

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

PÜLVERİZE KÖMÜR YAKICISI AERODİNAMİĞİNİN İNCELENMESİ

MUHAMMED RAŞİT YILDIRAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. İSMAİL TEKE**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PÜLVERİZE KÖMÜR YAKICISI AERODİNAMIĞININ İNCELENMESİ

Muhammed Raşit YILDIRAN tarafından hazırlanan tez çalışması 08.08.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İsmail TEKE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İsmail TEKE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erhan BÖKE
İstanbul Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'nde 1003 programı kapsamında yürütülmekte olan 5132106 No'lu "Termik Santraller için Türk Linyitlerine Uygun Yakıcı Geliştirilmesi" Projesi altında gerçekleştirilmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda bilgisi ve tavsiyeleriyle bana yol gösteren ve eleştirileri ile tezimi en güzel şekilde tamamlamamı sağlayan çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail TEKE'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu yüksek lisans tezi teorik, sayısal ve deneysel çalışmalarıyla TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir. Konuyla ilgili olarak sağlanan imkânlardan ötürü Enerji Enstitüsü Müdür Yardımcısı Sayın Dr. Osman Okur'a teşekkürlerimi iletirim.

Termik Santral Teknolojileri Grubu'nda bursiyer olarak araştırmalarda bulunduğum 21 aylık süreçte bana destek olan, bilginin paylaştıkça çoğaldığı bilinciyle benden bildiklerini esirgemeyen ve fikirlerime mütemadiyen saygı gösteren uzman araştırmacılar Sayın Dr. Selçuk Ataş ve Sayın Murat Kahraman'a minnettarım.

Tezimin gerçekleşmesi sürecinde deney düzeneği kurulumundan, ölçümlerin yapılmasına kadar her aşamada yoğun emek sarfederek tezimin bugüne gelmesini sağlayan Uzman Teknisyen Sayın Koray Yaşa'ya, yapmış oldukları çalışmalarla bu teze kapı aralayan ve fikirlerini benimle paylaşan araştırmacılar Sayın Sefa Yalçın ve Sayın Oğuzcan Gündüz'e de teşekkürlerimi borç bilirim.

Günlük hayatta bana moral olan, kötü günlerimde yanımda bulduğum benim için çok kıymetli olan aileme ve ismini teker teker sayamadığım kıymetli dostlarıma ve sevdiklerime çok teşekkür ederim.

Ağustos, 2016

Muhammed Raşit YILDIRAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Orijinal Katkı.....	2
BÖLÜM 2	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Bir Enerji Kaynağı Olarak Kömür	3
2.2 Pülverize Kömür Yakıcıları.....	6
2.3 Önceki Akademik Çalışmalar.....	9
BÖLÜM 3	
YANMA AERODİNAMIĞI İLE İLGİLİ TEORİK BİLGİLER	19
3.1 Kömürün Yanması ile İlgili Genel Bilgiler	19
3.2 Yanma Aerodinamiği ve Yanma Sürecine Etkileri	20
3.2.1 Karışımın Sağlanması	21
3.2.2 Girdaplı Akışlar.....	22
3.2.3 Merkezi Geri Dönüş Bölgesi ve Alev Etkileri.....	24
3.2.3.1 Alevde Kararlılığın Sağlanması	25
3.2.3.2 NO _x Salınımlarının Azaltılması	26

3.3	Performans Kriterleri	28	
3.3.1	Girdap Sayısı	28	
3.3.2	Girdap Verimi.....	30	
3.3.3	Geri Dönüş Hava Debisi	31	
3.3.4	Geri Dönüş Bölgesi Geometrisi.....	32	
3.3.5	Alev Tipleri	33	
BÖLÜM 4			
DENEYSEL ÇALIŞMALAR			35
4.1	Deney Sistemi	35	
4.1.1	Ölçeklendirme ve Boyutsal Benzeşim Hesapları	35	
4.1.2	Deney Sistemi Kurulumu ve İyileştirmeler	37	
4.1.3	Ölçüm Ekipmanları.....	41	
4.2	Yanma Odasında Hız Dağılımının Bulunması	43	
4.2.1	Hız Ölçümleri	43	
4.2.2	Hız Ölçüm Sonuçları.....	47	
4.2.3	Ölçüm Belirsizliği Hesapları	50	
BÖLÜM 5			
SAYISAL ANALİZLER			54
5.1	Türbülans Modelleme ve Yöneten Denklemler	57	
5.2	Katı Modelleme ve Akış Hacminin Elde Edilmesi	58	
5.3	Ağ Yapısının Oluşturulması	60	
5.4	Ayrıklaştırma	62	
5.5	Sınır Koşulları	62	
5.6	Doğrulama.....	64	
BÖLÜM 6			
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER			68
6.1	Bulgular	68	
6.2	Bulguların Yorumlanması.....	74	
6.3	İleri Çalışma Önerileri.....	80	
KAYNAKLAR.....			81
ÖZGEÇMİŞ.....			85

SİMGE LİSTESİ

k	Türbülans Kinetik Enerjisi (m^2/s^2)
ϵ	Türbülans Yitim Hızı (m^2/s^3)
ω	Özgül Türbülans Yitim Hızı (1/s)
τ	Efektif Zaman (s)
m	Kütle (kg)
\dot{m}	Kütlesel Debi (kg/s)
ρ	Özkütle (kg/m^3)
d	Çap (m)
x	Eksenel mesafe (m)
r	Yarıçap (m)
U	Akışın Eksenel Hızı (m/s)
V	Akışın Radyal Hızı (m/s)
W	Akışın Teğetsel Hızı (m/s)
G_ϕ	Açısal Momentum Eksenel Akısı
G_x	Eksenel İtki
δ	Girdap Tipine Bağlı Sabit
\dot{E}_k	Kinetik Enerji Akısı (W)
λ	Hava Fazlalık Katsayısı
A	Kesit Alanı (m^2)
α	Yalpalama Açısı ($^\circ$)
β	Yunuslama Açısı ($^\circ$)
P	Basınç (Pa)
k_{12}	Dinamik Basınç Katsayısı

S	Girdap Sayısı
S'	Düzeltilmiş Girdap Sayısı
S'_{ort}	Ocak İçindeki Ortalama Girdap Sayısı
X_m	Girdap Sayısı Nüfuz Etme Katsayısı
M_{GD}/M_O	Resirküle Olan Toplam Havanın Giriş Debisine Oranı



KISALTMA LİSTESİ

HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HM	Geri Dönüş Bölgesi Hacim Merkezi Katsayısı
KA	Kanat Açısı
KEA	Kanat Eğim Açısı
MO	Momentum Oranı
PD	Parçacık Penetrasyon Derinliği Katsayısı
PKYS	Pülverize Kömür Yakma Sistemi
STS	Soğuk Test Sistemi
UZ	Geri Dönüş Bölgesi Uzunluk Katsayısı
ASTM	American Society for Testing and Materials
IFRF	International Flame Research Foundation
LDA	Laser Doppler Anemometry
LES	Large Eddy Simulation
OFA	Over-Fire Air
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
Re	Reynolds Sayısı
RSM	Reynolds Stress Turbulence Model
SCR	Selective Catalytic Reduction
SST	Shear Stress Transport
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Kok partikülünün yanma mekanizması [1] 4
Şekil 2.2	Yaklaşık analiz sonuçlarına göre kömür tiplerinin içerikleri [1] 5
Şekil 2.3	(a) U alevli yakıcı, (b) türbülans tipi yakıcı, (c) teğetsel ateşlemeli yakıcı, (d) siklon yakıcı [2] 7
Şekil 2.4	Eksenel kanatçıklı girdap üreteçleri [6] 8
Şekil 2.5	Yanma haznesi içerisinde geri dönüş bölgesi [8] 11
Şekil 2.6	Farklı blokaj oranlarında geri dönüş bölgesi oluşumu [10] 11
Şekil 2.7	Dokuz farklı girdap üreteçinde girdap sayılarının bozunum etkisi [12] 13
Şekil 2.8	(a) Tasarlanan girdap üreteci, (b) eksenel hızlar için türbülans modelleri karşılaştırma [13] 13
Şekil 2.9	LES ve RANS modellerinin eksenel hızlarının kıyaslanması [14] 14
Şekil 2.10	Farklı kanat açılarında geri dönüş bölgesi sınırları [19] 16
Şekil 2.11	Farklı partikül boyutları ve girdap sayılarında geri dönüş bölgesi sınırları ve partikül yörüngeleri [21] 17
Şekil 2.12	Linyit ve bitümlü kömür için piroliz ve oksidasyon sürecinde C ve N kütle kaybının toplam oransal kütle kaybına oranı [23] 18
Şekil 3.1	Kömür partikülünün evrimi [25] 20
Şekil 3.2	Bir girdap üreteçinde oluşan geri dönüş bölgesi ile eksenel (üstte) ve teğetsel hızlar (altta) [27] 22
Şekil 3.3	Girdap üreteçinde oluşan 3 boyutlu helisel akım çizgileri [28] 23
Şekil 3.4	Dik kenarlı bir objenin arkasında alev oluşumu ve resirkülasyon [27] 26
Şekil 3.5	Geri dönüş bölgesi geometrik özellikleri 32
Şekil 3.6	IFRF'ye göre alev tipleri 33
Şekil 3.7	En uygun geri dönüş bölgesi geometrisi 34
Şekil 4.1	Benzeşim hesabı sonucu elde edilen birincil-ikincil kanal çapları [12] 37
Şekil 4.2	Soğuk test düzeneği genel görünümü 38
Şekil 4.3	Birincil-ikincil hava kanalları. İyileştirmeden önce (üstte) ve iyileştirmeden sonra (altta) 39
Şekil 4.4	Hava fanları (üstte) ve frekans kontrol panosu (altta) [12] 40
Şekil 4.5	Deneylerde kullanılan girdap üreteci 41
Şekil 4.6	Pervane tip anemometre ile hız ölçümünün yapılması [12] 42
Şekil 4.7	Kobra başlı pitot delikleri ve açıları 43
Şekil 4.8	Yanma haznesi ölçüm delikleri 44
Şekil 4.9	Pitot çubuğunun bir iple askılanarak sabitlenmesi 44

Şekil 4.10	Test çubuğu üzerinde ölçüm mesafeleri.....	45
Şekil 4.11	Yalpalama açısı bulma düzenekleri: açıölçer (solda) ve iplikçik (sağda).....	46
Şekil 4.12	Eksenel hız ölçüm sonuçları ve geri dönüş bölgesi şekli.....	48
Şekil 4.13	Teğetsel hız ölçümleri	49
Şekil 5.1	Girdap üretende incelenen parametreler (yakıcı çıkışında)	54
Şekil 5.2	Sabit bir kanat açısında (0°) kanat eğim açısının akış hız vektörlerine etkisi.	55
Şekil 5.3	Sabit bir kanat eğim açısında (0°) kanat açısının akış hız vektörlerine etkisi.	56
Şekil 5.4	Deneyi yapılan girdap üreticilerinin katı modelleri. Giriş (sol) ve çıkış (sağ) görünümleri	59
Şekil 5.5	STS bölgesi katı modeli	59
Şekil 5.6	Çözüm hacminin 6'da 1 periyodik modellenmesi.....	60
Şekil 5.7	Çözüm bölgesinde dörtyüzlü ağ örgüsü.....	61
Şekil 5.8	Eksenel hızlar için deney ve HAD sonuçları	64
Şekil 5.9	Teğetsel hızlar için deney ve HAD sonuçları	65
Şekil 5.10	Girdap üretici çıkışında oluşan 3 boyutlu akım çizgileri (üstten).....	67
Şekil 5.11	Girdap üretici çıkışında oluşan 3 boyutlu akım çizgileri (yandan)	67
Şekil 6.1	B tipi geri dönüş bölgeleri ve birincil hava nüfuzu kesit görünümleri	70
Şekil 6.2	Parçacık penetrasyon derinliğinin performans kriterleriyle değişimi	75
Şekil 6.3	Toplam resirküle olan havanın performans kriterleriyle değişimi	75
Şekil 6.4	Geri dönüş bölgesi uzunluğunun performans kriterleriyle değişimi	76
Şekil 6.5	Hacim merkezi konumunun performans kriterleriyle değişimi.....	76
Şekil 6.6	Düzeltilmiş girdap sayısının performans kriterleriyle değişimi.....	77
Şekil 6.7	Ortalama girdap sayısının performans kriterleriyle değişimi	77
Şekil 6.8	Girdap sayısı nüfuz etme katsayısının performans kriterleriyle değişimi.....	78

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Soma linyit kömürü elementel ve ısı değerleri	6
Çizelge 2.2 Yanma aerodinamiği performans parametreleri [7].....	10
Çizelge 4.1 STS ve PKYS benzeşim hesabı sonuçları [12]	36
Çizelge 4.2 STS ve PKYS momentum oranları [12]	36
Çizelge 4.3 Hava besleme fanlarının teknik özellikleri [12].....	40
Çizelge 4.4 Dijital manometre teknik özellikleri.....	51
Çizelge 4.5 Farklı deliklerdeki belirsizlikler	51
Çizelge 4.6 S1 ölçüm istasyonu için belirsizlik analizi sonuçları	52
Çizelge 5.1 HAD analizi sınır koşulları	63
Çizelge 6.1 Farklı koşullarda performans değerleri.....	71
Çizelge 6.2 Farklı koşullarda performans değerleri (devamı)	72
Çizelge 6.3 Farklı koşullarda performans değerleri (devamı)	73
Çizelge 6.4 Farklı momentum oranlarına karşılık gelen performans kriterleri	74
Çizelge 6.5 Farklı kanat eğim açılarına karşılık gelen performans kriterleri	74
Çizelge 6.6 Farklı kanat açılarına karşılık gelen performans kriterleri	74

PÜLVERİZE KÖMÜR YAKICISI AERODİNAMIĞININ İNCELENMESİ

Muhammed Raşit YILDIRAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail TEKE

Yakma sistemlerinde yanma prosesinin temel bileşenlerinden biri olan yanma aerodinamiği bir yakıcı tasarımında ilk olarak ele alınması gereken konudur. Pülverize haldeki kömür partüküllerinin hava molekülleriyle en ideal şekilde karşılaşarak yanma veriminin yüksek olması ve kirletici emisyonların düşük olması için uygun bir girdap üretici tasarlanmalıdır. Tasarımı yapılan girdap üretici yanma prosesinde teknik koşulları sağlamalıdır. Bilhassa yanma odası içerisinde akışın geri dönüş bölgesi oluşturması ve bu bölgenin geometrisi yanma aerodinamiği üzerinde, dolayısıyla alev sıcaklığından tam yanmanın sağlanmasına ve kirletici emisyonların düşürülmesine kadar çok sayıda performans kriteri üzerinde etkilidir.

Çalışma kapsamında ilk aşamada 250 kW_t gücünde bir yanma odasını temsil eden soğuk test düzeneği kurularak hız ölçümleri yapılmış, daha sonra sonlu hacimler yoluyla sayısal çözüm deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. 6 farklı kanat açısı, 4 farklı kanat eğim açısı ve 7 farklı momentum oranı bu aşamada incelenmiş ve toplamda 168 analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar yanma aerodinamiği performans parametrelerine göre değerlendirilerek en uygun girdap üretici belirlenmiştir. Bu çalışmayı farklı kılan, akış merkezinde geri dönüş bölgesinin oluşması ve geometrik şekli üzerindeki etkin faktörlerin etraflıca araştırılmış olması ve çok sayıda hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ile desteklenmiş olmasıdır. Ayrıca yapılan literatür

çalışmasında görüldüğü kadarıyla kanat eğim açısı da ilk defa incelenen bir parametredir.

Elde edilen bulgulara göre incelenen her üç parametre de merkezi geri dönüş bölgesi oluşumu ve şekli üzerinde etkili olup, kanat açısı ve momentum oranının etkisi daha gözle görünürdür. En ideal geri dönüş bölgesi şekli 35.5° açığa sahip kanatlarda ve $20^\circ - 25^\circ$ aralığındaki kanat eğim açılarında gerçekleşmektedir. Ayrıca, optimum momentum oranı 0.38 ve 0.53 arasında, ortalama olarak 0.45 değerinde gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pülverize kömür yakıcısı, yanma aerodinamiği, girdaplı akışlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, soğuk test düzeneği, merkezi geri dönüş bölgesi, kobra başlı pitot



**INVESTIGATION ON COMBUSTION AERODYNAMICS OF A PULVERIZED
COAL BURNER**

Muhammed Raşit YILDIRAN

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. İsmail TEKE

Combustion aerodynamics is one of the key subjects of combustion process that must be priorly handled during design of a burner. An appropriate swirler must be designed in order to attain ideal mixing between air molecules and pulverized coal particles, which results in high efficiency and low pollutant emissions. Designed swirler must meet the technical conditions of combustion process. More particularly, formation of recirculation zone in flow domain and geometry of this zone is effective on combustion aerodynamics. Accordingly, it is effective on complete combustion, high flame temperature, reducing pollutant emissions.

Within scope of this study, cold test rig which represents combustion chamber is installed first, then velocity measurements have been done. After, numerical solution is verified with experimental data. 6 different blade angles, 4 blade slope angles and 7 momentum rates were investigated and 168 analyses have been completed. Results were assessed according to performance criteria. What makes this study unique is comprehensive research on effective factors on formation of recirculation zone and its geometry via so many computational fluid dynamics analyses. In addition, it is seen that from literature research, blade slope angle investigated in this study for the first time.

Based on findings, three parameters investigated are effective on formation and shape of central recirculation zone. Blade angle and momentum ratio is more substantial than blade slope angle. Results show that swirler having 35.5° blade angle and blade slope angle within scope of 20° and 25° is best for formation of optimum recirculation zone. Moreover, optimum momentum ratio takes place between 0.38 and 0.53 something about 0.45.

Keywords: Pulverized coal burner, combustion aerodynamics, swirling flows, computational fluid dynamics, cold test rig, central recirculation zone, five hole probe



1.1 Literatür Özeti

Küresel ısınmanın etkilerinin iyiden iyie etkisini hissettirmesine karşın, kömür halen en temel enerji kaynaklardan bir tanesi olmayı sürdürmektedir. Özellikle enerji üretim sistemlerinin çevreye olan etkilerinin bolca tartışıldığı bir zamanda dünyadaki ve ülkemizdeki mevcut kömür kaynakları göz önüne alındığında kömürün elektrik üretimindeki payını önümüzdeki yıllarda da koruyacağı tahmin edilebilmektedir. Türkiye gibi enerji çeşitliliği kısıtlı olan ülkelerde enerji arzının sağlanabilmesi için elektrik üretiminin baz yükünün konvansiyonel termik santrallerden sağlanması bir seçimden öte zorunluluk haline gelmiştir. Bu bağlamda, çevreye etkinin en düşük seviyede olması için kirletici emisyonları ve sera gazı emisyonları en az olan yakma sistemleri önem kazanmıştır.

Günümüzdeki yakma sistemlerinde kullanılan kömürler içeriğine göre farklı metodlarla yakılmaktadır. Her kömürün kendi kimyasal ve fiziksel bileşenlerine en uygun yakma yöntemleriyle alakalı sürekli yeni teknolojiler geliştirilmekte, daima verimi yüksek sistemler ile çevreye daha az zararlı temiz teknolojiler hedeflenmektedir. Yüksek verimli, düşük emisyonlu yakıcılar ancak iyi bir yanma aerodinamiği performansına sahip yakıcılarla gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda yanma aerodinamiğinin yakıcı performansına direkt etkisi söz konusudur.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı 250 kW_t gücünde bir pülverize kömür yakma sisteminde, izotermal koşullar altında yanma aerodinamiğinin deneysel ve sayısal olarak sonlu hacimler yöntemiyle incelenerek anlaşılmasıdır. Kurulan soğuk test düzeneğinde yapılan hız ölçümleriyle sayısal analiz doğrulanarak girdap üreticinin kanat açısı, kanat eğim açısı ve birincil-ikincil hava momentum oranının yanma aerodinamiği, daha özelde merkezi geri dönüş bölgesi geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışmayı farklı kılan, merkezi geri dönüş bölgesinin oluşumu, geometrik şekli ve kalitesi üzerindeki etkin faktörlerin etraflıca araştırılmış olması ve 168 adet hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi (HAD) ile desteklenerek merkezi geri dönüş bölgeleri ve oluşumu hakkında önemli bulgular içermesidir. Ayrıca, yapılan literatür araştırmasında görüldüğü kadarıyla kanat eğim açısı da ilk defa bu çalışmada incelenen bir parametredir.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

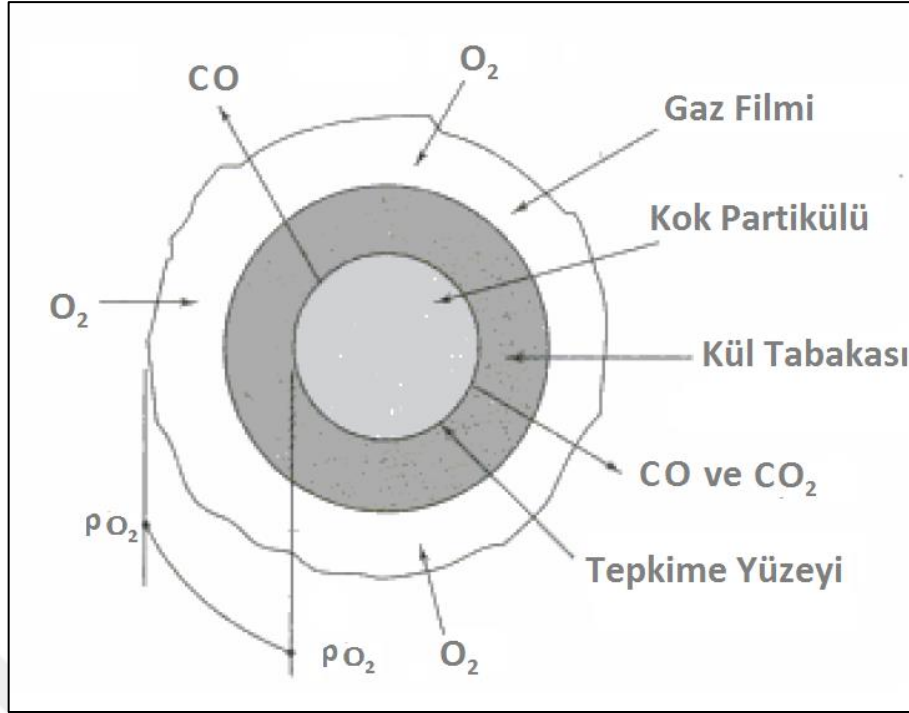
Yapılan literatür araştırması kapsamında öncelikle bir enerji kaynağı olarak kömür ve özelliklerinden bahsedilmiş, daha sonra pülverize kömür yakma teknolojilerinden ve son olarak da yanma aerodinamiği üzerine yayınlanmış akademik çalışmalar irdelenmiştir.

2.1 Bir Enerji Kaynağı Olarak Kömür

Kömür hidrokarbon içeren kompleks bir yakıttır. Doğada organik materyallerin basınç altında milyonlarca yıl süren bozunmaları sonucu meydana gelir. Petrol ürünlerinden farklı olarak, kömürün kompozisyonu bozunum derecesine, bulunduğu konuma, çevresindeki ortama bağlı olarak oldukça farklılık gösterebilir. Bunun için harmanlama işlemi kömürlerde önemlidir. Aynı zamanda yanma sonucu oluşan kül kazan yüzeylerine yapışma eğiliminde olacağından, kazanlar ve yakıcıları yakılacak kömürün kalorifik değeri, uçuculuğu ve içeriği gibi faktörler göz önüne alınarak tasarlanmalıdır.

[1]

Kömür karmaşık bir yakıt olduğu için diğer yakıtlardan farklı olarak kömürün yanma doğasının anlaşılması güçtür. Yanma esnasında iki fazlı akış ve kütle transferi koşulları, uçucu maddelerin bünyeden uzaklaşması süreci, çar yanması, kömür partikülü üzerinde kül birikmesi, kömürün içerdiği nem-kükürt-hidrojen gibi maddelerin derişiminin değişkenlik göstermesi, türbülans ve kalorifik değerlerin farklılık göstermesi gibi sebeplerden ötürü kömürün yanması yakıtlar içerisinde en zor anlaşılan türdür diyebiliriz. (Şekil 2.1) [1]



Şekil 2.1 Kok partikülünün yanma mekanizması [1]

ASTM D 388 Standartları kömürün organik değerlerinin ve ömrünün ölçümü ile alakalı sınıflandırmayı temel alır. Kömürler sınıflandırılırken farklı kriterlerin göz önünde bulundurulduğu durumlar da vardır. ASTM D 388 standardına göre kömürün basınç ve su altındaki şekil değiştirmesi gibi kriterlere bağlı olarak kömür sınıfları aşağıdaki gibi olmaktadır [2];

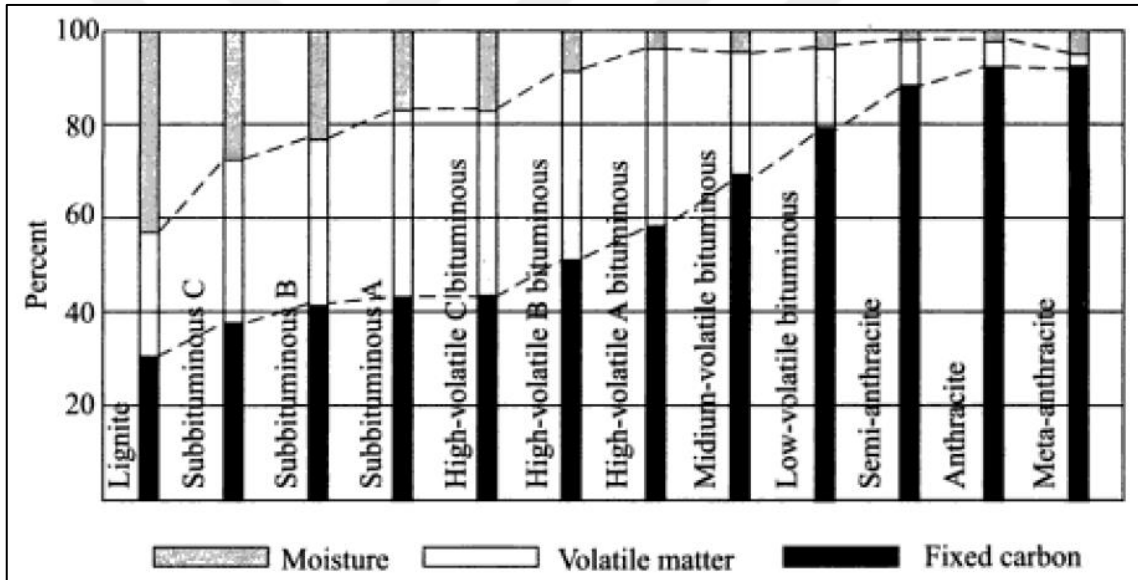
Antrasit: En kaliteli kömürdür. %86-98 oranında karbon içerir. Bu karbon genelde bir bileşik halinde değil saf halde bulunur. Parlak, sert, kırılğan ve yoğun bir maddedir. Karbon-hidrojen-azot içerikli uçucu madde oranı % 2-14 arasında olup bu maddelerin çoğunluğunu CH_4 (metan) oluşturur. Isıl değeri bitümlü kömürün hemen altındadır. % 98 karbon içeriği ve üzeri antrasitler meta antrasit olarak adlandırılıp saf karbon içerir. %92-98 arası antrasit, %86-92 arası da yarı antrasit olarak isimlendirilir. Antrasit yavaş yavaş yanar ve genellikle pulverize edilmeden kullanılır.

Bitümlü Kömür: Kömür sınıfları arasında en büyük paya sahip olan türdür. % 46 ile 86 arasında saf karbon, %20-40 arasında uçucu madde bulundurur. Uçucu madde içeriği antrasite göre daha komplekstir. Bitümlü kömürün ısıl değeri 25600-32600 kJ/kg arasındadır. Bitümlü kömür kolay yanar ve pulverize edilerek kullanılır.

Alt Bitümlü Kömür: Bitümlü kömürün ısı değeri düşük versiyonudur. Aynı zamanda nem oranı yüksektir (%15-30) ve koyu siyah renklidir. Genelde A, B, C gibi kaliteye bağlı gruplara ayrılır. Isıl değeri 19300-26750 kJ/kg arasındadır.

Linyit: En düşük ısı değere sahip kömürdür. Odunsu laminer tabakalar içerdiğinden fiber şeklinde bu tabakalar gözlenebilir. Rengi kahverengiye yakındır. Oluşumu esnasında reçine yönünden zengin ağaçlardan meydana geldiğinden nem oranı (%30) oldukça yüksektir. Isıl değeri 14650-19300 kJ/kg arasındadır. Yüksek nem ve düşük ısı değerinden dolayı taşıma yönünden ekonomik bulunmaz. Bu yüzden genelde uzun mesafelerde taşınmaz yahut maden bölgesinde kullanılır. Kalitesine göre A ve B diye iki alt gruba ayrılır.

ASTM D 388'e göre sınıflandırılmış kömürlerin içerikleri Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Yaklaşık analiz sonuçlarına göre kömür tiplerinin içerikleri [1]

Tez kapsamında incelenecek linyit kömürü Soma/Manisa sahasından çıkartılmaktadır. Bu kömürlerin farklı ölçüm numunelerinde yapılan elementel analiz sonuçları ve ısı değeri hesabı Çizelge 2.1'de verilmiştir;

Çizelge 2.1 Soma linyit kömürü elementel ve ısıl değerleri

C	H	N	S	A(kül)	O	W(nem)	Toplam	Alt I. D.	Üst I. D.
								kj/kg	kj/kg
%33	%2.3	%0.5	%0.5	%36.9	%12.9	%13.1	%100	11222	12048

2.2 Pülverize Kömür Yakıcıları

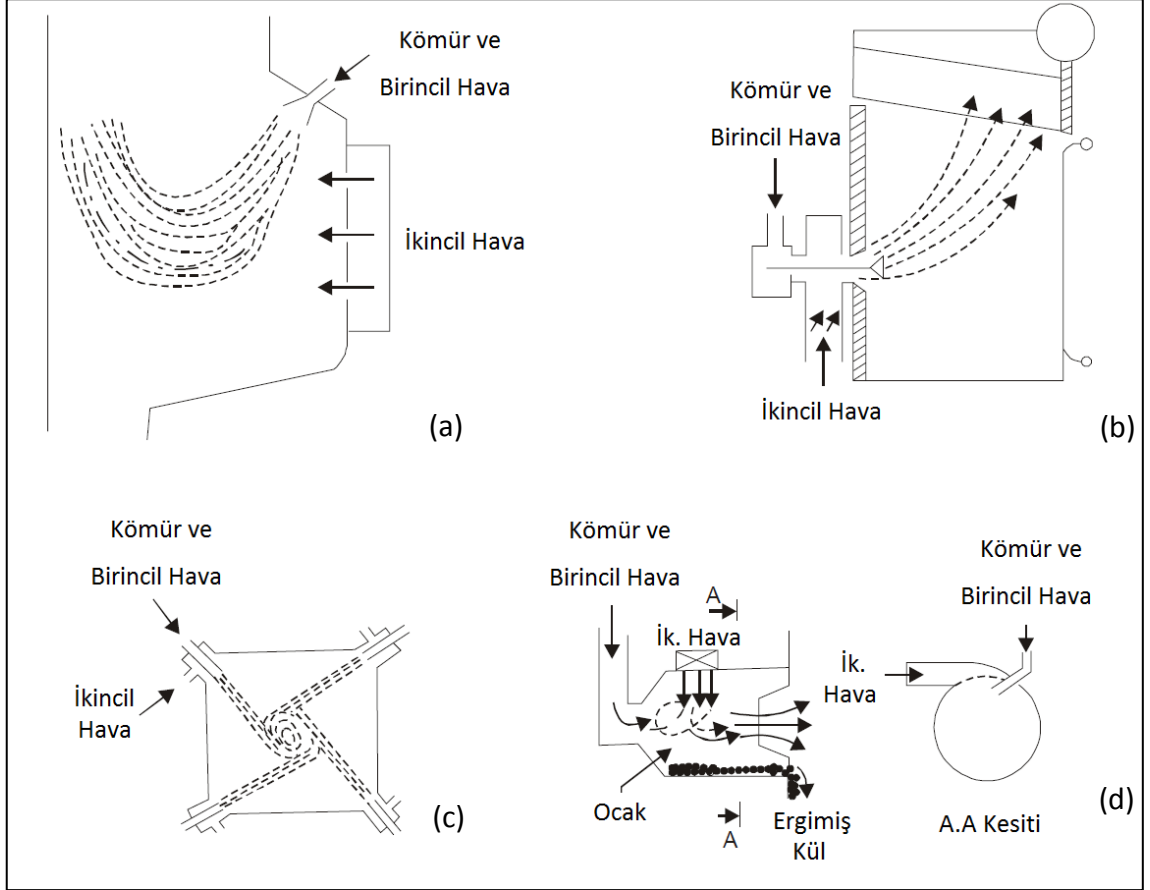
Pülverize kömürler, partikül boyutu, kömür ısıl değeri gibi özelliklerine göre farklı tiplerdeki yakma sistemlerinde kullanılır. Diğer yakıcılara göre farkı ise hava-yakıt karışımının hızlı şekilde gerçekleşebilmesidir. Bitümlü kömürlerde türbülans tipi yakıcı kullanılırken, düşük uçucu maddeye sahip kömürler uzun alevli yakıcılarda yakılmalıdır. Bir pülverize kömür yakıcısının sahip olması gereken gereklilikler aşağıdaki gibidir [2];

- Birincil hava ve kömür yanma odasına gelmeden evvel karışmış olmalı ve bu karışım ikincil havayla temas ettiğinde yeteri kadar türbülans üretilebilmelidir.
- Kömür yakıcı içerisine doğru oranlarda beslenmeli ve ateşleme kararlı bir şekilde gerçekleştirilerek alev şekli kontrol altında tutulmalıdır. İkincil hava bu işlevi görmekle birlikte, gereğinden fazla ikincil hava karışımının soğumasına neden olarak kömür partiküllerinin tutuşma sıcaklığına erişmesine engel olur.
- Kömür-hava karışımı yakıcı ağızından alev cephesinin hareketine uygun hızlarda gönderilmelidir, böylece alevde kopma ve geri kaçma durumları ortadan kalkar.

Bir pülverize kömür yakma sisteminde evvela yakılacak kömür değirmenlerde 5-400 µm arası boyutlara küçültülerek birincil hava yardımıyla yakıcı ağızına getirilir ve yakıcı ağız çıkışında yakma havasının çoğunu oluşturan ikincil hava ile uygun yanma şartlarını oluşturabilecek şekilde karışması sağlanarak yakılır. Düşük NOx salımlı yakıcılarda ise birincil ve ikincil yakma havalarına ilave olarak üçüncül yakma havası da yanma hacmine dâhil edilir. Yakma havaları arasında etkileşimin olması ve yanma sürecinde açığa çıkan ısının miktarı yanma reaksiyonunun gelişimini, yanma bölgesi sıcaklığı ile birincil ve ikincil havaların stokiometrisini belirlemektedir [3].

Pülverize kömür yakıcıları jet tipi ve duvar tipi yakıcılar olarak sınıflandırılabilir. Jet tipi yakıcılar genellikle tek başına değil, farklı sayıda yakıcı konfigürasyonu ile beraber kullanılır. U alevli yakıcı, türbülans tipi yakıcı, teğetsel ateşlemeli yakıcı ve siklon

Yakıcılar jet tipi yakıcılardır. (Şekil 2.3) Duvar tipi yakıcılar genellikle akışa girdap ve türbülans etkisini tek başına verebildiği için küçük ölçekli kazanlarda tek başına kullanılabilir. Aynı zamanda büyük ölçekli kazanlarda çoklu düzenlerde yerleştirilerek kullanılabilir. Eksenel ve teğetsel kanatçıklı yakıcılar duvar tipi yakıcıdır. Farklı tiplerdeki yakıcılar aşağıdaki gibidir [2], [4], [5];



Şekil 2.3 (a) U alevli yakıcı, (b) türbülans tipi yakıcı, (c) teğetsel ateşlemeli yakıcı, (d) siklon yakıcı [2]

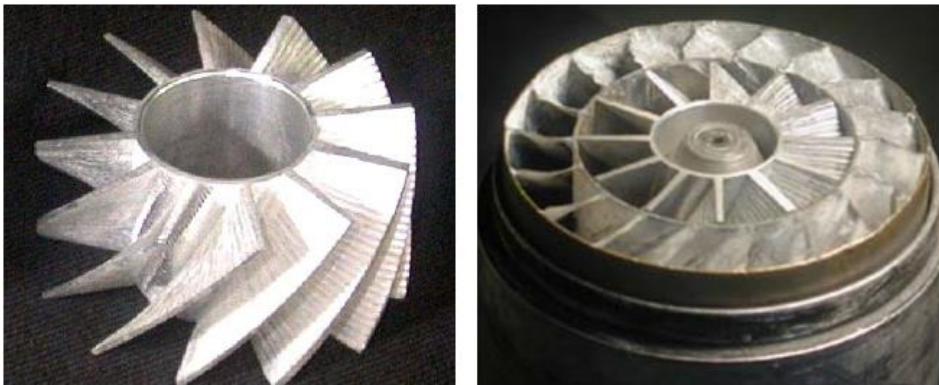
Uzun Alevli Yakıcı (U Alevli Yakıcı): Bu tip yakıcılar genellikle aşağı ateşleme düzeninde olup kömür partikülü için uzun seyahat mesafesi anlamına gelmektedir. Bu sayede tam yanmanın gerçekleşmesi yeterince zamanın geçmesi sağlanır. Bu yöntem tutuşması güç olan, yani yanma süreleri yüksek kömürler için uygundur. Ancak son yıllarda geliştirilen yakma yöntemleriyle birlikte tedavülden kalkmış ve kullanılmamaktadır (Şekil 2.3 (a)).

Kısa Alevli Yakıcı (Türbülans Tipi Yakıcı): Bu tip yakıcılarda pülverize kömür ocağa yatay düzende sıralanmış yakıcı ağızlarından beslenmekte ve ocak içerisinde ikincil hava ile karşılaşarak gerekli yakma gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.3 (b))

Teğetsel Ateşlemeli Yakıcılar: Bu tip yakma sistemlerinde yakıcılar ocağın köşelerine denk gelecek şekilde yerleştirilir. Her bir yakıcıya eğim verilerek merkezde hayali bir çembere teğet olacak şekilde alev oluşması sağlanır. Düşük NO_x salınımları, işletme kabiliyetleri, farklı kömür tipleriyle kullanılabilmesi ve iyi yanma verimleri sayesinde dünya üzerinde çok sayıda termik santralde tercih edilmektedir. (Şekil 2.3 (c))

Siklon Yakıcılar: Siklon tipi yakıcılar pülverize kömür yerine daha çok ezilmiş haldeki kömürlerin yakılmasında kullanılır. Siklon yakıcılar kömürü pülverize etmek için değirmenlere ihtiyaç duymaz. Kömürü ezme için harcanan güç pülverize etmeye göre daha düşüktür. Aynı zamanda uçucu külün de önüne geçilmiş olur. Bu yakıcıda oluşan kül ergimiş halde çökerek daha sonra sistemden atılır. (Şekil 2.3 (d))

Duvar Tipi Yakıcılar: Bu tip yakma sistemlerinde yakıcının ikincil hava kanalına aksel ya da teğetsel olarak yerleştirilen kanatçıklar sayesinde akışa girdap hareketi verilerek ocak içerisinde kalma süresi artırılır ve karışım iyileştirilerek tam yanma sağlanır. Aksel tip kanatçıklar kanal içine akış ekseninde yerleştirilirken, teğetsel kanatçıklar ikincil havanın kanal içerisine kanal eksenine teğet girecek şekilde girmesini sağlar. Kanatçıkların açıları değiştirilerek aynı zamanda girdabın derecesinin de değişmesi mümkündür. Genellikle uçucu madde miktarı %25'ten fazla bitümlü kömürlerde ve linyitlerde kullanılır [4], [5]. Bu çalışmada verilen yakıcı aksel kanatçıklı duvar tipinde bir yakıcı olup linyitin bu tip yakıcıda yakılması üzerinde durulmuştur. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4 Aksel kanatçıklı girdap üreteçleri [6]

2.3 Önceki Akademik Çalışmalar

Yapılan literatür araştırmasında görüldüğü üzere, yanma aerodinamiği üzerine yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. *Literatür taraması Scopus ve Science Direct portalları üzerinden gerçekleştirilmiştir.*

Yapılan akademik çalışmalardan bazılarında yanma koşulları test edilmeden evvel, tasarlanan yakıcıların izotermal koşullar altında gösterdikleri davranış deneysel olarak incelenmiştir. Ocak içerisinde akıştaki ters basınç gradyeninin etkisi ile oluşan merkezi geri dönüş bölgesi de aynı zamanda bu çalışmalarda üzerinde önemle durulan bir konudur [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Deneysel çalışmaların yanında sayısal analizler de bu kategorideki bazı yayınlarda incelenmiştir.

Literatür taramasında görüldüğü üzere, yakıcı içerisinde akışın hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile modellenmesine odaklanan yayınlar da mevcuttur. Bu çalışmalarda temel olarak farklı çözüm algoritmaları ile fiziksel modellerin karşılaştırmaları yapılmış ve içlerindeki en uygun modeller bulunmaya çalışılmıştır [13], [14], [15], [16].

Gerçekleştirilen çalışmalardan bir kısmı hem soğuk hem de sıcak koşullar altında ya da sadece sıcak koşullardaki yanma aerodinamiği etkilerini incelemiştir [17], [18], [19], [20], [21], [22]. Yakma deneylerinin yanı sıra sayısal analizlerin de olduğu bazı yayınlar bu kategoride değerlendirilmiştir.

Raj ve Ganesan [7] yaptıkları çalışmada aerodinamik anlamda en uygun kanat açısını bulmayı amaçlamışlardır. Bunun yanı sıra olarak kanat sayısı ve girdap üreticinin merkezinde göbek (hub) olup olmaması geometrik olarak incelenen diğer parametreler, uygun türbülans modelinin seçilmesi de incelenen akış parametresidir. Önceki çalışmalarda görüldüğü üzere hem güçlü hem zayıf girdaplı akışlarda tek bir türbülans modeli doğru sonuç vermemektedir. Bu çalışmadan çıkan sonuca göre zayıf girdaplı akımlar için standard k- ϵ modeli yeterli iken güçlü girdaplarda Reynolds stress modeline (RSM) başvurulmalıdır. Merkezi geri dönüş bölgesi kalitesi belirlenirken bazı karakteristikler belirlenmiştir (Çizelge 2.2). Bunlar girdap sayısı (S), resirkülasyon geometrisinin uzunluğunun ve genişliğinin girdap üretici çapına oranı (L/D, W/D), girdap üretici basınç kaybı faktörü (PLF), toplam resirküle olan kütleli debinin giriş kütleli debisine oranı (M_R/M_O), geri dönüş bölgesi yüzey alanının toplam hacme oranı

(S_A/V) gibi sayısal ifadelerdir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre 45° açılı 8 kanatlı ve 0.3 göbek/uç oranlı girdap üretici alev kararlılığı sağlama anlamında en iyi aerodinamik sonuçları vermektedir.

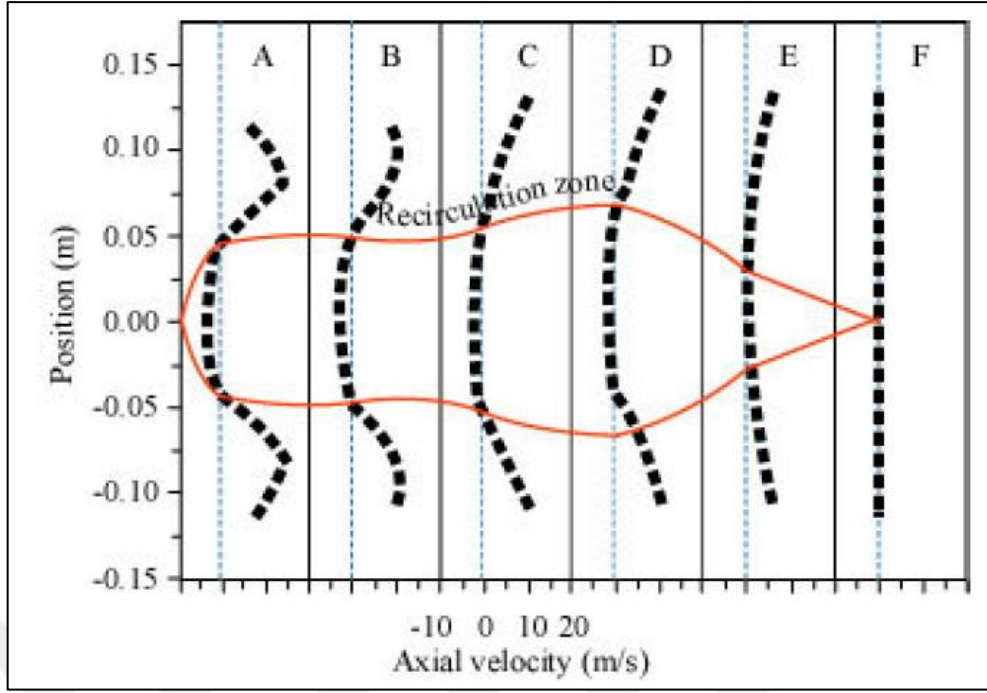
Çizelge 2.2 Yanma aerodinamiği performans parametreleri [7]

Characteristics and dimensions of recirculation zone for various swirlers								
S. No	Vane angle	S	L/D	W/D	$U_{r\max}/U_o$	PLF	M_R/M_O	S_A/V (per unit)
1	15°	0.27	–	–	0.00	0.74	–	–
2	30°	0.57	4.44	1.33	0.35	2.80	0.18	0.040
3	45°	1.00	6.54	1.70	0.53	5.65	0.74	0.030
4	60°	1.73	10.28	1.76	0.77	15.4	0.96	0.031

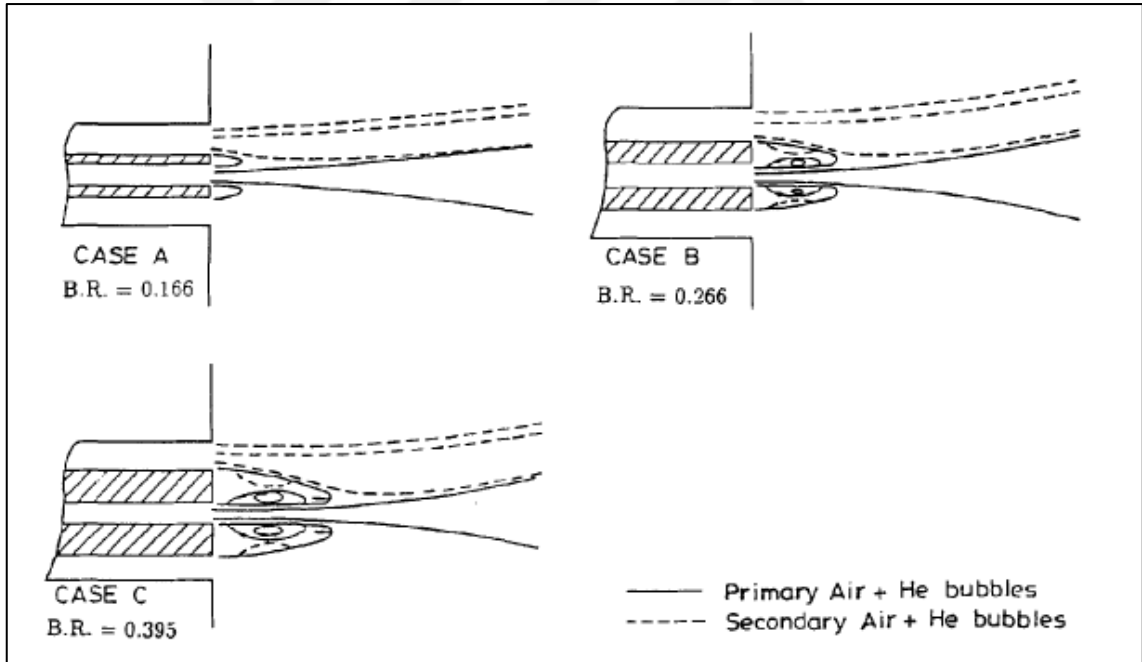
$U_{r\max}$ refers maximum reverse velocity and U_o refers average inlet velocity.

Raj ve Ganesan [8] bir diğer çalışmalarında 8 kanatlı ve 30° kanat açısına sahip bir girdap üreticinin yakıcı sonrası akışını kobra başlı pitot tüpü yardımıyla belirlemişlerdir. Kurulan deney düzeneğinde kobra başlı pitot tüpü yardımıyla aksel, teğetsel ve radyal hızları ölçmüşlerdir. Elde edilen sonuçlara göre 30° kanat açısına sahip bir girdap üreticinin alev kararlılığına yardımcı bir geri dönüş bölgesi oluşturduğunu bulmuşlardır (Şekil 2.5). Hız ölçümlerinin yakıcı akış karakteristiğinin anlaşılmasındaki önemini ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda çalışmanın sayısal modellerin doğrulanması için kıstas olabileceği belirtilmiştir.

Smart vd. [9] soğuk test sistemi (STS) tasarımında sıcak sistemden soğuk sisteme geçiş yapılırken bazı benzeşim kurallarını ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada bir yakma sisteminin tüm fiziksel ve kimyasal işlemlerinin benzeşim yöntemleri aracılığı ile ölçeklendirilmesinin pratikte mümkün olmadığını belirtmekle birlikte, bir takım benzeşim yöntemlerine dayanarak gerçeğe yakın sonuçların elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Çalışmada iki pratik yöntemden yararlanılabileceğini ifade edilmiştir. Bu yöntemler sabit hız yöntemi ve sabit kalma süresi yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Sabit hız yönteminde birincil ve ikincil hızlar sabit tutularak yakıcı boyutları birincil ve ikincil kanallarda aynı momentum akış hızları oranı korunacak şekilde ölçeklendirilmektedir. Bu sayede sıcak akışa ait momentum ve hız gibi dinamikler soğuk akış için simüle edilmiş olmaktadır.



Şekil 2.5 Yanma haznesi içerisinde geri dönüş bölgesi [8]



Şekil 2.6 Farklı blokaj oranlarında geri dönüş bölgesi oluşumu [10]

Ma vd. [10] eş merkezli dik kenarlı göbeğe sahip jet tipi bir endüstriyel yakıcıda yanma odasına püskürtülen havanın aerodinamik değişimlerini deneysel olarak izotermal koşullar altında incelemiştir. Çalışmada kontrol edilen parametreler; merkez dik kenarlı göbeğin blokaj oranı, koniklik açısı ve birincil-ikincil akışların hız oranları (U_s/U_p) olmuştur. Dik göbek arkasındaki geri dönüşü gözlemek için birincil ve ikincil havaya

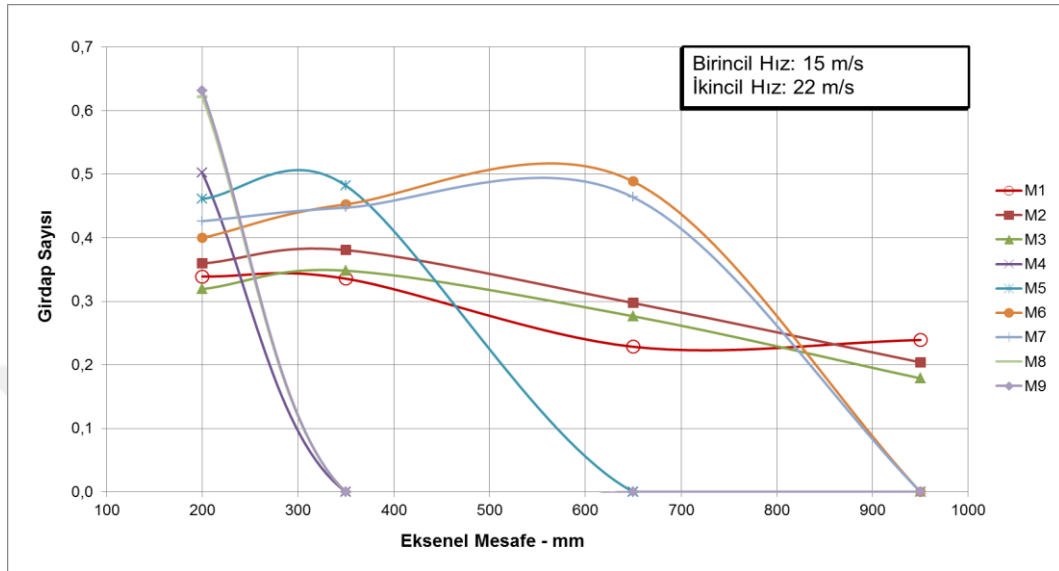
helyum baloncukları gönderilmiştir. 5 delikli pitot ile her noktadaki ortalama hız ölçümleri yapılmıştır. Çalışma sonunda saat yönüne göre birbirinin tersi yönde hareket eden iki adet eddy oluşmuş, ancak bu eddy'lerin birincil hava mı yoksa ikincil hava tarafından mı yönetildiği bilinmemiştir. Eğer birincil hava tarafından yönetiliyorsa birincil havadan bu bölgeye yakıtın geçeceği tahmin edilmiştir. Ayrıca, blokaj oranının artmasıyla resirkülasyon bölgesinin büyüdüğü, koniklik açısını artmasıyla da aynı etkinin gözlemlendiği belirtilmiştir (Şekil 2.6). Kontrol edilen üç parametrenin göreceli değiştirilmesiyle hava-yakıt karışımının iyileştirilerek alev sürekliliğinin sağlanacağı belirtilmiştir.

Shah vd. [11] deneysel olarak girdap üreticinde bulunan kanat sayısının akış karakteristikleri ve geri dönüş bölgesi üzerine olan etkilerini soğuk test koşullarında incelemiştir. Sırasıyla 6 ve 8 kanatçığa sahip iki farklı girdap üretici çalışmada test edilmiştir. Sonuç olarak 8 kanatçıklı girdap üreticinin 6 kanatlı olana göre yanma performanslarını iyileştirebilecek bir geri dönüş bölgesine sahip olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda 8 kanatçıklı girdap üreticinde nisbeten daha az basınç kaybının meydana geldiği belirtilmiştir.

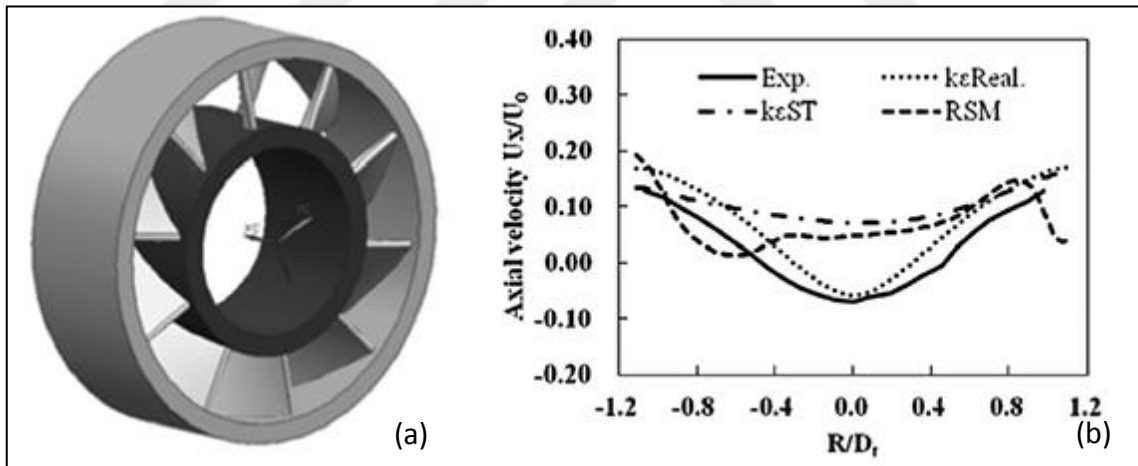
Gündüz [12] yapmış olduğu yüksek lisans tezinde soğuk test koşullarında 9 farklı aksel girdap üretici tasarımını deneysel olarak incelemiş, Taguchi yöntemiyle 4 farklı parametrenin girdap sayıları ve girdaplı akışın yanma haznesi içine nüfuzu üzerine etkilerini incelemiştir. Girdap üretici seçiminde bilhassa girdap etkisinin ne kadar uzun süre devam edebildiği incelenmiştir (Şekil 2.7). Ölçümler kobra başlı pitot aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak 45 derece kanat açısına sahip girdap üreticinin en uygun girdap koşullarını verdiği belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan test düzenekleri aynı zamanda bu tez kapsamında da kullanılmıştır.

Khandelwal vd. [13] yaptıkları çalışmada bir gaz türbini motorunda farklı kanat açıları ve kanat sayıları üzerinden detaylı tasarım metodları önermiş ve ocak içerisindeki akış karakteristikleri HAD aracılığıyla incelenmiştir. İlk aşamada girdap üretici tasarımı ampirik denklemler aracılığıyla gerçekleştirilmiş (Şekil 2.8 (a)), daha sonra tepkimesiz girdaplı akış $k-\epsilon$ realizeble türbülans modeli kullanılarak doğrulanmıştır (Şekil 2.8 (b)). Elde edilen sonuçlara göre kanat açısı, kanat sayısı ve debinin değiştirilmesiyle girdap

üretici performansında da ciddi bir değişiklik gözlenmiş. Eksenel ters akış hızı, eksenel doğrultudaki türbülans ve basınç düşümü kanat sayısının artmasıyla artmış, sonuç olarak hava/yakıt karışımı ve resirkülasyon yapısında iyileşme gözlenmesine karşın, yakıcının basınç düşümü olumsuz manada etkilenmiştir.



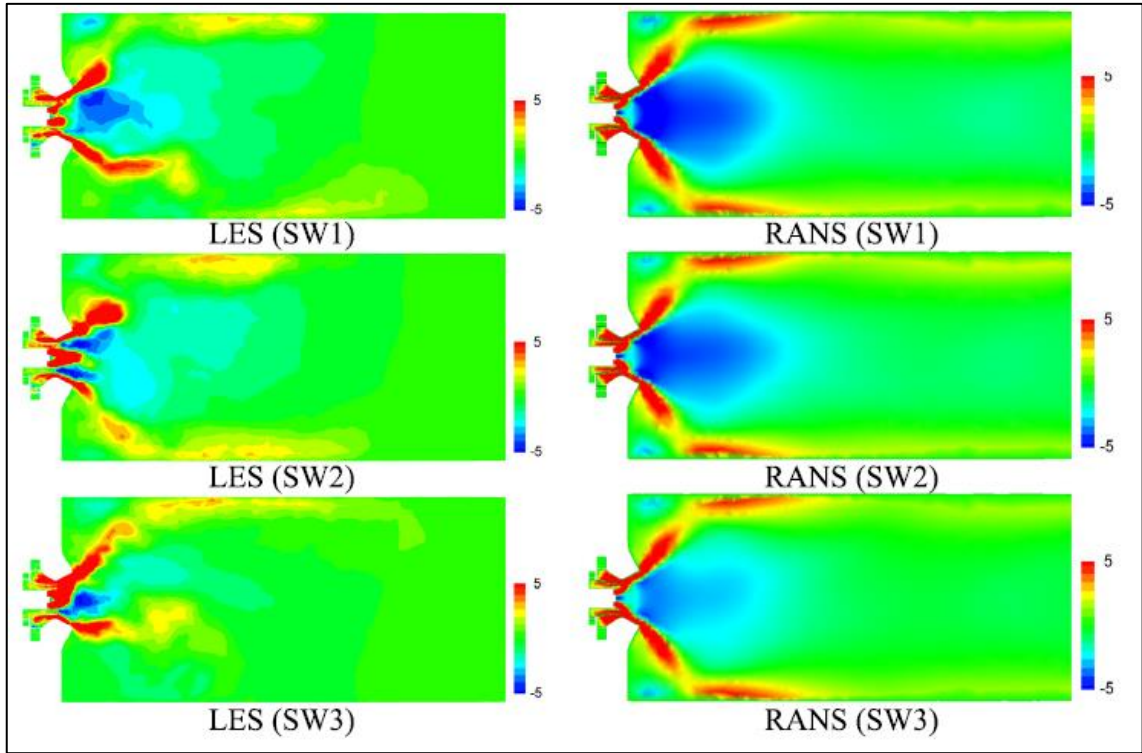
Şekil 2.7 Dokuz farklı girdap üreticinde girdap sayılarının bozunum etkisi [12]



Şekil 2.8 (a) Tasarlanan girdap üretici, (b) eksenel hızlar için türbülans modelleri karşılaştırma [13]

Watanabe vd. [14] çalışmalarında girdap akışlı bir pülverize kömür yakıcısında Large Eddy Simulation (LES) ile sayısal analiz gerçekleştirilerek deneysel sonuçlarla doğrulamış, sonra elde edilen sonuçları Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) modellerinden k-ε modeli ile kıyaslamıştır (Şekil 2.9). Elde edilen sonuçlara göre geri dönüş bölgesini tahmin etmede LES yöntemi deneysel verilerle örtüşmekle birlikte, RANS yöntemi

gerçekten yüksek hız değerleri bulmaktadır. Bunun sebebi türbülanslı karışım koşullarının LES ile daha iyi tahmin edilebilmesidir. Geri dönüş bölgesindeki hız dağılımı alev kararlılığı ve yanma verimi ile parçacıkların kalma sürelerini ciddi şekilde etkileyeceğinden bu tür yakma sistemlerinde zamana bağlı türbülans modelleyebilen LES modeli tavsiye edilmektedir. Ancak tepkimeli akışlarda yüksek hesaplama maliyetlerinden dolayı LES modeli tavsiye edilmemektedir.



Şekil 2.9 LES ve RANS modellerinin aksenal hızlarının kıyaslanması [14]

Meyyappan vd. [15] girdaplı akışların sayısal modellenmesinde yakıcı ağızından önceki akış kısmının modellemeye dahil edilmesi, k- ϵ ve RSM türbülans modelleri arasında karşılaştırma ve ayırıklaştırma yöntemleri gibi farklı bakış açılarını irdelemişlerdir. Buna göre yakıcıdan önceki kısmın çözüm geometrisine dahil edilmesiyle sonuçlardaki kesinlik artmıştır. Ayrıca k- ϵ modeli hesaplama süresi ve yakınsama anlamında daha iyi sonuçlar verirken RSM modeli türbülansın anizotropik doğasını da hesaba kattığı için geri dönüş bölgesini daha iyi tahmin etmiştir. Bunun dışında QUICK algoritması ile çözüm hassasiyetinin arttığı gözlenmiştir.

Vondál ve Hájek [16] girdap akışlı bir yakıcıda sayısal modelle hesaplanan hız profillerinin ve girdap sayılarının ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanmasını içerir. Çalışma daha

küçük hacimde deneysel çalışabilmek adına su tüneli vasıtasıyla gerçekleştirilmiş ve akışın farklı kesitlerinde girdap sayısı hesaplanmıştır. Hız profillerine göre SST k- ω türbülans modelinin sonuçları tutarsız olmuştur. Diğer RANS modellerindeki sonuçlara göre girdap ve türbülans etkilerinin aynı anda olmasından ötürü türbülans modelleri bu iki akışın birbirinden etkilendikleri bölgelerde hız dağılımlarını bulmada zorlanmaktadır. Bu yüzden modelin ne olduğuna bakılmaksızın ölçümler hatalı olmaktadır.

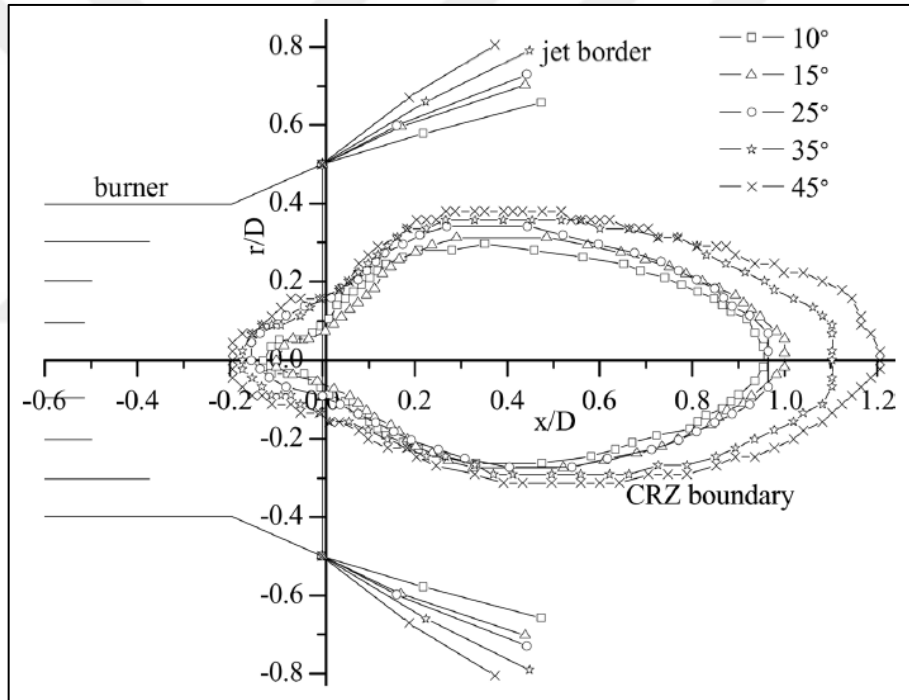
Luo vd. [17] çalışmalarında ikili bilezik ve çift konik ağız içeren özgün bir püskürtme yapısına sahip girdaplı yakıcı önermiş, önerilen yapıların girdap yoğunluğu ve türbülans gibi faktörlere etkileri ile gaz sıcaklık dağılımı, NO_x salınımları ve uçucu küldeki yanmamış karbon miktarı gibi etkiler de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yakıcının ters akış karakteristiği, türbülans dağılımı, yanma performansı ve NO_x salınımları geleneksel bir yakıcı modeliyle kıyaslanmış, yakıcının kömürü temiz ve verimli bir şekilde yakabildiği görülmüştür.

Adewole vd. [18] LPG yakıtı kullanan girdaplı bir yakıcı üzerinde çok sayıda deney yapmış, elde edilen deney sonuçları yapay sinir ağları yöntemi ile modellenmiştir. Çalışmada 6 farklı kanat açısı ve 8 farklı hava/yakıt oranı test edilmiş, sonuç olarak en yüksek alev sıcaklığı ve en düşük CO ve NO_x salınımlarının olduğu durumlar bulunmaya çalışılmıştır. Buna göre 55° kanat açısı ve 0.9 yakıt fazlalık katsayısı oranlarında en yüksek sıcaklık ve en düşük salınımlara ulaşılmıştır.

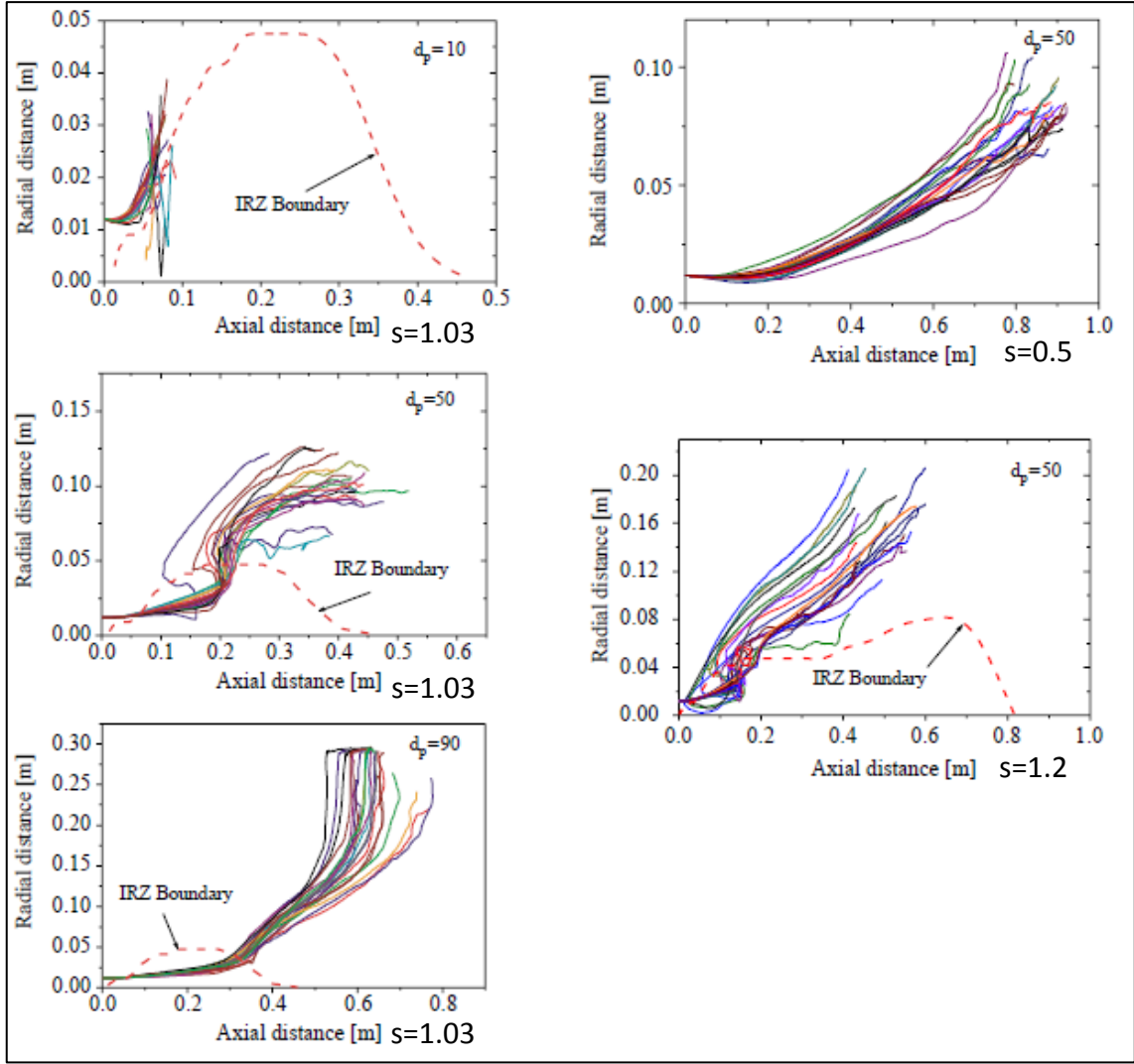
Bir başka çalışmada Zeng vd. [19] 600 MWe bitümlü kömür kazanında düşük NO_xlu aksel-girdap yakıcı akış karakteristikleri ve NO_x emisyonlarının araştırılması amacıyla soğuk deneyler ve sayısal simülasyonlar yapmıştır. Hot-film sensörler ile yapılan ölçümlerle ve sayısal simülasyonların karşılaştırılması göstermiş ki geri dönüş bölgesinin tespit edilmesinde sayısal analizler gerçeğe uygun sonuçlar verebiliyor. Dış ikincil hava için kanat açısı değiştirilerek, resirkülasyon bölgesi için farklı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 2.10); açılma açısı, resirkülasyonun uzandığı mesafe, yakıcıya geri gelen baca gazı miktarı, yanma odası sıcaklığı ve NO_x derişimi gibi etkiler irdelenmiştir. Dış ikincil hava için en uygun kanat açısı 15 derece olarak bulunmuştur.

Bir diğer çalışmada Lebedev vd. [20] homojen yanma modundaki bir gaz türbini motoru için yanma esnasında kendiliğinden-salınımlı basınç oluşumlarının alev kararlılığını

bozduğundan bahsetmektedir. Bunu önlemenin yolu ise geri dönüş bölgesi boyutlarının büyütülmesi olarak belirtilmiştir. Ancak bu bölgenin gereğinden fazla büyümesi partiküllerin kalma süresini fazlaca artıracığından NO_x salınımında yükselme söz konusudur. Çalışmada tipik türbülans modelleri ile yanma için geliştirilmiş CFD-ACE bilgisayar kodları kullanılarak metan-hava yanması gerçekleştirilerek büyük durma bölgelerinin azot emisyonlarına etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen çıkarımlara göre çok büyük bir resirkülasyon bölgesi oluşturmanın NO_x oluşumuna olumsuz etkisi %20'yi geçmemektedir. Çünkü yüzey alanı arttıkça durma bölgesi ve geri kalan akış hacmi arasından yoğun kütle transferi olmaktadır. Ayrıca LES ve RANS modellerinde kütle transferleri arasında yaklaşık 2 kat fark olmasına karşın durma bölgesi boyutları özellikle uzunluğu için benzer sonuçlar vermektedir.



Şekil 2.10 Farklı kanat açılarında geri dönüş bölgesi sınırları [19]

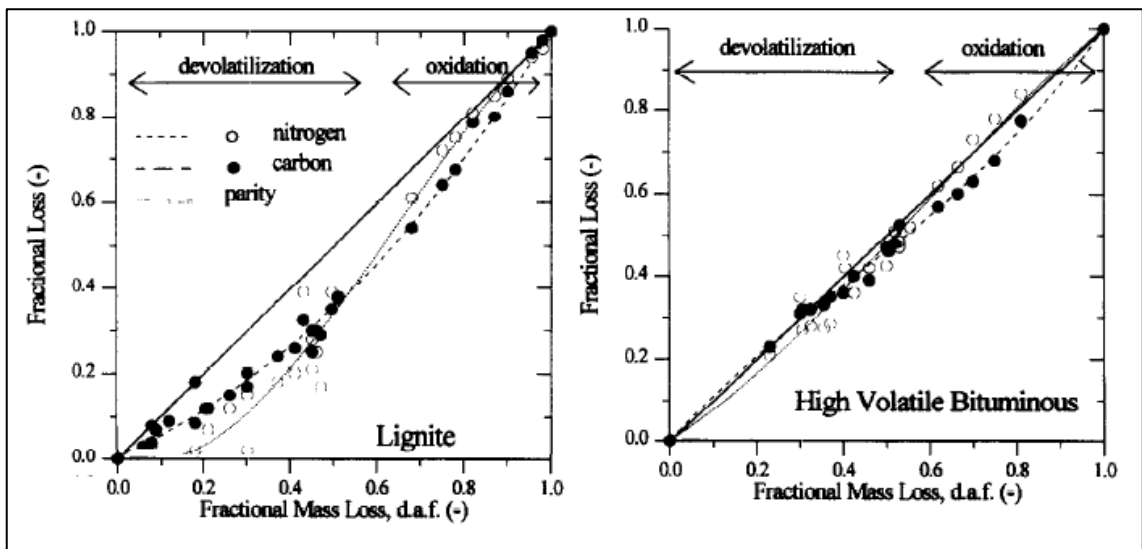


Şekil 2.11 Farklı partikül boyutları ve girdap sayılarında geri dönüş bölgesi sınırları ve partikül yörüngeleri [21]

Gu vd. [21] sayısal olarak girdaplı bir pülverize kömür yakma prosesinde NO_x oluşumları ile gaz akışı ve partiküllerin yanması süreci ile ilgili ilişki kurmuştur. Çalışmada aerodinamik yapı ve partikül penetrasyon kabiliyetleri incelenmiştir. Partikülün geri dönüş bölgesine penetre olma derinliği L_{dav} ve geri dönüş bölgesinde geçen efektif zaman τ_{eav} üç farklı girdap sayısında $s = 0.5, 1.03$ ve 1.2 için incelenmiştir. Çalışmada hem termal hem de yakıt NO_x 'ları hesaba katılmış, anlık NO_x 'lar eser miktarda olduğu için ihmal edilmiştir. Ayrıca sıcaklık dalgalanmalarına bağlı termal NO_x 'lar da hesaba katılmamıştır. Elde edilen sonuçlara göre $s = 0.5$ için merkezi geri dönüş bölgesinin oluşmadığı, $s = 1.03$ 'te ise 1.2 'ye göre daha kısa ve dar olduğu gözlenmiştir. $s = 1.2$ 'de partiküllerin önemli bir kısmı santrifüj kuvvetlerden ötürü merkezi geri dönüş bölgesi sınırı dışına savrulurak etraftaki havayla hızlıca karışarak daha iyi yanar. $s = 1.03$ 'te ise

yeterince yüksek santrifüj kuvvetleri olmadığı için yakıcının çıkışında hava-yakıt karışımı gerçekleşmez ve yakıtça zengin bölgede piroliz için daha fazla zaman geçmesi sağlanır. Böylece yakıt NO_x 'larında $s = 0.5$ 'te ise alev boyu daha uzun olmaktadır (Şekil 2.12). Sonuçlara göre en küçük çıkış NO ve NO_x emisyonları en büyük L_{dav} ve τ_{eav} durumlarında gerçekleşmektedir. Ayrıca NO_x emisyonlarının hesaplandığı analizlerde $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Bunun yerine yüksek dereceden türbülans modelleri ya da LES metodu önerilmektedir.

Lans vd. [22] yakıcı işletme koşullarının (akış rejimi ve girdaplar), geometrisinin ve yakıt parametrelerinin pülverize kömürün yanma süresi boyunca azot oksit oluşumu üzerine etkilerini incelemektedir [23], (Şekil 2.13). Çalışmadaki ana odak noktası yanma test sistemlerinin kendiliğinden alevi sürdürebilmesi olup çalışma deneysel ya da teorik araştırmadan ziyade mevcut bilgilerin derlenmesi şeklinde ele alınmıştır. Çalışmada belirtildiği üzere azot salınımları partikülün ısınması, uçucuların ayrılması, tutuşma, homojen ve heterojen yanma, ikincil hava ve resirkülasyon gazlarının pülverize kömürle karışması gibi hem yanmanın kimyasal sürecinden hem de aerodinamikten etkilenmektedir. Çalışmada aynı zamanda alev tiplerini tayin eden erkezi geri dönüş bölgesi için farklı tipteki geometriler verilmiştir. Bu geometrilerin kirletici azot salınımlarına etkileri detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 2.12 Linyit ve bitümlü kömür için piroliz ve oksidasyon sürecinde C ve N kütle kaybının toplam oransal kütle kaybına oranı [23]

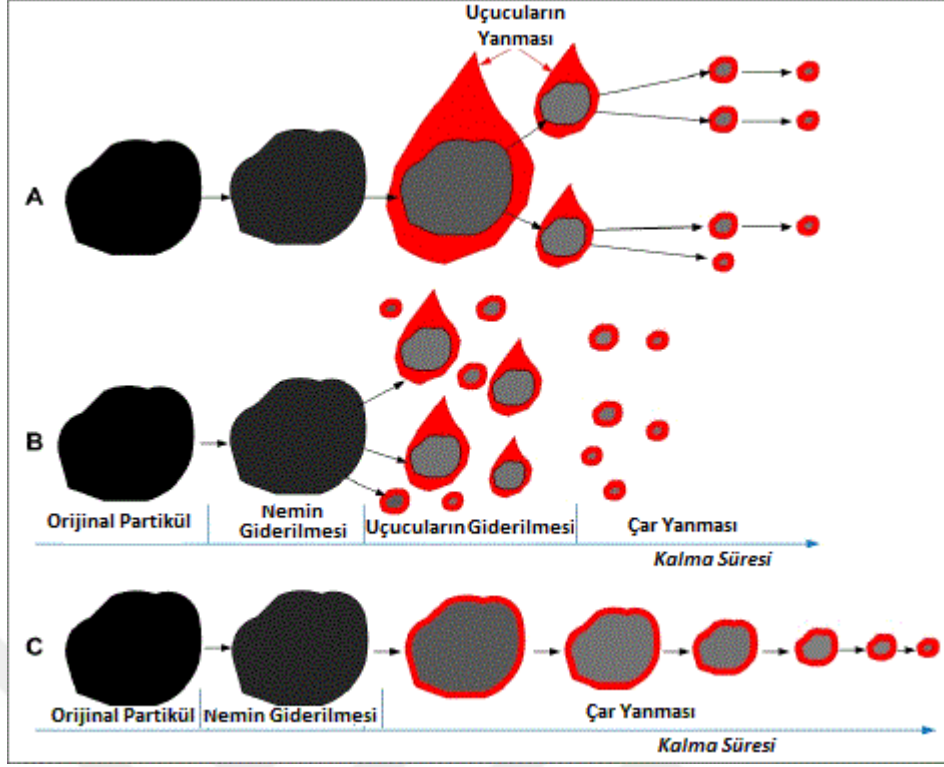
YANMA AERODİNAMIĞI İLE İLGİLİ TEORİK BİLGİLER

Yapılan araştırmalar sonucunda bu çalışmaya zemin oluşturan bilgiler ve yanma aerodinamiğinin teorik arka planı bu bölümde verilmiştir.

3.1 Kömürün Yanması ile İlgili Genel Bilgiler

Kısaca yanma, katı, sıvı ya da gaz fazındaki yakıtın genellikle hava gibi bir oksitleyici aracılığıyla taşınan oksijenle tepkimeye girerek ısının açığa çıktığı ekzotermik ve hızlı gerçekleşen bir kimyasal süreçtir [24]. Açığa çıkan ısı gaz türbinleri ya da içten yanmalı motorlarda direkt olarak yanmayla oluşan sıcak gazın genleşmesiyle elde edilirken, termik santrallerde ve proses buharı elde etmede bir kazanda sudan buhar edilerek Rankine Çevrimi'nde kullanılması ile gerçekleştirilir.

Yanma proseslerinden gaz yanması, yakıt ve oksijen molekülleri arasında birebir temasla sağlanırken, sıvı ve gaz yanmasında genellikle pülverize ya da atomize olmuş yakıt partikülleri kütle transferi gibi fiziksel süreçleri de barındıran bir dizi işlemle yanmayı gerçekleştirir. Sıvılarda sıvı partikülünün buharlaşmasıyla gaz fazına geçen yakıt molekülleri gaz fazındaki gibi yanar. Ancak katı yakıtlar yanma konusu içerisinde en zor anlaşılır yakıt tipidir. Bir kömür partikülünün yanmasında hem makro, hem de moleküler ölçekte çok sayıda kimyasal ve fiziksel işlem aynı anda ya da art arda gerçekleşmektedir. Bunlar pülverize olmuş kömür partikülünün yanma öncesinde ısınması, partikül bünyesindeki nemin buharlaşması ve uçucu maddelerin giderilmesi, uçucu maddelerin yanması, çar yanması ve kül oluşumu gibi basamaklardan (Şekil 3.1) oluşur [25].



Şekil 3.1 Kömür partikülünün evrimi [25]

Şekil 3.1’de görüleceği üzere A tipi yakma sisteminde yüksek uçucu maddeye sahip kömür partikülünün yanması görülmektedir. Partikül bünyesinde önce nem daha sonra uçucuların bünyeden ayrılmasıyla yanma başlar. Uçucu maddelerin yanmasını çar yanması takip eder. Bu tip kömürlerin pülverize kömür yakıcılarında yakılması uygundur. B tipindeki kömür ise yüksek uçucu ve düşük mineral miktarına sahiptir. Isıl etkilerle kömür partikülü hızlıca çatlayarak daha küçük parçacıklara ayrılır. Bu tip kömürde uçucuların bünyeden uzaklaşması ve yanması eş zamanlı gerçekleşir. Daha sonra çar yanması gerçekleşir. Bu tip kömürlerin kabarcıklı akışkan yatak tipinde yakıcılarda yakılması uygundur. C tipi kömür ise çok az uçucu maddeye sahip olup nemin uzaklaşmasının ardından çar yanması gerçekleşir.

3.2 Yanma Aerodinamiği ve Yanma Sürecine Etkileri

Yanma sürecindeki işletme parametrelerinin, bir diğer deyişle yanma aerodinamiğinin NO_x oluşumu, tam yanmanın sağlanması ve alev boyu gibi parametreler üzerindeki etkileri genelleme yapılamayacak kadar karmaşıktır. Bu yüzden farklı yakıcılardaki benzer değişiklikler çok farklı sonuçlar verebilmektedir [22].

Yanma performansını etkileyen en önemli iki faktör yakılacak yakıtın nem, kül, uçucu madde miktarı ve kalorifik değer gibi özellikleri ile yanma aerodinamiğidir. Burada ilk faktör insan kontrolünün dışında olup herhangi bir tasarım konusu olmadığından, yakıcılarda araştırma ve geliştirme faaliyetleri yanma aerodinamiği temelli sürmektedir.

Yanma aerodinamiği denince ocağa gönderilen hava miktarı, havanın hangi kanallardan ne şekilde yanma haznesine beslendiği (birincil, ikincil, üçüncül hava, OFA vs.), gönderilen hava momentumunun kanallara göre değişkenlik göstermesiyle elde edilen akış desenleri ve bu desenlerin oluşumunda rol oynayan yakıcı ağızları ve girdap üreteçleri akla gelmelidir.

3.2.1 Karışımın Sağlanması

Jet akışı ve çevre arasında momentum değişiminin sonucu olarak, çevreden jet akışı sınırları boyunca hava emilir. Bu emilme değişim katsayısı ve hız gradyanlarına bağlı olarak değişen sürtünme kuvveti özelliklerinden kaynaklanır. Türbülanslı değişim katsayısı (akış halinde) moleküler değişiminkinden (difüzyon halinde) birkaç derece (üs) daha yüksektir. Karışımın şiddeti şu şekilde açıklanabilir; türbülanslı jet her üç nozül çapı kadar aksenal mesafede nozüldeki akışkanın kütleli debisine eşdeğer miktarda çevreden akışkan emer. Sabit yoğunluklu bir sistemde emilen hava şu şekildedir;

$$\frac{m_e}{m_0} = 0.32 \frac{x}{d_0} - 1 \quad (3.1)$$

Değişken yoğunluklu sistemler içinse genel ifade şu şekildedir;

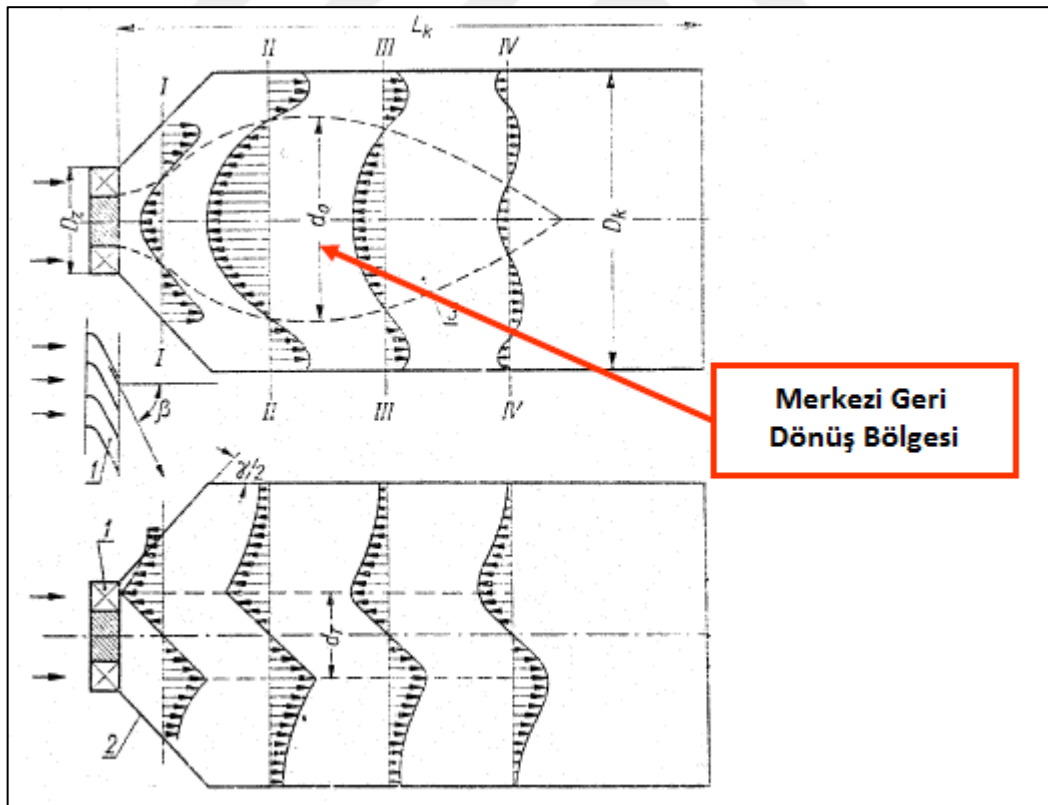
$$\frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_0} = 0.32 \left[\frac{\rho_a}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{x}{d_0} - 1 \quad (3.2)$$

Eğer serbest jet akışına hiçbir kuvvet etki etmiyorsa, total momentum her yönde korunmuş olur. Dış kuvvetler herhangi bir tekil yönde etki ettiğinde bu yönde momentum korunamaz, ancak Newton'un ikinci yasasına göre bir kuvvet dengesi bize gösterir ki bu yöndeki kuvvetler momentumun değişimi miktarınca dengededir. Reynolds'un denklemleri bu dengeleri her üç koordinatta da düşünmektedir. Akışın belirli kısımlarında türbülans stresleri mevcut olduğundan momentum korunmaz. Eğer akış alanında basınç değişkense, momentum yine korunmayacaktır.

Akış hacminde karışım, yakıt ve havanın ayrıştığı tabakadaki kayma kuvvetlerinin varlığı ile daha yüksek oranda olmaktadır. Bunun için akışta aksel kuvvetlerin dışında teğetsel kuvvet bileşenlerinin de olduğu girdap hareketleri önem arz etmektedir.

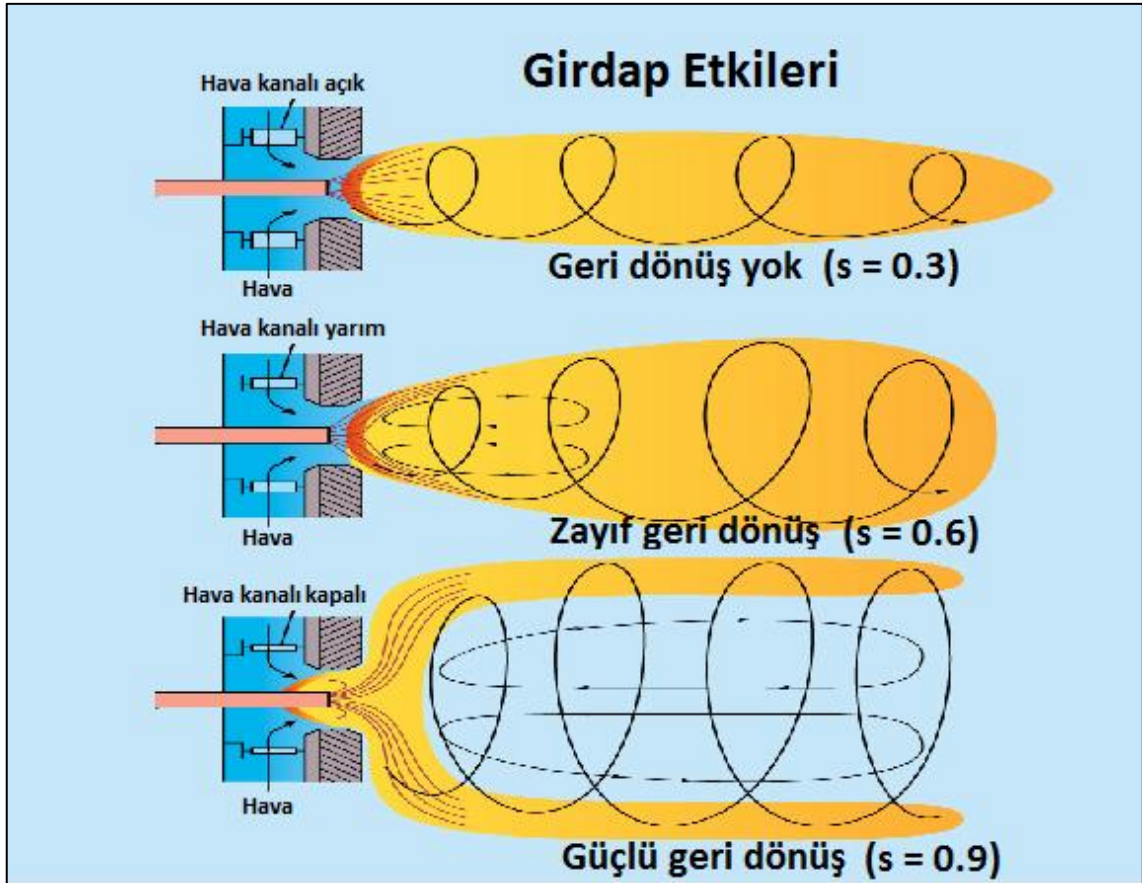
3.2.2 Girdaplı Akışlar

Girdap jetleri yanma odasında alev kontrol altına almak için kullanılan araçlardır. Aynı zamanda sprey kurutucular ve yakıcılarda uygulama alanları bulmuştur. Girdaplı türbülans jetlerinin aerodinamiği serbest türbülans ve girdaplı dönel hareketin bileşik hali olup, jetlerde ve çevrintili akışlarda karşılaşılr. Girdaplı akışlar akışkanlar dinamiği içerisinde önemli bir araştırma konusu olup, karmaşıklığı nedeniyle sayısal modellenmesi de zaman zaman güç olabilmektedir. Girdap yakıcılar yanma konusunda yeni olmamasına karşın, henüz son 30 yılda dönel akışların alev kararlılığı ve yanma üzerinde ne derece önemli olduğu anlaşılmaya ve araştırılmaya başlanmıştır. Bu konuda çeşitli çalışmalar mevcuttur [26].



Şekil 3.2 Bir girdap üreticinde oluşan geri dönüş bölgesi ile aksel (üstte) ve teğetsel hızlar (altta) [27]

Dönel bir akış olduğu zaman, girdapsız akışlardaki aksel ve radyal hız bileşenlerinin yanına bir de teğetsel hız bileşeni gelir. Girdapın mevcudiyeti akış alanını etkileyecek şekilde radyal ve aksel basınç gradyenlerinin oluşmasına neden olur. Güçlü girdaplarda ters aksel basınç gradyeni, akışı aksel boyunca ters yöne çevirerek bir iç resirkülasyon bölgesi oluşturacak kadar büyük olabilir. Teğetsel hız gradyenleri ise x akseline göre teğetsel ekseninde birbirinin orjine göre simetriği olmaktadır. (Şekil 3.2)



Şekil 3.3 Girdap üreticinde oluşan 3 boyutlu helisel akım çizimleri [28]

Bir yakıcıda hava teğetsel olarak hazneye girdiğinde yönü değişmeye zorlanır ve böylece akışta spiral şekli oluşur. Akışkan partikülleri üzerine etkiyen merkezkaç kuvvetleri ile yanma odası cidarlarına etkiyen basınç kuvvetleri arasında bir balans oluşur. Bu kuvvet dengeleri yakıcı içerisindeki statik basınç dağılımının ölçülmesiyle bulunabilir. Burada değerler $dp/dr = \rho w^2/r$ 'yi veren, teğetsel hızlardan hesaplanan basınç dağılımları ile örtüşmektedir [26]. Dönel akışın merkezindeki düşük basınç bölgesi merkezkaçtan dolayı akış portlarından çıktıkça daimi olarak vardır. Bu durum yüksek girdaplı akışlarda ters aksel basınç gradyenine sebep olur. Akış yönünü ters

çevirir ve merkezi bir toroidal şekilli bir vorteks oluşur. Toroidal vorteks çekirdeğinin uzunluğu, tanımlandığı üzere yakıcı çıkışından akış doğrultusunun geri dönüş noktasına kadar olan mesafe; yani geri dönüş bölgesinin uzunluğu girdabın derecesi arttıkça artmaktadır [20].

Akışkan partiküllerinin yakıcı çıkışından ayrılmadan önce dar bir kanalda sınırlandırılmış şekilde olduğu varsayılabilir. Çıkıştan ayrıldıktan sonra bu akışın teğetsel olarak bir ipin ucunda döndürülen ve sonra bırakılan bir nesne gibi dışarı doğru hareket etme eğilimi vardır. Ancak akış viskoz kuvvetler tarafından zorlanarak hareket etmesi önlenmeye çalışılır. Ayrıca radyal basınç kuvvetleri de hareketi engellemeye çalışır. Tüm bu etkilerin birleşimi akım çizgilerinin giderek genişleyen helisel bir şekil almasına neden olur (Şekil 3.3).

3.2.3 Merkezi Geri Dönüş Bölgesi ve Alev Etkileri

Bir yakıcıda merkezi geri dönüş bölgesine sahip akış deseni oluşturmanın farklı sebepleri olabilir. Bu aynı zamanda oluşturulan bir merkezi geri dönüş bölgesinin birden fazla avantaj sağladığı anlamına gelir. Merkezi geri dönüş bölgesinin iki temel avantajı alevde kararlılığın sağlanması ve NO_x salınımları üzerinedir. Bunun yanında kömür partiküllerinin kalma süreleri de geri dönüş bölgesi oluşturarak artırılabilir ve tam yanma sağlanarak verim artırılabilir. Akışın merkezinde bir geri dönüş bölgesi oluşturmak bir girdap üreticiyle santrifüj kuvvetler oluşturarak olabileceği gibi yakıcı ağız merkezinde dik kenarlı bir cisimle (bluff body) de gerçekleştirilebilir.

Çevrinti bölgesinde yanmanın olması halinde bu bölgede şekil ve şiddet anlamında değişiklikler olur. Bu bölgedeki tepkime, yanmayla olan sıcaklık artışıyla birlikte eğer bölgenin şekli ve şiddeti aynı kalırsa hacimsel debinin yaklaşık 5 kat artmasına yol açar. Bu bölgede yakıtın yanması bölgenin uzunluğunda ve statik basıncında artışa yol açar. Bölgedeki sıcaklık ve derişim dağılımları oldukça uniform olup bölgedeki aerodinamik parametrelerin değişimi de bölgedeki iyi karışmış sıcak gazların sıcaklığıyla direk alakalıdır. Statik basınçtaki ve uzunluktaki artış gazların ısıl genişmesinin direk bir sonucu olup açığa çıkan ısı miktarıyla direk alakalıdır. Deneyler gösterir ki karışım fakirleştikçe, statik basınç ve bölgenin uzunluğu soğuk bölgeye doğru değişir [29], [30].

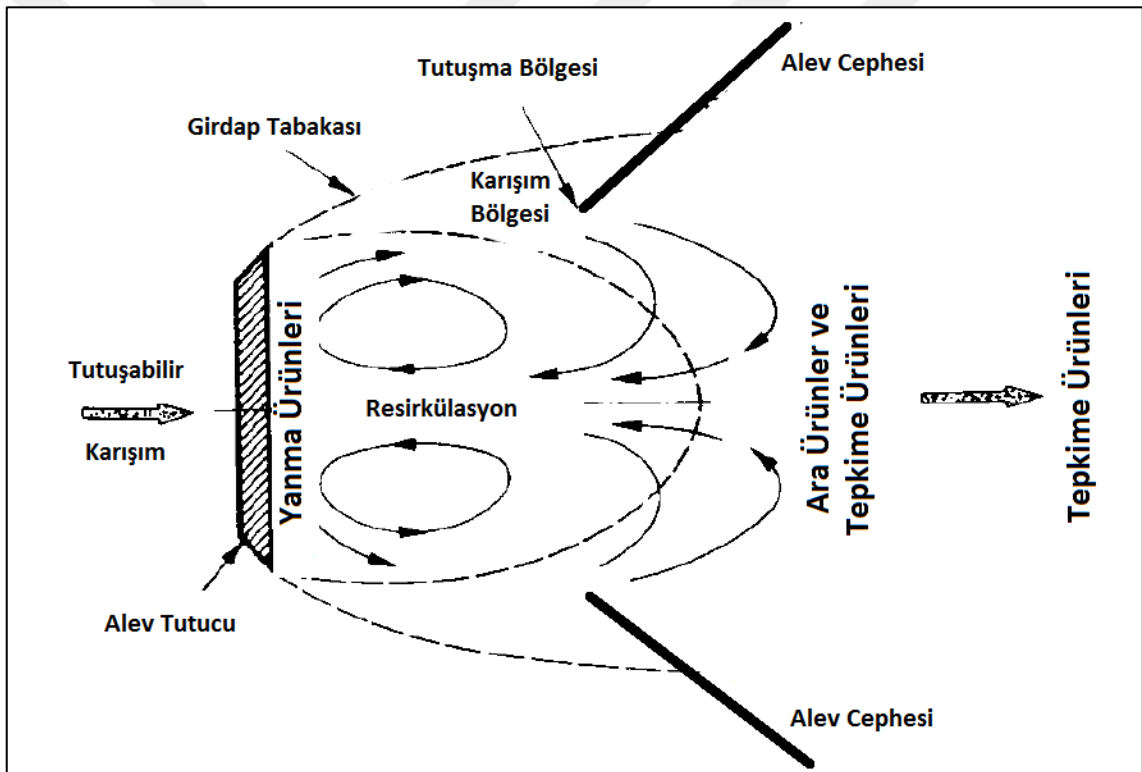
3.2.3.1 Alevde Kararlılığın Sağlanması

Alev genel olarak durağan yapıya sahiptir. Ancak hava debisi değişimi, yakıt debisi değişimi, momentum oranı, girdap sayısı ve ön ısıtma gibi giriş koşullarının değişmesi alev cephesinin kararsızlaşmasına sebep olur. Alev yakıcı ağızına doğru gelmeye ya da yakıcıdan ayrılmaya yahut kararsızlaşarak salınımlar yapabilmektedir. Ana akım hızı arttırıldıkça, bu hız belirli bir değere geldiğinde alev kopmaya başlar. Kararlı yanmanın sınırları genellikle alevin kopması ya da geri kaçması şeklinde karakterize edilir. Maksimum alev kopma hızlarına genelde sitokiyometrik karışım oranında ulaşılır. Bu hız karışım zenginleştikçe ya da fakirleştikçe azalır. Bunun dışında alevde dalgalanmaların olması alev cephesinin yüzey alanının değişken olmasına ve anlık hava emilimleri yüzünden NO_x üretimine sebep olur. Alevde kararlılık pilot alev, dik kenarlı bir cismin sınır tabakası ile veya geri dönüş bölgelerindeki çevrintili akış oluşturma gibi yöntemlerle sağlanabilir [26].

Alev cephesinin ilerlemesi veya alevin yayılması dediğimizde aklımıza ilk olarak yanabilen partiküllerin ulaşabildiği hacim gelmelidir. Ancak alevin oluşması için ısı da gerekir. Aslında ısı tutuşmanın başladığı noktada üretilmeye başlasa da oluşan serbest yanma ürünleri ve diğer maddeler ısı akışı ve difüzyonla yanmanın olduğu katmanın dış kısımlarına doğru ısıyı taşır. Böylece alev cephesi genişlemiş olur. Bu yüzden alev cephesinin ilerlemesi tepkime bölgesinden ısı ve kütlenin yanmamış karışım bölgesine doğru transferi ile alakalıdır. Yanabilir bir karışımın akışı içerisine bir engel konulduğu vakit, akış hızı cidar civarında düşerek alev yayılma hızı ile akış hızı arasında eşleşme imkânı artar. Ki bu alev kararlılığını sağlamak için gerekliliktir. Eğer ki bu engel dik kenarlı bir cisim ise, akışkan ivme kazandıkça akış hızı engelden ters basınç gradyeni oluşturacak kadar güçlü olur ve dik kenarlı cismin ardında çevrinti bölgesi oluşur. Eğer çevrinti ya da geri dönüş bölgesiyle bu çevrintiyi geçen akış arasında ısı ve kütle transferi oranı yeterliyse ve dış akışta yanma gerçekleşiyorsa, sıcak yanma ürünleri bu vorteks bölgesine penetre olarak burada taze yanma karışımıyla karşılaşır ve bu karışımı yanmaya hazırlar. Kimyasal olarak aktif gazların yanma ürünlerinden taze karışıma doğru transferi sayesinde çevrinti bölgesi aynı zamanda ısı rezervuarı olarak da görev yapar (Şekil 3.3). Isının ve kimyasal olarak aktif türlerin (species) yanabilir karışıma transferiyle ve partikül iletiminin sınır tabaka bölgesinde geciktirilmesiyle

birlikte alevin alev cephesi ilerleme hızını çokça aşan yaklaşım hızlarındaki bölgelerini kararlı hale getirmeyi sağlar. Zukoski ve Marble [31] farklı Reynolds sayılarına karşılık gelen akım hızlarında alev kopma sınırının taze karışım kütleli partikülünün geri dönüş bölgesini geçme süresi ile tespit edilebileceğini belirtmişlerdir.

Ana akımın ortasına yerleştirilmiş dik kenarlı bir cismin ardında oluşan çevrinti cismin boyutundan, şeklinden ve çevreleyen akış sisteminden etkilenmektedir. Geri dönüş bölgesi sıfır aksel hız eğrisiyle çevrilidir ve sadece ana akıma aksel olarak ters yönde hız profili içerir. Bu bölgenin başlangıç noktası aynı zamanda yakıcı çıkışında sınır tabakanın ayrılma noktasına tesadüf eder. Merkez ya da “göz” adı verilen bu eddy ters akışın iç sınırındadır ve statik basıncın minimum olduğu yerdir.



Şekil 3.4 Dik kenarlı bir objenin arkasında alev oluşumu ve resirkülasyon [27]

3.2.3.2 NO_x Salınımlarının Azaltılması

Yanma prosesinde N₂O (Diazot Monoksit), NO (Azot oksit) ve NO₂ (Azot Dioksit) gibi azotlu ürünler oluşmaktadır. İlk ikisi, yani NO ve NO₂ bileşikleri genel olarak NO_x şeklinde ifade edilmektedir. Bu iki bileşik asit yağmurlarına sebep olarak doğaya zarar verebileceği gibi havayı kirleterek canlılara da zarar vermektedir. Yanma gazlarındaki

NO_x içeriği bu üç bileşimin % 90'ının oluşturan NO, toplam azotlu ürünlerin yaklaşık % 10'unun oluşturan NO_2 ve eser miktarda N_2O 'dan oluşur. N_2O diğer iki madde gibi asidik oksit olmayıp genellikle akışkan yataklı yakıcıların baca gazlarında ve katalitik konvertörlerin egzoz gazlarında bulunur. Kirletici özelliği olmamasına karşın, ozon tabakasının incelmesine yol açmaktadır [32], [33].

Azotlu bileşik salınımlarından termal NO_x ve anlık (prompt) NO_x havadaki azottan kaynaklı olanlar iken yakıt NO_x 'u yakıt bünyesindeki azottan kaynaklanmaktadır. Kömür tipine ve kalitesine göre oluşan NO_x miktarlarında değişimler olmaktadır. Kömür kalitesinden kaynaklı salınımları düşürmek için düşük- NO_x 'lu yakıcılar geliştirilmekte, bunun yanında OFA'larla yakma havası (over-fire air) verilmekte, kazan çıkışından itibaren ise maliyetli de olsa Selective Catalytic Reduction (SCR) ve Non-catalytic reduction (SNCR) gibi sistemlerle sağlanabilmektedir [32]. Yanma prosesinde NO_x oluşumları kısaca şu şekilde olmaktadır;

Termal NO_x : Pülverize kömürlerinde toplam NO_x salınımlarının yaklaşık % 20'sini oluşturan termal NO_x , atmosferik oksijen ve azotun 1800°K gibi yüksek sıcaklıkların üzerinde tepkimesiyle oluşmaktadır. Bu tepkime Zel'dovich tarafından keşfedilen bir mekanizma ile gerçekleşmektedir [33], [34].

Yakıt NO_x 'u: Yakıtta bulunan ve organik bağla yakıtta bağlı olan azotun oksijenle tepkimesinden meydana gelmektedir. Yakıt NO_x 'u tepkime prosesi yaklaşık 50 ara türü barındıran oldukça kompleks bir kimyasal zincirdir. Yakıt NO_x 'unun giderilmesinde en etkili yöntem aşamalı yanma sağlanarak yakıt gazı ile havanın karışımının geciktirmektir [33].

Anlık (Prompt) NO_x : Anlık NO_x hidrokarbon radikallerinin atmosferik azotla bir dizi tepkime sonucunda oluşur. Pülverize kömür yakıcılarında anlık NO_x miktarı % 5'i geçmez. Termal ve Yakıt NO_x 'unu azaltmadaki yöntemler anlık NO_x oluşumlarına da olumlu katkı sağlar [33]. Yayınlarda anlık NO_x 'lar ihmal edilebilmektedir [21].

Yanma haznesi içerisinde çok yüksek sıcaklıklara ulaşılmadığı sürece termal NO_x oluşumları sınırlandırılmaktadır. Ancak yakıt NO_x 'u oluşumu yanma aerodinamiğinde iyileştirmelerle düzenlenerek düşük NO_x 'lu yakıcı tasarlamak mümkündür.

Yanma prosesinde yakıcı çıkışından itibaren yakıtça zengin ($\lambda < 1$) bölgede uçucu maddelerin uzaklaştığı piroliz fazı yer alır ki bu faz NO_x salınımlarını azaltmada birincil öneme sahiptir. Piroliz safhasında geçen zamana göre farklı ürünler bünyeden ayrılır ve sıcaklık ile oksijen yeterliyse tutuşma da başlar. Yakıt zenginlik oranı bu bölgede oldukça önem arz eder çünkü fazla hava piroliz tamamlanmadan bünyedeki azotla oksijeni tepkimeye sokacağından, fakir hava da daha fazla HCN ve NH_3 üretimine sebebiyet vererek alevin sonraki kısımlarında yüksek miktarda NO oluştururlar. Chen vd.'ne göre [35] bu bölgede hava fazlalık katsayısı olan $\lambda = 0.7$ değeri NO üretimi için idealdir. Bose'ye göre ise [36] piroliz bölgesindeki NO derişimi yakıt partikülünün bu bölgede kalma süresinin fonksiyonudur. Yani en düşük NO derişiminin en yüksek kalma sürecinde olacağı belirtilmektedir. Piroliz safhası ne kadar verimli tamamlanırsa NO üretimi o kadar düşük olmaktadır.

Geri dönüş bölgesi hızlarının düşük olmasıyla alevde oluşan sıcak yanma gazları taşınarak bu bölgeye gelir. Bu bağlamda geri dönüş bölgesinin yakıcı ağzına yakın olduğu yakıcılarda alevin oluşması yakıtça zengin bölgenin tutuşarak yüksek sıcaklıklara ulaşmasına sebebiyet verebilmektedir.

3.3 Performans Kriterleri

Pratikte yanma aerodinamiği performansı esasında sıcak koşullar altında NO_x oluşumu, alev sıcaklığı, yanma verimi gibi kriterler referans alınarak belirlenmelidir. Ancak birçok araştırmacı [7], [8], [9], [10], [11], [12] soğuk koşullar altında yapılan test ve simülasyonların sıcak koşullar hakkında bilgi vereceğini belirtmiştir. Bu bağlamda yanma aerodinamiği işletme ve tasarım parametrelerinin kıyaslanabilmesi adına yukarıda belirtilen sıcak koşullardakilerin dışında kriterlere ihtiyaç vardır.

3.3.1 Girdap Sayısı

Girdap üreteçlerinde şüphesiz ilk bakılan olgu oluşturulan girdabın derecesidir. Bu bağlamda Beer ve Chigier [26] tarafından girdap sayısı (S) tanımlanmıştır. Girdabın şiddeti arttıkça merkezkaç kuvvetlerinin etkisiyle merkezi geri dönüş bölgesi şekli birincil derecede etkilenmektedir. Girdap sayısı sayesinde çok sayıda ve farklı tipte girdaplı akış tek bir parametreyle ifade edilebilir. Aksi durumda akışı girdap üreticinin

çapı, kanat açıları, momentum oranları ve hızlar gibi çok sayıda parametre ile ifade etmek gerekirdi. Bu bağlamda girdap sayısı bir performans kriterinden çok bir tasarım girdisi gibi düşünülmesi gereken bir parametredir. Yayınların büyük çoğunluğunda sadece girdap üretici çıkışında bu sayı belirlenirken, Vondál ve Hájek [16] ile Gündüz [12] yakıcı ağızından belirli bir mesafeye kadar girdap sayısının nüfuz etme kabiliyetini incelemiştir.

Hız ölçümlerinin yanında basınç ölçmenin mümkün olmadığı durumlarda ya da sayısal simülasyonlarda da girdap sayısındaki basınç (p) ifadesi ihmal edilebilmekte ve düzeltilmiş girdap sayısı olarak (s') tanımlanabilmektedir [19], [26]. Bu çalışmada da basınç ölçümü olmadığı için düzeltilmiş girdap sayısı kullanılmıştır. Düzeltilmiş girdap sayısı sadece farklı durumlarda kıyaslama yaparken kullanılmalıdır. Girdabın şiddeti hakkında gerçek anlamda fikir vermemektedir.

Girdap üreticilerinde oluşan girdabın şiddeti oluşan teğetsel akıların aksel akılara ne derece baskın olduğu ile alakalıdır. Hem açıl momentumun aksel akısı G_ϕ , hem de aksel itki G_x korunmaktadır.

$$G_\phi = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr = \text{sabit} \quad (3.3)$$

$$G_x = \int_0^R U \rho U 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr = \text{sabit} \quad (3.4)$$

Burada U , W ve p sırasıyla jetin bir kesitindeki hızın aksel ve teğetsel komponentleri ile statik basınçtır. Her iki momentum akısı da bir jetin aerodinamik davranışı olarak ele alınabilirse de, bu nicelikler temelinde girdap yoğunluğunu veren boyutsuz bir kriter olarak önerilmiştir [26];

$$S = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (R = \text{yakıcı nozulu çıkış yarıçapı}) \quad (3.5)$$

Çok sayıda deney göstermiştir ki girdap sayısı (S) girdaplı akışlar için kayda değer bir benzeşim kriteri olup geometrik olarak benzer girdap üreticileriyle elde edilmektedir [26]. Bu kısımdaki hesaplamalar aksel kanatçıklı girdap üretici için olup diğer girdap üretici modelleri için de hesaplamalar mevcuttur.

Girdabın şiddeti bazı kaynaklarda iki kademedede incelenirken [7] Beer ve Chigier'e göre [26] $S < 0.3$ için zayıf girdap, $0.3 < S < 0.6$ için orta şiddette girdap ve $S > 0.6$ için kuvvetli girdap olarak tanımlanmıştır.

Düzeltilmiş girdap sayısı hesaplanırken aksel itki denkleminde basınç teriminin yer aldığı integral ihmal edilmektedir [26]. G_ϕ ifadesi aynı kalmaktadır. Bu durumda düzeltilmiş aksel itki ve düzeltilmiş girdap sayısı şu şekilde olmaktadır;

$$G'_x = \int_0^R U \rho U 2\pi r dr \quad (3.6)$$

$$S' = \frac{G_\phi}{G'_x R} \quad (3.7)$$

Burada R ifadesi halen yakıcı yarıçapını simgelemektedir. Ancak hem G_ϕ hem de G'_x denklemlerinde yer alan yarıçap sembolleri yanma odası çapının birer ifadesidir.

3.3.2 Girdap Verimi

Girdap üreticinden geçen havanın yanma odasında belirli bir basınca sahip olması pratik olarak önemlidir. Basınç düşüşünün sadece bir kısmı girdaplı jet akışının kinetik enerjisi olarak görülür. Geri kalan basınç düşüşü hava menfezinde meydana gelen mekanik enerji kayıplarından olmalıdır. Yakıcı ağızından geçen akışın kinetik enerji akışı şu şekilde ifade edilebilir;

$$\dot{E}_k = \frac{\dot{M}}{2} \bar{u}^2 (1 + \delta S^2) \quad (3.8)$$

Burada \bar{u} yakıcı ağızındaki ortalama aksel hız, \dot{M} debi, δ de girdap tipine, yakıcı ağızının iç ve dış yarıçapı arasındaki orana R_h/R ve eğer uniform değilse aksel hız dağılımına bağlı bir sabittir. Burada \dot{E}_k değeri bulunduktan sonra, bu değer girdap üreticindeki statik basınç düşümüne bölünerek girdap verimliliği elde edilir [26]. Bu tezde hem basınç ölçüm verileri olmadığı için, hem de girdap tipi katsayısı spesifik girdap tipleri için mevcut olduğu için kullanılmamıştır. Günümüzdeki çalışmalarda ölçümlerde girdap verimi elde edilirken bu ifadeden ziyade girdap sayısı ve bu sayıya bağlı ifadeler kullanılmaktadır.

Denklem 3.8'den farklı olarak bu çalışmada girdap veriminden ziyade akışın girdap karakteristiğini belirleyen iki parametre türetilmiştir. Bunlardan ilki ortalama girdap sayısıdır. Ocak hacmi içerisinde girdaplı akışın şiddetini belirlemek adına önemlidir. Farklı istasyonlarda ölçülen ortalama düzeltilmiş girdap sayısı S'_x şeklinde ve istasyon sayısı "n" olmak üzere girdap sayılarının aritmetik ortalaması S'_{ort} ;

$$n \cdot S'_{ort} = \sum_{x=1}^n S'_x \quad (3.9)$$

şeklinde hesaplanır. Bunun yanında girdaplı akışın yanma haznesinin hangi noktasına kadar nüfuz ettiği de önemlidir. Girdabın nüfuz etmesi demek, piroliz sonrası karışımın iyi olması anlamına geldiğinden tam yanmanın sağlanması bu bölgede sağlanmaktadır. Bunu ölçmek için de farklı istasyonlarda ölçülen girdap sayılarının ağırlık merkezleri hesaplanmıştır. Girdabın ağırlığı yakıcı çıkışına yakınsa bu sonraki kısımlarda art yanmaların olmayacağı anlamına geleceğinden istenmeyen bir durumdur. S'_x ölçüm yapılan istasyondaki düzeltilmiş girdap sayısı ve L_x ölçümü yapılan istasyonun yakıcıya uzaklığı olmak üzere girdabın ağırlık merkezi X_m şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$n \cdot X_m = \sum_{x=1}^n S'_x \cdot L_x \quad (3.10)$$

3.3.3 Geri Dönüş Hava Debisi

Ana akımdan geri dönüş bölgesine katılan toplam akışkan miktarı vorteksin şiddetinin ve alev kararlılığını sağlamadaki verimlilikte bir ölçü olarak kabul edilebilir [26]. Resirküle olan ters kütleli debi her aksel ölçüm istasyonunda şu şekilde hesaplanır;

$$\dot{M}_r = \int_0^{r_0} 2\pi r \rho \bar{u} dr \quad (3.11)$$

Burada r_0 sıfır hız sınırının ($\bar{u} = 0$) radyal mesafesidir. Relatif ters kütleli debiler blokajın artırılmasıyla birlikte artmakta ve dik cisim ön açısının düşürülmesiyle azalmaktadır. \dot{M}_r debisi tek bir kesitteki toplam geri dönen hava miktarı olduğu için akış sistemine giren toplam hava debisi değerinden küçük olmak zorundadır.

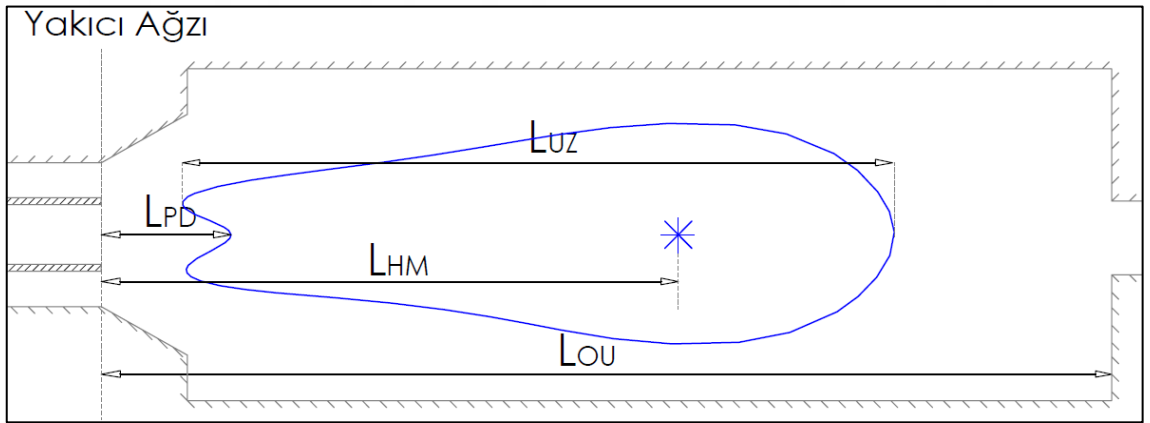
Yukarıda verilen denkleme ek olarak hesaplanan ters kütleli debi aksinel yönde tüm geri dönüş bölgesi boyunca integre edilirse;

$$\dot{M}_{GD} = \int_{x_0}^x \int_0^{r_0} 2\pi r \rho \bar{u} dr dx \quad (3.12)$$

Burada x_0 geri dönüş bölgesinin başladığı aksinel mesafe iken x de geri dönüş bölgesinin bittiği mesafedir. Böylece tüm geri dönüş bölgesi hacmi için toplam resirküle olan hava miktarı bulunmuş olur. Burada \dot{M}_r değerinin aksine geri dönüş bölgesine nüfuz eden ters kütleli debi olan \dot{M}_{GD} akışa giren toplam hava debisinden yüksek olabilmektedir. \dot{M}_O akışa giren toplam hava debisi olmak üzere \dot{M}_{GD}/\dot{M}_O oranı yüzdesel bir performans parametresi olarak hesaplanmaktadır.

3.3.4 Geri Dönüş Bölgesi Geometrisi

Geri dönüş bölgesinin uzunluk, hacim merkezi ve birincil hava nüfuz etme derinliği gibi geometrik özelliklerinin de yanma performansı üzerine etkileri vardır. Buna göre değişen yakıcı geometrisi ve işletme koşullarına göre geri dönüş bölgesindeki geometrik değişiklikler de performans parametresi olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Geri dönüş bölgesi geometrik özellikleri

Buna göre L_{PD} , L_{HM} , L_{UZ} , L_{OU} değerleri sırasıyla birincil hava penetrasyon derinliği, geri dönüş bölgesi hacim merkezi, geri dönüş bölgesi uzunluğu ve ocak uzunluğudur. Geometri özellikleri yüzdesel olarak şu şekilde hesaplanmıştır;

$$PD = L_{PD}/L_{OU} \cdot 100 \quad (3.13)$$

$$HM = L_{HM}/L_{OU} \cdot 100 \quad (3.14)$$

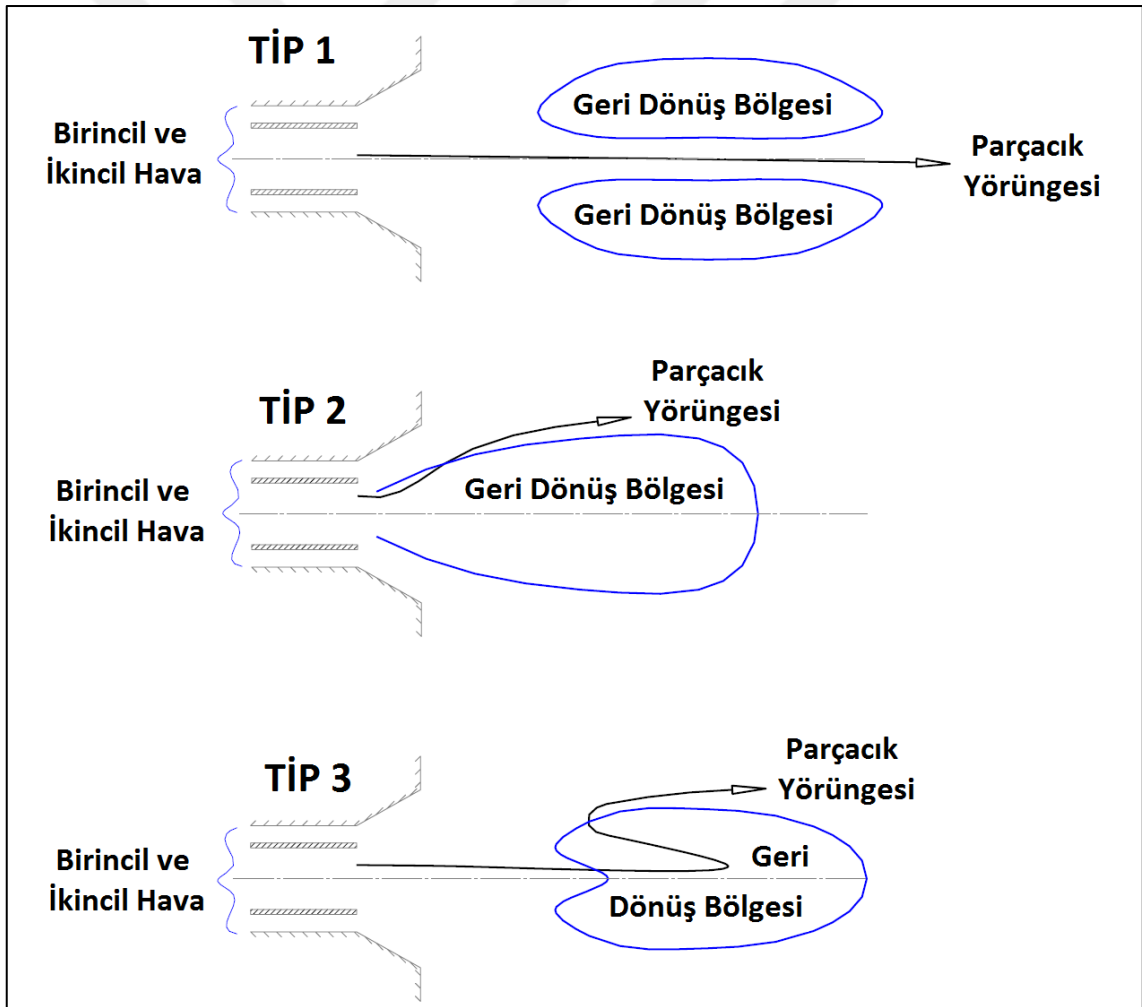
$$UZ = L_U/L_{OU} \cdot 100 \quad (3.15)$$

3.3.5 Alev Tipleri

Uluslararası Alev Araştırma Kurumu (IFRF) alev geometrilerini 4 farklı başlıkta (Şekil 3.6) toplamıştır [37];

Tip 0: Girdap ve merkezi geri dönüş bölgesi oluşmaksızın oluşan jet alevleridir. Bunun yerine alevin dış kısmında harici geri dönüş bölgesi oluşmaktadır. Doğalgaz, propan ve fuel-oil yakmada bu alev tipleri kullanılır.

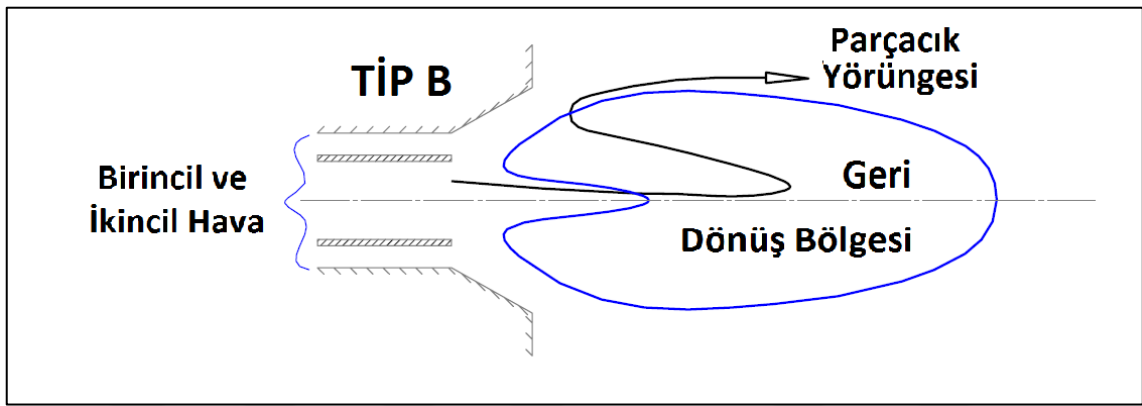
Tip 1: Birincil hava merkezi geri dönüş bölgesine tamamen penetre olur ki bu yüzden toroid şeklinde bir geri dönüş bölgesi oluşturur. Doğalgazı yakmada bu alev tipi kullanılmaktadır.



Şekil 3.6 IFRF'ye göre alev tipleri

Tip 2: Kısa ve yoğun alev oluşturan bu tip geri dönüş bölgesinde birincil hava ve yakıt merkezi geri dönüş bölgesine penetre olmaz ve ikincil hava yakıcı ağzından çıkar çıkmaz radyal yönde uzaklaşır. Ağır fuel oil ve pülverize kömür yakmada bu alev tipi kullanılır. Geri dönüş bölgesi sınırlarındaki karışım tabakasında NO_x üretimi yüksektir.

Tip 3: Bu tipte birincil hava kısmi olarak geri dönüş bölgesine penetre olur ve daha sonra radyal yönde hızlanarak eksenden uzaklaşır. Birincil havanın momentumunun artıp azalmasına bağlı olarak Tip 1'e ya da Tip 2'ye doğru evrilmektedir. Pülverize kömür yakmada kullanılmaktadır. Yakıtın bir miktar penetre olması NO_x salınımlarını düşürmede etkili olmaktadır.



Şekil 3.7 En uygun geri dönüş bölgesi geometrisi

Yakıcı çıkışında oksijence fakir bölgenin olduğu alevler kararsız olabilmektedir. Bu yüzden Tip 2 yakıcıları NO_x üretimi fazla olmasına rağmen pratikte tutuşması zor olan kömürler içindir. Uygulamada kömür partikülleri yakıtça zengin bölgede bir süre kalmalıdır. Bu yüzden spesifik bir alev tipi yerine 4 alev tipi arasından bir tanesi seçilmelidir. Bölüm 3'te anlatılan tüm teorik bilgilerin ışığında uçucu miktarı yüksek tipte bir kömür için pülverize kömür partikülünün piroliz olabilmesi için girişte bir miktar yakıtça zengin kısımda beklemelidir. Bu bağlamda en uygun geri dönüş geometrisi olan Tip B Şekil 3.7'deki gibi olacağı sonucuna varılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

250 kW_t gücünde bir pülverize kömür yakıcısının tasarım sürecinde, sıcak koşullar altında hız ve basınç ölçümü yapmak oldukça güç olduğu için izotermal koşullar altında hız ölçümü yapılması yakıcı tasarımında sıkça başvurulan bir yöntemdir. Soğuk test düzeneğinde elde edilen bulgular girdaplı akışların fiziksel arka planının anlaşılmasına yardımcı olacağından daha sonra pulverize kömür yakma sisteminin tasarımında kullanılacaktır. Bu bölümde STS ile ilgili yapılan çalışmalar ve deney prosedürleri anlatılmıştır.

4.1 Deney Sistemi

Deney düzeneği tasarlanırken öncelikle sıcak-soğuk sistemlerin akış koşullarındaki fiziksel farklılıklardan dolayı nicel büyüklüklerin temsil edilebilmesi amacıyla hava kanalları boyutlandırması, girdap üretici boyutlandırması ve debi gibi tasarimsal parametreler benzeşim yapılarak belirlenmiş, daha sonra elde edilen tasarım değerlerine göre deney düzeneği kurulumu gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Ölçeklendirme ve Boyutsal Benzeşim Hesapları

Yanma hadisesi kimyasal bir işlem olduğu için yanmanın gerçekleşeceği ocak içerisinde kimyasal tepkimeler farklı noktalarda farklı yoğunlukta gerçekleşmektedir. Bu yüzden sıcaklık dağılımları oldukça farklılık göstermekte ve buna bağlı hız ve basınçlarda da ciddi değişiklikler olmaktadır. Tüm bu fiziksel ve kimyasal etkileşimli prosesin benzeşim yöntemleri ile tam olarak ölçeklendirmek mümkün değildir [9]. Buna rağmen bir takım

benzeşim yöntemlerine dayanarak gerçeğe yakın sonuçların elde edilebileceği de gerçektir. Smart vd. [9] yakıcıların ölçeklendirilmesinde sabit hız ve sabit kalma süresi olmak üzere iki farklı yöntemden bahsetmektedir. Buna göre yanma koşullarında sıcaklığın yanma sıcaklıklarında, ancak homojen dağılımlı yani izotermal olduğu kabulü yapılmaktadır. Bu çalışmada sabit hız yöntemi benimsenmiş ve birincil-ikincil akış kanalları hızlar sabit tutulacak şekilde boyutlandırılarak, momentum oranları korunacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Böylece sıcak akışa ait momentum ve hız gibi dinamik nicelikler soğuk akış koşulları altında izotermal olarak benzetilmiş olmaktadır. M momentumu, \dot{m} kütleli debiyi, V akışkan hızını, ρ özkütleyi ve A kesit alanını simgelemek üzere akıştaki momentum;

$$M = \dot{m}V = \rho V^2 A \quad (4.1)$$

şeklinde dir. Pülverize kömür yakma sisteminde (PKYS) birincil ve ikincil kanallardaki momentum değerleri hesaplanarak STS’de aynı momentum değerleri korunacak şekilde boyutlandırma yapılmıştır. PKYS sisteminde sitokiyometrik koşullarda gerekli gücü sağlayacak hava debisi değerleri hesaplandıktan sonra hızlar ve gerekli momentum oranları bulunarak benzeşim yapılmıştır. Birincil ve ikincil kanallara göre yapılan hesaplara göre elde edilen PKYS ve STS parametreleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

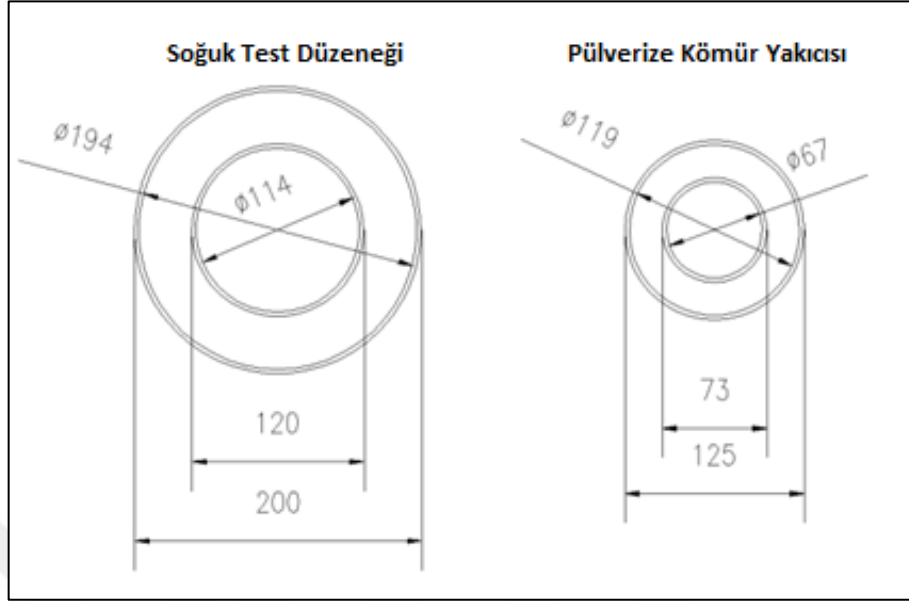
Çizelge 4.1 STS ve PKYS benzeşim hesabı sonuçları [12]

	Sıcaklık	Özkütle	Debi	Et Kalınlığı	İç Çap	Dış Çap	Blokaj	Hız
	°C	kg / m ³	m ³ / h	mm	mm	mm	%	m/s
PKYS	300	0,6	530	3	73	125	7,6	22
STS	15	1,2	1445	3	125	200	2,1	22

Çizelge 4.2 STS ve PKYS momentum oranları [12]

	Birincil Momentum	İkincil Momentum	Momentum Oranı
	kg.m/s ²	kg.m/s ²	-
PKYS	0,61	2,0	0,3
STS	2,82	9,0	0,3

Yapılan çalışmada elde edilen birincil ve ikincil kanal boyutları mm cinsinden Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Benzeşim hesabı sonucu elde edilen birincil-ikincil kanal çapları [12]

4.1.2 Deney Sistemi Kurulumu ve İyileştirmeler

STS sistemi santrifüj fan, fan kontrol panosu, hava kanalları, kuvars silosu, yanma haznesi, girdap üretici ve STS'yi yapısal olarak taşıyan sigma profiller ile bunların bağlantı parçalarından müteşekkildir (Şekil 4.2).

Yanma Haznesi ve Hava Kanalları: STS'de izotermal koşullarda hız ölçümlerinin yapılabilmesi için kapalı bir yanma haznesine ihtiyaç vardır. Yanma haznesinin içinin görülmesi ve müdahale edilebilmesi için saydam bir malzeme olan pleksiglas levhalar kullanılmıştır. Ancak levhaların kırılğan yapısından dolayı gerçekte silindirik olması gereken ocak geometrisi dörtgen prizma şeklinde inşa edilmiş ve birbirine birleştirilen pleksiglas levhalara destek olması için alüminyum sigma profiller kafes yapısı oluşturmada kullanılmıştır. Yanma haznesi tabanı kuvars tanecikleriyle akış görselleme yapıldığı vakit yakıcı içerisinde birikmesini önlemek için yakıcı ağzı hizasından itibaren öne doğru olacak şekilde eğimli yapılmıştır. Hazne çıkışında tanecikle akış görselleme yapılmak istendiğinde bu tanecikleri tutma amacıyla torba filtreler yerleştirilmiştir. Ancak bu çalışmada bu ekipmanlar kullanılmamıştır (Şekil 4.2).



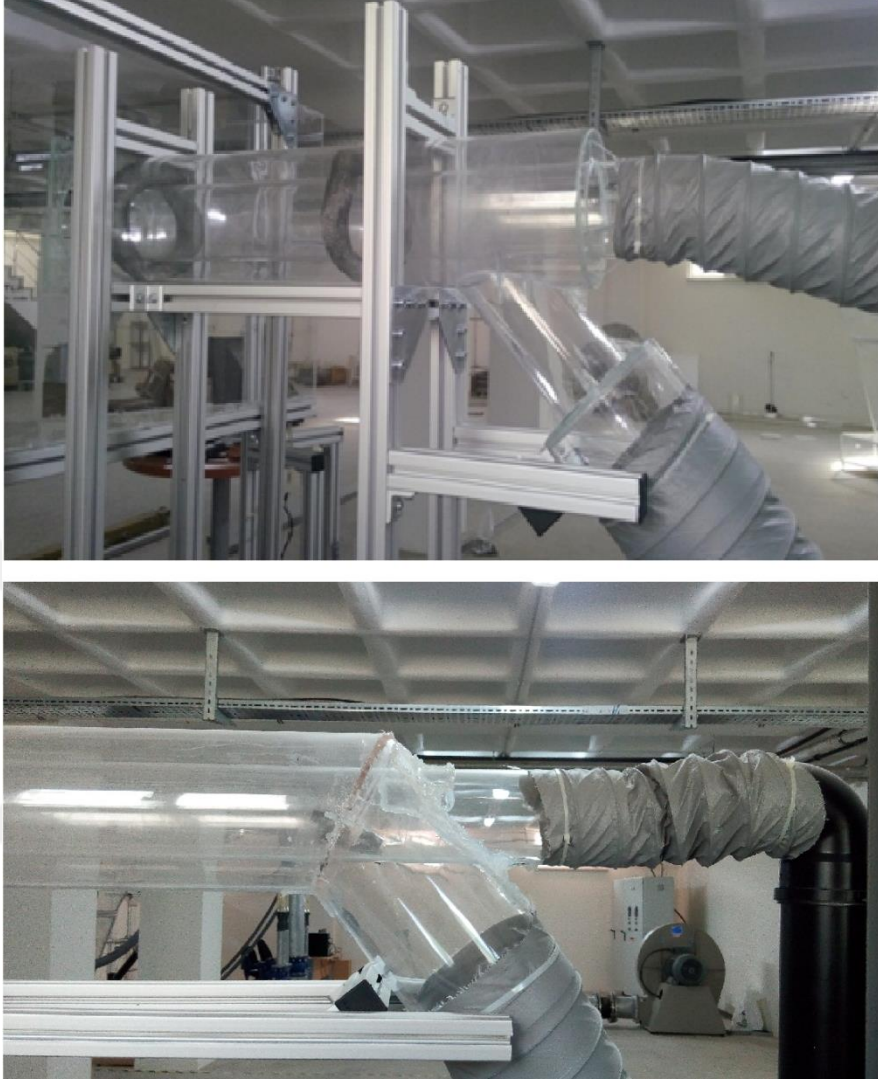
Şekil 4.2 Soğuk test düzeneği genel görünümü

Yanma haznesi yan yüzeylerinde kobra başlı pitot tüpüyle ölçüm yapabilmek için, uygun çapta delikler açılmıştır. Delikler yakıcı ağızından, eksen boyunca x yönünde sırasıyla 125, 200, 350, 500, 650, 800 ve 1100 olmak üzere toplam 7 adettir.

Yanma haznesi girişinde birincil ve ikincil hava kanallarının girebileceği ölçüde dairesel açıklıktan hava kanalları ocak hacmi içerisine girmektedir. Hava kanalları da yanma haznesi gibi pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Yakıcı bölgesinden itibaren 1.5 metre kadar uzanan borular daha sonra hortumlar aracılığıyla zemin seviyesine inmekte ve tekrar borularla fanlara gitmektedir. Hortumlar girdap üretici değişimi yapmak ve fanların konumu değiştirilmek istendiğinde kanalların hareketini sağlar (Şekil 4.2).

Birincil ve ikincil hava kanallarının birleşim yaptığı noktada ilk denemelerde fanların gerekli debiyi sağlayamadığı görülmüş, bunun üzerine kanalların birleşim yaptığı kısımlarda akış geometrisinde iyileştirmeler yapılarak basınç düşümleri azaltılmış ve fanların gerekli debiyi beslemesi sağlanmıştır. Burada ani kesit daralma ve genişlemeleri düzeltilmiş, ayrıca ikincil hava kanalının 45 derece açıyla bağlanması sağlanmıştır. Bunun dışında kanalların birleşim yaptığı nokta ile yakıcıya kadar olan mesafe arttırılarak akışın kendi kendini homojenize etme yeteneği arttırılmıştır. Bu sayede akışı homojenleştirmek için kullanılan iki adet simit şeklindeki tel süzgeçlerin

sayısını bire indirmek mümkün olmuş ve bu sayede basınç düşümü daha da azaltılmış ve fanların tasarım noktalarında çalıştırılması sağlanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Birincil-ikincil hava kanalları. İyileştirmeden önce (üstte) ve iyileştirmeden sonra (altta)

Fanlar: Birincil ve ikincil hava fanları sistemin hava debisi gereksinimi ve basma yüksekliği değerleri hesaplanarak santrifüj tipte seçilmiştir. Birincil ve ikincil kanallarda basınç kaybı karakteristiklerinin farklı olmasından dolayı iki adet fan seçimi yapılmıştır. Fanların yük ayarı frekans dönüştürücü ile ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Fanların motor gücüne göre seçilen dönüştürücüler bir kumanda panosuna (Şekil 4.4) yerleştirilerek üzerinde yer alan potansiyometre aracılığıyla devir sayıları kontrol edilmiştir [12]. Fan ve kumanda panosunun teknik özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.4 Hava fanları (üstte) ve frekans kontrol panosu (altta) [12]

Çizelge 4.3 Hava besleme fanlarının teknik özellikleri [12]

Fanlar	Birincil	İkincil
Tip	Santrifüj	Santrifüj
Debi (m³/h)	1300	2200
Basınç (mmSS)	300	450
Gücü (kW)	1,1	3
Devir (d/d)	3000	3000

Girdap Üretici: STS’de kullanılan girdap üretici yakıcının ikincil hava kanalı çıkışına yerleştirilen aksel kanatçıklardan oluşan, ikincil havaya teğetsel eksende hız kazandırarak girdap oluşumu sağlayan mekanik ekipmandır. Bu çalışmada kullanılan girdap üretici 18 adet, her biri dikey eksenele 45° açı yapan (kanat açısı) ve yakıcı

çıkışında yatay eksenle 10° açıyla eğimli (kanat eğim açısı) kanatçığa sahiptir. Ayrıca girdap üretici genişliği de 50 mm'dir. Deneyleerde kullanılan girdap üretici resmi Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 Deneyleerde kullanılan girdap üretici

4.1.3 Ölçüm Ekipmanları

STS deneyleerinde hava hız ölçümünde kullanılan başlıca ölçüm ekipmanları pervane tip anemometre ve kobra başlı (beş delikli) pitot tüpüdür. Pervane tip anemometre ile birincil ve ikincil hava kanalı içerisinde yer alan debiler ölçülürken kobra başlı pitot ile ocak hacmi içerisindeki aksenel, radyal ve teğetsel hız dağılımları fark basınç yöntemiyle ölçülmektedir.

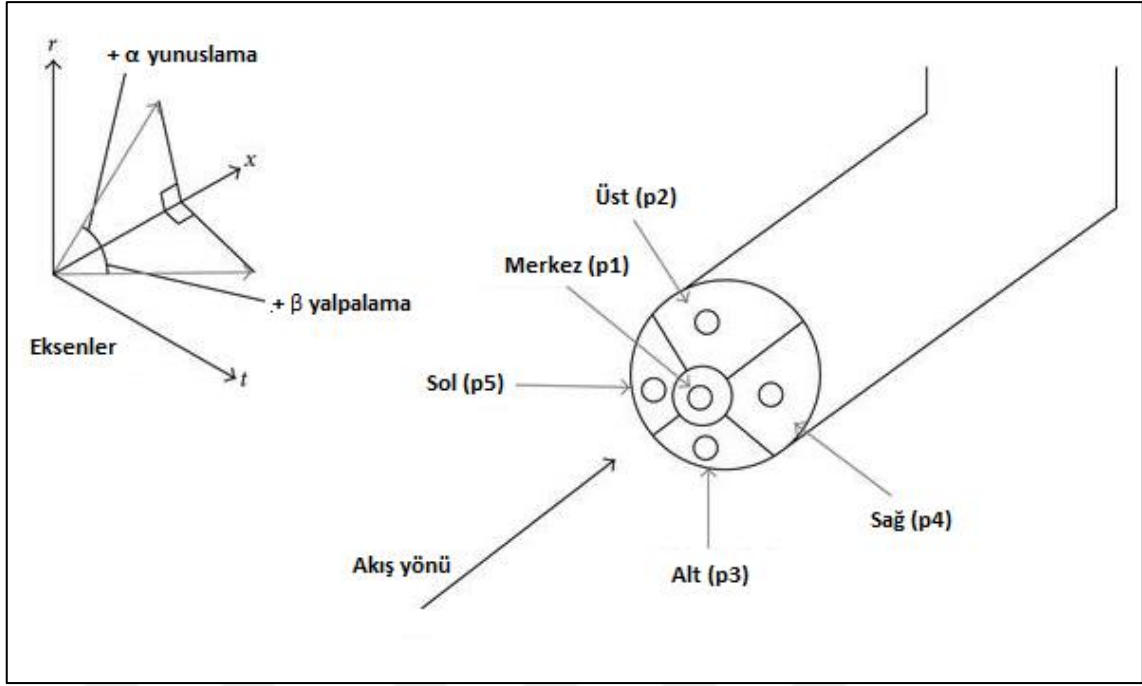
Pervane tip anemometre bir ölçüm çubuğu ucunda yer alan küçük bir pervane aracılığıyla akış hızını tayin etmektedir. Anemometre sapı teleskopik geçmeli olduğu için ölçüm yapılacak derinliğe bağlı olarak uzayabilmektedir. 40 m/s mertebesinde hızlara kadar sağlıklı ölçüm yapabilmektedir. Cihazın ölçüm çubuğu bir kablo ile dijital

anemometreye bağlanabilmektedir. Cihazın ölçüm çubuğu kanallar üzerine açılmış açılır-kapanır deliklerden akış içerisine daldırılarak hız ölçümü yapar. Akış kesiti boyunca farklı noktalardan ölçümler yapılarak akış hız profiline uygun olacak şekilde debi hesaplanır [12]. Şekil 4.6'da pervane tip anemometre görülmektedir.



Şekil 4.6 Pervane tip anemometre ile hız ölçümünün yapılması [12]

Kobra başlı pitot ise 1 metre uzunluğunda bir ölçüm çubuğu ucunda yer alan biri merkezde 4'ü çevresel olarak dizilmiş toplamda 5 adet delikten oluşmaktadır. Her bir delikten statik basınç değerleri ölçülmekte ve daha sonra ölçülen değerler ilgili bağıntılarla hıza çevrilmektedir. Çok boyutlu bir akış sisteminde bir koordinatın hızını bulmak için ölçümün yapıldığı o noktaya ait yalpalama/ β (yaw) ve yunuslama/ α (pitch) açılarının bilinmesi gerekmektedir (Şekil 4.7). Pitotun ucundaki 2 ve 3 numaralı delikler yalpalama açısını tayin etmede, üst ve altındaki 4 ve 5 numaralı delikler de yunuslama açısının bulunmasında kullanılır. Merkezde yer alan 1 numaralı delik ise ölçümün yapıldığı noktadaki statik basınç değerinin ölçümünde kullanılır. Deliklerin konumlarının çubuğun kendi eksenine etrafında dönmesiyle bozulmaması için çubuğun ucu kobra başı şeklindedir.



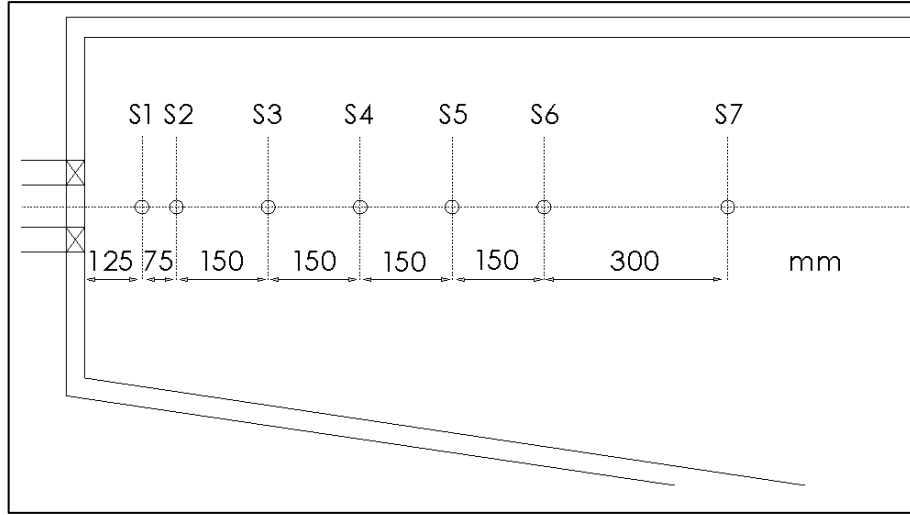
Şekil 4.7 Kobra başlı pitot delikleri ve açıları

4.2 Yanma Odasında Hız Dağılımının Bulunması

Yanma aerodinamiği incelenirken hava akışı 3 boyutlu olarak incelendiğinden standart pitot tüpleri ile her üç hız komponentini ölçmek mümkün değildir. Bu yüzden LDA, PIV gibi parçacıklı/dumanlı akışta dijital görüntü işleme teknikleri ve hızlı kameralar aracılığıyla akış görselleme mümkün olduğu gibi kobra başlı pitot tüpüyle de akış görselleme yapmak mümkündür. Bu çalışmada yapılan ölçümler bir veri tabanı olması ve sonraki çalışmaların doğrulanabilmesi amacını taşımaktadır.

4.2.1 Hız Ölçümleri

Girdap üretici çıkışında akışın teğetsel ekseninde periyodiğe yakın olduğunu kabul edersek, x yönünde alınan ölçümler hacim içerisinde hız dağılımları hakkında bilgi verecektir. Bu yüzden sadece yakıcı merkezine denk gelecek şekilde aksenal yönde tek bir çizgi üzerinde ölçümler yapılmıştır. Ölçüm yapılan istasyonlar sırasıyla 1'den 7'ye kadar numaralandırılmıştır (Şekil 4.3).



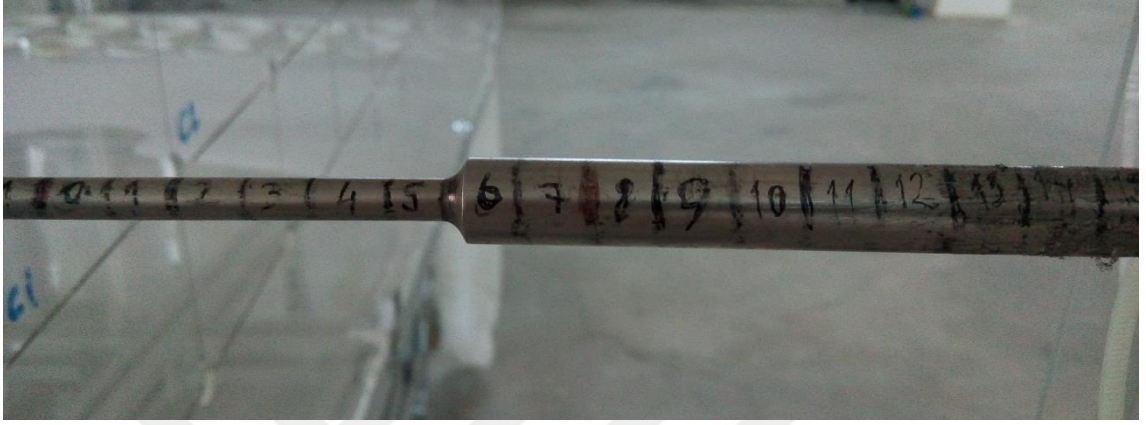
Şekil 4.8 Yanma haznesi ölçüm delikleri

Kobra başlı pitot tüpünün sabit şekilde kalabilmesi için alüminyum sigma profilden bir destek ünitesi kurulmuş, bu ünitenin üzerine açıölçer ve açıölçerin merkezine kobra başlı pitot yerleştirilmiştir. Bunun dışında yanma haznesinin üst kısmına da delikler açılmıştır. Bu deliklerden geçirilen bir ipin ucuna bağlı halka pitotun prob ucuna tutturulmuş, böylece hem pitotun 1 metre uzunluğundaki test çubuğunun sehim yapması önlenmiş, hem de akıştaki dalgalanmalardan kaynaklı prob ucunun konumunun değişken olmasının önüne geçilmiştir (Şekil 4.4). Bu sayede ölçüm kaynaklı hataların azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 4.9 Pitot çubuğunun bir iple askılanarak sabitlenmesi

Pitot üzerine 1 cm aralıklarla ölçüm mesafeleri işaretlenmiştir (Şekil 4.5). Böylece hangi noktadan ölçüm alındığı belirlenebilmektedir. 7 farklı ölçüm istasyonunda her birinde 23 farklı noktada (derinlikte) olmak üzere toplamda 161 noktada ölçüm yapılmıştır. Her noktada ortalama 10 saniye boyunca 3 farklı statik basınç ölçümü yapılmış, dijital manometre üzerinde okunan değerler Excel Programı'na tablolar halinde girilmiştir.



Şekil 4.10 Test çubuğu üzerinde ölçüm mesafeleri

Yalpalama Açısının Bulunması: Kobra başlı pitot tüpünde akışın hangi yönde olduğunu bulabilmek oldukça güçtür. Bu yön aynı zamanda yalpalama açısı değerini vermektedir. Yalpalama açısının belirlenebilmesi için 2 ve 3 numaralı deliklerde ölçülen fark basıncın sıfırlanması gerekmektedir. Pitot tüpü test çubuğu kendi eksenini etrafında döndürülerek bu farkın 0 olduğu açı bulunmaya çalışılır. Şekil 4.6'da görüleceği üzere bir açıölçer vasıtasıyla 0 fark basıncın olduğu yalpalama açısı bulunana kadar denir. Bu yöntemde özellikle geri dönüş bölgelerinde hızların çok düşük olduğu (negatif yalpalama açıları) noktalarda yalpalama açısını bulmak çok zor olmaktadır. Çünkü manometrenin okuma hassasiyeti test çubuğunu döndürmeyle değişen fark basıncı algılayamamaktadır. Ayrıca fark basıncın 0 olduğu iki farklı açı vardır. Bunlardan birisi akışın olduğu yöndeki açı iken diğeri de bu akışın 180° zıttıdır.

Akışın akım yönünden ters dönmeye başladığı $u=0$ noktalarına yaklaştıkça hızların vektörel büyüklükleri düştüğü için akım kararsızlaşır. Bu da akış yönü tayin etmede güçlükler açar. Pitot ile açı belirlemedeki yöntemin zorlukları anlaşılınca pitot tüpü ucuna bir iplikçik bağlanarak yalpalama açısı gözle tayin edilmiştir (Şekil 4.6). Bu yöntem özellikle geri dönüş bölgesi gibi düşük hız alanlarında açı ölçmedeki güçlükleri

gidermiştir. Serbest akım bölgesinde yalpalama açıları $-90^{\circ}/+90^{\circ}$ arasında iken, geri dönüş bölgesinde bu açı $+90^{\circ}/+270^{\circ}$ arasında olmaktadır.



Şekil 4.11 Yalpalama açısı bulma düzenekleri: açıölçer (solda) ve iplikçik (sağda)

Yunuslama Açısının Bulunması: Yalpalama açısının aksine, yunuslama açısının değişmesiyle probun konumu değişeceğinden tedarikçi firma [38] tarafından temin edilen kalibrasyon eğrileri yardımıyla yunuslama açısı hesaplanabilmektedir. Yunuslama açısının hesaplanabilmesi için öncelikle 4 ve 5 numaralı deliklerdeki, daha sonra 1 ve 2 numaralı deliklerdeki fark basınç değerleri okunur. $(P_4 - P_5)/(P_1 - P_2)$ değerine kalibrasyon eğrisinde karşılık gelen açı bize yunuslama açısını vermektedir.

Yalpalama ve yunuslama açılarının bulunmasının ardından akış hız değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [8] ;

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho * k_{12}}} \quad (4.2)$$

$$U = \bar{U} \cos \alpha \cos \beta \quad (4.3)$$

$$V = \bar{U} \sin \beta \quad (4.4)$$

$$W = \bar{U} \cos \beta \sin \alpha \quad (4.5)$$

Verilen denklemlere göre \bar{U} bileşke hız, U aksel hız, V radyal hız, W teğetsel hız, $P_1 - P_2$ 1 ve 2 nolu deliklerden okunan basınç farkı, α yalpalama açısı, β yunuslama açısı, ρ havanın özkütlesi, k_{12} de kalibrasyon eğrilerinden okunan yunuslama açısına göre değişen dinamik basınç sabitidir.

4.2.2 Hız Ölçüm Sonuçları

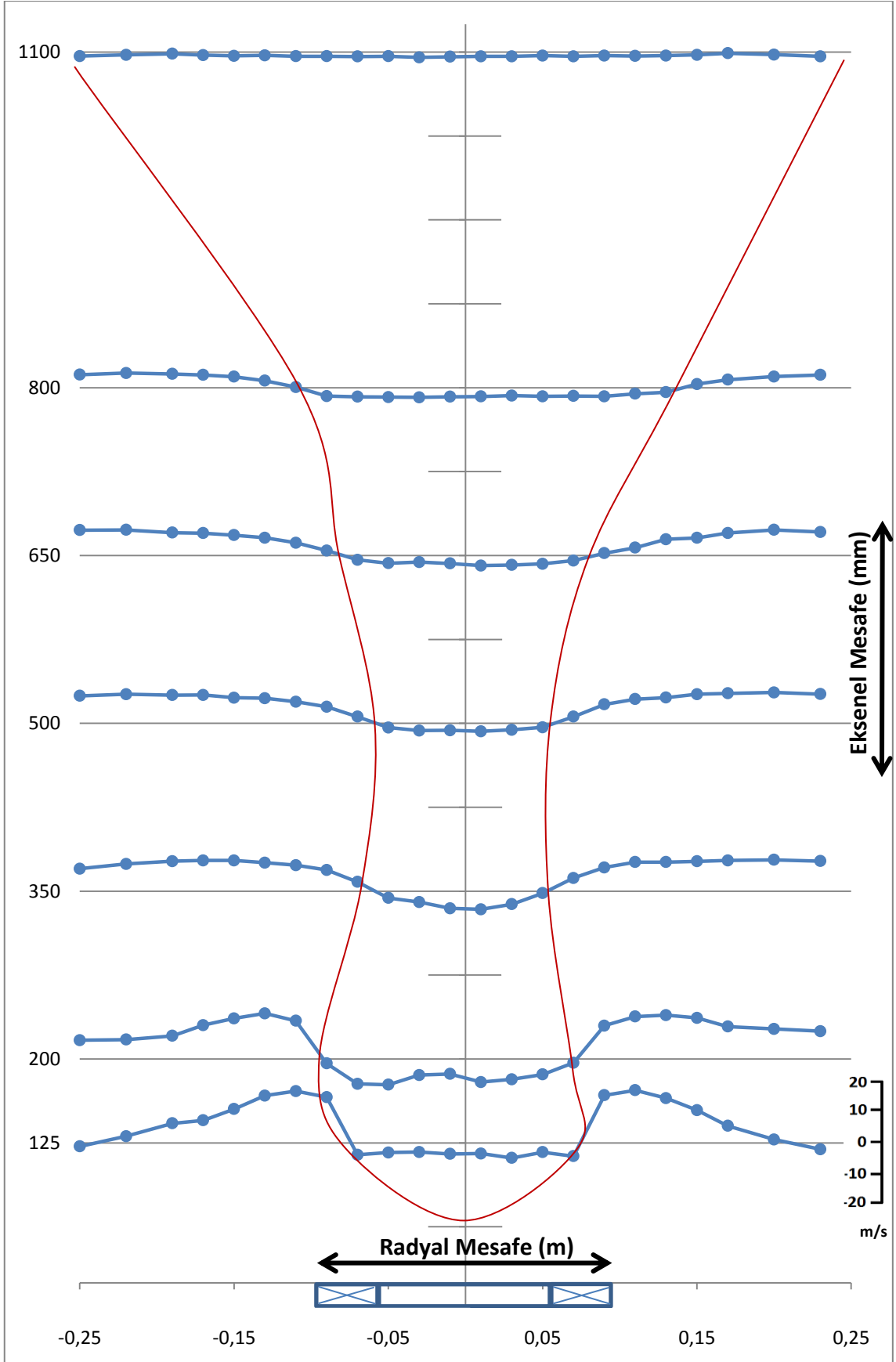
Pervane tip anemometre ile yakıcı ağzı çıkışında kabaca ilk hız ölçümlerinde merkez ekseninde akışın ters dönmeye başladığı mesafe çıkıştan itibaren yaklaşık 75 mm olmuştur. Bu değerler kobra başlı pitotla ölçüm yaptığımız ilk istasyon olan S1'de de geri dönüş bölgesinin varlığından bellidir.

Eksenel hızlar beklendiği gibi y-eksenine göre simetrik bir profile sahiptir. İlk istasyonlarda birincil-ikincil hız farkından dolayı hız profilinde iki pik noktası olurken, zamanla viskoz kuvvetlerin etkisiyle akış bozunarak homejenize olmuştur. Hatta S7 istasyonunda hız profili neredeyse düz bir çizgi halini almıştır (Şekil 4.12).

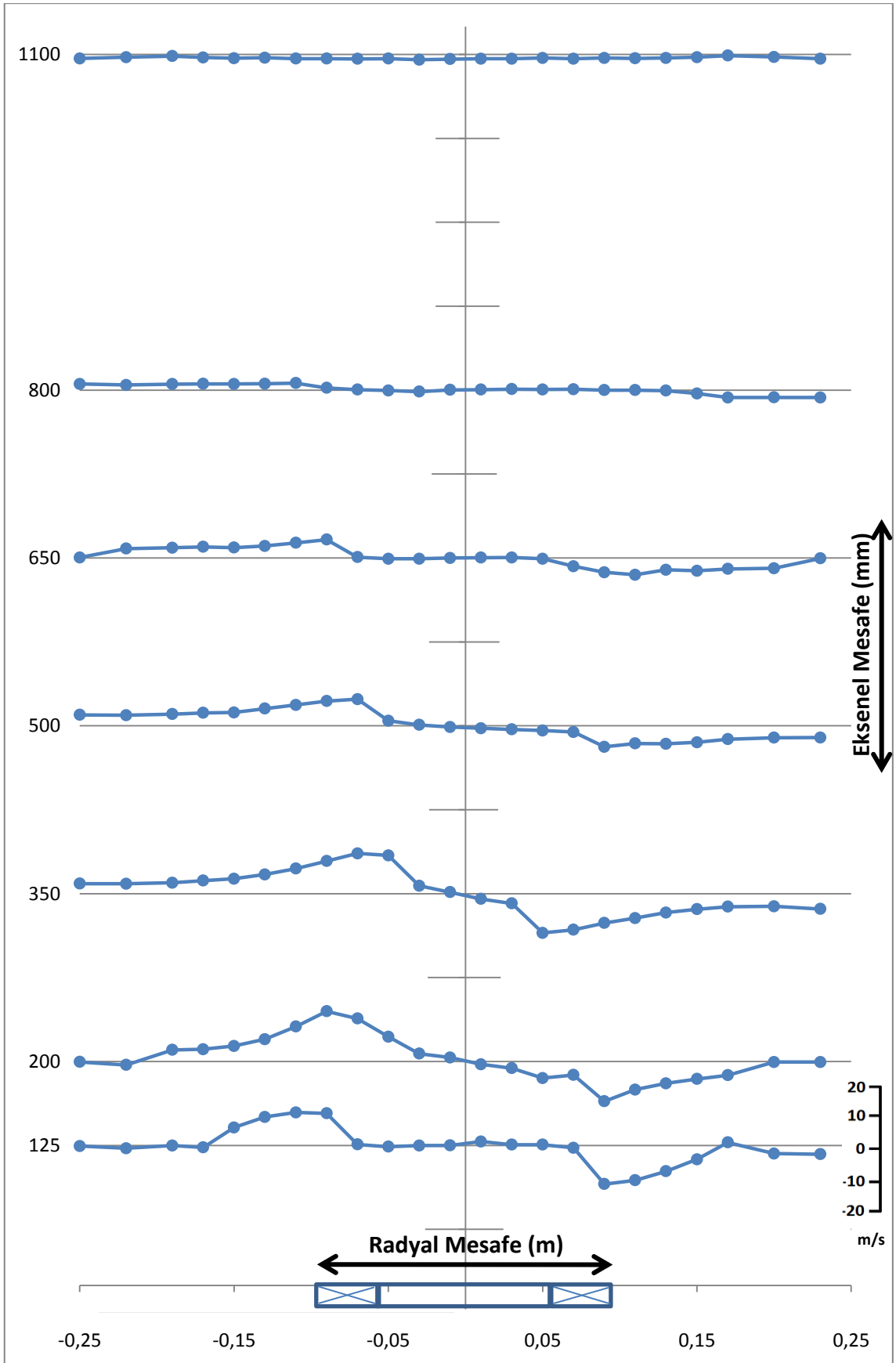
Geri dönüş bölgesi ters hız gradyenlerinin olduğu bölgelerde olmaktadır. Buna göre geri dönüş bölgesi çapının yakıcıdan uzaklaştıkça önce yavaşça azaldığı, sonra hızlı bir şekilde arttığı söylenebilir. İkincil havanın yöneten hava olduğu bu deneyde akış merkezkaç etkisinin gereğinden fazla olması nedeniyle yakıcı cidarlarına çarparak akış sınırı boyunca hareket etmekte, böylece ortada görece geniş çapta huni şeklinde bir geri dönüş bölgesi oluşmaktadır (Şekil 4.12).

Teğetsel hızlar da beklendiği üzere orijine göre simetrik bir profile sahip sonuçlar mevcut çalışmalarla örtüşmektedir. [27] Akışın helisel olması buna yol açmaktadır (Şekil 4.13).

Bu kısımda kullanılan girdap üretici optimum tasarım olmayıp, yapılan deneylerin veri tabanı oluşturarak ileri çalışmalara zemin hazırlaması ve doğrulanması amaçlanmıştır.



Şekil 4.12 Eksenel hız ölçüm sonuçları ve geri dönüş bölgesi şekli



Şekil 4.13 Teğetsel hız ölçümleri

4.2.3 Ölçüm Belirsizliği Hesapları

Ölçüm belirsizliği hesabına deneysel çalışmalarda sonuçların gerçekten ne kadar saptığını nicel olarak tespit edebilmek amacıyla sık sık başvurulur. Bu çalışmadaki deney sisteminde belirsizliğin olası sebepleri aşağıdaki gibidir [39];

- Ölçüm şartları/çevre koşullarındaki zamana bağlı değişim, deneylerin aynı koşullar altında yapılamaması
- Ölçüm cihazlarının sonlu çözünürlüğü
- Ölçülen değerlerin tanımındaki teorik eksiklikler/hatalar
- Deneyi gerçekleştiren personelin okuma hataları
- Dış kaynaklardan temin edilen sabit değer, standart ve referans fiziksel özelliklerin tam olarak bilinmemesi

Ölçüm belirsizliği hesaplanırken hata miktarı istenilen bir güvenlik seviyesine göre % cinsinden ifade edilebilir. Bu değer ölçülen büyüklüğün gerçek değer etrafında bulunabileceği aralığı tanımlayan tahmini değerdir. X ölçümü yapılan değer, U_{95} de % 95 seviyesinde ölçüm belirsizliği miktarı olmak üzere;

$$\text{Gerçek Değer} = X \pm U_{95} \quad (4.6)$$

şeklinde hesaplanır. Bir ölçümde ölçüm hatası ise şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\xi = \mu + \varepsilon \quad (4.7)$$

Bu hesaplamada ε rastgele ölçüm hatasını ifade ederken, μ sistematik ölçüm hatasını, ξ ise toplam ölçüm hatasını ifade etmektedir. Ölçümlerde standart sapma hesabı ise aşağıdaki formüle göre olmaktadır;

$$S_x = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(X_k - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (4.8)$$

Burada S_x ölçülen değerlerin standart sapmasını, N örneklem sayısını, X_k ölçülen değeri ve \bar{X} de ölçüm ortalama değerini göstermektedir. Buna göre toplam belirsizlik rastgele ve sistematik ölçüm belirsizlikleri aracılığıyla şu şekilde ifade edilmektedir;

$$U_{95} = 2 \sqrt{\left[\frac{\mu}{2}\right]^2 + [S_x]^2} \quad (4.9)$$

Soğuk test düzeneğinde kobra başlı pitotta fark basın manometresi ile ölçülen basınçlar daha sonra Bernoulli Denklemi aracılığıyla hesaplanmaktadır. Ölçüm yapılan noktadaki hız değeri şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$V = \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho * k}} \quad (4.10)$$

Burada V hız değerini, ΔP dinamik basıncı, ρ akışkan özkütlesini ve k da kalibrasyon eğrilerinden gelen katsayıyı ifade eder. Formüle göre basıncın karekökü hızla orantılı olduğundan hız hesabında belirsizliklerin bir miktar daha düşeceği söylenebilir. Ölçümlerde kullanılan fark basınç manometresinin özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Dijital manometre teknik özellikleri

Özellik	Değer
Ölçüm Genişliği	0 / +25 hPa
Çözünürlük	± 0,02 hPa
Kesinlik	0,01 hPa

Çizelge 4.5 Farklı deliklerdeki belirsizlikler

İstasyon	U ₉₅	Belirsizlik	
		Toplam	Basınç Ölç. Kaynaklı
S1	1.9	18.51%	4.01%
S2	2.0	22.61%	6.55%
S3	1.9	21.80%	4.32%
S4	1.9	41.51%	15.31%
S5	1.9	47.90%	13.72%
S6	1.9	59.85%	13.61%

Çizelge 4.6 S1 ölçüm istasyonu için belirsizlik analizi sonuçları

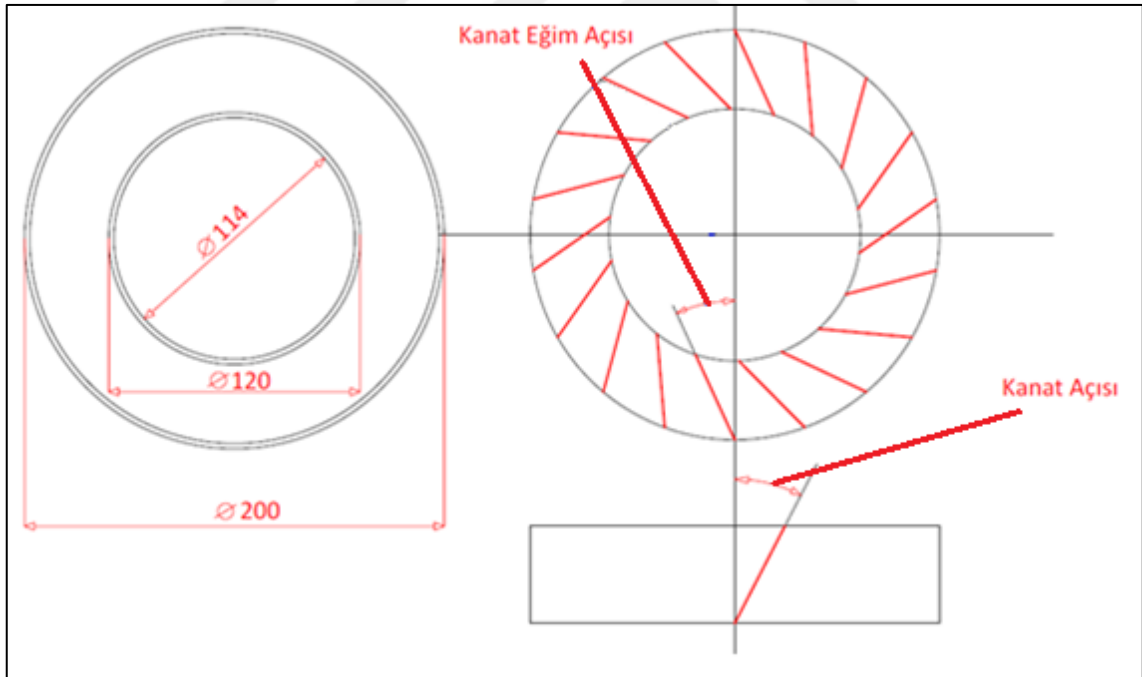
Ölçüm Tekrarı						Belirsizlik				
Ölç. Yeri	1.	2.	3.	Ort.	Std. Sap.	Sistemik Ölçüm Hatası	U ₉₅	Toplam	Basınç Ölçümü Kaynaklı	
mm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	Pa	m/s	m/s	%	%
-250	6.1	6.2	6.1	6.1	0.07	2.00	1.84	1.8	30%	2%
-220	6.0	5.9	6.1	6.0	0.08	2.00	1.84	1.8	31%	3%
-190	8.0	7.7	7.5	7.7	0.28	2.00	1.84	1.9	25%	7%
-170	11.2	10.0	11.2	10.8	0.69	2.00	1.84	2.3	21%	13%
-150	13.6	13.4	13.0	13.3	0.27	2.00	1.84	1.9	14%	4%
-130	15.6	15.1	15.3	15.3	0.24	2.00	1.84	1.9	12%	3%
-110	14.6	16.2	15.9	15.6	0.87	2.00	1.84	2.5	16%	11%
-90	15.0	14.9	15.2	15.0	0.14	2.00	1.84	1.9	12%	2%
-70	14.6	15.0	14.8	14.8	0.17	2.00	1.84	1.9	13%	2%
-50	10.7	10.5	10.8	10.7	0.17	2.00	1.84	1.9	18%	3%
-30	4.7	5.2	4.9	4.9	0.25	2.00	1.84	1.9	39%	10%
-10	4.7	5.0	4.2	4.6	0.40	2.00	1.84	2.0	43%	17%
10	7.0	7.2	6.6	6.9	0.28	2.00	1.84	1.9	28%	8%
30	7.1	5.5	6.4	6.4	0.81	2.00	1.84	2.4	38%	25%
50	6.9	6.6	6.8	6.8	0.13	2.00	1.84	1.9	27%	4%
70	4.2	4.2	4.5	4.3	0.17	2.00	1.84	1.9	43%	8%
90	15.8	15.4	15.4	15.6	0.23	2.00	1.84	1.9	12%	3%
110	14.7	15.7	15.5	15.3	0.51	2.00	1.84	2.1	14%	7%
130	14.6	14.4	14.9	14.6	0.27	2.00	1.84	1.9	13%	4%
150	14.9	13.7	15.3	14.7	0.83	2.00	1.84	2.5	17%	11%
170	11.3	11.2	11.0	11.2	0.15	2.00	1.84	1.9	17%	3%
200	10.2	10.2	10.2	10.2	0.00	2.00	1.84	1.8	18%	0%
230	10.2	10.2	10.2	10.2	0.00	2.00	1.84	1.8	18%	0%
							ORT.	2,1	22.6%	6.5%

Cihazdaki ölçüm belirsizliği 0.02 hPa değeri 1.84 m/s'ye denk gelmektedir. Bu nedenle hızların 2 m/s altında seviyelerde ölçüm belirsizlikleri yüksek çıkmaktadır. Yanma haznesi hacminin farklı noktalarında ölçülen bileşke hızlar üzerinden yapılan belirsizlik hesap sonuçları Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.



SAYISAL ANALİZLER

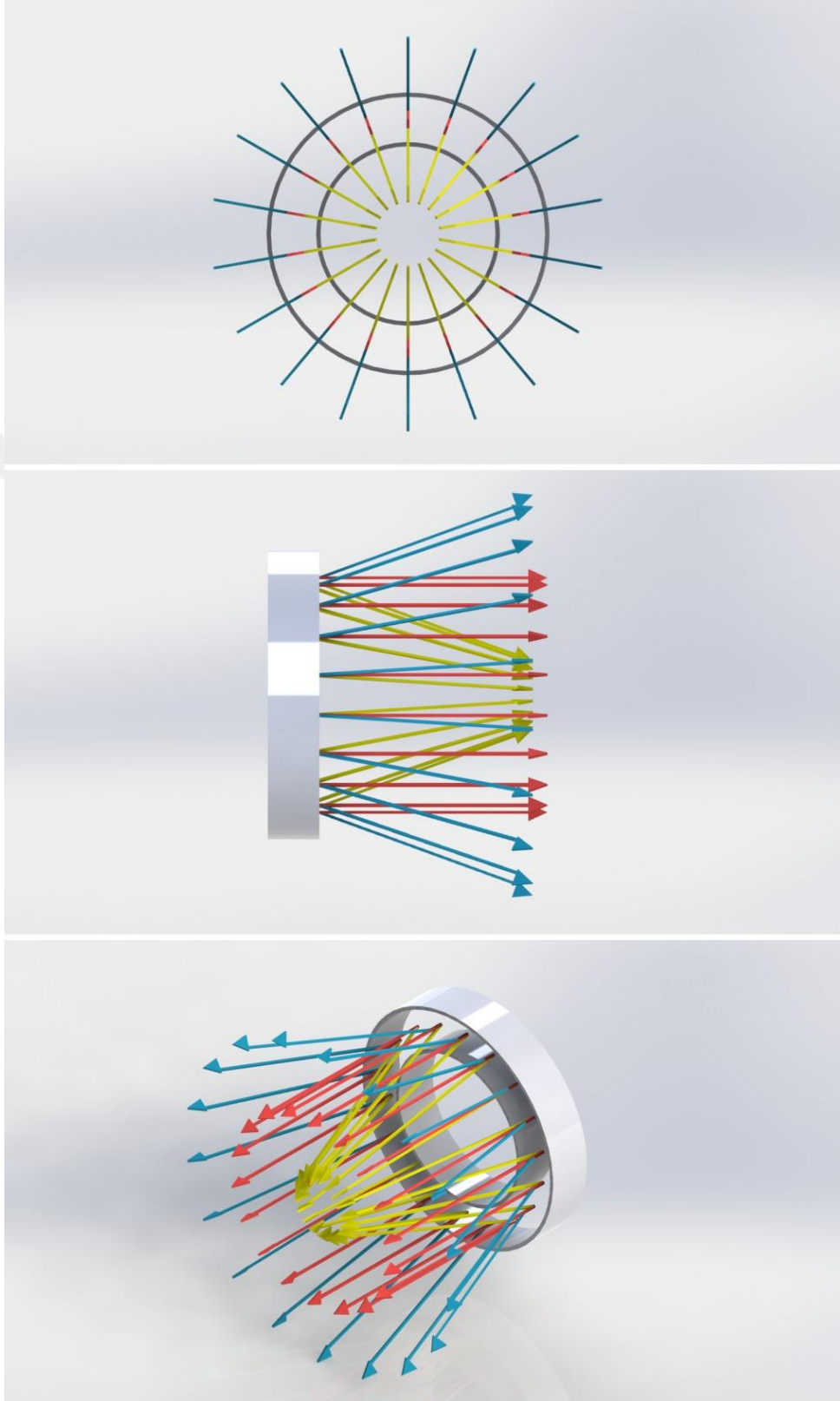
Daha önceki bölümlerde yanma aerodinamiğinin teorik arka planından ve yapılan deneysel çalışmalardan bahsedilmişti. Bu bölümde daha önceki çalışmalar baz alınarak daha detaylı incelemeler yapılmış ve farklı parametrelerin performans kriterleri üzerine etkileri incelenmiştir.



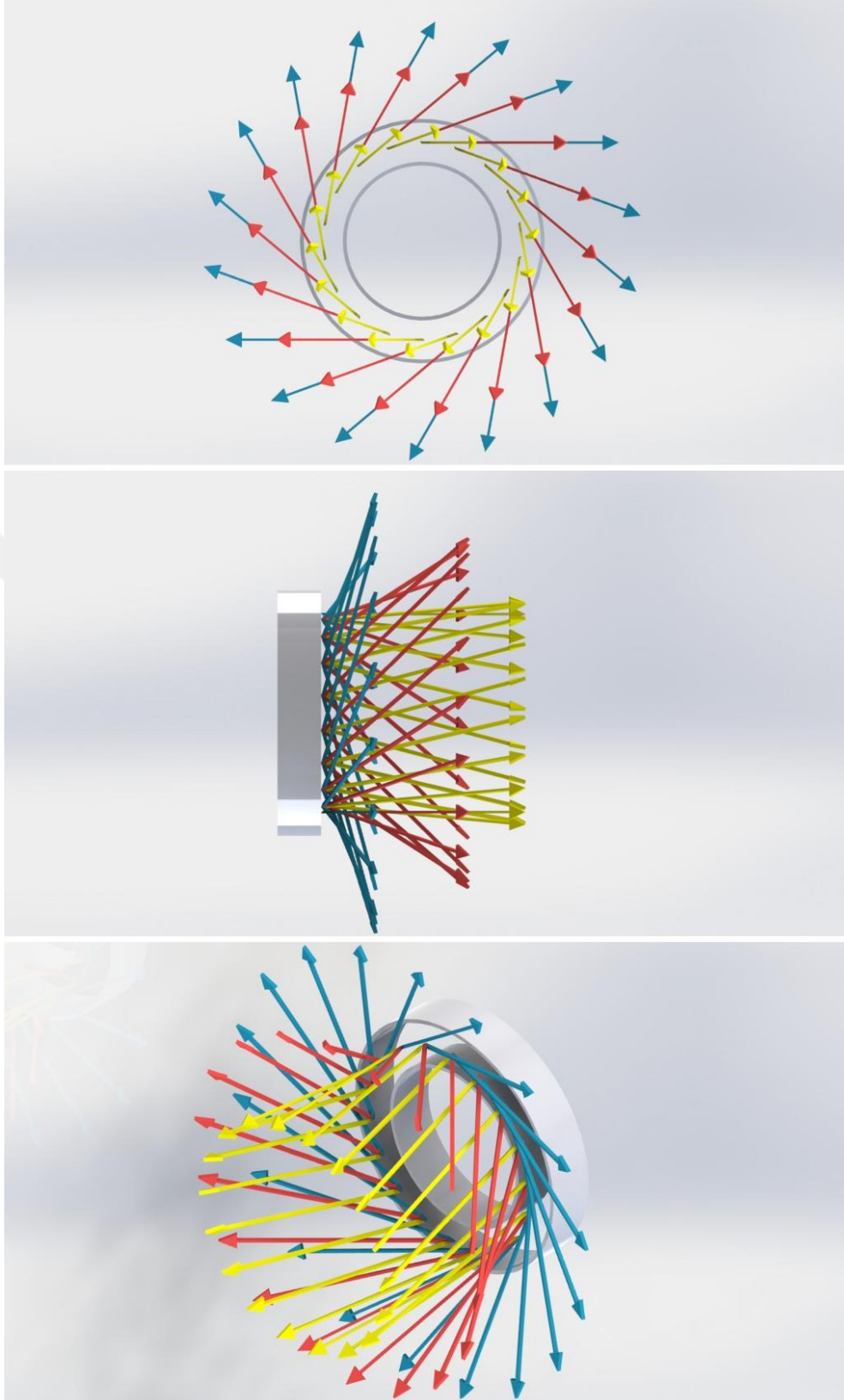
Şekil 5.1 Girdap üreticinde incelenen parametreler (yakıcı çıkışında)

Yapılan çalışma kapsamında üç temel parametrenin akış üzerine etkileri incelenmiştir. Geometrik parametreler, kanat açısı ve kanat eğim açısı (Şekil 5.1) iken, işletme parametreleri de birincil-ikincil momentum oranıdır. Bu parametreler dışında Bölüm

3'te bahsi geçen yanma odası geometrisi ve hava besleme gibi herhangi başka bir değişikliğe inelenmemiştir.



Şekil 5.2 Sabit bir kanat açısında (0°) kanat eğim açısının akış hız vektörlerine etkisi



Şekil 5.3 Sabit bir kanat eğim açısında (0°) kanat açısının akış hız vektörlerine etkisi
Yapılan incelemelerde kanat açısı 6 seviyede, kanat eğim açısı 4 seviyede, momentum oranı da 7 seviyede incelenmiştir. Toplamda 168 ayrı analiz her analizde diğer iki

parametre sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal analizlerdeki amaç incelenen parametrelerin akış karakteristikleri ve yanma aerodinamiği ile geri dönüş bölgesi geometrisi üzerine etkilerinin detaylı şekilde anlaşılmasıdır. Çalışmanın özgün yanlarından bir tanesi bu olmakla birlikte, bir diğer özgün tarafı da literatür taramasında görüldüğü kadarıyla kanat eğim açısının ilk defa incelenmiş olmasıdır. Kanat eğim açısının akış üzerindeki etkisi Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Kanat açısının akış hız vektörleri üzerindeki etkisi de Şekil 5.3’te verilmiştir.

5.1 Türbülans Modelleme ve Yöneten Denklemler

Yanma aerodinamiğinin doğasında fiziksel olarak türbülansın, girdaplı akışın ve ters akış bölgelerinin birleşik olarak varlığı akışın fiziksel arka planının karmaşıklaşmasına neden olmaktadır. Önceleri deneysel yöntemlere sıkça başvurulmaktayken, günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemiyle bu tip akışlar fiziksel olarak simüle edilebilmektedir.

Girdaplı akışlarda özellikle türbülans modelleme konusu üzerinde sıkça durulan bir konudur. Şiddetli türbülansın varlığı ve türbülansın anizotropik doğasını tahmin edebilmek genel geçer türbülans modelleriyle mümkün olmayabilir. Yaygın olarak kullanılan birinci dereceden RANS modellerinden $k-\epsilon$ realize türbülans modeli [40], düşük girdaplı akışlarda iyi sonuçlar vermesine karşın [7], [13] geri dönüş bölgesinin var olduğu ters akış gradyanlarını doğru tahlil edememektedir. Buna karşın, Launder vd. [42] Reynolds Stress Modeli (RSM), denklemlerinde içerdiği stres komponentleri sayesinde akışın anizotropik olarak davranış gösterdiği düşük hızlı ters akış bölgelerinde hız profillerini gerçeğe daha uygun olarak tahmin edebilmektedir. Burada Reynolds stres bileşenleri taşınım denklemlerinin türbülans yitim oranı ve bu bileşenler için çözümlenmesiyle elde edilmektedir. Literatürde bu iki türbülans modelinin karşılaştırılmasını içeren çok sayıda çalışma mevcuttur [7], [13], [15], [16]. RSM modeliyle yapılan analizler gerçeğe yakın sonuçlar vermesine karşın yüksek mertebeden değişkenler içermesinden ötürü $k-\epsilon$ realize modeline göre 1.5 - 2 kat daha fazla hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır ve standart 2 denklemlerine göre oldukça zor yakınsamaktadır [40]. Bunların yanında alev kararlılığı, parçacık kalma süresi ve resirkülasyon bölgesi geometrisi zamana bağlı türbülans ile ilintilidir. Bunun

hesaba katıldığı LES yönteminde yüksek girdaplı akışlarda gerçeğe en uygun sonuçları vermesine karşın, hesaplama süresi anlamında oldukça masraflıdır [14], [20]. Bu yüzden pratik uygulamalarda çok tercih edilememektedir. Sonuç olarak bu çalışma için tüm faktörler göz önünde bulundurularak RSM türbülans modelinde karar kılınmıştır. Akış hacminde gerçekleşen akış sürtünmeli, sıkıştırılmaz ve sabit maddesel özellikleri olan bir akışkan hareketi olduğundan bu hareketle ilintili kinematik ve dinamik özellikler kütle ve momentumun korunumu denklemleri ile betimlenebilmektedir. Yöneten denklemler aşağıdaki gibidir [41];

- Süreklilik Denklemi
- X, Y, Z Doğrultularında Momentum Denklemleri
 - Stres Üretimi
 - Çevrinti Üretimi
 - Türbülans Yayınımı
 - Basınç Gerilimi
 - Türbülans Yitimi

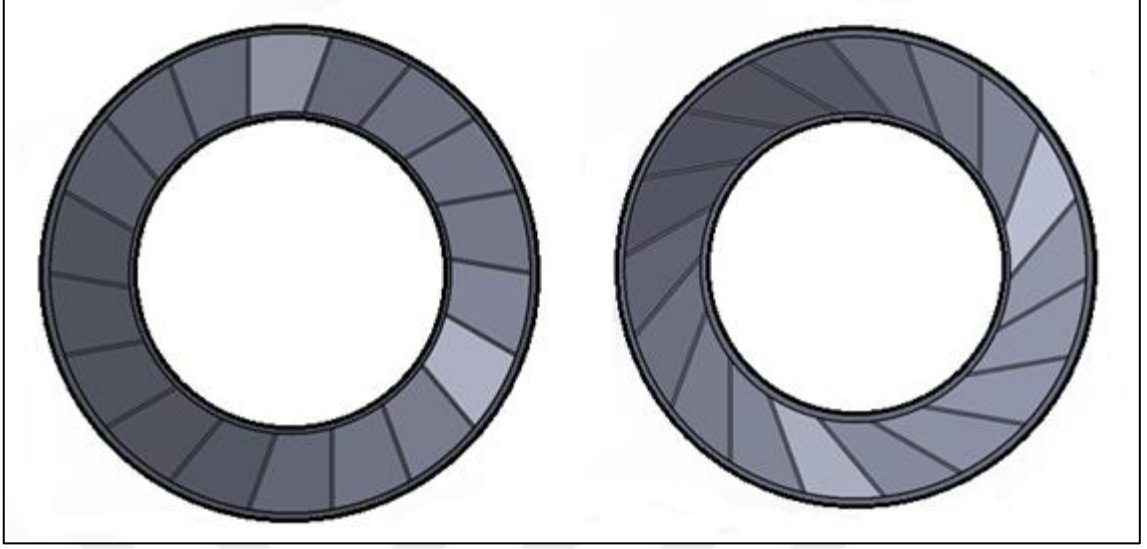
Stres ve çevrinti üretimi momentum denklemleri içerisinde çözdürülürken türbülans yayılımı, basınç gerinimi ve türbülans yitimi için modelleme gerekmektedir. [41]

5.2 Katı Modelleme ve Akış Hacminin Elde Edilmesi

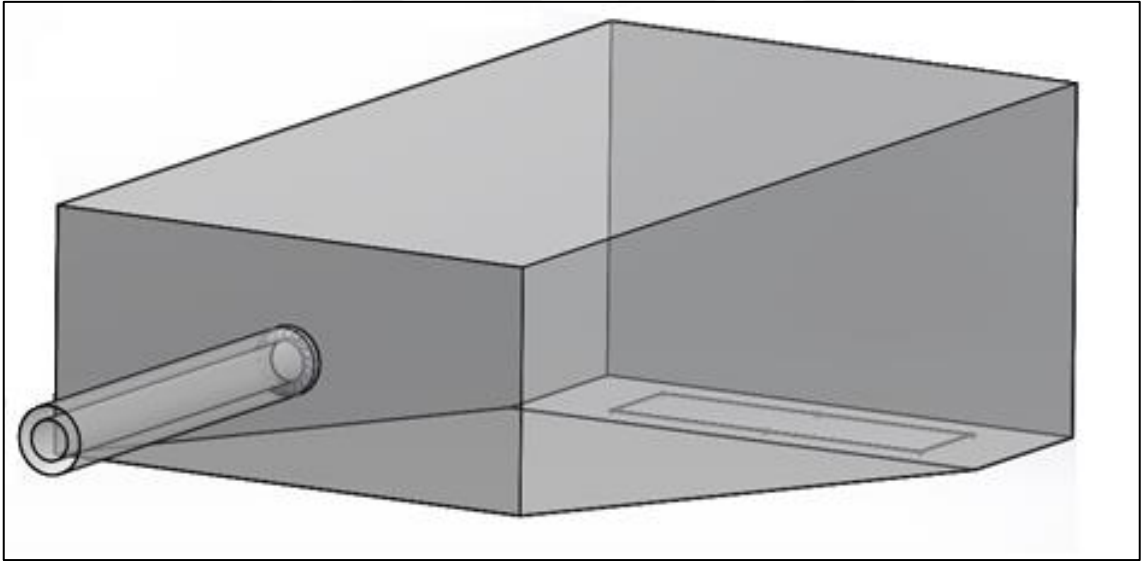
Deneysel aşamadan sonra sayısal analizlerin doğrulanabilmesi adına deney sisteminin birebir ölçekli katı modeli oluşturulmuş (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5) ve daha sonra katı cisimlerin iç kısımları doldurularak katı kısımlar ayrılmıştır. Geriye kalan hacim çözüm bölgesi olmaktadır. Tüm akış hacmi yekpare olarak elde edilmiş, hacim girdap üreticiden önce 1 metre kadar kanal ile birlikte ocak hacmi çıkışına kadar modellenmiştir. Katı modellemeler Solidworks Programı'nda gerçekleştirilmiştir.

Sayısal çözümün doğrulanmasının ardından asıl araştırma konusu olan farklı girdap üreticilerinin test edilebilmesi amacıyla kanat ve kanat eğim açıları değiştirilerek 24 farklı girdap üretici modellenmiş, ancak çözüm bölgesi aynı kalmıştır. Modelleme aşamasında hızların ve momentum oranlarının benzeşiminin yapılabilmesi için girdap

üreteçlerinin blokaj oranlarının sabit kalması gerekmektedir. Bunun için kanat cidar kalınlıkları değiştirilerek akış kesitinin sabit kalması sağlanmıştır.



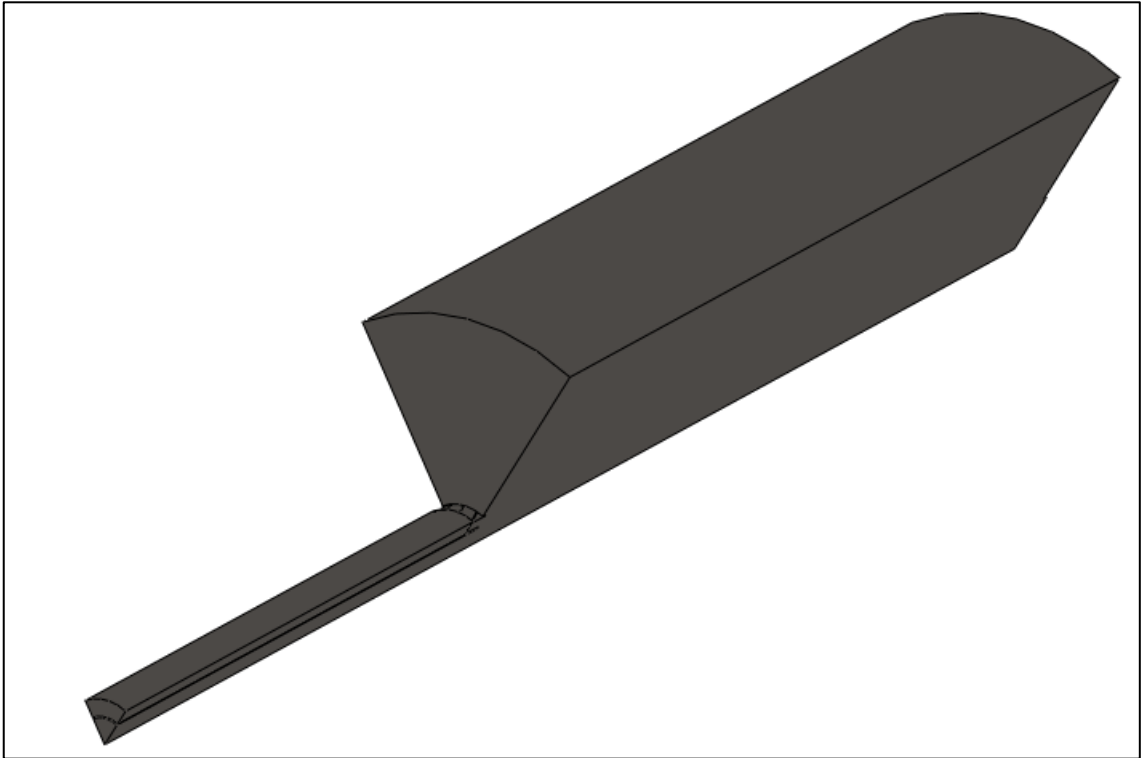
Şekil 5.4 Deneyi yapılan girdap üreteçlerinin katı modelleri. Giriş (sol) ve çıkış (sağ) görünüşleri



Şekil 5.5 STS bölgesi katı modeli

Yüksek kanat açılarında ve düşük kanat eğim açılarında kanat ikincil hava kanalını çevresel olarak sarmaya başlamakta, kanadın izdüşüm alanı oldukça artmaktadır. Bu yüzden belirli bir kanat açısında sadece belli aralıkta kanat eğim açısına sahip kanatlar gerçekte modellenmektedir.

Sayısal çözümün doğrulanmasıyla birlikte çözüm algoritmaları ve kullanılan fiziksel modeller doğrulanmış kabul edilebilir. Akışta incelenen girdap sayısı, türbülans miktarı, geri dönüş bölgesi karakterini ya da bir diğer deyişle akış rejimini değiştirmeyecek şekilde akış geometrisi üzerindeki değişiklikler bu bağlamda gerçekleştirilebilir. İlk etapta ocak hacmi dairesel olarak modellenmiş daha sonra nihayet çözümün kolaylaştırılabilmesi adına fiziksel hacim teğetsel yöndeki periyodik tekrar koşullarından ötürü 6'da 1 olarak modellenerek (Şekil 5.6) tüm çözüm hacmi bu parçayla temsil edilmiştir. İzotermal hava akımı yerçekimi ve kaldırma kuvveti etkilerine maruz kalmadığı için bu yöntemle ağ yapısında daha az hücre kullanılarak çözüm süresi kısaltılmıştır.

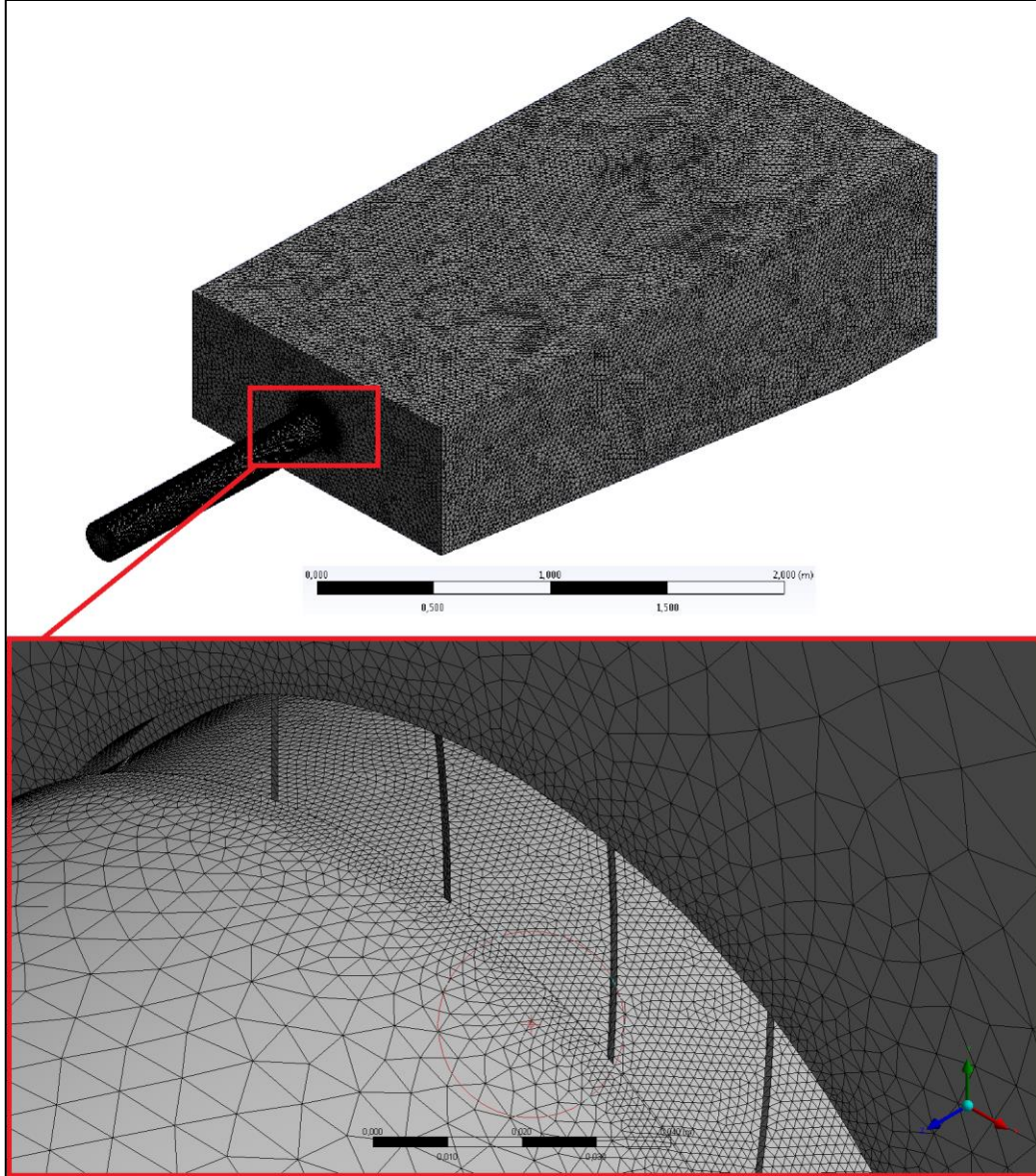


Şekil 5.6 Çözüm hacminin 6'da 1 periyodik modellenmesi

5.3 Ağ Yapısının Oluşturulması

Ağ yapısı oluşturulurken girdap üretici kanatçıkları civarında hücre boyutları ve kalitesi önem arz etmektedir. Yanma hacmi içerisinde oluşan geri dönüş bölgesi kanatçıklardaki sınır tabaka kalınlığından birinci derecede etkilenmektedir [26]. Bu bağlamda hücre yoğunluğu kanatçıklar civarında diğer kısımlara nisbeten oldukça yüksektir (Şekil 5.7). Buna karşın yanma hacmi cidarlarındaki sınır tabaka akışı ve geri

dönüş bölgesini çok etkilemediği için bu yüzeylerde kaba boyutlu hücreler oluşturulmuştur. Şayet enerji denklemi çözdürseydik ve bu sınırlardan ısı transferi olsaydı bu yüzeylerde ısıl sınır tabakadan dolayı hücre boyutları önem arz edecekti [7].



Şekil 5.7 Çözüm bölgesinde dörtyüzlü ağ örgüsü

Çözüm bölgesinin genelinde yapısal olmayan, tamamı dörtyüzlü (tetrahedral) hücreler kullanılmıştır. İnce kanatlarda ve keskin köşelerde ağ yapısı oluşturmanın güçlüklerinden ötürü dörtyüzlü hücre yapıları seçilmiştir. Hücre boyutları değişken girdap üreteçlerinde aynı kalmaktadır. Ancak deney simülasyonunda toplamda 5.600.000 hücre ağ yapısından bağımsız şekilde oluşturulmuştur. Toplam hücre adedinin yaklaşık yarısı girdap üretici civarında oluşturulmuştur. Gerek girdap üretici

civarında, gerekse çözüm hacminde toplamda 1.000.000 adet hücrenin kullanıldığı çalışmaya göre [7] oldukça fazla sayıda hücre kullanılmış olduğu için ağ yapısının bağımsızlığı için farklı hücre sayılarında analizler yapılmamıştır. Periyodik analizlerde bu hücre sayısı doğal olarak 900.000 civarına inmektedir. Farklı girdap üreteçlerinde farklı izdüşüme sahip yüzeylere aynı hücresel boyutların uygulanmasıyla hücre sayıları 870.000 - 950.000 arasında değişkenlik göstermiştir (Şekil 5.7). Hücre kalitesi değerleri çarpıklık (skewness) miktarı hiçbir analizde 0.8'in üzerinde olmayacak şekilde sağlanmıştır. Ağ yapısı ANSYS Programı ağ yapısı oluşturma modülü ile gerçekleştirilmiştir.

5.4 Ayrıklaştırma

Sayısal çözüm için sonlu hacimler yöntemini kullanan FLUENT 15.0 programı tercih edilmiştir. Taşınım denklemlerinin cebirsel olarak çözülebilir ifadelerle dönüştürülmesi için ayrıklaştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Süreklilik ve momentum denklemleri sırasıyla çözülmektedir ve süreklilik denklemi basınç çözümü için kullanılmaktadır. Ancak burada basınç terimi yer almamaktadır. Ayrıca momentum denklemi adveksiyon terimleri doğrusal olmayan büyüklükler içerdiği için başlangıçta hız ve basınç değerleri atanarak her iterasyonda enterpolasyonla yeni değerler türetilir. Süreklilik denkleminde bazı değişiklikler yapılarak gerçekleştirilen bu basınç-hız eşleşmesi için SIMPLE algoritması olarak adlandırılmaktadır [43].

RSM modelinin yakınsamasının sorunlu olduğu daha önceden belirtilmişti. Bu bağlamda türbülans kinetik enerji ve türbülans yitim hızı değerleri birinci dereceden çözdürülürken momentum ve stres terimleri ikinci dereceden ayrıklaştırılmıştır. Basınç teriminin ayrıklaştırılmasında ise basıncın hücre merkezi yerine yüzeyinde hesaplandığı PRESTO yöntemi kullanılmıştır [44]. Tüm bunlara ek olarak rahatlatma faktörleri de yakınsamanın sağlanabilmesi için momentum ve türbülans viskozitesi için sırasıyla 0.5 ve 0.8'e düşürülmüştür.

5.5 Sınır Koşulları

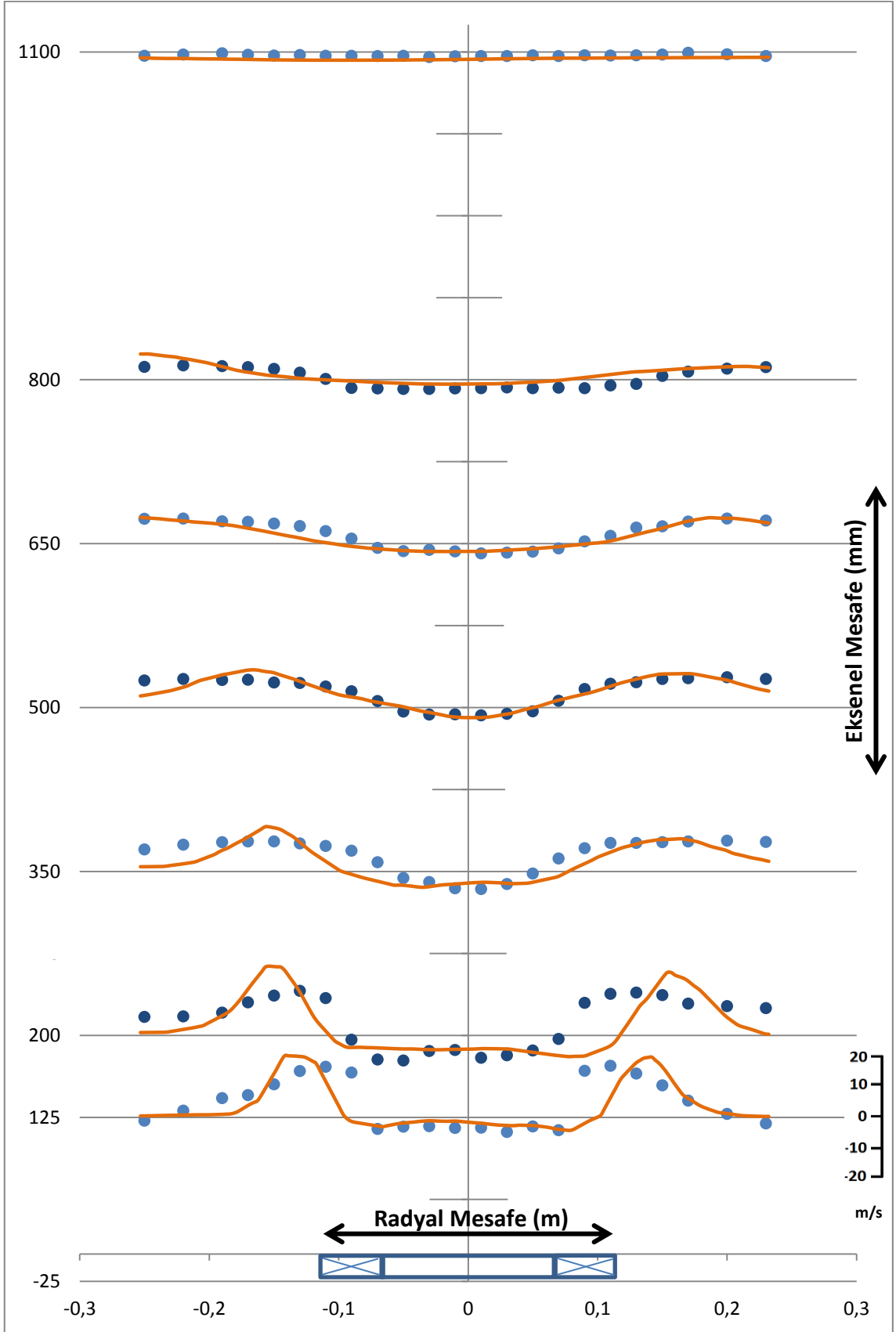
HAD analizi için program girdisine esas sınır koşulları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 HAD analizi sınır koşulları

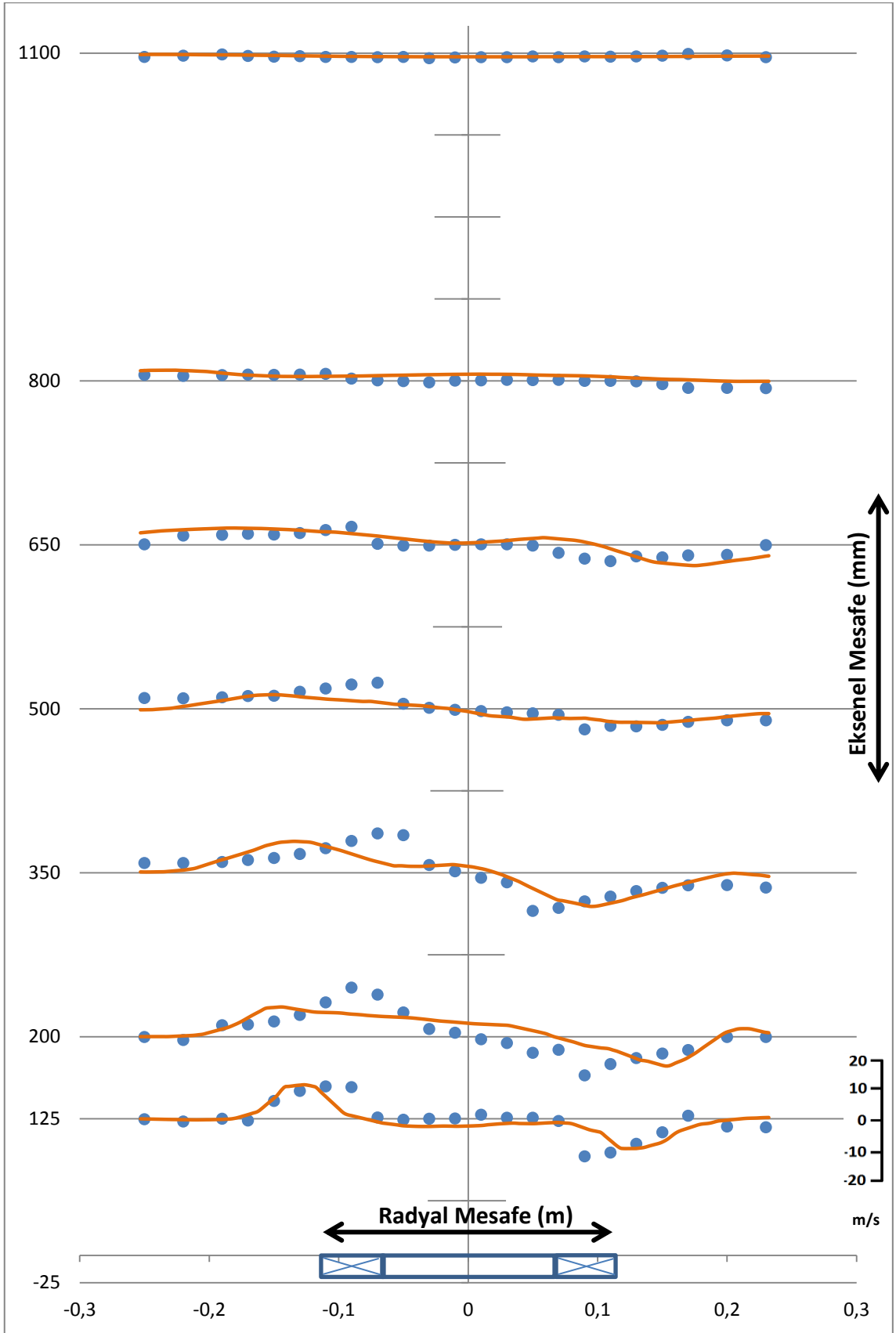
Koşul	Değer
Birincil Hava Girişi (kg/s) :	0.015, 0.020, 0.026, 0.033, 0.039, 0.044, 0.048 Kütlesel debi girişi / % 5 türbülans yoğunluğu
İkincil Hava Girişi (kg/s) :	0.100, 0.095, 0.088, 0.081, 0.075, 0.071, 0.066 Kütlesel debi girişi / % 5 türbülans yoğunluğu
Momentum Oranı:	0.03, 0.06, 0.12, 0.23, 0.38, 0.53, 0.71
Kanat Açısı (°) :	20.8, 26.0, 31.0, 35.5, 40.0, 49.0
Kanat Eğim Açısı (°) :	10.6, 21.0, 29.0, 39.4
Çıkış :	Dışarı akış (outflow) koşulu
Arayüzler :	Periyodik hücre eşleşmesi (match control)
Duvarlar :	Kaymama koşulu / Standart duvar fonksiyonları
Hava fiz. özellikleri ref. sic. :	15 ° C

Programda arayüzler tanımlanırken, eşleşmenin olduğu yüzeylerde aynı geometrik konuma denk gelen ağ hücrelerinin aynı geometrik şekilde olması önemlidir. Bunun için programın bir özelliği olan eşleşme kontrolünden faydalanılmıştır. Havanın özkütle ve viskozite gibi özellikleri de deney yapılan ortam sıcaklığı olan 15 °C referans hava sıcaklığında alınmıştır.

5.6 Doğrulama



Şekil 5.8 Eksenel hızlar için deney ve HAD sonuçları



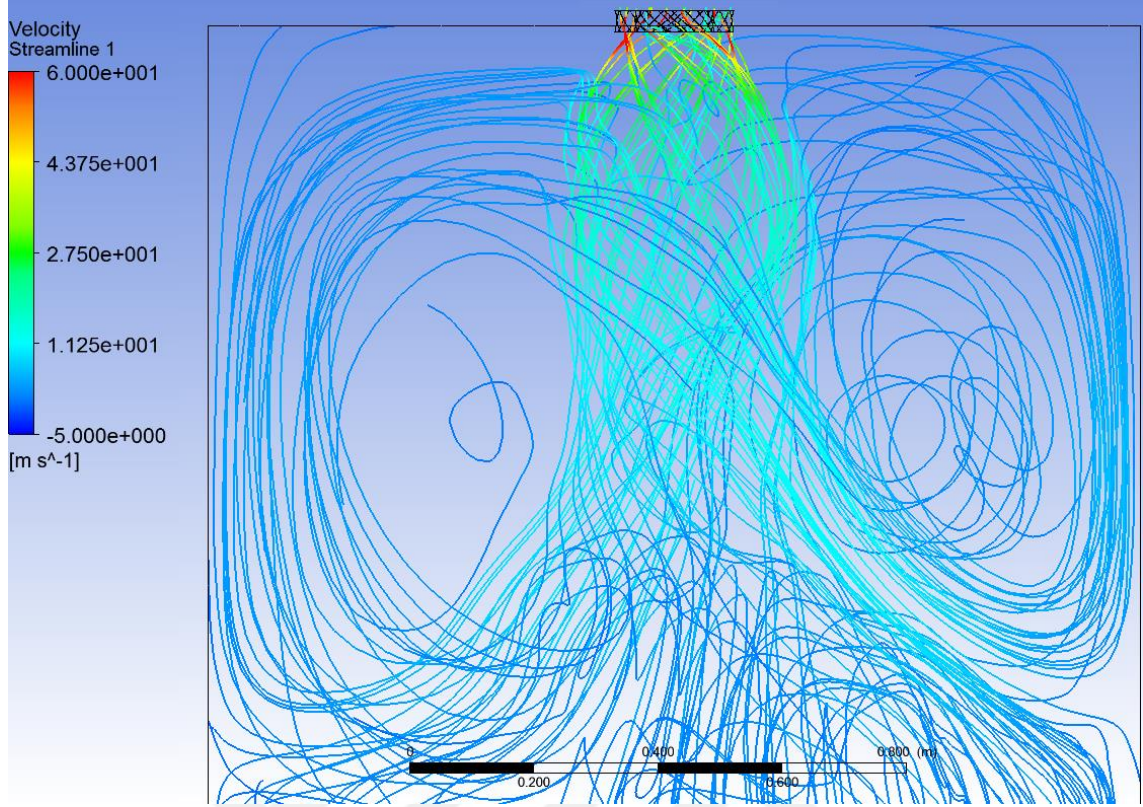
Şekil 5.9 Teğetsel hızlar için deney ve HAD sonuçları

Analiz sonuçları göstermiştir ki özellikle geri dönüş bölgesini tahmin etmede kullanılan araçlar oldukça etkili olup sayısal analiz ve deney sonuçlarının iyi bir şekilde örtüştüğü söylenebilir (Şekil 5.8). Buna rağmen sonuçlar arasında sapmalar da mevcuttur; Örneğin hız gradyanlarının yüksek olduğu geçiş kısımlarında sayısal analizlerde daha sert pik hız noktaları varken deneylerde bu bölgede daha yumuşak geçişler olmuştur. Bu bağlamda viskoz sönümlenme etkilerinin deneylerde daha gözle görünür olduğu söylenebilir. Bunun dışında akış merkezinden dışa açıldıkça akış hızında piklerin deneylerde HAD analizlerine göre daha erken başladığı gözlenmiştir. Aynı durum teğetsel hızlar için de geçerlidir. (Şekil 5.9). Bu tip sapmaların muhtemel sebepleri aşağıdaki gibidir;

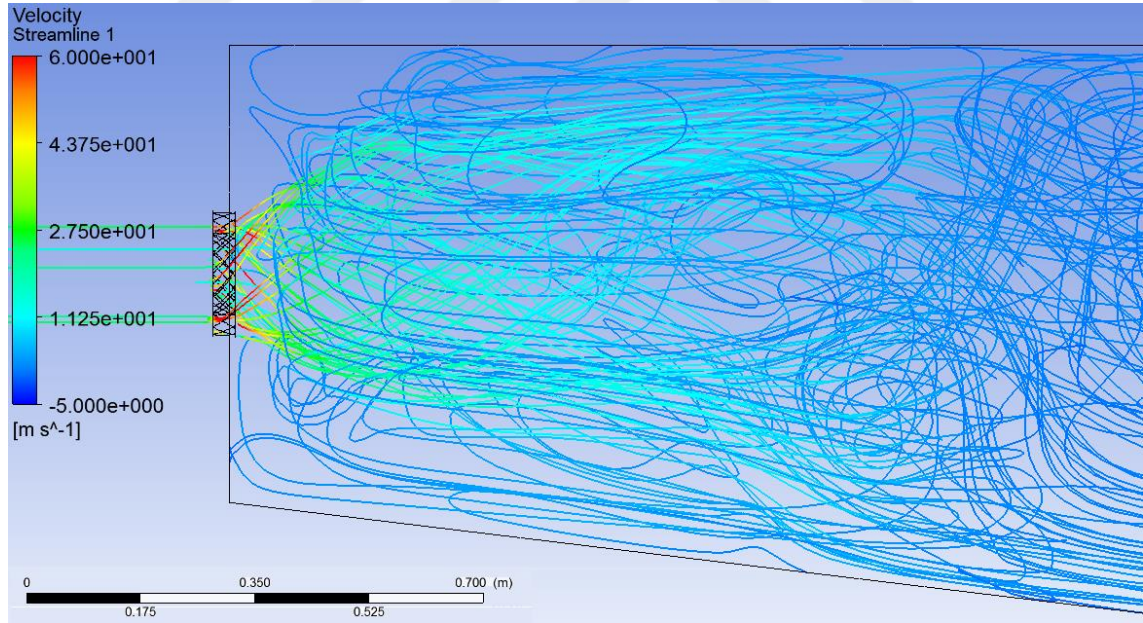
- Girdap üreticinin imalatı esnasında kanat ve kanat eğim açıları yeterince hassas ayarlanamamıştır. Örneğin, 45° çıkması gereken kanat açısı 42° ile 47° arasında rastgele değişkenlik göstermektedir. Pik noktalarının radyal mesafeleri kanat açlarına göre değiştiği için ölçüm ve HAD arasındaki uyumsuzluk bu şekilde açıklanabilir.
- Ayırıştırma sürecinde türbülans yitim hızı ve türbülans kinetik enerjisi birinci dereceden ayırıştırılmıştı. Bunun da çözümlerdeki hassasiyeti bir miktar düşürdüğü söylenebilir.

Deney ve HAD sonuçları arasında sapmalar olsa da bu sapmalar Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da görülebileceği üzere ihmal edilebilir seviyelerdedir.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de akım çizgileri görülmektedir. Buna göre yandan görünümde girdaplı akışın dik doğrultuda yatay doğrultuya göre bir miktar daha fazla yayıldığı söylenebilir. Merkezi geri dönüş bölgesi haricinde oluşan dış geri dönüş bölgesi yakıcı hacminin yatay kesitinde oluşmuş ancak dikey kesitte oluşmamıştır. Bu yüzden geri dönüş bölgesi baskılanmamıştır. Girdaplı akım çizgileri aynı zamanda geri dönüş bölgesi sınırında gerçekleşmektedir.



Şekil 5.10 Girdap üretici çıkışında oluşan 3 boyutlu akım çizgileri (üstten)



Şekil 5.11 Girdap üretici çıkışında oluşan 3 boyutlu akım çizgileri (yandan)

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

HAD analizleri deney sonuçlarıyla doğrulandıktan sonra araştırmaya konu olan farklı parametrelerin incelenmesi aşamasına geçilmiştir. Bu bağlamda 6'da 1'lik çözüm hacmi dilimi söz konusu çalışmada incelenmiş ve nihayet en iyi parametreler elde edilmiştir.

6.1 Bulgular

Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'te görüleceği üzere, geri dönüş bölgesi oluşumunda tüm parametrelerin etkisi kayda değerdir. Kanat açısı arttıkça geri dönüş bölgesinin varlığında bariz bir değişim olmaktadır. Kanat açısının artmasıyla önce geri dönüş bölgesi oluşmakta daha sonra bu bölge yanma hacminin çok büyük bir kısmını işgal edecek kadar büyümekte ve uzamaktadır. Bilhassa küçük kanat açısı değerlerinde kanat eğim açısı da geri dönüş bölgesi oluşumunda etkili olmaktadır. Kanat açısındaki gibi, kanat eğim açısının küçük değerlerinde de geri dönüş bölgesi oluşmamaktadır. Ayrıca momentum oranı yüksek olması Tip 0'a doğru yaklaştığından geri dönüş bölgesi oluşumu sadece yüksek kanat ve kanat eğim açılarında görülmektedir. Tip 1 geri dönüş bölgesi ise sadece kanat açısı ve momentum oranı yüksekse mümkün olabilir (PD = %100) Kanat açısı ve kanat eğim açısının ortalama değerlerinde tüm tipteki alevlerin birleşik etkileri bir diğer deyişle B tipi alev gözlenebilir. Çok düşük ve çok yüksek kanat açısı değerlerinde ise geri dönüş geometrisi mevcut ancak idealden uzaktır. 2 tipi geri dönüş bölgesi düşük momentum oranlarında ve yüksek kanat açılarında gözlenirken, 3 tipi geri dönüş ise yüksek kanat açıları hariç muhtelif açılarda olmaktadır.

35.5° kanat açısı için, birleşik etkiler yahut diğer bir deyişle B tipi alev 0.38 ve 0.53 momentum oranları arasında ve tüm kanat eğim açılarında gözlenebilir. Özellikle düşük kanat eğim açılarında hem 0.38 hem 0.53 değerleri için gözlenirken yüksek açılarda sadece 0.38 değerinde gerçekleşmektedir. 40° kanat açısında B tipi alev düşük kanat eğim açısında (10.6°) 0.38, 0.53 ve 0.72 momentum oranlarında gerçekleşirken yüksek kanat eğim açısında (39.4) sadece 0.23 momentum oranında oluşmuştur. 31.0° kanat açısında ise bu etkiler 0.38 ve 0.53 momentum oranları arasında ve yüksek kanat eğim açısında (39.4°) gözlenir.

Elde edilen yukarıdaki sonuçlara göre geri dönüş bölgesi için en ideal durum 31.0°, 35.5° ve 40.0° kanat açısı değerlerinde gerçekleşmektedir. Burada ideal açının 36° olduğu yorumunu yapabiliriz. B tipi alevlerin gözleendiği ideal momentum oranları ise ağırlıklı olarak 0.38 ve 0.53 momentum oranlarında gerçekleşmiştir. Bu değer 0.45 olarak alınabilir. Kanat eğim açılarına bakıldığında ise bir optimumdan ziyade kanat açısına bağlı bir aralık göze çarpmaktadır. B tipi alev 31.0° kanat açısı için sadece yüksek kanat eğim açısında oluşurken, 40.0°'de ise sadece düşük kanat eğim açısında oluşmuştur. 35.5° kanat açısında ağırlıklı olarak 10.6° ve 21.0° kanat eğim açılarında B tipi alevler oluşturmuştur. Burada şu yorumu yapmak uygun olacaktır; kanat açısı ve momentum oranı ideal olursa kanat eğim açısının önemi azalmaktadır. Ancak yine de 20° - 25° aralığında bu değerlerin seçimi kafidir. B tipi geri dönüş bölgelerinin ve birincil havanın nüfuz etmesinin kesit görünümleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'e göre sırasıyla;

(a): KA:31.0 KEA:39.4 MO:0.38, (b): KA:31.0 KEA: 39.4 MO: 0.53,

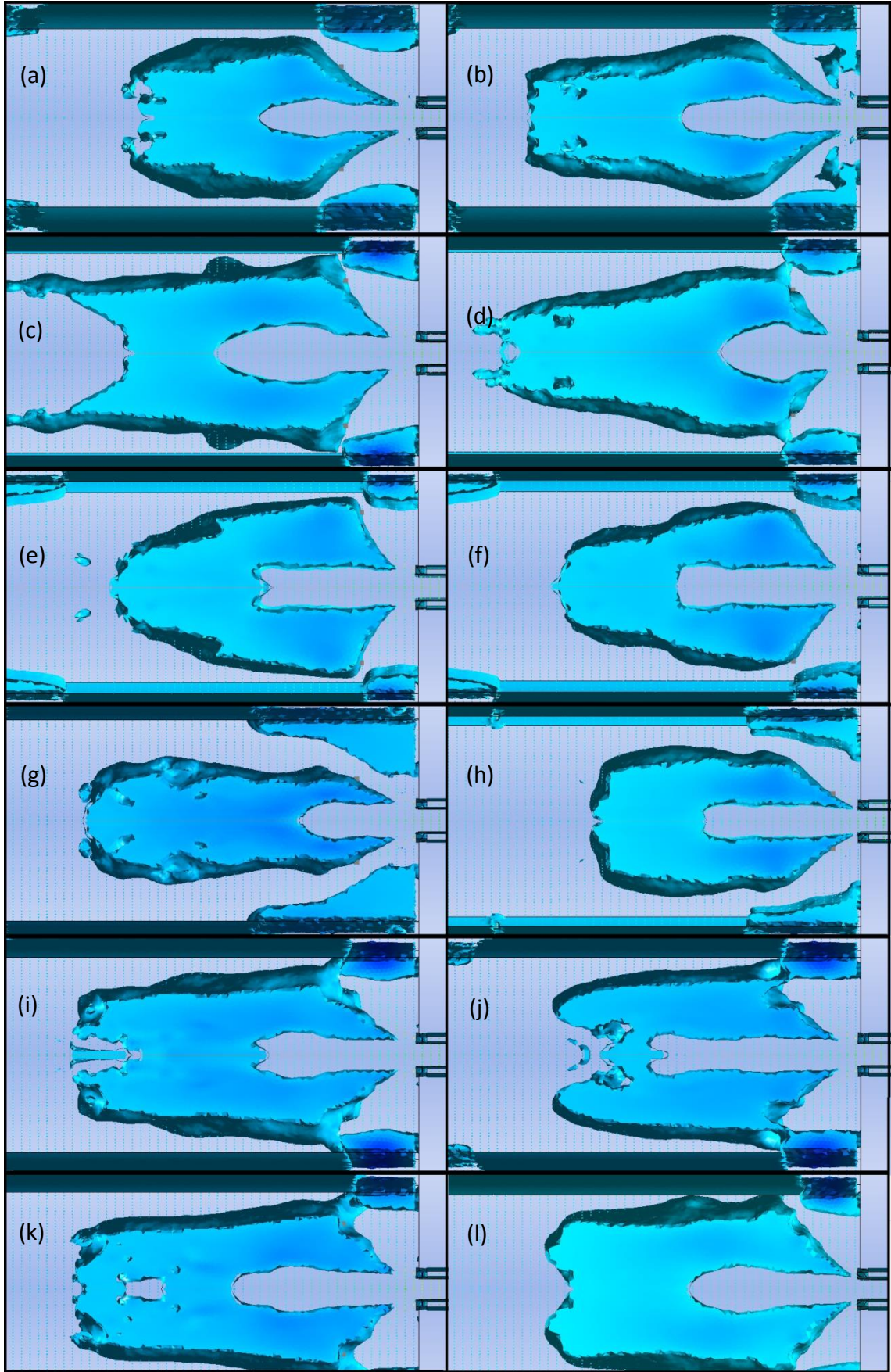
(c): KA: 35.5 KEA: 10.6 MO: 0.38, (d): KA: 35.5 KEA: 10.6 MO: 0.53,

(e): KA: 35.5 KEA: 21.0 MO: 0.38, (f): KA: 35.5 KEA: 21.0 MO: 0.53,

(g): KA: 35.5 KEA: 29.0 MO: 0.38, (h): KA: 35.5 KEA: 39.4 MO: 0.38,

(i): KA: 40.0 KEA: 10.6 MO: 0.38, (j): KA: 40.0 KEA: 10.6 MO: 0.53,

(k): KA: 40.0 KEA: 10.6 MO: 0.72, (l): KA: 40.0 KEA: 39.4 MO: 0.23 şeklindedir.



Şekil 6.1 B tipi geri dönüş bölgeleri ve birincil hava nüfuzu kesit görünümleri

Çizelge 6.1 Farklı koşullarda performans değerleri

	KA	KEA	MO	PD	M _{GD} /M	UZ	HM	S'	S' _{ort}	X _m	T
1	20.8	10.6	0.03	-	-	-	-	0.34	0.67	39%	0
2	20.8	10.6	0.06	-	-	-	-	0.25	0.63	39%	0
3	20.8	10.6	0.12	-	-	-	-	0.21	0.55	38%	0
4	20.8	10.6	0.23	-	-	-	-	0.14	0.57	40%	0
5	20.8	10.6	0.38	-	-	-	-	0.08	0.50	40%	0
6	20.8	10.6	0.53	-	-	-	-	0.07	0.45	40%	0
7	20.8	10.6	0.72	-	-	-	-	0.05	0.39	40%	0
8	20.8	21.0	0.03	-	-	-	-	0.43	0.80	41%	0
9	20.8	21.0	0.06	-	-	-	-	0.42	0.70	39%	0
10	20.8	21.0	0.12	-	-	-	-	0.35	0.66	39%	0
11	20.8	21.0	0.23	-	-	-	-	0.29	0.60	39%	0
12	20.8	21.0	0.38	-	-	-	-	0.23	0.51	40%	0
13	20.8	21.0	0.53	-	-	-	-	0.19	0.47	39%	0
14	20.8	21.0	0.72	-	-	-	-	0.16	0.41	39%	0
15	20.8	29.0	0.03	44%	50%	43%	70%	0.38	1.84	58%	3
16	20.8	29.0	0.06	66%	61%	30%	81%	0.40	1.25	51%	3
17	20.8	29.0	0.12	-	-	-	-	0.34	0.73	40%	0
18	20.8	29.0	0.23	-	-	-	-	0.33	0.69	40%	0
19	20.8	29.0	0.38	-	-	-	-	0.30	0.59	39%	0
20	20.8	29.0	0.53	-	-	-	-	0.26	0.52	39%	0
21	20.8	29.0	0.72	-	-	-	-	0.23	0.46	39%	0
22	20.8	39.4	0.03	17%	136%	72%	69%	0.45	1.84	58%	2-3
23	20.8	39.4	0.06	57%	108%	40%	75%	0.44	1.67	56%	3
24	20.8	39.4	0.12	66%	94%	28%	82%	0.42	1.21	54%	3
25	20.8	39.4	0.23	81%	105%	17%	90%	0.38	0.94	52%	3-0
26	20.8	39.4	0.38	-	-	-	-	0.34	0.65	40%	0
27	20.8	39.4	0.53	-	-	-	-	0.31	0.58	40%	0
28	20.8	39.4	0.72	-	-	-	-	0.28	0.52	39%	0
29	26.0	10.6	0.03	10%	193%	81%	65%	0.40	2.13	55%	2-3
30	26.0	10.6	0.06	14%	158%	72%	66%	0.34	1.97	58%	2-3
31	26.0	10.6	0.12	-	-	-	-	0.26	1.17	49%	0
32	26.0	10.6	0.23	-	-	-	-	0.17	0.87	41%	0
33	26.0	10.6	0.38	-	-	-	-	0.12	0.66	37%	0
34	26.0	10.6	0.53	-	-	-	-	0.09	0.60	37%	0
35	26.0	10.6	0.72	-	-	-	-	0.07	0.52	36%	0
36	26.0	21.0	0.03	12%	191%	68%	61%	0.54	2.42	60%	2-3
37	26.0	21.0	0.06	12%	203%	73%	64%	0.50	2.22	60%	2-3
38	26.0	21.0	0.12	17%	177%	69%	65%	0.49	1.89	57%	3-0
39	26.0	21.0	0.23	24%	160%	68%	63%	0.47	2.26	60%	3-0
40	26.0	21.0	0.38	-	-	-	-	0.29	0.78	41%	0
41	26.0	21.0	0.53	-	-	-	-	0.21	0.64	39%	0
42	26.0	21.0	0.72	-	-	-	-	0.19	0.57	39%	0
43	26.0	29.0	0.03	10%	202%	71%	59%	0.57	2.66	61%	2-3
44	26.0	29.0	0.06	13%	178%	74%	60%	0.56	2.23	58%	2-3
45	26.0	29.0	0.12	17%	190%	72%	62%	0.52	2.15	59%	3
46	26.0	29.0	0.23	25%	160%	64%	67%	0.45	1.64	55%	3-0
47	26.0	29.0	0.38	-	-	-	-	0.38	0.79	41%	0
48	26.0	29.0	0.53	-	-	-	-	0.34	0.71	40%	0
49	26.0	29.0	0.72	-	-	-	-	0.26	0.61	39%	0
50	26.0	39.4	0.03	9%	190%	70%	58%	0.58	2.72	61%	2-3
51	26.0	39.4	0.06	11%	162%	71%	60%	0.56	2.41	59%	2-3
52	26.0	39.4	0.12	15%	133%	69%	65%	0.54	2.16	58%	3-0
53	26.0	39.4	0.23	28%	162%	61%	63%	0.50	1.88	58%	3-0
54	26.0	39.4	0.38	-	-	-	-	0.46	0.95	40%	0
55	26.0	39.4	0.53	-	-	-	-	0.42	0.81	36%	0
56	26.0	39.4	0.72	-	-	-	-	0.37	0.68	36%	0

Çizelge 6.2 Farklı koşullarda performans değerleri (devamı)

	KA	KEA	MO	PD	M _{GD} /M	UZ	HM	S'	S' _{ort}	X _m	T
57	31.0	10.6	0.03	8%	172%	66%	53%	0.50	3.23	57%	2
58	31.0	10.6	0.06	10%	282%	70%	57%	0.42	2.99	58%	2
59	31.0	10.6	0.12	12%	250%	66%	56%	0.32	2.67	58%	2-3
60	31.0	10.6	0.23	17%	250%	67%	62%	0.22	2.43	57%	3
61	31.0	10.6	0.38	38%	153%	27%	45%	0.15	1.90	55%	3-0
62	31.0	10.6	0.53	-	-	-	-	0.11	0.84	37%	0
63	31.0	10.6	0.72	-	-	-	-	0.09	0.71	37%	0
64	31.0	21.0	0.03	8%	165%	66%	52%	0.69	3.15	58%	2
65	31.0	21.0	0.06	10%	153%	70%	54%	0.64	2.81	57%	2
66	31.0	21.0	0.12	11%	227%	64%	52%	0.54	3.06	58%	2-3
67	31.0	21.0	0.23	19%	155%	62%	55%	0.44	2.54	57%	3
68	31.0	21.0	0.38	22%	228%	64%	42%	0.35	3.77	55%	3-B
69	31.0	21.0	0.53	-	-	-	-	0.29	1.36	48%	0
70	31.0	21.0	0.72	-	-	-	-	0.24	0.74	34%	0
71	31.0	29.0	0.03	6%	160%	62%	49%	0.68	3.81	60%	2
72	31.0	29.0	0.06	8%	195%	64%	51%	0.67	3.27	59%	2-3
73	31.0	29.0	0.12	11%	19%	58%	38%	0.63	3.17	57%	3
74	31.0	29.0	0.23	14%	147%	64%	53%	0.53	3.15	56%	3
75	31.0	29.0	0.38	21%	288%	52%	39%	0.45	3.15	53%	3-B
76	31.0	29.0	0.53	100%	14%	31%	61%	0.42	2.84	59%	3-0
77	31.0	29.0	0.72	-	-	-	-	0.34	0.82	34%	0
78	31.0	39.4	0.03	8%	159%	58%	48%	0.73	3.88	57%	2
79	31.0	39.4	0.06	9%	177%	61%	49%	0.71	3.73	58%	2
80	31.0	39.4	0.12	11%	143%	63%	52%	0.68	3.29	56%	2-3
81	31.0	39.4	0.23	16%	175%	63%	53%	0.63	3.06	57%	3
82	31.0	39.4	0.38	36%	403%	59%	39%	0.57	3.75	56%	B
83	31.0	39.4	0.53	40%	373%	67%	41%	0.52	3.57	56%	B
84	31.0	39.4	0.72	100%	38%	37%	63%	0.47	2.90	55%	3-0
85	35.5	10.6	0.03	8%	283%	64%	44%	0.58	5.35	62%	2
86	35.5	10.6	0.06	8%	249%	60%	44%	0.53	4.65	60%	2
87	35.5	10.6	0.12	16%	253%	62%	45%	0.44	4.13	57%	2-3
88	35.5	10.6	0.23	12%	490%	76%	41%	0.33	4.25	57%	2-3
89	35.5	10.6	0.38	45%	485%	73%	43%	0.23	3.58	56%	B
90	35.5	10.6	0.53	32%	448%	75%	41%	0.16	3.65	57%	B
91	35.5	10.6	0.72	-	-	-	-	0.13	1.15	42%	3-0
92	35.5	21.0	0.03	7%	290%	59%	44%	0.78	4.65	59%	2
93	35.5	21.0	0.06	8%	307%	59%	43%	0.71	4.68	59%	2
94	35.5	21.0	0.12	10%	257%	60%	45%	0.60	3.96	58%	2-3
95	35.5	21.0	0.23	11%	453%	73%	41%	0.46	4.05	53%	2-3
96	35.5	21.0	0.38	38%	460%	60%	34%	0.35	4.13	51%	B
97	35.5	21.0	0.53	43%	369%	61%	35%	0.30	4.08	53%	B
98	35.5	21.0	0.72	-	-	-	-	0.26	1.89	54%	3-0
99	35.5	29.0	0.03	7%	217%	63%	45%	0.78	4.23	58%	2
100	35.5	29.0	0.06	8%	223%	63%	45%	0.85	4.05	58%	2
101	35.5	29.0	0.12	9%	204%	64%	48%	0.70	3.66	58%	2-3
102	35.5	29.0	0.23	11%	187%	69%	50%	0.64	3.32	56%	2-3
103	35.5	29.0	0.38	27%	227%	67%	44%	0.50	3.59	54%	B
104	35.5	29.0	0.53	100%	298%	53%	36%	0.45	3.23	54%	1
105	35.5	29.0	0.72	100%	223%	67%	54%	0.41	2.69	54%	1
106	35.5	39.4	0.03	7%	369%	60%	39%	0.87	5.29	59%	2
107	35.5	39.4	0.06	8%	343%	59%	40%	0.84	5.27	60%	2
108	35.5	39.4	0.12	10%	218%	64%	44%	0.81	4.51	55%	2-3
109	35.5	39.4	0.23	14%	235%	68%	46%	0.74	3.94	55%	2-3
110	35.5	39.4	0.38	35%	345%	56%	35%	0.66	4.59	56%	B
111	35.5	39.4	0.53	100%	302%	58%	36%	0.60	2.56	49%	1
112	35.5	39.4	0.72	100%	197%	55%	41%	0.54	2.97	53%	1

Çizelge 6.3 Farklı koşullarda performans değerleri (devamı)

	KA	KEA	MO	PD	M _{GD} /M	UZ	HM	S'	S' _{ort}	X _m	T
113	40.0	10.6	0.03	7%	1183%	79%	37%	0.70	5.22	54%	2
114	40.0	10.6	0.06	8%	643%	76%	40%	0.66	4.97	55%	2
115	40.0	10.6	0.12	8%	965%	75%	36%	0.57	4.96	53%	2
116	40.0	10.6	0.23	10%	632%	65%	36%	0.44	4.17	51%	2
117	40.0	10.6	0.38	38%	448%	69%	43%	0.33	3.63	56%	B
118	40.0	10.6	0.53	47%	357%	59%	39%	0.28	3.98	57%	B
119	40.0	10.6	0.72	42%	366%	68%	42%	0.23	3.55	57%	B
120	40.0	21.0	0.03	8%	699%	61%	34%	0.84	5.20	52%	2
121	40.0	21.0	0.06	9%	701%	64%	34%	0.77	5.25	53%	2
122	40.0	21.0	0.12	9%	557%	71%	40%	0.65	4.35	53%	2
123	40.0	21.0	0.23	11%	448%	69%	40%	0.51	4.16	56%	2
124	40.0	21.0	0.38	100%	292%	60%	37%	0.39	3.78	55%	1
125	40.0	21.0	0.53	100%	243%	58%	37%	0.32	3.33	54%	1
126	40.0	21.0	0.72	100%	305%	63%	36%	0.25	2.40	47%	1
127	40.0	29.0	0.03	6%	569%	59%	31%	0.91	6.33	54%	2
128	40.0	29.0	0.06	7%	424%	62%	35%	0.88	5.36	54%	2
129	40.0	29.0	0.12	8%	415%	61%	34%	0.80	5.27	53%	2
130	40.0	29.0	0.23	11%	463%	77%	44%	0.69	4.44	56%	2-1
131	40.0	29.0	0.38	100%	520%	63%	37%	0.58	4.09	53%	1
132	40.0	29.0	0.53	100%	380%	60%	36%	0.49	2.99	51%	1
133	40.0	29.0	0.72	100%	495%	59%	35%	0.42	2.35	46%	1
134	40.0	39.4	0.03	7%	927%	62%	34%	1.01	5.97	54%	2
135	40.0	39.4	0.06	7%	797%	67%	39%	0.98	4.88	55%	2
136	40.0	39.4	0.12	8%	679%	69%	40%	0.94	4.73	54%	2
137	40.0	39.4	0.23	38%	752%	65%	38%	0.86	5.09	57%	B
138	40.0	39.4	0.38	100%	911%	59%	34%	0.77	4.37	57%	1
139	40.0	39.4	0.53	100%	580%	62%	35%	0.70	3.14	51%	1
140	40.0	39.4	0.72	100%	298%	66%	42%	0.63	3.40	54%	1
141	49.0	10.6	0.03	6%	663%	69%	38%	1.00	6.02	60%	2
142	49.0	10.6	0.06	7%	562%	66%	38%	0.98	5.34	59%	2
143	49.0	10.6	0.12	7%	631%	65%	38%	0.96	5.14	56%	2
144	49.0	10.6	0.23	8%	775%	60%	37%	0.82	4.91	55%	2
145	49.0	10.6	0.38	100%	594%	59%	35%	0.71	4.84	54%	1
146	49.0	10.6	0.53	100%	368%	56%	34%	0.59	4.27	55%	1
147	49.0	10.6	0.72	100%	389%	58%	35%	0.56	3.78	50%	1
148	49.0	21.0	0.03	6%	696%	73%	39%	1.18	4.85	60%	2
149	49.0	21.0	0.06	6%	583%	68%	39%	1.11	4.83	60%	2
150	49.0	21.0	0.12	8%	550%	63%	38%	0.98	4.81	59%	2
151	49.0	21.0	0.23	10%	543%	63%	38%	0.84	5.29	56%	2-1
152	49.0	21.0	0.38	100%	446%	58%	35%	0.69	4.51	52%	1
153	49.0	21.0	0.53	100%	465%	58%	34%	0.58	3.95	51%	1
154	49.0	21.0	0.72	100%	427%	62%	34%	0.47	2.71	42%	1
155	49.0	29.0	0.03	6%	483%	72%	37%	1.25	6.03	58%	2
156	49.0	29.0	0.06	6%	430%	73%	37%	1.19	5.80	58%	2
157	49.0	29.0	0.12	8%	398%	71%	37%	1.08	5.46	57%	2
158	49.0	29.0	0.23	100%	342%	59%	34%	0.91	5.04	54%	1
159	49.0	29.0	0.38	100%	303%	59%	34%	0.74	4.05	51%	1
160	49.0	29.0	0.53	100%	295%	62%	35%	0.63	3.23	49%	1
161	49.0	29.0	0.72	100%	289%	65%	34%	0.52	2.45	44%	1
162	49.0	39.4	0.03	7%	616%	70%	37%	1.34	5.19	56%	2
163	49.0	39.4	0.06	7%	525%	70%	38%	1.28	5.21	57%	2
164	49.0	39.4	0.12	8%	469%	69%	39%	1.16	5.30	58%	2
165	49.0	39.4	0.23	100%	577%	61%	34%	1.08	4.90	53%	1
166	49.0	39.4	0.38	100%	513%	58%	33%	0.97	3.99	52%	1
167	49.0	39.4	0.53	100%	583%	63%	35%	0.88	3.21	47%	1
168	49.0	39.4	0.72	100%	470%	56%	33%	0.77	4.40	54%	1

6.2 Bulguların Yorumlanması

Çizelge 6.4, Çizelge 6.5, Çizelge 6.6'dan görülebileceği üzere her üç tasarım parametresinin değişken durumlarındaki performans değerleri ciddi manada etkilenmektedir. Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de ise tasarım parametreleri ile performans kriterleri arasındaki ilişki görülmektedir.

Çizelge 6.4 Farklı momentum oranlarına karşılık gelen performans kriterleri

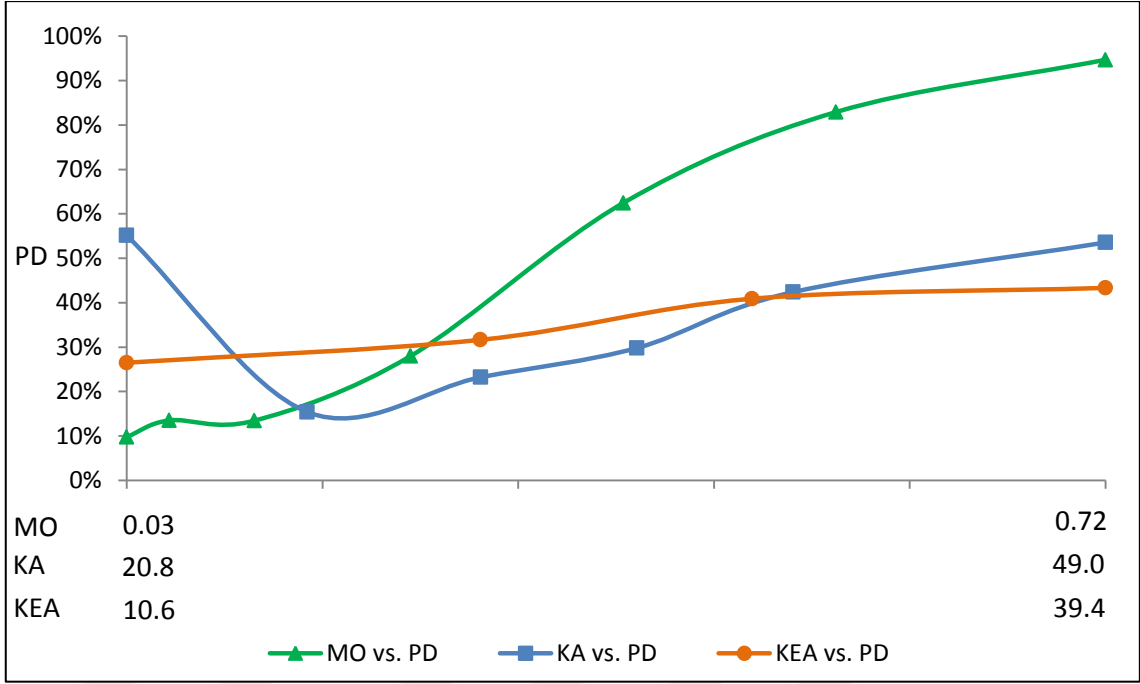
MO	PD	M_{GD}/M_O	UZ	HM	S'	S'_{ort}	X_m
0.03	10%	3.91	66%	47%	0.73	3.90	59%
0.06	14%	3.39	64%	49%	0.70	3.59	58%
0.12	13%	3.41	64%	48%	0.63	3.29	56%
0.23	28%	3.60	64%	49%	0.54	3.09	55%
0.38	62%	4.13	59%	38%	0.44	2.80	51%
0.53	83%	3.62	59%	38%	0.38	2.29	50%
0.72	95%	3.18	60%	41%	0.33	1.79	46%

Çizelge 6.5 Farklı kanat eğim açlarına karşılık gelen performans kriterleri

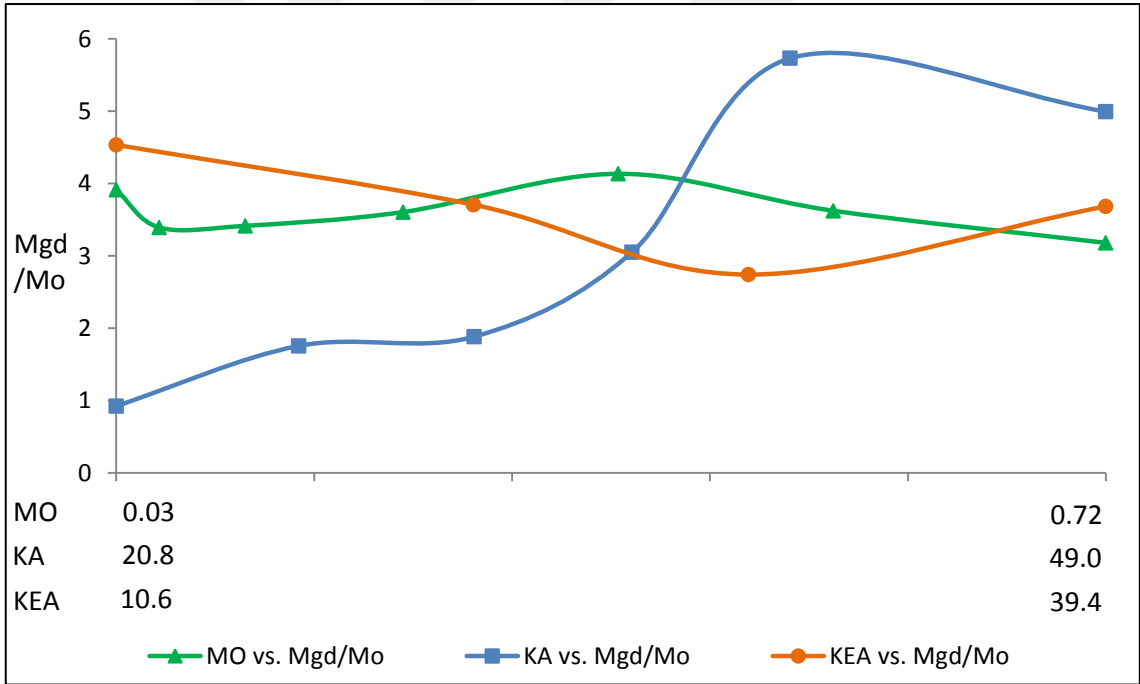
MO	PD	M_{GD}/M_O	UZ	HM	S'	S'_{ort}	X_m
10.6	26%	4.53	66%	44%	0.37	2.81	50%
21	32%	3.71	64%	44%	0.50	2.84	60%
29	41%	2.74	62%	46%	0.58	2.97	52%
39.4	43%	3.68	60%	47%	0.69	3.24	53%

Çizelge 6.6 Farklı kanat açlarına karşılık gelen performans kriterleri

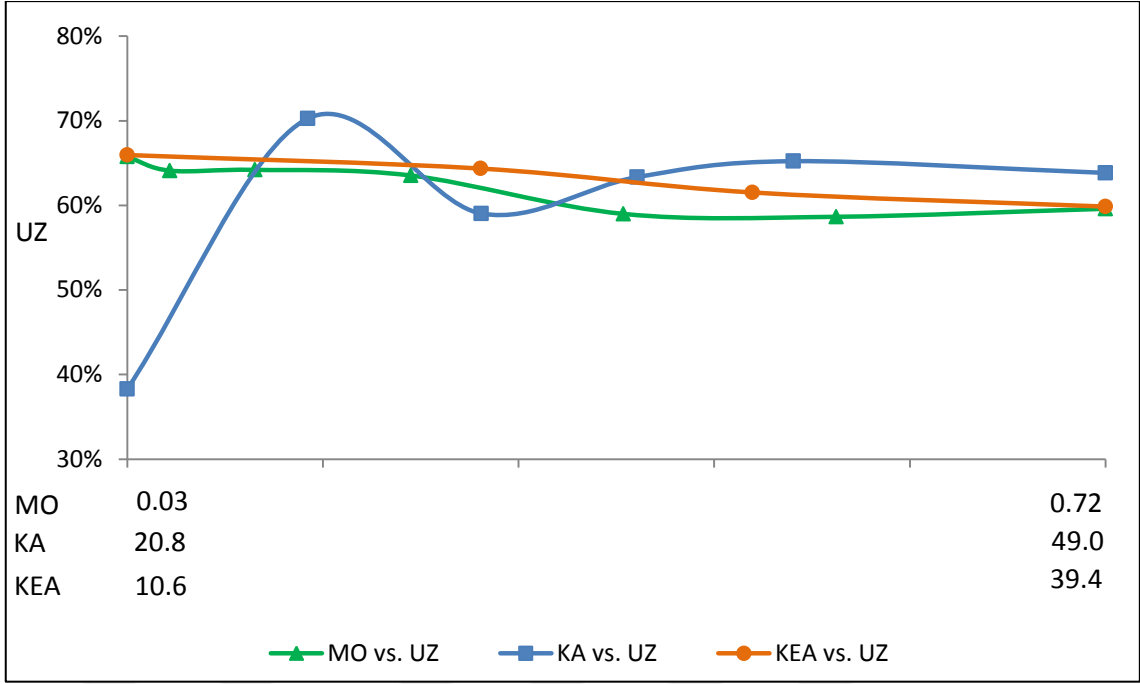
MO	PD	M_{GD}/M_O	UZ	HM	S'	S'_{ort}	X_m
20.8	55%	0.92	38%	78%	0.30	0.78	43%
26	15%	1.75	70%	63%	0.38	1.47	49%
31	23%	1.88	59%	51%	0.47	2.74	54%
35.5	30%	3.05	63%	42%	0.54	3.86	56%
40	42%	5.73	65%	37%	0.63	4.33	54%
49	54%	4.99	64%	36%	0.90	4.62	54%



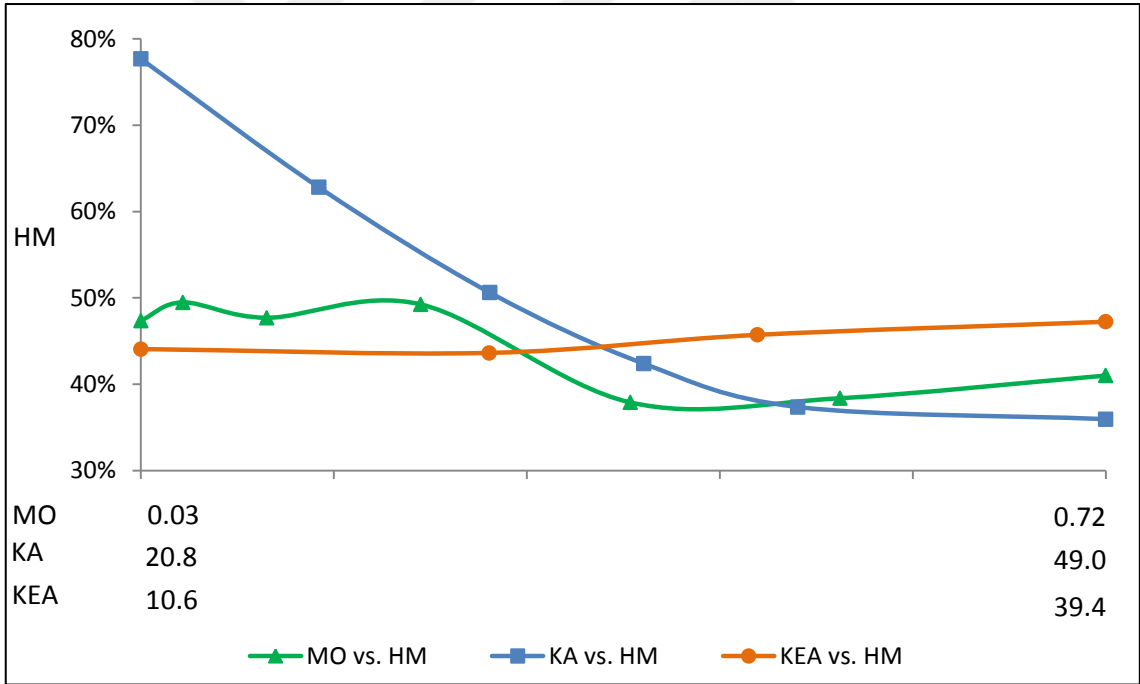
Şekil 6.2 Parçacık penetrasyon derinliğinin performans kriterleriyle değişimi



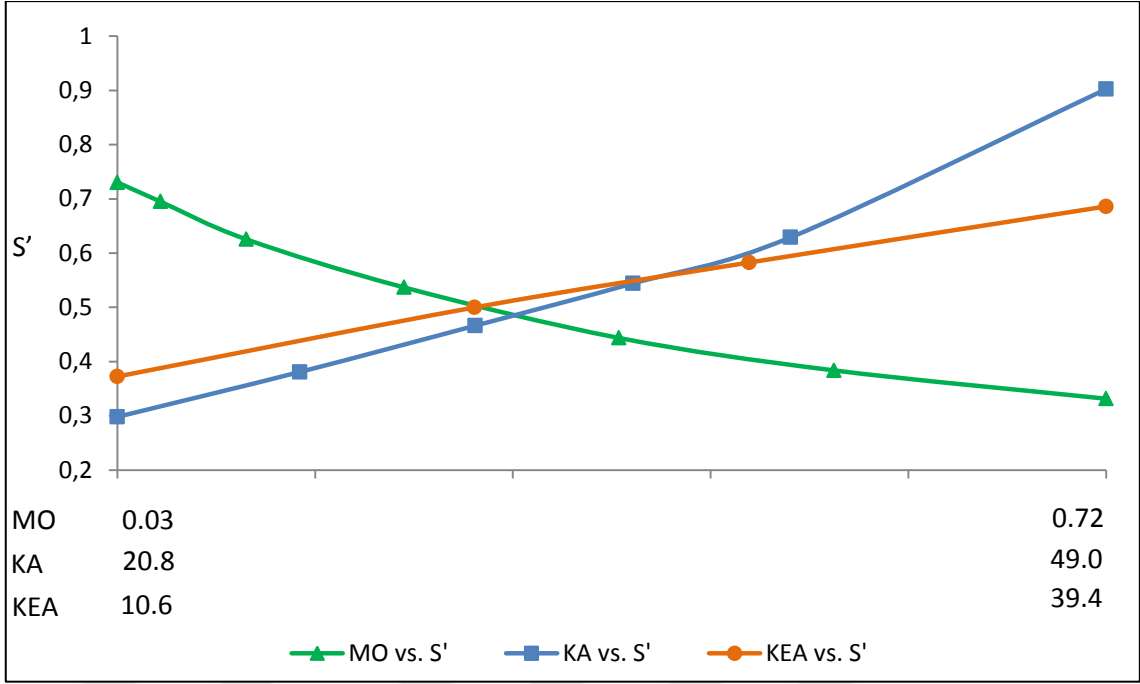
Şekil 6.3 Toplam resirküle olan havanın performans kriterleriyle değişimi



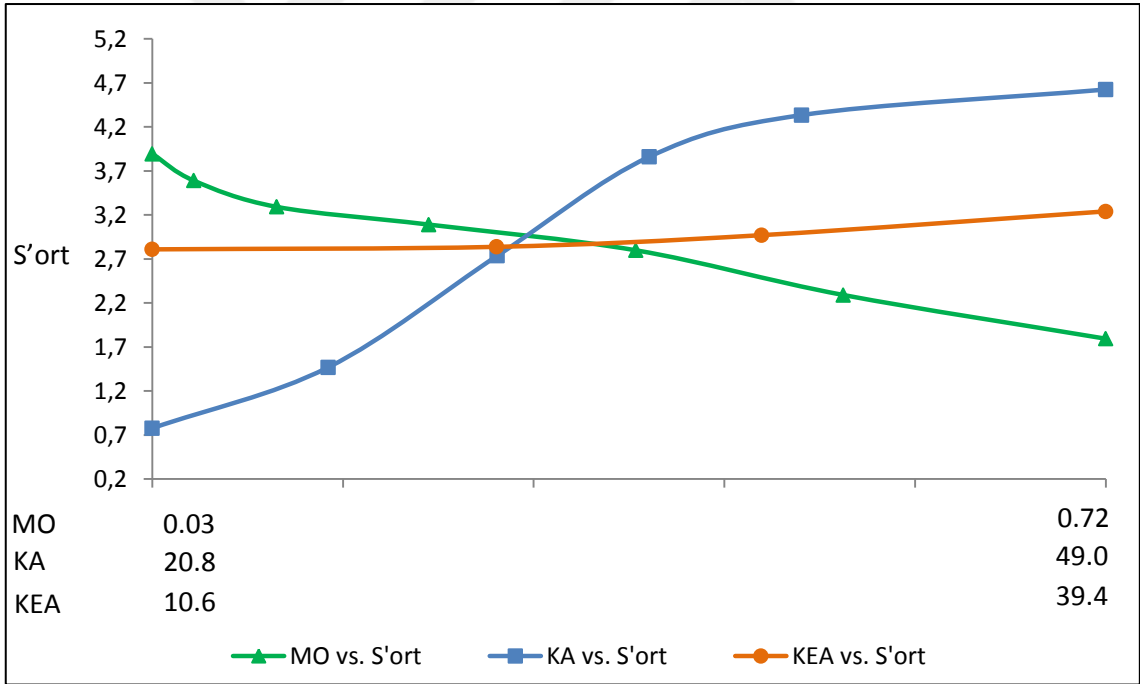
Şekil 6.4 Geri dönüş bölgesi uzunluğunun performans kriterleriyle değişimi



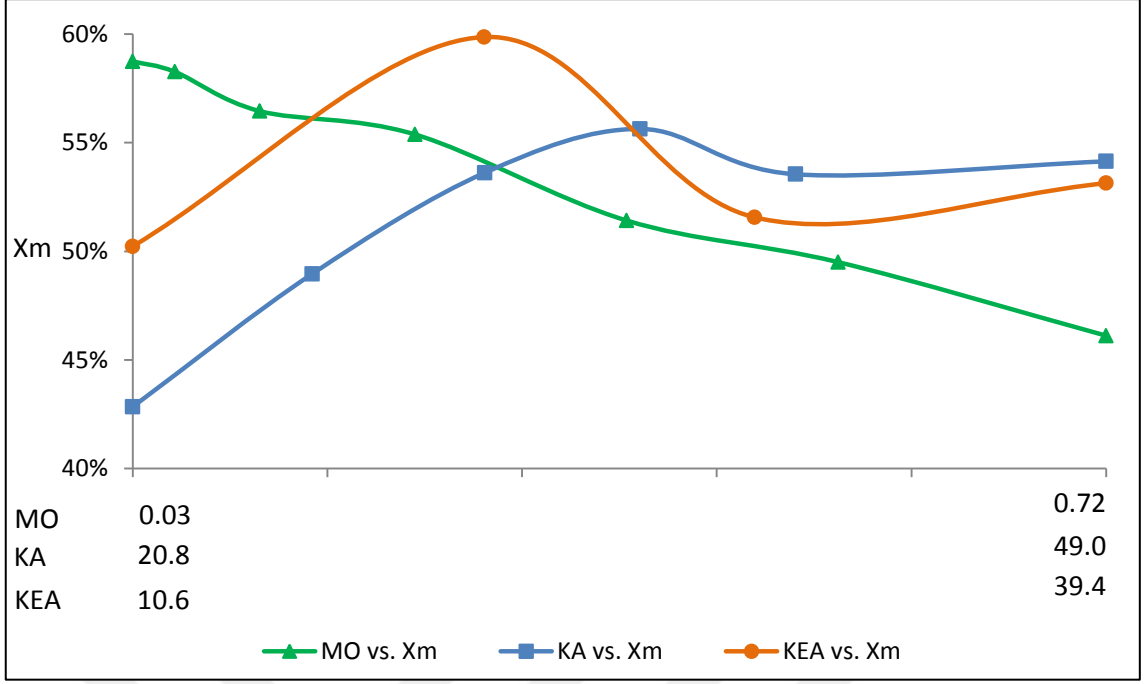
Şekil 6.5 Hacim merkezi konumunun performans kriterleriyle değişimi



Şekil 6.6 Düzeltilmiş girdap sayısının performans kriterleriyle değişimi



Şekil 6.7 Ortalama girdap sayısının performans kriterleriyle değişimi



Şekil 6.8 Girdap sayısı nüfuz etme katsayısının performans kriterleriyle değişimi

Elde edilen bulgulara göre şu çıkarımlar yapılabilir;

- Parçacık yahut birincil hava penetrasyon derinliği momentum oranından bir hayli etkilenmektedir. Momentum oranı arttıkça PD katsayısı da yükselmektedir. Düşük momentum oranlarında % 10 olan penetrasyon katsayısı daha sonra % 90 gibi değerlere çıkmaktadır. Bu artan momentumla birlikte parçacık penetrasyon etkisinin arttığını göstermektedir. Bunun yanında kanat açısı arttıkça PD değeri önce keskin bir düşüşe uğramakta, sonra yavaşça lineer bir şekilde yükselmektedir. Son olarak kanat eğim açısı arttıkça da parçacık penetrasyonu yavaşça artmakla birlikte belirli bir açıdan sonra bu artış doyum eğiliminde olmaktadır.
- Toplam resirküle olan hava miktarındaki en etkin parametre ise kanat açısıdır. Resirküle olan hava miktarı artan kanat açısıyla başta yavaşça yükselirken daha sonra sert şekilde yükselmekte ve büyük kanat açılarında doyuma ulaşarak fazlaca değişmemektedir. Kanat eğim açısı ve momentum oranının M_{GD}/M_0 üzerinde ciddi bir etkisi bulunmamakla birlikte orta seviye momentum oranlarında geri dönüş havası maksimuma, yine orta seviye kanat eğim açısı değerleri için minimuma gitmektedir.

- Geri dönüş bölgesi uzunluğu momentum oranı ve kanat eğim açısıyla ters orantıya sahiptir. Artan momentum ve kanat eğim açısı UZ değerini az da olsa küçültmektedir. Ancak bu değişim keskin değildir. Kanat açısının uzunlukla kayda değer bir ilişkisi bulunmamaktadır. Bunların yanında düşük kanat açılarında geri dönüş uzunluğu bir miktar artsa da ilerleyen kanat açılarında bu katsayı çokca değişmemektedir.
- Geri dönüş bölgesi hacim merkezinin yakıcı ağzına olan uzaklığı bu bölgenin yakıcı çıkışına yakınlığını temsil eder. Bu kriterdeki en etkin parametre kanat açısı olmuştur. Bu değer yükseldikçe HM değeri düşerek yakıcıya yaklaşmaktadır ancak büyük açılarda bu değişim durmaktadır. Kanat eğim açısının ise bu kriter üzerindeki etkisi çok çok küçük olup artan açıyla birlikte yükselmektedir. Momentum oranlarına bakıldığında ise ciddi bir etkinin olmadığı söylenebilir de HM değerinin artan momentumla önce görece yüksek, sonra daha düşük değerler aldığı ve sabite yakın seyrettiği belirtilmelidir.
- Düzeltilmiş girdap sayısı olan S' değerinde her üç parametreye de lineere yakın olacak şekilde bağımlılık söz konusudur. Momentumun azalmasıyla, kanat açısı ve kanat eğim açısının artmasıyla girdap sayısının lineer eğilimde değişiklik gösterdiği görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında S' değerlerinin orta ve yüksek girdap şiddeti aralıklarında olduğu görülebilir.
- Ortalama girdap sayısı S'_{ort} değeri artan momentum oranıyla birlikte lineer şekilde azalmakta ve artan kanat eğim açısıyla lineere yakın, hafif üstel şekilde yavaşça artmaktadır. Ancak artan kanat açısıyla önce artmakta, orta seviye kanat açılarından itibaren ise doyuma ulaşarak cüzi miktarda artmaktadır.
- Girdabın nüfuz etkisini simgeleyen X_m verimlilik katsayısı ise her üç parametreden de etkilenmektedir. Momentum oranlarına bakıldığında artan momentumla birlikte lineer bir azalmanın olduğu görülmektedir. Kanat açısının artmasıyla ise X_m değeri bir miktar yükselse de orta açılardan sonra fazlaca değişmemektedir. Kanat eğim açısı ise önce artıp sonra azalmış, daha sonra sabitlenmiştir. Yani X_m katsayısına rastgele bir bağımlılık söz konusudur.

6.3 İleri Çalışma Önerileri

- Ölçüm sürecine bakıldığında belirsizliklerin yüksek çıkmasının sebebinin basınç ölçümü kaynaklı belirsizlikler yerine ölçüm ekipmanı hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlikler olduğu görülmüştür. Bu ve buna benzer çalışmalarda belirsizliklerin azaltılabilmesi için hız mertebelerine uygun ölçüm cihazlarının kullanılması gerekmektedir.
- Ölçümlerde akım yönünü tayin etmede kullanılan iplikçik başlangıçta kalın seçilmiş, bu da akışın yönünü tayin etmede zorluklara yol açmıştır. .daha sonra ince bir iplikçik seçilmesiyle bu sorun ortadan klmıştır. İleriki çalışmalarda baştan ince ve ataleti düşük iplikçiklerin seçilmesinde fayda vardır.
- İzotermal koşullarda gerçekleştirilen çalışmalarda parçacık kalma süreleri sayısal olarak hesaplanmamış, sadece birincil havanın penetre olma derinliği üzerinden kalma süreleri hakkında yorum yapılmıştır. Hava akış analizlerinin üzerine parçacıklar gönderilerek kalma süreleri nicel hale getirilmelidir.
- İzotermal koşullarda yanma aerodinamiği davranışları hakkında fikir sahibi olabilsek de yanma koşulları simüle edilemediği için sıcak durumdaki etkiler göz ardı edilmiştir. Gerçekte yanma koşulları altında simülasyonlar gerçekleştirilmeli ve NO_x/SO_x oluşumu, alev sıcaklığı, kül oluşumu ve ısı transferi gibi çıktılarla yakıcı performansı değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Nag, P.K., (2008), "Power Plant Engineering", 3rd Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company, New Delhi
- [2] Raja, A.K., Srivastava, A.P. ve Dwivedi, M., (2006), "Power Plant Engineering", New Age International Publishers, New Delhi
- [3] Williams, A., Pourkashanian, M. ve Jones J.M., (2001), "Combustion of Pulverised Coal and Biomass", Progress in Energy and Combustion Science, 27:587–610.
- [4] Chaplin, R.A., (2009), "Thermal Power Plants", 1st Edition, Encyclopedia of Life Support Systems.
- [5] Basu, P., Kefa, C. ve Jestin, L., (2000), "Boilers and Burners Design and Theory", 1st Edition, Springer.
- [6] University of Maryland / The Combustion Laboratory, Underwater Propulsion, http://www.enme.umd.edu/combustion/underwater_propulsion.htm, 10 Haziran 2016
- [7] Raj, R.T.K. ve Ganesan, V., (2008), "Study on the Effect of Various Parameters on Flow Development Behind Vane Swirlers", International Journal of Thermal Sciences, 47:1204–1225
- [8] Raj, R.T.K. ve Ganesan, V., (2009), "Experimental Study of Recirculating Flows Induced by Vane Swirler", Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 16:14–22
- [9] Smart, J.P., Morgan, D.J. ve Roberts P.A., (1992), "The Effect of Scale on the Performance of Swirl Stabilised Pulverised Coal Burners", 24th Symposium (International) on Combustion, 1365–1372
- [10] Ma, H.K., Chiou, C.H. ve Harn, J.S., (1993), "Mixing and Recirculation Characteristics of A Double Concentric Burner with Bluff-Body", Journal of Thermal Science, 2:294-303

- [11] Shah, B.K., Dhakiya, A.K. ve Mohite, A.S., (2012), "Experimental Study on the Effect of Various Parameters of Recirculating Flows Induced by Vane Swirler", *International Journal of Educational Research and Technology*, 3:24-31
- [12] Gündüz O., (2015) "Pülverize Kömür Yakıcılarında Türbülötör Tasarımının Akış Hız Profiline Etkisinin Deneysel İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi
- [13] Khandelwal, B., Lili, D. ve Sethi, V., (2014), "Design and Study on Performance of Axial Swirler for Annular Combustor by Changing Different Design Parameters", *Journal of the Energy Institute*, 87:372-382
- [14] Watanabe, H., Kurose, R. ve Komori, S., (2009), "Large-Eddy Simulation of Swirling Flows in a Pulverized Coal Combustion Furnace with a Complex Burner", *Journal of Environment and Engineering*, 4:1-11
- [15] Meyyappan, M., Schwarz, M. P. ve Perry, J. H., (1997), "Modelling of Swirl Jet Flows", *International Conference on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation*, 177-188
- [16] Vondál, J. ve Hájek, J., (2012), "Swirling Flow Prediction in Model Combustor with Axial Guide Vane Swirler", *Chemical Engineering Transactions*, 29:1069-1074
- [17] Luo, R., Zhang, Y., Li, N., Zhou, Q. ve Sun, P., (2014), "Experimental Study on Flow and Combustion Characteristic of a Novel Swirling Burner Based on Dual Register Structure for Pulverized Coal Combustion", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54:136-150
- [18] Adewole, B., Abidakun, O. ve Asere, A., (2013), "Artificial Neural Network Prediction of Exhaust Emissions and Flame Temperature in LPG (Liquefied Petroleum Gas) Fueled Low Swirl Burner", *Energy*, 61:606-611
- [19] Zeng, L., Li, Z., Zhao, G., Shen, S. ve Zhang F., (2011), "Effect of the Vane Angle for Outer Secondary Air on the Flow and Combustion Characteristics and NO_x Emissions of the Low-NO_x Axial-Swirl Coal Burner", *Numerical Heat Transfer, Part A*, 59:43-57
- [20] Lebedev, A. B., Sekundov, A. N. ve Yakubovskii, K. Y., (2009), "The Effect of Recirculation Zone on the Magnitude of NO_x Emissions in a Low-Emission Combustion Chamber", *High Temperature*, 47:452-456
- [21] Gu, M., Zhang, M., Fan, W., Wang, L. ve Tian, F., (2005), "The effect of the mixing characters of primary and secondary air on NO_x formation in a swirling pulverized coal flame", *Fuel*, 84:2093-2101
- [22] van der Lans, R.P., Glarborg, P. ve Dam-Johansen, K., (1997), "Influence of Process Parameters on Nitrogen Oxide Formation in Pulverized Coal Burners", *Progressive Energy Combustion Science*, 23:349-377
- [23] Baxter, L.L., Mitchell, R.E., Fletcher, T.H. ve Hurt, R.H., (1995), "Nitrogen release during coal combustion", Sandia Report SAND958474 UC-1409

- [24] National Aeronautics and Space Administration (NASA), Combustion, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/combst1.html>, 03 Haziran 2016
- [25] M.E.T.T.S, Lignite: A New and Dedicated Approach, <http://www.metts.com.au/lignite-new-dedicated-approach.html>, 15 Haziran 2016
- [26] Beer, J. M. ve Chigier, N. A., (1983). "Combustion Aerodynamics", 2nd Edition, Robert E. Krieger Publishing Company
- [27] Politechnika Wroclawska, Nitrogen Oxides Formation in Combustion Processes, http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/combustion_en/NOx/NOx_formation.pdf, 16 Haziran 2016
- [28] Jin, P. ve West, T., (2005), "New Coal Burners and Low NOx Control Technologies", Advanced Combustion Technology, Dailan, China
- [29] Winterfield, G., (1965), "On Process of Turbulent Exchange Behind Flameholders", 10th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1265-1275
- [30] Bupalov, I. V., (1967), "Physical Principles of the Working Process in Combustion Chambers of Jet Engines by Raushenbakh et al., Translated from Russian, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, USA, AD 658 372, sayfa 366
- [31] Zukoski, E. E. ve Marble F. E., (1955), Combustion Researches and Reviews, sayfa 167
- [32] CoalTech, NOx Formation, <http://www.coaltech.com.au/NOxFormation.html#Topic15>, 15 Haziran 2016
- [33] Hesselmann, G. ve Rivas, M., (2001), "What are the Main NOx Formation Processes in Combustion Plant?", IFRF Online Combustion Handbook, ISSN 1607-9116
- [34] Zel'dovich, Y. B., Acra Phys.-Chim. URSS, 1946.21.577
- [35] Chen, S. L., Heap, M. P., Pershing, D. W. ve Martin, G. B., (1982), 19th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, sayfa 1271
- [36] Bose, A. C., Dannecker, K. M. ve Wendt, J. O. L., (1988), "Coal Composition Effects on Mechanisms Governing the Destruction of NO and Other Nitrogenous Species During Fuel-Rich Combustion", Energy Fuels, 2:301-308
- [37] Hupa M., IFRF, http://www.ffrc.fi/Liekkipaiva_2006/Liekkipaiva2006_IFRF_Today_HUPA.pdf, 18 Haziran 2016
- [38] United Sensor Corp., 3-Dimensional Probes, <http://www.unitedsensorcorp.com/>, 03 Nisan 2016

- [39] Integra 96, Ölçüm Belirsizliği Hesaplama, Rehberi, http://www.integra96.com/%C3%B6l%C3%A7%C3%BCm_belirsizli%C4%9Fi_hesaplama_rehberi-TR-127--3.html, 12 Mayıs 2016
- [40] ANSYS Inc. FLUENT v6.3, (2006), “Modeling Turbulent Flows”
- [41] Saad, T., “Turbulence Modeling for Beginners”, University of Tennessee Space Institute
- [42] Launder, B.E., Reece, G.J. ve Rodi, W., (1975) “Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure”, Journal of Fluid Mechanics 68:537–566
- [43] Purdue University College of Engineering, ME 608: Numerical Methods in Heat, Mass and Momentum Transfer, <https://engineering.purdue.edu/ME608/webpage/l33.pdf>, 20 Haziran 2016
- [44] Stanford University, ME 469B Spring: Computational Methods in Fluid Dynamics Using Commercial CFD Codes, <https://web.stanford.edu/class/me469b/handouts/incompressible.pdf>, 20 Haziran 2016

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Raşit YILDIRAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 24.09.1992 / DENİZLİ
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : rasilyildiran@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Isı-Proses (Mak. Müh.)	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Denizli Erbakır Fen Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014 - 2016	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi	Araştırma Bursiyeri
2013 - 2014	Arçelik A.Ş.	Proje Asistanı / Stajyer
2013	ENKA Gebze-Adapazarı Doğalgaz Komb. Çevrim Güç Santrali	Stajyer

YAYINLARI

Makale

1. **Yıldırım, R.**, Ataş, S., Kahraman, M., (2016) "Design and Performance Analysis of a District Heating System Utilizing Waste Heat of a Thermal Power Plant", Journal of Thermal Engineering, 2:940-954

Bildiri

1. **Yıldırım R.**, Ataş S., Kahraman M., (2015) "Design and Performance Analysis of a District Heating System Utilizing Waste Heat of a Thermal Power Plant", International Conference on Advances in Mechanical Engineering, 545 - 559
2. **Yıldırım R.**, (2015), "Current Status of Thorium in Energy Utilization", International Conference on Energy Systems", 261 - 271
3. **Yıldırım R.**, Teke İ., (2016), "Investigation on Combustion Aerodynamics of a Pulverized Coal Burner", 2nd International Conference on Advances on Mechanical Engineering, 131 - 139
4. Sever Ç. E., **Yıldırım R.**, Kalyoncuoğlu E., Javani N., (2016) "Simulation and Optimization of a Wind Turbine Blade For a Wind Powered Vehicle to Obtain Optimum Attack Angle", 2nd International Conference on Advances on Mechanical Engineering

ÖDÜLLERİ

1. Onur Öğrencisi, 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi
2. Rektörlük Kupası Masa Tenisi Turnuvası 2.si, 2013, Yıldız Teknik Üniversitesi
3. Tokyo Teknoloji Enstitüsü Doktora Kabulü / 2213 TÜBİTAK Yurtdışı Lisansüstü Bursu, 2015