

**YERALTI RAYLI TAŞIMA SİSTEMİ İSTASYONU
İÇİN YANGIN MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU**

Muhammed İlder BERBEROĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2008

ANKARA

Muhammed İlder BERBEROĞLU tarafından hazırlanan ‘YERALTI RAYLI TAŞIMA SİSTEMİ İSTASYONU İÇİN YANGIN MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU’ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nuri YÜCEL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nuri YÜCEL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, TOBB Üniversitesi

Tarih: 22/04/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Muhammed İter BERBEROĞLU

YERALTI RAYLI TAŞIMA SİSTEMİ İSTASYONU İÇİN YANGIN MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

M. İlter BERBEROĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2008

ÖZET

Bu çalışmada bir “Ankaray yeraltı raylı taşıma istasyonu” örnek alınarak kapalı bir hacimde akış ve yanma incelenmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında ticari bir HAD programının performans analizini yapabilmek amacıyla, küçük ölçekli ateşe dayanıklı bir yarım istasyon modeli imal edilmiştir. İmal edilen modelin simetri eksenine ısıya dayanıklı camla örtülmüş, böylece model içinde oluşturulan yangını izleme ve dijital video ve fotoğraf makinası ile kaydetme imkanı elde edilmiştir. Bu deneylerde hava akımı olmayan durumlar, 1m/s ve 3m/s sabit hava akımı giriş şartı olan durumlar için yanma incelenmiştir. Bu deneylerde çeşitli yerlerden hız ve sıcaklık ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile bir veritabanı oluşturulmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında ise deneylerin yapıldığı küçük ölçekli model bilgisayar ortamına aktarılmış ve ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı kullanılarak deneylerin sayısal simülasyonları gerçekleştirilmiştir. HAD ile simülasyonlara başlamadan önce teorik bir araştırma ile hangi modellerin kapalı bir ortamdaki yanmayı modellemede kullanılamayacağı belirlenmiş ve simülasyonlar önceden belirlenen bu modeller kullanılarak yapılmıştır. Türbülans modellerindeki

sayıca fazlalık nedeniyle bu modellerin performansları önce zamandan bağımsız çözümlerde denenmiş, zamana bağlı çözümler için en uygun türbülans modeli belirlenmiştir. HAD ile elde edilen simülasyon sonuçları, deney sonuçlarından elde edilen veritabanı ile karşılaştırılmış ve metro istasyonu yangını gibi kapalı bir ortamdaki yanmayı en iyi temsil edebilecek sayısal çözüm parametreleri seçilmeye çalışılmıştır. Çalışmalar sonunda, sayısal simülasyonlardan elde edilen akış karakteristiklerinin deneysel verilerle örtüştüğü ve sayısal modelin akımı iyi temsil ettiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.002

Anahtar Kelimeler : Yanma, metro istasyonu, kapalı hacimde yangın, sayısal akış modellemesi

Sayfa Adedi : 175

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Nuri Yücel

FIRE MODELLING AND SIMULATION FOR SUBWAY STATIONS
(M.Sc. Thesis)

M. İlter BERBEROĞLU

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

April 2008

ABSTRACT

In this project, flow characterization, fire and burning processes in closed volumes like “subway stations”, are inspected. In the first stage, a small scaled heat resistant subway station model is made to analyze the accuracy of a CFD software. The model produced as a half model due to symmetry and the symmetry axis is closed by a heat resistant glass which allows seeing inside of the model. the experiments are recorded from heat resistant glass window via digital recording devices. The experiments include flow visualization with smoke generator, no ventilation fire case, simulation of fire under piston effect cases. Fire experiment performed in small scaled model with zero piston effect and uniform inlet velocities, results obtained from experiments recorded to a database. In the second stage, digital model of the small scaled experimental model is generated and numerical simulations of the experiments repeated by using a commercial CFD software. There are lots of algorithms for both simulation of turbulence and burning process so it is needed to determine most suitable models. Due to high number of turbulence and combustion models, the combinations of the simulations will be excessive. For this reason, before starting CFD simulations, the theoretical research is performed in order to eliminate the models wich can not represent the simulation in the closed volumes. The results of CFD simulations also compared with the database

which is obtained by experimental data and the most suitable parameters for simulating fire under flow is obtained. The comparison of the simulation results and experimental data shows that the numerical simulation has obtained the flow characteristic well enough and also the velocities calculated are also highly accurate.

Science Code : 914.1.002
Key Words : Fire, subway station, fire in enclosure volume, flow simulation
Page Numbers : 175
Adviser : Prof. Dr. Nuri Yücel

TEŞEKKÜR

Tüm çalışmalar boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyip her ortamda ve şartta engin bilgisi ve tecrübesi ile bana yol gösteren sayın hocam Prof.Dr Nuri YÜCEL'e sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım. Tüm çalışmalar boyunca bilgisini ve manevi desteğini hissettiğim sayın Prof.Dr. Haşmet TÜRKÖĞLU'na, sayısal simülasyonlar konusunda engin tecrübe ve deneyimleri ile beni bilgilendirmekle kalmayıp tüm olanaklarını benimle paylaşan sayın Prof.Dr. Nevzat ONUR'a, yapılan deneyler sırasında desteklerini eksik etmeyen sayın Yr.Doç.Dr Turgut OĞUZ'a, bu çalışmada deneyimleri ile bana yardımcı olan araştırma görevlileri Dr. Fevzi KÖSEOĞLU, Kamil ARSLAN, Tolga DEMİRCAN, Zeki YILMAZOĞU, Özen KURTUL ve Nureddin DİNLER'e katkılarından dolayı teşekkür ederim. Yapılan çalışmalara büyük yardımı ve katkısı olan çalışma arkadaşım araştırma görevlisi sayın Salih KARAASLAN'a da ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma 106M370 kodlu "Yeraltı Raylı Taşıma Sistemi İstasyonu İçin Yangın Modellemesi ve Simülasyonu" isimli proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxv
1. GİRİŞ	1
2. KAPALI BİR HACİMDE AKIŞ VE YANMANIN İNCELENMESİ	15
3. İSTASYON MODELİNDE AKIŞ VE YANMA DENEYLERİ	17
3.1. Ankaray Yeraltı Taşıma Sistemi	17
3.2. Deney Modeli	23
3.3. Deney Seti, Kurulum ve Ölçüm Cihazları	30
3.4. Akış ve Yanma Deneyleri	40
3.4.1. Yakıt deneyleri	43
3.4.2. Akış deneyleri	48
3.4.3. İstasyon içi ölçüm noktaları	49
3.5. İstasyon Modeli İçerisinde İso-Propil Yakıtlı Yanma Deneyleri	51
3.5.1. Piston etkisiz durum için hat girişinde iso-propil alkol yakıtlı yanma	52

Sayfa

3.5.2. Piston etkisiz durum için hat merkezinde iso-propil alkol yakıtlı yanma	55
3.5.3. Piston etkisiz durum için hat çıkışında iso-propil alkol yakıtlı yanma	59
3.5.4. Piston etkisiz durum için istasyon merkezde iso-propil alkol yakıtlı yanma	63
3.5.5. Hat girişinde 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	67
3.5.6. Hat merkezinde 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	72
3.5.7. Hat çıkışında 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	77
3.5.8. İstasyon merkezinde 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	81
3.5.9. Hat giriş konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	87
3.5.10. Hat merkez konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	90
3.5.11. Hat çıkış konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	94
3.5.12. İstasyon merkez konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma	98
3.6. İstasyon Modeli İçerisinde n-Heptan Yakıtlı Yanma Deneyleleri	102
3.6.1. Giriş duvarı konumunda n-heptan yakıtlı yanma	102
3.6.2. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma	107
3.6.3. İstasyon arka duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma	111
3.6.4. İstasyon çıkış duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma	114
3.6.5. Piston etkisi olmayan istasyonda n-heptan yakıtlı yanma gözlemleri	118

Sayfa

3.6.6. Giriş duvarı konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma	120
3.6.7. İstasyon merkez konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma	124
3.6.8. Arka duvar konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma	128
3.6.9. Çıkış duvarı konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma	132
3.7. Yanma Deneyleeri Gözlemleri	137
4. İSTASYON MODELİNDE AKIŞ SİMÜLASYONLARI	140
4.1. İstasyon Modeli İçerisinde Akış Simülasyonu İçin Sayısal Çözüm Formülasyonu Seçimi	141
4.2. Akış Modellemesi ve Matematiksel Altyapı	142
4.3. Türbülanslı Akış Simülasyonu ve Türbülans Modelleri	144
4.4. Duvar Fonksiyonları ve Duvar Kenarı Modellemesi	152
4.5. Model İçerisinde Akış Simülasyonu İçin Türbülans Modeli Araştırması	154
4.6. İstasyon Modeli İçinde Kararsız (Unsteady) Akış Çözümleri	163
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	168
KAYNAKLAR	170
ÖZGEÇMİŞ	174

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Fluent® yazılımında bulunan türbülans modelleri	145

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Metil alkol (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)	44
Şekil 3.2. Etil alkol (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)	44
Şekil 3.3. İsopropil alkol (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)	45
Şekil 3.4. 95 oktan kurşunsuz benzin (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)	45
Şekil 3.5. 10cc mazot, 1cc kurşunsuz benzin (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)	46
Şekil 3.6. n-Heptan (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)	47
Şekil 3.7. İstasyon içerisindeki ölçüm düzlemleri ve noktaları	49
Şekil 3.8. Isıl çiftler (a ölçüm düzlemi konumu – soldan görünüm)	50
Şekil 3.9. Isıl çiftler (a ölçüm düzlemi konumu – sağdan görünüm)	50
Şekil 3.10. Isıl çiftler ve ölçüm düzlemleri (alttan)	50
Şekil 3.11. Isıl çiftler ve ölçüm düzlemleri (üstten)	51
Şekil 3.12. İso-propil alkol yakıtlı hat girişi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	53
Şekil 3.13. İso-propil alkol yakıtlı hat girişi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	54
Şekil 3.14. İso-propil alkol yakıtlı hat girişi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	54
Şekil 3.15. İso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	57
Şekil 3.16. İso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	58
Şekil 3.17. İso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	58
Şekil 3.18. İso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını için a düzleminde sıcaklıklar	61

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. İso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	62
Şekil 3.20. İso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	62
Şekil 3.21. İso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	66
Şekil 3.22. İso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	66
Şekil 3.23. İso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	67
Şekil 3.24. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	70
Şekil 3.25. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	70
Şekil 3.26. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	71
Şekil 3.27. Hat girişi yangını çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)	71
Şekil 3.28. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	74
Şekil 3.29. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	75
Şekil 3.30. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	75
Şekil 3.31. Hat merkezi yangını için çıkış tüneli sıcaklık zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)	77
Şekil 3.32. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	79
Şekil 3.33. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	80

Şekil	Sayfa
Şekil 3.34. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	80
Şekil 3.35. Hat çıkış yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)	81
Şekil 3.36. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	84
Şekil 3.37. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	85
Şekil 3.38. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	85
Şekil 3.39. İstasyon Merkez yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)	86
Şekil 3.40. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için a ölçüm düzleminde sıcaklık histogramı	88
Şekil 3.41. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	88
Şekil 3.42. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	89
Şekil 3.43. Hat girişi yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (3 m/s piston hızı)	89
Şekil 3.44. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	92
Şekil 3.45. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	92
Şekil 3.46. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	93
Şekil 3.47. Hat merkezi yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (3 m/s piston hızı)	93
Şekil 3.48. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	96

Şekil	Sayfa
Şekil 3.49. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	96
Şekil 3.50. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	97
Şekil 3.51. Hat çıkış yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (3 m/s akış hızı)	97
Şekil 3.52. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	100
Şekil 3.53. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	100
Şekil 3.54. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	101
Şekil 3.55. n-Heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için a düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	105
Şekil 3.56. n-Heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için b düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	105
Şekil 3.57. n-Heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için c düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	106
Şekil 3.58. n-Heptan yakıtlı istasyon merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	109
Şekil 3.59. n-Heptan yakıtlı istasyon merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	109
Şekil 3.60. n-Heptan yakıtlı istasyon merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	110
Şekil 3.61. n-Heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	113
Şekil 3.62. n-Heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	113
Şekil 3.63. n-Heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	114

Şekil	Sayfa
Şekil 3.64. n-Heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	117
Şekil 3.65. n-Heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	117
Şekil 3.66. n-Heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	118
Şekil 3.67. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	122
Şekil 3.68. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için b ölçüm düzleminde sıcaklık histogramı	122
Şekil 3.69. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	123
Şekil 3.70. Çıkış duvarı yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s akış hızı)	123
Şekil 3.71. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	127
Şekil 3.72. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	127
Şekil 3.73. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	128
Şekil 3.74. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	130
Şekil 3.75. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	130
Şekil 3.76. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	131
Şekil 3.77. Arka duvar yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s akım hızı)	131
Şekil 3.78. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	135

Şekil	Sayfa
Şekil 3.79. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	135
Şekil 3.80. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi	136
Şekil 3.81. Çıkış duvarı yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s akım hızı)	136
Şekil 4.1. Duvar fonksiyonu yaklaşımı ve duvar kenarı modellemesi yaklaşımı şematik gösterimi	153
Şekil 4.2. Standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli kararlı akış çözümü	155
Şekil 4.3. Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli kararlı akış çözümü	155
Şekil 4.4. RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli kararlı akış çözümü	156
Şekil 4.5. RNG $k - \varepsilon$ differential viscosity model kararlı akış çözümü	156
Şekil 4.6. RNG $k - \varepsilon$ swirl dominated model kararlı akış çözümü	157
Şekil 4.7. RNG $k - \varepsilon$ swirl dominated differential viscosity model çözümü	157
Şekil 4.8. Standart $k - \omega$ türbülans modeli kararlı akış çözümü	158
Şekil 4.9. SST $k - \omega$ türbülans modeli kararlı akış çözümü	159
Şekil 4.10. SST transitional $k - \omega$ türbülans modeli kararlı akış çözümü	159
Şekil 4.11. Low Reynolds-Stress Ω modeli kararlı akış çözümü	160
Şekil 4.12. RSM linear pressure-strain modeli kararlı akış çözümü	161
Şekil 4.13. RSM quadratic pressure-strain modeli kararlı akış çözümü	161
Şekil 4.14. Detached Eddy SST $k - \omega$ modeli kararsız akış çözümü	162
Şekil 4.15. 3D istasyon modeli ve sınır şartları	163
Şekil 4.16. 1 m/s üniform giriş hızı için 1. saniyede durum	164
Şekil 4.17. 1 m/s üniform giriş hızı için 5. saniyede durum	164

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. 1 m/s üniform giriş hızı için 15. saniyede durum	164
Şekil 4.19. 1 m/s üniform giriş hızı için 30. saniyede durum	165
Şekil 4.20. 3 m/s üniform giriş hızı için 0,5. saniyede durum	165
Şekil 4.21. 3 m/s üniform giriş hızı için 1. saniyede durum	166
Şekil 4.22. 3 m/s üniform giriş hızı için 5. saniyede durum	166
Şekil 4.23. 3 m/s üniform giriş hızı için 15. saniyede durum	166
Şekil 4.24. 3 m/s üniform giriş hızı için 30. saniyede durum	167

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Ankaray Maltepe İstasyonu konkurs seviyesi	18
Resim 3.2. Ankaray Maltepe İstasyonu Denizcilik Müsteşarlığı tarafındaki platform merdivenlerinin başından platform üstü görünüş	19
Resim 3.3. Ankaray Maltepe İstasyonu yolcu platformu	20
Resim 3.4. Ankaray Maltepe İstasyonu yolcu platformundan istasyon içi görünüm	20
Resim 3.5. Tren Ankaray Maltepe İstasyonuna giriş yaparken tünel içi görünüm	21
Resim 3.6. İstasyon-tünel birleşme kirişi	22
Resim 3.7. Konkurs seviyesinden Ankaray Maltepe İstasyonunun görünüşü	23
Resim 3.8. İstasyon modeli	24
Resim 3.9. Alüminyum profiller takılı halde tünel elemanı	25
Resim 3.10. Ytong bloklar (beyaz)	26
Resim 3.11. Fiber-reçine kompozit katman	27
Resim 3.12. Fiber-reçine kompozit katman	27
Resim 3.13. İstasyon ana gövde (ters)	28
Resim 3.14. İstasyon ana gövde ve beton tüneller	29
Resim 3.15. Montajlanmış istasyon modeli	30
Resim 3.16. Montajlanmış istasyon modeli	30
Resim 3.17. Elimko kontrol ünitesi, bilgisayar bağlantı ünitesi, yazılım diski ve kablolar	32
Resim 3.18. Isıl çiftler (4 - 9 nolu kanallar)	33
Resim 3.19. Isıl çiftler (1, 2 ve 3 nolu kanallar)	33

Resim	Sayfa
Resim 3.20. Testo multiprob	34
Resim 3.21. Transducer birimleri, Testo multiprob ve pitot tüpleri	34
Resim 3.22. Testo-350XL/454 kontrol ünitesi ve Testo-454 logger	35
Resim 3.23. Sun MGA 1200 gaz analiz cihazı	36
Resim 3.24. Capelec gaz analiz cihazı (ön yüzü)	36
Resim 3.25. Capelec gaz analiz cihazı (arka yüzü)	37
Resim 3.26. Akım düzeltici kutu	37
Resim 3.27. Montajlı deney seti	38
Resim 3.28. Deney seti (çıkış tüneli tarafı)	38
Resim 3.29. Deney seti (giriş tüneli tarafı)	39
Resim 3.30. Deney seti (ölçüm cihazları, duman makinası)	39
Resim 3.31. Katı yakıt ile ventilasyonsuz ve ventilasyonlu durumlar	40
Resim 3.32. Katı yakıt ile ventilasyonsuz durum	41
Resim 3.33. Arttırılmış miktarda katı yakıt ile ventilasyonsuz durum	41
Resim 3.34. Arttırılmış miktarda katı yakıt ile düşük hızlı ventilasyon durumu	41
Resim 3.35. Arttırılmış miktarda katı yakıt ile yüksek hızlı ventilasyon durumu	41
Resim 3.36. Durağan haden yüksek ventilasyona ani geçiş durumu	42
Resim 3.37. Duman makinası ve itici gaz sistemi	48
Resim 3.38. Piston etkisi olmayan durum için hat girişinde iso-propil alkol ile yanma (başlangıç ve harlanma)	52
Resim 3.39. Piston etkisi olmayan durum için hat girişinde iso-propil alkol ile yanma (harlı alev ve durulmaya geçiş)	52
Resim 3.40. İso-propil alkol alevinin istasyon tavanına çarpması	53

Resim	Sayfa
Resim 3.41. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat ortası yangın (ventilasyon yok)	56
Resim 3.42. 10 cc iso-propil alkol – hat merkezi kararlı (steady) yanma	57
Resim 3.43. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangın (ventilasyon yok)	60
Resim 3.44. 10 cc iso-propil alkol – hat çıkışı kararlı (steady) yanma	61
Resim 3.45. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını (ventilasyon yok)	64
Resim 3.46. 10 cc iso-propil alkol – istasyon merkezi kararlı (steady) yanma	65
Resim 3.47. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını (1 m/s zorlanmış ventilasyon)	68
Resim 3.48. 10 cc iso-propil alkol – hat giriş (1 m/s piston etkisi)	69
Resim 3.49. 10 cc iso-propil alkol – alevin içe hareketi (1 m/s piston etkisi)	69
Resim 3.50. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını (1 m/s)	73
Resim 3.51. 10 cc iso-propil alkol – hat merkez (1 m/s piston etkisi)	74
Resim 3.52. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını (1 m/s)	78
Resim 3.53. 10 cc iso-propil alkol – hat çıkış (1 m/s piston etkisi)	79
Resim 3.54. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını (1 m/s)	82
Resim 3.55. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını (1 m/s)	83
Resim 3.56. İstasyon merkezinde yanma (1 m/s)	84
Resim 3.57. İso-propil Alkol – 3 m/s akış hızı altında hat girişi yangını	87
Resim 3.58. İso-propil Alkol – 3 m/s akış hızı altında hat girişi yangını	87
Resim 3.59. Hat merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)	90

Resim	Sayfa
Resim 3.60. Hat merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)	91
Resim 3.61. Hat merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)	91
Resim 3.62. Hat çıkış konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)	95
Resim 3.63. Hat çıkış konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)	95
Resim 3.64. İstasyon merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s hız)	99
Resim 3.65. İstasyon merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s hız)	99
Resim 3.66. Giriş duvarı konumunda n-heptan yangını başlangıcı	103
Resim 3.67. Giriş duvarında n-heptan yakıtlı yanma	104
Resim 3.68. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma	107
Resim 3.69. İstasyon merkez, n-heptan yakıtlı yanma – alev içi sıcaklık ölçümü	108
Resim 3.70. İstasyon arka duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma	111
Resim 3.71. İstasyon arka duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma sonu	112
Resim 3.72. Çıkış duvarın konumunda n-heptan yakıtlı yanma	115
Resim 3.73. Çıkış duvarında n-heptan yangını – alev sönmesi	116
Resim 3.74. Giriş duvarında n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s piston hızı)	120
Resim 3.75. Giriş duvarında n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s piston hızı)	121
Resim 3.76. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s akım hızı – giriş tüneli profil görünümü)	125
Resim 3.77. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s akım hızı)	125

Resim	Sayfa
Resim 3.78. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s akım hızı – çıkış tüneli karşıdan görünüm)	126
Resim 3.79. n-Heptan – 1 m/s akış hızı altında arka duvar yangını	129
Resim 3.80. Çıkış duvarında n-heptan yakıtlı yanma – 1 m/s piston hızı	133
Resim 3.81. Çıkış duvarında 1 m/s akış hızı için yanma genel karakteri	134

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$^{\circ}\text{C}$	Celsius derece
cc	Santimetre küp
<i>D</i>	Karakteristik boyut
ε	Yitim oranı (dissipation rate)
Fr	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
hPa	Hekto-Paskal
<i>I</i>	İntensite
k	10^3
<i>k</i>	Türbülans kinetik enerjisi
<i>l</i>	Karakteristik uzunluk
m	Metre
μ	Viskozite
μm	Mikro metre
n-	Normal
P	Basınç (N/m^2)
ppm	Milyonda partikül sayısı
Re	Reynolds sayısı

Simgeler

ρ	Yoğunluk (gr/cm ³)
s	Saniye
t	Zaman
u	Akışkan hızı
W	Watt
ω	Özgül yitim oranı (specific dissipation rate)

Kısaltmalar

2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
AŞTİ	Ankara Şehirlerarası Terminal İşletmeleri
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RNG	Re-Normalization Group
RSM	Reynolds Stress Model
SST	Shear Stress Transport

1. GİRİŞ

Kapalı hacimlerde akış ve yanma analizi, insan konfor ve emniyetini sağlayabilmek açısından önemlidir. Akış karakteristiği ve yanmanın iyi analiz edilmesiyle, can ve mal kayıplarının mümkün olduğunca önüne geçilebilir ve yangın etkin olmadan durdurma stratejileri oluşturulabilir. Raylı taşıma sistemleri istasyonları gibi alanlarda hava girişi, doğal havalandırma (Natural Ventilation) ve suni havalandırma (Mechanical Ventilation) ile gerçekleşir. Bu nedenle, kapalı hacimde yanma analizi yapabilmek için tünel geometrisini bilmek, tünellerdeki hava akış rejimlerini saptamak ve duman deşarj yollarını belirlemek gerekir. Kapalı bir alanda yanma analizi ancak kimyasal tepkimeler sonucu olarak açığa çıkan enerji, tünellerdeki doğal ve zorlanmış hava akışları, enerji geçişleri ve termodinamik olaylar gibi karmaşık problemlerin birleştirilmesiyle yapılabilir. Bu nedenlerle kapalı bir hacimlerdeki akım çizgileri, akış debileri, alçak ve yüksek basınç noktaları, vortisit alanları gibi yanma ve yangın sırasında hayatta kalabilirliği birinci derecede etkileyen rejimlerin hassas bir biçimde hesaplanması gerekmektedir.

Yangınlar, ihmaller sonucunda yada gözden kaçan bir zaafiyetin rastgele bir zamanda etkisini göstermesi ile başlayabilir [1]. Kasım 1987'de 31 kişinin ölmesiyle sonuçlanan King Cross yangını, araştırmalar sonucunda quanda etkisinin bir benzeri olan hendek etkisi kavramının ilk olarak farkedilgi felaket olarak karşımıza çıkmaktadır. Hendek etkisi, yürüyen merdivenlerin mekanizma boşluğu gibi (iç kısmı makina yağı ve zamanla birikmiş pislikler gibi yanıcı madde içeren veya içermeyen) handekler içinde yangın alevinin hendek boyunca yayılması olayını tasvir eder. Quanda etkisi ise belli akış şartlarında alevin civardaki en yakın yüzeye yapışarak yüzey üzerinde akması olayıdır ve yüksek reynolds sayılarında baskınlığını yitiren bir etkidir¹. 1998'de 63 kişinin hayatını kaybetmesi ile sonuçlanan ve yüzlerce kişinin çeşitli seviyelerde yangından etkilendiği Gothenburg Diskosu kazası ise Greenwich Üniversitesi'nde yapılan araştırma ile yeni acil çıkış kapısı kriterlerinin belirlenmesine sebep olmuştur [2]. 1996'daki Manş Tüneli yangını ise

¹ Hirst, T., Blueprint for Disaster: Kings Cross

en modern ve en geniş bütçeli yeraltı yapılarının bile yangından ne kadar çok etkilenebileceğinin göstergesi olmuştur [1]. 2003'te gerçekleşen Daegu (Güney Kore) Metrosu yangınında ise en modern yangın engelleme ve söndürme sistemlerinin bile başarısız olabileceği görülmüştür. Duman bariyerleri, su hidrantları, yangın dedektörleri, yangın söndürme fiskiyeleri ve her türlü modern yangınla savaş (fire fighting) envanterine rağmen bu felakette 192 kişi hayatını kaybetmiş ve yüzlerce kişi yangından etkilenmiştir [1]. Bu yüzden bir çok araştırmacı, araştırma kurumu ve üniversite, konunun önemi nedeni ile araştırmalar yapmış, pek çok veri elde edilmiş ve kaynaklık teşkil edebilecek yüzlerce çalışma ortaya çıkmıştır.

1996'da Yokohoma/Japonya'da yapılan 5. Uluslararası Odalarda Hava Dağılımı, Oda Ventilasyonu '96 konferansında iki araştırmacı tarafından sunulan çalışmada, yangın esnasında dumanın dışarı atılabilmesi için çok hızlı çalışan yangın ventilasyon sisteminin gerekliliği vurgulanmış, böyle bir sistemin ise hava geçirmez hollerde ve uzun dehlizlerde basıncı düşürdüğü ortaya konulmuştur. Yangın sırasında hayat kurtarma aktivitelerinin başarı ile yürütülebilmesi için dumanın kapalı hacimdeki dağılımının kontrolü ve buna ilişkin havalandırma sistemleri araştırılmıştır [3]. İngiltere'de ise Enerji Verimlilik Ofisi tarafından binalar için site yerleşim planı, mikroklima etkisi, oryantasyon, gün ışığı ve solar kazanım, özel yaşam, gürültü, yangın, enerji verimli dizayn, termal yalıtım ve iç hacim ısıtması konularında kapsamlı araştırmalar yapılmıştır [4].

Uzun bir tünelde iyi tasarlanmış bir ventilasyon sistemi, tünel güvenliği ve tünelin insanlardan verimli bir şekilde arındırılabilmesi için yangın kaynaklı dumanı hemen tahliye etmelidir. Tünel içindeki duman rejiminin karakteristiğinde ve katmanların hareketinde tünel içindeki boylamasına hava hızları oldukça etkindir. Tünel içindeki hava hızının kontrolü ile duman akışını kontrol etme konsepti, "sınırlama hızı" (confinement velocity) adında yeni bir parametrenin tanımlanmasına neden olmuştur. Sınırlama hızı yada kritik ventilasyon hızı, yangın sonucu oluşan duman katmanlarının güvenle en yakın egzoz ventilasyon sisteminden atılabilmesi için gereken ventilasyon hızı olarak tanımlanabilir [5].

Kritik hızların, tünellerde duman kontrolü için önemini anlaşılmamasıyla bir çok araştırmada farklı kesitli ve eğimli tünellerde, farklı ventilasyon şartları altında farklı büyüklüklerdeki yangınlar için kritik hızlar incelenmiştir. Araştırmaların bazılarında yangın havuzundaki yangının boylamasına ventilasyondan etkilenecek değişim gösterdiği ve hatta yanma oranının ventilasyondan etkilendiği belirtilmektedir. Bir grup araştırmacı tarafından yapılan çalışmada, ventilasyon etkilerinin, yanma oranına ve duman hareketine olan etkisi Froude ölçeklenmesi ile oluşturulmuş 1/20 oranlı bir modelde deneysel olarak incelenmiştir. Kritik ventilasyon hızlarının farklı boyutlar için tahmininde kullanılan yöntemlerin bir çoğu Froude sayısını temel almaktadır ve Froude Sayısı (Fr) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gD}} = f\left(\frac{\text{atalet kuvveti}}{\text{yerçekim kuvveti}}\right) \quad (1.1)$$

Eşitlik 1.1’de ‘u’ akış hızını, ‘g’ yerçekimi ivmesini ve ‘D’ karakteristik uzunluğu temsil etmektedir. Testlerde öncelikle zorlanmış ventilasyonun olmadığı durumlar, sonrasında ise ventilasyonun yangına olan etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçları Fire Dynamics Simulator (FDS) programından elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Zorlanmış ventilasyon altındaki yangın için; kritik hızlar ve boyutsuz ısı yayılım oranı $-Q^*$ arasında bir bağıntı olduğu görülmüş, ampirik bağıntılara göre sabit bir ısı akısı veren yangın için tasarlanmış ventilasyon sisteminin yanmayı kuvvetlendirebileceği anlaşılmıştır [6].

Mevcut teknikler Froude sayısının korunmasına dayalı yarı ampirik metodlara ve deneysel verilere dayalıdır. Bu teknikler (Kurioka ampirik bağıntısı [13], volumetrik heat release yöntemi, fast chemistry numeric simulation, Finite Rate Eddy Dissipation vs.), alev gücünün ve tünellerin geometrisinin kritik hızlara etkilerini kestirememektedir. Alev ısı kapasitesi ve tünellerin geometrisinin, kritik hıza etkisinin incelenmesi amacıyla aynı yüksekliğe sahip fakat farklı kesitli beş tüneller modelini üzerinde iki araştırmacı tarafından deneyler yapılmıştır. Deneylerde, hız ve sıcaklık dağılımları detaylı bir şekilde ölçülmüştür ve kritik hızların tüneller

geometrisine göre değiştiği gözlenmiştir. Yüksek ısı yayılım oranlarında kritik hızlar ısı yayılım oranından etkilenmezken, düşük ısı yayılım oranlarında kritik hızlar ısı yayılım oranının 1/3. kuvveti ile değişmektedir. Ayrıca ısı yayılım oranı ile alev bloğunun geometri değişimide incelenmiş ve yapılan 5 deney sonucu karşılaştırılmıştır. Karakteristik boyut, tünel hidrolik yüksekliği olmak üzere, boyutsuz hız ve boyutsuz ısı yayılım oranı değerlerine bağlı olarak 5 modelin deney sonuçlarının ölçeklendirme amacıyla basit bir formüle dönüştürülebileceği gösterilmiştir. Yeni ölçeklendirme ve benzeştirme teknikleri literatürdeki büyük ölçekli deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca tünel modelleri için sayısal çözümler yapılmış ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. CFD hesaplamaları sonucunda genel olarak deneylerle örtüşen sonuçlar alınmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılırken, CFD simülasyonları ile hesaplanan akış alanlarındaki hız dağılımları daha düşük, sıcaklıklar daha yüksek olarak bulunmuştur [7].

Bir araştırmacı tarafından yapılan deneysel çalışmada ise uzun bir tünelde yangın meydana geldiğinde, güvenlik açısından duman kontrolünün önemi ifade edilmiştir. Bu çalışmada, 1/20 ölçekli bir tünel modelinde yangın nedeni ile tünel boyunca meydana gelen duman hareketinin havalandırma sistemleri ile kontrol edilmesi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel modelde, hava-helyum karışımı yakılarak yangın simule edilmiş, oluşan dumanın kontrolü için boyuna ve enine havalandırmanın etkisi gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda atalet kuvvetleri (ventilasyon kaynaklı akış hızı) ve kaldırma kuvvetleri arasındaki ilişki belirlenmiş ve tünel içinde duman kontrolünü sağlayabilecek boyuna ve enine suni havalandırma hızları belirlenmiştir [8].

İki araştırmacı, 1/20 ölçekli bir modelde duman hareketini simule etmeyi ve en uygun duman deşarj ventilasyon hızını bulmak amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yangın nedeniyle oluşan duman, hava helyum karışımı ile temsil edilirken yangın ısıl gücü gerçek ölçekli olarak 0,2 MW'tan 10 MW'ta kadar artırılmıştır. Deneyde ventilasyon hızı adım adım artırılmıştır ve katmanlı duman uzunluğu ve içeri giren temiz hava miktarı ölçülmüştür. Deneylerde dumanı ventilasyon sisteminden atmak için gereken minimum boylamasına hava hızına bağlı

olarak “sınırlama hızı” hesaplanmıştır. Bu sınırlama hızı çeşitli ısı yayılımı (HRR, heat release rate) değerleri için bulunup, ventilasyon sisteminin kritik hızları ile karşılaştırılmıştır. Havalandırmanın olmadığı durumlarda ateş bloğu tavana çarpmakta ve açığa çıkan duman her iki tünel ucuna doğru bir katman halinde ilerlemektedir. Egzos ventilasyon sistemi çalıştırıldığı andan itibaren bir kısım duman ventilasyon shaftına doğru çekilmeye başlamaktadır. Deneyleerde 0,2 MW’lik yangın için duman sıcaklığı 495 °C olarak ölçülürken 10 MW’lik yangın için 724 °C olarak ölçülmüştür. Çeşitli ısı yayılım oranları için (HRR) deney tekrarlanmış ve her bir HRR değeri için tünel ağzından duman gelmesini engelleyen ventilasyon kaynaklı akış hızı bulunmuştur [5].

Bir diğer deneysel çalışmada ise, tünellerdeki uzunlamasına zorlanmış havalandırmanın tünel içerisindeki otomobil, havuz ve ağır yük taşıtı yangını üzerine olan etkisi incelenmiştir. Tünellerde yapılan yangın deneylerinden elde edilen verileri Bayseian (Bayes) olasılık yaklaşımı ile iyileştirmişlerdir (tasfiye etmişlerdir). Uzunlamasına havalandırmanın ağır yük taşıtı yangınında etkili olduğunu, zorlanmış havalandırma hızının artmasıyla yangının büyüdüğünü belirlemişlerdir. Büyük havuz yangınlarının olasılıkla havalandırma kontrollü, küçük havuz yangınlarının olasılıkla yakıt kontrollü olduğunu ve düşük havalandırma hızlarında otomobil yangınının büyüklüğünün önemli ölçüde etkilenmediğini belirtmişlerdir [9].

Bir diğer deneysel çalışmada tünel içinde meydana gelen bir yangında tünel boyunca kullanılan havalandırma hızının yanma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışma için de 1/20 ölçekli bir model kullanılmıştır. Yangının simülasyonu için 3,71 kW ve 15,6 kW ısı kapasiteli n-heptan yakıt havuzları oluşturulmuş ve deney boyunca kullanılan yakıt miktarı, yakıt havuzlarının altına yerleştirilmiş bir yük hücresi yardımı ile belirlenmiştir. Tünel içindeki sıcaklık değişimi K-tipi ısı çift kullanılarak ölçülmüştür. Ölçekli modeldeki akış ise harici bir rüzgar tüneli kullanılarak oluşturulmuştur. Deneyleerde havalandırma hızındaki artışın, n-heptan’ın yanma oranında artış meydana getirdiği görülmüştür. Araştırmacılara göre bu artışın temel nedeni; havalandırma hızındaki artışın soğutma etkisinden çok, alevi yakıcı ile besleme (oksijen taşıma) etkisi gösteriyor olmasıdır [10].

Bir grup araştırmacı tarafından yapılan deneysel çalışmada tünel içindeki duman sıcaklığının değişimi incelenmiştir. Deneylelerden 12 tanesi tünel tavanında bir boyutta yayılmakta olan duman hareketi için, 2 tanesi büyük ölçekli bir model üzerinde ve 10 tanesi ise gerçek taşıt tünelinde gerçekleştirilmiştir. Deneylelerde yangın boyutu, tünel kat yüksekliği, tünel kesit geometrisi ve havalandırma hızı etkisi incelenmiştir. Duman hareket yönünde olan havalandırma hızının etkisi ve tünel içindeki bariyer etkisinin duman sıcaklığı ve hareketi üzerindeki etkileri de çalışmada araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, tünel içinde taşıt hareketi olmadığı sürece yangın boyutundaki artışın tünel tavanındaki duman sıcaklığını artırdığını göstermektedir [11].

Bir başka araştırma grubu ise yanan bir odadaki hava akışını, hava akışının türbülans karakterini ve ısı alanlarını, Lazer Doppler hız ler (LDV) ve 12 μm çaplı çok gelişmiş bir ısıl çift kullanarak hassas bir biçimde ölçmüşlerdir. Bu deneylerin amacı çok yoğun ısı dağılımını farkları olan bir odadaki türbülanslı akış yapısını ve ısı dağılımını belirlemenin yanısıra, sayısal metodlarla yapılan türbülanslı akış simülasyonu ve çok yüksek ısıl farklar içeren hacimlere ilişkin simülasyonların doğruluk analizini yapabilmektir. Yangın sırasında binanın içerisindeki dumanın hareketi, zemin sıcaklığı ve sıcaklık alanların yoğunluğuna çok bağımlıdır. Bu alışma sonucunda, Reynolds stress, türbülanslı ısı akışı ve bunlar gibi daha önceki çalışmalarda ölçümünde zorluk yaşanmış tüm parametreler, hız ve sıcaklığın türbülans karakterlerine etkisini belirlemek adına hassasiyetle belirlenmiştir. Bu deneylerin sonuçları 3-boyutlu türbülanslı akış ve değişken yoğunluklu ısıl dağılım simülasyonları için kaynaklık teşkil etmektedir [12].

Bir başka araştırmacılar grubu ise tünel içerisinde çıkan bir yangının yakın bölgesindeki olayları analiz etmek için deneyler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada 1/10, 1/2 ve tam ölçekli olmak üzere ve tam ölçekli modelde dikdörtgen ve at nalı kesitli olmak üzere modeller kullanmışlardır. Deneylelerde kare kesitli yangın kaynağı kullanmışlardır. En/boy oranı, açığa çıkan ısı miktarı ve uzunlamasına havalandırma hızı değiştirilmiştir. Alevin eğilmesi (tilt), görünür alev yüksekliği, duman

tabakasının maksimum sıcaklığı ve konumu için ampirik formüller 1/10 ölçekli model tünel kullanılarak elde edilmiştir. En/boy oranının etkisi bu modellerde dahil edilmiştir. $H^{3/2}/W^{1/2}$ oranı ile belirlenen uzunluğun tünellerde yangın olayı için temsili uzunluk olduğunu belirtmişlerdir. 1/2 ve tam ölçekli modelleri kullanarak yaptıkları deneyler ile de kare yangın kaynağının yakınındaki alanda yangın olayını tahmin etmek için buldukları ampirik bağıntıların uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir [13].

Bir kısım araştırmacı tarafından yapılan çalışmada ise uzunlukları 3270 m ve 1032 m olan iki gerçek tünelde, suni ventilasyonlu ve ventilasyonsuz bir dizi deney yapılmıştır. Bu deneylerde biri 1,6 MW diğeri 3 MW olan iki farklı yangın havuzu kullanılarak yangın senaryoları gerçekleştirilmiştir. Bu yangın senaryoları Fire Dynamics Simulator (FDS) 3.1 ile simule edilmiş ve simülasyon sonuçları deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra FDS ile bulunan maksimum duman sıcaklığı değerleri ampirik bir yöntem olan Kurioka ve ark. türettiği eşitlikten elde edilen maksimum duman sıcaklığı değerleri ile kıyaslanmıştır. Bu çalışma ile; önceki yıllarda meydana gelen Mont-Blanc Tauern, Gotthard, Dague ve Vuilleumier gibi pek çok can kaybı ile sonuçlanan yangın felaketlerinin sonuçlarının minimize edilmesini, tünel yapılarındaki olası hasarların tahmin edilmesini ve olası yangınlara karşı yapıyı korumak için alınabilecek önlemlerin belirlenmesinde kullanılabilecek verilerin toplanmasını amaçlamıştır. Deney sonuçları ile FDS sonuçları birbirleri ile uyumaktadır; aralarındaki en düşük fark 0,8 °C, en yüksek fark ise 11 °C olarak belirlenmiştir ve genel olarak fark mertebesinin 1-2 °C civarında olduğu görülmüştür. FDS ile bulunan maksimum duman sıcaklıkları Kurioka ampirik metodu ile bulunan sonuçlarla kıyaslandığında sıcaklık farklarının 7,7 °C dan düşük olduğu gözlenmektedir. Genel olarak FDS ve Kurioka metodları ile bulunan sıcaklıklar örtüşmekle beraber Kurioka metodu bir miktar daha yüksek maksimum duman sıcaklıkları öngörmüştür ve bu durum Kurioka denklemlerinin tünel eğimi parametresini içermemesi ile açıklanmıştır [14].

iki araştırmacı, tünel yangınlarındaki en/boy oranının duman hareketine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Tüneller aynı hidrolik çapa sahip olsalar da en/boy

oranının değişimi duman ilerlemesini etkilemektedir. Ayrıca deneysel sonuçlar ile sayısal çözümlerini kıyaslamışlar ve sıcaklık farklarını 10°C 'lik bir fark aralığında tutarlı olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklıktaki dumanın tavan boyunca ilerlediğini ve soğuk hava akışının tünelin alt kısmında olduğunu sıcaklık ve hız konturları ile göstermişlerdir [15].

Bir tüneldeki yatay bir yüzeye serpilmiş sıvı yakıt üzerindeki alev karakteristiği, iki araştırmacı tarafından sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Yakıt olarak heptan kullanılırken, rüzgar hızı 0,5-2,5 m/s değerleri arasında 3-boyutlu akış için, kurum oluşumu ve radyasyon etkileri sayısal yöntemlerle hesaplanmıştır. Standart $k - \epsilon$ türbülans modeline eklenen kaldırma kuvvetlerine rağmen hesaplama sonuçlarında tutarsızlıklar ortaya çıktığından simülasyonlarda Large Eddy Simülasyon modeli kullanılmıştır. Daha sonra hesap sonuçları, alev şekli ve ısı akıları açısından deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada akış ve yanma alanı modellenirken, üç boyutlu eliptik akışkanlar mekaniği denklemleri, kurum (soot) üretimli tepkimeli akış ve radyasyon modelleri ile birleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen verilerin başka bir araştırmacı tarafından yapılan orta ölçekli deneyin sonuçları ile örtüşmekte olduğu gözlenmiştir [16].

Bir diğer araştırmada ise bir metro istasyonu yangını durumunda istasyon içi duman kontrolü, optimal durumu bulmak için, sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneydeki genel senaryo, istasyonda duran bir metro treninden platforma doğru duman yayılmasıdır. Yangın gelişmesi ve duman yayılması büyük ölçüde akan havanın ortam karakteristiklerine bağlı olduğundan, üç farklı fan çalıştırılması senaryosu seçilmiştir. Bütün sayısal çözümler ve ölçekli model deneyleri aynı senaryolarda gerçekleştirilmiştir. İlk durumda tünel alanındaki hiçbir fan çalıştırılmamakta, ikinci durumda tünel alanındaki tüm fanlar tahliye yapmakta, üçüncü durumda ise fanların bir kısmı üfleme, bir kısmı tahliye yapmaktadır. Sonuç olarak, merdivenlerde tüm fanlar tahliye yaptığında düşük is konsantrasyonu ve kaçış için görünürlük elde edilebilirken, fanların çalışmadığı durumda is ve duman konsantrasyonu en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Rayların bulunduğu tünelde ise fanların çalışmadığı durumda düşük is konsantrasyonu ve kaçış için görünürlük elde

edilirken, 'üfleme-tahliye' durumunda duman türbülanslı olarak yayılmakta ve görünürlük sağlanamamaktadır [17].

Yürütülen araştırmalarda tünel yangınlarında acil havalandırma sistemlerinin alev formatına etkisinden, bina yangınlarında duman deşarj yönlerine kadar pek çok konu incelenmiştir [18]. Bir grup araştırmacı yol tüneli yangınlarında acil durum ventilasyon sistemlerinin performanslarını, çeşitli ventilasyon senaryoları için sayısal olarak incelemişlerdir. Acil durum ventilasyon sisteminin alev merkezine göre yerinin ve hava akış yönünün alev formatına ve sistem içi duman yoğunluğuna oldukça etkisi olduğunu göstermişlerdir [19].

Bir grup araştırmacı tarafından yapılan çalışmada, bir karayolu tüneline ters akışın tünelin girişinden çıkmaması için gereken kritik rüzgar hızı ve duvara yakın alev için duman dağılımı sayısal olarak simule edilmiştir. CFD simülasyonu sonuçları göstermiştir ki, duvar kenarında oluşan bir alev bloğunun duman akışını kontrol etmek için gereken hızlar kritik hızlar merkez yangını kritik hızlarından daha yüksektir ve teorik olarak kritik hızlar oranı 1,26 olarak hesaplanmıştır. CFD simülasyonlarında ise 500 kW'lık bir yangın için bu oran 1,18 olarak hesaplanmıştır [20].

Tünel ventilasyon karakterleri ve piston etkisi üzerine bir diğer çalışma ise iki araştırmacı tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında, Subway Environment Simulation (SES) programı ile bilgisayar ortamında bir tünel-istasyon konfigürasyonu modellemiş ve bu modelde piston ve ventilasyon etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında istasyona giriş yapan tekil trenlerin yanında farklı yönlerden aynı anda gelen trenlerin oluşturduğu piston etkileride incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda boşaltma şaflarına ilişkin sayısal sonuçlar ile tünel-istasyon hacimlerindeki piston etkisi kaynaklı akış rejimleri elde edilmiştir [21].

İki araştırmacı yaptıkları çalışmalarında bir tünel içerisindeki taşıtta çıkan yangın durumunda hava akışının hareketlerini sayısal olarak modellemişler ve farklı güvenlik sistemleri ile kıyaslamışlardır. Kullandıkları modelde, tünel basit dikdörtgen

kesitli kanal olarak kabul edilmiş ve tünel içerisinde yanan araç senaryosu için çözümler yapılmıştır. Dumanın yüksek konumlarda tutulduğu ve 3 m'nin altındaki yüksekliklerde düşük duman konsantrasyonunun olduğu böylece yolculara kaçabilmeleri için yüksek seviyeli emniyet sunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmalarında, çeşitli tünel havalandırma sistemlerinin, uzunlamasına, yarı-enlemesine, enlemesine, sanki (pseudo) enlemesine, uzunlamasına ve yarı-enlemesine birleşik havalandırma sistemlerinin tünel içerisindeki sıcaklığa etkisini sıcaklık konturları ile göstermişlerdir [22].

Bir metro istasyonundaki platformda ortaya çıkan yangın etkilerini sayısal olarak incelendiği bir diğer çalışmada ise sayısal çözüm için kullanılacak parametreler gerçek bir istasyondan ölçülmüştür. Hız sınır şartları deneysel ölçümler ile elde edilmiş ve bu ölçümler sayısal çözüm için girdi olarak kullanılmıştır. Isı, gaz yoğunluğu ve görünürlüğü iki farklı egzoz kapasitesi için analiz etmiş ve kıyaslamışlardır. Kurulu tahliye sistemlerinin kapasitesinin bir yangın durumunda duman ve ısı hareketi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve daha büyük kapasitenin daha verimli duman kontrolü verebileceğini göstermişlerdir [23].

İtfaiyecilerin yanan bir binada mahsur kalmış insanlara yardım edebilmesi için bir binanın çatısının ve bina genel yapısının yangına en az 30 dakika dayanması gerektiğini savunan bir araştırmacı, bu amaçla her yapının ısıya duyarlı materyal özellikleri kullanılarak yapısal stabilite analizinin gerçekleştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu analizin yapılırken yapı içerisindeki sıcaklık dağılımının bilinmesi gerekmektedir ve bu amaçla HAD kullanılabilir. Bir yangın simülasyonunda zamana bağlı olup olmadığı, ısı yayma oranı, yangın çapı, yanma hızı gibi yangın parametreleri göz önüne alınmalıdır. Ayrıca yangın modellenirken kullanılacak yöntemlerin ve kabullerin seçilimi bilgi gerektirmektedir. Alan modellemesi de (HAD, Navier-Stokes denklemleri, türbülanslı akış, oksitleyici miktarı ve dağılımı, ventilasyon vs.) simülasyonların gerçekçiliğinin sağlanması açısından önemlidir. Araştırmacı çalışmasının bir kısmında 3D çeşitli giriş ve çıkışları olan bir hacim içindeki yanmayı incelemiştir. 3D hacmi öncelikle 2D olarak modellemiş, 480 mesh alanındaki 1 m²'lik 500 kW ve 1000 kW basit bir ısı kaynağı için çözüm yapmıştır.

Bu çözümlü 3 boyuta genişleterek (expand) daha az bilgisayar gücü kullanarak 3D kapalı bir hacim için 380 000 mesh hacminde farklı zaman adımları ve farklı toplam süreler için ısı dağılımını çözmüştür. HAD simülasyonlarında zaman adımlarını değiştirince çözümlerinde değiştiğini gözlemlemiştir. Bu araştırmacı daha sonra bir metro istasyonunu modellemiş ve istasyon içindeki yangını simüle etmeye çalışmıştır. Simülasyonlar sonucunda elde ettiği ısı dağılımlarına göre istasyon yapımında kullanılabilecek materyallerin davranışlarını incelemiştir [24].

Başka bir araştırmacı, hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayanan duman hareketini öngören bir matematiksel model türetmiştir. Bu model 2D ve 3D zamana bağlı akışa ve sınır tabakaya ilişkin temel denklemleri türbülans, yanma ve radyasyon etkilerini içerecek şekilde çözmektedir. Sonuçlar tünel ventilasyon dizaynını etkileyen temel parametrelerin araştırılmasında da kullanılmıştır. Yangının boyutuna göre yayılma süresi, ventilasyon düzenlemeleri ve duman davranışları bir kaç tünel ve yeraltı demiryolu geometrisi için çözümlenmiştir [25].

Bir diğer araştırmacı CFAST ile yapmış olduğu tünel yangını simülasyon sonuçlarını yayımlamıştır. Bu çalışmada yanan tahta sandıktan, yanan otobüse kadar senaryolar incelenmiştir [26]. Yine bu araştırmacı tarafından yapılan başka bir hesaplamalı analizde, önce hava akış şekilleri ve buna bağlı olarak duman kontrol sistemleri dizaynı, hava içindeki ısı dağılımı, ventilasyon ve iklimlendirme incelenmiştir. Bu çalışmada kapalı hacimdeki hareketlilik, kütlelerin korunumu, momentum, entalpi ve kimyasal türlerin (chemical species) konsantrasyonlarına ilişkin kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülmesine dayandırılmıştır. Aynı zamanda bu çalışmada ısı konturları ve kimyasal türlerin konsantrasyon dağılımı sonlu farklar yöntemiyle ayıklaştırılmış ve boyutlarına bir tünelin ventilasyonu, geniş bir alana duman dolması ve kapalı bir hacimde yangından dolayı oluşan hava akışı ve sprinklerler (yangın söndürme fışkıyeleri) tarafından yangını söndürmek amacıyla yapılan serpinti temsili olarak gösterilmiştir [27].

Havalandırılmalı tünellerde duman ve yanma ürünleri tavan civarında katmanlaşır ve bir kısım duman havalandırma akışına ters yönde hareket edebilir. Dumanın oluşumu

ve duman akışı otoban ve maden tünelleri, bina koridorları gibi alanların boşaltılmasında engelleyici bir faktördür. İki araştırmacı tarafından yapılan çalışmada Fire Dynamics Simulator (FDS) isimli, LES modelini esas alan zemin kat ve havalandırılmalı tünel yangınlarını simule edebilen bir CFD programı kullanılmıştır. Bilgisayar verileri deney sonuçları ile karşılaştırılıp veriler analiz edilmiştir. Simülasyonlarda, yangın nedeniyle oluşan dumanın kontrolü için gereken minimum akış hızı hesaplanmış ve bu minimum hızda, alev üzerinde yer alan tavanda maksimum sıcaklıklara ulaşıldığı görülmüştür. Çözümler düz ve eğimli tüneller için yapılmıştır ve Froude modelinin yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca Froude ölçeklendirme kuralının iki geometrik olarak benzer tünelde yangın alanının ve akış özelliklerinin tam benzetilemediği durumlarda iyi sonuçlar vermediği anlaşılmıştır. Kritik hız değerleri yangın ısı yayma oranının 1/5. kuvveti ile değişmektedir. Ayrıca simülasyonlar yakıt türünün ve ortam sıcaklığının kritik hıza etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermiştir. Tünel eğimi ile kritik hızlar arasında ise non-linear bir bağıntı olduğu belirlenmiştir. FDS ile LES tabanlı yapılan simülasyonların deneylerle kıyaslanması sonucunda LES tabanlı sayısal metodların farklı büyüklükteki ve geometrideki yangınları doğru bir biçimde modellediği görülmüştür [28].

İki araştırmacı yaptıkları sayısal çalışmada FDS 3.10 CFD yazılımını kullanarak tipik bir metro istasyonu modellemişler ve bu modelde üç farklı konumda çıkan 1,0 MW'lık ve 2,5 MW'lık iki yangını simüle etmişlerdir. Bu simülasyonlarda ısı dağılımı, görüş mesafesi, CO konsantrasyonu ve radyasyon akısı yoğunluğu gibi parametreleri incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda görüş alanı ve duman faktörünün istasyonu boşaltmada anahtar faktör olduğu belirlenmiş ve etkin bir duman atım sisteminin ortamı boşaltma esnasında daha güvenli hale getirdiği gözlenmiştir. Simülasyonu yapılan model için minimum egzoz fanı debileri ve duman perdesi özellikleri belirlenmiştir [29].

Montreal nehri altında yer alan Louis-Hippolyte-Lafontaine tüneli içinde olası bir yangın senaryosunu inceleyen bir çalışmada ise test ve hesaplamaların yapılması için Fluent® yazılımı kullanılmış daha sonra sonuçların oluşturulması için özel bir

algoritma geliştirilmiştir. Çözümler sayısal olarak 3D model üzerinde kullanılarak yapılmıştır ve bu çalışmanın sonucunda görselleştirilmiş duman ve yangın hareketleri oluşturulmuştur [30].

Westbound Melbourne City Link Tüneli için yapılan bir sayısal çalışmada ise, tünel içinde yanan bir araç kaynaklı duman hareketini incelenmiştir. Tünel içinde akış hızı, basınç, sıcaklık ve emisyonlardaki değişim, Fluent® 6.0 yazılımındaki HAD modelleri kullanılarak zamana bağlı olarak çözülmüştür. Simülasyonlarda yanmakta olan durağan bir otobüsün yaklaşık olarak 500 L'lik bir dizel yakıtın 6 dakika içinde yaydığı enerjiye denk enerji açığa çıkardığı kabul edilmiştir. Çözümlerde yangın kaynaklı dumanın tünel çıkışlarına yöneldiği görülmüş ve bu katmanın durdurabilmesi için gereken havalandırma gücü hesaplanmıştır. Ayrıca yangın bölgesindeki yangın ve araç egzoz kaynaklı emisyonlar incelenmiş ve sekizinci dakikadan sonra tünel içindeki oksijenin %12-15 mertebesine düştüğü ve karbon-moksit ve karbon dioksit oranının yüksek olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, tünel içindeki yangınlarda yolcuların yangın etki alanından bir an önce uzaklaştırılmaları gerektiği anlaşılmıştır. Yangın kaynaklı geriye akışın (backflow) 150 m'ye kadar uzadığı görülmüş ve duman içindeki sıcaklık dağılımının 55-250 °C aralığında olduğu belirlenmiştir [31].

Bir grup araştırmacı volümetrik ısı kaynağı (VHS), eddy break-up, varsayımlı (tahmini) olasılık yoğunluk fonksiyonu (prePDF) yanma modellerini kullanarak kapalı ortamlarda yangın simülasyonları yapmışlardır. Sayısal çözümlerini Fluent® kullanarak yapmışlardır. Sonuçlarını diğer araştırmacıların deneysel verileri ile kıyaslamışlardır. Kullandıkları kapalı ortamlardan birisi de tüneldir. Tünel yangın simülasyonunda eddy break-up ve prePDF modellerinin eşit sonuçlar verirken, prePDF modelinin daha tutarlı olduğunu belirtmişlerdir. Ancak yaptıkları bu çalışma sonucunda kapalı hacimlerde yanma modellemesi için daha detaylı türbülanslı yanma modellerine gereksinim olduğunu vurgulamışlardır [32].

Günümüzde artan hesap kapasitesi ve kodlama kolaylıkları ile birlikte “Sayısal Yöntemler” geliştirilmiş ve neredeyse hemen her mühendislik problemine

uyarlanabilir hale getirilmiştir. Bilgisayarlarda veri işlemek için ayrılan alanların -gelişen teknolojiye bağlı olarak- artması ve 64, 128 ve 256 bitlik sistemlerin yaygınlaşması ile beraber, hesaplamalı yöntemlerde kullanılacak virgülden sonraki anlamlı hane sayısı artmış ve bu gelişmeler neticesinde en zor diferansiyel sistemler bile ayrıklaştırılarak çözülebilir hale gelmiştir. Bu durumun neticelerinden biri de, yeni sayısal yöntem ve ayrıklaştırma metodları ile bilgisayar üzerinde mühendislik problemlerini çözebilen pek çok algoritmanın geliştirilmesi ve gerek açık kaynak kodlu, gerekse ticari paket programlar olarak bu algoritmaların hizmete sunulmuş olmasıdır. Son yıllarda bilgisayar sistemlerinin hesaplama gücündeki artışa ve Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniğindeki (HAD) gelişmelere bağlı olarak bir çok ticari HAD programı piyasaya sürülmüştür. Güncel HAD yazılımlarında pek çok durum için doğru parametreler girildiğinde çözümlene yapılabiliyorsa da, kullanıcının gerçek durumu iyi tahlil etmesi ve bilgisayar programını gerçeği temsil edebilmesi için uygun veriler ve çalışma modları ile donatması gerekir [4]. Ayrıca kapalı hacimlerde yanma problemleri gibi zor problemlerde, gerçek durumlarda etkin olan “piston etkisi” gibi unsurların probleme uyarlanması için Courant-Friedrichs-Levy stabilite kriterlerinin sağlanması örneğindeki gibi “özel durumlara özel teoriler/kuramlar” kullanma gereksinim olabilir. Ayrıca HAD yazılımlarının hassasiyetine; seçilen grid büyüklüğü, mesh yapısı, yazılımın algoritmasında kullanılan ayrıklaştırma yöntemleri ve nümerik çözümlene algoritmaları, bilgisayar işlemleri yürütürken kullandığı anlamlı basamak sayısı gibi pek çok etken etki eder. Bunun haricinde matematiksel modelin gerçek duruma yakınsayıp yakınsamadığı da araştırılmalıdır. Bu nedenlerle simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılıp kontrol edilmelidir [33].

2. KAPALI BİR HACİMDE AKIŞ VE YANMANIN İNCELENMESİ

Kapalı bir hacimde akış ve yanma, önceki çalışmalarda da görüldüğü üzere, analitik, deneysel veya sayısal olarak incelenebilir. Deneysel çalışmalar gerçek hacimlerde, tam boyutlu modellerde veya ölçekli modellerde gerçekleştirilebilir. Deneysel bir çalışmada, deney setinin gerçek modeli ne derece temsil ettiği, dinamik veya krayojenik benzerlik şartının aranıp aranmayacağı, ölçüm cihazları, ölçüm cihazlarının hassasiyetleri, konumları ve sayıları, ölçmeden ve modelden gelen hatalar ve ölçüm cihazlarının akış ve yanmaya olan bozuntuları dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Sayısal çalışmalarda ise incelenen hacmin gerçek boyutundan ziyade, çözümlenelerde kullanılan mesh sayısı, sayısal çözümleme metodları, kullanılan yaklaşımlar, akış, türbülans ve yanma modelleri, sınır şartları, çözümlemede kullanılan bilgisayar donanımı hassasiyeti ve kapasitesi gibi noktalara dikkat edilmelidir. Her iki inceleme yönteminde kendine göre avantaj ve dezavantajları olmakla beraber, analiz için bir yöntem seçerken sayısal metodun sadece matematiksel bir çözümleme olduğu ve deneysel metod ile elde edilen verilerle sayısal metod çözümlenelerinin çakışması gerekmediği unutulmamalıdır. Sayısal bir çalışmada, Navier-Stokes denklemini çözebilmek için sınır şartları, akış alanı, akış karakteri gibi kabuller yapılırken kontrol hacmi incelemesi, tam adiyabatik sistem kabulü, zamandan tam bağımsızlık, sürekli ortam gibi Navier-Stokes denklemini çözmeyi kolaylaştıran ama gerçekte sağlanamayacak koşullarda çözümlenelerde kullanılmaktadır. Gerçek olaya dair bir çok kabul ve koşul, laboratuvar ortamının kontrollü deneylerinde bile sağlanamamaktadır.

Matematiksel çözümlenelerle elde edilen sonuçların gerçeği ne derece temsil ettiğinin anlaşılması için çok sayıda parametrenin değişimini içeren, hassas, kalibreli, ölçülen büyüklükleri veya parametreleri en az etkileyen ölçüm cihazları ile yeterli sayıda ve yeterli noktadan veri alınarak yapılmış detaylı deneylere ihtiyaç vardır. Bir senaryo (gerçek olay) sayısal olarak incelenmeden önce, senaryoya ilişkin deneysel veriler varsa araştırılmalı, hangi kabullerin ve sınır şartlarının olayı temsil edebileceği belirlenmeli, sayısal çözümlerde kullanılan denklem veya denklem sistemlerinin zayıf noktaları ve kararsızlık aralıkları (inconsistency) incelenmelidir.

Fiziksel olaya ilişkin detaylı bir araştırma ve kavrayıştan sonra ancak anlamlı bir sayısal çözümleme gerçekleştirilebilir. Bu nedenlerden dolayı, bu araştırmada karakteristik boyutları gerçek bir Ankaray İstasyonu'nun 1/100 ölçeğinde olan yarım bir model üzerinde bir grup akış ve yanma deneyi gerçekleştirilmiş, bu deneyler baz alınarak ölçekli modelin tam bir 3D bilgisayar modeli oluşturulmuştur. Fluent® ticari yazılımı kullanılarak bilgisayar modeli üzerinde bir dizi sürekli ve süreksiz akış çözümlemesi gerçekleştirilmiş, optimum mesh/grid ve optimum iterasyon sayısı belirlenmiş sonrasında ise deneyi en iyi temsil edebilecek matematiksel modeller aranmıştır. Simülasyonların tamamında türbülanslı akış incelenmişse de, bu çalışmanın esas konusu türbülans modelleri ve türbülanslı akışın teorik altyapısı değildir. Deneyler sırasında sınır tabakaya ait veri toplanmadığından ve sınır tabaka gözleme yeteneği sınırlı bir platformda çalışıldığından hem deneylerde hem de simülasyonlarda esas olarak tüneller ve istasyon içindeki ana akış karakteri ile istasyon içinde zamana bağlı yanma incelenmiştir.

3. İSTASYON MODELİNDE AKIŞ VE YANMA DENEYLERİ

Gerçek bir istasyondaki major hava hareketleri mekanik ventilasyon, trenlerden kaynaklanan piston etkisi ve doğal ventilasyondan kaynaklanmaktadır ve meydana gelen akımın genel hattı tünel ve istasyon boyu doğrultusundadır. Bu nedenle akım özelliklerinin hesabında kullanılacak karakteristik uzunluk olarak istasyon boyu seçilmiştir. Akış ve yanma deneyleri karakteristik uzunluğu 1/100 ölçekli ısıya dayanıklı bir modelde gerçekleştirilmiştir.

3.1. Ankaray Yeraltı Taşıma Sistemi

Ankaray yeraltı raylı taşıma sistemi, Ankara'nın batısındaki AŞTİ istasyonundan Kızılay'a, Kızılay Metro-Ankaray ortak istasyonundan ise şehrin doğu yakasındaki Dikimevi istasyonuna kadar uzanmaktadır. Uç istasyonlar (AŞTİ ve Dikimevi) orta platformlardan değişmeli işletmeye müsaade ederken, orta duraklardaki yolcu platformları istasyon kenarındadır. Her istasyon (Kızılay Metro-Ankaray ortak istasyonu hariç) platform ve konkurs olarak adlandırılan iki kata sahiptir. Konkurs seviyesinden yürüyen merdivenlerle ya da basamaklı merdivenlerle ulaşılan platform seviyesi ise Ankaray trenlerine iniş-binişin sağlandığı alandır. Platformlar için kamu kullanım uzunluğu 90 m ve sistemde kullanılan trenlerin uzunluğu 87 m'dir. Yolcu platformlarının ray hattından yüksekliği ise 0,95 m'dir. Hat üzerinde toplam onbir istasyon bulunmaktadır. Duraklar arası ortalama uzaklık 795 m'dir ve tüm istasyonlar doğrusal bir hat üzerindedir. Taşıma kapasitesi tek yön için 3 dakikalık dizi aralığı ile saatte 16 000 yolcudur. İki dakikalık dizi aralığı ve daha fazla tren ile taşıma kapasitesini tek yönde için saatte 25 000 yolcuya yükseltmek mümkündür. Ankaray trenleri, işletimde azami 80 km/saat hız yapabilmektedirler ve hat boyunca ortalama seyir hızları 35 km/saat civarındadır. Araçların cer sistemi, elektriksel fren esnasında üretilen enerjiyi güç ağına geri beslemektedir [34].

Ankaray hattı toplam 8,7 km'lik hat güzergahı boyunca 8 km'lik tünel kısmına sahiptir. Hattın dikey güzergahına bağlı olarak, istasyonlar ya tamamen yer altında ya da yarı yer altında inşa edilmiştir. Tünellerin ana bölümü olan 5922 m'lik kısım ise

Aç-Kapa teknolojisi ile inşa edilmiştir. Bu yöntemde tünelin inşa edileceği alanın iki yanına kazıklar çakılıp orta kısma tünel çukurları kazılır. Kazılan çukurların iki tarafı çimento ile kaplandıktan sonra çukurların üzerlerine beton kirişleri konarak kirişlerin üzeri örtülür. Bu şekilde üretilen dikdörtgen tünellerdeki iki hat yürüme yolu ile birbirinden ayrılmıştır. Demirtepe-Kolej istasyonları arası, tren depolama sahası-AŞTİ istasyonu arası ve Dikimevi istasyonu ötesi, yeni “Avusturya Delme Tünel Metodu” ile inşa edilmiştir. Delme tüneller, her hatta ait bir tane olmak üzere, iki oval tüpten oluşur. İki tüp arasındaki geçişler, acil havalandırma şaftlarına ulaşımı sağlarken, bakım personelinin bir tüpten diğerine geçişine de olanak verir. Tüplerdeki yürüme yolu hattın yan tarafındadır [34].

Maltepe Ankaray İstasyonu “Aç-Kapa” teknolojisi ile üretilmiştir ve basit olarak iki tarafında iki dikdörtgen tünelden ve dikdörtgen prizma şeklinde bir istasyon hacminden oluşmaktadır. Aşağıda deneylerde ve simülasyonlarda baz alınmış olan Maltepe Ankaray İstasyonuna ait gerçek fotoğraflar bulunmaktadır.



Resim 3.1. Ankaray Maltepe İstasyonu konkurs seviyesi

Resim 3.1 Ankaray Maltepe İstasyonunun Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi tarafındaki giriş konkursundan, istasyonun karşı konkursu görülecek şekilde çekilmiştir. Giriş turnikeleri ve platform seviyesinin üzerindeki asma tavan resimden görülebilmektedir.



Resim 3.2. Ankaray Maltepe İstasyonu Denizcilik Müsteşarlığı tarafındaki platform merdivenlerinin başından platform üstü görünüş

Resim 3.2’de yolcu platromlarının üzerinde bulunan asma tavan görülmektedir. Bu asma tavan, şekildeki çelik taşıyıcı sistemler sayesinde konkursa ve istasyon tavanındaki kirişlere bağlıdır. Çeşitli tesisat bileşenlerini saklayan ve genel olarak kozmetik işlevi olan asma tavan üzerinde olası bir yangında yakıtlık teşkil edebilecek toz ve pislik birikmektedir. Ayrıca ışıklandırma ve emniyet sistemlerinin (duman dedektörleri, kamera bağlantıları, elektrik kabloları vs.) tesisatları da yanıcıdır ve yakıtlık teşkil etmektedir. Ayrıca platform seviyesinde çıkacak bir yangın durumunda bu asma tavanın duman hareketine olan etkisi ve istasyondaki ısı dağılımına etkileride unutulmamalıdır. Asma tavana ilişkin resimler Resim 3.3 ve Resim 3.4’te sunulmuştur.



Resim 3.3. Ankaray Maltepe İstasyonu yolcu platformu



Resim 3.4. Ankaray Maltepe İstasyonu yolcu platformundan istasyon içi görünüm



Resim 3.5. Tren Ankaray Maltepe İstasyonuna giriş yaparken tünel içi görünüm

Aç-Kapa metodu ile yapılan Ankaray Maltepe İstasyonunun tünellerinden biri, Resim 3.5'te görülmektedir. Tünel kesiti dikdörtgendir ve kesiti yaklaşık olarak 2,7 m en ve 3,5 m yükseklik ölçülerine sahiptir [34]. Tünel içinde ne tavan, nede taban düzgün yüzey olarak kabul edilemez. Tavanda hat boyunca uzanan kirişlerin ve tabanda tren raylarının, piston etkisi ile oluşan hava akımını etkileyebileceği açıktır.



Resim 3.6. İstasyon-tünel birleşme kirişi

Resim 3.6’da Ankaray Maltepe İstasyonu Denizcilik Müsteşarlığı tarafındaki tünelin istasyona bağlantısı görülmektedir. Resmin üstündeki platform ise konkurs seviyesidir. Konkurs seviyesinden platforma ulaşım, iki kenardaki merdivenlerce sağlanmaktadır.



Resim 3.7. Konkurs seviyesinden Ankaray Maltepe İstasyonunun görünüşü

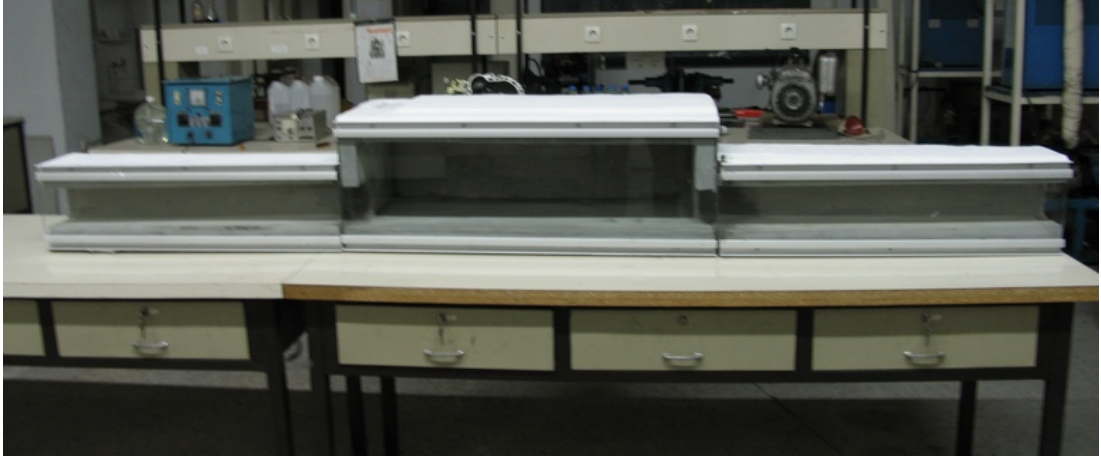
Resim 3.7'den görülebileceği üzere, istasyonun ana hatları hem enlemesine, hem de boylamasına orta eksenlerden simetriktir. İstasyonun iç hacmi kabaca hava geçirgen asma tavanlarca (aralıklı) bölünmüş dikdörtgen prizma olarak tanımlanabilir ve iki tünel ile birlikte tüm kompleks toplam 3 parçadan oluşmaktadır.

3.2. Deney Modeli

Kapalı bir hacimde akış ve yanmayı inceleyebilmek için örnek bir yeraltı raylı taşıma istasyonu seçilmiş, ve deneylerde kullanılmak üzere bu istasyon üzerinden ölçekli bir model üretilmiştir. Örnek olarak seçilen istasyon Ankaray Maltepe İstasyonu'dur. Bu istasyon 90 m platform uzunluğuna sahiptir ve istasyona bağlanan tüneller dikdörtgen kesitlidir [34]. Modelin tasarımında, ölçeklendirilecek karakteristik uzunluk olarak istasyon boyu alınmıştır.

Üretilen model sistem; giriş tüneli, istasyon ve çıkış tüneli olmak üzere toplam 3 bölümden oluşmaktadır. Model istasyon, karakteristik uzunluk bakımından 1/100

ölçeğe sahiptir ve 90 cm boyundadır. Tüneller ise hidrolik çap bakımından ölçekli olmayıp yaklaşık istasyon boyu uzunluğunda üretilmiştir. Akımı karıştırmak amacı ile tüneller ile istasyon birleşim yerlerine, gerçek istasyonda da olduğu gibi kirişler konmuştur. Üretilen modelin fotoğrafı aşağıdadır.



Resim 3.8. İstasyon modeli

Resim 3.8’de, deneylerde kullanılmak üzere üretilmiş yarım istasyon modeli görülmektedir. Modelin boylamasına merkez hattı simetri eksenini alınıp, camla kapatılmıştır. İstasyona simetri yüzeyinden bakıldığında, istasyon ve tüneller içindeki tüm görsel hareketlilik gözlemlenebilmektedir. İstasyon tavanının giriş tüneli tarafında merdiven girişini temsil eden, üzeri ateşe dayanıklı tıpa ile kapatılmış dikdörtgen kesitli bir delik vardır. İstendiği takdirde bu delik açılıp içerisine ateşe mukavim şeffaf tüp yerleştirilerek merdiven boşluğunun yangına etkileri incelenebilir. Yerleştirilecek tüpün geometri değiştirilerek quanda ve hendek etkisi gibi özel durumlar temsil edilebilir, en uygun merdiven formu araştırılabilir. Deneylerde kullanılan istasyon modeli ateşe ve yüksek sıcaklığa mukavimdir.

Tüneller, çelik hasırlı betonarme olarak kalıba döküm metodu ile üretilmiş ve içleri yanmaz ve pürüzlü sıva ile sıvanmıştır. Tünellerin dışı de yaz tavan boyası ile boyanmış, böylece olası kurum ve duman kaçaklarının üzerinde iz yapabilmeleri sağlanmıştır. Tünellerin camla örtülen simetri düzlemlerindeki tavan ve taban alın kısımlarına ısıya dayanıklı cama yataklık eden alüminyum profiller, yerlerine vida

kullanılarak montajlanmıştır. Tünelere ait üretim resimleri aşağıda Resim 3.9'da verilmiştir.



Resim 3.9. Alüminyum profiller takılı halde tünel elemanı

İstasyon ana gövde, mümkün olduğunca adiyabatik bir sistem oluşturulabilmek ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirilirken tam yalıtımlı sınır şartı koşuluna yaklaşılabilmek amacıyla ısı yalıtımı oldukça yüksek üretilmeye çalışılmıştır. İstasyon ana gövdesi tünellerin aksine betonarme değildir ve metal içermez. Gövdenin taşınabilir olması, konsol sistem için kalıplama metodu ile betonun istenilen şekli almaması, ısı yalıtımlı kompozit ve/veya modern inşaat malzemelerinin varlığı nedenleri ile gövde tünellerden farklı bir şekilde üretilmiştir.

Gövde üç ana bileşene sahiptir ve bu bileşenler konsol tavan, taban ve konsol taşıyıcı duvarlar şeklinde isimlendirilebilir. Her üç bileşeninde ana malzemesi 50 mm ytong bloklardır ve Resim 3.10'da görülmektedir.



Resim 3.10. Ytong bloklar (beyaz)

Ytong oldukça hafif, basmaya ve çekmeye yaklaşıt eşit mukavim, kolayca kesilebilir, zımparalanabilir, şekil verilebilir bir malzemedir. Çoğunlukla modern binaların ısı ve ses yalıtımlı duvarlarında tek veya çift kat olarak kullanılır. İçi hava baloncukları ile doludur ve bu nedenle hem hafiftir, hem de ısı ve ses yalıtımı sağlama özelliği vardır. Bloklar birbirlerine özel bir yapıştırıcı ile tutturulurlar ve bu yapıştırıcı malzeme basma ve kayma gerilmelerine mukavim olsa da çekmeye direnç gösteremez.

İstasyon modelinin konsol tavan ve taban bölümlerinde ana malzeme ytong haricinde kompozit katmanlar da mevcuttur. İstasyon konsol tavanının alt yüzeyi ve üst yüzeyinin yaklaşık %90'ı fiber-reçineden oluşan bu malzeme ile kaplıdır. Ayrıca konsola ek mukavemet sağlamak amacıyla ytong katmanını içi oyulup fiber iskelet yerleştirilmiştir. Taban kısmının altı ve üstü ise kompozit katmandan imal edilmiştir. Fiber-reçine kompozit malzeme, uzun ahşap liflerinin sıcaklık ve basınç altında reçine ile kalıplanmasından elde edilir ve ateşe maruz kaldığında kararıp özellikleri değişse de yakıtlık özelliği yoktur. Oldukça hafif, dayanıklılık/ağırlık oranı çok yüksek, kırılma-delinme direnci çok yüksek, çekmeye, basmaya ve kaymaya mukavim, burulmaya ve eğilmeye müsade eden ama plastik şekil değiştirmeyen bir malzemedir. Ayrıca bu katmanın ısı yalıtımı çok yüksektir. Fiber-reçine kompozit katmana ilişkin resimler, Resim 3.11 ve Resim 3.12'de sunulmuştur.



Resim 3.11. Fiber-reçine kompozit katman



Resim 3.12. Fiber-reçine kompozit katman

Ytong katman ve kompozit katmanlar özel, ısı yalıtımlı bir harç kullanılarak birleştirilmiştir. Taban parçası üzerine ytong bloklardan arka duvar ve 2/3 yan duvarlar örülerek üzerine konsol tavan yapıştırılmıştır. Bu üretim metodu sayesinde duvardan-duvara tam 90 cm'lik (+/-3 mm) bir uzunluk elde edilmiştir. Ayrıca duvarlarda eğiklik veya çarpıklık yoktur. Tamamlanan gövdenin içi yanmaz, ısı yalıtımlı sıva ile üç kat sıvanmış, gövdenin dışı ise ısı yalıtımlı sıva ile 4 kalın kat sıvanmıştır. Yapımı tamamlanan istasyon oksijen kaynağı ile test edilip ısı yalıtımı ve ateş dayanımı test edilmiştir. Test sonucunda bir dakika ateşe maruz kalan bölge kararırken, arkasında kalan bölgedeki ısı artışı 10 °C'yi aşmamaktadır. Test işleminden sonra istasyonun içine bir kat daha ince yanmaz ve ısı yalıtımlı sıva uygulanarak ateş izleri kapatılmış, istasyonun dışı ise beyaz tavan boyası ile boyanarak görsel kaçak tespiti yapılabilmesi sağlanmıştır. Resim 3.13'de bitmiş istasyon ve Resim 3.14'te tüm parçalar görülmektedir.



Resim 3.13. İstasyon ana gövde (ters)

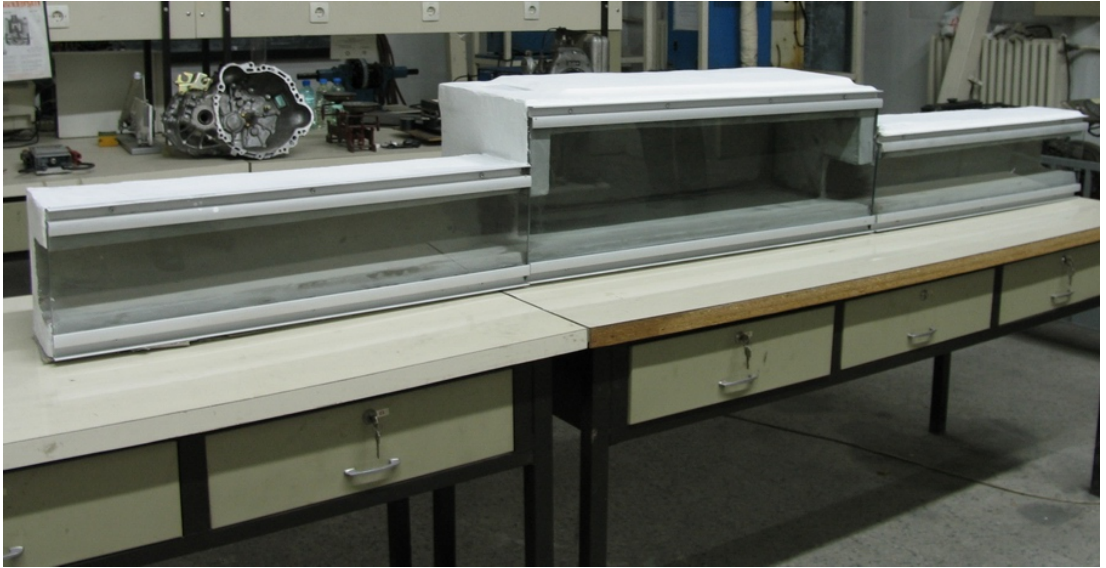


Resim 3.14. İstasyon ana gövde ve beton tüneller

İstasyon modeli parçalar halinde Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'ne ait İçten Yanmalı Motorlar ve Otomotiv laboratuvarı'na getirilmiş ve orada birleştirilmiştir. Parçalar yapıştırıcı sıva kullanılarak sızıntı oluşmayacak şekilde bir hat üzerinde birleştirilmiştir. Sistemin birleşmiş hali Resim 3.15 ve Resim 3.16'da verilmiştir.



Resim 3.15. Montajlanmış istasyon modeli



Resim 3.16. Montajlanmış istasyon modeli

3.3. Deney Seti, Kurulum ve Ölçüm Cihazları

Ateş dayanıklı istasyon modeli, bir dizi deneyde kullanılabilmesi amacıyla modifiye edilmiş ve bir dizi ölçüm cihazı ile donatılmıştır. Gerçek bir Ankaray istasyonunun hem boylamasına hem de enlemesine simetrik olduğundan hareketle, yarım bir istasyon modelinde giriş tüneli seçiminin dummy parametre (etkisiz parametre)

olduğu kabulü yapılmış ve modelin camlı tarafından bakıldığında sol tarafta kalan tünel, trenin istasyona giriş yönü olarak seçilmiştir. Modelin camlı tarafından bağldığında sağ tarafta kalan tünel ise “çıkış” tünelidir. Trenin oluşturduğu piston etkisini incelemek maksadı ile sol taraftaki tünelin (giriş tüneli) girişine akım düzelticili rotasyonel bir fan yerleştirilmiş, sonra akı kapasitesini artırabilmek ve uniform akım koşullarını daha iyi sağlayabilmek maksatları ile bu fan blow-off tipi endüstriyel bir fanla değiştirilmiştir. Giriş tünelinin arka duvarına istasyon girişinden yaklaşık 10 cm öncesine bir slot açılmış ve buraya 600 °C sıcaklığa dayanıklı bir pitot tüpü yerleştirilmiştir. Slot daha sonra harç ile kapatılarak tünel içindeki akışın kanama yapması engellenmiştir. Çıkış tünelinin arka duvarına ise benzer bir slot istasyon çıkışından 33 cm mesafede açılmış (çıkış tüneli toplam boyunun 1/3’ü mesafesi) ve bir başka 600 °C sıcaklığa dayanıklı pitot tüpüde bu slota yerleştirilmiştir. Çıkış tünelindeki slotta ısıya dayanıklı sıva ile kapatılarak sistemden sızıntılar minimize edilmeye çalışılmıştır. Tünel merkezlerine yerleştirilen bu pitot tüpleri sayesinde giriş tüneline istasyona giren akışın hızı ve debisi ile çıkış tünelineki akımın hızı ve debisi ölçülebilmektedir.

İstasyon arka duvarına ölçüm problemleri yerleştirebilmek maksadı ile 3x3’lük matris formunda dokuz delik delinmiştir ve orta hat üzerine ek ölçüm yapabilmek maksadı ile fazladan iki delik daha açılmıştır. 3x3’lük prob deliklerinin en alt sırası istasyon zemininden 3,5 cm yukarıda kalmaktadır. Tüm delik sıralarında orta delik istasyon merkezinde yer almaktadır ve orta deliğin her iki tarafında, 35 cm mesafede kenar prob delikleri yer almaktadır. İkinci sıra ise ilk sıradan 8,5 cm, tabandan ise 12 cm yüksekte konumlandırılmıştır. Orta hattın 8,5 cm üzerinde ise üçüncü ve son sıra bulunmaktadır. Orta hat üzerindeki deliklere ayrıca manşon geçirilmiştir. Ölçüm problemlerine desteklik ve yataklık yapması maksadı ile duvarda açılan prob delikleri ile uyumlu prob yataklarına sahip bir çelik jig imal edilmiştir. Jig sayesinde kullanılmak istenen problemleri birbirlerine göre sabitlemek ve beraberce hareket ettirmek olanaklıdır. Jig tekerlekli bir platformun üzerine montelidir ve üzerindeki tüm ekipmanla beraber rahatça hareket edebilmektedir.

İstasyon içerisinde yanma deneyleri yürütüldüğünden istasyon hacmi içindeki sıcaklık dağılımı ve değişimi en önemli inceleme parametresidir. İstasyon içerisinde yanma esnasındaki sıcaklık değişimlerini zamana bağlı olarak elde edebilmek maksadı ile Elimko marka 32 kanallı bir kontrol ünitesi ve bu üniteye bağlı 8 adet 900 °C'ye dayanıklı K-tipi ısıl çift jig üzerine merkez boş kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bir başka 900 °C'ye dayanıklı K-tipi ısıl çift ise çıkış tüneline yerleştirilerek, çıkış tüneli içindeki sıcaklıklar da kayıt altına alınmıştır. Elimko 32 kanal kontrol ünitesi, üzerine bağlı 9 kanal haricinde bütünleşik bir ısıl çift sayesinde ortam sıcaklığını da ölçebilmektedir. Deneylerde kullanılan Elimko kontrol ünitesi ve gereçleri, kablolar ve ısıl çiftler Resim 3.17, Resim 3.18 ve Resim 3.19'da görülmektedir.



Resim 3.17. Elimko kontrol ünitesi, bilgisayar bağlantı ünitesi, yazılım disk ve kablolar



Resim 3.18. Isıl çiftler (1, 2 ve 3 nolu kanallar)



Resim 3.19. Isıl çiftler (4 - 9 nolu kanallar)

İstasyon içerisindeki boylamasına hava hızlarının ölçülmesi hem istasyon içindeki piston etkisi (veya mekanik ventilasyon) kaynaklı akışın karakteri hakkında fikir sahibi olabilmek, hem de istasyon içi hareketliliğin ısı dağılımına etkilerini yorumlayabilmek açılarından önemlidir. Bu nedenle istasyon içindeki 3x3'lük matrisinin tam ortasında ölçüm almak için Testo markalı çok işlevli bir ölçüm probu kullanılmıştır. Resim 3.20'de görülen bu multiprob, 1200 °C sıcaklığa kadar hem sıcaklık, hem de fark basınç ölçümleri yapabilen özel bir pitot tüpüdür. Bu ölçüm probu sayesinde 3x3'lük ölçüm matrisinin her noktasında sıcaklık, merkez noktasında ise sıcaklık ve boylamsal hız ölçmek olanaklı hale gelmiştir.



Resim 3.20. Testo multiprob

Tüm deney setinde akım hızı ölçmek için kullanılan Testo markalı ölçüm gereçleri Resim 3.21'de gösterilmiştir.



Resim 3.21. Transducer birimleri, Testo multiprob ve pitot tüpleri

Pitot tüpleri ile yapılan hız ölçümlerinde belirlenen hız büyüklükleri, tüplerin yapısı nedeni ile, sadece tünel boyu doğrultusundadır ve girişten çıkışa yönlüdür. Tünellerdeki ve istasyondaki yanal ve dikey hareketlere dair hızlar ölçülmemiştir.

Giriş ve çıkış tünellerindeki pitot tüplerinin transducer birimleri ile Testo multiprob, Testo-454 logger'a bağlanmaktadır. Logger ise Testo-350XL/454 kontrol ünitesine bağlanmaktadır. Testo-454 logger'dan gelen tüm veriler kontrol ünitesi aracılığıyla bilgisayara aktarılabilmektedir. Testo-454 logger ve Testo-350XL/454, Resim 3.22'de görülmektedir.



Resim 3.22. Testo-350XL/454 kontrol ünitesi ve Testo-454 logger

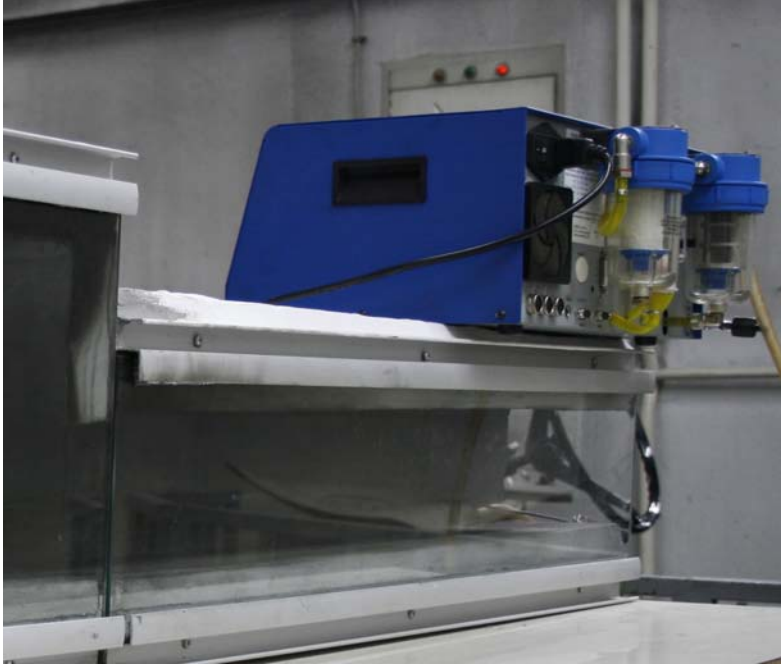
Yanma deneyleri sırasında, yanmanın performansını anlayabilmek ve istasyon içerisindeki ortamın canlı yaşamına uygun olup olmadığını belirleyebilmek amacıyla yanma sonucu ortaya çıkan emisyon değerleride çıkış tüneline ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Emisyon değerleri SUN MGA 1200 gaz analiz cihazı (Resim 3.23) ile ölçülmüş, bir kısım deneyde ise NO_x emisyonlarını da belirlemek amacıyla Capelec gaz analiz cihazı (Resim 3.24 ve Resim 3.25) kullanılmıştır.



Resim 3.23. Sun MGA 1200 gaz analiz cihazı

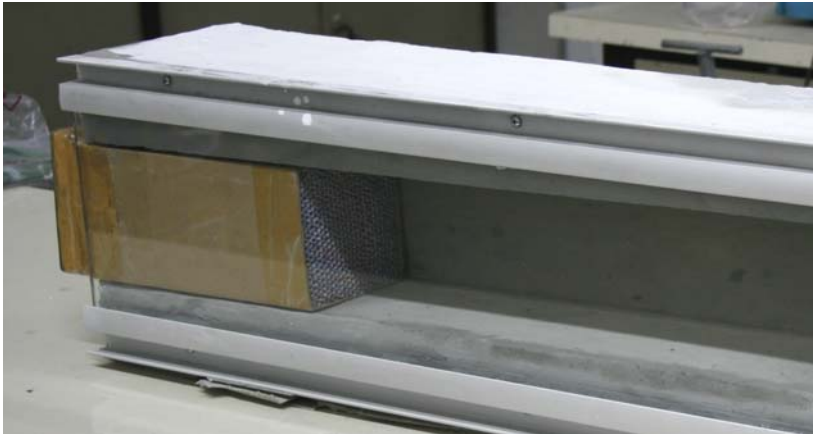


Resim 3.24. Capelec gaz analiz cihazı (ön yüzü)



Resim 3.25. Capelec gaz analiz cihazı (arka yüzü)

Deney setinde giriş tüneline uygun olacak şekilde yaklaşık 20 cm uzunluğunda bir akım düzeltici kutu yerleştirilmiştir. Bu sayede rotasyonel fanda üretilen hava akımı, yaklaşık 15 cm'lik bir mesafede fan göbeği arkasında kalan boş bölgeyi doldurabilmekte ve rotasyonel olarak 6 cm uzunluğundaki akım düzeltici peteklere ulaşmaktadır. Peteklerden geçen akım rotasyonel karakterini kaybetmekte ve uniform akış benzeri bir giriş akımı elde edilebilmektedir. Akım düzeltici kutu Resim 3.26'da, montajlı deney seti Resim 3.27'de görülmektedir.

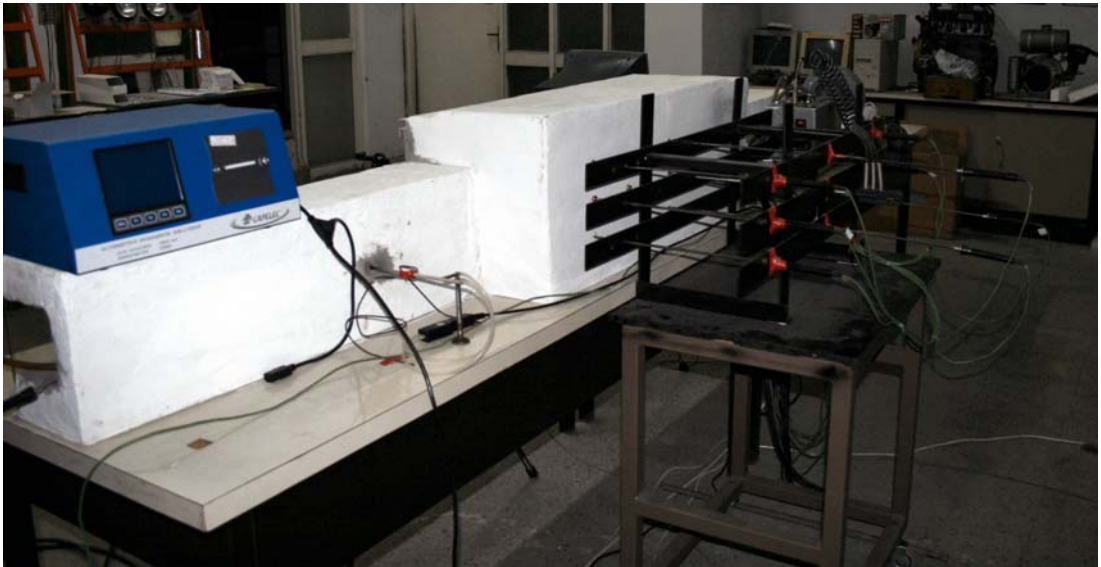


Resim 3.26. Akım düzeltici kutu



Resim 3.27. Montajlı deney seti

Deney seti içindeki akımı görüntülemek maksadı ile bir kısım deneyde duman makinası kullanılarak görselleştirilmiş akım oluşturulmuştur. Bu sayede istasyon içindeki akışın karakteri daha iyi anlaşılmıştır. Tüm ölçüm cihazları, kullanılan blow-off fan, duman makinası ve jig, deney setinin kurulmuş haline ait fotoğraflar olan Resim 3.28, Resim 3.29 ve Resim 3.30’da görülmektedir.



Resim 3.28. Deney seti (çıkış tüneli tarafı)



Resim 3.29. Deney seti (giriş tüneli tarafı)



Resim 3.30. Deney seti (ölçüm cihazları, duman makinası)

3.4. Akış ve Yanma Deneyleri

Kapalı bir hacimde alev karakteri, hava akımlarının aleve olan etkileri, zorlanmış akış olan ve olmayan durumlarda hacim içi ısı dağılımları ve istasyon modeli içerisinde çeşitli giriş hızları için akım hareketleri yürütülen deneyler kapsamında incelenmiştir. 1 m/s ve 3 m/s istasyona giriş hızları için sisteme duman gönderilerek yanmasız durumda akış görüntülenmiş ve elde edilen sonuçlar bilgisayar simülasyonlarının başarısı irdelenirken kullanılmıştır.

Yanma deneylerinde kullanılması gereken havuz boyutlarının tespiti için bir dizi katı yakıtlı deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin bazılarına ait fotoğraflar kolajlı halde aşağıda verilmiştir¹.



Resim 3.31. Katı yakıt ile ventilasyonsuz ve ventilasyonlu durumlar

¹ Deneylere ait fotoğrafların tamamı D-SLR fotoğraf makinası ile yüksek çözünürlükte çekilmiştir.



Resim 3.32. Katı yakıt ile ventilasyonsuz durum



Resim 3.33. Arttırılmış miktarda katı yakıt ile ventilasyonsuz durum



Resim 3.34. Arttırılmış miktarda katı yakıt ile düşük hızlı ventilasyon durumu



Resim 3.35. Arttırılmış miktarda katı yakıt ile yüksek hızlı ventilasyon durumu



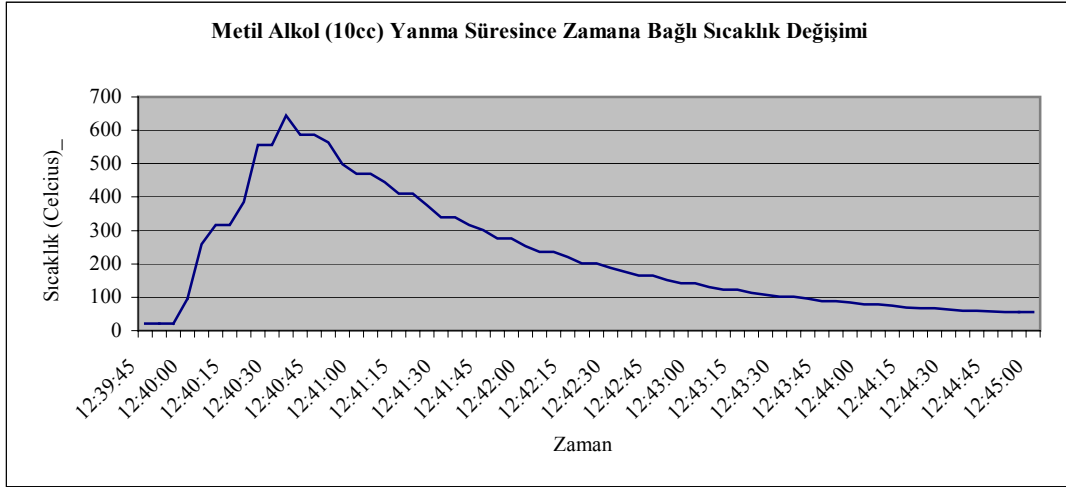
Resim 3.36. Durağan haden yüksek ventilasyona ani geçiş durumu

Yapılan katı yakıt deneyleri sonucunda akışın nerelerde ateşe etkili olduğu belirlenmiş, tipik bir yangını temsil edebilecek yakıt havuzu ölçüleri tespit edilmiştir. Ayrıca $u < 0,8$ m/s ve $u > 3$ m/s durumları için ateş karakterleri gözlenmiş, deneylerin hangi ventilasyon hızlarda yapılabilceğine ilişkin çıkarımlarda bulunulmuştur.

İstasyon modelinde yapılan deneylerde yangın, 5x10x0,4 cm (en, boy, derinlik) ebatlarındaki bir yangın havuzunun içindeki yakıtın yakılması ile temsil edilmiştir. Havuzların yapısında alüminyum folyo kullanılmış, her seferinde özdeş havuzlar imal edebilmek için köpük kalıp üzerine sarma metodu kullanılmıştır. Yanma sırasında havuzun çarpılmasını önlemek için her havuzda metal iskelet kullanılmıştır. Bir havuz en fazla üç yanma deneyinde kullanılabilen, daha sonrasında yüksek sıcaklık ve diğer etkilerden dolayı delinmekte veya deforme olmaktadır.

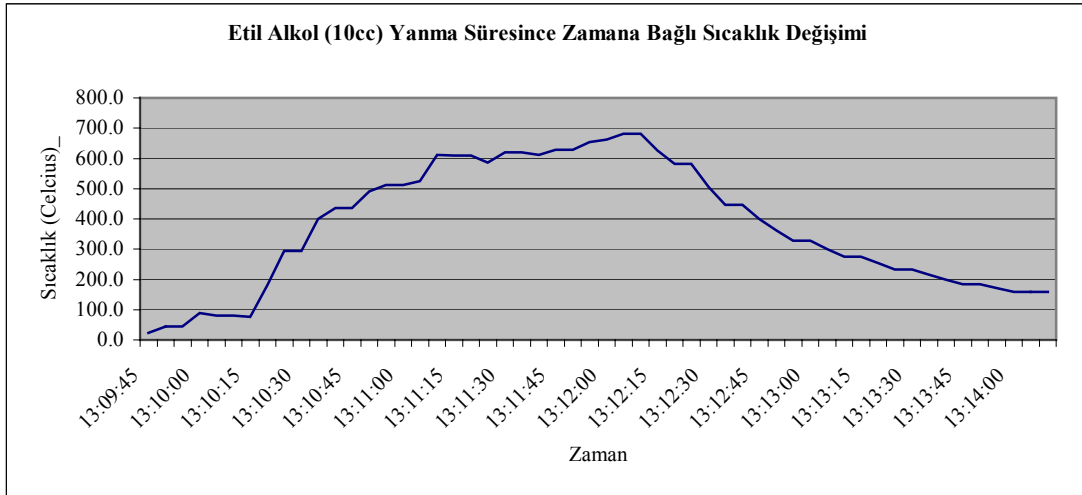
3.4.1. Yakıt deneyleri

Deneyler sırasında yanmanın temsili için kullanılacak yakıtları seçebilmek için bir dizi yakıt testi yapılmıştır. Yakıt testlerinde 5x10x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzlarında 10 cc hacimlerinde farklı yakıtlar yakılmış, yanma süresi, yanma süresince ulaşılan en yüksek sıcaklıklar, kurum oluşumu ve alev görünürlülüğü gibi unsurlar incelenmiştir. Tüm bu verilerin doğrultusunda deneylerde kullanılmaya en uygun iki yakıt seçilmiştir. İncelenen yakıtlar sırası ile metil alkol (CH_3OH - methanol), etil alkol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ - ethanol), iso-propil alkol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ veya $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ - isopropanol), 95 oktan kurşunsuz benzin, mazot ve n-heptan ($\text{H}_3\text{C}(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$ - dipropil metan) olarak sayılabilir. Testler, yakıt havuzu çevresi tamamen boş, hava akımsız ve çok geniş bir alanda (alev hacmine göre çok çok büyük hacim) yapılmış, sıcaklık ölçümleri yakıt havuzu yüzeyine 5 cm mesafede duran bir ısı çifti aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Metil alkol (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)

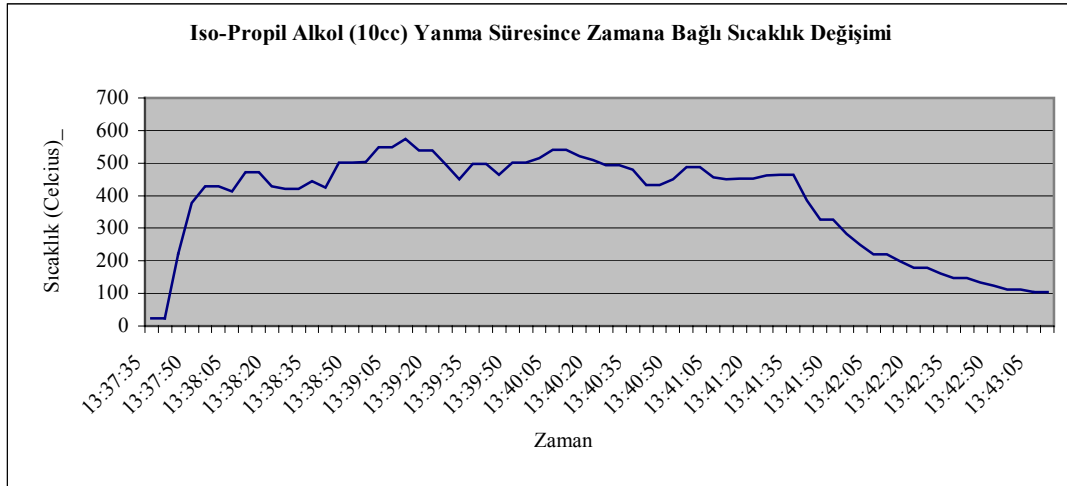
Metil alkole ilişkin sıcaklık ve yanma süresi grafiği Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Metil alkol renksiz, mavi-renksiz bir alevle yanmaktadır. Yanma tepkimesi oldukça kolay başlatılabilmekte, yanma sırasında hiç kurum çıkartmamaktadır.



Şekil 3.2. Etil alkol (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)

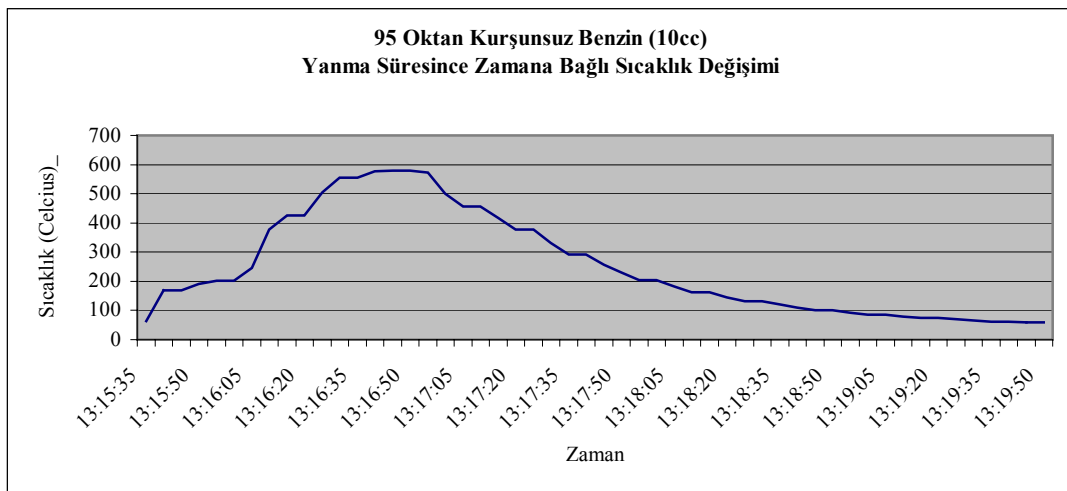
Etil alkole ilişkin sıcaklık ve yanma süresi grafiği Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Etil alkol mavi-renksiz, bazen alev uçları turuncu bir alevle yanmaktadır. Yanma tepkimesi oldukça kolay başlatılabilmekte, yanma sırasında neredeyse hiç kurum

çıkartmamaktadır. Ayrıca etil alkol, metil alkole kıyasla daha yavaş yandığı görülmüştür.



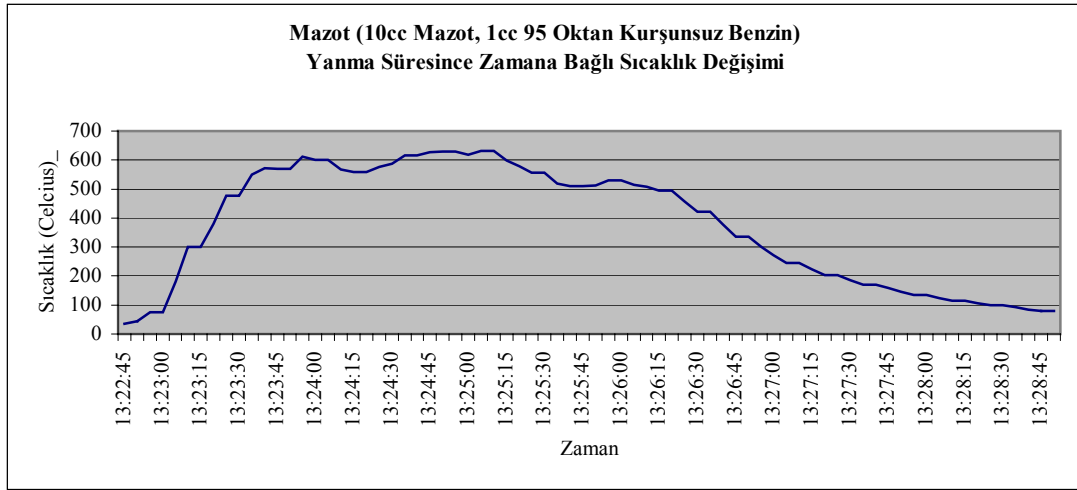
Şekil 3.3. İsopropil alkol (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)

İsopropil alkole ilişkin sıcaklık ve yanma süresi grafiğı Şekil 3.3'te gösterilmiştir. İsopropil alkol turuncu-kırmızı oldukça görünür bir alevle yanmaktadır. Yanma tepkimesi oldukça kolay başlatılabilmekte ve yanma sırasında neredeyse hiç kurum çıkartmamaktadır. Yanma oldukça gürbüz ve kararlıdır. Alevin çok görünür olması ve cam izleme yüzeylerini karartacak düzeylerde kurum oluşturmaması nedenleri ile görsel kayıt yapılan deneylerde isopropil alkol yakıt olarak kullanılabilir.



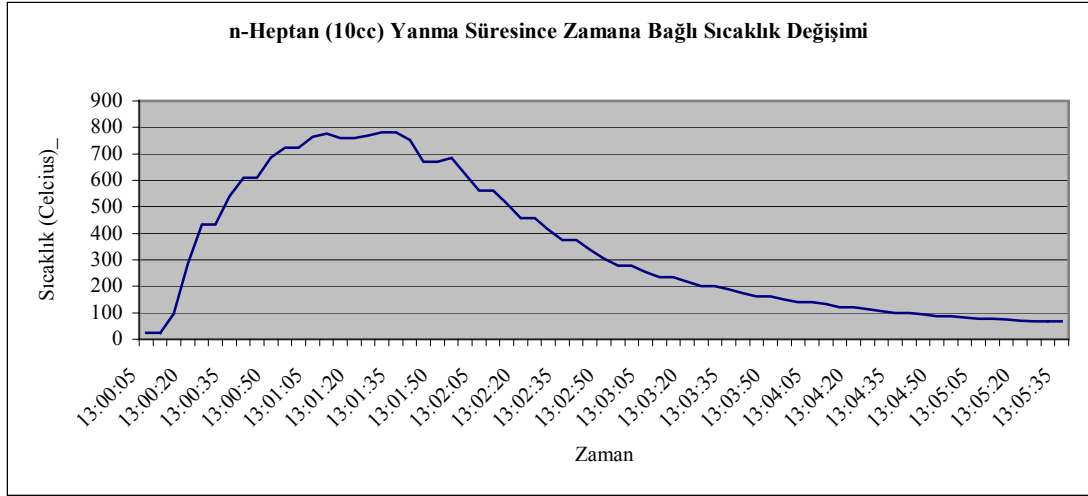
Şekil 3.4. 95 oktan kurşunsuz benzin (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)

95 oktan kurşunsuz benzine ilişkin sıcaklık ve yanma süresi grafiği Şekil 3.4'te gösterilmiştir. 95 oktan kurşunsuz benzin turuncu-kırmızı, parlak ve oldukça görünür bir alevle yanmaktadır. Yanma tepkimesi oldukça kolay başlatılabilmekte ve yanma sırasında oldukça yoğun, yağlı ve kurumlu duman oluşumu gözlenmektedir. Yanma oldukça gürbüz ve kararlıdır. Yakıtın ilk ateş alması parlama şeklindedir. Benzin içindeki maddelerin formülasyonunun ve derişiminin temin edilen firmaya ve zamana göre değişiyor olması yanma deneylerindeki tutarlılığı sağlamak açısından istenmeyen bir özelliktir.



Şekil 3.5. 10cc mazot, 1cc kurşunsuz benzin (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)

10 cc mazot ve 1 cc kurşunsuz benzin karışımına ilişkin sıcaklık ve yanma süresi grafiği Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Yakıt havuzuna konulan mazot ateşleme meşalesi ile yakılamadığından, yakıt havuzuna ön ateşleyici olarak 95 oktan benzinden 1 cc ilave edilmiştir. Mazotun alev alması; yanma tepkimesinin başlatılabilmesi için yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. Kırmızı-parlak, üst katmanlar koyu gri olarak gözlenen mazot alevi oldukça güçlü, kararlı ve enerjilidir. Yanma sırasında son derece yağlı, kurumlu ve kesif bir duman oluşmaktadır. Yanma sonucu oluşan yoğun ve yağlı kurum nedeni ile görsel kayıt yapılan deneylerde kullanılması uygun değildir. Ayrıca saf halde reaksiyonu başlatmadaki güçlükler de mazot ile çalışmayı güçleştirmektedir.



Şekil 3.6. n-Heptan (zamana bağlı sıcaklık eğrisi)

n-Heptan için sıcaklık ve yanma süresi grafiği Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Yanma sonucunda oluşan alev turuncu-kırmızı tonlarındadır. Alevin üst kısımlarından bir miktar kuru kurum çıkmakla beraber, mazot ve benzine nazaran oldukça temiz yanmaktadır. Yapılan deneyler içerisinde en yüksek sıcaklık pik değerine n-heptan ile ulaşılmıştır. n-Heptan saf bir yakıt olduğundan zamanla derişimi değişmez, yanma sırasındaki özgül ısıl yayılım oranı (HRR) yanmadan yanmaya fark etmez. Yanma sonucu oluşan alev oldukça güçlü, kararlı ve görünürdür ayrıca yakıt kolay ateş almaktadır. Literatür incelemelerinde, pek çok çalışmada yakıt olarak n-heptanın kullanıldığı görülmüştür ve bu çalışmada da bir kısım deneyde yakıt olarak n-heptan kullanılmıştır.

Farklı miktarlarda (5 cc ve 10 cc) ve 6 farklı yakıtla yapılan yakıt deneyleri sonunda, kapalı bir hacimdeki yanmanın görsel olarak incelenmesine en uygun olan iki yakıt olarak iso-propil alkol ve n-heptan seçilmiştir. İso-propil alkol, etil alkol ve metil alkole göre biraz kurumlu yanmakla beraber, denenen yakıtlar içinde ateşi en net görülebilen alkol grubu yakıttır. n-Heptan ise hem sahip olduğu yüksek ısı kapasitesi, hem de ateşinden kuru ve görece az kurumlu duman çıkartma özellikleri ile yanma deneylerinde benzin ve mazota iyi bir alternatif olarak belirlenmiştir. Ayrıca sayısal simülasyonlarda, tamamen saf yakıtlar olan iso-propil alkol ve n-heptanın yakıt olarak tanımlanması hem daha kolay hem de benzin ve mazota göre daha tutarlıdır.

3.4.2. Akış deneyleri

Çeşitli ventilasyon hızlarında istasyon içindeki akış, duman makinası ile sisteme çeşitli yerlerden duman verilerek görselleştirilmeye çalışılmıştır. Akış deneylerinde akışı görselleştirmek amacıyla kullanılan duman makinası Resim 3.37’de görülmektedir.

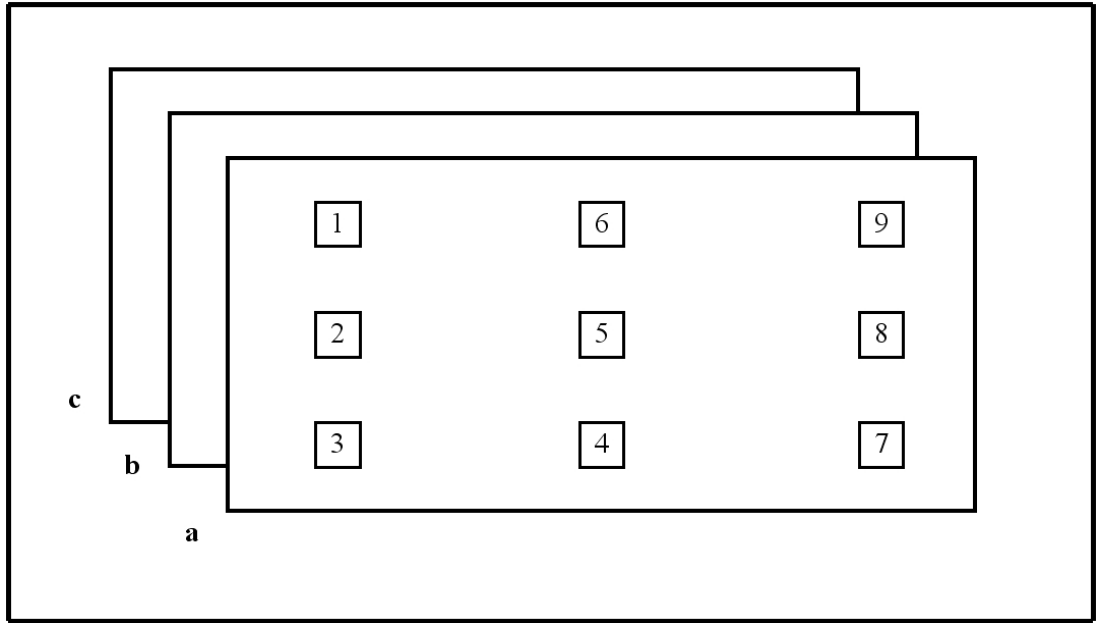


Resim 3.37. Duman makinası ve itici gaz sistemi

Kullanılan duman makinası sıcak tip olup 370-410 °C arasında buharlaştırdığı yakıtı itici gaz ile tahliye çıkışına gri ve yağlı bir duman olarak göndermektedir. Duman makinasında itici gaz olarak Resim 3.37’de görülen siyah tüpten sağlanan CO₂ kullanılmaktadır. 1 m/s ve 3 m/s hızlar için gerçekleştirilen dumanlı akış deneylerinde uygun ışıklandırma olmaması ve akışın çok hızlı olmasından kaynaklı olarak fotoğraf çekilememiştir. Deneylere ait video kayıtları bulunmakla beraber aynı nedenlerden ötürü kayıtlar çok net değildir.

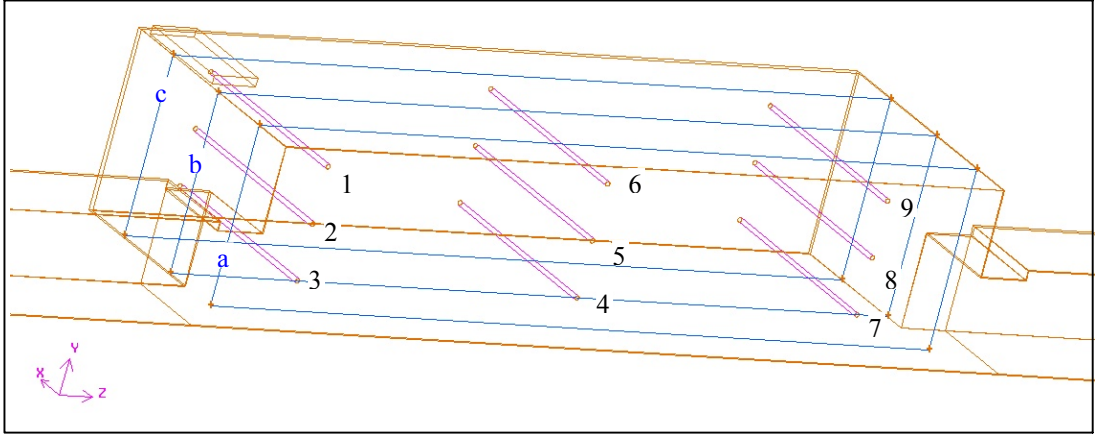
3.4.3. İstasyon içi ölçüm noktaları

Yanma deneyleri sırasında istasyon hacmi içerisinde belirlenen 3 düzlem üzerinde 9 noktadan sıcaklık ölçümleri alınmaktadır. Ayrıca belirlenen 3 düzlemin her birinde orta ölçüm noktasından Testo multiprob kullanılarak basınç farkı ölçüm yöntemi ile hız da belirlenmektedir. Ayrıca istasyon giriş ve çıkışlarında da pitot tüpleri kullanılarak hız ölçümü yapılmaktadır. Toplamda her bir yangın senaryosu için istasyon içerisinde 27 zamana bağlı sıcaklık ölçümü, istasyon genelinde 5 noktadan zamana bağlı hız ölçümü ve istasyon çıkış tüneline zamana bağlı sıcaklık ölçümü yapılmıştır. İstasyon içerisinde ölçüm yapılan düzlemler ve düzlem üzerindeki noktalar Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

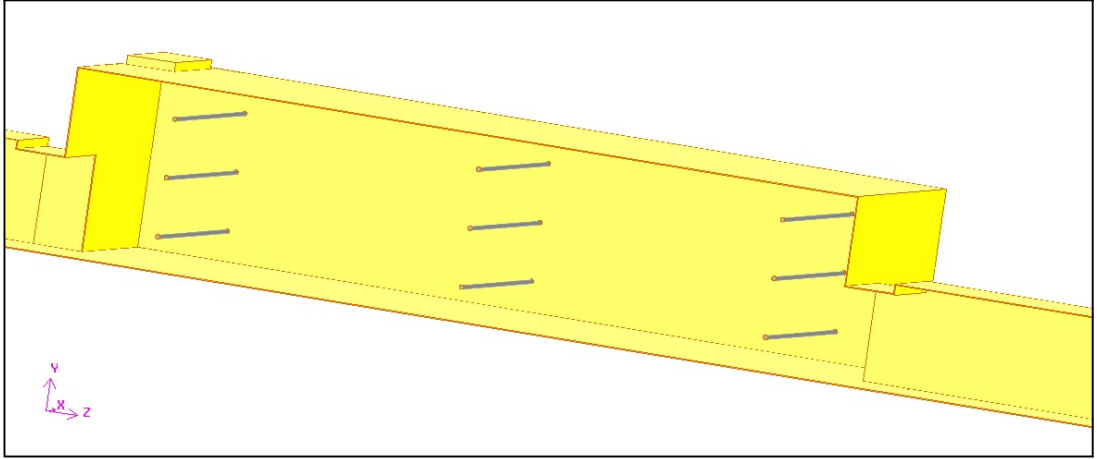


Şekil 3.7. İstasyon içerisindeki ölçüm düzlemleri ve noktaları

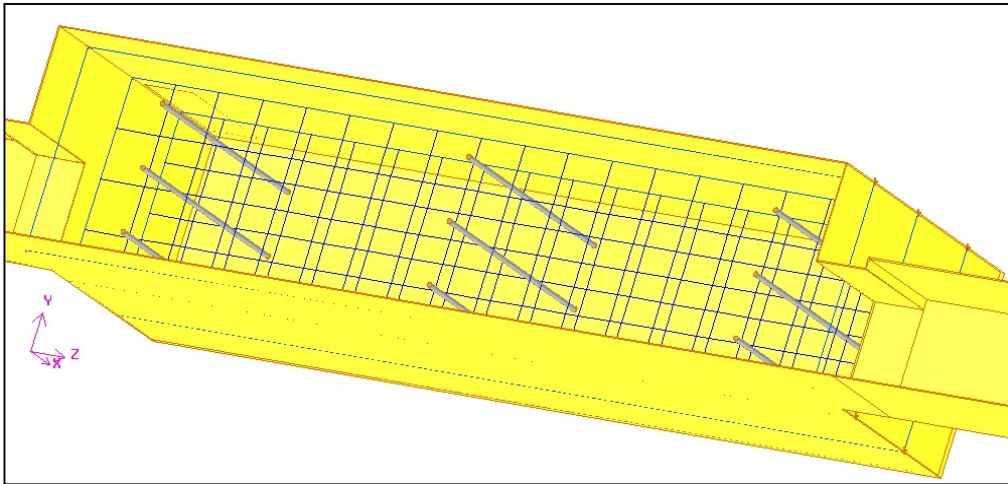
Şekil 3.7’de görünen a, b ve c düzlemleri, ölçüm alınan düzlemlerdir ve ölçüm problemlerini taşıyan jigin ileri-geri doğrusal hareketi sayesinde bir düzlemden öteki düzleme geçilir. Ölçüm alınan a düzlemi arka duvardan 26 cm, b düzlemi arka duvardan 17,5 cm ve c düzlemi ise arka duvardan 7 cm mesafededir. Isıl çiftler ve ölçüm düzlemlerinin istasyon içerisindeki pozisyonları Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmektedir.



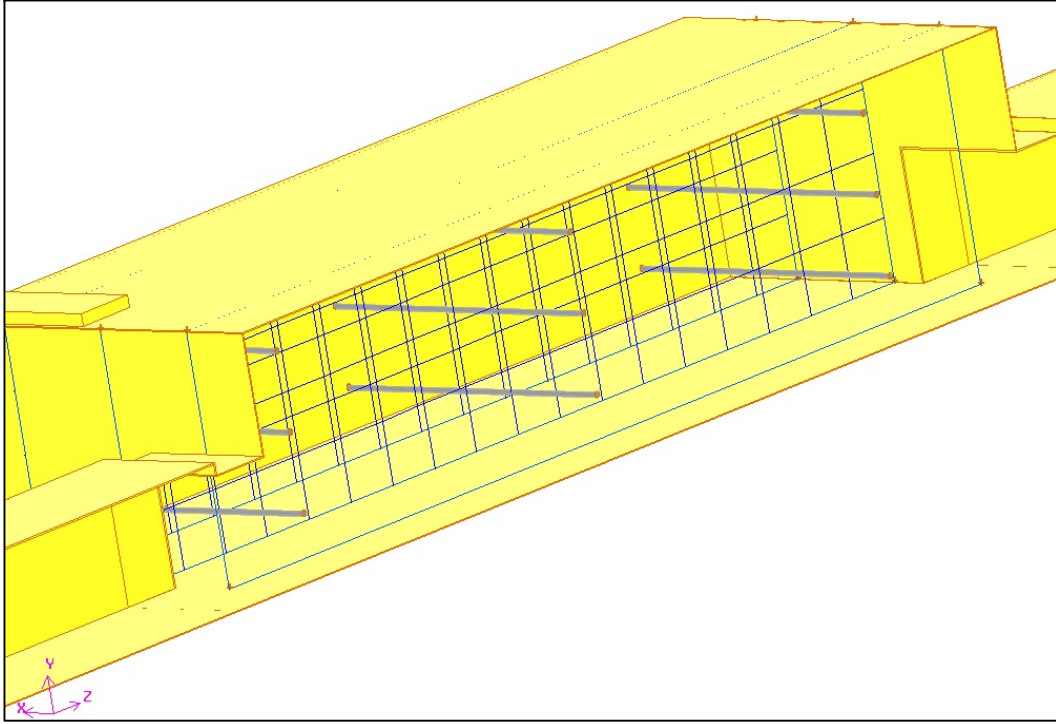
Şekil 3.8. Isıl çiftler (a ölçüm düzlemi konumu – soldan görünüm)



Şekil 3.9. Isıl çiftler (a ölçüm düzlemi konumu – sağdan görünüm)



Şekil 3.10. Isıl çiftler ölçüm düzlemleri (alttan)



Şekil 3.11. Isıl çiftler ve ölçüm düzlemleri (üstten)

İstasyon içerisinde yangın havuzları 7 ayrı konuma yerleştirilmiştir. Bu yerler sırası ile hat giriş konumu, hat merkez konumu, hat çıkış konumu, istasyon merkez konumu, istasyon arka duvar konumu, istasyon giriş duvarı konumu ve istasyon çıkış duvarı konumu olarak sayılabilir. Hat giriş konumu, camdan 6 cm içerde ve merkezin 35 cm önündedir. Hat merkez konumu, camdan 6 cm içerde ve istasyon ortasındadır. Hat çıkış konumu, camdan 6 cm içerde ve merkezin 35 cm gerisindedir. İstasyon merkez konumu, camdan 16 cm içerde ve istasyon ortasındadır. İstasyon arka duvar konumu, arka duvara 3,5 cm mesafede ve istasyon merkez hattı üzerindedir. İstasyon giriş duvarı konumu, arka duvardan 6 cm ve istasyon giriş duvarından 3,5 cm mesafededir. İstasyon çıkış duvarı konumu ise arka duvardan 6 cm ve istasyon çıkış duvarından 3,5 cm mesafededir.

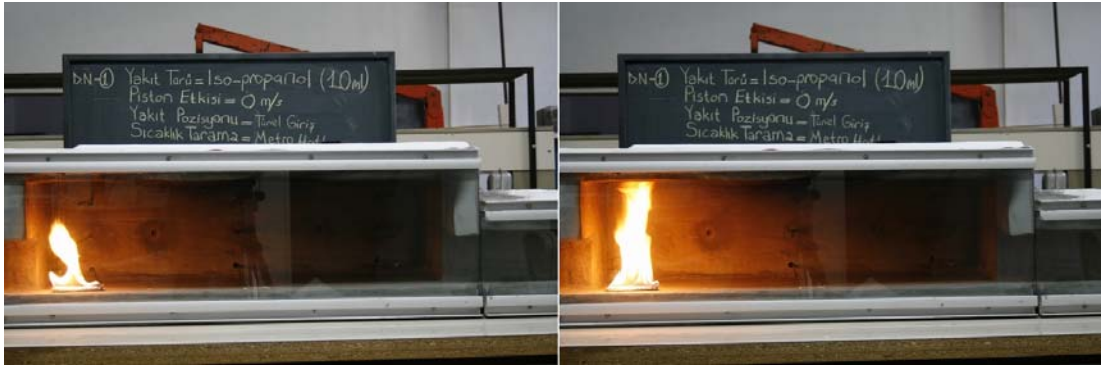
3.5. İstasyon Modeli İçerisinde İso-Propil Yakıtlı Yanma Deneyleri

İstasyon modeli içerisinde hat giriş, hat merkez, hat çıkış, istasyon merkez konumlarında ventilasyonsuz durum (piston etkisiz) için, 1 m/s piston etkisi altında

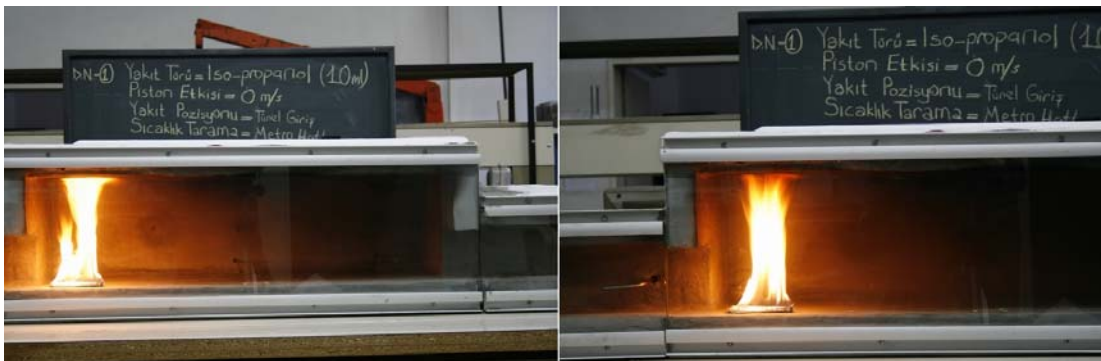
(yada uniform havalandırma) ve 3 m/s piston etkisi altında (uniform havalandırma) 10 cc iso-propil yakılmış ve zamana bağlı olarak sıcaklık ve hız değerleri ölçülmüştür.

3.5.1. Piston etkisiz durum için hat girişinde iso-propil alkol yakıtlı yanma

Zorlanmış havalandırma olmayan durumda, istasyona yanaşmış bir trenin son vagonunda çıkan yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.38, Resim 3.39 ve Resim 3.40'ta verilmiştir.



Resim 3.38. Piston etkisi olmayan durum için hat girişinde iso-propil alkol ile yanma (başlangıç ve harlanma)

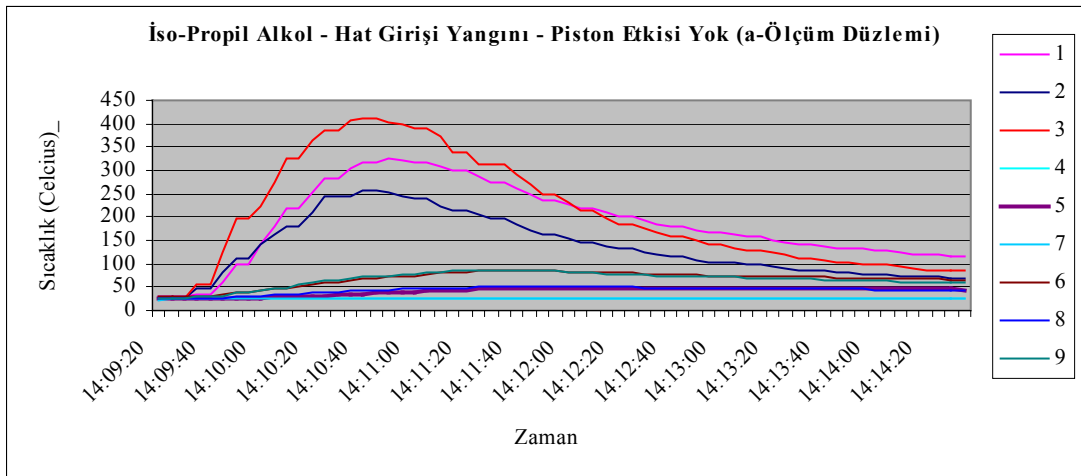


Resim 3.39. Piston etkisi olmayan durum için hat girişinde iso-propil alkol ile yanma (harlı alev ve durulmaya geçiş)

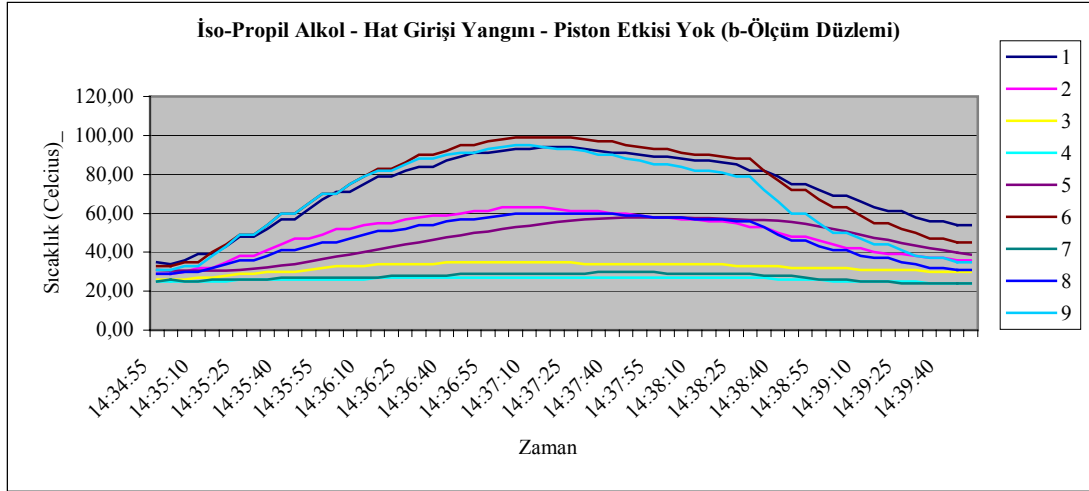


Resim 3.40. İso-propil alkol alevinin istasyon tavanına çarpması

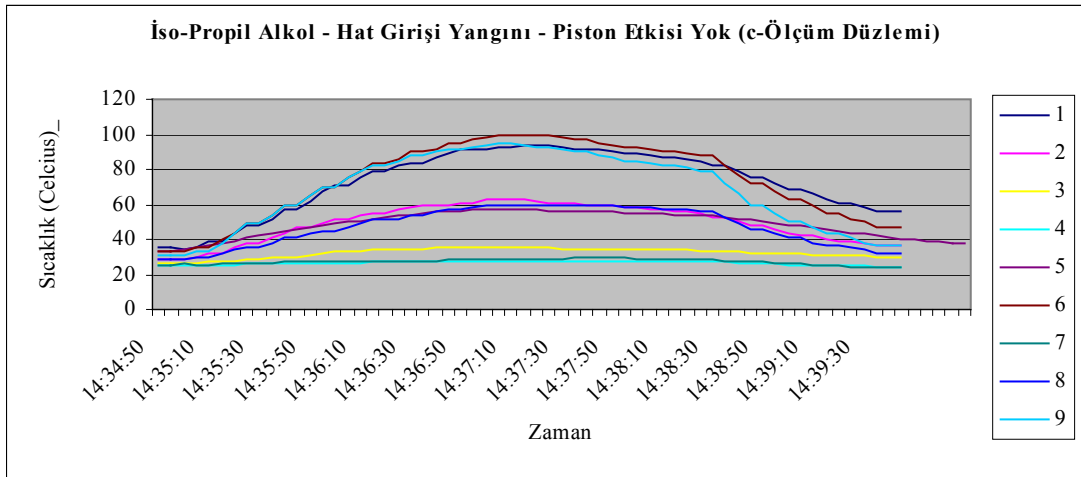
Piston etkisi olmayan durum için hat girişi konumunda yangına ilişkin sıcaklık değerleri Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.12. İso-propil alkol yakıtlı hat girişi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.13. İso-propil alkol yakıtlı hat girişi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.14. İso-propil alkol yakıtlı hat girişi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

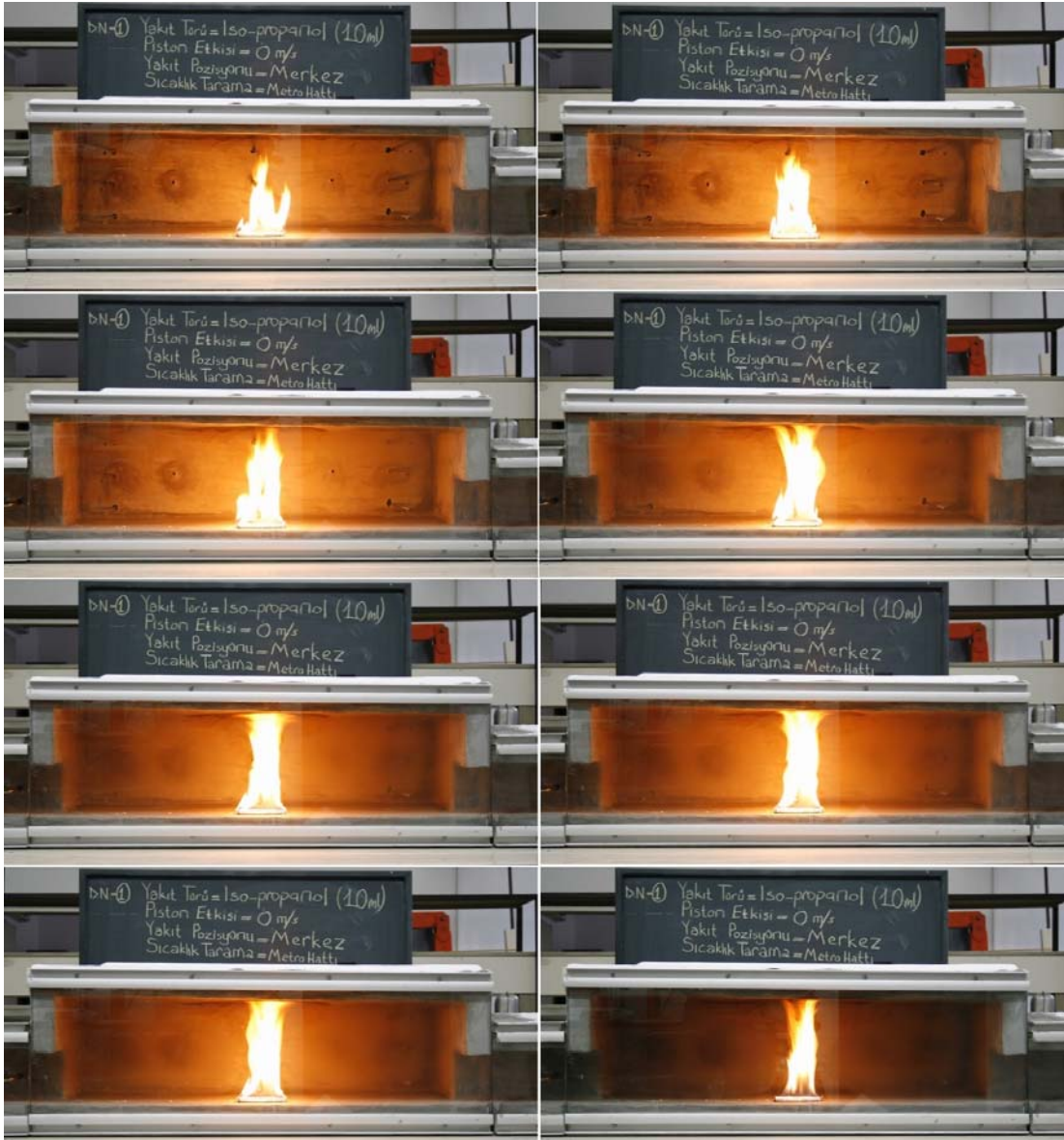
Hat girişi konumunda 10 cc hacminde sıvı haldeki iso-propil alkolün yakılması sonucunda istasyon içindeki zamana göre sıcaklık dağılımları Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te görüldüğü gibidir. Sıcaklık dağılımı grafiklerinden, piston etkisi olmaya durumda tüm sıcak gazlar istasyonun üst bölgelerine dağıldığı ve 100 °C derece civarında sıcak bir katman oluştuğu anlaşılmaktadır. Bir diğer ilginç tespit ise, yangın havuzunun üzerindeki a3 numaralı bölgenin, 400 °C derece ve üzeri değerlere ulaşarak istasyonun en sıcak bölgesi olmasına rağmen hemen arkasındaki b3 ve c3 bölgelerinin ancak 30 °C derece civarında bir sıcaklığa ulaşmasıdır. Görüldüğü üzere

hacim içerisinde buoyancy kuvvetleri dominant rol oynamaktadır. Gerçek bir istasyonda bu sıcak gazların ilk olarak konkurs seviyesine, oradanda merdiven boşluklarını kullanarak yüzeye ulaşacakları söylenebilir.

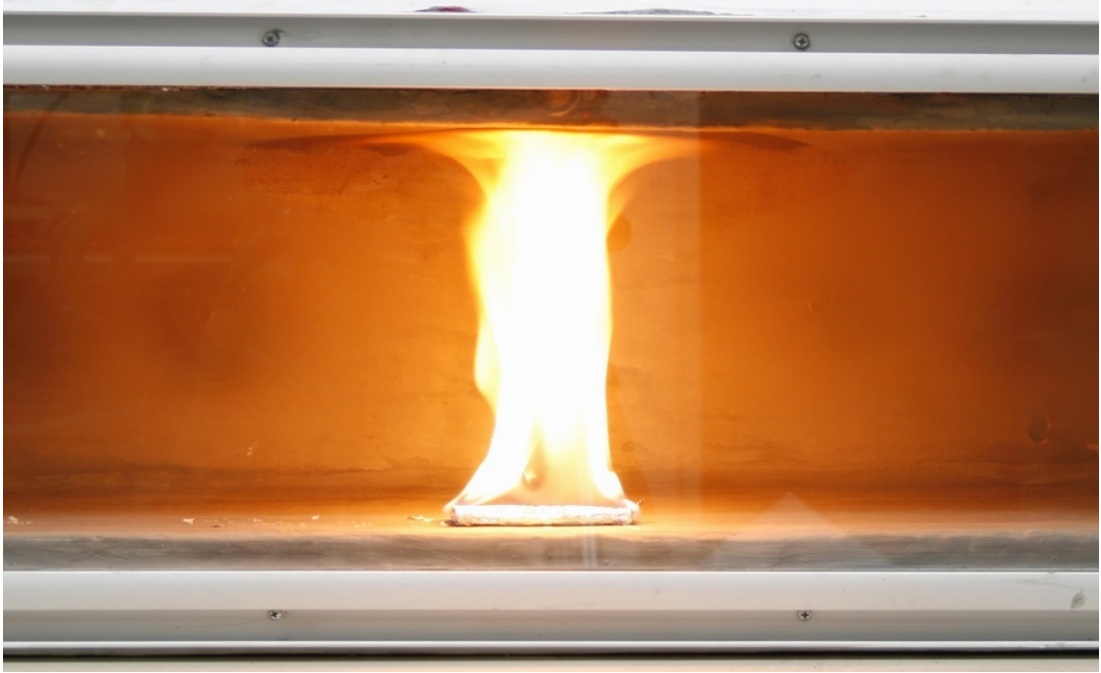
İstasyon içerisinde a5, b5 ve c5 noktalarından alınan hız değerlerinden görüldüğü kadarı ile yangının hemen arkasında (a5) hava hareketlenmesi pek olmamakta ama istasyon hacminin içlerine doğru (b5 ve c5) belirgin bir hareketlenme gelişmektedir. İstasyon içerisindeki b5 ve c5 noktalarından alınan ölçümlere göre bu noktalarda 0,6-0,7 m/s civarında çıkışa yönelmiş akış mevcuttur. SUN MGA-1200'den alınan emisyon ölçümlerinden ise çıkış tüneline 20 ppm civarı hidrokarbon, %2,47 CO₂ ve %0,02 CO olduğu belirlenmiş ve tüneldeki oksijen yüzdesinin %17,6'ya kadar gerilediği anlaşılmıştır. Çıkış tüneli sıcaklığı 24 °C derece olarak ölçülmüştür.

3.5.2. Piston etkisiz durum için hat merkezinde iso-propil alkol yakıtlı yanma

Zorlanmış havalandırma olmayan durumda, istasyona yanaşmış bir trenin orta vagonunda çıkan yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.41 ve Resim 3.42'de verilmiştir.

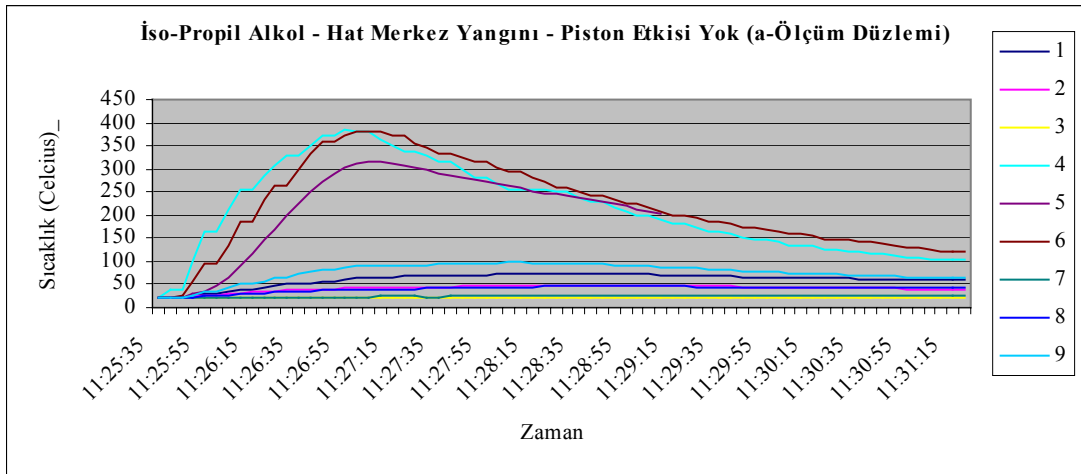


Resim 3.41. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat ortası yangın (ventilasyon yok)

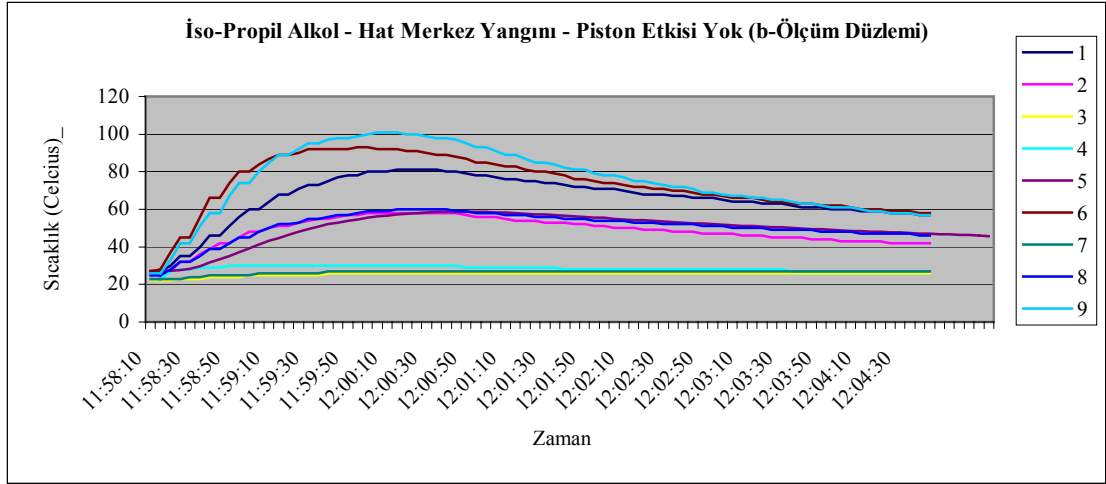


Resim 3.42. 10 cc iso-propil alkol - hat merkezi kararlı (steady) yanma

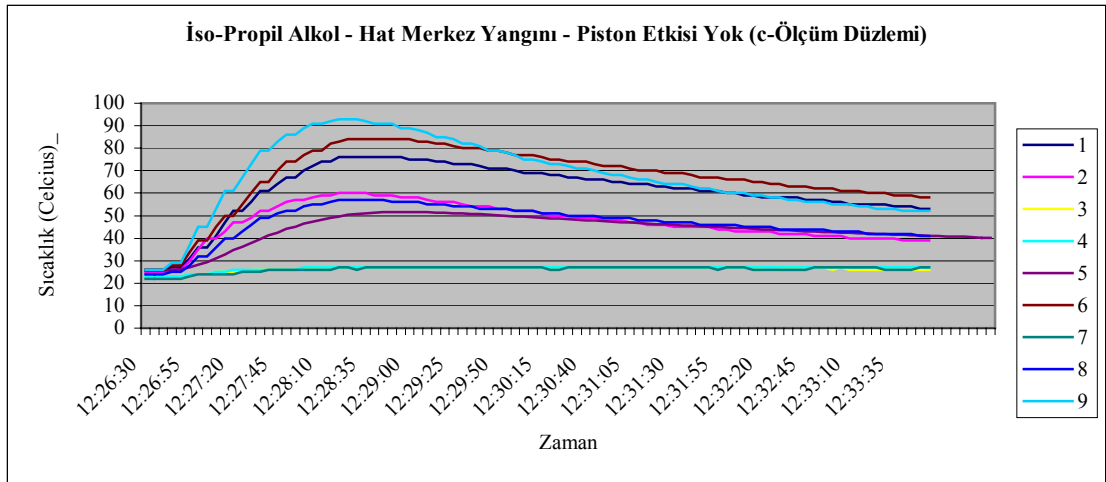
Piston etkisi olmayan durum için hat giriş konumunda yangına ilişkin sıcaklık değerleri Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.15. İso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.16. İso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.17. İso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat merkez konumunda 10 cc hacminde sıvı haldeki iso-propil alkolün yakılması sonucunda istasyon içindeki zamana göre sıcaklık dağılımları Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de görüldüğü gibidir. Sıcaklık dağılımından, piston etkisi olmaya durumda tüm sıcak gazlar istasyonun üst bölgelerine dağıldığı ve 80-100 °C dereceler civarında sıcak bir katman oluştuğu anlaşılmaktadır. Alevin üst hizası (a4, a5 ve a6), 390 °C derece mertebesinde sıcaklıklara sahiptir. Tavan ve yakıt havuzu civarından sonra en yüksek sıcaklıklar, yakıt havuzunun çevresindeki konumlarda (b2, b5, b8, c2,c5, c8) 60 °C olarak belirlenmiştir. Sıcaklık orta eksene göre

neredeşye simetrik bir dağılım göstermiştir. İstasyon içinde, a5 konumunda pertürbanslı olarak 0,6-0,9 m/s hızlara kadar çıkılırken, b5 ve c5 konumlarında yanmanın ilk başlama sürecinde anlık 1,1 m/s hızlarla hızın pik yaptığı, yanmanın tam gelişmesinden sonra ise salınım pik değerlerinin önce 0,6 m/s değerine düştüğü, ardından ölçüm hassasiyetinin altına düştüğü görülmüştür. Giriş tüneline yanma boyunca 0,6 m/s civarı hızlar kaydedilmiş, çıkış tüneli hızı 0 olarak ölçülmüştür. Giriş ve çıkış tünellerinde farklı hızlar ölçülmesinin en büyük nedeni, giriş tünelinedeki pitot tüpü tarafından tünelden istasyona doğru akış hızı ölçülürken, çıkış tüneline istasyondan çıkış tüneline doğru yönlenmiş akış hızlarının ölçülmesidir. Bu durumda istasyon merkezinde çıkan yangın sonucunda oluşan geri akışın (backflow) tünellerin orta kısımlarında etkili olmadığı, bu bölgede yanmanın oksijen tüketmesinden kaynaklı vakum etkisi nedeni ile istasyon içine doğru bir akım olduğu anlaşılmaktadır. Geri akışın (backflow) tavandan kaçması ve ateşin taban civarından emilen temiz hava ile beslenmesi durumu giriş ve çıkış tüneli için benzerdir.

Çıkış tüneline alinan emisyon ölçümlerinde 19 ppm hidrokarbon, %17,1 oksijen, %2,56 CO₂ ve %0,01 CO ölçüm sonuçları alınmıştır¹. Çıkış tüneline içindeki sıcaklık 24 °C derece olarak ölçülmüştür.

3.5.3. Piston etkisiz durum için hat çıkışında iso-propil alkol yakıtlı yanma

Zorlanmış havalandırma olmayan durumda, istasyona yanaşmış bir trenin ilk vagonunda çıkan yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.43 ve Resim 3.44'te verilmiştir.

¹ SUN MGA-1200

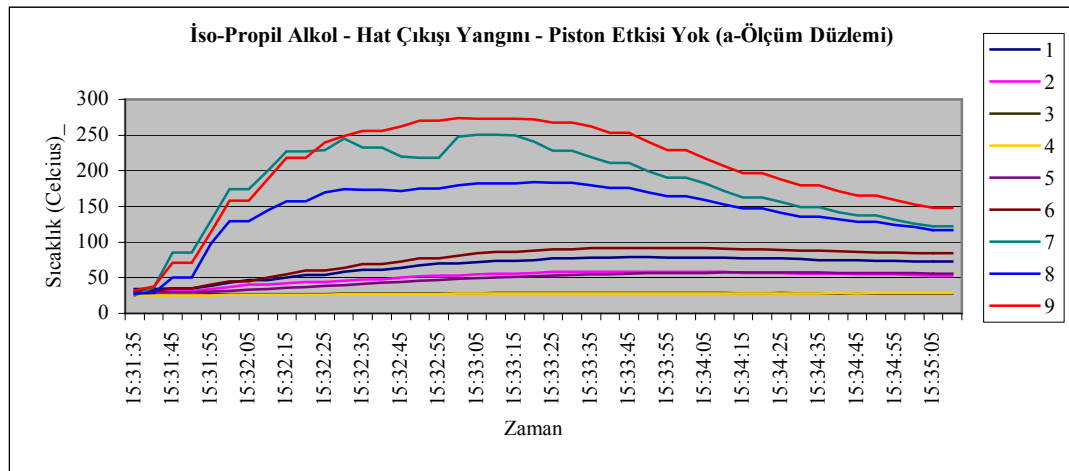


Resim 3.43. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangın (ventilasyon yok)

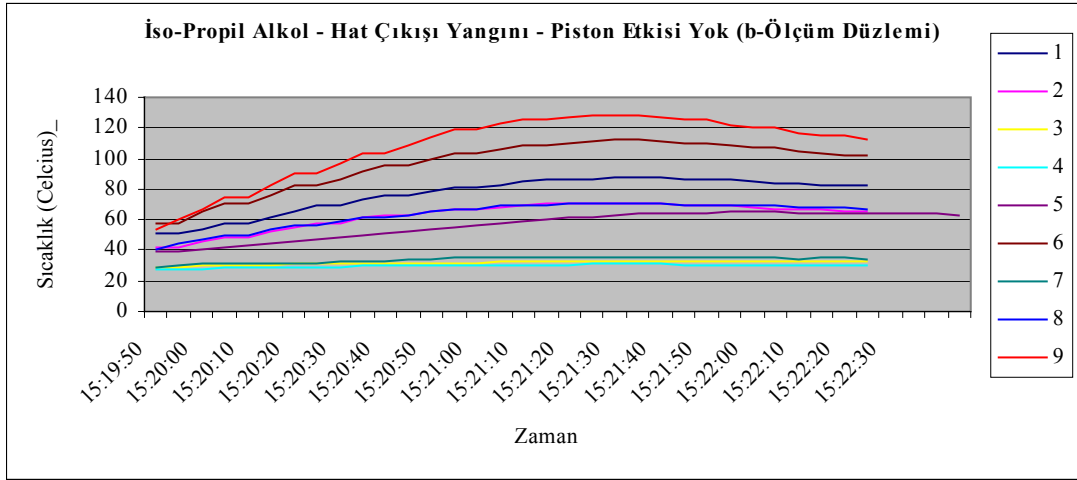


Resim 3.44. 10 cc iso-propil alkol - hat çıkışı kararlı (steady) yanma

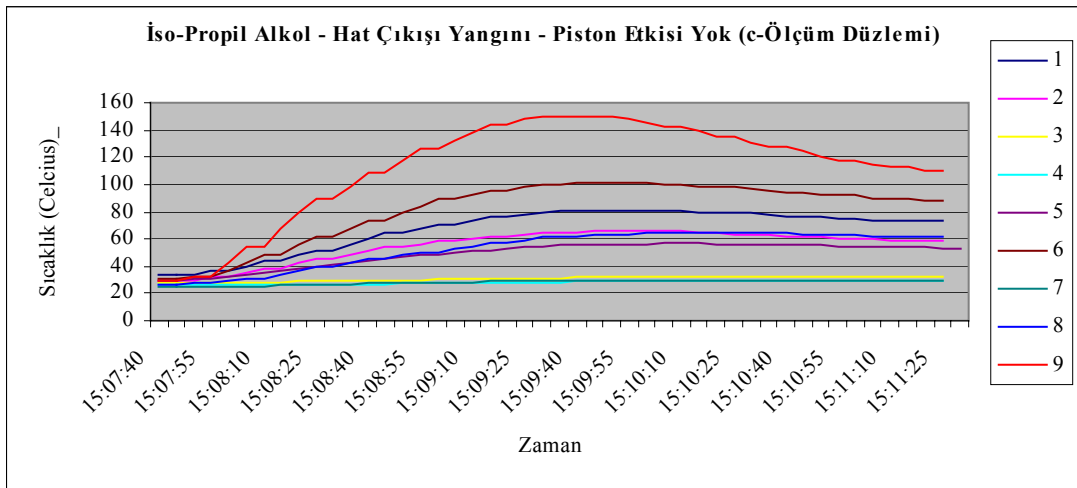
Piston etkisi olmayan durum için hat giriş konumunda yangına ilişkin zamana göre sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.18. İso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını için a düzleminde sıcaklıklar



Şekil 3.19. İso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.20. İso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat çıkış konumunda 10 cc hacminde sıvı haldeki iso-propil alkolün yakılması sonucunda istasyon içindeki zamana göre sıcaklık dağılımları Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de görüldüğü gibidir. Sıcaklık dağılımından anlaşıldığı üzere, piston etkisi olmayan durumda tüm sıcak gazlar istasyonun üst bölgelerine dağılmakta ve 80-120 °C dereceler civarında sıcak bir katman oluşmaktadır. Tam ateşin üzerinde kalan a9 bölgesi 270 °C derece civarında bir sıcaklığa ulaşmışsada hat merkez ve hat giriş iso-propil yangınlarında erişilen ateş üstü sıcaklıklardan düşüktür. Bu durumun

temel nedeni, ortamda yanmanın ihtiyaç duyduğu oksijenden daha az oksijen olmasıdır.

Çıkış tüneline elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 9 ppm hidrokarbon, %20,1 oksijen, %0,46 CO₂ ve %0,02 CO şeklindedir. Çıkış tüneline içindeki sıcaklık ise 26 °C derece olarak ölçülmüştür.

3.5.4. Piston etkisiz durum için istasyon merkezde iso-propil alkol yakıtlı yanma

Zorlanmış havalandırma olmayan durum için istasyon bekleme platformunun ortasında düşük enerjili yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyon merkezine konmuş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.45 ve Resim 3.46'da verilmiştir.

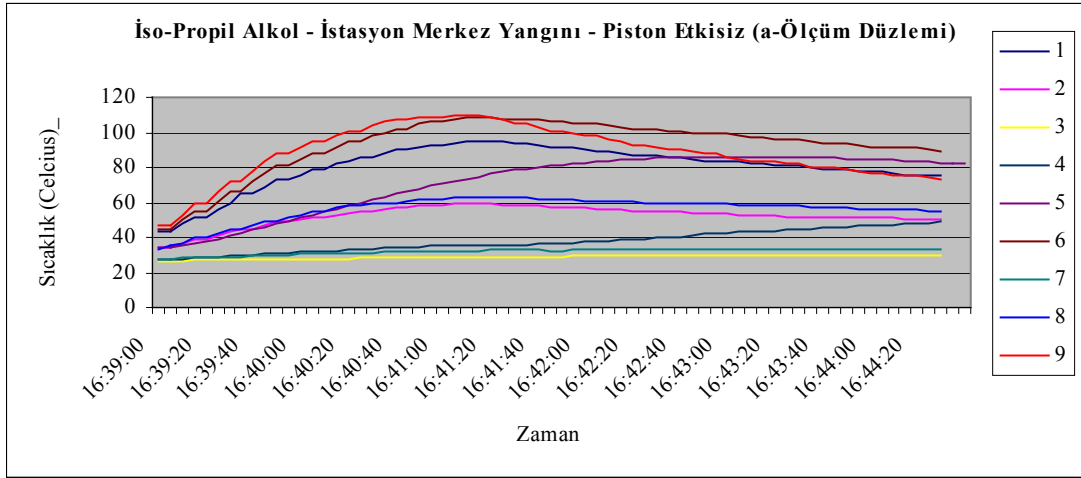


Resim 3.45. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını (ventilasyon yok)

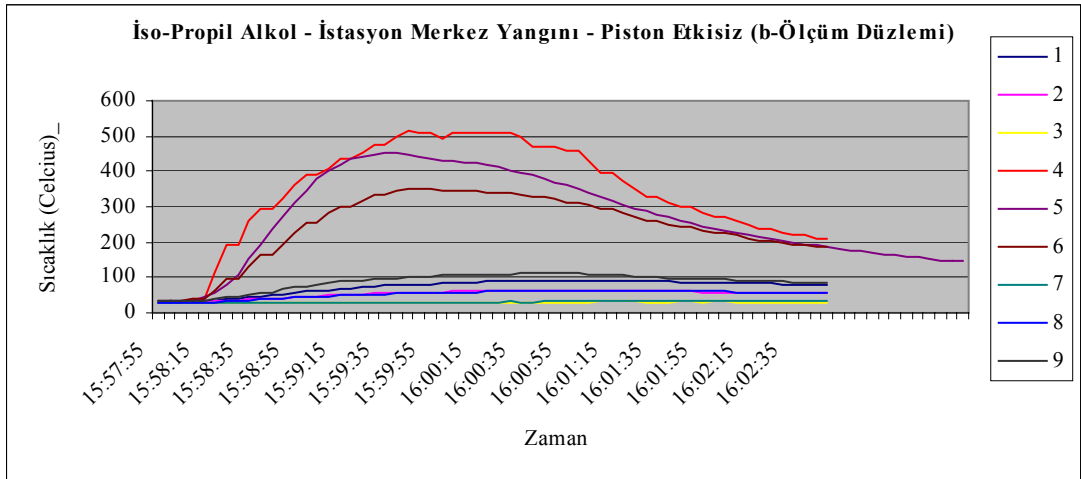


Resim 3.46. 10 cc iso-propil alkol - istasyon merkezi kararlı (steady) yanma

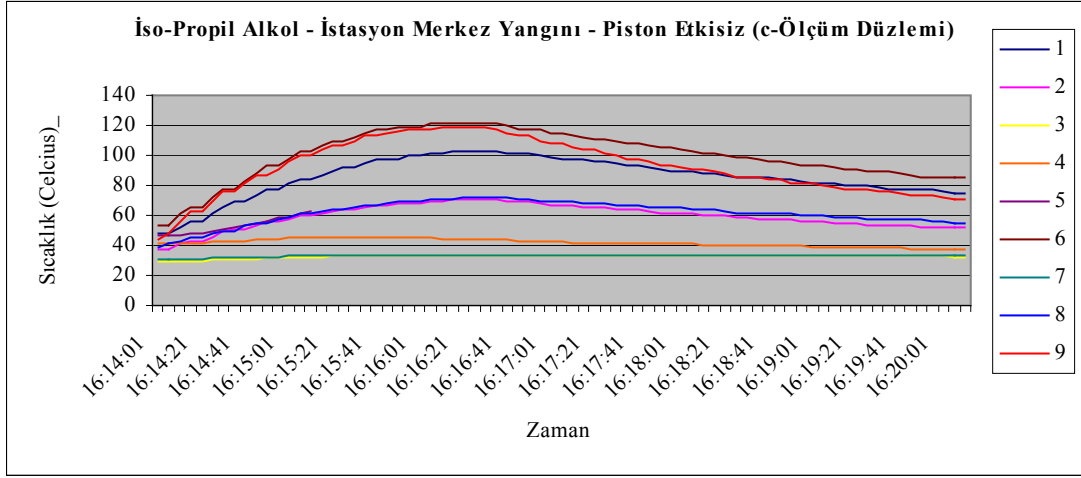
Piston etkisiz durum için istasyon merkez konumunda yangına ilişkin sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.21. İso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.22. İso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.23. İso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

İstasyon merkez konumunda 10 cc hacminde sıvı haldeki iso-propil alkolün yakılması sonucunda istasyon içindeki zamana göre sıcaklık dağılımları Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te görüldüğü gibidir. Sıcaklık dağılımı grafiklerinden, piston etkisi olmayan durumda istasyon merkezindeki alevin tavanda sıcak gaz birikmesine neden olmakla beraber genel olarak istasyonu ısıttığı, a2 ve a8 konumlarının 60 °C derece civarında bir sıcaklığa ulaştığı anlaşılmaktadır. Pitot tüplerinden hız ölçülmemiştir (pitot tüplerine bağlı basınç transducerları 0.6 m/s altındaki hızlara duyarlı değildir).

Çıkış tüneline elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 15 ppm hidrokarbon, %19,1 oksijen, %1,17 CO₂ ve %0,0 CO şeklindedir. Çıkış tüneli içindeki sıcaklık ise 26 °C derece olarak ölçülmüştür.

3.5.5. Hat girişinde 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

1 m/s zorlanmış ventilasyon olan durum için hat giriş konumunda çıkan bir vagon yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, hat girişi konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. İstasyon içerisindeki zorlanmış havalandırma, hattın diğer kısımlarında işleyen trenlerin piston etkisi veya istasyon acil durum havalandırma fanları kaynaklı

olabilir. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.47, Resim 3.48 ve Resim 3.49'da verilmiştir.



Resim 3.47. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını (1 m/s zorlanmış ventilasyon)

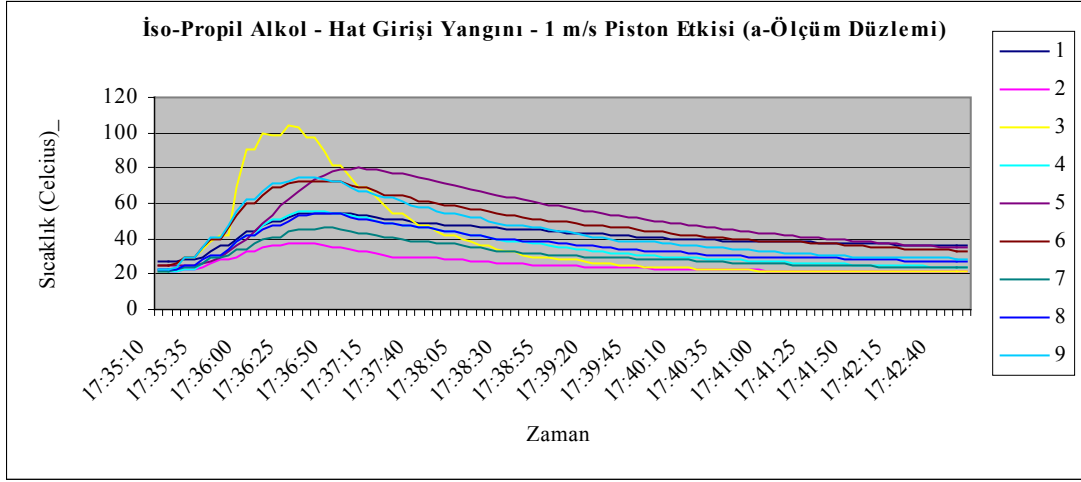


Resim 3.48. 10 cc iso-propil alkol - hat giriş (1 m/s piston etkisi)

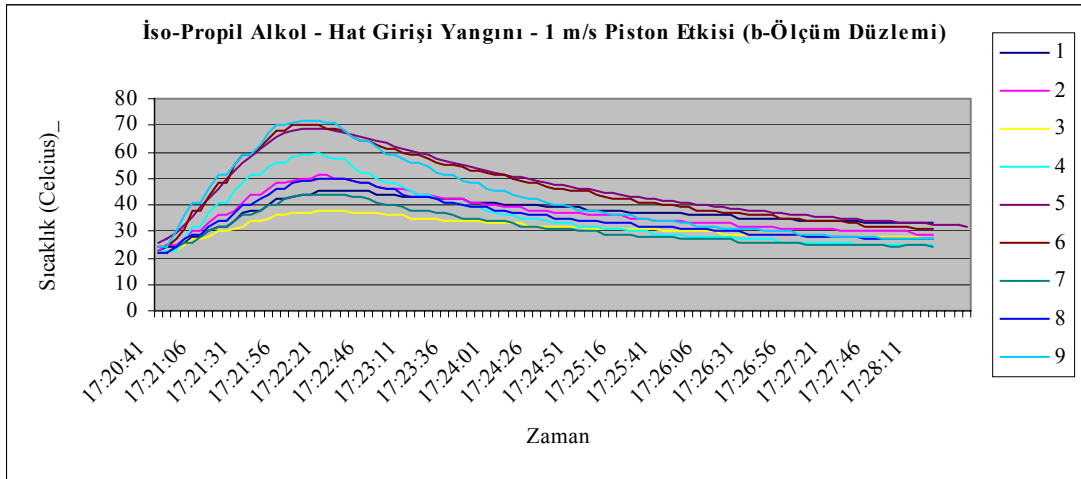


Resim 3.49. 10 cc iso-propil alkol - alevin ie hareketi (1 m/s piston etkisi)

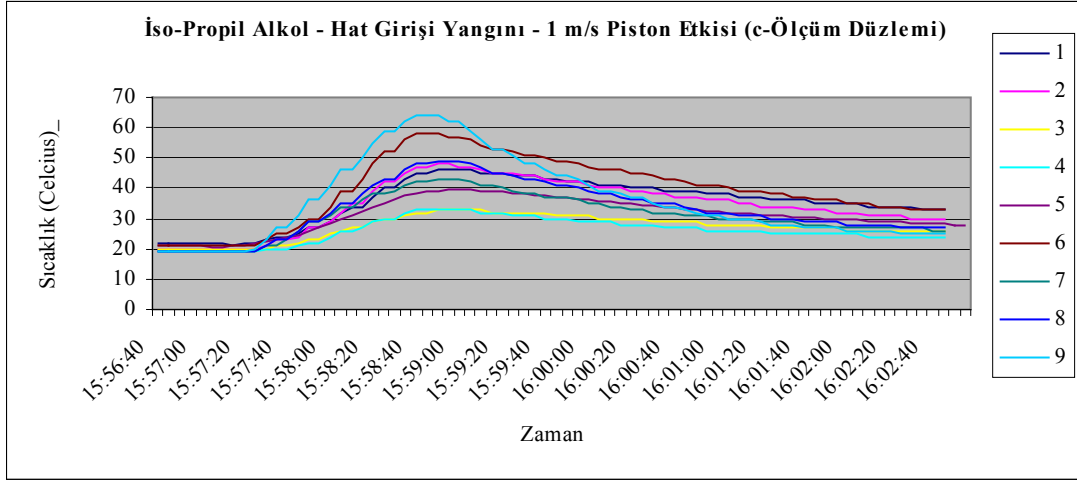
1 m/s piston hızı için hat giriş konumunda yangına ilişkin sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmişlerdir.



Şekil 3.24. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

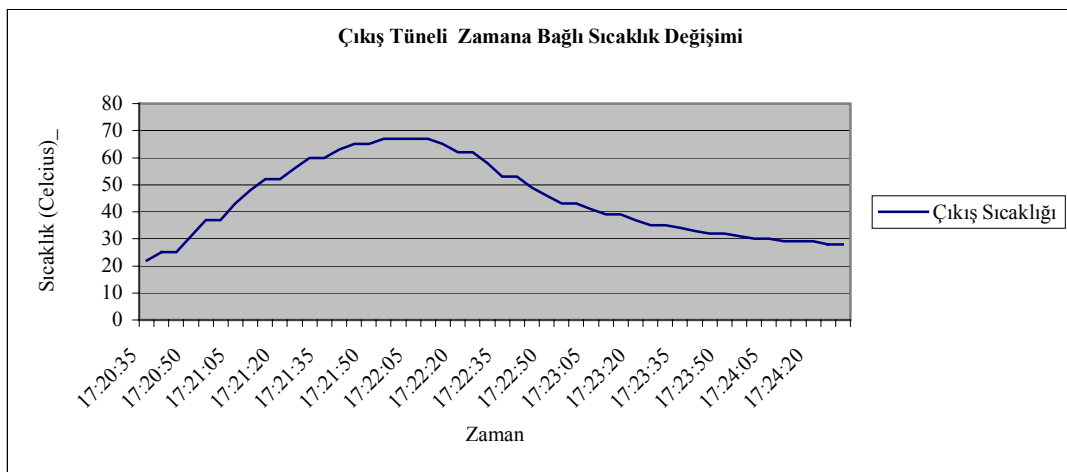


Şekil 3.25. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.26. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat giriş konumunda 1 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da görülmektedir. İstasyon içerisindeki sıcaklık dağılımlarından, ventilasyon sayesinde ısının istasyon hacmine daha dengeli dağılmış olduğu görülmektedir. En yüksek sıcaklıklar, alev bölgesinde ve ana akım çizgisi boyunca uzanan hat üzerinde ölçülmüştür (a3, a5, a6 ve a9). Çıkış tüneline alınan sıcaklık değerlerine zamana bağlı sıcaklık değişimi grafiği Şekil 3.27'de görülmektedir.



Şekil 3.27. Hat giriş yangını çıkış tüneline zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)

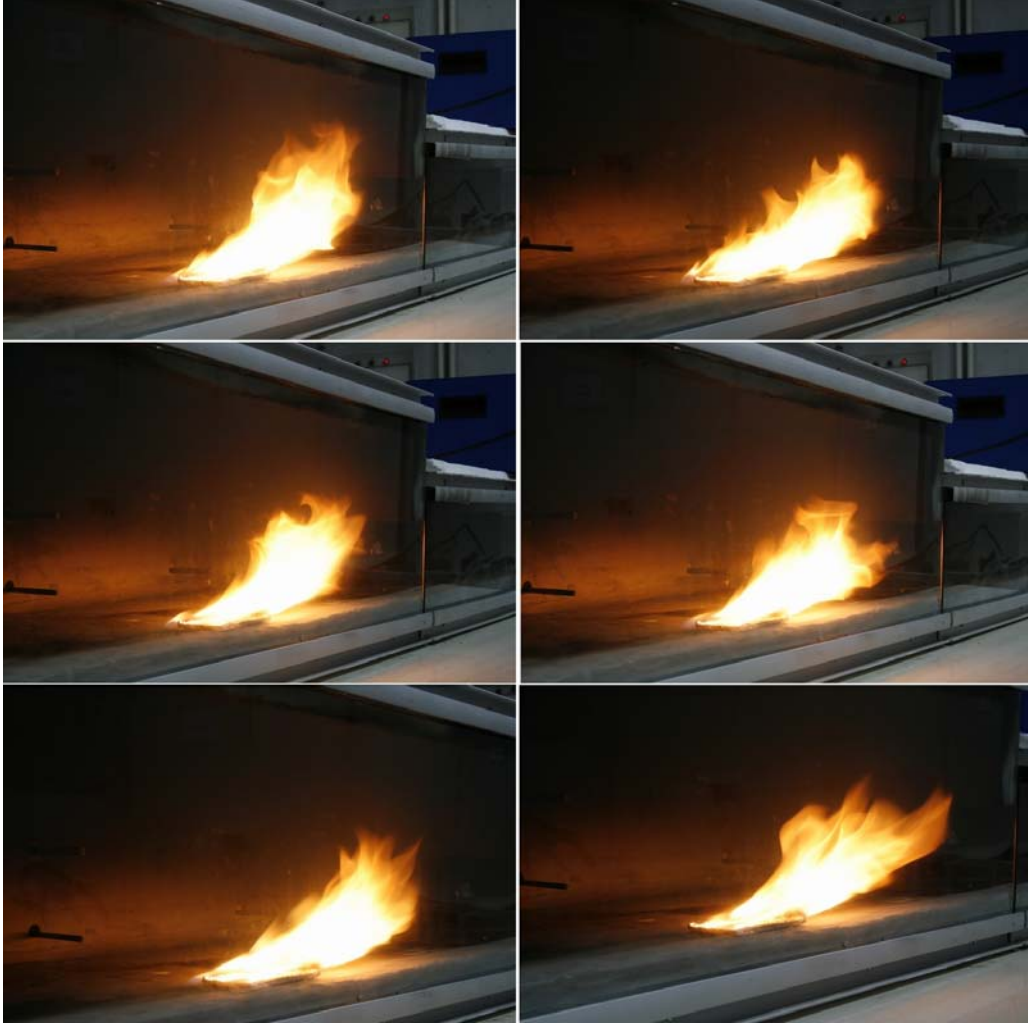
Şekil 3.27'den de görüldüğü üzere çıkış tüneline ciddi bir sıcaklık artışı vardır. Hat boyunca ve girişten çıkışa doğru yönlendirilmiş olan hava akımı, yanma tepkimesi sonucu oluşan enerjinin bir bölümünü yangın bölgesinden alıp çıkış tüneli boyunca taşımaktadır. Ayrıca sıcaklık artışı olan bölgelerin akım boyunca olması da bu gözlemi desteklemektedir.

Hız ölçümlerine göre, yanma olmayan durumda giriş ve çıkış hızları 1 m/s civarında bir salınım ile ölçülmüştür. Yanma esnasında çıkış tünelineki hızlar 0,9 m/s civarında ölçülmüştür ve yanma bittikten sonra çıkış hızı tekrar 1-1,1 m/s mertebelerinde hızlara yükselmiştir. Tüm ölçüm istasyonları, 0,6 m/s'den büyük hızlara duyarlıdır ve sadece giriş-çıkış doğrultusunda ölçüm yapmaktadır. Ayrıca c5 konumunda sadece yanma müddetince hızlar ölçülebilmiş (0,7 m/s civarında), yanma başlamadan önce ve yanma bittikten sonra bu bölgede hızlar sıfır olarak ölçülmüştür.

Çıkış tüneline Capelec gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 20,2 ppm hidrokarbon, %19,4 oksijen, %0,7 CO₂, %0,00 CO ve 19 ppm NO_x şeklindedir.

3.5.6. Hat merkezinde 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

1 m/s zorlanmış ventilasyon olan durum için hat merkez konumunda çıkan bir vagon yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, hat merkez konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.50 ve Resim 3.51'de verilmiştir.

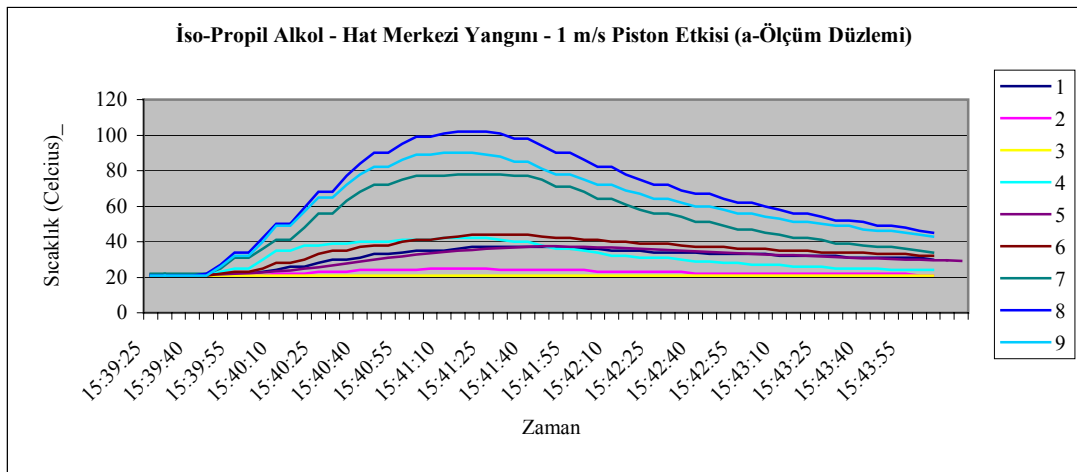


Resim 3.50. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat merkezi yangını (1 m/s)

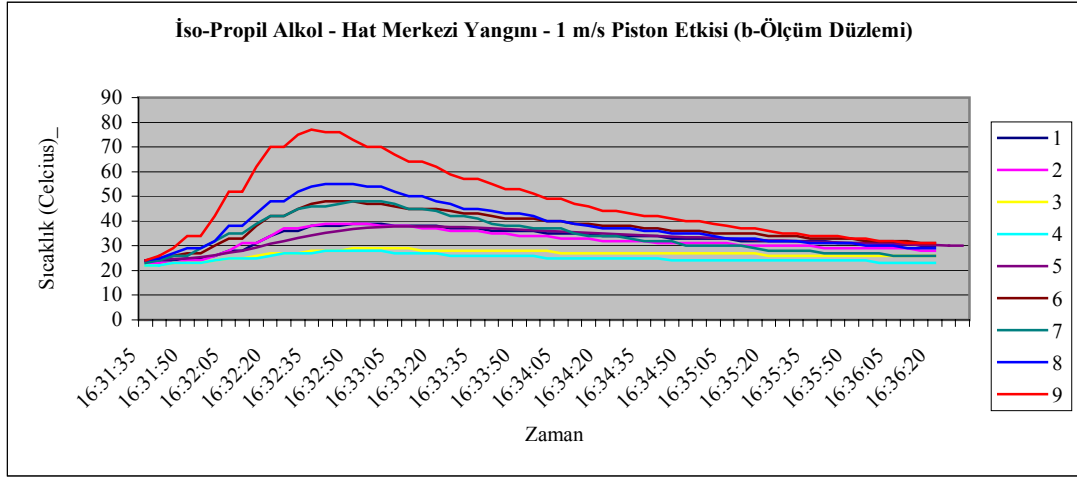


Resim 3.51. 10 cc iso-propil alkol - hat merkez (1 m/s piston etkisi)

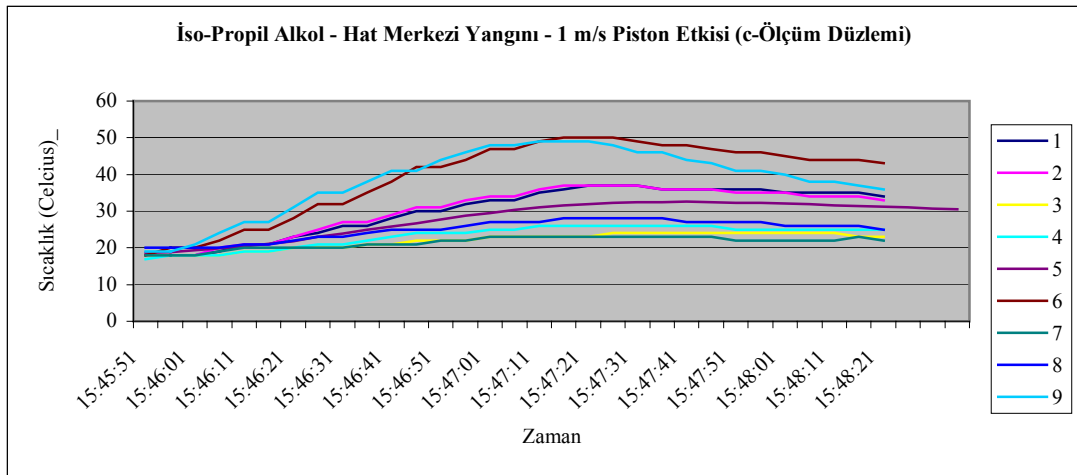
1 m/s piston hızı için hat merkez konumunda yangına ilişkin sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.28. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



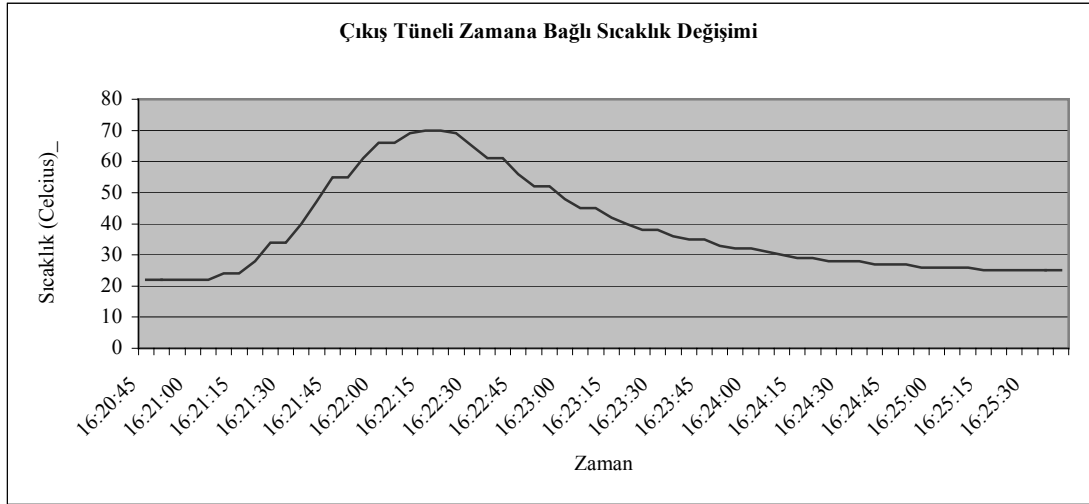
Şekil 3.29. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.30. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat merkez konumunda 1 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da görülmektedir. İstasyon içerisindeki sıcaklık dağılımlarından, ventilasyon sayesinde ısının istasyon hacmine daha dengeli dağılmış olduğu görülmektedir. En yüksek sıcaklıklar, alev bölgesinde ve hemen arkasında 70-100 °C derece aralığında ölçülmüştür. Ayrıca b9 ölçüm noktasından erişilen 80 °C derecelik sıcaklık, akımın bir ateş kaynaklı ısıyı bu bölgeye taşıdığını göstermektedir ve bu durum istasyon içerisindeki hava hareketleri hakkında bilgi vermektedir. İstasyon içindeki sıcaklık dağılımlarından, a ve b ölçüm

düzlemlerinde çabuk bir soğuma gerçekleşirken c düzlemindeki soğumanın oldukça yavaş olduğu görülmektedir. İstasyon çıkış tüneline ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin zamana bağlı sıcaklık grafiği ise Şekil 3.31’de görülmektedir.



Şekil 3.31. Hat merkezi yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)

Şekil 3.31’den de görüldüğü üzere çıkış tüneline belirgin bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. Hat boyunca ve girişten çıkışa doğru yönelmiş olan hava akımı, yanma tepkimesi sonucu oluşan enerjinin bir bölümünü yangın bölgesinden alıp çıkış tüneline boyunca taşımaktadır.

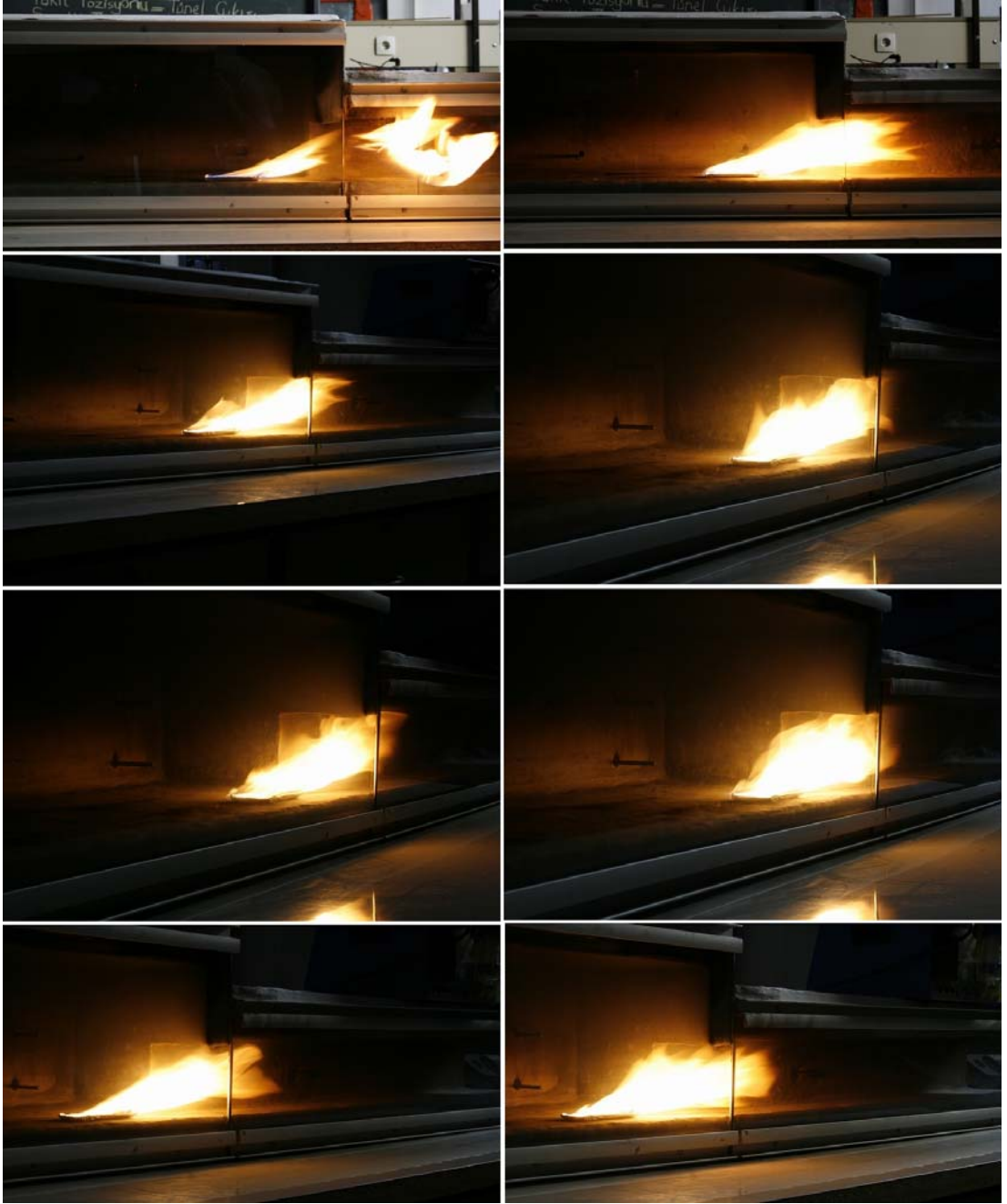
Hız ölçümlerine göre, yanma olmayan durumda giriş hızları 1,1 m/s civarında ve çıkış hızları 1 m/s civarındadır. Tüm ölçüm istasyonları, 0,6 m/s’den büyük hızlara duyarlıdır ve sadece giriş-çıkış doğrultusunda ölçüm yapmaktadır. Yanma tepkimesinin başlaması ile beraber a5 noktasındaki hızlarda 0,2 m/s mertebelerinde bir artış olmuştur. Yangının merkez konumunda ilk başlatıldığı anda b5 konumunda geçici olarak 0,1 m/s mertebesinde bir hızlanma görülmüştür.

Çıkış tüneline Capelec gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 0 ppm hidrokarbon, %20,2 oksijen, %0,3 CO₂, %0,00 CO ve 0 ppm NO_x şeklindedir. Bu sonuçlardan yanmanın oldukça verimli olduğu, tepkimenin

yeterli miktarda oksijenle beslendiği ve Hidrokarbon, NO_x ve CO miktarlarının Capelec gaz analiz cihazının ölçebildiği değerlerin altında olduğu anlaşılmaktadır.

3.5.7. Hat çıkışında 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

1 m/s zorlanmış ventilasyon olan durum için hat çıkış konumunda çıkan bir vagon yangınıni temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, hat çıkış konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.52 ve Resim 3.53’de verilmiştir.

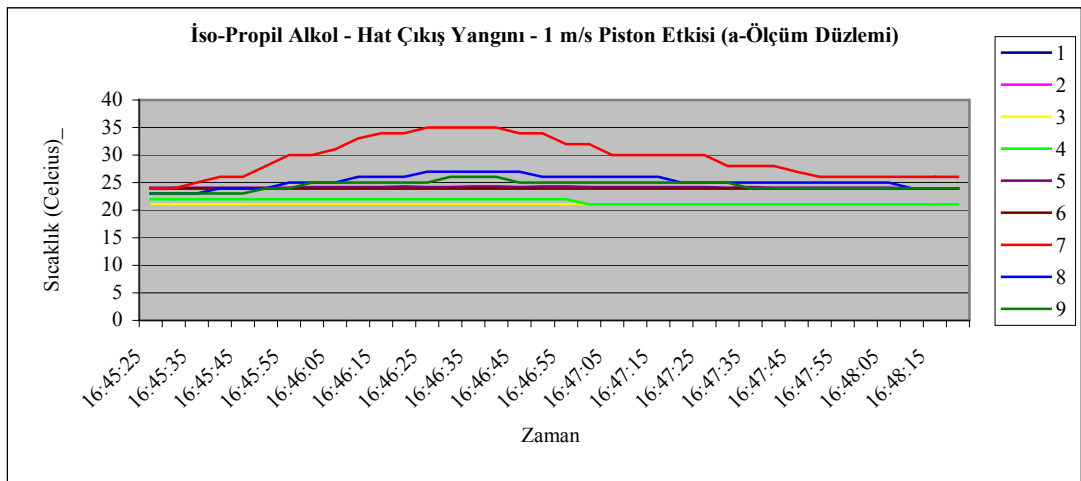


Resim 3.52. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı hat çıkışı yangını (1 m/s)

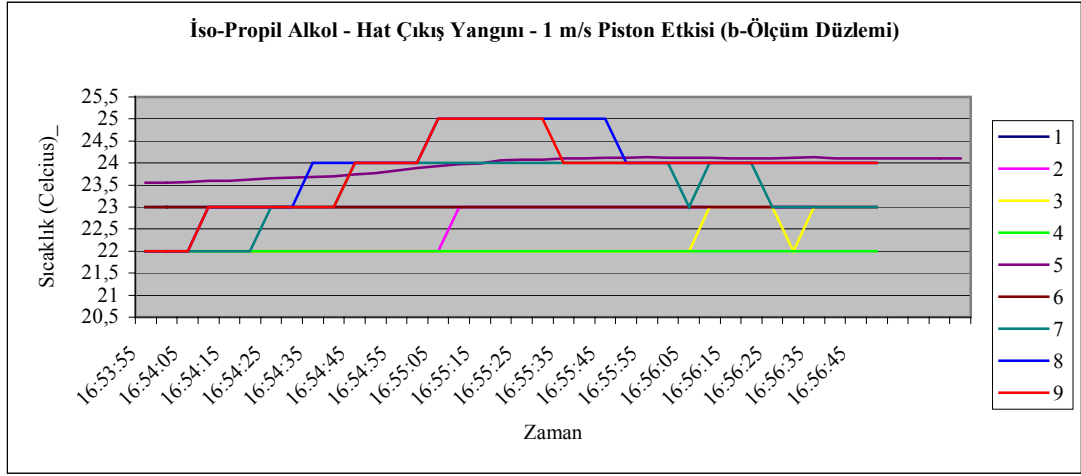


Resim 3.53. 10 cc iso-propil alkol - hat çıkış (1 m/s piston etkisi)

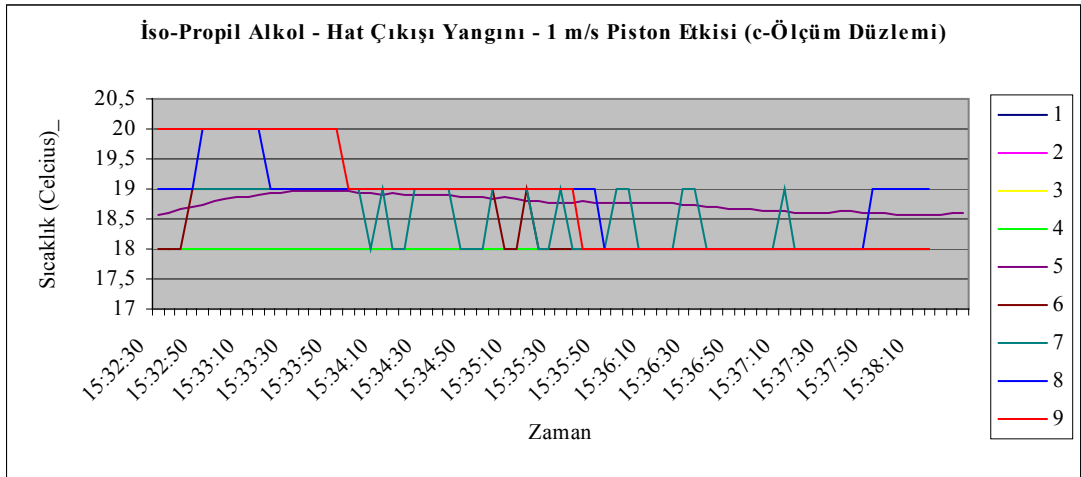
1 m/s piston hızı için hat çıkış konumunda yanma sonucu istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34’te verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.32. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.33. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.34. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat çıkış konumunda 1 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te görülmektedir. İstasyon içerisindeki sıcaklık dağılımlarından yanma sonucu oluşan ısının, istasyon içine dağılmadan akış boyunca çıkış tüneline taşındığı anlaşılmaktadır. İstasyon içindeki a ve b ölçüm düzlemlerinde hafif bir sıcaklık artışı görülsede, c düzlemi üzerindeki ölçüm noktalarında sıcaklık artışı kaydedilmemiştir. İstasyon çıkış tüneline ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin histogram ise Şekil 3.35'te görülmektedir.



Şekil 3.35. Hat çıkış yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)

Şekil 3.35'den de görüldüğü üzere çıkış tüneline belirgin bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. Hat boyunca ve girişten çıkışa doğru yönlendirilmiş olan hava akımı, yanma tepkimesi sonucu oluşan enerjinin neredeyse tamamını yangın bölgesinden alıp çıkış tüneli boyunca taşımaktadır. Deney süresinde çıkış tüneli içerisinde 170 °C derece civarı sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır.

Hız ölçümlerine göre, yanma olmayan durumda giriş hızları 1,2 m/s civarında ve çıkış hızları 1,1 m/s civarında bir ortalamaya sahiptir.

Çıkış tüneline Capelec gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 3-6 ppm hidrokarbon, %19,5 oksijen, %0,8 CO₂, %0,00 CO ve çok kısa bir aralıkta 1 ppm NO_x şeklindedir. Bu sonuçlardan yanmanın oldukça verimli ve tepkimenin sürekliliği için oksijen miktarının yeterli olduğu görülmektedir.

3.5.8. İstasyon merkezinde 1 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

1 m/s zorlanmış ventilasyon olan durum için istasyon merkez konumunda çıkan düşük enerjili yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyon merkez konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil

alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.54, Resim 3.55 ve Resim 3.56'da verilmiştir.



Resim 3.54. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını (1 m/s)

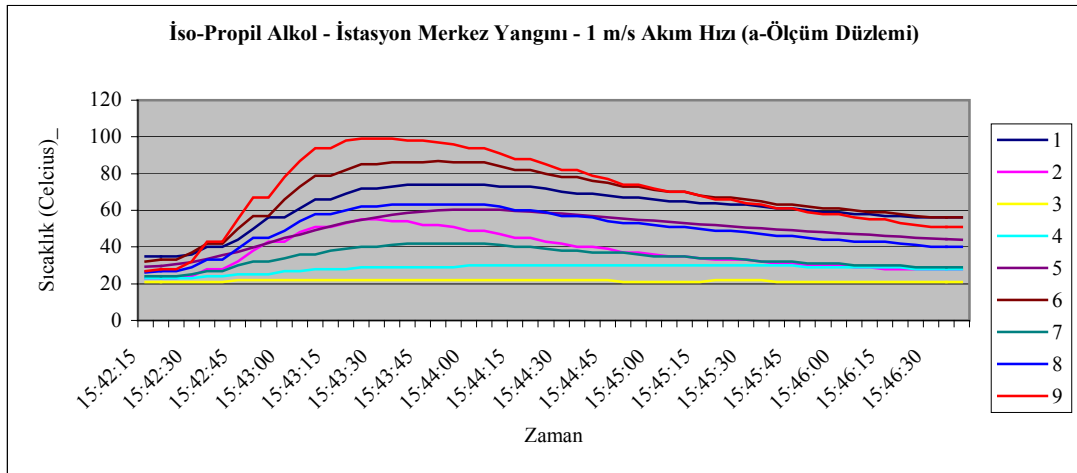


Resim 3.55. 10 cc iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkez yangını (1 m/s)

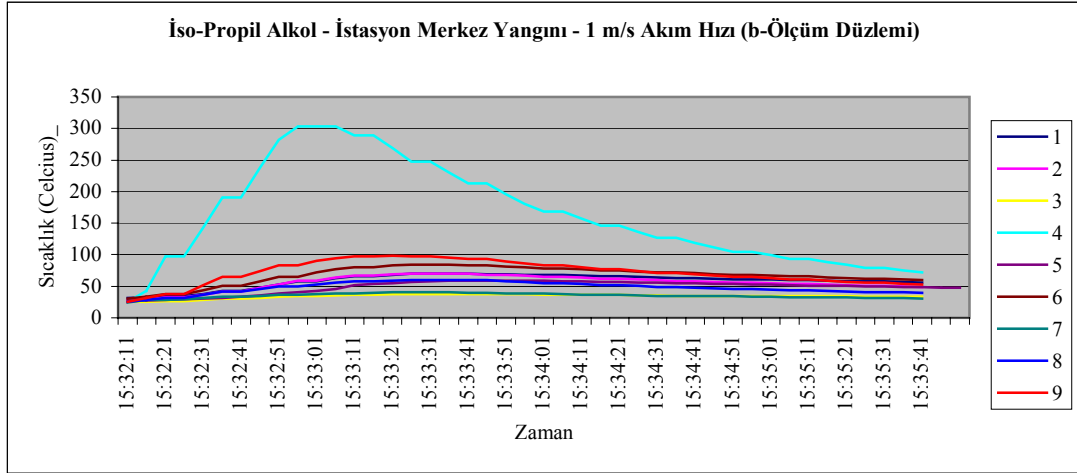


Resim 3.56. İstasyon merkezinde yanma (1 m/s)

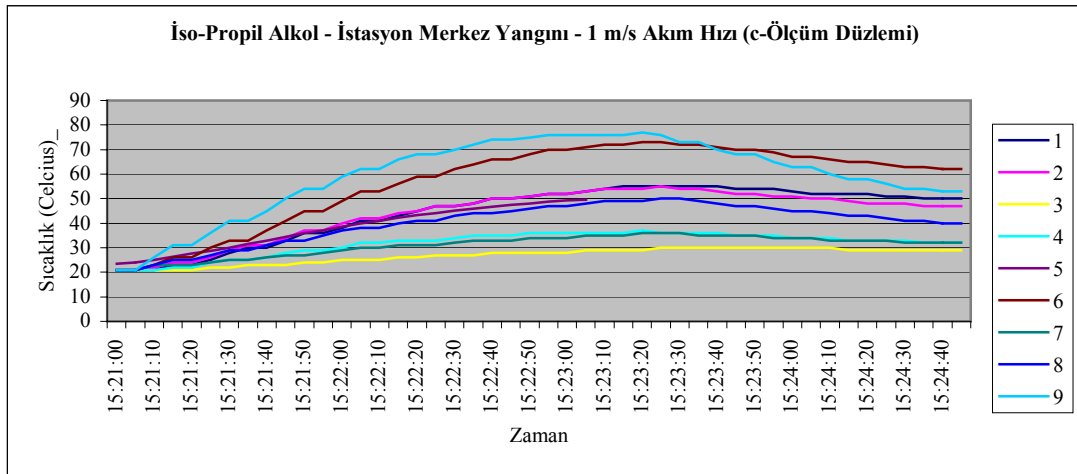
1 m/s piston hızı için, istasyon merkez konumundaki yanmaya bağlı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.36, Şekil 3.37 ve Şekil 3.38’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.36. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



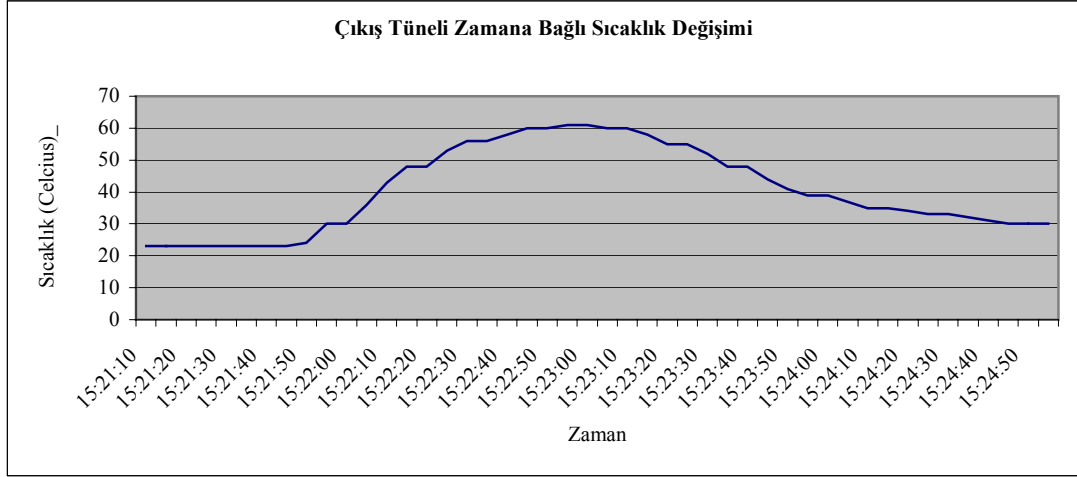
Şekil 3.37. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.38. 1 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

İstasyon merkez konumunda 1 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.36, Şekil 3.37 ve Şekil 3.38'de görülmektedir. İstasyon içerisindeki sıcaklık değerlerinden yangın havuzu üzerinde 300 °C derece civarı sıcaklıklara erişildiği görülmektedir. Yanma sonucu ortaya çıkan ısıdan en az etkilenen bölge, yangın havuzunun önünde kalan hacimdir. Genel olarak istasyonun tamamı bir miktar ısınmış, ama yangın gerisinde kalan tavan bölgeleri ve yangın havuzu üst-arkasında kalan bölgelerin sıcaklığı 60-100 °C dereceler aralığında

ölçülmüştür. İstasyon çıkış tüneline ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin histogram ise Şekil 3.39’da görülmektedir.



Şekil 3.39. İstasyon Merkez yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s piston hızı)

Şekil 3.39’den de görüldüğü üzere çıkış tüneline belirgin bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. Çıkış tüneline sıcaklık artışı bir dakika sürmüş, daha sonra sıcaklık 60 °C derece civarı bir değerde sabit kalmıştır. Alevin küçülmesiyle beraber sıcaklık hızla düşmeye başlamıştır.

Yanma olmayan durumda giriş hızları 1 m/s civarında ve çıkış hızları 1 m/s civarında bir salınım ile ölçülmüştür. Yanma tepkimesinin başlamasıyla beraber çıkış hızları 0,9 m/s civarına gerilemiştir. Yanmanın başlayıp istasyon içi akımın gelişmesi ile beraber c5 noktasında düzgün olarak 0.8 m/s civarı hızlar okunmuştur. Yanmanın henüz gelişme aşamasında a5 ve b5 noktalarında ölçülen hızlarda bir miktar artış pertürbasyon görülmektedir. Tüm ölçüm istasyonları, 0,6 m/s’den büyük hızlara duyarlıdır ve sadece giriş-çıkış doğrultusunda ölçüm yapmaktadır.

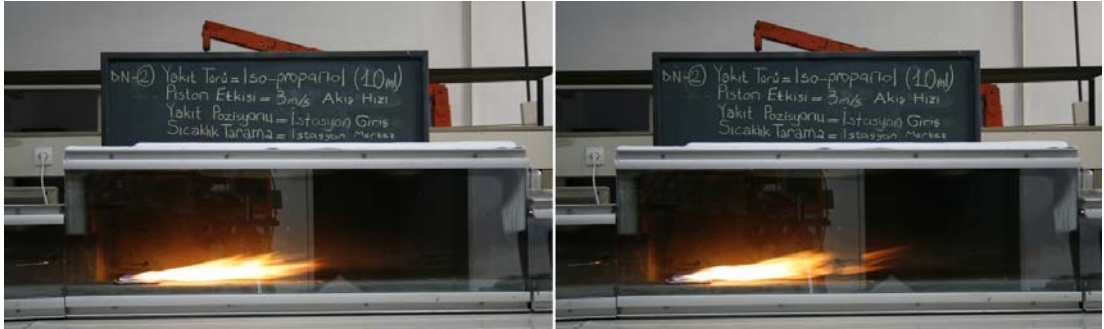
Çıkış tüneline SUN MGA-1200 gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 7-8 ppm hidrokarbon, %20,1 oksijen, %0,55 CO₂ ve %0,00 CO şeklindedir. Bu sonuçlardan yanmanın sürekliliği için gereken oksijen miktarının istasyon içinde yeterli olduğu görülmektedir.

3.5.9. Hat giriş konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

3 m/s zorlanmış ventilasyon olan durum için bir trenin son vagonunda çıkan yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun hat giriş konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.57 ve Resim 3.58’de verilmiştir.

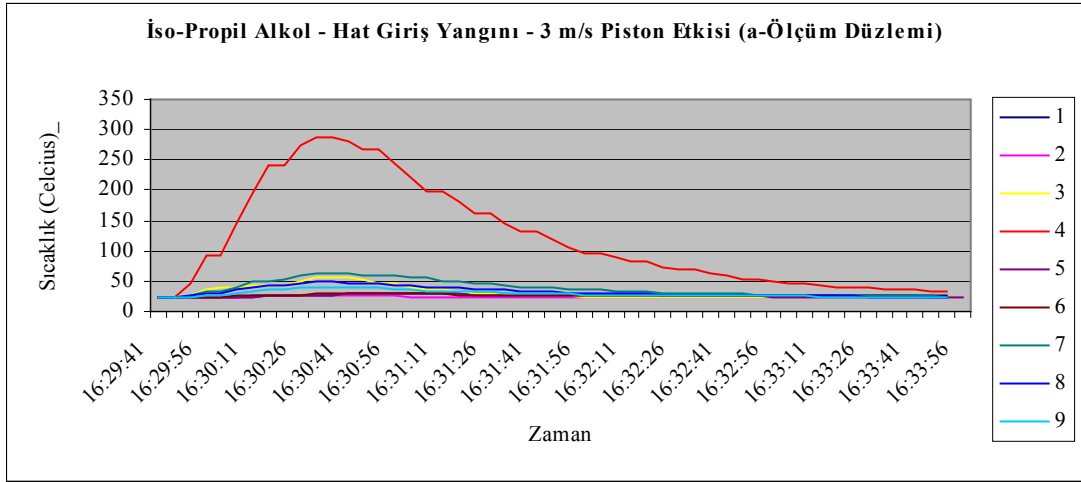


Resim 3.57. İso-propil Alkol - 3 m/s akış hızı altında hat girişi yangını

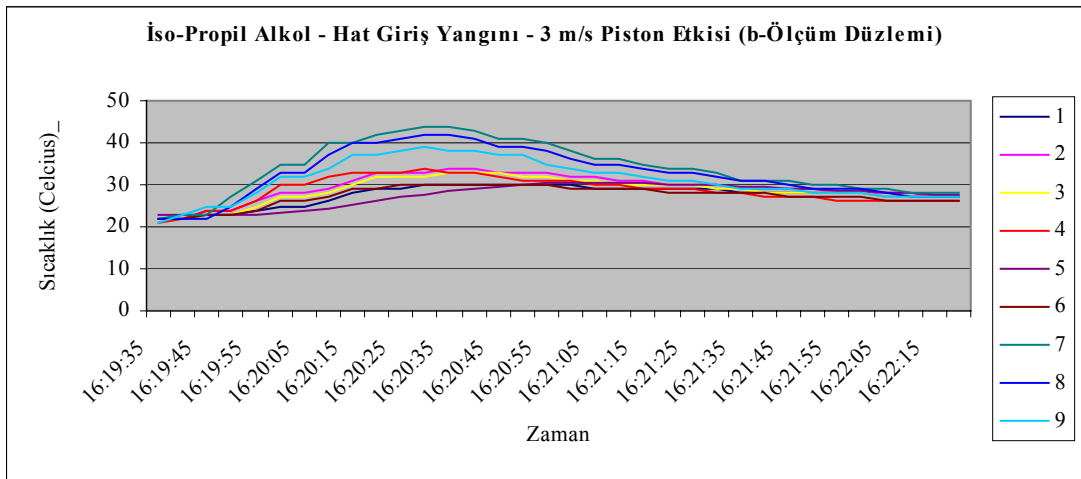


Resim 3.58. İso-propil Alkol - 3 m/s akış hızı altında hat girişi yangını

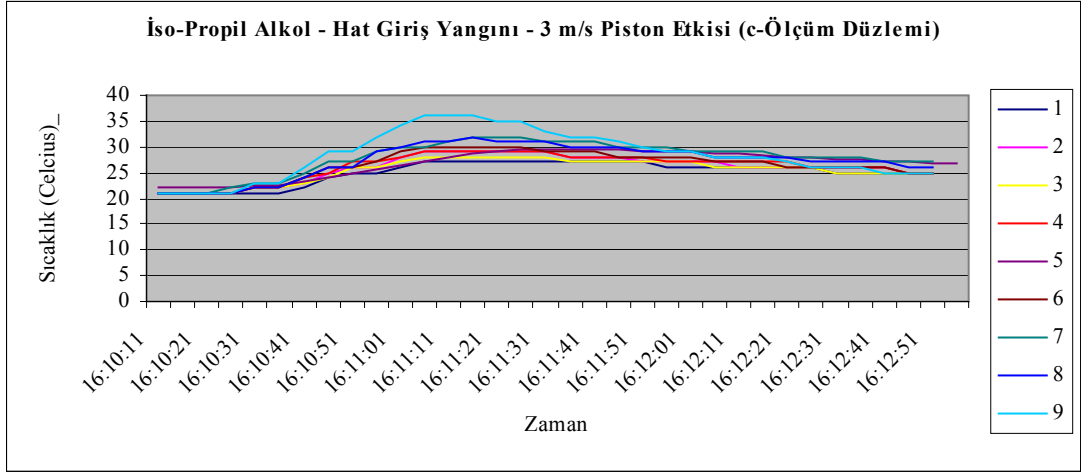
3 m/s piston hızı için, hat giriş konumundaki yanmaya bağlı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.40, Şekil 3.41 ve Şekil 3.42’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gsterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.40. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

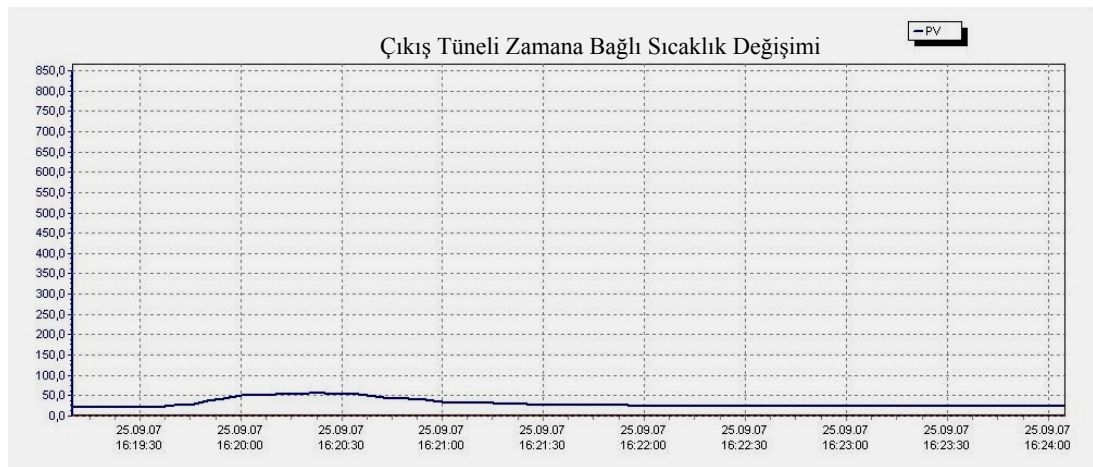


Şekil 3.41. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.42. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat giriş yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat giriş konumunda, 3 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.40, Şekil 3.41 ve Şekil 3.42'de görülmektedir. İstasyon içerisindeki sıcaklık değerlerinden yangın havuzunun hemen arkasındaki a4 noktasında 300 °C derece civarı sıcaklıklara erişildiği görülmektedir. Genel olarak istasyonun tamamı bir miktar ısınmıştır. Yangın gerisinde kalan tavan bölgeleri ve yangın havuzu üst-arkasında kalan bölgelerin sıcaklığı 60-100 °C dereceler aralığında ölçülmüştür. İstasyon çıkış tüneline ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin histogram ise Şekil 3.43'te görülmektedir.



Şekil 3.43. Hat girişi yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (3 m/s piston hızı)

Şekil 3.43'ten de görüldüğü üzere çıkış tüneline bir miktar sıcaklık artışı gözlenmektedir. Çıkış tüneline sıcaklıklar ancak 50 °C dereceye kadar artmıştır.

Giriş ve çıkış hızları 3 m/s civarında bir salınım ile ölçülmüştür. a5 ölçüm noktasından son derece dalgalı ölçümler alınırken, b5 ve c5 ölçüm noktalarından kaydedilen ölçüm sonuçları oldukça kararlı ve tutarlıdır.

Çıkış tüneline SUN MGA-1200 gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 7-8 ppm hidrokarbon, %20,6 oksijen, %0,29 CO₂ ve %0,00 CO şeklindedir. Bu sonuçlar, 1 m/s piston hızı için çıkış tüneline alınan sonuçlarla kıyaslandığında ölçülen oksijen miktarındaki artış ve CO₂ miktarındaki azalış göze çarpmaktadır. 3 m/s hızındaki taze hava ile beslenen alev, ortamdaki oksijen miktarını ancak çok küçük bir oranda etkileyebilmiştir. İstasyon içerisindeki sıcaklıklar da piston etkisiz durumla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Tavan bölgesi dahil olmak üzere istasyon içindeki ortam sıcaklığı 50 °C dereceden düşük kalmıştır.

3.5.10. Hat merkez konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

3 m/s zorlanmış ventilasyon olan durum için bir trenin orta vagonunda çıkan yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun hat merkez konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt (yangın) havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere fotoğrafları Resim 3.59, Resim 3.60 ve 3.61'de verilmiştir.



Resim 3.59. Hat merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)



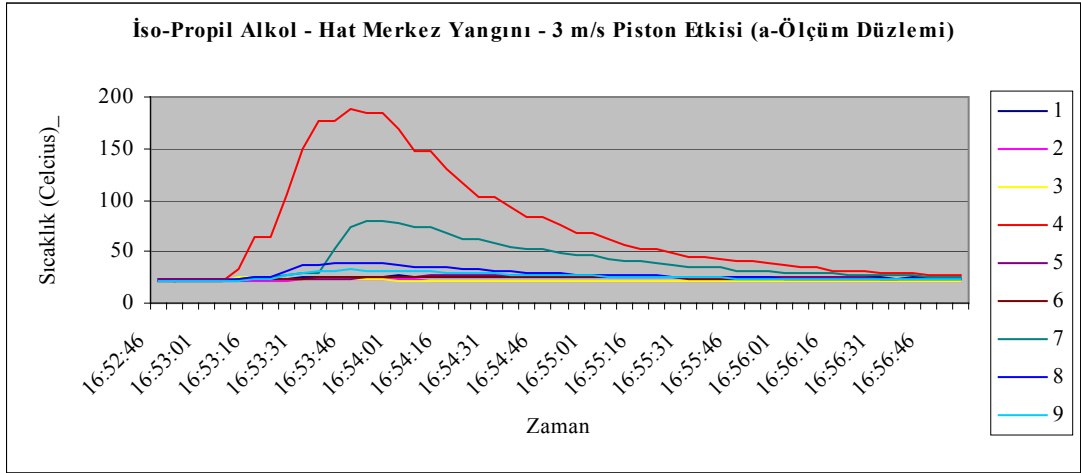
Resim 3.60. Hat merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)



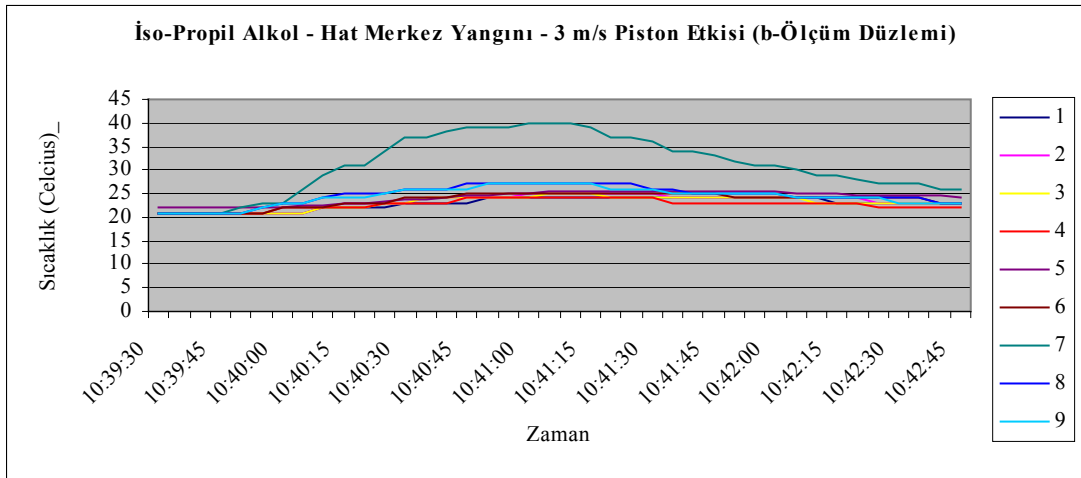
Resim 3.61. Hat merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)

Hat merkez konumundaki yangın senaryosunda 3 m/s istasyon giriş hava akım şartlarındaki yanma tepkimesi kararlı bir davranış sergileyememiş, düzgün bir alev formu oluşmamıştır. Alev istasyon içerisinde her yöne tilt yapmış, zaman zamanda çıkış tüneline doğru uzamıştır. 3 m/s piston hızı için, hat giriş konumundaki yanmaya bağlı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da

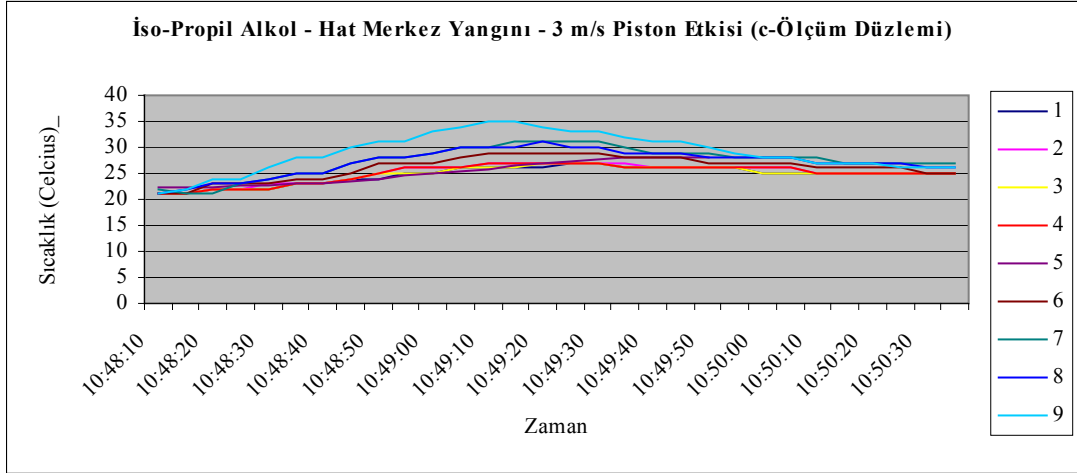
verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.44. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

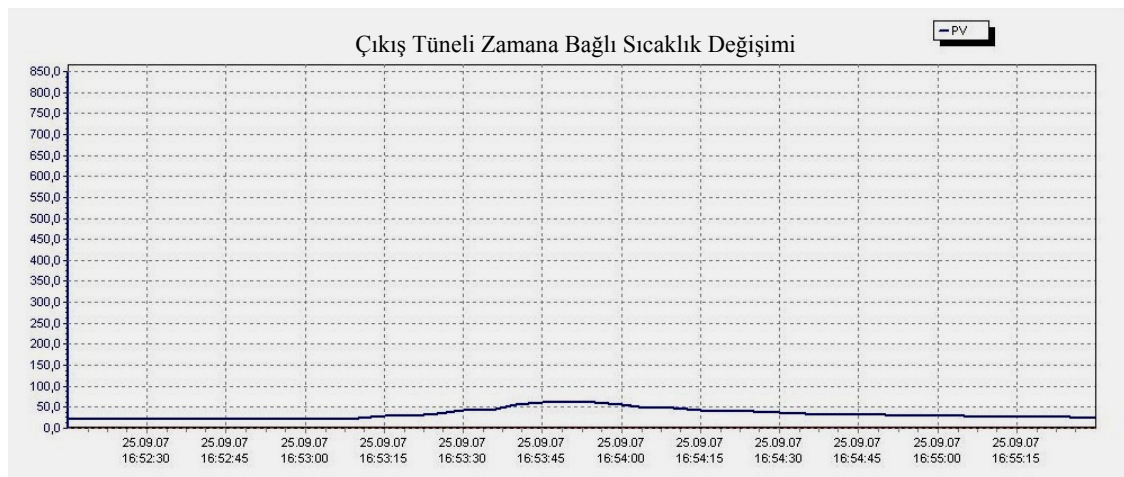


Şekil 3.45. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.46. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat merkez konumunda, 3 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.44, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da görülmektedir. En yüksek sıcaklıklara 190 °C derece civarı ile a4 noktasında daha sonra 70 °C derece ile ateşin yaladığı a7 noktasında erişilmiştir. Genel olarak istasyon içindeki sıcaklıklar bir miktar artmışsa da ortam sıcaklığı 30 °C derece civarında ölçülmüştür. İstasyon çıkış tüneline ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin zamana bağlı sıcaklık değişimi ise Şekil 3.47'de görülmektedir.



Şekil 3.47. Hat merkezi yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (3 m/s piston hızı)

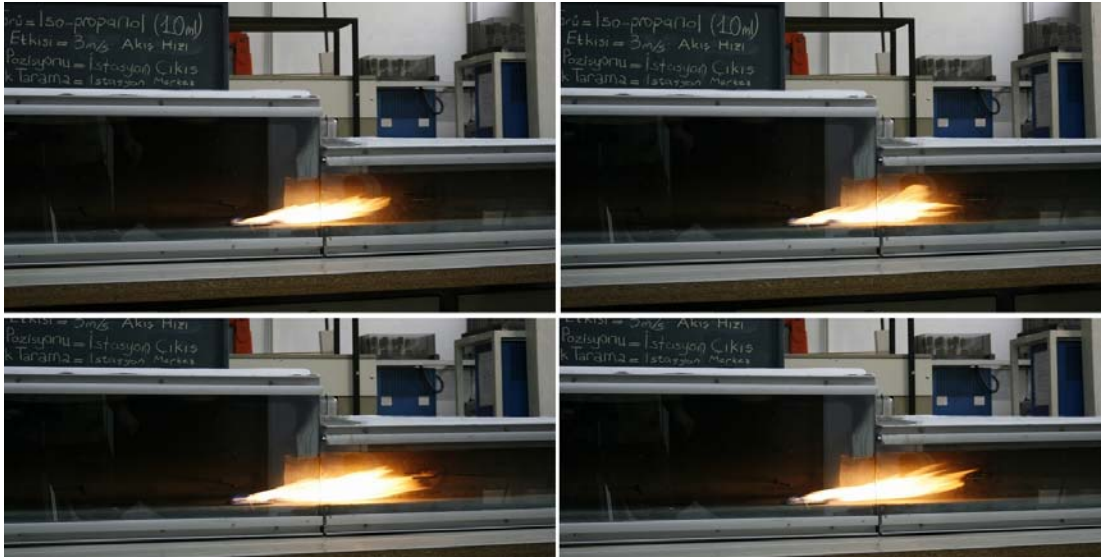
Şekil 3.47'den de görüldüğü üzere çıkış tüneline bir miktar sıcaklık artışı gözlenmektedir. Çıkış tüneline sıcaklık 60 °C dereceye ulaşmıştır.

Hız ölçmek için kullanılan probların ölçümlerine göre giriş ve çıkış hızları 3 m/s civarında bir salınım göstermektedir. a5 ölçüm noktasından son derece dalgalı ölçümler alınırken, b5 ve c5 ölçüm noktalarından kaydedilen ölçüm sonuçları daha karardır. Hat giriş yangını senaryosunda, yakıt havuzundan geriye doğru uzanan alevin ucunun a5 konumuna kadar uzanarak probun ölçümlerini bozması olağan bir durumsada, hat ortası yangını senaryosunda ateşle (flame sheet) bağlantısı kalmayan a5 noktasında pertürbasyonlu ölçüm alınması sadece akış karakteri nedeniyle olabilir. Arka duvara yakınlığı nedeniyle ana akış hattından uzak kalan c5 noktasında, ana akış hattına daha yakın olan b5 noktasından (istasyon ortası) daha yüksek hız değerleri ölçülmesi daha detaylı araştırma ve daha hassas ölçüm cihazları gerektirmektedir.

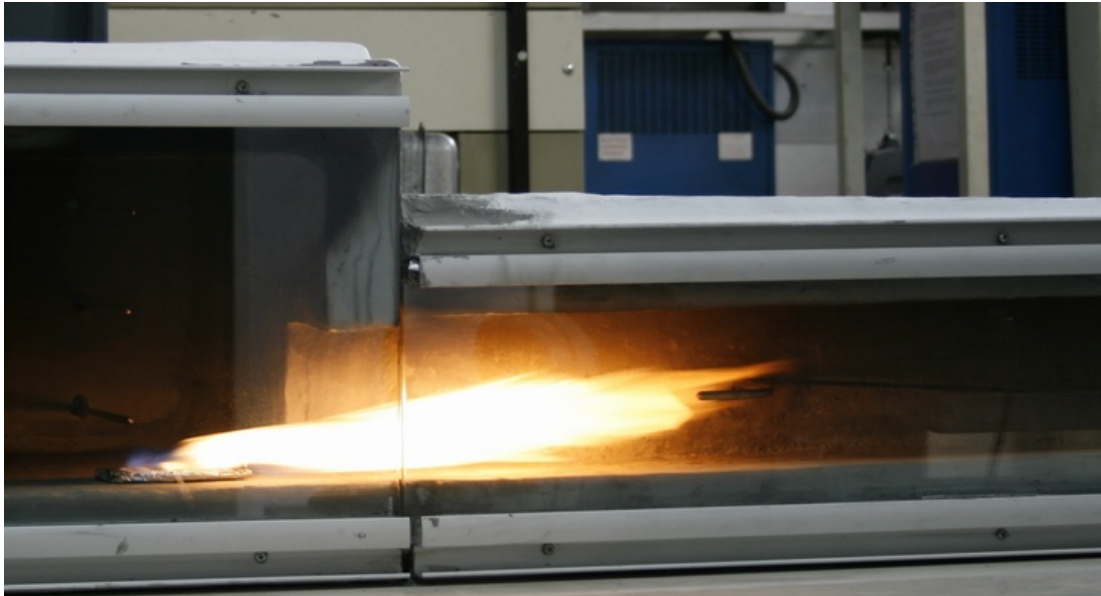
Çıkış tüneline SUN MGA-1200 gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 3 ppm hidrokarbon, %20,5 oksijen, %0,24 CO₂ ve %0,00 CO şeklindedir. 3 m/s hızındaki taze hava ile beslenen istasyonda, alev ortamdaki oksijen miktarını (yaklaşık %21) ancak çok küçük bir oranda azaltmıştır. İstasyon içerisindeki sıcaklıklar da piston etkisiz durumla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür.

3.5.11. Hat çıkış konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

3 m/s zorlanmış ventilasyon olan durum için bir trenin ilk vagonunda çıkan yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun hat giriş konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.62 ve Resim 3.63'te verilmiştir.

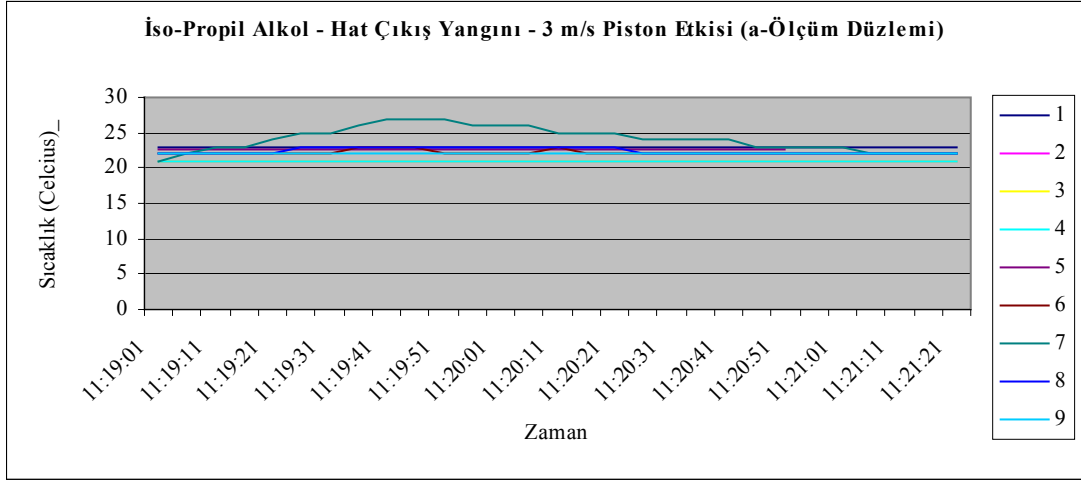


Resim 3.62. Hat çıkış konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)

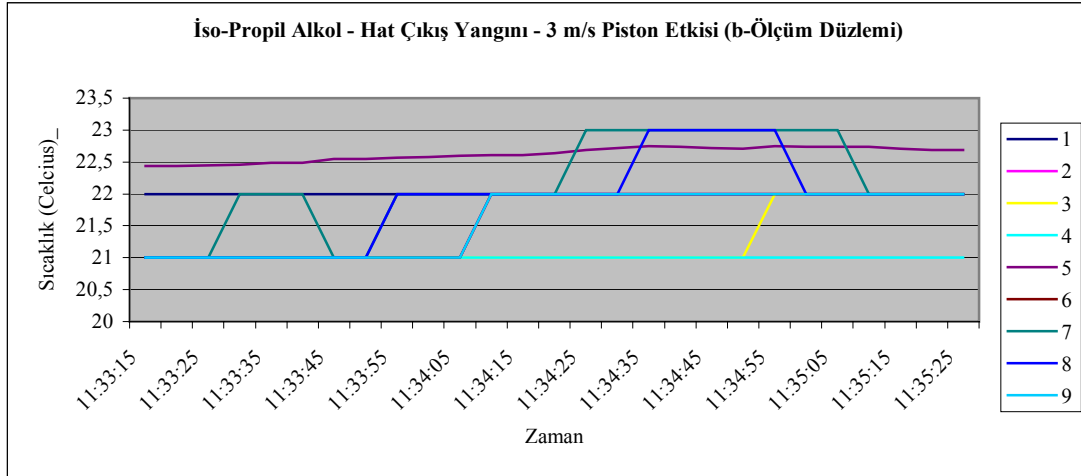


Resim 3.63. Hat çıkış konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s piston hızı)

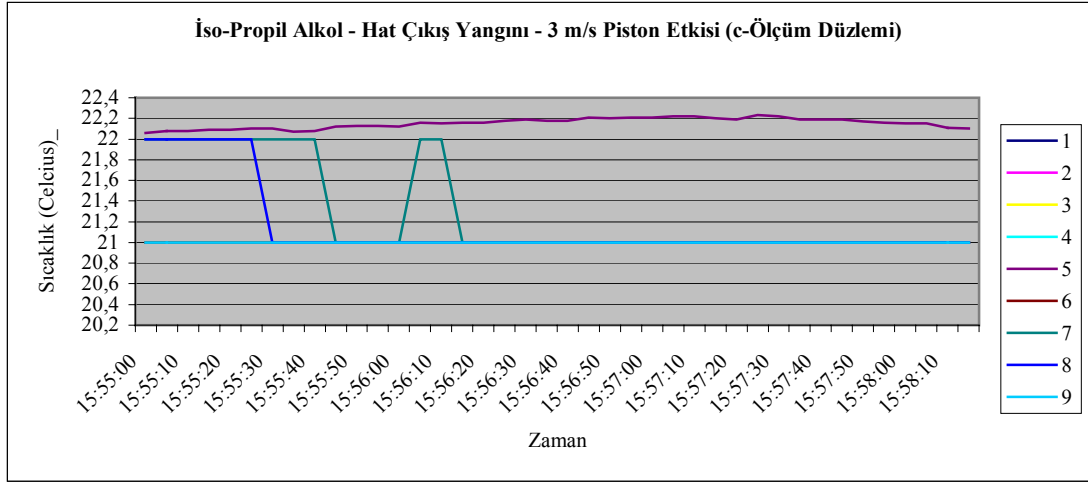
3 m/s piston hızı için, hat çıkış konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.48, Şekil 3.49 ve Şekil 3.50’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.48. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

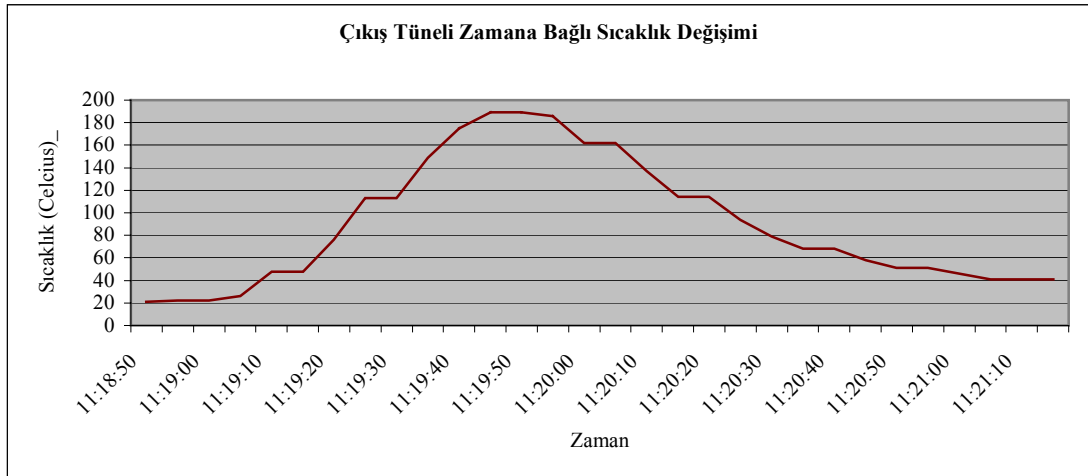


Şekil 3.49. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.50. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı hat çıkış yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat çıkış konumunda, 3 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.48, Şekil 3.49 ve Şekil 3.50'de görülmektedir. Yakıt havuzu üzerine denk gelen a7 noktasında 27 °C derece civarı ile en yüksek sıcaklıklara ulaşılmıştır. Genel olarak istasyon içindeki sıcaklıklar neredeyse hiç artış göstermemiştir. İstasyon çıkış tüneline ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin histogram ise Şekil 3.51'de görülmektedir.



Şekil 3.51. Hat çıkış yangını için çıkış tüneline zamana bağlı sıcaklık değişimi (3 m/s akış hızı)

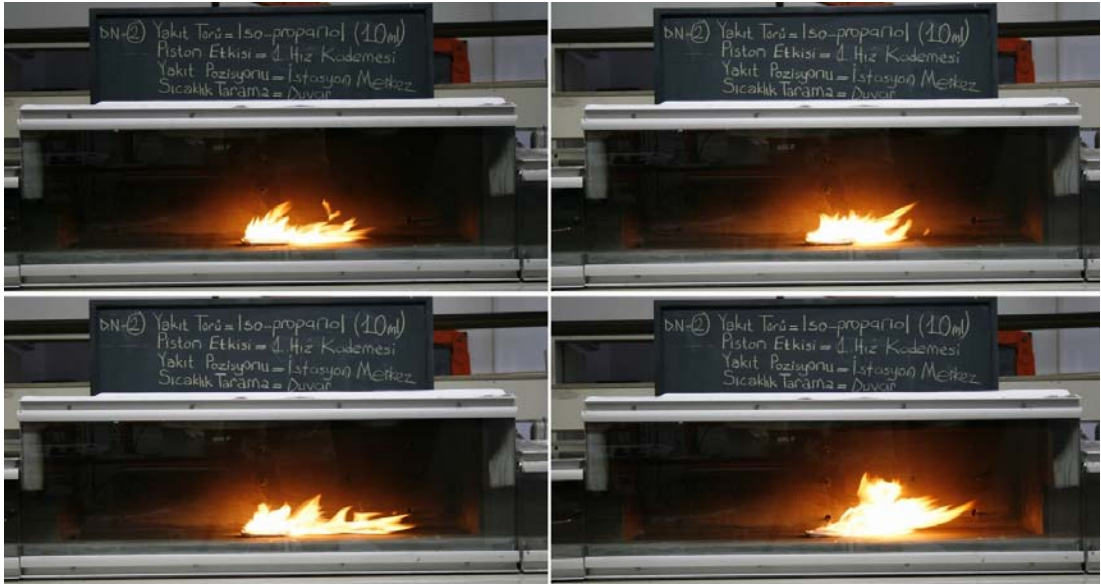
Şekil 3.51'den de görüldüğü üzere çıkış tüneline yüksek bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. Yanma tepkimesi sonucu üretilen ısı enerjisi akımla beraber çıkış tüneline geçerken, çıkış tüneline sıcaklık 190 °C dereceye ulaşmıştır. Çıkış tüneli ve istasyon içi sıcaklık histogramlarından, yanma tepkimesinin tüm enerjisinin akımla beraber çıkış tüneli boyunca aktığı ve yanmanın istasyon içerisini neredeyse hiç etkilemediği anlaşılmaktadır.

Hız ölçümlerine göre, giriş ve çıkış hızları 3 m/s civarındadır. a5 ölçüm noktasından ortalama 1,5 m/s, b5 ölçüm noktasından ortalama 1,7 m/s ve c5 ölçüm noktasından ortalama 1,5 m/s hız değerleri okunmuştur. Tüm ölçüm istasyonları, 0,6 m/s'den büyük hızlara duyarlıdır ve sadece giriş-çıkış doğrultusunda ölçüm yapmaktadır.

Çıkış tüneline SUN MGA-1200 gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 11 ppm hidrokarbon, %20,6 oksijen, %0,25 CO₂ ve %0,00 CO şeklindedir. İstasyon içindeki yaşam koşulları yangından neredeyse hiç etkilenmemiştir.

3.5.12. İstasyon merkez konumunda 3 m/s piston hızı için iso-propil alkol yakıtlı yanma

3 m/s akım şartlarında yolcu platformunun ortasında çıkan düşük enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun hat giriş konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc iso-propil alkol yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.64 ve Resim 3.65'te verilmiştir.

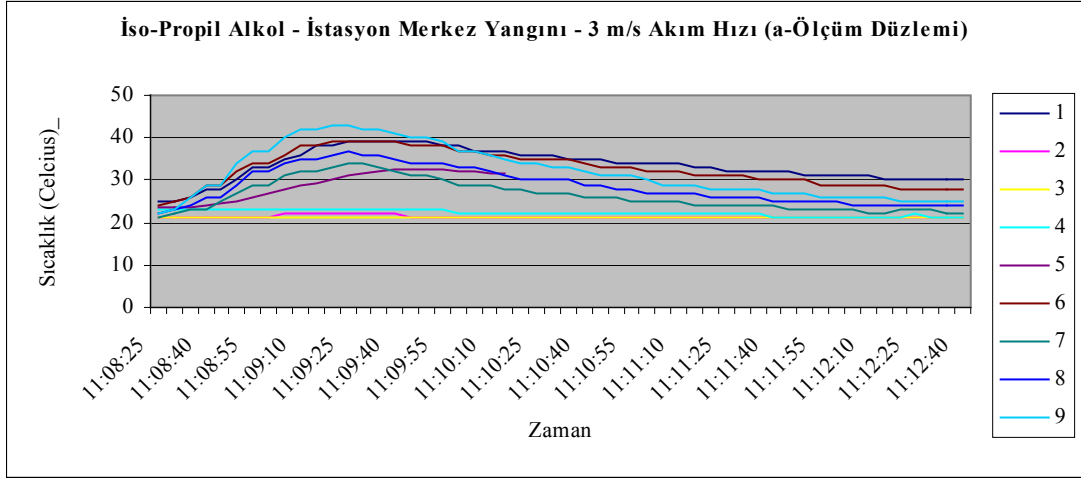


Resim 3.64. İstasyon merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s hız)

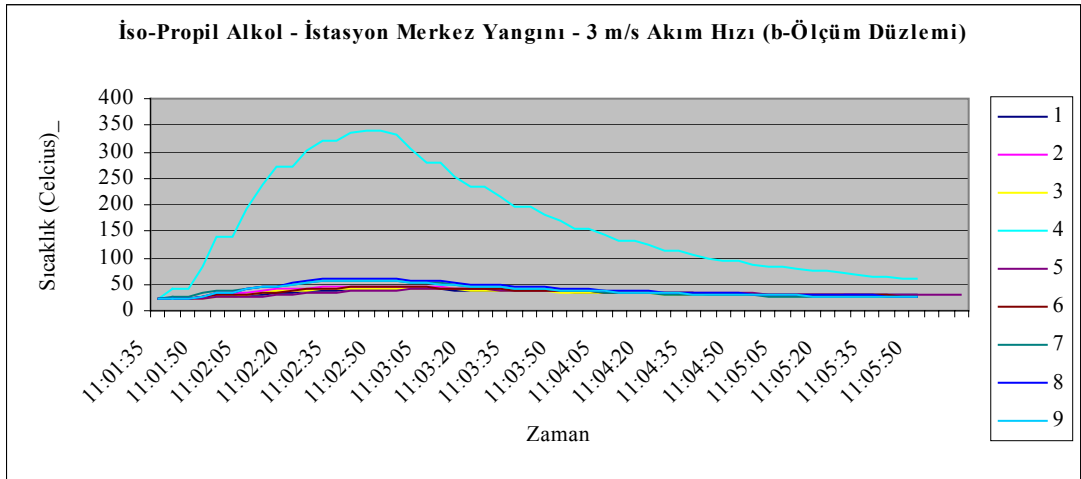


Resim 3.65. İstasyon merkez konumunda iso-propil alkol yangını (3 m/s hız)

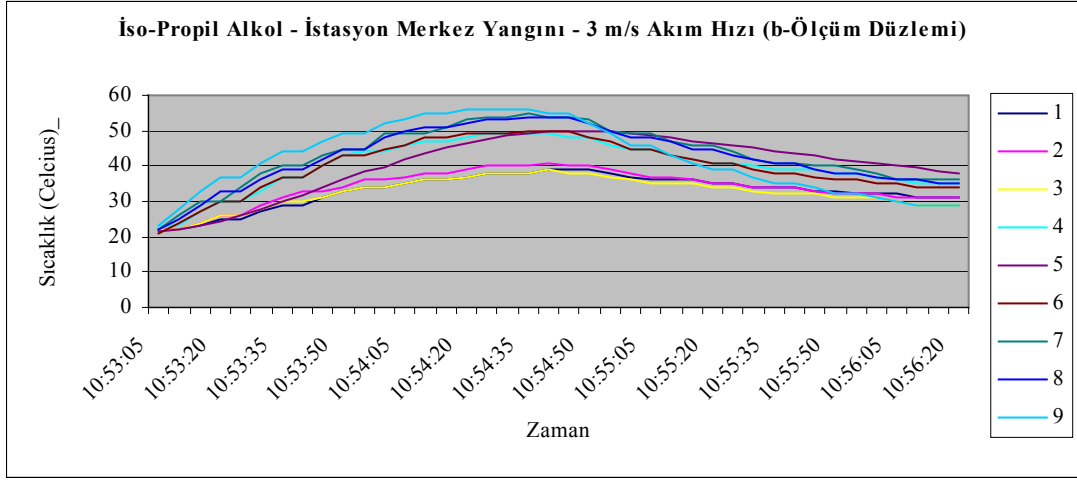
3m/s piston hızı etkisi altında, istasyon merkez konumundaki yanma incelenmiştir. Deneylede alevin oldukça kararsız olduğu ve düzgün bir alev geometrisi yakalayamadığı görülmüştür. 3 m/s piston hızı için, istasyon merkez konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.52, Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'te verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.52. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.53. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.54. 3 m/s piston hızı etkisindeki iso-propil alkol yakıtlı istasyon merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Hat çıkış konumunda, 3 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.52, Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'te görülmektedir. Yakıt havuzu üzerine denk gelen b4 noktasında 350 °C derece civarı sıcaklıklara ulaşılmıştır. Özellikle yangın arkasında kalan bölgeler ve c ölçüm düzleminin tamamı yangının ısısından etkilenmiştir. İstasyon arka duvarı önündeki en düşük sıcaklık 40 °C derece civarındadır. İstasyon çıkış tüneline 59 °C dereceye varan sıcaklıklar ölçülmüştür.

Hız problemlerinden toplanan verilere göre, giriş ve çıkış hızları 3 m/s civarında ölçülmüştür. a5 ölçüm noktasında sadece yangın boyunca ortalama 2 m/s hızlara ulaşılmış, b5 ve c5 ölçüm noktalarında ise tüm deney boyunca ortalama 2 m/s hız değerleri okunmuştur. Tüm ölçüm istasyonları, 0,6 m/s'den büyük hızlara duyarlıdır ve sadece giriş-çıkış doğrultusunda ölçüm yapmaktadır. Bu nedenle, istasyon içerisindeki geri akışa ve farklı doğrultulardaki hızlara dair veri toplanamamıştır. Deneyin görsel kayıtlarından istasyon tavanında bir geri akış olduğu gözlenmektedir.

Çıkış tüneline SUN MGA-1200 gaz analiz cihazı kullanılarak elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 3 ppm hidrokarbon, %20,5 oksijen, %0,24 CO₂ ve %0,00 CO şeklindedir. Yangın önünde kalan alan, alevden ve ortaya çıkan ısıdan en az etkilenen bölge olarak yangın sırasında nispeten istasyon içindeki en güvenli alandır.

3.6. İstasyon Modeli İçerisinde n-Heptan Yakıtlı Yanma Deneyleri

İstasyon modeli içerisinde yüksek enerjili yangını temsil edebilmek için giriş duvarı, çıkış duvarı, arka duvar ve istasyon merkez konumlarına yerleştirilmiş yangın havuzlarında 10 cc n-heptan, zorlanmış havalandırma olan ve olmayan koşullarda yakılmıştır. İso-propil ile yapılan yangın deneylerinde alınan sonuçlar incelenmiş ve ateşin bu akış şartları altında çok kararsız olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca 3 m/s'lik hız altında, istasyon içerisinde sıcaklık dağılımları yakalanamamakta, yanma tepkimesi sonucu açığa çıkan ısının çoğu akımla beraber çıkış tüneline tahliye olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı 3 m/s'lik piston etkisi incelemesi n-heptan deney prosedüründen çıkartılmıştır. n-Heptan deneylerinde, piston etkisi olmayan hallerdeki ve 1 m/s piston hızı etkisi altındaki yanma ve istasyon içerisindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. n-Heptan deneylerinde kaydedilen emisyon değerlerinin tamamı Capelec gaz analiz cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

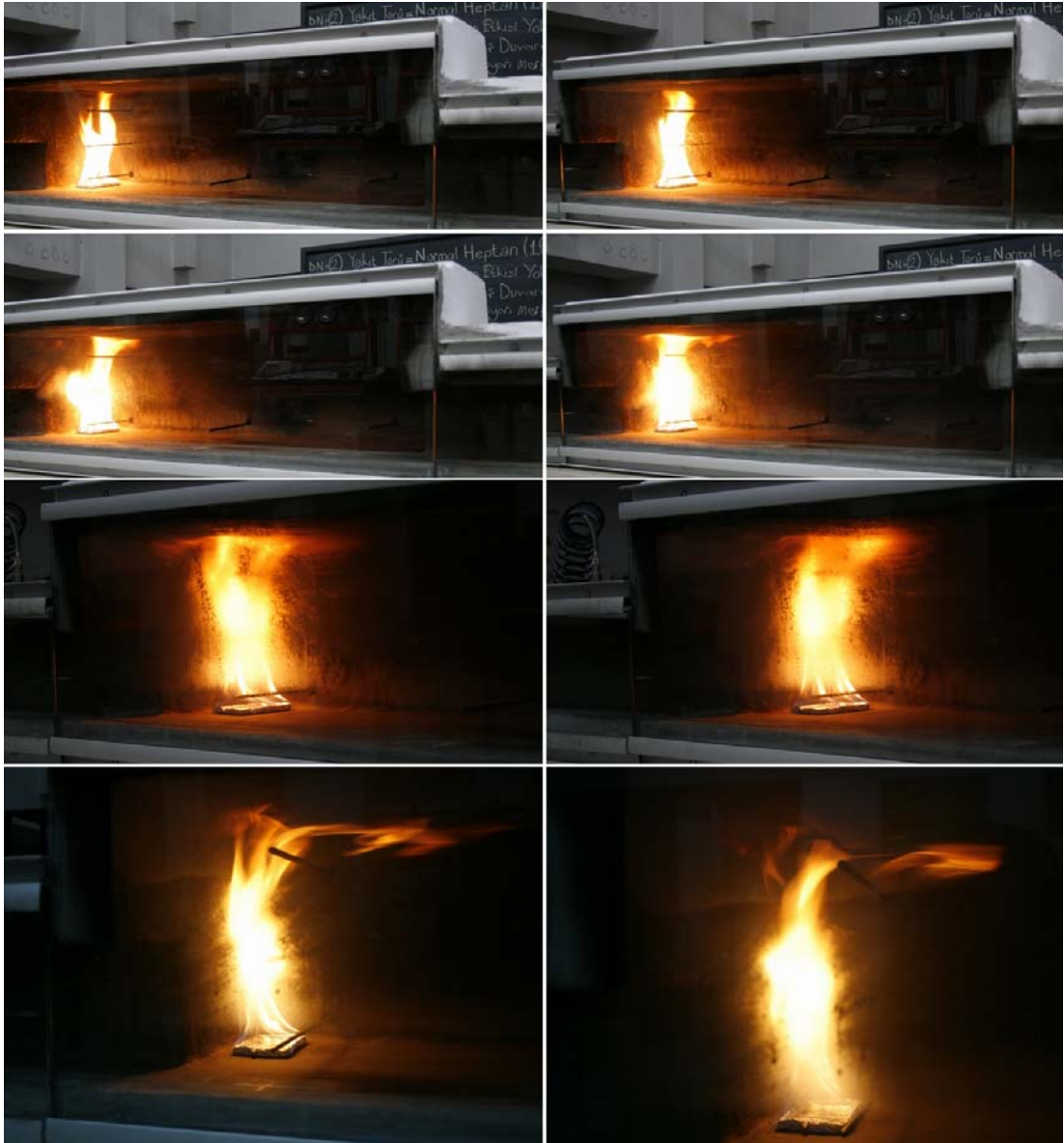
3.6.1. Giriş duvarı konumunda n-heptan yakıtlı yanma

Zorlanmış ventilasyon olmayan bir istasyondaki giriş duvarı konumunda çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun giriş duvarı konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-heptan yakılmıştır. Modelin giriş duvarı konumunun üstüne denk gelen kısımda merdiven boşluğunu temsil etmesi için açılmış dikdörtgen kesitli bir delik mevcuttur ve bu delik ateşe dayanıklı tıpa ile kapatılmıştır. Tıpa, deliği büyük ölçüde kapatmış olsada hava sızdırmaz değildir. Bu nedenle çıkarılan ateş ilk olarak tıpa çevresini yalama eğilimi göstermiştir. Bu durum Resim 3.66'da görülmektedir.



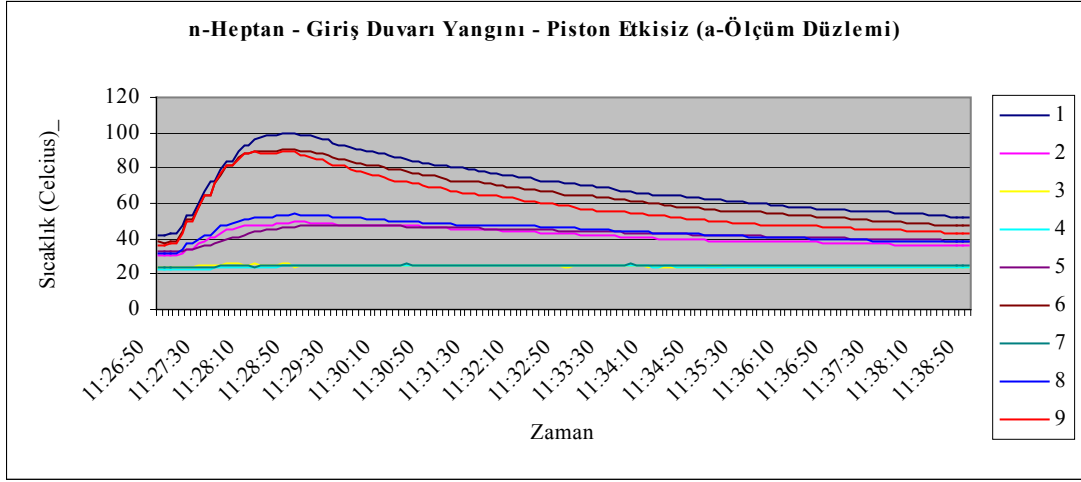
Resim 3.66. Giriş duvarı konumunda n-heptan yangını başlangıcı

Piston etkisiz durumda giriş duvarında yanma deneylerine ilişkin fotoğraflar Resim 3.67'de verilmiştir.

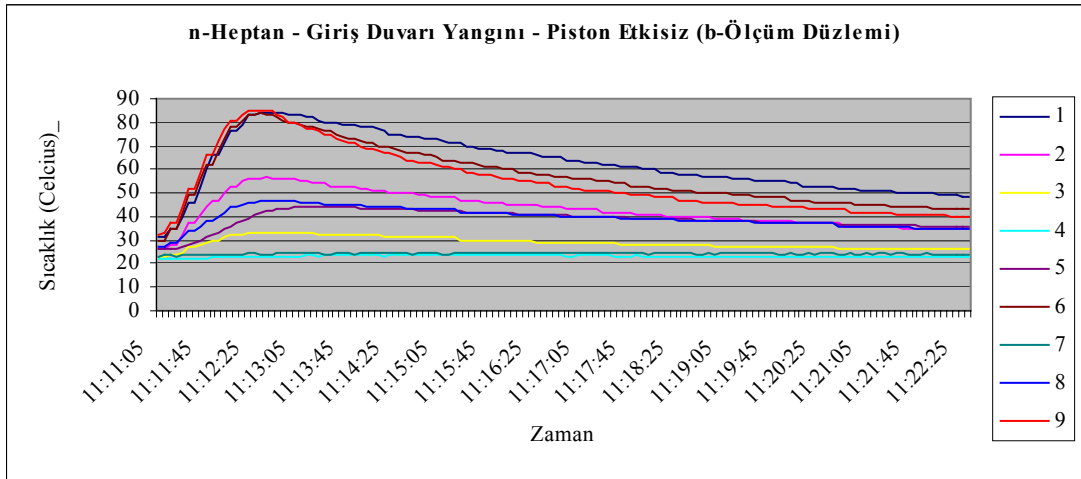


Resim 3.67. Giriş duvarında n-heptan yakıtlı yanma

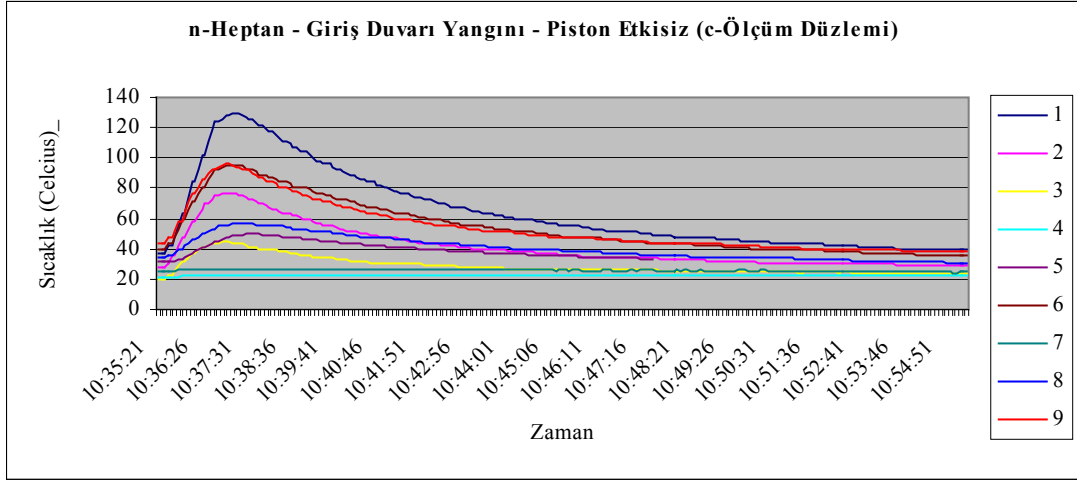
Resim 3.67’de piston etkisi olmayan istasyonda, giriş duvarı konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen yangın görülmektedir. Yanma müddetince alev oldukça gürbüz ve kararlıdır. İstasyon tavanına çarpan alev dönmüş ve istasyon içlerine kadar yürümüştür. İstasyon giriş konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.55, Şekil 3.56 ve Şekil 3.57’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.55. n-Heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için a düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.56. n-Heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için b düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.57. n-Heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için c düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

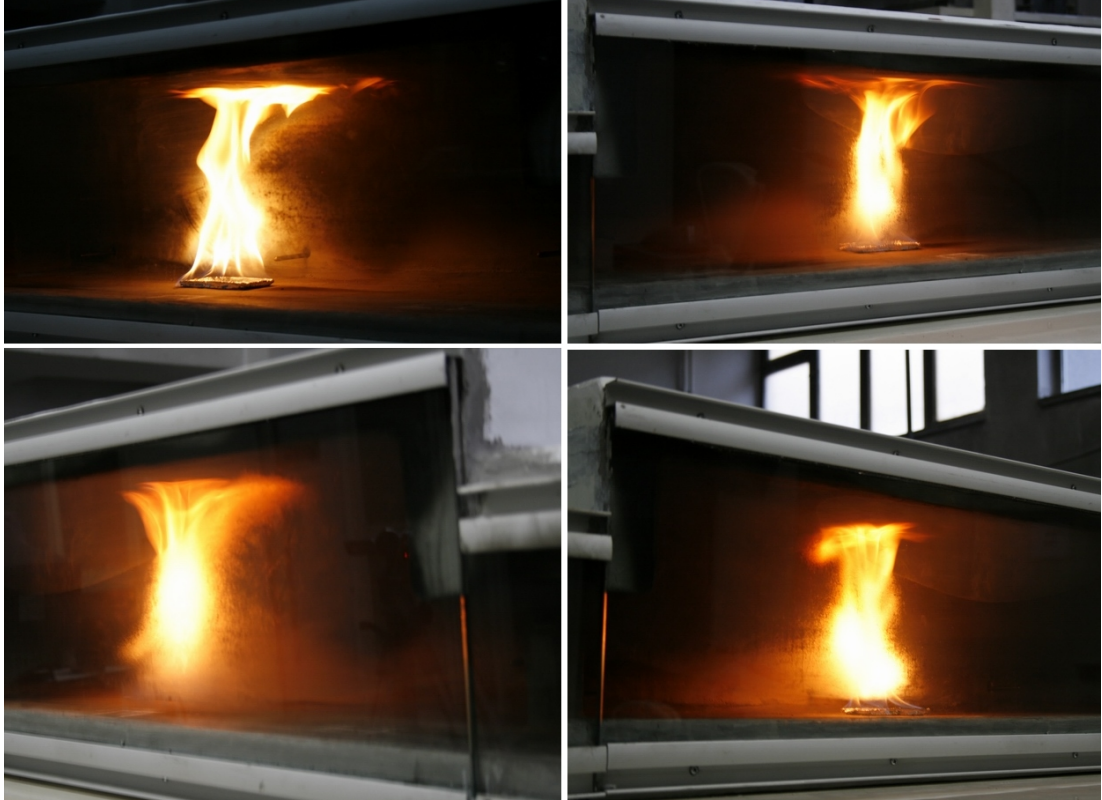
Giriş duvarı konumunda yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.55, Şekil 3.56 ve Şekil 3.57'de görülmektedir. Yakıt havuzu üzerine denk gelen c3 noktasında şaşırtıcı bir şekilde sıcaklık ancak 50°C dereceye ulaşmıştır. Sıcaklık artışı özellikle tavanda olmuş, tüm tavan boyunca sıcaklıklar 90°C derece civarı ölçülmüştür. İstasyonda insan dolaşım hacimlerini kapsayan a, b ve c ölçüm düzlemlerindeki 3, 4 ve 7 nolu ölçüm istasyonlarının tamamında insan hayatını tehdit etmeyecek düzeyde sıcaklıklar ölçülmüştür (27°C). İstasyon içerisinde buoyancy kuvvetleri çok etkin rol oynamaktadır ve tüm sıcak gazlar tavan bölgesinde toplanmıştır. İstasyon çıkış tüneline sıcaklık 18°C derece ölçülmüştür. Giriş ve çıkış tünellerinde, tüm ölçüm istasyonlarının, $0,6\text{ m/s}$ 'den büyük hızlara duyarlı olması kaynaklı olarak hız ölçülemediği, istasyon içinde (a5, b5 ve c5 konumları) alınan ölçümlerde çok kısa aralıklarla ve seyrek olarak $0,6\text{-}0,7\text{ m/s}$ hız okumaları yapılmıştır. Bu sonuçlardan, istasyon içerisinde yavaş hava hareketleri ve düşük miktarlarda basınç değişimleri olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca giriş tüneline az miktarda ve çıkış tüneline yoğun olarak duman çıkışı gözlemlenmiştir.

Yanma boyunca çıkış tüneline alınan hidrokarbon emisyon değerleri $38\text{-}85\text{ ppm}$ aralığında ölçülmüştür. Gaz analiz cihazından alınan diğer emisyon değerleri ise $\%17\text{-}\%15,3$ oksijen, $\%2,2\text{ CO}_2$ ve $\%0,084\text{-}\%0,102\text{ CO}$ şeklindedir. Çıkış tüneline

oksijen miktarının %15 mertebelerine düşmesi oldukça önemlidir ve istasyon içerisindeki oksijen miktarının bu değerden düşük olması kuvvetle muhtemeldir.

3.6.2. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma

Zorlanmış ventilasyon olmayan bir istasyonda yolcu platformunun ortasında çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyon merkez konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-heptan yakılmıştır. Deneye ilişkin fotoğraflar Resim 3.68 ve Resim 3.69'da görülmektedir.

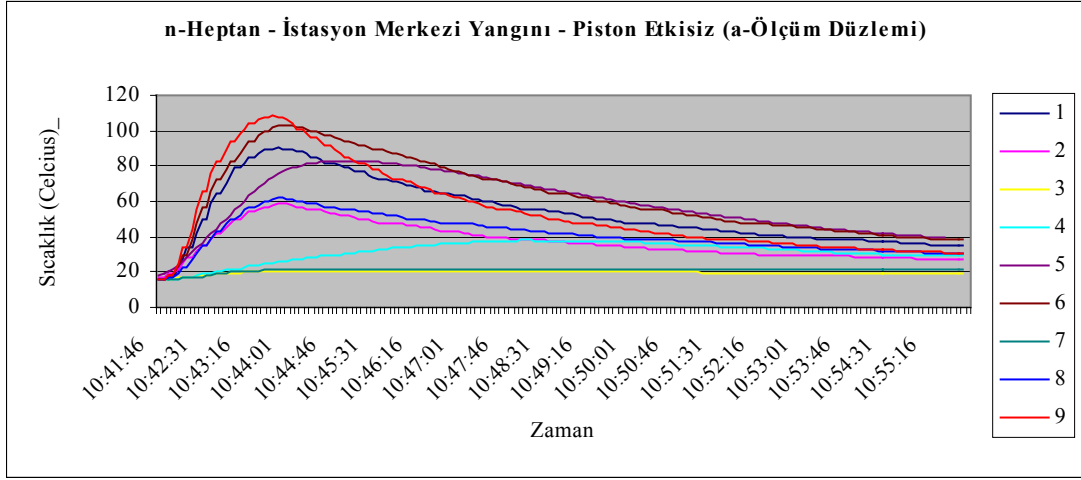


Resim 3.68. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma

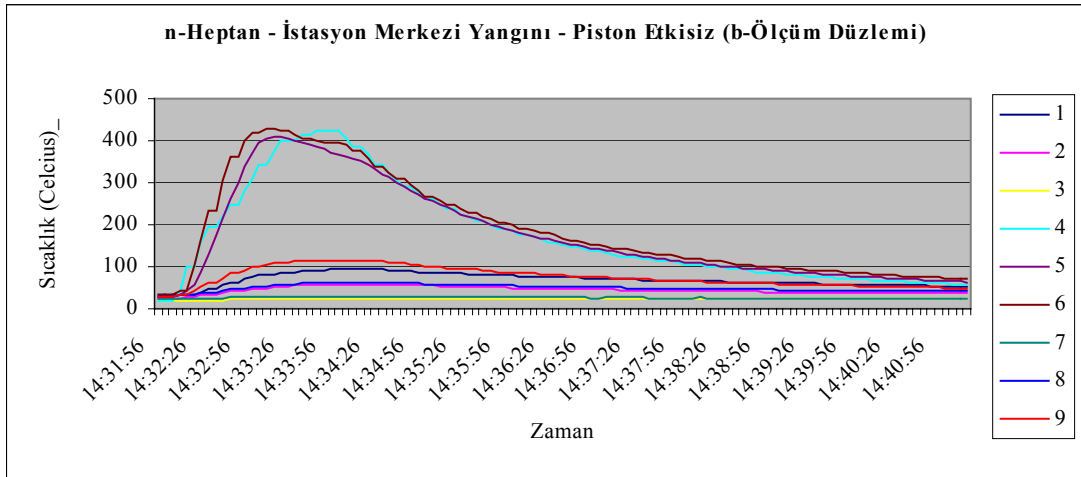


Resim 3.69. İstasyon merkez, n-heptan yakıtlı yanma - alev içi sıcaklık ölçümü

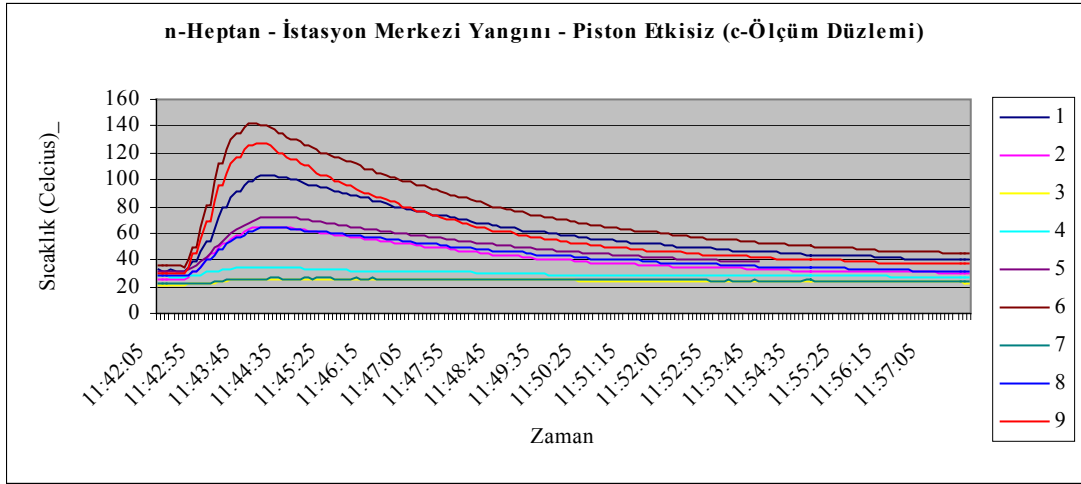
Piston etkisi olmayan istasyonda, istasyon merkez konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen yangın yukarıdaki resimlerde görülmektedir. Yanma müddetince alev oldukça gürbüz ve kararlıdır. İstasyon tavanına çarpan alev istasyon tavanına dairesel bir geometride yayılmıştır. İstasyon merkez konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.58, Şekil 3.59 ve Şekil 3.60'ta verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.58. n-Heptan yakıtlı istasyon merkez yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.59. n-Heptan yakıtlı istasyon merkez yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.60. n-Heptan yakıtlı istasyon merkez yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

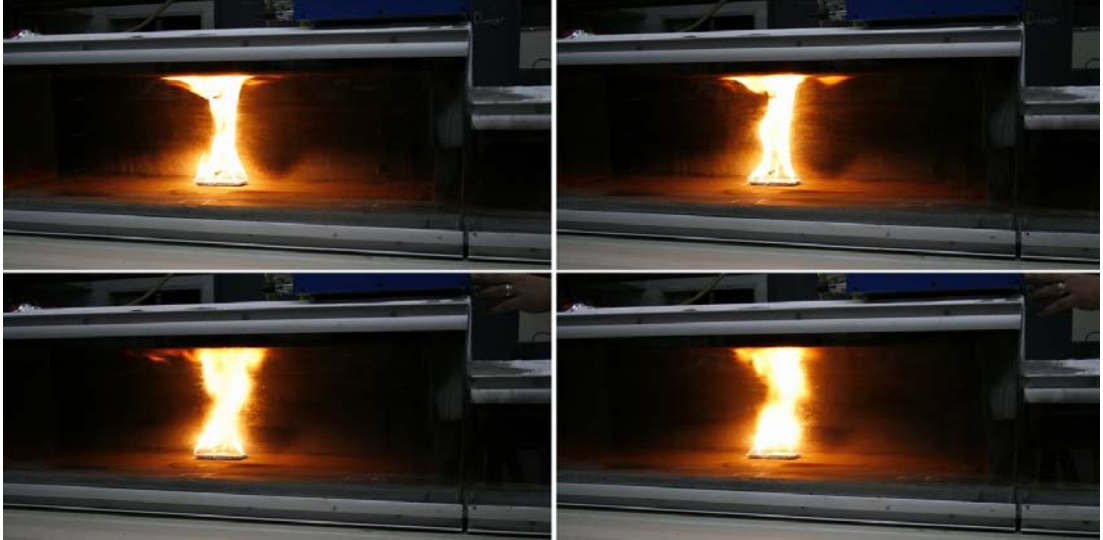
Giriş duvarı konumunda yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.58, Şekil 3.59 ve Şekil 3.60'ta görülmektedir. Yakıt havuzu üzerine denk gelen b4 noktasında sıcaklık 400 °C dereceye ulaşmış, alev bloğu içerisinde bulunan b5 ve b6 ölçüm noktalarında benzer sıcaklıklar ölçmüştür. Sıcaklık artışı özellikle tavanda olmuş, tüm tavan boyunca sıcaklıklar 100-140 °C derece civarı ölçülmüştür. İstasyonda insan dolaşım hacimlerini kapsayan a, b ve c ölçüm düzlemlerindeki 3 ve 7 nolu ölçüm istasyonlarının tamamında insan hayatını tehdit etmeyecek düzeyde sıcaklıklar ölçülmüştür (30 °C). İstasyon çıkış tüneline sıcaklık 20 °C derece ölçülmüştür. Giriş ve çıkış tünellerinde, tüm ölçüm istasyonlarının, 0,6 m/s'den büyük hızlara duyarlı olması kaynaklı olarak hız ölçülemediği, istasyon içinde (a5, b5 ve c5 konumları) alınan ölçümlerde çok kısa aralıklarla ve seyrek olarak 0,6-0,7 m/s hız okumaları yapılmıştır. Bu sonuçlardan, istasyon içerisinde yavaş hava hareketleri ve düşük miktarlarda basınç değişimleri olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca giriş tüneline az miktarda ve çıkış tüneline yoğun olarak duman çıkışı gözlenmiştir.

Yanma boyunca çıkış tüneline alınan hidrokarbon emisyon değerleri 35-86 ppm aralığında ölçülmüştür. Gaz analiz cihazından alınan diğer emisyon değerleri ise %20,9-%14,4 aralığında oksijen, %2,7-%3,9 aralığında CO₂ ve %0,014-%0,082 aralığında CO şeklindedir. Çıkış tüneline oksijen miktarının %14 mertebelerine

düşmesi oldukça önemlidir ve istasyon içerisindeki oksijen miktarının bu değerden düşük olması kuvvetle muhtemeldir.

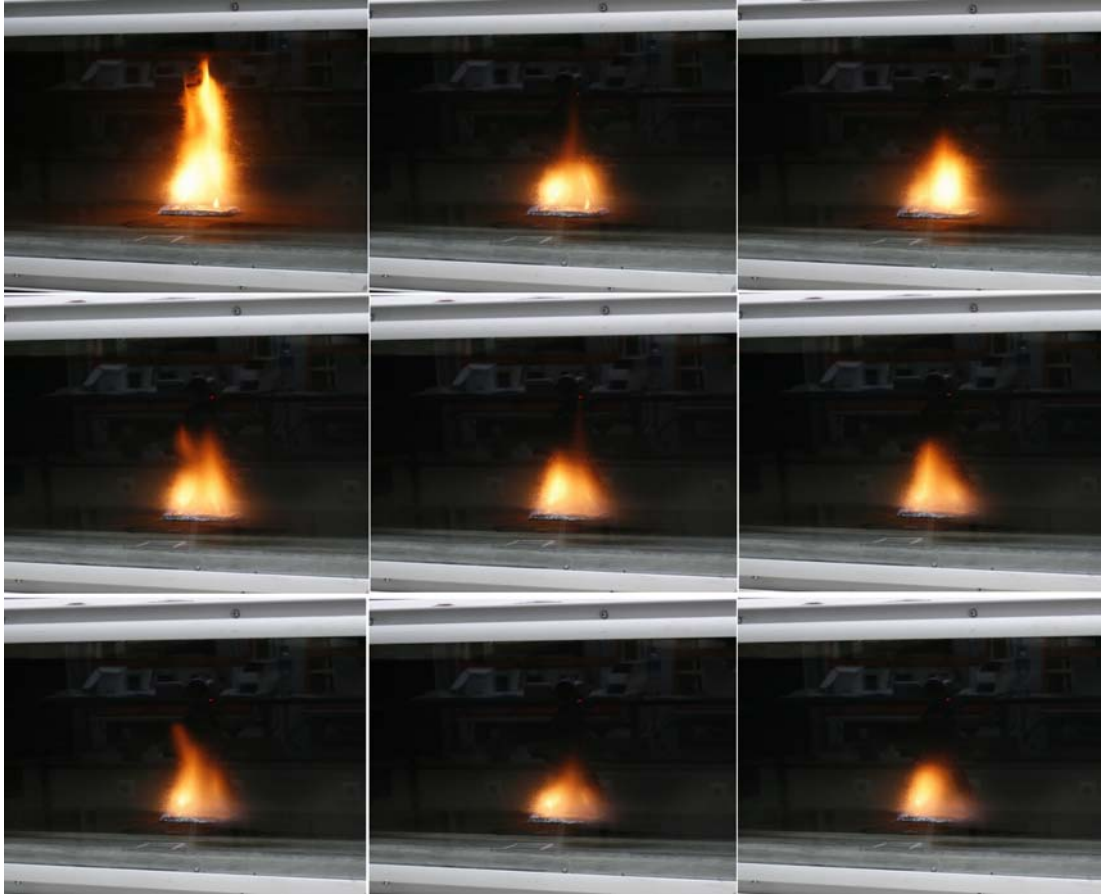
3.6.3. İstasyon arka duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma

Zorlanmış ventilasyon olmayan bir istasyonun yolcu platformu arka duvarı önünde çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun arka duvar konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-heptan yakılmıştır. Deneye ilişkin fotoğraflar Resim 3.70’te görülmektedir.



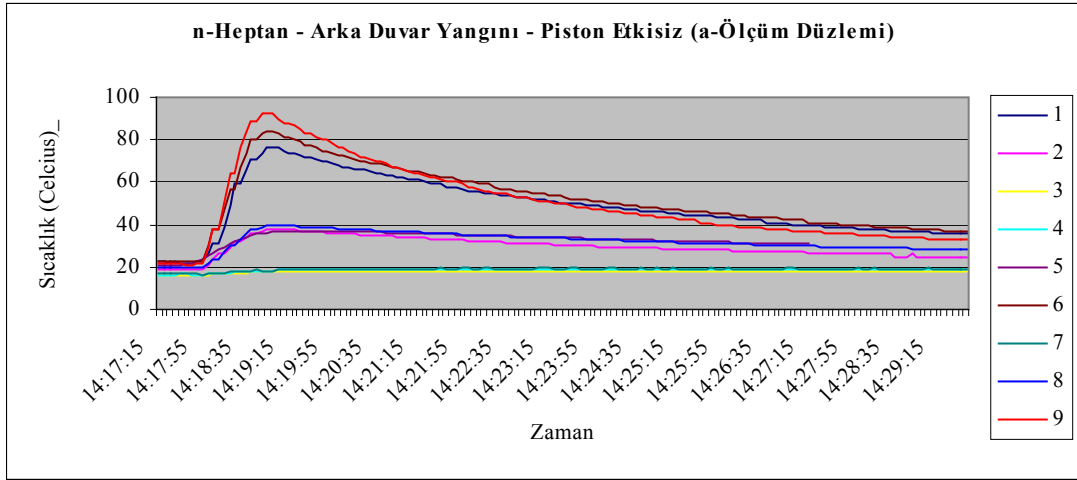
Resim 3.70. İstasyon arka duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma

Yanmanın ilerleyen zamanlarında yakıt havuzunda yakıt olmasına rağmen alev küçülmüş, ara ara tekrar canlanmıştır. Bu duruma ilişkin resimler Resim 3.71’de sunulmuştur.

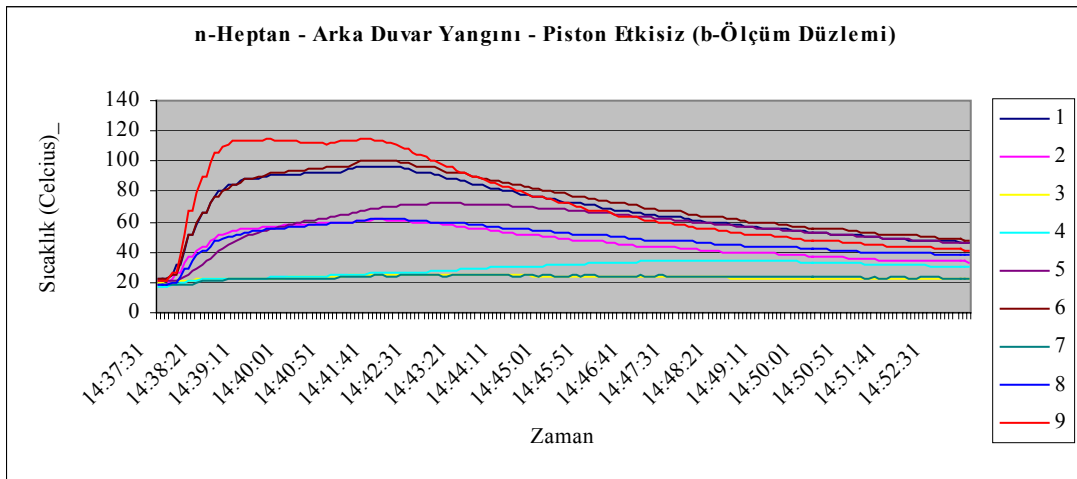


Resim 3.71. İstasyon arka duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma sonu

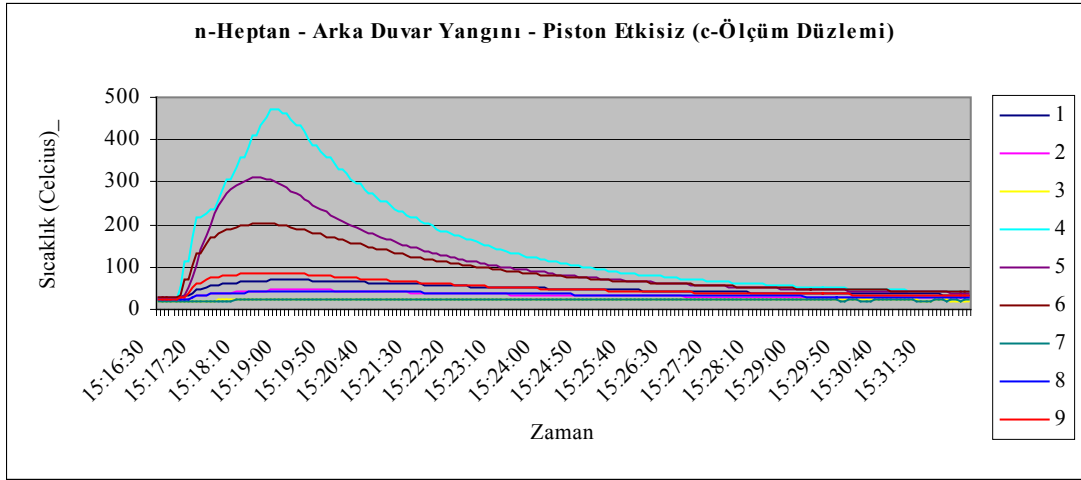
Piston etkisi olmayan istasyonda, istasyon arka duvar konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen yangın yukarıdaki resimlerde görülmektedir. Yanma başlarında alev oldukça gürbüz (robust) ve kararlıdır ama yanmanın sonlarına doğru alev gürbüzlüğünü kaybetmiştir. İstasyon tavanına çarpan alev istasyon simetri eksenine ve kenarlara doğru yayılmıştır. İstasyon arka duvar konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.61, Şekil 3.62 ve Şekil 3.63’de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7’de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.61. n-Heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.62. n-Heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.63. n-Heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

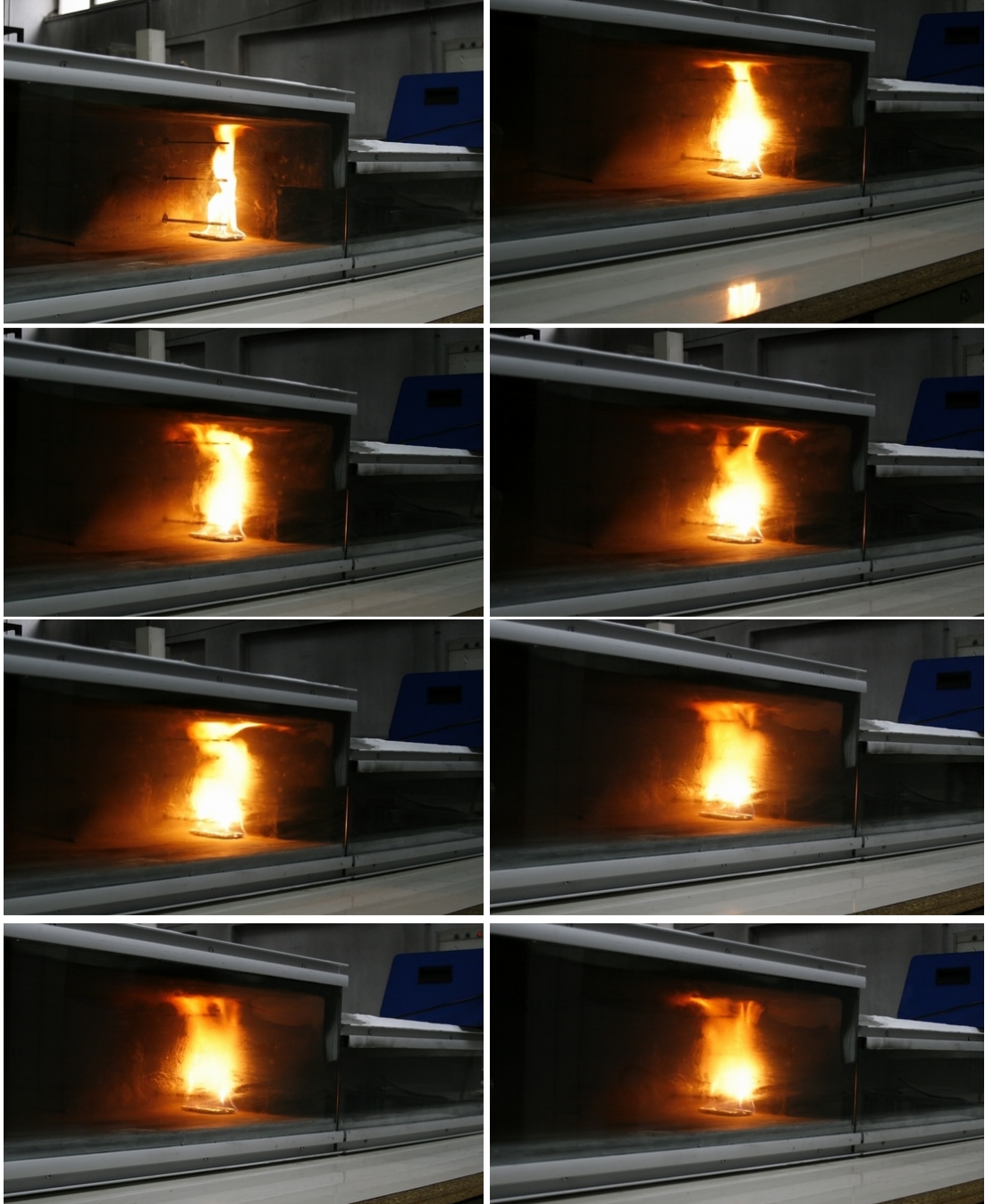
Zamana bağlı sıcaklık değişimi grafiklerinden, yangın merkezinden uzaklaştıkça tavadaki ve orta hattaki sıcaklık düşümü rahatça belli olmaktadır. Ayrıca, grafiklerden giriş tüneli tarafında bulunan tıpa ile kapalı merdiven boşluğu deliğinin sıcaklık dağılımına etkisi de görülmektedir. Tavanı yekpare olan çıkış tüneli tarafında sıcaklıklar (a9, b9, c9) giriş tüneli tarafına nazaran (a1, b1, c1) daha yüksektir. Yer seviyesinde sıcaklık artışları en alt düzeyde gerçekleşmiştir. Giriş ve çıkış tünellerinden duman çıkışı (backflow) gözlenmiştir.

Yanma boyunca çıkış tüneline alınmış hidrokarbon emisyon değerleri 75-270 ppm aralığında ölçülmüştür. Gaz analiz cihazından alınan diğer emisyon değerleri ise %16,6 oksijen, %2,2 CO₂ ve %0,0121 CO şeklindedir. İstasyon içerisindeki emisyon değerleri ise 126-376 ppm hidrokarbon, %12,3-%13,5 oksijen, %4,7-%5,5 CO₂ ve %0,01 oranında CO olarak belirlenmiştir. İstasyonun içerisindeki ortam hayatı idame ettirmeye müsait değildir.

3.6.4. İstasyon çıkış duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma

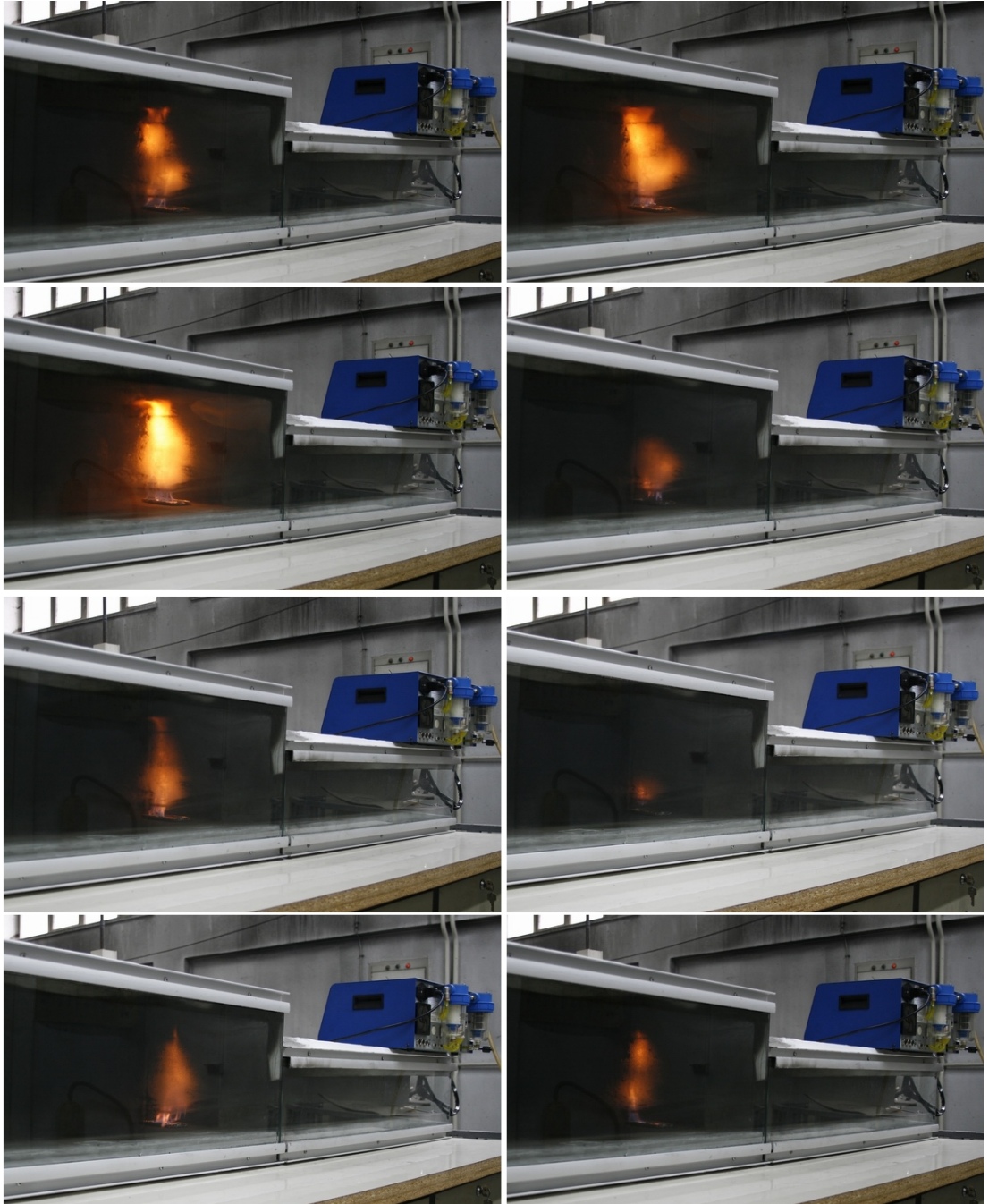
Zorlanmış ventilasyon olmayan bir istasyondaki çıkış duvarı konumunda çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun çıkış duvarı konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-

heptan yakılmıştır. Bu deneyin giriş duvarı deneyinden farkı, çıkış duvarı konumu üzerinde herhangi bir kaçak yada hava girişi olmaması ve yangının istasyonun arka köşesinde sıkışmış halde bulunmasıdır. Deneye ilişkin fotoğraflar Resim 3.72’de görülmektedir.



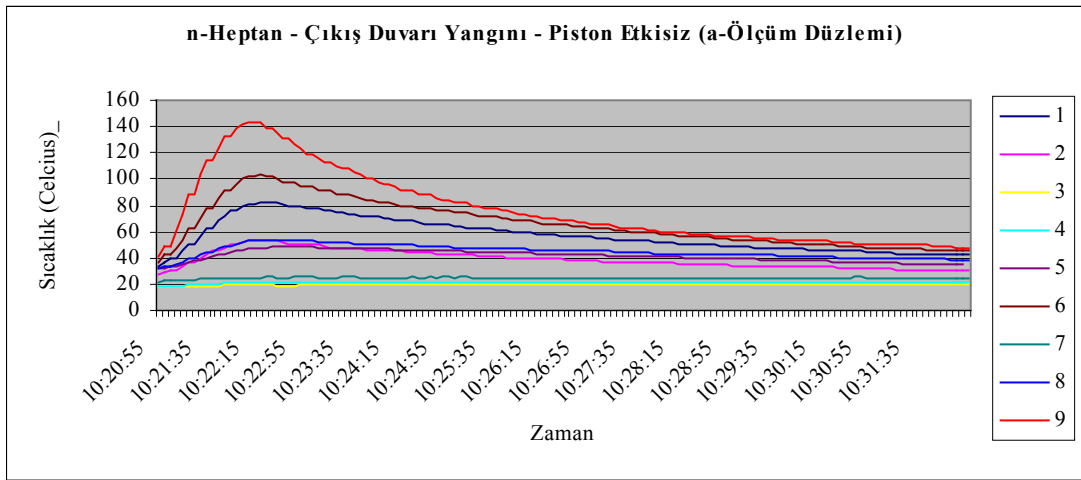
Resim 3.72. Çıkış duvarın konumunda n-heptan yakıtlı yanma

Yanmanın ilerleyen zamanlarında yakıt havuzunda yakıt olmasına rağmen alev küçülmüş, ara ara tekrar canlanmıştır. Bu duruma ilişkin fotoğraflar Resim 3.73'te sunulmuştur.

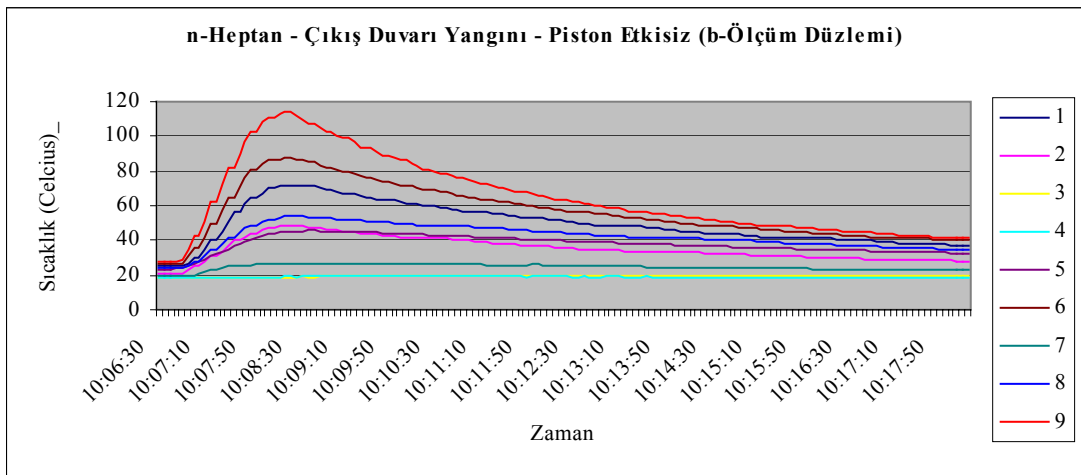


Resim 3.73. Çıkış duvarında n-heptan yangını - alev sönmesi

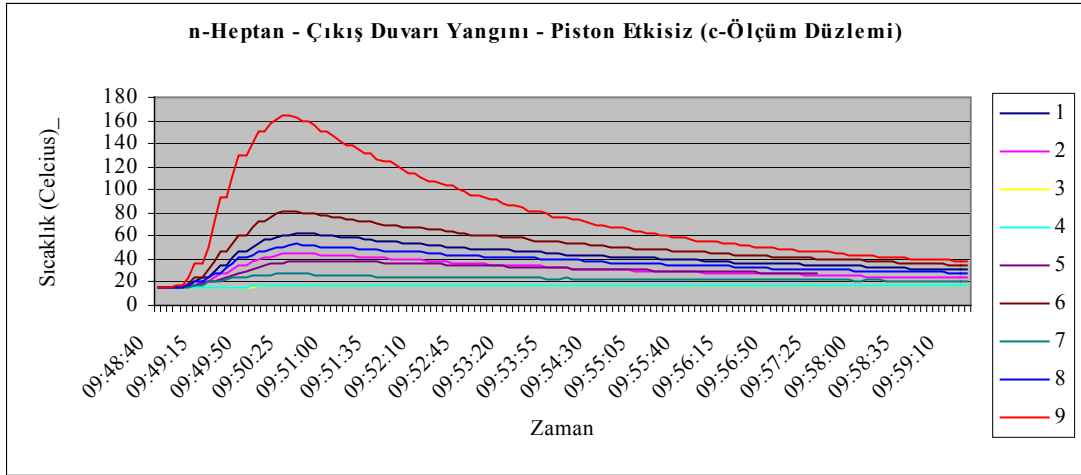
Piston etkisi olmayan istasyonda, istasyon çıkış duvarı konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen yangın Resim 3.63'te görülmektedir. Yanma başlarında alev oldukça gürbüz (robust) ve kararlıdır ama sonlara doğru alev gürbüzlüğünü kaybetmiştir. İstasyon tavanına çarpan alev istasyon merkezine ve simetri eksenine doğru yayılmıştır. İstasyon çıkış duvarı konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.64, Şekil 3.65 ve Şekil 3.66'da verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.64. n-Heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.65. n-Heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.66. n-Heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Sıcaklık değişimi grafiklerinden görüldüğü üzere, Yangın havuzunun üstüne denk gelen c9 bölgesinde en yüksek sıcaklık olan 165 °C dereceye ulaşılmış, aynı hat üzerindeki a9 ve b9 bölgelerinde 100-140 °C derece arası sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Yanma boyunca a, b ve c düzlemlerindeki 3 ve 4 noktalarında ancak 3 derecelik bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir.

Yanma boyunca çıkış tüneline alınan hidrokarbon emisyon değerleri 75-270 ppm aralığında ölçülmüştür. Gaz analiz cihazından alınan diğer emisyon değerleri ise %19,4 oksijen, %1 CO₂ ve %0,025 CO şeklindedir. Çıkış tüneli içindeki sıcaklık 18 °C derece civarında ölçülmüştür.

3.6.5. Piston etkisi olmayan istasyonda n-heptan yakıtlı yanma gözlemleri

Piston etkisi (zorlanmış havalandırma) olmayan istasyon modeli içerisinde yapılan yangın deneylerinde dört farklı konumda (giriş duvarı, istasyon merkez, arka duvar, çıkış duvarı) yanma incelenmiştir. Giriş duvarı, çıkış duvarı ve arka duvar konumlarında çıkartılan yangınlarda alev, ölçüm probleminin sokulduğu deliklerden dışarı sıçramış, bu deliklerden içeri giren hava nedeniyle sürekli olarak bir miktar taze hava ile temasta kalmıştır. Giriş duvarı konumunda çıkartılan yangın, tavandaki

tam yalıtımlı olmayan merdiven boşluğu nedeniyle taze hava ile beslenmiş ve bu nedenle çıkış duvarı yangınına nazaran daha gürbüz ve kararlı yanmıştır.

Arka duvar ve çıkış duvarı konumlarında çıkartılan yangınlar oldukça kuvvetli başlamakta, bir müddet gürbüz olarak yandıktan sonra yakıt havuzunda yeterince yakıt olmasına rağmen ateş küçülmekte ve kararsızlaşmaktadır. Bazı deneylerde yakıt havuzunda hala n-heptan olmasına rağmen alev tamamen sönmüştür. Alevin yakıt bitene kadar canlı kaldığı durumlarda ise yanmanın son evrelerinde ateş iyice küçülmekte ve ara ara tekrar canlanmaktadır. Bu durumun nedeni zorlanmış havalandırma olmayan durumlarda yanma sırasında tüketilen oksijenin arka duvardaki ölçüm deliklerinden ve giriş-çıkış tünellerinden karşılanamıyor olmasıdır. Arka duvar konumunda n-heptan yakıtlı yanma deneyinde istasyon içerisinde b1 konumundan alınan emisyon ölçümleri sonucu da bu çıkarımla örtüşür niteliktedir.

University of Louisville (Louisville Üniversitesi) Kamu Güvenliği Departmanı'nın (Department of Public Safety) internet sayfasından alınan verilere göre bir insanın normalde soluduğu havada %21 oranında oksijen bulunması gerekmektedir. Eğer bu oran %17'nin altına düşerse kişilerde düşünce bozuklukları, istemli kas hareketlerinde zorluk ve koordinasyonsuzluk gibi semptomlar ortaya çıkmakta ve bu semptomlar nedeniyle yangın kurbanları olay yerinden kaçmakta zorlanmakta veya kaçamamaktadır. Eğer oksijen miktarı %11'in altına düşerse canlılarda solunum durmakta ve 6 dakika içinde beyin ölümü gerçekleşmektedir [35]. Daha detaylı bir tablo ise Birleşmiş Milletler Kimyasal Güvenlik ve Tehlike Araştırma Kurulunun Haziran 2003 tarihli güvenlik bülteninde verilmiştir. Tabloya göre ortamda normalde %20,9 oksijen olmalıdır. Ortamdaki oksijen miktarı %19'un altına düşerse kişilerde belli belirsiz psikolojik yan etkiler görülürken, %16'nın altına düştüğünde kalp atışlarında ve soluk alma hızında artış, koordinasyon kayıpları, odaklanma ve dikkat eksikliği görülmektedir. Ortamdaki oksijen miktarı %14'ün altına düştüğünde ise kişilerde aşırı yorgunluk hali, mutsuzluk, darlanma hissi, koordinasyonsuzluk ve düşünce bozuklukları görülür. Oksijen miktarının %12,5 değerinin altına düşmesi ile mide bulantıları, kusma, soluk almada düzensizlik, bilinç yitimi gibi semptomlar ortaya çıkar ve kalıcı kalp hasarları oluşabilir. Oksijen miktarının %10'un altına

düşmesi ile hareketsizlik, kıvrınma ve ölüm meydana gelir [36]. Piston etkisi olmayan durumlarda çıkış tüneline bile oksijen miktarı ancak %17 civarındadır, istasyon içerisinde yangından uzak bir konumda alınan değer ise %12 ile insan yaşamını ciddi şekilde tehdit edici ölçüdedir. Bir kısım deneyde yakıt olmasına rağmen yanmanın durması da, oksijen miktarının bazı anlarda ve bölgelerde %10'un altına düştüğünü göstermektedir.

3.6.6. Giriş duvarı konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma

1 m/s akım şartlarında istasyon giriş duvarı konumunda çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun giriş duvarı konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-heptan yakılmıştır. Deneyle ilgili fotoğraflar Resim 374 ve Resim 3.75'te verilmiştir.



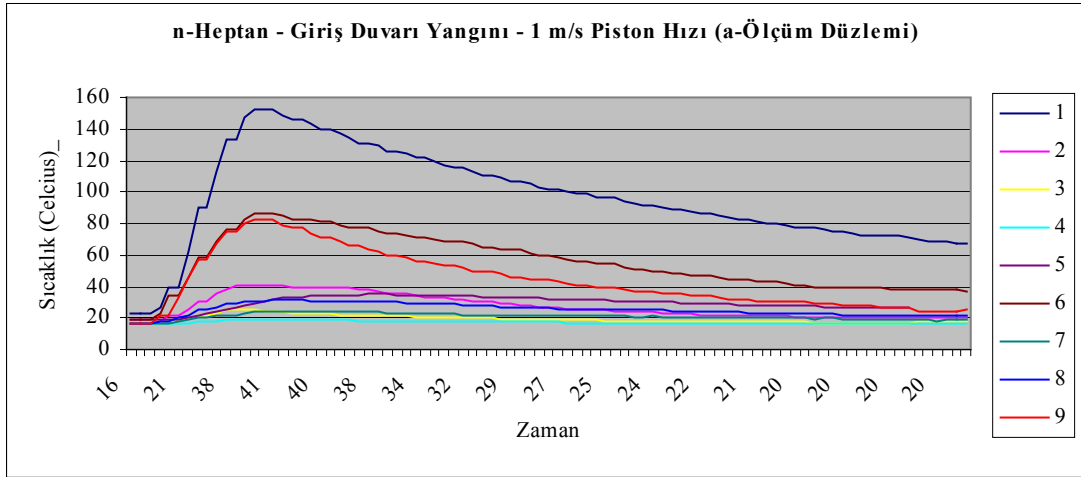
Resim 3.74. Giriş duvarında n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s piston hızı)



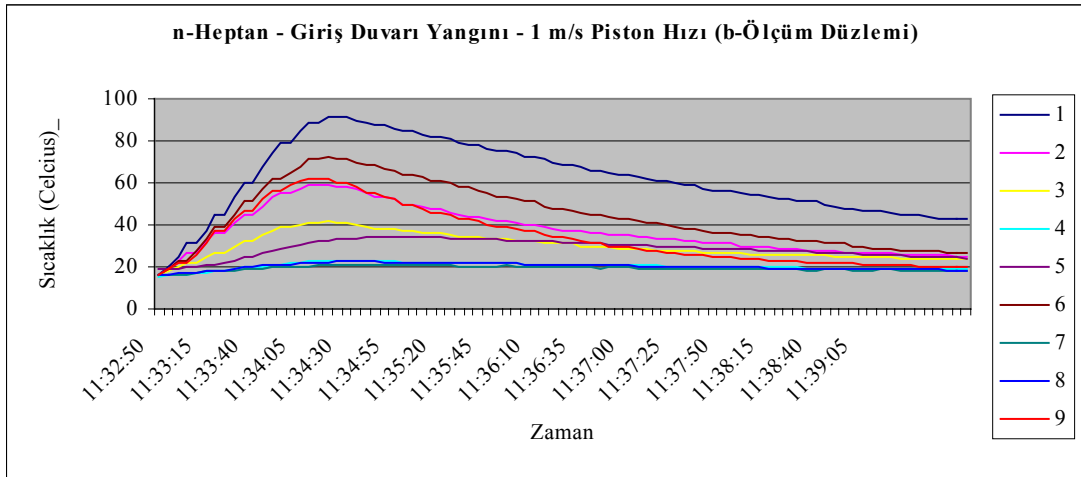
Resim 3.75. Giriş duvarında n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s piston hızı)

1 m/s piston etkisi olan istasyonda, istasyon giriş duvarı konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen istasyon yangını Resim 3.75'te görülmektedir. Yanma boyunca alev oldukça gürbüz (robust) ve kararlıdır. İstasyon tavanına çarpan alev, istasyon merkezine ve simetri eksenine doğru yayılmıştır. 1 m/s ventilasyon hızı

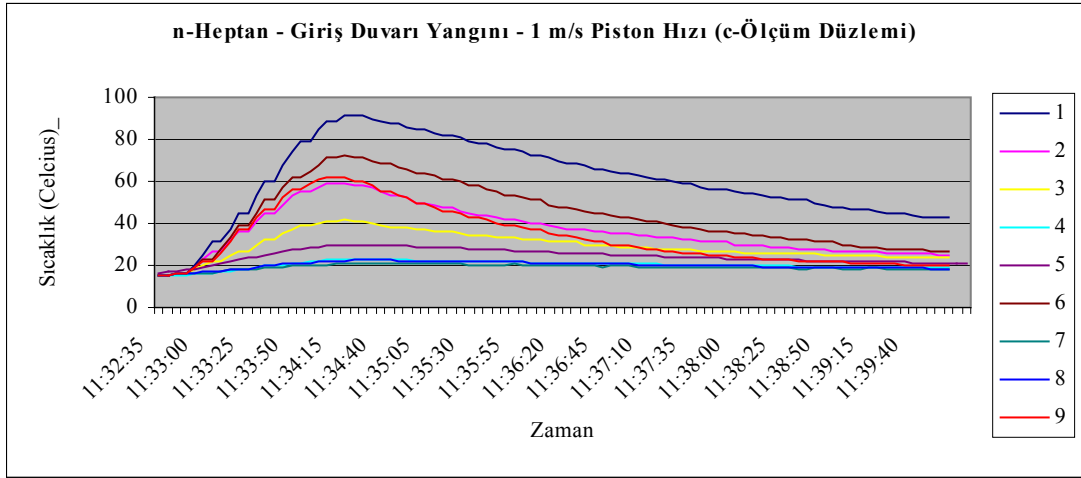
etkisinde istasyon giriş duvarı konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.67, Şekil 3.68 ve Şekil 3.69'da verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.67. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

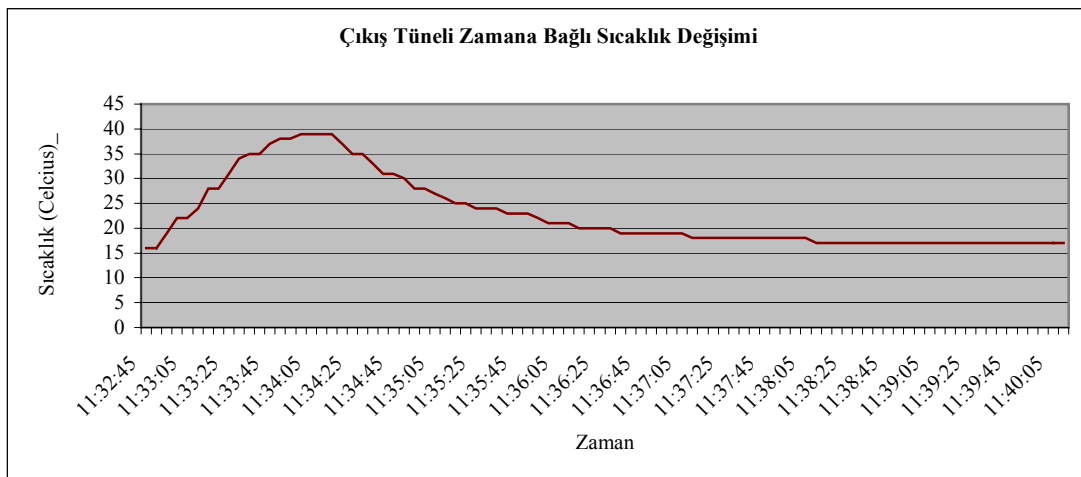


Şekil 3.68. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.69. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon giriş duvarı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Giriş duvarı konumunda 1 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.67, Şekil 3.68 ve Şekil 3.69'da görülmektedir. İstasyon içerisindeki sıcaklık dağılımlarından, ölçüm düzlemlerinin üçünde de 1 ölçüm noktasında en yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı (150°C , 90°C , 90°C) görülmektedir ve bu noktaları gene her üç ölçüm düzleminde 6 ve 9 nolu ölçüm noktaları izlemektedir. Her üç ölçüm düzleminde de 4, 7 ve 8 konumları sıcaklıktan en az etkilenen yerlerdir. Çıkış tüneline alınan sıcaklık değerlerine ilişkin sıcaklık dağılımı Şekil 3.70'te görülmektedir.



Şekil 3.70. Çıkış duvarı yangını için çıkış tüneline zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s akış hızı)

Şekil 3.70'ten de görüldüğü üzere çıkış tüneline bir miktar sıcaklık artışı (35 °C civarı) gözlenmektedir.

Giriş ve çıkış hızları, yanma öncesi 1 m/s civarında ölçülmüştür. Yanmanın başlaması ile çıkış tüneline hızı 0,8 m/s mertebesine gerilemiştir ve a5 ölçüm noktasından aralıklarla 0,6 m/s, b5 ölçüm noktasından aralıklarla 0,6 m/s ve c5 ölçüm noktasından sadece yanma başlangıcında 0,6 m/s hız değerleri okunmuştur. Bu verilerden a5 bölgesinde 0,4-0,5 m/s, b5 noktasında 0,4 m/s ve c5 noktasında çok daha düşük hızlar olduğu tahmini yapılabilir. Tüm ölçüm istasyonları, 0,6 m/s'den büyük hızlara duyarlıdır ve sadece giriş-çıkış doğrultusunda ölçüm yapmaktadır.

Çıkış tüneline elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 6-11 ppm hidrokarbon, %20 oksijen, %0,4-%0,6 CO₂ ve %0,00 CO şeklindedir.

3.6.7. İstasyon merkez konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma

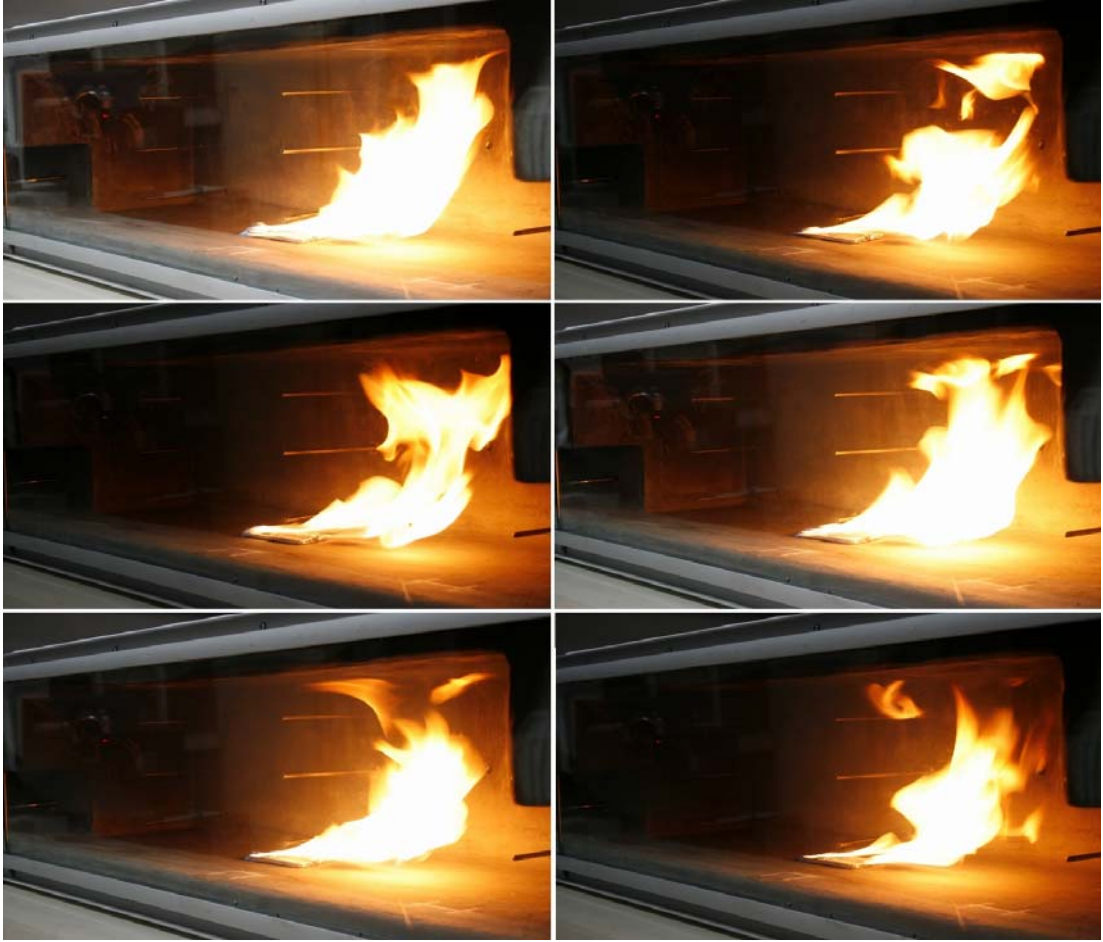
1 m/s akım şartlarında istasyon yolcu platformunun ortasında çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyon merkez konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-heptan yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.76, 3.77 ve Resim 3.78'te verilmiştir.



Resim 3.76. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s akım hızı - giriş tüneli tarafından profil görünüm)

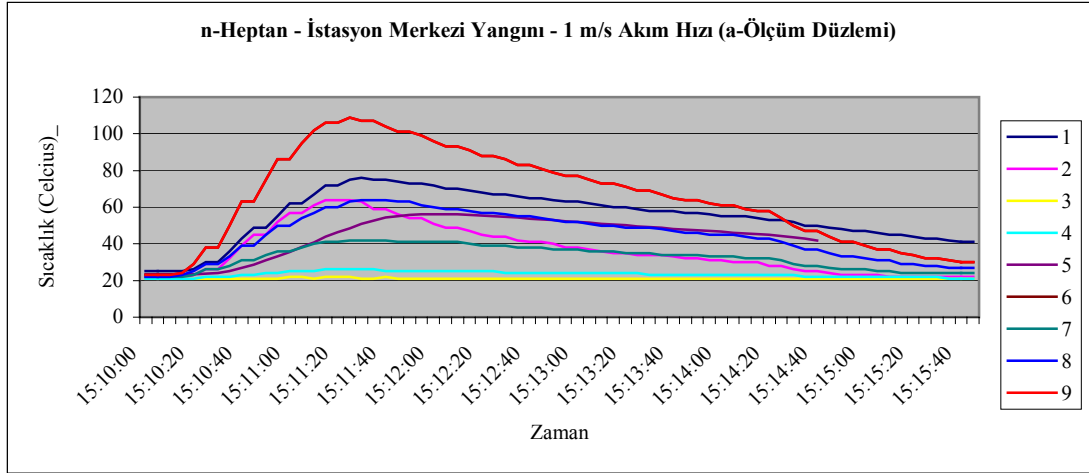


Resim 3.77. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s akım hızı)

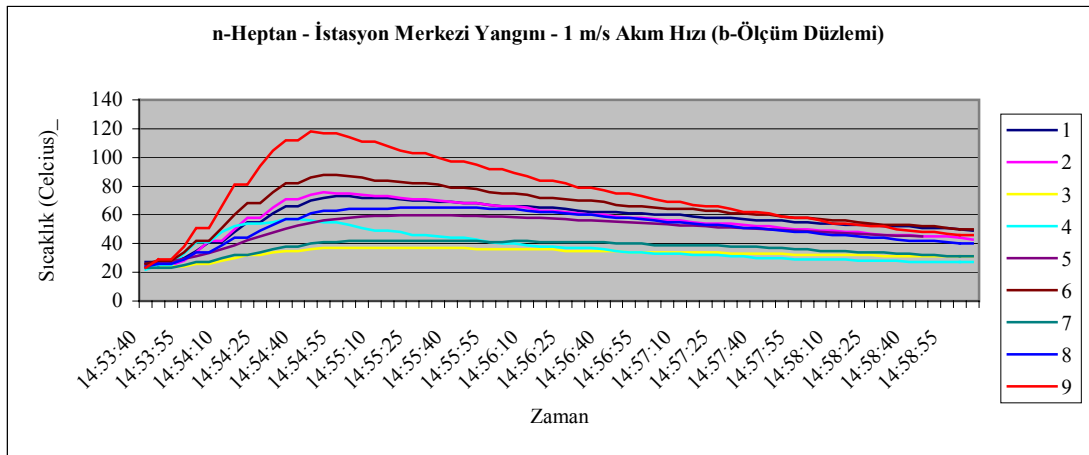


Resim 3.78. İstasyon merkez konumunda n-heptan yakıtlı yanma (1 m/s akım hızı - çıkış tüneli karşıdan görünüm)

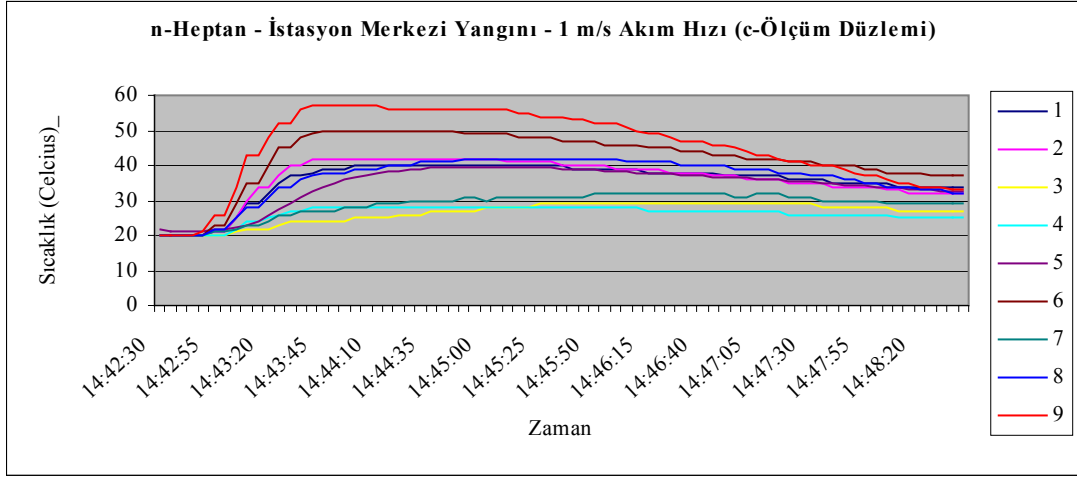
1 m/s piston etkisi olan istasyonda, istasyon merkez konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen istasyon yangını, Resim 3.76, Resim 3.77 ve Resim 3.78'de görülmektedir. 1 m/s ventilasyon hızı etkisinde istasyon merkez konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.71a, Şekil 3.72 ve Şekil 3.73'te verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.71. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon merkezi yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.72. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon merkezi yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

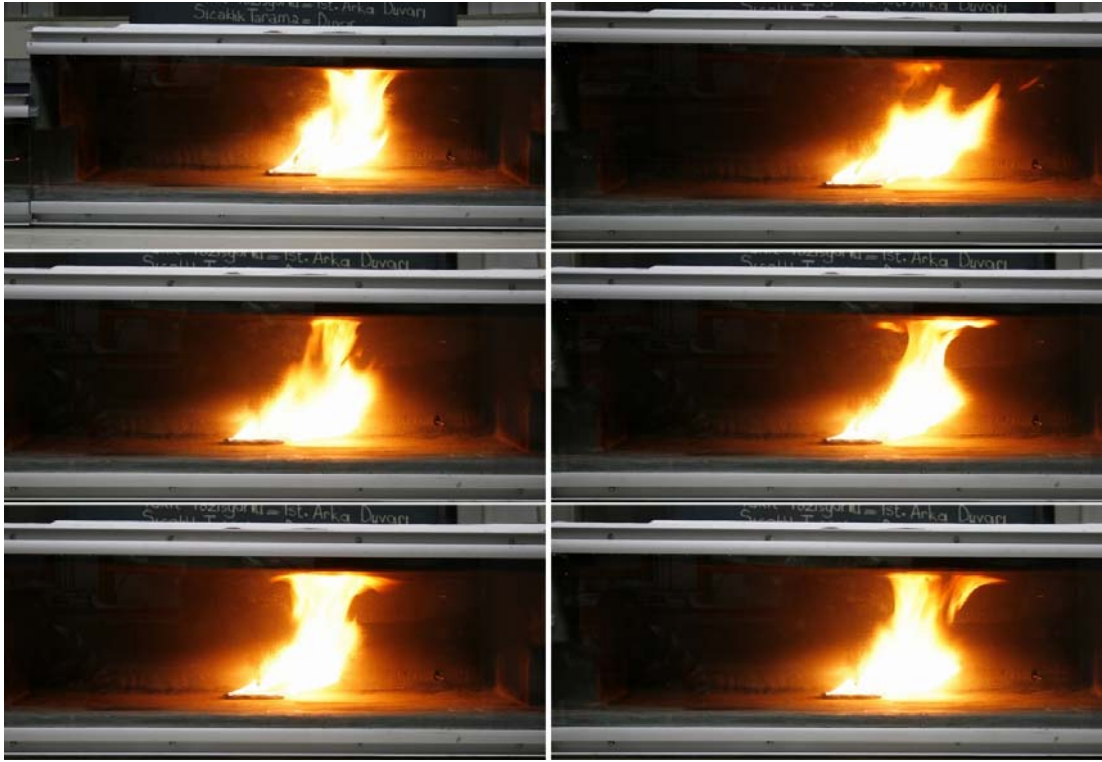


Şekil 3.73. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon merkezi yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

İstasyon içerisinde b1 ve b2 noktalarında 72°C derece civarı sıcaklıklar ölçülürken (ateş önünde yer almaktadırlar), yangın merkezine aynı mesafelerde ama rüzgarın arkasında kalan b8 bölgesi 62°C derece ve b9 bölgesi 120°C derece sıcaklığa ulaşmıştır. Tavanın çıkış tüneli kısmında kalan bölge genel olarak en sıcak olan bölgedir.

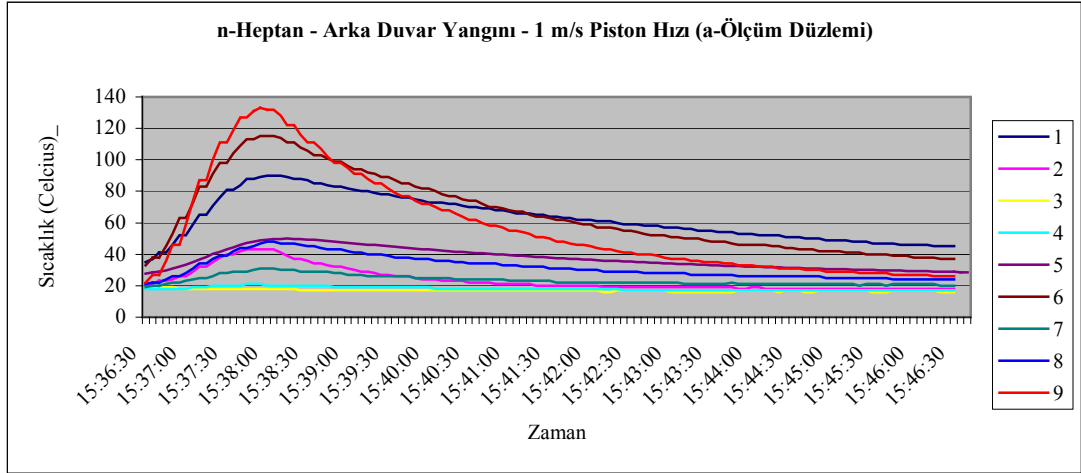
3.6.8. Arka duvar konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma

1 m/s akım şartlarında yolcu platformunun arkasındaki duvar önünde çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyon arka duvar konumuna yerleştirilmiş $10 \times 5 \times 0,4$ cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-heptan yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.79'da görülmektedir.

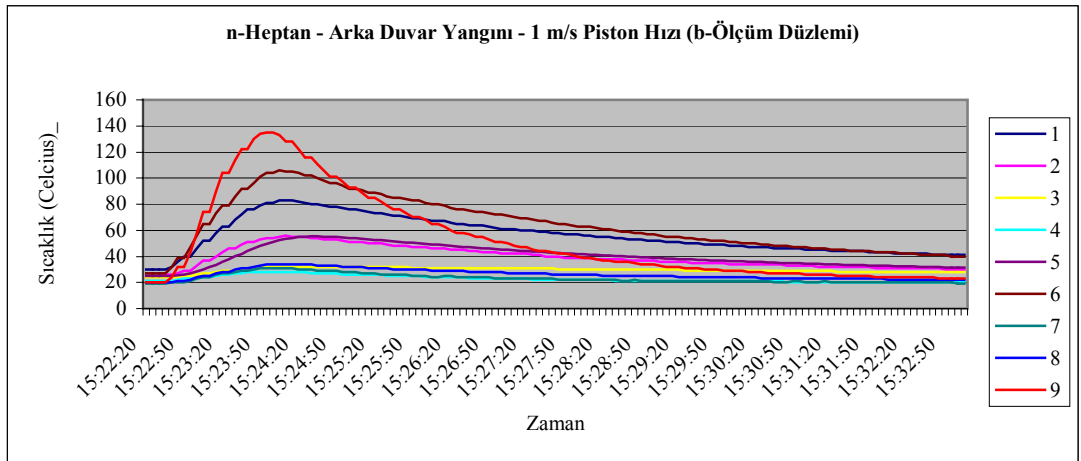


Resim 3.79. n-Heptan - 1 m/s akış hızı altında arka duvar yangını

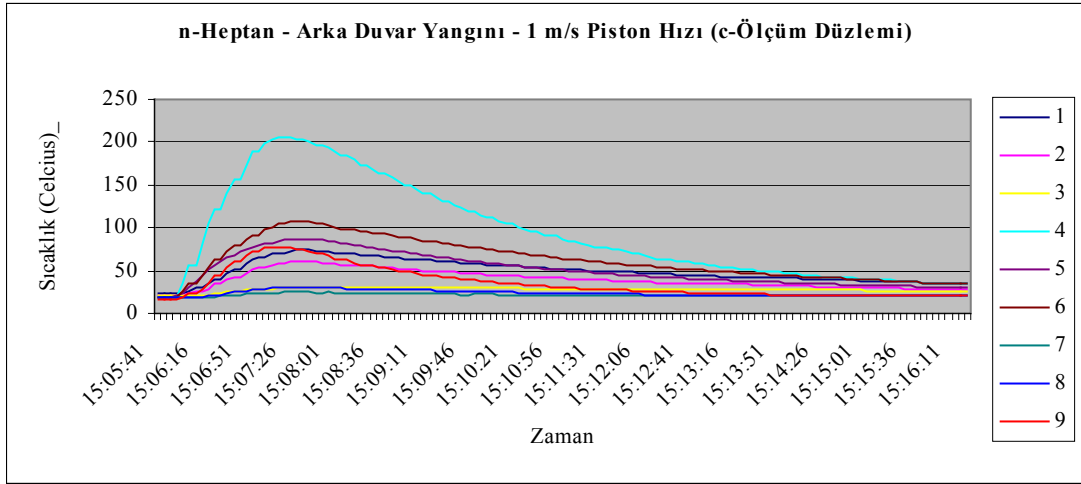
1 m/s piston etkisi olan istasyonda, istasyon arka duvar konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen yangın, Resim 3.69'da sunulmuştur. 1 m/s ventilasyon hızı etkisinde istasyon arka duvar konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.74, Şekil 3.75 ve Şekil 3.76'da verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.74. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

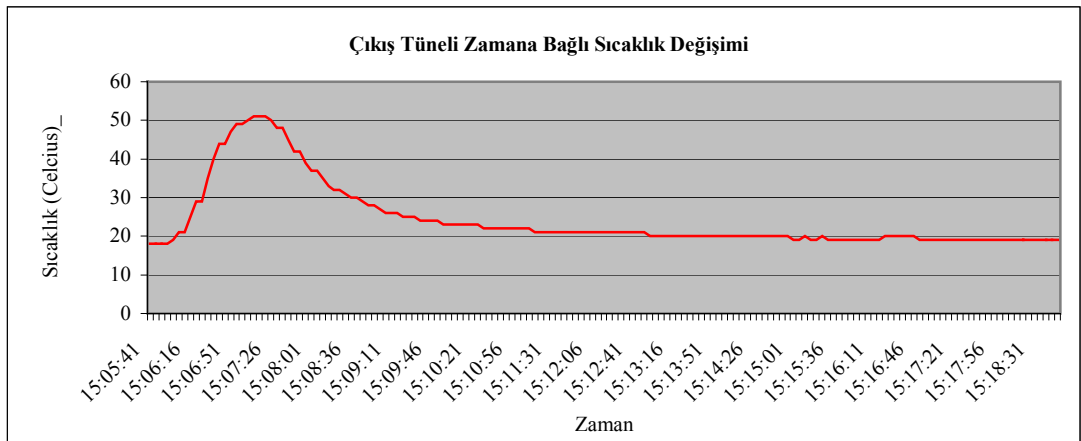


Şekil 3.75. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.76. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon arka duvar yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Zamana bağlı sıcaklık değişimi grafiklerinden alev bölgesinin 200 °C civarında sıcaklıklara eriştiği görülmekte, sıcaklık dağılımlarından oluşan ısının istasyonun arkasında kalmayıp simetri eksenine yakın bölgelere taşındığı anlaşılmaktadır. Her üç ölçüm düzleminde de 3 nolu ölçüm noktalarından 20-30 °C derece civarı sıcaklıklar ölçülmüştür. İstasyon içerisinde b1 noktasında 82 °C ve b2 noktasında 55 °C derece civarı sıcaklıklar ölçülürken (ateş önünde yer almaktadırlar), yangın merkezine aynı mesafelerde ama rüzgarın arkasında kalan b8'de 35 °C derece ve b9'da 135 °C derece sıcaklığa ulaşılmıştır. Ventilasyonun soğutma etkisi b8'de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.77. Arka duvar yangını için çıkış tüneli zamana bağlı sıcaklık değişimi (1 m/s akım hızı)

Çıkış tüneline ölçülen sıcaklıklar Şekil 3.77’de sunulmuştur. Grafikten anlaşıldığı üzere çıkış tüneline ulaşılan maksimum sıcaklık 50 °C civarı olmuştur ve yanma süresince çıkış tüneline sıcaklıklar kararlı bir şekilde artış göstermiştir. Yanmanın bitmesi ile beraber, ventilasyonun ani soğutma etkisi tünel içini domine etmiş, eğimi ısınma eğrisinden az olmakla beraber kesin bir soğuma süreci başlamıştır.

3.6.9. Çıkış duvarı konumunda 1 m/s piston hızı için n-heptan yakıtlı yanma

1 m/s akım şartlarında istasyon çıkış duvarı konumunda çıkan yüksek enerjili bir yangını temsil etmeyi amaçlayan bu deneyde, istasyonun çıkış duvarı konumuna yerleştirilmiş 10x5x0,4 cm ebatlarındaki yakıt havuzunda 10 cc n-heptan yakılmıştır. Deneylere ilişkin fotoğraflar Resim 3.80 ve Resim 3.81’de verilmiştir.

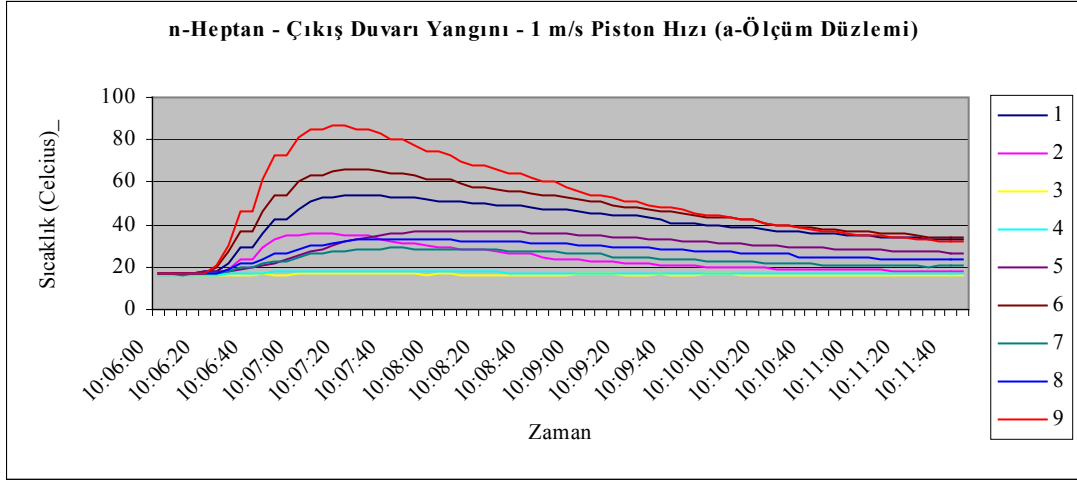


Resim 3.80. ıkış duvarında n-heptan yakıtlı yanma - 1 m/s piston hızı

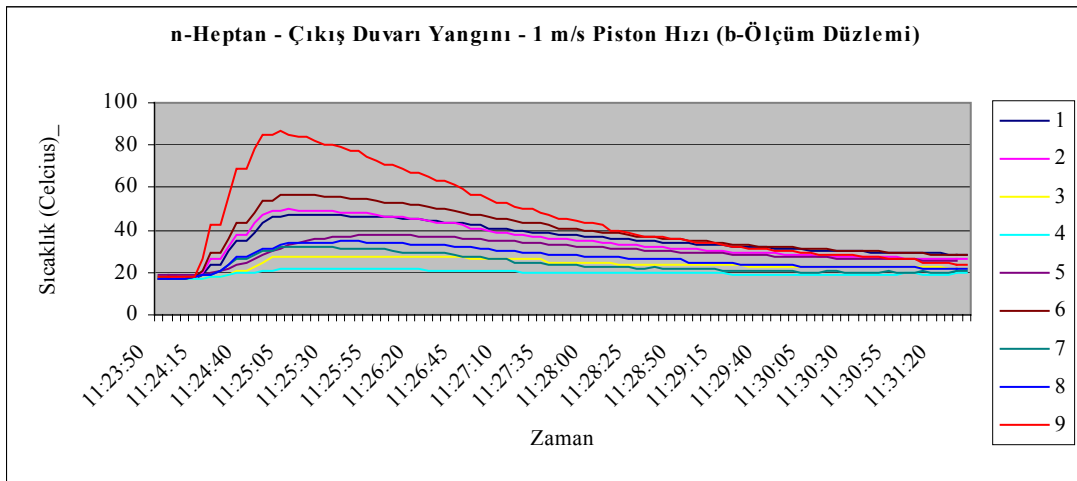


Resim 3.81. Çıkış duvarında 1 m/s akış hızı için yanma genel karakteri

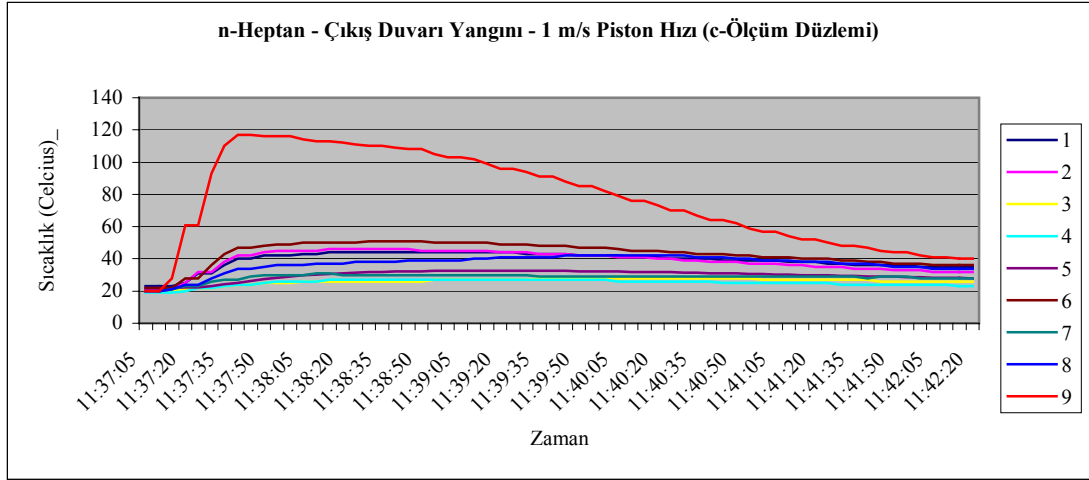
1 m/s piston etkisi olan istasyonda, istasyon çıkış duvarı konumunda n-heptan yakılarak temsil edilen istasyon yangını Resim 3.81'de görülmektedir. Yanma boyunca alev farklı karakterler sergilemiş, yakıt havuzundan çıkan bir kol arka ve yan duvarların kesişimindeki sanki-durağan (pseudo-steady) bölgeden tavana çıkarken hat kısmına yakın olan bölgeden çıkan bir diğer kol ana akış boyunca çıkış tüneline kaçmıştır. 1 m/s ventilasyon hızı etkisinde istasyon çıkış duvarı konumundaki yangın kaynaklı istasyon içi sıcaklık değerleri değişimi Şekil 3.78, Şekil 3.79 ve Şekil 3.80'de verilmiştir. Grafik değerleri, Şekil 3.7'de gösterilen ölçüm noktalarının numaralarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.78. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için a ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

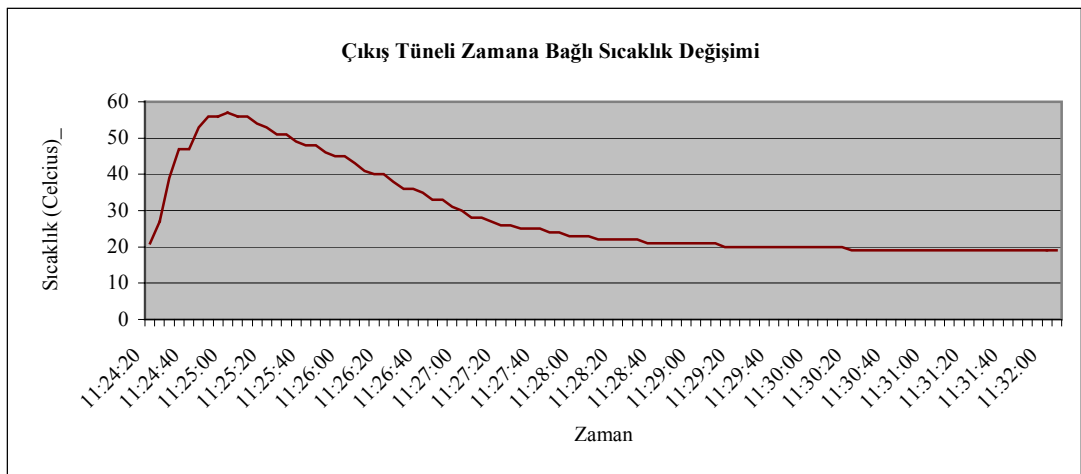


Şekil 3.79. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için b ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.80. 1 m/s piston hızı etkisindeki n-heptan yakıtlı istasyon çıkış duvarı yangını için c ölçüm düzleminde zamana bağlı sıcaklık değişimi

Giriş duvarı konumunda 1 m/s'lik akış altındaki yanma sonucu istasyon içinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 3.78, Şekil 3.79 ve Şekil 3.80'de görülmektedir. İstasyon içerisindeki sıcaklık dağılımlarından, ölçüm düzlemlerinin üçünde de, 9 ölçüm noktasında en yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı (85°C , 87°C , 118°C) görülmektedir. 9 bölgesinden sonraki en yüksek sıcaklıklar 6 bölgesinde ölçülmüştür. İstasyon içerisindeki b ve c ölçüm düzlemleri üzerindeki 3 bölgeleri yangının çok önünde olmalarına rağmen tepkimenin ısısından etkilenmiştir. İstasyonun içinde genel olarak bir sıcaklık artışı mevcuttur. Çıkış tüneline alınan sıcaklık değerlerine ilişkin zamana bağlı sıcaklık değişimi grafiği Şekil 3.81'ta görülmektedir.



Şekil 3.81. Çıkış duvarı yangını için çıkış tüneline zamana bağlı sıcaklık değişimi

Şekil 3.81'den de görüldüğü üzere çıkış tüneline 58 °C derecenin üzerinde bir miktar sıcaklığa ulaşılmıştır.

Hız ölçüm problemlerinden alınan verilere göre, giriş ve çıkış hızları 1 m/s civarında ölçülmüştür. a5 ölçüm noktasından 0,8 m/s, b5 ölçüm noktasından 0,7 m/s ve c5 ölçüm noktasından 0,8 m/s hız değerleri okunmuştur. Tüm ölçüm istasyonları, 0,6 m/s'den büyük hızlara duyarlıdır ve sadece giriş-çıkış doğrultusunda ölçüm yapmaktadır.

Çıkış tüneline elde edilen emisyon ölçüm değerleri ise 23-30 ppm hidrokarbon, %19,6 oksijen, %0,6-%0,8 CO₂ ve %0,01 CO şeklindedir.

3.7. Yanma Deneyleri Gözlemleri

Karakteristik uzunluğu 1/100 ölçekli istasyon modelinde yakıt olarak n-heptan ve iso-propil alkol kullanılarak yapılan yanma deneylerinde 7 farklı konumda yangın senaryoları incelenmiştir. İso-propil alkol deneylerinde 1 m/s piston hızı, 3 m/s piston hızı ve durağan hallerde hat üzerinde 3 konumda ve yolcu platformu ortasında yangın senaryoları canlandırılırken, n-heptan deneylerinde daha çok istasyonun iç kısımlarında çıkabilecek yangınlara dair senaryolar incelenmiştir. Her deneyde istasyon içindeki 27 farklı noktada ve çıkış tüneli içerisinde sıcaklıklar ölçülmüş, 5 farklı konumda hızlar kayıt altına alınmış ve çıkış tüneline emisyon değerleri alınmıştır.

İstasyon modeli içerisinde dumanlı akış deneyleri yapılarak piston etkisi olan durumlarda istasyon içerisindeki akış görselleştirilmiş ve bu deneylerden bazıları kayıt altına alınmıştır. Duman deneylerine göre giriş tüneline türbülanslı blok halinde giren hava, istasyon içerisine girdiğinde giriş ve çıkış tünelleri arasında istasyon içine doğru hafifçe bükülmüş bir ana akım (main stream) oluşturmakta, ana akımın çevresinde konik bir açılma meydana gelmektedir. Açılan dış akış istasyon çıkış duvarı ve çıkış tüneli üst kirişine çarparak tavan ve çıkış duvarı üzerinden istasyon içine dönmektedir. Bu dönen akış nedeniyle istasyon tavanında ve arka

duvarda ana akışa ters yönlü ve nispeten yavaş bir akış mevcuttur (ters akış). Ana akış çevresindeki konik açılma ile tavan-duvar yüzeyi boyunca akan ters akışın birbirlerine temas eden yüzeylerinde (continuum type boundary layer) mini vortisiteler oluşmakta, 3 m/s ve üzeri hızlarda tam istasyon merkez hattı üzerinde büyük bir girdap yapısı belirlemektedir. İstasyonun çıkış duvarından arka duvara dönen akışın bir kısmı giriş duvarına kadar ulaşmakta ve piston etkisi altında giriş duvarı konumunda çıkartılan yangını sürekli taze hava ile beslemektedir.

Gözlemlenen bu ters akış nedeni ile özellikle c ölçüm düzleminde ölçülen 0,6-0,8 m/s mertebelerindeki pozitif yönlü (giriş-çıkış doğrultusunda) hızlar kabul edilebilir değildir. Yerleştirilen pitot tüpleri sadece giriş-çıkış doğrultusundaki hızları ölçebildiğinden Testo multiprobun arka duvar boyunca akan ters akışın hızını ölçmesi mümkün değildir. İstasyon içerisinde yanma tepkimesi meydana geldiğinden içerideki hızlar sıcak tel anemometresi ile de ölçülemez. Böyle bir deneyde en doğru hız ölçümleri alev mukavim mikro türbinmetre, radar veya lazer anemometresi kullanılarak yapılabilir. Aynı nedenlerden b5 konumunda ölçülen hız değerlerine de şüphe ile yaklaşmak gerekir. Diğer yandan a5 ölçüm noktası ana akış civarında olduğundan bu bölgede ana akıştan farklı yönlerde ve mertebe bakımından çok küçük akışlar olması mümkün olmakla beraber, ters akış olması mümkün değildir. Bu ana akıma nispeten çok küçük olan akışkan hareketleri ihmal edilecek olursa, a5 noktasındaki hız ölçümleri kabul edilebilirdir.

Kullanılan ölçüm cihazlarından Elimko ısı çiftleri ve kontrol ünitesi 5 saniyelik aralıklarla ölçüm yapmaktadır ve ısı çiftlerinin tepki süresi oldukça yeterlidir. Kullanılan bir diğer ölçüm aygıtı olan Testo dijital basınç transducerleri ve multiprob her saniye ölçüm yapmaktadır ve Testo multiprobun sıcaklığa tepki süresi Elimko ısı çiftlerinin tepki süresinden uzundur. Bu nedenle grafiklerin soğuma eğrilerinde bazı hallerde 5 numaralı bölge geç soğuyor gibi görülmekte bu aslında multiprobun tepki süresi ile alakalı bir ölçüm hatasıdır.

İstasyon içerisinde hız ölçümünde kullanılan pitot tüpleri 0-100 hPa ölçüm aralığına sahip orta hassaslıktaki dijital transducerlere bağlıdır ve 0,6 m/s altındaki hızları

ölçememektedir. Ayrıca yapılan gözlemlerde sistemin 0,1 m/s civarında bir random hataya sahip olduğu belirlenmiştir. Bir diğer ölçüm hata kaynağı ise hız ölçme metodudur. Fark basınç ölçerek hızı belirlenmek istenen akım türbülanslı olduğundan akım içerisinde bölgesel hızlar, yerel vortisiteler ve düzensiz katmanlar mevcut olabilir. Pitot tüpünün alt ve üst çeperlerine farklı basınçlar uygulanıyor olması, akımın tam karşıdan gelmek yerine açılı veya türbülanslı gelmesi karmaşık karakterli akışlarda ve türbülanslı akışlarda fark basınç değeri üzerinden hız hesaplamayı kaba bir ölçüm metodu haline getirmektedir. Bu metodla ölçülen hızlar, ancak ana akışa dair ortalama hız mertebelerinin anlaşılması bakımından manidardır. Bu nedenle modeldeki pitot tüplerinin tamamı ana akış hatlarına (giriş tüneli konumu, a5 konumu ve çıkış tüneli konumu) yerleştirilmiştir. İstasyon içerisinde hız belirlenen b5 ve c5 konumlarında ise esas ölçülen parametreler fark basınçlardır. Bu sayede özellikle istasyon arka duvarı üzerinde duvar normaline etkiyen toplam basınç ile ortam basıncı arasındaki fark ölçülmüştür.

İstasyon giriş duvarı tarafında tavanda bulunan merdiven deliği, istasyon giriş duvarı yangını ve istasyon çıkış duvarı yangını olaylarını birbirinden farklı hale getirmiştir. Giriş duvarı konumunda tavandaki delik sayesinde temiz hava ile beslenen n-heptan alevi, yakıtı sorunsuzca ve tamamen bitirirken, çıkış tüneli konumunda açık havadan tamamen izole olarak yanan alev, kısa bir süre sonra küçülmekte, bazı hallerde yakıt bitmeden sönmektedir.

Piston etkisiz durumda hat girişinde çıkarılan iso-propil alkol yangınında alev giriş tünelini kapatmakta ve giriş tünelinden gelen hava ile beslenmektedir. İso-propil alkol tepkimesinden oluşan sıcak gazlar ve duman istasyon tavanında toplanmakta ve çıkış tünelinden geri akış (backflow) olarak kaçmaktadır. Giriş tünelinden duman çıkışı çok azdır. Aynı durum hat çıkışı yangınında da gözlenmiş, hat çıkışı yangını sırasında giriş tünelinde geri akış (backflow) oluşumu belirlenmiştir. Hat çıkış yangını sırasında çıkış tünelinden duman çıkışı oldukça azdır. Her iki durumda da alev bir duman bariyeri gibi çalışmış, duman alevin olmadığı tünelden kaçmıştır.

4. İSTASYON MODELİNDE AKIŞ SİMÜLASYONLARI

Akış ve yanma deneylerinde kullanılan karakteristik uzunluğu 1/100 ölçekli istasyon modeli içerisindeki akış, ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent® kullanılarak incelenmiştir. Fluent® yazılımı 1981'den beri geliştirilmekte olup içerisinde pek çok modül ve sayısal çözüm algoritması barındırmaktadır. Deneylerde kullanılan model içerisindeki akışı en iyi şekilde simüle edebilmek için model içindeki akışın karakterinin bilinmesi, sınır şartları için doğru kabullerin yapılması, amaca uygun çözüm metodlarının seçilmesi ve akış parametrelerinin en uygun şekilde HAD yazılımına kodlanması gerekmektedir.

Sayısal çözümlerin yapılabilmesi için deney modelinin 3D bir bilgisayar modeli milimetrik hassasiyetle oluşturulmuştur. Bu model üzerinde 1 m/s giriş hızına sahip kararlı (steady) ve kararsız (unsteady) akış simülasyonları yapılmak istenmiş, simülasyonların gerçek durumu mümkün olan en iyi şekilde temsil edebilmesi için detaylı bir şekilde optimum-mesh, optimum iterasyon sayısı araştırması yapılmıştır. Yapılan optimum mesh araştırmasında 50 bin'den 5 milyon'a kadar mesh sayılarına sahip 12 farklı model üretilmiş, bu modeller içerisinde aynı parametreler kullanılarak kararlı akış çözümleri yapılmıştır. Tüm modellerde hexagonal (6 yüzlü) mesh hücreleri kullanılmış, 350 000 mesh sayısına sahip modelde sınır tabaka mesh yapısı uygulanmıştır. 1,5 milyon mesh sayısına sahip modeldeki çözümler diğer modellerin çözümlerinden sapmaya başladığından 5 milyon mesh sayısına sahip model optimum mesh aralığı dışında kabul edilmiş ve üzerinde akış simülasyonları yapılmamıştır. Optimum mesh taraması yapılırken 200, 400, 750, 1000, 1300, 1600, 2000 ve 2300 iterasyon sayıları için modellerin akış çözümleri kıyaslanmış ve sonuçların iterasyon sayısından bağımsız hale geldiği iterasyon sayıları belirlenmiştir. Bu çalışma G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü yazım kuralları nedeniyle sunulamamıştır. Optimum mesh ve optimum iterasyon çalışması sonucunda pürüzlü ve tam ısı yalıtımlı duvarlar kabulü ve standart duvar fonksiyonu kullanımı ile tünel giriş hızı uniform 1 m/s, çıkış tüneli sonunda fark basınç '0' sınır koşulları için 220 000 hexagonal mesh hücrelerine sahip model optimum olarak seçilmiştir. Bu modelde (ve diğer modellerin bir çoğunda) çözümün stabil hale gelmesi için 1000 iterasyon yeterli olmaktadır.

4.1. İstasyon Modeli İçerisinde Akış Simülasyonu İçin Sayısal Çözüm Formülasyonu Seçimi

Fluent® yazılımında, 6.2 versiyonuna kadar çözücü formülasyonu olarak, ayrık (segregated) implicit, akuple (coupled) implicit ve akuple (coupled) explicit formülasyonları çözücü opsiyonu olarak sunulmaktadır. Her üç formülasyonda pek çok akış için doğru çözümler üretebilmekle beraber her birinin daha iyi veya daha çabuk sonuç vereceği özel durumlar mevcuttur. Ayrık ve akuple çözüm yaklaşımları momentum, süreklilik, enerji ve tür (species) denklemlerini çözerken birbirlerinden farklı metodolojiler benimser. Ayrık çözüm yaklaşımı her bir parametreyi sıra ile ötekilerden bağımsız çözüp yeni değerlerin hesabında çözüm sonuçlarını kullanırken, akuple yaklaşımda tüm parametreler simultane olarak çözülür. Her iki yaklaşımda türbülans ve radyasyon miktarları gibi skaler parametrelerin çözümünü sıralı olarak gerçekleştirir. Implicit ve explicit çözüm algoritmaları ise akuple denklemleri lineerleştirmede birbirlerinden farklılık gösterirler [37].

Ayrık (segregated) çözüm metodu sıkıştırılamaz (incompressible) veya sıkıştırılabilirliği düşük (mildly compressible) akışları formüle edebilmek için geliştirilmiş bir çözüm yöntemi, akuple yaklaşım daha çok yüksek hızlı, sıkıştırılabilir (high-speed compressible) akışları temsil etmesi amacıyla geliştirilmiştir. Zaman içerisinde her iki yaklaşımın ardındaki formülasyonlar geliştirilip tüm akışlara uygulanabilirliği sağlanmış olsada, her bir yöntemi asıl geliştirilme amacına yönelik olarak kullanmak çözüm üretmede avantaj sağlayabilir. Özellikle yüksek hızlı, sıkıştırılabilir akışların çözümünde akuple çözüm formülasyonu, ayrık metoda göre performans üstünlüklerine sahiptir [37]. Fluent® 6.3 versiyonunda çözücülerin ismi ‘basınç tabanlı’ (pressure based) ve ‘yoğunluk tabanlı’ (density based) olarak değiştirilmiştir.

Fluent® varsayılan çözücü olarak ayrık formülasyonu kullanmaktadır. Problem alanı boyunca buoyancy veya merkezkaç kuvvetleri gibi gövde kuvvetleri (body force) etkinse veya akış alanı çok sık mesh hücreleri ile kaplanmışsa çözümde ayrık formülasyon yerine akuple implicit formülasyon kullanılabilir. Akuple (coupled)

çözücü akış ve enerji denklemlerini beraber çözdüğünden belirtilen hallerde çözüme daha çabuk yakınsar. Akuple çözücünün dezavantajı, ayrık formülasyondan 1,5-2 kat civarı daha fazla sistem belleği talep etmesidir. Akuple çözücü kullanmanın daha avantajlı olduğu durumlarda bile, sistemi çözen bilgisayar sistemleri yeterli belleğe ve işlemci gücüne sahip değilse ayrık çözücü formülasyonu tercih edilebilir [37].

Akuple explicit çözücü formülasyonu da akuple implicit formülasyonu gibi akış ve enerji denklemlerini beraber çözmekle beraber ihtiyaç duyduğu sistem belleği daha azdır. Explicit akuple çözümlerin implicit metoda göre en büyük dezavantajı ise çözüme daha geç yakınsaması ve kararsız (unsteady) çözümlerde kararlılık şartlarının çözüm parametrelerini kısıtlamasıdır [37].

Akuple çözüm formülasyonu bazı modülleri içermemektedir ve amaca özel bu modüllerle çözüm yapabilmek için ayrık (segregated, pressure based) çözücü formülasyonu kullanmak gerekmektedir. Sadece ayrık çözücü formülasyonu ile kullanılabilen çözücü modülleri; ‘cavitation model’, ‘fixed variable option’, ‘physical velocity formulation for porous media’, ‘volume-of-fluid (VOF) model’, ‘multiphase mixture model’, ‘Eulerian multiphase model’, ‘non-premixed combustion model’, ‘premixed combustion model’, ‘partially premixed combustion model’, ‘composition PDF transport model’, ‘soot and NO_x models’, ‘Rosseland radiation model’, ‘melting/solidification model’, ‘specified mass flow rate for streamwise periodic flow’, ‘shell conduction model’ ve ‘floating operating pressure’ şeklinde sayılabilir [37].

Bu çalışmanın devamında kararsız (unsteady) akış şartlarında istasyon içerisindeki n-heptan ve iso-propil alkol yakıtlı yanma tepkimeleri de simüle edileceğinden yapılan tüm simülasyonlarda ayrık çözücü formülasyonu kullanılmıştır.

4.2. Akış Modellemesi ve Matematiksel Altyapı

Değişken kesitli bir geometri içerisindeki akışkan hareket ederken, kesit alanı ve geometrisinin değişimine bağlı olarak, çeşitli akış alanı özellikleri (ρ , u , ω gibi)

değişim gösterir. Akışa dair parametreleri hesaplayabilmek için akışkanın uyması gereken kütle ve momentumun korunumu gibi temel prensiplerden yola çıkılarak temel akış denklemleri elde edilebilir. Akışkanın uyması gereken en temel prensip kütle korunumu yasasıdır. Bu prensip çerçevesinde akış alanı içerisinde akışkan yok olmaz veya yoktan var olmaz. Akış alanına dahil olan her bir akışkan bir kaynaktan (source) gelmeli ve akış alanı boyunca herhangi bir noktada varlığını sürdürmelidir. Akış alanındaki maddenin korunumu şartını kontrol eden bu denklem ‘Süreklilik Denklemi’ (Continuity Equation) olarak bilinir ve formülasyonu aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A \delta x) = \left(\rho Au - \frac{\partial}{\partial x}(\rho Au) \frac{\delta x}{2} \right) - \left(\rho Au + \frac{\partial}{\partial x}(\rho Au) \frac{\delta x}{2} \right) \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1, x-yönü doğrultusunda yazılmış süreklilik denklemdir. Eşitlik 4.1’in sadeleştirilmesi sonucunda aşağıdaki form elde edilir [33];

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho Au) = 0 \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de her iki taraf A ile bölünecek olursa [33];

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (4.3)$$

3D bir akış alanında sürekliliği sağlamak için her 3 yöndeki (x, y ve z doğrultuları) süreklilik denklemleri yazılmalı ve akış alanı içerisinde simultane olarak çözülmelidirler. Vektörel formda süreklilik denklemi aşağıdaki gibidir [37];

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.4)$$

Eşitli 4.4'teki S_m terimi kaynak terimidir ve akış alanına eklenen veya akıştan çekilen maddeyi temsil eder. Bu genel hali ile süreklilik denklemi sıkıştırılabilir (compressible) ve sıkıştırılamaz (incompressible) akışlar için kullanılabilir.

Akış alanında korunması gereken bir diğer özellik ise momentumun korunumudur ve Newton'un 2. prensibinden yola çıkılarak elde edilmiş bir formülasyondur. Momentumun korunumu denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [33];

$$-\frac{\partial}{\partial x}(PA)\delta x + P\frac{\partial A}{\partial x}\delta x - F\delta x = \frac{\partial}{\partial t}(\rho Au\delta x) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho Au^2\delta x) \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.4, Eşitlik 4.2 kullanılarak sadeleştirilecek olursa aşağıdaki form elde edilir [33];

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho\frac{\partial u}{\partial t} + \rho u\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{F}{A} = 0 \quad (4.6)$$

Burada F gövde kuvveti, dışarıdan etkiyen kuvvetleri veya modele bağlı (model dependent) kuvvetleri (porlu yüzey vs.) temsil eder. Vektörel formda momentum denklemi [37];

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (4.7)$$

Eşitlik 4.7'de $\rho\vec{g}$ yerçekiminden dolayı ortaya çıkan gövde kuvvetlerini, \vec{F} akışkana etkiyen kuvvetleri ve $\vec{\tau}$ ise gerilme tensörünü ifade etmektedir.

4.3. Türbülanslı Akış Simülasyonu ve Türbülans Modelleri

Türbülanslı akışlar hız alanlarının dalgalanması şeklinde karakterize edilirler. Bu dalgalı bölgede momentum, enerji ve türlerin konsantrasyonu gibi büyüklüklerde taşınmaktadır ve bölge içindeki değişimlerden etkilenmektedirler. Bu bölge içindeki

pertürbasyonların boyutunun çok küçük ve frekanslarının çok yüksek olmasından dolayı, mühendislik hesaplamalarında direkt olarak simüle edilmeleri hesaplama gücü açısından çok fazla kaynak gerektirmektedir. Direkt olarak sayısal çözüm yerine ilgili denklemlerin zaman ortalanmış, grup ortalanmış yada küçük ölçekli olaylar ihmal edilmiş şekilde modifiye edilerek çözümleri çok daha kolay hesaplanabilir ve gerekli hesaplama gücünde ciddi bir tasarruf sağlar. Modifiye edilmiş bu denklemler ek bilinmeyen parametreler içermektedirler ve bu parametreleri bilinen parametreler cinsinden ifade edebilmek için “Türbülans Modelleri” kullanmak/kurgulamak gerekmektedir. Bu çalışmanın kapalı bir hacimdeki akış ve yanmanın sayısal olarak simülasyonunda kullanılan Fluent® yazılımında bulunan türbülans modelleri Çizelge 4.1’de sunulmuştur [37].

Çizelge 4.1. Fluent® yazılımında bulunan türbülans modelleri

Spalart-Allmaras Türbülans Modeli (1D - tek denklem)	Vorticity kaynaklı üretim
	Gerilme/vorticity kaynaklı üretim
$k - \varepsilon$ Türbülans Modeli	Standart
	RNG
	Realizable
$k - \omega$ Türbülans Modeli	Standart
	SST
Reynolds Stress Modeli (RSM)	7 denklem
Detached Eddy Simulation Türbülans Modeli	Vorticity kaynaklı üretim
	Gerilme/vorticity kaynaklı üretim
$v^2 - f$ Türbülans Modeli	(Ek lisansa tabidir)
Large Eddy Simulation (LES) Metodu	Smagorinsky-Lilly
	WALE
	Kinetik enerji transport

Günümüzde bile gözlemlenebilen tüm türbülans çeşitlerini ifade edebilecek bir genel-geçer türbülans modeli üretilmemiştir. Türbülans modeli seçiminde akış alanındaki fiziksel durum, çözülecek probleme ilişkin deneysel veriler, gereken

doğruluk derecesi, kullanılabilir hesaplama gücü ve simülasyonun yapılabileceği toplam süre gibi kriterler göz önüne alınmalıdır. Sayısal çözümün kabul edilebilir bir çözüm üretebilmesi için kullanılan türbülans modelinin iyi yeterlilik ve limitlerinin anlaşılması ve yazılımdaki opsiyonların işlevlerinin kavranması gerekmektedir.

Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) denklemleri, modellenen türbülans ölçeğindeki transport denklemlerini akışa dair parametrelerin ortalama değerleri için ifade etmektedir. Parametrelerin ortalama değerlerinin sistemi çözümlemede kullanılması yaklaşımı, gerekli hesaplama gücünde ciddi bir tasarruf sağlar. Şayet ortalama akış “zamandan bağımsız” (steady) ise, ilgili denklemlerin hiç birinde zamana bağlı türev ifadesi bulunmaz ve “kararlı akış” (steady-state) çözümleri çok daha kolay yapılabilir. Bu kabulün getirdiği hesaplama avantajı geçiş durumlarının simülasyonlarında bile etkili olmaktadır çünkü hesaplama için gerekli zaman adımı türbülans ölçeğindeki kararsızlıktan ziyade ana akıştaki kararsızlık tarafından belirlenir. Reynolds-averaged yaklaşımı genellikle mühendislik uygulamalarında Spalart-Allmaras, $k - \varepsilon$ ve türevleri, $k - \omega$ ve türevleri ve Reynolds Stress Model (RSM) gibi türbülans modelleri ile kullanılır [37].

Reynolds-averaging yaklaşımında anlık durum için tam Navier-Stokes denklemleri, ortalanmış değer (ensemble-averaged veya time-averaged) ve dalgalı değer (fluctuating) olmak üzere iki bölgeye ayrıştırılır. Bu ayrıştırma hız için aşağıdaki gibidir;

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad i = 1,2,3 \quad (4.8)$$

Burada \bar{u}_i , ‘i’ yönündeki ortalanmış hız, u'_i ise iyönündeki hız dalgalanmasıdır. Vektörel değerler için Eşitlik 4.8’in yapısı aynı kalmakla beraber, sadece hız yerine ilgili parametre yerleştirilir. Bu skaler parametreler için aşağıda sunulan Eşitlik 4.9 yazılabilir;

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (4.9)$$

Burada Φ , basınç, sıcaklık, enerji yada tür konsantrasyonu gibi skaler bir büyüklüğü temsil etmektedir. Akış alanlarındaki değişkenleri bu şekilde ortalanmış ve dalgalı değerler olarak ikiye ayırmak momentum denklemlerini de ortalanmış ve dalgalı değerler cinsinden yazabilmeyi olanaklı kılar. Ortalanmış değerlerin üzerindeki bar kaldırılır ve Kartezyen koordinatlarda tensör formunda momentum denklemleri yazılacak olursa aşağıdaki zaman ortalanmış (time-averaged/ensemble-averaged) eşitlikler elde edilir¹.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.10 ve Eşitlik 4.11, Fluent® yazılımında kullanılan Reynolds-averaged Navier-Stokes denklemleridir. Bu ifadeler anlık Navier-Stokes denklemleri ile aynı forma sahip olmakla beraber, ortalanmış hız değerleri ve değiştirilmiş çözüm parametreleri ile artık zaman ortalanmış (time-averaged) formdadır. Türbülansın etkileri yeni eklenen terimlerle ifade edilmektedir ve bu sistem bu formu ile açık bir sistemdir (analitik olarak çözülemez). Sistemi kapatmak için Reynolds gerilim terimleri $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ modellenmelidir. Sayısal türbülanslı akış çözümlerinde kullanılan türbülans modelleri, Reynolds gerilim terimlerini tanımlayarak sistemi çözülebilir hale getirmektedir [37].

Large Eddy Simülasyonu (LES) ise, RANS'a alternatif olarak türbülans içindeki ölçek olarak büyük eddy'lerin zamana bağlı çözüldüğü filtrelenmiş bir denklem seti kullanmaktadır. Filtreleme işlemi filtre boyutundan küçük eddy'lerin hesaplamalarda kullanılmaması için Navier-Stokes denklemlerine yapılan bir manipülasyondur ve filtre boyutu genellikle mesh boyutu olarak alınır. RANS'ta olduğu gibi LES'te de

¹ Eşitlik 4.10 ve Eşitlik 4.11 Fluent 6.1 ve Fluent 6.3 yardım dökümanlarından alıntıdır. Eşitlik 4.11'deki $-(2/3)\delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l}$ terimi sıkıştırılabilirlik etkilerini temsil eder.

yapılan modifikasyonlar kaynaklı bilinmeyen terimler oluşmaktadır ve filtreleme işleminde ortaya çıkan bu terimleri çözebilmek içinde yaklaşımlar geliştirilmiştir. Mühendisliğin ilgisi genelde akışa dair ortalanmış parametrelerin istatistiğidir ki bu parametreler zamana bağlı simülasyonlarla hesaplanır. LES'in avantajı türbülansı daha az modelleyip (daha çok çözüm yaparak) türbülans modellerinden gelen hataların azaltılmasıdır. LES'in günümüzde akış simülasyonlarındaki uygulaması oldukça sınırlıdır çünkü yaklaşım gereği çözülmesi gereken enerji yüklü türbülans eddy'lerinin getirdiği hesaplama yükü oldukça fazladır. En başarılı LES uygulamaları yüksek dereceli uzlamsal ayrıklaştırma (high-order spatial discretization) ile ve etkin olabilecek tüm ölçeklerdeki etkilerin dikkate alınması ile gerçekleştirilmiştir. LES için düşük çözünürlükte çözüm yapılmasının çözümün doğruluğuna olan etkileri hakkında yeterli çalışma yapılmamıştır. Bunun haricinde, LES çözümlerinde duvar fonksiyonlarının kullanılmasına ve geliştirilmesine dair daha çok araştırmaya ve geliştirmeye ihtiyaç vardır [37].

Detached Eddy Simülasyonu (DES) ise Spalart-Allmaras modelinin modifiye edilmiş bir versiyonudur ve LES'e göre yüksek Reynolds sayılarında ve yüksek kaldırılmalı kanat profili (high-lift airfoils) etrafındaki akış çözümleri gibi problemlerde çok daha pratik bir alternatiftir. DES yaklaşımı, Spalart-Allmaras türbülans modelinin kararsız RANS versiyonu ile aynı modelin filtrelenmiş formunu akış alanında iki farklı çözüm alanı oluşturacak şekilde birleştirir. Duvarlara yakın yerlerde RANS formülasyonu kullanılırken geri kalan yerlerde LES metodu uygulanır. LES uygulanan bölge genellikle yüksek Reynolds sayılarındaki türbülanslı çekirdek akıştır ve bu bölgede türbülans ölçekleri önemli rol oynamaktadır. Bu bölgede DES modeli LES modelini 1D sub-grid (alt-grid) modeli şeklinde içermektedir. Viskoz etkilerin hakim olduğu duvara yakın bölgelerde ise standart RANS modeli yaklaşımı kullanılır [37].

Reynolds stress modelinde (RSM) görülen ve RANS modeline alternatif bir diğer yaklaşım ise, transport denklemlerini Reynolds gerilim tensöründeki her bir terim için çözmektir. Bu metodla çözüm gerçekleştirebilmek için ek olarak bir tanede ölçek belirleyici eşitlik (genelde ε için) gerekmektedir. Bunun anlamı 2D akışlar

için 5 ve 3D akışlar için 7 tane ek transport denklemi çözmek gerektiğidir. Pek çok durum için simülasyonlarda Boussinesq hipotezinin kullanılması oldukça yeterli sonuç vermekte ve RSM'in gerektirdiği ek hesap yükünden kurtarmaktadır. RSM'in gerçek faydası ancak türbülans anisotropisinin ana akış üzerinde baskın etkisinin olduğu durumlarda görülmektedir. Bu durumlara örnek olarak yoğun girdaplı akışlar ve yüzey gerilimi tarafından enerjilendirilen ikincil akışlar gösterilebilir [37].

RANS denklemleri ile akış çözümlerinde en çok kullanılan iki model $k - \varepsilon$ türbülans modeli ve $k - \omega$ türbülans modelidir. Bu türbülans modellerindeki k , türbülans kinetik enerjisini, ε , türbülans harcanım (yitim) oranını (turbulence dissipation rate) ve ω , özgül harcanım oranını (specific dissipation rate) ifade eder. RANS denklemlerindeki μ_t (türbülanslı viskozite) değeride k ve ε 'nin veya k ve ω 'nın fonksiyonu olarak ifade edilir [37].

Standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli yarı-ampirik bir modeldir ve modele ilişkin denklemler fenomenolojik çıkarımlara dayanan ampirik ifadelerdir. $k - \varepsilon$ türbülans modeli, akış ve ısı transferi simülasyonlarında türbülanslı akışları çok geniş anlamda kapsamayı, hesap yükünün nispeten az olması, elde edilen sonuçların gürbüz ve gerçeği iyi ifade edebilmesi nedenleri ile yaygın bir şekilde kullanılan ve kabul görmüş bir modeldir. Standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli sadece tam türbülanslı akışlar için gerçekçi çözümler yapabilmektedir çünkü modelin türetilmesinde akışın tamamen türbülanslı olduğu ve moleküler viskozite etkilerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabulleri yapılmıştır [37].

Standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli önceden belirlenmiş (user-specified) türbülans Prandtl sayıları ile çözüm yaparken, renormalizasyon grup teorisi (RNG) türbülanslı Prandtl sayısı için analitik bir formülasyon önermektedir. RNG- $k - \varepsilon$ modeli ε 'nu hesaplarken, özellikle çok hızlı yön değiştiren akışlarda doğruluğu (accuracy) ciddi biçimde arttıran ek bir terim içermektedir. Ayrıca girdap etkileride RNG modeli ile temsil edilebilmekte, böylece girdaplı/dönmeli akışlarda daha yüksek doğruluk sağlanmaktadır. Standart formu ile $k - \varepsilon$ türbülans modeli yüksek Reynolds

sayılarında (high-Reynolds-number) geçerlidir. RNG teorisi efektif vizkoziteyi hesaplamak için analitik olarak türetilmiş bir diferansiyel formülasyon kullanır ve bu nedenle cidar civarında uygun duvar şartlarının belirlenmesi ile düşük Reynolds sayılarındaki (low-Reynolds-number) akışlar için de kullanılabilir [37].

Realizable $k - \varepsilon$ modeli, süreklilik denkleminin sağlanması, türbülans harcanım oranının hesaplanması ve \bar{u}^2 değerinin negatif çıkmaması gibi konularda oldukça tutarlı bir türbülans modelidir. Realizable $k - \varepsilon$ modeli özellikle düzlemsel ve dairesel jetlerin yayılım oranını yüksek doğrulukla hesaplamaktadır. Ayrıca rotasyon (dönme) hareketi içeren akışların hesabında, çok kuvvetli ters basıç gradyeni içeren sınır tabaka çözümlerinde, ayrılma, kopma, tekrarlı devinim içeren akış simülasyonlarında da kullanılabilir. “Realizable” (gerçeklenebilir) terimi, bu modelin formülasyonunun Reynolds gerilmelerindeki bir kısım matematiksel kısıtlamaları karşıladığını ve türbülanslı akışların fiziksel özellikleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu açıdan ne standart $k - \varepsilon$, nede RNG- $k - \varepsilon$ türbülans modelleri gerçeklenebilir modeller değildir [37].

Realizable $k - \varepsilon$ ve RNG $k - \varepsilon$ türbülans modelleri, akımın sertçe kıvrıldığı, vortisite içerdiği veya dönel olduğu durumlarda standart $k - \varepsilon$ türbülans modelinden daha iyi sonuçlar verirler. Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modelinin henüz çok yeni bir yaklaşım olmasından dolayı, RNG modeline hangi durumlarda üstünlük sağladığı tam olarak belli değildir. Yapılan ilk çalışmalarda Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modelinin akım ayrılması olan durumlarda ve kompleks ikincil akış hesaplarında RNG metoduna göre daha başarılı olduğu görülmüştür [37].

Standart $k - \omega$ türbülans modeli, türbülans kinetik enerjisi k ve özgül harcanım oran ω için transport denklemleri temelli ampirik bir modeldir ve buradaki ω , ε 'nin k 'ya oranı olarak düşünülebilir. Fluent®'te kullanılan standart $k - \omega$ türbülans modeli, düşük Reynolds sayıları etkilerini, sıkıştırılabilirliği ve kayma akışı dağılımına dair iyileştirmeler içeren Wilcox $k - \omega$ modeli tabanlıdır. Wilcox modeli, geç ayrılan akışlar, karışma (mixing) katmanları ve düzlemleri, dairesel ve

radyal jetlere ait ölçümsel değerlerle çok uyumlu serbest kayma akışı dağılımı öngörülerini yapmaktadır ve bu model yüzeye bağımlı akışlara ve serbest yüzey akışlarına uygulanabilir. Fluent® ayrıca $k-\omega$ -SST şeklinde adlandırılan gelişmiş bir $k-\omega$ türüvi türbülans modeli de ihtiva etmektedir¹. SST $k-\omega$ türbülans modeli $k-\omega$ modelinin duvar yakınında (near-wall region) gürbüz ve çok etkin olan formülasyonu ile $k-\varepsilon$ türbülans modelinin uzak alanlarda (far field) sağladığı serbest akış bağımsızlığı (free-stream independence) özelliklerini çok güzel harmanlamıştır. Bu harman, $k-\varepsilon$ modelinin $k-\omega$ formülasyonuna dönüştürülmesi ile sağlanmıştır. SST $k-\omega$ türbülans modeli $k-\omega$ türbülans modeline benzemekle beraber iyileştirmeler içermektedir. SST $k-\omega$ türbülans modeli standart $k-\omega$ türbülans modeline göre çok daha geniş bir uygulama alanına sahiptir [37].

Karmaşık türbülanslı akışlarda (farklı şartlandırılmış çoklu inlet (giriş) barındıran sistemler gibi) türbülans intensitesi için bir ilk değer vermek çözümün hızını ve kalitesini arttırabilir. Türbülans intensitesini (I) hesaplamak için Fluent® kullanma klavuzunda Eşitlik 4.12 önerilmektedir.

$$I = 0,16 \cdot \text{Re}_{Dh}^{-1/8} \quad (4.12)$$

Tam gelişmiş türbülanslı akış için %5-%10 intensite değerleri yeterlidir. Türbülans kinetik enerjisi k , türbülans intensitesi ve akış karakteristik ortalama hızı kullanılarak Eşitlik 4.13'ten hesaplanabilir [37].

$$k = \frac{3}{2} (I u_{avg})^2 \quad (4.13)$$

Türbülans kinetik enerjisi k hesaplandıktan sonra yitim oranı ε ve özgül yitim oranı ω da hesaplanabilir. Yitim oranı ε 'nin hesabı için kullanılacak formüller Eşitlik 4.14 ve Eşitlik 4.15'te verilmektedir.

¹ F.R. Menter'in 1994 yılında yayımlanan shear stress transport (SST) $k-\omega$ türbülans modeli.

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (4.14)$$

$$\varepsilon = \rho \cdot C_{\mu} \frac{k^2}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (4.15)$$

Özgül yitim oranı ω ise Eşitlik 4.16 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{C_{\mu}^{1/4} l} \quad (4.16)$$

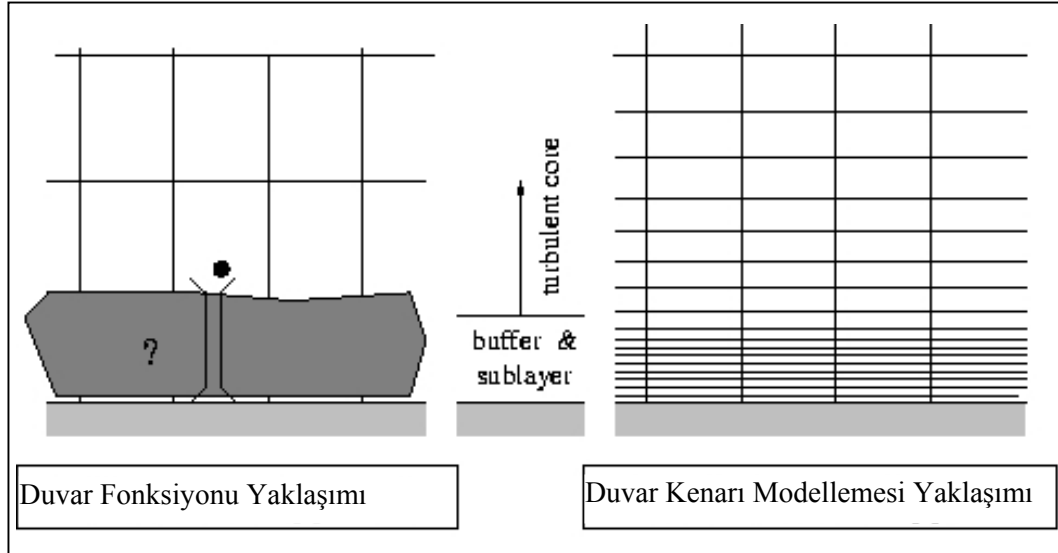
Eşitlik 4.14, Eşitlik 4.15 ve Eşitlik 4.16’da görülen C_{μ} ampirik bir sabit katsayı olup değeri 0,09 kabul edilebilir. Eşitliklerde yer alan l ise pek çok durum için karakteristik uzunluğun 0,07 katı olarak kabul edilir. Dikdörtgen kesitli bir tünel için karakteristik uzunluk hidrolik çap yada tünel yüksekliği olarak alınabilir.

4.4. Duvar Fonksiyonları ve Duvar Kenarı Modellemesi

Duvar bölgelerine yakın bölgelerin sayısal çözümlerinde genellikle iki farklı yaklaşımda bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan ilkinde, viskoz etkilerin baskın olduğu iç bölgeler (viskoz alt katman ve tampon bölge) çözülmez, bunun yerine ‘duvar fonksiyonları’ (wall functions) denilen ve duvar bölgesi ile tam türbülanslı bölge arasında kalan bölgeyi tanımlayan ampirik formülasyonlar kullanılır. Duvar fonksiyonları sayesinde duvar kenarları için ek çözümler veya çözüm algoritmasına modifiyeler yapma gerekliliği ortadan kalkar [37].

Duvar kenarındaki akışı modellemekte kullanılan yaklaşım ise, duvar civarındaki viskozite etkilerinin hakim olduğu tüm mesh hücrelerinde modifiye edilmiş türbülans modelleri ile viskoz alt tabaka dahil akış çözümü yapmaktır. Tüm duvar bölgesi hatlarınca çözüm yaparak akışın modellenmesi yaklaşımına “duvar kenarı modellemesi” (near-wall modeling) denmektedir. Duvar fonksiyonları ve duvar

kenarı modellemesi yaklaşımlarının şematik gösterimi Şekil 4.1’de görülmektedir [37].



Şekil 4.1. Duvar fonksiyonu yaklaşımı ve duvar kenarı modellemesi yaklaşımı şematik gösterimi

Yüksek Reynolds sayılı akışların (high-Reynolds-number flows) çoğunda duvar fonksiyonu kullanımı, duvar kenarında çok hızlı değişim gösteren viskozite etkin bölgede çözüm yapılmamasından dolayı ciddi oranda hesaplama gücü tasarrufu sağlar. Duvar fonksiyonu yaklaşımı az hesap gücü gerektirmesi, gürbüz sonuçlar vermesi ve faydalarına göre yeterli doğrulukta çözümler üretmesi ile oldukça popüler ve kabul görmüş bir methodur. Özellikle mühendislik uygulamaları için ve endüstriyel amaçlı hesaplamalarda oldukça pratik ve etkin bir seçenektir [37].

Duvar fonksiyonları düşük Reynolds sayılarındaki karmaşık akışlı sistemlerin simülasyonlarında yetersiz kalmaktadır ve bu gibi çözüm alanlarında duvar kenarı modellemesi yaklaşımının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Duvar kenarı modellemesi ile duvara kadar olan viskozite etkin tüm bölge çözülerek akış alanı için geçerli sonuçlar elde edilebilir. Tüm bu viskozite etkin alanın çözülmesi ek bilgisayar yükü getirdiği gibi, çözülmesi gereken denklemlerin çoğalmasında ve bu denklemlerin anlamlı sonuçlar elde edebilmesi için mesh yapısının sıklaştırılmasının gerekmesi nedenleri ile ek hesaplama hatalarına da neden olur [37].

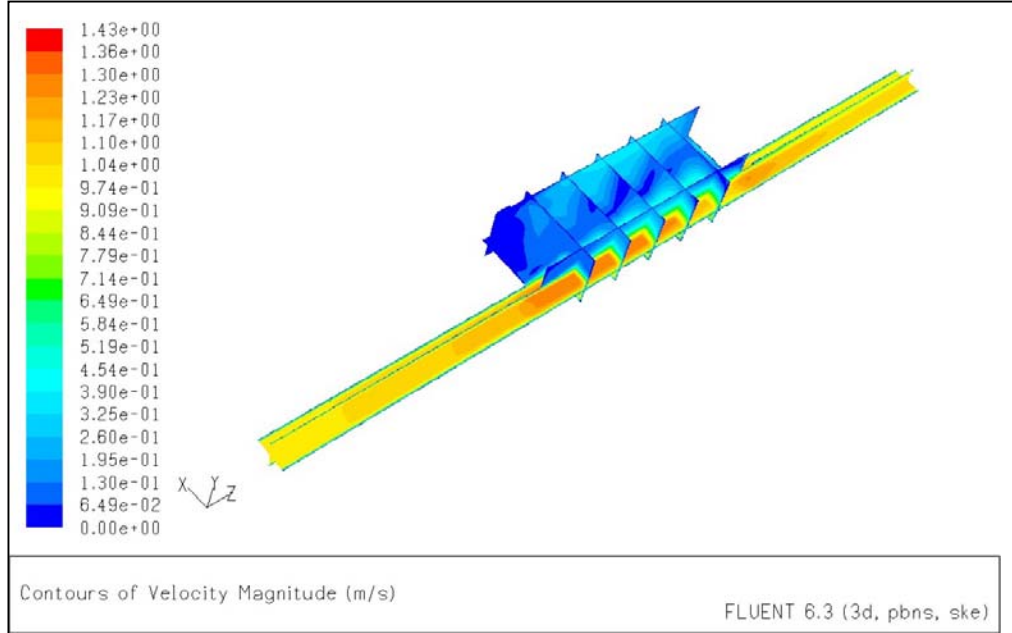
4.5. Model İçerisinde Akış Simülasyonu İçin Türbülans Modeli Araştırması

220 000 mesh hücresi barındıran 3D bir dijital istasyon modelinde, 1 m/s uniform hava giriş hızı ile oluşacak akışı en iyi temsil edebilmek için $k - \varepsilon$ türbülans modeli ve türevleri, $k - \omega$ türbülans modeli ve türevleri, Reynolds-Stress türbülans modeli ve türevleri ve Detached Eddy $k - \omega$ formülasyonları kullanılarak kararlı durum için (Detached Eddy formülasyonu hariç) bir dizi akış simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Dijital istasyon modeli 3D olduğundan Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılamamıştır. İstasyon simülasyonu için LES çözüm algoritmasında denenmişse de, istasyon içerisinde sınır tabaka meshi bulunmaması ve istasyon içindeki mesh hücre büyüklüklerinin LES için gerekenden büyük olması nedenleri ile sağlıklı çözümler elde edilememiştir. Bu nedenle LES çözüm algoritması bu çalışmanın kapsamına alınmamıştır. İstasyon içerisindeki Detached Eddy $k - \omega$ çözümü 0,1 saniye zaman adımı için 14 saniyelik akış için yapılmıştır.

Simülasyonları yapılan istasyon modelinde giriş tüneli hidrolik çapı 0,117 metre'dir. Giriş tüneline sabit ve uniform 1 m/s giriş hızı için istasyon giriş tüneline Reynolds sayısı 8084,83, sabit ve uniform 3 m/s giriş hızı için istasyon giriş tüneline Reynolds sayısı 24 254,49 olarak belirlenmiştir. Her iki durumda da istasyon içerisindeki akış türbülanslıdır ve akış simülasyonlarında türbülanslı akış için çözüm yapılmalıdır. Eşitlik 4.5 kullanılarak 1 m/s giriş hızı için istasyon giriş tünelineki intensite hesaplanacak olursa 0,0519 değeri bulunur. Tüm 1 m/s akış hızı simülasyonlarında türbülans intensitesi %5,2 olarak kabul edilmiştir.

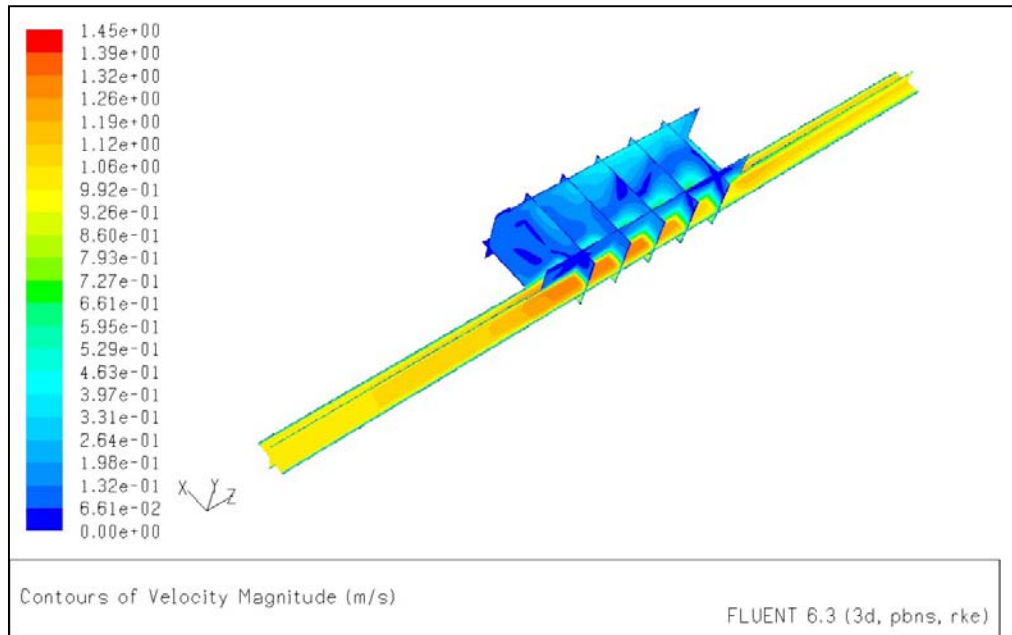
Bilgisayar simülasyonlarında Fluent® 6.3 versiyonu kullanılmıştır. Çözüm alanındaki tüm duvarlar için 0,5 mm granül yüksekliği ile ortalama yüzey pürüzlülüğü verilmiştir. Duvarlar için tam yalıtımlı kabulü yapılmış ve duvar çevresi akış çözümleri için standart duvar fonksiyonları kullanılmıştır. Her bir simülasyon için yeterli iterasyon sayısı 1000 olduğu halde çözümler 1200 iterasyona kadar devam ettirilmiştir. Modeller arasındaki kıyaslamalar yerel hızlar ve akış geometrisine göre yapılmıştır. Hangi modelin daha tutarlı olduğu deney setinden

alınan hızlar ve duman deneylerinden elde edilen bilgiler ışığında belirlenmiştir. Şekil 4.2’de standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



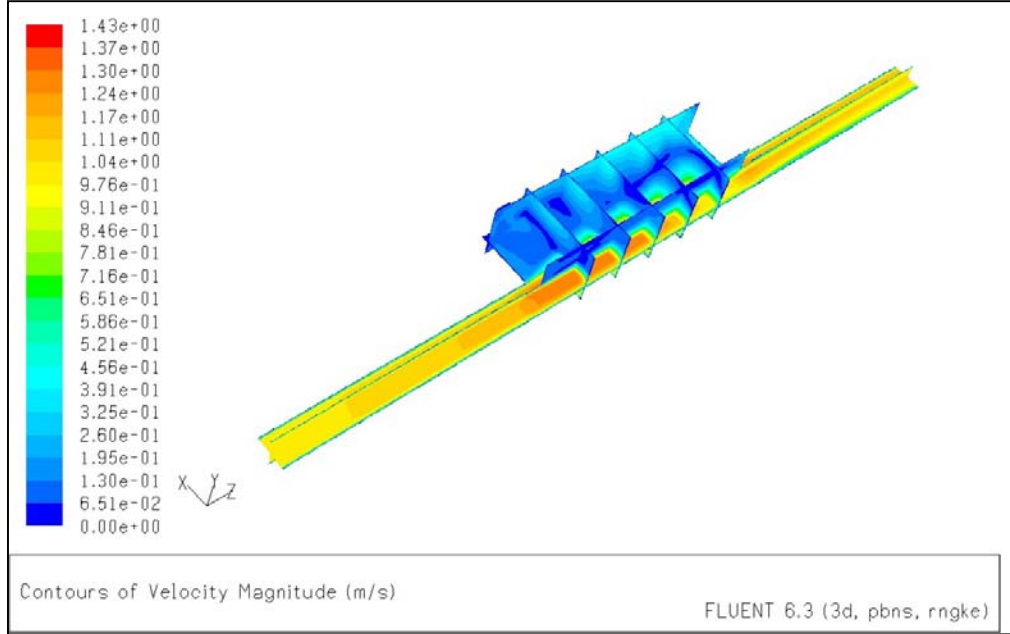
Şekil 4.2. Standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.3’te Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



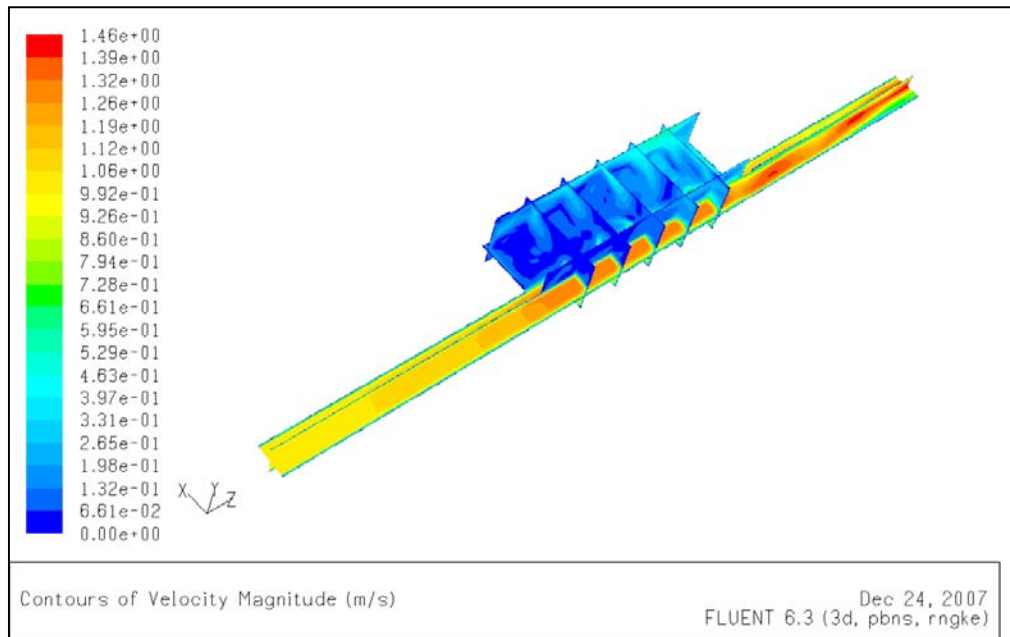
Şekil 4.3. Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.4'te RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



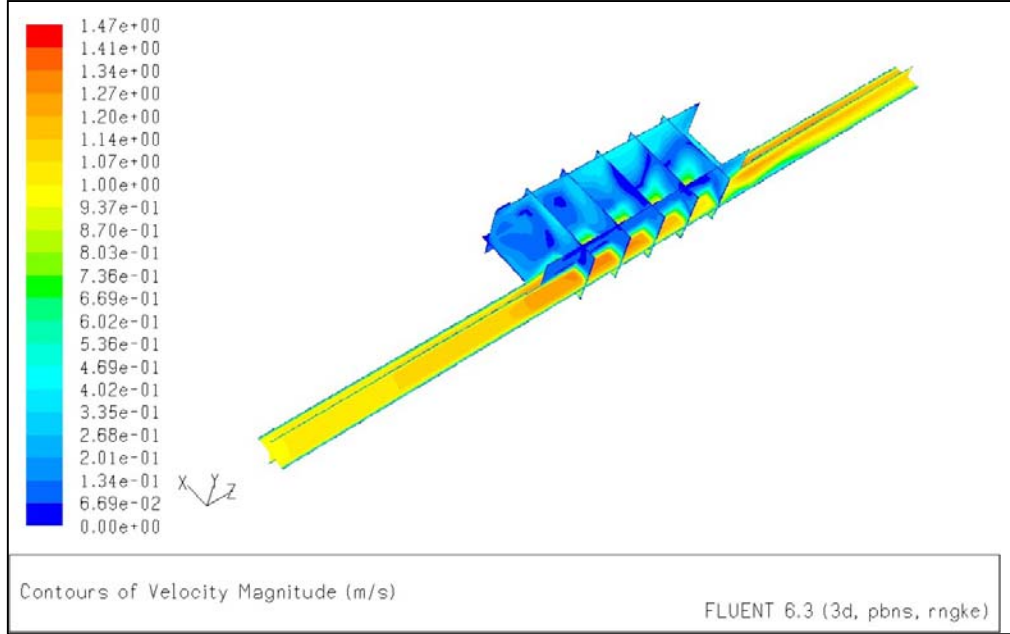
Şekil 4.4. RNG $k - \varepsilon$ türbülans modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.5'te RNG $k - \varepsilon$ differential viscosity model ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



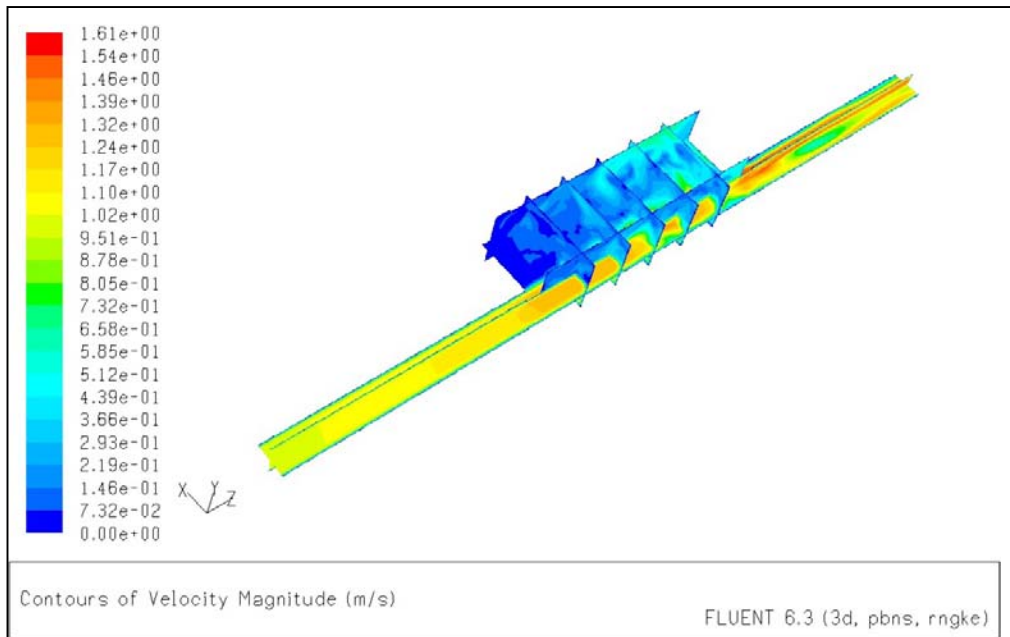
Şekil 4.5. RNG $k - \varepsilon$ differential viscosity model kararlı akış çözümü

Şekil 4.6’da RNG $k - \varepsilon$ swirl dominated model ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.6. RNG $k - \varepsilon$ swirl dominated model kararlı akış çözümü

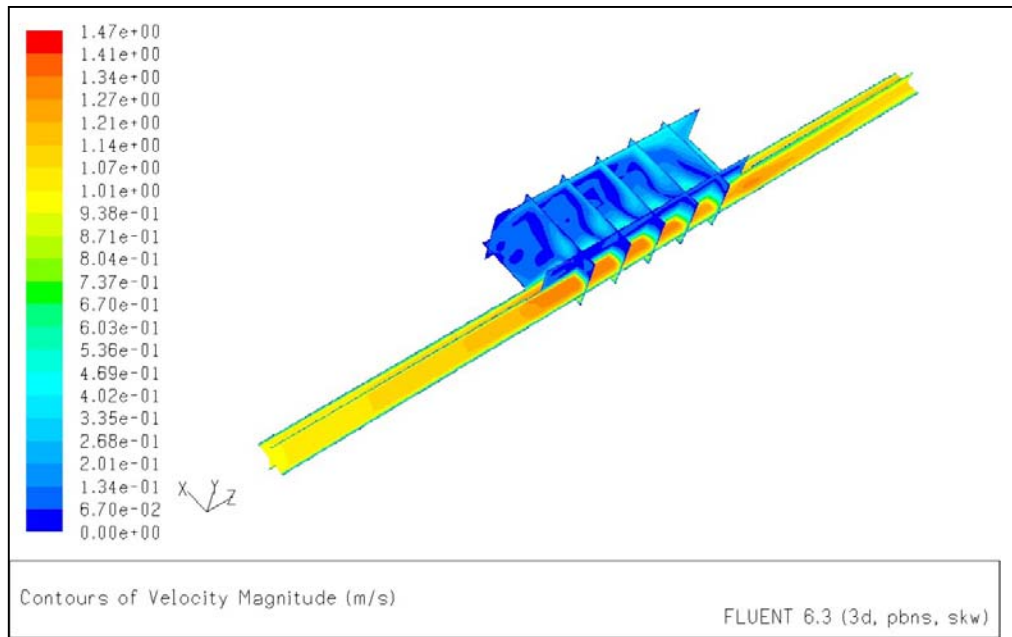
Şekil 4.7’de RNG $k - \varepsilon$ swirl dominated differential viscosity model ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.7. RNG $k - \varepsilon$ swirl dominated differential viscosity model çözümü

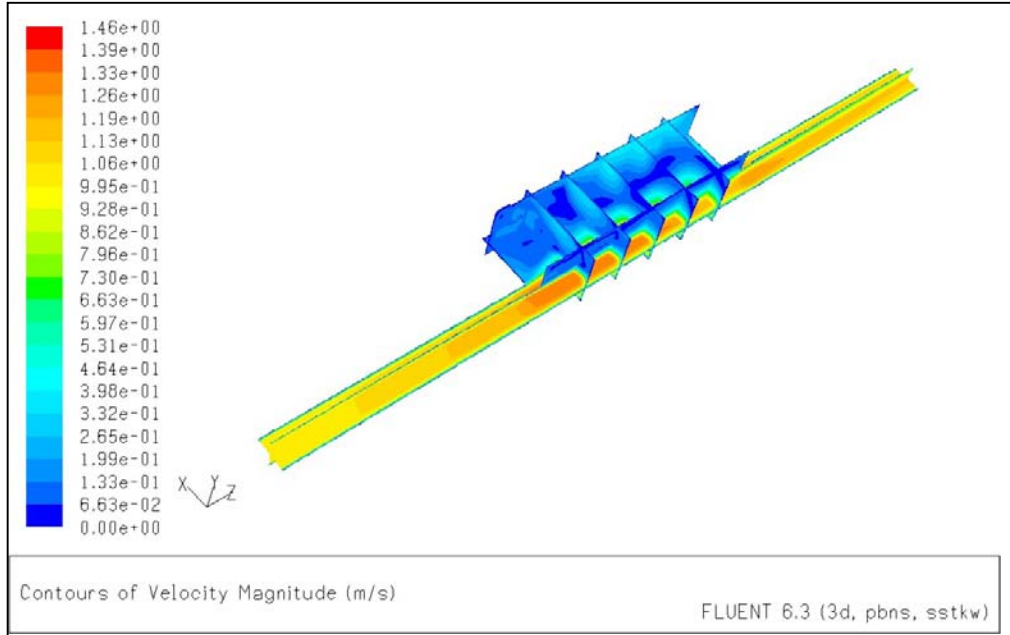
Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi RNG $k - \varepsilon$ swirl dominated differential viscosity model (girdap ağırlıklı diferansiyel viskozite modeli), akış alanına dair gerçekçi olmaktan son derece uzak bir çözüm üretmiştir. Ayrıca istasyon içerisinde maksimum hız olarak hesapladığı 1,61 m/s değeri, sonuca yakınsayan simülasyonlar içindeki en yüksek hız tahminidir. Çıkış tüneli merkezinde hızlı akımlarla çevrili yavaş bir çekirdek bölge tahmini de gerçekle bağdaşmamaktadır. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere, çözüm yapılmak istenen durum ve akış şartlarına göre çözüm metodu ve çözücü algoritması seçimi çok önemlidir.

Şekil 4.8'de standart $k - \omega$ türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



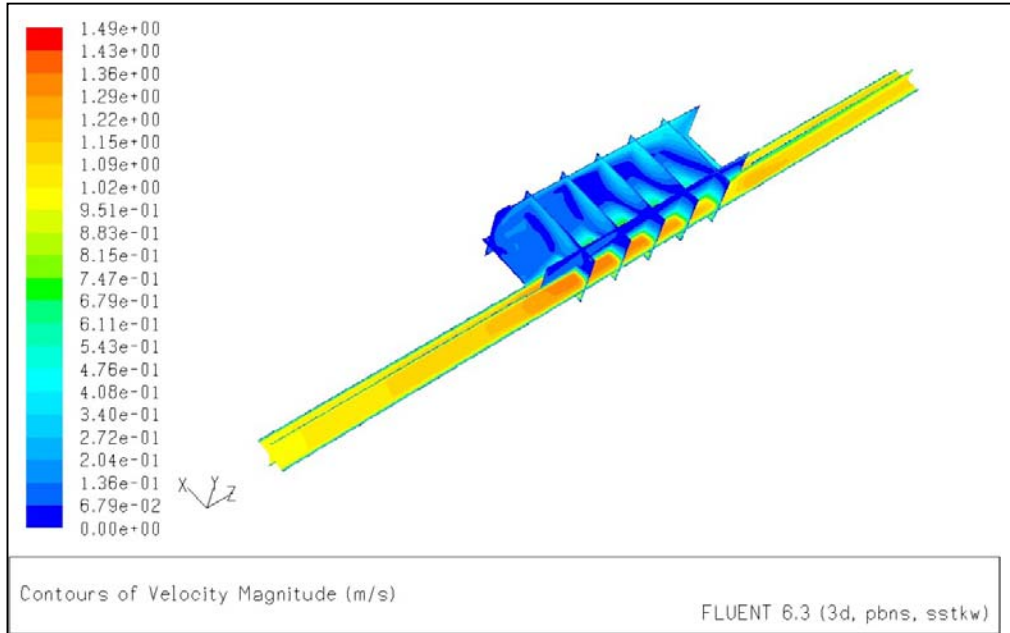
Şekil 4.8. Standart $k - \omega$ türbülans modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.9'da SST $k - \omega$ türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



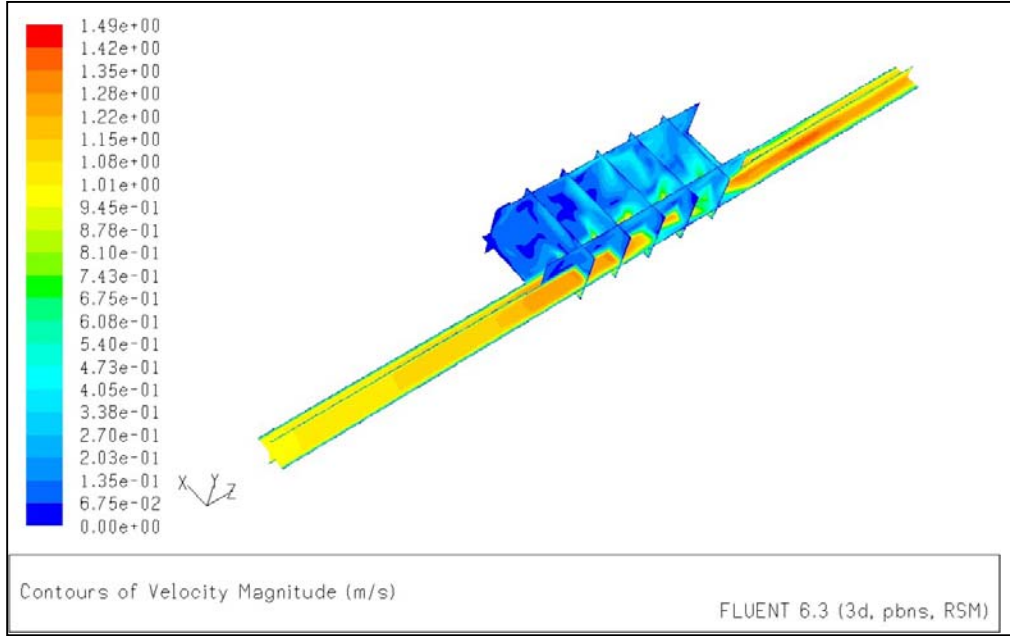
Şekil 4.9. SST $k-\omega$ türbülans modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.10'da SST $k-\omega$ transitional türbülans modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



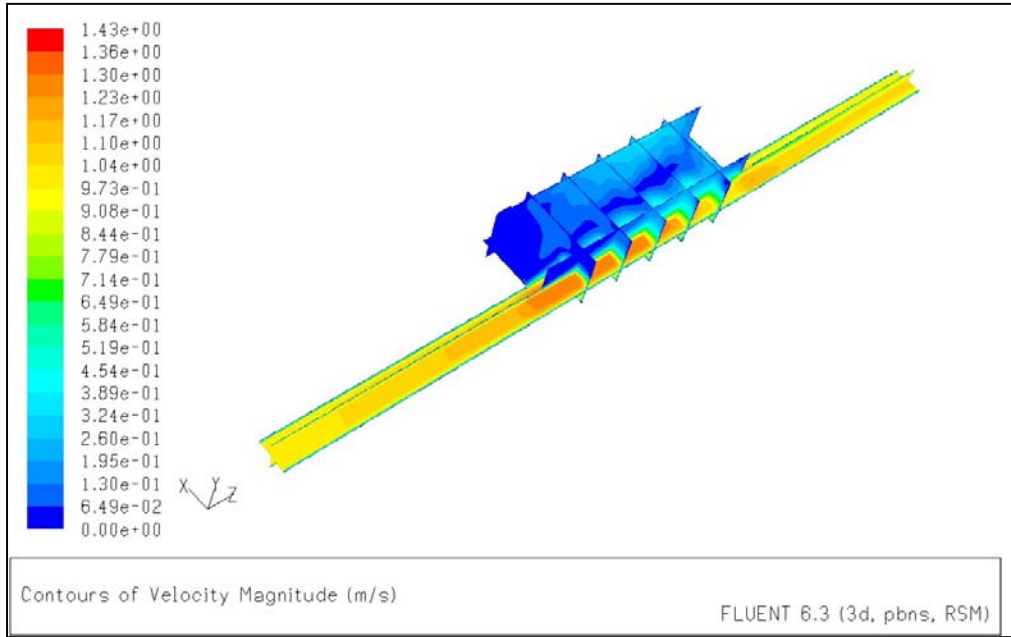
Şekil 4.10. SST transitional $k-\omega$ türbülans modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.11’de Low Reynolds-Stress Ω modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Çözümde kayma gerilmeleri düzeltme opsiyonu etkindir.



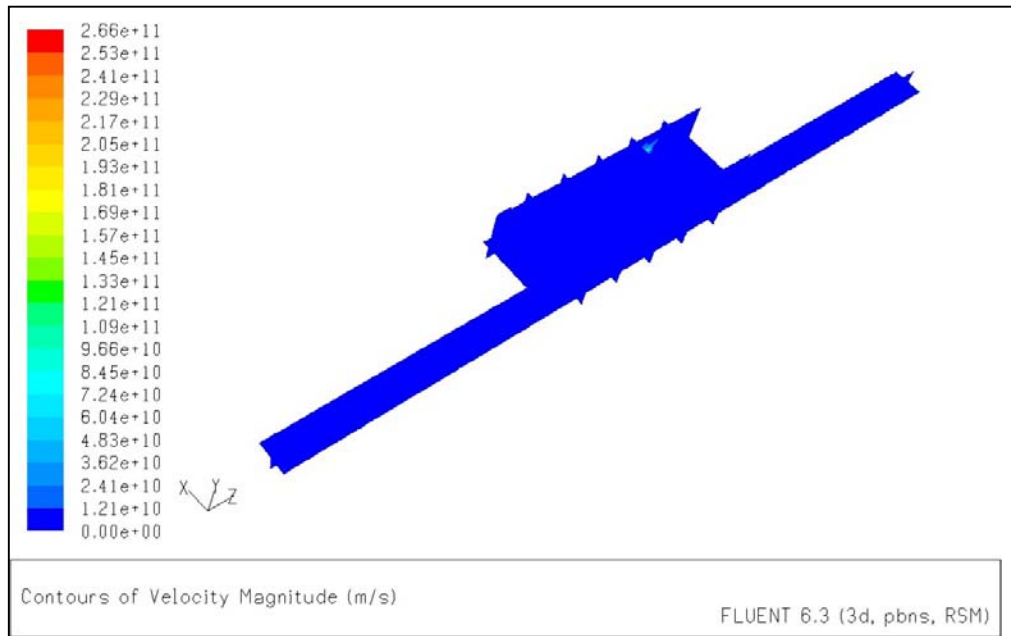
Şekil 4.11. Low Reynolds-Stress Ω modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.12’de RSM lineer pressure-strain modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Çözümde duvar sınır koşullarının k ’ya bağlı olması (wall BC from k equation) ve duvardan yansıma etkileri (wall reflection effects) seçenekleri etkindir. Bu sayede istasyon giriş tüneline gelen ve istasyon çıkış tüneline çarpan akışın hareketi daha iyi belirlenmek istenmiştir.



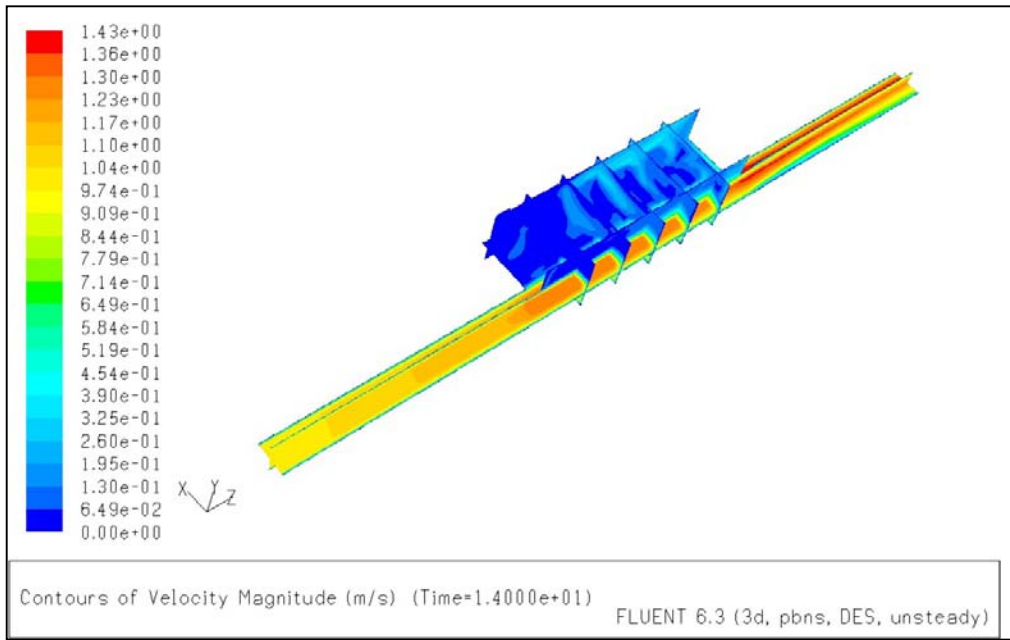
Şekil 4.12. RSM linear pressure-strain modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.13'de RSM quadratic pressure-strain modeli ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.13. RSM quadratic pressure-strain modeli kararlı akış çözümü

Şekil 4.13'ten de görüldüğü üzere verilen sınır ve akışkan şartları için çözüm iraksamıştır. Şekil 4.14'te Detached Eddy SST $k - \omega$ modeli ile 14. saniye için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

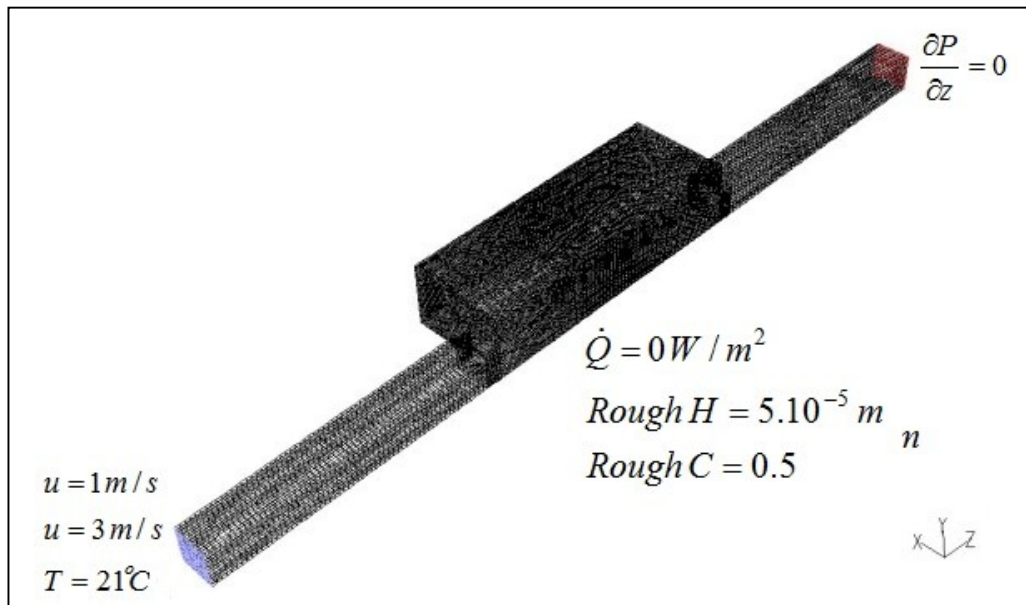


Şekil 4.14. Detached Eddy SST $k - \omega$ modeli kararsız akış çözümü

Farklı türbülans modelleri ile tek bir istasyon modelinde aynı parametrelerle yapılan simülasyon sonuçları yukarıda verilmiştir. Tüm çözümler kontur ve vektör formlarında incelendiğinde SST $k - \omega$, realizable $k - \varepsilon$ ve RNG $k - \varepsilon$ modellerinin deney gözlemleriyle ve deneylerde giriş tüneli, a5 ve çıkış tüneli konumlarında ölçülen hızlarla uyduğu belirlenmiştir. Seçilen bu üç model içerisinde duman makinası kullanılarak yapılan akış deneylerine en uygunu SST $k - \omega$ türbülans modelidir. 8000 civarı gibi düşük sayılabilecek Reynolds sayılarında SST $k - \omega$ modelinin iyi sonuçlar vermesi beklenen bir durumdur. Gerçekte yüksek Reynolds sayılarında kullanılmak üzere geliştirilen $k - \varepsilon$ türbülans modeli, RNG ve realizable modifikasyonları ile 8000 gibi yüksek olmayan Reynolds sayılarında bile geçerliliğini korumuştur. Detached Eddy SST $k - \omega$ modeli ise giriş-çıkış tünelleri arasında SST transitional $k - \omega$ modelinden bile güçlü bir jet öngörmüştür. Bu çözümde istasyon içerisi neredeyse durağan hesaplanmış, çıkış duvarından yansımaları gereken akış karakteri düzgün betimlenememiştir.

4.6. İstasyon Modeli İçinde Kararsız (Unsteady) Akış Çözümleri

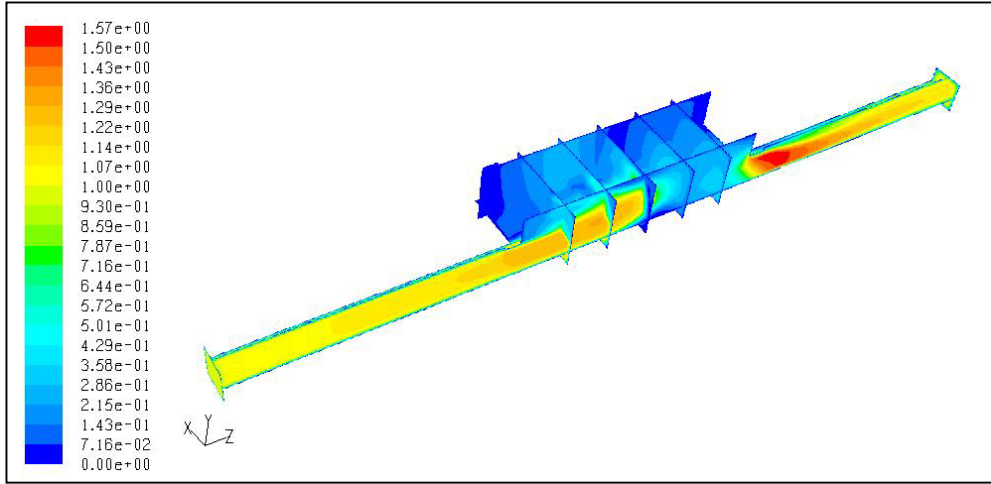
Karakteristik ölçeği 1/100 olan istasyon modeli içerisindeki akışı çözümlenmeye en uygun türbülans modeli, SST $k-\omega$ türbülans modeli olarak belirlenmiştir. İstasyon modeli içerisinde 1 m/s ve 3 m/s unifom hızlarla giren akışları (tren piston etkisini) kararsız (unsteady) olarak çözümlenmek için SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Şekil 4.15'te simülasyonlarda kullanılan bilgisayar modeli ve modele ait sınır şartları gösterilmektedir.



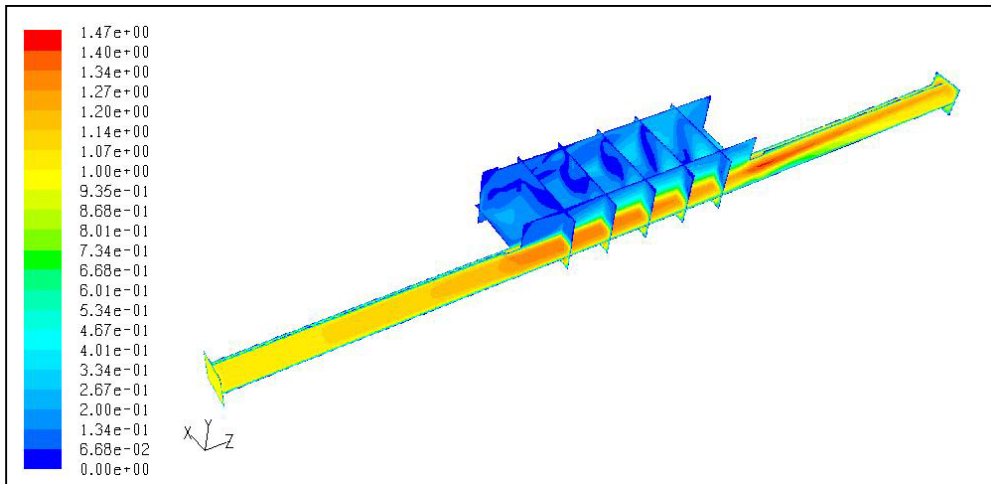
Şekil 4.15. 3D istasyon modeli ve sınır şartları

Ayrık implicit çözücüde 0,05 saniye adım aralığı kullanılarak iterasyonlar yürütülmüş, her 0,1 saniye için çözüm dosyası kaydedilmiştir. Her bir piston hızı için istasyon içerisindeki 30 saniyelik akış çözümü 15 Gb yer tutmuştur ve 302 veri dosyası oluşmuştur. Ayrıca her 0,05 saniyede üretilen sonuçların grafiği kaydedilmiştir. Aşağıda yalnızca sınırlı sayıda hız kontur grafiği ele alınacak, diğer parametreler ise bu çalışma kapsamında sunulmayacaktır.

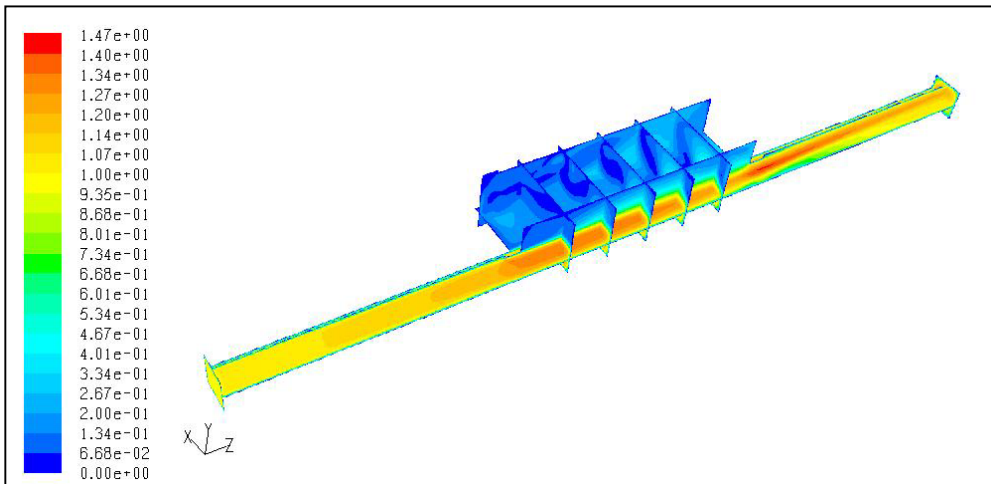
Aşağıda 1 m/s'lik akış için 1, 5, 15 ve 30. saniyelerine ait hız kontur grafikleri sunulmuştur;



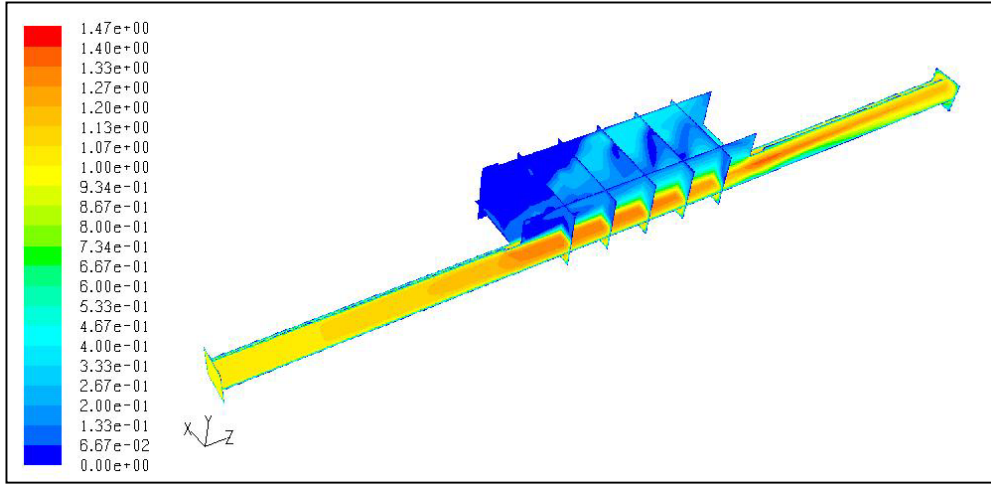
Şekil 4.16. 1 m/s üniform giriş hızı için 1. saniyede durum



Şekil 4.17. 1 m/s üniform giriş hızı için 5. saniyede durum



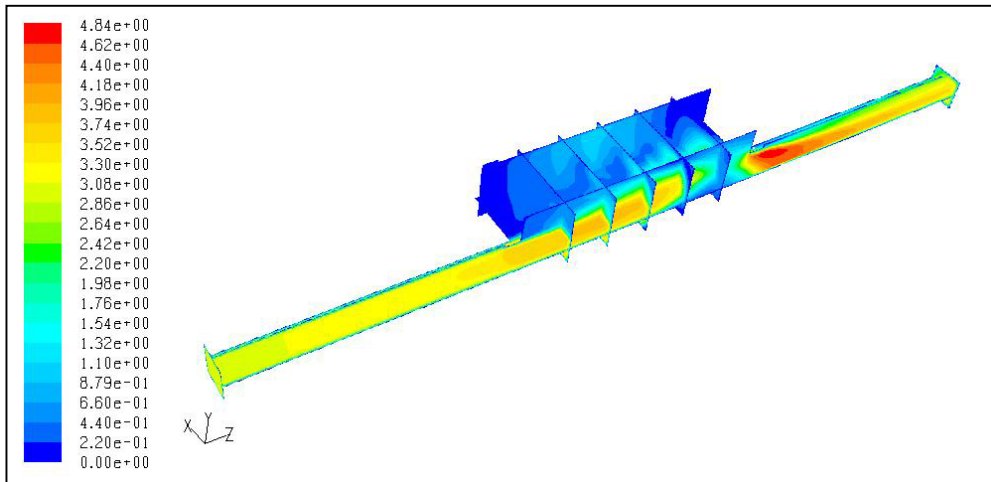
Şekil 4.18. 1 m/s üniform giriş hızı için 15. saniyede durum



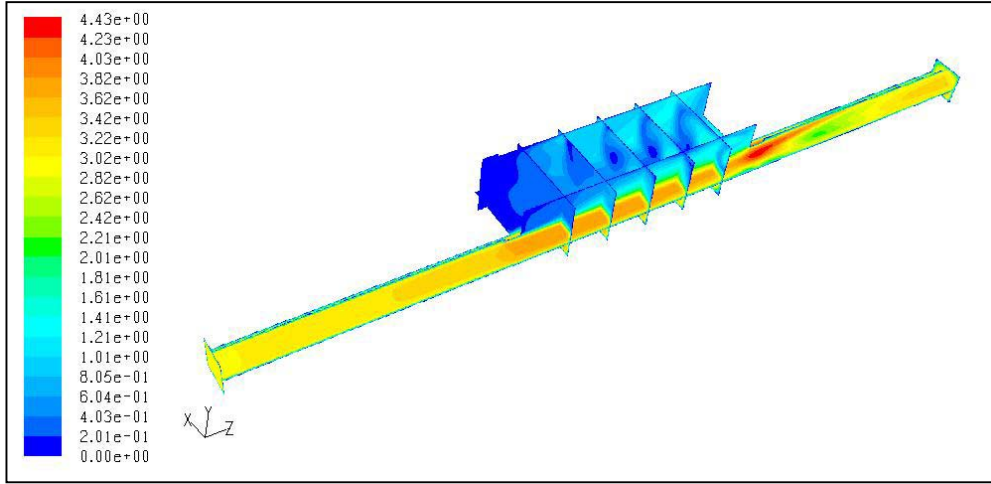
Şekil 4.19. 1 m/s üniform giriş hızı için 30. saniyede durum

1 m/s piston hızı için elde edilen simülasyon sonuçları deney gözlemleri ve literatür araştırmaları ile uyum içindedir. Tam beklendiği gibi giriş tüneli tarafındaki duvarın önünde durağana yakın bölge ve istasyon arka duvarı ile tavan civarındaki geri akışlar belirlenebilmiştir.

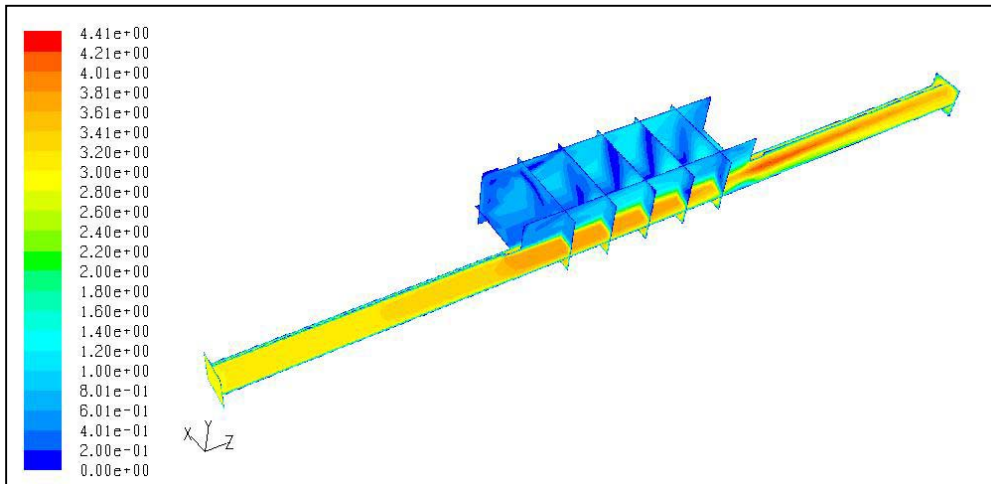
Aşağıda 3 m/s'lik akış için 0,5, 1, 5, 15 ve 30. saniyelerine ait hız kontur grafikleri sunulmuştur;



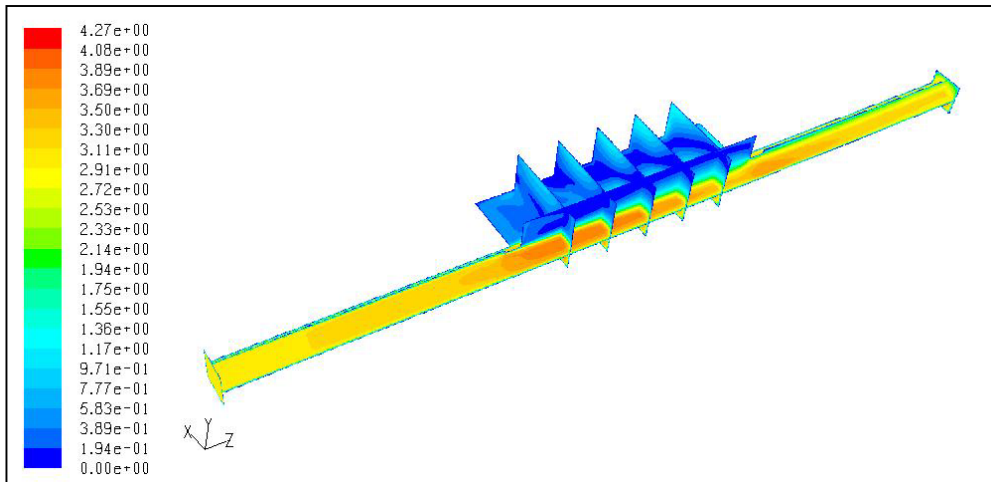
Şekil 4.20. 3 m/s üniform giriş hızı için 0,5. saniyede durum



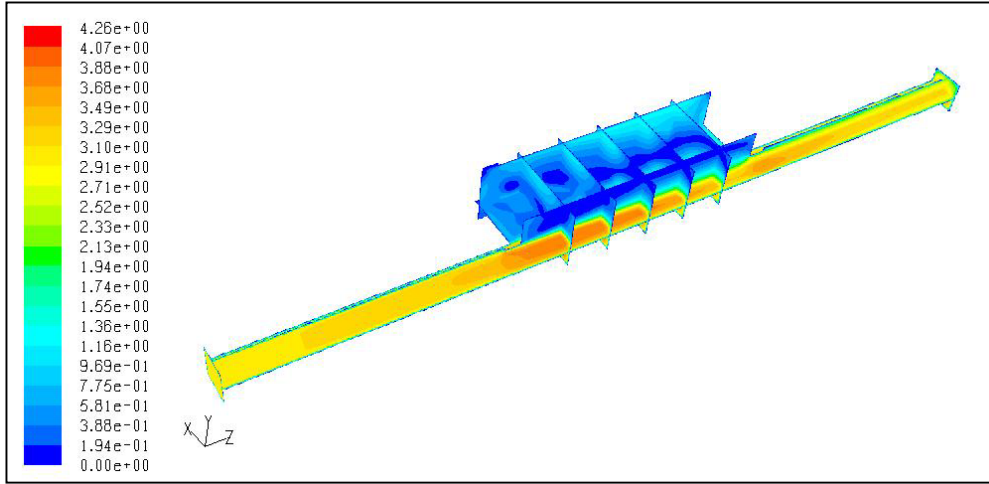
Şekil 4.21. 3 m/s üniform giriş hızı için 1. saniyede durum



Şekil 4.22. 3 m/s üniform giriş hızı için 5. saniyede durum



Şekil 4.23. 3 m/s üniform giriş hızı için 15. saniyede durum



Şekil 4.24. 3 m/s üniform giriş hızı için 30. saniyede durum

Çözümlerin 20. saniyesinden sonra hız konturları arasındaki değişim farkedilmeyecek düzeye gelmiştir. Her iki piston hızı içinde (1 m/s ve 3 m/s) akış hattında hala zaman içerisinde oynamalar ve değişimler olsada akış genel hatlarıyla belirlemiştir. İterasyonlara her zaman adımında 50 iterasyon sayısı ile başlanmış, çözümlerin 10. saniyesinden sonra residülerin 10^{-6} değerinin altına düşmesi ile her bir zaman adımı için gereken iterasyon sayısı düşmeye başlamıştır. Simülasyonların 25. saniyesi için residülerin 10^{-6} değerinin altına düşmesi 1 m/s piston hızı için sadece 17 iterasyon, 3 m/s piston hızı içinse 20 iterasyon gerektirmektedir. 0,05 saniye aralıklarla çekilmiş sistem görüntüleri ardışık oynatıldığında dinamik sisteme ait hareketli görüntü oluşmaktadır. SST $k - \omega$ ile kararsız durum için yapılan çözümler, kararlı çözümlerle kıyaslanmayacak şekilde iyi sonuçlar vermiştir. İstasyon içerisindeki akış bölgeleri netçe belirlenmiş, çıkış duvarından yansıyan akışın karakteri doğru biçimde hesaplanmıştır. Tünnellerle birlikte toplam 2,81 m uzunluğundaki istasyon modeli içerisinde 220 000 mesh hücresi ve sınır tabaka meshi olmayan durum için 1 m/s ve 3 m/s piston hızlarında yapılan çözümler oldukça gerçekçi ve tatminkardır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ölçekli bir metro istasyonu modelinde 7 farklı konumlarda, 3 farklı akış şartında ve 2 farklı yakıt kullanılarak yangın deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde 5 farklı noktadan hız, 28 farklı noktadan sıcaklık ve çıkış tüneline emisyon değerleri ölçülmüştür. Toplamda gerçekleştirilen 70 üzeri deneyden derlenen veriler bu çalışmada sunulmaya çalışılmıştır. Deney düzeneği içerisindeki akış, ticari bir HAD yazılımı kullanılarak modellenmeye çalışılmış, gerçek bir durumu sayısal simülasyonlarla temsil etmek için gereken optimum ve minimum parametreler belirlenmiştir. Çalışmalar boyunca toplanan verilerin ancak sınırlı bir bölümü burada sunulabilmektedir.

Yangın deneylerinde, ventilasyonsuz durumda istasyon tavan bölgesinin hızla ısındığı, yaya platformunun sıcaklığının yalnızca bir kaç °C derece arttığı ve bu bölgedeki sıcaklığın insan hayatını tehdit edici seviyelere ulaşmadığı belirlenmiştir. Bununla beraber, istasyon içerisindeki oksijen miktarının hızla düştüğü ve insan yaşamını tehdit edici seviyelere gerilediği görülmüştür. İstasyon içinde baskın karakterli bir akış olmadığından buoyancy kuvvetleri çok etkili olmuş, yangın sonucu ortaya çıkan tüm sıcak gazlar önce istasyon tavanına yayılmıştır. Tavandan aşağı inen bir kısım duman tüneline tavanları boyunca geri akış oluşturmuştur. Giriş tüneline önünde çıkan yangın sonucunda duman çıkış tüneline yoğun olarak çıkarken, çıkış tüneline önünde çıkan yangının dumanı yoğun olarak giriş tüneline çıkmaktadır.

Ventilasyonsuz durumda taze havadan uzak kalan bölgelerde çıkarılan yangın hızla gücünü yitirmekte, oksijenin etrafta yeterli oranda bulunmadığı hallerde kendiliğinden sönmektedir. Bu duruma karşın 1 m/s ve 3 m/s akış hızlarında yapılan deneylerin tamamında yakıt bitinceye kadar yanma devam etmiştir. Ayrıca 3 m/s altındaki ateş son derece kararsızdır ve yaya platformuna doğru yatmaktadır. Özellikle giriş tüneline ağzında ve istasyon merkezinde akış olan durumlarda çıkartılan yangınlar, derhal arkalarındaki bölgeyi ısıtmakta ve etrafa yayılma eğilimi göstermektedirler. Ventilasyon olan durumda istasyon içerisindeki hava kalitesi çok düşmesede, yangının yolcu platformunu yalaması ve etrafa yayılma eğilimi

ventilasyonu canlı yaşamı bakımından tehlikeli hale getirmektedir. Ayrıca akım hızına bağlı olarak buoyancy kuvveti etkisini kaybetmektedir. 1 m/s'lik akım hızlarında bile tavan bölgesi durağan konumda olduğu kadar çok ısınmamaktadır.

Günümüzde pek çok yeraltı raylı taşımacılık sisteminde acil havalandırma sistemleri tünellerde konumlandırılmışlardır. Tünellerde konumlandırılan havalandırma sistemleri istasyon içindeki ısı ve dumanı boşaltmada faydalı olsada içeri çekilen temiz hava yüzünden yangının söndürülmesini zorlaştıracak deneyle kanıtlanmıştır. Ayrıca yangının akışla beraber tilt yapması yangının yayılma riskini artırmakta, ateş köküne ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Deneyle sonunda sıcak dumanın yangın yayılmadan tahliyesi için acil durum ventilasyon sisteminin istasyon tavan bölgesine yerleştirilmesinin daha uygun olabileceği belirlenmiştir. Fanlar bu bölgede konuşlandırılmasa bile fan sistemine bağlı havalandırma kanalları ile ortamdaki duman ve sıcak gazlar istasyon hacminden çekilebilir. Bu sistemin bir diğer avantajı ise alevin tilt yapmasına neden olmaması ve yangının yayılmasına tahrik vermemesi olabilir. Deneyle istasyon tavanına yerleştirilmiş bir acil durum ventilasyon sisteminin performansı incelenmelidir.

Deneyle alınan sonuçlar eşliğinde gerçekleştirilen bilgisayar simülasyonlarında istasyon içindeki akışı en iyi temsil edebilecek türbülans modelleri aranmıştır. Simülasyon sonuçlarının gerçeğe yakınsamasını sağlamak ve bu arada zaman-işlemci gücü-bellek efektif bir model oluşturmak için optimum mesh ve optimum iterasyon araştırmaları yapılmıştır. 1 m/s ve 3 m/s akış hızları için yapılan kararsız akış simülasyonları sonucunda gerçeğe oldukça yakın sonuçlar alınmıştır. Genel akış hatları, dumanla görülür hale getirilen akım çizgileri, akışa ait hız değerleri, Fluent® ticari yazılımındaki SST $k - \omega$ türbülans modeli kullanılarak hesaplanan sonuçlarla örtüşmektedir. Sayısal sonuçlar ters akışları, yansıma hareketlerini, ana akım hatlarını ve tüm akışa dair genel hız büyüklüklerini yapılan deneyle elde edilen hız verilerine ve akış gözlemlerine uyuşacak şekilde tahmin etmiştir.

KAYNAKLAR

1. İnternet : Wikipedia “Channel Tunnel Fire”,
http://en.wikipedia.org/wiki/Channel_Tunnel_fire.html (2008).
2. İnternet : Wikipedia “Gothenburg Nightclub Fire”,
http://en.wikipedia.org/wiki/Gothenburg_nightclub_fire (2008).
3. Mizielinski, B., Hendiger, J., “Directing Of The Air Flow In Industrial Hall During Fire Ventilation Operation”, *5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Roomvent '96*, Yokohama/Japan, 315-320 (1996).
4. Energy Efficiency Office, “Housing Design Handbook”, *Building Research Establishment*, UK, 55-89 (2003).
5. Vauquelin, O., Telle, D., “Definition and Experimental Evaluation of The Smoke “Confinement Velocity” in Tunnel Fires”, *Fire Safety Journal*, 40: 320-330 (2005).
6. Roh, J.S., Ryou, H.S., Kim, D.H., Jung, W.S., Jang, Y.J., “Critical Velocity and Burning Rate in Pool Fire During Longitudinal Ventilation”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22: 262-271 (2007).
7. Wu, Y., Bakar, M.Z.A., “Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems – A Study of The Critical Velocity”, *Fire Safety Journal*, 35: 363-390 (2000).
8. Olivier, V., “Experimental Simulation Of Fire-Induced Smoke Control In Tunnels Using An ‘Air-Helium Reduced Scale Model’: Principle, Limitations, Results And Future”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, in press (2007).
9. Carvel, R.O., Beard, A.N., Jowitt, P.W., “The Influence Of Longitudinal Ventilation Systems On Fires İn Tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16: 3-21 (2001).
10. Roh, J.S., Yang, S.S., Ryou, H.S., Yoon, M.O., Jeong, Y.T., “An Experimental Study On The Effect Of Ventilation Velocity On Burning Rate In Tunnel Fires-Heptane Pool Fire Case”, *Building and Environment*, in press (2008).
11. Hu, L.H., Huo, R., Wang, H.B., Li, Y.Z., Yang, R.X., “Experimental Studies On Fire-Induced Buoyant Smoke Temperature Distribution Along Tunnel Ceiling”, *Builging and Environment*, 42 (11): 3095-3915 (2007).

12. Murakami, S., Kato, S., Yoshie, R., "Measurement of turbulence statistics in a model fire room by LDV", *ASHRAE Transactions*, BIBINF USA, 101/2: 287-301 (1995).
13. Kurioka, H., Oka, Y., Satoh, H., Sugawa, O., "Fire Properties In Near Field Of Square Fire Source With Longitudinal Ventilation In Tunnels", *Fire Safety Journal*, 38: 319-340 (2003).
14. Hu, L.H., Huo, R., Peng, W., Chow, W.K., Yang, R.X., "On The Maximum Smoke Temperature Under The Ceiling in Tunnel Fires", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21: 650-655 (2006).
15. Lee, S.R., Ryou, H.S., "A Numerical Study On Smoke Movement In Longitudinal Ventilation Tunnel Fires For Different Aspect Ratio", *Building and Environment*, 41: 719-725 (2006).
16. Wang, H.Y., Joulain, P., "Numerical Simulation of Wind-Aided Flame Propagation Over Horizontal Surface of Liquid Fuel in a Model Tunnel", *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*, 20: 541-550 (2007).
17. Rie, D.H., Myung, M.W., Kim, S.J., Yoon, S.W., Ko, J.W., Kim, H.Y., "A Study Of Optimal Vent Mode For The Smoke Control Of Subway Station Fire", *Tunnelling and Underground Space Technology, Safety in the Underground Space*, 21 (3-4): 300-301 (2006).
18. Musluoğlu, E., "Simulation of a Fire Incidence In Underground Transportation Systems", MSc Thesis, *METU Institute of Natural Science and Technology*, Ankara, 10-55 (2003).
19. Kashef, A., Loughheed, G.D., Bénichou, N., Debs, A., "Investigation Of Emergency Ventilation Strategies Effectiveness In The Event Of Fires In Road Tunnels", *ASHRAE Transactions*, 11: 1-14 (2005).
20. Hu, L.H., Peng, W., Huo, R., "Critical Wind Velocity For Arresting Upwind Gas And Smoke Dispersion Induced By Near-Wall Fire In A Road Tunnel", *Journal of Hazardous Materials*, 150: 68-75 (2007).
21. Eralp, O.C., Düzce, A., "Simulation Of Ventilation In The Stations Of Underground Transportation Systems", *Turkish Society of HVAC & Sanitary Engineers VI. International HVAC – R Technology Symposium*, İstanbul, Türkiye, 527-534 (2004).
22. Li, J.S.M., Chow, W.K., "Numerical Studies On Performance Evaluation Of Tunnel Ventilation Safety Systems", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18: 435-452 (2003).

23. Park, W.H., Kim, D.H., Chang, H.C., “Numerical Prediction Of Smoke Movement In A Subway Station Under Ventilation”, *Tunnelling and Underground Space Technology, Safety in the Underground Space*, 21 (3-4): 304 (2006).
24. Katz, C., “Challenges Of Fire Design; View From A Civil Engineer”, *NAFEMS World Congress 2005*, Budapest-Hungary, 122-133 (2005).
25. Rhodes, N., “Review Of Tunnel Fire And Smoke Simulations”, *Conference proceedings*, Liverpool, Cockram I.Ed.,UK, 471-486 (1994).
26. Chow, W.K., “Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model”, *Tunneling and Underground Space Technology*, 11 (2): 221-236 (1996).
27. Chow, W.K., “Application Of Computational Fluid Dynamics In Building Services Engineering”, *Building and Environment*, 31 (5): 425-436 (1996).
28. Hwang, C.C., Edwards J.C., “The Critical Ventilation Velocity in Tunnel Fires – A Computer Simulation”, *Fire Safety Journal*, 40: 213-244 (2005).
29. İnternet : National Center for Research on Earthquake Engineering, Lin, C.J., Chuah, Y.K., “Smoke Management Design and Computer Simulation of an Underground Mass Transit Station In Taiwan”, <http://www.ncree.gov.tw>, <http://www.ncree.org.tw/2004tcworkshop/pdf/14.pdf> (2006).
30. Abanto, J., Reggio, M., Barrero, D., Petro, E., “Prediction Of Fire And Smoke Propagation In An Underwater Tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22: 90-95 (2006).
31. Bari, S., Naser, J., “Simulation Of Smoke From Aburning Vehicle And Pollution Levels Caused By Traffic Jam In A Road Tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20: 281-290 (2005).
32. Xue, H., Ho, J.C., Cheng, Y.M., “Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation”, *Fire Safety Journal*, 36: 37-54 (2001).
33. Aradağ, S., “Underground Transportation System Ventilation By Train Piston Effect”, MSc Thesis, *METU Institute of Natural Science and Technology*, Ankara, 1-120 (2002).
34. İnternet : Ankara Büyükşehir Belediyesi “Ankara Raylı Sistem Hizmetleri”, http://www.ego.gov.tr/uprs/ankaray_2.htm
http://www.ego.gov.tr/uprs/ankaray_3.htm
http://www.ego.gov.tr/uprs/ankaray_4.htm (2006).
35. İnternet : University of Louisville “Public Safety: Fire Safety inspections”, http://louisville.edu/admin/dps/emergency/fire_inspections.htm (2007).

36. Internet : U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board “Safety Bulletin: Hazards of Nitrogen Asphyxiation”, www.csb.gov/safety_publications/docs/SB-Nitrogen-6-11-03.pdf (2007).
37. Fluent 6.1 User’s Guide, **Fluent® INC.**, California, 7.1-7.30, 12.1-18.3 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BERBEROĞLU, M. İlter
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.07.1981 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 363 81 99
 e-mail : milterx@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Makina Müh.	2008
Lisans	İTÜ /Uçak Mühendisliği Bölümü	2003
Lise	Kurtuluş Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004	SG Hava K./İzmir	Kalite Kontrol
2005	AFG-Gencay Tuna/Ankara	Tasarım ve İmalat
2007	Ece Galvaniz/Ankara	İmalat Srm.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

1. Hacıyev, Ç., Berberoğlu, M.I., GPS Verileri İle Uçağın Konum Ve Hızının İki Aşamalı Tahmin Algoritması”, *Kayseri 5. Havacılık Sempozyumu*, Kayseri,166-170 (2004).

2. Hacıyev, Ch., Berberoglu, M.I., “Two-Level Processing of GNSS Measurements for Estimation of Motion Parameters”, *RAST 2005*, İstanbul, 39-45 (2005).
3. Hacıyev, Ch., Berberoglu, M.I., “EKF Based User’s Position Estimation Using GNSS Measurements”, *AIAC 2005*, Ankara, 44 (2005).
4. Karaaslan, S., Berberoglu, M.I., Dinler, N., Yucel, N., “Experimental Fire Analysis in a Scaled Subway Station”, *ASME 2008 Heat Transfer Summer Conference*, Jacksonville. FL. USA, (accepted 2008).
5. Karaaslan, S. Berberoğlu, M.İ., Dinler, N., Yücel, N., “Ricardo Motorunda Silindir İçi Anlık Emisyon Oluşumlarının Deneysel Olarak İncelenmesi”, *OTEKON-4.Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, Türkiye, (accepted 2008).

Hobiler

Bisiklet sürmek, doğa yürüyüşü, maket ve model yapmak