}s^{-1}$

C_r - Yakıt konsantrasyonu, kg/m^3

C_o - Oksijen konsantrasyonu,

A - Arrhenius frekans faktörü, S^{-1} veya $S^{-1}C^{1-n}$

Ea - Aktivasyon enerjisi, kJ/mol

R - Evrensel gaz sabiti, $= 8,3145J\ mol^{-1}\ K^{-1}$

T - Sıcaklık, K

Isı dağılımı, kömürün ve çevresindeki kayacın termal iletkenliğine, atmosferdeki hava hızı ve barometrik değişikliklerinin neden olduğu konveksiyon işlemlerine ve kaya kütesindeki küçük ve büyük kırık ve çatlakların yoğunluğuna bağlıdır.

Kömür madenciliğinin sektöründe, kömürün kendiliğinden yanması, hem açık hem de yeraltı madenciliğinde büyük bir sorundur. Kömürün düşük sıcaklıkta oksidasyonu, kömür madenciliğinde, depolanması ve taşınması sırasında kendiliğinden tutuşması ve ısınmanın temel nedenidir (Su vd., 2017). Kömürün kendiliğinden yanması, kömür madenlerinde bütün kömür üreten ülkeler için en önemli problemlerden biri ve bu alanda ilgilenen endüstri ve araştırmacılar için büyük korkusudur. İlk başta çoğu kömür yangını, kendiliğinden ısınmaya bağlı olarak küçük bir alanda başlar ve daha sonra kademeli olarak milyonlarca ton kömür kaybı, işçilerin ölümü, madenin içindeki ekipmanın hasar görmesi ile sonuçlanan geniş bir alanı kapsar. Bununla beraber, madenden açığa çıkan gazlar ve aşırı duman çevresel sorunlar, maden sıcaklığının artışı ve maden havalandırma sisteminin bozulması gibi sorunlara neden olur.

Kömürün kendiliğinden yanmasının alevi ile ortaya çıkan patlama riski, düşük kalite kömüre sahip olan ve birikmiş metan gazı içeren madenlerde daha yüksektir. Türkiye'deki taşkömürlerinin kendiliğinden yanmasının eğilim endeksi 4 ile 7,24 dk¹ arasında değişirken, linyitler için aynı endeks 3,68 ile 19,57 dk¹ arasında değişmektedir (Sensogut ve Cinar, 2006).

Yanma her zaman oksijen, ateş ve yanabilir maddeye ihtiyaç duyar. Bu nedenle yeraltı kömür madenlerinde, kendiliğinden yanmanın meydana gelmesi için aşağıda verilen 3 koşulun sağlanabilmesi gerekir. Bunlar;

- 1- Yeraltı ocaklarında oksidasyon işlemi desteklemek için yeterli oksijen bulunmalı,
- 2- Yeraltı ocaklarında ısı birikimi için ortam koşulları uygun olmalı,
- 3- Yeraltı ocaklarında ortam sıcaklığında oksitlenebilecek bir biçimde kömür bulunmalıdır.

Oksidasyon işleminin kolayca gerçekleşebileceği bir ortam olduğunda kömürün kendiliğinden yanması meydana gelir. Bu nedenle; yeraltı ocakları, kendiliğinden yanma sürecini teşvik edebilen doğal bir ortamdır. Yeraltı kömür madenlerinde, kömür damarlarının çıkartıldığında, eski imalat içerisinde kırılmış ve atık kömürler düşük sıcaklık oksidasyonuna maruz kalıp kaçak hava ile oksidasyona girer ve atık kömürlerin tutuşmasına neden olabilir. Yeraltı madenlerinin eski imalatlarında kaçak hava düşük hıza sahiptir. Düşük hava hızı oksidasyon açısından kritik hava hızı olup oksidasyon işlemlerinin sonucunda ortaya çıkan sıcaklıklar ortamdan uzaklaştırılamamaktadır. Sonuç olarak, Adularya yeraltı kömür madeninde, eski imalat göçük bölgesi kendiliğinden yanma için ana yer olup, Taraba ve Michalec'nin (2011) elde ettikleri sonuçları ile aynı doğrultudadır.

Yeraltı kömür madenlerinde, kömürün kendiliğinden yanması için, barajların etrafı, iki baca arasında kalmış olan topuk, iyi tahkimat yapılmamış giriş ve çıkış hava yolları arasındaki sahalar, kapatılmış alanların etrafı ve eski imalat alanları gibi sabit alanlar, ayak aynası ve şiltlerin arkası dinamik alan olarak tanımlanabilir. Kömürün kendiliğinden yanması için sabit alanlar daha riskli olup, kendiliğinden yanma riski hava kaçağı ve

çatlaklara bağlıdır. Yeraltı kömür madenlerinde, eski imalatlarda hava kaçağı bulunduğundan ve hava hızı düşük olduğundan dolayı oksidasyon meydana gelir ve bu alanlarda her zaman kömürün kendiliğinden yanmasının izlenmesini gerektirir.

2.1.2. Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler

Kömürün kendiliğinden yanması, belirli atmosferik koşullar altında ortaya çıkar. Kömürün kendiliğinden ısınma eğiliminin belirlenmesi için önce farklı kömürlerinin iç özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Ancak, şu ana kadar kömürün kendiliğinden yanmaya duyarlılığını değerlendirmek için özel bir standart teknik kullanılmamıştır. Kömürün kendiliğinden ısınmasının başlamasını etkileyen çeşitli içsel ve dışsal faktörler vardır. Bu nedenle, kendiliğinden yanmanın mekanizmasını anlamak zordur. Kömürün kendiliğinden yanmasını etkileyen faktörler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kendiliğinden yanmayı etkileyen faktörler (Uludağ, vd., 2001).

İç faktörler		Dış faktörler	
Kömür özellikleri	Jeolojik özellikler	Atmosferik koşullar	Madencilik faktörleri
Uçucu madde	Fay varlığı	Oksijen oranı	Madencilik yöntemi
Gevreklik	Damar derinliği	Sıcaklık ortalaması	Çalışma tarzı
Kömürleşme derecesi	Üst tabakalar	Hava basıncı	Yan kayaçların hareketleri
Gözeneklilik	Damar yakınlığı	Hava nemliliği	İlerleme hızı
Tane boyutu	Damar eğimi		Tavandaki kömür
Kömür reaktivitesi	Taban hareketi		Tabandaki kömür
Kalorifik değeri	Jeotermik gradyan		Havalandırma yöntemi
Yoğunluğu			Kullanılan ekipmanlar
Kül, Nem ve Pirit içeriği			Organik maddelerin bulunması
Toplam kükürt			Çalışma derinliği

Düşük kaliteye sahip olan kömürler, kendiliğinden yanmaya karşı daha duyarlıdır. Çünkü düşük kaliteye sahip olan kömürler tipik olarak daha fazla ufalanabilir olup daha fazla kırık yüzey alanı içerir ve yüksek kaliteye sahip olan kömürlerden daha fazla oksidasyona maruz kalır. Yüksek kaliteye sahip olan kömürler daha az safsızlığa sahip olduğundan dolayı kendiliğinden yanmaya karşı düşük bir potansiyele sahiptir. Yüksek miktarda hidrojen, karbon, nem, uçucu madde, pirit ve kükürt varlığına sahip olan kömürler kendiliğinden yanmaya daha yatkın olup, yüksek kül ve safsızlığa sahip olan kömürler ise kendiliğinden yanmaya yatkın değildir. Kömür damaları ne kadar derinde olursa o kadar yüksek basınç ve sıcaklığa maruz kalarak oksijen yokluğunda gözeneksiz ve yüksek kaliteli kömürleri oluşturulur. Kömür damarlarının yan kayaçları ve fay yapısının bilinmesi kendiliğinden yanmayı tahmin etmek açısından önemlidir. Faylar taban ve tavan kayaçlarının hareketlerine ve hava kaçağına neden olarak yanmayı artırır. Kömür ile hava teması geçtiğinde oksidasyon meydana gelip kendiliğinden yanmaya sebep olur. Her madencilik yönteminde kendiliğinden yanmaya yatkın alanlar vardır. Bu nedenle, madencilik yöntemi seçilirken bazı hususların göz önünde bulundurulması gerekir. Madencilik yönteminde mümkün olduğunca atık kömürlerin kalmaması, yüksek ilerleme hızı ve ayakların havalandırma sisteminin paralel olması kendiliğinden yanmayı azaltır. Geri dönüşlü ve göçertmeli uzunayak madencilik yönteminde göçük bölgesi, küçük taneli atık kömürlerin ve hava kaçağının bulunmasından dolayı kendiliğinden yanma için tehlikeli bölgedir.

Yeraltı kömür madenlerinde yangınların tahmin edilmesi için izlenmesi gereken değişkenler: hava hızı, ortam sıcaklığı, karbon monoksit, karbon dioksit, oksijen, metan, hidrojen, azot ve hidrokarbon konsantrasyonları, kömür kalitesi, madencilik yöntemi ve jeolojik özelliklerdir. Bundan dolayı, bu çalışmada kömürün kendiliğinden yanmasını tahmin etmek için CO, O₂, N₂ ve sıcaklık değişkenleri kullanılmıştır.

2.1.3. Yeraltı madenlerinde kendiliğinden yanma için alınacak önlemler

Kendiliğinden yanmayı kontrol etmek için ilk adımda yapılan işlem, kritik yerlerin belirlenmesidir. Kritik yerleri belirledikten sonra, aşağıdaki 7 faktörün bilinmesi ve uygulanması gerekir (Grubb vd., 2015):

- 1- Kömürün kendiliğinden yanmasının davranışı ile ilgili bilgi sahibi olmak,
- 2- Sürekli olarak ocağın durumunu tespit etmek ve izlemek,
- 3- Hava basıncının farklarını dengelemek,
- 4- Baraj yapmak,
- 5- İnert gaz enjeksiyonu yapmak,
- 6- Söndürme planı oluşturmak,
- 7- Çalışanlara konu ile ilgili eğitim vermek.

2.1.4. Açık Yangınlar

Genelde, açık yangınlar harici kaynaklar sebebiyle gelişen yangınlardır. Bu yangınlar aşağıdaki faktörlerden kaynaklanabilir:

- 1- Elektrik kablolarının kıvılcımıyla,
- 2- Elektrik kablolarının tavan göçme nedeniyle kesilmesi,
- 3- Kaynak,
- 4- Sürtünme,
- 5- Metan ve toz patlaması,
- 6- Kendiliğinden yanma,
- 7- Patlatma.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yeraltı kömür madenlerinde, kendiliğinden yanmanın erken aşamalarda tespiti ve tahmini için farklı yöntemler kullanılmakta olup, bunlar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kendiliğinden tahmininde kullanılan yöntemler.

Kullanılan yöntemler	Kaynaklar
Bulanık mantık yöntemi	(Grychowski, 2014; Muduli vd., 2018)
Gaz konsantrasyonunun izlenmesi	(Li.L vd., 2018; Lu vd., 2004; Wang vd., 2003; Wang vd., 2018; Xiao vd., 2018; Xu vd., 2018; Zhang vd., 2015)
Elektromanyetik radyasyon tekniği	(Kong vd., 2018)
Sıcaklık ölçüm yöntemi	(Lei vd., 2018; Li.J vd., 2018; Mohalik vd., 2018)
Sayısal modelleme yöntemi	(Deng vd., 2018; Wu vd., 2018; Yang vd., 2018)
İstatistiksel analiz yöntemi	(Bustamante Rúa vd., 2018)
Gri model yöntemi	(Li.S vd., 2018)
Analitik yöntem	(Lin vd., 2017)
Uzaktan algılama yöntemi	(Syed vd., 2018)
Radon algılama yöntemi	(Zhou vd., 2018)

Kömür madenlerinde yangın tahmin etmede en çok kullanılan yöntemlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

3.1. Bulanık Mantık Yöntemi

Muduli vd. (2018), yeraltı kömür madenlerinin yangını izlemek için bulanık mantık yöntemini önermişlerdir. Bulanık mantık yönteminde sıcaklık, karbon monoksit, karbon dioksit ve oksijen girdi değişkenleri ve yangın yoğunluğu ise çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır. Gaz konsantrasyonları anlık olarak sensör şebekeleri ile alınmıştır.

Grychowski (2014), bulanık mantık yöntemini yeraltı kömür madenlerinin yangın tehlikesini izlemek amacıyla önermiştir. Bulanık mantık yönteminde karbon monoksit, karbon dioksit ve oksijen girdi değişkeni olarak kullanılmıştır. Ancak, bu çalışmada oksijen konsantrasyonu % 21,25 olarak kullanılmış olup, bu konsantrasyon değeri oksijenin normal atmosferik konsantrasyondan yüksektir. Daha önceden alınmış gaz konsantrasyonları bulanık mantık yöntemi ile değerlendirilmiştir.

3.2. Elektromanyetik Radyasyon Tekniği

Sıcaklık ve gaz konsantrasyonuna bağlı olarak elektromanyetik radyasyon tekniği, kömürün kendiliğinden yanmasını ve yangını belirlemek için kullanılmıştır. Elektromanyetik radyasyonunun sinyali sıcaklıktaki artış ile artmaktadır. Elektromanyetik radyasyonunun sinyali, sıcaklık ile 0,73'ten yüksek bir korelasyon katsayısı göstermektedir. Aynı zamanda elektromanyetik radyasyonunun sinyalinin CO gazının konsantrasyonu ile değişimi de kömürün kendiliğinden yanmasını gösterir. Kömür madenlerinde görülmeyen yangınları tespit etmek amacıyla elektromanyetik radyasyon tekniği kullanılabilir (Kong vd., 2018).

3.3. Gaz Konsantrasyonunun İzlenmesi

Zhang vd. (2015), karbon dioksit ve karbon monoksit emisyonunun 200 °C sıcaklığının altında belirlenmesi için farklı kömür türleri üzerinde araştırma yapılmışlardır. CO ve CO₂ emisyonu kömürün türüne ve maruz kalma süresine bağlı olarak tespit edilmiştir. CO ve CO₂ üretimi sadece yüzeysel ayrışma sırasında değil, kömürün bünyesinde bulunan oksijen içeren grup ayrışması sırasında da üretilir. CO₂ emisyonunun aktivasyon enerjisi CO emisyonunun aktivasyon enerjisinden yüksektir.

Bitümlü kömürlerde, karbon dioksit ve karbon monoksit emisyonunun 60 °C ile 90 °C sıcaklık arasında belirlenmesi için, kömürün farklı tane boyutlarında ve oksijen konsantrasyonlarında araştırma yapılmıştır. CO ve CO₂ emisyonu deneyin başlangıcında yüksek olup 10 saatten sonra bir düşüş görülmüştür. Ayrıca, CO ve CO₂ emisyonunun kömürün tane boyutundan ve oksijen konsantrasyonundan bağımsız olduğu, zamana ve sıcaklığa bağlı olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal adsorpsiyon ayrışmasında CO'den

ziyade CO₂ elde edildiği sonucuna varılmıştır. Buna göre, kömürün oksidasyonunu belirlemek için, CO₂/CO oranının kullanabileceği önerilmiştir (Wang vd., 2003).

Gaz konsantrasyonun izlemesine bağlı olarak kömürün oksidasyonunu belirlemek için diğer birçok araştırmacılar tarafından da farklı çalışmalar yapılmıştır (Li.L vd., 2018; Lu vd., 2004; Wang vd., 2018; Xiao vd., 2018; Xu vd., 2018).

3.4. Gaz Oranları

Farklı gaz oranları kömürün kendiliğinden yanmasını veya yangını belirlemek için kullanılmıştır. Ancak, gaz oranları bazı avantaj, dezavantaj ve kullanım sınırlarına sahiptir. Yeraltı kömür madenlerinde, kömürün kendiliğinden yanmasını veya yangını belirlemek için tek bir oran kullanımından ziyade birkaç farklı oran kullanımı daha yararlıdır (Singh vd., 2007). Gaz oranlarına bağlı olarak kömürün kendiliğinden yanmasını veya yangını belirlemek için diğer birçok araştırmacılar tarafından da çalışmalar yapılmıştır (Panigrahi ve Bhattacharjee, 2004; Ray vd., 2004; şensöğüt, 2011).

3.5. Yangın Oranları

Kömürün kendiliğinden yanmasını tahmin edebilmek için, gaz izleme yöntemine dayalı farklı araştırmacılar tarafından bazı önemli gaz oranları önerilmiştir. Kömürün kendiliğinden yanması ve yangın durumunun erken aşamalarda tahmin edilmesi için yaygın olarak kullanılan yangın oranları da izelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kömür kendiliğinden yanmasını tahmin etmek için kullanılan yangın oranları.

Yangın oranları	Kaynaklar
Graham Oranı (GR)	(Ray vd., 2004; Şensöğüt, 2011)
Young Oranı (YR)	(Panigrahi ve Bhattacharjee, 2004; Ray vd. 2004; Şensöğüt, 2011)
CO/CO ₂ Oranı	(Panigrahi ve Bhattacharjee, 2004; Ray vd., 2004)
Jones ve Trickett Oranı (JTR)	(Jones ve Trickett, 1955; Ray vd., 2004; Şensöğüt, 2011)
N ₂ /(CO+CO ₂) Oranı	(Şensöğüt, 2011)
Hidrokarbon Oranı (RI)	(Justin ve Kim, 1988)
Kuru Kül içermeyen (dry ash-free) (DAF) Oksijen Oranı	(Gouws, 1993)
Wilett Oranı	(Ray vd., 2004; Willett, 1951)
C/H Oranı	(Ghosh ve Banerjee, 1967; Ghosh vd., 1980)
Litton Oranı	(Litton, 1986; Timko ve Derick, 1995)
H/CH ₄ Oranı	(Mitchell, 1990)
Üretilen Karbon Monoksit	(Mackenzie-Wood ve Strang, 1990; Timko ve Derick, 2006)
CO veya CO ₂ /Metan Oranı	(Mackenzie-Wood ve Strang, 1990)
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ ve C ₃ H ₈ /C ₂ H ₆ Oranları	(Su vd., 2017)

3.5.1. Graham oranı (GR)

Yeraltı kömür madenlerinde, kömürün kendiliğinden yanması nedeniyle ortaya çıkan yangınları erken aşamada ve gelişmiş aşamada tespit etmek için Graham oranı yaygın olarak kullanılmaktadır (Ray vd., 2004; Şensöğüt, 2011). Graham oranı, Graham indeksi veya karbon monoksit indeksi olarak da tanımlanmakta olup, karbon monoksit/oksijen yetersizlik oranı olarak belirtilmektedir. Gaz numuneleri yeraltı kömür madenlerinden yanmaya yatkın bölgelerden alınır. Kömürün kendiliğinden yanması sırasında yayılan karbon monoksit oksijen tüketimine sebep olur. Graham oranı bazen yangının başlangıç aşamasında 30'a ve açık yangınlarda 90'a kadar ulaşmaktadır (Ramlu,

2007). Graham oranı ile yangın yoğunluğunun derecelenmesi Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Graham oranı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$GR = 100 \times \frac{CO}{(0,265 \times N_2 - O_2)} \quad (3.1)$$

Burada:

N_2 : Azot gazının konsantrasyonu, %

O_2 : Oksijen gazının konsantrasyonu, %

CO : Karbon monoksit gazının konsantrasyonu, %

0,265: Sabit katsayı.

Çizelge 3.3. Graham oranı ile yangın yoğunluğunun derecelendirilmesi.

Graham oranı	Açıklamalar
$\leq 0,4$	Normal durum
0,5	Genel bir kontrol gerekir.
$>0,5 < 1$	Isınma kesin
$>1 < 2$	Gelişmiş aşama ısınma
>3	Aktif yangın
≥ 7	Açık yangını gösterir.

3.5.2. Young oranı (YR)

Young oranı, karbon dioksit üretiminin oksijenin tüketimine oranı olarak kabul edilmiş olup, karbon dioksit/oksijen yetersizlik oranı olarak da belirtilmektedir (Panigrahi ve Bhattacharjee, 2004; Ray vd., 2004; Şensöğüt, 2011). Young oranının değerleri Çizelge 3.4'te sınıflandırılmıştır. Young oranı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$YR = 100 \times \frac{CO_2}{(0,265 \times N_2 - O_2)} \quad (3.2)$$

Burada:

CO_2 : Karbon dioksit gazının konsantrasyonu, %

Çizelge 3.4. Young oranının sınıflandırılması.

Young oranı	Açıklamalar
<25	Normal durum
25-50	Yüzeysel ısınma
>50	Yüksek yoğunluklu ısınma

3.5.3. CO/CO₂ oranı

Bu oran karbon oksitlerinin oranı olarak da tanımlanmaktadır. Havalandırma havası, metan ve enjeksiyon edilmiş azot tarafından etkilenmeme özelliğine sahip olup, kapatılmış ve havalandırılmış alanlarda kullanılabilir (Panigrahi ve Bhattacharjee, 2004; Ray vd., 2004). Karbon oksitler oranına göre yapılan sınıflanma Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Karbon oksitler oranına göre yangın durumunun sınıflanması.

Karbon oksitler oranı	Açıklamalar
<2	Normal durum
2-13	Yüzeysel ısınma
>13	Açık yangın

3.5.4. Jones ve Trickett oranı (JTR)

Jones ve Trickertt oranı, herhangi bir patlatma ve yangın sırasında hangi akaryakıtın dahil olmasını gösterir (Jones ve Trickett, 1955; Ray vd., 2004; Şensöğüt, 2011). Bu oran, patlamalarda metan veya kömür tozunun etkin olup olmadığını belirlemek için Jones ve Trickett tarafından geliştirmiştir. Jones ve Trickett oranının değerlerinin sınıflanması Çizelge 3.6'da belirtilmektedir. Jones ve Trickertt oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$JTR = \frac{[CO_2 + (0,75 \times CO) - (0,25 \times H_2)]}{(0,265 \times N_2 - O_2)} \quad (3.3)$$

Burada:

H_2 : Hidrojen gazının konsantrasyonu, %

0,25 ve 0,75: Sırasıyla hidrojen ve karbon monoksit için sabit katsayılar.

Çizelge 3.6. Jones ve Trickett oranının sınıflandırılması.

Jones ve Trickett oranı	Açıklamalar
<0,4	Yangın olmadığını gösterir.
0,4-0,5	Yangın veya patlatmanın metan kaynaklı olduğunu gösterir.
0,5-1	Yangında petrol, kömür veya bantın etkin olduğunu gösterir.
0,9-1,6	Ağaç yanmasını gösterir.
>1,6	Numune alınmasında veya maden havasının analizinde bir problem olduğunu gösterir.

3.5.5. $N_2/(CO+CO_2)$ oranı

Bu oran, baraj nedeniyle kapatılmış alanlarda yangının sönme aşamasını belirlemek için kullanılmaktadır. Yangın tam olarak söndürüldüğünde bu oranın değeri sabit eğilimi gösterir (Şensöğüt, 2011).

3.5.6. Hidrokarbon oranı (RI)

Hidrokarbon oranı, esas olarak sıcaklık artışı ile kömürden hidrokarbon desorpsiyonuna dayalı olarak çalışmaktadır. Ortam sıcaklığında kömürden metan üretimi oluşurken, başka hidrokarbonlar sıcaklık artışı ile yayılmaktadır (Justin ve Kim, 1988). Bu oran bitümlü kömürler için sıcaklığa bağlıdır ve RI değerinin sınıflanması Çizelge 3.7'de verilmiştir. Aşağıdaki eşitlik ile RI oranı hesaplanır.

$$RI = \frac{1,01 \times THC - CH_4}{THC + c} \times 1000 \quad (3.4)$$

Burada:

CH_4 : Metan konsantrasyonu, ppm

THC : Toplam hidrokarbon konsantrasyonu, ppm

C : Sabit bir değer (0,01)

Çizelge 3.7. Bitümlü kömür için RI değerinin sınıflandırılması.

RI oranı	Açıklamalar
0	Numunelerde hidrokarbonların bulunmaması
0-5	Normal durumu gösterir.
50-100	Kömürün ısınma olasılığını gösterir.
>100	Isınmış kömürü gösterir.

3.5.7. Kuru kül içermeyen oksijen oranı ((dry ash-free) (DAF) Oxygen index)

Bu oran Gouws (1993) tarafından kömürün kendiliğinden ısınma eğilimini belirtmek için geliştirilmiştir. DAF oksijen oranı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$DAF \text{ oksijen oranı} = e^{(0,907 + 0,126 \times DAF \text{ oksijen})} \quad (3.5)$$

3.5.8. Willett oranı

Willett oranı, maden havasında bulunan karbon monoksitin blackdamp ve yanabilir gazların toplamına bölünmesi ile elde edilir (Ray vd., 2004; Willett, 1951). Kapatılmış alanlarda yangının sönmesi belirlemek için ve ayrıca Graham oranının çalışmadığı sahalarda kullanılabilir. Willett Oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$Willet \text{ oranı} = \frac{100 \times CO}{Blackdamp + yanabilir \text{ gazları}} \quad (3.6)$$

3.5.9. C/H oranı

Bu oran, barajlanmış alanlarının durumunun belirlenmesi için Ghosh ve Banerjee tarafından geliştirilmiştir. Yangın yoğunluğunun incelenmesi ve genişliğinin belirlenmesi için oksijen tüketim oranı ile karbon oranı ve mevcut hidrojen oranı kullanılır (Ghosh ve Banerjee, 1967; Ghosh vd., 1980). Hidrojen düşük sıcaklıkta tamamen yanarken yanmayan karbonlar siyah toz olarak depozito olur ve C/H oranı değerinin azalmasına neden olur. Kapatılmış alanlarda, C/H oranına ve oksijen tüketimine göre yangının durumunun belirlenmesi Çizelge 3.8'de gösterilmiştir (Banerjee, 1985). C/H değerinin sınıflanması Çizelge 3.9'da verilmiştir. Hesaplama, kömürü $C_xH_yO_z$ yakıt tipi olarak kabul edilerek aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$C/H = \frac{3(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4)}{(0,265N_2 - O - CO_2 - 0,5CO + 0,5H_2 + CH_4 + C_2H_4)} \quad (3.7)$$

Çizelge 3.8. Kapatılmış alanlar için C/H oranının değerlerinin sınıflandırılması.

Yangın alanlara göre C/H oranının değerleri	Oksijen tüketim oranı	Yangın durumu
20'den fazla	Hızlı	Ağaç tahkimatların yanması ile desteklenmiş açık ve yoğun yanma
	Yavaş	Ağaç tahkimatların yanması ile desteklenmiş ancak yerleştirilmiş açık yanma
Yaklaşık 20	Hızlı	Açık ve yoğun olarak kömürün yanması
	Yavaş	Açık fakat yerleştirilmiş kömürün yanması
10'un altında	Hızlı	Yüzeysel yanma fakat yoğun yanma olabilir
	Yavaş	Yerleştirilmiş ve yüzeysel yanma

Çizelge 3.9. C/H oranının değerlerinin sınıflandırılması.

C/H oranı	Açıklamalar
3-4	Yüzeysel ısınmayı gösterir.
4-20	Aktif yangını gösterir.
>20	Açık yangını gösterir.

3.5.10. Litton oranı

Litton oranının incelemesi için 4 gazın (oksijen, karbon monoksit, metan ve etan) izlenmesi ve ölçülmesi gerekmektedir (Litton, 1986; Timko ve Derick, 1995). Atmosfer 3 bölüme ayrılmaktadır. Bunlar atmosferik hava, aktif gazlar ve atık gazlardır. Atık gazlar, kapatılmış alanlardan alınan numunelerden havayı, metanı ve etanı çıkardıktan sonra atık gazların yüzdesi olarak tanımlanmıştır ve Eşitlik 3.12 ile hesaplanır. Atık gazlar, yangın sonucunda üretilmiş gazlar (CO_2 , CO , H_2 ve hidrokarbonlar), azot ve kimyasal süreç ile üretilmiş gazları içermektedir. Bu oran kapatılmış alanların yeniden açılması sırasında ve oksijeni verdikten sonra yangın potansiyelini azaltmak ve kaldırmak amacı ile Litton tarafından geliştirilmiştir. Çizelge 3.10'da Litton oranının değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.10. Litton oranının değerlerinin sınıflandırılması.

Litton oranı	Açıklamalar
<1	En az otuz gün içinde eğer 1'den düşük değere sahipse dengeli bir durumu gösterir.
=1	Ortam sıcaklığına ulaşmaktadır.
>1	Sıcaklık ortam sıcaklığından yüksek olup, açık yangın veya ortam sıcaklığının üstünde oksidasyon gerçekleşmektedir.

Litton oranı aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$R_g = 100 - a(\text{O}_2) - \text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_6 \quad (3.8)$$

Burada:

$$Hava = a(\text{O}_2)$$

$$a = \frac{100}{20,946} = 4,774$$

Atık gazda karbon monoksit konsantrasyonu, ppm olarak aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$(CO)_{R_g} = \left(\frac{(CO)_s}{R_g} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

Burada:

$(CO)_s$, alınan numunelerde karbon monoksit konsantrasyonu, ppm

Atık gazda karbon monoksit konsantrasyonu kullanarak yeni bir parametre yani R- indeksi (R_I) elde edilmiştir.

$$R_I = \left(\frac{(CO)_s}{R_g^2} \right) \times 100 \quad (3.10)$$

R_I sabit bir değere ulaştığında, düşük sıcaklıkta yangın sürmektedir ya da ortam sıcaklığında düşük bir karbon monoksit üretilmektedir. Karbon monoksit üretilmesi sıcaklık artışı ile artar. Bu nedenle yangın olan yerlerde, R_I ortalama değeri karbon monoksitin üretilmesinden dolayı ortam sıcaklığından yüksek olabilir.

Eğer karbon monoksit sadece ortam sıcaklık süreci ile üretilmişse, bir gaz numunesi için, $(R_I)_{eq}$ R-indeksin maksimum denge değerini gösterir. Ölçülmüş karbon monoksit konsantrasyonu ve hesaplanmış R_g değeri ile maksimum denge değeri aşağıda verilen eşitlik ile belirlenebilir.

$$(R_I)_{eq} = 300 \times \left(\frac{R_g}{O_2} \right)^{-0.5} \quad (3.11)$$

Yukarıda belirttiği gibi R_g değeri ölçülmüş gazlardan (O_2 , CH_4 , C_2H_6) elde edilebilir. Ölçülmüş karbon monoksit konsantrasyonu (ppm) ve elde edilmiş R_g değeri ile gerçek R-indeksin değeri $((R_I)_{act})$ belirlenebilir. Kapatılmış alanların durumu belirlemek için aşağıda verilen eşitlik kullanılır.

$$Oran = \left(\frac{(R_I)_{act}}{(R_I)_{eq}} \right) = \frac{\left(\frac{(CO)_s}{R_g^2} \right) \times 100}{300 \times \left(\frac{R_g}{O_2} \right)^{-1/2}} = \frac{(CO)_s}{3 \times O_2^{1/2} \times R_g^{3/2}} \quad (3.12)$$

3.5.11. H/CH₄ oranı

Bu oran Mitchell tarafından geliştirmiş olup, yangın indeksi olarak kullanılmaktadır. Yangın sırasında karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen, etilen, propilen ve asetilen normal olarak yayılmaktadır. Sıcaklık, hidrojenin yayılma sıcaklığını aştığında yangın meydana gelir. Bundan dolayı hidrojenden çok başka gazların izlenmesi ile aktif yangınlar belirlenebilir (Mitchell, 1990).

3.5.12. Üretilen karbon monoksit

Yeraltı kömür madenlerinde yangın alanları inertleştirmek için azot kullanılır. Bundan dolayı bazı oranların değerlerinde azalma gözlenir. Üretilen karbon monoksit verimli olmayan yanma esnasında açığa çıkar. Yeraltı kömür madenlerinde yangın sırasında karbon monoksit konsantrasyonunun % 15'in üzerine ulaşabilir (Timko ve Derick, 2006). Mackenzie-Wood ve Strang'a (1990) göre 0,01 m³/dk karbon monoksit üretilmesi yangın alanının kontrol edilmesini gerektirir, 0,02 m³/dk karbon monoksit üretimi önemli tehlikeyi gösterir.

3.5.13. CO veya CO₂/Metan oranı

Mackenzie-Wood ve Strang'ın (1990) elde ettiği sonuçlara göre, inertleştirme sırasında, eğer belirli alanlarda metan yayılması sabit kalırsa, bu oran ile etkin bir şekilde oksidasyonun süreci izlenebilir.

3.5.14. C₂H₄/C₂H₆ ve C₃H₈/C₂H₆ oranları

Su vd. (2017) C₂H₄/C₂H₆ ve C₃H₈/C₂H₆ oranları ile kömürün oksidasyonunun riskini düşük sıcaklıkta (≤ 190 °C) belirlemek için farklı sıcaklık ve oksijen konsantrasyonunda deneyler yapmışlardır. C₂H₄/C₂H₆ oranında 80 °C ile 130 °C sıcaklık arasında istikrarlı olmayan bir değişiklik görülmekte olup, 130 °C sıcaklık üzerinde istikrarlı bir artış görülmüştür. İstikrarlı olmayan bölgelerde C₂H₄ konsantrasyonu C₂H₆ konsantrasyonundan düşüktür. Sıcaklık 170 °C'ye ulaştığında C₂H₄ konsantrasyonu C₂H₆ konsantrasyonundan yüksek olup, oksijen konsantrasyonu artışı ile bu sıcaklık düşer. C₂H₄/C₂H₆ oranı kullanıldığında oksijen konsantrasyonunun etkisi göz önünde bulunması önemlidir.

C₃H₈/C₂H₆ oranı, C₂H₄/C₂H₆ oranı gibi istikrarlı olmayan bölgeye (110 °C ile 130 °C) sahiptir. 130 °C sıcaklık üzerinde C₃H₈/C₂H₆ oranının da azalma görülmüştür. Ayrıca, 130 °C sıcaklık üzerinde oksijen konsantrasyonunun etkisi görülmemiştir. Bu nedenle düşük sıcaklıkta (≤ 190 °C) C₃H₈/C₂H₆ oranı C₂H₄/C₂H₆ oranından kömürün oksidasyon riskini değerlendirmek için daha etkindir. Çizelge 3.11'de yangın oranlarının avantajları ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 3.11. Yangın oranlarının avantajları ve dezavantajları.

Yangın oranları	Avantajlar	Dezavantajlar
Graham oranı	<p>Havalandırılmış ve kapatılmış alanlarda kullanılması.</p> <p>Erken ve ileri yangın aşamalarında kullanılması.</p> <p>Karbon monoksit sensörünün kolay bulunması.</p> <p>Oksitlenmiş maddelerinin miktarından bağımsız olması.</p> <p>Havalandırma havasından etkilenmemesi.</p>	<p>Azot ile inertlenmiş alanlarda iyi sonuç vermemesi.</p> <p>Maden makinelerinden yayılan karbon monoksitten etkilenmesi.</p> <p>Bazen yangın tamamen sönmeden karbon monoksitin yok olması.</p> <p>% 0,3'ten düşük oksijen yetersizliğinde yanlış sonuca sebep olması.</p>
Jones ve Trickett oranı	<p>Gaz patlamasından kömür tozunun patlamasını ayırması.</p> <p>Yangının sönmesini veya sıcaklığın düşük olduğunu gösterir.</p> <p>Yangına hangi yakıtın dâhil olduğunu gösterir.</p> <p>Havalandırma havasından bağımsızdır.</p>	<p>Oksijen yetersizliğinden bağımsız olmaması.</p> <p>Karbon dioksit ve karbon monoksit yangın ve oksidasyon yerine başka bir kaynaktan yayınlanması.</p>
Young oranı	<p>Karbon monoksit azaldıkça kullanılır.</p> <p>Oksitlenmiş ve yanmış organik maddelerinin miktarına bağlıdır.</p> <p>İleri yangın aşamalarda kullanılması.</p> <p>Havalandırma havasından etkilenmemesi.</p>	<p>Karbon dioksit sensörünün karbon monoksit sensörüne göre kolay bulunmaması.</p> <p>Karbon dioksit ile inertlenmiş alanlarda iyi sonuç vermemesi.</p> <p>Karbon dioksitin suda çözülmesi.</p> <p>Maden makinalarından yayılmış karbon dioksitten etkilenmesi.</p> <p>Azot ile inertlenmiş alanlarda iyi sonuç vermemesi.</p>

Çizelge 3.11. Yangın oranlarının avantajları ve dezavantajları (devam).

Yangın oranları	Avantajlar	Dezavantajlar
CO/CO ₂ oranı	<p>Havalandırılmış ve kapatılmış alanlarda kullanılması.</p> <p>Oksijen yetersizliğinden bağımsızdır.</p> <p>Oksidasyonun tamamlandığını gösterir.</p> <p>Metandan, havadan ve azottan etkilenmemesi.</p> <p>Aktif yangınlarda kullanılması.</p>	<p>Karbon dioksit ile inertlenmiş alanlarda iyi sonuç vermemesi.</p> <p>Karbon dioksitin suda çözülmesi.</p> <p>Karbon dioksit ve karbon monoksit yangın ve oksidasyon yerine başka bir kaynaktan yayınlanması.</p>
N ₂ /(CO+CO ₂) oranı	<p>Havalandırma havasından bağımsızdır.</p> <p>Oksijen yetersizliğinden bağımsızdır.</p>	<p>Azot ile inertlenmiş alanlarda iyi sonuç vermemesi.</p> <p>Karbon dioksit ve karbon monoksit yangın ve oksidasyon yerine başka bir kaynaktan yayınlanması.</p> <p>Sıcaklıktan bağımsız olmaması.</p>
C/H oranı	<p>Yangın yoğunluğu ve boyutu gösterir.</p> <p>Graham oranından daha geniş alanı kapsar.</p>	<p>Oksijen yetersizliğinden bağımsız olmamasıdır.</p> <p>Grizudan bağımsız olmamasıdır.</p> <p>Karbon dioksit ve karbon monoksit yangın ve oksidasyon yerine başka bir kaynaktan yayınlanması.</p> <p>Gazların suda çözülmesidir.</p>
Wilett oranı	<p>Kapatılmış alanlarda kullanılması.</p> <p>Oksijen yetersizliğinden bağımsız olması.</p>	<p>Karbon dioksit ve azot ile inertlenmiş alanlarda iyi sonuç vermemesi.</p> <p>Farklı gazları içermesi.</p>

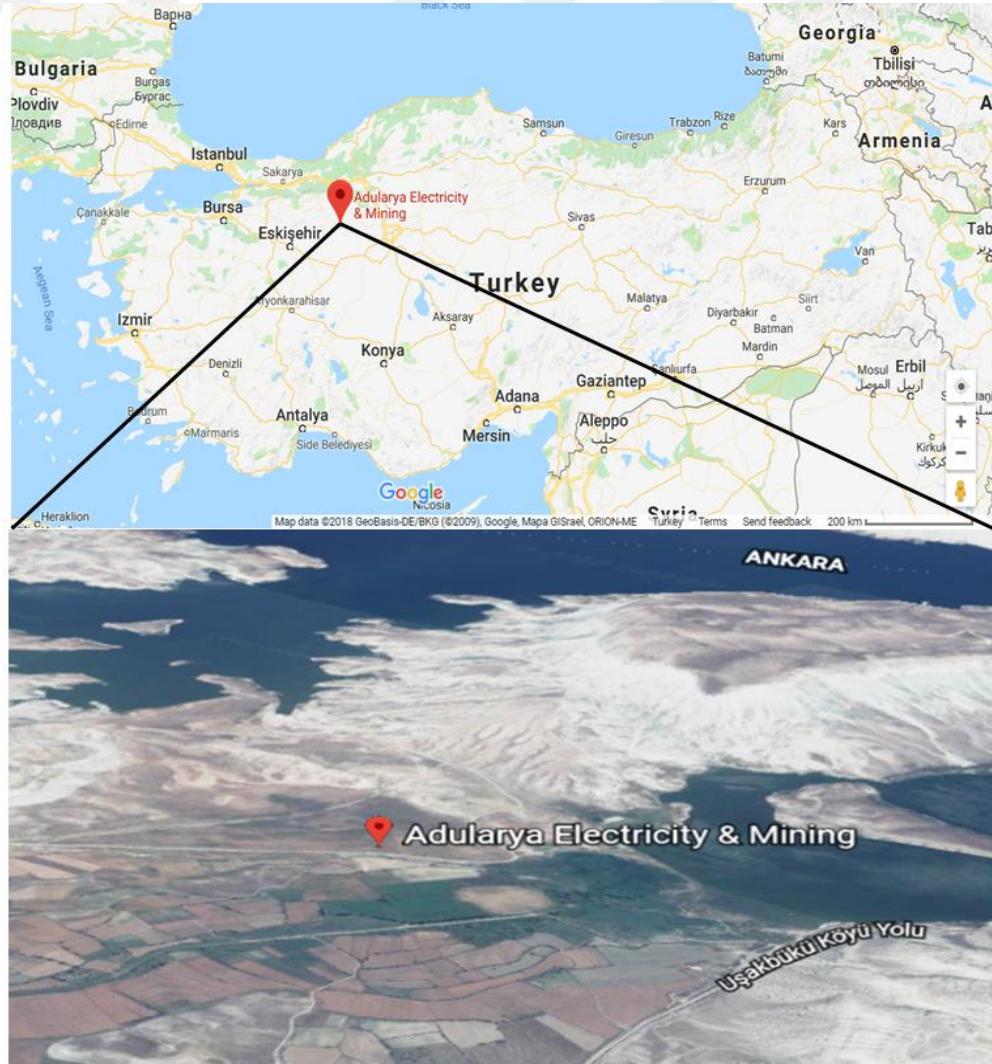
Çizelge 3.11. Yangın oranlarının avantajları ve dezavantajları (devam).

Yangın oranları	Avantajlar	Dezavantajlar
Hidrokarbon oranı	Kapatılmış alanlarda kullanılması İleri aşama yangınlarda ve yüksek sıcaklıkta kullanılması Oksijen yetersizliğinden bağımsızdır. Karbon monoksitten ve karbon dioksitten bağımsızdır.	Erken aşama yangınlarda iyi sonuç vermemesi Metan 20 ppm'den yüksek olmalı Gaz ölçüm aletlerin kolay bulunmaması

Yukarıda da belirtildiği gibi tüm oranlar bazı avantaj, dezavantaj ve kullanım sınırlarına sahiptir. Yeraltı kömür madenlerindeki alanlar, gazların numune alınmasına göre iki grupta ayrılır. Bunlar; havalandırılmış alanlar ve kapatılmış alanlardır. Baraj arkasından alınan gaz numunelerin değerlendirilmesi, havalandırılmış alanlardan alınan gaz numunelerin değerlendirmesinden farklılık gösterdiği için yangın oranlarının da, havalandırılmış alanlar için yangın oranları ve barajlanmış alanlar için yangın oranları olacak şekilde iki gruba ayrılmaları daha doğrudur (Şensöğüt, 2011). Dolayısıyla, Graham oranı, CO/CO₂ oranı, Jones ve Trickett oranı, vb., havalandırılmış alanları için kullanılmaktadır. Hidrokarbon oranı, kuru kül içermeyen oksijen oranı, N₂/(CO+CO₂) oranı, CO/CO₂ oranı, vb., barajlanmış alanları için kullanılmaktadır. Türkiye'deki Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğine göre yeraltı işyerlerinde karbon dioksit gazının ölçülmesi zorunlu değildir. Bu çalışmada, yeraltı kömür madenlerinde kendiliğinden yanma nedeniyle ortaya çıkan yangın durumunu erken ve gelişmiş aşamalarda belirlemek, CO sensörlerin CO₂ sensörlerden daha kolay bulunması, havalandırılmış alanlarında kullanılması, karbon dioksiti içermemesi gibi avantajlara sahip olan Graham oranı kullanılmış ve oluşturulmuş olan bulanık mantık modeli ile karşılaştırılmıştır.

4. ADULARYA MADENCİLİK A.Ş. VE ENERJİ ELEKTRİK ÜRETİMİNİN TANITIMI

Adularya yeraltı kömür madeni ve elektrik enerjisi santrali Eskişehir İli sınırları içerisinde Mihallıççık İlçesinde Koyunağlı Köyü'nde bulunmaktadır. Koyunağlı Köyü Eskişehir'e 128 km, Ankara'ya 145 km Beypazarı'na 40 km ve Mihallıççık'a 32 km uzaklıktadır. İşletme Koyunağlı Köyü'nün 1,5 km batısında olup, Eskişehir Ankara sınırında bulunan Uşakbükü Köprüsü sayesinde Mihallıççık'ı Beypazarı-Ankaraya bağlamaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Adularya yeraltı kömür madeni ve elektrik enerjisi santralinin yerleşkesi.

Adularya madeni ve elektrik enerji üretiminin gelişme tarihçesi sırasıyla;

- 1955 ile 2006 yılları arasında linyit sahasının belirlenmesi,
- 2007, Koyunağılı maden sahasında kömür üretmek ve termik santrali kurmak üzere yetkilendirilme ve rödövens sözleşmesinin imzalanması,
- 2008, Elektrik üretimi lisansının alınması,
- 2008, ÇED raporunun onaylanması,
- 2010, TEİAŞ bağlantı ve kullanma anlaşmasının imzalanmasıdır.

Türkiye'nin artan elektrik tüketiminin ihtiyacının karşılanması, kaynaklarının kullanıma sokulması ile enerjide dışa bağımlılığının azaltılması amacıyla Adularya termik santrali, Eskişehir ili Mihallıççık ilçesi sınırları içerisinde kurulmuştur (Şekil 4.2). Maden işletmelerinde, hâlihazırda 1 100 kişi, proje tamamlandığında ise 1 500 kişiden oluşacak ekibi ile madencilik faaliyetleri gerçekleştirilmektedir.



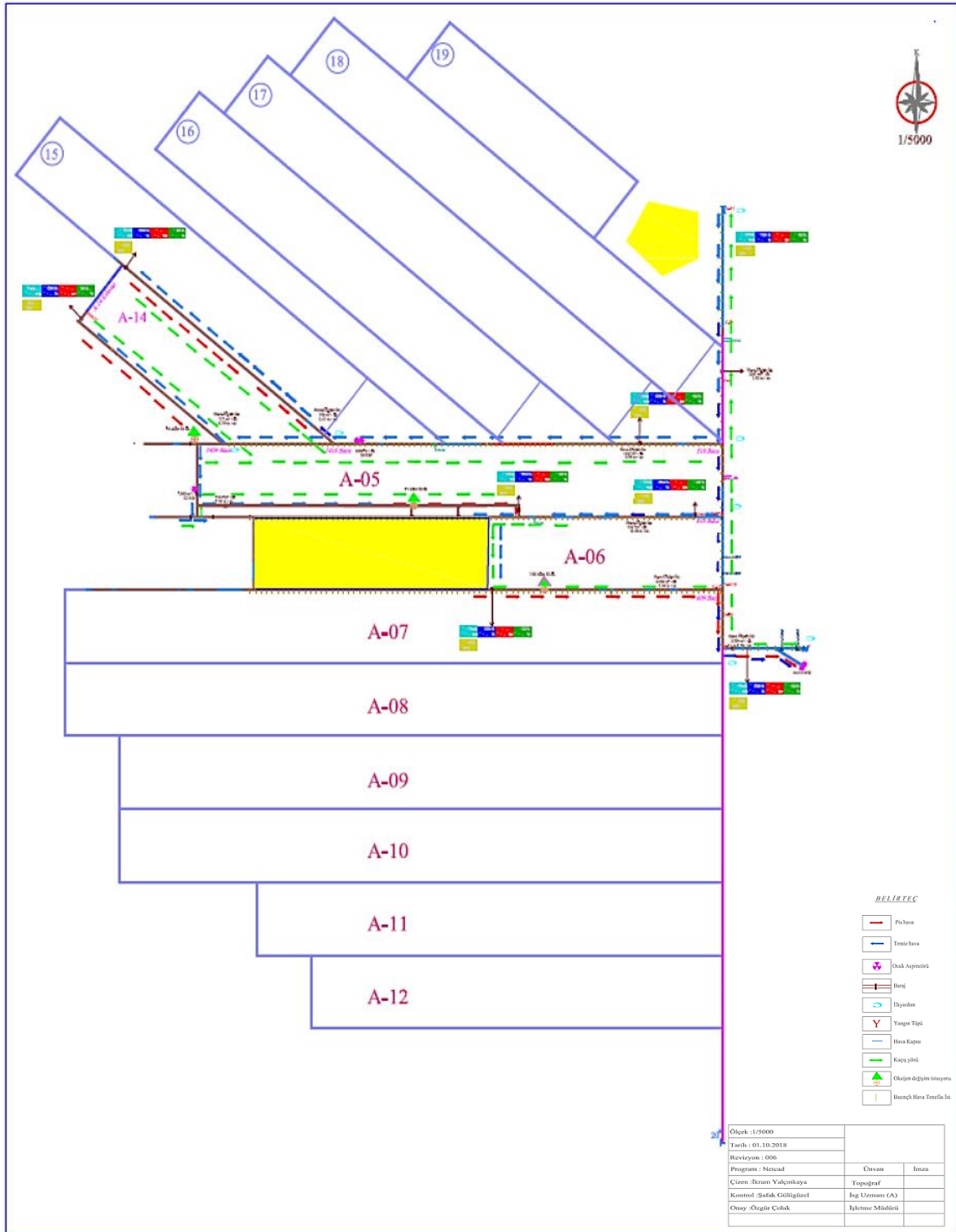
Şekil 4.2. Adularya termik santrali (Gülügüzel'den, 2018).

Adularya Madencilik A.Ş. ve elektrik enerjisinin üretimi 2007 yılında Naksan Holding tarafından kurulup, kömür üretilmesi ve kömürden elektrik üretimi amacıyla sahanın detaylı olarak sondaj çalışmaları yapılmıştır. Bu nedenle, bugüne kadar 450 adet sondaj, 350 metre ortalama derinlik ile gerçekleştirilmiştir. Mihallıccık-Koyunağılı sahasında 33 424 308 ton üretilebilir rezerve ve 2 500 Kcal/kg ortalama ısı değerine sahip olan linyit kömür madeni 1955 ile 2006 yılları arasında yapılan arama çalışmaları sonucunda bulunmuştur.

Yapılan sondajlardan elde edilen verilere göre linyit sahası toplam 40 km²'lik bir alanı kapsayıp, Koyunağılı ve Beyköy sınırları içerisinde doğusunda Koyunağılı köyü, Kuzeyinde Kavak ve Güreş köyleri, Batıda ise İkizafer köyü, kuzeyde ise Sarıyar Barajı gölü yer almaktadır. Linyit sahası fazla eğimi olmayan düzlüklerden ve kenar zonlara doğru dağlık alanlardan oluşmaktadır. Termik santralin beslenmesi için tüm sahanın kömürü üretimine yönelik olarak planlanmıştır.

Madencilik sektöründe dünyada kullanılan son teknoloji, en modern ve gelişmiş yeraltı üretim yöntemi olan tam mekanize uzunayak tercih edilmiştir. Termik santrale beslenen kömürün taşınması ve yeraltında kömürün kazılması tamamen makineler ile gerçekleştirilmektedir. Kullanılan yöntem ve mekanize çalışmalar, yüksek iş emniyetini ve işçi başına düşen verimliliği de arttırmaktadır.

Adularya madenin A sektöründe 250 metre arınlı uzunayak tam mekanize yürüyen tahkimat sistemi ile üretim yapmakta olup, D sektöründe hazırlık çalışmaları, uzunayak tam mekanize yürüyen tahkimat sistemi ile üretim yapılacak şekilde, tamamlanmış hazır tam bir mekanize uzunayak panosu bulunmaktadır. Üretim için ekipmanların kurulması daha gerçekleştirilmemiştir. A sektörünün yeraltı hazırlık, havalandırma ve üretim planı Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Galerilerde hazırlıkların yapılması için 3 adet Dosco marka kollu galeri açma makinesi kullanılmaktadır (Şekil 4.4). Adularya enerji üretim santrali 2x145 MW iki üniteden oluşmaktadır. Kazan dolaşımli akışkan yatak teknolojisi olup, buna ek olarak yarı-kuru tip baca gazı arıtma sistemi mevcuttur.



Şekil 4.3. A sektörünün yeraltı hazırlık, havalandırma ve üretim genel planı.



Şekil 4.4. Dosco marka kollu galeri açma makinesi.

4.1. Koyunağlı Linyit Havzasının Genel Jeolojik Özellikleri

4.1.1. Genel jeoloji

İnceleme sahasında Paleozoyik ve Senozoyik yaşlı sedimanter ve metamorfik kaya birimleri görülmektedir (Gülügüzel, 2018).

4.1.1.1. Stratigrafi

Saha tümüyle Miosen, Pliosen ve Kuvaterner yaşlı formasyonlarla kaplıdır. Sondajlarda temeli oluşturan Paleozoik yaşlı birimler ve alt Miosen birimleri görülebilmektedir. Stratigrafik dizilimi aşağıda yaşlıdan gence doğru belirtilmiştir.

Paleozoik; temel Karmaşığı (Ptk), sahanın doğusunda metamorfik şistler (albit-epidot, grafit, mika, amfibol şistler ve kuvarsit) ve çoğunlukla serpantinleşmiş ultrabazik (gabro, dünit, serpantinit) kayalar ve güney güneybatısında serpantinit görülmektedir.

İncelenen alanın güneyinde ve doğusunda yayılım gösteren Paleozoik yaşı birimlerin genel görünüşü gri, mavi, siyahımsı ve yeşilimsidir. Temel karmaşığı olmakla birlikte üst seviyelerinde ofiyolitik kayalar belirlenmiştir. Rekrystalize kireçtaşları genel olarak blok şeklinde serpantinlerden oluşan birim içerisinde yer almaktadır. Temel karmaşığının taban seviyesi gözlenmemekte olup, üzerine Neojen birimleri transgressif olarak gelmektedir.

Miyosen yaşı kaya birimleri litolojik özelliklerine göre, Koyunağılı Neojen havzasında 7 ayrı formasyona ayrılmıştır. Yaş saptamasına göre, bu formasyonlar içinde uygun nitelikte fosil bulunmamıştır. Koyunağılı bölgesi Beypazarı kömür sahasına komşu olduğundan dolayı Beypazarı kömür sahasında yapılan palinolojik analiz sonuçları göz önünde bulundurularak Koyunağılı bölgesinde bulunan Neojen birimlerine Orta Miyosen yaşı uygun görülmüştür. Orta Miyosen yaşı formasyonlar özellikleri aşağıda ayrı ayrı anlatılmış ve stratigrafik kesitte belirtilmiştir (Şekil 4.5).

4.1.2. Yapısal jeoloji

Koyunağılı bölgesindeki faylar eğim atımlı normal fay ve doğrultu atımlı fay şeklinde bulunmaktadır. Her iki bileşeni de bazı faylarda görmek olanaklıdır. Kömürün oluşumu ile birlikte başlamış olan düşey atımlı faylar aktif özelliğini Üst Miyosen’de bitirmiştir. Genç olan doğrultu atımlı faylar aktivitesini Pliyosen döneminde de sürdürmüştür. Genelde doğrultu atımlı fayların bölgelerinde büyük çaplı heyelanlar gelişmiştir. Günümüzde aktivitesini sürdüren belirlenmiş fay yoktur. Linyit işletmesi ve yeraltı suyu açısından fayların özelliklerinin belirlenmesi önemlidir (Gülügüzel, 2018).

4.1.2.1. Kuzey-güney fayı (K-G)

K-G fayı Beyköy’ün güneybatısında Gökleme mevkiinde başlar Satıkakma mevkiinden geçer. İsimsiz tepe K-G fayı iki kola ayrılıp, doğuya Karakaş tepenin kuzeyine ve Sarıyar baraj gölüne kadar uzanır.

K-G fayı, eğim atımlı normal fay özelliğine sahiptir. K-G fayı, batı bloğu yükselen ve güneyde Killikboğazı dereye kadar olan kesimde doğu bloğu düşen bir konumdadır. Elde edilen sondajların sonucundan, kuzey kesiminde ise doğu bloğu yükselmiş batı bloğu ise düşmüş bir durum tespit edilmiştir. Satıkakma mevkiinde vadi içinde fayın yüzeydeki en iyi gözlemlendiği yerdir. Bu bölgede fayın yüzeyden derinlere doğru eğimi azalmakta ve listirik fay şeklindedir. Atımın 180 m’ye kadar ulaştığı sondajlar ile tespit edilmiştir. K-G fayının İsimsiz tepeden Karakaş tepeye doğru uzanan kesimi Karakaş tepe fayı olarak da adlandırılmıştır.

4.1.2.2. Karakaş tepe fayı (Ka-T)

Ka-T fayı normal fay olup yapılan sondaj sonuçlarına göre, uzanımı her iki tarafında tespit edilmiştir. Kuzey bloğu düşen fayın, atımı doğuda daha fazla batıda daha azdır. Güney-kuzey uzanımlı fay Batıaras mevkiindedir. Batı bloğu düşen fayın, tek bir fay olmayıp zon halinde olup, doğrultu atımlı bileşeni vardır. Yine de atımı 60 m’ye yakın bir normal fayı, Karakaş tepeden İğrek tepeye doğru uzanan Killikboğazı dereyi kontrol eden

ve dođu bloku dűřen normal fay mevcuttur. Atımları 80 m'ye yakın iki KB-GD uzanımlı fay, Beyköy'ün Güney ve kuzeyinde birbirine paralel şekilde mevcuttur.

4.1.2.3. Kırmızı tepe fayı (Kı-T)

Kı-T fayının atımı 100 m'ye yakın olup, D-B uzanımlıdır. Kı-T fayı eğim atımlı olup kuzey bloğu düşen bloktur. Kı-T fayı kırmızı tepenin güneydoğusunda Garipçi dere vadisinden, Minarekayası mevkiinden, Sığıryalağı mevki güneyinden, kuzeybatıya dönerek Karakaya mevkiine kadar uzanmaktadır.

4.1.2.4. Doğrultu atımlı faylar (D-A)

İki adet fay genel olarak GD-KB uzanımlı batı ocak sektöründe tespit edilmiştir. Genelde faylar doğrultu atımlı fakat bazen az da olsa düşey atım bileşeni vardır.

Birinci fay: KB-GD istikametinde sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay Delebellerin güneyinde mevcuttur. Birinci fay yaklaşık 4 km uzunluğa, 50 m genişliğe sahiptir. Fayın düzlemi, fayın İnçayı dereyi kestiği yerde net olarak görülmektedir.

İkinci fay: Satıkakma'nın güneyinden GD-KB uzanımlı kil madeni evlerinin güneyinden devam etmektedir. İkinci fay birinci faya paralel olup sağ yönlü doğrultu atımlı bir özelliğiye sahiptir. Proje alanının güneyinde GD-KB uzanımlı doğrultu atımlı faylar linyit sahasının dışından geçer. Tabaka doğrultu ve eğimleri: Sahada yüzeyleyen birimlerde gözlenen eğimler 5 ile 150 derece civarındadır. 30 dereceye ulaşan eğimler, yeraltında faylara bağlı olarak tespit edilmiştir.

4.1.3. Linyit jeolojisi

Alt-Orta Miosen yaşı Çoraklar formasyonu (M1) havzadaki linyit oluşumları temel kayaçlarını uyumsuz olarak örtmüştür. Linyit oluşumu, formasyonun iki ayrı düzeyinde gelişmiştir. Önceki çalışmalar ile tespit edilen üst düzeylerdeki linyit oluşumları "Üst Damar" olarak adlandırılmıştır. Sahada Adularya A.Ş. tarafından sürdürülen araştırmalar ve sondajlar "Üst Damar"ın yanal-düşey yayılımına katkı sağlanmıştır. Bu çalışmalar

yardımla “Üst Damar”dan 30 ile 50 m daha derinde yeni bir linyit oluşumu belirlenip, “Alt Damar” olarak adlandırılmıştır (Gülügüzel, 2018).

4.1.3.1. Üst damar

Üst damar sığ göl ortamında ve otokton olarak oluşmuştur. Damarın yanal ve düşey oluşumunda devamsızlıklara, göl ortama gelen malzeme farklılıkları ve sınırlarındaki değişim neden olmuştur. Önceki işletmelerde genelde tek damar olarak işletilmiş ama kendi içerisinde değişik sayı ve kalınlıklar gösteren 3 farklı damardan oluşmuştur.

Üst damarın ısı değeri genellikle 3000 Kcal/kg ve üzerindedir. Kalınlık değişimi az olup yanal devamlılık, parlak, sert ve kırılğan özelliklere sahiptir.

4.1.3.2. Orta damar

Orta damarın kalınlık değişimi fazla olup, ısı değeri üst damardan düşüktür. Yanal devamlılığı düzensizdir. Orta damarın kalınlığı düşüktür ve çoğu kez bir ara kesme ile kendi içinde iki parçalı bir damarı gösterir.

4.1.3.3. Alt damar

Alt damarın kalınlık değişiminin fazla olmadığı ve yanal devamlılığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Alt damar, orta damarı çoğunlukla 1 m'den fazla bir ara kesme ile izler. Alt damar, önceki sığ yapılmış (MTA-19, 20, 28) sondajların nedeniyle bazılarında, kesilememiştir.

Damarlar kahve-siyah koyu renklere sahiptir. Milimetreden 3 ile 4 santimetreye kadar kalınlıklara sahip silt, kil, pirit, kum bantları ve fosil içerir. Kırık ve çatlakları demir oksit boyamalıdır. Damarlar değişken kalınlıklara sahip olup, çoğunlukla silttaş, bitümlü şeyl, kiltaş, kireçtaş türü kaya birimlerden oluşmuştur. Damarların taban kayaçları katmanları belirsiz, az orta sağlam, kaba-orta taneli silttaş, kumtaş, marn, kil ve kireçtaşlarından oluşmaktadır.

4.1.4. Hidroloji

Sahada İç Anadolu iklimi hâkimdir. Bu nedenle, kışları soğuk ve yağışlıdır, yazları ise sıcak ve kuraktır. Sahada yağışlar daha çok yağmur şeklinde olmaktadır. Sarıyar baraj gölü çalışma sahasının yakınında bulunduğu ve saha kotunun az olmasından dolayı kış aylarındaki kar yağışı çok kısa süre için ince bir örtü şeklinde yerde kalır.

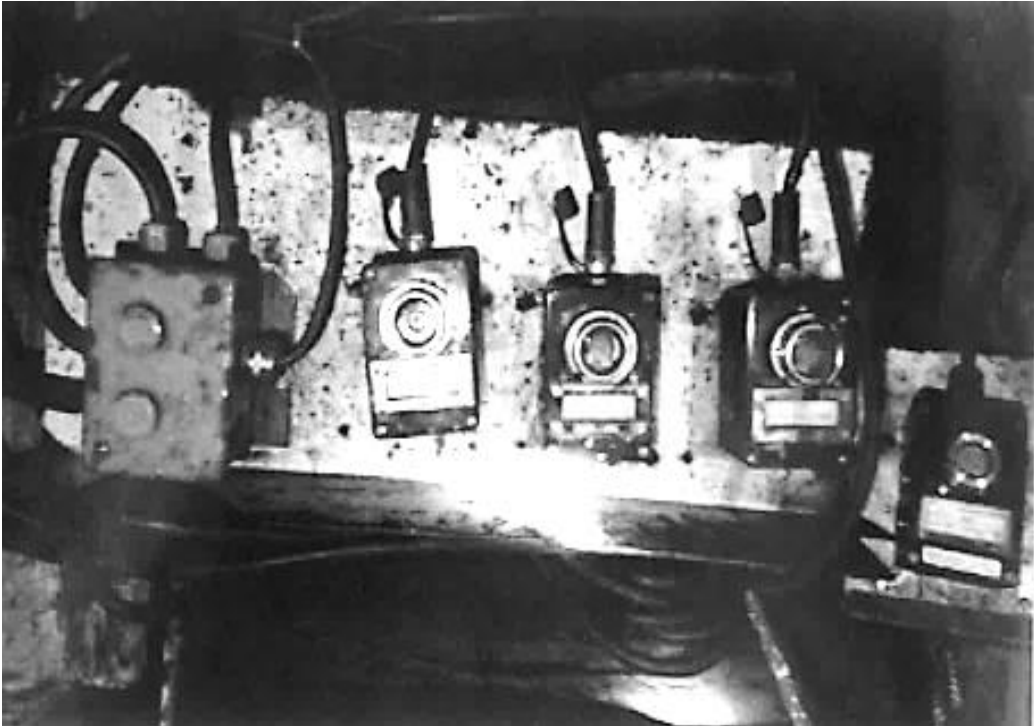
Zeki Erzenoğlu-2009																																																	
ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİMGESİ	KALINLIK (m)	LİTOLOJİ	LİTOLOJİK AÇIKLAMA	HİDROJEOLOJİK AÇIKLAMA																																									
PALEOZOYİK	MESOZOYİK	TERSİYER	NEOJEN	MIYOSEN	ORTA	Çoraklar	Hırka	m2	100	Kireçtaşı: Çörtlü, tüftü. Çatlaklı erime boşluklu. Sarımsı kahverengi	Karstik iyi akifer özelliktedir.																																						
												Kuvaterner	Acısu	m4a3	60	Kireçtaşı, mam ve kireçtaşı ardalanması; Plastik killer koyu yeşil, kilitaşı ve mamlar açık yeşil renkli.	Kireçtaşı seviyeleri karstik özelliktedir. Sahada buldukları konumları ile su bulunmaz																																
																		Bozçayır	m4a2	90	Tüfit: karbonatlı ve killidir. Yer yer alçı taşı bantları içerir. Kil: Nefti yeşil, canlı yeşil ve kırmızı renkli seviyelerin ardalanması	Geçirimsiz özelliktedir. Yüze yakın yerlerde birkaç metre erime boşlukları gelişmiştir. Su taşımaz																											
																							Kırmızıtepe	m4b	40	Çakıllıtaşı, kumtaşı, kilitaşı ardalanması; şarabi renkli, yarı yuvarlak ofiyolit ve yassımsı metamorfik çakıllı.	Taneli gözenekliliğe sahip geçirimlidir. Yükseklerde yeraldığından su bulundurmaz.																						
																												Çantlı	Pc	1-5	Çakıllıtaşı tutturulmamış	Geçirimli, yersel olarak su taşıyıcı. Önemsiz																	
																																	Al	1-50	Çakıl, kum, silt ve çamur.	Geçirimli, iyi akifer özelliktedir.													
																																					Ya			Geçirimli, yersel olarak su taşıyıcı									
																																									Temel Karmaşığı	Ptk	450	Serpantin: Açık yeşil ve gri renkli, Yeryer silisleşmiş, talklaşmış ve demiroksitleşmiş.	Genel olarak akifer özelliktedir. İkincil gözenekliliğe bağlı seviyelerden düşük debili kaynak çıkışları vardır.				
																																														500-1000		Kuvarsit, albit-epidot ve grafit şistlerden oluşmaktadır. Yer yer mavi şistler yer almaktadır. Mavisistler gri mavi renkli, sık foliasyonludur.	Genel olarak akifer özelliktedir. İkincil gözenekliliğe bağlı seviyelerden düşük debili kaynak çıkışları vardır.

Şekil 4.6. Koyunağılı linyit sahasının hidrojeolojik stratigrafi dikme kesiti.

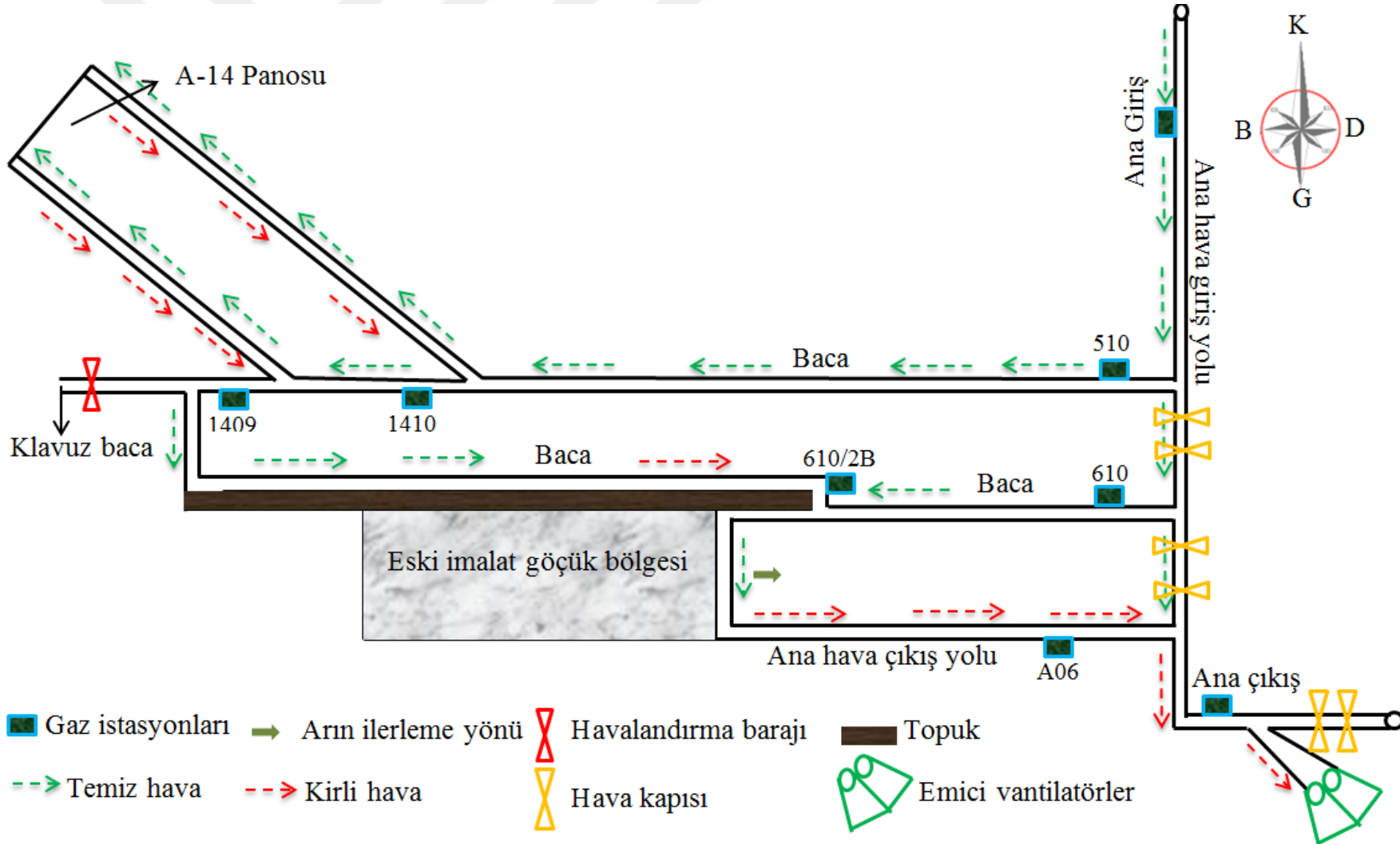
5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Adularya yeraltı kömür madeni 8 saatlik 3 vardiya halinde çalışmaktadır. Gaz, sıcaklık ve hava hızı her saat içerisinde galerinin tahkimatlarının yan duvarına yerleştirilmiş sensörler ile ölçülür (Şekil 5.1). A sektöründeki gaz numunelerinin ölçümü 8 istasyon noktasında (ana giriş, 510, 1410, 1409, 610/2B, 610, A06 ve ana çıkış) gerçekleştirilir. Şekil 5.2, Adularya yeraltı kömür madeni A sektörünün genel havalandırma sistemi ve gaz istasyonunun noktalarını göstermektedir. D sektöründeki gaz numunelerinin ölçümü 2 istasyon noktasında (D ve D210) gerçekleştirilir. Bu çalışmada; 2017 yılı için toplanan veriler, Adularya yeraltı kömür madeninde kömürün kendiliğinden yanma tehlikesi olup olmadığını belirlemek için kullanılmıştır. Verilerin ortalama değerleri her bir gaz istasyonu için Çizelge 5.1’de listelenmiştir.



Şekil 5.1. Gaz ve sıcaklık sensörleri.



Şekil 5.2. Adularya yeraltı kömür madeni A sektörünün genel havalandırma sistemi ve gaz ölçüm istasyon noktaları.

Çizelge 5.1. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz istasyonu için 2017 yılı aylık ortalama değerleri.

Gaz istasyonları	Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ana giriş	Hava hızı (m/s)	1,59	1,48	1,45	1,48	1,47	1,53	**	**	**	**	0,84	1,22
	O ₂ (%)	20,64	20,83	20,91	20,89	20,82	20,94	21,15	21,15	20,77	20,80	20,93	20,84
	CO (ppm)	2,00	**	**	4,25	**	**	**	**	**	**	**	**
	H ₂ S (ppm)	**	**	0,43	0,26	0,12	**	**	**	**	**	**	**
	CH ₄ (%)	0,13	0,08	0,05	0,09	0,75	0,05	0,05	0,06	0,04	0,02	0,02	0,03
	Sıcaklık (°C)	0,68	4,30	9,85	12,41	16,99	21,67	28,24	27,49	23,93	17,16	9,94	7,91
	N ₂ (%)	79,20	79,06	78,57	78,73	78,28	78,98	78,78	78,76	79,16	79,15	79,02	79,1
510	Hava hızı (m/s)	0,82	0,78	0,77	0,79	0,84	0,90	1,13	0,89	1,05	1,39	0,90	0,68
	O ₂ (%)	20,96	20,60	20,83	20,82	20,81	20,76	20,84	20,84	20,84	20,96	20,97	20,96
	CO (ppm)	0,77	3,24	1,88	1,74	1,60	1,30	1,14	1,00	1,04	1,25	1,00	1,00
	H ₂ S (ppm)	**	**	**	**	**	1,00	1,00	**	1,38	**	**	**
	CH ₄ (%)	0,07	0,08	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,05	0,04	0,05	0,06	0,02
	Sıcaklık (°C)	7,31	11,27	15,12	15,74	18,38	20,84	23,48	24,17	22,33	16,37	13,12	11,91
	N ₂ (%)	78,94	79,29	79,11	79,11	79,11	78,15	78,04	79,08	77,71	78,96	78,95	78,99

Çizelge 5.1. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz istasyonu için 2017 yılı aylık ortalama değerleri (devam).

Gaz istasyonları	Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
1410	Hava hızı (m/s)	0,69	0,61	0,56	0,56	0,66	0,56	0,54	0,61	0,61	0,74	0,88	0,58
	O ₂ (%)	20,46	20,62	20,97	20,98	20,99	20,98	20,97	20,96	20,94	20,95	20,96	20,97
	CO (ppm)	4,00	**	**	**	**	**	**	**	2,00	**	**	**
	H ₂ S (ppm)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	CH ₄ (%)	0,02	0,03	0,07	0,10	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	Sıcaklık (°C)	25,02	27,41	26,24	26,00	25,97	26,75	26,71	27,46	27,04	26,99	26,13	25,54
	N ₂ (%)	79,49	79,33	78,93	78,89	78,92	78,95	78,98	78,99	79,02	79,01	79,00	78,99
1409	Hava hızı (m/s)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,90	0,73	0,68	0,71	0,73	0,67	0,65
	O ₂ (%)	20,82	20,75	20,91	20,86	20,87	20,86	20,83	20,81	20,80	20,90	20,88	20,89
	CO (ppm)	1,41	2,82	2,82	4,63	3,08	3,47	3,64	2,43	2,27	2,78	2,29	2,2
	H ₂ S(ppm)	1,04	0,26	0,32	0,34	0,31	0,57	0,46	0,45	0,26	0,32	2,63	**
	CH ₄ (%)	0,12	0,07	0,05	0,06	0,07	0,10	0,07	0,09	0,02	0,02	0,02	0,02
	Sıcaklık (°C)	26,13	26,87	26,93	27,03	27,03	27,72	27,97	28,20	28,12	28,47	27,08	27,02
	N ₂ (%)	77,99	78,89	78,68	78,70	78,73	78,49	78,61	78,62	78,89	78,73	76,44	79,06

Çizelge 5.1. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz istasyonu için 2017 yılı aylık ortalama değerleri (devam).

Gaz istasyonları	Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	
610/2B	Hava hızı (m/s)	**	**	**	**	**	**	**	**	1,48	**	1,48	1,33	
	O ₂ (%)	20,49	20,42	20,84	20,83	20,84	20,82	20,81	20,12	20,74	20,67	20,86	20,86	
	CO (ppm)	2,93	5,03	3,53	4,58	2,85	2,76	2,81	2,34	2,37	1,88	1,48	1,38	
	H ₂ S (ppm)	0,33	0,44	0,36	0,37	0,34	0,33	0,32	0,76	0,47	0,77	0,71	**	
	CH ₄ (%)	0,05	0,17	0,04	0,02	0,05	0,06	0,09	0,06	0,06	0,05	0,07	0,06	
	Sıcaklık (°C)	27,31	28,06	27,11	26,90	27,02	28,06	28,69	28,88	28,88	29,03	28,68	28,61	28,13
	N ₂ (%)	79,10	78,94	78,73	78,75	78,74	78,76	78,75	79,03	78,70	78,48	78,33	79,05	
A06	Hava hızı (m/s)	1,98	1,99	1,93	1,72	1,93	1,78	1,17	1,53	1,45	1,09	1,86	1,79	
	O ₂ (%)	20,06	19,27	19,92	20,16	20,15	20,32	20,36	20,02	20,05	20,10	19,85	20,18	
	CO (ppm)	1,38	3,92	3,20	2,68	2,33	2,59	3,85	3,09	2,98	2,36	2,36	3,64	
	H ₂ S (ppm)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	1,00	**	**	
	CH ₄ (%)	0,02	0,04	0,03	0,04	0,07	0,43	0,01	0,03	0,04	0,09	0,06	0,15	
	Sıcaklık (°C)	26,27	25,84	26,60	26,69	26,73	26,52	25,93	26,77	27,19	27,00	27,09	26,72	
	N ₂ (%)	79,89	80,67	79,85	79,63	79,75	79,22	79,6	76,83	79,88	78,78	80,06	79,64	

Çizelge 5.1. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz istasyonu için 2017 yılı aylık ortalama değerleri (devam).

Gaz istasyonları	Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	
610	Hava hızı (m/s)	0,85	1,78	**	**	**	0,68	0,67	0,63	0,9	0,66	0,69	0,75	
	O ₂ (%)	20,90	20,85	20,88	20,17	20,81	20,82	20,80	20,62	20,82	20,91	20,89	20,90	
	CO (ppm)	3,65	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
	H ₂ S (ppm)	0,37	0,34	0,42	0,35	0,33	0,49	0,59	0,29	0,60	0,30	0,19	0,46	
	CH ₄ (%)	0,07	0,11	0,19	0,06	0,06	0,06	0,08	0,09	0,46	0,05	0,07	0,04	
	Sıcaklık (°C)	10,81	13,08	16,12	16,07	18,36	19,88	20,42	20,59	20,59	19,86	17,74	16,16	15,54
	N ₂ (%)	78,62	78,67	78,48	79,4	78,77	78,59	78,50	78,97	78,09	78,70	78,83	78,57	
Ana çıkış	Hava hızı (m/s)	2,17	2,28	2,25	2,15	2,01	2,16	2,66	2,21	2,07	1,73	1,84	1,93	
	O ₂ (%)	20,33	19,78	20,23	20,18	20,16	20,17	20,51	20,35	20,27	20,29	20,29	20,46	
	CO (ppm)	**	2,06	6,31	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
	H ₂ S (ppm)	**	**	**	**	4,20	**	**	**	**	**	**	**	
	CH ₄ (%)	0,07	0,07	0,08	**	**	0,10	0,02	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	
	Sıcaklık (°C)	21,00	22,00	22,49	22,59	23,56	24,39	24,73	24,96	24,45	22,79	22,20	23,05	
	N ₂ (%)	79,57	80,12	79,66	79,79	75,61	79,70	79,43	79,58	79,65	79,64	79,62	79,47	

Çizelge 5.1. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz istasyonu için 2017 yılı aylık ortalama değerleri (devam).

Gaz istasyonları	Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
D	Hava hızı (m/s)	1,36	1,39	1,42	1,68	1,92	1,12	1,55	0,99	0,66	**	1,16	1,15
	O ₂ (%)	20,88	20,88	20,83	20,82	20,76	20,64	20,60	20,64	20,76	20,95	20,64	20,45
	CO (ppm)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	H ₂ S (ppm)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	CH ₄ (%)	0,04	**	0,03	0,07	0,11	0,06	0,05	0,05	0,05	**	**	0,16
	Sıcaklık (°C)	15,9	15,54	16,95	17,00	18,39	19,62	20,37	20,33	19,43	18,53	17,02	16,88
	N ₂ (%)	79,04	79,09	79,11	79,09	79,11	79,27	79,31	79,28	79,16	79,02	79,33	79,36
D 210	Hava hızı (m/s)	1,20	1,17	1,14	1,06	1,01	1,05	1,33	1,33	1,40	0,00	1,99	1,96
	O ₂ (%)	20,88	20,87	20,83	20,80	20,77	20,71	20,65	20,66	20,73	20,86	20,96	20,61
	CO (ppm)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	H ₂ S (ppm)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	CH ₄ (%)	0,07	0,10	0,03	0,05	0,06	0,06	0,07	**	**	**	**	0,06
	Sıcaklık (°C)	13,27	13,02	14,46	15,00	16,53	18,09	19,02	19,75	19,00	17,44	15,89	15,01
	N ₂ (%)	79,02	79,00	79,10	79,12	79,15	79,19	79,24	79,31	79,24	79,11	79,01	79,30

Not: ** Ölçüm yapılmamış

A sektöründe toplam 12 panonun çalışması planlanmıştır. Mevcut sektörlerde, ayak uzunlukları 250 m civarındadır. Pano boyları ise 1720 ile 2000 m arasında değişmektedir.

Üretim yöntemi olarak, geri dönüşlü göçertmeli tam mekanize uzunayak yöntemi uygulanmaktadır. A sektöründe ayak içerisinden kömürün kazısı çift tamburlu kesici yükleyici makine ile yapılmaktadır. Bu sahada kullanılmakta olan kesici yükleyici makine çift tamburlu olup, "CAT" marka ve modeli "ELECTRA2000" dir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Cat Electro 2000 kesici yükleyici makinesi.

Adularya yeraltı kömür madeninin havalandırması, gaz içeriği, hava kalitesi ve hava hızı uzaktan izleme sistemi ve kişisel gaz detektörleri ile takip edilmektedir. Doğu desandride 2 adet 110 kw'lık ve 900 ile 1400 dev/dk'lık emici vantilatör (Şekil 5.4) bulunduğundan dolayı ocağa kuzey desandrisinden (Şekil 5.5) yaklaşık 39,65 m³/sn'lik hava girmektedir (Gülügüzel, 2018). Hazırlık bacasına tali havalandırma ile yaklaşık 800 m³/dk'lık hava gönderilmektedir. Kirli hava bacadan doğal hızıyla çıkıp ana yoldaki doğal havalandırmaya karışarak taban yolundan ayağı dolaşır ve tavan yolundan tekrar ana yola çıkar ve doğu desandreden ocağı terk eder.

Aktarma galerilerine havanın kısa devre yapmasını önlemek için hava kapıları yapılmıştır. Gaz değerleri ortalaması; O₂ % 20,4, CH₄ 0,0 ppm, CO 1 ile 8 ppm, H₂S 0,0 ppm ve hava hızı 1,2 ile 2,2 m/sn olarak değişmektedir.



Şekil 5.4. Paralel çalışmakta olan iki emici vantilatör.



Şekil 5.5. Kuzey girişi.

5.2. Bulanık Mantık Yöntemi

5.2.1. Bulanık mantığın gelişimi

Bulanık mantık, kesin rakamlar yerine dilsel ifadeler, insan düşünme ve algılamasına dayanan önemli ve güçlü bir modelleme aracıdır. Değerleri sayı yerine kelimeler olan değişkenlere dilsel değişkenler denir (Zadeh, 1975). Bulanık sistemde kurallar ve dilsel değerler kullanılarak kesin veya bulanık girdi değişken kümelerinden bulanık çıktı değişken kümeleri elde edilir. Bulanık mantık kavramında bulanıklık veya çok karmaşık durumlarda kesin diye bir şey yoktur. Klasik mantığın veya Aristo mantığının 3 temel özelliği vardır; özdeşlik (bir şey ne ise odur), çelişmezlik (bir şey hem kendi, hem de başka bir şey olamaz), üçüncünün olmazlığı (bir şey ya vardır ya da yoktur), ilkeler gibi klasik mantığının temelini oluşturur. Bulanık mantığa göre, eğer gelecek olaylar hakkında bahsedilirse olaylar hakkında önermeler aslında ne yanlıştır ve ne doğrudur oysaki belirsizlik durumundadır. Bu nedenle, önermelerin iki durum içerisinde olması tahmin edilir ve önermelerin değerleri bulanık ve belirsiz olup olaylara bağlıdır. Önermelerin değerleri kesin olmayan durumlarda sadece gelecek olaylara özgü değildir. Çünkü önermelerin doğruluk değerleri bazı doğal sınırlar yüzünden her zaman elde edilemeyebilir. Bundan dolayı, sonucu elde etmek için kesin bir değer yerine üçüncü bir belirsiz değeri alır.

Bulanık mantık kavramı Lotfi Zadeh tarafından 1965 yılında yayınlanan makalede, matematiksel modelleme yaklaşımının şeklinde ve bulanık küme geliştirilmiştir (Zadeh, 1965). Bulanık küme, klasik kümenin genellemesidir veya keskin sınırları olmayan ve sıfır ile bir ($M_\mu \in \{0,1\}$) arasında bir karakteristik fonksiyonu ile karakterize edilen bir kümedir. Bulanık küme bulanık sistemlerin en temel elemanını oluşturur. Bulanık kümede bir elemanın kümeye dâhil olup olmadığı elemanların üyelik dereceleri ile belirlenir. Bulanık küme elemanları farklı üyelik derecesine sahip olan bir kümedir. Elemanlar bulanık kümede 0 ile 1 arasında bir değere alır 0 değere sahip olan eleman bulanık kümeye ait değil ama 1 değere sahip olan eleman tam üyelik derecesiyle bulanık kümeye aittir. Hâlbuki klasik kümede bir eleman 0 veya 1 değere sahip olup 0 ile 1 arasında bir değer almaz. Bulanık mantık sisteminde önemli kısmi dilsel ifadeler veya dilsel değişkenler oluşturur. Dilsel ifadeler veya dilsel değerler kişiye göre değişebilir. Örneğin, “sıcak” bir

dilsel ifadesi olup ‘‘çok sıcak’’ bir dilsel değeridir; çok sıcak dediğimiz zaman bazı insanlara göre 25°C ama bazı insanlara göre 35°C sıcaklıktır.

Gerçek dünyada, evren sürekli değişmektedir. Bundan dolayı, çevremizdeki olaylar hakkında bazen kesin yargılama ve olayların arasında kesin ayırım yapmak mümkün değildir. Su kirliliği denince temiz su ve kirli su arasında ayırım yapmak zordur. Örneğin; içme, tarım ve sanayide kullanılan su kalitelerinde farklılık vardır. Bu durumlarda kirli su ve temiz su arasında tedrici bir geçişi vardır. Bulanık mantık yardımı ile bu durumlar arasında geçiş tedrici olarak ifade edilir ama klasik mantığı ile durumlar arasında geçiş tedrici olarak ifade edilemez. Bu sebeplerden dolayı, karar verme zamanında belirsiz ortamlarda bulanık mantık sistemi klasik mantığa göre daha verimli ve hızlı çalışır. Yüzyıllardır klasik mantığın uygulanmasından ve bulanık mantık olumsuz anlama sahip olmasından dolayı batıda ilk başta kabul edilmemiştir. Doğuda, zellikle Japonya’da bulanık mantık kabul edilip ürünlerin üretilmesinde uygulanmış ve büyük gelişmeler elde edilmiştir. 80’lerin başlarında ürün üretiminde kullanılan bulanık mantık ile Japonya’da elde ettikleri başarılar sonucunda 80’lerin sonlarında Amerika’da bulanık mantığın kullanılmasına sebep olmuştur.

Bulanık mantık sistemi ilk başta 1975 yılında Mamdani ve Assilian tarafından bir buhar makinesi ve kaynama kombinasyonunun hızı ve basıncı kontrol etmek amacıyla kullanılmış olup bulanık sisteminin çalışması kolay ve sonuçları da daha etken bulunmuştur (Mamdani ve Assilian, 1975). Bulanık mantık 1980 yılında önemli bir ticari faaliyette Danimarka’daki bir imento fabrikasının işletilmesi ve kontrol edilmesinde uygulanmıştır. Bu tarihten sonra Hitachi firması 1987 yılında Sendai Metro’su’nun kontrolünde, bulanık mantık sisteminden yararlanılmıştır (obanoğlu, 2000).

Farklı alanlarda çok başarılı sonuçlar veren bulanık mantığa olan ilgi dünya çapında gün geçtikçe artmıştır. Bu nedenle, 1989 yılında bu alanda uluslararası bir çalışma ortamının kurulması amacıyla, SGS, Omron, Thomson, Hitachi, IBM, NCR, Toshiba ve Matsuhita gibi toplam olarak 51 dünyanın ünlü firma katılımıyla LIFE (Laboratory for Interchange Fuzzy Engineering) laboratuvarları kurulmuştur (obanoğlu, 2000).

5.2.2. Bulanık mantık ve madencilik uygulaması

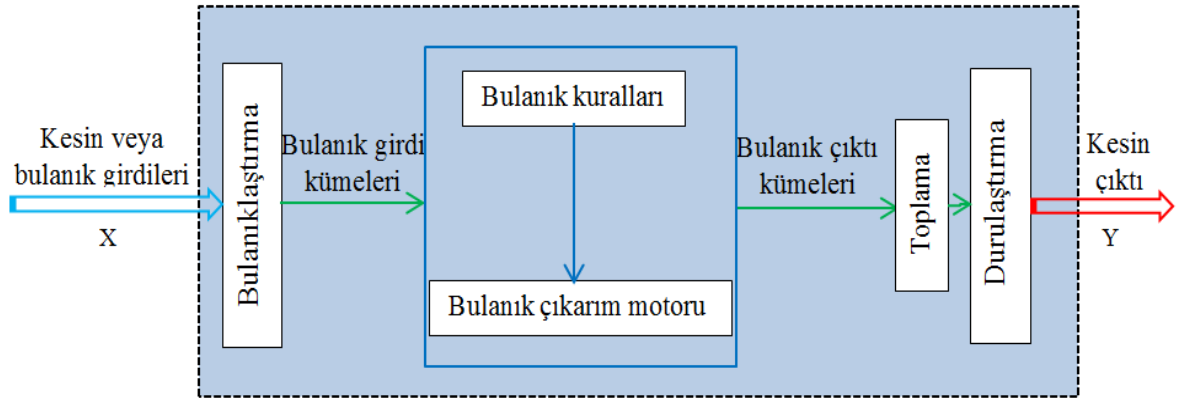
Bu bölümde, literatürlerde bu alanda yapılmış olan bazı çalışmalar verilmiştir. Örneğin, Monjezi vd. (2009), patlatma sırasında kaya parçalanmasının öngörülmesi için bir bulanık mantık modeli tasarlanmışlardır. Benzer şekilde Razani vd. (2013), yeraltı kömür madenlerinde tavan göçmesinin oranını tahmin etmek için bir bulanık mantık sistemi geliştirmişlerdir. Toraño vd. (2008), uzunayak kömür madenlerinin montajı için sanal gerçeklik modelinin yaklaşımına dayanan bir bulanık mantık sistemi kullanmışlardır. Başka bir çalışmada, Muduli vd. (2018) sıcaklık, oksijen, karbon dioksit ve karbon monoksiti girdi değişkenler olarak kullanarak yeraltı kömür madenlerinde anlık olarak yangın izlemeye dayalı bir bulanık mantık modeli önermişlerdir. Grychowski (2014), yeraltı kömür madenlerinde yangın tehlikesini izlemek için bir çevrimdışı bulanık mantık modeli oluşturmuştur. Araştırmacı, karbon dioksiti girdi değişken olarak görmüş, ancak yanma sırasında artan ve kömürün kendiliğinden yanmasını ve yangını hızlandıran ana faktör olan sıcaklığı dikkate almamıştır. Ayrıca bu çalışmada, havadaki normal oksijen konsantrasyonundan (% 20.95) daha yüksek olduğu için, oksijen konsantrasyonu güvenilir olarak kabul edilmiştir (% 21.25 ve % 21.09).

Her ne kadar tüm yöntemler kömür yangınının öngörülmesinde kesin başarı sağlasa da, bulanık mantık yöntemi yüksek belirsizlik ve doğrusal olmayan koşullarda dilsel değişken araçlarıyla verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlarda, bulanık mantık modelinin uygulanması birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Bu çalışmada, yüksek belirsizliklerle başa çıkmak için, kömürün kendiliğinden yanması ve kömür yangını tahmin etmek için bulanık çıkarım sistemi uygulanmıştır.

5.2.3. Bulanık çıkarım sistemleri

Bulanık çıkarım sistemi, bulanık küme teorisi, bulanık “EĞER-O ZAMAN” kuralları ve bulanık akıl yürütme ilkelerine dayanan ünlü bir hesaplama çerçevesidir. Bulanık sistem, veri sınıflandırması, otomatik kontrol, uzman sistem, karar analizi, robotik sistemi, zaman serilerinin tahmini ve örüntü tanıma gibi çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır (Jang vd., 1997).

Bulanık çıkarım sistemleri farklı alanlarda kullanıldığı için, bulanık uzman sistemler, bulanık model, bulanık kural tabanlı sistem ve bulanık sistem gibi değişik isimler ile bilinmektedir (Zadeh, 1965). Bulanık mantık modeli, bulanıklaştırma, kural tabanlı, bulanık çıkarım motoru ve durulaştırma gibi 4 bileşenden oluşur. Bulanık mantık modelinin genel yapısı Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bulanık çıkarım sistemini tanımlamadan önce, bulanık küme teorisi ve klasik küme teorisi tartışılacaktır.



Şekil 5.6. Bulanık mantık modelinin genel yapısı.

5.2.4. Bulanık küme ve klasik küme teorisi

5.2.4.1. Klasik küme

Küme ortak özelliğe sahip olan nesnelerin topluluğudur. Kümede yer almakta olan nesneler kümenin elemanları olarak tanımlanır.

Klasik küme kuramında kesin sınırlı küme olarak tanımı kullanılmaktadır. Klasik kümede her eleman sıfır ya da bir, üyelik değerine sahiptir ($\mu \in \{0,1\}$) (Evet, hayır koşul). Klasik bir kümede Aristo mantığının gibi her eleman kümeye ya aittir ya da ait değildir. Klasik küme F 'de, bir x elemanın üyeliği veya üyeliğinin olmaması, μ_F of F karakteristik fonksiyonu ile temsil edilir. Klasik küme temel işlemleri ve özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Klasik kümede, eğer bir elemanın değeri sıfır ise bu kümenin elemanı değildir, eğer elemanın değeri bir ise kümenin elemanıdır ve aşağıda ifade edilmiştir:

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in F \\ 0 & \text{if } x \notin F \end{cases} \quad (5.1)$$

Eğer F bir sölem evreni x nesnelere oluşmuş ise, o zaman x , F kümenin bir elemanı ise:

$$x \in F \quad (5.2)$$

x , F kümenin bir elemanı değil ise;

$$x \notin F \quad (5.3)$$

Şeklinde yazılır. Bir kümenin içindekileri tanımlamak için kullanılan liste ve kural yöntemleri vardır. Liste yönteminde, kümedeki her nesneyi listeleterek bir kümenin üyesini tanımlar.

$$F = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (5.4)$$

Kural yönteminde, her üyenin bir kümeye üye olmak için bir özelliği uyması gereken kuralları ile tanımlar.

$$F = \{x \mid x \text{ özelliği var } U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\} \quad (5.5)$$

A kümesindeki her eleman aynı zamanda B kümesinin de üyesi ise, A , B kümenin bir alt kümesidir.

$$A \subseteq B \quad (5.6)$$

Eğer A , B kümenin bir alt kümesi ise ve B A kümenin bir alt kümesi ise, A ve B , eşit kümeler olarak tanımlanır.

$$A = B \quad (5.7)$$

Eğer A kümesinin en az bir elemanı B kümesinde değilse ya da B kümesinin en az bir elemanı A kümesinde değilse A ve B eşit küme değildir.

$$A \neq B \quad (5.8)$$

Eğer A , B kümesinin bir alt kümesiysen fakat A ve B eşit değilse, A , B kümesinin tam bir alt kümesidir.

$$A \subset B \quad (5.9)$$

Çizelge 5.2. Klasik kümenin temel işlemleri ve özellikleri.

Tümlenme	$A'' = A$
Değişim ilkesi	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$
Birleşim ilkesi	$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$ $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$
Dağılım ilkesi	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
De Morgan Kuralı	$(A \cap B)' = A' \cup B'$ $(A \cup B)' = A' \cap B'$
Çelişmezlik ilkesi	$A \cap A' = \phi$
Üçüncünün olmazlığı ilkesi	$A \cup A' = E$
Kendine yetme ilkesi	$A \cup A = A$ $A \cap A = A$
Özdeşlik ilkesi	$A \cup \phi = A$ $A \cap \phi = \phi$ $A \cap X = A$ $A \cup X = X$
Geçişlilik ilkesi	Eğer $A \subseteq B \subseteq C$ O ZAMAN $A \subseteq C$

5.2.4.2. Bulanık küme

Bulanık küme, klasik kümenin genellemesidir veya keskin sınırları olmayan ve sıfır ile bir ($\mu \in \{0,1\}$) arasında bir karakteristik fonksiyonu ile karakterize edilen bir kümedir. Her eleman bir üyelik derecesinin değerine bağlıdır ve sıfır ile bir arasında bir üyelik değeri alır (Zadeh, 1965). Bu da, dilsel ifadelerinin esnekliğini göstermektedir. Bulanık kümelerin kavramı 1980 yılından sonraki bilimsel ve teknoloji çalışmalarda etkin bir şekilde kullanılmıştır. Normal bir bulanık küme için üyelik derecesinin 3 temel özelliği göstermesi gerekmektedir (İphar, 2004).

- 1- Bir bulanık kümede en azından bir elemanın en büyük üyelik derecesi olan 1'e sahip olması durumunda, normal bulanık kümesi denilir.
- 2- Bir bulanık kümede, üyelik derecesi 1'e eşit olan elemana yakın sağda ve soldaki elemanların üyelik derecelerinin de 1'e yakın olması durumunda bulanık kümenin monoton olmasıdır.
- 3- Bir bulanık kümenin simetrik özelliğini gösteren onun elemanları, üyelik derecesi 1'e eşit olan elemanlardan sağa veya sola eşit aralıkta hareket edildiğinde bulanık elemanların üyelik derecelerinin birbirine eşit olmasıdır.

P , bulanık bir kümesinde girdi kesin x elemanı ile tanımlanan üyelik fonksiyonu tarafından temsil edilir:

$$P = \{x, \mu_p(x) | x \in F\} \quad (5.10)$$

Burada, F söylem evreni ve $\mu_p(x)$ ise P bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu olup x ise söylem evreninin elemanıdır. Söylem evreninin elemanının üyelik fonksiyonu 0 ile 1 arasında bir üyelik derecesi ile belirtilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mu_p(x) \rightarrow [0,1] \quad (5.11)$$

Söylem evreni kesikli olduğunda, bulanık küme aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_P(x_i)}{x_i} \quad (5.12)$$

Söylem evreni sonlu olduğunda, bulanık küme aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$P = \int_F \mu_P(x) / x \quad (3.13)$$

Yukarıdaki eşitliklerde Σ , \int , $—$ ve $/$ ifadeler sembolik ifadeler olup matematik anlamını vermezler.

Bulanık ve klasik mantık temel farklılıkları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

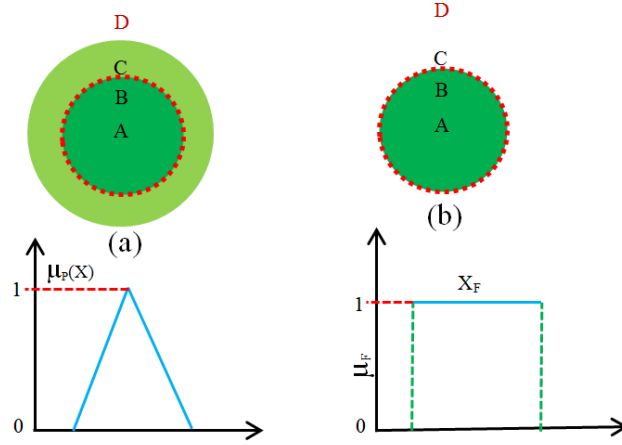
Çizelge 5.3. Bulanık ve klasik mantık temel farklılıkları (Çobanoğlu, 2000).

Klasik mantık	Bulanık mantık
A veya A değil	A ve A değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Belli derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 arasında süreklilik
İkili birimler	Dereceli veya kısmi birimler
Dijital bilgisayar	Nöral ağ (beyin)
Fortran, Pascal vs.	Türkçe (doğal dil)

Bulanık kümede elemanlar 0 ile 1 arasında bir değere alır 0 değere sahip olan eleman bulanık kümeye ait değil ama 1 değere sahip olan eleman tam üyelik derecesiyle bulanık kümeye aittir. Hâlbuki klasik kümede bir eleman 0 veya 1 değere sahip olup 0 ile 1 arasında bir değer almaz.

Örneğin, eğer boğucu alanları % 10 oksijen konsantrasyonundan az düşünürsek klasik küme teorisine göre, % 10'un üzerinde oksijen konsantrasyonuna sahip olan alanlar boğulmuş alanlar olarak sayılmaz, ancak bulanık kümede her alan üyelik derecesi ile dikkate alınır. A alanını % 20 oksijen konsantrasyonuyla, B alanını % 15 oksijen konsantrasyonuyla, C alanını % 9,99 oksijen konsantrasyonuyla ve D alanını % 5 oksijen

konsantrasyonuyla varsayarsak, klasik küme teorisine göre, A ve B alanları uygun olarak kabul edilirken, C alanı % 0,01 farkla reddedilir. Ancak, bulanık küme teorisine göre, C alanı 0 ile 1 arasında bir üyelik derecesine sahip olup uygun bir alan olarak kabul edilir ve sıfır üyelik derecesine sahip olan D alanı reddedilecektir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. (a) Bulanık küme ve (b) klasik küme.

5.2.5. Bulanık kümelerde temel işlemler

Bulanık küme işlemlerinde birleşim, kesişme ve tümleyen işlemler gibi bulanık küme üyelik fonksiyonları Zadeh'in makalesinde belirttiği gibi yapılır (Zadeh, 1965). Birleşim, kesişme ve tümleyen işlemleri bulanık kümelerinin işlemlerinde sırasıyla "VE", "VEYA" ve "DEĞİL" operatörleri ile kullanılabilirler.

5.2.5.1. Birleşim

İki A ve B bulanık kümelerinin birleşimi C bulanık kümesidir (Şekil 5.8). A ve B bulanık kümelerindeki elemanlarına göre, C bulanık kümesindeki elemanların üyelik dereceleri elde edilir. Bu işlemde A ve B bulanık kümelerinin üyelik derecesi yüksek olan elemanlar seçilir. Aşağıda ifade edilmiştir:

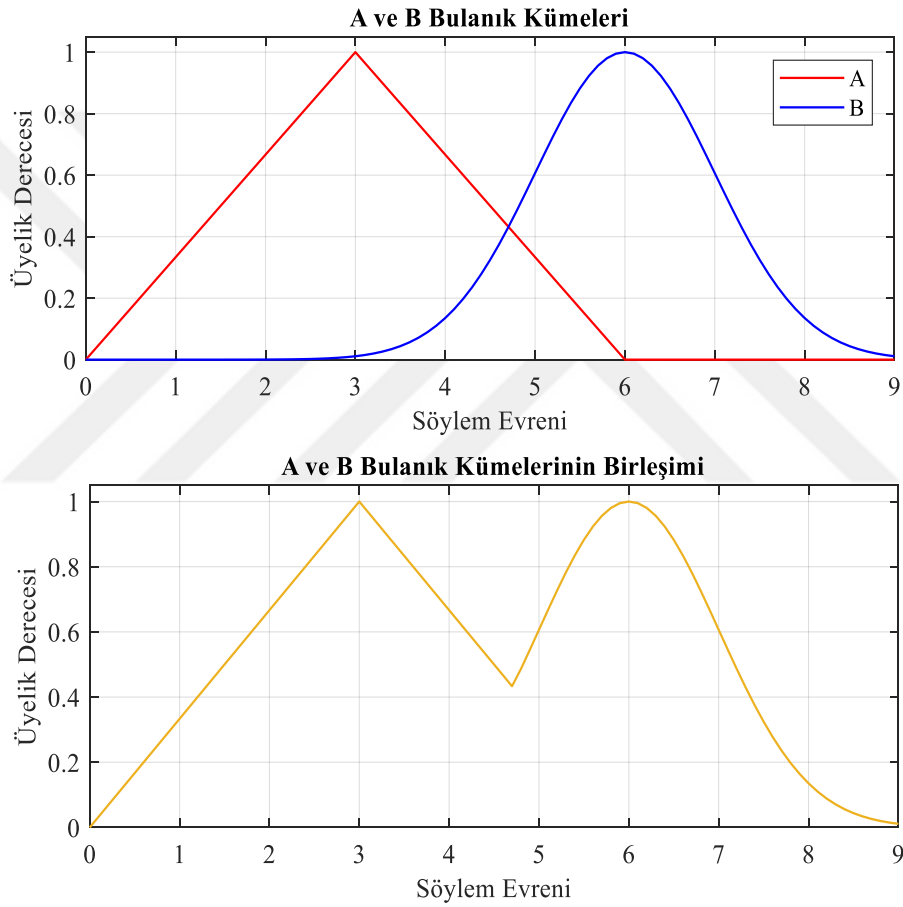
$$C = A \cup B \Rightarrow C = A \text{ veya } B \quad (5.14)$$

$$\mu_C(x) = \text{MAX}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (5.15)$$

Örnek: A ve B gibi iki bulanık kümesi aşağıda verilip Eşitlik 5.15 kullanılarak birleşimleri hesaplanmıştır.

$$A = \left\{ \frac{1}{1.0} + \frac{0.75}{1.5} + \frac{0.3}{2.0} + \frac{0.15}{2.5} + \frac{0}{3} \right\} \quad B = \left\{ \frac{1}{1.0} + \frac{0.6}{1.5} + \frac{0.2}{2.0} + \frac{0.1}{2.5} + \frac{0}{3} \right\}$$

$$C = \left\{ \frac{1}{1.0} + \frac{0.75}{1.5} + \frac{0.3}{2.0} + \frac{0.15}{2.5} + \frac{0}{3} \right\}$$



Şekil 5.8. A ve B bulanık kümeleri ve birleşimi.

5.2.5.2. Kesişme

İki A ve B bulanık kümelerinin kesişimi C bulanık kümesidir (Şekil 5.9). A ve B bulanık kümelerindeki elemanlarına göre, C bulanık kümesindeki elemanların üyelik dereceleri elde edilir. Bu işlemde A ve B bulanık kümelerinin üyelik derecesi düşük olan elemanlar seçilir. Aşağıda ifade edilmiştir:

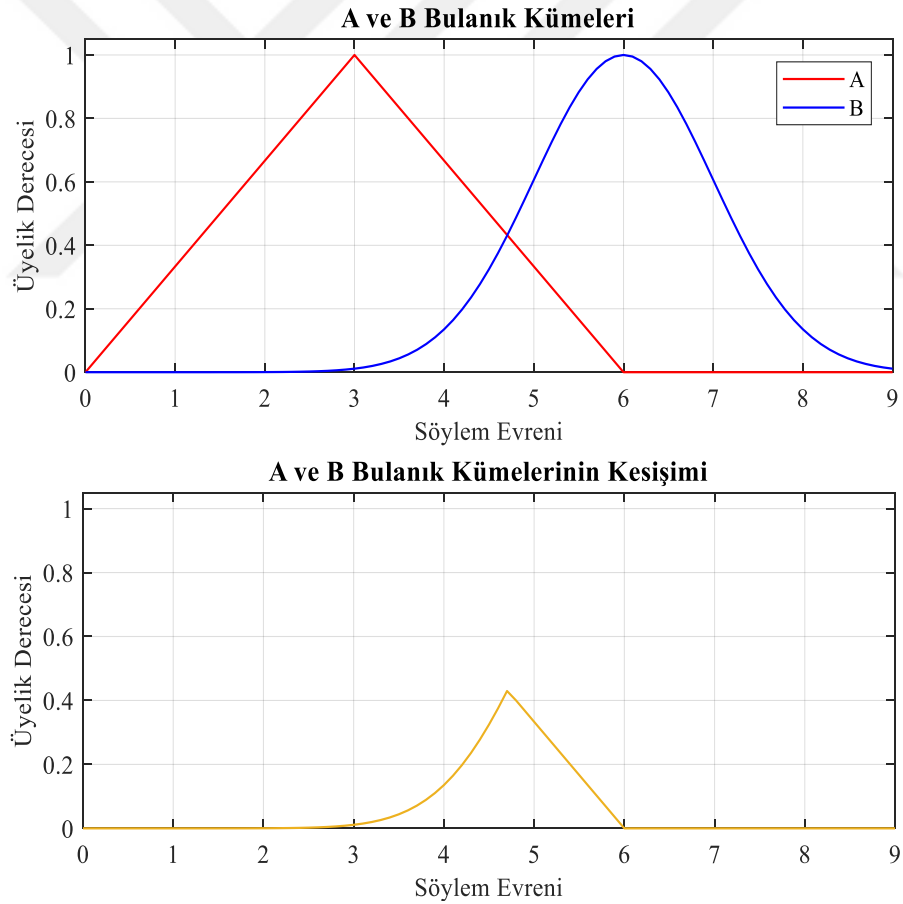
$$C = A \cap B \Rightarrow C = A \text{ ve } B \quad (5.16)$$

$$\mu_C(x) = \text{MIN}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (5.17)$$

Örnek: A ve B gibi iki bulanık kümesi aşağıda verilip Eşitlik 5.17 kullanılarak kesişimleri hesaplanmıştır.

$$A = \left\{ \frac{1}{1.0} + \frac{0.75}{1.5} + \frac{0.3}{2.0} + \frac{0.15}{2.5} + \frac{0}{3} \right\} \quad B = \left\{ \frac{1}{1.0} + \frac{0.6}{1.5} + \frac{0.2}{2.0} + \frac{0.1}{2.5} + \frac{0}{3} \right\}$$

$$C = \left\{ \frac{1}{1.0} + \frac{0.6}{1.5} + \frac{0.2}{2.0} + \frac{0.1}{2.5} + \frac{0}{3} \right\}$$



Şekil 5.9. A ve B bulanık kümeleri ve kesişimi.

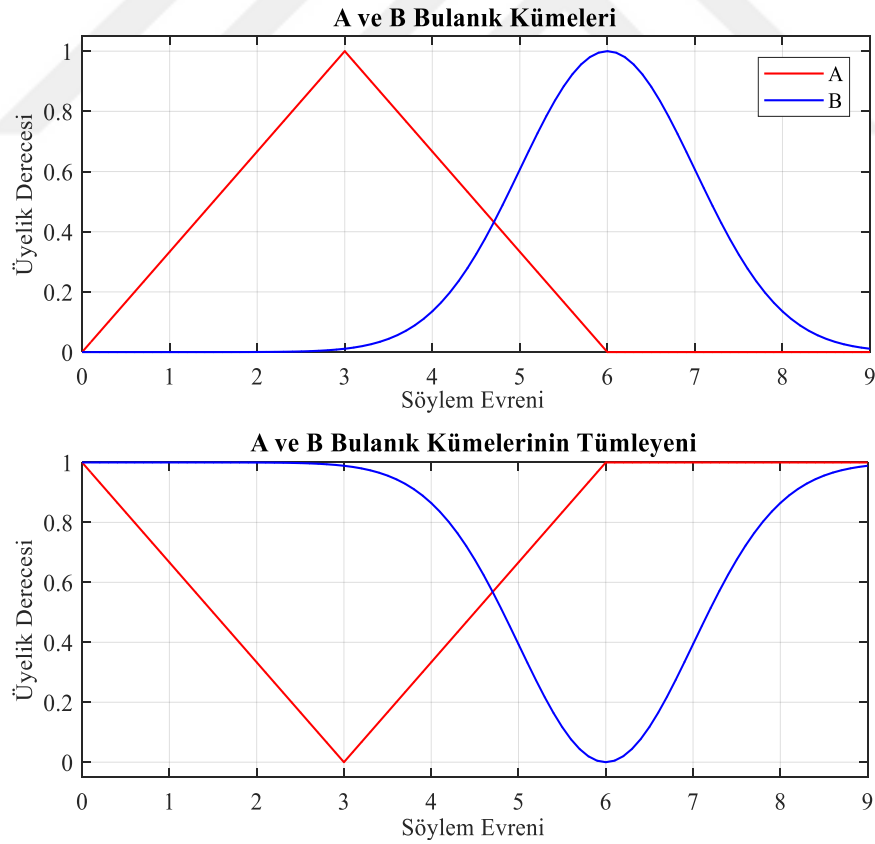
5.2.5.3. Tümlen

A bir bulanık kümesinin tümleniyi $-A$, \bar{A} veya A değil olarak gösterilebilmektedir (Şekil 5.10). Aşağıda verilen eşitlik yardımı ile A bir bulanık kümesinin elemanlarının üyelik dereceleri hesaplanır.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5.18)$$

Örnek: A gibi bir bulanık kümesi aşağıda verilip Eşitlik 5.18 kullanılarak tümleniyi hesaplanmıştır.

$$A = \left\{ \frac{1}{1.0} + \frac{0.75}{1.5} + \frac{0.3}{2.0} + \frac{0.15}{2.5} + \frac{0}{3} \right\} \quad \bar{A} = \left\{ \frac{0}{1.0} + \frac{0.25}{1.5} + \frac{0.7}{2.0} + \frac{0.85}{2.5} + \frac{1}{3} \right\}$$



Şekil 5.10. A ve B bulanık kümeleri ve tümleniyi.

Bulanık küme operatörlerinin özellikleri ve temel işlemleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Standart bulanık küme operatörlerinin özellikleri ve temel işlemleri.

Tümlleme	$\overline{\overline{A}} = A$
Değişim ilkesi	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$
Birleşim ilkesi	$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$ $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$
Dağılım ilkesi	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
De Morgan Kuralı	$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$
Çelişmezlik ilkesi	$A \cap \overline{A} \neq \phi$
Üçüncünün olmazlığı ilkesi	$A \cup \overline{A} \neq X$
Kendine yetme ilkesi	$A \cup A = A$ $A \cap A = A$
Özdeşlik ilkesi	$A \cup \phi = A$ $A \cap \phi = \phi$ $A \cap X = A$ $A \cup X = X$
Simetrik fark formülü	$(\overline{A} \cap B) \cup (A \cap \overline{B}) = (\overline{A} \cup \overline{B}) \cap (A \cup B)$
denklik formülü	$(\overline{A} \cup B) \cap (A \cup \overline{B}) = (\overline{A} \cap \overline{B}) \cup (A \cap B)$
Kendini verme	$A \cap (A \cup B) = A$ $A \cup (A \cap B) = A$

5.2.6. Üyelik fonksiyonunun türleri

Trapez, Gauss, Çan eğrisi, üçgen ve Sigmoidal gibi dilsel değerleri sunmak için çeşitli üyelik fonksiyonları kullanılır. Bunlar aşağıda ayrıntılı olarak belirtilmiştir.

5.2.6.1. Üçgen üyelik fonksiyonu

Üçgen üyelik fonksiyonu aşağıda verildiği gibi 3 parametre (a, b, c) ile ifade edilip Şekil 5.11.a'da gösterilmiştir. (a, b, c) parametreleri X-koordinatında üçgenin köşe noktalarının değerlerini ve x kesin girdiyi göstermektedir.

$$\text{Üçgen } (x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (5.19)$$

MAX ve MIN kullanıldığında üçgen üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi belirtilir:

$$\text{Üçgen } (x; a, b, c) = \text{MAX} \left(\text{MIN} \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \quad (5.20)$$

5.2.6.2. Gauss üyelik fonksiyonu

Gauss üyelik fonksiyonu aşağıda verildiği gibi 2 parametre (c, σ) ile ifade edilir. C parametre gauss üyelik fonksiyonunun merkezini ve σ ise üyelik fonksiyonunun genişliğini ve x kesin girdiyi göstermekte ve Şekil 5.11.b'de gösterilmiştir.

$$\text{Gauss } (x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2} \quad (5.21)$$

5.2.6.3. Genelleştirilmiş Çan Eğrisi üyelik fonksiyonu

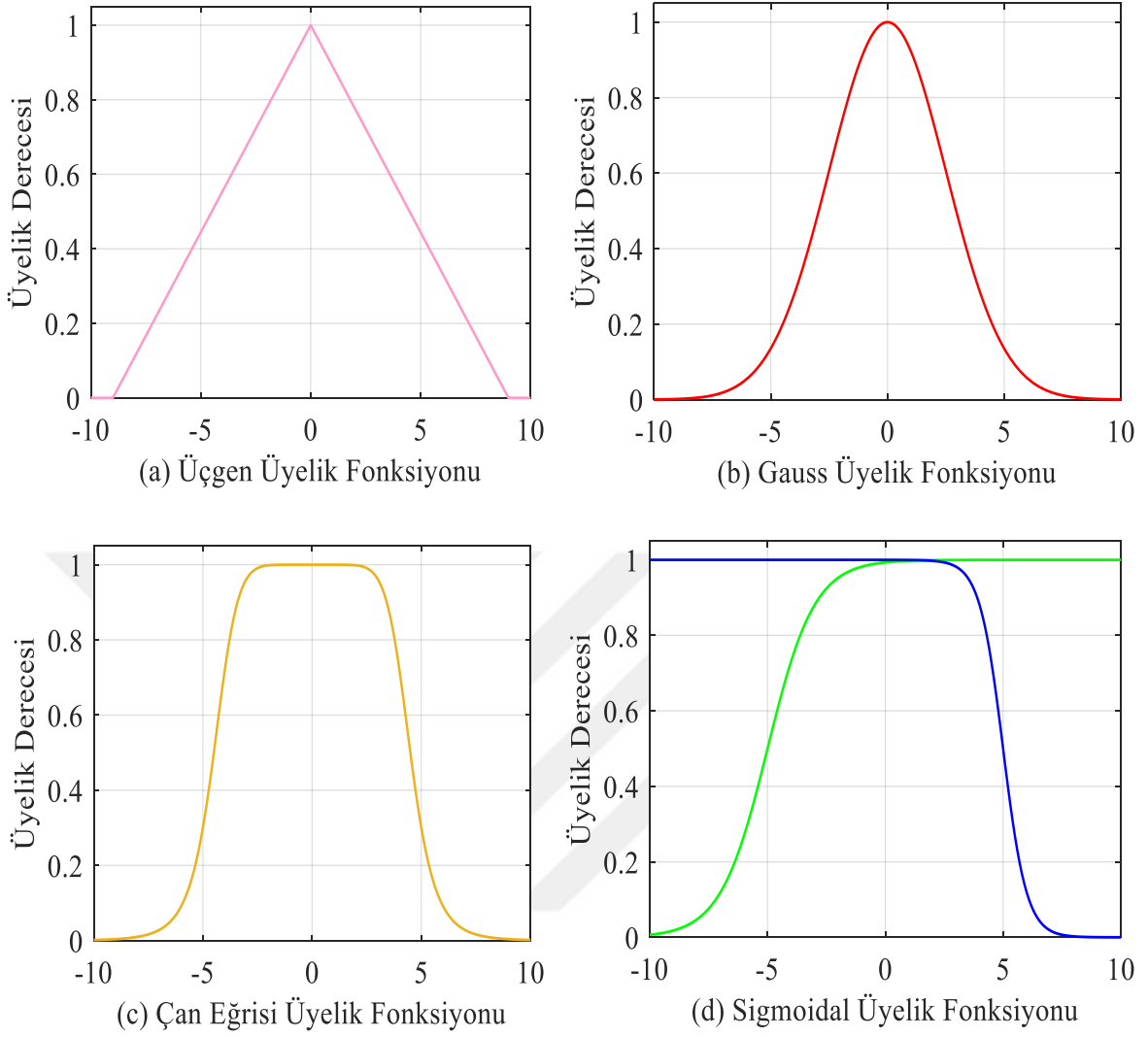
Genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonu aşağıda verildiği gibi 3 parametre (a, b, c) ile ifade edilir. a ve c parametreleri sırasıyla çan eğrisi üyelik fonksiyonunun genişliğini ve merkezini ayarlamak için kullanılmakta ve b parametre ise üyelik fonksiyonunun geçiş noktalarını ayarlamak için kullanılıp, x kesin girdiyi göstermekte ve Şekil 5.11.c'de gösterilmiştir.

$$\text{Çan eğrisi}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.22)$$

5.2.6.4. Sigmoidal üyelik fonksiyonu

Sigmoidal üyelik fonksiyonu aşağıda verildiği gibi 2 parametre (a, c) ile ifade edilir. Burada a, $x = c$ geçiş noktadaki eğimini kontrol eder ve x kesin girdiyi göstermekte ve Şekil 5.11.d'de gösterilmiştir.

$$\text{Sig}(x; a, c) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x-c)]} \quad (5.23)$$



Şekil 5.11. Üyelik fonksiyonlarının grafik gösterimi.

5.2.6.5. Trapez üyelik fonksiyonu

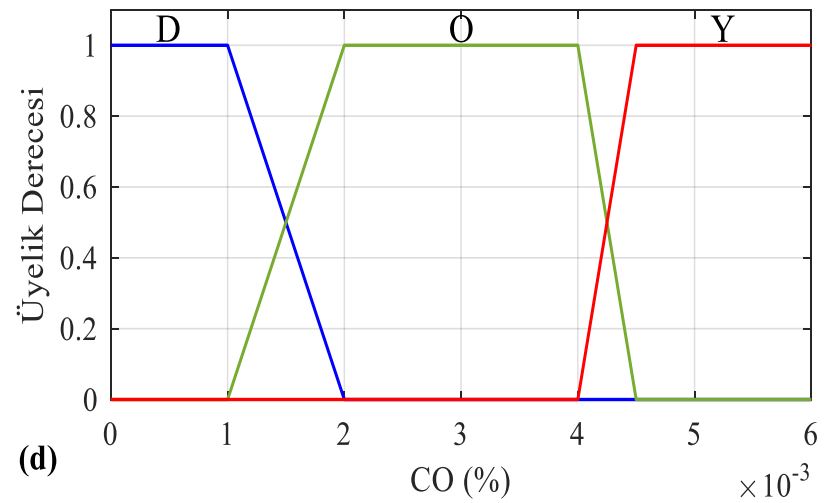
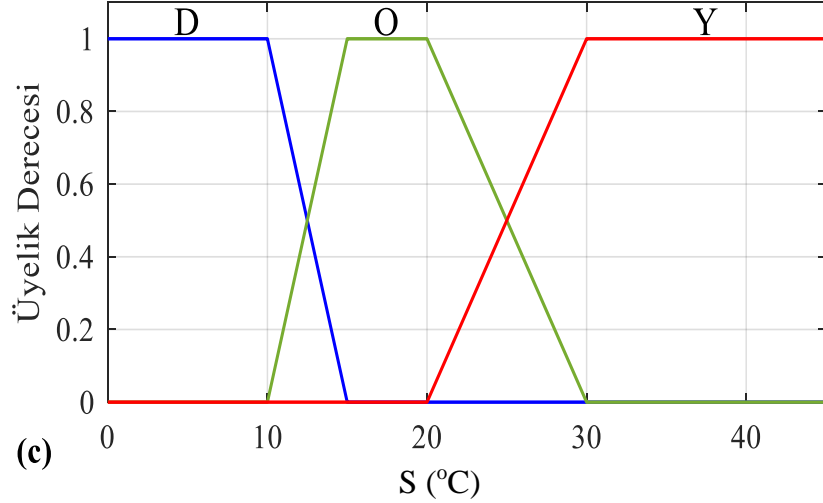
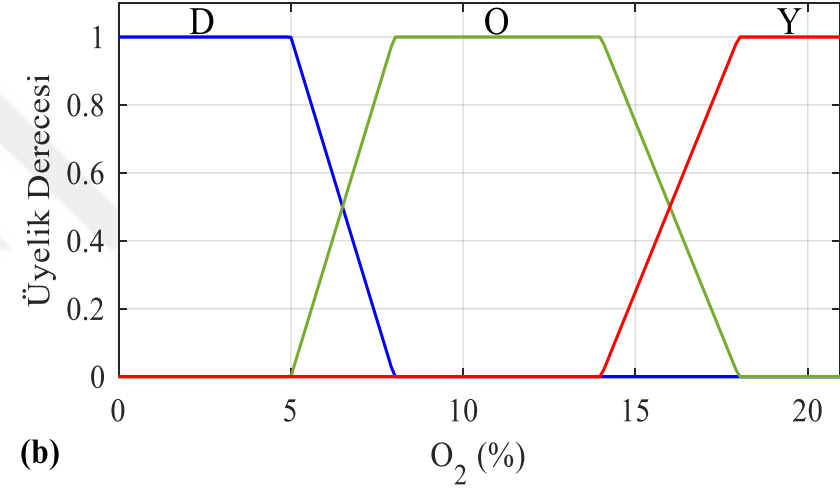
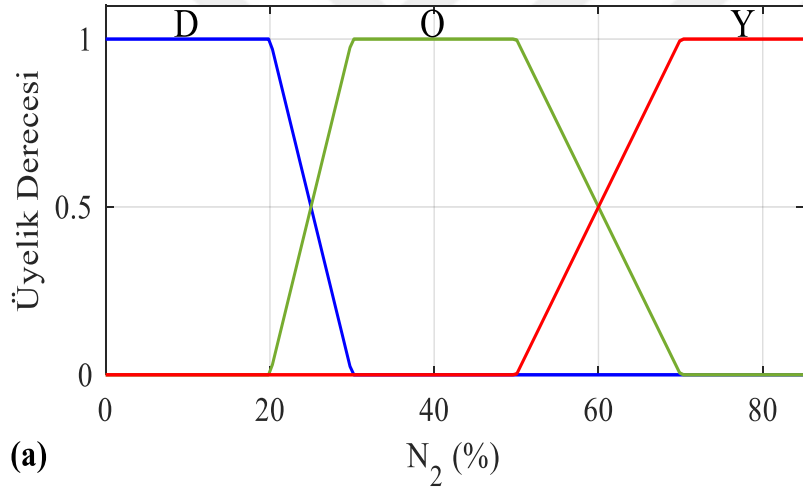
Trapez üyelik fonksiyonu aşağıda verildiği gibi 4 parametre (a, b, c, d) ile ifade edilir. (a, b, c, d) parametreleri X-koordinatında trapezin köşe noktalarının değerlerini ve X kesin girdiyi göstermektedir.

$$\text{Trapez } (x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (5.24)$$

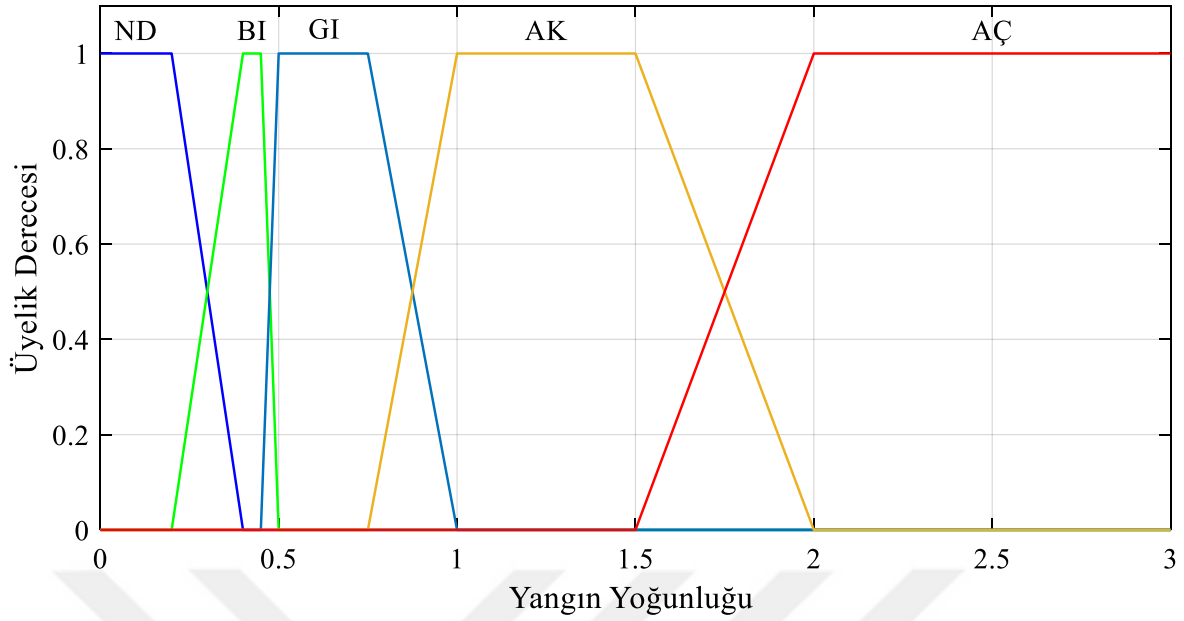
MAK ve MİN kullanıldığında trapez üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi belirtilir:

$$\text{Trapez } (x; a, b, c, d) = \text{MAX} \left(\text{MIN} \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right) \quad (5.25)$$

Bulanık mantık modelini çalıştırmak için MATLAB'daki Bulanık Mantık Araç Kutusu kullanılmıştır. Bir bulanık modeli geliştirmek için ilk adımda, girdi ve çıktı değişkenlerini tanıtmak ve onlara dilsel değerleri vermek gerekir ve her dilsel değerleri için üyelik fonksiyonunun kendi aralıklarıyla göz önünde bulundurulması gerekir. CO, O₂, N₂, CO₂ konsantrasyonu kömürün yangınlarını ve kömürün kendiliğinden yanmasını önceden tahmin etmek için bir gösterge olarak kullanılır (Su vd., 2017). Bu çalışmada, CO, O₂, N₂ ve sıcaklık dilsel girdi değişkenleri olarak, yangın yoğunluğu ise dilsel bir çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada dilsel değişkenleri dilsel değeri vermek için trapez üyelik fonksiyonu kullanılmış ve tüm girdi değişkenlerinin trapez üyelik fonksiyonları grafik olarak Şekil 5.12'te ve çıktı değişkeninin trapez üyelik fonksiyonları grafik olarak Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Trapez ve üçgen üyelik fonksiyonları basit formüllerine sahip olduğundan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Zadeh, 1965).



Şekil 5.12. Girdi değişkenlerinin trapez üyelik fonksiyonları grafik gösterimi; (a) azot konsantrasyonu, (b) oksijen konsantrasyonu, (c) sıcaklık ve (d) karbon monoksit konsantrasyonu.



Şekil 5.13. Çıktı değişkeninin trapez üyelik fonksiyonları grafik gösterimi; yangın yoğunluğu.

Şekil 5.13 incelendiğinde bulanık mantık modeline göre yangın yoğunluğunun derecelendirilmesi Çizelge 5.5'te verilen değerler ile elde edilir.

Çizelge 5.5. Bulanık modeline göre yangın yoğunluğunun derecelendirilmesi.

Bulanık modeli	Açıklamalar
$<0,3$	Normal durum
$\geq 0,3 < 0,48$	Belirli ısınmayı gösterir.
$\geq 0,48 < 0,88$	Gelişmiş aşama ısınma
$\geq 0,88 < 1,8$	Aktif yangın
$\geq 1,8 \leq 3$	Açık yangını gösterir.

5.2.7. Bulanık sistem bileşenleri

5.2.7.1. Bulanıklaştırma

Bulanık mantık sisteminde, girdi kesin veya bulanık kümeler olabilir, ancak çıktılar her zaman bulanık kümelerdir (Jang vd., 1997). Girdiler kesin küme olduğunda, sistemdeki kurallar ile kesin girdi kümeleri bulanık girdi kümelere eşlemek için bulanıklaştırma kullanılır. Bulanıklaştırma alanında, kesin değerler kesin olmayan değerlere dönüştürülür. Başka bir deyişle, her kesin girdi değişkeni için, dilsel değerleri verilip dilsel değerleri üyelik fonksiyonu ile karakterize edilir. Değerleri sayı yerine kelimeler olan değişkenlere dilsel değişkenler denir (Zadeh, 1975). Sıcaklık, CO, O₂, N₂ dilsel girdi değişkenleri ve yangın yoğunluğu dilsel çıktı değişkeni olarak kabul edilmiştir. Her girdi değişkeni için 3 dilsel değeri (Düşük, Orta ve Yüksek) verilmiş olup, çıktı değişkeni için 5 dilsel değeri (Normal Durum, Belirli Isınma, Gelişmiş Isınma, Aktif Yangın ve Açık Yangın) verilmiştir. Çizelge 5.6'da girdi ve çıktı değişkenleri, değişkenlerin dilsel değerleri, üyelik fonksiyonu, üyelik fonksiyonunun aralıkları ve üyelik fonksiyonunun şekilleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. Girdi ve çıktı değişkenleri, dilsel değerleri, üyelik fonksiyonunun şekli, aralık ve üyelik fonksiyonunun parametreleri.

	Değişkenler	Dilsel değerleri	Üyelik fonksiyonunun şekli	Aralık	Üyelik fonksiyonunun parametreleri
Girdi Değişkenleri	Azot (N ₂)	Düşük (D)	Trapez		[0 0 20 30]
		Orta (O)	Trapez	[0-85]	[20 30 50 70]
		Yüksek (Y)	Trapez		[50 70 85 85]
	Oksijen (O ₂)	Düşük (D)	Trapez		[0 0 5 8]
		Orta (O)	Trapez	[0-20,95]	[5 8 14 18]
		Yüksek (Y)	Trapez		[14 18 20,5 20,95]
	Sıcaklık (S)	Düşük (D)	Trapez		[0 0 10 15]
		Orta (O)	Trapez	[0-45]	[10 15 20 30]
		Yüksek (Y)	Trapez		[20 30 45 45]
Karbon Monoksit (CO)	Düşük (D)	Trapez		[0 0 0,001 0,002]	
	Orta (O)	Trapez	[0-0,006]	[0,001 0,002 0,004 0,0045]	
	Yüksek (Y)	Trapez		[0,004 0,0045 0,006 0,006]	
Çıktı Değişkeni	Yangın Yoğunluğu (YY)	Normal Durum (ND)	Trapez		[0 0 0,2 0,4]
		Belirli Isınma (BI)	Trapez		[0,2 0,4 0,45 0,5]
		Gelişmiş Isınma (GI)	Trapez	[0-3]	[0,45 0,5 0,75 1]
		Aktif Yangın (AK)	Trapez		[0,75 1 1,5 2]
		Açık Yangın (AÇ)	Trapez		[1,5 2 3 3]

5.2.7.2. Bulanık kurallar ve çıkarım motoru

Bulanık mantık modelinin bu iki bileşeni birlikte çalışıp, bulanık mantık teorisine dayanan ve bulanık mantık sisteminin omurgası olarak bilinen önemli modelleme araçlarını oluştururlar. Girdiler ile çıktılar arasındaki mantıksal ilişki “EĞER-O ZAMAN” kuralları (Eşitlik 5.26) tarafından tanımlanmıştır. Bulanık kuralları öncül (EĞER) ve soncul (O ZAMAN) olarak iki bölümden oluşur. Bulanık ilişkileri, sırasıyla MİN, MAX ve tümleyen operatörler olarak adlandırılan “VE”, “VEYA” ve “DEĞİL” gibi çeşitli operatörler ile birleştirilebilir (Jang vd., 1997). Bu çalışmada, bulanık mantık modelinde bulanık ilişkileri oluşturmak için “VE” operatörü kullanılmıştır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Eşitlik 5.27).

$$R_i = \text{Eğer} (X_1 A_{i1} \text{ ise ve } X_2 A_{i2} \text{ ise ve... ve } X_n A_{in} \text{ ise}) \text{ O ZAMAN } (Y D_i \text{ 'dir}) \quad (5.26)$$

Burada, R_i , R_i^{th} kuralın numarası olup, X_1, X_2, X_n girdi değişkenleri ve Y çıktı değişkenidir. A_{i1}, A_{i2}, A_{in} girdi ve D_i çıktı dilsel değerleridir. Eşitlik 5.27’de sırasıyla $(X_1 A_{i1} \text{ ise ve } X_2 A_{i2} \text{ ise ve...ve } X_n A_{in} \text{ ise})$ ve $(Y D_i \text{ 'dir})$ öncül ve soncul olarak adlandırılmıştır.

$$\mu_{f_i}(x_i) \text{ ve } \mu_{f_j}(x_j) = \mu_{f_i}(x_i) \cap \mu_{f_j}(x_j) = \text{MİN}(\mu_{f_i}(x_i), \mu_{f_j}(x_j)) \quad (5.27)$$

Burada, $\mu_{f_i}(x_i)$ ve $\mu_{f_j}(x_j)$, sırasıyla F_i ve F_j bulanık kümelerinin üyelik fonksiyonlarıdır.

Bulanık kurallar ve çıkarım motoru aynı zamanda denetleyiciler olarak da adlandırılır. Çünkü bulanık motoru tüm bulanık girdileri, bulanık mantık teorilerini kullanarak ve “EĞER-O ZAMAN” kurallarına dayanan, işleyip karar verme aşamasında kullanılan bulanık çıktı kümelerini oluşturur (Şekil 5.14). Bu çalışmada, dört girdi değişken ve bir çıktı değişken seçilmiştir. Her gidi değişken için 3 dilsel değer ve çıktı değişken için 5 dilsel değer verilmiştir. Toplam olarak değişkenler için 17 dilsel değer verilmiştir. 17 dilsel değere göre 405 kural yazılabilir ama 81 kuraldan fazla olduğunda bazı kurallar tekrar olabilir. Bu nedenle, kömürün kendiliğinden yanmasını tahmin etmek

Çizelge 5.8. Kömürün yangını tahmin etmek için tüm kısaltılmış bulanık kuralları.

R#	Girdiler					Çıktı	R#	Girdiler					Çıktı	R#	Girdiler					Çıktı
	N ₂	O ₂	S	CO	YY			N ₂	O ₂	S	CO	YY			N ₂	O ₂	S	CO	YY	
1	D	D	D	Y	AK	28	O	D	D	Y	AÇ	55	Y	D	D	Y	AK			
2	D	D	D	O	GI	29	O	D	D	O	AK	56	Y	D	D	O	GI			
3	D	D	D	D	BI	30	O	D	D	D	GI	57	Y	D	D	D	BI			
4	D	D	O	Y	AÇ	31	O	D	O	Y	AÇ	58	Y	D	O	Y	AÇ			
5	D	D	O	O	AK	32	O	D	O	O	AK	59	Y	D	O	O	AK			
6	D	D	O	D	GI	33	O	D	O	D	GI	60	Y	D	O	D	GI			
7	D	D	Y	Y	AÇ	34	O	D	Y	Y	AÇ	61	Y	D	Y	Y	AÇ			
8	D	D	Y	O	AÇ	35	O	D	Y	O	AK	62	Y	D	Y	O	AÇ			
9	D	D	Y	D	GI	36	O	D	Y	D	GI	63	Y	D	Y	D	GI			
10	D	O	D	Y	GI	37	O	O	D	Y	AK	64	Y	O	D	Y	AK			
11	D	O	D	O	BI	38	O	O	D	O	BI	65	Y	O	D	O	BI			
12	D	O	D	D	ND	39	O	O	D	D	ND	66	Y	O	D	D	ND			
13	D	O	O	Y	AÇ	40	O	O	O	Y	AK	67	Y	O	O	Y	GI			
14	D	O	O	O	AK	41	O	O	O	O	GI	68	Y	O	O	O	BI			
15	D	O	O	D	GI	42	O	O	O	D	BI	69	Y	O	O	D	ND			
16	D	O	Y	Y	AÇ	43	O	O	Y	Y	AÇ	70	Y	O	Y	Y	AK			
17	D	O	Y	O	AÇ	44	O	O	Y	O	AK	71	Y	O	Y	O	GI			
18	D	O	Y	D	GI	45	O	O	Y	D	AK	72	Y	O	Y	D	BI			
19	D	Y	D	Y	AK	46	O	Y	D	Y	AK	73	Y	Y	D	Y	GI			
20	D	Y	D	O	GI	47	O	Y	D	O	BI	74	Y	Y	D	O	BI			
21	D	Y	D	D	ND	48	O	Y	D	D	ND	75	Y	Y	D	D	ND			
22	D	Y	O	Y	GI	49	O	Y	O	Y	GI	76	Y	Y	O	Y	GI			
23	D	Y	O	O	BI	50	O	Y	O	O	BI	77	Y	Y	O	O	BI			
24	D	Y	O	D	ND	51	O	Y	O	D	ND	78	Y	Y	O	D	ND			
25	D	Y	Y	Y	AÇ	52	O	Y	Y	Y	GI	79	Y	Y	Y	Y	AK			
26	D	Y	Y	O	AK	53	O	Y	Y	O	GI	80	Y	Y	Y	O	GI			
27	D	Y	Y	D	GI	54	O	Y	Y	D	BI	81	Y	Y	Y	D	BI			

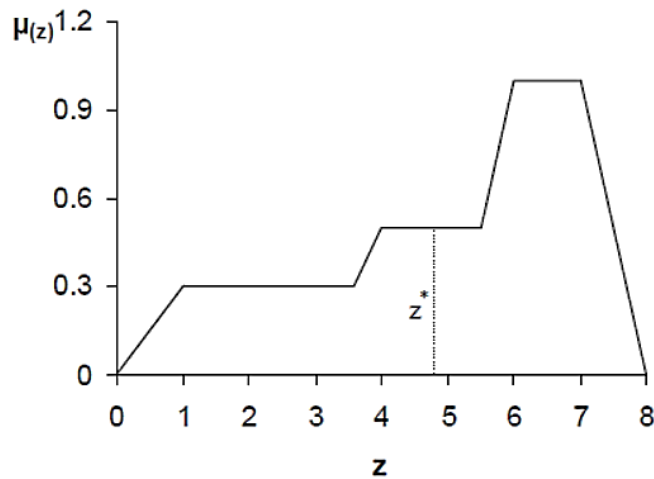
Not: D: Düşük; O: Orta; Y: Yüksek; ND: Normal Durum; BI: Belirli Isınma; GI: Gelişmiş Isınma; AK: Aktif Yangın; AÇ: Açık Yangın.

5.2.7.3. Durulaştırma

Durulaştırma işlemlerinin niteliği, bulanıklaştırma işlemlerinin tam tersidir. Bölüm 5.2.8.1'de belirtildiği gibi bulanık mantık modelinin girdileri bulanık kümeler veya kesin kümeler olabilir, ancak çıktılar her zaman bulanık kümelerdir. Yangın yoğunluğunu tanımak için, diğer gaz endeksleri gibi, gerçek dünyada karar verme için kesin bir değere ihtiyaç duyar, bulanık mantık modelinin genel yapısında gösterildiği gibi (Bkz. Şekil 5.6). Bu sebeple, durulaştırma işlemi yapılmalıdır. Alanın merkezi yöntemi (COA), alanın açıortayı yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemi, en büyük alanın merkezi yöntemi, ortalama en büyük üyelik yöntemi, en büyük üyelik yöntemi, toplamların merkezi yöntemi ve maksimum ilki veya sonu yöntemi olduğu gibi 8 farklı durulaştırma yöntemi vardır. Bunlar arasında, (COA) yöntemi farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Jang vd., 1997) (Şekil 5.15). Bu çalışmada, Yaygın olarak kullanılan (COA) durulaştırma yöntemi kullanılmış olup ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Z^*_{COA} = \frac{\int_z \mu_A(z)z dz}{\int_z \mu_A(z) dz} \quad (5.28)$$

Burada, $\mu_A(z)$, A çıktı bulanık kümelerinin toplam üyelik fonksiyonu, \int cebirsel entegrasyonunun işareti olup Z^*_{COA} kesin değeridir.



Şekil 5.15. Alanın merkezi durulaştırma yönteminin grafiği (İphar'dan, 2004).

5.2.8. Bulanık çıkarım sistemlerinin türleri

Bulanık çıkarım sistemi, bulanık küme teorisi, bulanık “EĞER-O ZAMAN” kuralları ve bulanık akıl yürütme ilkelerine dayanan ünlü bir hesaplama birimidir. Bulanık sistem; veri sınıflandırması, otomatik kontrol, uzman sistem, karar analizi, robotik sistemi, zaman serilerinin tahmini ve örüntü tanıma gibi çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmıştır (Jang vd., 1997). Bulanık çıkarım sistemleri farklı alanlarda kullanıldığı için bulanık uzman sistemler, bulanık model, bulanık kural tabanlı sistemi ve bulanık sistem gibi değişik isimler ile bilinmektedir (Zadeh, 1965).

Genel olarak, Mamdani sistemi, Sugeno (TSK) modeli ve Tsukamoto modeli gibi dilsel kurallara dayanan çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan 3 bulanık çıkarım sistemi vardır (Ross, 2005).

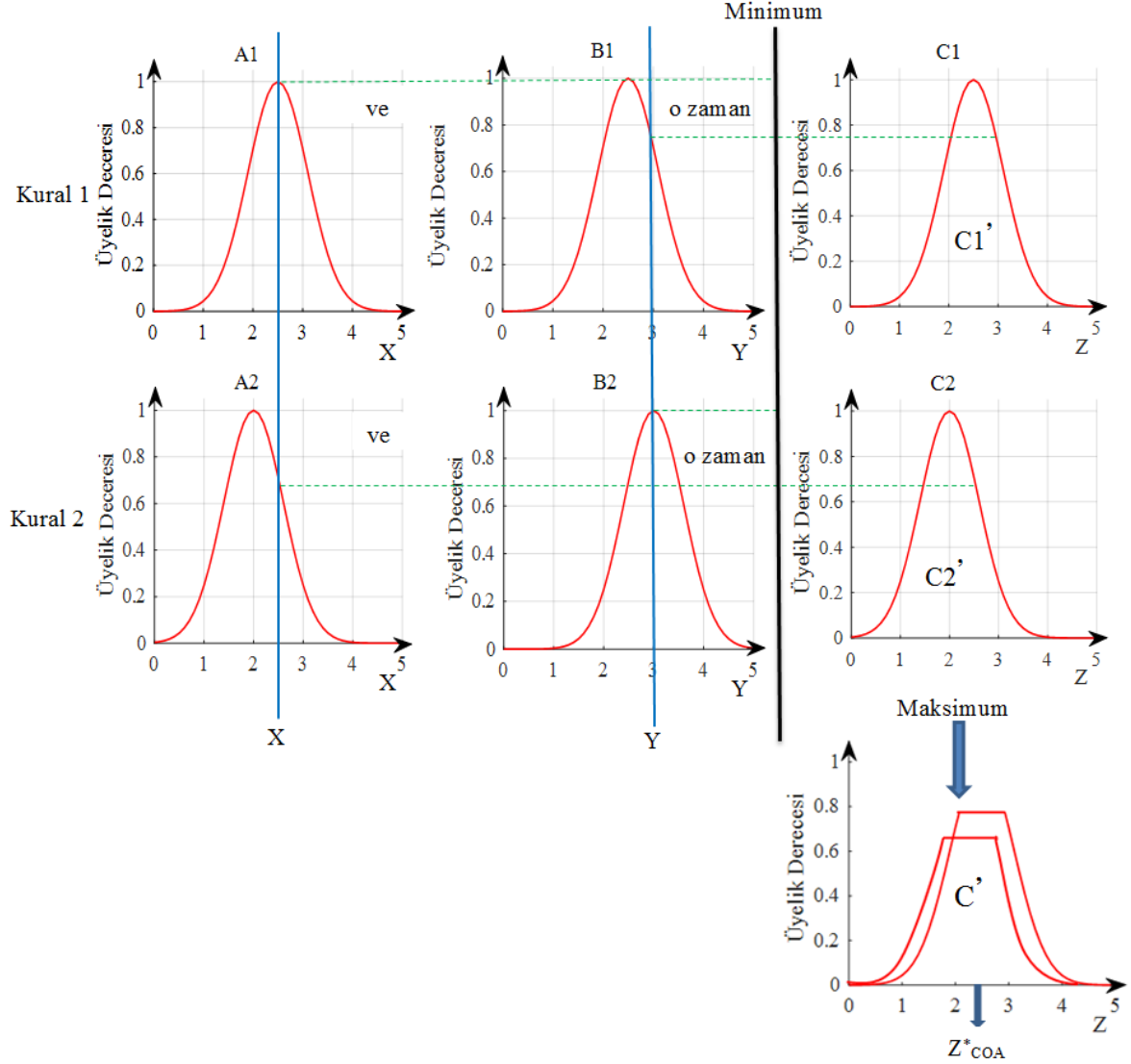
5.2.8.1. Mamdani bulanık çıkarım sistemi

Mamdani bulanık çıkarım sistemi, ilkiz 1975 yılında Ebrahim Mamdani tarafından buhar makinesi ve kaynama kombinasyonunun hızı ve basıncı kontrol etmek için öne sürülmüştür. Mamdani bulanık çıkarım sistemi literatürde en çok kullanılan ve bulanık küme teorisine ve dilsel küme kurallarına dayanan bulanık çıkarım sistemidir. Şekil 5.16’da iki kural tabanlı Mamdani bulanık çıkarım sisteminin verebileceği sonucu göstermektedir.

Mamdani bulanık sisteminde, nihai sonucu elde etmek için bulanık kuralları aşağıdaki gibi ifade edilir. Mamdani bulanık sisteminin kurallarının birleştirilmesi için farklı operatörler (“VE”, “VEYA” ve “DEĞİL”) kullanılabilir ancak en çok kullanılan ve basit olan “VE” operatörü olup aşağıdaki eşitlikte kullanılmıştır.

$$\text{Eğer } X_1 A_{i1}^k \text{ ise ve } X_2 A_{i2}^k \text{ ise } \dots \dots X_r A_{ir}^k \text{ ise } O \text{ ZAMAN } Y^k D_i^k \text{ 'dir} \quad (5.29)$$

Burada, A_{i1}^k ve A_{i2}^k , k^{th} kuralın öncülünde dilsel değerleri olup D_i^k ise k^{th} kuralın sonculunda dilsel değeri, X ve Y sırasıyla öncülünde ve sonculunda girdi ve çıktı değişkenleridir.



Şekil 5.16. Minimum ve maksimum operatörlerinin kullanıldığı 2 kuralı Mamdani bulanık çıkarım sistemi.

Şekil 5.16'da görüldüğü gibi Z^*_{COA} kesin değeri elde etmek için iki bulanık girdi değişkeni ve bir çıktı bulanık değişkeni kullanılmıştır. A ve B girdi bulanık değişkenleri ve C ise çıktı bulanık değişkenidir. Minimum ve maksimum operatörleri kullanıldığından dolayı ilk önce girdi alanında kurallardan minimum üyelik fonksiyonunun değerleri ve sonra çıktı kısmında kurallardan maksimum üyelik fonksiyonunun değerleri seçilir.

Minimum ve maksimum operatörlerinin kullanıldığı 2 kuralı Mamdani bulanık çıkarım sistemi Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Eğer minimum ve maksimum operatörleri yerine maksimum-çarpım operatörü kullanılırsa bulanık çıkarım sistemi değişik şekli alır ancak yine de Mamdani sisteminde sonuç her zaman bulanık küme olarak elde edilir. Bulanık kümeden kesin bir değer elde etmek için, bölüm 5.2.8.3'te verildiği gibi alanın merkezi durulaştırma yöntemi uygulanmıştır.

5.2.8.2. Sugeno bulanık çıkarım sistemi

Sugeno bulanık çıkarım sistemi veya başka bir adıyla TSK bulanık çıkarım sistemi Takagi, Sugeno ve Kang tarafından geliştirilmiştir (Sugeno ve Kang, 1988; Takagi ve Sugeno, 1985). TSK'nin bilgi tabanı, klasik fonksiyonlar biçimindeki sonucullarıyla koşullu bulanık kurallardan oluşmaktadır. TSK bulanık çıkarım sisteminde girdiler sayı olarak verilir, çıktı için her kural sayısal bir fonksiyon olarak elde edilir. TSK'nin en önemli avantajı, sayısal çıktıları belirlemek için çıkarım işleminde durulaştırmayı içermediğinden dolayı az hesaplama yapılır. Ancak, TSK bulanık çıkarım sistemi farklı bulanık kuralların yorumlamasına ve farklı toplama operatörlerinin uygulanmasına izin vermez. Daha fazla açıklama için, tipik bulanık kuralı TSK bulanık çıkarım sistemi için aşağıda verilmiştir:

$$\text{Eğer } X_1 A_{i1} \text{ ise ve } X_2 A_{i2} \text{ ise} \dots \dots \dots X_r A_{ir} \text{ ise O ZAMAN } Z = f(X_1, X_2, X_r) \quad (5.30)$$

Burada' A_{i1} ve A_{i2} TSK bulanık kuralının öncülünde bulanık kümeleri ve $Z = f(X_1, X_2, X_r)$ ise TSK bulanık kuralının sonucunda kesin bir fonksiyondur.

TSK bulanık çıkarım sisteminde her kural için çıktılar bulanık kümeden oluşturulmadığından dolayı son kesin çıktının değeri ağırlıklı toplam veya ağırlıklı ortalama ile elde edilir.

5.2.8.3. Tsukamoto bulanık çıkarım sistemi

Tsukamoto bulanık sisteminde, her kural için kesin çıktı elde edildiğinden dolayı durulaştırma aşamasını ortadan kaldırmış olur ve son çıktı ise ağırlıklı ortalama yöntemi ile elde edilir. Ancak, Tsukamoto bulanık sistemi, Mamdani ve Sugeno bulanık sistemlerine göre açık olmamasından dolayı her alanında çok sık olarak kullanılmamaktadır (Jang vd., 1997). Tsukamoto bulanık sisteminin akıl yürütme mekanizması kesin olarak çıkarım kuralının kompozisyonuna uymadığından, girdiler bulanık olsa bile çıktı her zaman kesin değerdir.

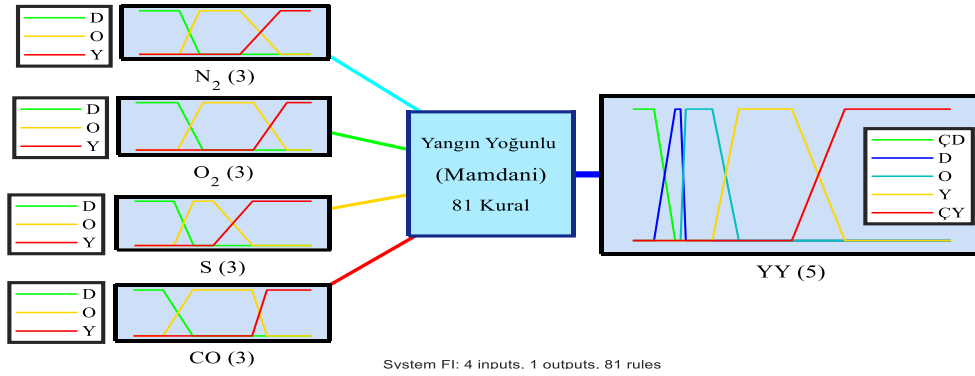
Yukarıda belirtilen bulanık çıkarım sistemlerinin arasındaki farkları, bulanık kurallarının sonucu, toplanması ve durulaştırmasındadır. Böylece, Mamdani sisteminde çıktı bulanık küme olarak verilmiştir; ancak TSK modelinde ise sonuç polinom fonksiyonu olarak verilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada, kömürün kendiliğinden yanmasının tahmin edilmesinde, yorumlamasının kolaylığı, insan görüşünün daha etkin olması ve kullanım kolaylığından dolayı, Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kendiliğinden yanma, yeraltı kömür madenlerinde önemli yangınlara neden olur. Yeraltı kömür madenlerinde kömür yangınına erken evrede tespit ve tahmin etmek için çeşitli yöntemler kullanılır. Kömürün kendiliğinden yanmasının sırasında, bazı zehirli ve patlayabilir gazlar üretilir. Kömür yangınına tespit etmek için CO, CO₂, N₂, CH₄, vb. gibi gaz göstergeleri kullanılmaktadır. Sonuç olarak, yeraltı kömür madenlerinde yangın durumu tahmin etmek ve değerlendirmek için birçok yangın oranı kullanılır. En yaygın kullanılan yangın oranları, karbon oksitler oranı (CO/CO₂), Willet oranı, Jones ve Trickett oranı, Graham oranı, Young oranı, kuru kül içermeyen oksijen indeksi, hidrokarbon indeksi ve (N₂/(CO+CO₂)) oranlarıdır. Bunların arasında yaygın olarak kullanılmakta olan Graham oranı, yorumlama kolaylığı, yangının erken ve ileri aşamalarında kullanılabilmesi, karbon dioksit içermemesi, hem havalandırılmış alanlarda hem de kapalı alanlarda kullanılabilmesi gibi özelliklere sahip olduğundan dolayı yangın durumunu tespit etmek ve değerlendirmek için kullanılmıştır (Bkz. Eşitlik 3.1). Kömürün kendiliğinden yanması sırasında, sıcaklıktaki artış yeraltı kömür madenlerinde oksijen tüketimi ile birlikte gaz üretimini de artırır. Yeraltı kömür madenlerinde kömür yangınına tahmin etmek için en belirleyici parametreler oksijen, CO, CO₂, N₂ ve sıcaklıktır.

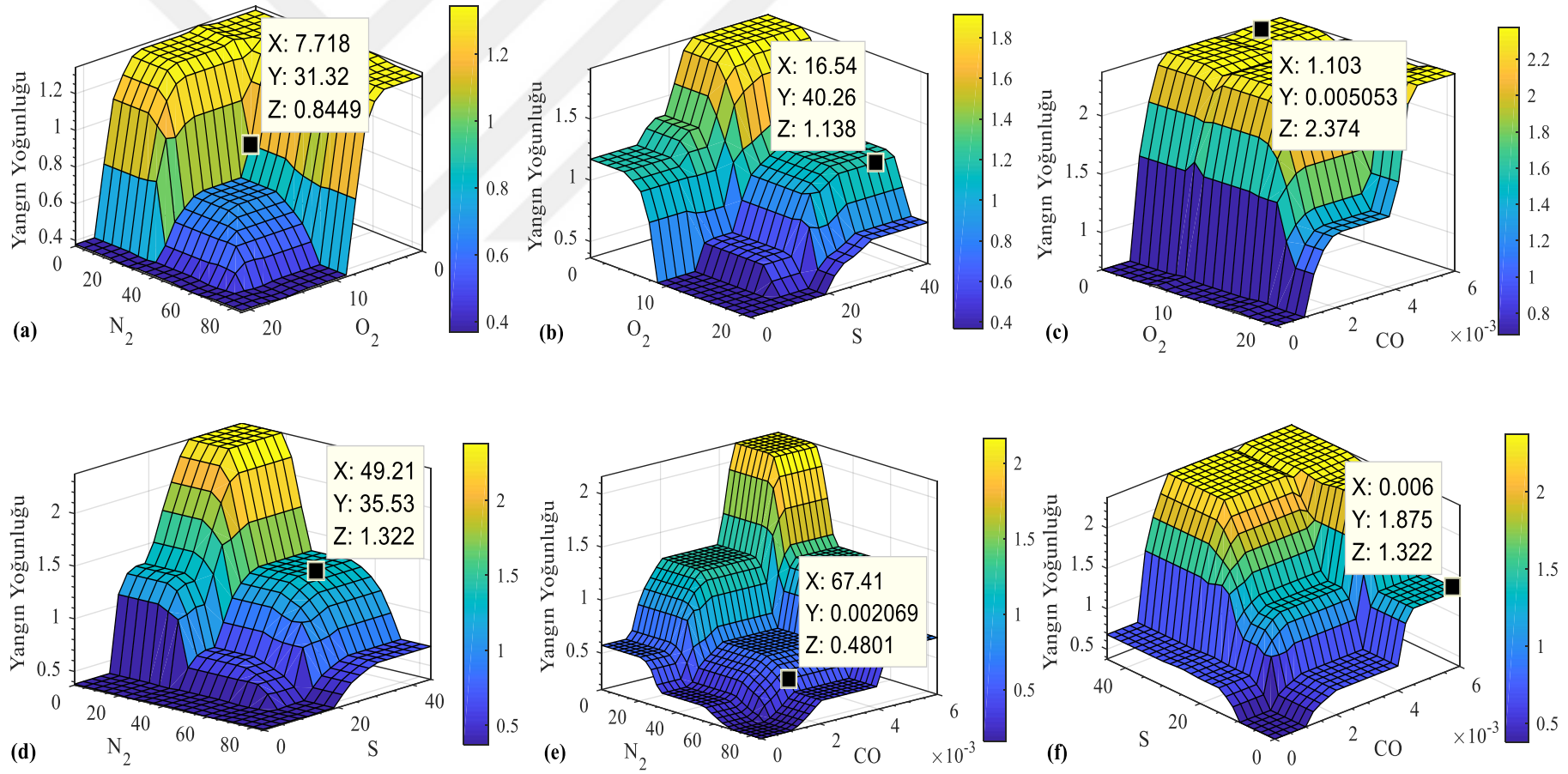
Adularya yeraltı kömür madeni, kömürün kendiliğinden yanmasına ve yangına yatkın olup olmadığını değerlendirmek için bir örnek işyeri olarak seçilmiştir. Veriler, Çizelge 5.1'de gösterildiği gibi 2017 yıl içerisinde Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan 10 gaz izleme istasyonundan toplanmıştır. Bu çalışmada, Adularya yeraltı kömür madeninde yangın durumunu tahmin etmek ve değerlendirmek için bir bulanık mantık modeli önerilmiştir. Önerilen bulanık mantık modelinde N₂, O₂, CO ve sıcaklık girdi değişkenleri, yangın yoğunluğu ise çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır (Şekil 6.1). Bulanık mantık modelini simüle etmek için, Intel Core i7-4500U, 1.80GHz CPU ve Microsoft Windows 8.1Pro platformunda ve 16GB RAM içeren bir sistemde MATLAB R2017a'daki Bulanık Mantık Araç Kutusu kullanılmıştır. Bölüm 5.2.3'te belirtildiği gibi bulanık mantık sistemi; bulanıklaştırma, kural tabanı, çıkarım motoru ve durulaştırma gibi 4 bileşenden oluşur.



Şekil 6.1. Dört girdi ve bir çıktı değişkene sahip olan bulanık simülasyon modelinin ana yapısı.

Bulanıklaştırma aşamasında, girdi olarak verilen kesin değerleri, dilsel değerleri Çizelge 5.5 ve trapez üyelik fonksiyonunun şekli ise Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilerek bulanık girdilere dönüştürülmüştür. Kural tabanının oluşturulması aşamasında Çizelge 5.7'de gösterildiği gibi uzman görüşüne dayanan, Eşitlik 5.26'yı kullanılarak 81 "EĞER-O ZAMAN" kuralı yazılmıştır. Çıkarım motoru adımı, olarak kullanılan, kural tabanlı ve insan görüşüne dayanan Mamdani bulanık çıkarım sistemini (Eşitlik 5.29) kullanılarak bulanık çıktı kümeleri üretilmiştir. Durulaştırma aşamasında, diğer yangın endeksleri gibi yangın durumunun yorumlanması için kesin bir değer elde etmek amacıyla alanın merkezi durulaştırma yöntemi kullanılmış olup, Eşitlik 5.28 ile elde edilir.

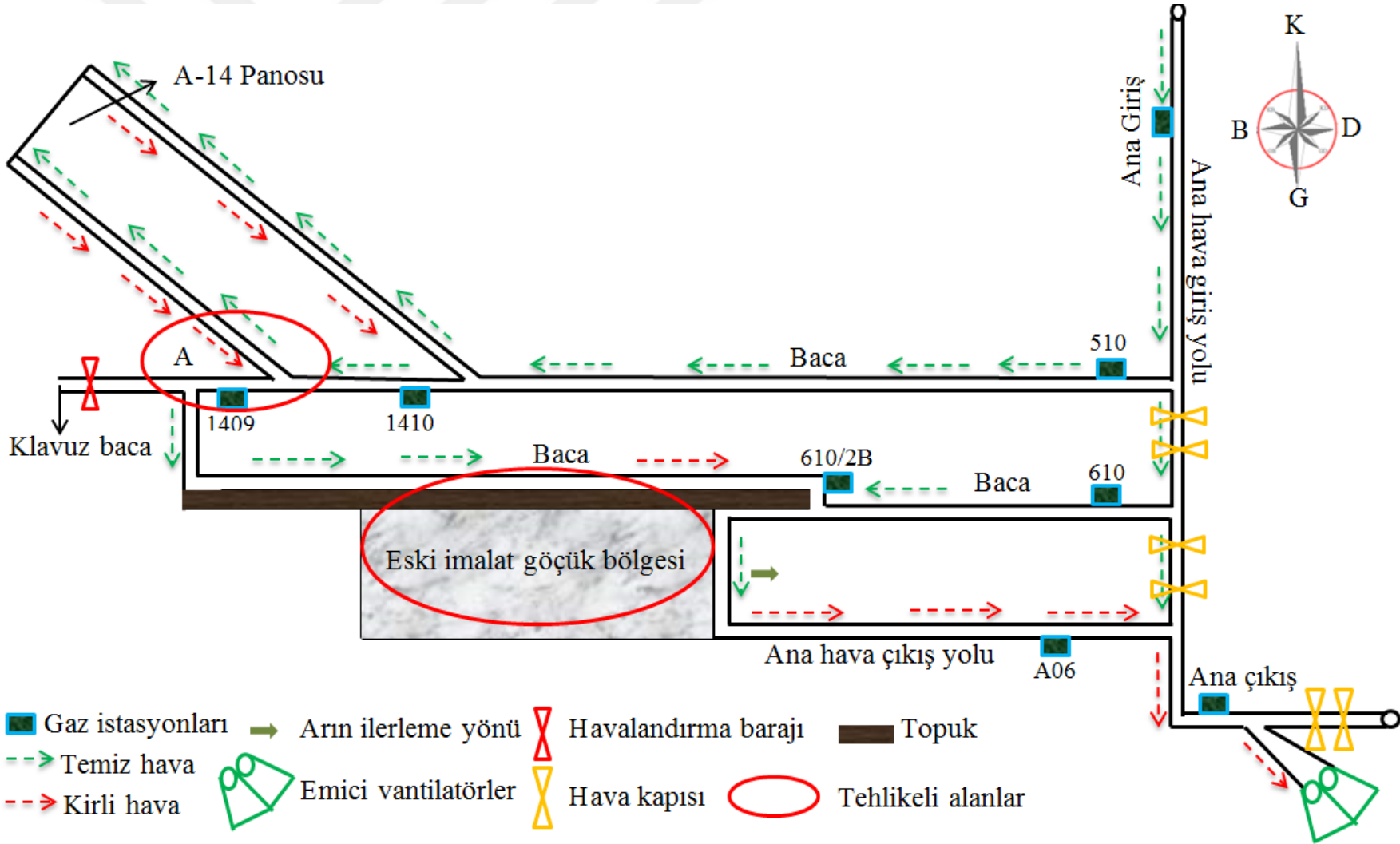
Şekil 6.2'de girdi değişkenlerinin çeşitli kombinasyonlarına göre, bulanık modeli yangın yoğunluğunu tahmin etmede doğru çalışmaktadır. Şekil 6.2.a'da sıcaklık ve CO değerleri sabit tutulmuş, oksijen konsantrasyonunun % 7,718 ve azot konsantrasyonunun % 31,32 olduğunda yangın yoğunluğunun 0,8449 olduğunu bulunmuştur. Şekil 6.2.b'de CO ve N₂ değerleri sabit tutulmuş, oksijen konsantrasyonunun % 16,54 ve sıcaklık 40,26 °C olduğunda yangın yoğunluğunun 1,138 olduğunu bulunmuştur. Şekil 6.2.c'de N₂ ve sıcaklık değerleri sabit tutulmuş, oksijen konsantrasyonu % 1,103 ve CO % 0,005053 ise, yangın yoğunluğu 2,374'tür. Ayrıca, Şekil 6.2.d'de O₂ ve CO değerleri sabit tutulmuş, azot konsantrasyonu % 49,21 ve sıcaklık 35,53 °C ise, yangın yoğunluğunun 1,322 olduğunu bulunmuştur. Şekil 6.2.e'de O₂ ve sıcaklık değerleri sabit tutulmuş, azot konsantrasyonu % 67,41 ve CO % 0,002069 ise, yangın yoğunluğunun 0,4801 olduğunu bulunmuştur. Şekil 6.2.f'de O₂ ve N₂ değerleri sabit tutulmuş, sıcaklık 1,875 °C ve CO % 0,006 ise, yangın yoğunluğunun 1,322 olduğunu bulunmuştur. Bu bulanık modeli için yangın yoğunluğunun sınıflandırılması Çizelge 5.5'te gösterilmiştir. Bulanık modeli ile yangın yoğunluğunun değerlendirilmesi, birçok değişkenin eşzamanlı olarak analiz edilmesi, değişkenlerin kolay bir şekilde girilmesi ve zaman tasarrufu sağlanması açısından faydalıdır.



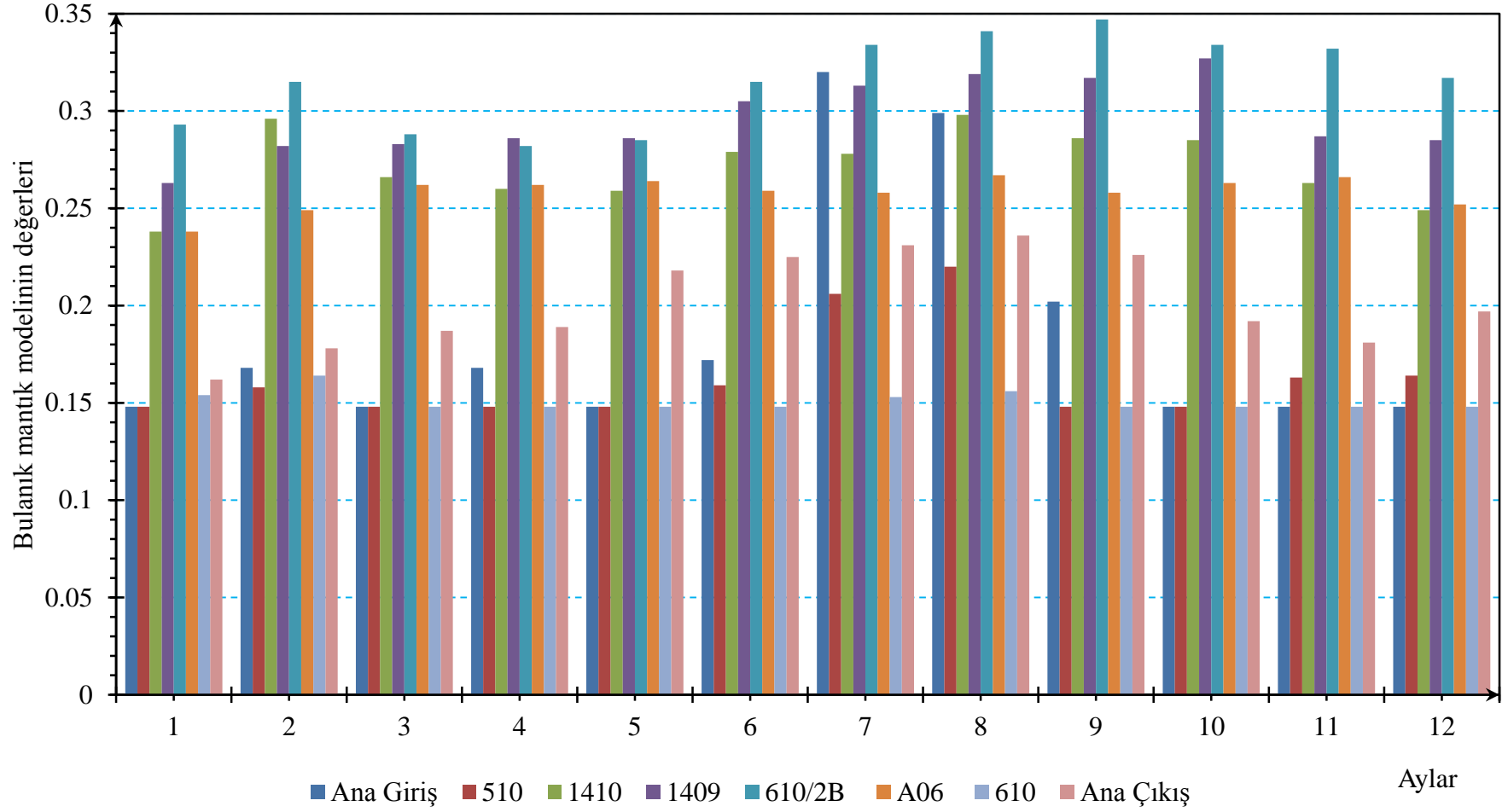
Şekil 6.2. Çeşitli bulanık girdi kombinasyonları ile birlikte bulanık kurallarına göre grafik olarak yangın yoğunluğunun yorumlanması; (a) oksijen ve azot, (b) oksijen ve sıcaklık, (c) oksijen ve karbon monoksit, (d) azot ve sıcaklık, (e) azot ve karbon monoksit, (f) sıcaklık ve karbon monoksit.

Adularya yeraltı kömür madeninde bulanık modeli ile kendiliğinden yanmayı tahmin etmek amacıyla, her bir gaz izleme istasyonu için hesaplama yapılmıştır. Temiz hava ana giriş havayolundan gelerek 510 numaralı bacadan geçer, 1410 ve ardından 1409 numaralı bacaları havalandırır (Şekil 6.3). O₂, CO, N₂ ve sıcaklık kullanılarak oluşturulan bulanık çıktı kümeleri ile (Şekil 5.14) yapılan hesaplama sonucunda, Şekil 6.4'te de görüldüğü gibi 1409 ve 610/2B gaz izleme istasyonu noktalarında yüksek değerler bulunmuştur. Hazırlık galerisinde bulunan 1409 gaz izleme istasyonunda, havalandırma sistemi seri olarak çalıştığından ve galeri açma makinesinin de çalışmasından dolayı hava kirlenir ve ayrıca sıcaklık da artar. 1409 numaralı istasyona yakın olan ve A olarak adlandırılan bölgede kömürün kendiliğinden yanmasının en önemli nedeni; klavuz baca olarak adlandırılan bacanın üretim ön hazırlığı olarak sürülmesinden kısa bir süre sonra fay nedeniyle kömür kaybolmuştur. Bu süreçte işletme yönetimi burada üretimi durdurmuş ve baraj yaparak bu bölgeyi terk etmiştir. Dolayısıyla, bir miktar ilerleme yapılan bu bölgede tavan tabakalarında bir hareketlenme olmuş, bu durumda hava kaçağı meydana getirmiştir. Laminer olan bu hava kaçağı kömür ile temasa girmiş ve kendiliğinden yanmayı oluşturmuştur. Ayrıca, 1409 numaralı istasyon bir kavşak noktasında bulunmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen çatlaklar hava kaçaklarına izin verdiği için yanma olayı artmıştır. 610/2B gaz izleme istasyonu ise, eski imalat alanına paralel olan bacanın ortasında olup, çalışılmakta olan ayağa yakındır. Eski imalat göçük bölgesinin etkisini azaltmak amacıyla topuk bırakılmıştır. Ancak bu topuk üzerine gelen aşırı yük basıncı topukta çatlamalara neden olmuştur. Aşırı basınç aynı zamanda yanından geçen bacanın kesitinde daralmaya sebep olmuştur. Bu kesit daralması hava akımının basınç farkını artırdığından hava kaçakları artmış ve bu durum yanmayı artırmıştır. Ayrıca, eski imalat göçük bölgesinde kalan kömür de yanmaya neden olmaktadır. Böylece, galeri kesit alanı azaldığında, hava basıncı yükselir ve çatlaklar ve faylardan eski imalat içerisine hava kaçağı meydana gelip, kömürün kendiliğinden yanması eski imalatta daha da hızlanır. Yeraltı kömür madenlerinde, kömür damarı üretildiğinde, eski imalat içerisindeki atık kömürler düşük sıcaklıkta oksidasyona maruz kalarak kömürlerin tutuşmasına neden olabilirler. Sonuç olarak, Adularya yeraltı kömür madeninde, eski imalat alanı göçük bölgesi kendiliğinden yanma için en tehlikeli yer olup Taraba ve Michalec'nin (2011) elde ettikleri sonuçları ile aynı doğrultudadır. Bununla birlikte, 1409 numaralı istasyon bölgesinde kendiliğinden yanma olayı için diğer tehlikeli bölgedir (Şekil 6.3).

Her bir gaz izleme istasyonu için bulanık modelinin sonucu, yukarıda açıklanan 610/2B ve 1409 istasyonlar dışında, ana girişten dönüş hava yoluna doğru değerin kademeli olarak arttığını göstermekte olup, Muduli vd.'nin (2018) elde ettikleri sonuçları ile aynı doğrultudadır. Ayrıca, Şekil 6.4'te görüldüğü gibi Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarındaki değerler diğer aylara göre daha yüksek olup, kömürün kendiliğinden yanmasının değerlerin mevsimsel olarak değişebileceğini de göstermektedir. Özellikle yaz aylarında hava sıcaklığının yüksek olması ocak hava akımının da sıcaklığını artırmaktadır. Bu durum kömürden havaya olan ısı transferini azaltarak yanmayı artırabilir. Ana giriş gaz izleme istasyonu için Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında bulanık modelinin değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 6.4). Bu da bulanık modelin bu aylardaki hava sıcaklığının artmasından etkilenebileceğini göstermektedir.



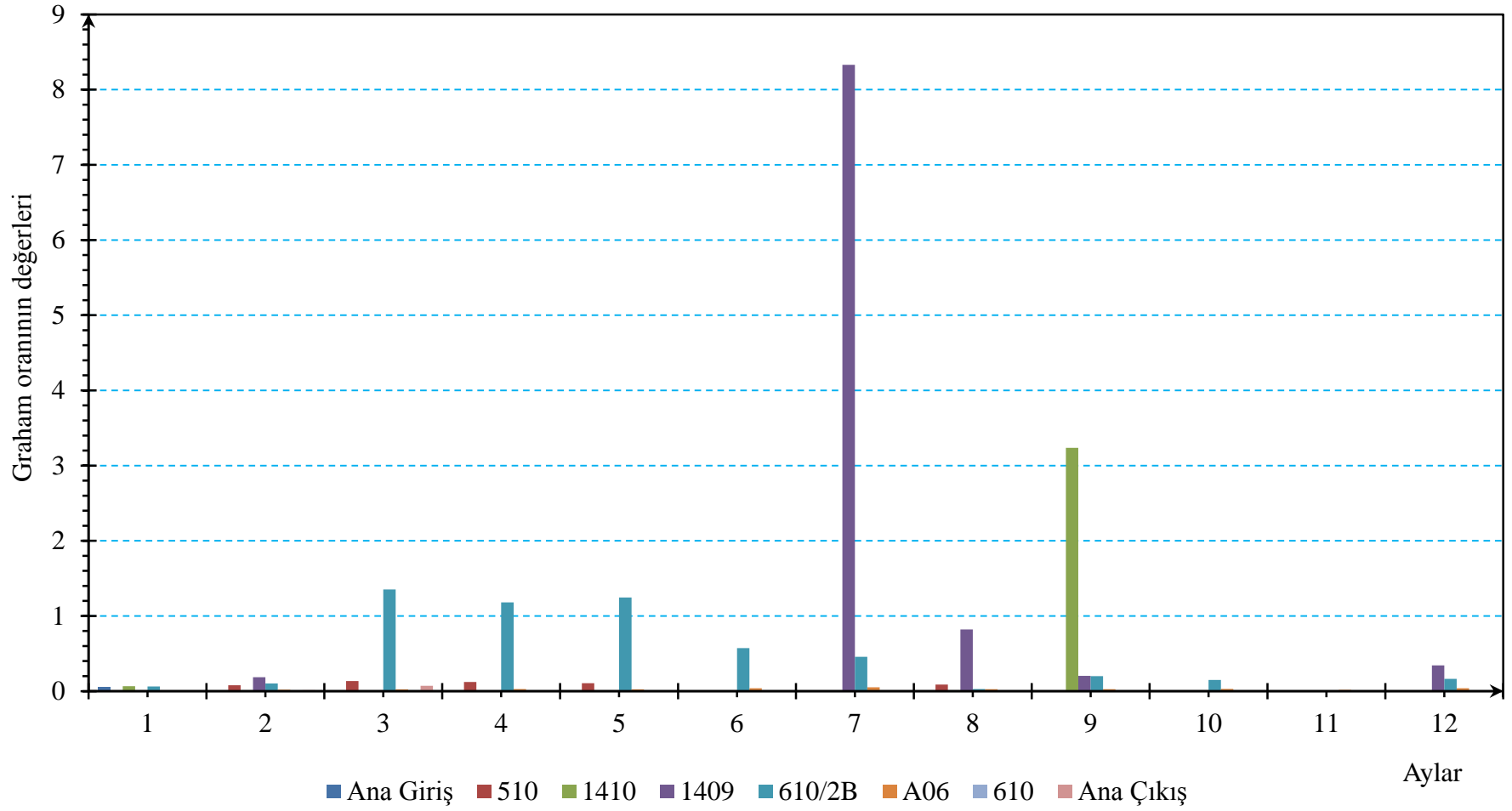
Şekil 6.3. Kendiliğinden yanmaya yatkın ve tehlikeli alanların gösterimi.



Şekil 6.4. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz izleme istasyonu için bulanık modelinin değerleri.

Bulanık modelinin doğrulanması amacıyla, bulanık mantık modelinin sonucu Graham oranının sonucuyla karşılaştırılmıştır (Şekil 6.5). Bulanık mantık modelinin sonucunun daha güvenilir olduğu ve 4 değişkeninin eşzamanlı olarak analiz edilmesinin yangın yoğunluğunun tahmin edilmesinde daha güvenilir sonuçlar verdiği bulunmuştur. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi Graham oranının değerleri 1409 ve 610/2B istasyonlarında artmaktadır. Graham oranı Temmuz ve Eylül ayların arasında 1409 ve 1410 istasyonlarında yüksek bir artış göstermiştir.





Şekil 6.5. Adularya yeraltı kömür madeninde bulunan her bir gaz izleme istasyonu için Graham oranının değerleri.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kömürün kendiliğinden yanması yeraltı kömür madenlerinde doğrudan veya dolaylı gaz ve toz patlamalarına, yangınlara ve işçilerin hayat kaybına neden olur. Bu kazaları önlemek için kömürün kendiliğinden yanmasını erken evrede tespit ve tahmin etmek önemli rol oynar. Kömürün kendiliğinden yanması bazı zehirli ve patlayabilir gazlarının üretilmesine de sebep olur. Bundan dolayı, kömürün kendiliğinden yanmasını tahmin etmek ve değerlendirmek için birçok yangın oranı kullanılır. Bu yangın oranlarında CO, CO₂, N₂, CH₄, vb. gibi gaz göstergeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Her yangın oranı bazı avantaj, dezavantaj ve kullanım sınırlara sahiptir. Kendiliğinden yanmanın belirlenmesinde en çok kullanılan göstergelerden birisi Graham İndeksi'dir. Graham İndeksi'nde yangının durumunu yorumlayan değerler arasında boşluklar olduğundan geçiş değerlerini daha iyi yorumlayabilmek için bir bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Bulanık mantık yöntemi daha esnek ve niteliksel değişkenler kullanılabildiğinden dolayı son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelde CO, O₂ ve N₂ parametrelerine ilave olarak hava sıcaklığı parametresi de kullanılmıştır. Uygulama çalışması için, Adularya yeraltı kömür madeni seçilmiş ve işletmenin bütün gaz ölçüm istasyonlarından 2017 yılına ait olan bilgiler toplanmıştır.

Bulanık mantık modelini simüle etmek için, MATLAB R2017a'daki Bulanık Mantık Araç Kutusu kullanılmış ve bulanık modelinde Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Kömürün kendiliğinden yanmasını tahmin etmek için önerilmiş olan bulanık mantık modelinde CO, O₂, N₂ ve sıcaklık girdi değişkenleri ve yangın yoğunluğu ise çıktı değişkeni olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada bulanık mantık sistemi bulanıklaştırma, bulanık kural tabanı, bulanık çıkarım sistemi ve durulaştırma olmak üzere 4 bileşenden oluşturulmuştur. Bulanık mantık sisteminde CO, O₂, N₂ ve sıcaklık parametreleri girdi dilsel değişkeni ve yangın yoğunluğu ise çıktı dilsel değişkeni olarak kullanılmıştır. Her girdi dilsel değişkeni için 3 dilsel değeri (Düşük, Orta ve Yüksek) ve çıktı dilsel değişkeni için 5 dilsel değeri (Normal Durum, Belirli Isınma, Gelişmiş Isınma, Aktif Yangın ve Açık Yangın) atanmıştır. Bulanık mantık sistemi için 81 "EĞER-O ZAMAN" kuralı oluşturulmuştur. Bulanık mantık değeri diğer

yangın endeksleri gibi kesin bir değeri elde etmek için, durulaştırma aşamasında alanın merkezi durulaştırma yöntemi kullanılmıştır.

Adularya yeraltı kömür madeninde bulanık model ile kendiliğinden yanmayı tahmin etmek amacıyla, her bir gaz izleme istasyonu için hesaplamalar yapılmıştır. Sonuç olarak 1409 ve 610/2B gaz izleme istasyonlarının kendiliğinden yanma açısından tehlikeli bölgeler olduğu belirlenmiştir. Hazırlık galerisinde bulunan 1409 numaralı gaz izleme istasyonunda, havalandırma sistemi seri olarak çalıştığından dolayı hava basıncı artmaktadır. Üretim ön hazırlığı için açılmış ve kısa bir süre sonra terkedilmiş klavuz baca içerisinde hava basıncının artması ile hava kaçağına neden olmuştur. Ayrıca, bu hazırlık galerinde galeri açma makinesi çalıştığında hava sıcaklığı da artmaktadır. 1409 numaralı istasyonunda bir kavşak noktasında bulunmaktadır. Bu bölgelerde meydana gelen çatlaklar topuk içerisinde hava kaçaklarına sebep olmuştur. Belirtilen nedenler 1409 numaralı gaz izleme istasyona yakın olan ve A olarak adlandırılan bölgede kömürün kendiliğinden yanmasına neden olmuştur.

Eski imalat alanına paralel olan bacanın ortasında ve çalışılmakta olan ayağa yakın olan 610/2B gaz izleme istasyonu da tehlikeli bulunmuştur. Eski imalat göçük bölgesinin içerisinde, topukta aşırı yük basıncından dolayı meydana gelmiş çatlaklardan hava kaçağına neden olmuştur. Ayrıca, aşırı basınç aynı zamanda eski imalat yanından geçen bacanın kesitini de daraltmıştır. Kesitin daraltması da hava akımının basınç farkını artırdığından dolayı hava kaçakları artmış ve bu durum göçük bölgede yanmayı artırmıştır. Ayrıca, eski imalat göçük bölgesinde kalan kömür de kaçak hava ile temasa geçtiğinde yanmaya neden olmaktadır.

Adularya yeraltı kömür madeninde her bir gaz izleme istasyonu için bulanık modelin sonucu, ana girişten dönüş hava yoluna doğru değerin kademeli olarak arttığını göstermiştir. Ayrıca, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında değerleri yüksek olup, kömürün kendiliğinden yanmasının değerlerin mevsimsel olarak değişebileceğini göstermektedir.

Bulanık mantık sisteminin sonuçları, belirsiz verileri ve doğrusal olmayan verileri ile yangın yoğunluğunun karar vermesinde daha güvenilir bulunmuştur. Graham İndeksi için CO, O₂ ve N₂ değerleri gerekli iken, bulanık model yöntemi ile kendiliğinden yanmayı etkileyen birçok değişken eşzamanlı olarak analiz edilebilir ve değerlendirilebilir.

Adularya yeraltı kömür madeninde, kendiliğinden yanmayı önlemek için uygun önlemlerin alınması gereklidir. Kavşak noktalarda galerilerin genişletilmesinden dolayı iki galeri arasında kalan topukların üzerinde basınç da artar. Basınç artışını önlemek için bu noktalarda dayanımı yüksek tahkimat sistemler uygulanmalıdır. Seri havalandırmada basınç farkları daha yüksek olduğundan, basınç farkını ve böylece hava kaçağı azaltmak için paralel havalandırma sistemi daha uygundur. Kendiliğinden yanma için inkübasyon süreci göz önünde bulunması önemlidir. Bu nedenle, panoların çok uzun ve büyük olmaması tavsiye edilir. Çünkü madencilik yöntemi yüksek hıza sahip olmaması durumunda kömürün hava ile temas süresi uzar.

Daha sonraki çalışmalarda, kömürün kendiliğinden yanmasının mevsimsel değişkenliğini tahmin etmek için zaman serisi analizi kullanılabilir. Kendiliğinden yanmaya yatkın ocaklarda kısmi nem basıncının düşük tutulması kömürün bünyesindeki suyun buharlaşarak soğuma etkisi oluşturacağından, ocak havasının kısmi nem basıncının kendiliğinden yanmaya etkisinin araştırılması da önemlidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ankara, 2014, Tarihin en büyük maden kazaları, Anadolu Ajansı, <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/tarihin-en-buyuk-maden-kazalari/159755>, erişim tarihi: 15.11.2018.
- Banerjee, S.C., 1985, Spontaneous combustion of coal and mine fires, Rotterdam: A. A. Balkema, p.164.
- Baris, K., Didari, V., 2009, Low temperature oxidation of a high volatile bituminous Turkish coal effects of temperature and particle size, Coal Operators' Conference, University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 296-302.
- Bustamante Rúa, M.O., Daza Aragón, A.J., Bustamante Baena, P., Osorio Botero, J.D., 2018, Statistical analysis to establish an ignition scenario based on extrinsic and intrinsic variables of coal seams that affect spontaneous combustion, International Journal of Mining Science and Technology, doi:10.1016/j.ijmst.2018.05.008 (in press).
- Çobanoğlu, B., 2000, Bulanık mantık ve bulanık küme teorisi, Niksar MYO/ GOP Üniversitesi, s.3.
- Cray, D., 2010, Deep underground, miles of hidden wildfires rage, Time gazetesi, <http://content.time.com/time/health/article/0,8599,2006195,00.html>, erişim tarihi:13.11.2018.
- Deng, J., Lei, C., Xiao, Y., Cao, K., Ma, L., vd., 2018, Determination and prediction on “three zones” of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face, Fuel, 211, 458-470.
- Ghosh, A.K., Banerjee, B.D., 1967, Use of the carbon-hydrogen ratio as an index in the investigation of explosions and underground fires, Journal of Mines, Metals and Fuels, 15 (11): 334-340.
- Ghosh, A.K., Banerjee, D.D., Banerjee, B.D., Sen, S.K., 1980, Assessment of the seat of heating inside a sealed off area with a view to combat and control, Proc. Silver Jubilee Seminar on Combating Coal Fires, 6-10.
- Gouws, M.J., 1993, A spontaneous combustion liability index based on ignition temperature tests and adiabatic calorimetry, PhD thesis, University of the Witwatersrand, <http://hdl.handle.net/20.500.11892/108503>.
- Grubb, J.W., Brune, J.F., Zipf, K.R., Bogin, G.E., Marts, J.A., vd., 2015, Managing the risks of spontaneous combustion in underground coal mines, 15th North American Mine Ventilation Symposium, Virginia Tech Department of Mining and Minerals Engineering, 1-10.
- Grychowski, T., 2014, Multi sensor fire hazard monitoring in underground coal mine based on fuzzy inference system, Journal of Intelligent and Fuzzu System, 26(1): 345-351.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gülügüzel, Ş., 2018, Koyunağılı havzası kömür madenlerinde kömür damarlarının metan gazı içeriklerinin ve gerekli hava miktarının belirlenmesi, Yüksek Lisans tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 128 s.
- İphar, M., 2004, Bulanık kümelerinin sökücü seçimi amacıyla kazılabilirlik sınıflama sistemlerine uygulanması, Doktora tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 160 s.
- Jang, R.J.S., Sun, C.T., Mizutani, E., 1997, Neuro-fuzzy and soft computing, USA: Prentice-Hall Upper Saddle River, s. 73-76.
- Jones, J.H., Trickett, J.C., 1955, Some observations on the examination of gases resulting from explosions in collieries, Transactions of the Institution of Mining Engineers, 44, 768-791.
- Justin, T.R., Kim, A.G., 1988, Mine fire diagnostics to locate and monitor abandoned mine fires, Proceedings America Society of Mining Reclamation, 348-355.
- Kajick, K., 2005, Fire in the hole, Smithsonian gazetesini, <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/fire-in-the-hole-77895126/>, erişim tarihi: 13.11.2018.
- Kong, B., Li, Z., Wang, E., Lu, W., Chen, L., vd., 2018, An experimental study for characterization the process of coal oxidation and spontaneous combustion by electromagnetic radiation technique, Process Safety and Environmental Protection, 119, 285-294.
- Lei, C., Deng, J., Cao, K., Ma, L., Xiao, Y., vd., 2018, A random forest approach for predicting coal spontaneous combustion. Fuel, 223, 63-73.
- Li, J., Fu, P., Zhu, Q., Mao, Y., Yang, C., 2018, A lab-scale experiment on low-temperature coal oxidation in context of underground coal fires, Applied Thermal Engineering, 141, 333-338.
- Li, L., Qin, B., Ma, D., Zhuo, H., Liang, H., vd., 2018, Unique spatial methane distribution caused by spontaneous coal combustion in coal mine goafs: an experimental study, Process Safety and Environmental Protection, 116, 199-207.
- Li, S., Ma, X., Yang, C., 2018, Prediction of spontaneous combustion in the coal stockpile based on an improved metabolic grey model, Process Safety and Environmental Protection, 116, 564-577.
- Liang, Y., Wang, S., 2017, Prediction of coal mine goaf self-heating with fluid dynamics in porous media, Fire Safety Journal, 87, 49-56.
- Lin, Q., Wang, S., Liang, Y., Song, S., Ren, T., 2017, Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with high possibility of self-ignition, Fuel Processing Technology, 159, 38-47.
- Litton, C.D., United States Bureau of Mine, 1986, Gas equilibrium in sealed coal mines [microform]/by Charles D. Litton, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 13 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lu, P., Liao, G.X., Sun, J.H., Li, P.D., 2004, Experimental research on index gas of the coal spontaneous at low-temperature stage, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17(3): 243-247.
- Mackenzie-Wood, P., Strang, J., 1990, Fire gases and their interpretation, *Journal of Mining Engineer*, 149(345): 470-478.
- Mamdani, E.H., Assilian, S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1): 1-13.
- Melikoglu, M., 2017, Vision 2023: Status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 800-808.
- Melody, S.M., Johnston, F.H., 2015, Coal mine fires and human health: What do we know?, *International Journal of Coal Geology*, 152, 1-14.
- Mitchell, D.W., 1990, Recommended detection and spontaneous combustion. Sec. in *Mine fires*, Maclean Hunter Publication, Co., Chicago, p. 27-56.
- Mohalik, N.K., Lester, E., Lowndes, I., 2018, Development a modified crossing point temperature (CPTHR) method to assess spontaneous combustion propensity of coal and its chemometric analysis, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56doi:10.1016/j.jlp.2018.09.001 (in press).
- Monjezi, M., Rezaei, M., Yazdian Varjani, A., 2009, Prediction of rock fragmentation due to blasting in Gol-E-Gohar iron mine using fuzzy logic, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8): 1273-1280.
- Muduli, L., Jana, P.K., Mishra, D.P., 2018, Wireless sensor network based fire monitoring in underground coal mines: A fuzzy logic approach, *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 435-447.
- Onifade, M., Genc, B., 2018, Spontaneous combustion of coals and coal-shales, *International Journal of Mining Science and Technology*, doi:10.1016/j.ijmst.2018.05.013 (in press).
- Özdeniz, A.E., 2003, Kömür stoklarındaki kendiliğinden yanma olayının incelenmesi- Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ) Örneği, Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 185 s.
- Panigrahi, D.C., Bhattacharjee, R.M., 2004, Development of modified gas indices for early detection of spontaneous heating in coal pillars, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(7): 367-379.
- Ramlu, M.A., 2007, *Mine disasters and mine rescue (Second Edition)*, Universities Press, p. 1-90.
- Ray, S.K., Singh, R.P., Sahay, N., Varma, N.K., 2004, Assessing the status of sealed fire in underground coal mines, *Journal of Scientific and Industrial Research*, 63, 579-591.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Razani, M., Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S.H., 2013, A novel fuzzy inference system for predicting roof fall rate in underground coal mines, *Safety Science*, 55, 26-33.
- Rosa, M.I.D., 2004, Analysis of mine fires for all U.S. underground and surface coal mining categories: 1990–1999, NIOSH Information Circular/2004 IC 9470, 36 p.
- Ross, T.J., 2005, Fuzzy logic with engineering applications (Second Edition), John Wiley & Sons, p. 151.
- Sensogut, C., Cinar, İ., 2006, A research on the spontaneous combustion tendency of Turkish Coals-Ilgın Lignite's case, *Trends in Applied Sciences Research*, 1(1): 9-14.
- Singh, K.A., Singh, R.V.K., Singh, P.M., Chandra, H., Shukla, N.K., 2007, Mine fire gas indices and their application to Indian underground coal mine fires, *International Journal of Coal Geology*, 69, 192-204.
- Singh, R., Singh, V., 2004, Status of mine fire of Jharia coalfield and suggestions for prevention and control, *Journal of Coal Mining Technology Management*, 9(6-8): 38-44.
- Stracher, G.B., Taylor, T.P., 2004, Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe, *International Journal of Coal Geology*, 59(1): 7-17.
- Su, H., Zhou, F., Li, J., Qi, H., 2017, Effects of oxygen supply on low-temperature oxidation of coal: A case study of Jurassic coal in Yima, China, *Fuel*, 202, 446-454.
- Sugeno, M., Kang, G., 1988, Structure identification of fuzzy model, *Journal of Fuzzy sets and systems*, 28(1): 15-33.
- Syed, T.H., Riyas, M.J., Kuenzer, C., 2018, Remote sensing of coal fires in India: A review, *Earth-Science Reviews*, doi:10.1016/j.earscirev.2018.10.009 (in press).
- Şensöğüt, C., 2011, Spontaneous combustion related fire ratios, *Journal of Engineering Sciences*, 5(1): 1009-1014.
- Tagaki, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *J. IEEE Trans. Syst. Man Cybernetics*, 15(1), 116-132.
- Taraba, B., Michalec, Z., 2011, Effect of longwall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area -CFD modelling, *Fuel*, 90(8): 2790-2797.
- TBB, T.B.B., 2014, Soma maden faciasi raporu, Türkiye Barolar Birliği, Şen Matbaa, 269, 152 s.
- Timko, R., Derick, R.L., 1995, Detection and control of spontaneous heating in coal mine pillars: A case study, United States Department of the Interior, United States Bureau of Mines, 24 p.
- Timko, R., Derick, R.L., 2006, Methods to determine the status of mine atmospheres: An overview, *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, 59, 1-9.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Toraño, J., Diego, I., Menéndez, M., Gent, M., 2008, A finite element method (FEM)-Fuzzy logic (Soft Computing)-virtual reality model approach in a coalface longwall mining simulation, *Automation in Construction*, 17(4): 413-424.
- Uludağ, S., PhMips, H.R., Eroğlu, H.N., 2001, Assessing spontaneous combustion risk in South African coal mines using a GIS tool, 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey- IMCET 2001, 243-249.
- Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M., 2003, Pathways for production of CO₂ and CO in low-temperature oxidation of coal, *Energy and Fuels*, 17, 150-158.
- Wang, J., Zhang, Y., Xue, S., Wu, J., Tang, Y., vd., 2018, Assessment of spontaneous combustion status of coal based on relationships between oxygen consumption and gaseous product emissions, *Fuel Processing Technology*, 179, 60-71.
- Willett, H., 1951, Gas analysis behind stoppings, *Transactions of the Institution of Mining Engineers*, 111, 6-29.
- Wu, J., Yuan, S., Zhang, C., Zhang, X., 2018, Numerical estimation of gas release and dispersion in coal mine using Ensemble Kalman Filter, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56, 57-67.
- Xiao, Y., Ren, S.J., Deng, J., Shu, C.M., 2018, Comparative analysis of thermokinetic behavior and gaseous products between first and second coal spontaneous combustion, *Fuel*, 227, 325-333.
- Xu, Q., Yang, S., Cai, J., Zhou, B., Xin, Y., 2018, Risk forecasting for spontaneous combustion of coals at different ranks due to free radicals and functional groups reaction, *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 195-202.
- Yang, Y., Li, Z., Si, L., Hou, S., Li, Z., vd., 2018, Study on test method of heat release intensity and thermophysical parameters of loose coal, *Fuel*, 229, 34-43.
- Yaşar, S., İnal, S., Yaşar, Ö., Kaya, S., 2015, Geçmişten günümüze büyük maden kazaları, *Madencilik*, 54(2): 33-43.
- Zadeh, L.A., 1965, Fuzzy sets, *Information and Control*, 8, 338-353.
- Zadeh, L.A., 1975, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Information Sciences*, 8, 199-249.
- Zhang, Y., Wang, J., Wu, J., Xue, S., Li, Z., vd., 2015, Modes and kinetics of CO₂ and CO production from low-temperature oxidation of coal, *International Journal of Coal Geology*, 140, 1-8.
- Zhou, B., Wu, J., Wang, J., Wu, Y., 2018, Surface based radon detection to identify spontaneous combustion areas in small abandoned coal mine gobs: Case study of a small coal mine in China, *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 223-232.