

Yeraltı Maden İşletmelerindeki Hava Hızı ve Metan Davranışının Hesaplamalı
Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Modellenmesi

Gölnaz Daloğlu

DOKTORA TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat 2017

The Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Airflow Velocity and Methane
Behaviour in Underground Mines

Gülnaz Daloğlu

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Mining Engineering

February 2017

Yeraltı Maden İşletmelerindeki Hava Hızı ve Metan Davranışının Hesaplamalı
Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Modellenmesi

Glnaz Daloğlu

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

Danışman: Prof. Dr. Mustafa nder

Bu tez TÜBİTAK tarafından “2214-Yurt dışı doktora burs programı” çerçevesinde desteklenmiştir.

şubat 2017

ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Gülnaz Daloğlu'nun DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Yeraltı Maden İşletmelerindeki Hava Hızı ve Metan Davranışının Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Modellenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mustafa Önder

İkinci Danışman : —

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Mustafa Önder

Üye : Prof. Dr. Adnan Konuk

Üye : Doç. Dr. Necati Mahir

Üye : Doç. Dr. Yaşar Kasap

Üye : Yrd. Doç.Dr. Sunay Beyhan

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof.Dr.Mustafa Önder danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yeraltı Maden İşletmelerindeki Hava Hızı ve Metan Davranışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Modellenmesi” başlıklı DOKTORA 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. 08/02/2017

Gülnaz Daloğlu
İmza

ÖZET

Metan gazı yeraltı ocaklarındaki en önemli tehlikelerden olup, mücadelenin temeli havalandırma sistemlerinin doğru oluşturulmasından geçmektedir. Mevzuatın izin verdiği sınır değerlerini aşmamak için, metan düzenli olarak izlenmeli ve yeterli hava hızı sağlanarak kontrol altında tutulmaya çalışılmalıdır.

Yeraltı kömür ocaklarında metan, çeşitli istasyon noktalarından ya da mobil ekipmanlarla istenilen yerlerden ölçülebilmektedir. Ancak, ölçüm yapmanın zor olduğu ya da yapılan ölçümlerin yetersiz olduğu yerlerde, son yıllarda dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanan, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) metodu ile modellenenbilir. Bu çalışmada, tali havalandırma sistemleriyle havalandırılan ve TTK Kozlu müessesesinde bulunan bir baca içindeki metan ve hava hızı davranışlarının CFD ile modellemesi yapılmıştır.

Çalışma yapılan bacadan alınan metan konsantrasyon ve hava hızı değerleri CFD tabanında çalışan Ansys® 12.00 programı ile k- ϵ türbulans modelleme tekniği kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ölçüm ve modelleme değerlerinin arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki olduğu bulunmuştur. Böylece, modellemede kullanılan veri setinin güvenilir olduğu, ocağın diğer kısımlarındaki çalışmalar içinde kullanılabilceği kanıtlanmıştır.

Çalışmanın sonucunda, yeraltı kömür ocaklarında, özellikle tali havalandırılan bacalardaki metanın ve hava hızının modellenmesinde dikkat edilecek hususlar belirtilmiştir. Ölçüm alınmayan noktalardaki metan ve hava hızının güvenilir tahmini metan kaynaklı kazaların önlenmesine yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), Metan, Hava hızı, Modelleme, TTK.

SUMMARY

Methane gas is one of the biggest dangers in the underground mines and the basic challenge is to design ventilation systems properly. In order not to exceed the threshold limit value determined by the legislation, methane gas should be regularly monitored and checked, ensuring adequate air velocity.

Methane in the underground coal mines can be measured at various station points or in the intended areas by means of mobile equipment. However, it can be modelled in the places where it is hard to measure or when the measurements made are inadequate utilizing a recent worldwide method named computational fluid dynamics (CFD) method. In this study, methane and air velocity behaviours in a heading that is Turkish Hard Coal Enterprises (TTK) Kozlu and ventilated by auxiliary ventilation systems were modelled with CFD.

Methane concentration and air velocity values obtained from heading in the study were analysed using Ansys® 12 program running in CFD and k- ϵ turbulence modeling technique. According to results obtained, there was a statistically significant relationship between measurement and modeling values. Thus, it has been proven that the data set used in the models is reliable and can be used in the studies carried out in other parts of the mine.

The results of study indicated the important issues to be taken in to consideration while modelling the location and air velocity in the headings especially ventilated using auxiliary ventilation systems in the underground mines. The reliable prediction of methane gas and air velocity at the points where measures are not taken will be useful to prevent accidents due to methane gas.

Keywords: Computational fluid dynamics (CFD), Methane, Airflow velocity, modeling, TTK.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren danışmanım Prof. Dr. Mustafa Önder'e, bana iyi niyeti ile her zaman destek olan Prof. Dr. Eyüp Sabah' a ve Prof. Dr. Bahri Öteyaka'ya, bilimsel çalışmamda 2214-yurtdışı burs programı ile bana destek olan TÜBİTAK' a büyük bir teşekkürü borç bilirim. Tez çalışmalarım sırasında benden yardımını esirgemeyen Prof. Dr. Zekeriya Altaç ve Araştırma Görevlisi Zerrin Böcü' ye, beni yönlendiren tez jüri üyelerim Doç. Dr. Necati Mahir ve Doç. Dr. Yaşar Kasap'a, Arş. Gör. Barış Ergül'e, okutman Nadire Arıkan'a, Mustafa Abanoz'a, Colorado School of Mines (USA)' da benim ikinci ailem olan ve desteklerini benden esirgemeyen Prof. Dr. Kadir Dağdelen, Prof. Dr. Jurgen Brune ve Prof. Dr. John Grubb, Prof. Dr. Uğur Özbay, Prof. Dr. Hugh Miller ve tezimde bilgisi ile bende emeği geçen Dr. Pejman Kazempoor ve güzel ailesine, tezimin istatistik kısmında yardımcı olan arkadaşım Özlem Sekmen ve Amerika' da ki tüm Türk arkadaşlarıma teşekkür ederim. Benden manevi ve teknik desteğini esirgemeyip her zaman yanımda olan öğrencim İTÜ Araş. Gör. Olgun Esen'e, tezimde büyük emeği geçen TTK (Zonguldak) çalışanlarından Dr. Erdinç Günay olmak üzere tüm çalışanlarına ve yayınları ile bana destek veren Dr. Mine Tekbaş Candar'a teşekkürü bir borç bilirim.

Benim için –en büyük zenginlik olan- manevi duygularımın ve yaşam mücadelemimin oluşmasını sağlayan babama, hayatı boyunca bizim için her alanda fedakârlıktan kaçınmayan anneme, ablama ve bana hep yardımcı olan enişteme ve abisi Yrd. Doç. Dr. Mustafa Öteyaka'ya, benden manevi desteklerini esirgemeyen Yıldız Sazak ve ailesine, uzakta olsa gönüllerimizin bir olduğu akrabalarıma, bana sevgiyi yaşatan ve benden dualarını esirgemeyen insanlara, kalpleri iyilik için çarpan ve kötülük yapıp bana hayatı öğreten herkese, bu işi bana sevdiren hayatının baharındaki genç öğrencilerime, bize bu güzel toprakları bırakan atalarımıza ve bizim güven içinde yaşamamızı sağlayan şehitlerimize büyük bir teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) METODU İLE MODELLEME YÖNTEMİ	18
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar dinamiği (CFD)	18
3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi	23
3.1.2. Sonlu hacimler yöntemi	24
3.1.3. Sonlu farklar yöntemi	25
3.2. CFD Metodu ile Çalışan Bilgisayar Programları..	25
3.2.1. Gambit	25
3.2.2. Fluent yazılım programı	25
3.2.3. Ansys yazılım programı	27
3.3. Ansys Türbülans Akış Modelleri	28
3.4. Modellemeyi Yöneten Eşitlikler	30
3.5. Difüzyon	34
3.6. Durağan ve Durağan Olmayan Akış	36
3.7. Laminer ve Türbülans Akış	36
4. ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ KURUMU (TTK) JEOLJİK YAPISI VE REZERVLERİ	38
4.1. Zonguldak Taşkömürü Havzasının Jeolojik Yapısı.....	38
4.1.1. Stratigrafi	47
<u>4.1.1.1. Temel formasyonlar</u>	48

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.1.2. Kömürlü birimler (Üst karbonifer)	48
4.1.1.3. Örtü birimleri	49
4.1.2. Tektonik durum, faylar ve kıvrımlar	49
4.2. Zonguldak Taşkömürünün Rezervleri	50
4.3. Zonguldak Taşkömürünün Karakteristik Özellikleri.....	51
4.4. Müesseseler	51
4.4.1. Kozlu taşkömürü işletme müessesesi	51
4.4.1.1. Jeolojik özellikleri	52
4.4.1.2. Tektonik ve faylar	53
4.4.1.3. Rezervler	53
4.4.1.4. Çalışma yapılan -560 m. Milopera damarı hakkında bilgi.....	54
4.5. Üretim	56
4.5.1. Uzunayak	56
4.5.2. Pnömatik patlatma.....	56
5. MATERYAL VE YÖNTEM	59
5.1. Ölçüm Çalışması.....	59
5.2. CFD Metodu ile Modelleme Çalışması.....	64
5.2.1. CFD metodu ile 2-boyutlu metan davranışı ve hava hız davranışının modellenmesi	65
5.2.2. VNETPC programında hava hız davranışının gösterimi.....	68
5.2.3. CFD metodu ile 3-boyutlu modelleme.....	69
5.2.3.1. <u>Türbülans akışa göre modelleme yönteminin Ansys programında gösterimi</u>	69
5.2.3.2. <u>Metan davranışı ve hava hız davranışının türbülanslı akışa göre modellenmesi</u>	76
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	87
6.1. Normal Dağılıma Uygunluk Analizi	87
6.2. Varyans Analizi ile Değerlendirme	93
6.3. Çiftli t-Testi	96

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.4. Doğrusal Regresyon Analizi ile Sonuçların Değerlendirilmesi	97
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR DİZİNİ	104
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Akışkanlar dinamiğinin “3 boyutlaması”	18
3.2. CFD metodunun mühendislikte uygulama örnekleri.....	19
3.3. CFD simülasyonunda ana aşamalar.....	21
3.4. Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar.....	23
3.5. Fluent program yazılımı.....	26
3.6. Fluent ayrıştırıcı çözüm kartı.....	27
3.7. Newtonian ve non-newtonian akışlarda kayma gerilmesinin değişimi.....	31
3.8. Metanın kömür içindeki difüzyonu.....	35
3.9. Dairesel kesitli olmayan geometrinin şekli.....	37
4.1. Zonguldak taşkömürü havzası.....	38
4.2. 1941-2013 yılları arası ölü sayıları	43
4.3. Müesseseye bağlı ölü ve yaralı sayıları	44
4.4. Taşkömürü havzası jeolojik yapısı	50
4.5. – 560 m. Milopera kömür damarı kat planı.....	54
4.6. Kozlu kömür yatağının stratigrafisi.....	55
4.7. Patlatma ünitelerinin delik içi konumu ve patlatma açıları	57
5.1. Kozlu (Zonguldak) yeraltı kömür maden galerisi	59
5.2. Testo 435-4 anemometresi	59
5.3. Havalandırma sisteminin şematik gösterimi	60
5.4. Her kesitten alınan 5 noktanın uzunlukları ve gösterimi	61
5.5. Galeri ve vantüpün meshlere ayrılması	64
5.6. Metan davranışının (kgs/m) gösterimi	66
5.7. Hız davranışının (m/s) gösterimi	66
5.8. Hız davranış vektörlerinin (m/s) gösterimi	67
5.9. Hava akım fonksiyonunun (kg/s) gösterimi	67
5.10. VNET PC 2007’ de hava akış şeması	68
5.11. Hava debisinin (m ³ /s) gösterimi	69
5.12. Hava hızının (m/s) gösterimi	69
5.13. “Model”den k-epsilon (2 eqn)” seçimi	70
5.14. “Türlerin iletimi (Species transport)” ve “energy=on” paneli seçimi	71
5.15. “Malzeme (Materials)”ve “sınır koşulları (boundary conditions)” seçimi	71

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.16. “Sınır koşulları (Boundary conditions)” içinde “Metan girişi” seçimi	72
5.17. “Sınır koşulları (Boundary conditions)” içinde “Hava hız girişi (Air velocity girişi)” seçimi	72
5.18. “Sınır koşulları (Boundary conditions)” içinde “Açıklık (Opening)” seçimi	73
5.19. “Çözüm yöntemleri (Solution methods)” içinde ikinci dereceden ayıklama (second-order upwind)” seçimi	73
5.20. “Artık ekranı (Residual monitors)” seçimi	74
5.21. “Hesaplama sayısı (Run calculation)” başlangıç olarak iterasyon sayısı gösterimi	74
5.22. “Calculation (hesaplama) bittikten sonra çözümün gösterimi	75
5.23. “Flux reports (akış sonucu)” ile modelin doğruluğunu değerlendirme	76
5.24. Hava hız davranışının (m/s) 3-boyutlu gösterimi	77
5.25. Metan davranışının (kgm/s) 3-boyutlu gösterimi	77
5.26. Arıdan 6 m. uzaklıkta bulunan bir kesitte hava hız dağılımının gösterimi	78
5.27. Arıdan 3 m. uzaklıkta bulunan kesitte metan dağılımının gösterimi	78
5.28. Arıdan 1 m. uzaklıkta bulunan kesitte hava hızı ve metan dağılımının gösterimi	79
5.29. Arıdan 6 m. uzaklıkta bulunan kesitin hava hız ve metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi	80
5.30. Arıdan 25 m. uzaklıkta bulunan kesitin hava hız ve metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi	80
5.31. Arıdan 40 m. uzaklıkta bulunan kesitin hava hız ve metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi	81
5.32. Arıdan 60 m. uzaklıkta bulunan kesitin hava hız ve metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi	81
5.33. Arıdan 110 m. uzaklıkta bulunan kesitin hava hız ve metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi	81
5.34. Nokta 1’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi	82
5.35. Nokta 2’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi	83
5.36. Nokta 3’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi	83
5.37. Nokta 4’ ün deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi	83
5.38. Nokta 5’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi	84

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.39. Nokta 1' in deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi	84
5.40. Nokta 2' nin deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi	85
5.41. Nokta 3' ün deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi	85
5.42. Nokta 4' ün deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi	86
5.43. Nokta 5' in deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi	86
6.1. Nokta 1 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi ...	88
6.2. Nokta 2 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi ...	88
6.3. Nokta 3 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi ...	89
6.4. Nokta 4 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi ...	89
6.5. Nokta 5 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi ..	90
6.6. Nokta 1 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi	90
6.7. Nokta 2 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi	91
6.8. Nokta 3 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi	91
6.9. Nokta 4 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi	92
6.10. Nokta 5 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi	92
6.11. Modellemesi yapılan galerinin ve ölçüm noktalarının gösterimi	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Türkiye’ de oluşan grizu kazaları	3
4.1. Türkiye Taşkömürü Kurumu Grizu Olayları, 1941-2013	39
4.2. Armutçuk, Amasra ve Üzülmez müessesesi ocakların da 1970 ve 2012 yılları arasında üretim miktarı ve aspiratör çıkışında metan miktarı (m ³ /t)	44
4.3. Kozlu ve Karadon müessesesi ocaklarında 1975 ve 2010 yılları arasında üretim miktarı ve aspiratör çıkışında metan miktarı (% CH ₄)	46
4.4. Havza rezervlerinin müesseselere göre dağılımı	50
4.5. Müesseselere göre kömür özellikleri	51
4.6. Kozlu müessesesi rezerv hesaplamasında esas alınan damar kalınlıkları	54
4.7. -560 m. kömür damarından alınan numune özellikleri	55
5.1. Ölçüm noktalarının koordinatları	60
5.2. Model giriş-çıkış parametreleri	65
5.3. Beş farklı kesitte 5 nokta için ortalama deneysel ve CFD değerleri	82
6.1. Nokta 1’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi	94
6.2. Nokta 2’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi	94
6.3. Nokta 3’ ün deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi	94
6.4. Nokta 4’ ün deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi	95
6.5. Nokta 5’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi	95
6.6. Nokta 1’ in deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi	95
6.7. Nokta 2’ in deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi	95
6.8. Nokta 3’ in deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi	96
6.9. Nokta 4’ in deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi	96
6.10. Nokta 5’ in deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi	96
6.11. Ortalama deneysel ve modelleme değerlerinin belirlilik katsayıları	98

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
a	İvme
A	Kesit alanı
C	Özgül gaz konsantrasyonu
du/dy	Tabakalara dik yöndeki hız gradyenidir
D	Difüzyon katsayısı
D	Hidrolik çap
ϵ	Türbülans kinetik enerji yayılma hızı
G_b	Eğilime bağlı türbülans
G_k	Türbülans kinetik enerji üretimi
g	Yerçekimi ivmesi
k	Türbülans kinetik enerji
k	geçirgenlik
M	kütle akışı
m	kütle
μ	Dinamik Vizkozite
μ_t	Türbülans vizkozitesi
μ_{eff}	Etkili vizkozite
n	mol sayısı
P	Islak çevre
P	Basınç
ρ	Yoğunluk
ppm	Parts per million
R	gaz sabiti
R_e	Reynold sayısı
t	zaman
τ	Tabakalar arası yüzey gerilimi
T	Sıcaklık
u	gaz hızı
u_x	x yönünde hız difüzyonu
Q	Hacim akışı
σ_ϵ	Türbülans Prandtl sabitleri

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

σ_k	Türbülans Prandtl sabitleri
$\partial P/\partial x$	Basınç gradyeni
V_{ort}	Ortalama akış hızı
V	Hacim
ν	Kinematik vizkozite
Y_M	Sıkışabilirliğin türbülans etkisi
(°)	Derece

Açıklama

Kısaltmalar

NIOSH	Amerikan Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü
CAE	Bilgisayar destekli mühendislik
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
LES	Büyük eddy simülasyon
DES	Detaylı eddy simülasyon
GVB	Göçük havalandırma delikleri
CFD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
SST	Kesme gerilimi iletim
PCA	Parça bileşim analizi
PRL	Pittsburgh Araştırma Laboratuvarı
RSM	Reynolds gerilim modeli
CIS	Rusya, Ukrayna, Kazakistan
FEM	Sonlu eleman metodu
FDM	Sonlu farklar metodu
FVM	Sonlu hacim metodu
SF6	Sülfür hekzaflorit
TTK	Türkiye Taşkömürü Kurumu
ILO	Uluslararası Çalışma Örgütü
ANN	Yapay sinir ağları
RNG	Yeniden normalleştirme-grubu

1.GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzden yaklaşık 340 milyon yıl önce başlayıp, yaklaşık 60 milyon yıl önce sona eren Karbonifer devrinde turba ve bataklık zeminlerinde çökelen bitki ve hayvan organizmalarının sıcaklık, basınç gibi etmenler altında kömürleştiği bilinmektedir. Yaklaşık 280 milyon yıl devam eden kömürleşme süreci sonucunda oluşan metan gazı, yeraltı kömür madenciliğinde dikkatle izlenmesi ve kontrol altında tutulması gereken bir ögedir. Metan yeraltında birçok istasyon noktasında ölçülmekle beraber, ölçüm yapmanın güç olduğu ya da ölçümü alınmayan noktalardaki tahmini CFD metodu kullanılarak yapılabilir. CFD dünyada ilk defa 1940 yıllarında yapı analizinde kullanılmaya başlanmış olup, madencilikteki ilk uygulamalarına 1980' li yıllarda başlanmıştır. CFD modellemesi; Darcy' nin kanunu ile geçirgen ortamdan geçen hava-metan karışımını, kömür-gaz yangını, toz durdurma, gaz dağılım tahmini, ocak yangını ve patlamalar, doğal yanma, ısı ve ocak iklimi ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüksek oranlarda metan emisyonunun gözlendiği Türkiye Taşkömür Kurumu (TTK) Kozlu Müessesesi 560 Milopera damarının metan gaz konsantrasyonu ve hava hız değerlerinin CFD metodu ile modellenmesi amaçlanmaktadır.

Giriş bölümünü izleyen 2. bölümde, geçmişten günümüze kadar yapılan metan ve hava akışı davranışının CFD metodu ile modellenmesi hakkında bulunan tüm literatür araştırması ve Türkiye'de meydana gelmiş olan metan kaynaklı kazalar hakkında bilgi verilmektedir.

3. bölümde, CFD hakkında bilgi ve modellemeyi yöneten eşitlikler, geliştirilen model, ANSYS programı, ANSYS programında hava hız ve metan konsantrasyon değerleri gösterilmektedir.

4. bölümde, uygulama yeri olan Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK)' nun jeolojik yapısı ve stratigrafisi, Zonguldak taşkömürünün özellikleri, Kozlu Taşkömürü İşletme müessesinin jeolojik özellikleri ve rezervleri, ölçüm alınan -560 m Milopera damarı hakkında genel bilgiler verilmektedir.

5. bölümde, Kozlu kömür maden ocağından alınan ölçümler, hava hız ve metan konsantrasyon değerlerinin türbülanslı akış yöntemlerinden biri olan k-epsilon modeline göre 2-boyutlu olarak Fluent programı ve 3-boyutlu olarak Ansys® 12.00 programı ile modellenmesi gösterilmektedir.

6. bölümde, deneysel ve modelleme sonuçlarının aralarındaki ilişkiyi MINITAB-17 programı ile regresyon, korelasyon ve varyans istatistiksel analizi ile değerlendirilmesi hakkında bilgiler verilmektedir.

7. bölümde ise, bu çalışma boyunca elde edilen sonuçlar sıralanarak daha sonraki çalışmalara ışık tutabilecek önerilere yer verilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yeraltı kömür madenlerinde meydana gelmiş olan büyük kazalar incelendiğinde, başta kömür tozu patlamaları, grizu patlamaları ve grizu+kömür tozu patlamaları gelmektedir. Zonguldak' ta 1 milyon ton üretime düşen ölüm sayısı Almanya'nın 22 katıdır (Ataman, 1984). Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) 2003-2008 yılları arası iş kazası oranlarına göre Türkiye, Hindistan ve Rusya' dan sonra ölümlü iş kazalarında üçüncü sırada yer almaktadır. İngiltere' de iş kazaları oranı % 1, Almanya' da % 2.5, Fransa' da % 3.5, İspanya' da % 4 ve Türkiye' de % 9.5-10 arasındadır. Türkiye' de oluşan grizu patlama kazaları Çizelge 2.1' de verilmiştir (TMMOB, 2010).

Çizelge 2.1. Türkiye' de oluşan grizu kazaları (TMMOB, 2010).

YER	YIL	NEDENİ	ÖLÜ SAYISI
TTK/Armutçuk/kömür	7 Mart 1983	Grizu patlaması	103
TTK/Kozlu/kömür	10 Nisan 1983	Grizu patlaması	10
Yeni çeltek/Amasya/kömür	14 Temmuz 1983	Grizu patlaması	5
TTK/Kozlu/kömür	31 Ocak 1987	Göçük	8
TTK/Amasya/kömür	31 Ocak 1990	Grizu patlaması	5
Yeni çeltek/Amasya/kömür	7 Şubat 1990	Grizu patlaması	63
TTK/Kozlu/kömür	3 Mart 1992	Grizu patlaması	263
Yozgat/Sorgun/kömür	26 Mart 1995	Grizu patlaması	37
Erzurum/Aşkale/kömür	8 Ağustos 2003	Grizu patlaması	8
Karaman/Ermenek/kömür	22 Kasım 2003	Grizu patlaması	10
Çorum/Bayat/kömür	9 Ağustos 2004	Grizu patlaması	3
Kastamonu/Küre/metal	8 Eylül 2004	Yangın	19
Kütahya/Gediz/kömür	21 Nisan 2005	Grizu patlaması	18
Balıkesir/Dursunbey/kömür	2 Haziran 2006	Grizu patlaması	17
Bursa/Mustafakemalpaşa/kömür	10 Aralık 2009	Grizu patlaması	19
Balıkesir/Dursunbey/kömür	23 Şubat 2010	Grizu patlaması	13
TTK/Karadon/kömür	17 Mayıs 2010	Grizu patlaması	30
TOPLAM			636

Metan kaynaklı olarak meydana gelmiş olan maden kazaları incelendiğinde aşağıda verilen ve havalandırma ile ilgili olan bazı temel eksikliklerin var olduğu anlaşılmaktadır. Bu eksiklikler;

- 1) Havalandırma planlarının yok veya yetersiz olması,
- 2) Özellikle kör bacalarda yeterli ve etkin havalandırma yapılmaması,
- 3) Sağlıklı hava ve gaz ölçümü yapılmaması ve kayıda alınmaması,
- 4) Uzaktan izleme sensörleri ve erken uyarı sistemlerinin yetersiz olması,
- 5) Seyreltilmiş gaz ölçümlerinin yapılması,
- 6) Ocakta kullanılan elektrik teçhizatı ve motorlarının alev sızdırmaz özellik taşıması,
- 7) Sertifikalı ateşleyici olmaması,
- 8) Kontrol sondajlarının yapılmaması,
- 9) Metan % 1.5' u geçtiği halde elektriğin kesilmediği gibi bazı hususlar belirlenmiştir (TMMOB, 2010).

Türkiye' de yeraltı maden işlerinin yapıldığı maden ocaklarında uygulanacak metan gazı ile ilgili hükümleri şunlardır:

- 1) Taşıma yollarında hava içinde patlamaya neden olabilecek kömür tozu bulunan veya metan oranı % 0.3' ü geçen kömür ocakları ile kükürt tozu bulunan kükürt ocaklarında, elektrikli lokomotifler kullanılamaz.
- 2) Havada % 19' dan az oksijen, % 2' den fazla metan, % 0.5' den fazla karbondioksit, 50 ppm (% 0.005)' den fazla karbonmonoksit ve diğer tehlikeli gazlar bulunan yerlerde çalışma yapılamaz. 8 saat çalışma süresi için en fazla hidrojen sülfür oranı 20 ppm (% 0.002)' dir.
- 3) Emniyet lambası veya metan dedektörleri ile yapılan ölçümlerde % 1 veya daha fazla metan olan kısımlarda patlayıcı madde kullanılmaz.
- 4) Yeraltında yanıcı veya patlayıcı ortam oluşan riskli miktarda metan gazı çıkan maden ocakları “grizulu” kabul edilir. Grizulu ocaklarda her vardiyada ölçüm yapılır ve havada % 1' den çok metan gazı olduğunda, bu oran % 1' in altına düşünceye kadar ölçümler devam eder. Ocakta yeterli sayıda kalibre olmuş seyyar gaz ölçüm cihazları bulunur.
- 5) Aynı hava akımından yararlanan ayaklarda ve damar içinde düz ve eğimli yollarda metan oranı % 1.5' u, bunların bağlandığı hava dönüş yollarında % 1' i geçemez.

- 6) Havada % 2' den çok metan bulunduğunda ocakta çalışanların kurtarılması ve grizunun temizlenmesi dışında çalışma yapılmaz. Havada metan oranı % 1.5' u geçen yerlerde iletkenlerin ve elektrikli aygıtların gerilimi kesilir.
- 7) Ateşleyici, grizulu ocaklarda lağım deliklerini doldurmadan önce 25 metre yarıçapındaki bir alan içinde ve özellikle tavandaki çatlaklar, boşluklar ve oyuklarda grizu ölçümü yapılır. Bu ölçümde % 1 veya daha çok metan tespit edilirse lağımlar doldurulmaz. Ateşleyici, lağımların doldurulmasından sonra ve ateşlemeden önce ölçümü tekrarlar. Metan oranı % 1' in altında ise lağımlar ateşlenir, üstüneyse % 1' in altına düşene kadar ateşleme yapılmaz (Resmi gazete, 2013).

Ocakların gazlılık sınıflaması yapılırken esas alınan yayılım şekli, emisyon şeklindeki yayılım şeklidir. Ocakların gazlılığı, genellikle, üretilen her ton kömüre karşılık yayılan metan miktarı (m^3/ton) olmaktadır. Metanın normal yayılımını oluşturan kaynaklar ve yayılımındaki oranlar aşağıda verilmiştir (Yalçın, 2012):

1.Kazı yüzeyleri	% 40-50 (yakında gazlı damar varsa % 80)
2.Kazılmış kömür	% 10-15
3.Kazılmış taş	% 10-15
4.Göçükteki kayaç	% 20-25
5.Çalışılmayan damar:	
a)Açık yüzey (ayaktan)	% 0-5
b)Göçük	%5-10

Güyağüler (2002), Türkiye' de meydana gelen grizu patlamalarının nedenlerini araştırarak, patlamaların sebeplerini belirtmektedir. Metan patlamaları 1900' lü yıllarda dünyada en üst düzeye çıkmış ancak 2000' li yıllarda en aza inmiştir. Ancak ülkemizde tam tersi gözlenmiştir.

Gürses (1943), Türkiye' de yaygın kömür ve linyit yataklarının olduğunu ve 1939 yılında kömürden sağlanan elektrik gücünün % 82.8 olduğunu vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, bitümlü kömür ülkenin ana mineral kaynağıdır ve ülkenin

endüstriyel gelişimi için sadece yakıt olarak değil, ayrıca yabancı kaynak sağlama yolu olarak da önemlidir. Linyit yatakları, ülkenin elektriği için ana güç kaynaklarından biridir.

Güney' in Kozlu (Zonguldak) müessesinde yaptığı çalışmada (1971), kazılan kömür yüksek oranda tozlu olduğundan ilerletimli ve geri dönümlü uzunayak yöntemleri kullanılmaktadır. Dönümlü uzun ayak kullanılmasının nedeni, kömür damarının kendi kendine yanma özelliğidir. İlerletimli uzun ayakta “damarı kesen sondaj metodu”, dönümlü uzun ayakta “kılavuz sürme metodu” kullanılır. Güney'in (1976), Kozlu Bölgesi (Zonguldak) yeraltı kömür arını geri dönüş yollarında ve laboratuarda volumetrik metotlarla yapmış olduğu grizu emisyonu çalışmasına göre, metan emisyonunun içten ve dıştan yanma parametrelerine bağlı olarak grizuyu etkilediği görülmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki; Kozlu Bölgesi üretim alanında belli kömür damarları çok gazlıdır ve kazılmış kömürün ton başına 93.45 m^3 ulaşan saf metanın toplam emisyonun geri dönüş hava yollarında olduğu durumlarda bulunmaktadır.

Yalçın ve Durucan'ın (1984) yapmış olduğu çalışmaya göre, Zonguldak'taki her damarın metan desorpsiyon oranları hesaplanmıştır. Gazların veya su buharının katı yüzeyine tutulmasına “adsorpsiyon”, grizunun kömürden ayrılmasına “desorpsiyon” denir. Yapılan deneyler sonucunda Kozlu' daki (Zonguldak) 4 farklı kömür damarının metan adsorpsiyon büyüklüğü Çay, Acılık, Civelek ve Büyük Kılıçlar kömür damarlarıdır. Desorpsiyon oranları aynı sıralamadır. Genel olarak Zonguldak' ta ki tüm damarlar gazlıdır ve Çay damarında en yüksek metan emisyonu görülmektedir. Buna göre kömür üretimi sırasında ocak havasına karışan metan miktarı kömür boyutunu azaltmadığımızda azaltılabilir. Ancak mekanize üretim, üretilen kömürün tane büyüklüğünü azaltmakta ve metan emisyonunu arttırmaktadır. Bu durumda metan drenajı ve iyi bir havalandırma oldukça iyi bir önlemdir.

Değirmenci ve Zırtoğlu (1984), Kozlu bölgesinde yapılan metan drenajı uygulamasını anlatmıştır. Kozlu Bölgesi' nde ilk metan drenajı 01.07.1983 tarihinde Çay panosunda yapılmıştır. Günlük üretim 470 ton olan panoda 2 delik delinmiştir. Delikler 65 mm çapındadır. 15 vardiya (120 saat) için panodan 7200 m^3 saf metan emilmiştir. Drenaj öncesi % 1,7 CH_4 miktarı, 120 saat sonunda % 1,3 CH_4 ' e düştüğü gözlenmiştir. Bu uygulamadan metan drenajının başarılı olduğu görülmektedir.

Uluslararası literatürde konu ile ilgili bazı çalışmalar şunlardır; Maciejewski (1984), taşkömürü madenciliğinde metan riskini azaltmak için “paralel havalandırılmalı geri dönümlü uzun ayak sistemi” kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu sistemde uzun ayaktaki metan drenaj delikleri paralel havalandırma galerilerinden delinir. Galeriler arasındaki topuklardan dolayı drenaj delikleri iyice sıkılır. Metan drenajı ile metan kömürden alınarak, kömür üretim miktarı artmıştır.

Krog vd. (2006), Pittsburgh kömür yatağında metan emisyonunu artırıcı etkenlerin (bantlı konveyör, kesici, arın, topuk) metan emisyonlarına etkisini araştırmak için Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) metodunu kullanmaktadır. Kömür yatağının 20., 80., ve 145. şilinde metan monitörleri ile 3 gün boyunca metan izlenmiştir. Kesici, arın konveyörü ve bant emisyonu kesici kaynaklar olmasına rağmen, gaz gecikmelerine katkı sağlar ve artan genişlikte metan emisyonu fazla çıkmıştır. Kömür arın konveyörü ile taşındığı zaman maksimum metan emisyonu sağlanmıştır. Ana giriş genişlikleri sabit olduğu zaman metan emisyonu artmamıştır.

Amerika’ da metan ile ilgili ilk çalışmalar, madencilik bürosu (Bureau Mines) araştırma raporunda (1974) metan konsantrasyon noktaları ölçülerek, noktaların istatistiksel dağılımını belirlemeye yöneliktir. Normal dağılım iyi dağılım gösterirken, log-normal dağılım zayıf dağılım göstermektedir. Ayrıca seçilen aralıklar üzerinde “en yüksek” noktalar aşırı-değer dağılım türüne uygun bulunmuştur (Kissel vd., 1974). Madencilik bürosu araştırma raporuna göre, 1959’ dan 1981 yılına kadar Amerika’ da oluşan ana kömür ocak patlama felaketleri ve bu felaketleri önleme tedbirleri özetlenmiştir. Bu yıllar arasında oluşan 18 ana patlamanın 12’si grizu kaynaklıdır ve bu değer toplam patlama oranının % 30’nu oluşturmaktadır. Rapor, 1969 ve 1977 yıllarının Federal maden sağlık ve emniyet tedbirlerini gözden geçirmektedir. Sonuçta, hem ölümlerin hem de felaketlerin sayısını azaltan bu tedbirlerin nasıl yürütüldüğünü tartışmaktadır (Richmond vd., 1983).

Metan gazı patlamaları, mevsimsel değişimlerden etkilenmez. Fakat kömür tozu patlamaları, mevsimsel değişimlerden büyük oranda etkilenir (Kissel vd., 1973). 1984 yılında yapılan Madencilik bürosu araştırma raporuna göre, 1980 yılında Amerika kömür ocaklarında metan emisyon miktarı, yeri ve kömür yatağı tanımlanmaktadır ve emisyon

değerleri arasındaki ilişki gözden geçirilmektedir. Rapor, 1975 ve 1980 yıllarının kayıtlarını kıyaslamaktadır ve 11 maddede kömür yatağı gaz bileşen verisi arasında ilişkiyi tanımlamaktadır (Grau, 1984). Coleman vd. (2010), 2003 ve 2007 yılları arasında, Amerika'da maden işletmelerinde görülen en sık 5 hasar özelliklerini anlatmaktadır. Buna göre, yeraltı kömür ocaklarında yaralanma oranı yüzey kömür ocakları yaralanma oranının yaklaşık 3 katı olmaktadır.

Karacan 2006-2009 yılları arasında kömür metan gazını etkileyecek önemli çalışmalar yapmıştır. Karacan vd. (2008), doğal yanma için gaz kontrolü, kömür yataklarının ön-madencilik gazsızlaştırması, göçük gaz sondaj deliği dizaynı ve uzunayaklarda performans değerlendirilmesi ve gelişen madencilik boyunca gaz yönetimini tartışmak için yapılmış ağa-dayalı nümeriksel modelleme teknikleri CFD ve nümeriksel rezervuar modellemeyi incelemiştir. Karacan (2009)'da Çok Tabakalı Yapay Sinir Ağları kullanarak (ANN) Amerika uzunayak kömür madenleri gazsızlaştırma sistemini seçmek için bir çalışma yapmıştır. Çoklu-doğrusal ANN metodu kullanarak, kömür yatağı özellikleri girdi olarak alınmıştır ve gazsızlaştırma dizaynı 4 farklı kısımda çıktı olarak sonuçlanmıştır. Bunlar: 1- GVB (göçük havalandırma sondaj delikleri), 2- yatay ve GVB, 3- yatay-dikey, 4- yüksek doğrulukta GVB. Bu kapsamda model, gazsızlaştırma sistemi için bir karar aracı olarak kullanılmaktadır. Karacan (2009), kömür yatağı rezervuar mühendislik uygulamaları ve optimizasyon için modelleme tekniklerini uzunayakta ve kazıcı kısımlarında metan emisyonlarını kontrol etmede bir çalışma yapmıştır. Rezervuar modellemesi, sondaj deliği performansı ve değişik kömür yatağı için arın emisyon tahminleri ve sondaj deliği konfigürasyonları sunulmuştur. Alan rezervuar çalışmalarında bir kesit ve metan kontrol için kuyu deliği log analizleri, metan kontrolü ve havalandırma optimizasyonunun tamamlayıcısı olarak sunulmaktadır.

Taylor ve Karacan (2010), yeraltı kömür ocaklarında metan kontrolü için geçmişten günümüze kadar Amerika'da yapılan çalışmaları özetlemektedir. Bu araştırmanın iki ana amacı vardır. Kömür yatağı veya göçükten metan emisyonunu kontrol ederek, yeraltı metan patlamalarını azaltmak ve arın yüzeyinden salınan metan gazını sulandırmaktır. Bu zamana kadar Amerika Madencilik Bürosu (Bureau Mines) ve Amerikan Ulusal İş sağlığı ve güvenliği enstitüsü (NIOSH) birçok çalışma yapmıştır. NIOSH tarafından yapılan 1990

ve 2006 yılları arasındaki bir araştırmaya göre, 20' den fazla yeraltı yangınlarından sadece 3'ü metan gazı kaynaklıdır (Trevits vd., 2010).

Modelleme ile ilgili ilk çalışmalara bakıldığında; Wala ve Kim (1985), hava akışı ve metan konsantrasyonu modellemesinde ocak açıklıklarında hava ve metan zonunda metan konsantrasyon dinamiğini yaz ve kış mevsimi için modellemiştir.

Edwards vd. (1995), madencilik endüstrisinde emniyet ve sağlık problemlerini çözmek için CFD metodunun uygulama alanlarından bahsetmektedir.

Wala vd. (1998) Kentucky Üniversitesi' nde yaptığı bir çalışmada, CFD yöntemi kullanarak iki fazlı akış (hava-metan) ve çoklu akışı, kuyu ve fan çalışma alanı arasında modellemiştir. Oda-topuk yöntemi havalandırma sistemi ve kat kesme madenciliğinde havalandırma sistemi parametrelerinin etkisi (toz bastırıcısında arın hava akışı, toz ve metan seviyelerinde perde mesafesi vb.) modellenmiştir. Burada hava perde hattı, toz bastırıcı çıkışında toplanır ve arında metan konsantrasyonunu azaltır.

Taylor vd. (2003), ocak girişinde hava akışını ölçmek için 3-eksenli ultrasonik anomometre kullanarak bir bilgisayar programı geliştirmiş ve kullanılan aletin uygunluğunu test etmişlerdir. Bir üfleyici fan ve arın girişi karşısına hava perdesi yerleştirilmiş ve ses basınç dalgasına bağlı bir 3 eksenli anomometre ile hava hızı ölçülmüştür. 2 hava girişi ve 2 giriş genişliğinden akış ölçümleri alınmıştır. U ve V yönlerinde hızlar, giriş hız miktarı arttığı zaman artmaktadır.

Siddique vd. (2005), bir borudan geçen havayı ve ocak ısı transferini, ısı ve nemliliği dikkate alarak, CFD ile silindir hava borusu ve dikdörtgen kesitli maden ocağını 2 boyutlu modellemiştir. Sınır koşulları olarak; hava girişi boruda ve hava çıkışı atmosferde ve 4 duvar alınmıştır. 2 ıslak duvar, havanın doygunluk indeksini belirler. Hexahedral mesh uygulanır. Galeri sonunda saat yönünde sirkülasyon olurken, durgun zon da sirkülasyon çok düşüktür. Galeride % 90' dan fazla su buharı bulunmaktadır.

Hwang ve Edwards (2005) yaptığı çalışmaya göre, tünel yangınlarında sigara ve sıcak yanan ürünler, tavanda bir tabaka oluşturur ve hava akışına ters yönde akar. Bu ters

tabakalanmış akışın varlığı yangınla mücadelede önemli bir davranıştır. Burada havalandırılmış bir tünelde taban-seviye yangınlarında CFD programı kullanılmış ve kritiksel hava hızının, farklı boyutta 2 tünelin simülasyonunda, ters katmanlaşmış tabakayı önlemede önemli bir yere sahip olduğu bulunmaktadır. Yangında tavan sıcaklığı iki tünel içinde maksimum sıcaklığa ulaşmaktadır. CFD modeli Froude yaklaşımının tünel yangını için uygun olduğunu göstermekte ve Kennedy (1996) ve Kurisch (2002)' un teorilerinin kritiksel havalandırma ile ilişkili olduğu açıklanmaktadır.

Kissell (2006) hazırladığı kitabında; metan gaz karışımlarının patlayabilirliği, patlamada basınç ve sıcaklık etkisi, metan yanmalarının daha az yaygın kaynakları, kömürde depolanan metan miktarı, metan emisyon oranı tahmini, maden tavanında metan birikimi, maden havasının yeniden depolanması tehlikeli olduğu zaman metan patlamasını önlemede daha yüksek hava hızının önemi ve maden patlamaları, barometrik basınç ve patlamalarda mevsimsel eğilimden bahsetmektedir.

Ren ve Balusu (2005), uzunayak dolgu alanlarında akış göç dinamiklerini geliştirmek amacıyla, farklı havalandırma sistemlerinde göçükte oksijen girişini ve dolgu drenaj çalışmalarını kullanmaktadır. Bu yaklaşım hem verimli gaz kontrol stratejilerinin dizaynına yardımcı olur hem de dolguda yanma riski yönetimine yardımcı olur. Çalışma aktif uzunayak arınlarının arkasında doğal ısınmanın gelişimini bastırmak için ileriye yönelik dolgu etkisizleştirme stratejilerinin genel kurallarını geliştirmek için devam eder.

Yuan vd. (2006), uzunayak göçük alanlarında doğal yanmayı önlemede havalandırma tasarımının etkisini araştırmak için 3 farklı havalandırma sisteminde (bir-girişli, iki-girişli drenajsız sistemler ve üç-girişli drenajsız sistemler) göçükteki akış modellerini CFD ile modellemiştir. Göçük alanında porozlu ortamdan geçen gaz akışı laminer olurken, havalandırma hava yollarında gaz akışı tam gelişmiş türbülans akışı olarak simüle edilmektedir.

Parra vd. (2006), kömür madeninin kapalı yerinde çalışan havalandırma sistemlerini modelleyerek, durağan bölgelerde, kirli hava bölgelerinde ve patlama bölgelerinde havalandırma sistemi verimliliğini incelemektedir. Sıcak-kablo anomometresi

kullanarak, üfleyici, emici ve kombine havalandırmada akış alanı, havanın ortalama zamanı ve metan konsantrasyonları hakkında bilgi sağlanmaktadır.

Taylor vd. (2006), üfleyici havalandırma sisteminde kazı makinesine monte edilmiş toz bastırıcıların metan üzerine etkisini göstermek için, arından alınan hava akışı ve toz yıkayıcısı çevresindeki metan gaz konsantrasyonlarını ölçerek, toz bastırıcının metan üzerine etkisi gözlenmiştir. Ultrasonik anemometre ile arın yakınında hava akış hızı ve sabit nokta metanometre ile makine üzerinde 21 noktada gaz konsantrasyonları alınmıştır. Bu kapsamda, üfleyici havalandırma sisteminde makineye monte edilmiş toz yıkayıcılar hem giriş havasını hem de arına ulaşan hava miktarını artırarak kullanmaktadır.

Hargreaves ve Lowndes (2007), İngiltere kömür ocaklarında, galeri sürme için denenmiş her ters çevresel koşulların göçünde alternatif tali havalandırma sistemlerinin verimliliğini tartışmaktadır. CFD modelleri, yarma-civatalama devrinin değişik durumlarında, galeri açmanın boşaltma ucunda görülen havalandırma akış modellerinin benzerini yapmak için amaçlanmıştır. Simülasyondan sağlanan sonuçlar, temsili bir İngiltere derin kömür ocağının hızlı gelişen galeri sürmede yapılmış tam çapta havalandırma deneylerinin bir serisinden sağlanan veri ile kıyaslanmıştır. Bu kapsamda CFD modelleri, tipiksel yarma-civatalama devri boyunca farklı tali havalandırma sistemleri ile ilişkili havalandırma özelliklerini tanımlamada başarıyla kullanılmaktadır.

Branny (2007), uzunayak çıkış bölgesine yerleştirilmiş jet fanların pozisyonlarını, metan seyreltme verimliliğini Fluent programı ile modelleyerek, serbest jet fanların kullanımı ile metan tehlikesini azaltma yöntemlerini açıklamaktadır. İki birbirini kesen galeride metan girişi, hava girişi ve geri dönüş olarak modelleme yapılmıştır. Daha büyük fan kullanılarak, hava miktarı artırılmış ve metan konsantrasyonu azaltılmıştır.

Wala vd. (2007), hava perdesi ile boş (ekipmansız) yüzey alanında metan davranışını ve 10.7 m çekme mesafesini belirlemiştir. Pittsburgh araştırma laboratuvarında (PRL), galeride akış ve metan dağılım ölçüleri 36 noktada, hava perdesi ve arın arasında, dilim kesme sırasında ölçülmüş ve sınır koşulları; ara yüzey, hız girişi (metan-hava), çıkış (kaymayan duvarlarda akış) alınmıştır. En yüksek metan konsantrasyon değeri, arının sol üst köşesinde modellenirken, deneyde sağ üst köşede gözlenmiştir.

Ren ve Balusu (2008), kesici çevresinde toz akışını CFD ile modellemiştir. Bir kesici yükleyici sistemin, bant yolu kesme tamburu çevresinde hava akış modellerini ve yürüme alanında biriken tozu azaltmada önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Aminassadi ve Hooman (2008), rekup galerisine yerleştirilen vantüb genişliğinin akış-alanına etkisini 2 boyutlu olarak modellemektedir. Rekup galerisine yerleştirilen vantüb genişliği, hız akış fonksiyonu ile artar. Artan vantüb genişliği, daha yüksek hız sağladığından daha iyi havalandırma mekanizması sunmaktadır.

Yuan ve Smith (2008), CFD çalışmasını uzunayak göçük alanlarında doğal ısınma süresinde göçük özelliklerini ve havalandırmaya etkisini araştırmak için, iki uzunayak panosu ile bir emniyet havalandırma sistemi modellemiştir. Doğal ısınma, Arhenius hız kanunu ve önceli lab-ölçek çalışmalarından sağlanan kinetik veri ile göçükte kömürün düşük-sıcaklık oksidasyonu olarak modellenmiştir. Doğal ısınmadan üretilen ısı, yalıtım ve taşınım ile iletilir ve oksijen ile ürünleri yalıtım ve difüzyon ile taşınmaktadır. Simülasyonda değişen havalandırma parametreleri; emniyet kuyusunun ucunda basınç ve uzunayak arınında ikinci girişte ayarlayıcı dayanımdır. Smith ve Yuan (2008), emniyet vanasız havalandırma sistemi ile uzunayak göçük alanlarında doğal ısınmayı CFD ile modellemişlerdir. Geçirgenlik ve porozite jeotekniksel modellerle tahmin edilmiş ve doğal ısınmayı engellemek için nitrojen enjeksiyonu değerlendirilmiştir. Tek bir uzunayak panosu ile emniyet vanasız havalandırma sistemi simule edilmiş ve geçirgenlik ve porozite jeotekniksel model ile bulunmuştur.

Gadde vd. (2008), Amerika' da 2006 yılında meydana gelen Sago maden kazasını hem CFD modeli hem de yapısal model ile modellemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, göçükte metan-hava karışımı sıfır, metan % 8 ile % 12 arasında iken, oksijen % 14' den fazla çıkmıştır. Metan % 5 ile % 15 arasında olduğu zaman, oksijenin bir fonksiyonu olan karbondioksit miktarı oluşmuştur. Metan patlamasında CO₂ etkisinden bahsetmemek gerçek dışıdır. Patlama büyüklüğü ve yayılımında, durağan toz etkisi önemlidir.

Guan-nan vd. (2009)' nın çoklu akışa bağlı maden havalandırma modeli araştırması çalışmasına göre, iki fazlı (hava ve metan) bir modelde sıcaklığın mesafeye bağlı değişimi gösterilmektedir.

Ren ve Balusu (2010), göçükte gaz yönetiminde CFD kullanımı ve drenaj, ısıtma kontrolü için göçüğü etkisizleştirme ve uzunayak toz kontrol stratejilerini anlatmaktadır. Kömür madenciliği endüstrisinde birçok emniyet ve sağlık problemleri, akıcı veya gaz akış mekanizmasının analizini içerir ki bunlar göçükteki gaz göçü, arın havalandırması ve toz dağılımında kullanılmaktadır.

Ndenguma (2010) hazırladığı tezinde, hava akış modellerini ve hava hızını değiştirerek tozu ve geçerli seviyelerde metanı koruyabilen optimum havalandırma dizaynı sağlamak için CFD ile modelleme yapmaktadır.

Oraee ve Goodarzi (2010), bir kömür damarı metan drenajını 2 boyutlu modellemiş ve oluşan riskin difüzyon katsayısına, kömür gözenekliliğine, boruların durumuna ve damarın drenaj için süresine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda metan drenajı, çoğu kömür damarında özellikle yüksek gaz bileşenine sahip yerde üretim artışını gerçekleştirmede önemli bir rol oynamaktadır.

Torano vd. (2006), tünel ve galerilerde ölü zon havalandırmasını modellediği çalışmada, hava akış zonunun ortasında havanın baskın ve galeri çıkışında türbülanslı davranışta olduğunu ortaya koymuştur. Yazarların 2009 yılındaki çalışmada, İspanya'da tali havalandırma sistemine bir kömür galerisinde CFD metodu ile hava akışını ve metan konsantrasyonunu tahmin etmeye çalışmıştır. Arından 6 farklı kesitte ve 5 farklı noktadan 450 toplam ölçüm alınmış ve vantüp borusunun çıkışında metan konsantrasyonu en düşük olmaktadır (Torano vd., 2009). Ardından 2011 yılında, iki tali havalandırma sisteminin zamana bağlı toz davranışını CFD ile modellemesini yaparak, çalışma arınında hava akış ve toz konsantrasyonunu tahmin etmişlerdir (Torano vd., 2011). Kuzey İspanya' da bir kömür ocağında bir AM50 tünel açma makinesi ile sürülen bir galerinin 6 farklı kesitin 6 farklı noktasında solunabilir toz konsantrasyon ölçümleri almışlardır. Bu kapsamda tünel açma makinesi çevresinde ve arın arkasında farklı kesitlerde hava akışı ve toz davranışı modellemişlerdir.

Diego vd. (2011), dairesel tünellerin hava kayıplarını klasik ve CFD metodu ile hesaplamışlar ve yeraltı makinelerinin (yol galeri açıcılar, boşaltma kamyonları ve

ekskavatörler) etkisini göstermişlerdir. İki metodun sonuçları arasında yeterli korelasyon bulunmakta ve bu değerler % 17'nin altındadır.

Ardejani vd. (2011) yaptığı çalışmada Balusu'nun (1993) kullandığı bir CFD kodunu kullanarak yeraltı kömür madenlerinde bir uzunayakta solunabilir toz konsantrasyonu ve hava akış durumunu modellemek için, bir nümeriksel model (FIDAP) geliştirmiştir.

Kenny vd. (2012) bir at nalı kesitli kömür madeni tüneline 11 farklı havalandırma düzenini CFD analizi ile modellemişlerdir. En iyi sonuç, silindirik havalandırma borusunu kare bir havalandırma borusu ile yer değiştirerek sağlamıştır. Çünkü üfleyici havalandırma borusunun kanalın tüm uzunluğuna hava sağlamada yetersiz olduğunu, bu nedenle kare boruların ve ayırıcıların ölü zon ve yakını için iyi bir çözüm sağladığı anlaşılmıştır.

Vlasin vd. (2013), geridönümlü uzun ayakta ve hava boşaltma yollarında metan davranışını hesaplamalı olarak modellemişlerdir.

Xu vd. (2013), basit bir deney madeninde indikatör gaz (SF₆) ölçümleri olarak, CFD metodu ile indikatör gaz dağılımını modellemişlerdir. SF₆ (sülfür hekzaflorit) gaz konsantrasyonu ana giriş ve göçük arasında difüzyon nedeniyle denge durumuna gelmiştir. Xu vd. (2015), bir kireçtaşı maden ocağının bir kesitinden alınan ortalama hız değerleri (m/s) ve indikatör gaz SF₆ (sülfür hekzaflorit) konsantrasyonu değerlerini (ppm), dört farklı durum için (üfleyici fan açık-kapalı ve ayırma kapısı açık-kapalı) iki-boyutlu ve üç-boyutlu k-e türbülans modeli ile modellemiştir. Sınır koşulları; hava hız girişi ve çıkış basıncıdır. Deneysel ve CFD değerlerini karşılaştırıldığında; maksimum konsantrasyon seviyesi, üfleyici fan açık konumda daha düşüktür ve ayırma kapısı kapalıyken daha fazla olduğu görülür. CFD konsantrasyon değerleri, deneysel değerlerden % 30 daha az bulunmuştur. Bu hataların iki ana nedeni vardır. İlki; toplam akış miktarı ölçülen toplam akış miktarından % 13 daha azdır. İkincisi; üfleyici fanın akış miktarı, ölçülen değerden daha azdır.

Xu vd. (2016), indikatör salınım metotları, örnekleme ve analiz tekniklerini inceleyerek, indikatör gaz deneysel dizaynı geliştirmek için üç-boyutlu CFD metodu ile modelleme yapmıştır. CFD modellemesi, indikatör deneyinde önemli faktörleri

belirlemeye yardım eder. Örneğin; salınım oranı ve süresi, beklenen konsantrasyon profili ve salınım yeri.

Torno vd. (2013), bir kömür galerisinde arından 20, 30 ve 40 m. uzaklıkta 3 farklı noktada CO gazını CFD metodu ile modellemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, patlamadan 20 dakika sonra CO konsantrasyonu arından 3 m. mesafede 2 ppm' den azken, galeri açıklığına doğru 50 ppm' den 100 ppm'e doğru artmıştır. Patlamadan 40 dakika sonra CO gazı galeri boyunca 50 ppm' den az bulunmuştur.

CFD metodunu kullanarak modelleme yapan diğer çalışmalar içinde Gheshlaghi vd. (2013), Sarchenhmeb bakır madeninde 120 m. çaplı endüstriyel kuyruk tamburu kalınlığını CFD ile iki fazlı Eulerian/eulerian türbülans modeline göre modelleme yapılmıştır. Modelleme ve deneysel sonuçlar iyi bir ilişki göstermiştir.

Sasmito vd. (2013), oda-topuk kazı yöntemi ile çalışan bir kömür ocağında 2 farklı (sağdan-soldan) kazı durumunda metan konsantrasyonunu CFD metodu ile modellemiştir. Her iki kesme durumunda hava akışı havalandırma için hava sirkülasyonu olmayan yerlerde yeterli iken, büyük hava sirkülasyonu olan soldan kazı durumunda metan % 4' den fazla miktarda bulunmuştur.

Kurnia vd. (2014), bir maden tüneline metan emisyon oranını ve metan hızını CFD metodu ile modellemişlerdir. Metan dağılımı, metan kaynaklarının yeri ve sayısı tarafından etkilenir. Volumetrik akış kontrol ve akış yönü, yenilikçi akış ayırıcı uygulanmasında belirleyicidir. Kurnia vd. (2014), bir havalandırma sistemini ocak arının alt metan seviyelerinde enerji maliyetini azaltmak için değerlendirmişlerdi. Önemli enerji kazanımları ve hava tutucu ekipmanlar, çözüm olarak gösterilmiştir.

Ren vd. (2014), bir madende toz kirliliğini azaltmak için, yeraltı deposunun yukarısında solunabilir toz davranışını CFD modeli ile modellemişlerdir. Solunabilir toz parçaları, yatay hava girişinden havalandırma hacminin artarak (10-13 m³/s) çalışanların nefes alma seviyesinde önemli olarak seyreltilmiştir. Yeraltı deposunun etrafında solunabilir toz parçaları % 68' in üstündedir ve bant yollarında tozda % 40 bir azalma vardır.

Candra vd. (2014), yeraltı kömür arınlarında üfleyici vantilatör, emici vantilatör, kompleks vantilatör ve hava örtüsü arasında CFD metodu kullanarak toz dağılımını modellemiş, hava perdesinin toz kontrolü için daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

Stovern vd. (2014), maden topuğundan çevresine kadar oluşan toz dağılımını CFD metodu ile modellemişlerdir. Model, ince parça toz dağılımı daha büyük parçaların yönünü izlemek ve onların biriktiği yerleri görmek için kullanılırken, iri hava tanelerini modellemek için gazlı duman bulutu dağılımına bakılır. Sonuçlar lokal topoğrafya ve rüzgar hızı profillerinin birikme kontrolü için önemli faktörler olduğunu gösterir.

Deng vd. (2015), bir 20-L küresel gaz patlama test aracı kullanarak CH₄ ve CO konsantrasyonlarını ölçmüşlerdir. Sonra FLACS programı ile değişik CH₄ ve CO konsantrasyonlarının patlamasını modellemişlerdir. Sonuçlara göre CO konsantrasyonu arttıkça, CH₄ patlama limitleri azalır. İnhibitör patlamayı etkiler ve CH₄ konsantrasyonu arttıkça daha fazla önem kazanır.

Lihong vd. (2015), L-kesitli bir NIOSH'a ait havalandırma test galerisinde hava akış ve metan konsantrasyon değerlerini, 4.6 m., 7.6 m. ve 10.7 m. 'lik üç farklı hava perdesi arkası dönüş mesafeleri için Gerçekleşebilir k-e türbülans modeli kullanarak modellemiştir. Sınır koşulları; hava hız, gaz girişi ve çıkış basıncıdır. Deneysel ve CFD metan konsantrasyon değerlerini karşılaştırdığımızda; 4.6 m. perde arkası dönüş mesafesinde iyi ilişki, 7.6 m.' de zayıf ilişki ve 10.7 m.' de en düşük ve en zayıf ilişki bulunmuştur.

Luo vd. (2015), dört farklı dikdörtgen kesitli kömür galerilerinde 100 noktada, hava akış dağılımını CFD ile modellemiştir. Buna göre; düşük hava hız bölgesi, galerilerin duvar ve tavanı, yüksek hava hız bölgesi, pürüzlü duvar ve tavanlı galerinin zemini etrafındadır. Toplam mesafede düşük hava hız dağılımı, en yüksek hızın % 80' nini oluşturmaktadır. Toplam mesafede düşük hız mesafesi yüzdeleri, yüzey pürüzlülüğü ile artmaktadır.

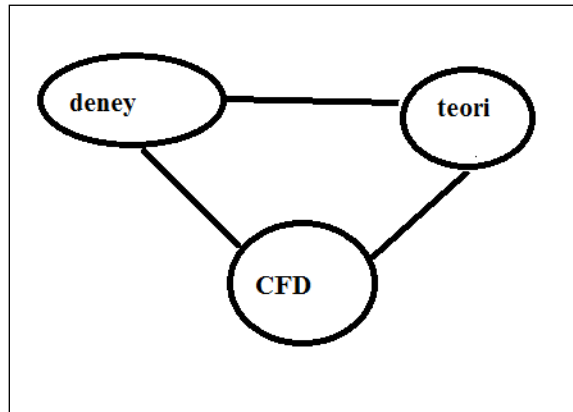
Cheng vd. (2016), Çin' in kuzeyinde tam mekanize bir kömür arınında hava akışını ve farklı negatif basınçlarını modellemiştir. Sınır koşulları; hava hızı ve çıkış akışıdır. Artan havalandırma havası, hava dönüş ve tavan yolu galerisinde ve uzunayak arın üst

köşesinde, gaz konsantrasyonunu azaltır. Tavan gaz drenaj galerisinde artan negatif basınç, tavan ve tavan yolu galerilerinde gaz konsantrasyonunu azaltabilir. Nadiren hava-dönüş galerisinde gaz konsantrasyonunu etkiler. Hava-dönüş galerisi ve arın üst köşesinin gaz konsantrasyonu; tavan yolu galerisinde artan havalandırma hava hızı ile azalmaktadır.

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) METODU İLE MODELLEME YÖNTEMİ

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

Yüksek hızlı bilgisayarların gelişmesi ile kompleks akış problemlerinin çözümünde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), temel akış problemleri ve bilgisayar arasında bir köprü görevi yapmaktadır. CFD, 17. yy.' da Fransa ve İngiltere' de “deneysel akışkanlar dinamiği” ve 18. ve 19. yy.' da Avrupa'da “teoriksel akışkanlar dinamiğine” üçüncü bir yaklaşım olarak, bilgisayarlarda çözülen fiziksel problemler için gerçek nümeriksel algoritmaların kombinasyonu ve yüksek-hızlı dijital bilgisayarların kullanımı ile bulunmuştur (Şekil 3.1) (Anderson, 1995).

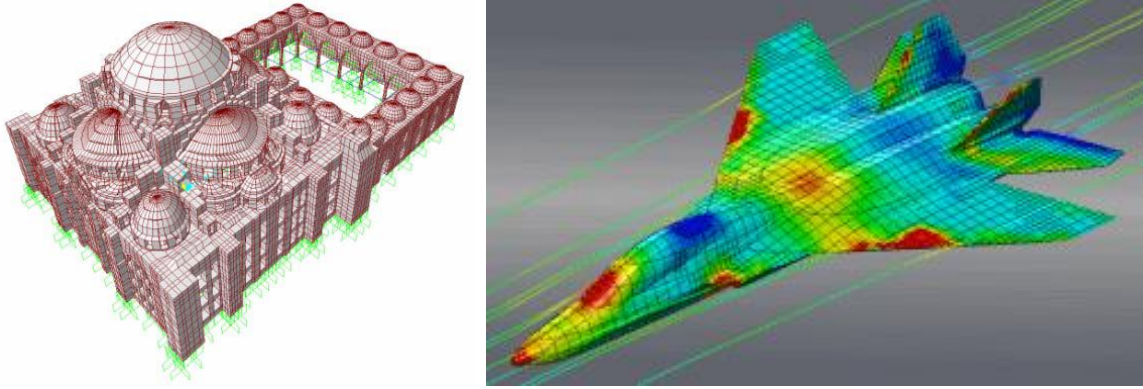


Şekil 3.1. Akışkanlar dinamiğinin “3 boyutlaması”(Anderson, 1995).

CFD, endüstriyel ve endüstriyel olmayan birçok uygulama alanında kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Bu uygulama alanlarına örnek olarak;

- Uçakların ve araçların aerodinamiğinde; kaldırma ve sürüklenme,
- Gemilerin hidrodinamiğinde,
- Enerji santralleri; IC motorlarında ve gaz türbinlerinde yanma,
- Turbo mekaniği; geçitler vs. için dönen akışkanlar,
- Elektrik-elektronik mühendisliği; mikro devrelerde teçhizatın soğutulması,
- Kimyasal işlemler mühendisliği; karıştırma ve parçalama işleri, polimer kalıp kaplama,

- Binaların iç ve dış çevresi; rüzgar yükleme, ısıtma ve havalandırma,
- Deniz mühendisliği; kıydan uzak yapılar üzerindeki yükler,
- Çevre mühendisliği; dışarıdan akan ve hava ve suyu kirleten kirleticilerin dağılımı,
- Maden mühendisliği; yeraltı su akışı, kirleticilerin iletimi, ısı transferi, patlamalar, yangın gelişimi, toz hareketleri ve metan,
- Hidroloji ve okyanus coğrafyası; akarsu, haliç ve okyanustaki akışkanlar,
- Meteoroloji, hava tahmini,
- Biomedikal mühendislik; atardamar ve toplardamardaki kan akışları (Duygu, 2014).

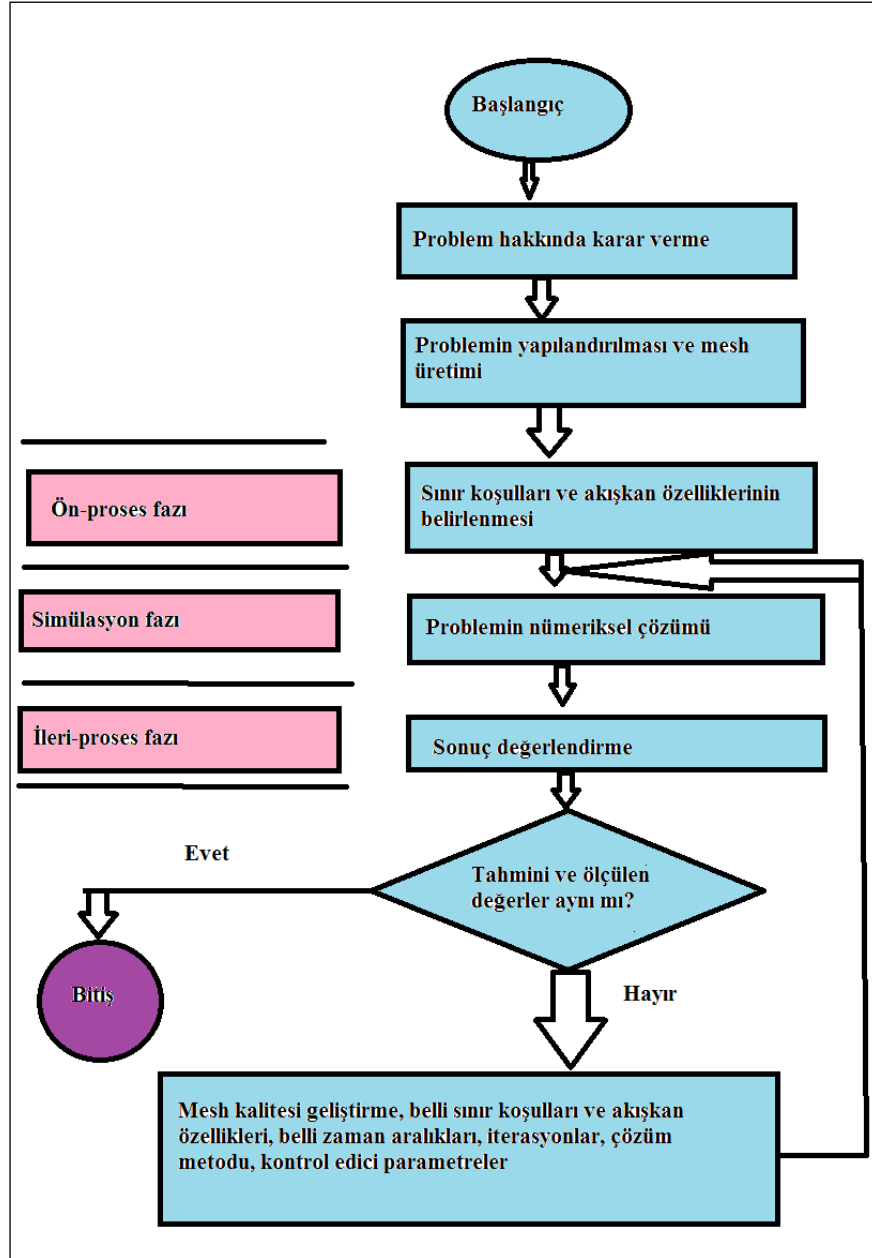


Şekil 3.2. CFD metodunun mühendislikte uygulama örnekleri
(<https://www.inonu.edu.tr/.../Bilg%20Uyg%20Ders%20>).

CFD, nümerik metotlar kullanarak akışkan hareketini zaman ve uzaya göre değişimini tahmin etmek için, akış alanını sonlu sayıda hacimlere bölerek kullanılan bir yöntemdir. Hacimler arasındaki noktalara “nod” denir ve Navier-Stokes denklemleri çözümünden elde edilen sonlu sayıdaki denklem sistemi ile çözülür. Düğüm noktalarının sayısı, kullanılan çözüm yöntemine ve bilgisayar kapasitesine göre, hesaplama zamanı birkaç günden aya kadar uzayabilir (Duygu, 2014). CFD’ nin avantajlarını özetlersek; yeni tasarımlarda zaman ve maliyet tasarrufu sağlama, riskli çalışma şartlarını kapsayan sistemlerde ve deneysel olarak çalışılması zor olan sistemlerde güvenli çalışma imkanı vermektedir (Duygu, 2014).

CFD kullanarak başarılı bir analiz yapmak için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

- 1) Model amacını belirlemek,
- 2) Model geometrisi ve ağı yaratmak,
- 3) Çözücü ve fiziksel modeli kurmak,
- 4) Çözümü tamamlamak ve izlemek,
- 5) Sonuçları değerlendirmek ve kaydetmek,
- 6) Nümeriksel ve fiziksel parametrelerin yeniden gözden geçirilmesi gerekliliğini belirlemek (Vella, 2006). Şekil 3.3, CFD analizinin ana adımlarını göstermektedir.



Şekil 3.3. CFD simülasyonunda ana aşamalar (Ardejani vd., 2011).

CFD üç aşamadan meydana gelir. Bu aşamalar; ön-işlem, çözüm ve son-işlemdir;

- 1) Ön-işlem; akışkan problemin çözümü için kullanıcı tarafından verilen girdileri kapsamaktadır. Bunlar;
 - Çözüm bölgesi geometrisinin tanımı,
 - Çözüm bölgesinin alt elemanlara ayrılması,
 - Fiziksel model belirlenmesi,
 - Akım özelliklerinin tanımlanması,

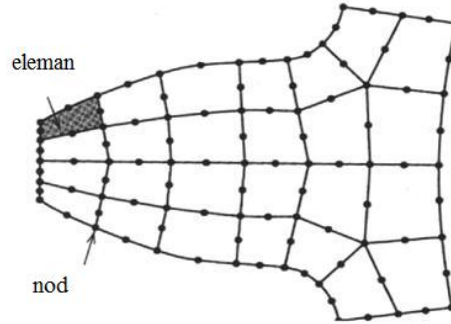
- Sınır şartlarının belirlenmesi.
- 2) Çözüm; bilinmeyen akışkan değişimi için ilgili eşitliklerin çözümünü içermektedir. Üç yöntem içerir; sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sınır eleman yöntemidir. Sonlu hacim yöntemi, sonlu farkların geliştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Çözümün temel aşamaları;
 - Bilinmeyen akım değerlerinin basit fonksiyonlar türünden tanımlanması,
 - Akımı ifade eden denkleme yapılan yaklaşımın uygulanması sonucu ayrıklaştırma ve matematiksel işlemler,
 - Cebirsel denklem takımlarının çözümü.
- 3) Son-işlem, çözümde elde edilen sonuçların çeşitli şekillerde gösterimidir. Bunlar;
 - Bölge gösterimi ve grid gösterimi,
 - Vektörel çizim,
 - 2 veya 3 boyutlu çizimler,
 - Parçacık takibi,
 - Renkli çıktılardır (Filinte, 2006).

Sonlu hacim metodu (FVM), sonlu eleman metodu (FEM) ve sonlu farklar metodu (FDM) olarak sınıflandırılan CFD' nin bilgisayarda kolaylıkla kullanılabilmesi ile yeterli doğruluk sağlanır. Nümeriksel çözüm metodunun ve ağ (mesh) stratejisinin seçimi, CFD problemlerini çözmeye bağlıdır. (Ardejani vd., 2011).

CFD Fluent, sonlu hacim metoduna dayanmaktadır. Akış alanı, akış sınırları içindeki ayrı ağ noktalarından oluşan hesaplamalı ağ kullanılarak ayrı kontrol hacimlerinde parçalara ayrılır. Buna “ayrıştırma” denir. Sınır koşulları (boundaries) girdiler, çıktılar, duvarlar veya akışa uygulanan diğer koşullar olarak tanımlanabilir. Diferansiyel denklemler, matematiksel denklemlere dönüşen ayrı ağ noktaları için yaratılır ve yakınsama olana kadar iterasyon (çözüm) yapılır. Yakınsama başarılı iterasyonlarla uzamayan çözümün bir noktasıdır. Sonlu hacim yöntemi (FVM), sonlu eleman yöntemi (FEM) ve sonlu farklar yöntemi (FDM) aşağıda açıklanmaktadır.

3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi

İncelenmek istenen cismin sonlu sayıda küçük elemana bölünerek incelenmesine “sonlu elemanlar metodu (the finite element method)” denilir (Pençe, 2007). Sonlu elemanlar metodunda yapı birçok elemana bölünür ve bir, iki veya üç boyutlu olan bu elemanlara “düğüm (nod) veya düğüm noktası” denir (Şekil 3.4). Bir eleman içinde hesaplanması istenen büyüklük değeri, o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bilinmesi ve hesaplanması istenen değerler, nodlardaki değerlerdir. Bu değerlerin denklem takımı elde edilir (Özdemir, 2009).



Şekil 3.4. Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar (Özdemir, 2009).

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak gerilme analizi probleminde uygulanmış, tüm uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı, ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akışı, akışkan problemlerinde akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonu olmaktadır.

Sonlu eleman metodunda çözüm yapılırken izlenen yol:

- 1) Yapı veya sürekli eleman birim elemanlara bölünür. Birim elemanın boyutu ve şekli, malzemenin fiziki özelliklerine göre seçilir.
- 2) Elemanlar birbirine düğüm noktaları ile bağlıdır ve bu noktaların yer değiştirmeleri problemin bilinmeyen ana parametreleridir.
- 3) Elemanın yerdeğişimini tanımlamak için, düğüm noktalarının yerdeğişimi cinsinden fonksiyon seçilir ki genelde bir polinomdur.
- 4) Her bir elemanın özelliklerini ifade eden matris denklemi oluşur.

- 5) Elemanlara bölünen sistemin özellikleri toplanır ve sistem davranışını ifade eden matris denklemi oluşur (Pençe, 2007).

Sonlu eleman yönteminin avantajları:

- 1) Geometrisi karmaşık şekilleri inceler ve şekle esneklik kazandırır.
- 2) Karmaşık ve değişik malzeme özellikleri olan sistemlere uygulanır. Örneğin; nonlinear, anizotropi vb...
- 3) Sınır koşulları kolayca tespit edilebilir.
- 4) Matematiksel olarak geliştirilebilir ve birçok problemi çözmek için aynı model kullanılabilir.
- 5) Yöntemin fiziksel ve matematisel anlamı vardır.
- 6) Mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek birçok program mevcuttur (Ansys, Nastran, Patran, Fluent vb.)
(<https://www.inonu.edu.tr/.../Bilg%20Uyg%20Ders%20...>).

Sonlu eleman yönteminin dezavantajları:

- 1) Bazı problemlerde zorluklar (sınır koşulları, ayrıklaştırma vb.) çıkabilir.
- 2) Sağlanan sonucun doğruluğu, verilerin ve yöntemin doğruluğuna bağlıdır.
- 3) Doğru sonuç için bölgenin doğru bir meshi ayrıklaştırması gerekir
(<https://www.inonu.edu.tr/.../Bilg%20Uyg%20Ders%20...>).

3.1.2. Sonlu hacimler yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, sonlu elemanlar yöntemine benzeyerek geometriyi küçük hacimlere bölerek, bu hacimlerin her biri için çözüm yapar. Sonlu farklar yönteminden daha hassas çözümler verir. Sonlu elemanlar yönteminden farkı, akış denklemlerinin çözümünü her kontrol hacmini karakterize eden denklemlerin oluşmasını sağlamaktadır.

Sonlu hacimler yönteminde problem çözümünde izlenecek adımlar aşağıda belirtilmektedir;

- Çalışılacak bölgenin sayısal analize uygun ağ ile kontrol hacimlerine bölünmesi,
- Momentum, süreklilik, enerji ve türbülans gibi istenen denklemlerin çözümü,
- Sonuçlanan denklem takımlarının iteratif çözücü ile daha doğru değerlere ulaşması,
- Yakınsamanın kontrol edilmesi,
- Çözümün elde edilmesi (Duygu, 2014).

3.1.3. Sonlu farklar yöntemi

Sonlu farklar yöntemi, bir fonksiyonun belirli noktalardaki türevini veya integralini saptamak için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin temeli, Daniel ve Jacob Bernoulli, Leonard Euler, Jacobo Stirling gibi ünlü bilim adamları ile iki yüz yıldan önceye gitmektedir. Türev ve integral alma, iç ve dış değer bulma, polinom uydurma gibi problemler bu yöntemle çözülür. Sonlu farklar yöntemi hassasiyetlerine göre ikiye ayrılır; birinci ve ikinci mertebeden ve yüksek mertebeden (üç ve daha fazla mertebeden) sonlu farklardır. Sonlu farklar yöntemi, ileri farklar yaklaşımı, geri farklar yaklaşımı ve merkezi farklar yaklaşımı olarak üç farklı şekilde uygulanır (Günay, 2010).

3.2. CFD Yöntemi ile Çalışan Bilgisayar Programları

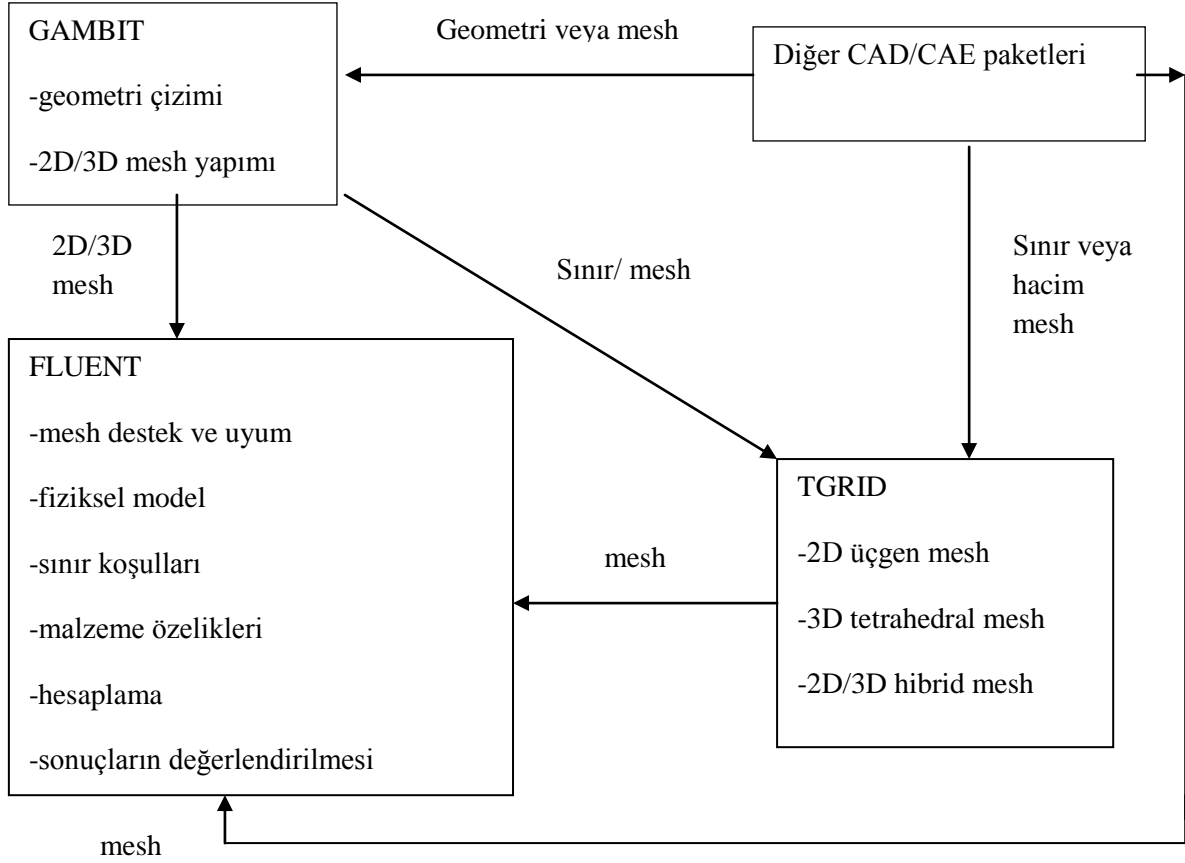
3.2.1. Gambit

Geometri çizimi ve sayısal ağ (mesh) oluşturmak için kullanılan bir programdır. Gambit, iki boyutta kare, dörtgen ve üçgen mesh, üç boyutta dört yüzlü ve altı yüzlü mesh elemanları kullanarak, meshi oluşturan bir yazılımdır (Duygu, 2014).

3.2.2. Fluent yazılım programı

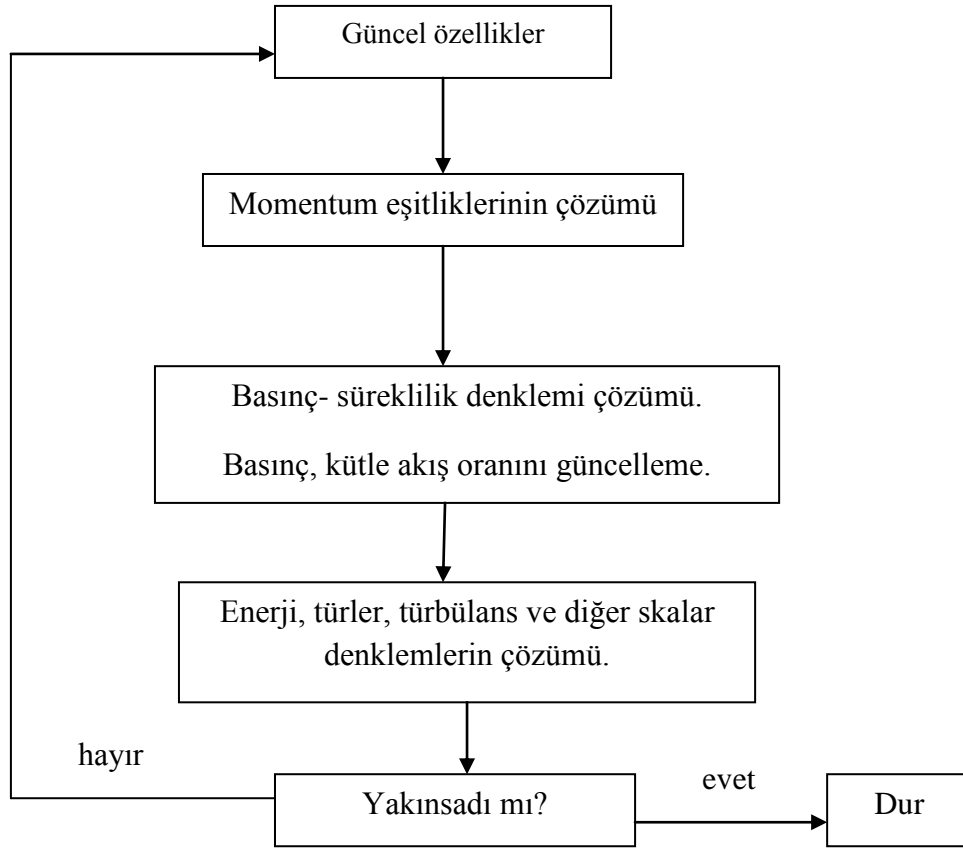
Fluent, CFD yazılımının en büyük programlarından biridir ve iki ayrı alt programa ayrılır: fluent çözüm programı ve geometri ve mesh ayırımı için kullanılan Gambit. Bu yazılım programı iki ve üç boyutlu modellemeyi, mesh kalitesi, kimyasal türlerin karışımı,

çoklu-faz, durgun veya geçiş akış model özellikleri ve fiziksel modellerin ürünlerini sağlamaktadır. Fluent yazılım yapısı Şekil 3.5’ de gösterilmektedir (Vella, 2006).



Şekil 3.5. Fluent program yazılımı.

İki veya üç boyutlu akışkan geometrisi veya modeli, ya Gambit ya da ayrı bir CAD programı ile yapılabilir. Bu model, CAD’ de model yaratıldıktan sonra Gambit kullanılarak meshlenir veya TGRID mesh programı ile desteklenir. Meshlenen geometri, fluent çözücünde çözümlenir. Yazılım, farklı fiziksel modellere bağlı davranışını tahmin etmek için modeli yöneten eşitliklere uygulanır. Sınır koşulları ve malzeme özellikleri hesaplamadan önce belirlenir. Matematiksel eşitlikler, çözüm yakınsaya kadar iterasyon sürecinde çözülen yazılımla üretilir. Yakınsama, ardışık iterasyonlarla uzunca değişmeyen çözümün bir noktasıdır. Bu süreç Fluent ayrıştırıcı çözümde Şekil 3.6’ da gösterilmektedir. Model analiz sonuçları, grafiksel veya tablosal sunulabilir (Vella, 2006).



Şekil 3.6. Fluent ayrıştırıcı çözüm kartı.

3.2.3. Ansys yazılım programı

Ansys, sonlu elemanlar paket programıdır ve fiziksel problemlerin çözümünde kullanılır. Ansys üç kademede çalışır. Bunlar;

- 1) **Preprocessing (problemin tanınması):** Preprocessing ana kademeleri aşağıda verilmiştir:
 - Anahtar nokta, çizgi, alan, hacimlerin tanımlanması,
 - Eleman tipi ve malzeme, geometri özelliklerinin tanımlanması,
 - Çizgi, alan, hacimlerin sonlu elemanlara bölünmesi.
- 2) **Solution (yüklerin ve sınır şartların atanması ve çözümün gerçekleştirilmesi):** Yükler (basınç ve noktasal) belirlenir, sınır şartları belirlenir ve çözüm yapılır. Yük ve sınır şartları preprocessing kademesinde de tanımlanabilir.

3) **Postprocessing (sonuçların değerlendirilmesi):**

- Düğüm noktası yerdeğiştirmelerinin listelenmesi,
- Eleman kuvvet ve momentlerin izlenmesi,
- Yerdeğiştirme çizimleri
- Gerilme diyagramları (www.vedattaskin.com/fileupload/.../ansys_not.pdf).

Yukarıda açıklanan her bir kademedede yapılan işleri özetleyecek olursak;

1) **Preprocessing** kademesi aşağıdakileri içermektedir:

- * **Başlığın verilmesi:** probleme rahat erişebilmek için isim verilir.
- * **Modelin oluşturulması:** model 2D veya 3D çizilir.
- * **Eleman tipinin belirlenmesi:** eleman seçimi model geometrisine bağlı olarak bir, iki veya üç boyutlu olabilir.
- * **Malzeme özelliklerinin girilmesi:** malzeme özellikleri (elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk, termal iletkenlik vb.) tanımlanır.
- * **Modelin elemanlara bölünmesi:** model meshlere ayrılır.

2) **Solution** kademesi aşağıdakileri içermektedir:

- * **Analiz tipinin belirlenmesi:** statik, transit, modal gibi tiplerden biri seçilir.
- * **Sınır şartlarının tanımlanması:** duvarlar, giriş, çıkış gibi sınır şartları belirlenir.
- * **Yüklerin uygulanması:** yükler bir noktaya, bir kenara ve bir yüzeye hatta toplam cisme uygulanabilir. Yükler termal analizde sıcaklık, akışkan analizinde hız, gerilme analizinde yer değiştirme veya basınç şeklinde olabilir.
- * **Çözüm:** otomatik yapılır.

3)**Postprocessing** kademesinde; sonuçlar tablo, kontur şeklinde gösterilebilir. Animasyon yardımı ile model davranışı gözlenebilir (Pençe, 2007).

3.3. ANSYS Türbülans Akış Modelleri

Akışkanlarda türbülans akış, değişen hız alanlarını içermektedir. Bu değişimler, enerji etkileşimi, momentum, akışlarda taşınmış türlerin konsantrasyonları nedeni ile oluşmaktadır. Bu değişimler, pratik mühendislik hesaplamalarında yedekleme için pahalı hesaplama yapmak yerine, daha ekonomik bir hesaplama oluşturur. Bu nedenle, ortalama bir zaman alır, aksi halde elle hesaplama çok fazla zaman alır. Dezavantajı, bu eşitlikler

bilinmeyen değişkenlere eklenebilir ve türbülans modelleri bilinen miktarların değişkenlerini belirlemeye ihtiyaç duymaktadır.

ANSYS türbülans modeller için aşağıdaki seçimleri sağlamaktadır:

1. Spalart Allmaras modeli
2. $k-\epsilon$ türbülans modeli
 - Standard $k-\epsilon$ modeli
 - Yeniden normalleştirme-grubu (RNG) $k-\epsilon$ modeli
 - Gerçekleşebilir $k-\epsilon$ modeli
3. $k-\omega$ türbülans modeli
 - Standard $k-\omega$ modeli
 - Kesme gerilimi iletim (SST) $k-\omega$ modeli
4. Reynolds gerilim modeli (RSM)
 - Linear pressure-strain RSM model
 - Quadratic pressure-strain RSM model
 - Düşük-Re gerilim-omega RSM modeli
5. Detaylı eddy simülasyon (DES) modeli
 - Spalart-Allmaras RANS modeli
 - Gerçekleşir $k-\epsilon$ RANS modeli
 - SST $k-\omega$ RANS modeli
6. Büyük eddy simülasyon (LES) modeli
 - Smargotinsky-Lilly yan ağ-skala modeli
 - WALE yan ağ-skala modeli
 - Kinetik-enerji iletim yan ağ-skala modeli (Kenny vd., 2012).

Türbülans modellerinin her birine baktığımızda, hepsi ayrı avantaj ve dezavantaja sahiptir. Standart $k-\epsilon$ türbülans modeli, türbülans kinetik enerjisi (k) ve dissipasyon oranı (ϵ) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans vizkozitesini (μ_t) içermektedir. İki denklemliler türbülans modelleri arasında ekonomik olması ve doğru sonuç vermesi bakımından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir. RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli, iki denklemliler bir model olup, aynı k ve ϵ denklemleri hesaplanmaktadır. Tek farkı, sabitlerin farklı olması ve ilave terimlerin gelmesidir. Reynolds gerilim modeli

(RSM), Reynolds gerilmelerinin transport denklemlerinin çözümü ile hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu denklemler momentum denklemlerinin salınım büyüklüğü ile çarpılması ve Reynolds ortalamasının alınması ile elde edilir (Duygu, 2014).

Türbülans model seçimi, doğruluk payı, mesh ve çizim zorluğu, hesaplama zamanı gibi faktörlere bağlıdır. Örneğin; spalart-almaras metodu, k-ε, k-ω ve RSM modeline göre en az masraflı modeldir ve tek eşitlik gerektirir. k-ε ve k-ω türbülans modelleri, daha fazla eşitlik içerdiğinden daha çok zaman ve efor gerektirir. İki modele göre RSM, artan eşitlikler nedeni ile % 15-20 daha fazla hafıza ve zaman gerektirmektedir (Kenny vd., 2012).

3.4. Modellemeyi Yöneten Eşitlikler

Akışkanlar mekaniği, akışkan maddelerin hareketlerini analiz eden bir bilim dalıdır. Akışkan maddeler, sıkıştırılabilen ve sıkıştırılamayan akışkanlar olmak üzere ikiye ayrılır. Sıkıştırılabilen akışkanların hareketleri zamana bağlı olarak yoğunlukları değişir, sıkıştırılamayan akışkanların yoğunluğu değişmez.

Navier-Stokes denklemleri, 1800'lerin başında Navier ve Stokes tarafından bulunan, hareket eden bir akışkan hızı, basıncı ve yoğunluğu arasındaki bağıntıyı ifade eden denklemlerdir. Deformasyon hızı ile kayma gerilmesi arasında doğrusal orantı bulunan akışkanlara "Newtonian-akışkanlar (Newton tipi)" denilmektedir. Su ve gazların çoğu, Newtonian akışkanlardır. Bu orantı, 1687 yılında Newton tarafından bulunmuştur (Günay, 2010). Bu orantı, Eşitlik 3.1'de gösterilmektedir;

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.1)$$

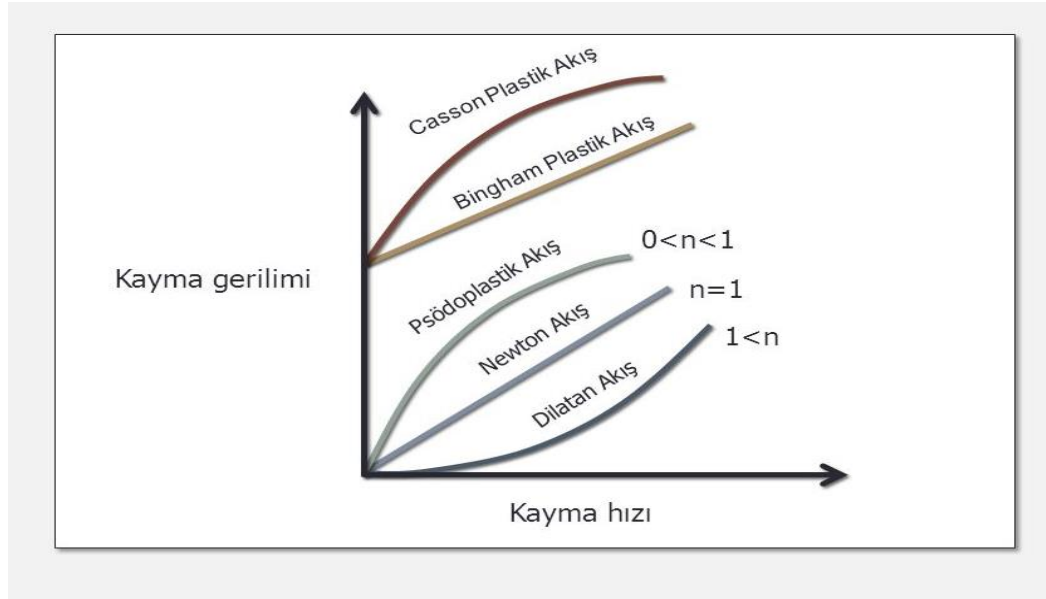
Burada;

τ = tabakalar arası yüzey gerilimi,

μ = dinamik vizkozite,

du/dy = tabakalara dik yöndeki hız gradyenidir (Günay, 2010).

Deformasyon hızı ile kayma gerilmesi arasında doğrusal orantı olmayan akışkanlara “non-Newtonian akışkanlar (Newton-tipi olmayan)” denir. Yoğurt, boya, hamur, jöle bu akışkanlara örnektir (Günay, 2010). Şekil 3.7’ de, deformasyon hızı ve kayma gerilmesi arasındaki oran (n) gösterilmektedir. $n=1$ Newtonian akışı, $n \neq 1$ non-newtonian akışı, $n > 1$ dilatant akış ve $n < 1$ psödoplastik akışı göstermektedir (Umur, 2001).



Şekil 3.7. Newtonian ve non-newtonian akışlarda kayma gerilmesinin değişimi.

Bir akışkan analizi için üç temel yol izlenir. Bunlar;

- Kontrol hacmi ya da integral analizi,
- Sonsuz eleman ya da diferansiyel analiz,
- Deneysel çalışma ve boyut analizidir.

Bu üç analiz durumunda, bir akışkan analizi için gerekli denklemler şunlardır;

- Kütle korunumu (süreklilik),
- Momentum (lineer momentum) korunumu (Newton 2. kanunu),
- Enerji korunumu (Termodinamiğin 1. kanunu),
- Gazlar için hal bağıntısı ($\rho = \rho(P, T)$ vs.),
- Katı yüzey, ara yüzey, akışkan giriş ve çıkış bölgelerine uygun sınır ve başlangıç şartlarıdır (Günay, 2010).

Bu çalışmada, tali galerilerde hava ve metan gaz davranışını türbülans akışta göstermek için kullanılacak olan eşitlikler gösterilmektedir. Navier-Stokes eşitliği, hız, basınç alanları, yoğunlukla ilgili olan süreklilik denklemi (kütle korunumu) ve sıcaklık alanları ile ilgili olan enerji denkleminde oluşmaktadır. Navier-Stokes eşitliği, durağan, sıkıştırılmaz, izotermal, türbülans ve iki gazın reaktif olmayan bir akışıdır (Parra, 2006).

Süreklilik denklemi, Fransız kimyacı A. L. Lavoisier tarafından “Allah’ın yaratması dışında, madde varken yok edilemez, yokken var edilemez şeklinde ifade edilmiştir (Soğukoğlu, 2007). Bir sistem içindeki kütle (m) zamanla değişmeyeceğini ifade etmektedir (Eşitlik 3.2 ve 3.3) (Umur, 2001).

$$dm/dt = 0 \quad (3.2)$$

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.3)$$

Momentumun korunumu denklemi, Newton’ın ikinci hareket kanununa dayanan bir dinamik eşitliktir ve bir parçanın akış hareketini tanımlayan kütle kapalı olmayan (infinitesimal) akış elemanına sistemine uygulanır. Bir cisme dışardan kuvvetler (yerçekimi, basınç ve viskoz) etki ederse, cisim ya dengede kalır ya da bir ivmeyle hareket eder. Newton’ın ikinci kanununa (momentum denklemi) göre herhangi bir t anında bir elemana etkiyen toplam kuvvet, o elemanın kütlesi ve elemanın aynı andaki ivmesinin çarpımına eşittir (Eşitlik 3.4-3.5) (Soğukoğlu, 2007).

$$F=ma \quad (3.4)$$

Momentum denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij})_{eff}}{\partial x_j} \quad (3.5)$$

Türlerin korunumu

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \overline{Y_k}) = \frac{\partial (\rho D_{\text{eff}} \partial \overline{Y_k} / \partial x_j)}{\partial x_j} \quad (3.6)$$

$(\overline{\tau_{ij}})_{\text{eff}}$ etkili gerilme tensörüdür ve eşitlik (3.7)' de vurgulanmaktadır:

$$(\overline{\tau_{ij}})_{\text{eff}} = \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.3) ve (3.6) kütle korunumu, momentum ve türleri sunar. $\rho \overline{u'_i u'_j}$ Reynolds gerilmeleridir ve ortalama hıza bağlı çekme tensörünü kullanmada modeller Eşitlik (3.8)' de gösterilmektedir.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3.8)$$

Burada μ_t eddy türbülans vizkozitesidir. Eşitlik (3.8), Eşitlik (3.7)'i içerir. Reynolds gerilmeleri, etkili vizkozitede sonuçlanan difüzyona eklenebilir:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (3.9)$$

Turbülans vizkozitesi

$$\mu_t = \rho \cdot C_{\mu} \cdot \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.10)$$

Standart k-ε epsilon modeli, turbülans kinetik enerji (k) ve turbülans yayılma hızı (ε) olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 3.11 ve 3.12, turbülans kinetik enerji (k) ve turbülans yayılma hızını (ε) belirten taşınım denklemleridir (Karkınlı vd., 2011):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_{\epsilon} \quad (3.12)$$

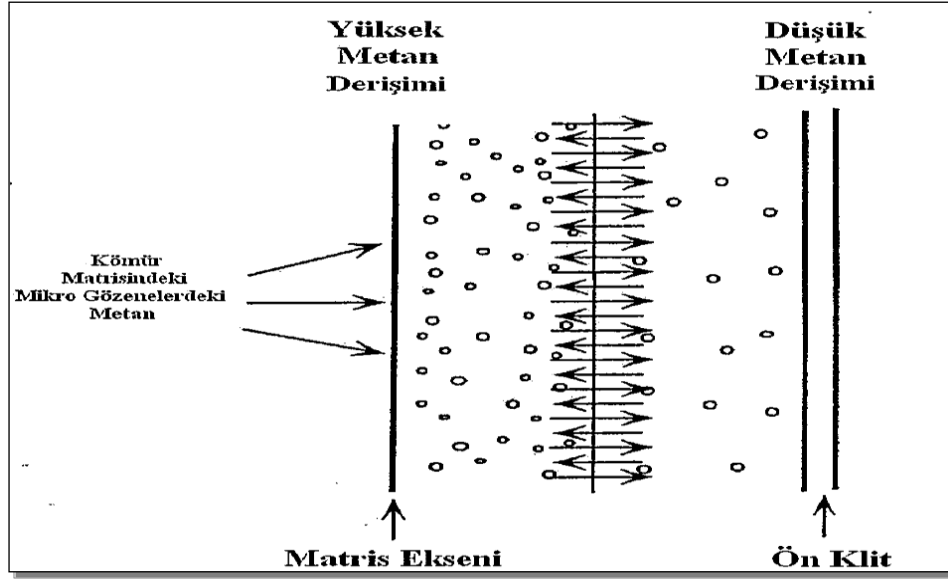
Burada;

k	Türbülans kinetik enerji, (m^2/s^2)
ϵ	Türbülans kinetik enerji yayılma hızı, (m^2/s^3)
ρ	Yoğunluk, (kg/m^3)
μ	Dinamik vizkozite, (Pa.s)
μ_t	Türbülans vizkozitesi, (Pa.s)
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	Türbülans Prandtl sabitleri,
$C_{1\epsilon} C_{2\epsilon} C_{3\epsilon}$	k- ϵ türbülans modeli için model sabitleri,
G_b	Eğilime bağlı türbülans,
G_k	Türbülans kinetik enerji üretimi,
Y_M	Sıkışabilirliğin türbülans etkisi,
$C_1 \epsilon = 1.44, C_2 \epsilon = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$	

Enerji korunumu denklemi, termodinamiğin birinci yasası ile ilgilidir. Bu kanuna göre; belirli bir işleme tabi tutulmuş bir sisteme işlem esnasında (ısı veya iş şeklinde) enerji eklenmiş veya çıkarılmış ise, eklenen enerjinin hiçbir kısmı sistem içinde yok edilemez ve çıkarılan enerjinin hiçbir kısmı sistem içinde yaratılmamıştır (Aybers, 1969). Yani enerji yaratılmaz ve yok edilemez, ancak birbirine dönüşebilir.

3.5. Difüzyon

Difüzyon, birbiri ile temasa geçen iki veya daha fazla gazın dereceli karışımıdır ve onların moleküllerinin eğilimi ile sisteme üniform dağılıma kadar, yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona taşınırlar. Bu karışım moleküllerin sürekli hareketinden olan kütle hava hareketi olmadan oluşur. Difüzyon oranları yüksek sıcaklıklarla artar ve düşük sıcaklıklarda azalır. Şekil 3.8'de metanın kömür içindeki difüzyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Metanın kömür içindeki difüzyonu (Alptekin, 2009).

Difüzyon, en basit Fick kanunu ile açıklanır (Eşitlik 3.13) (McPherson, 2008):

$$u_x = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.13)$$

Burada;

u_x = x yönündeki hız difüzyonu (m/s)

D = difüzyon katsayısı (m^2/s)

C =özgül gaz konsantrasyonu (m^3/m^3)

Gözenekli ortam için Darcy Kanunu (1856) geçerli olmaktadır (Eşitlik 3.14) (McPherson, 2008):

$$u = \frac{k \partial P}{\mu \partial x} \quad (3.14)$$

Burada;

u = gaz hızı (m/s)

k = geçirgenlik (m^2)

μ = dinamik vizkozite (Ns/m^2)

$\partial P/\partial x$ = basınç gradyeni (Pa/m).

Darcy kanununun kullanılabilmesi için şu koşullar olmalıdır: 1) tek bir sıkıştırılmayan akış olmalı, 2) akış laminer bölgede olmalı, 3) akış delik duvarlarında durağan olmalı, 4) akış ve ortam reaktif olmamalı (Sunayuç, 2007).

3.6. Durağan ve Durağan Olmayan Akış

Durağan akış, zamana bağlı olmadan uzayda verilen bir noktadaki hızdır. Gerçekte çoğu akışlar, bazı hız değişim derecesi ile durağan değildir. Eğer hızlar arası değişim minimumsa durağan akışın tahmini sonuçların kullanışsız olmaksızın büyük olasılıkla analizi basitleştirir (Vella, 2006).

3.7. Laminer ve Türbülans Akış

Akışkanlar mekaniğinde, iki farklı akıcı akış vardır. Bunlar: laminer ve türbülans akışlardır. Laminer akış, akışkan taneciği sabit hızda, akış yönüne paralel hareket ederek düzgün akım oluşmasıdır. Türbülanslı akış, akışkanın her taneciği farklı hız ve yönde hareket ederek girdap oluşturmalarıdır. Akım şartlarının belirlenmesinde Reynold sayısının büyüklüğü önemli bir faktör olup, boyutsuz bir parametredir. Reynold sayısı, akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranıdır (Eşitlik 3.15) (Gürü vd., 2012). Dairesel boru akışında Reynolds sayısı, 2300'de laminer akış, 2300 ile 4000 arası geçiş bölgesi ve 4000 üstü türbülans akış oluşturmaktadır (Vella, 2006).

$$R_s = \frac{\rho DV}{\mu} = \frac{DV}{\vartheta} \quad (3.15)$$

Burada;

R_e = Reynold sayısı (boyutsuz)

ρ = akışkan yoğunluğu (kg/m^3)

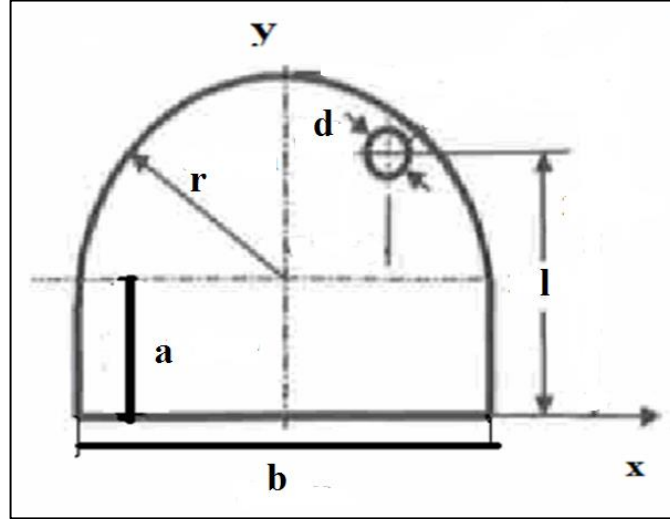
V = ortalama akış hızı (m/s)

D = hidrolik çap (m)

μ = dinamik viskozite (Pa.s)

ϑ = kinematik viskozite (m^2/s)

Dairesel kesitli olmayan boru ve kanallarda akış için Reynolds sayısı, hidrolik çapa bağlıdır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Dairesel kesitli olmayan geometrinin şekli.

Açık kanallar da, kesit alanının (A) ıslak çevreye(P) oranı olarak tanımlanan “hidrolik çap” esas alınır (Eşitlik 3.16) (Gürü vd., 2012). Islak çevre (P), akışkanın temas ettiği kanal ya da boru duvarı, kesitin çevresini oluşturur (web.deu.edu.tr>atiksu>ana58>boru). Eşitlik 3.17, dairesel kesitli olmayan boru ve kanallarda kesit alanını (A) ve Eşitlik 3.18’ de ıslak çevreyi (P) vermektedir.

$$D = 4A/P \quad (3.16)$$

$$A = ab + \frac{\pi r^2}{2} \quad (3.17)$$

$$P = 2a + b + \pi r \quad (3.18)$$

4. ZONGULDAK TAŞ KÖMÜRÜ KURUMU (TTK) JEOLJİK YAPISI VE REZERVLERİ

4.1. Zonguldak Taşkömürü Havzasının Jeolojik Yapısı

Zonguldak kömür havzası, Karadeniz'in güneybatı sahilinde olup, İstanbul' a 350 km., Ankara' ya 265 km. uzaklıkta bulunan, dağlık ve ormanlık bir alandır. En büyük yükseltisi 785 m. ile Göldağı Tepesi, en yüksek tepesi kömürlü Karbonifer Formasyonların bulunduğu 580 m. ile Karaboya tepesidir. İklimi dört mevsimi yağışlı olup, sarp vadi yamaçları ile dikkati çekmektedir. Taşkömürü havza sınırları, 3.000 km² 'si denizde ve 3.885 km² 'si karada olmak üzere toplam 6.885 km² 'dir. Zonguldak taşkömürü havzası yer bulduru haritası Şekil 4.1' de verilmiştir (TTK Faaliyetleri, 2009).



Şekil 4.1. Zonguldak Taşkömürü Havzası (Biçer, 2008).

Türkiye Taş kömürü Kurumu' nda 1941 ve 2013 yılları arasında meydana gelen grizu olayları Çizelge 4.1' de verilmiştir (Öztürk, 2014).

Çizelge 4.1. Türkiye Taşkömürü Kurumu Grizu Olayları, 1941-2013.

Tarih	Müessesesi	İşletme	Olay	Ölü	Yaralı
1941	Üzülmez	Derebaca	İştial	1	0
03.12.1942	Armutçuk	Çamlı	İnfilak	63	5
20.01.1942	Üzülmez		Gaz	1	0
20.01.1942	Karadon		Gaz	1	0
18.11.1942	Üzülmez		Gaz	1	0
02.12.1944	Kozlu		Gaz zehir.	1	0
01.06.1945	Kozlu		İştial	0	8
01.10.1945	Kozlu		İştial	0	10
01.08.1946	Armutçuk		İştial	0	14
21.09.1947	Kozlu	İncirharmanı	İnfilak	53	10
26.03.1947	Kozlu		Gaz	1	0
09.02.1947	Karadon		Gaz	1	0
04.10.1947	Karadon		Gaz	1	0
05.11.1948	Armutçuk		İştial	4	7
17.07.1948	Kozlu		Gaz	1	0
09.08.1949	Üzülmez	Asma	İştial	1	28
05.09.1952	Karadon		Gaz	1	0
22.03.1953	Kozlu	Kılıçlar	Gaz	1	7
04.09.1953	Üzülmez		Gazdan boğ.	2	0
10.06.1954	Üzülmez	Çaydamar	İnfilak	6	4
20.08.1954	Kozlu	İncirharmanı	İnfilak	13	36
18.09.1954	Üzülmez		Gazdan boğ.	1	0
19.10.1954	Merkez		Gazdan boğ.	1	0
23.01.1955	Karadon	Gelik	İnfilak	54	19
21.09.1955	Armutçuk		Gazdan boğ.	1	0
08.06.1955	Armutçuk		İnfilak	2	0
24.04.1956	Armutçuk	Armutçuk	İnfilak	8	64
07.02.1956	Armutçuk		Gazdan boğ.	1	0
13.09.1956	Üzülmez		Gazdan boğ.	1	0
24.02.1957	Kozlu		İnfilak	1	0

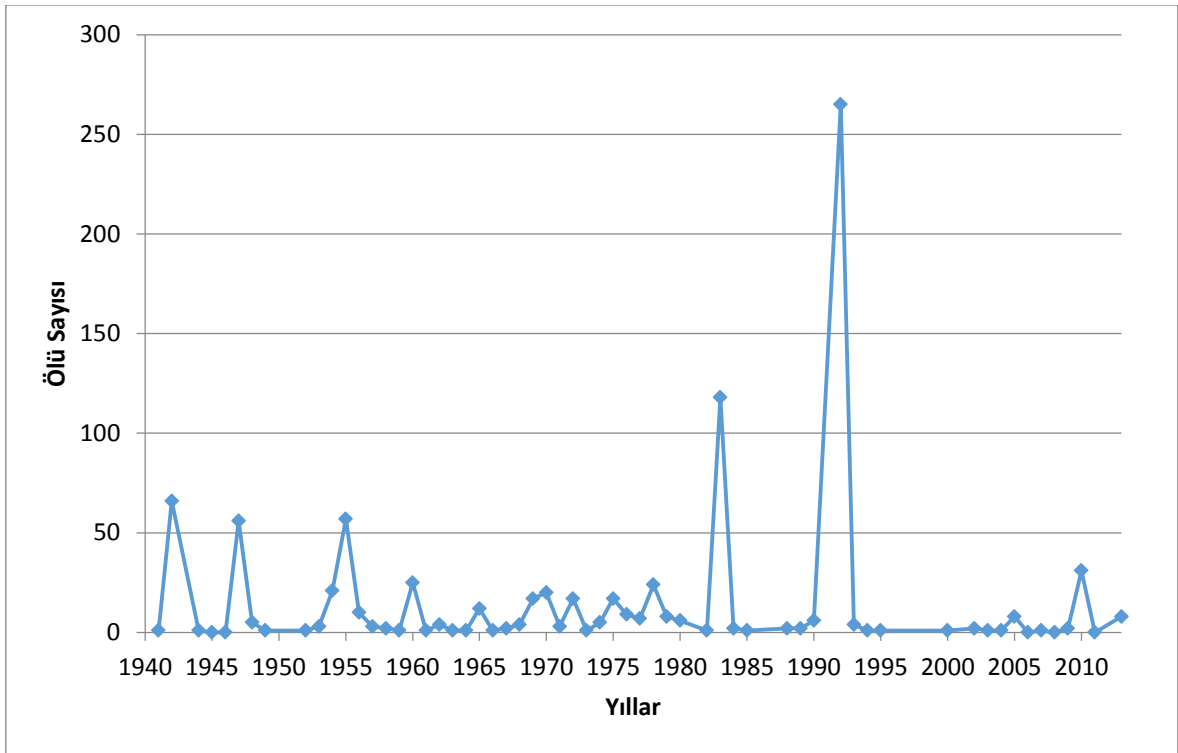
19.03.1957	Kozlu		İnfilak	1	0
23.03.1957	Kozlu		İnfilak	1	0
04.04.1958	Karadon		Gaz zehir.	1	0
16.12.1958	Üzülmez		Gaz zehir.	1	0
12.03.1959	Karadon		Gaz zehir.	1	0
14.12.1960	Kozlu	İncirharmanı	İnfilak	25	13
31.10.1961	Kozlu		İnfilak	1	0
15.02.1962	Karadon	Kilimli	İştial	4	6
30.12.1963	Karadon		İnfilak	1	0
19.06.1964	Armutçuk		İştial	0	8
14.03.1964	Karadon		Gaz zehir.	1	0
16.12.1965	Karadon	Kireçlik	Gazdan boğ.	1	1
19.02.1965	Kozlu		İnfilak	1	7
01.12.1965	Armutçuk		İnfilak	10	9
10.05.1966	Üzülmez		İnfilak	1	0
10.10.1967	Karadon	Kilimli	İştial	1	9
01.06.1967	Karadon		İnfilak	1	0
20.12.1968	Kozlu	İncirharmanı	İnfilak	4	2
11.09.1969	Karadon	Karadon	İnfilak	16	8
19.08.1969	Karadon		Gazdan boğ.	1	0
22.03.1970	Üzülmez	Asma	İnfilak	2	0
02.09.1970	Üzülmez		İnfilak	1	0
27.08.1970	Armutçuk	Armutçuk	İnfilak	7	0
30.06.1970	Kozlu		İnfilak	4	0
12.02.1970	Kozlu		Gazdan boğ.	2	0
13.01.1970	Karadon		Gazdan boğ.	4	0
03.01.1971	Armutçuk		İnfilak	1	3
21.07.1971	Karadon		İnfilak	1	0
28.09.1971	Kozlu		Gazdan boğ.	1	0
23.10.1972	Kozlu	İncirharmanı	İnfilak	16	41
23.10.1972	Üzülmez	Çaydamar	İnfilak	8	30
23.05.1972	Karadon		Degaj	2	0

19.06.1972	Armutçuk		Degaj	3	25
21.08.1972	Karadon		İnfilak	1	0
20.11.1972	Karadon		Degaj	1	0
14.06.1972	Üzülmez		Gazdan boğ.	2	0
09.08.1973	Kozlu		İnfilak	2	8
15.08.1973	Armutçuk		Gazdan boğ.	1	0
15.09.1974	Kozlu		Zehirlenme	3	0
23.10.1974	Kozlu		Zehirlenme	1	0
01.08.1974	Amasra		İştial	1	0
01.08.1974	Armutçuk		İştial	1	0
14.04.1974	Karadon		İştial	2	0
06.03.1975	Karadon		Ga. Degaj	3	0
23.08.1975	Armutçuk		Gazdan boğ.	1	0
28.10.1975	Karadon	Karadon	İnfilak	13	2
01.05.1976	Karadon		İştial	1	0
13.08.1976	Armutçuk		Zehirlenme	7	0
31.08.1976	Üzülmez		Gazdan boğ.	1	0
03.08.1977	Üzülmez		İnfilak	4	0
17.04.1977	Karadon		Gazdan boğ.	1	0
09.06.1977	Armutçuk		Gazdan boğ.	1	0
05.07.1977	Kozlu		Gazdan boğ.	1	0
03.03.1978	Kozlu		Degaj	2	0
19.01.1978	Amasra		Gazdan boğ.	1	0
24.04.1978	Armutçuk	Alacağzı	İnfilak	17	5
07.03.1978	Kozlu		Gazdan boğ.	1	0
16.05.1978	Karadon		Gazdan boğ.	1	0
28.07.1978	Armutçuk		Gazdan boğ.	2	0
12.08.1979	Karadon	Gelik	Gazdan boğ.	6	0
28.05.1979	Kozlu		Degaj	1	0
28.06.1979	Karadon		Zehirlenme	1	0
09.05.1980	Kozlu		Gazdan boğ.	2	0
21.05.1980	Kozlu		Gazdan boğ.	1	0

24.09.1980	Kozlu		Gazdan boğ.	1	0
19.11.1980	Karadon		Degaj	1	0
16.12.1980	Karadon		Gazdan boğ.	1	0
25.10.1982	Armutçuk		Gazdan boğ.	1	0
07.03.1983	Armutçuk	Kandilli	İnfilak	103	96
11.04.1983	Kozlu	İhsaniye	İnfilak	11	9
30.05.1983	Kozlu		Degaj	1	0
04.07.1983	Kozlu		Gazdan boğ.	1	0
30.08.1983	Armutçuk		Gazdan boğ.	2	0
17.07.1984	Karadon		Degaj	1	0
27.09.1985	Üzülmez		Gazdan boğ.	1	0
01.07.1988	Karadon		Boğulma	2	0
28.08.1989	Amasra		Boğulma	2	0
31.01.1990	Amasra	Amasra	İnfilak	5	0
08.10.1990	Karadon		Boğulma	1	0
31.01.1992	Kozlu		Zehirlenme	1	0
15.06.1992	Amasra		Gaz	1	0
03.03.1992	Kozlu	İncirharmanı	İnfilak	263	77
22.12.1993	Karadon		Boğulma	4	0
10.10.1994	Amasra		Boğulma	1	0
08.08.1995	Üzülmez		Boğulma	1	0
14.02.2000	Karadon		Degaj	1	2
19.12.2002	Karadon		Degaj	2	0
14.10.2003	Kozlu		Degaj	1	5
02.03.2004	Karadon		Degaj	1	0
30.12.2004	Karadon		Degaj	4	0
16.06.2005	Karadon		Degaj	5	0
15.05.2005	Kozlu		Gaz	3	0
01.01.2006	Amasra		Zehirlenme	0	5
25.06.2007	Karadon		Gaz	1	0
12.11.2007	Karadon		Zehirlenme	0	1
01.01.2008	Karadon		Zehirlenme	0	1

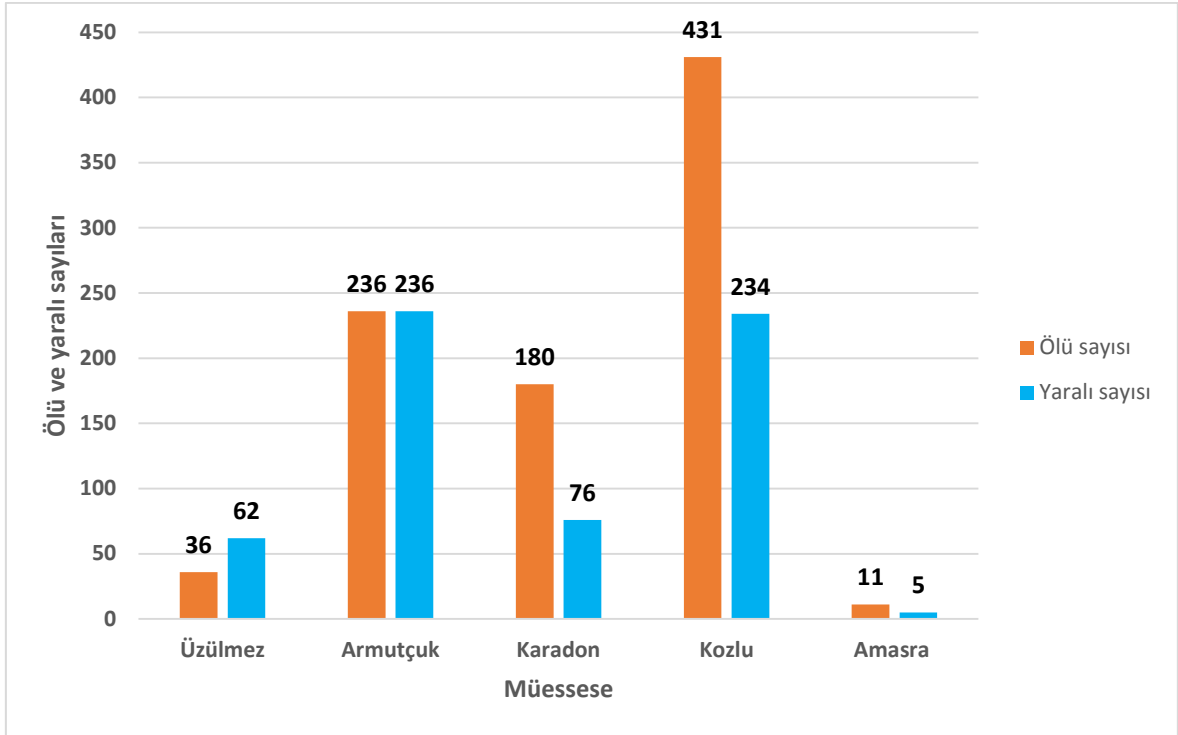
10.02.2009	Karadon		Boğulma	2	5
04.09.2010	Karadon		Boğulma	1	0
17.05.2010	Karadon	Kilimli	İnfilak	30	12
31.03.2011	Karadon		Degaj	0	10
15.04.2011	Karadon		Degaj	0	0
07.03.2013	Kozlu		Degaj	8	1
TOPLAM				895	613

Şekil 4.2' de TTK'ya bağlı müesseselerin 1941-2013 yılları arasındaki grizu olaylarında meydana gelen ölü sayılarının dağılımı ve ayrıca, Şekil 4.3' de müesseselere bağlı ölü ve yaralı sayılarının dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.2. 1941-2013 yılları arası ölü sayıları

Şekil 4.2 incelediğinde, TTK'da grizu kaynaklı ölüm vakalarının işletme tarihinden itibaren devam ettiği ve 1983 ile 1992 yıllarında çok büyük kayıplara sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 4.3. Müesseseye bağlı ölü ve yaralı sayıları

Şekil 4.3 incelendiğinde, Kozlu müessesesinde grizu kaynaklı ölüm vakalarının diğer tüm işletmelerden daha fazla olduğu, bunu Armutçuk müessesesinin izlediği söylenebilir.

Çizelge 4.2' de Armutçuk, Amasra ve Üzülmöz müessesesi ocakların da 1970 ve 2012 yılları arasında üretim miktarı ve aspiratör çıkışında metan miktarı (m^3/t) verilmiştir (Öztürk, 2014).

Çizelge 4.2. Armutçuk, Amasra ve Üzülmöz müessesesi ocakların da 1970 ve 2012 yılları arasında üretim miktarı ve aspiratör çıkışında metan miktarı (m^3/t).

Yıllar	Armutçuk		Amasra		Üzülmöz	
	(Tüvenan) Üretim, (ton/yıl)	Gaz (m^3/t)	(Tüvenan) Üretim, (ton/yıl)	Gaz (m^3/t)	(Tüvenan) Üretim, (ton/yıl)	Gaz (m^3/t)
1970	639.074	20,11	0	-	2.114.363	7,01
1971	670.476	21,05	0	-	2.095.785	7,33
1972	674.306	20,34	0	-	2.172.170	7,41
1973	634.708	20,18	228.500	6,93	2.118.363	7,66
1974	767.252	20,21	228.395	6,91	2.303.010	7,95

1975	728.765	19,88	241.409	6,74	2.190.160	8,08
1976	679.915	20,25	109.513	6,83	2.032.146	8,41
1977	644.892	21,22	300.219	6,21	2.042.551	10,06
1978	685.767	21,66	338.430	6,81	2.201.294	10,11
1979	604.796	21,54	186.743	6,86	2.021.124	9,46
1980	522.786	21,08	312.639	6,66	1.812.732	9,33
1981	494.253	20,66	386.939	6,57	2.055.487	9,66
1982	626.009	21,33	452.977	5,73	1.913.889	9,75
1983	444.940	20,91	527.486	5,69	1.748.621	9,63
1984	477.895	20,88	516.120	5,69	1.918.101	9,61
1985	515.685	21,14	542.992	5,98	1.944.722	9,54
1986	516.933	21,28	498.645	5,93	1.856.662	9,40
1987	545.095	20,86	477.096	5,76	1.842.404	9,26
1988	488.920	20,28	464.414	5,58	1.692.924	9,29
1989	426.840	20,16	426.983	5,91	1.520.026	9,38
1990	497.844	21,73	369.527	5,68	1.396.908	9,34
1991	387.000	20,90	389.248	5,14	1.239.793	9,45
1992	483.223	20,33	437.089	5,83	1.118.810	9,46
1993	518.781	20,10	350.335	5,88	1.188.228	9,56
1994	402.170	20,24	343.333	5,93	1.143.357	9,58
1995	284.470	22,68	297.224	5,68	930.973	9,64
1996	340.493	21,63	254.573	5,71	989.993	9,61
1997	279.202	21,88	244.407	5,82	853.668	9,67
1998	290.508	21,05	223.458	5,88	729.141	9,73
1999	245.476	21,31	196.619	6,46	631.682	9,89
2000	358.976	20,33	276.727	6,65	775.991	9,79
2001	381.904	21,08	294.423	6,78	826.471	9,93
2002	382.117	21,28	260.860	7,63	821.913	9,83
2003	349.434	21,09	233.820	7,66	717.472	9,69
2004	372.731	21,78	233.600	7,91	682.622	9,59
2005	378.411	21,02	215.422	8,13	596.585	9,73
2006	330.585	21,84	210.858	8,90	452.941	9,78
2007	342.149	22,09	194.739	8,55	521.675	9,87
2008	332.485	21,36	203.073	8,86	466.850	9,83

2009	326.820	21,24	239.598	8,73	659.246	9,94
2010	265.591	21,78	287.630	8,87	571.300	9,90
2011	251.785	22,35	289.880	9,03	571.300	9,94
2012	252.338	22,18	250.206	9,12	486.055	9,96
Ortalama		21,08		6,78		9,35
Maksimum		22,35		9,12		9,96

Çizelge 4.3' de Kozlu ve Karadon müessesesi ocaklarında 1975 ve 2010 yılları arasında üretim miktarı ve aspiratör çıkışında metan miktarı (m^3/t) verilmiştir (Öztürk, 2014).

Çizelge 4.3. Kozlu ve Karadon müessesesi ocaklarında 1975 ve 2010 yılları arasında üretim miktarı ve aspiratör çıkışında metan miktarı (% CH_4).

Yıllar	Kozlu		Karadon	
	Tüvenan üretim (ton)	Açığa çıkan metan miktarı (m^3/t)	Tüvenan üretim (ton)	Açığa çıkan metan miktarı (m^3/t)
1975	2.209.988	23,64	2.984.961	12,86
1976	2.149.263	21,78	2.792.524	15,06
1977	2.019.488	23,58	2.658.787	17,70
1978	2.092.221	21,05	2.423.599	17,40
197-	1.851.544	22,67	2.354.071	18,51
1980	1.870.619	24,34	2.079.979	19,13
1981	1.959.100	23,70	2.492.113	11,54
1982	1.857.417	23,67	2.372.579	12,12
1983	1.574.664	25,40	2.429.289	11,84
1984	1.786.665	22,86	2.404.632	11,96
1985	1.783.734	18,81	2.472.950	11,63
1986	1.833.802	14,23	2.309.250	12,45
1987	1.817.827	17,64	2.402.057	11,97
1988	1.772.997	17,53	2.268.293	12,68
1989	1.622.557	20,27	2.262.378	12,72

1990	1.524.398	21,96	1.858.070	15,48
1991	1.391.768	21,13	1.801.331	15,97
1992	947.820	15,85	1.733.777	16,59
1993	889.120	10,41	1.662.204	17,30
1994	804.021	15,58	1.517.899	11,53
1995	644.145	15,59	1.094.758	11,67
1996	675.074	19,44	1.059.989	12,25
1997	593.745	14,35	1.147.666	12,42
1998	599.472	20,89	1.023.259	13,93
1999	567.707	22,06	959.691	14,85
2000	638.540	19,61	1.146.737	12,05
2001	665.213	18,18	1.324.094	10,44
2002	657.782	18,38	1.123.955	12,29
2003	601.578	20,10	1.052.030	12,72
2004	540.825	22,36	974.466	13,29
2005	509.688	23,73	920.606	14,77
2006	506.760	23,87	975.748	15,74
2007	555.430	22,55	809.726	13,87
2008	518.230	24,17	814.819	13,78
2009	653.700	19,16	1.043.879	10,75
2010	683.150	18,33	905.393	12,40
Ortalama		20,24		12,60
Maksimum		25,40		19,13

Çizelge 4.2 ve 4.3 değerlendirildiğinde, TTK' ya bağlı işletmelerden Kozlu ve Armutçuk' un en gazlı ocaklar olduğu söylenebilir.

4.1.1. Stratigrafi

Zonguldak Taşkömürü havzasında tabandan tavana doğru görülen seriler aşağıda açıklanmaktadır (TTK Faaliyetleri, 2001).

4.1.1.1. Temel formasyonlar

- a) Kristalen seri
- b) Silüriyen
- c) Devoniyen
- d) Alt Karbonifer

4.1.1.2. Kömürlü birimler (Üst karbonifer)

Alacağzı formasyonu (Namuriyen):

Genellikle ince şist ve kumtaşı tabakalarından oluşmakta olup, alt kısmı kömürsüz, üst kısmı birçok kömür tabakası içermektedir. Formasyonun kalınlığı değişkenlik gösterip, 600-1000 m. arasında değişmektedir.

Kozlu formasyonu (Westfaliyen A):

Havzada en çok yayılımı olan seri olup, serinin toplam kalınlığı 550-800 m. arasında değişim göstermektedir. Genellikle kumtaşı, konglomera, şist ve kömür tabakalarından oluşup, 22 adet işletilebilir kömür damarı içermektedir. Kozlu serisi tabanında Kılıç serisi yer almakta ve 5 damarla, Üzülmüş Müessesinde tek damarla temsil edilmektedir.

Karadon formasyonu (Westfaliyen B,C,D):

Seri tabanında kuvars, metamorfik kayaç çakıllı kalın konglomeratik bir seviye, üstünde kaba kumtaşı konglomera ve kömür tabakalarından oluşmaktadır. Bu serideki kömür damarlarının kalınlıkları, adedi ve yayılımı Kozlu formasyonundan az olup, birimin toplam kalınlığı 400-450 metredir. Ayrıca bu seride Şiferton (ateşe dayanıklı refrakter kil) yüksek kalitede bulunmaktadır.

4.1.1.3.Örtü birimleri

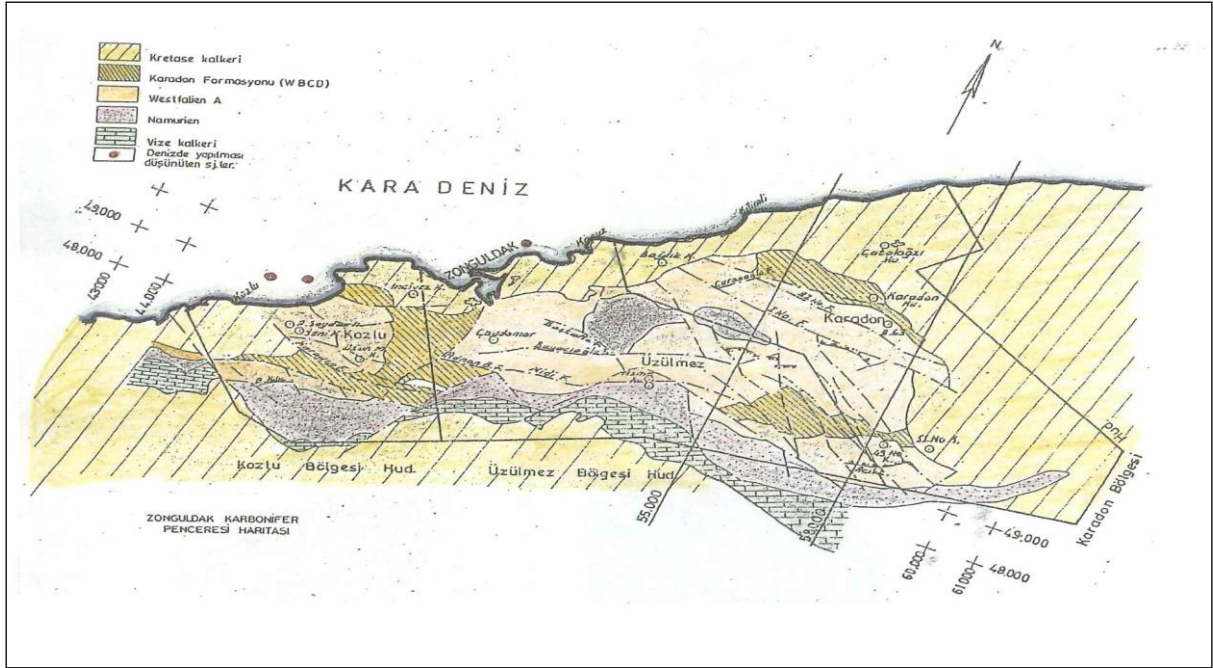
- a) Permiyen
- b) Jura
- c) Kretase
 - Barremiyen
 - Apsiyen
 - Albiyen
 - Senomaniyen
 - Türoniyen
 - Koniasiyen
 - Kampaniyen
 - Maestrichtiyen
- d) Tersiyer
 - Paleosen-Eosen

4.1.2. Tektonik durum, faylar ve kıvrımlar

Havza, Hersiniyen (Kreatese öncesi) ve Alpin (Kretase sonrası) olmak üzere iki orojenezin etkisindedir. Bu orojenezler doğu-batı yönlü kıvrımlardan oluşmuş ve büyük gravite fayları oluşturmuştur. Tabaka eğimleri $40-45^{\circ}$ dir.

Faylar düşey veya eğik atımlı normal gravite faylarıdır. En büyük fay Midi fayı, Hersiniyen Orojenezi sırasında oluşmuş, batıda güneybatı-kuzeydoğu yönünde, doğuda doğu-batı konumunda uzanmaktadır. Hersiniyen ve Alpin Orojenezi sırasında oluşan doğu-batı uzanımlı büyük ölçekli birincil faylar, kuzey-güney yönlü gelişen ikincil faylar tüm havzayı kesmektedir.

Kıvrımlar, ortalama doğu-batı doğrultulu uzanır ve Namuriyen mostra verdiği Gelik antiklinalinin bulunduğu kuzeyde ve güneyde Karadon formasyonunun senklinal eksenini boyunca yükselmiş büyük bir senklinoryum bulunmaktadır (Şekil 4.4) (TTK Faaliyetleri, 2001).



Şekil 4.4. Taşkömürü Havzası jeolojik yapısı (TTK Faaliyetleri, 2009).

4.2. Zonguldak Taşkömürünün Rezervleri

Havzanın -1200 m. derinliğe kadar hesaplanmış jeolojik rezervi yaklaşık 1.316 milyar ton olup, bunun % 40' ı (529.4 milyar ton) görünür rezerv olmaktadır (Çizelge 4.4). Taşkömürleri koklaşır ve koklaşmaz olarak ikiye ayrılır ve kalorifik değerleri 6200-7250 kcal/kg arasında bulunmaktadır. Metalürjik kok elde etmeye yönelik rezervler Kozlu, Üzülmöz ve Karadeniz üretim alanlarında bulunup, toplam rezervin yaklaşık 2/3' ünü oluşturmaktadır. Kömür damarlarının eğimi 0-90° arasında olup, damar kalınlıkları 0.80-3.50 m. arasında değişmektedir. Çalışılan en derin kot -560 m. ve ortalama çalışma derinliği -371 m.' dir. Damar eğimi yüzünden çalışma derinliği her yıl ortalama 12 m. artmaktadır (TTK Faaliyetleri, 2009).

Çizelge 4.4. Havza rezervlerinin müesseselere göre dağılımı (TTK Faaliyetleri, 2009).

REZERV	Armutçuk	Kozlu	Üzülmöz	Karadeniz	Amasra	TTK
Hazır	1.468.000	3.353.714	2.178.060	2.924.000	233.700	10.157.474
Görünür	4.594.324	68.729.821	137.181.373	136.905.375	171.873.195	519.284.088
Muhtemel	11.089.144	40.539.000	94.342.000	159.162.000	115.052.000	420.184.144
Mümkün	5.885.637	47.975.000	74.020.000	117.034.000	121.535.000	366.449.637
TOPLAM	23.037.105	160.597.535	307.721.433	416.025.375	408.693.895	1.316.075.343

4.3. Zonguldak Taşkömürünün Karakteristik Özellikleri

TTK tarafından üretilen kömürlerin boyutlarına göre kül, nem ve kalorifik değerleri Çizelge 4.5’ de verilmektedir.

Çizelge 4.5. Müesseselere göre kömür özellikleri (TTK Faaliyetleri, 2009).

Nitelik	Armutçuk Müessesesi			Amasra Müessesesi			Kozlu-Üzülmez Müe.			Karadon Müessesesi		
	AID (kcal/kg)	Kül (%)	Nem (%)	AID (kcal/k g)	Kül (%)	Nem (%)	AID (kcal/kg)	Kül (%)	Nem (%)	AID (kcal/k g)	Kül (%)	Nem (%)
+18	7.000	9±2	3±1	6.000	14±2	4±1	6.900	13±2	4±1	6.900	13±2	3±1
10-18	6.800	9±2	5±1	5.850	14±2	6±1	6.800	13±2	4±1	6.800	12±2	4±1
0-10	6.050	9±2	14±2	5.450	12±2	14±2	6.300	9±1	6±1	6.200	12±2	12±2
Santral Y.	3.300	47	12-16				3.300	47	12-16	3.300	47	12-16

4.4. Müesseseler

TTK Genel Müdürlüğü 5 üretim müessesesinden meydana gelmektedir; Armutçuk, Kozlu, Üzülmez, Karadon ve Amasra’dır. Uygulama çalışması Kozlu Müessesesi’ nde gerçekleştirilmiş olup, işletmeye ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

4.4.1. Kozlu taşkömürü işletme müessesesi

Kozlu Taşkömürü İşletme Müessesesi, kuzeyde Karadeniz, güneyde Midi Fayı, batıda Öküşne Fayı, doğuda Damlar ve Adnanbey fayı ile sınırlı olup, Zonguldak ilinin 6 km. batısında yaklaşık 9 km²’ lik bir alanda üretim yapmaktadır. Kozlu Müessesesi İhsaniye ve İncirhamamı olmak üzere iki işletme halinde üretim yapmaktadır. Üretim 5 ayrı katta sürdürülüp, bu katlar sırayla +20/+80; -160/-185; -190/-250; -425/-485; -485/-555’ dir. Üretim klasik göçertmeli uzun ayak, geri dönümlü göçertmeli uzun ayak ve pnömatik patlatma şeklinde yapılmaktadır.

4.4.1.1. Jeolojik özellikleri

Jeolojisi İstif Mesozoyik yaşlı örtü formasyonları ve Paleozoyik yaşlı Karbonifer formasyonlarından oluşmaktadır (TTK Faaliyetleri, 2001).

Mesozoyik:

Zonguldak Formasyonu: Kandilli, Alacaağzı, Ilıksu ve Değirmenağzı çevresinde mostra veren bu formasyon, üretif Karboniferi diskordan olarak örten kireçtaşlarından oluşmaktadır. 15-50 metre arasında kalınlık gösteren taban konglomerası ile başlayan ve çakılları Paleozoyik yaşlı karbonatlı birim üçe ayrılmaktadır: Öküşne kireçtaşı üyesi, İncüvez Kırıntılı üyesi ve Kapuz Kireçtaşı üyesi. Alt seviyede ortalama 150 metre kalınlığında koyu gri renkli, kumlu dolomitik kireçtaşı, ara seviyede 50 metre kalınlığında pembe, az breşik kireçtaşı, üst seviyede bej, 150-350 metre arası kalınlıkta kireçtaşı bulunmaktadır. Seyrek olarak kırmızı kumtaşı ve çamurtaşı birimleri bulunmaktadır (TTK Faaliyetleri, 2001).

Paleozoyik:

Yaşlıdan gence doğru Yılanlı, Alacaağzı, Kozlu ve Karadon Formasyonlarından oluşmaktadır.

Yılanlı Formasyonu, kireçtaşı ardalanmasından oluşan, Kozlu' nun güneyinde kretase örtüsü altında aşınma ile oluşan, 800-850 metre kalınlığında bir birimdir.

Alacaağzı Formasyonu, 250-300 metre kalınlıkta, ince taneli kumtaşı, silttaşı, kiltası, kireçtaşı ve kömür ardalanmasından oluşan, yeşil, sarı ve beyaz renkli bir birimdir. Kumtaşlarının tane boyutu 0.10-0.50 metre arasında olmasında rağmen ekonomik değildir. En belirgin özelliği konglomera içermez.

Kozlu Formasyonu, konglomera, mikalı karbonatlı kumtaşı, kiltası, silttaşı ve kömür ardalanmasından oluşup, ekonomik olarak 20-24 adet kömür damarı içermektedir. Kömür damarının tavan ve tabanı kiltası ve silttaşıdır. Alacaağzı formasyonuna geçiş

sırasında 0.5-4.0 metre kuvarsitli seviye bulunmaktadır. Tavanda Karadon Formasyonu bulunup, 750-850 metre kalınlıktadır.

Karadon Formasyonu, konglomera, mikalı karbonatlı kumtaşı, kıltaşı, silttaşı ve kömür ardalanmasından oluşup, tabanında Westfaliyen A yaşlı Kozlu Formasyonu ve tavanında Barramiyen yaşlı Zonguldak Formasyonu vardır. Çok az ekonomik kömür damarına sahiptir ve 250-400 metre kalınlıktadır (TTK Faaliyetleri, 2001).

4.4.1.2. Tektonik ve faylar

Kozlu bölgesi, Hersiniyen Orojenizin etkisiyle kuzeybatı-güneydoğu uzanımlı deformasyonlara sahiptir. İkincil olarak alpin Orojenizin etkisi ile bölgenin kuzeyinde yoğun bir çökme ve güneyinde yükselme görülmektedir.

Bölgede bulunan faylar aşağıda belirtilmektedir:

- a) Kuzey Fayı: 75-80⁰ eğimde, 200-250 metre atımlıdır.
- b) Milopero Fayı: 80-85⁰ eğimde, güneyde 50-75 metre ve kuzeyde 150 metre atımlıdır.
- c) İncirhamamı Fayı: 70-75⁰ eğimde, güneyde 35-50 metre ve kuzeyde 80-100 metre atımlıdır.
- d) Değirmenci Fayı: doğuda 10 metre, batıda 150-200 metre atımlıdır.
- e) Karadon Fayı: 70-75⁰ eğimde, 400-500 metre atımlıdır (TTK, 2001).

4.4.1.3. Rezervler

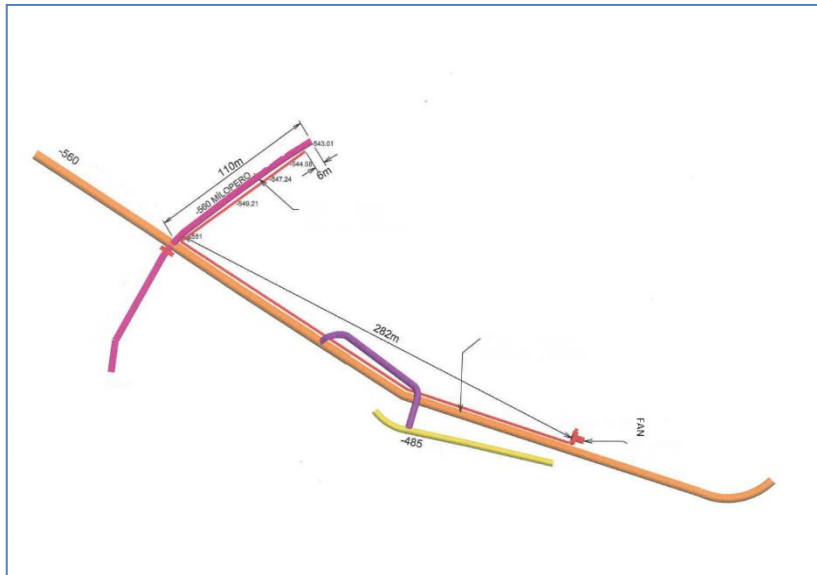
Kozlu Müessesesi rezervleri görünür 68.729.821 ton, muhtemel 40.539.000 ton ve mümkün 47.975.000 ton olmak üzere toplam 160.597.535 ton olarak hesaplanmıştır (TTK Faaliyetleri, 2009). Müessesede bulunan damar kalınlıkları Çizelge 4.6' da gösterilmektedir. 2012 yılı kömür üretim miktarı 704.172 tondur.

Çizelge 4.6. Kozlu müessesesi rezerv hesaplamasında esas alınan damar kalınlıkları (TTK Faaliyetleri, 2001).

Damar Adı	Kalınlık (m)	Damar Adı	Kalınlık (m)	Damar Adı	Kalınlık (m)
Yiğit	1.00-1.50	Dibek	1.00-1.20	Akalın	1.00-1.10
Kesmeli	2.00-3.00	Kurul	1.80-2.20	Gökcan	0.90-1.00
Büyük	2.00-2.50	H.Memiş	1.20-1.50	Ömerağa	1.00-1.20
Domuzcu	1.00-1.50	Sulu	1.70-2.50	Civelek	2.00-2.50
Taşbaca	1.00-1.50	Özkan	1.00-1.20	Sülman	1.00-1.20
Acenta	1.00-1.50	Acılık	4.00-5.00	B. Kılıç	3.00-3.50
Messoğlu	1.00-1.20	Piriç	1.00-1.20		
Karagöz	1.20-1.50	Çay	7.50-8.00		

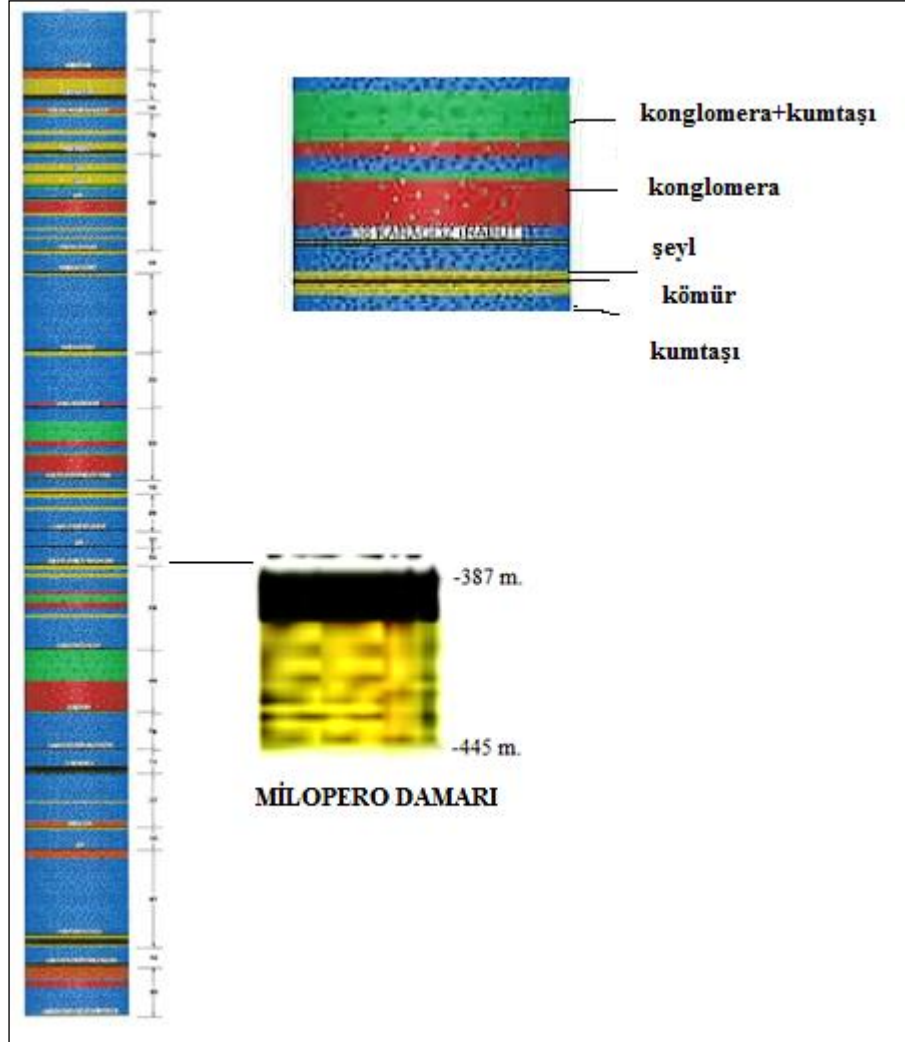
4.4.1.4. Çalışma yapılan – 560 m Milopero damarı hakkında bilgi

Kozlu formasyonu, 0.80-10.00 metre arasında kalınlığa sahip 23 kömür damarı içerir ve toplam kalınlığı 550-800 metredir. Bu formasyonun % 90' ı üretilebilir kömür damarına sahiptir. -560 metre Milopero kömür damarı en derin ve gazlı damar olup, 3.34 metre kalınlığa ve 70° eğime sahiptir. Rezerv miktarı 153.000 ton olup, pnömatik patlatma ile üretim yapılmaktadır. Kat planı Şekil 4.5' de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. -560 m Milopero kömür damarı kat planı.

Kozlu kömür yatağının stratigrafisi Şekil 4.6' da gösterilmektedir. Ortalama kömür özellikleri Çizelge 4.7' de verilmektedir.



Şekil 4.6. Kozlu kömür yatağının stratigrafisi.

Çizelge 4.7. -560 m kömür damarından alınan numune özellikleri.

Kül (%)	Nem(%)	Uçucu md (%)	Sbt- Karbon(%)	Kalorifik değer (kcal/kg)
12.46	1.74	25.87	59.93	7312

4.5. Üretim

Havzada 0-45⁰ meyilli damarlarda ilerletimli-göçertmeli uzunayak, yangına müsait damarlarda (Kozlu, Armutçuk) geri dönümlü-göçertmeli uzunayak üretim yöntemi uygulanırken, meyli 45⁰' den fazla dik damarlarda pnömatik-patlatmalı kazı yöntemi uygulanmaktadır. Ayrıca Kozlu müessesinde dik olan damarlarda tumba baca yöntemi uygulanmaktadır (TTK, 2009).

Havzada sayısız fay ve sıklmalar olması, üretimde mekanize yöntemlerin uygulanmasını engellerken, üretim büyük oranda insan gücüne dayanmaktadır. Damarların eğimi nedeni ile havza her yıl ortalama 12 metre derinliğe sahip olmaktadır (TTK, 2009).

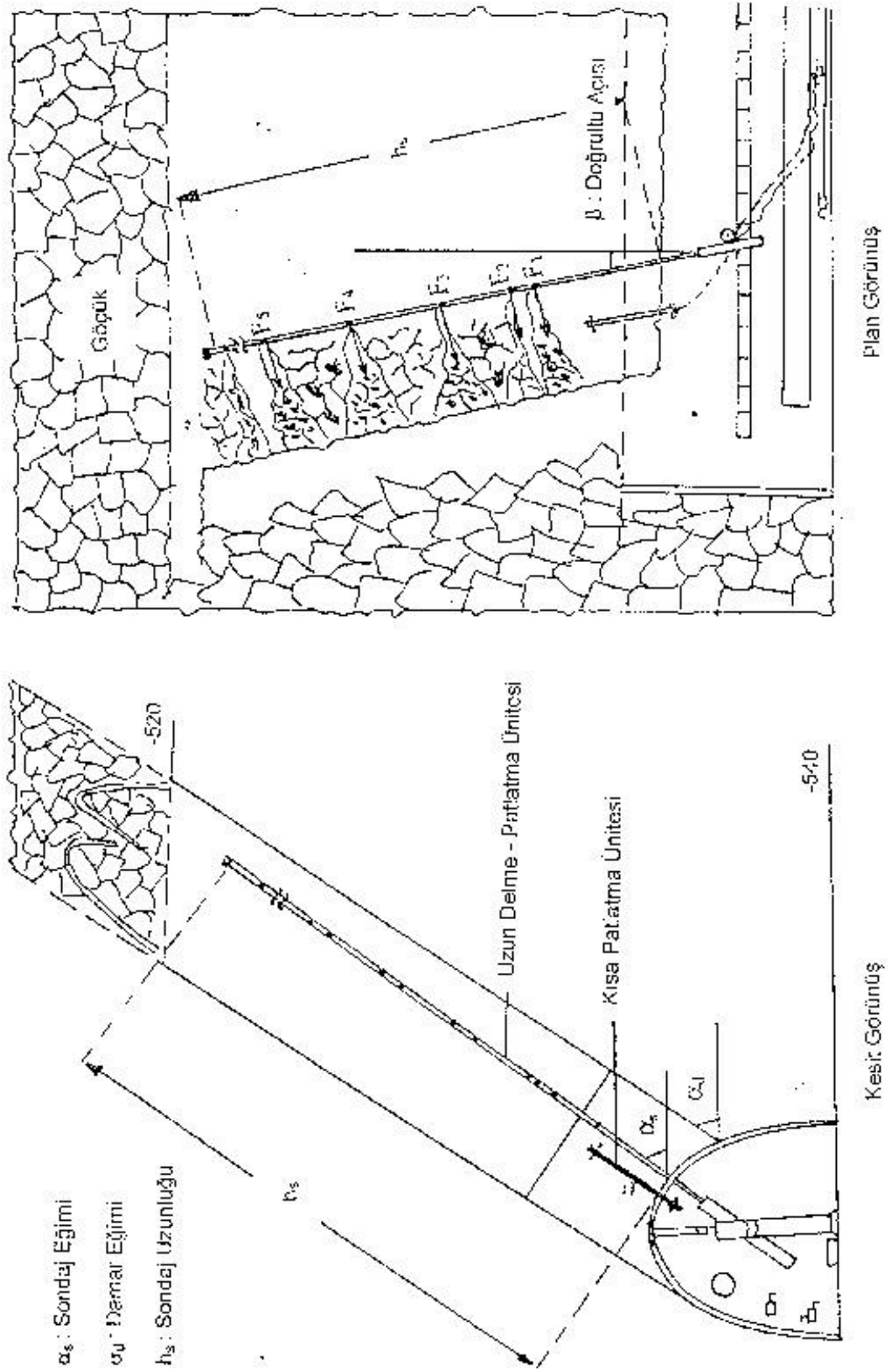
4.5.1. Uzunayak

Ayak boyları damar eğimine bağlı 100-150 metre, have genişliği 1-1,20 metre arasında değişmektedir. Kazı genelde martopikör ile yapılmakta olup,. Armutçuk, Amasra gibi çok sert damarlarda dinamit kullanılarak üretim yapılmaktadır. Temel tahkimat malzemesi ağaç sarma-direk ve domuzdamıdır. Bazı ayaklarda hidrolik direk-çelik sarma uygulanır. Genellikle arına paralel tahkimat yöntemi tercih edilir. İki vardiya kazı işlemi, bir vardiya da tahkimat ve teçhizatların ötelenmesi yapılmaktadır (TTK, 2009).

4.5.2. Pnömatik patlatma

Derin kömür madenciliğine sahip Avrupa ülkelerinde, bozuk jeolojik kömürlerin kazılması, maliyetlerin düşürülmesi ve rekabet etmek amacı ile yüksek basınçlı hava (pnömatik) patlatmalı kazı sistemi ilk kez 1982 yılında Macaristan' da uygulanmaya başlanmıştır.

Sistem; damar içinden çıkılan başyukarıdan 15-20 metre ara katlar sürülerek, panolar dönümlü olarak hazırlanır. Serbest yüzey başyukarısı oluşturulur ve buna paralel 1-1,5 metre aralıklar ile 15-17 metre uzunluğunda delme-patlatma üniteleri ile sondajlar yapılır. Kompresörde 800-840 bar basınçlı hava ile kömürün kazılması sağlanmaktadır (TTK, 2009). Pnömatik patlatmanın genel bir uygulaması Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Patlatma ünitelerinin delik içi konumu ve patlatma açıları (Akçın ve Özkan, 1999).

1991 yılında Kozlu müessesinde uygulanan yüksek basınçlı hava ile kazı metodu sonra Karadon Müessesesi Kilimli İşletmesi -360/-460 batı Çay ayakta uygulanıp, diğer müesseselere yaygınlaştırılmıştır. Kurumun toplam tüvenan kömür üretiminin % 13'ü bu sistem ile yapılır. Sistem dik damarlarda başarılı olup, halen Kozlu, Üzülmez, Karadon ve Amasra müesseselerinde uygulanmaktadır (TTK, 2009).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Ölçüm Çalışması

Modelleme çalışmalarında kullanılacak veri setini oluşturmak amacıyla, Türkiye Taşkömürü Kurumu'na bağlı Kozlu İşletme Müessesesinde ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Ölçüm çalışmalarının yapıldığı galeriye ait bir görünüm Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Kozlu (Zonguldak) yeraltı kömür maden galerisi.

Tali havalandırma sistemi ile havalandırılan galeri 110 m uzunluğunda olup, 9.05 m² yarı-silindirik alana sahiptir. Vantüp çapı 0.6 m olup, galeri arınından 6 m geriye hava ulaştıracak şekilde yerleştirilmiştir. Galeriden geçen hava debisi, TESTO 435-4 anemometresi ile ölçülmüş olup, $Q=2.77 \text{ m}^3/\text{s}$ ' dir. 0.20 m/s ve 20 m/s hızları arasında kullanılan TESTO 435-4 anemometresi ile hava hızları, dolaştırma yöntemi ile ölçülmüştür (Şekil 5.2).

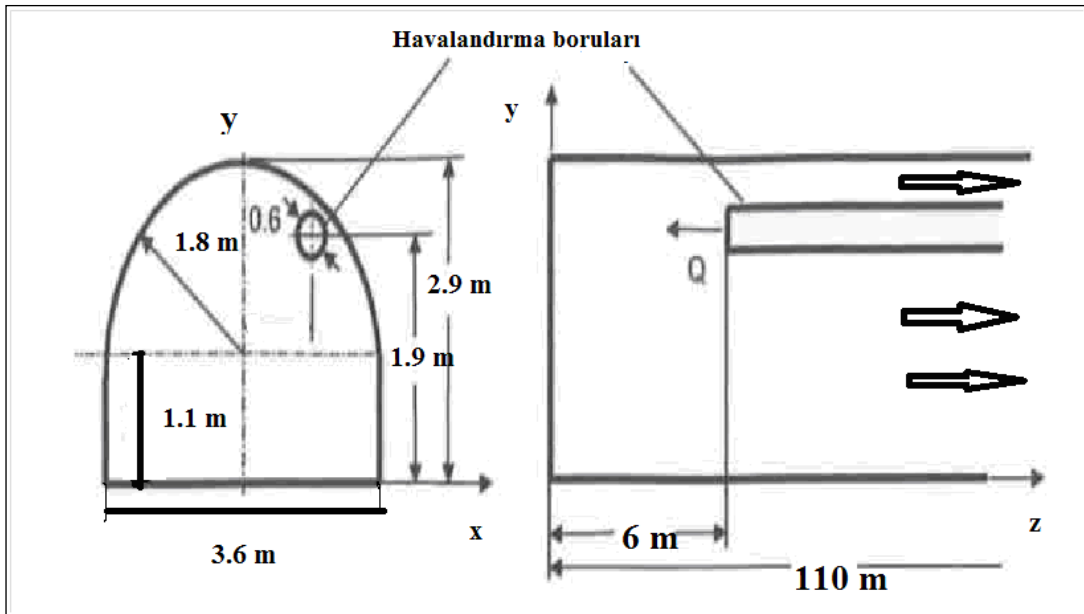


Şekil 5.2. Testo 435-4 anemometresi.

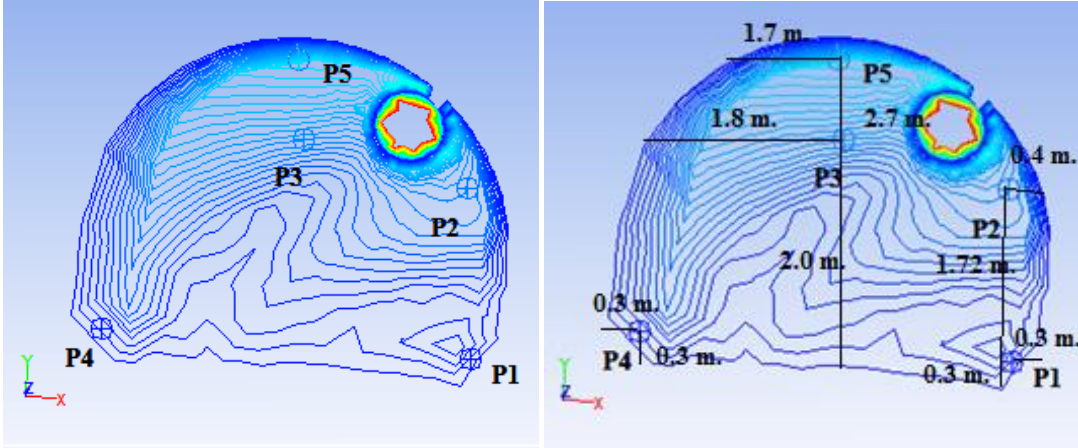
Ölçüm çalışmalarının yapıldığı galeride öncelikle, galeri yüksekliği $y=2.9$ m, genişliği $x=3.6$ m ve uzunluğu da $z=110$ m olarak ölçülmüştür. Hava hızı (m/s) ve metan konsantrasyonu (%) değerlerinin ölçüleceği 5 adet nokta, 20 ölçülen değerlerin ortalamasıdır ve arından 5 farklı uzaklıkta alınmıştır. Bu noktaların arından uzaklığı sırasıyla $z_1=6$ m, $z_2=25$ m, $z_3=40$ m, $z_4=60$ m ve $z_5=110$ m' dir. Her kesitten alınan 5 noktanın koordinatları Çizelge 5.1'de verilmiş ve ayrıca, havalandırma sisteminin şematik sunumu Şekil 5.3'de ve nokta koordinatları 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Ölçüm noktalarının koordinatları

Nokta	X (m.)	Y (m)
P1	3.3	0.3
P2	3.2	1.72
P3	1.8	2.0
P4	0.3	0.3
P5	1.7	2.7



Şekil 5.3. Havalandırma sisteminin şematik gösterimi.



Şekil 5.4. Her kesitten alınan 5 noktanın ve uzunluklarının gösterimi.

Modelleme için gerekli olan hesaplamalar aşağıda sırasıyla verilmiştir (Eşitlik 16-23). Galerinin hidrolik çapı (D), kesit alanı (A) ve ıslak çevre (P) eşitlik 3.15-3.16 ve 3.17' den hesaplanmaktadır.

$$A = ab + \frac{\pi r^2}{2} = 110 \times 360 + \frac{\pi (180)^2}{2} = 90493,81 \text{ cm}^2 = 9,049381 \text{ m}^2$$

$$P = 2a + b + \pi r = 2 \times 110 + 360 + \pi \cdot (180) = 1145,49 \text{ cm} = 11,4549 \text{ m}$$

$$D = \frac{4 \times 9,049381}{11,4549} \cong 3,1600 \text{ m}$$

İki farklı gazın Reynolds sayısı ve ortalama hız ($V_{ortalama}$) aşağıdaki Eşitlik 5.20 ile hesaplanmaktadır. Galeriden geçen ortalama hava hızı eşitlik 5.21 ile hesaplanmaktadır.

$$R_s = \frac{D_h \times V_{ortalama}}{\vartheta_{kinematik}} = \frac{D_h \times V_{ortalama}}{\vartheta_{metan} \times \text{yoğunluk}(\%) + \vartheta_{hava} \times \text{yoğunluk}(\%)} \quad (5.20)$$

$$V_{boru} \times A_{boru} = V_{ortalama} \times A_{ortalama} \quad (5.21)$$

$$V_{boru} \times (\pi r^2) = V_{ortalama} \times D_h$$

$$9,05 \left(\frac{m}{sn} \right) \times \pi(0,3^2) = V_{ortalama} \times 9,049381(m^2)$$

$$V_{ortalama} = 0,282743 \left(\frac{m}{sn} \right)$$

$$R_s = \frac{3,16(m) \times 0,282743 \left(\frac{m}{sn} \right)}{2,01 \times 10^{-5} \times 0,87(\%) + 1,50 \times 10^{-5} \times 99,13(\%)} = \frac{0,89346788 \left(\frac{m^2}{sn} \right)}{1,504437 \times 10^{-5} \left(\frac{m^2}{sn} \right)} = 59388,85311$$

Türbülans akış, kirletici gazların uzaklaştırılması ve dağılmasını sağlamak için ocak havayollarında hakimdir. Laminer akış, göçük alanlarında ve hava-sızdırmaz duvarlarında bulunur. Türbülans akış, düşük hava dirençli ocak hava yollarında, laminer akış yüksek dirençli alanlarda (göçük gibi) bulunur (Stephens, 2011). Bu çalışmada Reynolds sayısı >4000 olduğu için turbülans olarak bulunmaktadır.

Bir hava yolundan geçen hava akımı miktarının bulunması için, birim zamanda (1 sn) hava yolunun kesit alanından geçen havanın hacmi (m^3) göz önüne alınır. Hacim akışı (Q) birimi m^3/sn olur. Kütle akışı ise, birim zamanda (sn) hava yolunun kesit alanından geçen hava kütlesine (kg) denir. Eşitlik 5.26' da kütle akış hesabı verilmektedir (Önder, 2001).

$$M=Q \times \rho \quad (5.26)$$

Burada;

M= Kütle akışı (kg/s),

Q= Hacim akışı (m^3/sn),

ρ = Yoğunluk (kg/m^3).

TTK-Kozlu kömür ocağında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler sırasıyla aşağıda verilmiştir;

Milopera damar gaz içeriği= 18,76 m^3/ton

Ayak başına üretim=300 ton/gün

2 vardiya üretim=2x8 (saat)x3600 (sn)=57600 sn.

Metan yoğunluğu=0,7 kg/m^3

Buradan hesaplanan metan emisyon miktarı;

$[18,76 \text{ (m}^3\text{/ton)} \times 300 \text{ (ton/gün)}] / 57600 \text{ (sn)} = 0,098 \text{ (m}^3\text{/sn)}$ metan gazı olarak bulunur.

Metan kütle akışı (M), iki farklı yolla hesaplanmaktadır. İlki, Eşitlik 5.26 ile bulunur.

$M = Q \times \rho$ formülünden;

$M = 0,098 \text{ (m}^3\text{/sn)} \times 0,7 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 0,065 \text{ (kg/sn)}$ metan kütle akışı

İkinci yol, genel gaz denklemi ile hesaplanmaktadır;

Metan molekül ağırlığı = 16.04 g/mol

$P = 101325 \text{ Pa}$

$T = 298 \text{ K}$

$R = 8,314 \text{ kJ/kgK}$

$n = \text{mol sayısı}$

Bir gazın basınç (P), mutlak sıcaklık (T) ve hacim (V) arasındaki ilişkiyi “genel gaz kanunu” olarak bilinen bir denklemdir (Eşitlik 5.27) (Önder, 2001).

$$PV = nRT \quad (5.27)$$

Buradan;

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT} = \frac{101325}{8,314 \times 298} = 40,90 \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right)$$

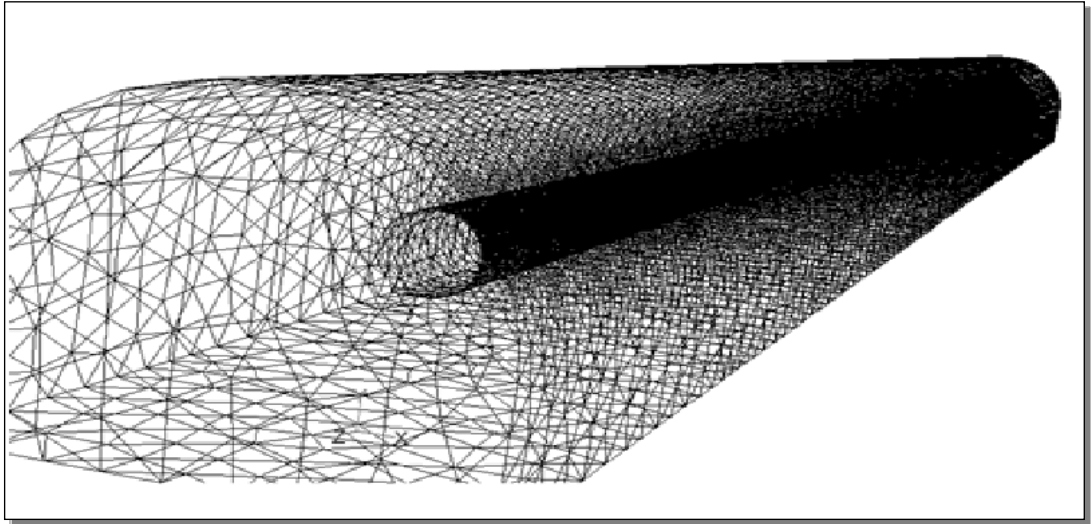
$$0,098 \frac{\text{m}^3}{\text{sn}} \times 40,90 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \times 0,016 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0,064 \frac{\text{kg}}{\text{sn}}$$

olarak hesaplanır.

5.2. CFD Metodu ile Modelleme Çalışması

Bu çalışmada yapılan modelleme çalışması iki problemten oluşmaktadır. Birincisi, tali olarak havalandırılan bir bacada metan gazının davranışını belirlemek, ikincisi de, hava hızındaki değişimleri incelemiştir. Bu modelleme çalışmaları, Ansys® 12.00 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Öncelikle modellenecek galeri ve havalandırma borusu, sonlu hacim metoduna göre tetrahedron meshlere (ağlara) bölünmüştür (Şekil 5.5). Tetrahedron meshler, tünel geometrileri için en uygun meshlerdir (Diego, 2011). 762,844 tetrahedral hücre vardır ve mesh kalitesi 0.8' dir. Mesh kalitesi 1.00' e yakın olduğu için, mesh kalitesi yüksektir.



Şekil 5.5. Galeri ve vantüpün meshlere ayrılması.

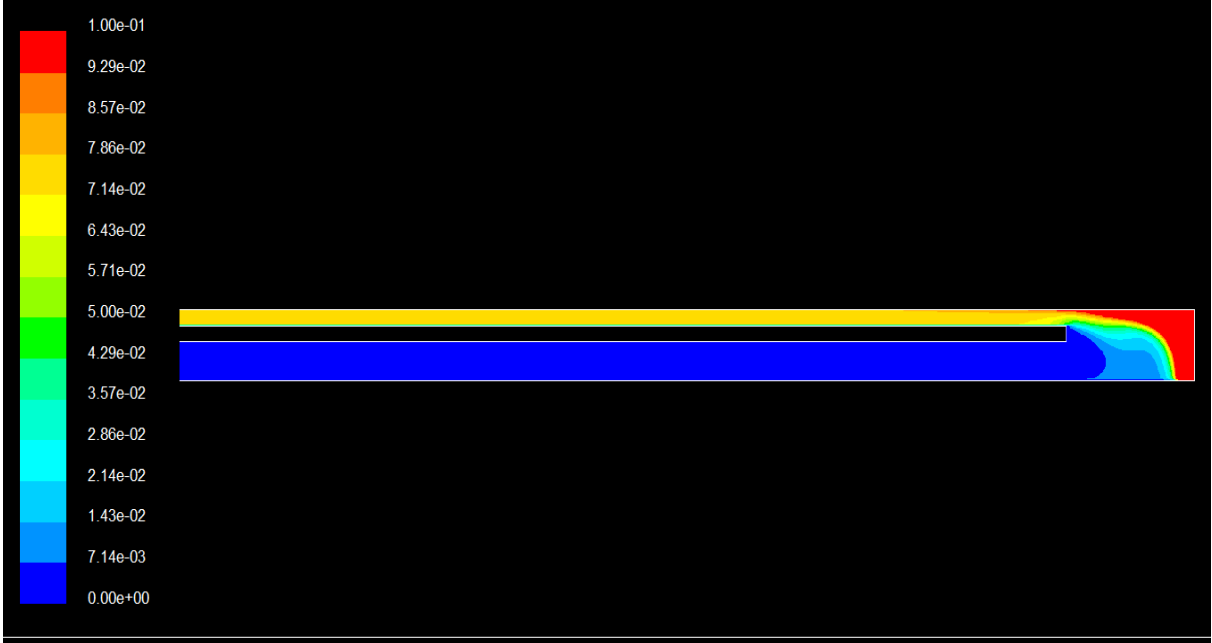
Üç sınır koşulu belirlenmiştir. Bunlar; giriş, çıkış ve duvarlardır. Giriş iki kısım içerir: birincisi arından metan girişi (0.065 kg/s), diğeri fan çıkışından alınan hava hızıdır (9.05 m/s). Çıkış hava ve metan gazı karışımıdır. Duvarlar, yan ve alt yüzeylerdir ve ısı transferi ihmal edilmiştir. y^+ değeri, meshe bağlı boyutsuz bir mesafedir ve hücre bölgesine bağlıdır. Burada üç bölge vardır: Laminer bölge ($y^+ < 5$), geçiş bölgesi ($5 < y^+ < 30$) ve turbülans bölgesi ($y^+ > 30$) (Altaç, 2005). Galeri sıcaklığı 27^0 C' dir. Çizelge 5.2' de modelin giriş ve çıkış parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Model giriş-çıkış parametreleri.

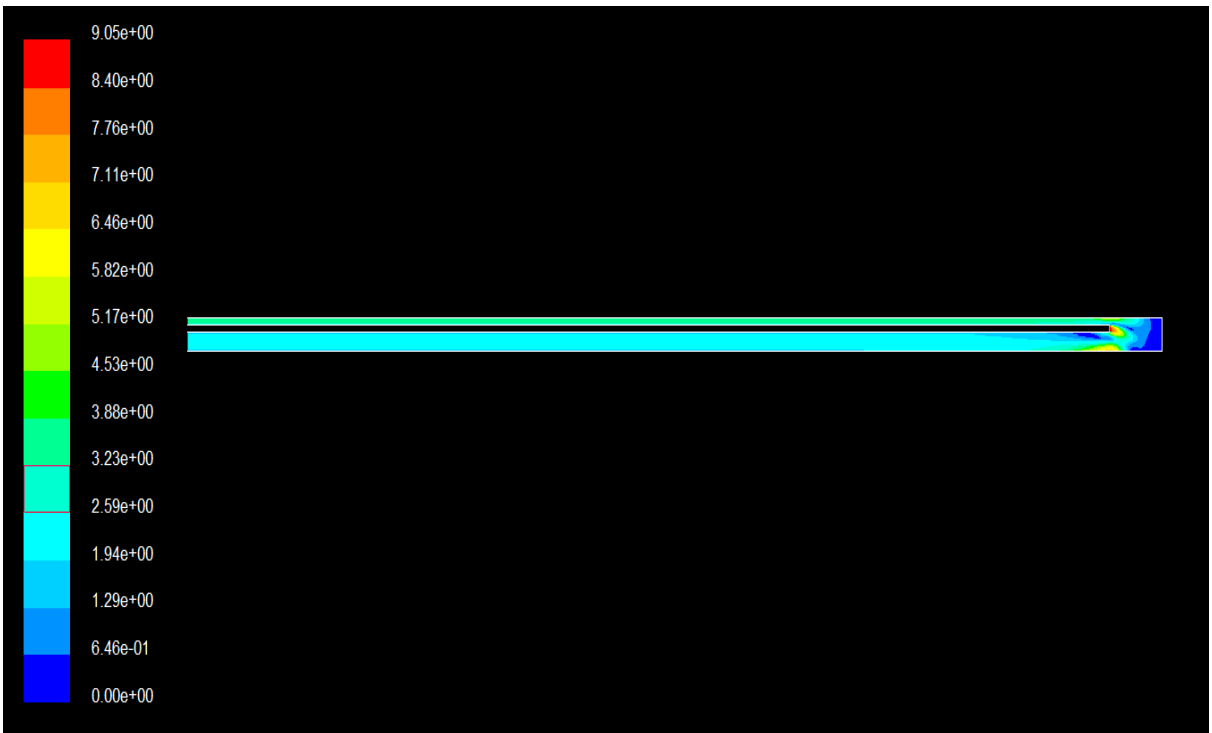
İsim	Sınır koşulu	Sıcaklık (K)	Hidrolik çap (m)	Türbülans yoğunluğu (%)	Türler (%)	
					CH ₄	O ₂
Hava hızı (m/s)	9.05	300	0.6	10	0	0.21
Metan girişi (kg/s)	0.065	300	3.16	10	1	0
Çıkış yüzeyi (Pa)	0	300	3.16	10	0.007	0.21

5.2.1. CFD metodu ile 2-Boyutlu metan davranışı ve hava hız davranışının modellenmesi

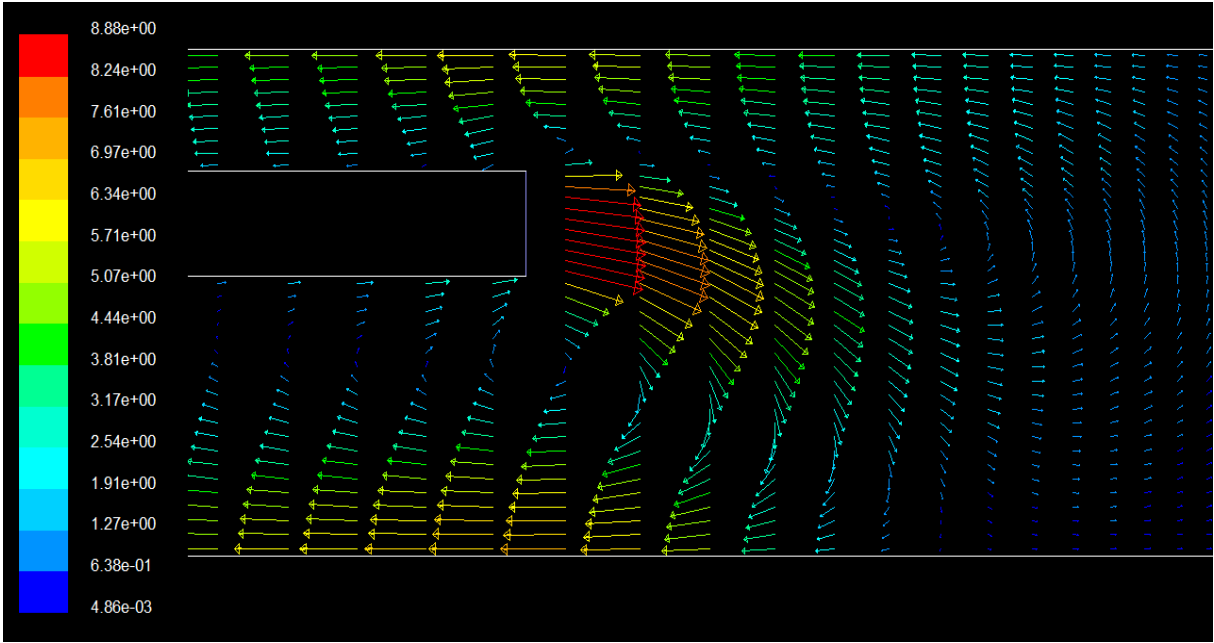
Bu bölümde, Fluent programı kullanılarak 2 boyutlu modelleme yapılmıştır. Hava 9.05 m/s' lik bir hızla vantüpten çıkarak, arına doğru hareket etmekte ve arındaki metan gazı ile karışarak türbülanslı bir hareketle arından geriye dönmektedir. Modelleme sonuçlarına göre, metan gazı galeri tavanı ve kömür arını yakınında yüksek olup, kömür arını tarafından salınmaktadır (Şekil 5.6). Hava hız davranışı, vantüb çıkışında maksimum değerde (9.05 m/s) olup, çalışma alanında azalmaktadır (Şekil 5.7). Şekil 5.8' de hız büyüklük vektörleri (m/s), hava hız davranış yönlerini göstermektedir. Şekil 5.9, akım fonksiyonlarını göstermektedir.



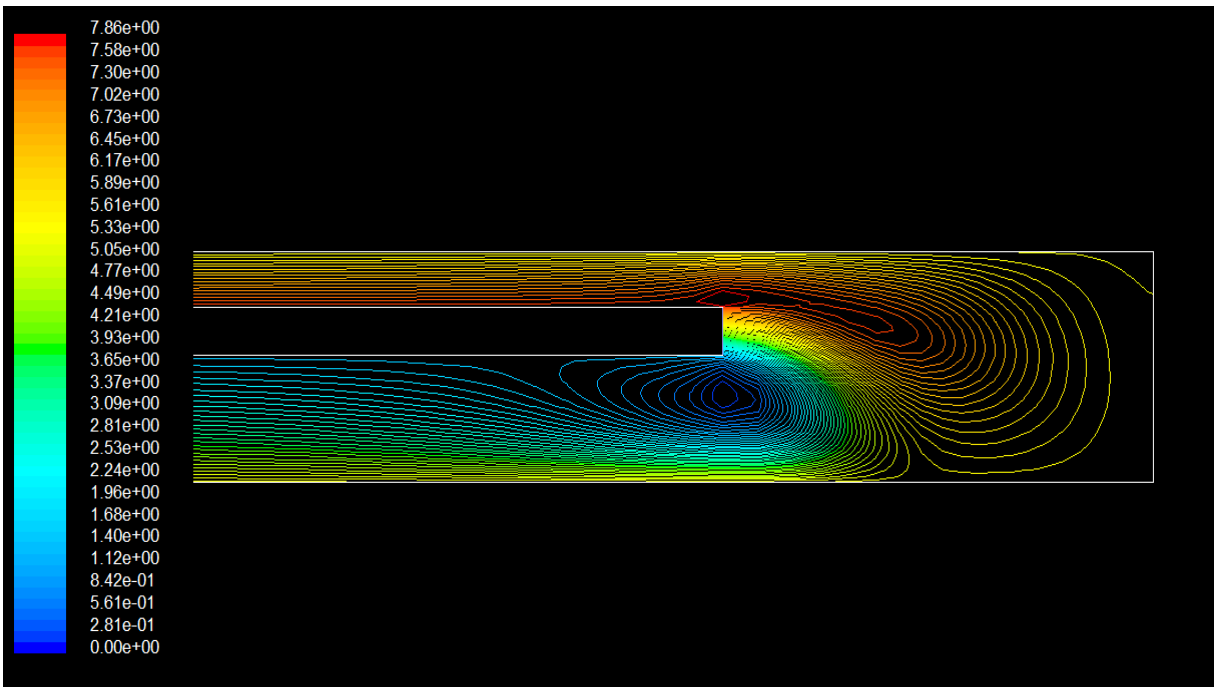
Şekil 5.6. Metan davranışının (kgs/m) gösterimi.



Şekil 5.7. Hız davranışının (m/s) gösterimi.



Şekil 5.8. Hız davranış vektörlerinin (m/s) gösterimi.



Şekil 5.9. Hava akım fonksiyonunun (kg/s) gösterimi.

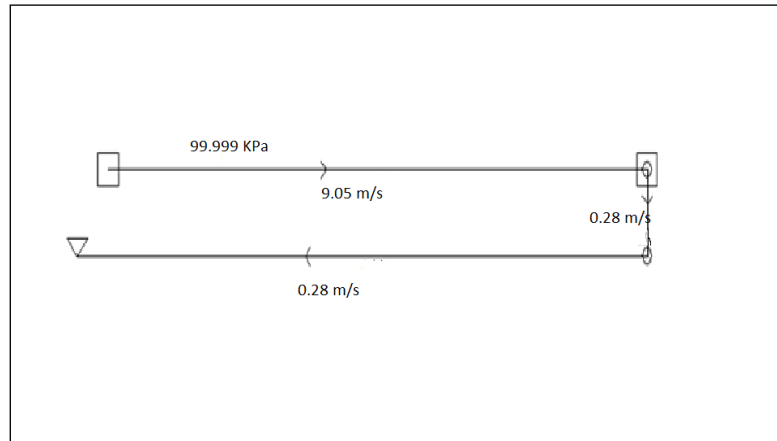
Şekil 5.8' e göre, hava hız değeri vantüb çıkışında en yüksek olup, arına doğru azalmaktadır. Şekil 5.9' a göre, hava hız değeri tavanda zeminden daha fazladır. Hava hızı tavanda 5.89 m/s ve zeminde 3.65 m/s' dir. Tavanda daha yüksek hava hızının nedeni, vantüb ağzının yukarı doğru bakması olmaktadır.

5.2.2. VNETPC programında hava hız davranışının gösterimi

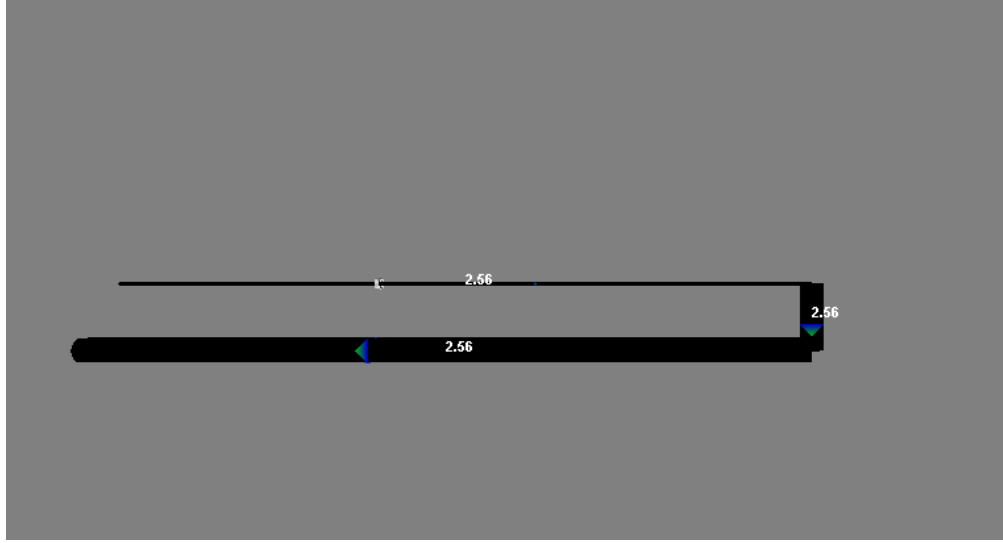
Ocak havalandırma benzetim programlarından biri VNETPC 2007' dir. Bu program, gerçek sistemin fan çalışma noktaları, hava akış oranları ve kısmi basınç düşüşlerini tahmin etmek amacıyla mevcut havalandırma ağlarının benzetimi için kullanılmaktadır. VNETPC programı, sıkıştırılmayan akış ve Kirchhoff' un ikinci yasasına dayanarak geliştirilmiştir.

VNETPC yazılımı, oldukça kolay ve hızlı öğrenilebilir. FLUENT gibi bu programda sıkıştırılmayan, türbülans ve durağan akıcı akışkanı içeren ocak havalandırma tahminlerinin tümünde kullanılır (Stephens, 2011).

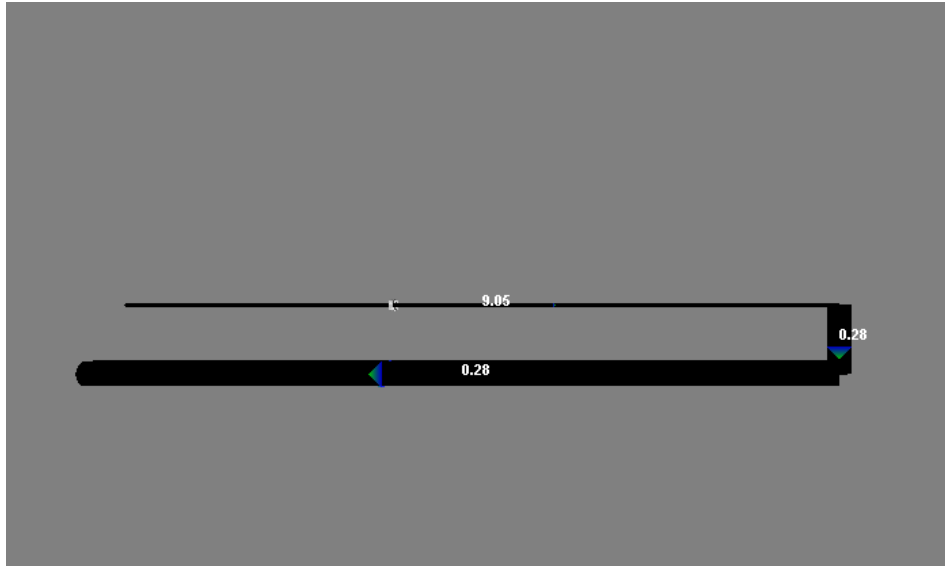
VNETPC 2007 programında hava hızı (m/s) ve hava akış miktarı (m^3/s) Şekil 5.10-5.11 ve 5.12' de gösterilmiştir. Vantüb içerisinden $9,05 m/s$ ' lik hızla gelen hava galeriyi ortalama $0,28 m/s$ 'lik hızla terketmektedir. Eşitlik 5.21'de hesaplanan galeriden geçen ortalama hava hızı da $V=0,282743 m/sn$ olarak bulunmuştur. Bu programda hava hızı modellenmesi yapılabilirken, metan gaz davranışı gösterilememektedir (Şekil 5.11-5.12).



Şekil 5.10. VNET PC 2007' de hava akış şeması.



Şekil 5.11. Hava debisinin (m^3/s) gösterimi.



Şekil 5.12. Hava hızının (m/s) gösterimi.

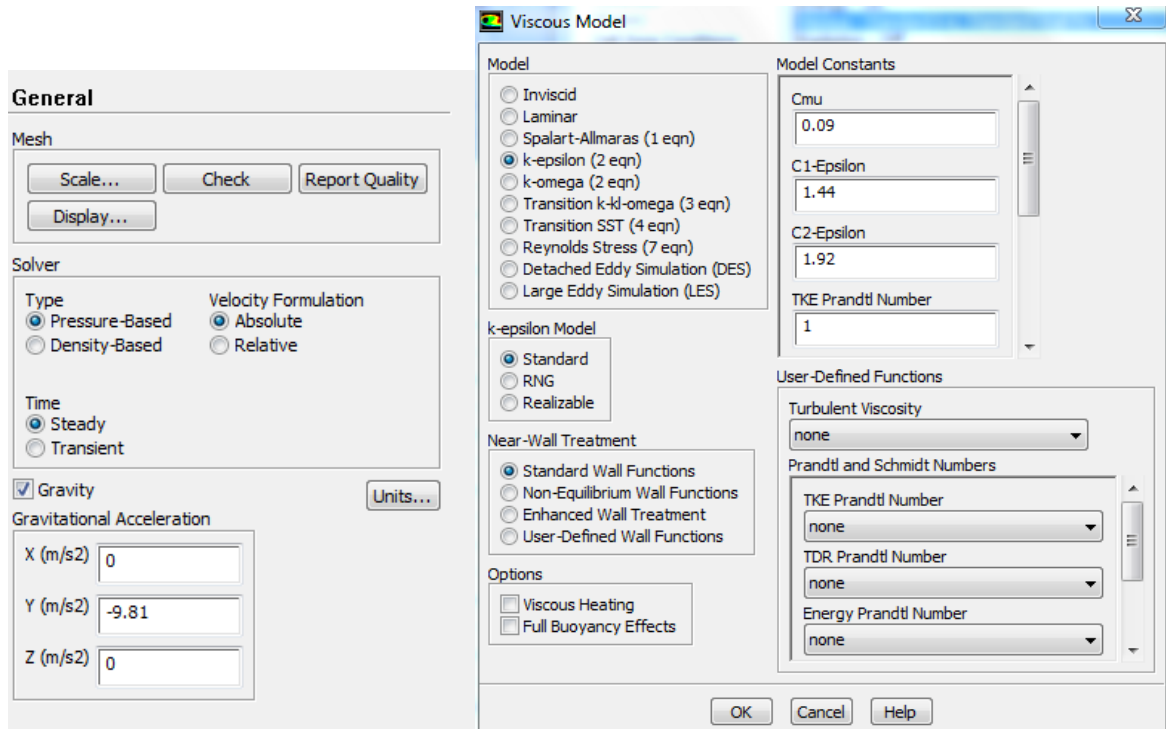
5.2.3. CFD metodu ile 3-boyutlu modelleme

5.2.3.1. Türbülans akışa göre modelleme yönteminin ANSYS programında gösterimi

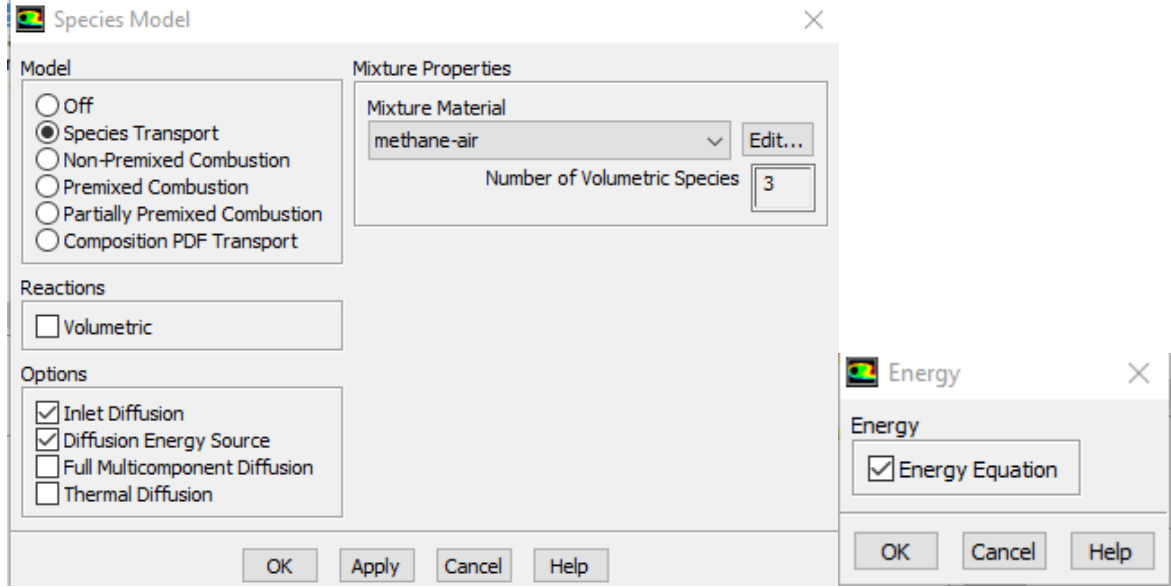
Türbülanslı akışa göre modelleme adımları, Ansys® 12.00'de aşağıda verildiği şekilde gösterilmektedir. Öncelikle ocak içinde bulunan metan, hava ve diğer gazların yoğunluk farklarını belirtmek için yerçekimi ivmesi ($g=9.81 m/s^2$) faktörü göz önüne alınır. Daha sonra en doğru sonucu veren k-epsilon türbülans modeli programda seçilir

(Şek. 5.13). İki farklı gaz (hava ve metan) modelleneceğinden, “species transport (türlerin iletimi)” paneli işaretlenir. Galeride yanma gibi bir reaksiyon olmadığı için “volumetric reactions (hacimsel reaksiyonlar)” seçilmez. Türbülanslı akış modellemesinde enerji denklemi çözmek şart değildir. Burada sıcaklık değeri ($300 \text{ }^0\text{K}$) girdiğimizi için, türbülans kinetik enerji denklemi çözülür ve enerji aktif (on) hale getirilir (Şek. 5.14).

Türbülansın en basit modellerinden “k-epsilon modeli” türbülans hızı ve uzunluk skalalarını bulan iki ayrı iletim eşitliğinin çözümünü sağlar. Bu model Launder ve Spalding tarafından önerildiğinden beri akış hesaplarında kullanılmaktadır (jullio.pe.kr/fluent6.1/help/htm).

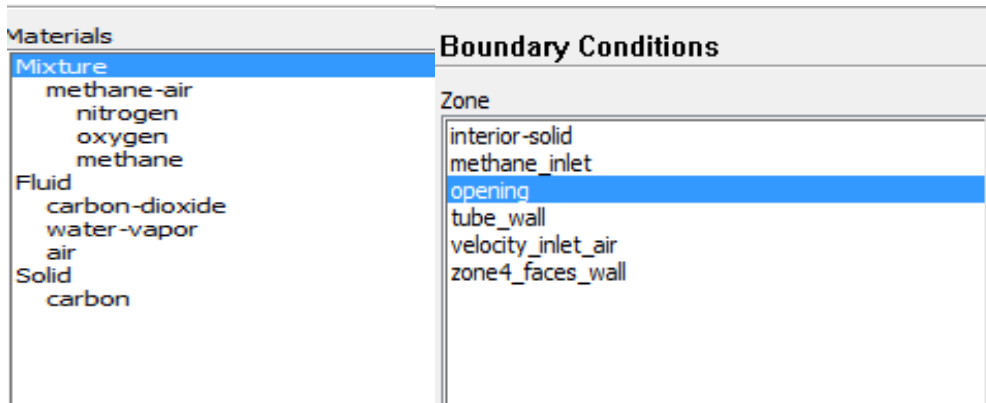


Şekil 5.13. “Model”den k-epsilon (2 eqn)” seçimi.

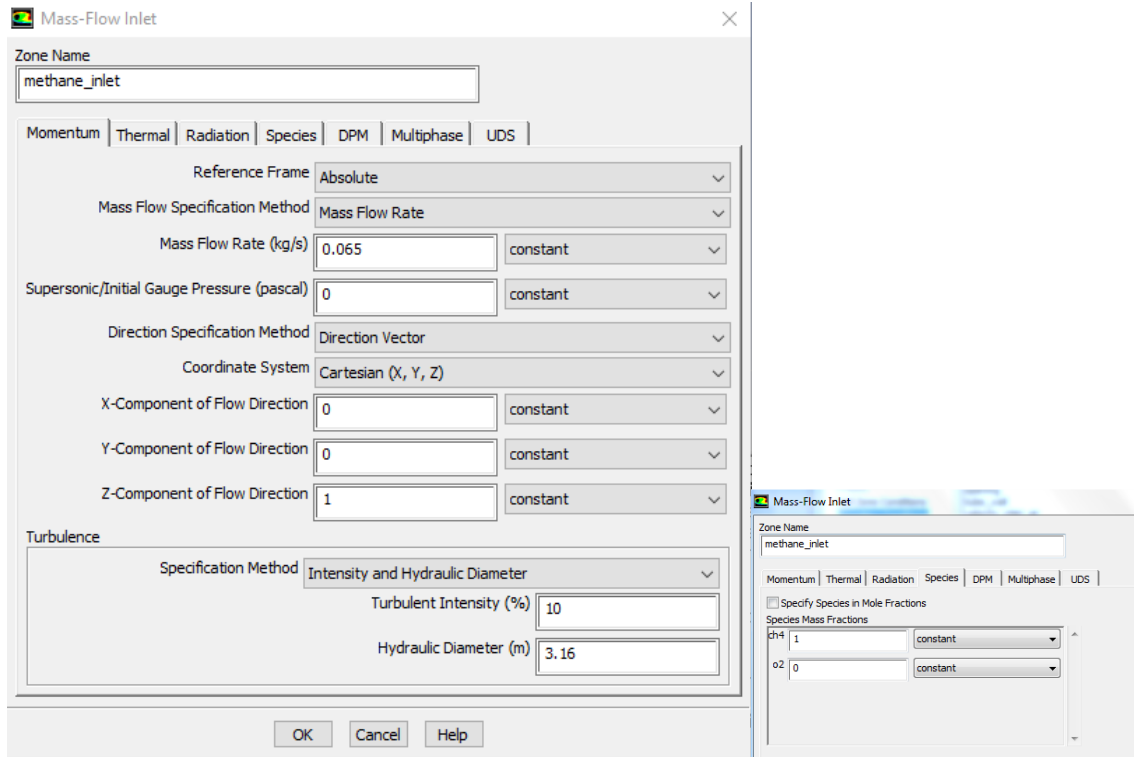


Şekil 5.14. “Türlerin iletimi (Species transport)” ve “energy=on” paneli seçimi.

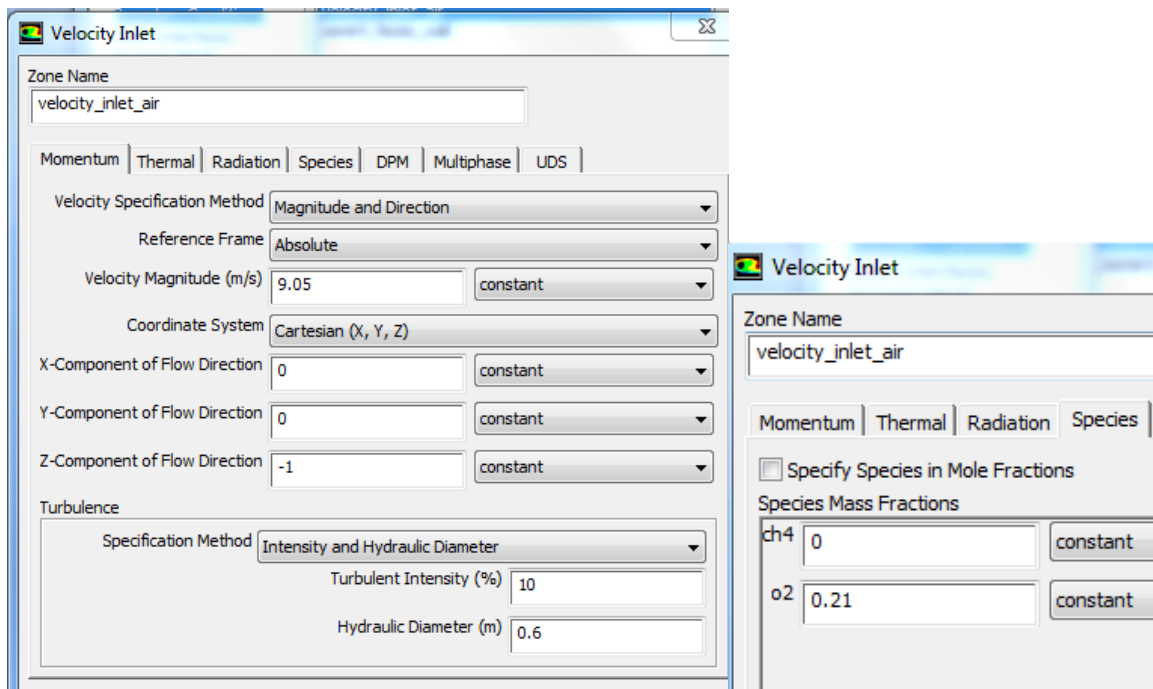
Malzeme “metan-hava karışımı” olarak seçilir ve katı duvarlar kömürün ana maddesi “karbon” olarak alınır (Şek. 5.15). Sınır koşulları olarak metan girişi yüzeyi olan “methane-inlet”, hava giriş ağzı “velocity-inlet”, ocak ağzı çıkışında basınç çıkışı olarak “opening”, iç akış “interior” ve duvarlar “tube-wall, faces-wall” seçilir (Şek. 5.16-5.17-5.18).



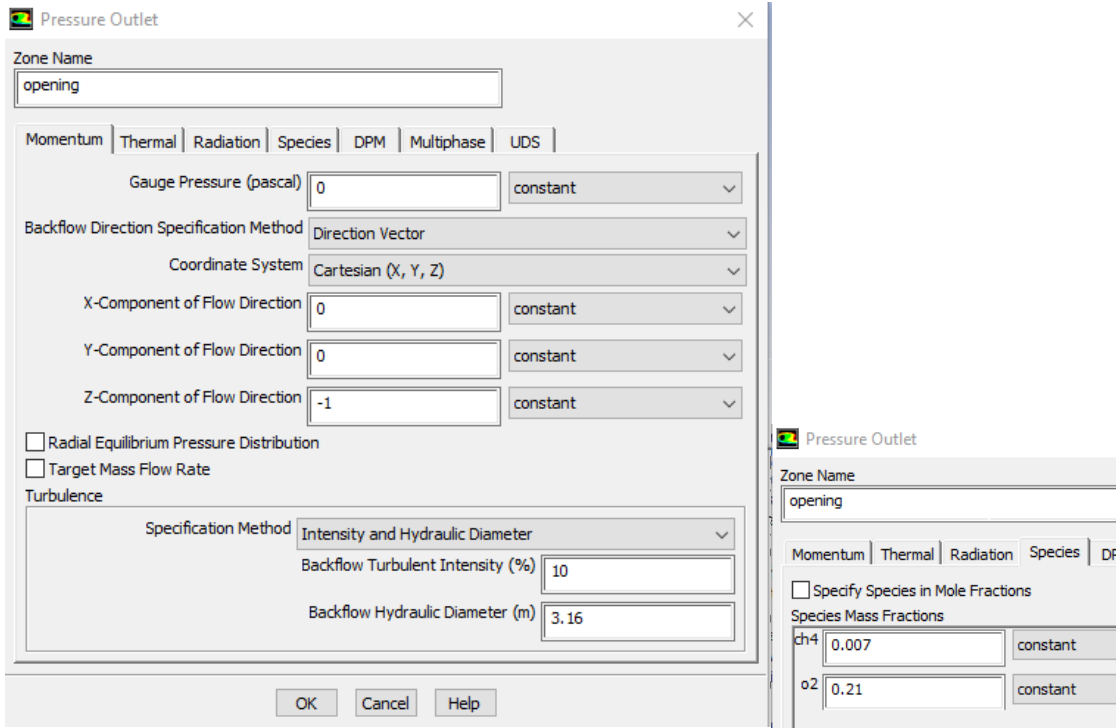
Şekil 5.15. “Malzeme (Materials)” ve “sınır koşulları (boundary conditions)” seçimi.



Şekil 5.16. “Sınır koşulları (Boundary conditions)” içinde “Metan girişi” seçimi.

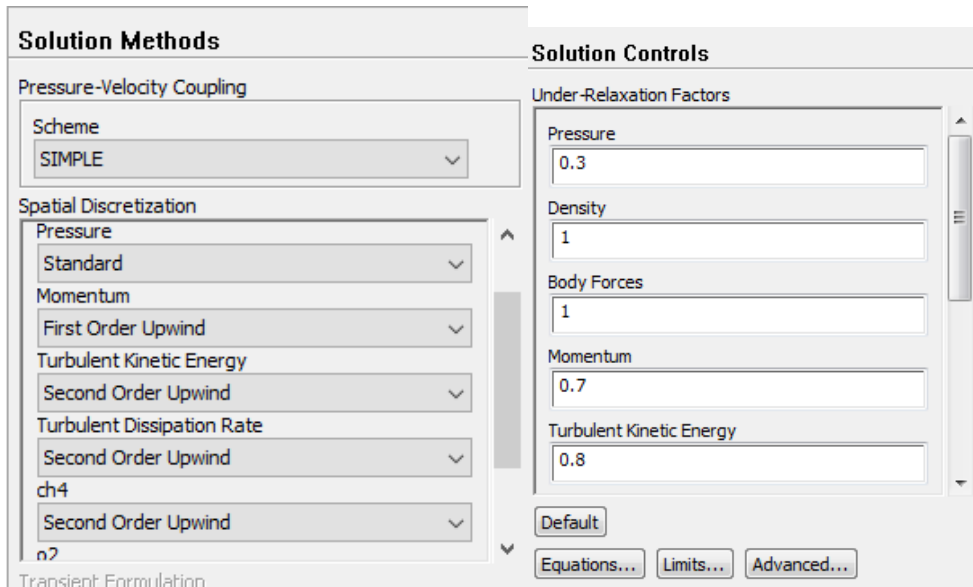


Şekil 5.17. “Sınır koşulları (Boundary conditions)” içinde “Hava hız girişi (Air velocity girişi)” seçimi.

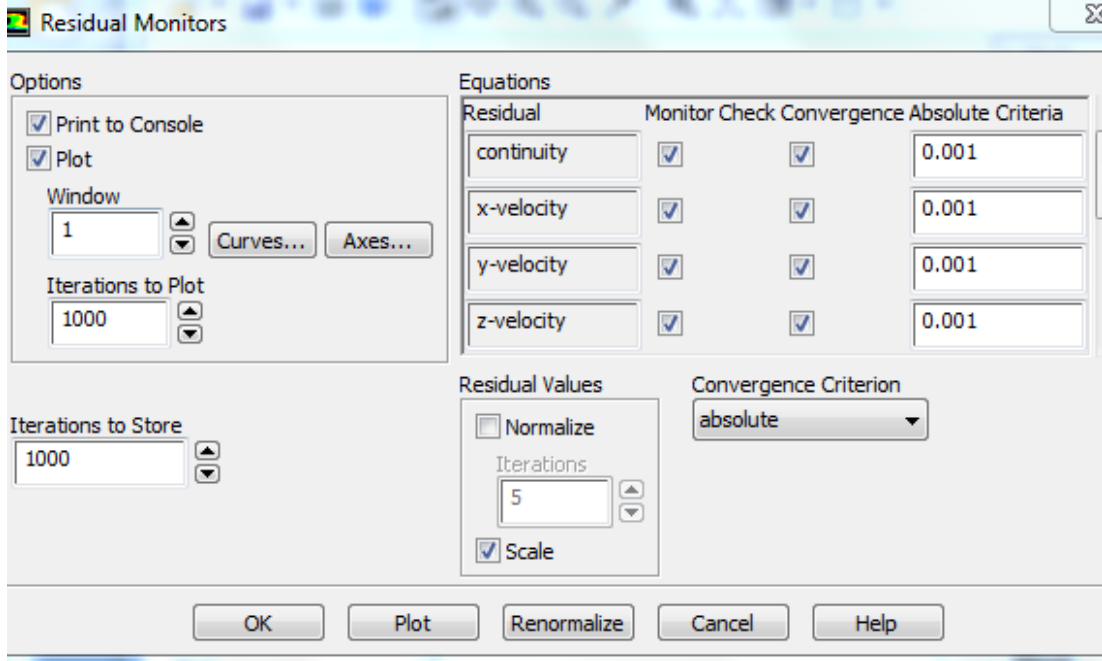


Şekil 5.18. “Sınır koşulları (Boundary conditions)” içinde “Açıklık (Opening)” seçimi.

Momentum birinci dereceden ayrıklaştırma (first-order upwind) ve türbülans kinetik enerjisi ayrıklaştırmak için ikinci dereceden ayrıklaştırma (second-order upwind), daha iyi çözüm vermesi için kullanılır (Şek. 5.19). Yakınsama kriteri, 10^{-3} olarak alınmıştır (Şek. 5.20).

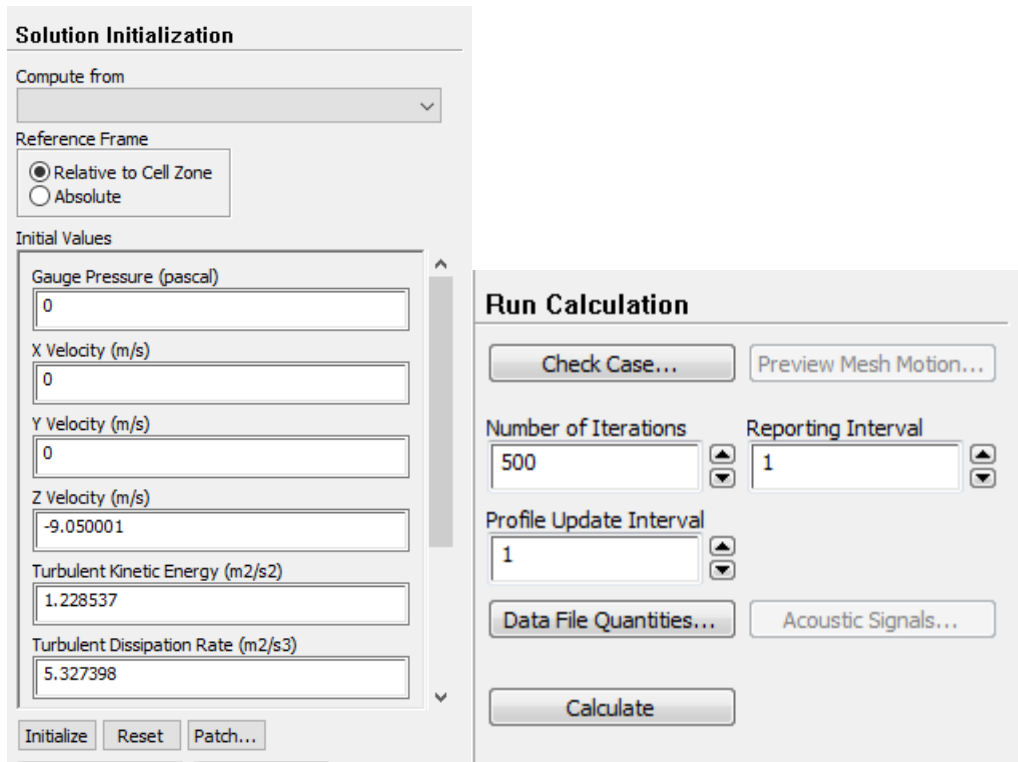


Şekil 5.19. “Çözüm yöntemleri (Solution methods)” içinde ikinci dereceden ayrıklaştırma(second-order upwind)” seçimi.



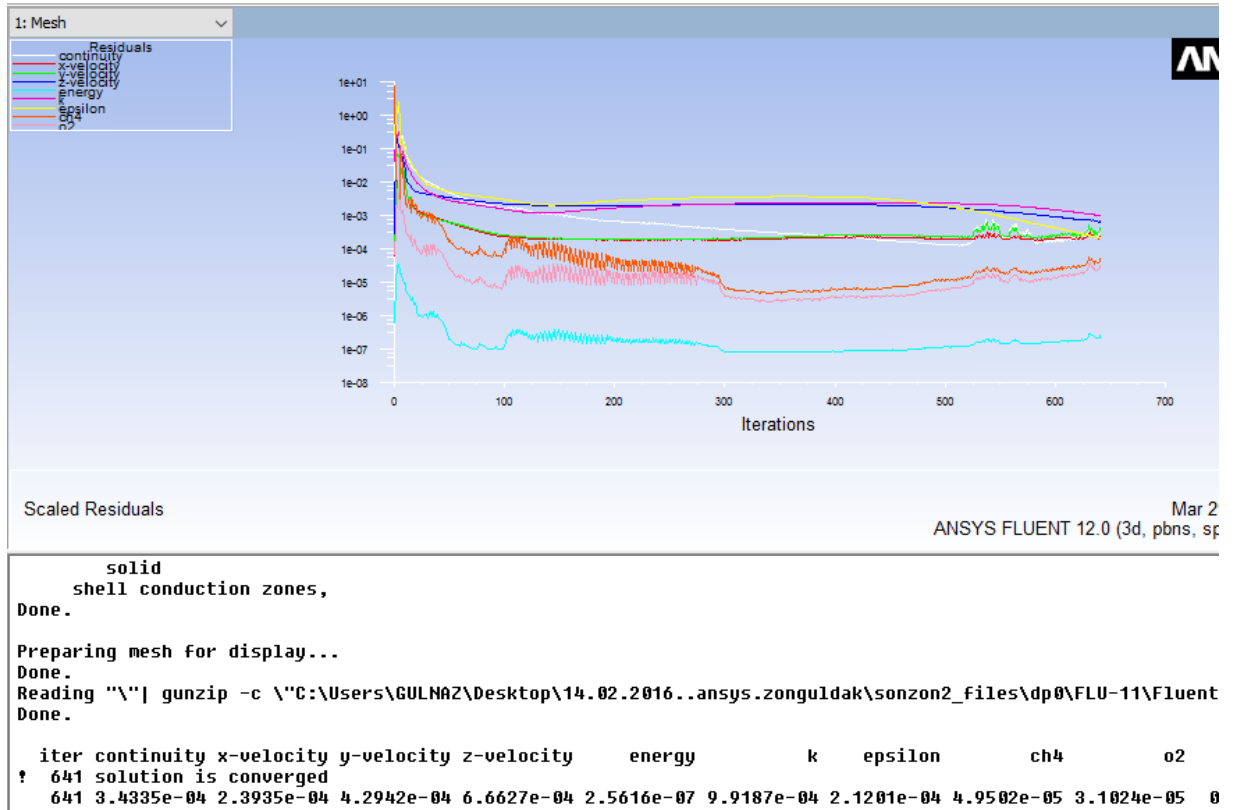
Şekil 5.20. “Artık ekranı (Residual monitors)” seçimi.

Çözümde önce başlangıç tahmin değerini belirlemek için “solution initialize (çözüm başlangıcı)” seçilir ve iterasyon sayısı yazılır (Şek. 5.21).

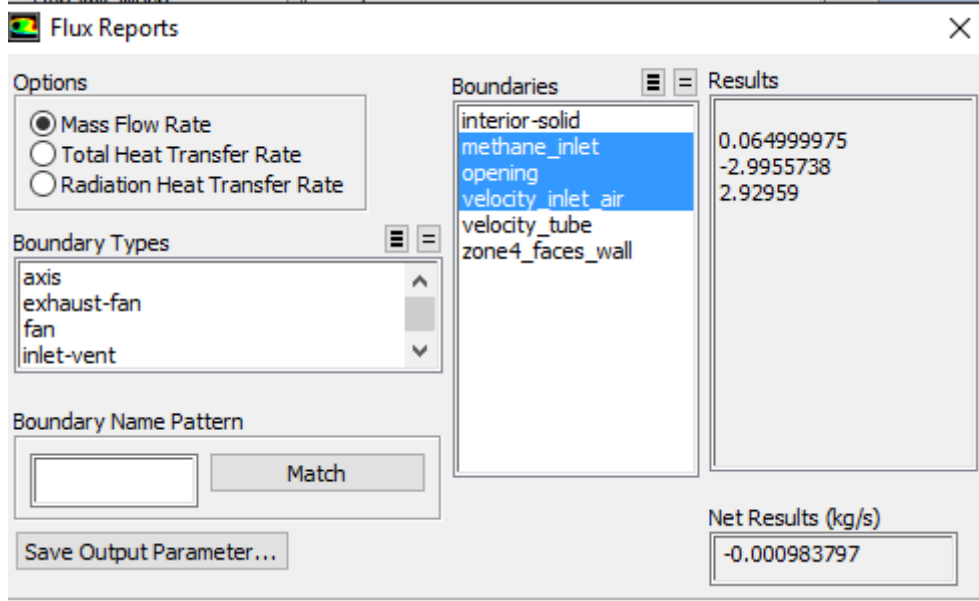


Şekil 5.21. “Hesaplama sayısı (Run calculation)” başlangıç olarak iterasyon sayısı gösterimi.

İterasyon sayısı ve grafiği ekranda belirir (Şek. 5.22). Model belli bir iterasyon sayısında yakınsama gösterdikten sonra, “flux reports (akış sonucu)” ile modelin doğruluğu değerlendirilir (Şekil 5.23). Akış sonucuna göre, giren ve çıkan kütle akış debisi arasındaki fark sıfıra ne kadar yakınsa, model o derece doğru demektir (Altaç, 2005). Giren ve çıkan kütle akış debisi arasındaki “net fark” 0,000983797 kg/sn bulunmuştur. Bu değer sıfıra yakın bir değer olduğu için, modelin doğru olduğu hakkında bize bilgi vermektedir.



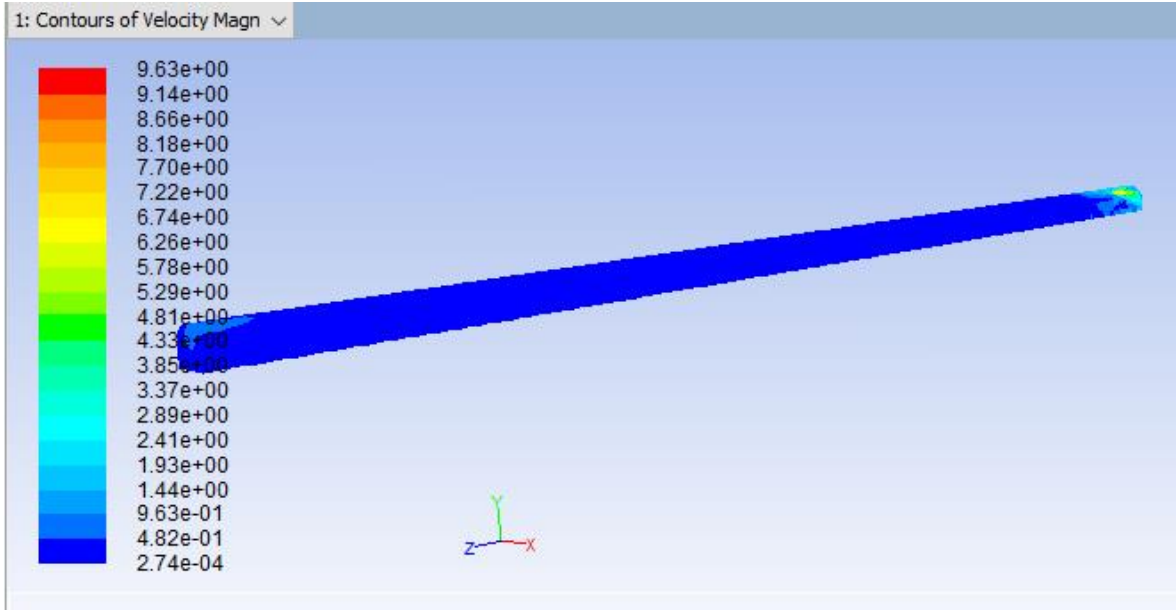
Şekil 5.22. “Calculation (hesaplama) bittikten sonra çözümün gösterimi.



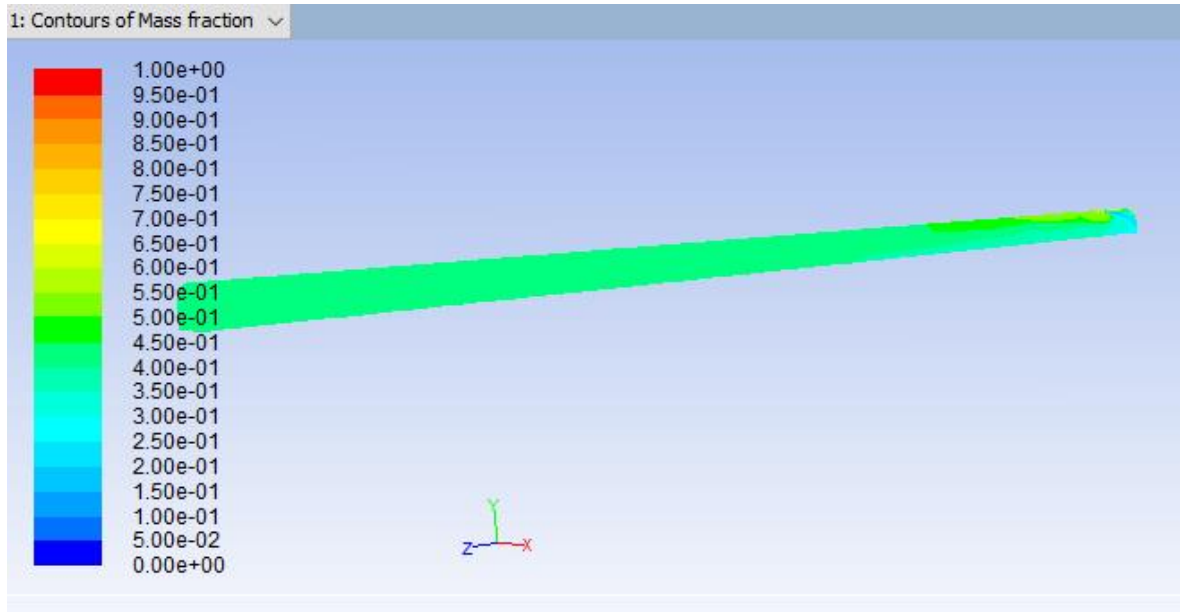
Şekil 5.23. “Flux reports (akış sonucu)” ile modelin doğruluğunu değerlendirme.

5.2.3.2. Metan davranışı ve hava hız davranışının türbülanslı akışa göre modellenmesi

Bu bölümde tali havalandırma ile havalandırılan bir bacada metan ve hava hız davranışının 3-boyutlu olarak türbülanslı akışa göre modellenmesi gösterilmektedir. Hava hız değeri vantüb çıkışında maksimum iken, arın gerisinde azalmakta ve sabit bir değere ulaşmaktadır (Şekil 5.24). Metan gazı tavanda ve galeri arını yakınında fazla iken, belli bir mesafeden sonra sabit bir değere ulaşmaktadır (Şekil 5.25).



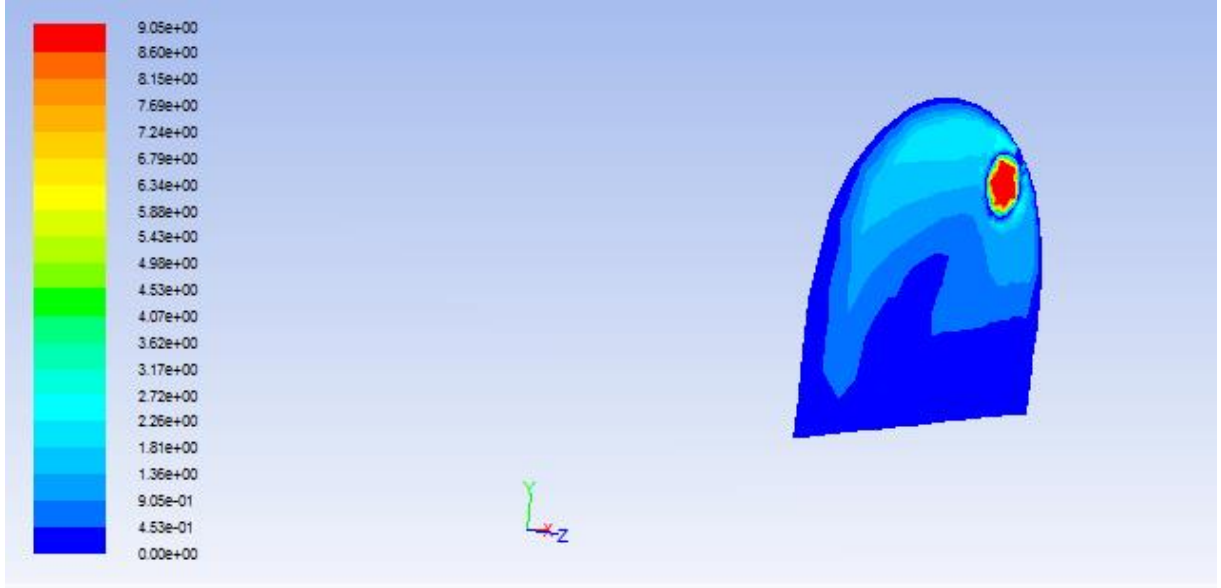
Şekil 5.24. Hava hız davranışının (m/s) 3-boyutlu gösterimi.



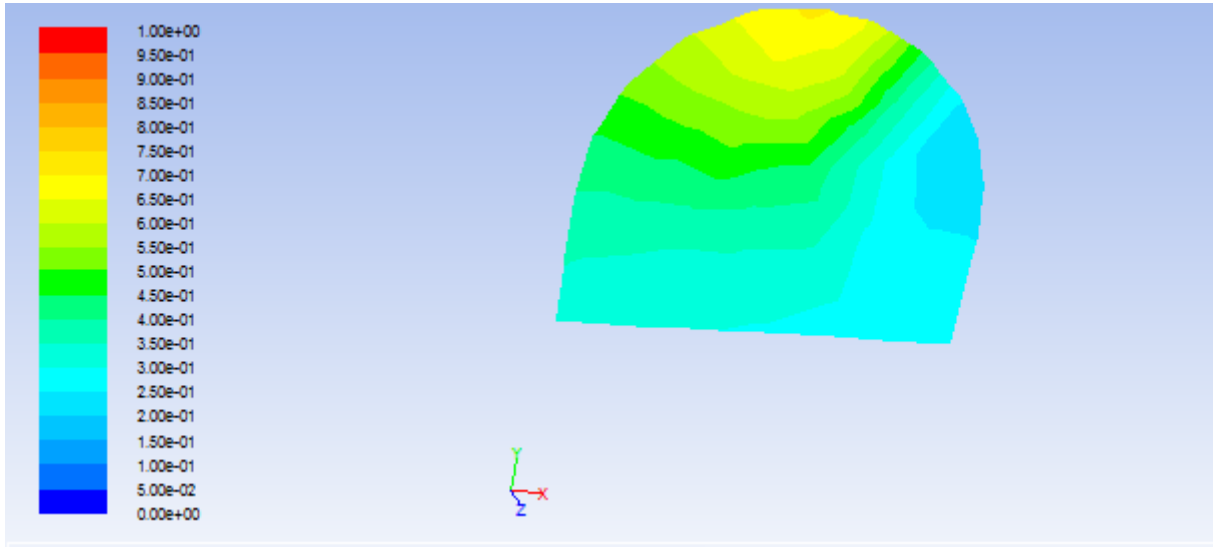
Şekil 5.25. Metan davranışının (kgm/s) 3-boyutlu gösterimi.

Şekil 5.26' a göre, hava hız değeri vantüb çıkışında en yüksek (9.05 m/s) olup, tavanda tabandan daha fazla bulunmaktadır. Çünkü, vantüb altında bir türbülans olmaktadır. Ayrıca, metan ve hava karışımındaki metan yüzdesi arından 40 m ve 60 m

uzaklıkta sabit bir değere ulaşmaktadır. Metan gazı, ocakta tavanda yüksek olup, tabana doğru azalma göstermektedir (Şekil 5.27).

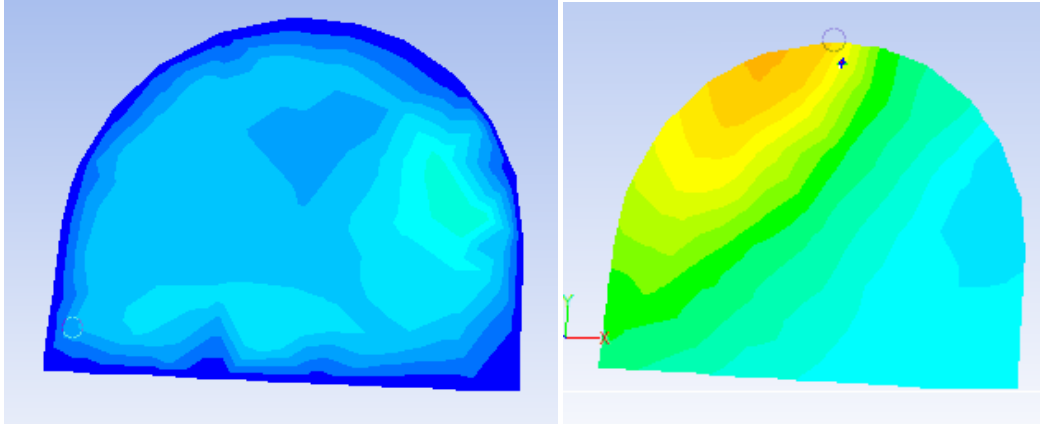


Şekil 5.26. Arından 6 m uzaklıkta bulunan bir kesitte hava hız dağılımının gösterimi.



Şekil 5.27. Arından 3 m uzaklıkta bulunan kesitte metan dağılımının gösterimi.

Galeri arınından 1 m uzaklıktaki hava hızı ve metan değerleri modellenmiş ve Şekil 5.28' de gösterilmiştir.

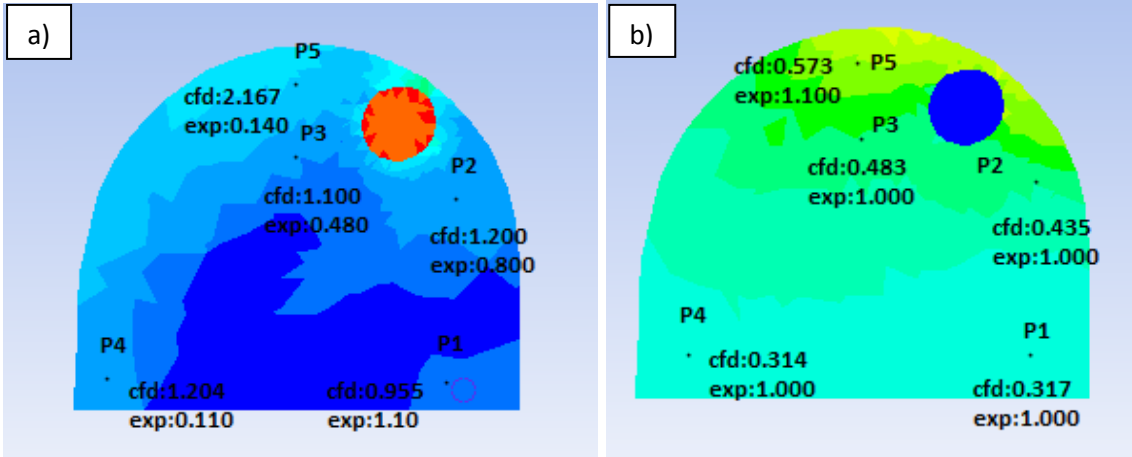


Şekil 5.28. Arıandan 1 m uzaklıkta bulunan kesitte hava hızı ve metan dağılımının gösterimi.

Arıandan 1 m uzaklıktaki hava hız dağılımı incelendiğinde, galerinin duvarlarında hava hızı “0” a yakın olduğu belirlenmiştir. Vantüp çevresine yakın olan noktalarda hız yüksek değerdedir. Metan konsantrasyon değerleri incelendiğinde, özellikle galeri kesitinin vantüp bulunmayan tavan kısmında metan konsantrasyon değerleri oldukça yüksektir. Dolayısıyla, tali havalandırma ile açılan kör bacalarda yürüme alanı olarak adlandırılan vantüpsüz kesitin tavan kısmında metan ölçümlerine özellikle önem verilmelidir.

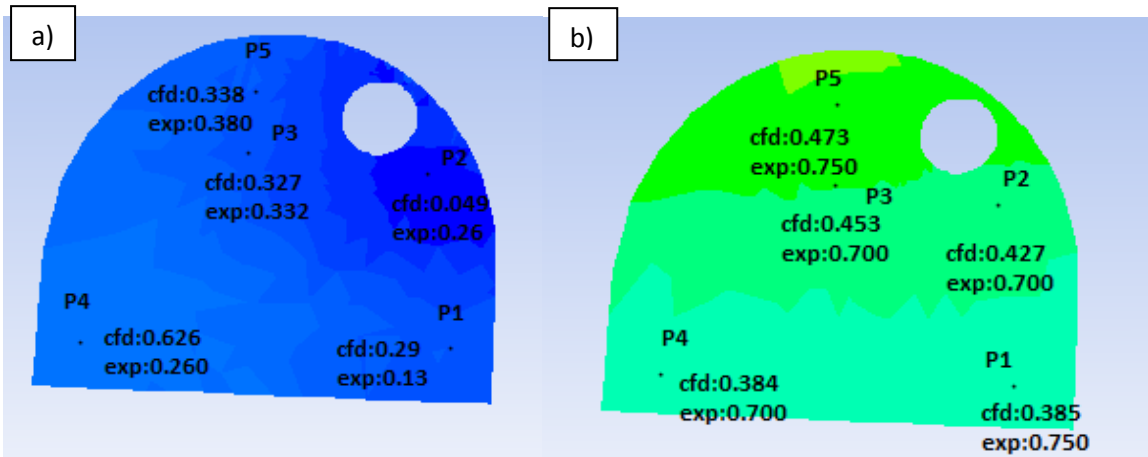
Hava hız ve metan konsantrasyon (%) değerleri, arıandan 6, 25, 40, 60, 110 m uzaklıkta olmak üzere her kesitte 5 ayrı noktadan alınmıştır. Ölçüm çalışmaları ile belirlenen metan (%) ve hava hızı (m/s) değerleri ile Ansys® 12.00 kullanılarak gerçekleştirilen CFD benzetim sonuçları sırasıyla aşağıdaki şekillerde (5.29-5.33) gösterilmiştir.

Arıandan 6 m uzaklıkta hava hız değerleri, tavanda ve vantüb çevresinde fazla iken, vantüb altında turbülans oluşması nedeni ile hava hız değerleri azalma göstermektedir. Metan konsantrasyon değerleri, metan yoğunluğunun havaya göre az olması nedeni ile tavandan tabana doğru azalma göstermektedir (Şekil 5.29).

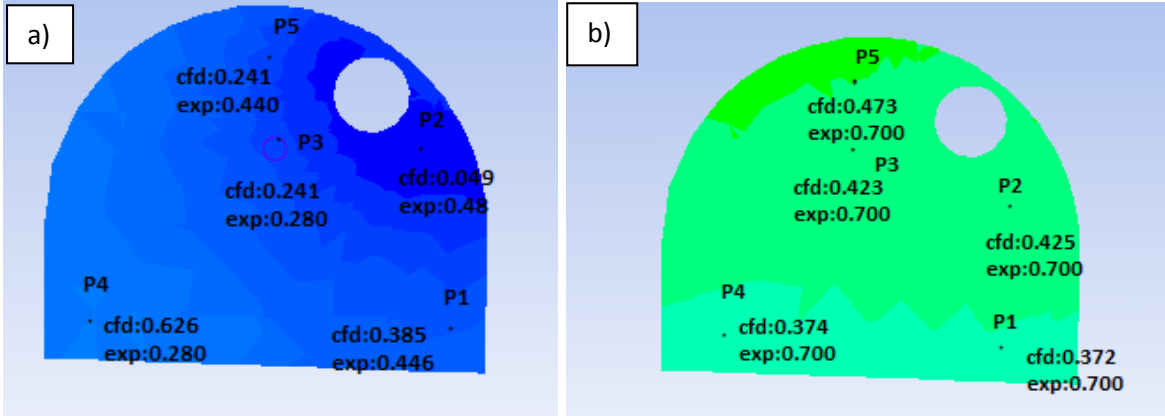


Şekil 5.29. Arından 6 m uzaklıkta bulunan kesitin a) hava hız ve b) metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi.

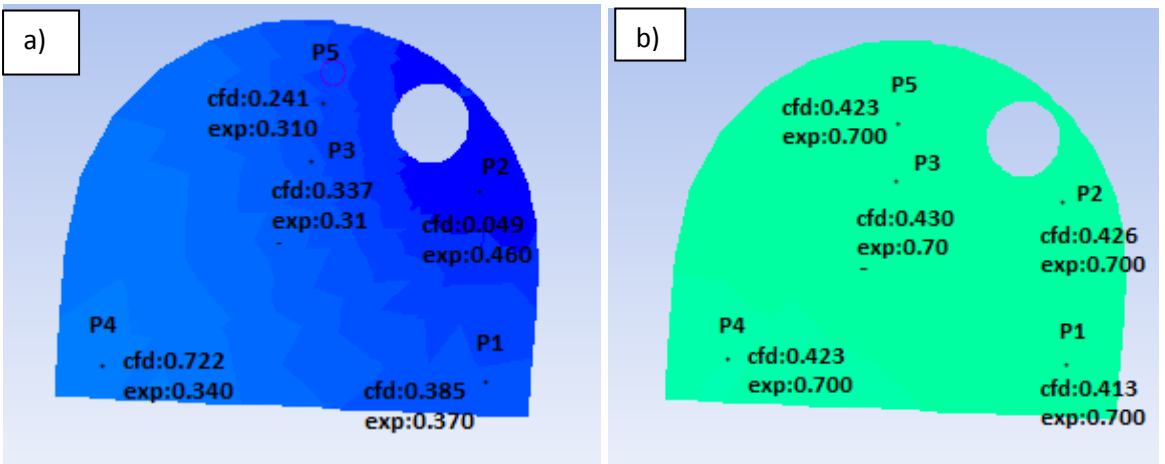
Arından 25 m ve 40 m uzaklıkta hava hız değerleri izometrik bir dağılım göstermektedir. Yani sol uçta fazla miktarda hava hızı varken, ortalara doğru azalmakta ve vantüb ağzının en alt noktasında daha az bir değer göstermektedir. Metan değeri tavanda daha fazladır (Şekil 5.30-5.31). Arından 60 m ' de metan konsantrasyon değeri tali ocağın her yerinde sabit bir değere (deneysel % 0.7; CFD % 0.42) ulaşmaktadır (Şekil 5.32). Bu da hava akımının metanı uzaklaştırma yetisinin azaldığını göstermektedir. Bu nedenle arından 40 m uzaklıkta galeri içine ikinci bir tali vantilatör konularak, metanın tutuşma tehlikesinin önüne geçilmesi faydalı olacaktır. Yine arından 110 m uzaklıkta (çıkış yüzeyinde) hava hızı vantüb etrafında fazla iken, alt noktalarda az olmaktadır (Şekil 5.33).



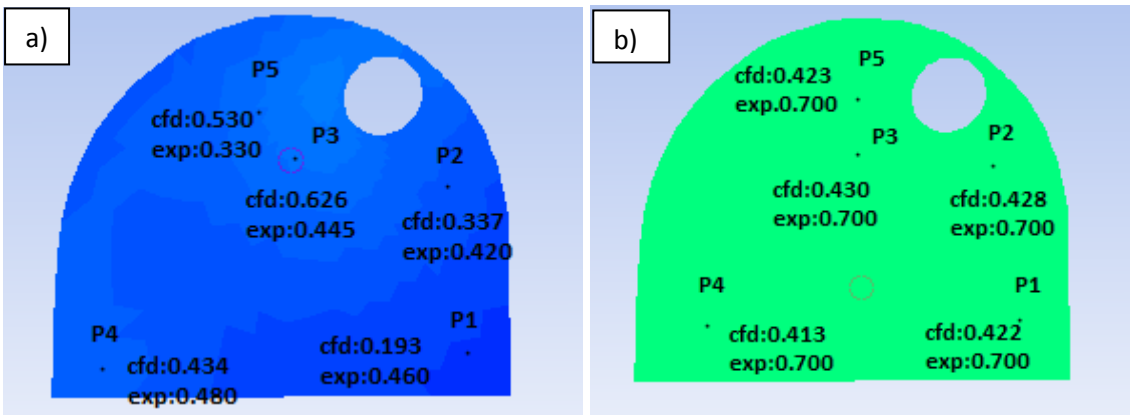
Şekil 5.30. Arından 25 m uzaklıkta bulunan kesitin a) hava hız ve b) metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi.



Şekil 5.31. Arından 40 m uzaklıkta bulunan kesitin a) hava hız ve b) metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi.



Şekil 5.32. Arından 60 m uzaklıkta bulunan kesitin a) hava hız ve b) metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi.



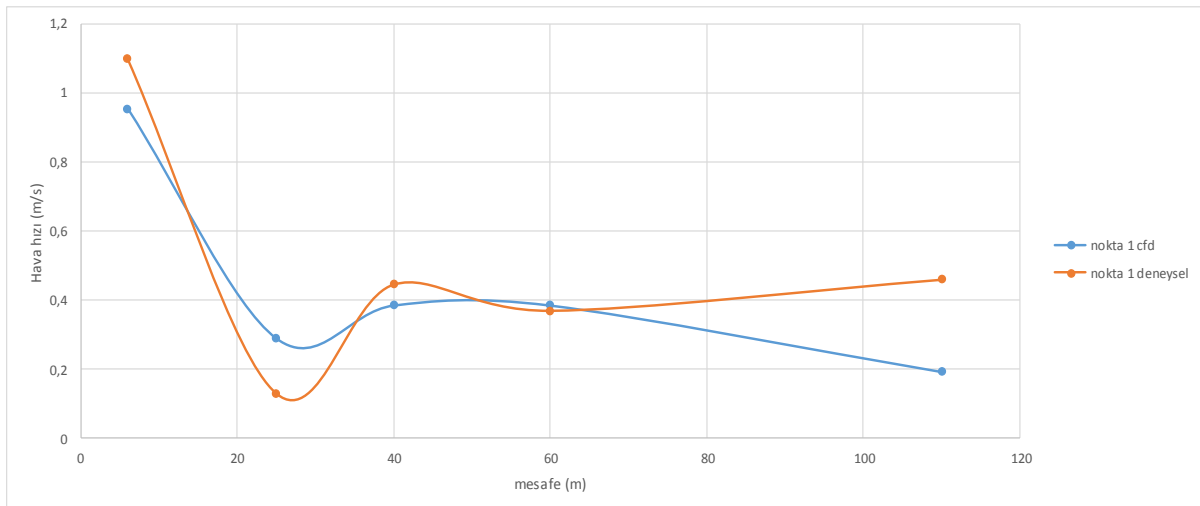
Şekil 5.33. Arından 110 m uzaklıkta bulunan kesitin a) hava hız ve b) metan konsantrasyon değerlerinin gösterimi.

Çizelge 5.3' de 5 nokta için 5 farklı kesitten alınan ortalama deneysel ve CFD değerleri verilmiştir.

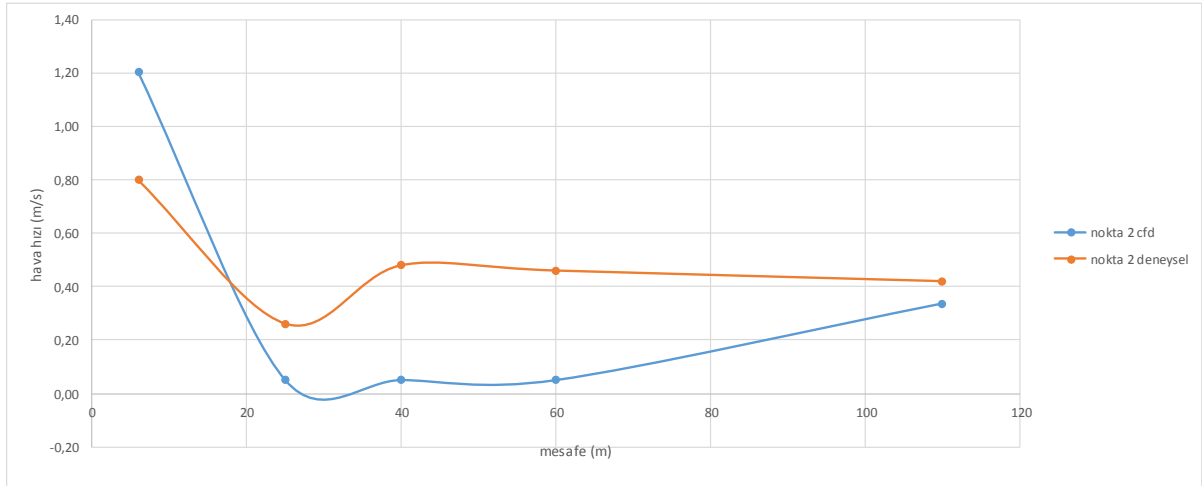
Çizelge 5.3. Beş farklı kesitte 5 nokta için ortalama deneysel ve CFD değerleri.

Kesit	Sonuçlar	Ortalama hız (m/s)					Ortalama metan konsantrasyonu (%)				
		P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
6 m	CFD	0,955	1,20	1,1	1,204	2,167	0,317	0,435	0,483	0,314	0,573
	Deneysel	1,1	0,80	0,48	0,11	0,14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,1
25 m	CFD	0,29	0,049	0,327	0,626	0,338	0,385	0,427	0,453	0,384	0,473
	Deneysel	0,13	0,26	0,332	0,26	0,38	0,75	0,7	0,7	0,7	0,75
40 m	CFD	0,385	0,049	0,241	0,626	0,241	0,372	0,425	0,423	0,374	0,473
	Deneysel	0,446	0,48	0,28	0,28	0,44	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
60 m	CFD	0,385	0,049	0,337	0,722	0,241	0,413	0,426	0,43	0,423	0,423
	Deneysel	0,37	0,46	0,311	0,34	0,31	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
110 m	CFD	0,193	0,337	0,626	0,434	0,53	0,422	0,428	0,43	0,413	0,423
	Deneysel	0,46	0,42	0,445	0,48	0,33	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

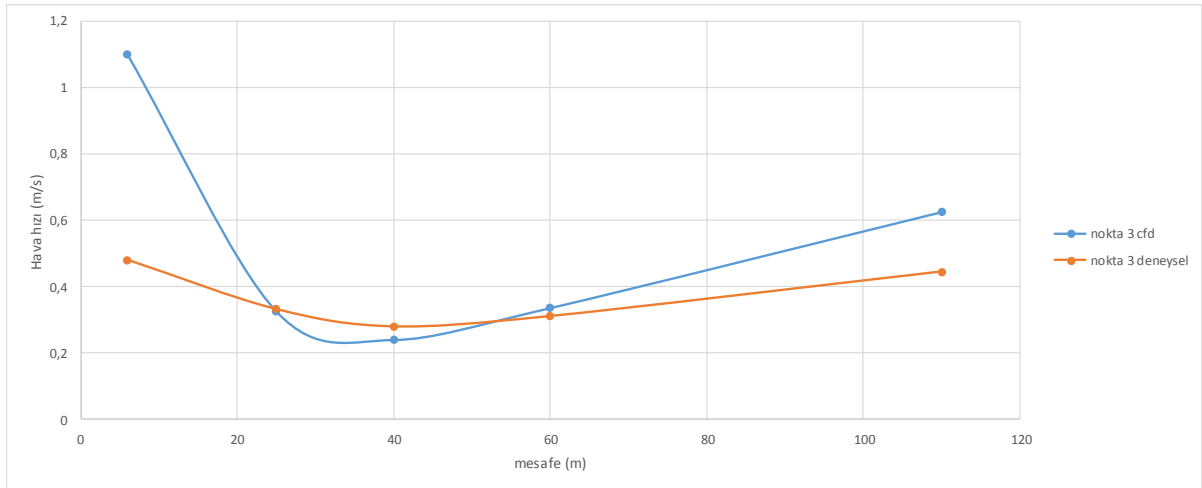
Nokta 1 ve 2 ' nin deneysel ve modelleme hava hız değerleri birbiri ile paralellik gösterirken, nokta 3, 4 ve 5'te, arından 6 m uzakta başlangıç değerleri turbülansın etkisi ile farklılık göstermektedir. Ancak, arından 25 m uzaklıktan sonra, galeri boyunca tüm ölçüm ve modelleme sonuçları benzer olarak bulunmuştur (Şekil 5.34-5.38).



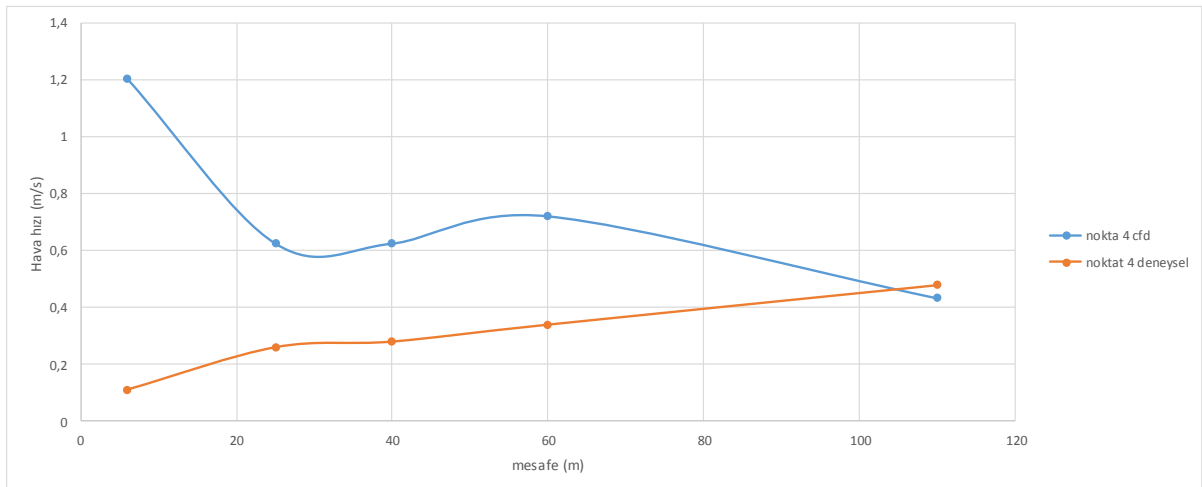
Şekil 5.34. Nokta 1' in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi.



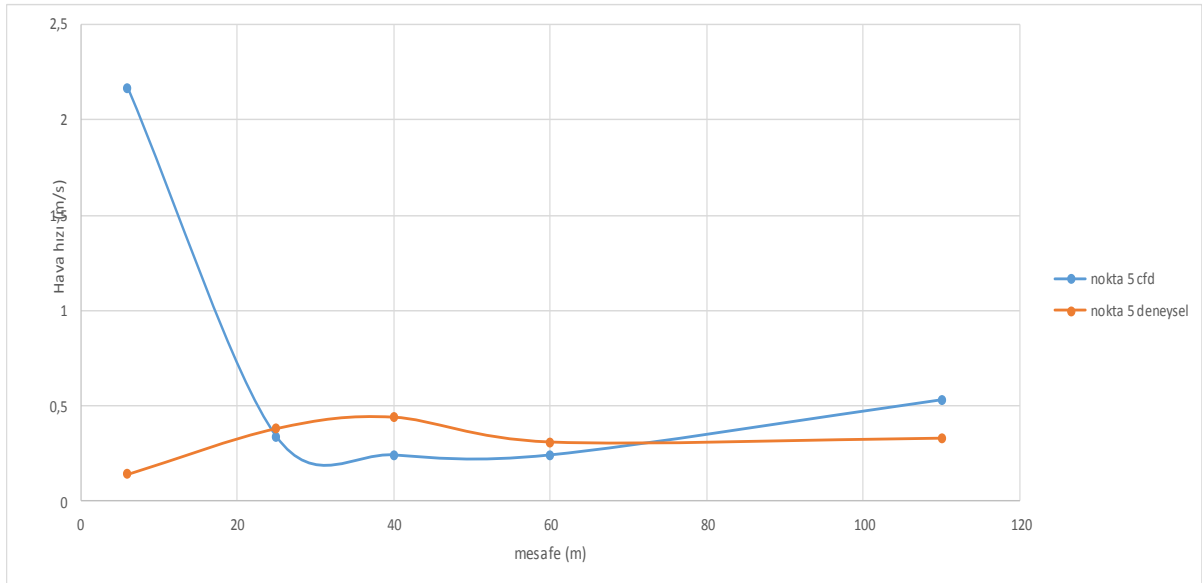
Şekil 5.35. Nokta 2' nin deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi.



Şekil 5.36. Nokta 3' ün deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi.

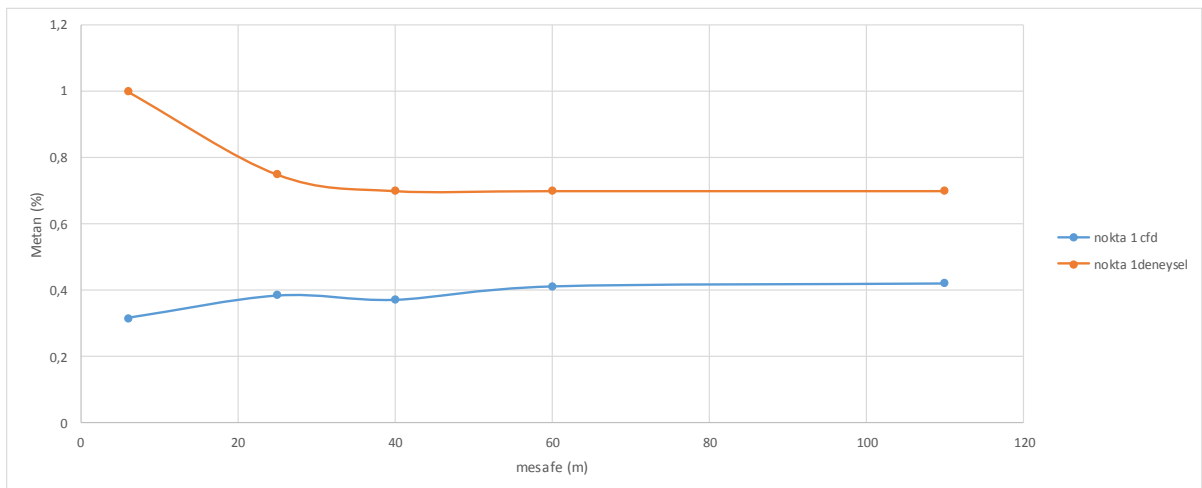


Şekil 5.37. Nokta 4' ün deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi.

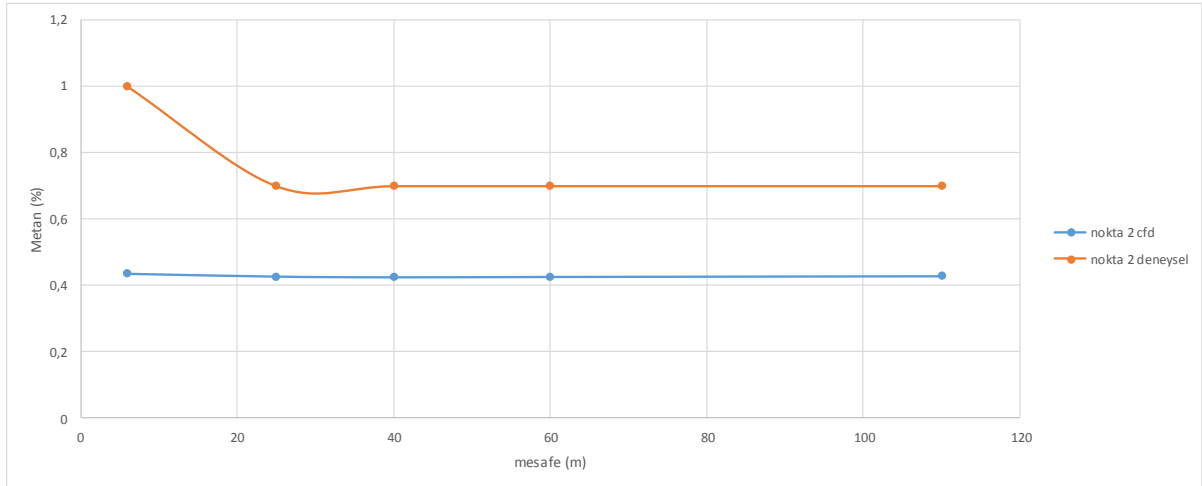


Şekil 5.38. Nokta 5' in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin(m/s) gösterimi.

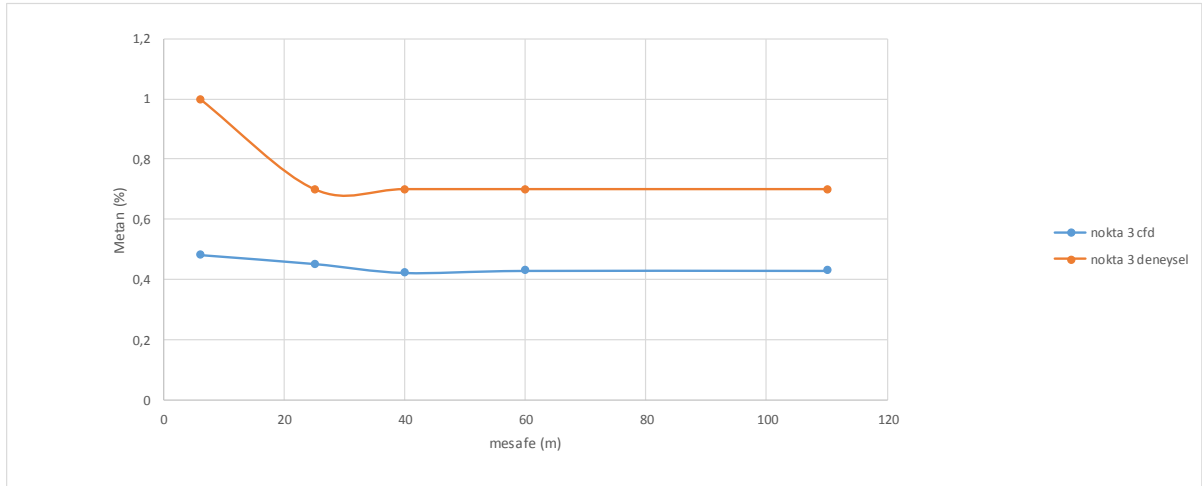
Beş nokta için metan konsantrasyon değerleri, arından 6 m' de turbülansın etkisi ile birbirinden uzak değerler alsada, arından 25 m' den 40 m' ye kadar azalan bir eğim gösterdikten sonra, 40 m' den itibaren sabit bir değere ulaşarak modellemeye paralel gitmektedir (Şekil 5.39-5.43). Arından 40 m' den itibaren 110 m' ye kadar bacanın her yerinde metan değeri sabit bir değerde (modelleme değeri % 0.42) gitmektedir.



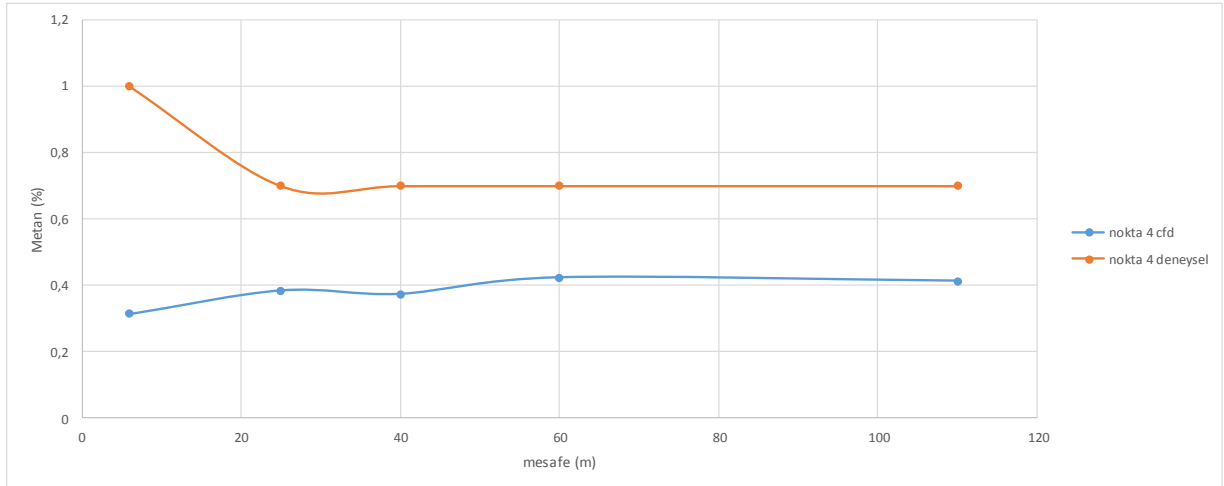
Şekil 5.39. Nokta 1' in deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi.



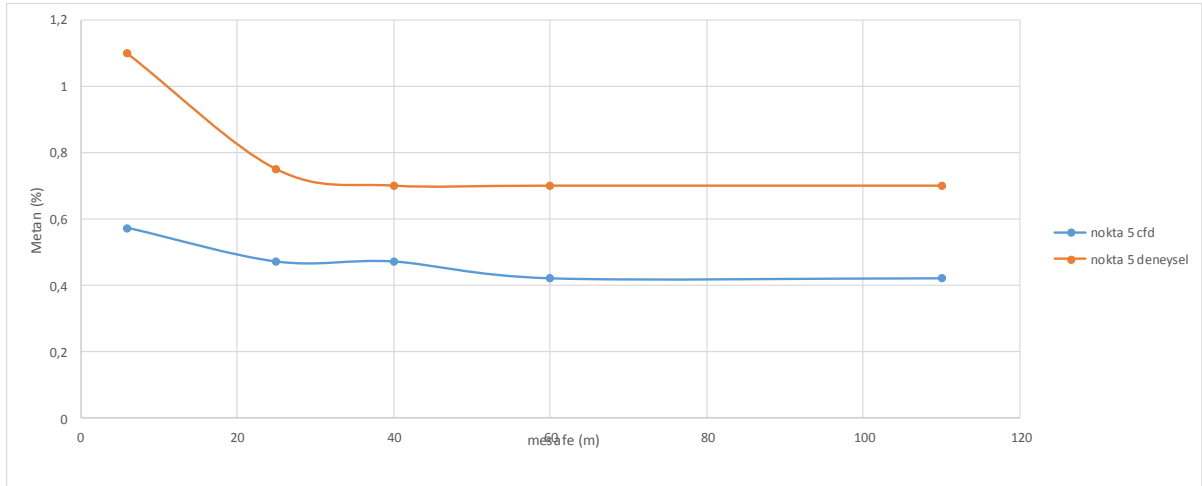
Şekil 5.40. Nokta 2' nin deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi.



Şekil 5.41. Nokta 3' ün deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi.



Şekil 5.42. Nokta 4' ün deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi.



Şekil 5.43. Nokta 5' in deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerlerinin (%) gösterimi.

6.BULGULAR VE TARTIŞMA

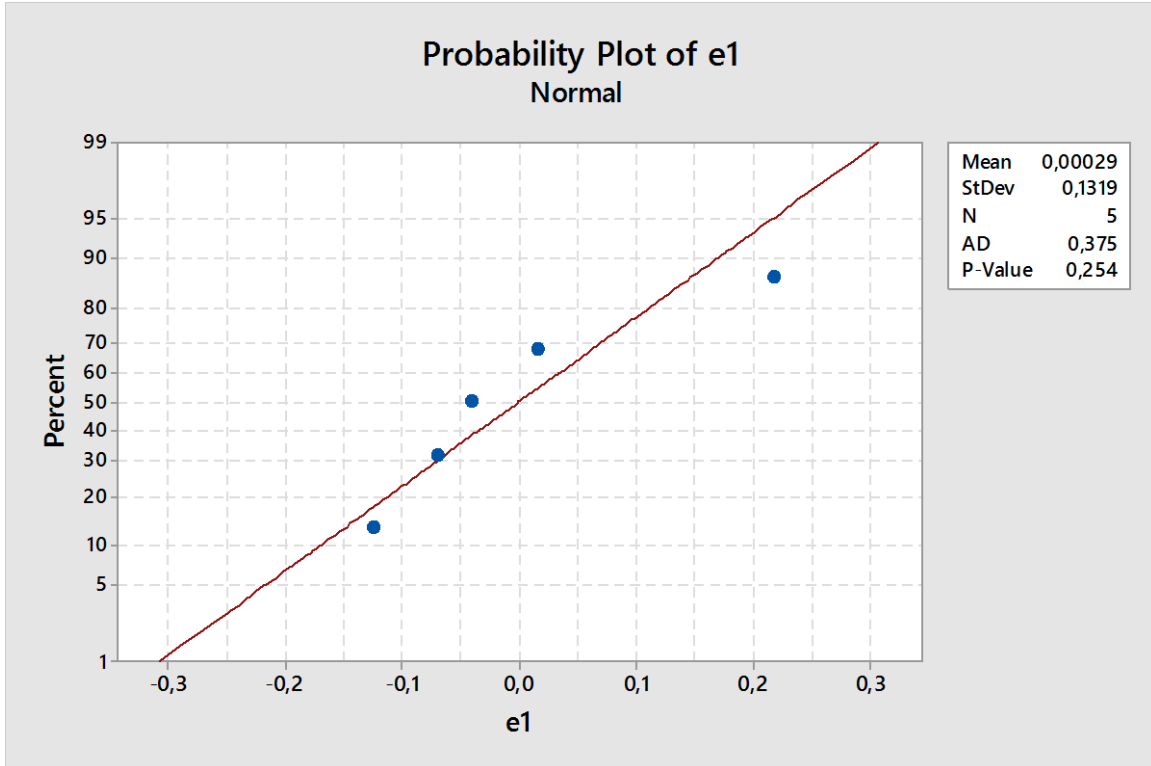
6.1. Normal Dağılıma Uygunluk Analizi

Modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile yerinde alınan ölçüm değerlerinin istatistiksel olarak yakın olup olmadığını araştırmak amacıyla varyans analizi ve doğrusal regresyon analizi teknikleri kullanılmıştır. Analizlerde MINITAB-17 istatistiksel paket programı kullanılmış olup, öncelikle deneysel ve modelleme değerlerinin Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov, Ryan-Joiner normallik testlerinden Anderson-Darling yöntemi ile normal dağılıma uyup uymadığına bakılmıştır (Şekil 6.1-6.10). Kurulan hipotezler aşağıda verilmiştir.

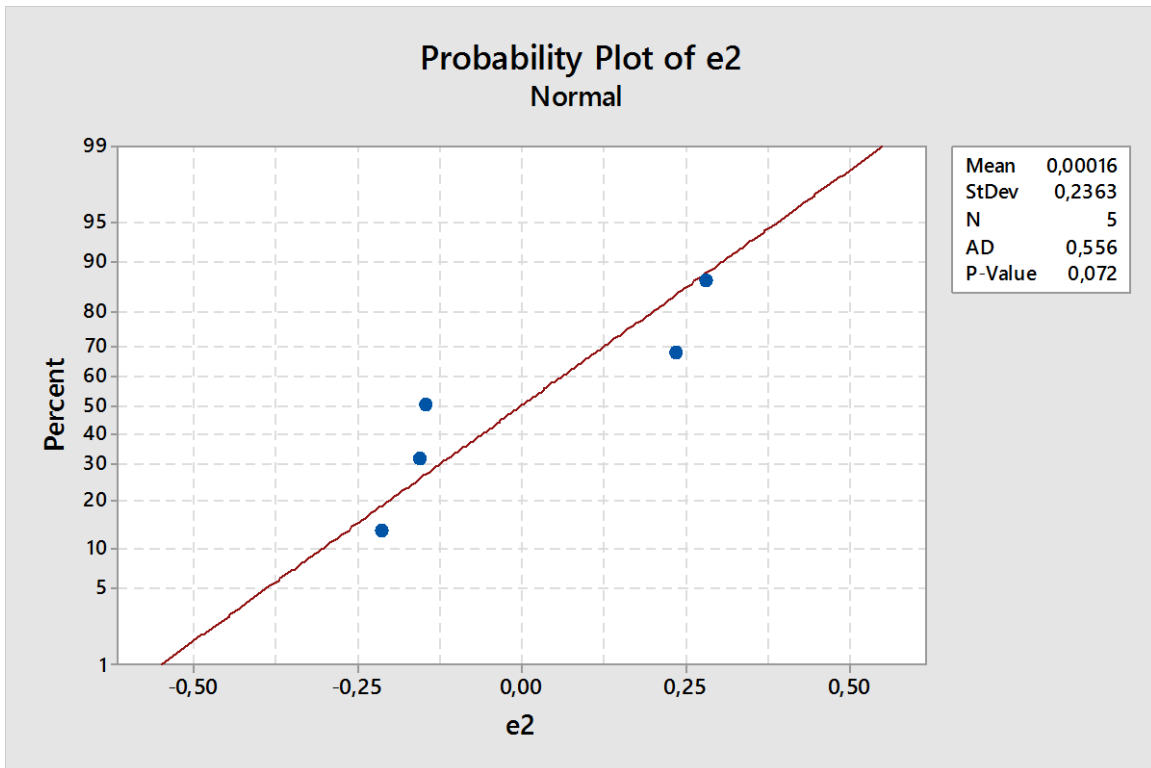
H_0 : Veri seti normal dağılıma uymaktadır.

H_1 : Veri seti normal dağılıma uygun değildir.

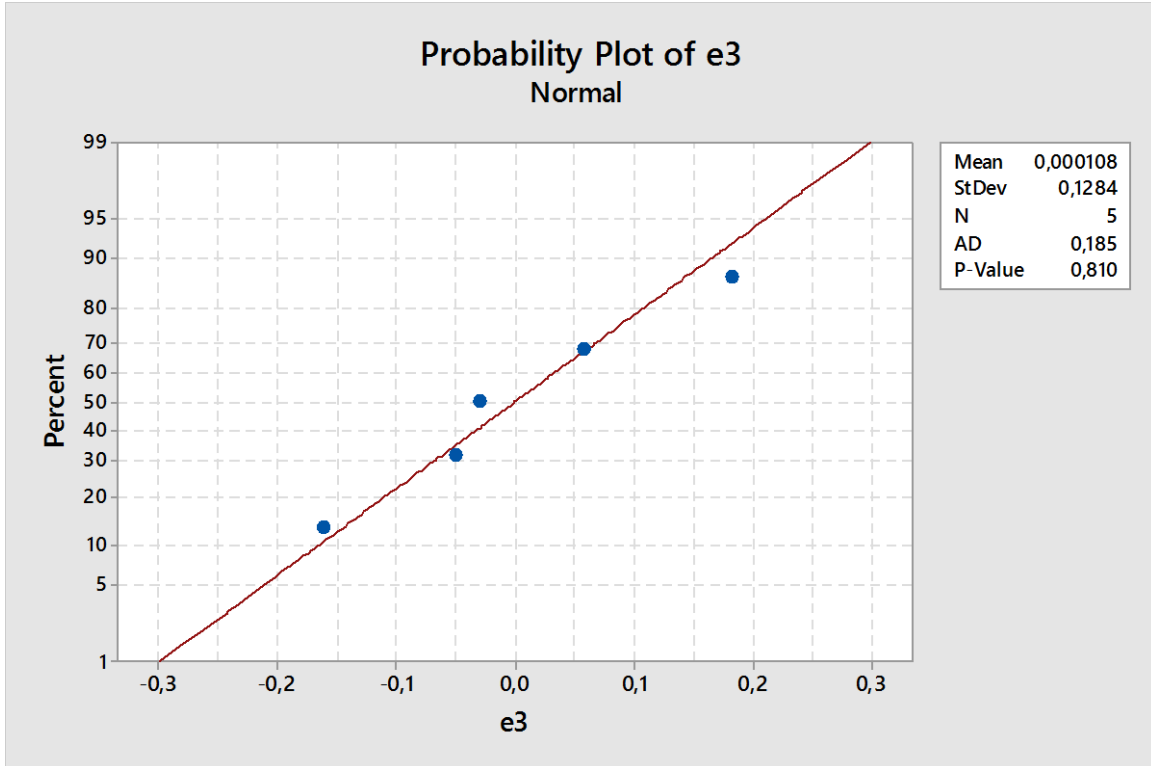
% 95 güven seviyesinde çalışılmış olup, bu hipotezlere göre p değeri > 0.05 ' den büyük ise H_0 hipotezi kabul edilir (<http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/data-concepts/anderson-darling/>). Aşağıda verilen şekillerdeki p değerleri incelendiğinde, her bir noktadaki p değerlerinin $0,05$ ' den büyük olduğu ve veri setinin normal dağılıma uyduğu söylenebilir.



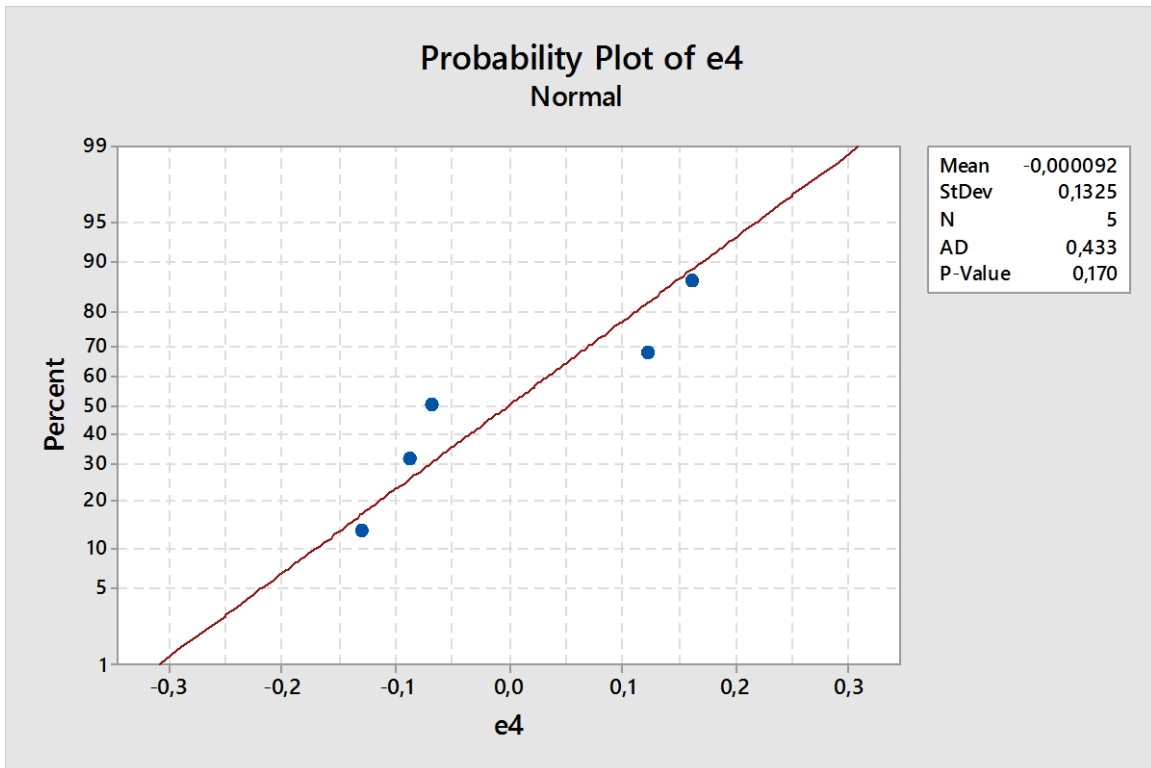
Şekil 6.1. Nokta 1 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi.



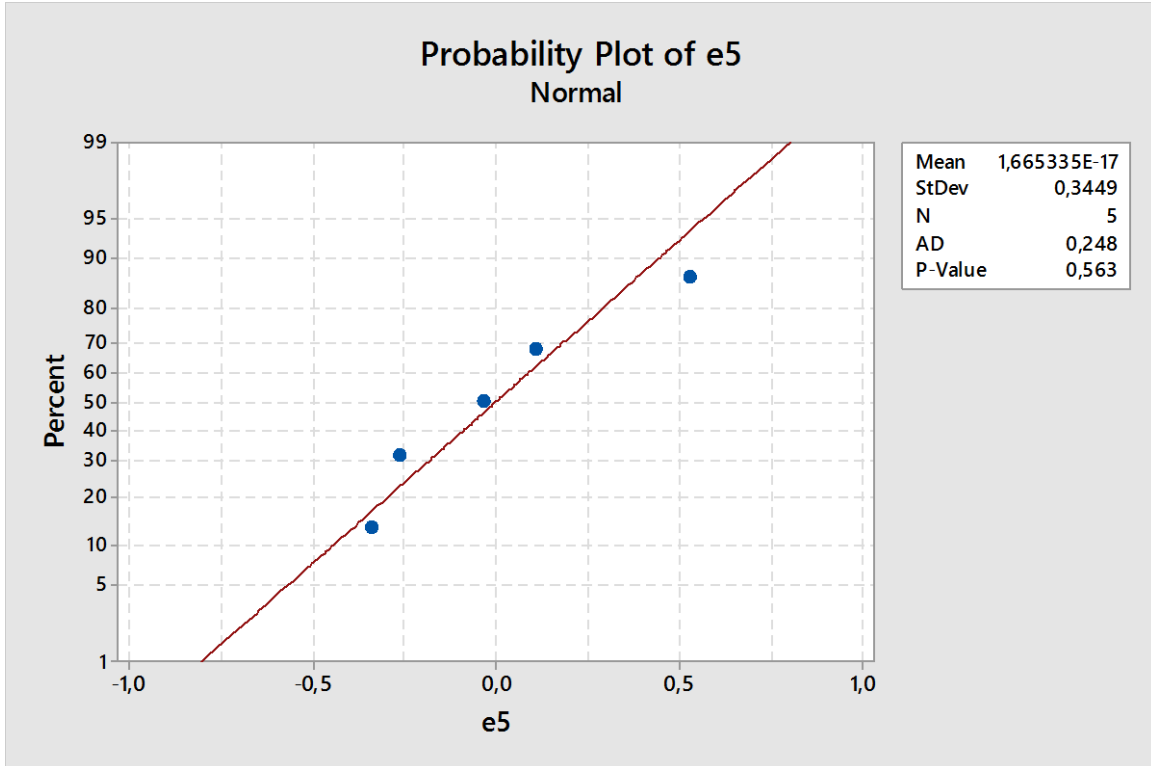
Şekil 6.2. Nokta 2 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi.



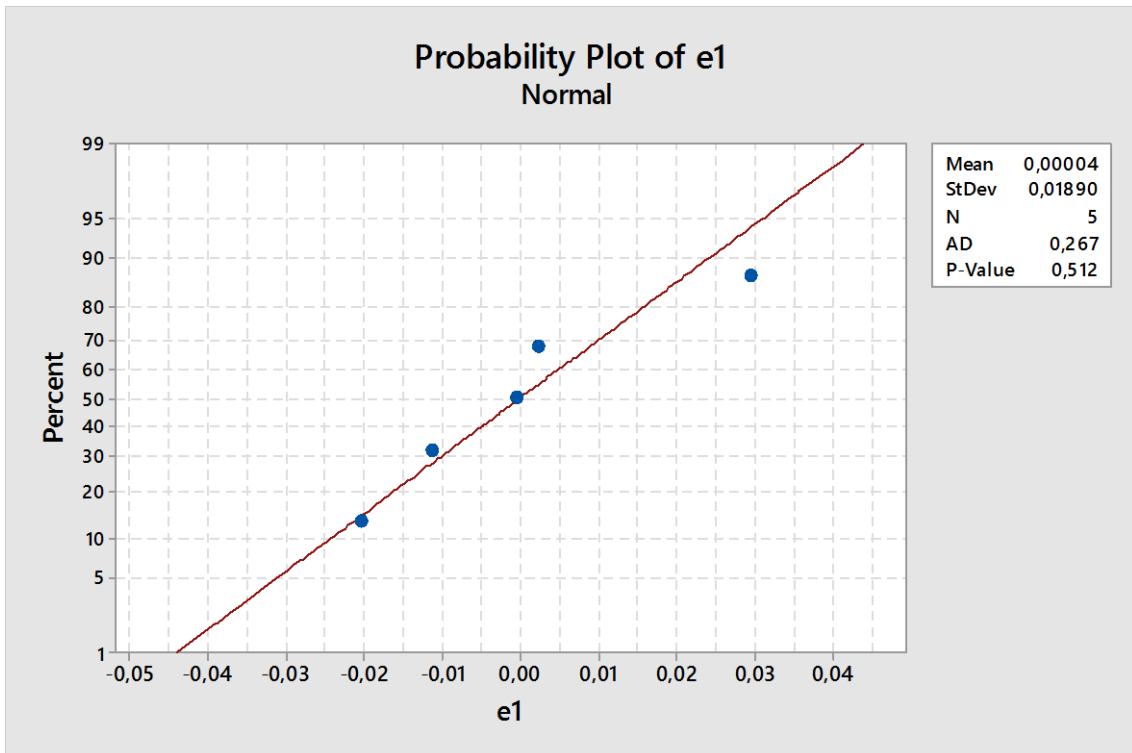
Şekil 6.3. Nokta 3 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi.



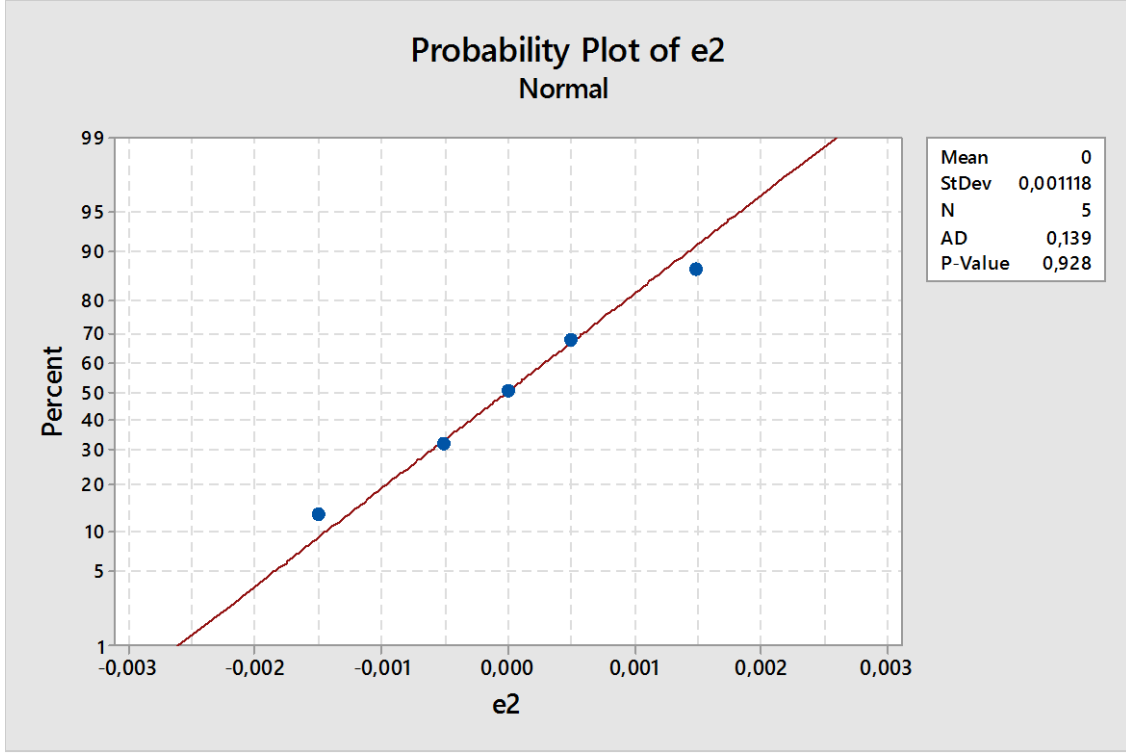
Şekil 6.4. Nokta 4 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi.



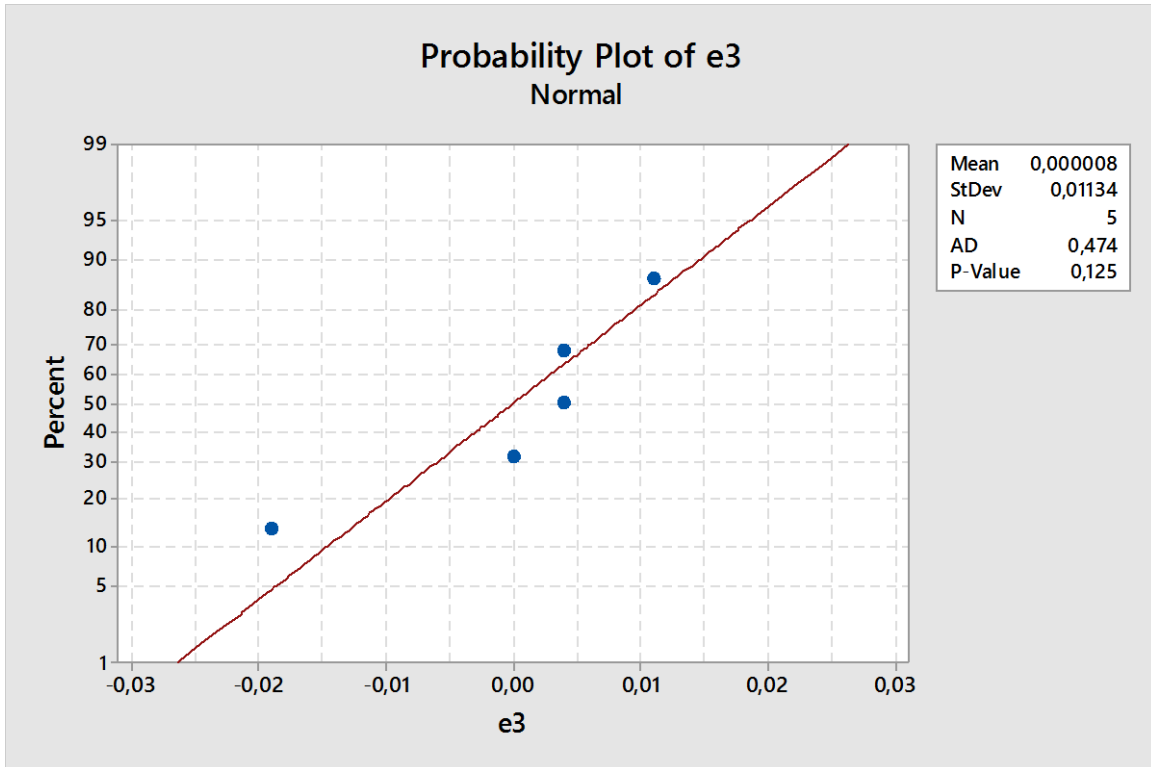
Şekil 6.5. Nokta 5 için deneysel ve modelleme (cfd) hava hız değerlerinin normallik testi.



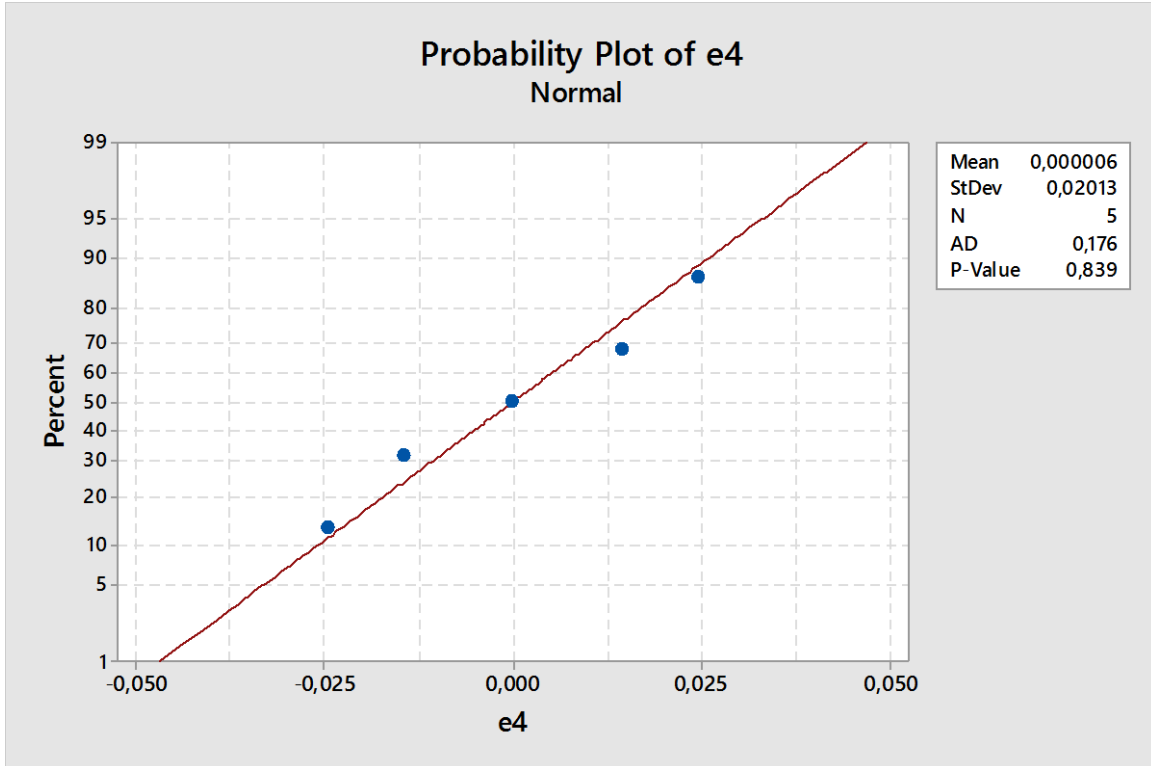
Şekil 6.6. Nokta 1 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi.



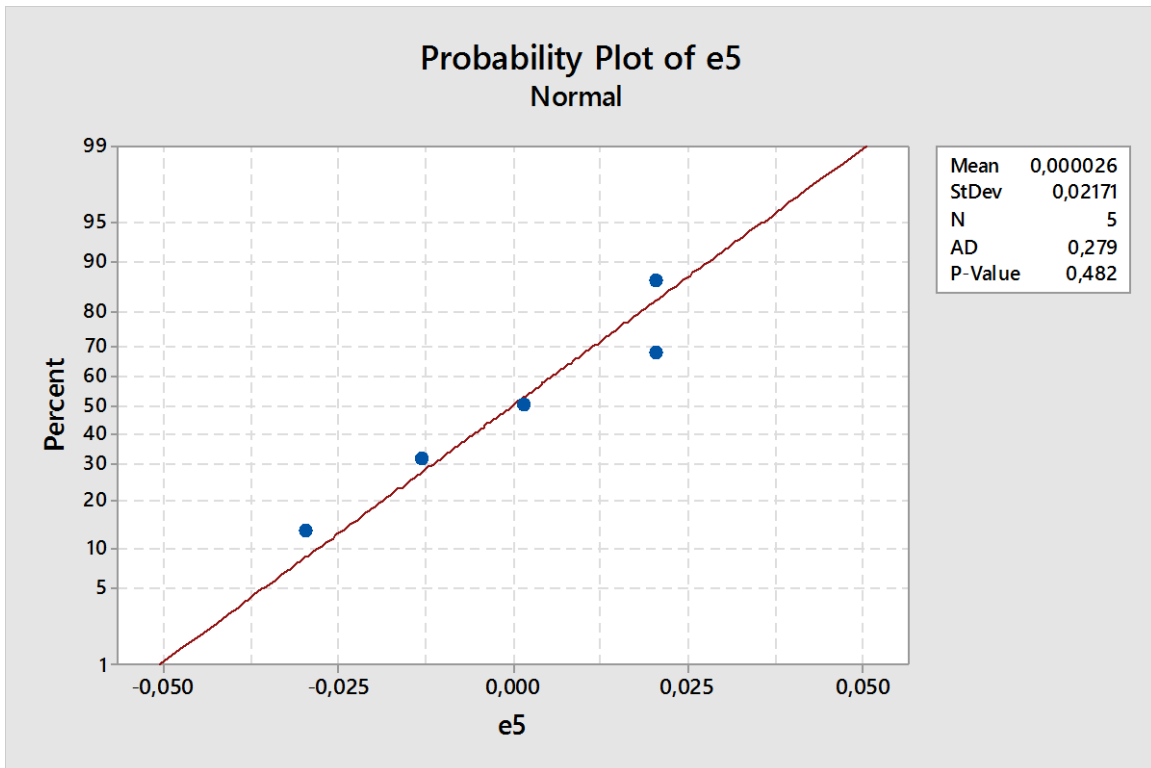
Şekil 6.7. Nokta 2 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi.



Şekil 6.8. Nokta 3 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi.



Şekil 6.9. Nokta 4 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi.



Şekil 6.10. Nokta 5 için deneysel ve modelleme (cfd) metan değerlerinin normallik testi.

Normal dağılıma uyan metan ve hava hız modelleme ve deneysel değerler arasında önemli bir anlam taşıyıp taşımadığını incelemek için, bu değerlerin varyans analizi ve regresyon analizine bakılmıştır. Hava hızı ve metanın, modelleme ve deneysel değerleri arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığını inceleyen varyans ve regresyon analizleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

6.2. Varyans Analizi ile Değerlendirme

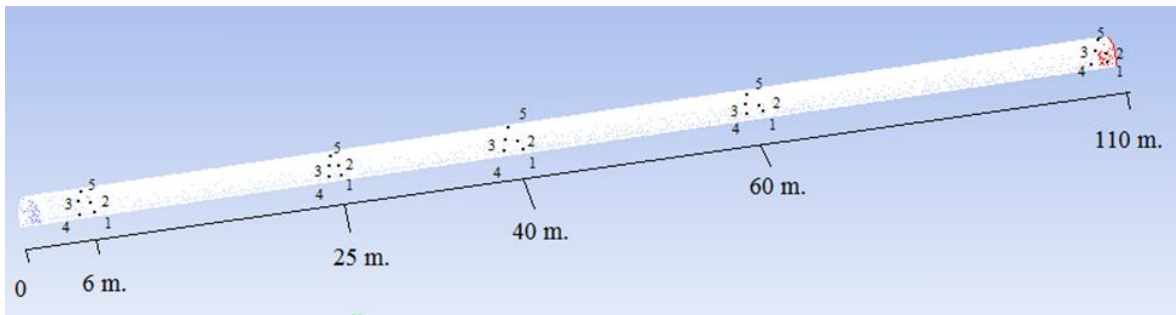
Hipotez testi, bir kesitin her noktasında (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) deneysel ve modellenen hava hızı ve metan ölçümleri arasında herhangi bir anlam olup olmadığını belirlemek için oluşturulmuştur. Bu nedenle her noktada deneysel ve modellenen ortalamalar arasında önemli bir anlamı kıyaslamak için ANOVA testi uygulanmıştır. İstatistiksel analizlerde MINITAB-17 paket programı kullanılmış olup, % 95 güven seviyesinde çalışılmıştır.

Hipotez testinde;

H_0 : Her noktadaki deneysel ve modellenen hava hız ortalamaları arasında önemli bir anlam yoktur.

H_1 : Her noktadaki deneysel ve modellenen hava hız ortalamaları arasında önemli bir anlam vardır.

İstatistiksel analizlerin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla modelleme çalışmalarının yapıldığı galerinin yaklaşık bir gösterimi Şekil 6.11’ de verilmiştir.



Şekil 6.11. Modellemesi yapılan galerinin ve ölçüm noktalarının gösterimi

Yerinde yapılan ölçümler ve CFD ile yapılan modelleme sonuçlarını kıyaslamak amacıyla varyans analizleri (ANOVA) yapılmıştır. Öncelikle modelleme ile belirlenen hava hızı değerlerinin doğruluğunu belirlemek için, 1 numaralı noktadan alınan ölçüm değerleri kullanılmıştır. Yapılan analizin sonuçları Çizelge 6.1’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Nokta 1’ in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,28522	0,28522	12,30	0,039
Hata	3	0,06955	0,02318		
Toplam	4	0,35477			

Çizelge 6.1 incelendiğinde, F değeri 12.30 olarak bulunmuştur. 12.30 olan F değeri, ortalamaların farklı olması nedeniyle en az bir grup sonucunun sıfırdan farklı olduğunu göstermektedir. P değeri = 0.039 değeri α (güvenilirlik seviyesi) < 0.05 olduğundan H_0 hipotezi red edilir ve alternatif hipotez kabul edilir. Bu koşullarda 1 numaralı noktada ölçülen ve modellenen hava hız ortalamaları arasında bir fark olmadığı söylenebilir. Böylece modellemede kullanılan verilerin doğruluğuda ortaya çıkmış olmaktadır. Benzer şekilde diğer noktalar için yapılan ANOVA sonuçları Çizelge 6.2-6.5’ de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Nokta 2’ nin deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,77621	0,77621	10,38	0,049
Hata	3	0,2243	0,07477		
Toplam	4	1,0005			

Çizelge 6.3. Nokta 3’ ün deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,43012	0,43012	19,58	0,021
Hata	3	0,06590	0,02197		
Toplam	4	0,49602			

Çizelge 6.4. Nokta 4' ün deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,26345	0,26345	11,25	0,044
Hata	3	0,07025	0,02342		
Toplam	4	0,33370			

Çizelge 6.5. Nokta 5' in deneysel ve modelleme hava hız değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	2,2574	2,2574	14,23	0,033
Hata	3	0,4760	0,1587		
Toplam	4	2,7333			

Yerinde alınan hava hızı değerleri ile CFD modelleme tekniğiyle bulunan hava hızı değerleri, her bir nokta için ANOVA ile incelenmiş ve tüm noktalardaki p değerlerinin 0.05' den küçük olduğu bulunmuştur. Bu durumda, tüm noktalar için, H_0 hipotezi için red edilip, H_1 hipotezi kabul edilir. Yani ölçülen ve modellenen değerler istatistiksel olarak birbirine yakındır. Böylece modellemede kullanılan veri setinin güvenilir olduğu söylenbilir. Benzer şekilde, metan konsantrasyon değerleri için yapılmış olan ANOVA analizleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.6-6.10).

Çizelge 6.6. Nokta 1' in deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,005466	0,005466	11,48	0,043
Hata	3	0,001428	0,000476		
Toplam	4	0,006895			

Çizelge 6.7. Nokta 2' nin deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,000058	0,000058	34,68	0,010
Hata	3	0,000005	0,000002		
Toplam	4	0,000063			

Çizelge 6.8. Nokta 3' ün deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,001921	0,001921	11,21	0,044
Hata	3	0,000514	0,000171		
Toplam	4	0,002435			

Çizelge 6.9. Nokta 4' ün deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,005712	0,005712	10,57	0,047
Hata	3	0,001621	0,000540		
Toplam	4	0,007333			

Çizelge 6.10. Nokta 5' in deneysel ve modelleme metan değerlerinin varyans analizi.

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regresyon	1	0,013115	0,013115	20,87	0,020
Hata	3	0,001885	0,000628		
Toplam	4	0,015000			

Çizelge 6.6-6.10 incelendiğinde, tüm p değerleri < 0.05 olduğundan, H_0 hipotezi red edilir ve alternatif hipotez kabul edilir. Bu koşullarda, alınan metan konsantrasyon değerleri ve CFD ile modellemeden bulunan değerler arasında bir fark olmadığı ve metan konsantrasyon değerlerini modellemede kullanılan veri setinin de güvenilir olduğu söylenebilir.

6.3. Çiftli t-Testi

Ölçüm değerleri ile benzetimden elde edilen değerler arasındaki farkları test etmek için, ayrıca çiftli t-testi tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemde önce H_0 ve H_1 hipotezleri kurulur. Birinci veri grubunun aritmetik ortalaması μ_1 , ikinci veri grubunun aritmetik ortalaması μ_2 ise sıfır hipotezi (H_0) ve alternatif hipotez (H_1);

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ veya } \mu_D = \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ veya } \mu_D = \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

olarak modellenir. Bu modelde sıfır hipotezi, her iki veri grubunun yeterince yakın olduğu, alternatif hipotez ise iki veri grubunun farklı kütleler olarak değerlendirileceği anlamını taşır (Önder, 2001).

Çiftli t- testi ile yapılan analiz sonucunda ortalama deneysel ve modelleme hava hızı değerleri için $p=0.152>0.05$ olduğu için, H_1 hipotezi kabul edilir. Yani; benzetim değerlerinin ölçüm değerlerine yeterince yakın olduğu söylenebilir. Ortalama deneysel ve modelleme metan konsantrasyon değerleri için $p=0.000$ bulunmuştur. Bu değer istatistiksel olarak anlamsız kabul edilir. Bunun nedeni; metan değerlerinin belli bir mesafeden sonra bacanın her yerinde sabit olmasından kaynaklanmaktadır.

6.4. Doğrusal Regresyon Analizi ile Sonuçların Değerlendirilmesi

Deneysel ve modellenen hava hızı ve metan ölçümleri değişkenleri arasında oluşan basit ilişkinin bir doğru ile açıklanması için “basit doğrusal regresyon modeli”, ölçüm alınan kesitin her noktasında (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) yapılmıştır. İki değişken arasındaki doğrusal regresyon denkleminin deneysel değerleri ne derece açıkladığını belirlemek amacı ile “korelasyon katsayısı (r)” kullanılır. Korelasyon katsayısı (r) -1 ve +1 arasında değerler almaktadır. Eğer;

- a) $r = -1$ ise, tam negatif doğrusal bir ilişki vardır.
- b) $r = +1$ ise, tam pozitif doğrusal bir ilişki vardır.
- c) $r = 0$ ise, iki değişken arasında ilişki yoktur.

Korelasyon katsayısının yorumu beş farklı gruba ayrılır
(<http://slideplayer.biz.tr/slide/2476009/>):

r	<u>İlişki</u>
0,00-0,25	Çok zayıf
0,26-0,49	Zayıf
0,50-0,69	Orta
0,70-0,89	Yüksek
0,90-1,00	Çok yüksek

Belirlilik katsayısının (R^2) 0,5 olması regresyon denkleminin gözlenen değerlerin % 50' sine uyduğunu, R^2 değeri 1'e yaklaştıkça belirlilik arttığını ve ilişkinin güçlendiğini, 0' a yaklaştıkça ise belirsizliğin arttığını ve değişkenlerarası ilişkinin zayıfladığını göstermektedir (Konuk ve Önder, 1999). Her noktanın belirlilik katsayısı (R^2) değerleri çizelge 6.11' de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Ortalama deneysel ve modelleme değerlerinin belirlilik katsayıları.

Nokta	Belirlilik katsayısı (R^2)	
	Ortalama hava hızı değeri (m/s)	Ortalama metan konsantrasyon değeri (%)
1	80.4	79.3
2	77.6	92.0
3	86.7	78.9
4	78.9	77.9
5	82.6	87.4

Çizelge 6.11' e göre, ortalama deneysel ve modelleme hava hızı ve metan konsantrasyon değerlerinin belirlilik katsayıları 1' e yakın olduğu için, deneysel ve modelleme değerleri arasında çok yüksek bir ilişki bulunmuştur.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Metan gazı, Dünya’da ve Türkiye’ deki yeraltı kömür ocaklarında dikkatle izlenmesi gereken önemli tehlikelerden birisidir. Türkiye Cumhuriyeti tarihinin en büyük kazalarından olan ve TTK Kozlu müessesinde 1992 yılında meydana gelen grizu infilakında 263 çalışan hayatını kaybetmiştir. Ayrıca, bu büyük kazanın dışında çeşitli işletmelerde birçok grizu kaynaklı kazalar meydana gelmiştir. Meydana gelen bu kazaların en önemli ortak özelliklerinden birisinin havalandırma havasının metanı sürükleme kabiliyetindeki yetersizlik olduğu yapılan değerlendirmelerden anlaşılmaktadır.

Metan gazı kaynaklı kazaları önleyebilmek için, mevzuatımızda da belirtildiği gibi, ocak içindeki birçok istasyon noktasından sürekli ölçüm almak ve bu ölçüm sonuçlarına göre hareket etmek gerekmektedir. Merkezi gaz izleme istasyonları, yeraltında belirli noktadaki gaz değerlerini düzenli olarak ölçerek yerüstündeki izleme merkezine aktarmaktadır. Gaz izleme istasyonlarının dışında mobil çoklu gaz ölçüm aletleri ile de istenilen noktalarda ölçüm alınabilmektedir. Ancak, yapılan tüm bu ölçümlere rağmen ocak içinde ölçüm alınamayan noktaların da var olduğu ve buralarda olabilecek metan birikimlerinin de ciddi bir tehlike olduğu kesindir. Bu nedenlerle, dünyada yaygın olarak kullanılan ve ülkemizde de kullanılmaya başlanmış bulunan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) metodu kullanılarak, metan ve hava hızının yeraltındaki değişimleri modellenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada kullanılacak veri setini oluşturmak için TTK Kozlu yeraltı kömür ocağının -560 m seviyesindeki Milopera damarı seçilmiştir. Bu damarın seçilmesinin nedeni, ortalama açığa çıkan metan gazı miktarının $18,76 \text{ m}^3/\text{t}$ ile oldukça yüksek bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ölçümler tali olarak havalandırılan bir hazırlık bacasından alınmıştır.

Havalandırma benzetim programlarında (VNETPC) hava hızı modellemesi yapılabilirken, metan gazı konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, özellikle gaz gibi bazı kirleticilerin modellenmesi için CFD metodu ile çalışan bilgisayar yazılımlarının kullanılması faydalı olacaktır. Kozlu kömür

ocağında bir tali galeriden alınan metan konsantrasyon değerleri (%) ve hava hız değerleri (m/s), öncelikle FLUENT programında 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Hava yüksek bir hızla vantüb çıkışından kömür arınına hareket ederek, türbülanslı bir davranış göstermiştir. Modelleme sonuçlarına göre hava hız davranışı, vantüb çıkışında maksimum değerde ve tavanda yüksek olup, vantübün altında azalmaktadır. Metan gazı galeri tavanı ve kömür arını yakınında yüksek olup, tabanda azalmıştır.

FLUENT programı ile analizden sonra, Ansys® 12.00 programı ile 3 boyutlu modelleme yapmak için, galerinin kömür arınından 5 farklı uzaklıkta ve her bir kesitte 5 farklı noktadan hava hızı ve metan konsantrasyon değerleri ölçülmüştür. Çalışmanın bu aşamadan sonraki amacı ise CFD tabanında çalışan Ansys® 12.00 programı kullanılarak bir yeraltı galerisinde metan ve hava hızı değerlerinin benzetimini yapmaktır. Benzetimin başarılı olabilmesindeki ana kriter, ölçülen ve modellenen metan ve hava hızı değerlerinin istatistiksel olarak birbirine yakın olmasıdır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda CFD ile başarılı bir modelleme yapabilmek için aşağıda verilen hususların dikkate alınması gerekmektedir;

1. Geometri doğru çizilmeli ve mesh sayısının yaklaşık 700.000-800.000 arasında (orta sayıda) olması daha kısa sürede güvenilir sonuçlar alınmasında önem arz etmektedir. Mesh sayısının az olması modelin hassasiyetini azaltırken, mesh sayısının fazla olması da, çok uzun sürede sonuç alınmasına neden olmaktadır.
2. Ansys® 12.00 programında var olan türbülans modelleri tek tek incelendiğinde (Spalart-almaras, k-epsilon ve k-omega) ve elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, k-epsilon türbülans modelinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği bulunmuştur.
3. Hava içerisindeki metanın modellenmesini göstermek için yerçekimi ivmesi 9,81 m/s² olarak aktif halde gösterilmelidir.
4. Kütle korunumu, momentum korunumu, enerji korunumu ve türlerin korunumu gibi türbülans denklemlerindeki parametreler değiştirilmemelidir.

5. Modelleme çalışmasının yapıldığı ortam malzemesi doğru girilmelidir. Bu çalışmada ortam kömür olduğundan karbon malzemesi seçilmiştir.
6. Sınır koşulları (modellemenin girdi ve çıktı değerleri) doğru girilmelidir. Bu çalışmada girdi değerleri hava hızı ve metan kütle akış değeri, çıktı olarak çıkış yüzeyi alınmıştır.
7. Programın iteratif işlemleri sonucunda girdi ve çıktı değerleri arasında 10^{-3} ' lük bir hassasiyet daha kısa sürede güvenilir sonuç vermektedir. 10^{-4} ' lük hassasiyet istendiğinde süre oldukça uzamaktadır. 10^{-3} ' lük hassasiyette yapılan benzetim çalışmasında, giren ve çıkan kütle akış debisi arasındaki "net fark" 0,000983797 kg/sn bulunmuştur. Bu değer sifira yakın bir değer olduğu için, modelin doğru olduğu hakkında bize bilgi vermektedir.

Yapılan modelleme çalışmasının sonuçlara göre, arından 6 m uzaklıkta hava hız değerleri, tavanda ve vantüb çevresinde fazla miktarda iken, bacanın taban kesitinde daha az değerdedir. Arından uzaklaştıkça, vantüp çevresinde hava hız değerlerinde belirgin bir azalma görülmektedir. Arından özellikle 40 m ve 60 m uzaklıktaki kesitlerde hava hız değerleri izometrik bir dağılım göstermektedir. Yani vantübün çevresinde daha düşük bir hava hızı olurken, baca kesitinin sınırlarında daha hızlı hava olmaktadır. Özellikle 110 m' de hava hızında oldukça düşüş gözlenmektedir.

Metan konsantrasyonu arın önünde ve galerinin tavanında yüksek değerlere sahiptir. Modelleme sonucunda, arından 60 m uzaklıkta sabit bir değere ulaşarak, galerinin her yerine eşit dağılım göstermektedir. Bu durum, hava hızının düşük kalmasından dolayı olduğu söylenebilir. Bu nedenle, özellikle arından 40 m mesafede tali bir vantilatör daha kullanılması metanın seyreltilmesine ve metan tabakalaşmasının önlenmesine faydalı olacağı söylenebilir.

Modelleme çalışmasından elde edilen önemli bir sonuçta, özellikle arına yakın mesafelerde galeri duvarlarında hava hızının az, metan konsantrasyonunun da yüksek olduğunun tespit edilmesidir. Tali havalandırma ile açılan kör bacalarda yürüme alanı olarak da adlandırılan vantüpsüz kesitin tavan kısmında metan konsantrasyonu yüksek değerlerde bulunmuştur. Bu noktalarda ölçüm alınmamasına rağmen metan ve hava hız

değerleri tahmin edilmiştir. Dolayısıyla, metan özellikle yürüme alanlarının tavan kısımlarında dikkatle ölçülmelidir.

Hava hızı modelleme değerlerinin ölçüm değerleri ile grafiksel kıyaslaması yapıldığında, nokta 1 ve 2 ' nin deneysel ve modelleme hava hız değerleri birbiri ile paralellik gösterirken, nokta 3, 4 ve 5'te (arından 6 m uzakta) turbülansın etkisi ile farklılık göstermektedir. Ancak, bu noktadan sonra galeri boyunca tüm ölçüm ve modelleme sonuçları benzer olarak bulunmuştur.

Beş nokta için metan konsantrasyon değerleri, arından 6 m' de turbülansın etkisi ile birbirinden uzak değerler olsa da, arından 25 m' den 40 m' ye kadar azalan bir eğim gösterdikten sonra, 40 m' den itibaren sabit bir değere ulaşarak modellemeye paralel gitmektedir. Arından 40 m' den itibaren 110 m' ye kadar bacanın her yerinde metan değeri sabit bir değerde (modelleme değeri % 0.42) gitmektedir.

Hava hız ve metan modelleme ve deneysel değerlerinin normal dağılıma uygun olduğunu öğrenmek için, MINITAB-17 programı ile Anderson-Darling yöntemine göre normal dağılıma bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hava hız ve metan modelleme ve deneysel değerlerinin normal dağılıma uyduğu bulunmuştur. Normal dağılıma uyan modelleme ve deneysel değerler arasında anlamlı bir ilişki olup, olmadığını görmek amacı ile ANOVA testi ile Varyans analizi yapılmıştır. % 95 güven seviyesinde yapılan analizler sonucunda, hava hızı ve metan konsantrasyonlarının modelleme ve deneysel değerlerinin hepsi için anlamlı bir ilişki belirlenmiştir. Deneysel ve modelleme değerlerinin belirlilik katsayıları da belirlenmiş olup, hava hızı değerleri için belirlilik katsayıları 77.6-86.7 arasında, metan konsantrasyon değerleri için de 77.9-92.0 aralığında bulunmuştur. Dolayısıyla, ölçülen ve modellenen değerlerin istatistiksel olarak birbirine yeterince yakın olduğu söylenebilir.

Türkiye' de metan drenaj çalışmalarına ağırlık verilerek metanı kaynağında azaltmak daha etkin bir çözüm yolu olarak ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır. Ancak, drenaj çalışmalarının yetersizliğinden dolayı modelleme çalışmaları önem kazanmaktadır. Bu çalışmayla, dünyada birçok sektörde yaygın olarak kullanılan CFD metodunun, metan kaynaklı kazalarının önlenmesi için madencilik sektöründe de kullanılabileceği

kanıtlanmıştır. CFD gibi gelişmiş modelleme tahminleri yapılarak, uygun havalandırma performansı sağlanmalıdır. Böylece metan patlama riski en aza indirilmiş olacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akçın, N. A., Özkan, T., 1999, Yüksek basınçlı hava ile kömür kazısı, I. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, İzmir, 467-484.
- Alptekin H.Ö., 2009, TTK Amasra sahası metan gazı içeriğinin incelenmesi ve Türkiye kömür yatağı metanı potansiyeli, Master tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 79 s.
- Altaç Z., 2005, Gambit ve Fluent Örneklerle Modelleme, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Makine Müh. Bölümü, Mart, 286 s.
- Anderson, J. D., 1995, Computational fluid dynamics :the basics with applications, McGraw-hill Inc., 547 p.
- Aminossadati, S.M., Hooman, K., 2008, Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings, 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, 253-259.
- Ardejani F. D., Baafi E., Panahi K. S., Singh R. N., Shokri B. J., 2011. Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Simulation of Acid Mine Drainage Generation and Subsequent Pollutants Transportation through Groundwater Flow Systems and Rivers. Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications, Edited Igor V. Minin, ISBN 978-953-307-169-5, Hard cover, 396 pages, Publisher: InTech, Chapters published July 05, pp. 123-160.
- Arslanhan, S., Cünedioğlu, H.E., 2010, An evaluation of experienced occupational accidents in mines and its consequences, Turkey Economy Politics Research Foundation (TEPAV).
- Ataman, T., 1984, Firedamp and explosions of the coal dust in the world mining history, Turkey Coal Congress, 387-399.
- Aybers, N., 1969, Mühendislik termodinamiğinin esasları, İTÜ Teknik okulu yayınları, sayı: 66, İstanbul, 360 s.
- Biçer, N., 2008, Modular coal processing plants applied to Zonguldak Hardcoal, Slayt, 31.
- Branny, M., 2007, Computer simulating of flow of air and methane mixture in the longwall-return crossing zone, E-journal of Mining Engineering, 1-10.
- Candra, K.J., Pulung, S.A., Sadashiv, M.A., 2014, Dust dispersion and management in underground mining faces, International Journal of Mining Science and Technology, 24, 39-44.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cheng, J., Li, S., Zhang, F., Zhao, C., Yang, S., Ghosh, A., 2016, CFD modelling of ventilation optimization for improving mine safety in longwall working faces, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 285-297.
- Coleman, P.J., Brune, J.F. and Martini, L., 2010, Characteristics of the top five most frequent injuries in United States mining operations, 2003-2007 Transactions, *Society for Mining, Metallurgy and Exploration* 2010; 326, 61-70.
- Çetinkaya, S., 2014, Termodinamik, Nobel yayıncılık, No: 25, Eylül, Ankara, 345 s.
- Değirmenci, H., Zırtıoğlu, M., 1984. The methane drainage and its application in Kozlu Region, 4th Coal congress, 333-343.
- Deng J., Cheng F., Song Y., Luo Z., Zhang Y., 2015, Experimental and simulation studies on the influence of carbon monoxide on explosion characteristics of methane, 36, 45-53.
- Diego, I., Torno, S., Torano, J., Menendez, M., Gent, M., 2011, A practical use of CFD for ventilation of underground works, *Tunneling and Underground Space Technology*, 25, 189-200.
- Duygu, A., 2014, Bulaşık makinesi tasarımı ve CFD analizi, Bitirme ödevi, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 49 s.
- Edwards J.S., Ren T.X., Jozefowicz R., 1995. Using CFD to solve mine safety and health problems, *APCOM XXV Conference*, Brisbane, July 9-14, 41-47 p.
- Filinte, E. G., 2006, Konveksiyon-difüzyon problemlerinin sonlu hacim yöntemi ile analizi, yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 112 s.
- Gadde, M. M., Beerbower D. A., Rusnak J. A., 2008. Comments on the U.S. Army Corps of Engineers Report, "CFD Study and Structural Analysis of the Sago Mine Accident", Received OSRM/MSHA, January 18, 31 p.
- Gheshlaghi M. E., Goharrizi A. S., Shahrivar A. A., 2013, Modeling industrial thickener using computational fluid Dynamics (CFD), a case study: Tailing thickener in the Sarcheshmeh copper mine, 23, 885-892.
- Grau R.H., LaScola J. C., 1984, Methane emissions from US Coal mines in 1980, Bureau of Mines Information Circular (8987).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Guannan, L., Feng, G., Xing-guang, J.M.L., 2009, Investigation of the ventilation simulation model in mine based on multiphase flow, *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 491-496.
- Gürses, F., 1943, Coal in Turkey, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Technical Publication, No.1602, 10.
- Gürü, M., Yalçın, H., 2012, Mühendislik termodinamiği, Palme yayınları, Ankara, 698 s.
- Günay, A., 2010, Akışkanlar mekaniğinin temel model problemlerinin sonlu fark çözümleri, Master tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 130 s.
- Güney M., 1971. The methane, the methane drainage and its application conditions in Zonguldak coal mines, 2th congress book, February, 222- 235 p.
- Güney, M., 1976, Firedamp emission and methane content of coal measures, AIME, 115-122.
- Güyagüler, T., 2002, Türkiye’ de meydana gelen grizu patlamalarının irdelenmesi ve önlem önerileri, Türkiye 13. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 45-51.
- Hargreaves, D.M., Lowndes, I.S., 2007, The computational modelling of the ventilation flows within a rapid development drivage. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 150-160.
- Hwang, C.C., Edwards, J.S., 2005, The critical ventilation velocity in tunnel fires-a computer simulation, *Fire Safety Journal*, 40, 3, 213-244.
- <http://slideplayer.biz.tr/slide/2476009/>, Kemal Doymuş, korelasyon analizi, 24 s.
- <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/data-concepts/anderson-darling/>.
- http://web.deu.edu.tr/maden/docs/komur_hazirlama_teknolojisi/8.hafta_koklasma_1_lisans_sunum.pdf
- <https://www.inonu.edu.tr/.../Bilg%20Uyg%20Ders%20...>, sonlu elemanlar (finite elements) yöntemi, 28 s.
- http://www.vedattaskin.com/fileupload/.../ansys_not.pdf, sonle eleman analizleri, 163 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karacan, C.Ö., Goodman, G.V.R., 2008, Coal bed discontinuity effects on the production of degasification boreholes and on emissions during longwall mining, SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting.
- Karacan, C.Ö., 2009, Degasification system selection for U.S. longwall mines using an expert classification system, *Computers and Geosciences*, 35, 515.
- Karacan, C.Ö., 2009, Reservoir engineering considerations for coal seam degasification and methane control in underground coal mines.
- Karkınlı, A.E., Kurban, T., Kesikoğlu, A., Beşdok, E., 2011, CFD based risk simulations and management on CBS, Congress of Geographic Information Systems.
- Kenny, L.B.C, Sasmito, A.P., Birgersson, E., Mujumdar, A.S., 2012, Coal mine design and modeling: a study of flow patterns in different mining configurations of a horseshoe mine tunnel, M3TC Technical Report, 95.
- Kissell, F.N., Nagel A.E., Zabetakis, M.G., 1973, Coal mine explosion: seasonal trends, *Science*, 179, 891-892.
- Kissell, F.N., Banfield J.L., Dalzell R.W., Zabetakis, M.G., 1974, Peak methane concentrations during coal mining, Bureau of Mines Report of Investigation (7885).
- Kissell, F. N., 2006, Handbook for methane control in mining, NIOSH: IC 9486, 150 p.
- Konuk, A., Önder, S., 1999, Maden İstatistiği, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 155 s.
- Krog, R.B., Schatzel, S.J., Garcia, F., Marshall, J.K., 2006, Predicting methane emissions from longer longwall faces by analysis of emission contributors. 11th U.S./North American Mine Ventilation Symp.
- Maciewski, W., 1984, The methane drainage station, 4th Coal Congress, 11, 345-356.
- Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., Mujumdar, A. S., 2014, CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 3467-3484.
- Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., Mujumdar, A. S., 2014, Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines, *International journal of mining science and technology*, 42, 206-215.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lihong, Z., Christopher, P., Yi, Z., 2015, CFD modeling of methane distribution at a continuous miner face with various curtain setback distances, *International Journal of Mining Science and Technology*, 25, 635-640.
- Luo, Y., Zhao, Y., Wang, Y., Chi, M., Tang, H., Wang, S., 2015, distributions of airflow in four rectangular section roadways with different supporting methods in underground coal mines, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 46, 85-93.
- McPherson, M. J., 2008, *Subsurface ventilation engineering*, Virginia Polytechnic Institute and State University, (www.mvsengineering.com).
- Ndenguma, D.D., 2010, *Computational fluid dynamics model for controlling dust and methane in underground coalmines*, M.S. thesis, Univesity of Pretoria, 212 p.
- Oraee, K., Goodarzi, A., 2010, *Mathematical modeling of coal seam methane drainage in longwall mining*, In: 100 Years Of Mining Research Symposium.
- Önder, M., 2001, *Yeraltı ocaklarındaki iklim koşullarının benzetimi*, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği, 208 s.
- Özdemir, N. Ö., 2009, *Sonlu elemanlar yöntemi ile yorulma mekaniği ve uygulamaları*, KaradenizTeknik Üniversitesi Makine Mühendisliği, Bitirme çalışması, Haziran, 55 s.
- Öztürk, M., 2014, *Taşköürü havzası dammar gazıçeriklerini tespit çalışmaları*, TTK iş sağlığı güv. ve eğitim daire bşk., No:71, 75 s.
- Parra, M.T., Villafruela, J.M., Castro, F., Mendez, C., 2006, *Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines*, *Building and Environment*, 41, 87-93.
- Pençe, E., 2007, *Eğitim amaçlı ANSYS paket programının tanıtılması*, ANSYS öğretimi ve uygulama örnekleri, Zonguldak Karaelmas Üniveritesi Makine Eğitim Bölümü, Bitirme tezi, 63 s.
- Ren, T.X., Balusu, R., 2005, *CFD Modeling of goaf gas migration to improve the control of spontaneous combustion in long walls*, *Underground Coal Operators' Conference*, 258-264.
- Ren, T.X., Balusu, R., 2008, *Innovative CFD modelling link to improve dust control in longwalls*, 8th *Underground Coal Operators' Conference*, 137-147 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ren, T.X., Balusu, R., 2010, The use of CFD modeling as a tool for solving mining health and safety problems, In Aziz, N (ed), 10th Coal Operators' Conference, 339-349.
- Ren, T., Wang, Z., Cooper, G., 2014, CFD modeling of ventilation and dust flow behavior above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system, Tunneling and Underground Space Technology, 41, 241-254.
- Resmi Gazete, 2013, Maden iş yerlerinde iş sağlığı ve güvenliği yönetmenliği, Sayı: 28770.
- Richmond, J.K., Price, G.C., Sapko, M.J., Kawenski, E.M., 1983, Historical summary of coal mine explosions in the United States, 1959-1981, Bureau of Mines Information Circular (IC-8909), 53.
- Sasmito, A. P., Birgersson, E., Ly, H. C., Mujumdar, A. S., 2013, Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment-A computational fluid dynamic study, Tunneling and Underground Space Technology, 34, 82-95.
- Sınayuç, Ç., 2007, Modelling of enhanced coalbed methane recovery from Amasra coalbed in Zonguldak coal basin, M.S. thesis, Middle East Technical University, 383 p.
- Siddique, H., Tuck, M., Naser, J., 2005, A three-dimensional simulation of mine ventilation using computational fluid dynamics, 8th International Mine Ventilation Congress, 489-491.
- Smith, A.C., Yuan, L., 2008, Simulation of spontaneous heating in longwall gob area with a bleederless ventilation system, SME Annual Meeting, 6.
- Soğukoğlu, M., 2007, Akışkanlar mekaniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 329 s.
- Stephens, M., 2011, Laboratory and numerical modelling used to characterize leakage in underground coal mines, M.S. thesis, The University of Utah, 100 p.
- Stovern M., Felix O., Csavina J., Rine K. P., Russell M. R., Jones R. M., King M., Betterton E. A., Saez A. E., 2014, simulation of windblown dust transport from a mine tailings impoundment using a computational fluid dynamics model, 14, 75-83.
- Taylor, C.D., Chilton, J.E., Hall, E., Timko, R.J., 2006, Effect of scrubber operation on airflow and methane patterns at the mining face, 11th US/NA Mine Vent Symp, University Park PA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Taylor, C.D., Karacan, C.Ö., 2010, Historical development of technologies for controlling methane in underground coal mines, *Extracting the Science: a century of mining research*, SME,(ed.) Jurgen Brune, 478-487.
- Taylor, C.D., Timko, R.J., Senk, M.J., Lusin, A., 2003, Measurement of airflow in a simulated underground mine environment using an ultrasonic anemometer, *SME Annual Meeting*.
- TMMOB, Madencilikte yaşanan iş kazaları raporu, Haziran, 2010.
- Torano, J., Rodriguez, R., Diego, I., 2006, Computational fluid dynamics use in the simulation of the death end ventilation in tunnels and galleries, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 52, 113-121.
- Torano, J., Torno, S., Menendez, M., Gent, M., Velasco, J., 2009, Models of methane behavior in auxiliary ventilation of underground coal mining, *International Journal of Coal Geology*, 80, 35-43.
- Torano, J., Torno, S., Menendez, M., Gent, M., 2011, Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: validated CFD modeling of dust behavior, *Tunneling and Underground Space Technology*, 26, 201-210.
- Torno, S., Torano, J., Ulecia, M., Allende, C., 2013, Conventional and numerical models of blasting gas behavior in auxiliary ventilation of mining headings, *Tunneling and Underground Space Technology*, 34, 73-81.
- Trevits M. A., Smith A. C., Brune J. F., 2010. Remote mine fire suppression technology, *Proceedings of the 32nd International Conference of Safety in Mines Research Institutes*, 28-29 September 2007, Beijing, China. Beijing, China.
- TTK Faaliyet Raporu, 2001, Zonguldak Taşkömürü Havzası Jeolojisi ve Rezervleri, 24 s.
- TTK Faaliyet Raporu, 2009, TTK Faaliyetleri 2003-2009, No: 65, 75 s.
- Umur, H., 2001, Akışkanlar mekaniği, Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü no:59, Bursa, 482 s.
- Wala, A.M., Kim B.J., 1985, Simulation of unsteady-state of airflow and methane concentration processes in mine ventilation systems caused by disturbances in main fan operation, In P. Mopusset-Jones (ed.) *Proc. Of The Second US Mine Ventilation Symposium*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wala, A.M., Yingling, J.C., Zhang, J., 1998, Evaluation of the face ventilation systems for extended cuts with remotely operated mining machines using three-dimensional numerical simulations, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. (SME) Annual Meeting.
- Wala, A.M., Vyila, S., Taylor, C.D., Huang, G., 2007, Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation, *Mining Engineering*, 59, 10, 49-55.
- web.deu.edu.tr>atiksu>ana58>boru, Borulama ve hidrolik hesaplar, 52-69 s.
- Xu, G., Luxbacher, K.D., Ragab, S.A., Schafric, S., 2013, Development of a remote analysis method for underground ventilation systems using tracer gas and CFD in a simplified laboratory apparatus, *Tunnelling and Underground space Technology*, 33, 1-11.
- Xu, G., Jong, E.C., Luxbacher, K.D., Ragab, S.A., Karmis, M.E., 2015, Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine, *Safety Science*, 74, 140-149.
- Xu, G., Jong, E.C., Luxbacher, K.D., McNair, H.M., 2016, Effective utilization of tracer gas in characterization of underground mine ventilation Networks, *Process safety and environmental Protection*, 99, 1-10.
- Vella, A., 2006, Ventilation of highwall mining to control methane concentration at the Moura Mine, M.S. thesis, The University of Southern Queensland, 84 p.
- Vlasin, N.I., Lupu, C., Şuvar, M., Pasculescu, V.M., Arad, S., 2013; Computerised modelling of methane releases exhaust from a retreating logwall face, In: 4th European Conference on Recent Advances in Civil and Mining Engineering (ECCIE'13), 274-277.
- Yalçın, E., Durucan, Ş., 1984, The methane contents of Zonguldak coals, 4th Coal Congress, 319-331.
- Yalçın, E. 2012, Yeraltı havalandırması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No: 336, İzmir, 402 s.
- Yuan, L., Smith, A.C., Brune, J.F., 2006, Computational fluid dynamics study on the ventilation flow paths in longwall gobs, In *Proceedings of the 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*.
- Yuan, L., Smith, A.C., 2008, Effects of ventilation and gob characteristics on spontaneous heating in longwall gob areas, 12th US/NA Mine Vent Symp, 141-147 p.

ÖZGEÇMİŞ

Gölnaz Daloğlu, 1984 yılında Ankara’ da doğmuştur. Babasının işi dolayısıyla, doğumundan itibaren sırayla Malatya (4 yıl), İstanbul (3 yıl), Sivas (3 yıl), Ankara (6 yıl) ve Eskişehir (içinde olduğu 13. yıl)’ de bulunmuştur. İlkokula Sivas’ da Kadı Burhaneddin İlkokulu’nda başlayıp, daha sonra ilk ve ortaokul öğretimine Ankara’ da Ulubatlı Hasan İlköğretim okulunda devam etmiştir. Liseyi Ankara- Cumhuriyet Lisesi’nde başlayıp, lise sonu Eskişehir-Cumhuriyet Lisesi’nde bitirmiştir. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden mühendisliği bölümünü birincilikle bitirerek, aynı zamanda çift anadal programı ile makine mühendisliğini de tamamlamıştır. Ardından “Eskişehir-Derbent tüflerinin doğal yapı taşı olarak değerlendirilebilirliği” adlı yüksek lisans tezini aynı üniversitede bitirmiş ve “Yeraltı maden işletmelerindeki hava hızı ve metan davranışının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile modellenmesi” isimli doktorasını tamamlamıştır. Master çalışmaları sırasında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi’ nde araştırma görevlisi olmuştur. Doktora çalışmaları sırasında 2012-2013 yıllarında, TÜBİTAK yurt dışı burs programı kazanarak, 1 sene boyunca Colorado School of Mines (USA)’ da çalışmalarını tamamlamıştır. Halen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi’ nde araştırma görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.