

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GAZ TÜRBİNLERİNDE YANMA KARARSIZLIĞININ**  
**İNCELENMESİ VE KONTROL ALTINA ALINMASI**

**ENDER ŞAŞMAZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2015**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GAZ TÜRBİNLERİNDE YANMA**  
**KARARSIZLIĞININ İNCELENMESİ VE**  
**KONTROL ALTINA ALINMASI**

**ENDER ŞAŞMAZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**YRD. DOÇ. DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ**

**GEBZE**  
**2015**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**COMBUSTION INSTABILITIES IN GAS  
TURBINES AND CONTROL**

**ENDER ŞAŞMAZ**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF**  
**MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR  
ASSIST. PROF. DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

**GEBZE**  
**2015**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/06/2015 tarih ve 2015/41 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ender ŞAŞMAZ'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Doç. Dr. Ali ŞAHİN

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

**İMZA/MÜHÜR**

## ÖZET

Bu çalışmada, gaz türbinleri yanma odalarında meydana gelen yanma kararsızlıkları incelenmiş ve kontrol altına alınma yöntemleri ele alınmıştır. Yüksek maliyetli hasarlara yol açan bu etken, yanma odasında açığa çıkan ısı ile basınç dalgalanmalarının kritik frekanslarda karşılaşmasıyla tetiklenmektedir. Yakıt cinsi, hava sıcaklığı ve yakıt-hava karışım oranı gibi faktörlerin yanma rejimini değiştirdiği gözlenmiştir. Gaz türbinlerinde, yanma odası geometrisi, yakıcı tipi tasarımlarındaki iyileştirme ve eklentiler daha istikrarlı bir yanmaya katkı sağlamaktadır. Sayısal simülasyonlarla Alstom firmasına ait endüstriyel yakıcıdan elde edilen deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar LES ve TFLES metotları kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali'nde bulunan Siemens V94.3 SGT5 4000F gaz türbinleri işletme koşullarında gözlenerek yanmadaki dengesizliklerin oluşumu, sisteme etkileri ve minimize edilme yöntemleri kaydedilmiştir. Helmholtz rezonatörü ilave edilmiş dairesel yanma odası modellenerek ön karışimsız yanma simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. SGT5 4000F modelinde yanma istikrarı ARGUS sistemi ile otomatik olarak sağlanmaktadır. Yanma odası çeperine monte edilmiş piezoelektrik sensörün algıladığı titreşim verileri anında ARGUS sisteminde işlenerek değerlendirilmektedir. Türbine giren yakıt ve hava debileri düzenlenerek yanma odası salınım frekansları kritik değerlerden uzak tutulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler: Gaz Türbini (GT), Akustik Rezonans, Isı yayılımı, Basınç Dalgalanmaları, Yanma Gürültüsü.**

## SUMMARY

In this work, combustion instabilities in gas turbine combustion chambers are investigated and the methods of controlling them are examined. The effect, which causes high cost damages on the system, is triggered when the frequencies of heat release and pressure oscillations in the combustion chamber coincide at critical values. Combustion regime changes are observed as the factors such as fuel type, air temperature and air-fuel ratio varies. Improvements in the burner design, combustion chamber geometry and the auxiliary units of gas turbines contribute to more stable combustion. In this thesis, numerical simulations and the test data of the industrial burner of Alstom Power are compared. The numerical results are obtained by LES and TFLES methods. In addition, the formation of combustion instabilities, their effect on the system and the methods of minimizing them are determined by observing two Siemens SGT5 4000F gas turbines in Ambarli Dual Fueled Combined Cycle Power Plant during their operation. A Helmholtz Resonator added annular combustion chamber is modeled, non-premixed combustion simulation is performed on it and the results are evaluated. Combustion is controlled by ARGUS System in SGT5 4000F automatically. The oscillation frequencies observed by piezoelectric sensors which were mounted on the combustion chamber wall are transmitted and evaluated by ARGUS control system in real time, thereby the fuel and air flow rates are regulated to assure safe operation of the chamber away from the critical oscillation frequencies.

**Key Words: Gas Turbine (GT), Acoustic Resonance, Heat Release, Pressure Oscillations, Combustion Noise.**

## TEŞEKKÜR

Başta, y¼ksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiğbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu ęalıŐmanın oluŐmasının yolunu açan danıŐmanım Yrd. Doç. Dr. Salih Özen ÜNVERDİ'ye,

B¼t¼n ęalıŐmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecr¼belerini benimle paylaŐan değerli arkadaŐım Yakup ALKAN'a,

Ve g¼stermiŐ olduğu desteklerinden dolayı sevgili eŐim M¼nevver ŞAŞMAZ'a en iğten teŐekk¼rlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. YANMA KARARSIZLIKLARI	5
2.1. Yalın Ön-Karışımli Gaz Türbinleri Yakıcılarındaki Yanma Kararsızlık Mekanizması	6
2.1.1. Yanma Kararsızlıkları Mekanizması	6
2.1.2. Yakıt-Hava Oranındaki Dalgalanmaların LP Yakıcı Sistemlerine Etkisi	7
2.1.3. Yakıt-Hava Oranı Değişimleri Oluşumu	7
2.1.4. Kararsızlık Koşulları	9
2.1.4.1. Alev Hızı Dalgalanmaları	11
2.1.4.2. Alev Alanı Dalgalanmaları	12
2.2. Fiziksel Yaklaşım	12
2.2.1. Girdap Şeklindeki Akış	12
2.2.1.1. Giriş	12
2.2.1.2. Temel Fikir	13
2.2.2. Ön-Karışımli Alevler	16
2.2.2.1. Kimyasal Reaksiyonlar ve Stokiyometri	16
2.2.2.2. Kimyasal Kinetik	17
2.2.2.3. Laminer Ön-Karışımli Alevler	18
2.2.2.4. Türbülanslı Ön-Karışımli Alevler	19
2.2.3. Ön-Karışımli Alevler	21



2.2.4. Gaz Türbinlerinde Yanma	22
2.2.4.1. Gaz Türbinlerinde Girdap Şeklinde Akış Oluşumu	22
2.2.4.2. Yanma Odalarındaki Alev Girdapları	23
2.2.4.3. Gaz Türbinlerinde Ön-Karışımli Yanma	24
2.3. Sayısal Yaklaşım	25
2.3.1. Tepkimeye Giren Türbülanslı Akışların Sayısal Simülasyonu	25
2.3.1.1. Tepkimeli Akışlar İçin Navier-Stokes Denklemleri	25
2.3.1.2. Hesaplamalı Yaklaşımlar	26
2.3.2. Ön-Karışımli Yanma İçin LES	28
2.3.2.1. Filtrelenmiş Denge Denklemleri	28
2.3.2.2. Çözümlememiş Akış Modelleme	29
2.3.2.3. Tepkime Oranı	29
2.3.3. Sıkıştırılabilir Akış Çözümleyicisi	33
2.3.3.1. Genel Özellikler	33
2.3.3.2. Sayısal Yaklaşım	33
2.4. Sayısal Uygulamalar	34
2.4.1. Tek Boyutlu Alev Hesaplamaları	34
2.4.1.1. Genel Tanım	34
2.4.1.2. Sayısal Alev Hesaplamaları	35
2.4.1.3. Sonuçlar	35
2.4.1.4. Siemens SGT5 4000F Gaz Türbini Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması	36
2.4.1.5. Yorumlar	43
2.4.2. Tepkimeli Akış	45
2.4.3. Tepkimesiz Akış	47
2.4.3.1. İki Boyutlu Akış	47
2.4.3.2. Üç Boyutlu Akış	48
2.4.3.3. Yorumlar	49
3. DAİRESEL YANMA ODALARINDA ÖN KARIŞIMSIZ YANMADAKİ HIZ PROFİLLERİNİN SİMÜLASYONU ve SİSTEME HELMHOLTZ REZONATÖRÜ İLAVE EDİLDİĞİ DURUMDAKİ HIZ PROFİLLERİNİN GÖSTERİLMESİ	50
3.1. Katı Modelin Oluşturulması	50

3.2. Katı Modelin ANSYS'e Transferi	53
3.3. Sınır Koşulları	55
3.4. Simülasyon Sonuçları	57
4. YANMA KARARSIZLIKLARININ KONTROL ALTINA ALINMASI	62
4.1. Kararsızlık Kontrolü Yaklaşımları	62
4.2. Aerodinamik Etkileri Minimize Etme Çalışmaları	64
4.2.1. Yakıt Kademelenmesi	64
4.2.2. Yakıt Hava Karışımı Oranı Dalgalanmasının Sönümlenmesi	66
4.2.3. Akustik Rezonatör	68
4.2.3.1. Helmholtz Rezonatörü	69
4.2.4. Aerodinamik Sönümlenme Araçları	71
4.3. Siemens Gaz Türbinleri Termoakustik Tasarım Araçları ve Kontrolü	72
4.4. Çözüm Yöntemleri	74
4.4.1. Bir Boyutlu Akustik Analizler	74
4.4.2. Üç Boyutlu Akustik Analizler	76
4.4.3. Alev Tepkisi	78
4.4.4. Tam Kararlılık Analizleri	79
5. AMBARLI ÇİFT YAKITLI DOĞALGAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALİ BÜNYESİNDEKİ SIEMENS SGT5 4000F GAZ TÜRBİNİ, İŞLETMEDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR ve ÇÖZÜMLERİ	84
5.1. Yanma Kararlılığı Kontrolü İçin İteratif Pilot Gaz Debisi Değişikliği	85
5.2. Yanma Odası İvmelenmesi	86
5.3. Yanma Odası Gürültüsü (Uğultusu)	86
5.4. Ambarlı Fuel Oil Santrali Rehabilitasyonu Projesi Kapsamında Devreye Alma Çalışmalarında Karşılaşılan Yanma Kararsızlığı Problemi	86
5.5. T3000 ve ARGUS Sistemlerine Ait Grafikler	86
6. SONUÇLAR ve YORUMLAR	91
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	95
EKLER	96

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler ve</u></b>	<b><u>Açıklamalar</u></b>
<b><u>Kısaltmalar</u></b>	
B	: Arrhenius Kanununda Eksponansiyel Önü Sabit
$c_0$	: Ses Hızı
$C_s$	: Model Sabiti
$E_a$	: Aktivasyon Enerjisi
g	: Yerçekimi İvmesi
k	: Tepkime Hız Çarpanı
R	: Evrensel Gaz Sabiti
S	: Boyutsuz Girdap Akış Sayısı
$\nu_t$	: Türbülans Viskozitesi
$\phi$	: Eşdeğerlik Oranı
AVBP	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kodu
CEMS	: Continuous Emission Metering System
CRZ	: Corner Recirculation Zone
CTRZ	: Central Toroidal Recirculation Zone
DFD	: Düşük Frekans Dinamikleri
DLE	: Kuru-Düşük Emisyonlu Yakıcı Sistemi
DNS	: Direct Numerical Simulation
GRI	: Gas Reseach Institute
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
HRSG	: Healts Recovery Steam Generator
ICC	: Integrated Complex Chemistry
IGV	: Inlet Guide Vanes
LES	: Large-Eddy Simulation
LP	: Lean Premixed
OFD	: Orta Frekans Dinamikleri
PVC	: Precessing Vortex Core
RANS	: Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations
SGS	: Subgrid-Scale Model

TFLES : Thickened Flame Large-Eddy Simulation  
YFD : Yüksek Frekans Dinamikleri  
YHO : Yakıt Hava Oranı

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1: Gaz türbini temel kısımları.	1
1.2: Yanma kararsızlığının olabilmesi için gerekli şartlar.	2
2.1: Tipik LP yakıcı şeması.	6
2.2: Yakıcı kararsızlıklarından sorumlu olan geribesleme çevrimi şeması.	7
2.3: Reaksiyon oranı ve eşdeğerlik oranı değişimi.	8
2.4: Yanma kararsızlığından sorumlu bozucu etkenlerin evrimi.	9
2.5: Girdap şeklinde akış sağlayan helezon tip yakıcı.	13
2.6: Akış yönünün gösterildiği silindirik koordinat sistemi ve akışta rol alan başlıca kuvvetler.	13
2.7: Radyal basınç gradyenti sonuçları için tasarlanan sonsuz küçük akışkan parçası.	14
2.8: Yanma odasında ani genişleyen düşük girdap sayılı akış.	15
2.9: Yanma odası çıkışında ani genişleyen yüksek girdap sayılı akış.	15
2.10: PVC akabinde oluşan kırılma.	16
2.11: PVC'nin önden görünümü.	16
2.12: Laminer düz alevin şematik açıklaması.	19
2.13: Türbülanslı alev sonucu oluşan ince kıvrımlı alev.	20
2.14: Türbülanslı alev sonucu oluşan kalın kıvrımlı alev.	20
2.15: Türbülanslı alev sonucu oluşan kalın alev.	21
2.16: Ön-karışimsız bir boyutlu laminer alevin yapısı.	22
2.17: Silindirik yakıcı çıkışı.	23
2.18: Sirkülasyon bölgesi ile alev kararlılığının sağlanması.	24
2.19: Pilot yakıt – NO <sub>x</sub> grafiği.	24
2.20: Bir alev kuyruğundaki, DNS ,RANS veya LES ile hesaplanmış yerel sıcaklığın zamanla değişimi.	27
2.21: Ön-karışımli alev kalınlığı $\delta_1^0$ ile LES ağ uzunluğu $\Delta x$ arasındaki karşılaştırma.	30
2.22: Alev cephesi ve G-alanı.	30
2.23: Kalınlaştırılmış alev yaklaşımı.	31

2.24:	Alev türbülans etkileşimlerinin DNS'i.	32
2.25:	Yakıt kütle oranı değişimi ve tek boyutlu laminer alevin tepkime hızı ve sıcaklığı.	34
2.26:	HP FLAME programı ile adyabatik alev sıcaklığının hesaplanması.	42
2.27:	Adyabatik alev sıcaklığının üretilen güç ile değişimi.	42
2.28:	AVBP ve indirgenmiş kimyasal kinetik ile hesaplanan 686 K ve 101kPa'daki farklı yakıt eşdeğerlik oranlarındaki laminer metan alevinin bir boyutlu alev hızı ve adyabatik alev sıcaklığı.	43
2.29:	Basitleştirilmiş kimya ve AVBP ile 686K ve 101kPa'da hesaplanan $\phi = 0.43$ 'teki tek boyutlu sıcaklık, yakıt tepkime hızı, yakıt kütle oranı, oksijen kütle oranı ve yoğunluk değişimi.	44
2.30:	İndirgenmiş kimyasal kinetik ve AVBP ile 686K ve 101kPa'da hesaplanan $\phi = 0.43$ 'teki bir boyutlu sıcaklık, yakıt tepkime hızı, yakıt kütle oranı, oksijen kütle oranı ve yoğunluk değişimi. Kalınlaştırılmış alev (F=10) ve kalınlaştırılmamış alevin ( F=1 ) karşılaştırılması.	45
2.31:	Ortalama, maksimum ve minimum basınçların zamanla değişimi.	47
2.32:	Eksenel hız çeşitli eksenel noktalarda kırılmaya uğrar.	48
2.33:	Basınç, hız ve kütle korunumunun üç boyutlu tepkimesiz hesaplamada zamanla değişimleri.	49
3.1:	Yüksek sıcaklığa dayanıklı yanma odası yüzey seramiği yaklaşık ölçüleri.	50
3.2:	Yanma odası ana krokisi için kullanılan şablon.	51
3.3:	Döndürme tekniği için girilen parametreler.	51
3.4:	SolidWorks'te oluşturulan yanma odası katı modeli.	52
3.5:	Yakıcı görünümü.	52
3.6:	Rezonatör katı modeli.	53
3.7:	ANSYS'te akışkan olarak tanımlanan bölge.	53
3.8:	Yanma alanı ağ yapısı.	54
3.9:	Rezonatör monte edilmiş yanma odası ağ yapısı.	54
3.10:	Gaz türbini P-T-V (basınç – sıcaklık – hız) profili.	55
3.11:	Akış giriş, çıkış bölgeleri ve ıslak çap.	56

3.12:	Sistem ekseninden geçen bir düzlemsel kesitte sıcaklık dağılımı.	57
3.13:	Sıcaklık dağılımının 3 boyutlu görünümü.	58
3.14:	Sistem ekseninden geçen bir düzlemsel kesitte yoğunluk dağılımı.	58
3.15:	Hız vektörlerinin üç boyutlu görünümü.	59
3.16:	Yakıcı çıkışındaki döner akışta hız vektörleri.	59
3.17:	Rezonatör monte edildiğindeki hız vektörleri.	60
3.18:	Rezonatörün boyutları.	61
4.1:	Yanma kararsızlığını sürdüren mekanizma ve kararsızlığın bastırılması.	65
4.2:	Eksenel 3 kademeli yakıcı (Power Generation Handbook).	65
4.3:	Değerlendirilen ön-karıştırıcı konseptlerinin şematik çizimleri.	66
4.4:	d/U değıştikçe basınç dalgalanmalarındaki pozitif artış bölgeleri.	67
4.5:	Modifiye edilmiş iki kademeli kuru-düşük emisyonlu türbin yanma sistemi kesit görüntüsü.	68
4.6:	Helmholtz Rezonatörü.	69
4.7:	Yüksek basınçlı test yakıcısından elde edilen dinamik basınç dalgalanmaları spektrumu.	73
4.8:	Siemens 1000F yakıcısına ait yakıcı girişı, eksenel ve çapraz kanallar, yakıt enjeksiyon bölgeleri ve alevi temsil eden bir akustik transfer elemanları ağı ile karakterize edilen bir gaz türbini yakıcısı.	76
4.9:	Gaz türbini yakıcı dizaynı için sonlu eleman akustik modelleri.	77
4.10:	Sonlu eleman akustik analizleri için tipik hesaplama bölgesi.	78
4.11:	Dairesel yanma odasının geometrisi.	80
4.12:	Dairesel test donanımını gösteren akustik transfer matrisi ağı.	81
5.1:	Pilot alev ile yanma kararlılığı kontrolü.	84
5.2:	T3000 kontrol sistemi yazılımında türbin çıkış sıcaklığına göre pilot gaz debisi girdi sayfası.	85
5.3:	Yanma odası ivmelenmelerinin zararsız boyutta olduğu işletme anına ait grafik.	87
5.4:	Yanma odası ivmelenmelerinin yüksek seviyede oluşu ve korumaların devreye girerek aktif gücü düşürmesi.	87
5.5:	ARGUS sistemi, ivme ve frekans verileri.	88
5.6:	Piezoelektrik ivmeölçer.	88

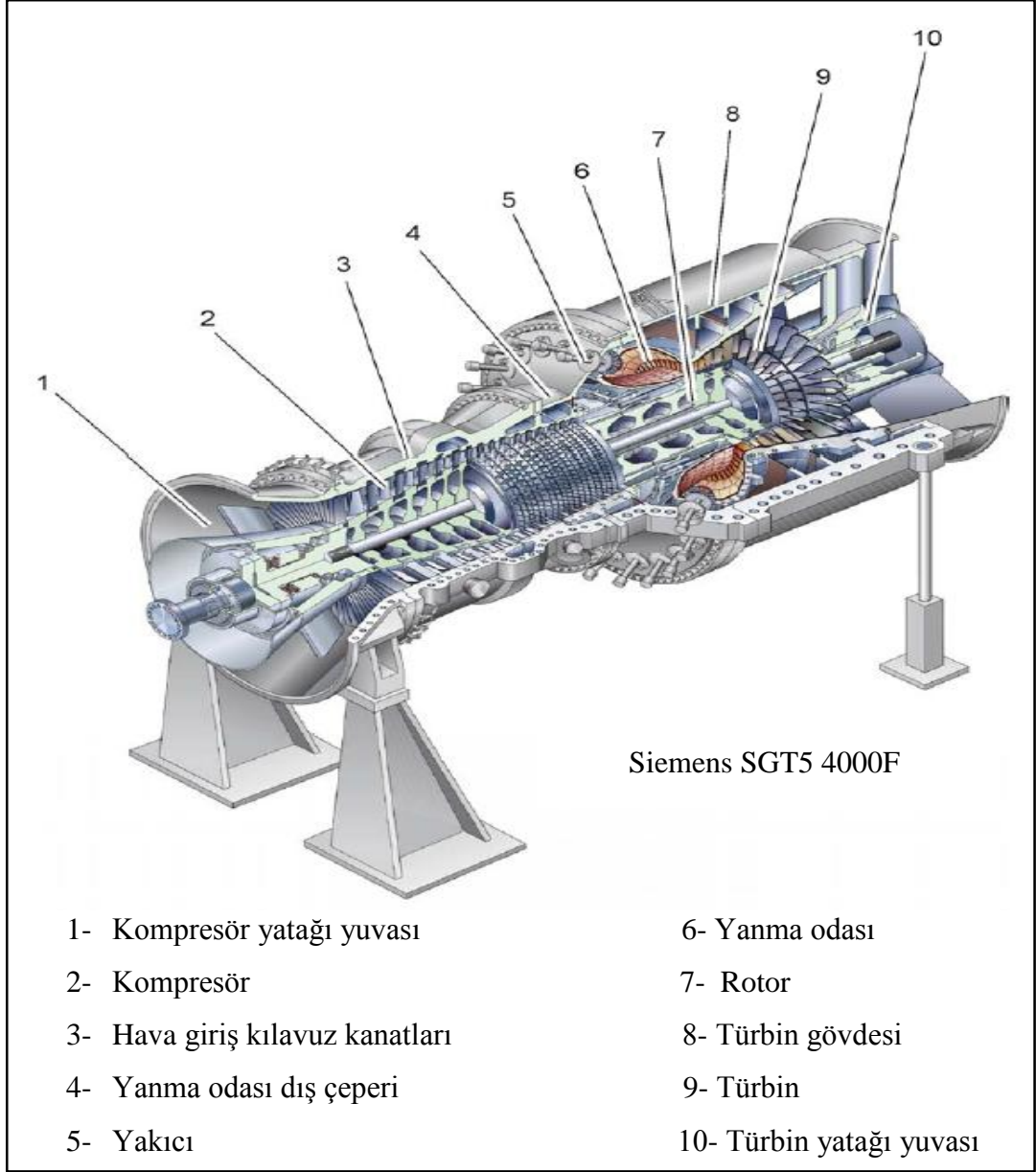
5.7:	Yanma ile oluşan ivmelenmeyi ve gürültüyü basınç cinsinden gösteren grafikler.	89
5.8:	Yanma ivmelenmesi seviyelerini gösteren mantık şeması.	89
5.9:	Doğalgaz ve fuel oil yakıtlı yanma durumunda meydana gelen yanma ivmelenmelerine karşı türbin koruma sistemi şeması.	90



# TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: DNS, RANS ve LES yaklaşımlarının karşılaştırılması.	26
2.2: Kromotograf cihazından alınan doğalgaz bileşenleri % molar derişimleri.	36
2.3: Yanma ürünleri % molar derişimleri.	37
2.4: Bileşenlerin 925 K noktasındaki özgül ısıları.	39
2.5: Bileşenlerin 333 K noktasındaki özgül ısıları.	39
2.6: Bileşenlerin 633 K noktasındaki özgül ısıları.	40
2.7: Doğalgaz bileşenleri ve yanma ürünleri oluşum entalpileri ve özgül ısıları.	40
2.8: GRI-Mech ve AVBP ile kalınlaştırılmamış alev $F=1$ ve kalınlaştırılmış alev $F=10$ için bir boyutlu adyabatik alev hızı ve alev kalınlığı.	44
3.1: Türbin tam yükteyken alınan değerler.	56
4.1: Siemens gaz türbinleri yanma sistemleri dizaynında uygulanan çözüm yöntemleri.	75
4.2: Dairesel yakıcı donanımı için bulunan kompleks öz frekanslar.	82
4.3: Gaz türbini yanma sistemlerinin güvenli çalışma aralığını genişletmek için kullanılan tasarım seçenekleri.	82

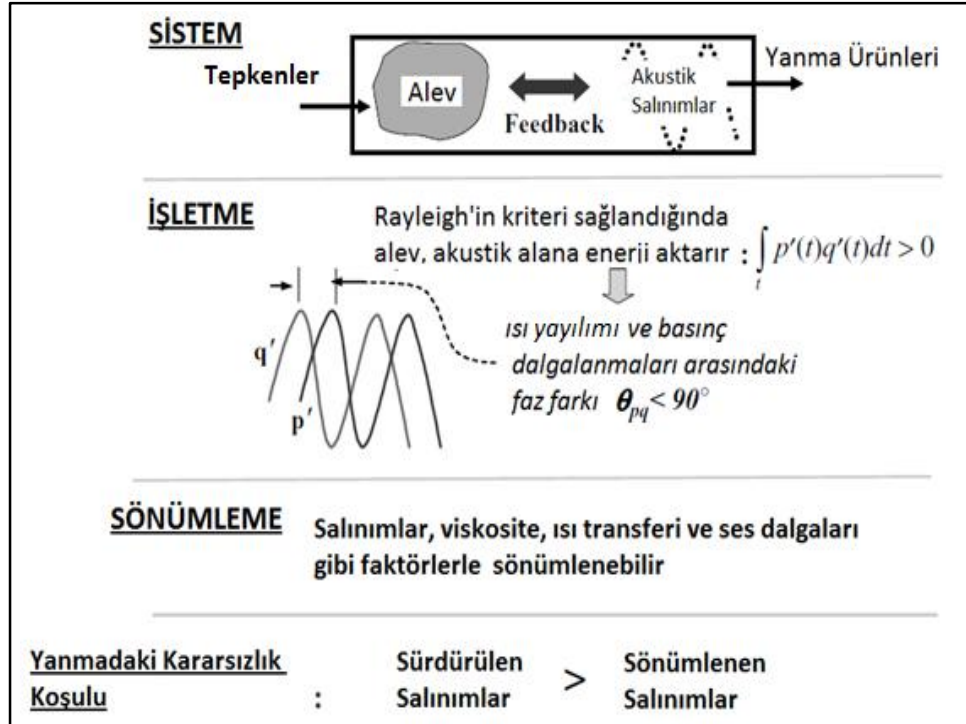
# 1. GİRİŞ



Şekil 1.1: Gaz türbini temel kısımları.

Yanmadaki kararsızlıklar, yakıcıların bir veya daha fazla doğal akustik modlarının yüksek genlikli salınımları tarafından karakterize edilir. Roketlerde, jet motorlarında, ağır hizmet gaz türbinlerinde ve endüstriyel fırınlarda bu duruma rastlanmaktadır. Şekil 1.2, yanma istikrarsızlıklarının kendiliğinden nasıl meydana geldiğini özetlemektedir. Sol tarafta, istikrarsız bir yanma olan sisteme giren tepkenler, sağ tarafta ise yanma ürünleri gösterilmektedir. Yakıcı akustik modlarından biri ile ısı yayılımı dalgalanmaları arasındaki etkileşim, akustik moddan

enerji götürür. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi eğer Rayleigh’in integrali pozitif ise yanma prosesi akustik salınımların enerjisini azaltır. İntegral sonucunun işareti, ısı yayılımı ve basınç dalgalanmaları arasındaki faz farkına bağlıdır. Faz farkı  $90^\circ$ ’ den küçük ise integral pozitif, büyük ise integral negatif sonuç alır. T periyodu boyunca ısı yayılımı dalgalanmaları ve ses basıncı dalgalanmalarının integrali pozitif olduğu durumda kararsızlık artar. Eğer, integral negatif ise sönümlenme gerçekleşir. Diğer bir ifadeyle, kararsızlık, ısı yayılımı dalgalanmaları ile basınç dalgalanmaları aynı fazda ise artar, farklı fazda ise veya arada bir zaman gecikmesi varsa azalır. Bu da, faz kaydırma yönteminin geliştirilmesinde rol oynamıştır. Faz kaydırma yönteminde, yanma esnasında alınan geri-beslemelere göre harici bir akustik kaynaktan ses dalgaları gönderilerek bir zaman gecikmesi sağlanmaya çalışılmaktadır.



Şekil 1.2: Yanma kararsızlığının olabilmesi için gerekli şartlar.

## 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Gelişen sanayi ve teknolojiye paralel olarak, enerji ihtiyacı da gün geçtikçe artmaktadır. Çevreye olan zararlı etkilerinin azlığı sebebiyle yaygın olarak kullanılan doğalgazdan enerji elde edilmesinde gaz türbinleri önemli rol oynamaktadır. Dünyaca ünlü büyük firmaların ürettikleri gaz türbinleri %39'luk verimlere ulaşmış,

Ülkelerin elektrik ihtiyacının önemli kısmını sağlamaktadırlar. Özellikle kombine çevrim doğalgaz santralleri, atık ısının değerlendirilmesiyle birlikte %56'lara varan verimleriyle oldukça ekonomiktirler.

Enerjiye olan yüksek talep nedeniyle, santrallerin emre amadeliği hassas bir konudur. Çünkü, ihtiyaca göre her an devreye alınmak üzere hazır bekleyen santrallerin olması gerekmektedir. Buna ek olarak, Őebekenin durumuna göre, santralin primer ve sekonder frekans kontrollerine müsait olması istenir. Böylece, elektrik sistemi frekans nominal değerde tutulmuŐ olur. Ancak, bir santral, mekanik, elektrik veya tesisat kısımlarında meydana gelebilecek arızalar nedeniyle hizmet veremez duruma gelebilir. Malzeme yorulması, Şebeke darbeleri, hava Şartları, hatalı işletme, geciken bakımlar gibi faktörler arıza sebepleridir. Bunun için, tüm sistemlere ait veriler dikkatli olarak takip edilmelidir ve eğer santralde duruŐ olacaksa planlı bir duruŐ istenir. İŐte, gaz türbinlerinde görülen en ciddi problemlerden biri yanmadaki kararsızlıklardır. Yanmadaki bu olumsuz durum, titreŐimlere yol açarak türbin gövdesine, tesisata, enstrümanlara ve hatta atık ısı buhar kazanına zarar verebilmektedir. Sonuç olarak, sistem uzun sürecek bir bakım periyoduna girer ve santralin çalışma sürekliliği kesintiye uğrar.

Dolayısıyla, gaz türbinlerinde yanma dengesizlikleri iyi analiz edilmeli ve kontrol altına alınma yöntemleri geliştirilmelidir. Alev stabilitesi ve emisyonlar düŐünülerek dizayn parametreleri belirlenmelidir.<sup>1</sup>

Yanma odası ısıya dayanıklı yüzey seramikleri ve türbinin diğer elemanları ülkemizde üretilmediği için yurt dıŐından yüksek fiyatlarla satın alınarak temin edilmektedir. Eğer, yanmadaki kararsızlık kontrol altına alınıp zararsız boyutlara indirilebilirse, mevcut türbin ekipmanlarının ömrü uzar ve santralin emre amadeliğine katkıda bulunulmuŐ olur. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında iŐlenecek olan türbülanslı akış durumu, Rayleigh kriteri, tepkimeli ve tepkimeli olmayan akış gibi kavramlar, alev stabilitesini anlamada yardımcı olacaktır.

---

<sup>1</sup> Bu durumun sağlanabilmesi için modern laboratuarlarda deneyler yapılması gerekir. Ancak, bu testlerin alt yapısı oldukça maliyetlidir. ABD'de bulunan Berkeley Ulusal Laboratuvarında ve CERFACS araştırma enstitüsünde, gaz türbinlerinde yanma konu baŐlıęı altında önemli deneyler yapılmaktadır.

Bu tez kapsamında, öncelikle ikinci bölümde yer alan gaz türbinlerindeki yanma kararsızlıkları, kararsızlıkların modellenmesi ve olumsuz etkileri anlatılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre bu kararsızlıkların kontrolü hakkında temel bilgiler verilmiş ve LES metoduna dayalı sayısal sonuçlar incelenmiştir. Üçüncü bölümde, Siemens SGT5 4000F gaz türbini yanma odası modellenerek, ön karışimsız yanma simülasyonu gerçekleştirilmiş ve yanma odasına Helmholtz rezonatörü ilave edildiğindeki akış hız profilleri gösterilmiştir. Dördüncü bölümde, yanma kararsızlıklarının kontrol altına alınması detaylı olarak açıklanmıştır. Beşinci bölümde ise, Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali bünyesinde Siemens SGT5 4000F gaz türbinlerindeki yanma durumu gözlemlenerek, yanma istikrarının sağlanması için alınmış önlemler ve yanma odası izleme-analiz sistemi incelenmiştir

## 2. YANMA KARARSIZLIKLARI

Gaz türbinine ait en önemli dizayn faktörlerinden biri türbülanslı yanma durumudur. Yanma dengesi ve emisyonlar, operasyon limitlerini oldukça zorlamaktadır. Yanma prosesinin analitik tekniklerle ifadesinin karmaşık olmasına rağmen, türbülanslı yanmanın sayısal modellemesi hızla gelişen bir alana dönüşmüştür. Buna ek olarak, yanma sırasındaki kimyasal değişimler ile türbülans arasındaki etkileşim de kompleks bir görüntü oluşturur.

Dairesel yanma odalarındaki kararlılık tahmini modelleri, genellikle odanın tek boyutlu ağ görünümünü baz alır [Dowling, 1995]. Burada her bir yakıcı sadece akış oranı salınımlarından etkilenir. Bütün yakıcıların aynı transfer fonksiyonuna sahip olması beklenir. Aynı ilişki, yakıcı giriş hızı ( $u'$ ) ve toplam ısı yayılımı oranı salınımları ( $q'$ ) arasında da mevcuttur. Bu, pratikte sağlanamayabilir, özellikle sıvı yakıtlı roket motoru veya çoklu jet içeren yakıcılarda komşu alevler arasındaki etkileşim kararsızlık doğurabilir.

Dairesel bir yanma odasında ilk ve bazen ikinci açısız akustik modlar en güçlüleridir [Stow and Dowling, 2001]. Açısız modlar, durağan modlar veya dönen modlar olarak gaz türbinlerinde meydana gelir.

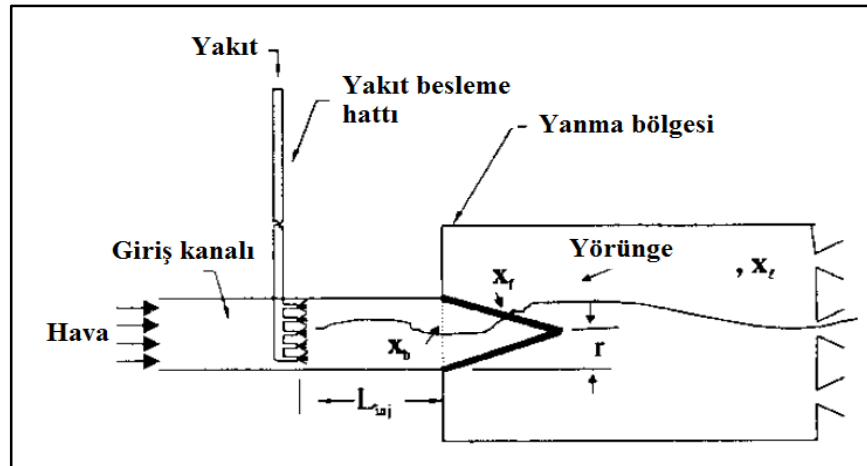
Kimyasal olaylar ve türbülans için gerekli ana denklemler tamamıyla ve kolay şekilde tanımlanabilir. Ancak, sayısal simülasyonlar hesaplama sürecini de içine alacak şekilde pahalı ve karmaşık olmaktadır. Bu da araştırılacak konulara olan yaklaşımları kısıtlamaktadır.

Endüstrideki türbülans simülasyonları için ortalama hız alanları sağlayan istatistiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Çünkü, bu yöntem basitleştirilmiş yanma modelleriyle uyumludur. Ancak, türbülanslı alevin durağan olmayan karakteri nedeniyle, istatistiksel yaklaşımlar tarafından veri olarak yakalanamaz. Değişken tip simülasyonların kullanılması, yanma işlemini simüle etmede daha tutarlıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte hızlanan bilgisayarlar direkt sayısal simülasyon ve istatistiksel metotlardan oluşan bir karma çalışmayı mümkün kılmıştır. Alev dinamiği için kullanılan bu model ve yaklaşım, alev davranışı tahmini ve yanma limitlerini simüle etmede daha güvenilir ve tutarlı olmuştur. Örneğin, alev akustik olarak çok hassastır; çünkü, alev kararlı hale veya yanma odasında dalgalar yayacak şekilde istikrarsız

duruma zorlanabilir. Akustik, çoğu zaman gaz türbini işletme limitlerini sabitleyebilir.

## 2.1. Yalın Ön-Karışım Gaz Türbinleri Yakıcılarındaki Yanma Kararsızlık Mekanizması

Emisyon ile ilgili mevzuatın çok sıkı olması nedeniyle Şekil 2.1’de gösterilen LP yakıcılara olan yönelim oldukça artmıştır. LP yanmada, alev sıcaklığı düşüktür. Buna karşın, LP yakıcılar çeşitli işletme koşullarında yanma kararsızlıklarına meyillidir. Yanma kararsızlıklarını engellemek üzere bir yaklaşım geliştirmek için, bu modların hangi koşullar altında oluştuğunu tahmin etme yeteneğine sahip olunmalıdır ve bir kontrol mekanizmasının oluşturulması gerekmektedir. Geçtiğimiz birkaç yıl içinde hem deneysel hem de teorik çalışmalar, kararsızlığı tahmin edebilen modeller ortaya çıkarmıştır.



Şekil 2.1: Tipik LP yakıcı şeması.

### 2.1.1. Yanma Kararsızlıkları Mekanizması

Yanma kararsızlıkları çalışmalarında karşılaşılan birinci zorluk, istikrarsız ısı yayılımı ile bunları üreten etkenler arasındaki ilişkiyi anlayabilmektir. Çünkü, bu ısı yayılımı dalgalanmaları, aynı ortamdaki hız, sıcaklık, basınç ve bileşenlerin kompozisyonuna bağlı olabilir. Öncelikle, kararsız ısı yayılımı, salınım yapan akustik basınç ile devam ederse, kararsız hareketlere enerji aktarılmış olur (Rayleigh

Kriteri). İkinci olarak, eklenen enerji miktarı ısı transferiyle kaybedilen enerji miktarından fazla olmalıdır.

Yanmadaki bu stabil olmayan duruma zemin hazırlayan iki önemli faktör vardır: Bunlar, yakıt-hava bileşenlerindeki ( $\phi$ ) çeşitlilik sebebiyle ısı yayılımı dalgalanmaları ve yakıcı enjektörü içindeki hız ve basınç salınımlarıdır.

### 2.1.2. Yakıt-Hava Oranındaki Dalgalanmaların LP Yakıcı Sistemlerine Etkisi

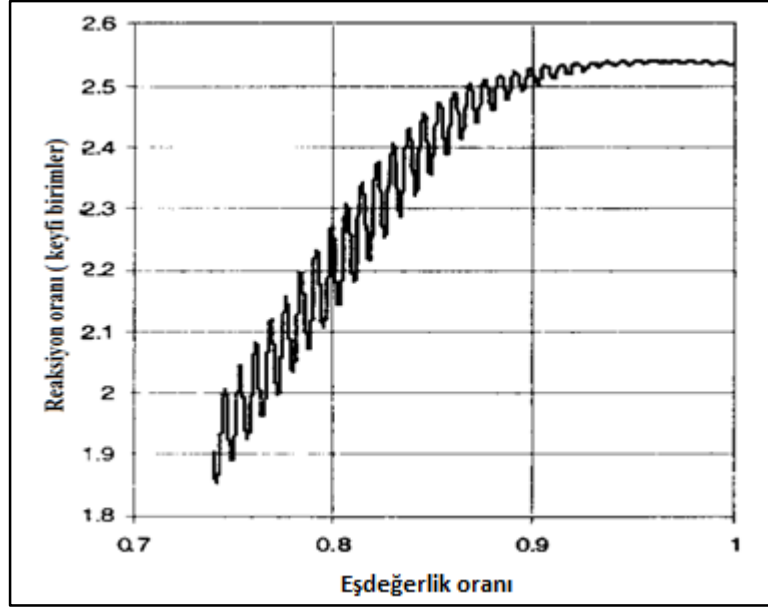
Alev kalınlığı, alev hızı ve reaksiyon oranı, yanma işlemi stokiyometrisinin yalın duruma kaymasına ve  $\phi$  çeşitliliğine zemin hazırlamaktadır. Buna ek olarak, yalın bölgeye yakın noktada işletilen sistemler,  $\phi$  değişimlerine karşı çok hassastır ve bu değişimler bazı periyodik sönmelere yol açabilir. Deneysel olarak elde edilen Şekil 2.3'e bakıldığında,  $\phi$  değişimleri sonucunda oluşan hesaplanmış reaksiyon oranı tepkisi görülmektedir. Bu sonuca göre,  $\phi$  salınımları, yalın işletme koşullarında önemli boyuttaki ısı yayılımı değişimlerini tetiklemektedir. Ayrıca, elde edilen diğer bir sonuç,  $\phi$  değişimlerinin stokiyometrik bölgeye yakın kısımlarda kararsızlık üretme olasılığının çok düşük olmasıdır. Çünkü, bu işletme koşullarında reaksiyon oranı değişimi ihmal edilebilir. Deneysel tecrübelerine göre de, stokiyometrik bölgeye yakın şartlardaki basınç salınım genlikleri zararsız derecededir.

### 2.1.3. Yakıt-Hava Oranı Değişimleri Oluşumu



Şekil 2.2: Yakıcı kararsızlıklarından sorumlu olan geribesleme çevrimi şeması.





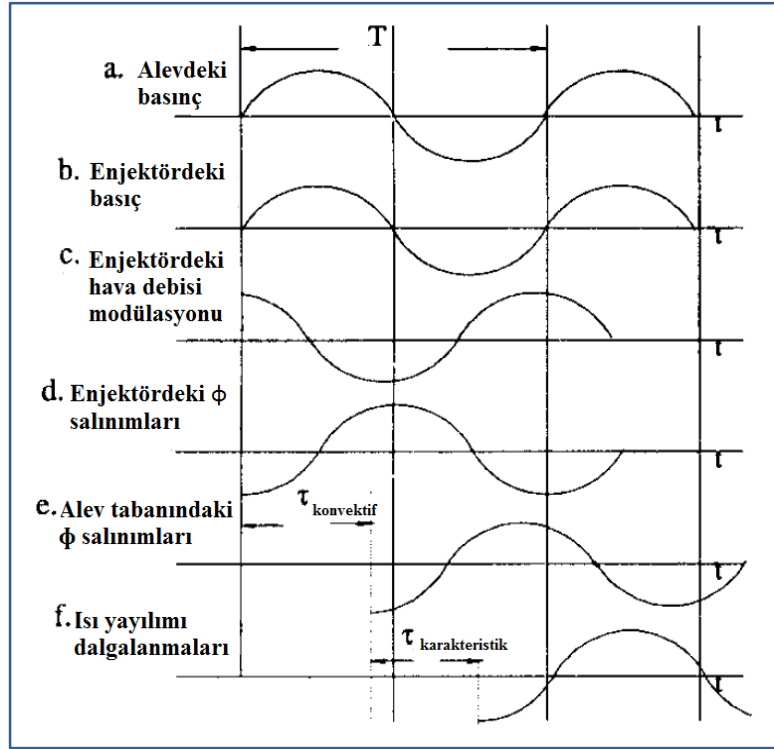
Şekil 2.3: Reaksiyon oranı ve eşdeğerlik oranı değişimi.

Türbülanslı karışım nedeniyle rastgele yakıt-hava oranı dalgalanmalarının meydana gelmesi kaçınılmazdır. Sonuç olarak,  $\phi$  değişimlerinin artış nedenini anlamak ve kararsızlığı üreten ısı yayılımı- $\phi$  dalgalanmaları arasındaki geribesleme mekanizmasını izah etmek gereklidir.  $\phi$  tanımından türetilen eşitlik (2.1), hız ve basınç karmaşasından kaynaklanan yakıcı giriş bölgesindeki  $\phi$  salınımları oluşumunu göstermektedir.

$$\frac{\phi'}{\phi} = \frac{\frac{m'_y}{m_y} - \frac{m'_o}{m_o}}{1 + \frac{m'_o}{m_o}} \quad (2.1)$$

Eşitlikteki  $y$  yakıtı,  $o$  oksitleyiciyi ve  $m$  ise kütle debisini ifade etmektedir. Bu eşitliğe göre,  $\phi'$ 'deki salınımlar yakıcı enjektöründeki hava veya yakıt akışındaki değişimler ile oluşmaktadır. Buna ek olarak, düşük Mach sayısına sahip akışlarda, küçük akustik dalgalanmalar önemli  $\phi$  salınımları üretebilir. Örneğin,  $M=0.05$  olan bir yakıcı enjektöründe ( $m'_y = 0$ ), %1 oranında ortalama akustik dalgalanma, %20 oranında  $\phi$  dalgalanması oluşturabilir ( $\frac{\phi'}{\phi} = 0.2$ ). Diğer bir yaklaşıma göre, yakıcı

girişindeki bileşenlerin kompozisyonundaki değişimler, Şekil 2.1'de gösterilen yanma odasındaki akustik salınımlara eşlik etmektedir.



Şekil 2.4: Yanma kararsızlığından sorumlu bozucu etkenlerin evrimi.

#### 2.1.4. Kararsızlık Koşulları

Yanma kararsızlığı mekanizması ve olası kontrol parametreleri, onları sürdüren çeşitli işlemlerin evrimi göz önüne alınarak daha iyi anlaşılabilir. Şekil 2.4a, T periyodunda kararsız moddaki bir alevde akustik basıncın zamana bağlı değişimini göstermektedir. Bu faktör, giriş kanalında akışa ters yönde etki gösterir ve yakıcı enjektöründe dalgalanmalar üretir. Alev ve yakıt enjektörü arasında bir basınç düğümü olmadığı sürece ve Mach sayısı düşük ise, alev ve yakıt enjektöründeki basınç bozucu etkenleri neredeyse aynı fazdadır (Şekil 2.4.b). Basınç dalgalanmalarına, hızdaki değişimler ile enjektördeki oksitleyici akış oranı değişimleri zemin sağlar. Fakat, hız salınımlarının fazı, akışa ters yöndeki sınır koşullarına bağlı olan basınca yakındır. Düşük Mach sayısına sahip akışlarda, hız ve debi oranı neredeyse aynı fazdadır (Şekil 2.4.c). Enjektör tıkalı olarak kabul edilirse ( $m'_y = 0$ ), yakıt enjektöründe oluşan tepkimeli karışımın eşdeğerlik oranındaki

salınımlar, hava akış salınımları ile aynı fazda değildir (Şekil 2.4.d). Bu da, periyodik olarak çeşitlilik gösteren bir  $\phi$  ile bir tepkimeli karışımın oluşumuna öncülük eder. Bu eşdeğerlik oranı akış ile iletilir ve bir konvektif zaman sonra alev tabanına erişir (Şekil 2.4.e). Tepkimeli karışım alev tabanına ulaşır ulaşmaz hemen tüketilmez. Çünkü, yakıcıya giren akışın farklı kısımları alevin farklı yüzeylerinde tüketilir. Yani, alev bölgesinin bitimine kadar tüketilmez. Dolayısıyla, ısı yayılımı, alev tabanındaki  $\phi$  salınımlarını  $T_{karakteristik}$  ile ifade edilen bir zaman ile geciktirir. Böylece, Şekil 2.4.f'teki ısı yayılımı dalgalanmaları ile basınç dalgalanmaları (Şekil 2.4.a) aynı fazda olursa Rayleigh Kriteri sağlanmış olur.  $T_{karakteristik}$ , Putnam tarafından ortaya konulan, yanıcı karışımın sonlu bir alev bölgesinde tüketildiğini gösteren ve iletilme zamanını uzatan bir periyottur [Putnam, 1997].

$$\frac{T_{konvektif} + T_{karakteristik}}{T} = C_n = n - \frac{1}{4} \quad (n=1,2,\dots) \quad (2.2)$$

$n$  dalga boyudur. Formülasyondaki rasyonel sayılar ise daimi ses dalgalarındaki harmonikleri ifade etmektedir. Bu harmonikler yakıcı içindeki akışkanın ilerleyişi sırasındaki yer değiştirmesi ve basıncının maksimum olduğu düğümleri göstermektedir.

Aynı analizleri kullanarak, girişteki akışa ters yöndeki sınır koşulları akustik olarak rijitse veya yansıtıcı olmayan bir bölge ise aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{T_{konvektif} + T_{karakteristik}}{T} = C_n = n - \frac{3}{4} \quad (2.3)$$

$$\frac{T_{konvektif} + T_{karakteristik}}{T} = C_n = n \quad (2.4)$$

Sonuç olarak, tıkalı olmayan yakıt enjektörü için, eşdeğerlik oranındaki dalgalanmalara katkı sağlayan baskın etken, yakıt akış modülasyonudur ve yakıt akış salınımı fazı, basınç salınımı fazından  $180^\circ$  farklıdır.

$$\frac{T_{konvektif} + T_{karakteristik}}{T} = C_n = n - \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

Denklem (2.2) basınç düğümünü, denklem (2.3) hız düğümünü, denklem (2.4) yansıtıcı olmayan periyodu ve denklem (2.5) ise yakıt akış modülasyonunu ifade etmektedir.

Dolayısıyla, kararsızlık bölgeleri  $(T_{konvektif} + T_{karakteristik})/T$  'nin bir fonksiyonudur. Eşitlik (2.2) ve (2.5), kararsızlık bölgelerinin yaklaşık  $(T_{konvektif} + T_{karakteristik})/T = C_n$  olan merkezde olduğunu gösterir.  $C_n$ , yakıcı dizaynına bağlı olan bir sabittir. Sönümlenmeyen bir yakıcıda, kararsızlık bölgeleri  $C_n - \frac{1}{4} < (T_{konvektif} + T_{karakteristik})/T < C_n + \frac{1}{4}$  arasındadır. Bu band, akustik basınç ve ısı yayılımı arasındaki faz farkı  $90^\circ$  olduğundaki limitlemedir.

#### 2.1.4.1. Alev Hızı Dalgalanmaları

Laminer alevlerde bir yakıtın yandığındaki alev hızı basınç, sıcaklık ve yakıt konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. İzentropik bir yaklaşımla sıcaklığa olan bağımlılık ortadan kaldırılırsa, denklem (2.6), denklem (2.7) gibi yazılabilir.

$$p'_1 = \frac{p'_f}{c_1} \quad (2.6)$$

$$\frac{S'_f}{S_f} = \mathcal{G}_p \frac{p'_f}{p_f} + \mathcal{G}_Y \frac{Y'_{F,f}}{Y_{F,f}} \quad (2.7)$$

1 ve 2 sırasıyla akışın tersi yönü ve akış yönünü temsil etmektedir.  $p_1$  akışa tersyöndeki basınç,  $S_f$  alev hızı,  $f$  alev önü,  $c_1$  öz ısı,  $Y$  kütle oranı,  $\mathcal{G}$  alev yüzeyidir. Örnek olarak, yalın metan alevleri ( $\phi > 0.5$ ) için,  $\mathcal{G}_p$ ,  $0.4 < \mathcal{G}_p < 0.5$  aralığına düşer ve  $\mathcal{G}_Y > 1$  olur [Lieuwen and Zinn, 1999]. Yüksek Damköhler sayılarında alev hızı türbülanslı hıza bağlıdır. Türbülans alanı, akustik dalgalanmalar tarafından etkilenirse  $S'_f = 0$  olur ve dolayısıyla  $(Q'/\bar{Q})_{S_f} = 0$  eşitliği gerçekleşir. Burada Q ısı yayılımıdır.

### 2.1.4.2. Alev Alanı Dalgalanmaları

Bir alev önü, tepken tarafında  $h < 0$  , ürün tarafında  $h > 0$  ve alev önünde  $h = 0$  olacak şekilde  $h(x, t)$  fonksiyonu ile genellenebilir. Ayrıca,  $h$ ,  $U_f$  hızı ile değişim gösterir. Eğer alev önü  $x_f(\phi, \psi, t)$  ile tanımlanmak istenirse, (2.8) denklemi alev önünü belirler.  $U_f$  alev sınırındaki hız,  $\phi$  eşdeğerlik oranı,  $t$  zaman,  $x_f$  alev konum vektörüdür.

$$\frac{\partial x_f}{\partial t}(\phi, \psi, t) = U_f(x_f(\phi, \psi, t), t) \quad (2.8)$$

## 2.2. Fiziksel Yaklaşım

### 2.2.1. Girdap Şeklindeki Akış

#### 2.2.1.1. Giriş

Bu tip akış, aynı büyüklükteki eksenel ve teğetsel akış hızları tarafından karakterize edilir ve boyutsuz akış girdap sayısı  $S$  ile belirlenir:

$$S = \frac{G_\theta}{G_x R} \quad (2.9)$$

$$G_\theta = \int_0^\infty (\rho u w + \overline{\rho u' w'}) r^2 dr \quad (2.10)$$

birim zamanda eksenel yönde akan açısız momentumudur.

$$G_x = \int_0^\infty (\rho u^2 + \overline{\rho u'^2}) r dr \quad (2.11)$$

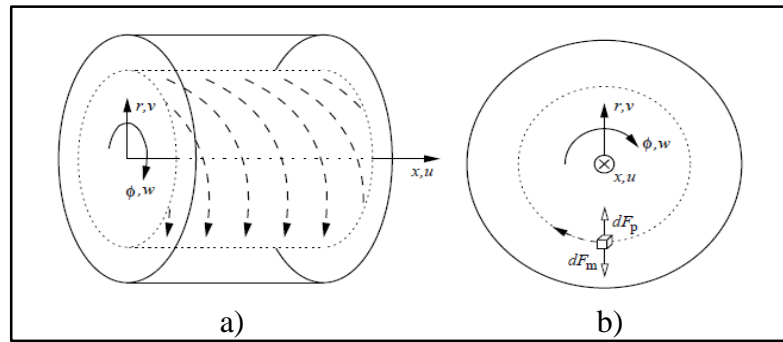
birim zamanda eksenel yönde akan eksenel momentumdur.  $R$  , yakıcının yarıçapıdır.

Yukarıda  $u$  ve  $w$  sırasıyla eksenel ve teğetsel yönlerdeki ortalama hız bileşenleri  $u'$  ve  $w'$  bu yönlerdeki çalkantı hız bileşenleridir.  $\rho$  , akışkanın özgül kütesidir.



Şekil 2.5: Girdap şeklinde akış sağlayan helezon tip yakıcı.

$v$ ,  $w$ ,  $u$  silindirik koordinat sistemindeki hız bileşenleridir (Şekil 2.6.a). Üst çubuklar zaman ortalaması alınmış değerleri göstermektedir.



Şekil 2.6: Akış yönünün gösterildiği silindirik koordinat sistemi ve akışta rol alan başlıca kuvvetler. a) İzometrik görünüm b) Kesit görünümü.

### 2.2.1.2. Temel Fikir

- Basınç Gradyenti

Merkezcil etkiler nedeniyle girdap şeklindeki akış, boru içinde pozitif basınç meydana getirir. Basınç kuvveti ve merkezcil kuvvetlerin radyal yöndeki eşitliğinden yola çıkılarak, bu eğimin tahmini mümkündür. Şekil 2.6'da sağ tarafta görülen silindirin eksenine etrafında dönen sonsuz küçük bir akışkan parçası olmak üzere, bu parça durağan kabul edilip üzerindeki kuvvetlerin toplamı sıfır olmalıdır.

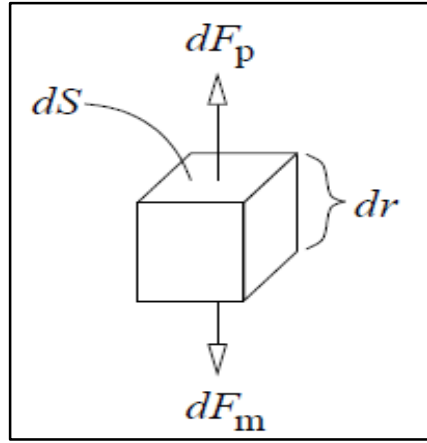
$$dF_m + dF_p = 0 \quad (2.12)$$

- $dF_m = \frac{w^2}{r} \rho dr dS$  [N] santrifüj kuvvettir.

- $dF_p = -dp dS$  [N] basınç kuvvetidir.
- $dp$  [Pa] mevcut basınç farkıdır.
- $dS, dr$  [ $m^2$ ], [m] boyutsal ölçülerdir (Şekil 2.7).

Bu eşitlikten radyal yöndeki basınç gradyenti, özgül kütle, teğetsel hız ve radyal konum cinsinden ifade edilebilir.

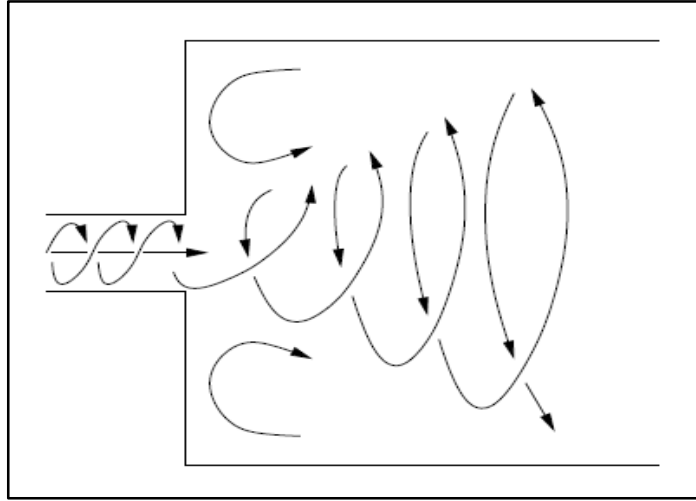
$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho w^2}{r} \quad (2.13)$$



Şekil 2.7: Radyal basınç gradyenti sonuçları için tasarlanan sonsuz küçük akışkan parçası.

- Düşük Girdap Etkileri

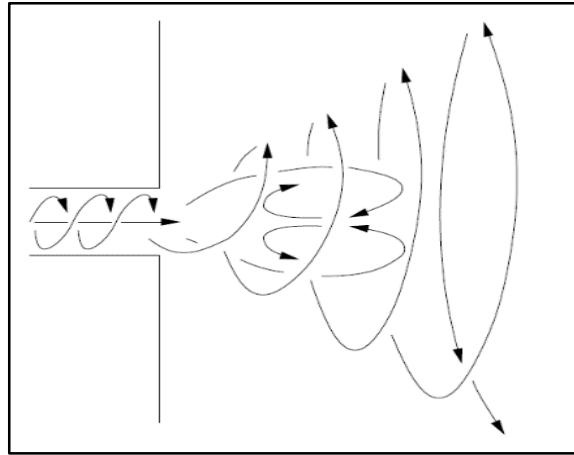
Akış, yakıcıdan çıkıp ani genişleme bölgesinden geçerken akım girdap dış yüzeyinden ayrılır. Ayrılan bu akım duvarlarla çevreli kısımda kaldığında, “Köşe sirkülasyon bölgesi” (CRZ)’ne neden olur. Santrifüj etki meydana gelir. Şekil 2.8’de görülen jetin büyümesi olayını tetikler. Jetin büyümesi, girdap şeklindeki akışı bozar. Radyal basınç eğimi ve eksenel hız küçülür.



Şekil 2.8: Yanma odasında ani genişleyen düşük girdap sayılı akış.

- Yüksek Girdap Etkileri

Radyal basınç gradyentindeki bozulma, yönü yakıcı çıkışına doğru olan negatif basınç oluşumuna sebep olur. Bu da “Merkezi Çembersel Sirkülasyon Bölgesi”(CTRZ) olgusunu meydana getirir (Şekil 2.9).

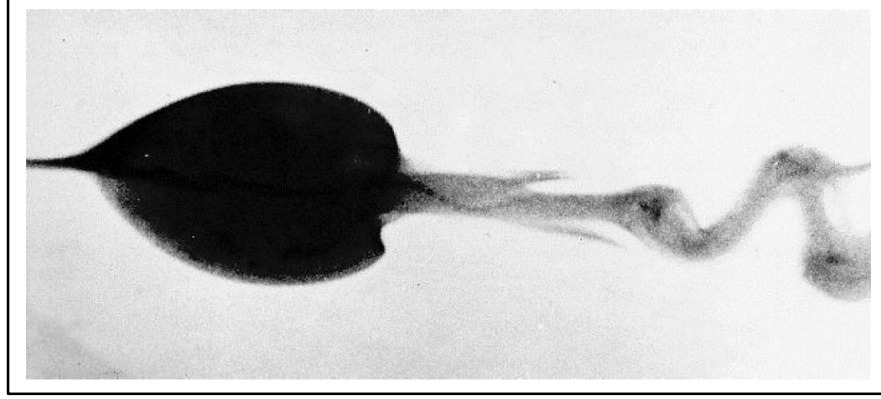


Şekil 2.9: Yanma odası çıkışında ani genişleyen yüksek girdap sayılı akış.

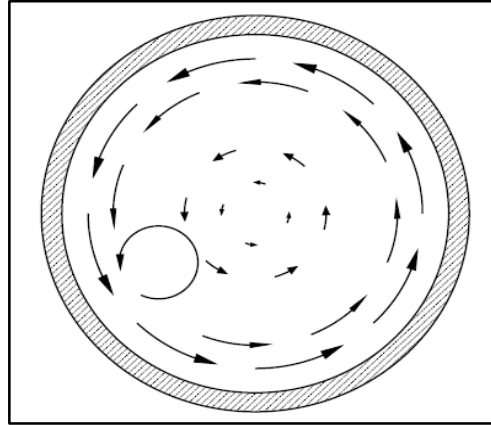
CTRZ ancak yüksek girdap sayılı akışta oluşur ( $S > 0.6$ ). Buna ek olarak, helezonik akış, yüksek Reynolds sayılı, yüksek girdap sayısına sahip akış sırasında oluşan, hareket halinde, üç boyutlu birçok olguyu barındırır. Olayın başlama noktası girdapların bozulma anıdır. Bozulma, akış eksenindeki küçük kabarcıklarla başlar. Bu kabarcıklar başta stabildir, fakat akıştaki kopukluklar ilerleyen kısımlarda bozucu etkiler yaratır. Meydana gelen bu ikinci kırılma birçok şekil alabilmektedir. Bunlardan biri “girdap merkezinin yakıcı eksenini etrafında yarıçapı giderek büyüyen



bir spiral halini almasıdır.(Precessing Vortex Core (PVC))” Şekil 2.10’da eksenden sapan girdap merkezi akabinde oluşan girdap bozulması görülmektedir. Şekil 2.11’de ise girdap hareketinin önden görünümü ve eksende ilerleyen girdap dizisi görülmektedir.



Şekil 2.10: Prof. Sarpkaya tarafından Naval Lisansüstü Eğitim Merkezi’nde PVC akabinde oluşan kırılmanın gösterilmesi.



Şekil 2.11: PVC’nin önden görünümü.

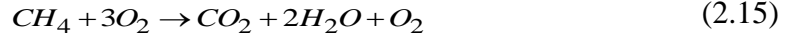
## 2.2.2. Ön-Karışım Alevler

### 2.2.2.1. Kimyasal Reaksiyonlar ve Stokiyometri

Ön karışım alevde, yakıt ve oksitleyici yanma odasına ulaşmadan önce karışmaktadır. Eğer yakıt tamamen oksitlenirse stokiyometrik karışım adını alır. Metanın yakılması incelenirse; stokiyometrik karışımın yanma denklemi:



Tepkimeye giren oksijen miktarı metanın tamamını oksitleyecek miktardan fazla ise yalın karışım gerçekleşir. Örneğin:



Tepkimeye giren oksijen miktarı metanın tamamını oksitleyecek miktardan az ise zengin karışım gerçekleşir. Örneğin:



(2.16) Yakıt eşdeğer oranı " $\phi$ ";

$$\phi = \frac{\left(\frac{Y_f}{Y_o}\right)}{\left(\frac{Y_f}{Y_o}\right)_{stokiyometrik}} \quad (2.17)$$

$Y_f$  ve  $Y_o$  yakıt ve oksitleyicinin kütle oranlarıdır. Zengin yanma durumunda  $\phi > 1$ , yalın yanma durumunda ise  $\phi < 1$  şeklindedir. Hava eşdeğer oranı ise " $\lambda$ " ile gösterilir ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\lambda = \frac{1}{\phi} \quad (2.18)$$

### 2.2.2.2. Kimyasal Kinetik

Yanma odası sistemleri uygulamalarında birçok unsur (N) birden fazla tepkimeye (M) girmektedir. Tepkime mekanizması denklem (2.19)'da gösterilmiştir.

$$\sum_{k=1}^N v'_{kj} X_k \leftrightarrow \sum_{k=1}^N v''_{kj} X_k \quad (j=1, \dots, M) \quad (2.19)$$

$$\sum_{k=1}^N v'_{kj} W_k + \sum_{k=1}^N v''_{kj} W_k = 0 \quad (j=1, \dots, M) \quad (2.20)$$

$$\sum_{k=1}^N v_{kj} W_k = 0 \quad (j=1, \dots, M) \quad (2.21)$$

$$v_{kj} = v_{kj}'' - v_{kj}' \quad (k=1, \dots, N); (j=1, \dots, M) \quad (2.22)$$

$W_k$  ; k unsurunun molar kütlesi,  $v_{kj}'$  ve  $v_{kj}''$  ; j reaksiyonunda k unsurunun molar stokiyometrik katsayısıdır. K türleri için kütle reaksiyon oranı ( $\dot{w}_k$ ) , M tane tepkime sonucu üretilen ( $\dot{w}_{kj}$ ) 'nin özeti durumundadır.

$$\dot{w}_k = \sum_{j=1}^M \dot{w}_{kj} = W_k \sum_{j=1}^M v_{kj} \psi_j \quad (2.23)$$

$$\psi_j = k_{fj} \prod_{l=1}^N [X_l]^{v_{lj}'} - k_{rj} \prod_{l=1}^N [X_l]^{v_{lj}''} \quad (2.24)$$

$\psi_j$  j. tepkimenin ilerleme hızı değişkenidir. Bu ilerleme hızı genellikle ampirik Arrhenius Kanunu ile modellenir. Değişkenin hesabında deneysel Arrhenius Kanunuyla hesaplanan ileri ve geri tepkime hızı çarpanları kullanılır:

$$k = A e^{-E_a/(RT)} \quad (\text{Arrhenius Kanunu}) \quad (2.25)$$

Burada  $k$  tepkime hızı çarpanı,  $E_a$  aktivasyon enerjisi,  $R$  evrensel gaz sabiti,  $A$  eksponansiyel önü çarpan,  $T$  mutlak sıcaklıktır.

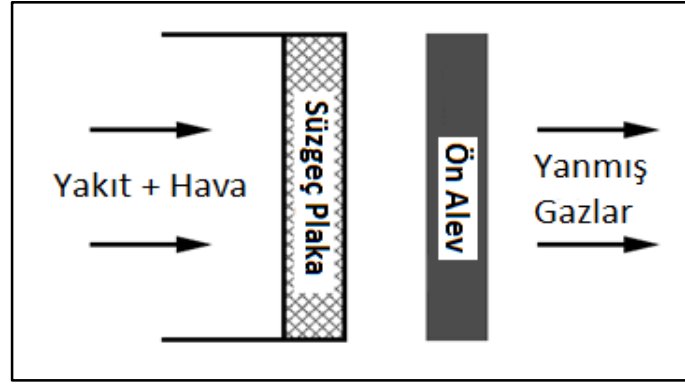
### 2.2.2.3. Laminer Ön-Karışım Alevler

Laminer düz alev Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Hava yakıt karışımı soldan gelir ve ardından gözenekli plakadan geçer. Çıkışında da laminer alev şeklinde yanar. Örnekte olduğu gibi alev hızı gazlara yakındır ve giriş hızları da benzer, ancak alev ilk pozisyonundaki gibi kalır. Bu da eşdeğer orana, giriş sıcaklığına ve basıncına bağlı olan  $S_L^0$  durağan laminer alev hızını gösterir. Laminer alev hızı aşağıdaki formülle belirlenebilir:

$$S_L^0 = \frac{\int_v \dot{w}_F dV}{S \rho_0 (Y_F^0 - Y_F^1)} \quad (2.26)$$

Buradaki 0 ve 1 indisleri yanmamış ve yanmış gazları gösterir.  $\rho_0$ , yanmamış gaz yoğunluğudur. Mutlak hız ile akış hızı arasındaki fark akışa göre göreceli ön hız olarak tanımlanır. Burada  $V$ , alevin yanmamış gazlara dönük olan yüzüne normal olan birim vektördür.  $\dot{w}_F$  ise yakıt reaksiyon oranıdır. Reaksiyon sonucu oluşan ısı enerjisi ile yükselen sıcaklık, termal alev kalınlığı kavramını tanımlar.

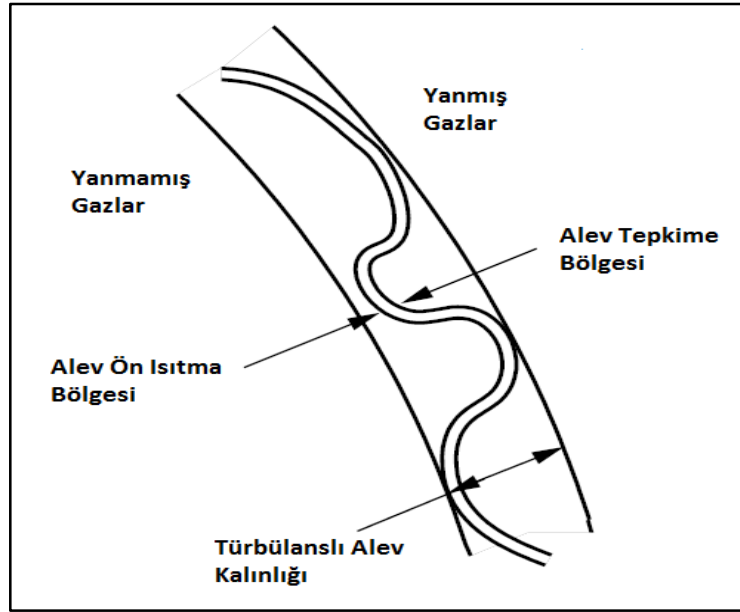
$$\delta_L^0 = \frac{T_2 - T_1}{\max\left(\left|\frac{\partial T}{\partial x}\right|\right)} \quad (2.27)$$



Şekil 2.12: Laminer düz alevin şematik açıklaması.

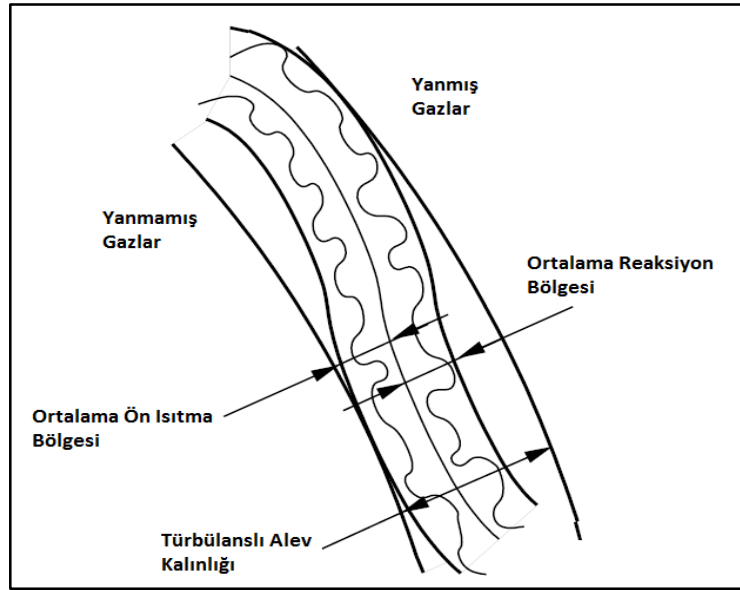
#### 2.2.2.4. Türbülanslı Ön-Karışım Alevler

Yanma odaları barındıran çoğu sistemde akış türbülanslıdır. Laminer alev Bunsen Alevi sistemindeki şartlarda oluşabilir. Bunsen Alevi mekanizması, yanmadan önce hava ve yakıtı istenen oranda ayarlayabilme kapasitesine sahiptir. Türbülans, çalkantılı girdap büyüklüğü ve şiddetine bağlı olarak alev önünde meydana gelir. Ortalama hızdaki yüksek dalgalanmalar ile daha küçük türbülanslı girdaplar alev türbülansını daha çok etkilemektedir. Şekil 2.13'de burulmuş ince alev şekli gösterilmiştir. Bu rejimde, alevin ön kısmı ince ve iç kısımdaki alev yapısı laminere yakındır. Burulma ise, türbülanslı hareket ölçeği alev kalınlığından büyük olduğunda gerçekleşmektedir.



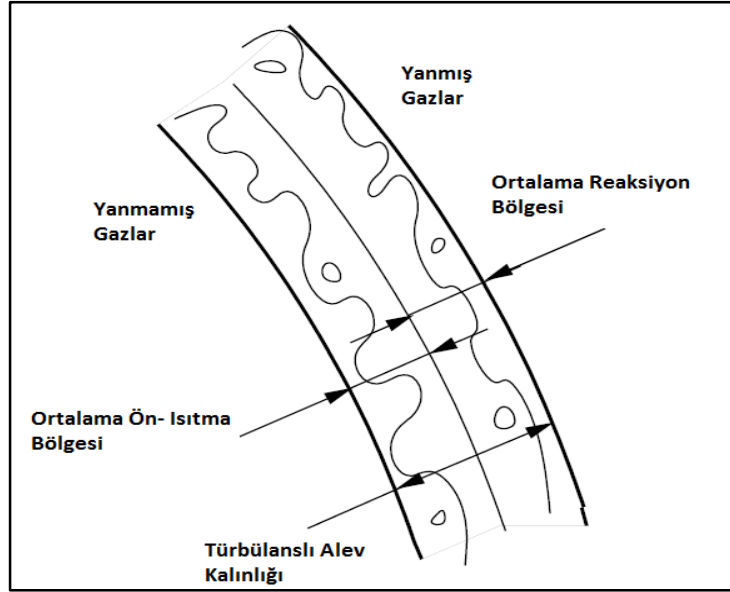
Şekil 2.13: Türbülanslı alev sonucu oluşan ince kıvrımlı alev.

Türbülanslı kısımların küçülmeye başlamasıyla, çalkantılı hareket, alev ön ısıtma bölgesine girer ve orayı değiştirir. Reaksiyon bölgesi ise henüz türbülans etkilenmemiş ve laminer kıvrımlı alev bölgesine yakın kalmıştır (Şekil 2.14). Fakat, küçük ölçekli türbülanslar için, reaksiyon bölgesinin çalkantılardan etkilenmesi söz konusudur.



Şekil 2.14: Türbülanslı alev sonucu oluşan kalın kıvrımlı alev.

Artık laminer alev tespit etmek mümkün olmamaya başlar (Şekil 2.15) ve görüldüğü gibi türbülans alevi kıvrımlı hale getirir.



Şekil 2.15: Türbülanslı alev sonucu oluşan kalın alev.

Bu daha çok kalın alevlerde ve yüksek alev hızına ( $s_T$ ) sahip türbülanslı alevlerde oluşur. Alevin enine kesiti  $A$  sabit kalırken, toplam alev yüzeyi  $A_{total}$  artışı nedeniyle alev hızında yükselme meydana gelir.

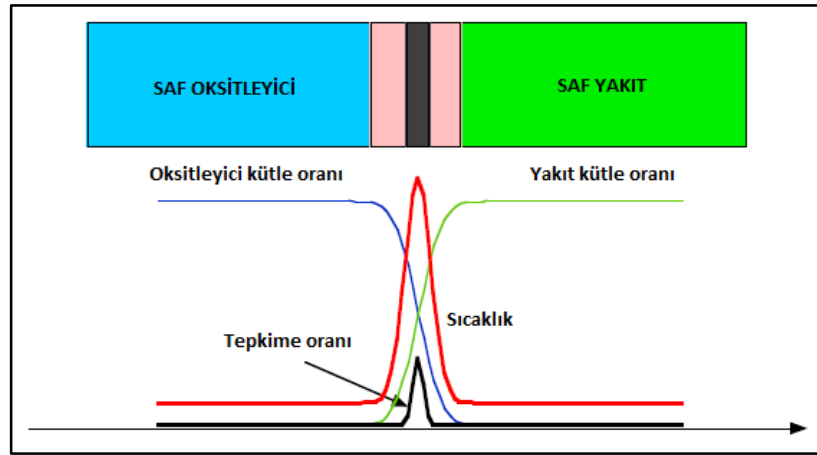
$$\frac{s_T}{s_L} \approx \frac{A_{total}}{A} \quad (2.28)$$

Bu, türbülanslı yanmanın ana sebeplerinden biri olan kütle tüketiminde artışa yol açar. Sadece türbülans alevi etkilemez, ayrıca ters biçimde alevin de türbülans üzerinde etkisi vardır. Bu etkileşim, alev önünde oluşan ısı yayılımının neden olduğu güçlü akış ivmelenmeleri ve sıcaklık değişimlerinin tetiklediği kinematik viskozite değişimleri ile meydana gelmektedir. Tepkimeye giren türbülanslı akış, henüz tepkimeye girmemiş kısımla ayırt edilebilir seviyeye gelir.

### 2.2.3. Ön-Karışimsız Alevler

Ön-karışimsız alevlerde (difüzyon alevleri olarak da adlandırılır), tepkenler, tepkime bölgesine ayrı olarak verilir. Bu tip yanma için, yakıcı dizaynı ve imalatı

basittir. Çünkü ön karışım gerekmez ve alev, içinde oksitleyici bulunmayan yakıt akışına ters yönde hareket edip geri tepme yapamaz. Buna karşın, difüzyon alevi daha az verimlidir. Çünkü yakıt ve oksitleyici yanmadan önce moleküler difüzyonla karışmalıdır. En yüksek egzost gazı sıcaklığı stokiyometrik karışımlarda oluşur. Bunun kontrolü de çok zordur. Yapılan deneysel çalışmaya istinaden (Hottel, Hawtrone, 1949), ön-karışimsız alevde yanma işlemini artırmak için türbülans oluşturulur. Alev uzunluğu, akış laminer kalacak şekilde yakıt oranı ile artar. Yakıt jeti türbülanslı hale gelince ise, alev uzunluğu, yakıt oranı artsa bile sabit kalır. Çok büyük akış oranları alevde düzensiz hareketlere (kalkmalara) ve sonrasında sönmeye yol açabilir. Ayrıca, oluşan türbülans ise alev kararlılığını zayıflatacaktır. Şekil 2.16'da karışımdaki yakıt ve oksitleyici kütle oranlarına göre alev sıcaklığı değişimi gösterilmektedir [Poinsoot and Veynante, 2004].



Şekil 2.16: Ön-karışimsız bir boyutlu laminer alevin yapısı. Burada yakıt ve hava sıcaklığı aynı olarak kabul edilmiştir.

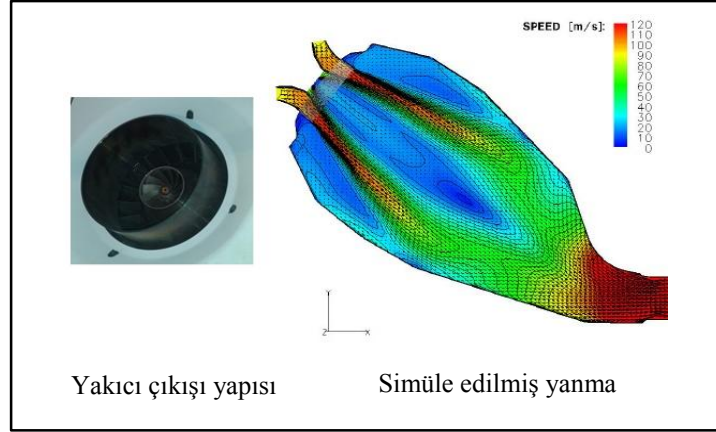
## 2.2.4. Gaz Türbinlerinde Yanma

### 2.2.4.1. Gaz Türbinlerinde Girdap Şeklinde Akış Oluşumu

Yanma odasında girdap şeklinde akış oluşturmak için kullanılan iki yöntem vardır:

- Yakıcı çıkış kılavuz kanatları dairesel yerleştirilmiş ve aksenal akışın çıkışta helezonik şekle büründüğü yöntem,
- Yakıcı içinde teğetsel yuvalara giren akışkanın girdap halini aldığı yöntemdir.

Siemens Energy tarafından geliştirilen SGT5 4000F gaz türbininde de kullanılan yakıcı çıkışı incelediğimizde helezonik akışlı alev oluşumunu görebiliriz (Şekil 2.17).

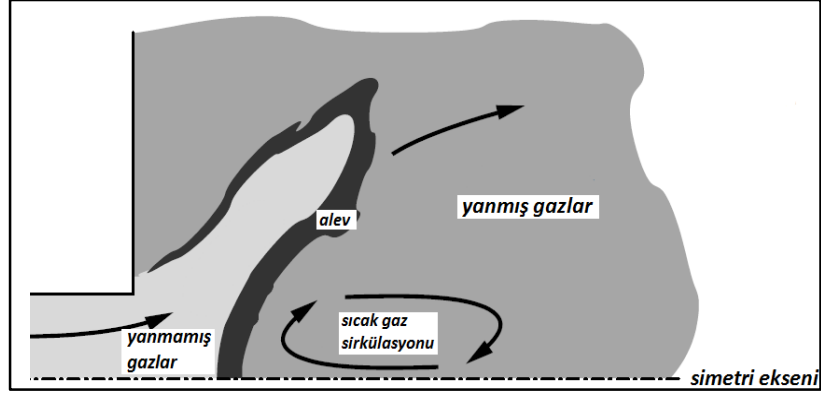


Şekil 2.17: Ön karışımli yanmada silindirik yakıcı çıkışı.

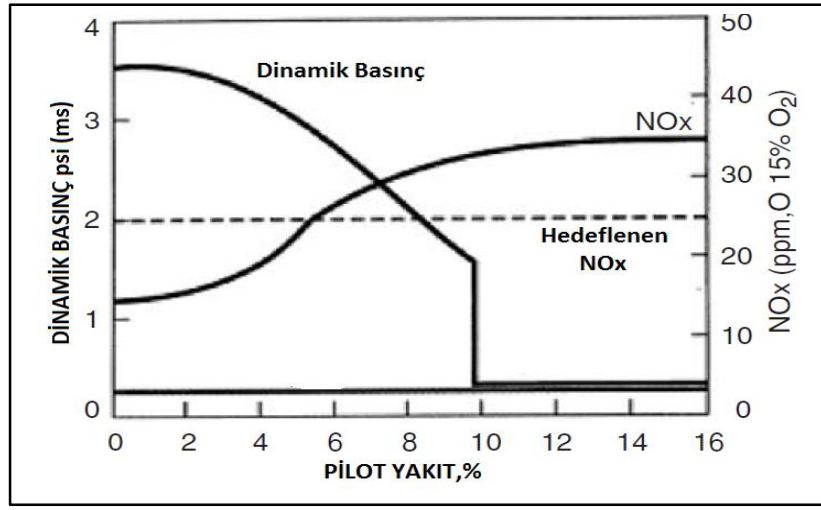
#### 2.2.4.2. Yanma Odalarındaki Alev Girdapları

Akış, helezonik yapıdaki jet yakıcıyı terkederek yanma odasına ulaşır. Burada pilot alevi sayesinde ateşlenir ve yanar. Kısa bir süre sonra sirkülasyon bölgesi sıcak gazlarla dolar. Bu birikim sisteme giren taze gazların yanması için gerekli ısıyı sağlar (Şekil 2.18). Çoğu gaz türbininde pilot alev daha sonra gerekli olmaz ve sirkülasyon bölgesinde stabilite sağlanır. Ayrıca, girdaplı akışın diğer bir avantajı da dönen akış içindeki yüksek türbülans şiddeti sebebiyle hava yakıt karışımını iyileştirmesidir. Bunlara ek olarak pilot alev devamlı kullanıldığında yanma kararlılığını artırır ve debisindeki değişimler ile farklı yanma odası frekanslarını sönmülemeye yardımcı olur. Siemens SGT5 4000F gaz türbininde de bu sistem kullanılmaktadır. Sürekli pilot alev kullanan sistemlerde pilot gaz debisi iyi ayarlanmalıdır. Çünkü, fazla miktarda pilot gaz yüksek alev sıcaklığı ile birlikte yüksek NO<sub>x</sub> salınımına sebep olur (Şekil 2.19).





Şekil 2.18: Sirkülasyon bölgesi ile alev kararlılığının sağlanması.



Şekil 2.19: Pilot yakıt – NOx grafiği.

### 2.2.4.3 Gaz Türbinlerinde Ön-Karışım Yanma

Ön karışımli yanmanın ön karışimsız yanmayla karşılaştırıldığında temel bir avantajı ve bir de dezavantajı bulunmaktadır.

Ön karışimsız yalın bir yanma, yerel bölgeciklerde stokiyometrik olarak yüksek sıcaklıkta gerçekleşir. Ön karışımli yalın yanmada ise alev sıcaklığı stokiyometrik olana göre daha düşüktür. Düşük alev sıcaklığı da zararlı NOx oluşumunu azaltmaktadır. Yanma bölgesi dışında yanıcı karışım bulunabileceği için, belirlenen bölge dışında kontrol edilemeyen patlama veya tepkime olabilir.

Gaz türbini dizaynında önemli bir nokta olan egzost gazı kirletici emisyonlarını azaltma faktörü, şirketleri ön-karışımli yanma çözümlerine yönelmektedir.

## 2.3. Sayısal Yaklaşım

### 2.3.1. Tepkimeye Giren Türbülanslı Akışların Sayısal Simülasyonu

#### 2.3.1.1. Tepkimeli Akışlar İçin Navier-Stokes Denklemleri

Tepkimeli akışların korunumlu denklemleri bilinen Navier-Stokes denklemleriyle benzerdir. Momentum denklemi de tepkimeli ve tepkimeli olmayan akışlar için benzerdir. Hacimsel kuvvetler ihmal edilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.29)$$

Burada  $\rho$  karışımın yoğunluğu,  $u$  hız vektörü,  $p$  basınç,  $\tau_{ij}$  gerilme tensörüdür. Hacimsel kuvvetler ihmal edilmiştir. Fakat kimyasal olaylar momentum denklemini yoğunluk  $\rho$  ve viskoz gerilme  $\tau_{ij}$  ile etkiler.

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (i, j = 1, \dots, 3) \quad (2.30)$$

Burada  $\mu$  dinamik viskozite,  $\delta_{ij}$  Kronecker deltadır. Toplam kütle korunumu denklemi aynı kalır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.31)$$

Fakat her bir unsur için ilave bir kütle korunumu denklemi vardır.

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho(u_i + V_{k,i})Y_k) = \dot{w}_k \quad (k = 1, \dots, N) \quad (2.32)$$

Burada  $Y_k$ , k unsurunun kütle oranıdır.  $V_{k,i}$ , k unsurunun difüzyon hızının i'inci bileşenidir.  $\dot{w}_k$  ise k unsurunun tepkime hızıdır. Hacimsel kuvvetlerin ihmal edildiği, viskoz ısıtma ve harici ısı kaynakları ile enerji korunumu denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i E)}{\partial x_i} = - \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 \dot{w}_k - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (2.33)$$

$h_{f,k}^0$ , k unsurunun oluşum entalpisı,  $E$  toplam enerji,  $q_i$ , difüzyonla ısı enerji akısıdır.

### 2.3.1.2. Hesaplamalı Yaklaşımlar

Tablo 2.1’de türbülansın sayısal modellenmesinde kullanılan üç yaklaşım karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1: DNS, RANS ve LES yaklaşımlarının karşılaştırılması.

YAKLAŞIM	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
DNS	_ Yanma - türbülans etkileşimi için bir model oluşturmaya ihtiyaç duymaz. _ Modelleri incelemek için bir araçtır.	_ Hesaplamada engelleyici maliyetler(şebeke giderleri, kod maliyetleri) _ Uygulaması küçük ölçekli problemlerle sınırlıdır.
RANS	_ Kaba bir sayısal ağ kullanılır. _ Geometrik olarak sadeleştirme yapılabilir (2B ve eksene simetrik akışlar...) _ Azaltılmış hesaplama maliyetleri vardır.	_ Kararsız durumlar için çözüm üretmez. _ Kapatma modelleri gereklidir.
LES	_ Kararsız hallerle uyum sağlayabilir. _ Azaltılmış modelleme problemleri(RANS ile karşılaştırıldığında).	SGS(Çözüm ağı altı ölçekleri) modellemesi gereklidir. _ 3B simülasyon gereklidir. _ Kesin, net kodlar gereklidir. _ Hesaplamalar maliyetlidir.

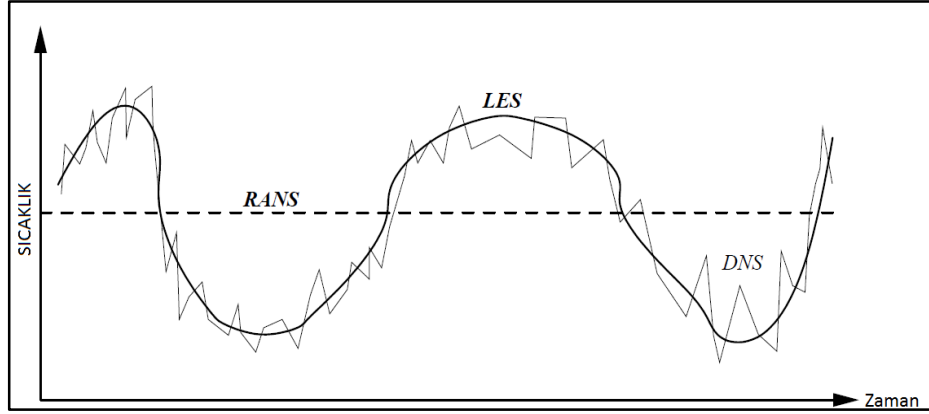
- Doğrudan Sayısal Simülasyon (DNS)

Anlık Navier-Stokes denklemleri DNS ile çözülebilir. Türbülans hareketleri için modelleme gerekmez ve akış, daha önce belirtilen denklemlerle tamamen tanımlanmıştır. Küçük ölçekli çalkantılar hesaplama ağı ile çözümlenir. Bilgisayar hız ve hafıza sınırlamaları, karmaşık kimyasal kinetik, termodinamik ve çoklu ürün geçişi gibi faktörler içeren tepkimeli akışın kapsamlı sayısal simülasyonuna izin vermemektedir. Ayrıca, DNS, günümüzde küçük ölçekli problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Küçük Reynolds sayıları, basitleştirilmiş geometriler ve küçük hacimleri inceler (örneğin, yanma odası küçük kübik bir kutudur). Stabilize olmuş

basit bir jet alevi için, DNS, tüm sıcaklık değişimlerini tahmin eder. Özellikle yüksek çözünürlüklü bir sensör bunları deney sırasında ölçer (Şekil 2.20).

- Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri

RANS bütün niceliklerin ortalama değerlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Buna ek olarak, anlık denge denklemleri de ortalama formasyondadır. Fakat, bu ortalama denklemler kapatma modelleri gerektirir; kimyasal unsur değişimi ve ısı yayılımını tanımlayan türbülanslı yanma modeli (örneğin, girdap ayrılması, Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu) ile kombinasyon içinde olan akış dinamiklerine çözüm olanağı sağlayan bir türbülans modeli (örneğin  $k - \epsilon$ ) kurulur.



Şekil 2.20: Bir alev kuyruğundaki, DNS, RANS veya LES ile hesaplanmış yerel sıcaklığın zamanla değişimi.

Bu nedenle, kaba sayısal ağ yeterlidir ve hesaplamalar iki boyutlu forma indirgenir. RANS hesaplamalarının sonuçları durağan ve zaman içindeki ortalama akış olduğundan, hesaplama maliyeti çok yüksek değildir. Jet alevi için, RANS ölçülen noktadaki ortalama sıcaklığı tahmin edebilir (Şekil 2.20).

- Büyük Girdap Simülasyonu (LES)

LES yaklaşımı RANS ve DNS arasında değerlendirilebilir. Bu teknikte, büyük ölçekli çalkantılar açıkça hesaplanabilir ve daha küçük olanların etkileri çözüm ağı altı modelleri ile hesaplanır (örneğin, Smagorinsky modeli). Smagorinsky modelinde viskozite modellenir. LES için denge denklemleri, fiziksel uzaydaki ve spektrumlardaki anlık denge eşitlikleri filtrelenerek elde edilir. Tepkimeli akışın LES'i, çözümlenmiş büyük ölçekli alev ön kısmının anlık konumunu belirler. Yanmadaki küçük ölçekli türbülans etkilerini hesaba katmak için, alt-sistem (örneğin, "G eşitliği" veya kalınlaştırılmış yapay alevler) gereklidir. LES ile simüle

edilen akış zamana bağlı ve türbülanslı olduğu için, geometrik sadeleştirmeler neredeyse imkansız olup sayısal maliyetler oldukça yüksektir. Fakat, küçük ölçekli parçalar modellenirken DNS'teki gibi yüksek çözünürlükte bir ağ sistemi gerekmez ve bu da büyük bir avantaj sağlar. Alev jeti için, LES sıcaklığın düşük frekanslı değişikliklerini yakalayacaktır. Bu çalışmada LES ve uygulamalarına değinilecektir.

## 2.3.2. Ön-Karışımli Yanma İçin LES

### 2.3.2.1. Filtrelenmiş Denge Denklemleri

Sıkıştırılabilir akışkanlar için Navier-Stokes denklemlerinin filtrelenmiş sistemi, alt-sistem ölçek operatörleri ile çözümlenmiş ve çözümlenmemiş hareket arasındaki etkileşimi tanımlayan vektörler içerir (Poinsot, 2004).

- Kütle

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.34)$$

- Momentum

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{\rho} \left[ u_i u_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \right] \right) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^N \overline{\rho Y_k f_{k,i}} \quad (2.35)$$

- Kimyasal Unsurlar

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k + \bar{\rho} \left[ u_i Y_k - \tilde{u}_i \tilde{Y}_k \right] \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{V_{k,i} Y_k} = \bar{w}_k \quad (k=1, \dots, N) \quad (2.36)$$

- Entalpi

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s)}{\partial x_i} = & \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \overline{u_i \frac{\partial p}{\partial x_i}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \overline{\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}} - \bar{\rho} (u_i h_s - \tilde{u}_i \tilde{h}_s) \right] \\ & + \overline{\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \overline{\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k}} \right) + \bar{w}_t \end{aligned} \quad (2.37)$$

Yukarıdaki denklemlerde;  $\bar{\rho}$  toplam ortalama yoğunluk,  $\tilde{u}_i$  filtrelenmiş hız,  $\tilde{\tau}_{ij}$  viskoz gerilme tensörü,  $V_k$  alev alanının her bir birimindeki k unsurunun

ortalama tepkime oranı,  $Y_k$  tepkimeye giren N tane unsurun kütle oranları,  $\overline{w_k}$  filtrelenmiş kimyasal tepkime oranıdır. Bu denklemlerden aşağıdaki nicelikler modellenenabilir. Alt-sistem ölçekli türbülans modeli gerektiren çözülmemiş Reynolds gerilmeleri  $(u_i u_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j)$  .k unsurunun çözülmemiş türbülanslı taşınımı  $(u_i Y_k - \tilde{u}_i \tilde{Y}_k)$  ile ifade edilir. Türler için filtrelenmiş laminer difüzyon akışı  $\overline{\rho V_{k,i} Y_k}$  ile gösterilir.

### 2.3.2.2. Çözülmemiş Akış Modelleme

Çözülmemiş hareketler üzerindeki çözülmemiş ölçeklerin etkileri, türbülans viskozitesinin  $\nu_t$  tanımlanması üzerine kurulu olan SGS modelinde hesaba katılır. Çoğu LES kodu çözülmemiş momentum akışları için Smagorinsky-Lilly yöntemini kullanır.

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon} \tau_{kk} = -\nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (2.38)$$

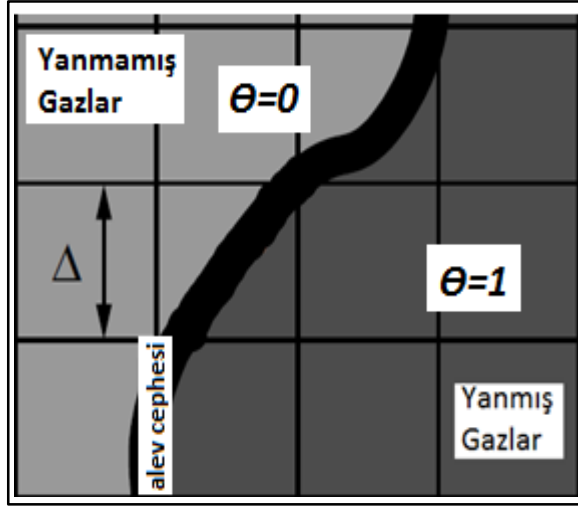
Burada  $\tau_{ij}$ , gerilme tensörü,  $\delta_{ij}$ , alev kalınlığı,  $\tau_{kk}$ , çözüm ağı alt ölçekli gerilme,  $\bar{u}_i$ , çözüm ağı alt ölçekli hızdır. Çözüm ağı alt ölçekli viskozite  $\nu_t$  aşağıdaki gibi modellenir.

$$\nu_t = (C_s \Delta x)^2 |\bar{S}| \quad (2.39)$$

Buradaki  $\Delta x$ , sistem boyutu ve  $C_s$  de model sabitidir.  $\bar{S} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$  olup, filtrelenmiş kayma gerilmesi oranıdır. Diğer çözülmemiş akışlar çoğu zaman basit gradyent varsayımlarıyla çözülür.

### 2.3.2.3. Tepkime Oranı

Ön karışımli alev kalınlığı  $\delta_1^0$  genellikle LES ağı uzunluğundan ( $\Delta x$ ) oldukça küçüktür (Şekil 2.21). Prosesin ilerleme değişkeni  $\theta$  çok yoğun değişkenlik gösterir.  $\theta$ , boyutsuz yakıt kütle oranıdır [Schmitt, 2001].

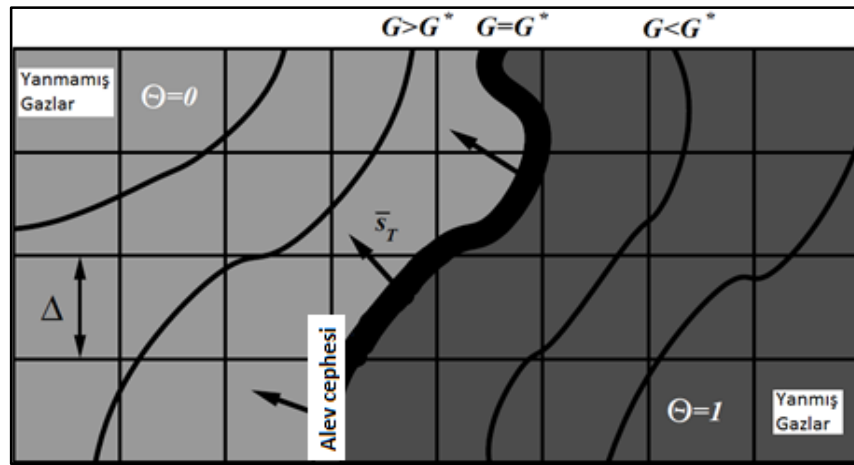


Şekil 2.21: Ön-karışım alev kalınlığı  $\delta_1^0$  ile LES ağ uzunluğu  $\Delta x$  arasındaki karşılaştırma.

Bu nedenle, alev cephesi bilgisayar hesaplamaları ile çözümlenemez. Bu zorluğun üstesinden gelmek için iki ana yaklaşım mevcuttur. Alev cephesi izleme metodu (G-eşitliği) ve yapay kalınlaştırılmış alevler yöntemi sıkça kullanılmaktadır.

- Alev cephesi izleme metodu (G-eşitliği)

G-eşitliği arkasındaki temel fikir, alev kalınlığını sıfır kabul etmek ve alev cephesini, G değişkenini kullanarak yüzeyi izli yayılan alev olarak tanımlamaktır (Şekil 2.21). G-eşitliği, sıfır seviyesi alevi tanımlayan skalar bir alan ( $G(x,t)$ ) denklemi ile alev cephesini izlemede kullanılır. LES'te çözümlenmiş alev eş seviyedeki  $\tilde{G} = G^*$  ile ilişkilendirilir.



Şekil 2.22: Alev cephesi ve G-alanı. Alev cephesi bir G-alanının verilen bir yüzeyi  $\tilde{G} = G^*$  ile tanımlanır.

Çözümlemiş G-alanının ilerleme değişkenini  $\theta$  takip etmesine gerek yoktur. Gradyentler LES alanında çözümlenebilir. Birçok teorik ve sayısal problemlere rağmen, bu yaklaşım türbülanslı ön-karışimli yanmanın LES'i için yaygın olarak kullanılmaktadır.

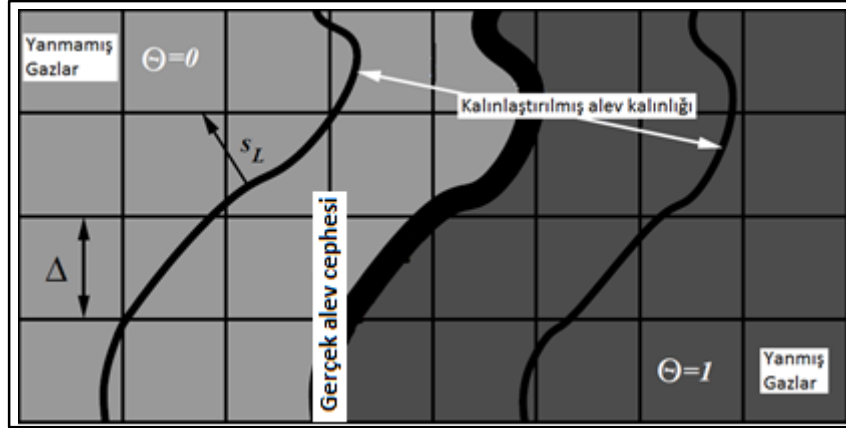
- Yapay Kalınlaştırılmış Alevler Metodu

Bu yaklaşım G-eşitliği yaklaşımına ters bir görüşü benimsemektedir. Alev kalınlığı LES ağı ile çözümlenmesine uygun olana kadar artırılır (Şekil 2.23). Laminer ön-karışimli alevlere ait basit teorileri takip ederek, alev hızı  $s_L^0$  ve alev kalınlığı  $\delta_L^0$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$s_L^0 \propto \sqrt{D_{th}B} \quad (2.40)$$

$$\delta_L^0 \propto \frac{D_{th}}{s_L^0} = \sqrt{\frac{D_{th}}{B}} \quad (2.41)$$

$D_{th}$ , termal difüzyivite ve  $B$  ise tepkime hızını veren Arrhenius Kanunundaki eksponansiyel önü sabittir.



Şekil 2.23: Kalınlaştırılmış alev yaklaşımı. Alev hızı korunurken, laminer alev kalınlaştırılmıştır.

Eğer  $D_{th}$ ,  $B$  değeri  $F$  tarafından azaltılırken  $F$  faktörü ile artarsa, alev hızı sabit tutularak alev kalınlığı  $F$  ile çarpılmalıdır. Yeterli büyüklükteki bir  $F$  değeri için, kalınlaştırılmış alev cephesi LES hesaplama ağı ile çözümlenebilir. Fakat alev kalınlaştırıldıkça türbülansa karşı duyarsız hale gelmektedir. Bunu açıklamak için



Şekil 2.23’de kalınlaştırılmış ve kalınlaştırılmamış alev karşılaştırılmıştır. Bu istenmeyen etkiyi dengelemek için, verim fonksiyonu (E) olarak adlandırabileceğimiz bir eşitlik tanımlanabilir. Bu, hıza, uzunluk ölçekleri oranlarına bağlı olup DNS araştırmalarıyla belirlenir. Difüzyon ve eksponansiyel sabit bu fonksiyon ile çarpılır.

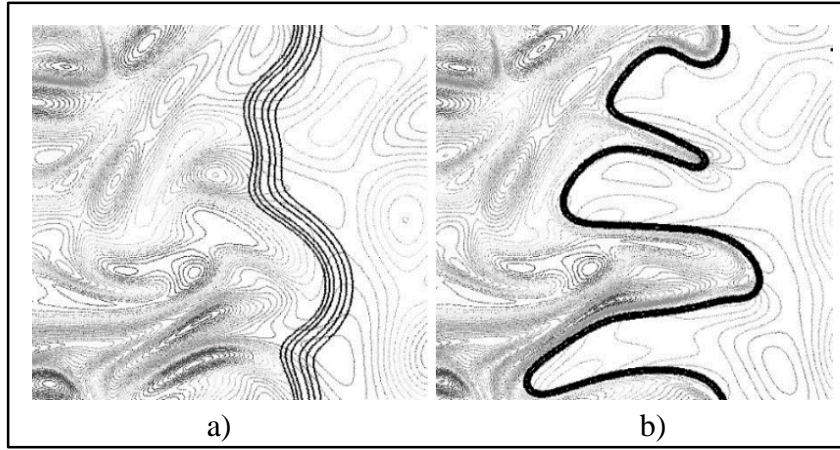
$$\begin{aligned}
 & \text{- Difüzyon} \quad D_{th} \quad \rightarrow \quad FD_h \quad \rightarrow \quad EFD_{th} \\
 & \text{- Üstel Öncesi Sabit } B \quad \rightarrow \quad B/F \quad \rightarrow \quad EB/F \\
 & \hspace{10em} (\text{kalınlaşma}) \quad \hspace{10em} (\text{kıvrımlaşma})
 \end{aligned}$$

Bu aşağıdaki eşitliklere öncülük eder.

$$s_T^0 = Es_L^0 \quad (2.42)$$

$$\delta_T^0 = F\delta_L^0 \quad (2.43)$$

$s_T^0$ , türbülanslı alev hızının çözüm ağı alt ölçeği ve  $\delta_T^0$ , yapay kalınlaştırılmış alev kalınlığıdır. Kalınlaştırma yaklaşımı sonucu oluşturulan alev LES ile tekrar çözümlenebilen bir şekil alır. Ayrıca bu alev orijinal hali gibi davranır. Bu çalışmada kalınlaştırma metodu geliştirmesi basit olduğu için özel olarak incelenecektir.



Şekil 2.24: Alev türbülans etkileşimlerinin DNS’i. Tepkime hızı ve girdap üst üste gelmiştir. a) Referans alevi b) F=5 faktörlü yapay kalınlaştırılmış alev

### 2.3.3. Sıkıştırılabilir Akış Çözümleyicisi

#### 2.3.3.1. Genel Özellikler

AVBP projesi CERFACS bünyesinde geliştirilen hesaplamalı akışkanlar mekaniğine esneklik ve verimlilik katan modern bir yazılımdır [Schmitt, 2001]. Herhangi tipte bir hücre ağını çözümlene kabiliyetine sahiptir. Yapılandırılmış ağların tutarlılığı, yapılandırılmamış ağların verimliliği ile kombine edilmeye çalışılmıştır. Bu da ağ türetiminde esneklik ve ağların birbiriyle örtüşmesi konusunda katkı sağlar. AVBP modülerliği artırmak için iki yazılım kütüphanesi üzerine oluşturulmuştur. Alışlagelmiş Euler ve Navier-Stokes denklemleri, kimyasal modelleme, dinamik türbülans, RANS türbülans modelleri, sayısal yöntemler, sınır koşulları ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kapsamı dışındaki genel uygulamalar bu sınıflandırma içinde yer alır.

#### 2.3.3.2. Sayısal Yaklaşım

- Sayısal Yöntem

Ana denklemlerin ayrıştırılması için kullanılan akış çözücü sonlu hacimler yöntemine dayanır. Geri kalanlar hücre merkezinde hesaplanır ve ağ düğümleri üzerine tekrar dağıtılır. Bu ağ düğümlerinde korunmuş değişkenlerin değerleri ayrıktır. Kararlı durumdaki akışlar için Lax-Wendroff yöntemi lineer yapay viskozite modeli ile birlikte kullanılır. Kararsız türbülanslı akış için Lax-Wendroff yöntemi fazla dağıtıcı görünür. Tepkimeli ve reaktif olmayan LES simülasyonlarında birçok yüksek mertebeden yöntem kullanılmıştır. Zaman integrasyonu açık, çok kademeli Runge-Kutta yöntemi ile yapılır. Bu çalışmada iki kademeli Taylor-Galerkin yöntemi kullanılacaktır.

- Türbülans ve Yanmanın Modellenmesi

Çözüm ağı alt ölçekli model olarak, AVBP yüksek geçişli ilave filtre ile Smagorinsky modelini kullanır. Çünkü yapay viskozite LES içindeki türbülans seviyesini etkiler ve yapay viskozite yalnızca bir sensörle uygulanabilir. Yüksek frekanslı modları sönmüleyen şok hapsedici yapay viskozite sistemleri mevcuttur. Yanma modellemesi için verim fonksiyonu ile alev kalınlaştırma uygulanır.

Kodlarda tepkime hızları iki moleküllü basit tepkimelerden oluşan kinetik mekanizmalarla hesaplanır.

- Sınır Koşulları

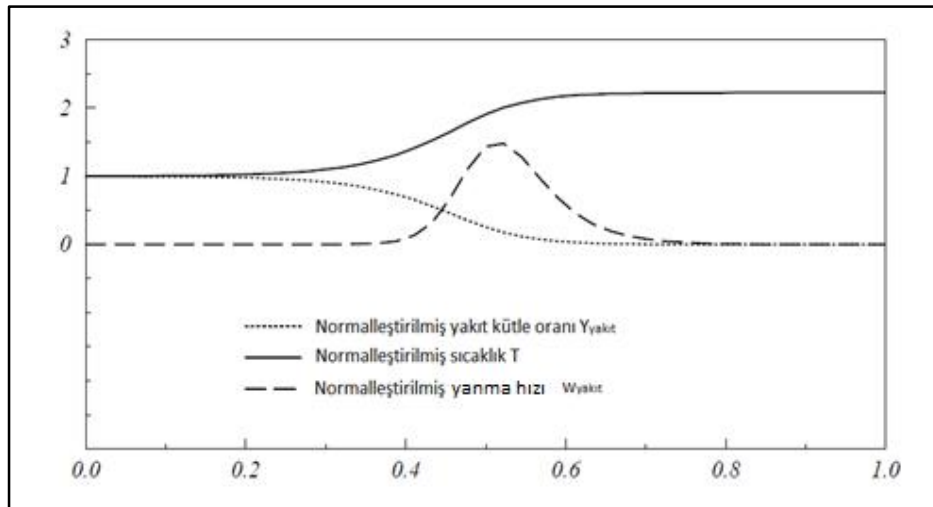
AVBP, Navier-Stokes karakteristik sınır koşullarını kullanır. Kararsız Navier-Stokes denklemi için bu koşullar sınırlardaki rijit değerleri etkilemez, ama verilen değerleri korur. Hesaplama alanına dalgalar yayan bu yol, hesaplama alanından çıkabilir ve bu alana yansımaz.

## 2.4. Sayısal Uygulamalar

### 2.4.1. Tek Boyutlu Alev Hesaplamaları

#### 2.4.1.1. Genel Tanım

Laminer alevler türbülanslı alev bloklarının temel yapı taşı olarak görülürler. Çeşitli kimyasal konularda ve yanma modellemesinde çalışma yapmak için laminar tek boyutlu alev sıkça kullanılan bir yaklaşımdır. Eğer, girişteki yanmamış gazların hızı laminar alev hızına eşitse, durağan tip bir çözüm kabul edilecektir. Tipik tek boyutlu alevin uzaysal değişimi Şekil 2.25'de gösterilmiştir. Alev cephesinin bir tarafından diğer tarafına geçerken yakıt kimyasal tepkimede harcanır ve sıcaklık yükselir. Buna ek olarak basınç sabit kalırken sıcaklığın artmasıyla genleşme sebebiyle yoğunluk düşer ve süreklilik denkleminde hız artar.



Şekil 2.25: Yakıt kütle oranı değişimi ve tek boyutlu laminar alevin tepkime hızı ve sıcaklığı.

### 2.4.1.2. Sayısal Alev Hesaplamaları

Kimyasal tepkimeleri simüle etmek için kimyasal bir mekanizma gereklidir. Tipik kimyasal mekanizmalar yüzlerce unsur ve binlerce tepkime gerektirir. Bu iş için de metan-hava alevinde oluşan tüm tepkimeleri tanımlayan GRI mekanizması kullanılır [Poinsot, 2004]. CHEMKIN kütüphanesi temeline dayanan ön-karışımli hesaplama kodları, Newton tipi sayısal metodla ilgili başlangıç sınır değer problemlerini çözer [Schmitt, 2001].

Kimyasal bir bakış olarak, çoklu unsur taşınımı ve kimyasal tepkime modellemesi üç boyutlu simülasyon için çok pahalıdır. Hesaplama çalışmalarını iyi bir nedene bağlı tutmak için, AVBP iki unsur, tek tepkime modeli ve karmaşık entegre kimyasal kinetik kullanır (ICC) [Lieuwen, 1999]. ICC kompleks kimyasal kinetik karakteristiklerini örtüşürmesi için ayarlanır. Bu çalışmada söz konusu olan kimyasal kinetik 680K soğuk gaz sıcaklığı için geliştirilmiştir. Yakıt eşdeğerlik oranı ise 0.5 ile 1 arasında değişiklik gösterir.

### 2.4.1.3. Sonuçlar

*ICC ve GRI-Mach Karşılaştırılması:* Metan-hava alevinin uzaysal değişimi, GRI-Mech ve ICC modeli ile incelenmiştir (Şekil 2.28). Farklı kimyasal mekanizmalar arasında iki ana farklılık bulunur:

- Yanmış gazların adyabatik alev sıcaklığı indirgenmiş kimyasal kinetik için 100K daha düşüktür. Çünkü indirgenmiş kimyasal kinetik için eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) 0.5 ile 1 arasındadır (Şekil 2.28, sağda). İki kimyanın adyabatik alev sıcaklıkları  $\phi = 0.8$ 'de örtüşür ve 0.6mm alev kalınlığı bulunmuştur (Schmitt, 2001). Daha büyük eşdeğerlik oranları için adyabatik alev sıcaklığı çok daha yüksektir. Buda, ICC'nin zengin karışımlarda eşdeğerlik oranına, fakir karışımlarda ise fazla hava oranına orantılı olduğuna bir kanıttır.
- Karmaşık kimyasal kinetik için yakıt tepkime hızı indirgenmiş kimyasal kinetiğin ileri safhalarında zirve yapar. Ayrıca karmaşık kimyasal kinetik kullanılırsa yakıt oksijenden önce harcanır. Bu da şunu gösterir ki, gerçek kimyasal tepkimeler orta ürün formunu alır ve bazen tepkime başlangıcında

metanı geri getirir.

Fakir karışımlar için indirgenmiş kimyasal kinetik neredeyse gerçek kimyasal kinetik ile örtüşür. En iyi benzerlik  $\phi = 0.7$  'de olur. Bu yine indirgenmiş kimyasal kinetiğin eşdeğerlik oranının 0.5 ile 1 arasında değişmesiyle açıklanabilir.

Zengin yanma için, basitleştirilmiş kimyasal kinetik gerçek alev hızını tahmin etme yeteneğinden uzaktır.

ICC'de kalınlaştırılmış ve kalınlaştırılmamış alevlerin karşılaştırılması ile ilgili çalışmaya göre alev, seçilen faktör ile kalınlaştırılır. Yakıt kütle oranları ve tepkime hızı ile hesaplanan alev hızı, kalınlaştırılmamış alev hızına eşittir. Tablo 2.8'de  $\phi = 0.43$  noktasındaki alev hızı ve alev kalınlığı gösterilmiştir. Karmaşık kimya ile elde edilen alev kalınlığı, ICC ile elde edilenden daha büyüktür. Ayrıca kalınlaştırılmış ve kalınlaştırılmamış alevlerin kalınlıkları arasındaki oran, seçilen faktör  $F=10$ 'dan küçüktür.

#### 2.4.1.4. Siemens SGT5 4000F Gaz Türbini Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması

Öncelikle Siemens otomasyon programı olan T3000 ve Emerson'a ait ovation programı kullanılmıştır. Buralardan alınan, doğalgaz kromotografik değerler ve bileşen ölçüm değerleri hesaplamalarda kullanılmıştır.

- Kromotograf Bilgileri ( $TN : 0^{\circ}C, PN : 101kPa$  )

Tablo 2.2: Kromotograf cihazından alınan doğalgaz bileşenleri % molar derişimleri.

Bileşen	Kimyasal Formül	%molar
Metan	$CH_4$	95.24
Etan	$C_2H_6$	0.69
Bütan	$C_4H_{10}$	0.094
Propan	$C_3H_8$	0.1
Pentan	$C_5H_{12}$	0.012
Nitrojen	$N_2$	0.497

Doğal gaz alt ısı değeri 49466 kJ/kg olup yoğunluğu 0.75 kg/m<sup>3</sup>'tür. Tablo 2.2'de bazı doğal gaz bileşenleri ihmal edilmiştir.

- Debimetre Bilgileri ( $TN : 15^{\circ}C, PN : 101kPa$ )

Yakılan doğalgaz debisi  $53535 m^3 / saat$ , yoğunluk  $0.71 kg / m^3$ , generator çıkış gücü 190MW, doğalgaz sıcaklığı  $60^{\circ}C \approx 333K$  'dir.

Debiyi kütleli debi cinsinden yazarsak;

-  $5353 \times 0.71 = 38010 kg / saat = 10.55 kg / saniye$  bulunur.

Türbin egzost gazları analiz sisteminden (CEMS)  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  değerleri okunur. Birimleri %molar olup aşağıda listelenmiştir.

Tablo 2.3: Yanma ürünleri % molar derişimleri.

Bileşen		%molar
Oksijen	$O_2$	11.8
Karbonmonoksit	$CO$	0.1
Karbondioksit	$CO_2$	4.2
Nitrojen	$N_2$	75.7

Türbin egzost gazı çıkış sıcaklığı ise  $570^{\circ}C$ 'dir.

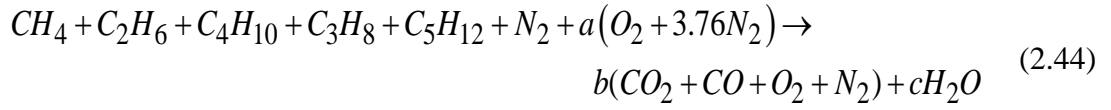
- Oksitleyici Havanın Bazı Özellikleri

Yanma havası kuru kabul edilmiştir. Ayrıca, havanın %79 azot ( $N_2$ ) ve %21 oksijen ( $O_2$ )'den oluştuğu varsayılmıştır. Bu orandan yola çıkarak  $0.79/0.21=3.76$  bulunur.

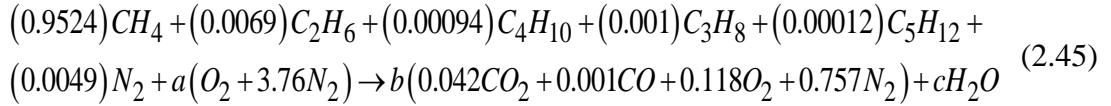
Yanma odasına, dolayısıyla türbine giren hava 15 kademeli aksel kompresörde IGV (giriş rehber kanatçıkları) açıklığına bağlı olarak 10-17 bar arasına sıkıştırılır. Sıcaklığı ise  $310-420^{\circ}C$  arasındadır. Çalışmada 190MW çıkış gücü için  $360^{\circ}C$  (633K) kullanılmıştır.

- Hesaplamalar

a,b,c denklem katsayıları olmak üzere, yanma denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.



Katsayılar yerine yazılırsa,



C atomu mol toplamı,

$$0.9524 + 0.0069 \times 2 + 0.00094 \times 4 + 0.001 \times 3 + 0.00012 \times 5 = 0.9735 \text{ mol} \quad (2.46)$$

$$b \times (0.042 + 0.001) = 0.9735 \rightarrow b = 22.64 \quad (2.47)$$

H mol toplamı,

$$0.9524 \times 4 + 0.0069 \times 6 + 0.00094 \times 10 + 0.001 \times 8 + 0.00012 \times 12 = 3.86 \text{ mol} \quad (2.48)$$

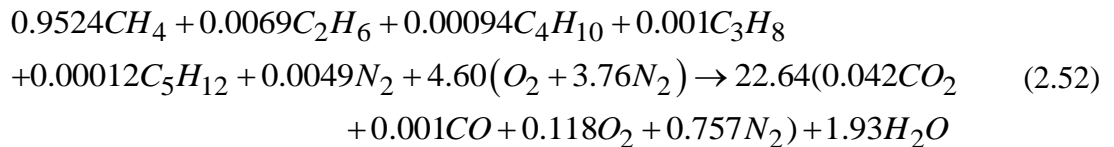
$$2c = 3.86 \rightarrow c = 1.93 \quad (2.49)$$

Oksijen denkleştirilmesi:

$$2a = b \times (2 \times 0.042 + 0.001 + 2 \times 0.118) + c \quad (2.50)$$

$$2a = 22.64 \times (2 \times 0.042 + 0.001 + 2 \times 0.118) + 1.93 \rightarrow a = 4.60 \quad (2.51)$$

Denklem aşağıdaki hali alır:



- Giriş sıcaklığı 298K ve  $c_p(T)$  925K seçilmiştir.

-  $C_xH_y$  için  $\sum x = 0.974$ ,  $\sum y = 3.869$  bulunmuştur.

$$\text{- Eşdeğerlik oranı } \phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{stokiyometrik}}}{\left(\frac{A}{F}\right)} \rightarrow \phi = 0.42 \text{ bulunur.}$$

- $c_p$  'lerin (özellik ısıların) Bulunması

Hesaplama için  $\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$  [kJ/kmol.K) eşitliği kullanılmıştır (Kyle, Chemical and Process Thermodynamics). Aşağıdaki tablolarda yanma bileşenleri ve egzost gazlarına ait 925K,633K ve 333K sıcaklıklarındaki hesaplanmış  $c_p$  'ler gösterilmiştir. Yalnızca  $C_3H_8$  'e ait hesaplamada  $eT^4$  kullanılmıştır.

Tablo 2.4: Bileşenlerin 925 K noktasındaki özgül ısıları.

925	a	b	c	d	e	kJ/kmol.K
$N_2$	28,9	-0,00157	0,000008081	-2,87E-09	-	32,0872858
$O_2$	25,48	0,0152	-0,000007155	1,31E-09	-	34,45638963
$CH_4$	19,89	0,05024	0,0001269	-1,10E-08	-	68,50598234
$CO_2$	22,26	0,05981	-0,00003501	7,47E-09	-	53,54018214
$H_2O$	32,24	0,001923	0,00001055	-3,60E-09	-	40,20034477
$C_4H_{10}$	3,96	343,6375	-156,92165	2,77E+01	-	218,3767344
$C_2H_6$	6,9	159,7475	-54,8113375	5,77E+00	-	117,6018985
$C_5H_{12}$	6,774	420,2275	-192,173375	3,35E+01	-	268,2986777
$C_3H_8$	-1,48	68,76358	-33,42499063	6,37E+00	0,014247	168,3942628
$CO$	28,16	1,549375	4,5964175	-1,76E+00	-	32,54718366

Tablo 2.5: Bileşenlerin 333 K noktasındaki özgül ısıları.

333	a	b	c	d	e	kJ/kmol.K
$N_2$	28,9	-0,00157	8,08E-06	-2,90E-09	-	29,16686
$O_2$	25,48	0,0152	-7,16E-06	1,31E-09	-	29,79664
$CH_4$	19,89	0,05024	1,27E-05	-1,10E-08	-	37,62055
$CO_2$	22,26	0,05981	-3,50E-05	7,47E-09	-	38,57031
$H_2O$	32,24	0,001923	1,06E-05	-3,60E-09	-	38,91749
$C_4H_{10}$	3,96	123,7095	-2,03E+01	1,29E+00	-	108,6249
$C_2H_6$	6,9	57,5091	-7,10E+00	2,69E-01	-	57,57456
$C_5H_{12}$	6,774	151,2819	-2,49E+01	1,56E+00	-	134,7118
$C_3H_8$	-1,48	24,75489	-4,33E+00	2,97E-01	0,10993	80,96182
$CO$	28,16	0,557775	5,96E-01	-8,21E-02	-	29,23142



Tablo 2.6: Bileşenlerin 633 K noktasındaki özgül ısıları.

633	a	b	c	d	e	kJ/kmol.K
$N_2$	28,9	-0,00157	8,08E-06	-2,90E-09	-	30,41483
$O_2$	25,48	0,0152	-7,16E-06	1,31E-09	-	32,56744
$CH_4$	19,89	0,05024	1,27E-05	-1,10E-08	-	53,98413
$CO_2$	22,26	0,05981	-3,50E-05	7,47E-09	-	47,98602
$H_2O$	32,24	0,001923	1,06E-05	-3,60E-09	-	36,77271
$C_4H_{10}$	3,96	235,1595	-7,35E+01	8,88E+00	-	174,5104
$C_2H_6$	6,9	109,3191	-2,57E+01	1,85E+00	-	92,3987
$C_5H_{12}$	6,774	287,5719	-9,00E+01	1,07E+01	-	215,0774
$C_3H_8$	-1,48	47,05659	-1,57E+01	2,04E+00	0,030423	133,8749
$CO$	28,16	1,060275	2,15E+00	-5,64E-01	-	30,8092

Doğalgaz bileşenleri oluşum entalpileri ve  $c_p$  'leri (özgül ısıları) aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 2.7: Doğalgaz bileşenleri ve yanma ürünleri oluşum entalpileri ve özgül ısıları.

Bileşen	$\overline{h_{fi}}^\circ$ [kJ/kmol] (298K)	$\overline{c_{pi}}^\circ$ [kJ/kmol.K] (333K)	$\overline{c_{pi}}^\circ$ [kJ/kmol.K] (633K)	$\overline{c_{pi}}^\circ$ [kJ/kmol.K] (925K)
$CH_4$	-74831	37,62	-	-
$C_2H_6$	-84667	57,57	-	-
$C_4H_{10}$	-124733	108,62	-	-
$C_3H_8$	-103847	80,96	-	-
$C_5H_{12}$	-146440	134,711	-	-
$N_2$	0	29,16	30,41	32,08
$O_2$	0	-	32,56	34,45
$CO_2$	-3939546	-	-	53,54
$H_2O$	-241845	-	-	40,2
$CO$	-110541	-	-	32,54

$H_{giren}$ , giren bileşenlerin entalpisi ve  $H_{ürün}$ , çıkan bileşenlerin entalpisi olmak üzere adyabatik sistem için termodinamiğin 1. Kanunu şöyle yazılabilir:

$$H_{giren} = H_{ürün} \quad (2.53)$$

$$H_{giren} = \sum_{giren} N_i \bar{h}_i = \sum_{giren} N_i (\bar{h}_{f,i}^{\circ} + \bar{c}_{p,i} (T_i - T_{ref})) \quad (2.54)$$

$$H_{ürün} = \sum_{ürün} N_j \bar{h}_j = \sum_{ürün} N_j (\bar{h}_{f,j}^{\circ} + \bar{c}_{p,j} (T_{ad} - T_{ref})) \quad (2.55)$$

Burada  $N_i$ , i'nci unsurun mol sayısını,  $\bar{h}_{f,i}^{\circ}$ , i'nci unsurun standart koşullarda oluşan entalpisini,  $\bar{c}_{p,i}$ , i'nci unsurun molar özgül ısısını,  $T_i$ , i'nci unsurun açık sisteme giriş sıcaklığını,  $T_{ref} = 298K$  standart sıcaklığı, j alt indisli büyüklükler ürünleri oluşturan unsurları,  $T_{ad}$ , adyabatik alev sıcaklığını göstermektedir.

- $T = 633K$  hava giriş sıcaklığı,
- $T = 333K$  yakıt giriş sıcaklığı için,

$$\begin{aligned} H_{giren} = & 0.9524[-74831 + 37.62(333 - 298)] + 0.0069[-84667 \\ & + 57.57(333 - 298)] + 0.00094[-124733 + 108.62(333 - 298)] \\ & + 0.001[-103847 + 80.96(333 - 298)] + 0.0049[0 + 29.16(333 - 298)] \\ & + 4.6[0 + 32.56(673 - 298)] + 17.25[0 + 30.41(673 - 298)] = 154145 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} H_{ürün} = & 22.63 \times 0.042[-393546 + 53.54(T_{ad} - 298)] + 22.63 \times \\ & 0.001[-110541 + 32.54(T_{ad} - 298)] + 22.63 \times 0.118[0 + 34.45(T_{ad} - 298)] \\ & + 22.63 \times 0.757[0 + 32.08(T_{ad} - 298)] + 1.93[-241845 + 40.2(T_{ad} - 298)] = \\ & -843312 \text{ kJ} + 768(T_{ad} - 298) \end{aligned} \quad (2.57)$$

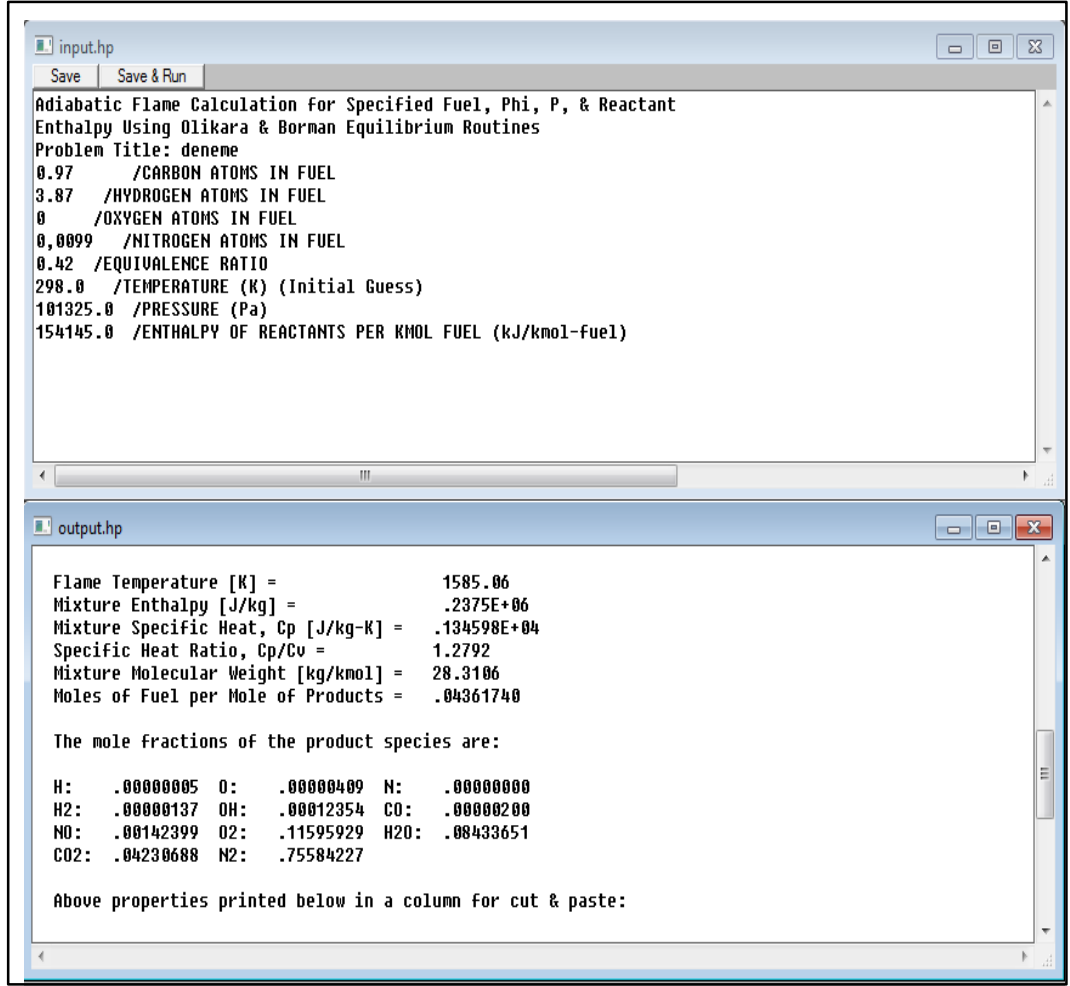
Buradan;

$$\bullet \quad H_{giren} = H_{ürün}$$

$$\begin{aligned} 154145 &= -863842 + 789(T_{ad} - 298) \\ T_{ad} &= 1587K \end{aligned} \quad (2.58)$$

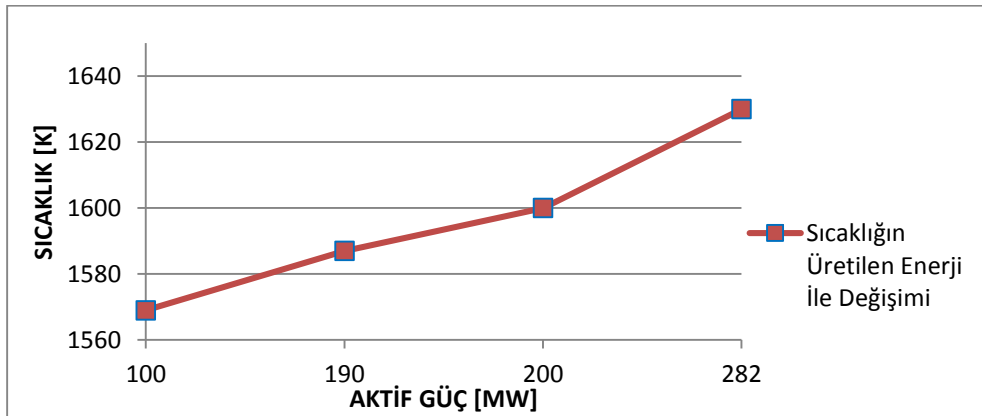
bulunur.

Adyabatik alev sıcaklığının HP FLAME yazılımı ile hesaplanması mümkündür [Turns, 2000]. Sonuç Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26: HP FLAME programı ile adyabatik alev sıcaklığının hesaplanması.

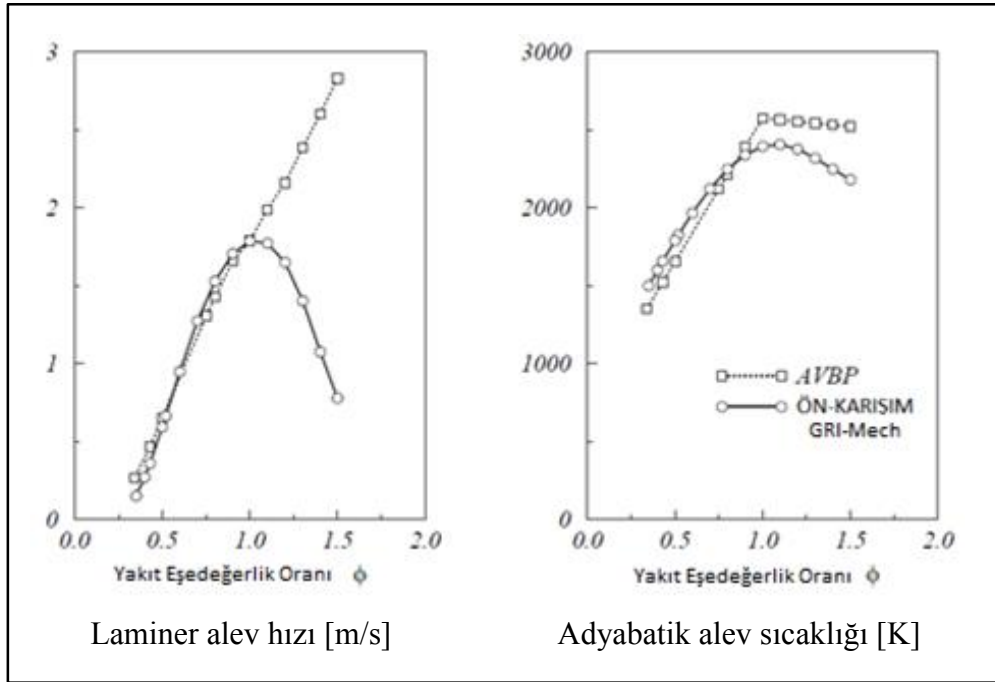
Ayrıca Şekil 2.27’de generator çıkış gücünün artması ile adyabatik alev sıcaklığının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.27: Adyabatik alev sıcaklığının üretilen güç ile değişimi.

### 2.4.1.5 Yorumlar

Basitleştirilmiş model, alev yalın rejimde iken ön-karışimli yanmayı yeterli seviyede tahmin etme yeteneğine sahiptir. İndirgenmiş kimyasal kinetik, tutarlı sonuçlar için ortalama yakıt eşdeğerlik oranına göre ayarlanmalıdır. Çünkü mevcut ICC  $\phi = 0.75$  değerine ayarlanmıştır. Fakat bu eşdeğerlik oranının 0.43'e eşit olduğu durumlar kadar iyi sonuçlar vermez. Alev kalınlaştırma yaklaşımı laminer alev nedeniyle verim fonksiyonu dikkate alınmadan doğrulanmıştır.

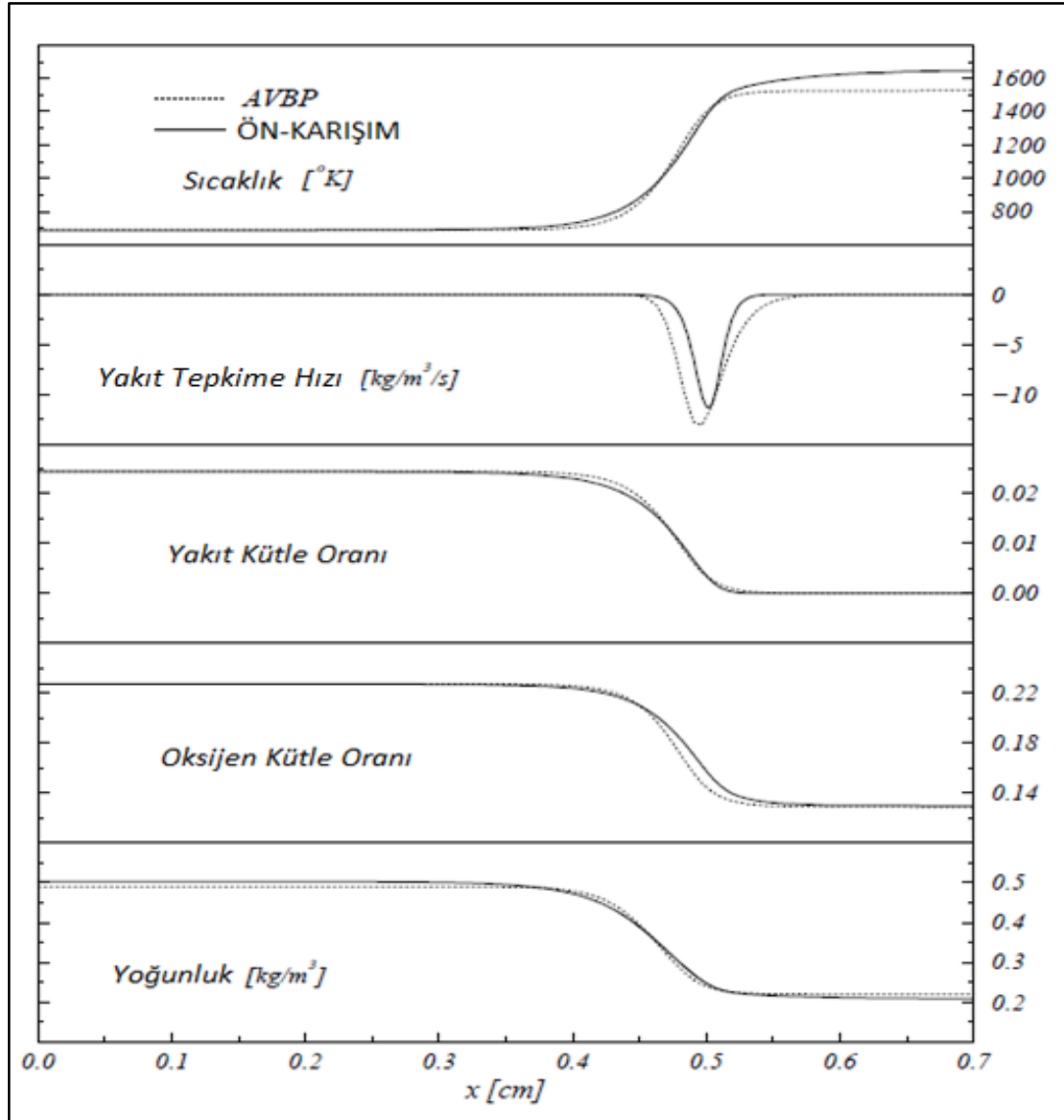


Şekil 2.28: AVBP ve indirgenmiş kimyasal kinetik ile hesaplanan 686 K ve 101kPa'daki farklı yakıt eşdeğerlik oranlarındaki laminer metan alevinin bir boyutlu alev hızı ve adyabatik alev sıcaklığı.

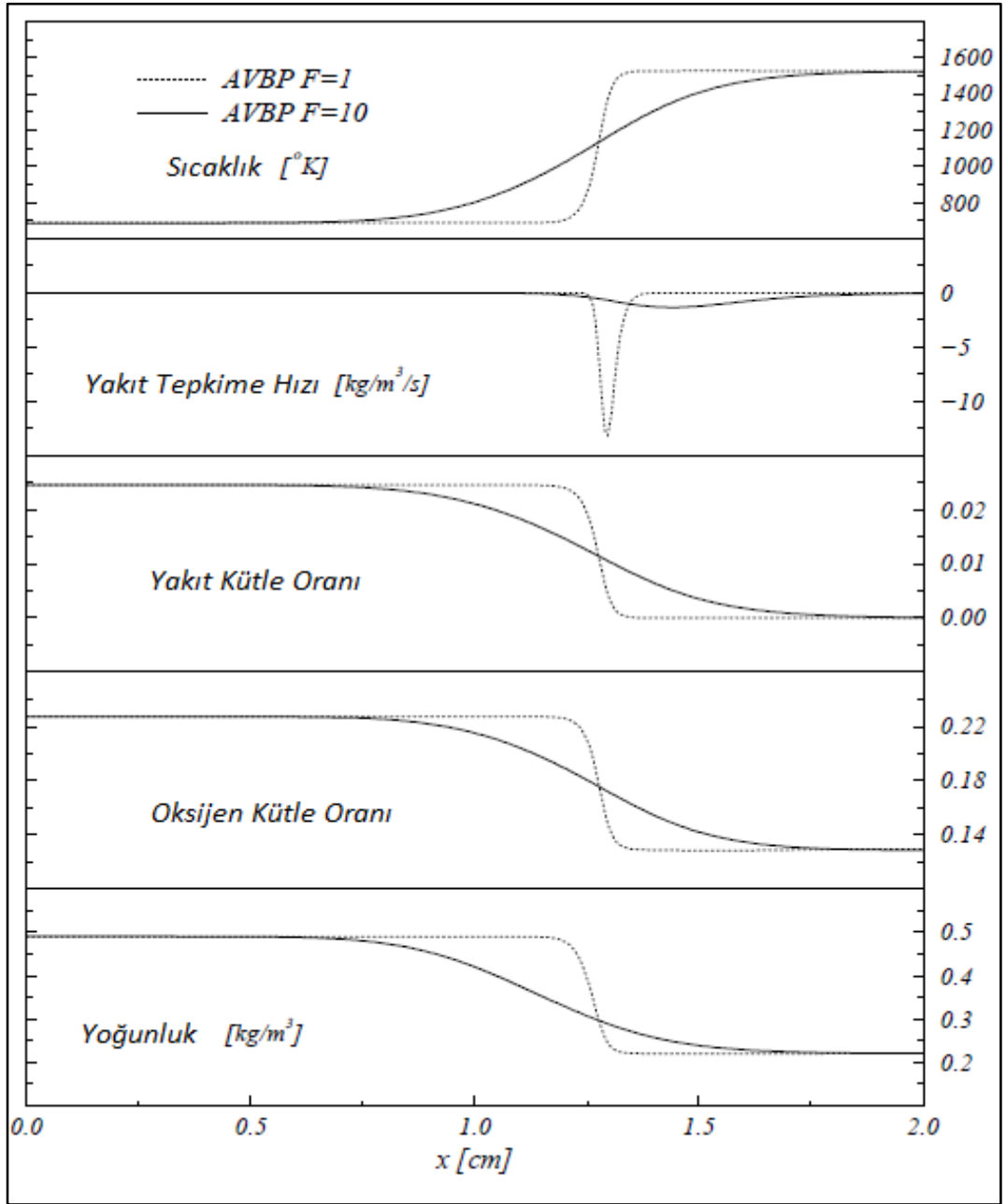
Soldaki şekilde görüldüğü üzere eşdeğerlik oranı 1'e yaklaşırken, GRI-Mech hesaplamalı alev hızı düşmekte, AVBP kodlu hesaplamaya dayalı hız artmaktadır. Sağdaki şekilde de her iki yöntemde de eşdeğerlik oranının 1'e ulaşmasıyla alev sıcaklığı artışı durmuştur.

Tablo 2.8: GRI-Mech ve AVBP ile kalınlaştırılmamış alev F=1 ve kalınlaştırılmış alev F=10 için bir boyutlu termal alev hızı ve alev kalınlığı. T=686K, P=101kPa [Schmitt, 2001].

Alev	Ön-Karışimli (GRI-Mech)	AVBP F=1	AVBP F=10
Alev Hızı $s_L^0$ [cm/s]	36	47.2	46.9
Alev Kalınlığı $\delta_L^0$ [mm]	0.79	0.63	5.59



Şekil 2.29: Basitleştirilmiş kimya ve AVBP ile 686K ve 101kPa'da hesaplanan  $\phi = 0.43$ 'teki tek boyutlu sıcaklık, yakıt tepkime hızı, yakıt kütle oranı, oksijen kütle oranı ve yoğunluk değişimi.



Şekil 2.30: İndirgenmiş kimyasal kinetik ve AVBP ile 686K ve 101kPa’da hesaplanan  $\phi = 0.43$ ’teki bir boyutlu sıcaklık, yakıt tepkime hızı, yakıt kütle oranı, oksijen kütle oranı ve yoğunluk değişimi. Kalınlaştırılmış alev ( $F=10$ ) ve kalınlaştırılmamış alevin ( $F=1$ ) karşılaştırılması.

## 2.4.2. Tepkimeli Akış

Tepkimeli akış, bir akışkanın akışı sırasında kimyasal tepkimelerin meydana geldiği durumdur. Tepkimeli akışları ifade eden temel denklemler Navier-Stokes denklemleri olup kimyasal tepkimeleri, unsurların korunumunu ve değişken-fiziksel

ve kimyasal özellikler gibi kavramları içinde barındırır. Fiziksel olguların geniş bir aralığında geçerlidir. Gaz fazındaki tepkimeli akışlarda, zamana bağlı, kütle, momentum, enerji ve elementlerin korunumunu ifade eden kısmi türevli diferansiyel denklemler kullanılır. Bu denklemlerin yazılması için, çeşitli fiziksel olaylar tanımlanmalıdır. Bunlar, taşınım, kimyasal tepkimeler, difüzyon, radyasyon ve dalga olgularıdır. Kimyasal tepkimeli çalışma alanında başlıca üç nicelik vardır: Bunlar, akış, kimyasal konsantrasyonlar ve sıcaklıktır.

Tepkimeli akış problemleri boyutsuz sayılar kullanılarak karakterize edilebilir. Bunların en önemlileri Reynolds sayısı ve Damköhler sayısıdır.

$$Re = \frac{\text{atalet kuvveti}}{\text{viskoz kuvvet}} = \frac{\rho U l}{\mu} \quad (2.59)$$

$U$ ,  $l$  ve  $\rho$  sırasıyla karakteristik hız, uzunluk ve yoğunluktur. Büyük  $Re$  sayıları türbülanslı akışı ifade eder.

$$Da = \frac{\text{karişma zaman ölçeği}}{\text{kimyasal zaman ölçeği}} = \frac{T_{\text{karişim}}}{T_{\text{tepkime}}} \quad (2.60)$$

$Da > 1$  ise gaz fazında türbülans modelleri kullanılmalıdır.

Kullanılan diğer bir sayı ise Mach sayısıdır.  $Mach > 0.3$  ise sıkıştırılabilirlik etkileri dikkate alınmalıdır.

$$Mach \text{ Sayısı} = \frac{\text{taşınım hızı}}{\text{ses hızı}} = \frac{U}{c} \quad (2.61)$$

Çok modlu ısı transferi nedeniyle tepkimeli akışları karakterize etmede Boltzmann sayısı da gereklidir.

$$Bo = \frac{\text{taşınımla ısı geçişi}}{\text{radyasyon ile ısı geçişi}} = \frac{(\rho U C_p T) \text{ giriş}}{\sigma T^4} \quad (2.62)$$

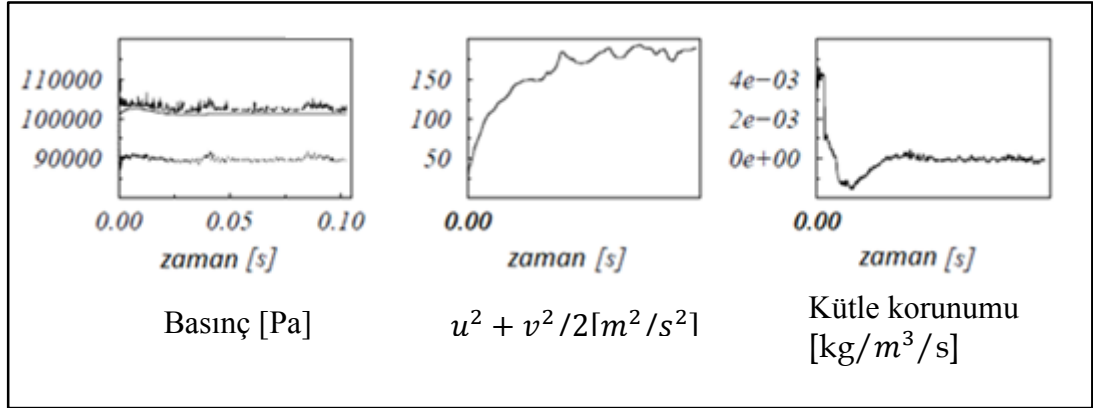
Boltzmann sayısına göre öncelikli mekanizma taşınımdır.  $Bo < 10$  olduğu zaman ısıl radyasyon hesaba katılmalıdır.

### 2.4.3. Tepkimesiz Akış

Sunulan simülasyonlar referans hızı  $u_n = 80m/s$  kullanılarak hazırlanmıştır [Schmitt, 2001].

#### 2.4.3.1. İki Boyutlu Akış

M. Kohlmann ve Alstom Power firması işbirliği ile ön-karışimli yakıcı üzerinde iki ve üç boyutlu akışın aerodinamik testleri gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu asimetrik hesaplamalar Smagorinsky alt-sistem (ağ altı) yüksek geçişli filtre modeli kullanılarak sürdürülmüştür. Çünkü asimetrik yaklaşım akışı eksene sıkıştırır. Yüksek yapay viskozite değerleri gerektirir. Şekil 2.30'da çeşitli akış niceliklerinin zamana göre değişimi gösterilmektedir. Ortalama, maksimum ve minimum basınç (Şekil 2.30 solda) kararlı dengeli hale getirilmiş ve sadece küçük dalgalanmalar göstermektedir.



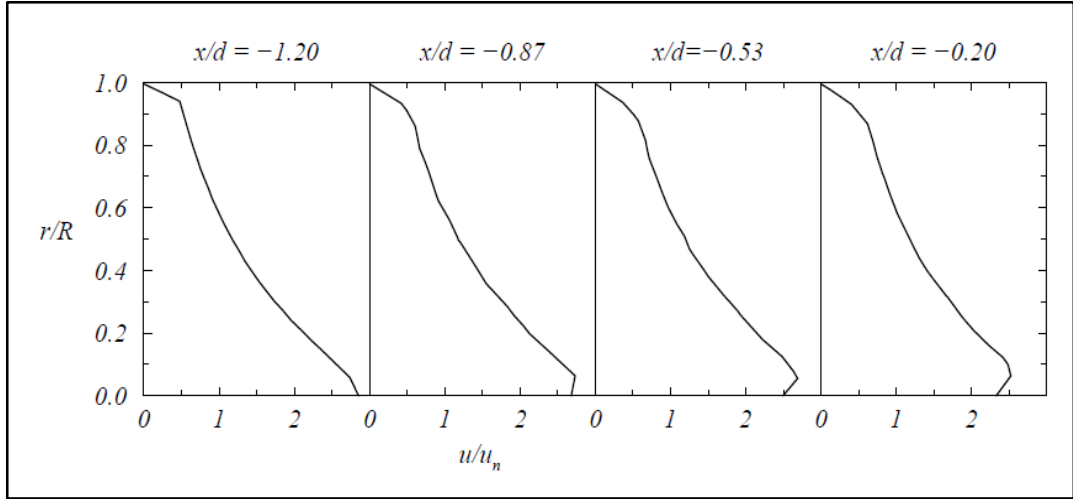
Şekil 2.31:Ortalama,maksimum ve minimum basınçların zamanla değişimi. Asimetrik iki boyutlu hesaplama için hız ve kütle akışı değişimleri.

Şekil 2.31'de ortada görülen hızların karesi sabit değerler etrafında dalgalanmalar gösterir. Yine Şekil 2.30'da sağda görülen kütle korunumuna yaklaşık 40ms sonra ulaşılır. Akışın durağan olmayan türbülanslı karakteri nedeniyle grafiklerde salınımlar belirmiştir. Akış stabilitesi tipik ortalama akış elde etmeyi kolaylaştırır.

Şekil 2.32'de aksenal hız, karışım tüpünün içinde eksen yakınında çeşitli noktalarda kırılır ve eksen üzerinde hız düşüşü meydana gelir. Çünkü aksenal hız



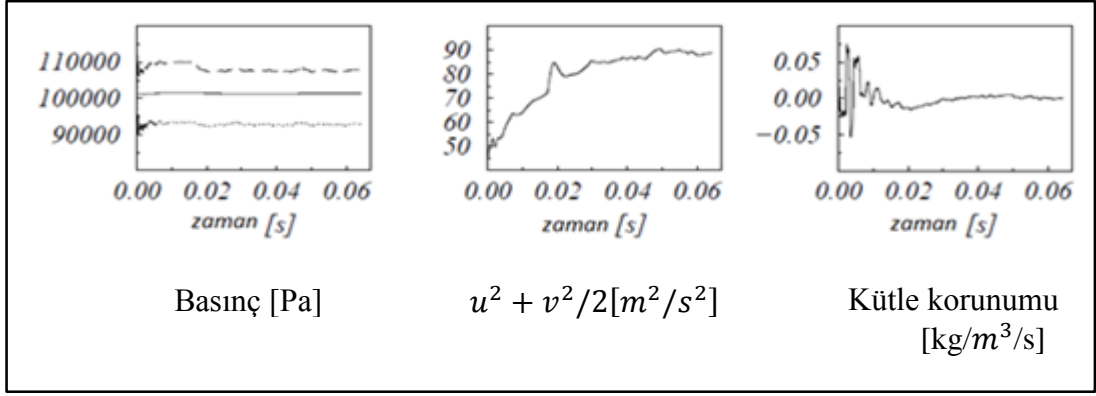
profilleri sirkülasyon bölgesinin pozisyonu için önemlidir. Deneysel veriler ve simülasyon değerleri arasındaki farklılıkların sebebi olarak bu hız değişimi gösterilebilir.



Şekil 2.32: Eksenel hız çeşitli eksenel noktalarda kırılmaya uğrar.

### 2.4.3.2 Üç Boyutlu Akış

İlk hesaplama için, WALE alt-sistem (ağ altı) ölçekli modeli kullanılmıştır. Şekil 2.33'de çeşitli akış niceliklerinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Yine Şekil 2.33'de solda ortalama, minimum ve maksimum basınç dengelenmiş ve sadece küçük salınımlar gösterirler. Aynı şekilde ortadaki hızların karesi sabit bir değere yaklaşır. Kütle korunumuna iki boyutlu hesaplamada yaklaşık 15 ms sonra ulaşılmıştır. Akış stabilitesi tipik ortalama akış elde etmeyi kolaylaştırır.



Şekil 2.33: Basınç, hız ve kütle korunumunun üç boyutlu tepkimesiz hesaplamada zamanla değişimleri.

### 2.4.3.3. Yorumlar

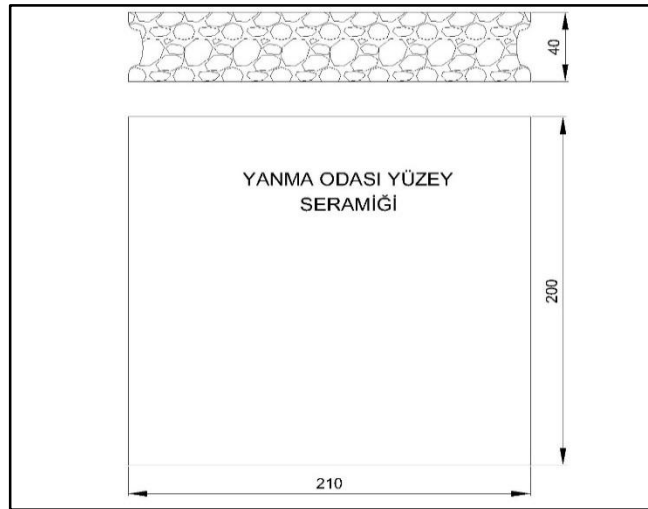
Asimetrik hesaplama sonuçlarının deneysel verilerle yeterince uyuşmadığı görülmüştür. Konum ve sirkülasyon bölgesini etkileyen ana faktör eksen olduğu için, üç boyutlu bir hesaplama daha tutarlı bir sonuç üretmelidir. Bu tutarlılığı artıracaktır. Fakat üç boyutlu hesaplama, doğru eksenel hız profili üretmeye izin vermeyen, akışın ortasındaki kaba ağ sistemi nedeniyle aksaklıklar göstermektedir. Hız profili ve ağ sistemi değişimi sirkülasyon bölgesi tahminini geliştirme konusunda umut verir.

### 3. DAİRESEL YANMA ODALARINDA ÖN KARIŞIMSIZ YANMADAKİ HIZ PROFİLLERİNİN SİMÜLASYONU ve SİSTEME HELMHOLTZ REZONATÖRÜ İLAVE EDİLDİĞİ DURUMDAKİ HIZ PROFİLLERİNİN GÖSTERİLMESİ

Bu deneyde dairesel bir gaz türbini yanma odasındaki alev hız profilleri ile aynı yanma odasına rezonatör monte edildiğindeki hız profillerinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Helmholtz rezonatörü ile ilgili ayrıntılı bilgi bölüm 4.2.3.1’de verilmiştir. Rezonatör ilavesi, dinamik basınç ile alev davranışı ve yanma kararsızlıkları arasındaki ilişkiyi tanımlamada yardımcı olacaktır. Ayrıca, Yamanaka S., Maeda F., Shioda K., Wabuchi K., Tsuchiya T., Okamoo M. tarafından yapılan çalışmada gaz türbinleri yanma odasına rezonatör ilavesinin kararsızlıkları azalttığı görülmüştür.

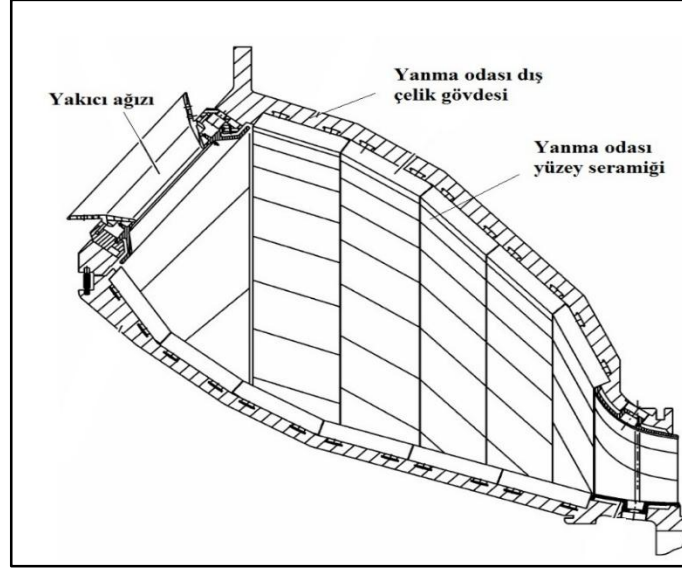
#### 3.1. Katı Modelin Oluşturulması

Yanma odası yaklaşık ölçüleri, bir yanma odası yüzey seramiğinin boyutları baz alınarak hesaplanmıştır. Katı modelleme için SolidWorks programı kullanılmıştır. Ayrıca, modelleme için Siemens AG’den gerekli izinler alınarak Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Santrali Projesi’ne ait dökümanlardan faydalanılmıştır.



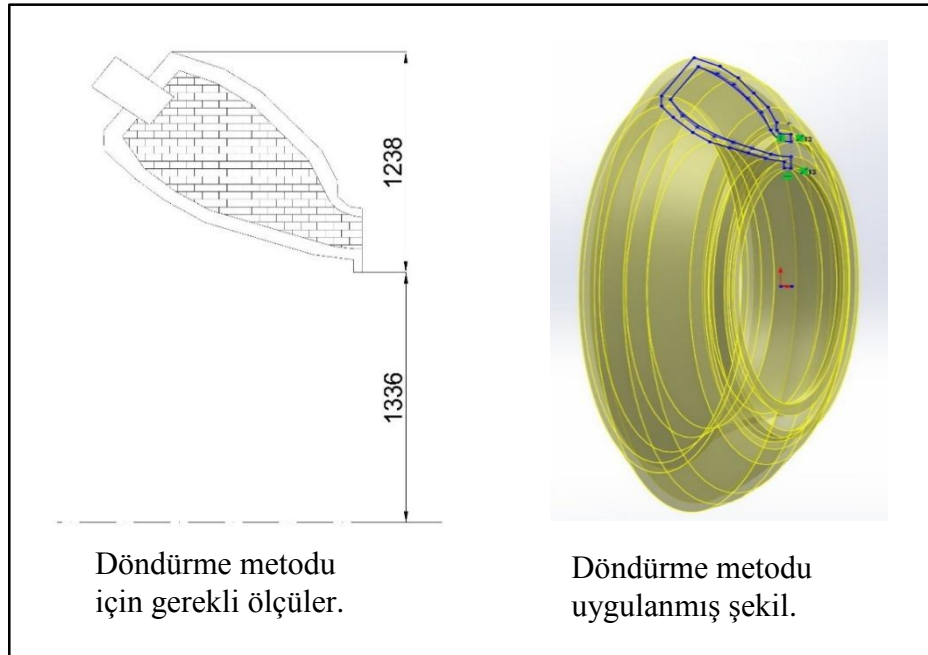
Şekil 3.1: Yüksek sıcaklığa dayanıklı yanma odası yüzey seramiği yaklaşık ölçüleri.

Döndürme tekniği ile oluşturulan modelin ana krokisi seramik boyutuna göre hesaplanmıştır. Oluşturulan modeller Siemens SGT5 4000F modeline aittir.



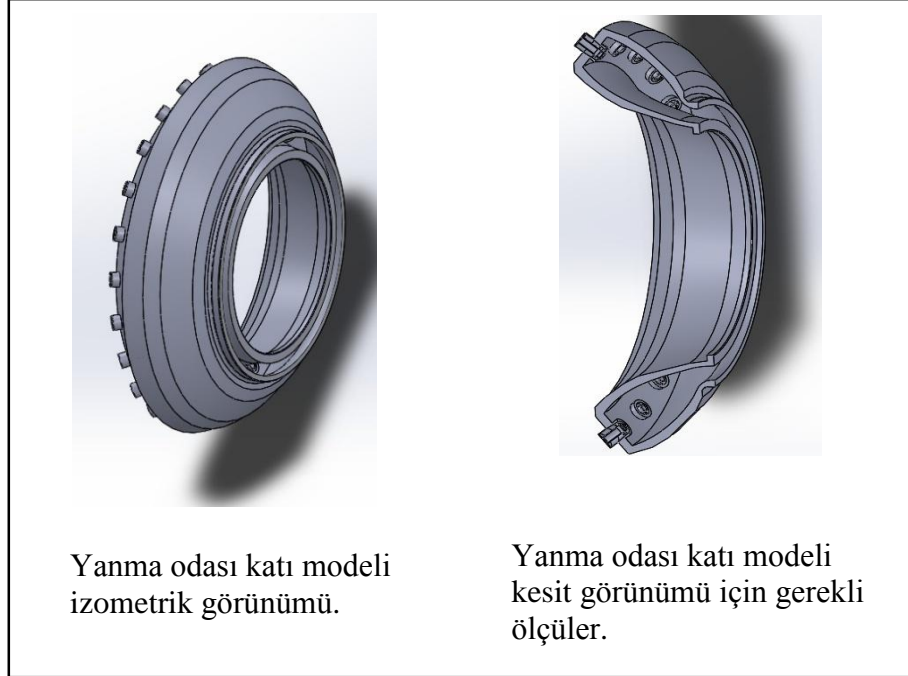
şekil 3.2: Yanma odası ana krokisi için kullanılan şablon.

Türbinin toplam gövde boyutları göz önünde bulundurularak döndürme tekniği için gerekli parametreler oluşturulmuştur.



şekil 3.3: Döndürme tekniği için girilen parametreler.

Katı model oluşturulduktan sonra, akışkanın doldurduğu bölge tanımlanır. Amaçlanan simülasyon ANSYS Fluent programında yapılacaktır. SolidWorks’de tanımlanan akışkan bölgesi, ANSYS programına transfer edilir.

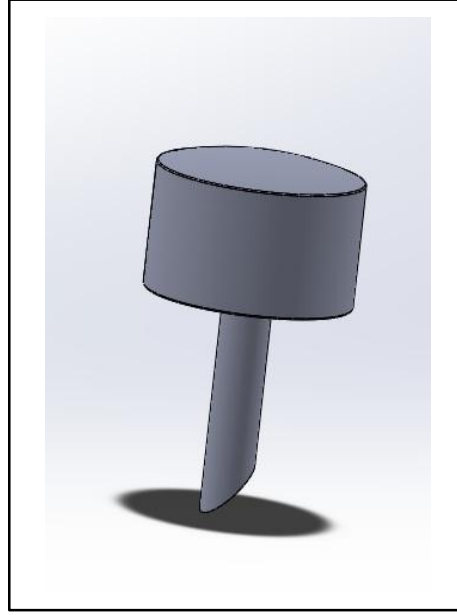


Şekil 3.4: SolidWorks’te oluşturulan yanma odası katı modeli.

Yakıcı çıkışında akışa döner bir hareket kazandırmak için kanatçıklar ilave edilmiştir.



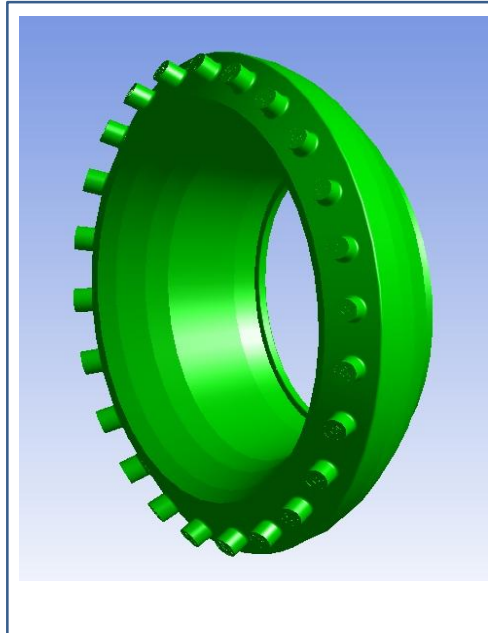
Şekil 3.5 : Yakıcı görünümü.



Şekil 3.6: Rezonatör katı modeli.

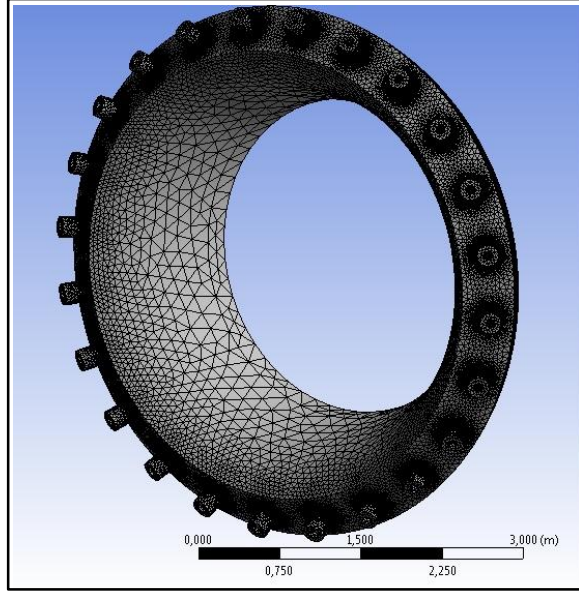
### 3.2. Katı Modelin ANSYS'e Transferi

Design Modeler'a aktarılan, önceden akışkanın dolduracağı bölge olarak tanımlanan katı model, burada da akışkan bölgesi olarak tanımlanır.

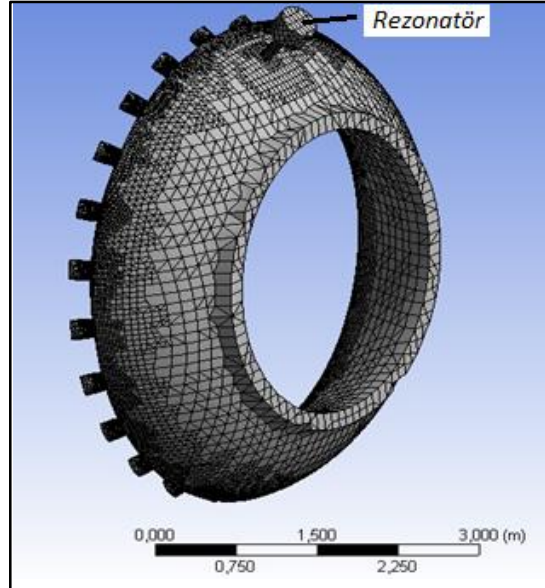


Şekil 3.7: ANSYS'te akışkan olarak tanımlanan bölge.

Akışkan bölgesi olarak tanımlanan modelin ağ yapısı oluşturulur. Ağ yapısının kalitesine göre simülasyon sonucu görselliği değişmektedir. Ayrıca, ağ yapısı oluşturulurken keskin geometrilerden uzak durulmuş ve küçük kesit alanları elimine edilmiştir.



Şekil 3.8: Yanma alanı ağ yapısı.

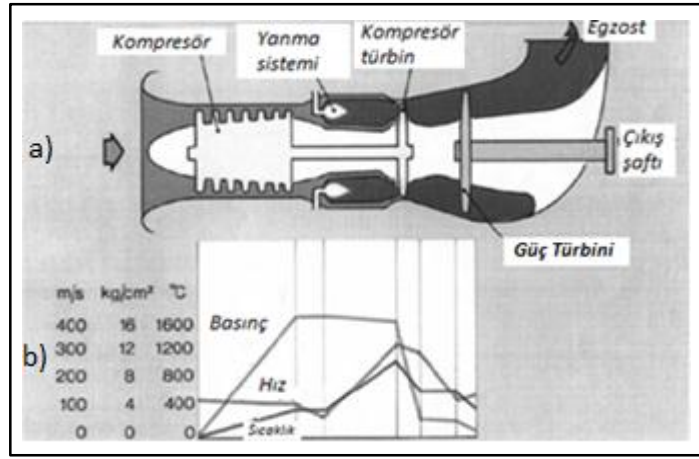


Şekil 3.9: Rezوناتör monte edilmiş yanma odası ağ yapısı.

Ağ yapısında toplam 149752 adet düğüm noktası ve 751659 adet eleman mevcuttur. Ayrıca, FLUENT yazılımının modellemede kullandığı denklemler EK-3'te gösterilmiştir.

### 3.3. Sınır Koşulları

Model olarak ön karışimsız difüzyon yanma kullanılmıştır. Basınç sıcaklık değerlerinin bir kısmı Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Santrali bünyesindeki Siemens SGT5 4000F gaz türbini kontrol sisteminden alınmıştır. Diğer bilgiler yaklaşık olarak teorik gaz türbini bilgilerinden elde edilmiştir.



Şekil 3.10: Gaz türbini P-T-V (basınç – sıcaklık – hız) profili. a) Gaz türbini, b) Basınç-hız-sıcaklık grafiği

Şekil 3.10'da PTV profilinde [Giampaolo, 2006] görüldüğü üzere, yanma odası girişi ile yanma odası çıkışı arasında basınç farkı oldukça azdır. Akışkan sıcaklık ve hızı [ $25^{\circ}\text{C}$ ,  $90\text{m/s}$ ], yanma başladıktan sonra artışa geçip, yanma odası çıkışında yüksek değerlere ulaşmaktadırlar [ $1200^{\circ}\text{C}$ ,  $260\text{m/s}$ ].

Ambarlı çift yakıtlı kombine çevrim santralindeki gaz türbini kontrol sistemi yazılımı olan T3000'den ve buhar türbinleri kontrol sistemi yazılımı olan OVATION'dan alınan hava debisi, yakıt debisi, yakıt sıcaklığı, yakıt basıncı, kompresör çıkış hava sıcaklığı ve kompresör çıkış hava basıncı aşağıdaki gibidir. Değerler KKS sinyal numaraları ile verilmiştir. KKS Almanca bir terim olan (Kraftwerk–Kennzeichen–System) kısaltmalı güç santralleri için tanımlama sistemidir.

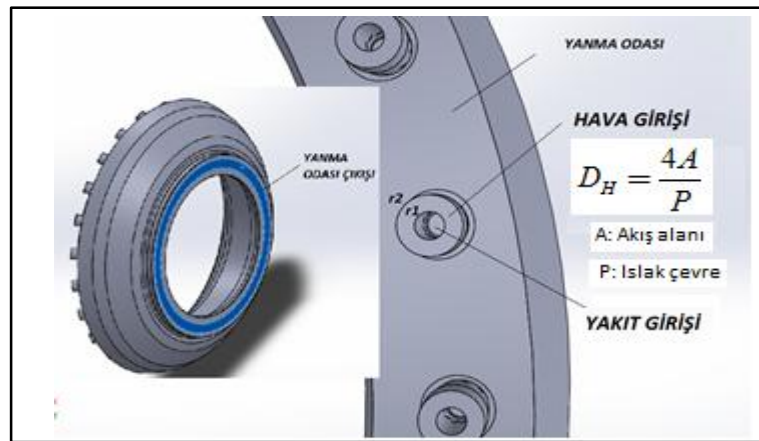


Tablo 3.1: Türbin tam yükteyken alınan değerler (Siemens SGT5 4000F modeline ait).

Tanım	KKS No	Değer
Hava Emiş Debisi	HNY10CF001	656.4kg / s
Doğalgaz Debisi	MBP	14kg / s
Doğalgaz Sıcaklığı	MBP13FT901	333K
Doğalgaz Basıncı	MBP13CP101	3030000Pa
Kompresör Çıkış Hava Sıcaklığı	MBA12CT901	673K
Kompresör Çıkış Hava Basıncı	MBA12FP100	1717000Pa

Oldukça büyük bir debiye sahip olan havanın basıncı, yanma odası basıncını belirleyecektir. O halde yanma odası basıncını 16.5bar olarak kabul edebiliriz. Yanma odası çıkış basıncını da 16bar olarak kayıt ediyoruz. Doğalgaz içinde metan gazının %96'lara varan molar oranı nedeniyle, yakıtı %100 metan kabul edebiliriz.

- Akışkan: Hava + metan
- Model: Ön karışimsız
- Hava girişi: 1717000Pa, 673K, 656.4kg / s, 2.64m ıslak çap
- Yakıt girişi: 3030000Pa, 333K, 14kg / s, 2.4m ıslak çap
- Yanma odası çıkışı: 1616000Pa, 1800K, 0.4m ıslak çap

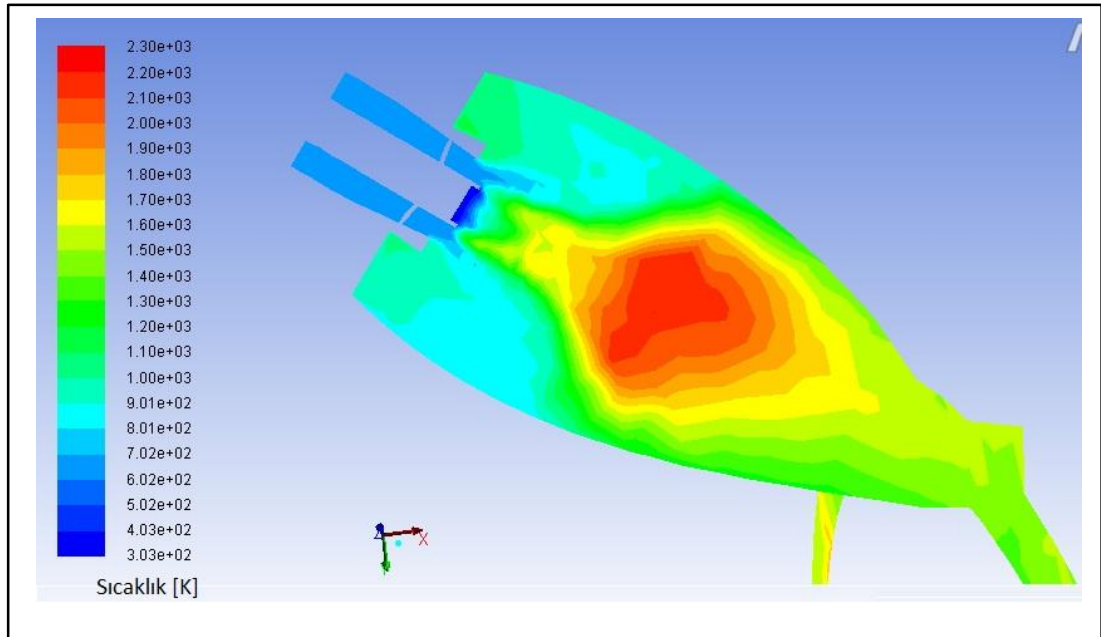


Şekil 3.11: Akış giriş, çıkış bölgeleri ve ıslak çap.

Hesaplamalar iteratif olup 2000 adet iterasyon yapılmıştır. Difüzyon yanma meydana geleceği için simülasyon öncesi 2000 K'e yakın alev sıcaklığı beklenmektedir.

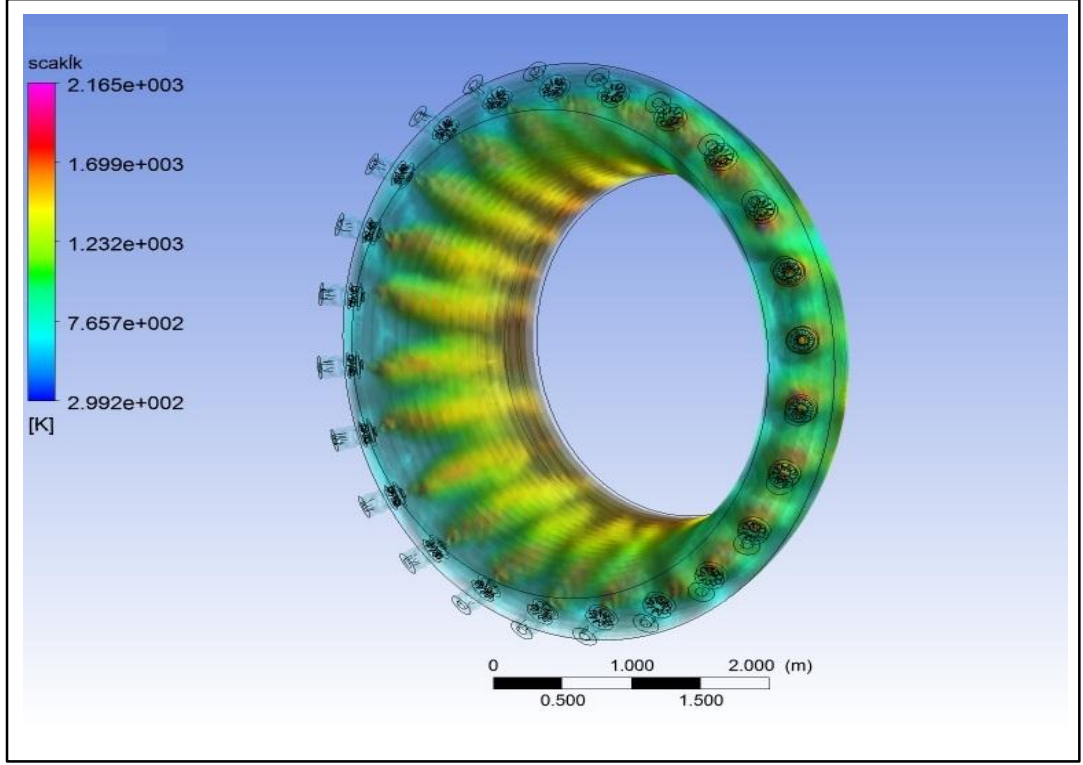
### 3.4. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon sonucu olarak, sıcaklık, yoğunluk ve hız dağılımını gösteren grafikler aşağıdaki gibidir.

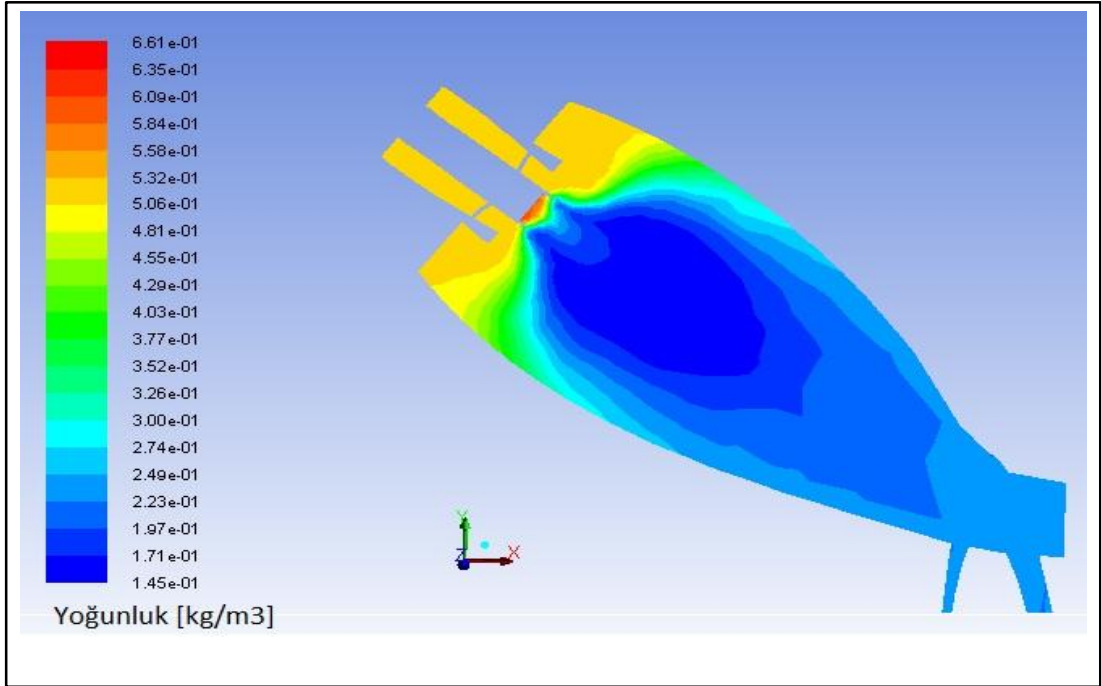


Şekil 3.12: Sistem ekseninden geçen bir düzlemsel kesitte sıcaklık dağılımı.

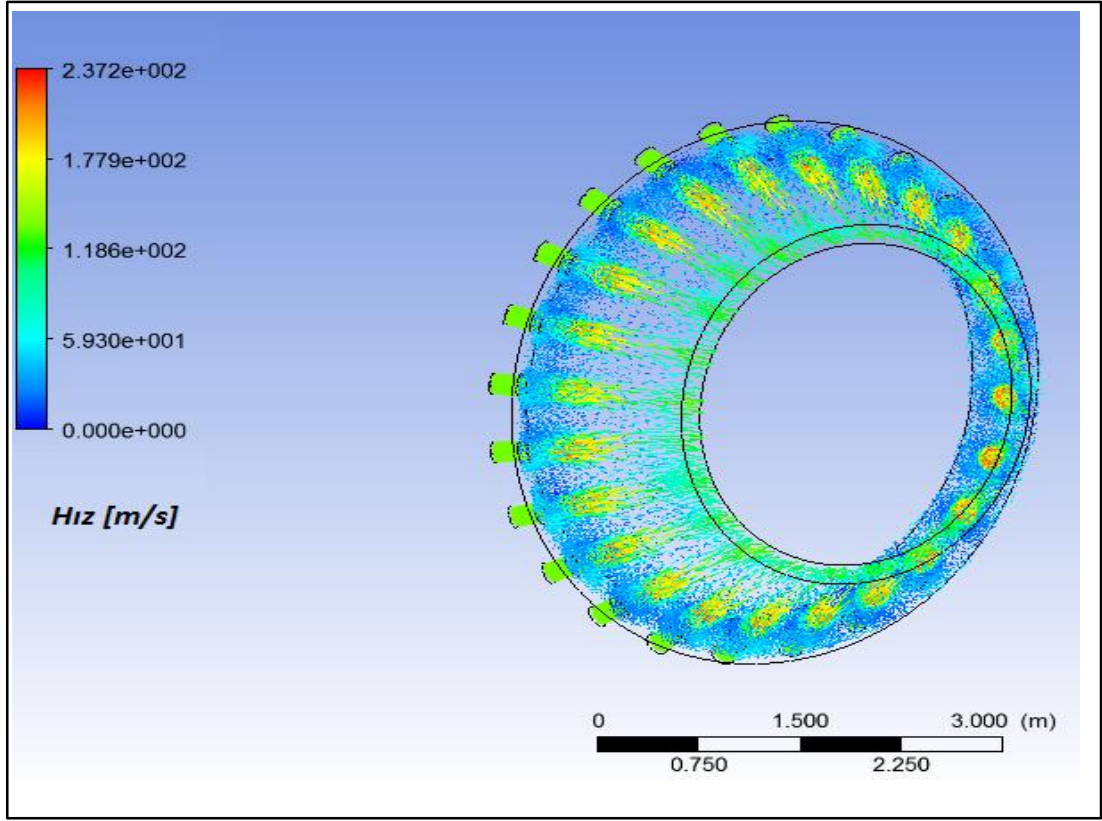
Görüldüğü üzere alev sıcaklığı 2200 K civarındadır. Türbin çıkışında egzost gaz sıcaklığı 873K'dir. Yanma odası üst kısmında sıcaklığın daha yüksek olması sebebiyle yanma odası çıkışındaki üst kısım yüzey seramiklerinin en çok yıpranan bölüm oluğu anlaşılmaktadır.



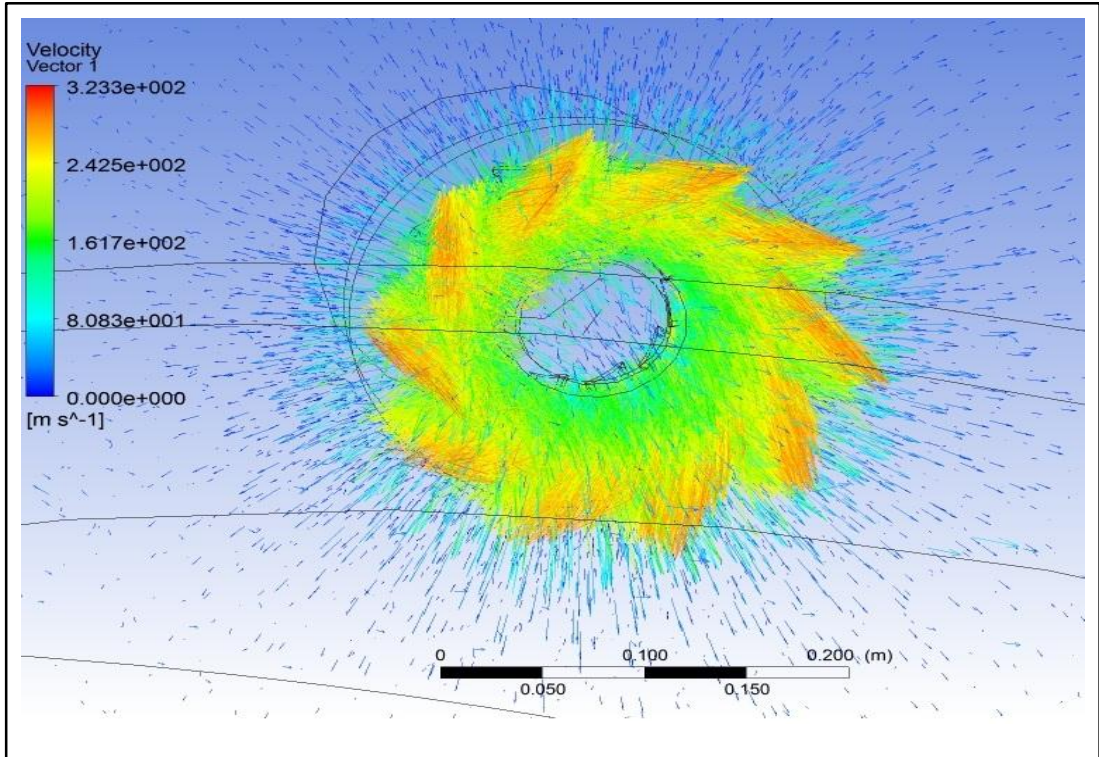
Şekil 3.13: Sıcaklık dağılımının 3 boyutlu görünümü.



Şekil 3.14: Sistem ekseninden geçen bir düzlemsel kesitte yoğunluk dağılımı.

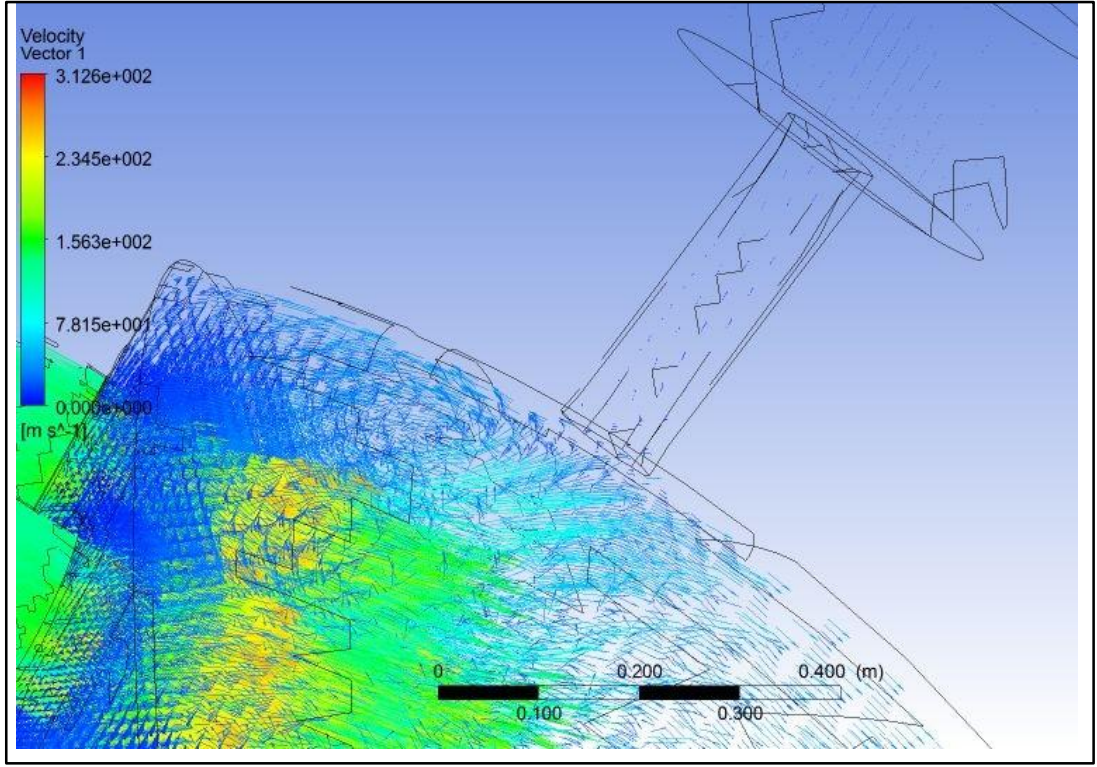


Şekil 3.15: Hız vektörlerinin üç boyutlu görünümü.



Şekil 3.16: Yakıcı çıkışındaki döner akışta hız vektörleri.





Şekil 3.17: Rezonatör monte edildiğindeki hız vektörleri.

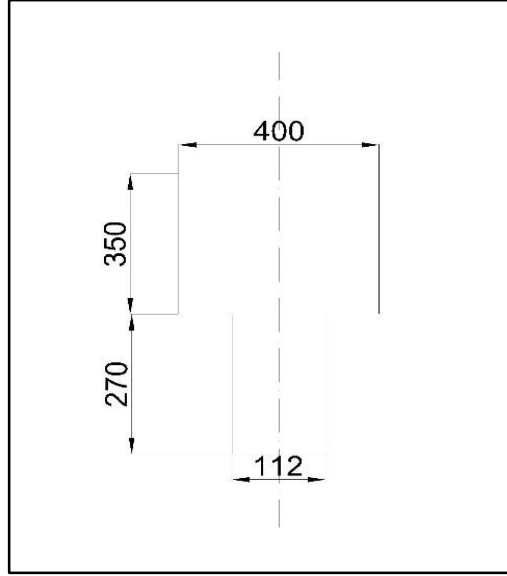
Görüldüğü üzere rezonatör içinde hız çok düşüktür. Rezonatör içindeki hız vektörleri oldukça küçük görünmektedir.

Helmholtz rezonatörü için rezonant frekansı eşitlik 3.1 ile ifade edilir.

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}}$$

(3.1)

- $f$  : frekans
- $c_0$  : ses hızı
- $S$  : giriş kesit alanı
- $V$  : rezonatör hacmi
- $l$  : rezonatör boyun uzunluğudur.



Şekil 3.18: Rezonatörün boyutları.

Ses hızı simülasyon sonuçlarına göre ve denklem (3.2) kullanılarak hesaplanırsa:

$$c_0 = 331.5 + (0.6T)m/s, \quad T[^\circ\text{C}] \quad (3.2)$$

Rezonatöre yakın kısımda sıcaklık ortalama 780 K'dir.

$$c_0 = 331.5 + 0.6(780 - 273) = 635.7m/s \quad (3.3)$$

$$S = \pi r^2 = \pi 0.056^2 = 9.852 \times 10^{-3} m^2 \quad (3.4)$$

$$l = 0.27m \quad (3.5)$$

$$V = \pi r_1^2 h_1 + \pi r_2^2 h_2 = \pi \times 0.056^2 \times 0.27 + \pi \times 0.2^2 \times 0.35 \cong 4.664 \times 10^{-2} m^3 \quad (3.6)$$

$$f = \frac{635.7}{2\pi} \sqrt{\frac{9.852 \times 10^{-3}}{4.664 \times 10^{-2} \times 0.27}}$$

(3.7)

$f = 89.4\text{Hz}$  bulunur. 89.4Hz rezonans frekansıdır.

## 4. YANMA KARARSIZLIKLARININ KONTROL ALTINA ALINMASI

### 4.1. Kararsızlık Kontrolü Yaklaşımları

Bir türbin kontrol sisteminde dengesiz yanmaya karşı en basit kontrol yaklaşımı donanımsal bir değişiklik gerektirmez; türbinin çeşitli işletme koşulları gibi üç aşama arasında yakıt debisinin nasıl programlandığına bakılarak yazılımsal değişiklikler yapılır. Yakıcıdaki yakıt geçişlerinin değiştirilmesi ısı yayılımı dağılımında çeşitlilik meydana getirir. Bu çeşitlilik, kısıtlı-çevrimli genliklerin kontrolünü anlamada kolaylık sağlar. Bu yaklaşım, kararsız yanmayı pasifize etmede temel değişikliklere gitmeden önce yıllarca kullanılmıştır. Rezonansa neden olan arka plandaki olayların anlaşılması, yanmadaki kararsızlığı azaltma yaklaşımlarındaki gelişmelere katkı sağlamıştır. Richards and Janus, Lieuwen ve Zin, yalın ön-karışım ile yanma dengesizlikleri arasındaki bağlantının sistemdeki bir zaman gecikmesinin başlangıcı olabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu zaman gecikmesi, yanma öncesi yakıt hava karışımına erişilebilmesi ihtiyacından kaynaklanır. Karışma bölgesinde istenilen karışımın sağlanması için “kalış süresi” diye adlandırabileceğimiz bir süre gereklidir. Yanma bölgesinden gelen basınç dalgaları ön-karıştırıcı içinde hava akış modülasyonları meydana getirir. Ardından yakıt-hava oranı (YHO) değişikliklerine zemin sağlanır. Isı yayılımında salınımlara yol açan YHO bozulması, ön-karıştırıcı vasıtasıyla yanma odasına taşınır. Eğer sağlanan yakıt oranı sabitlenebilirse, akış hızı dalgalanmaları ile YHO dalgalanmaları arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{YHO'}{YHO} = -\frac{u'}{\bar{u}} \quad (3.8)$$

Burada  $YHO'$  YHO salınımı,  $\overline{YHO}$  ortalama YHO,  $u'$  hız salınımı ve  $\bar{u}$  ortalama hızdır. Lieuwen ve Zin ilave olarak, geçişteki düşük Mach sayısı nedeniyle ( $M \sim 0.05$ ), küçük basınç dalgalanmalarının hava-yakıt oranı karışımlarında ciddi değişikliklere yol açtığını ifade etmişlerdir.

Bu ayrıca aşağıdaki eşitlikten de görülebilir.

$$\frac{u'}{U} = \frac{1}{\gamma M} \frac{p'}{p} \quad (3.9)$$

Burada  $u'$  hız salınımı,  $U$  ortalama hız,  $\gamma$  ısı kapasite oranı,  $M$  Mach sayısı,  $p'$  basınç salınımı ve  $p$  anlık statik basınçtır. Ayrıca, yakıcı içerisindeki statik basınçta oluşacak %1'lik salınım, ön-karıştırıcıda %15'lik bir YHO salınımıyla sonuçlanabilir. Diğer bir ifadeyle yakıcı içindeki bir basınç dalgalanması ön-karıştırıcı çıkışında YHO dalgalanmasına öncülük eder ve ardından yanma bölgesindeki ısı yayılımını değiştirir. YHO salınımlarıyla ilişkili ısı yayılımı orjinal basınç dalgalanmalarıyla bir faz içindedir, salınım yapan ısı yayılımı yanma odasındaki orjinal basınç dalgalanmalarını artıracaktır. Bu özel yanma kararsızlığı geri-beslemesi Richards-Lieuwen mekanizmasında yer alır (DLE).

Diğer bazı potansiyel mekanizmalar ön-karışimli sistemlerde yanma dengesizliğine öncülük edebilir. Fakat yakıt hava karışım oranı salınımlarının olmadığı durumlardaki diğer etkenler ya önemsenmeyecek kadar küçük etkilidir, ya da doğrudan sistemi rahatsız etmemektedir. Sonuç olarak Richards-Lieuwen mekanizması kuru-düşük emisyonlu sistemli modern gaz türbinleri için geçerli bir teoridir. Şekil 4.1'de pratik yalın ön-karışimli sistemlerde var olduğu düşünülen anahtar yanma kararsızlığı mekanizmaları sunulmuştur. Basitçe açıklanırsa, büyük genlikli basınç dalgalanmaları, ısı yayılımı salınımlarıyla da üretilebilir veya kısık türbinle ilişkili basınç gradyentleri ile yoğunluk değişimleriyle ortaya çıkar. Ön-karıştırıcılardan kaynaklanan YHO değişimleri birkaç yolla basınç dalgalanmaları oluşturur. İlk olarak, salınım yapan YHO, ısı yayılımındaki değişimlerin doğrudan sebebidir. Ön-karıştırıcıda zamanla değişen YHO, yakıcı içinde zamanla değişen yoğunluğa, zamanla değişen alev yüzeyine ve zamanla değişen alev yanma hızına neden olacaktır. Son yıllarda kuru-düşük emisyonlu sistemlerde YHO dalgalanmalarını aktif kontrol yöntemleri kullanarak yok etmenin yollarını bulmak adına önemli bir adım atılmıştır. Rolls-Royce'da geliştirilen analog akustik sönümleme tipi bir araç, ön-karıştırıcılarda YHO salınımlarını sönümlemektedir. Bu tip sönümleme, kararsızlığa neden olan çok sayıdaki geri besleme döngülerini zayıflatma potansiyeline sahiptir. Pasif dizayn çözümlerindeki ana fikir ise basınç geri besleme döngülerinin kuvvetini kırmaktır. Hangi mekanizma olursa olsun, rezonatör gibi akustik zayıflatma araçları amaçlarına ulaşmıştır. Çünkü basınç dalgalarının sağlamlığı düşürülür.



## 4.2.Aerodinamik Etkileri Minimize Etme Çalışmaları

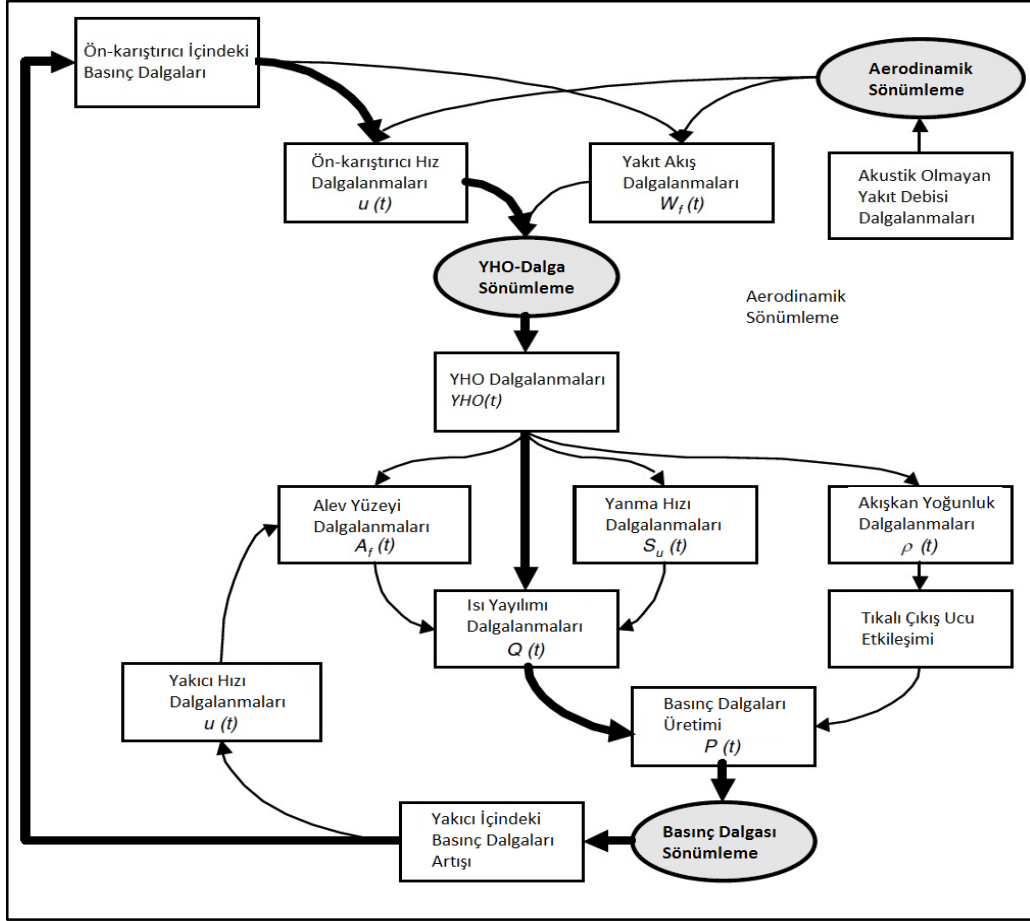
### 4.2.1. Yakıt Kademelenmesi

Yakıcı uzunluğu boyunca olan ısı yayılımındaki çeşitlilik, yakıcının boylamsal rezonans modlarının genliğini kontrol etmek için verimli bir mekanizma sağlar. Kısıtlı-çevrim davranışlarının göstergeleri elde edilerek, özel koşullar altında her bir kararsız modun genliklerini tahmin eden bir kontrol aracı tarafından kullanılabilen ampirik korelasyonların geliştirilmesi ön görülmüştür. Bu korelasyonun geliştirilmesinde, basınç dalgalanmalarının boyutsuz genliğinin ısı yayılımı bölgesinden geçen sıcaklık oranının bir fonksiyonu olduğu kabul edilir. Eksenel üç kademeli yakıcıda, ısı yayılımı olan üç bölge vardır (Şekil 4.2). Bu da basınç dalgalanmalarını etkileyecek üç farklı sıcaklık oranı olduğu anlamına gelir. Yakıcının bütünündeki ısı yayılımının da belirleyici bir faktör olduğu kayıtlara geçmiştir. Dolayısıyla, her bir kararsız mod için kullanılan korelasyonların fonksiyonel formu aşağıdaki gibidir:

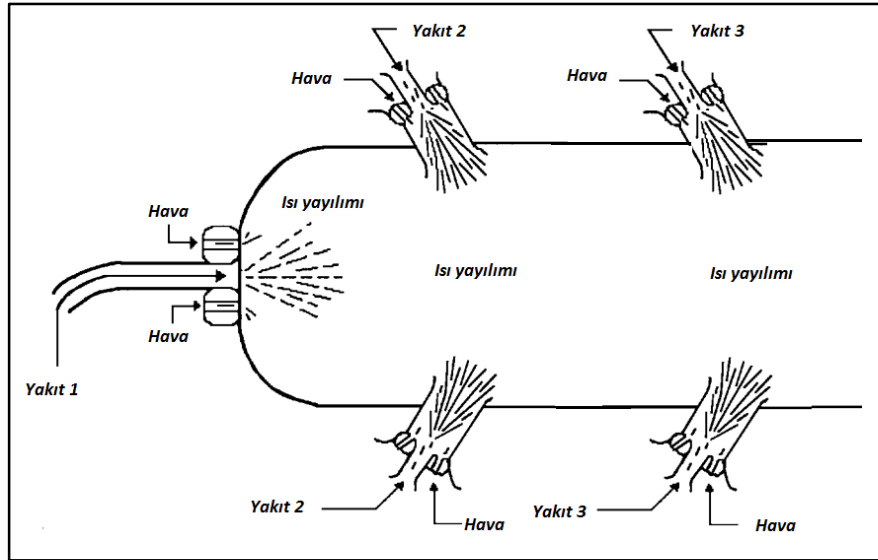
$$\frac{\Delta p}{P} = K_1 + K_2 P_3^A \sum_{i=1}^N \left[ \frac{T_i - T_3}{k_i} \right]^{\alpha_i}$$

(3.10)

Burada  $\Delta p$  kısıtlı çevrim basınç salınım genliği,  $P$  ortalama statik basınçtır.  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $A$ ,  $k_i$  ve  $\alpha_i$  değerlerinin hepsi verilere uyarlanan sabitlerdir. 1'den N'e kadar olan  $i$  indisi ise yakıcı içindeki her bir yanma bölgesidir. Keyfi sabitler, stabil olmayan her bir modun veri grubunun lineer regresyonu ile elde edilmiştir. Bu yaklaşım sadece genliklerin tahmini imkânını vermez, ayrıca yanma rezonansının frekansını tahmin etme fırsatını da sunar. Üç kademeli ön-karışimli bir yakıcı emisyon gereksinimlerini karşılarken basınç dalgalanmalarını kontrol etmek için yakıt bölme seçeneği sunmuştur.



Şekil 4.1: Yanma kararsızlığını sürdüren mekanizma ve kararsızlığın bastırılması. Kalın çizgi karışım ile uyarılmış kararsızlıkları gösterir.

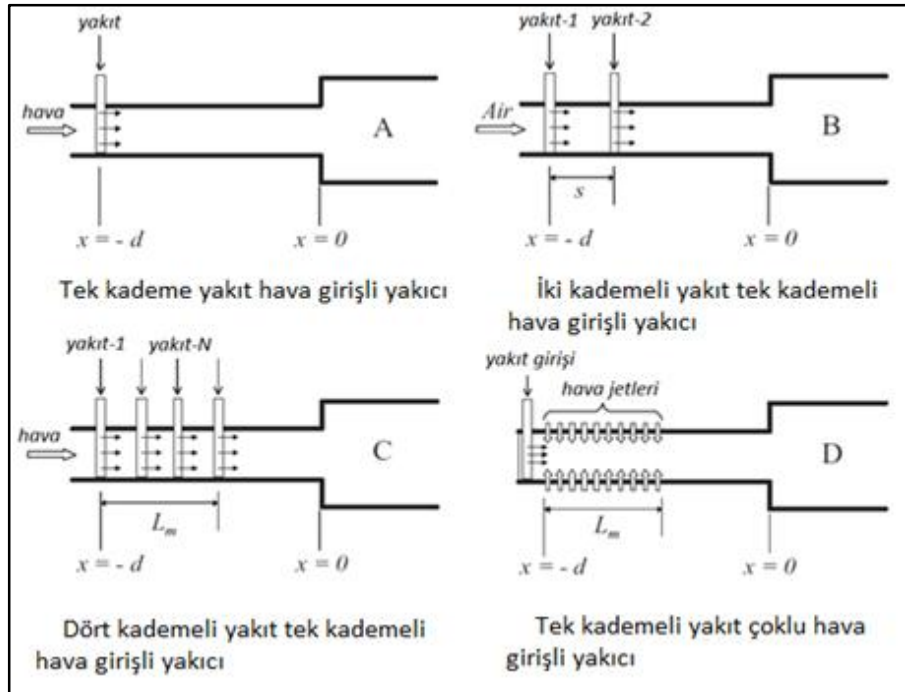


Şekil 4.2: Eksenel 3 kademeli yakıcı.

## 4.2.2. Yakıt Hava Karışımı Oranı Dalgalanmasının Sönümlenmesi

Daha önce bahsedildiği gibi Richards-Lieuwen mekanizması modern kurudüşük emisyonlu sistemlerin baskın kararsızlık kaynağıdır. Bir basınç dalgası ve ilişkili olduğu YHO salınımının üretilmesi arasındaki sonlu zaman gecikmesi bu mekanizmanın kalbidir. Hava veya yakıt akışı içindeki karmaşa yakıt enjeksiyonu anında oluşur ve bu bozucu etkinin yanma bölgesine taşınması için de sonlu bir zaman gereklidir. Bu ilerleyiş zamanı yakıt hava karışımının olduğu periyodu içerir.

Yakıt hava karışım süresi keyfi olarak düşürülemez. Çünkü düşük emisyonların sağlanması tamamlanmış bir karışıma bağlıdır. Aynı şekilde bu süre gereğinden çok uzatılamaz. Çünkü ön-karıştırıcı içinde kendiliğinden ateşleme olabilir. Eğer, kendiliğinden ateşleme söz konusu olmasaydı ve kalış zamanı uzatılırdı karışım sırasında yok edilen dalgalanmalar ön-karıştırıcı çıkışındaki kararsız modları engellerdi. Sonuç olarak, karışımındaki zamana bağlı yeterlilikler sağlanmış olurdu. Çeşitli örnek enjektör yapıları üzerinde testler yapılmıştır. Deneylerde elektrikli ölçü aleti ile basınç dönüştürücüsü kullanılarak hareketli akış şartları görüntülenmiştir ( $u', p'$ ). Alev iyonizasyon dedektörü ile yakıt konsantrasyonundaki anlık değişiklikler gözlenmiştir ( $YHO'$ ). Yakıt olarak etilen ve hava kaynağı olarak da bir fan kullanılmıştır.



Şekil 4.3: Değerlendirilen ön-karıştırıcı konseptlerinin şematik çizimleri.

C dizaynındaki gibi N adet yakıt girişi düşünülürse, her bir konum ( $d_k$ ) bir kuvvete sahiptir ( $s_k$ ). Türbülans ayrılması etkileri yok sayılarak, Lieuwen–Richards mekanizmasına ait aşağıdaki eşitsizlik sağlandığı zaman sistemin yükseltme eğilimine yani amplifikasyona sebep olduğu görülür.

$$\text{Re} \left[ \sum_{k=1}^N s_k e^{-i \left( wd_k \left( \frac{1}{U} + \frac{1}{c} \right) - \frac{\pi}{2} \right)} \right] \geq 0$$

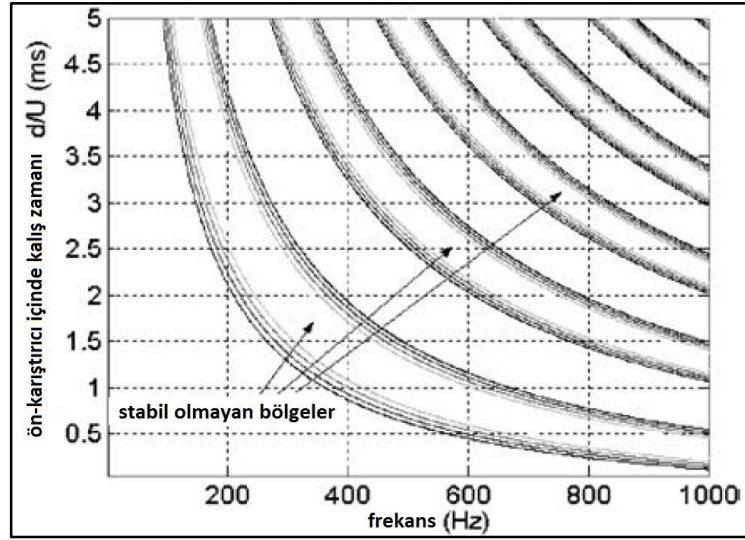
(3.11)

Burada  $w$  açısal hız,  $c$  ses hızıdır,  $\bar{u}$  ortalama hızdır. Her bir konum bir yakıt enjeksiyon debisine sahiptir ( $s_k$ ) ve bir pozisyonda yerleştirilmiştir ( $d_k$ ). Bu eşitlik, karışımın  $x = 0$  noktasında tüketildiğini kabul eder. Denklem 4.1 baz alınarak YHO dalgalanmalarındaki orantılı değişimi hız dalgalanmalarındaki orantılı değişime bölersek  $a$  değerini elde ederiz. Bu parametre farklı karışım dizaynlarını yorumlamada çok kullanışlıdır.

$$\alpha = \left( \frac{YHO'_{rms}}{YHO} / \frac{u'_{rms}}{u} \right)$$

(3.12)

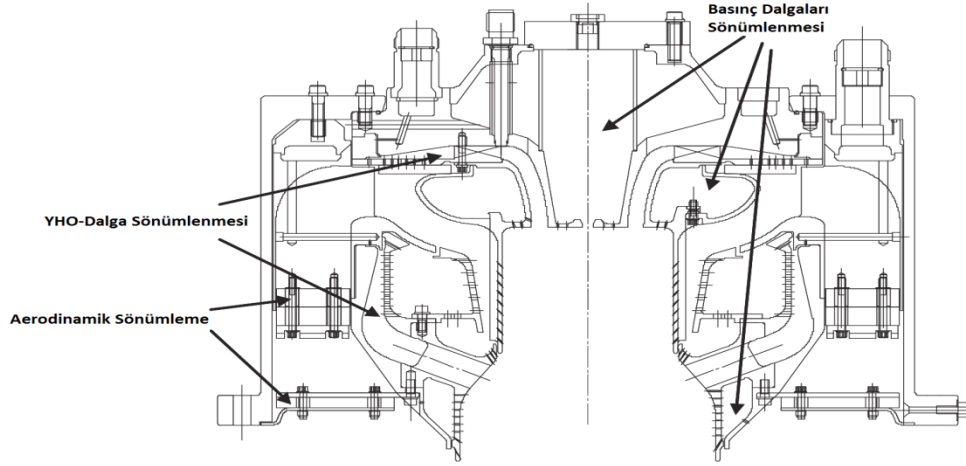
İyi bir karışım da  $a$  sifira yaklaşır. Çünkü pay kısmının sifira yaklaşması demektir ve pay kısmı sifir ise YHO'da değişim yok demektir. Sabit bir karışım da stabil olmayan modları önler.



Şekil 4.4:  $d/U$  değıştikçe basınç dalgalanmalarındaki pozitif artış bölgeleri.

### 4.2.3. Akustik Rezonatör

Bir nehir motoru üzerinde uygulanan rezonatör örneği incelenmiştir. Uygun şekilde dizayn edilmiş ve iyi yerleştirilmiş bir basınç dalgalarını zayıflatıcı mekanizma, bütün yanma dengesizliklerine yol açan geri beslemelerin kuvvetini azaltamasa da, hatırı sayılır iyileştirme sağlamıştır. Ön-karıştırıcılardaki YHO dalgalanmalarını yok etmek için büyük gayret gösterilse de, birçok basınç dalgaları zayıflatıcı alet yakıcı yapısına dahil edilmiştir. Bu aletler, Richard- Lieuwen mekanizması dışındaki potansiyel etkilere karşı önlem olarak konulmuştur. Basınç dalgaları, zayıflatıcı mekanizmanın geliştirilmesi, uyarılan akustik modların anlaşılmasını gerektirir. Modun frekansı bu mekanizmanın boyutunu belirler (küçük frekanslarda daha büyük boyut gerekir). Modun şekli de dalga düşürücünün konumunu belirler. İncelenen motorun yakıcısının frekanslarının mod şekillerinin belirlenmesi kolaydır, çünkü geometri silindirik kavitasyona bakılarak belirlenebilir. Bu kısmın çapı uzunluğun %20'si kadardır. Buna ek olarak, çörek şekilli rezonatör geliştirilmiş ve yanma sistemlerinden önce akustik-hoparlörlerde optimize edilmiştir. Rezonatörün yanma sistemleri içindeki konumuna dikkat edilmiştir. Böylece rezonatör motor etrafındaki atmosfer koşullarından etkilenmez. Ayrıca bütün rezonatörler yanma tüpüne doğrudan bağlanır. Çünkü bu sistemler yanma odalarına mümkün olduğunca yakın olmalıdır. Önemli sayıda frekans birçok boşluk ile çevrelenmiştir. Yanmadaki karasızlıklar yanma gürültüsü olarak da sonuçlanabilir.



Şekil 4.5: Modifiye edilmiş iki kademeli kuru-düşük emisyonlu türbin yanma sistemi kesit görüntüsü.

Uluslararası literatürde “humming” olarak adlandırılan bu akustik modların etkileri de oldukça yıpratıcıdır. Bu konu üzerinde ses bilimi alanında önemli yer tutan Helmholtz rezonatörü detaylı bir biçimde açıklanacaktır.

#### 4.2.3.1. Helmholtz Rezonatörü

Helmholtz rezonatörü, yanma kararsızlıkları pasif kontrolünde kullanılmaktadır ve akustik sönümlenme araçları kategorisindedir. Açık ucu sayesinde içine giren akışkan bir süre sonra dışarı itilir ve böylece bir sıkışma-genleşme meydana gelir.  $l$  uzunluğunda ucu atmosfere açık  $V$  hacimli Şekil 4.6’da  $S$  kesiti görülen bir kap düşünölsün. Kap içindeki yoğunluk ve basıncın yalnızca zamana bağlı olduğu ve konumla değişmediği kabul ediliyor ( $p'_{iç}(t), \rho'_{iç}(t)$ ). Kanal içindeki basınç  $p'(x,t)$  şeklinde gösterilmektedir. Basınç ve yoğunluk ortalama atmosferik değerlerine ( $p_0, \rho_0$ ) göre doğrusallaştırılmıştır. Aşağıdaki denklemler Notre Dame Üniversitesi yayınlarından alınmıştır.

$$p_{iç}(t) = p_0 + p'_{iç}(t) \quad (3.13)$$

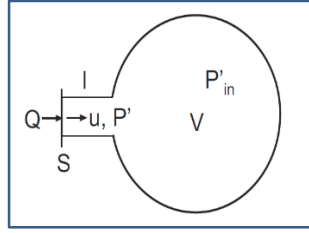
$$\rho_{iç}(t) = \rho_0 + \rho'_{iç}(t) \quad (3.14)$$

$$p(x,t) = p_0 + p'(x,t)$$

(3.15)

Kanal içinde hareket eden havanın hızı ise  $u$  olarak kabul ediliyor ve kap içine giren hava sıkışırken, çıkan hava ise genişlemektedir.

$$p'_{iç}(t) = c_0^2 \rho'_{iç} \quad \text{ve} \quad c_0 \text{ ses hızıdır.}$$



Şekil 4.6: Helmholtz Rezonatörü.

Kaba giren kütle debisi :  $\dot{m} = \rho_0 S u$

$$(3.16) \quad \text{- Sonuç olarak } \rho'_{iç}, \frac{d\rho'_{iç}}{dt} = \frac{\dot{m}}{V} \text{ oranıyla artar.}$$

İntegrasyon sonucu aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\rho'_{iç} = \frac{1}{V} \int_0^t \dot{m} dt \quad (3.17)$$

Basıncın yoğunluk ile ifade edilişi denklem 4.11'deki gibidir.

$$p'_{iç} = c_0^2 \rho'_{iç} = \frac{c_0^2}{V} \int_0^t \dot{m} dt \quad (3.18)$$

Hız  $u$  ve basınç  $p'$  momentum eşitliği ile ilişkilendirilirse denklem 4.12 bulunur.

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p'}{\partial x} - F \quad (3.19)$$

Burada  $F$  direnç kuvveti olup sürtünmeden ve radyasyon etkilerinden kaynaklanabilir. Bu nedenle  $F = \frac{R u}{l}$  eşitliği kabul edilir. Burada  $R$  direnç kuvvetidir.

Akış niceliklerinin harmonik olarak zamana bağlı olduğunu kabul edersek, örneğin

$$p' = \bar{p}' e^{i\omega t} \text{ ise,}$$

$$i\rho_0 w u + \frac{R u}{l} = -\frac{\partial p'}{\partial x} \quad (3.20)$$

Kütle korunumu hava akış hızının  $x$ 'den bağımsız olduğunu söyler.

$$p'_{i\zeta} = p'_0 - i\rho_0 w l u - R u \quad (3.21)$$

$p'_0$  kanal içindeki basıncı ifade eder.

$$p'_0 = p'_{i\zeta} + i\rho_0 w l u + R u = \frac{c_0^2}{V} \int_0^t \dot{m} dt + i\omega l \frac{\dot{m}}{S} + \frac{R}{\rho_0 S} \dot{m} \quad (3.22)$$

Türev alınarak denklem 4.16 elde edilir.

$$\frac{dp'_0}{dt} = i\omega p'_0 = \dot{m} \left( \frac{c_0^2}{V} - \frac{\omega^2 l}{S} + i \frac{\omega R}{\rho_0 S} \right) \quad (3.23)$$

İç direnç denklem 4.17'deki gibidir.

$$Z = \frac{p'}{u} = R - i\rho_0 c_0 \left( \frac{c_0 S}{\omega V} - \frac{\omega l}{c_0} \right) \quad (3.24)$$

Boyutsuz formda direnç kuvveti  $R$  cinsinden yazılırsa denklem 4.19 bulunur.

$$\zeta = \frac{Z}{\rho_0 c_0} = \tilde{R} - i \left( \frac{c_0 S}{\omega V} - \frac{\omega l}{c_0} \right) \quad (3.25)$$

$\tilde{R} = R / \left( \frac{\rho_0}{c_0} \right)$  yazılırsa,

$$w_r = c_0 \sqrt{\frac{S}{V l}} \quad (3.26)$$



$$\zeta = \tilde{R} + i \frac{wl}{c_0} \left( 1 - \left( \frac{w_r}{w} \right)^2 \right) \quad (3.27)$$

eşitliği elde edilir.

Rezonans reaktans  $I_m(\zeta) = 0 \Rightarrow w = w_r$  için rezonansın olduğu frekans aşağıdaki gibi verilir.

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad (3.28)$$

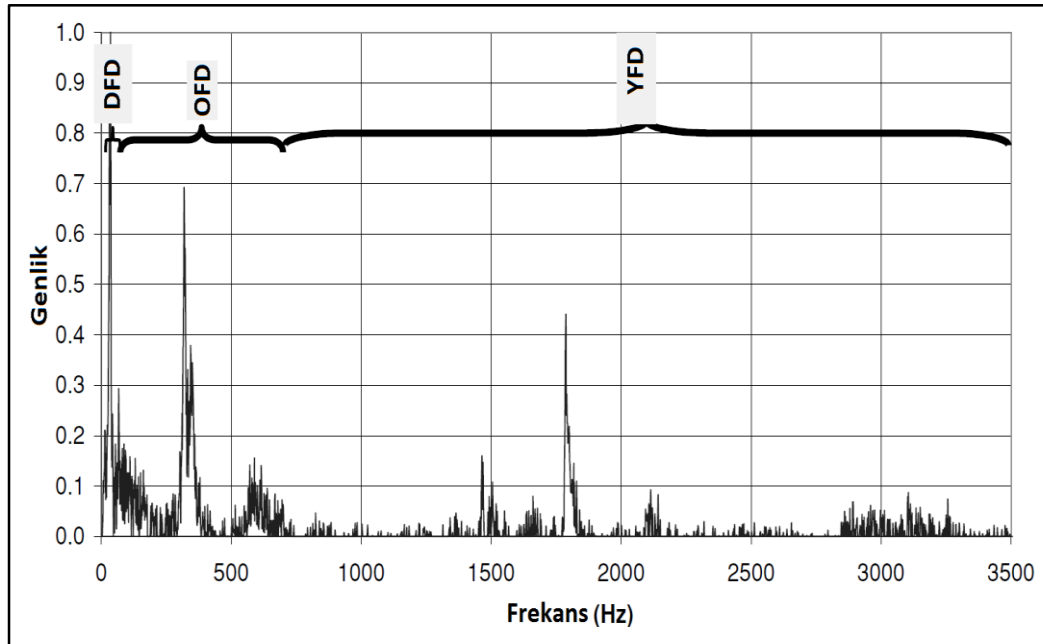
#### 4.2.4. Aerodinamik Sönümlenme Araçları

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi yakıcı basınç dalgalanmalarına neden olan önemli mekanizmalardan biri de sisteme giren, ön-karıştırıcıdan geçen ve yanma bölgesine iletilen akışkanın akış yönünün tersi istikamette olan hız dalgalanmalarıdır. Yakıcıyı kaplayan türbülanslı akış bu olayın potansiyel kaynağıdır. Ön-karıştırıcılara taşınan büyük ölçekli girdaplar yanma prosesini rahatsız eden önemli hız değişimlerine neden olabilir. Bu mekanizmanın diğer mekanizmalara nazaran ne kadar önemli olduğunu değerlendirmek zor olsa da, önleyici bir yaklaşım geliştirilmiştir. Ortaya çıkan bu salınımların mümkün olduğu kadar sönümlenmesi öngörülmüştür. Birçok hava akış aracı test edilmiş ve tüm yapısal parametreleri optimize edilmiştir. Tüm bu araçlar Şekil 4.5’te görüldüğü gibi ön-karıştırıcı kısmına yerleştirilmiştir. Bazı konfigürasyonlar metal köpük, bal peteği gibi bir takım ağısı yapıya sahip materyaller ile test edilmiştir. Tüm malzemeler, gözeneklilik, kalınlık ve basınç kaybı karakteristiklerine göre incelenmiştir. Bu araç, aerodinamik dalgalanmaları geniş bir frekans aralığında 20 dB düşürmeyi başarmıştır. Buna ek olarak, ön-karıştırıcı ve alevdeki düşürülmüş hız salınımları daha sakin bir yanma sağlar. Not edilmelidir ki, bahsedilen sönümlenme sebebiyle oluşan basınç kaybı % 0.2’den daha azdır.

### 4.3. Siemens Gaz Türbinleri Termoakustik Tasarım Araçları ve Kontrolü

Yanma kaynaklı salınımlar veya termoakustik olarak uyarılan dalgalanmalar, içerdiği kimyasal enerjiyi yaklaşık  $10^{-4}$  oranında akustik enerjiye dönüştüren geri-besleme döngüsü ile karakterize edilir. Termoakustik dalgalanmalar için tipik yaklaşım yanma odasındaki rezonans frekanslarındaki belirgin zirvelerdir.

Yanma kararsızlıklarını tanımlamada üç frekans aralığı gösterilebilir: 1) Düşük frekans dinamikleri(DFD): 50Hz'in altında oluşurlar ve bu dinamikler Helmholtz, nefes alma veya hacim modlarında gözlenebilir. 2) Orta frekans dinamikleri(OFD): 50Hz ile 1000Hz arasında oluşurlar. Genel olarak, alev sıcaklığı ve geometriye bağlı olarak gaz türbinlerinin ilk rezonant frekansı 50Hz ile 300Hz arasındadır. Araştırmalar, bu tipteki kararsızlıkların geri-besleme döngülerini ortaya koymuştur. 3) Yüksek frekans dinamikleri (YFD): 1000Hz üzerinde meydana gelir. YFD üç boyutlu akustik modlar içinde yer alır. Burada kullanılan ve tanımlamayı kolaylaştırıcı frekans aralıkları gerçekte görülemeyebilir. Bunlar fiziksel bir davranışın rijit sınır koşulları olarak yorumlanmamalıdır. Şekil 4.7'de stabil olmayan işletme koşullarındaki yüksek basınçlı test yakıcısından elde edilen dinamik basınç spektrumu gösterilmektedir. Ayrıca, teknik olarak doğru olmasa da, stabil olmayan kararsız yanma terimi izin verilen limitleri aşan veya limit döngülerine erişen dinamik basınç dalgalanmalarını anlatmaktadır.



Şekil 4.7: Yüksek basınçlı test yakıcısından elde edilen dinamik basınç dalgalanmaları spektrumu.

OFD modu, bir yakıt kademesindeki YHO'daki artış ile sönmülenebilir. Ama bu hareket diğer modun genliğini artırabilir. Yakıcı dizaynındaki değişiklikler de benzer durumlara zemin hazırlayabilir. Ancak belirli bir seviyeye indirilebilen lineer titreşimler, termo-akustik olarak uyarılan basınç titreşimlerinden kaynaklanır. Belli bir aralıkta üst limite yakın olan basınç genlikleri dizayna özgü olup, frekansın bir fonksiyonu olacaktır. Yüzeyle doğru olabilecek aşırı ısı transferi yanmada yumuşama ve zayıflamaya yol açabilir. Bu etki basınç dalgalanmalarıyla birleşirse feci sonuçlar görülebilir.

Söz konusu akustik dalgalar, yanma sistemi boyutlarıyla karşılaştırıldığı zaman uzun dalga boylarına sahiptir. Bunlar kompresor, yakıcı haznesi ve türbin gibi çeşitli gaz türbini parçaları içinde genişler. Yakıcı haznesinin akustik özellikleri ve boyutunun yakıcı çıkış empedansı üzerinde önemli etkisi vardır. Ayrıca, yakıt hacmi içindeki basınç uyarılı dalgalanmaların büyüklüğünü etkiler. Yakıt akışı ile hava akışı arasındaki ilişki ısı yayılımı dalgalanmalarına neden olan eşdeğerlik oranı değişimleriyle sonuçlanır. Yanma odasının akustik geometrisi akustik modların şeklini belirler. Bu akustik modlar yakıcı çıkışındaki akustik sınır koşullarından etkilenir. Yanma dengesizliğinin nedeni kararsız alevdir. Bunun için dinamik basınç düzensizliklerinden kaynaklanan ısı yayılımı salınımlarını iyi anlamak gereklidir.

Dizayn aşamasındaki teknik parametreler şöyledir: 1) Termo-akustik geribesleme döngüsü belirlenir ve farklı bileşenlerin etkileşimi incelenir. 2) Termo-akustik dizayn prosesi optimize edilir ve dizayn değişikliklerinin termo-akustik etkileri değerlendirilir. 3) Test donanımlarının tahmin yeteneği optimize edilir, test sonuçlarına dayalı hesaplamalı tahmin modelleri geliştirilir. Akustik enerji dengesi için, alev tarafından üretilen akustik enerjinin yanma sistemlerinin girişinde ve çıkışında yok olduğu düşünülür. Türbin dizaynına bağlı olarak test donanımları giriş ve çıkışlarda farklılık gösterir. Bu kayıpların bilgisi başarılı bir gaz türbini dizaynı için çok önemlidir. 4) Termo-akustik dalgalanmaların bastırılması için aktif ve pasif faktörler geliştirilmelidir.

#### **4.4. Çözüm Yöntemleri**

Gaz türbini yanma odalarının termo-akustik özelliklerini araştırmak için Siemens bünyesinde birçok analitik ve sayısal çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Tüm yöntemler bahsedilen dizayn parametreleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur.

#### 4.4.1. Bir Boyutlu Akustik Analizler

Çoğu bileşende, özellikle tek yakıçılı test donanımı için, bir boyutlu basınç alanı varsayılabilir, çünkü düşünülen frekans aralığı çok boyutlu modların kesme frekansının altındadır. Rezonatör dizaynı gibi özel sebepler için, iletim hat modelleri geliştirilmiştir. Akustik geçiş dallanmaları olan sistemler göz önünde bulundurulur ve bir transfer matris ağı uygulanabilir. Şekil 4.8’de SGT 1000F gaz türbinine ait hibrid yakıcı gösterilmiştir. Eş merkezli iki hava kanalından oluşmuştur. Merkez eksenli girdap oluşturan sistem boyunca toplam havanın %10’u deşarj edilir. Havanın %90’ı ise çapraz helezonik kanalından geçer (Şekil 4.8). Bir dallanma elemanı bu hava ayrılmasını göstermek için kullanılır. Bu kanal elemanları yakıt enjeksiyonunu iyileştirmek için kullanılır. Basit modellerde, yakıt orifisi, yakıt çıkış kanalı etkisi ile tanımlanır.

Tablo 4.1: Siemens gaz türbinleri yanma sistemleri dizaynında uygulanan çözüm yöntemleri.

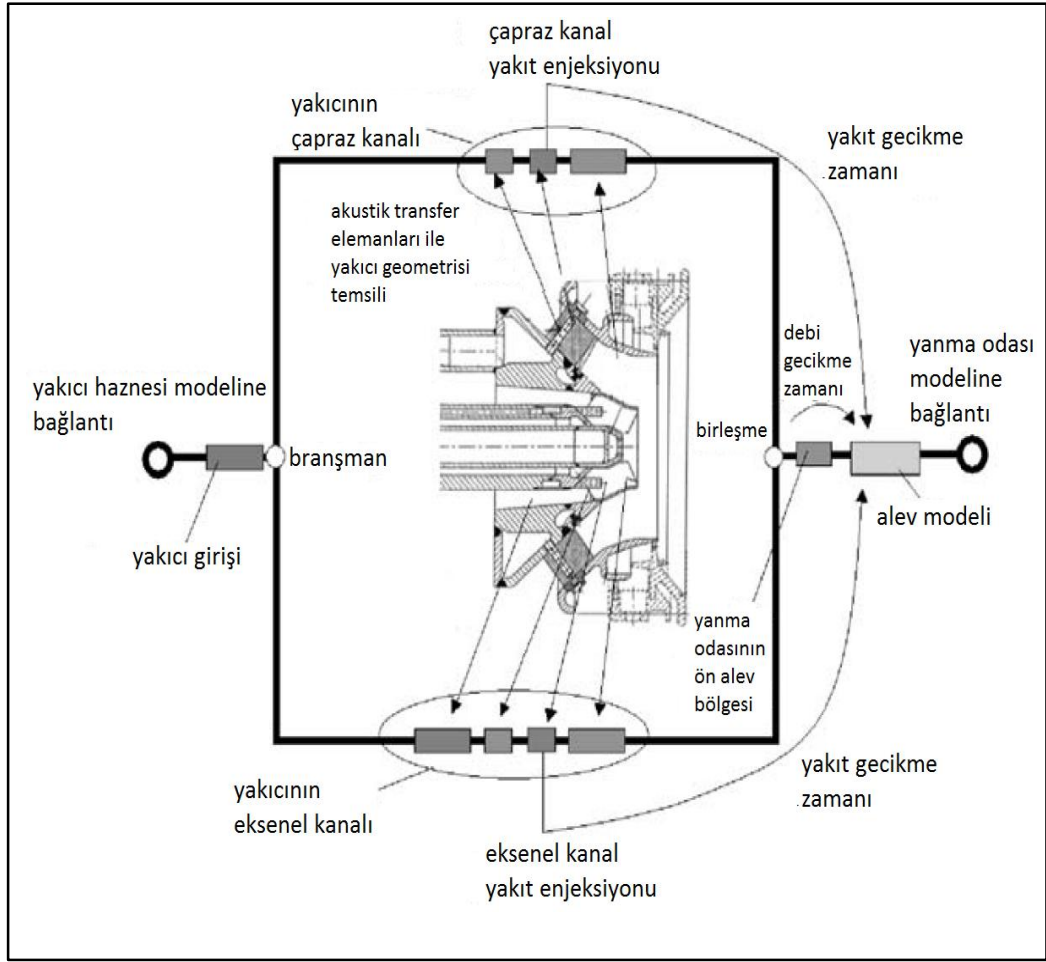
Çeşit	Kullanılan Metot	Fonksiyon
Yakıcı parçalarının akustik özellikleri	İletim hattı metodu	Rezonatör dizaynı
Bir boyutlu akustik analizler	Transfer matris ağı	Gaz türbini bileşenleri için akustik özelliklerin değerlendirilmesi
Üç boyutlu akustik analizler	Sonlu elemanlar yöntemi	Görüntüleme ve rezonatör dizaynı için akustik basınç dağılımlarının değerlendirilmesi
Alev tepkisi	Zaman gecikmesi modelleri	Dizayn değişikliklerinin alev tepkisi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Alev tepkisi	Zamana bağılı hesaplamalı akışkanlar dinamiği	Dizayn değişikliklerinin alev tepkisi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi
Tam stabilite analizi	Transfer matris yaklaşımı, Galerkin Metodu	Dizayn değişikliklerinin stabilite üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi
Egzost kanalı çeşitliliğinin oluşturduğu etki ile ayarlanabilir donanım	Lüle şeklinde egzost kanalı tasarımları	Dizayn değişikliklerinin stabilite üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

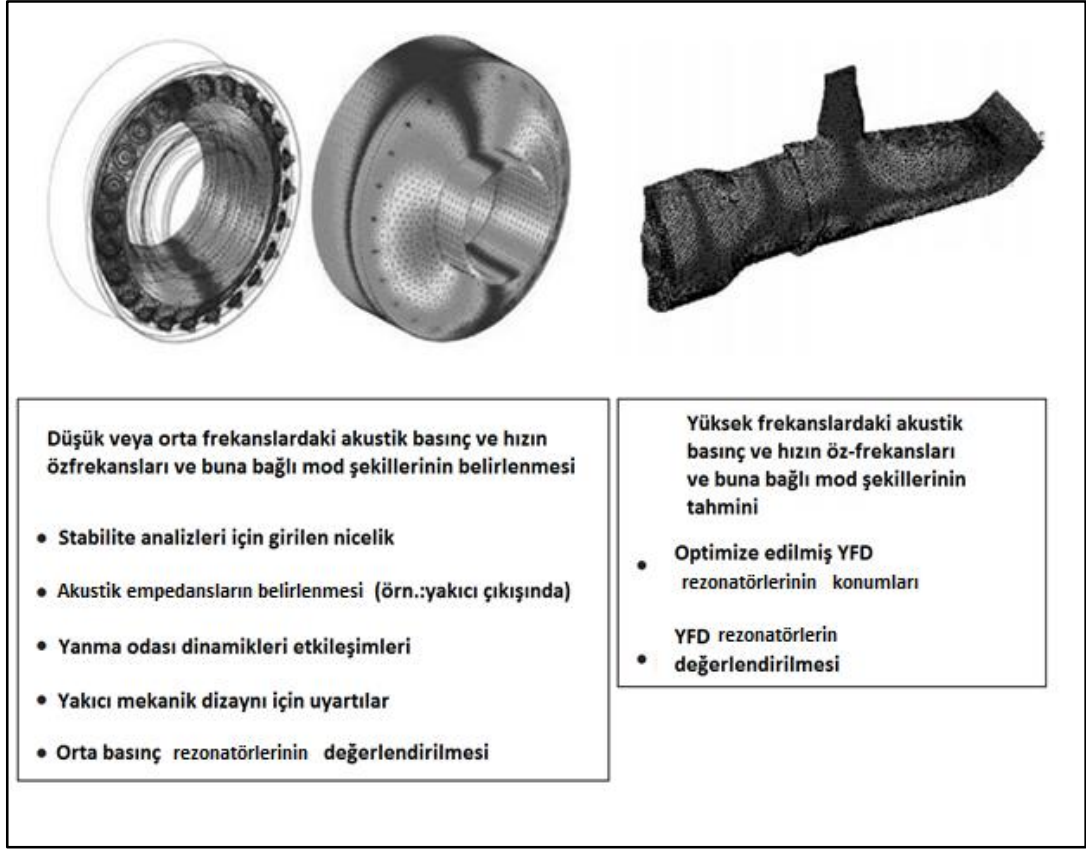
Bu yöntemin temel getirisi, akustik olarak anlamlı her bileşenin akustik özelliklerinin ayrı transfer matrisi ile gösterilebilmesidir. Sistemin tamamının akustik özelliklerini, bu transfer matrislerini bir transfer matris altında birbirleriyle bağlayarak elde edebiliriz. Transfer matris yöntemi, gaz türbini yanma sistemlerindeki yakıt hatları, test donanımlarının egzost kanalları gibi parçalarının özelliklerini tanımlamada uygulanır.

#### 4.4.2. Üç Boyutlu Akustik Analizler

Bir yakıcı içinde veya yakıcı haznesinde genellikle üç boyutlu akustik alanla karşılaşılır. Bu, akustik basınç dağılımını araştırmak için üç boyutlu kodların uygulanması ve geliştirilmesini gerekli kılar. Siemens AG’de, viskoz olmayan akış bölgelerindeki üç boyutlu akustik denklemleri çözen üç boyutlu sonlu eleman kodları kullanılır. Şekil 4.9’da üç boyutlu sonlu eleman akustik analiz temel yönü gösterilmiştir. Sonlu eleman akustik analiz sonucu hesaplanan akustik mod şekilleri termo-akustik stabilite analizleri için bir kaynaktır. Yine Şekil 4.9’da dinamik basınç modülünün dağılımıyla görselleştirilen mod şekilleri yer almıştır.



Şekil 4.8: Siemens 1000F yakıcısına ait yakıcı girişi, eksenel ve çapraz kanallar, yakıt enjeksiyon bölgeleri ve alevi temsil eden bir akustik transfer elemanları ağı ile karakterize edilen bir gaz türbini yakıcısı.



Şekil 4.9: Gaz türbini yakıcı dizaynı için sonlu eleman akustik modelleri.

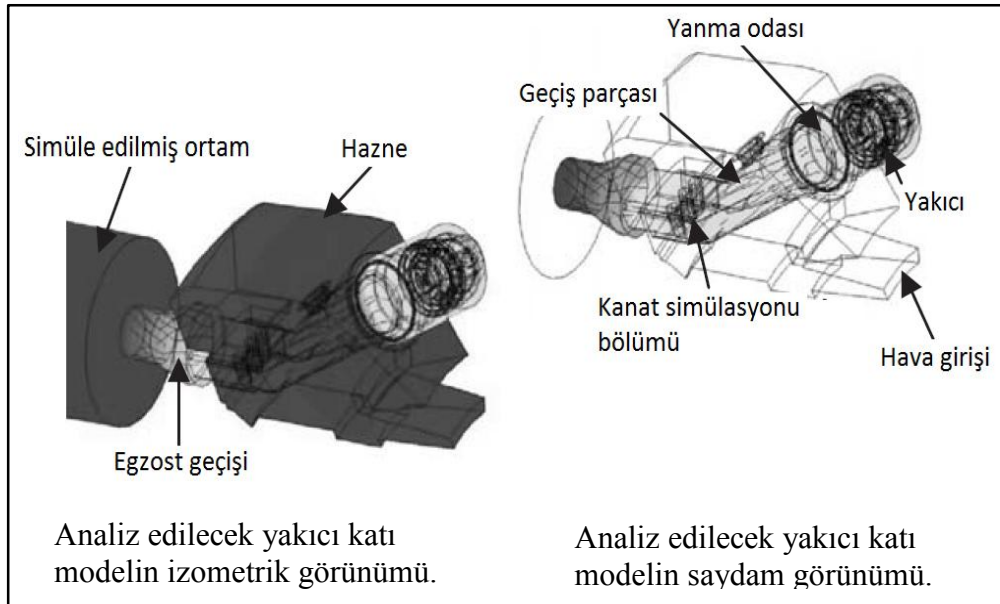
Dinamik basıncın dalga karnı orta koyuluktaki gri bölgede yer alır, burada dinamik basınç düğümleri koyu gri tonlu bölgede gösterilmektedir. Şekil 4.9'da soldaki şekil iki basınç dalga gövdesi ve iki basınç düğümü ile dairesel yakıcının ilk sırasındaki açısız mod şekillerini gösterir. Açısız bileşen merkezde gösterilen hazne içindeki basınç dalgalarına baskın gelir. Yanma odası ve yakıcı basınç dalgalanmaları arasında yakıcı transfer matrisi ile verilen doğrudan ilişkiler bulunur. Bu transfer ilişkisi yakıcı içindeki dinamik basıncın doğrudan ölçülmesi yerine görüntüleme cihazı montajı ile hesaplanır. Şekil 4.9'da sağda gösterilen şekil ise 2000 Hz'den büyük özfrekans değerlerine sahip kombine eksenel ve açısız mod özelliği gösteren dairesel yakıcının yüksek frekans dinamik modunu temsil eder. Bütün yanma sisteminin akustik analizi kompresör çıkışından türbin girişine kadar olan kısmı kapsayan geniş bir hesaplama alanı gerektirir. Bu hesap işlerini yürütmek için, esnek bir yaklaşım geliştirilmiştir. Üç tip yaklaşım şöyle sıralanabilir: 1) Tek yakıcı içeren yanma odasının sadeleştirilmiş modeli (Şekil 4.10 sağda). 2) Sistemin akustik basınç seviyesi final stabilitesi için direnç sınır koşulları önemlidir. Çünkü akustik sınır yüzündeki direnç, bu yüzeydeki akustik enerji kaybını belirler. Tahmin

tutarlılığını iyileştirmek için hesaplama alanı genişletilebilir (Şekil 4.10 solda). Artık hesap alanı, egzost, yakıcı üst kısmındaki akış girişi, yanma odası ve türbin kanatları gibi bölümleri içerir. 3) En karmaşık ve pahalı model olup tüm dairesel yanma odası ve yakıcıları kapsar. Buna ilave olarak, üç boyutlu akustik analiz kodları test donanımı ve türbin arasındaki farklılıkları ortaya çıkarmada da kullanılır.

#### 4.4.3. Alev Tepkisi

Alev tepkisi, gaz türbini yanma sistemleri, termo-akustik kararlılık analizi değerlendirilmesi için çok kritik öneme sahiptir. Çünkü alev tepkisi akustik enerji transfer fonksiyonu için kaynak belirler. Genel olarak, alev tepki fonksiyonları akustik basınç dalgaları tarafından uyarılan ısı yayılımı salınımlarını ifade eder. Akustik düzensizlik sonucu oluşan alevin anlık tepkisi aşağıda verilen basınç çifti ve hız çifti eşitlikleriyle açıklanabilir.

$$F_1(t) = \frac{q'(t)\bar{p}}{p'(t)\bar{q}} \quad (3.29)$$



Şekil 4.10: Sonlu eleman akustik analizleri için tipik hesaplama bölgesi.

$$F_2(t) = \frac{q'(t)\bar{u}_{\text{yakıcı çıkış yüzü}}}{u'(t)_{\text{yakıcı çıkış yüzü}}\bar{q}} \quad (3.30)$$



$q'$  alev yüzeyindeki ısı yayılımı dalgalanmalarının integralidir.

$$q'(t) = \int_{\text{ısı yayılımı bölgesi}} Q'(\vec{r}, t) dV[W] \quad (3.31)$$

$p'$  ve  $u'$  sırasıyla akustik basınç dalgalanmalarını ve akustik hız dalgalanmalarını belirtmektedir. Her iki alev tepki fonksiyonu kendi ortalama değerleri ile boyutsuz hale getirilmiştir.  $F_1$ , basınç dalgalanmaları ile ısı yayılımı salınımları arasındaki anlık etkileşimleri gösterir ve bütün alev akustik etkileşimleri için geçerlidir.  $F_2$ , yakıcıda veya yakıcı çıkışındaki akustik hız değişimleri ve ısı yayılımı salınımlarının arasındaki anlık etkileşimi ifade eder. Çoğu alev tepki fonksiyonlarının ölçümü  $F_2$  tip fonksiyonla yapılmaktadır. Dizayn değişikliklerinin etkisi konusuna daha derin bakış için, alev tepkisi aerodinamik dizayn parametreleri ile ilişkili olmalıdır. Alev akustik ilişkisi üzerine çok fazla çalışma ve vakit harcanmıştır.

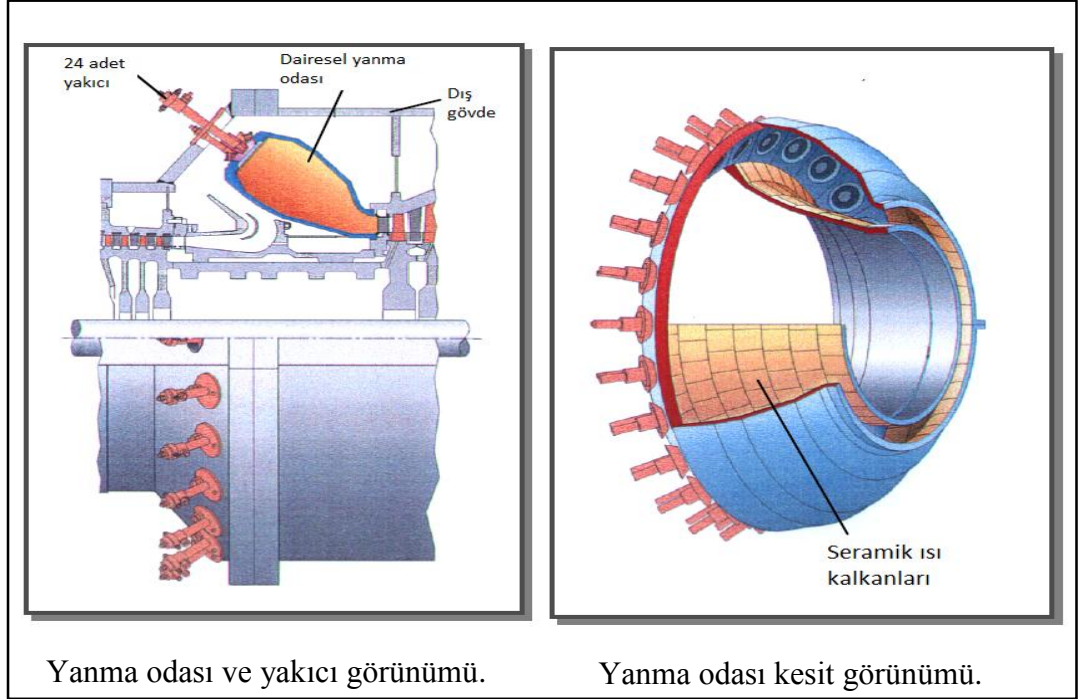
Nihayetinde, alevin dinamik özellikleri genel olarak zaman gecikmesi ile gösterilir ve farklı yanma dizaynları da zaman gecikmelerine bakılarak karşılaştırılabilir. Zaman gecikmesi dağılımı durağan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde ileri adımlarla elde edilebilir. Durağan analizlere dayanan yaklaşımlar temel bir sakıncaya da sahiptir; zorlanma oranı üzerindeki basınç dalgaları etkisi ve alev girdap etkisi etkileşimi gösterilemez.

Sonuç olarak, durağan yaklaşımı alevin zamanla değişmediğini kabul eder. Bazı koşullarda alev konumu yanma kararsızlığı olduğu zaman ötelenir. Daha detaylı bir çalışma için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinden LES kullanılabilir. Bilindiği gibi LES, büyük ölçekli girdapları çözümler ve Siemens bu konunun üstesinden gelmek için durağan olmayan yöntemler geliştirmektedir.

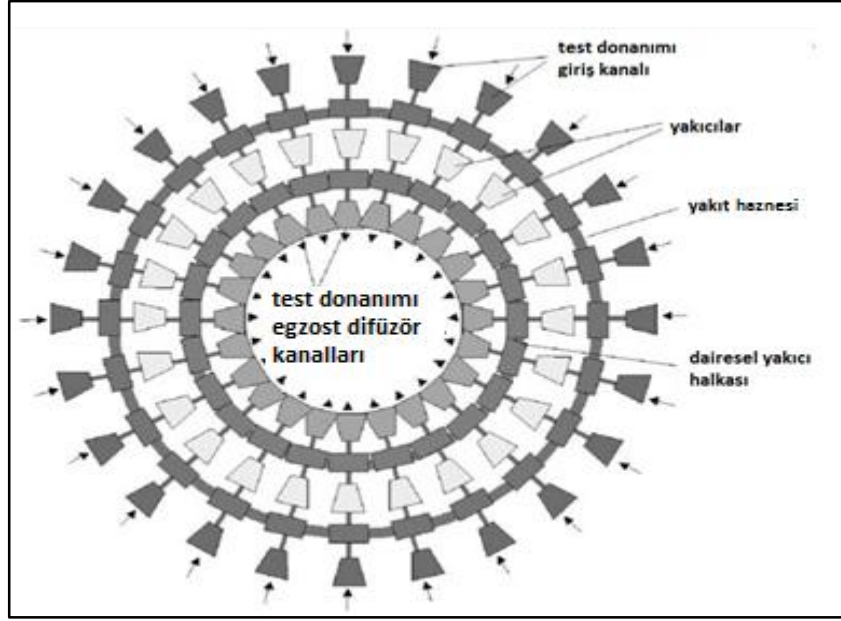
#### 4.4.4. Tam Kararlılık Analizleri

Tam kararlılık analizlerinin amacı bir akustik modun uyarısını veya sönümlenmesini tahmin etmektir. Bu işlem, alev tepkisi ve akustik çevre arasındaki geri-besleme döngüsü gösterilmesini kapsar. Termo-akustik kararlılık, termo-akustik

alev tepkisi ve türbin kompresor girişi arasındaki tüm bileşenlerin akustik özelliklerinin bir sonucudur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerine uymayan şekilde hesaplama alanı tüm bileşenleri kapsayacak şekilde genişletilmelidir. Bu gereksinimi karşılamak üzere geliştirilen yöntem transfer matris ağıdır. Bu yöntem dairesel yakıcı test donanımı analizi ile açıklanabilir. Dairesel yanma odası kesit alanı Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Siemens SGT5 4000F dairesel yanma odasının geometrisi



Şekil 4.12: Siemens SGT5 4000F dairesel test donanımını gösteren akustik transfer matrisi ağı.

Hava akışı test donanımına girer, kompresör çıkışına doğru ilerler ve 24 yakıcıdan dışarı çıkar. Yanma, dairesel yanma odasında meydana gelir. Son olarak sıcak gazlar egzost-difüzer kanalına iletilir. Dairesel yakıcı atmosferik koşullarda işletilir ve test düzeneği giriş ve çıkışlarında akustik olarak yumuşak şartlar olduğu kabul edilir. Test donanımını temsil eden akustik ağ Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu örnekte, dairesel yakıcı, tek boyutlu kanal elemanının iki bağlantısız halkasıyla temsil edilmiştir. En dıştaki halka yakıt haznesi ve en içteki halka dairesel yakıcıyı ifade eder. Halkayı temsil eden kanal elemanlarının boyu ortalama akustik kanal uzunluğunu kaplama amacıyla seçilir. Yakıcının öz frekansları üç boyutlu sonlu eleman model analizleri ile elde edilir. Bu yaklaşım geçerlidir, çünkü açılal mod şekilleri Siemens ürün ailesi yanma odalarında oldukça baskındır.

Bütün sistem 1000 farklı transfer matris elemanı içerebilir. Modelin kalitesi bu elemanların kalitesine bağlıdır. Dairesel kanalların modellerine ek olarak, Siemens AG egzost kanalları ve kanal çıkış uçları için özel modeller geliştirmiştir. Bu modellerin transfer matrisi üretme yetenekleri vardır. Bunlar yakıt sağlama sistemlerinde olabilecek yüksek Mach sayılı akışları da kapsar. Ağ formülasyonu bir matris denklemiyle sonuçlanır. Bu denklem, karmaşık sistemin öz frekanslarını

$(w_n = w_f + i\alpha)$  elde etmede kullanılabilir. Burada  $\alpha$  YHO sönümleme katsayısı,  $w_n$ ; n. modun frekansı,  $w_f$ ; öz frekanstır.

Sistemin stabilitesini belirlemek için, transfer matrisinin determinantı uygun sınır koşulları kullanılarak hesaplanır. Basınç dalgalanmalarının genliği eğer karmaşık öz frekansların sanal kısmı  $\alpha$  negatif olursa artar. Bu kısım sönümleme katsayıları olarak adlandırılır. Normal şartlarda işletilen dairesel yakıcı test donanımı için bulunan karmaşık öz frekanslar Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2: Dairesel yakıcı donanımı için bulunan kompleks özfrekanslar.

No	Titreşim Frekansı ( $w_f$ ) [Hz]	Sönümleme Katsayısı ( $\alpha$ ) [Hz]	Yorum
1	93.4	10.2	Kararlı
2	169	6.4	Kararlı
3	196	-3.1	Kararsız
4	214	0.1	Stabilite limitinde

Tablo 4.3: Gaz türbini yanma sistemlerinin güvenli çalışma aralığını genişletmek için kullanılan tasarım seçenekleri.

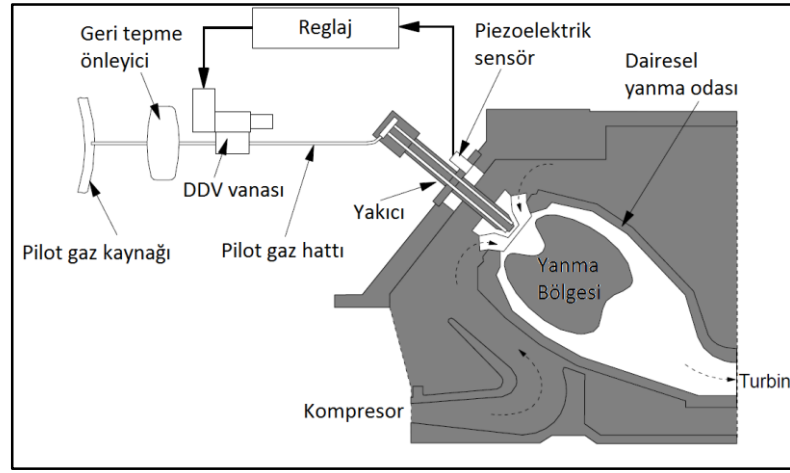
No	Dizayn Opsiyonları	Açıklama	Etkisi
Yakıcı			
1	Yakıcı çıkış geometrisini modifiye ederek alev ön lokasyonu değişimi	Örnek olarak Siemens gaz türbinlerinde, yakıcı çıkışı CBO(circular burner outlet) şeklindedir. Alevi, daha önde tutar.	Alev tepkisi
2	Yakıt konsantrasyon profillerinin değişimi	Yakıt yoğunluk, LHV değerlerini belirleyen bileşen kütlece %miktarı değişimi yanmayı etkiler.	Alev tepkisi
3	Yakıt kademelenmesi teknolojisi	Yakıt, yakıcı girişinde birkaç noktadan enjekte edilir.	Alev tepkisi
4	Isı yayılımı dağılımı modifikasyonu	Akışa girdap şeklini veren kanatçıkların açılarının değişimi tepkime bölgesini değiştirebilir.	Alev tepkisi
5	Uyarlamalı yakıt çıkış ucu etkisi	Yakıtın yakıcıdan çıktığı delik tasarımı yakıtın enjeksiyon şeklini belirler.	Alev tepkisi

Tablo 4.3: Devam.

Yanma Odası			
6	Rezonatörler	Rezonatör, yanma kararsızlıklarının pasif kontrolünde kullanılan akustik bir araçtır.	Sönümleme
Kontrol			
7	Aktif stabilite kontrolü	Siemens 4000F sistemine ait ARGUS sistemi bu kategoridedir.	Alev tepkisi
8	Aktif yanma kontrolü	Alev sıcaklığı kontrolü ve buna bağlı olarak türbin çıkış egzost gazı sıcaklığı kontrolü bu kategoridedir.	Alev tepkisi

## 5. AMBARLI ÇİFT YAKITLI KOMBİNE ÇEVİRİM ELEKTRİK SANTRALİ BÜNYESİNDEKİ SIEMENS SGT5 4000F GAZ TÜRBİNİ, İŞLETMEDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR ve ÇÖZÜMLERİ

Yanma stabilitesi ARGUS isimli kontrol sistemiyle izlenip, kritik durumlarda türbin kontrol sistemi tarafından aktif çıkış gücü azaltılarak veya gerektiğinde korumalar devreye girerek olası türbin arızalarının önüne geçilmektedir.



Şekil 5.1: Pilot alev ile yanma kararlılığı kontrolü.

Şekil 5.1’de gösterilen DDV valfi, basınç etkilerini elektrik akımına dönüştüren piezoelektrik sensör sinyalleri ile yakıt akışını düzenler.

Yanma odası gövdesinde yanmadan kaynaklanan titreşim ivmeleri “g” yerçekimi ivmesi sembolüyle ölçeklenir ve 2.5g ’ye kadar olan değerler izin verilen limitler içindedir. Doğalgaz, ana stop valfinden sonra ön-karışım ve pilot gaz olmak üzere iki hatta ayrılır. Yaklaşık 1.2 kg/s debiye sahip pilot gaz, difüzyon alevi oluşturarak asıl yakıt hattının beslediği ön-karışım alevinin kararlı yanmasını sağlar. Toplam 24 adet yakıcının her birinde pilot gaz girişi mevcuttur. Yanma durumuna göre ARGUS kontrol sisteminden gelen sinyaller doğrultusunda pilot gaz debisi değiştirilerek alev stabilitesi sağlanır. Ayrıca, hava giriş yönlendirme kanatçıkları (IGV) ayarlanarak hava debisi değiştirilir.

## 5.1. Yanma Kararlılığı Kontrolü İçin İteratif Pilot Gaz Debisi Değişikliği

Türbin hangi aktif güçteyken kararsızlık fazla ise, o bölgedeki türbin egzost sıcaklığına göre pilot gaz debisi ayarlanabilir. Yöntem iteratif olup, debi değişikliği ardından problemlili yüke gelinir ivmelenme ve gürültü değerlerine bakılır. Bu değerlerde artış görülürse, bu kez debi düşürülür ve tekrar problemlili bölgeye gelinerek sonuca bakılır. Debi artış veya azalışı yaklaşık 2g/s adımlarla yapılabilir. Şekil5.2'deki ekran görüntüsünde EÜAŞ Ambarlı B Elektrik Santrali Ünite50'ye ait arşiv değerleri mevcuttur. Sistemde debi-metre olmayıp, kontrol vanasının daha önce sisteme kayıtlı olan açıklığa göre geçirdiği debi değerleri kullanılmaktadır. Fakat, pilot gaz debisi artışı alev sıcaklığını artıracığından NOx üretimini de artırır (Şekil 2.19). Bu durum debi artışını limitler.

Type	Name	Value <<	Parameter Key	Destination ...	Visible Port	Visible Param...	Archive >>
I	X	0.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A1	260.0	\$SREL: TT.ATK.199		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B1	0.64	\$SREL: F.PILOT.274		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A2	290.0	\$SREL: TT.ATK.200		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B2	0.7	\$SREL: F.PILOT.275		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A3	320.0	\$SREL: TT.ATK.201		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B3	0.7	\$SREL: F.PILOT.276		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A4	350.0	\$SREL: TT.ATK.202		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B4	0.63	\$SREL: F.PILOT.277		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A5	370.0	\$SREL: TT.ATK.203		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B5	0.61	\$SREL: F.PILOT.278		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A6	400.0	\$SREL: TT.ATK.204		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B6	0.46	\$SREL: F.PILOT.279		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A7	430.0	\$SREL: TT.ATK.205		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B7	0.33	\$SREL: F.PILOT.280		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A8	460.0	\$SREL: TT.ATK.206		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B8	0.22	\$SREL: F.PILOT.281		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A9	530.0	\$SREL: TT.ATK.207		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B9	0.07	\$SREL: F.PILOT.282		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	A10	550.0	\$SREL: TT.ATK.208		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I	B10	0.0	\$SREL: F.PILOT.283		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
O	Y	0.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Şekil 5.2: T3000 kontrol sistemi yazılımında türbin çıkış sıcaklığına göre pilot gaz debisi girdi sayfası (Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali Gaz Türbini Ünite50).

## **5.2. Yanma Odası İvmelenmesi**

MBM10CY101, MBM10CY102 ve MBM10CY103 KKS kodlu cihazlar piezoelektrik sensör (ivme ölçer) olup 0-200g arası çalışma aralığına sahiptir. Ancak sistemde 0-10g arası setlenmiştir. Dökümanlarda titreşim sensörü olarak geçmektedir (Siemens I&C documents prepared for Ambarli Project).

## **5.3. Yanma Odası Gürültüsü (Uğultusu)**

MBM12CP107, MBM12CP110 ve MBM12CP115 KKS kodlu cihazlar basınç çeviricisi olup 0-250bar arası çalışma aralığına sahip, sistemde 0.0005 – 250 bar arası setlenmiştir. Bunlar 10. 7. ve 15. yakıcıların flanşlarına monte edilmiştir. Dökümanlarda basınç sensörü olarak geçmektedir (Siemens I&C documents prepared for Ambarli Project) .

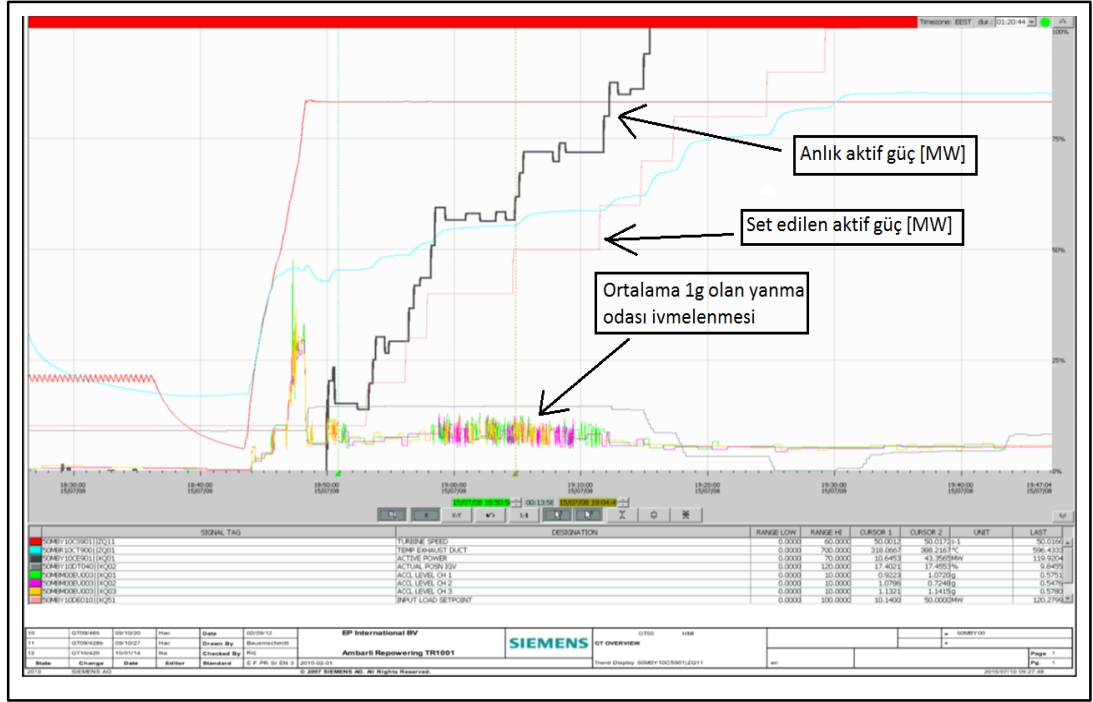
## **5.4. Ambarlı Fuel Oil Santrali Rehabilitasyonu Projesi Kapsamında Devreye Alma Çalışmalarında Karşılaşılan Yanma Kararsızlığı Problemi**

Santral devreye alma çalışmalarının başında, türbin 50 Hz hızına ulaşana kadar IGV açıklığı %11 dir. Bu açıklık, türbin çıkış sıcaklığı üst limit olan 570°C'ye ulaşana kadar (yaklaşık 110 MW'ta) kapalı durumdadır. Ambarlı Projesi kapsamında devreye alma çalışmalarında türbin yanma odası titreşimleri istenilen seviyeye düşürüldü, ancak atık ısı buhar kazanı (HRSG) titreşimleri devam etti. Buna çözüm olarak, IGV açıklığı %17 seviyelerine çekilerek sorun ortadan kaldırıldı. Daha geçirgen IGV sayesinde, hava girişi artmış ve dolayısıyla türbine giren akış kütle debisi artış göstermiştir.

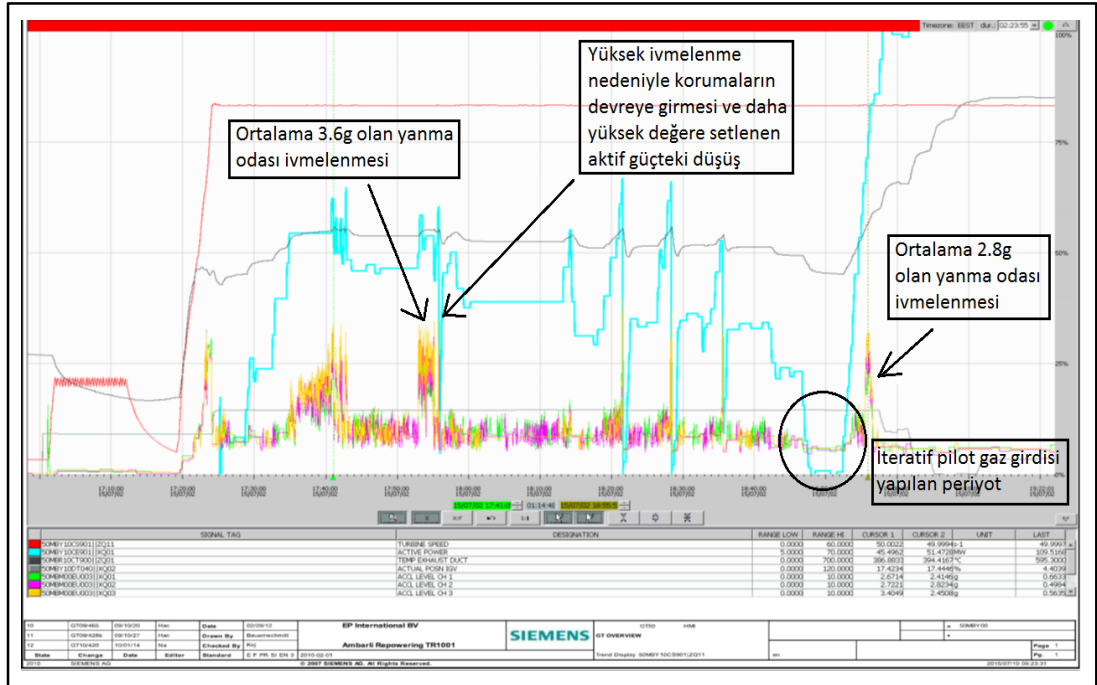
## **5.5. T3000 ve ARGUS Sistemlerine Ait Grafikler**

Şekil 5.4'te santralin devreye alınması aşamasında gaz türbininin ilk çalışmasına ait grafik mevcuttur. Şekilden görüleceği üzere işletmeciler tarafından aktif güç seti artırılırken kritik bir noktada ivmelenmeler artmış ve ünite korumalar nedeniyle yük atmıştır. Ardından, iteratif pilot gaz debisi değişikliği ile türbinin istenen aktif güce ulaşması sağlanmıştır.

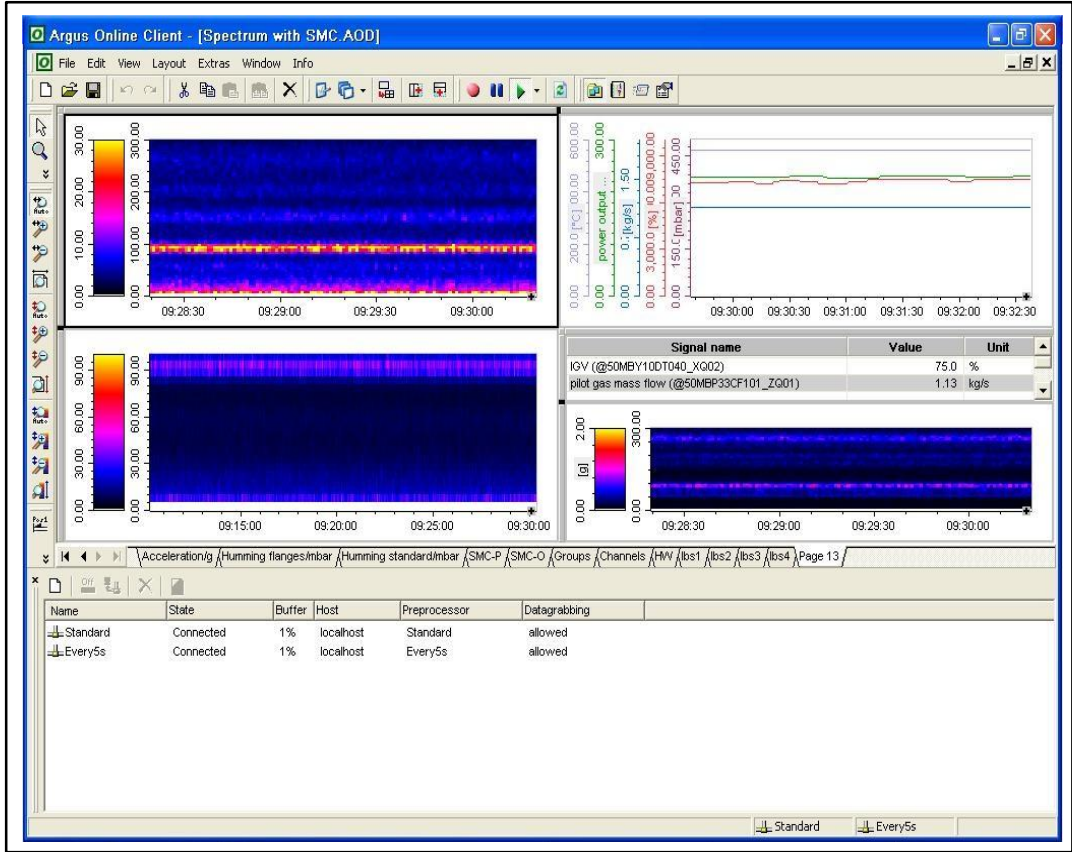




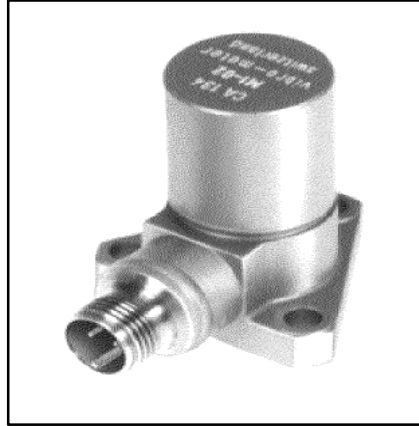
Şekil 5.3: Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali Gaz Türbini Ünite50 T3000 yazılımından alınan yanma odası ivmelenmelerinin zararsız boyutta olduğu işletme anına ait grafik.



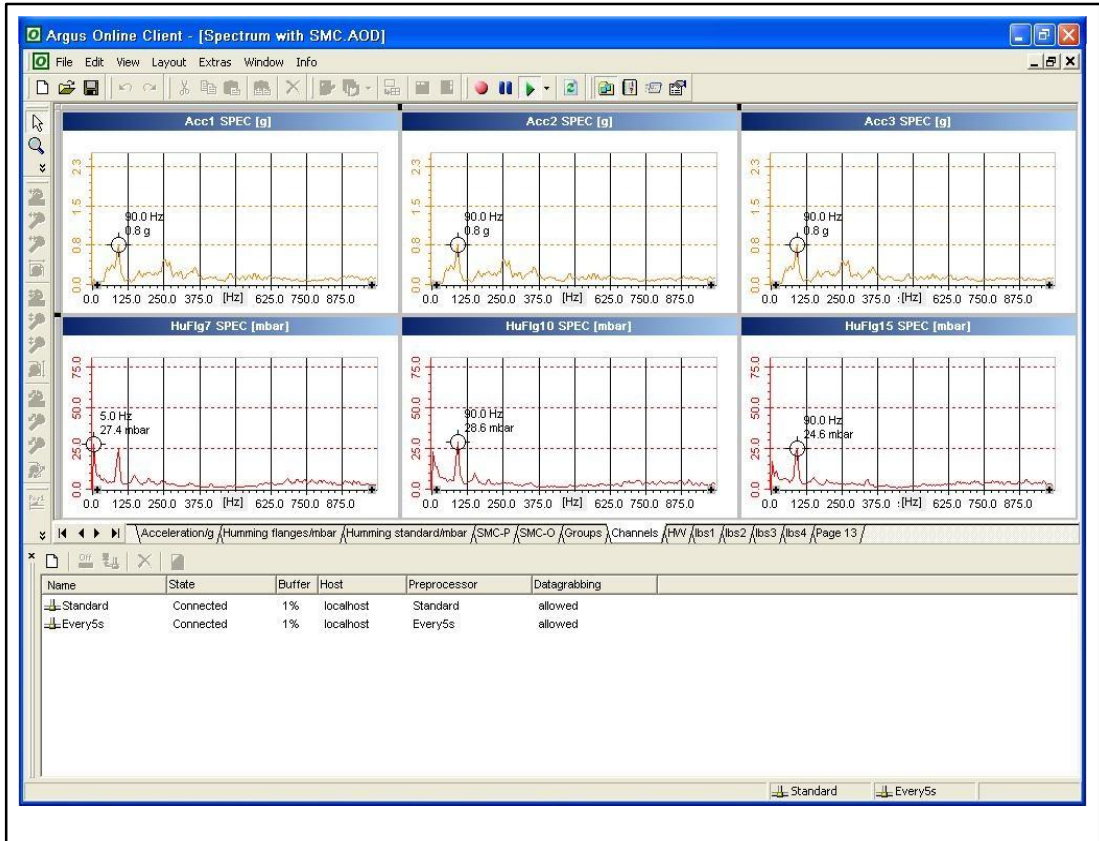
Şekil 5.4: Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali Gaz Türbini Ünite50 T3000 yazılımından alınan yanma odası ivmelenmelerinin yüksek seviyede oluşu ve korumaların devreye girerek aktif gücü düşürmesi.



Şekil 5.5: Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali Gaz Türbini Ünite50 ARGUS sistemi, ivme ve frekans verileri.

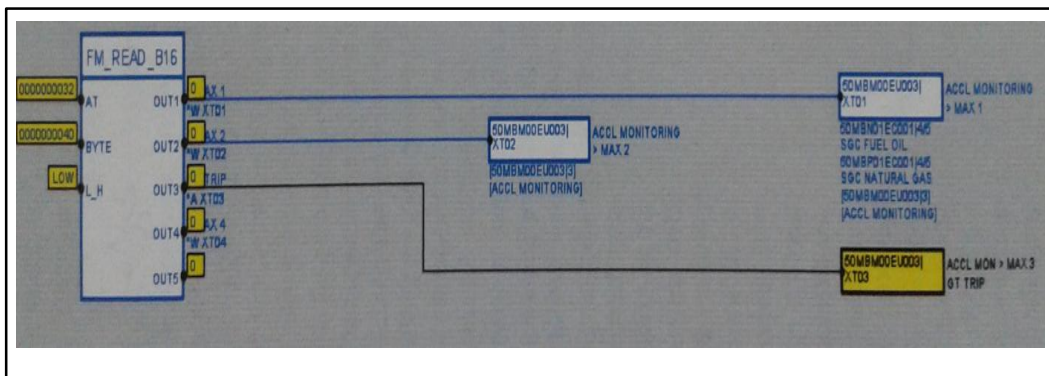


Şekil 5.6: Piezoelektrik ivme ölçer.



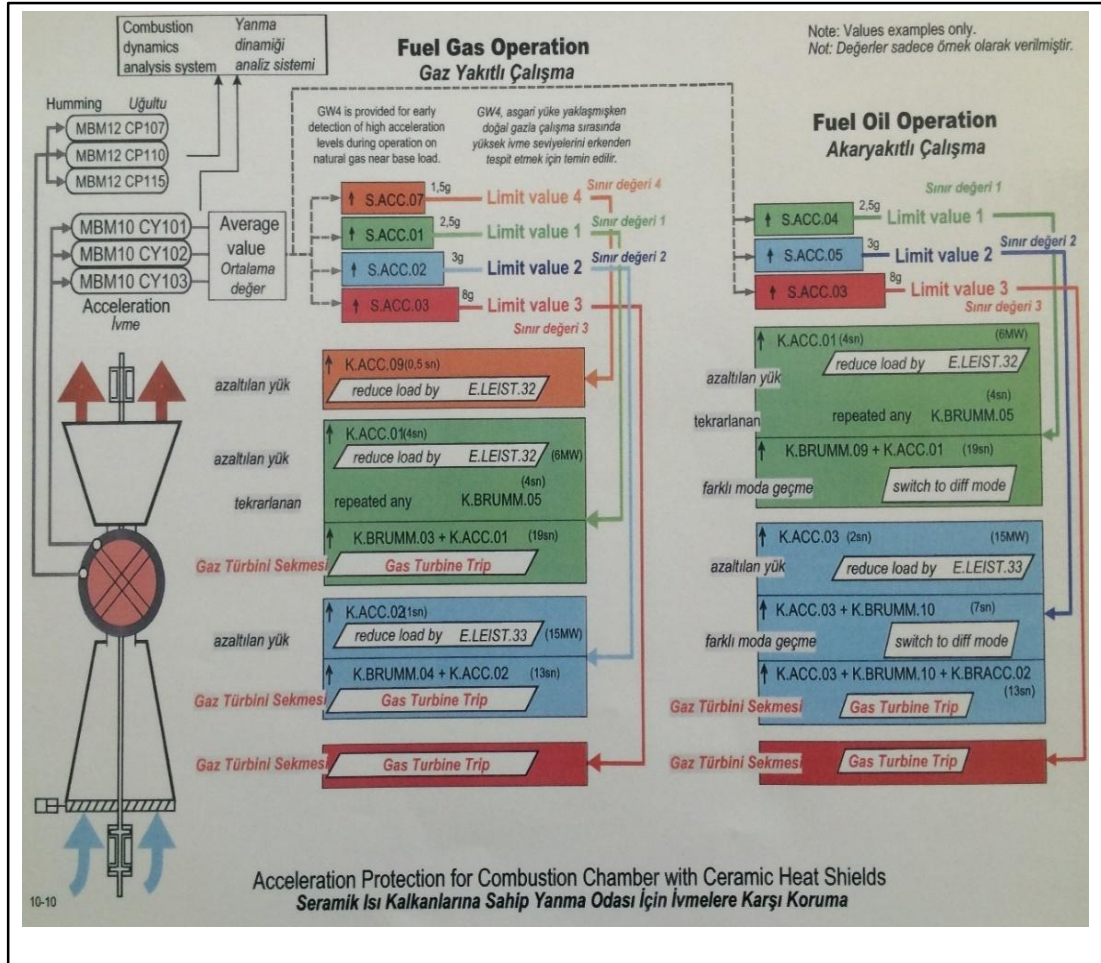
Şekil 5.7: Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali Gaz Türbini Ünite50 ARGUS'tan alınan yanma ile oluşan ivmelenmeyi ve gürültüyü basınç cinsinden gösteren grafikler.

Türbin belli şartlarda işletme halinde iken yanma odası titreşimleri artar ise türbin koruma sistemi generator çıkış gücünü düşürür. Bu düşüş miktarı ivmelenme şiddetine bağlıdır. Sistem yük atarak kritik noktadan uzaklaşır.



Şekil 5.8: Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali Gaz Türbini Ünite50 T3000 yazılımından alınan yanma ivmelenmesi seviyelerini gösteren mantık şeması.

Şekil 5.8’teki çıkış sinyalleri gerekli fonksiyon bloklarına giderek belirlenmiş komutları başlatır.



Şekil 5.9: Doğalgaz ve fuel oil yakıtlı yanma durumunda meydana gelen yanma ivmelenmelerine karşı türbin koruma sistemi şeması (Ambarlı Çift Yakıtlı Kombine Çevrim Elektrik Santrali Gaz Türbini Ünite50,ARGUS).

## 6. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada ön-karışımli yanma içeren modern gaz türbinlerine ait çeşitli görüşlerin kısa bir tanıtımı yer almıştır.

Sunulan sayısal yaklaşım, gaz türbinlerindeki kararsız yanma mekanizmasını anlamada gelişmeler için umut verici bir teknik ortaya koyar. Başlıca avantaj ise türbülanslı yanmanın anlık davranışlarını tahmin edebilme özelliğidir. Akustik zorlama yapabilen bir uygulama olsaydı operasyonel limitleri değiştirebilirdi. Buna ek olarak çoklu unsurların taşınması ve ileri seviye kimyasal kinetik birleştirilirse kirletici oluşumları da tahmin edilebilir. Bu, akustik zorlamanın NO<sub>x</sub> oluşumu üzerindeki etkisini araştırmaya fırsat tanıyabilir. Eğer, düşük maliyetli verimli sistemler geliştirilerek yanma kararsızlıkları kontrol altına alınabilirse, gaz türbinleri tasarım kriterleri önündeki kısıtlamalardan biri ortadan kalkmış olur. Oluşabilecek ağır hasarların önüne geçileceğinden, yedek parça giderleri düşer. Buna ek olarak, benzer turbofan, roket motorları, endüstriyel fırınlar gibi sistemlerde de iyileşmeler sağlanabilir.

Gelecekte aşağıdaki araştırma çalışmaları yapılabilir:

- Pasif kontrol yöntemlerinden biri olan akustik rezonatöre benzer olarak, değişebilir hacimli yanma odası tasarlanabilir. Bu fikirdeki başlıca amaç, işletme anında milimetrik bir hareketle oda hacmi artışı ve azalışından faydalanmaktır. Hacim ve basınç arasındaki etkileşimi kullanarak, yanma odası akustik modları değiştirilebilir.
- Tepkimeli ve tepkimeli olmayan akışın farklı giriş hızları, hesaplama ağları ve alt-sistem ölçekli modelleri ile üç boyutlu simülasyonu. Başlatılan üç boyutlu simülasyonlar devam edecek çalışmalar için iyi bir başlangıç noktası olabilir.
- Bu çalışmada kullanılan tek adımlı kimyasal kinetik alev özelliklerini tam olarak tahmin etmek için geliştirilebilir.
- Eğer eksen etkisi tam olarak belirlenirse, alev üzerindeki farklı akustik uyarılmaların tepkisi incelenebilir.
- Girişteki türbülans etkisi bilindiği için, simülasyon içine tanımlanması sonuçları daha da iyileştirebilir. Üç boyutlu simülasyon için, yanma odası öncesi girdap yaratıcı yapı dizaynı istenen türbülans seviyesi için anahtar olabilir.

Önerilen birçok yaklaşım yakın gelecekte gelişimini sürdürecektir. Ayrıca yanma modeli ile LES'in, modern gaz türbinindeki yanma olayını daha iyi anlamada yararlı olduğu görülecektir.

Isı enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü gaz türbinlerinde yanma odası ve yakıcı sistemler, yanma kontrolünün en iyi şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla yapılandırılır. Değişen hava koşulları, değişen yakıt kompozisyonu ve günlük elektrik üretimindeki değişiklikler yanmayı etkileyecektir. Çalışma sürekliliğinin sağlanması ve emre amade durumunun temini için kararsız yanmanın etkileri minimize edilmelidir.

Değişen parametrelerin alev stabilitesine etkisinin, sayısal modelleme ve hesaplama teknikleri ile önceden tahmin edilebilir olması büyük avantaj sağlamaktadır. Anlık ölçülen yanma kaynaklı türbin gövde titreşimleri veya diğer yöntemler vasıtasıyla hem yanma kontrolü sağlanmakta hem de türbin koruma sistemi olası hasarları engellemektedir.



## KAYNAKLAR

Bellucci V., (2009), "Modeling and Control of Gas Turbine Thermoacoustic Pulsations", Doctoral Thesis, Techonology University Of Berlin.

Boyce M. P., (2001), Gas Turbine Engineering Handbook, 2nd Edition, Gulf Professional Publishing.

Çengel Y. A., Boles M. A., (2006), Thermodynamics An Engineering Approach, 5th Edition, McGraw-Hill College.

Dowling A., (1995), "The Calculation Of Thermoacoustic Oscillations", J Sound Vib, 180, 557-581.

Giampaolo T., (2006), Gas Turbine Handbook Principles and Practises, 3rd Edition The Fairmont Press Inc.

Hottel H. C., Hawthorne W. R., (1949), "Diffusion On Laminar Flame Jets", Combustion 3, 254.

Kiameh P., (2002), Power Generation Handbook, 1st Edition, McGraw-Hill Professional.

Kyle B. G., (1984), Chemical and Process Thermodynamics, 2nd Edition, Prentice Hall PTR.

Lieuwen T. C., Zinn B. T., (1999), "Investigation of Combustion Instability Mechanisms in Premixed Gas Turbines", Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology.

Lieuwen T., Torres H., Johnson C., Zinn B. T., (2001), "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors", Asme Journal Of Engineering for Gas Turbines and Power, 123, 182-185.

Lieuwen T. C., Yang V., (2005), "Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling", Progress in Astronautics and Aeronautics, 210, 3-116.

Poinsot T. J., Veynante D. P., (2004), Theoretical and Numerical Combustion, 2nd Edition , R.T. Edwards Inc.

Sarpkaya T., (1986), "Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers", Journal of Fluid Mechanics, 165, 61- 71.

Steinert R., Jonas P., (2014), "Swirl Flame Response to Traveling Acoustic Waves", ASME Turbo Expo 2014 Turbine Technical Conference and Exposition, 3-9, Düsseldorf , Germany, 16-20 May.

Schmitt P., (2001), “Combustion Instabilities in Gas Turbines”, Final Studies Project, Ensica.

Stow S. R., Dowling A., (2001), “Thermoacoustic oscillations in an annular combustor”, ASME Turbo Expo 2001, 4-7, New Orleans, Louisiana, USA, 4-7 June.

Turns S. R., (2000), An Introduction to Combustion, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2nd Edition, Boston.

Yamanaka S., Maeda F., Shioda K., Wabuchi K., Tsuchiya T., Okamoto M., (2003), “Application of the Helmholtz Resonator for Reducing the Combustion Oscillation in a Gas Turbine, Proceedings of the International Gas Turbine Congress”, 146, 1-7.

Wolf P., Staffelbach G., Balakrishnan R., Roux A., Poinsot T. J., (2010), “Azimuthal Instabilities in Annular Combustion Chambers”, Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program , 131, 1-2.

Web 1, (2015), [https://tr.wikipedia.org/wiki/Ses\\_hızı](https://tr.wikipedia.org/wiki/Ses_hızı) (Erişim tarihi: 14/11/2015).

Web 2, (2015), [http://www.cfd-online.com/Wiki/Smagorinsky-Lilly\\_model](http://www.cfd-online.com/Wiki/Smagorinsky-Lilly_model) (Erişim tarihi: 02/06/2015).



## ÖZGEÇMİŞ

Ender ŞAŞMAZ 1987 yılında Bolu'da doğdu. 2005 yılında başladığı Zonguldak Karaelmas Üniversitesi (ZKÜ), Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2010 yılında başarıyla tamamladı. Askerlik görevini tamamladıktan sonra iş hayatına atıldı. Aydın Vinç firmasındaki 8 ay yürüttüğü teknik keşif, teklif ve organizasyon işlerinin ardından, Mart 2012'de Ambarlı Çift Yakıtlı Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali ve Rehabilitasyonu Projesi dahilinde iki adet Siemens SGT5 4000F gaz türbinlerinden sorumlu makine mühendisi olarak EPP Adi Ortaklığı'nda başladığı görevine devam etmektedir.

## EKLER

### Ek A: Smagorinsky-Lilly Model

Smagorinsky model şöyle özetlenebilir:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij} = -2(C_s\Delta)^2 |\bar{S}| S_{ij} \quad (\text{A1.1})$$

Smagorinsky-Lilly modelde girdap viskozite aşağıdaki gibi modellenir:

$$\mu_{sgs} = \rho(C_s\Delta)^2 |\bar{S}| \quad (\text{A1.2})$$

Filtre genişliği:

$$\Delta = (\text{Hacim})^{\frac{1}{3}} \text{ ve } \bar{S} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (\text{A1.3})$$

Efektif viskozite aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$\mu_{efektif} = \mu_{mol} + \mu_{sgs} \quad (\text{A1.4})$$

$C_s = 0.1-0.2$  arasında hesaplanır.

### Ek B: Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) Model

WALE modelinde viskozite aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mu_t = \rho\Delta_s^2 \frac{\left(S_{ij}^d S_{ij}^d\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}\right)^{\frac{5}{2}} + \left(S_{ij}^d S_{ij}^d\right)^{\frac{5}{4}}} \quad (\text{B1.1})$$

$$\Delta_s = C_w V^{\frac{1}{3}} \quad (\text{B1.2})$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left( g_{ij}^{-2} + g_{ji}^{-2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} g_{kk}^{-2} \right) \quad (\text{EB.3})$$

$$g_{ij}^{-} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (\text{B1.4})$$

$\bar{S}_{ij}$ , çözümlenmemiş ölçek için gerilme tensörü aşağıdaki ifadeyle tanımlanır:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{B1.5})$$

Burada sabit  $C_w = 0.325$  tir.

### Ek C: FLUENT Denklemleri

Karışım oranı: 
$$f = \frac{Z_i - Z_{i,oksitleyici}}{Z_{i,yakit} - Z_{i,oksitleyici}}$$
 (C1.1)

$Z_i$  her bir bileşenin kütle oranıdır. Favre ortalama karışım denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}) + \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{kullanici} \quad (\text{C1.2})$$

$\rho$  yoğunluk,  $\bar{f}$  karışım oranı değişimi,  $\sigma_t$  sabit değer,  $S_m$  tepkimeye giren bileşenleri temsil eden terim,  $S_{kullanici}$  kullanıcı tarafından belirlenen kaynak terimdir. Karışım oranı ve eşdeğerlik oranı:

$$F + rO \rightarrow (1+r)P \quad (\text{C1.3})$$

$F$  yakıt,  $r$  hava-yakıt oranı,  $O$  oksitleyici,  $P$  üründür.

Eşdeğerlik oranı:

$$\phi = \frac{\left( \frac{yakıt}{hava} \right)_{anlık}}{\left( \frac{yakıt}{hava} \right)_{stokiyometrik}} \quad (\text{C1.4})$$

Bir adyabatik sistemdeki tek karışım oranı:

$$\phi_i = \phi_i(f) \quad (\text{C1.5})$$

İkinci bir akış eklendiğindeki durum:

$$\phi_i = \phi_i(f_{yakıt}, P_{sec}) \quad (C1.6)$$

Adyabatik olmayan sistemlerde ısı kaybı veya kazanımı durumunda:

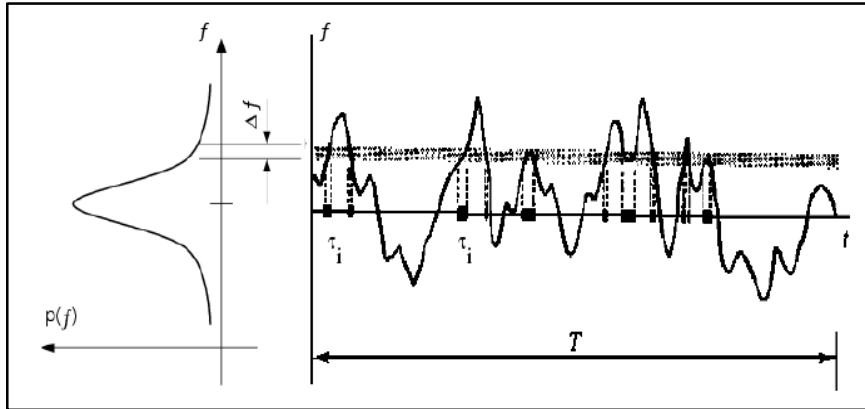
$$\phi_i = \phi_i(f, H) \quad (C1.7)$$

$H$  anlık entalpi değeridir. Muhtemel yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function ((PDF))):

$$p(f) \Delta f = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i$$

(C1.8)

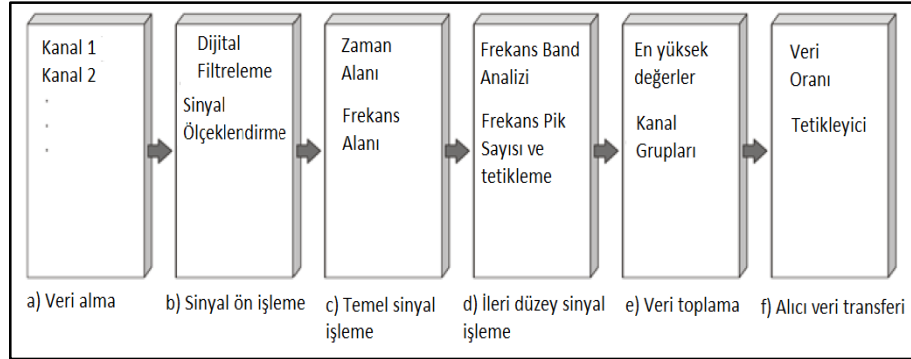
Burada  $f$ , akışkanın belli band aralığında harcadığı zaman ortalaması,  $\Delta f$  salınım yapan karışım oranı,  $T$  zaman ölçeği,  $\tau_i$ ;  $\Delta f$  bandında tüketen  $f$  dir.



Şekil EkC.1. PDF'in genel grafiksel tanımı.

## Ek D: ARGUS Sistemi

Argus, genel olarak salınımları görüntüleme ve karakterize etme kabiliyetlerini barındıran bir kontrol sistemidir. Gerçek zamanlı data alma, gerçek zamanlı data işleme ve gerçek zamanlı kontrol sistemleri için donanımsal ve yazılımsal bir çatıya sahiptir. Tüm bu gerçek zamanlı işlemler bir dijital sinyal işlemcisi vasıtasıyla çalışır. EÜAŞ Ambarlı B Elektrik Santrali bünyesindeki gaz türbinlerinde, ARGUS sistemi üç yakıcı üzerinden basınç bilgilerini ve türbin gövdesi üzerinden titreşim bilgilerini alıp işleyerek yanma kararsızlıklarına karşı kontrol sağlamaktadır.



Şekil EkD.1. ARGUS veri akış şeması

## Ek E: ANSYS Yazılımı

ANSYS, çeşitli mühendislik alanlarında dizayn aşamasında etkili olarak kullanılan görsel bir simülasyon yazılımıdır. Kendi bünyesinde de barındırdığı katı modellemeyle beraber uyumlu olduğu başka bir yazılımdan transfer edilen bir katı model üzerinde simülasyonlar gerçekleştirilebilir. Katı modele bir ağ yapısı uygulanır ve ağ kalitesi simülasyon sonuçları bakımından oldukça önemlidir. Ardından, çalışma alanına bağlı olarak bir model seçilir. Bu aşamadan sonra sınır koşulları da belirlenerek hesaplama yaptırılır. Sonuç kısmında ise çeşitli görsel efektlerle desteklenen veriler elde edilir. Bu tez çalışmasında da ANSYS'te ön karışimsız yanma simüle edilmiştir.