

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PÜLVERİZE KÖMÜR YAKICILARINDA TÜRBÜLATÖR
TASARIMININ AKIŞ HIZ PROFİLİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ

OĞUZCAN GÜNDÜZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2015

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PÜLVERİZE KÖMÜR YAKICILARINDA
TÜRBÜLATÖR TASARIMININ AKIŞ HIZ
PROFİLİNE ETKİSİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ

OĞUZCAN GÜNDÜZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
YRD. DOÇ. DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

GEBZE
2015

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

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF
SWIRLER DESIGN EFFECT ON VELOCITY
PROFILE IN PULVERISED COAL
BURNERS**

OĞUZCAN GÜNDÜZ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ

GEBZE
2015



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 24/06/2015 tarih ve 2015/39 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Oğuzcan Gündüz'ün tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

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

ÜYE

: Prof. Dr. İsmail TEKE

ÜYE

: Prof. Dr. Mehmet Ali ARSLAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada farklı türbülötör (girdap üretici) tasarımlarının akış hız profiline olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Girdap üretici tasarımında öne çıkan parametreler Taguchi yöntemine göre analiz edilerek belirlenen 9 adet girdap üretici imal ettirilerek her bir üretici için iki farklı birincil/ikincil hava oranı için pleksiglas malzemeden yapılan “Soğuk Test Düzeneği”nde test edilmiştir. Deneylerde her bir girdap üreticinin pleksiglas malzemeden oluşan ve yanma bölgesini simüle eden hazne içerisinde meydana getirdiği aksenal, radyal ve teğetsel hızlar belirlenen noktalarında ölçülmüştür. Hız ölçümlerine ilave olarak her bir girdap üreticinin basınç düşümleri ve girdap sayıları da hesaplanmıştır. Ölçümler kobra başlı beş-delikli pitot tüpü ve dijital basınç farkı manometresi yardımıyla yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde elde edilen sonuçlar kıyaslanarak en uygun girdap üretici kanat parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Girdap Üretici, Girdap Sayısı, Taguchi Yöntemi, Kobra Başlı Pitot Tüpü.

SUMMARY

In this study, the effects of different swirler design parameters on the downstream flow pattern are experimentally investigated. Nine swirlers determined by analysis of critical design parameters by Taguchi method have been manufactured and each one was tested for two primary/secondary air flow rates in a “Cold Test Chamber”. In the experiments axial, radial and tangential air velocity components were measured at points of interest in the test chamber which simulates the combustion zone. Furthermore, pressure drop and swirl number for each swirler was calculated. Measurements were conducted with a cobra type pitot tube which had five holes and a digital pressure differential manometer. Finally, the swirler with the best performance has been determined by comparing the test results and calculations.

Key Words: Swirler, Swirl Number, Taguchi Method, 5-Hole Pitot Tube.

TEŞEKKÜR

BaŐta, yüksek lisans eğitimimde desteğini ve yardımlarını hiğbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu alıŐmaya yn veren tez danıŐmanım Yrd. Do. Dr. Salih zen ÜNVERDİ'ye,

Bu alıŐmanın ortaya çıkması için gerekli test düzeneğinin kurulmasında ve deneylerin yapılmasında büyük emek sarf eden değerli çalışma arkadaŐım Koray YAŐA'ya,

ve her zaman yanımda oldukları için ailem ile sevgili eŐım Sinem EKER GÜNDÜZ'e en içten teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Ülkemizde ve Dünya’da Kömürün Yeri	1
1.2. Pülverize Kömür Yakma Teknolojileri	4
1.3. Amaç ve Kapsam	6
2. PÜLVERİZE KÖMÜR YAKICILARI	7
2.1. Jet Yakıcılar	7
2.1.1. Teğetsel Ateşlemeli Yakıcılar	7
2.1.2. Aşağı Ateşlemeli Yakıcılar	10
2.1.3. Yatay Ateşlemeli Yakıcılar	11
2.2. Tek (Duvar Tipi) Yakıcılar	12
2.2.1. Eksenel Kanatçıklı Yakıcılar	13
2.2.2. Teğetsel Kanatçıklı Yakıcılar	13
3. SOĞUK TEST DÜZENEĞİ (STD)	15
3.1. STD Tasarımı ve Yapılan Hesaplamalar	17
3.1.1. STD Ölçeklendirme ve Boyutlandırma Hesaplamaları	18
3.2. STD Kurulumu ve Ekipman Seçimi	21
3.2.1. Pleksiglas Hazne ve Alüminyum Profil Bağlantıları	22
3.2.2. Birincil ve İkincil Fanlar ve Hat Bağlantıları	24
3.2.3. Ölçüm Ekipmanları	26
3.3. STD Ölçümleri ve Değerlendirme	32
3.3.1. STD’de Test Edilen Girdap Üretici Tasarımları	32

3.3.2. Deney Setleri Oluşturma	36
3.3.3. Ölçümler ve Veri İşleme	37
3.3.4. Belirsizlik Analizi	39
3.3.5. Hız Ölçüm Sonuçları	42
3.3.6. Girdap Sayısı Hesaplamaları	53
3.3.7. Basınç Düşümü Ölçümleri	60
3.3.8. İdeal Kanat Tasarım Parametreleri	62
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
α	: Akışa ait yalpalama açısı
β	: Akışa ait yunuslama açısı
d_o	: Hayali yanma dairesinin çapı
d_y	: Gerçek yanma dairesinin çapı
k_{12}	: Dinamik basınç katsayısı
mtep	: Milyon ton eşdeğer petrol
P_1	: 1 numaralı delikten okunan basınç değeri
P_2	: 2 numaralı delikten okunan basınç değeri
P_3	: 3 numaralı delikten okunan basınç değeri
P_{23}	: 2,3 numaralı deliklerden okunan ortalama basınç değeri
P_4	: 4 numaralı delikten okunan basınç değeri
P_5	: 5 numaralı delikten okunan basınç değeri
U	: Akışın aksenal yöndeki hızı
V	: Akışın radyal yöndeki hızı
W	: Akışın teğetsel yöndeki hızı
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
PKYS	: Pülverize Kömür Yakma Sistemi
STD	: Soğuk Test Düzeneği

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: 2011 yılı Dünya birincil enerji arzı kaynak payları.	2
1.2: 2012 yılı Türkiye birincil enerji arzı kaynak payları.	2
1.3: Dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre gelişimi.	3
1.4: Geleneksel bir pülverize kömür kazanının şematik çizimi.	5
2.1: Teğetsel yakıcı bir kazandaki alevin şematik ve gerçek görüntüleri.	8
2.2: Teğetsel ateşleme sisteminde etkin aerodinamikler.	9
2.3: Farklı teğetsel yakma düzenleri.	10
2.4: Aşağı ateşlemeli yakma düzeni.	11
2.5: Yatay ateşlemeli yakma düzeni.	12
2.6: Eksenel kanatçıklı yakıcı modeli.	13
2.7: Teğetsel kanatçıklı yakıcı modeli.	14
3.1: STD ve PKYS kanal çapları.	21
3.2: Pleksiglas hazne ve alüminyum profil bağlantıları.	22
3.3: Bağlantı parçalarıyla yapılan bir köşe bağlantısı.	23
3.4: Birincil ve ikincil santrifuj hava fanları.	24
3.5: Fan kontrol panosu.	25
3.6: Birincil ve ikincil kanal bağlantıları.	26
3.7: Pervane tip anemometre ile kanal içi hız ölçümü.	27
3.8: Pitot tüpü ile eksenel hız ölçümü.	28
3.9: Kobra başlı pitot tüpünün görünüşü.	29
3.10: Yunuslama, yalpalama açıları ve delik numaralarının gösterimi.	29
3.11: Yunuslama açısı kalibrasyon eğrisi.	30
3.12: Yalpalama açısı okuma gönyesi.	31
3.13: Yunuslama açısına göre k_{12} değeri eğrisi.	32
3.14: Girdap üretici kanat parametrelerinin şematik gösterimi.	34
3.15: STD'de test edilen girdap üretici modelleri giriş kesitleri.	35
3.16: STD'de test edilen girdap üretici modelleri çıkış kesitleri.	35
3.17: Soğuk test düzeneği ölçüm deliklerinin dizilimi.	39
3.18: Eksenel, radyal ve teğetsel hız bileşenlerinin gösterimi.	42

3.19:	M1 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	44
3.20:	M1 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	44
3.21:	M1 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	44
3.22:	M2 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	45
3.23:	M2 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	45
3.24:	M2 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	45
3.25:	M3 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	46
3.26:	M3 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	46
3.27:	M3 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	46
3.28:	M4 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	47
3.29:	M4 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	47
3.30:	M4 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	47
3.31:	M5 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	48
3.32:	M5 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	48
3.33:	M5 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	48
3.34:	M6 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	49
3.35:	M6 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	49
3.36:	M6 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	49
3.37:	M7 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	50
3.38:	M7 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	50
3.39:	M7 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	50
3.40:	M8 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	51
3.41:	M8 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	51
3.42:	M8 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	51
3.43:	M9 No'lu girdap üretici için 1. durum eksenel hız ölçüm sonuçları.	52
3.44:	M9 No'lu girdap üretici için 1. durum radyal hız ölçüm sonuçları.	52
3.45:	M9 No'lu girdap üretici için 1. durum teğetsel hız ölçüm sonuçları.	52
3.46:	Girdap sayısının eksenel konum ile değişimi (1. durum).	54
3.47:	Girdap sayısının eksenel konum ile değişimi (2. durum).	55
3.48:	1. durum için parametre etki grafikleri.	57
3.49:	2. durum için parametre etki grafikleri.	59
3.50:	Basınç düşümü için parametre etki grafikleri.	61

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Pülverize kömür yakma teknolojisinde parçacık boyutları.	4
3.1: PKYS'ye ait bazı değerler.	19
3.2: Baca gazı geri besleme debisi hesabı.	19
3.3: PKYS ve STD'nin birincil kanallarına ait hesap sonuçları.	19
3.4: PKYS ve STD'nin ikincil kanallarına ait hesap sonuçları.	20
3.5: PKYS ve STD ikincil kanallarında engelleme, gerçek hız ve momentum akış hızı değerleri.	20
3.6: STD ve PKYS kanallarının momentum akış hızları ve oranları.	20
3.7: Bağlantı elemanları.	23
3.8: Birincil ve ikincil fan özellikleri ve çalışma koşulları.	25
3.9: Girdap üreteç özellikleri ve farklı değerleri.	33
3.10: STD'de kullanılan girdap üreteçlerinin çeşitli geometrik özellikleri.	34
3.11: STD deney tablosu.	37
3.12: Ölçümlerde kullanılan basınç farkı manometresinin teknik özellikleri.	40
3.13: Ölçüm belirsizliği hesabı.	41
3.14: 1. durum girdap sayısı hesapları için istatistik tablosu.	56
3.15: 1. durum için cevap tablosu.	57
3.16: 2. durum girdap sayısı hesapları için istatistik tablosu.	58
3.17: 2. durum için cevap tablosu.	58
3.18: Girdap üreteçlerinin basınç düşümü istatistik tablosu.	60
3.19: Basınç düşümü cevap tablosu.	61
3.20: Ölçüm ve hesaplamalar sonucu öne çıkan kanat tasarım parametreleri.	62

1. GİRİŞ

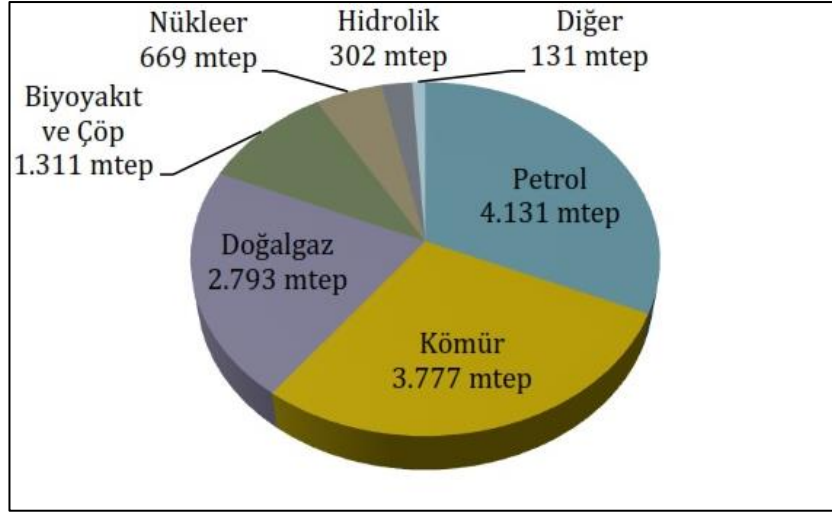
Ülkemizde ve Dünya’da kömürden elektrik üretimi uzun yıllardır önemini korumaktadır. Dünya’daki ve ülkemizdeki mevcut kömür kaynakları göz önüne alındığında kömürün elektrik üretiminde önemini önümüzdeki yıllarda da koruyacağı tahmin edilebilmektedir.

Mevcut yakma sistemlerinde kullanılan kömür içeriğine göre farklı şekillerde yakılmaktadır. Her kömürün kendi karakteristiğine en uygun yakma yöntemleriyle alakalı her geçen gün yeni teknolojiler geliştirilmekte, yüksek verimli sistemler ile düşük çevre kirliliği oluşturan temiz teknolojiler hedeflenmektedir.

Bu bölümde ilk olarak pülverize kömür yakma teknolojilerinden bahsedilmiş, kömür yakma sistemlerinin en önemli elemanlarından biri olan türbülatorün (girdap üreticinin) tasarım ölçütleri ve çeşitleri üzerinde durulmuştur. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ise tez kapsamında tasarlanan deney düzeneğinden ve düzenekte test edilmek üzere üretilen girdap üreteçlerinden bahsedilmiştir. Sonrasında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilerek elde edilen bulgular aktarılmıştır. Bölümün sonunda da tez konusunun amaç ve kapsamından bahsedilmiştir.

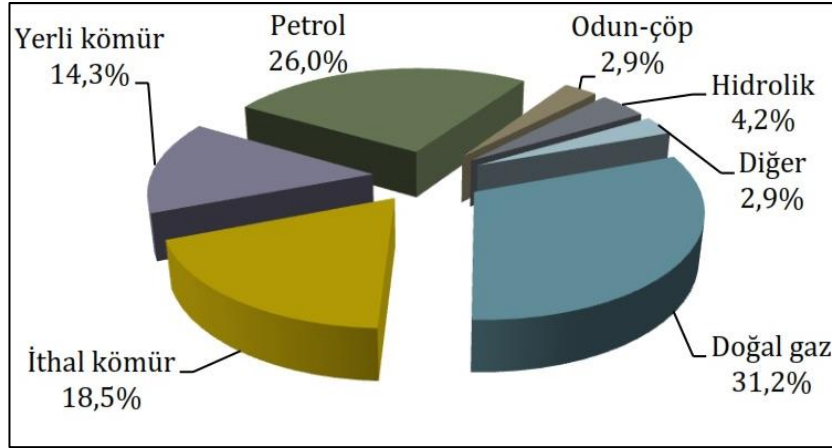
1.1. Ülkemizde ve Dünya’da Kömürün Yeri

Dünya ve ülkemizde enerji talebine bağlı olarak gerçekleşen arz yıldı yıla artış göstermektedir. Bu enerji arzı son 40 yılda yaklaşık iki katına çıkmıştır. Eldeki istatistiki verilere göre Dünya’da bu son 40 yıllık dönemde petrolün payı %46’lardan %31,5’e kadar gerilerken, doğal gazın payı %16’dan yaklaşık %21’e, nükleer enerjinin payı %0,9’dan %5,1’e ve yenilenebilir ve hidrolik enerji arzının toplam payı da %1,9 seviyesinden %3,3 düzeylerine yükselmiştir [1]. Aynı süre zarfında kömürün payı artarak %24,6’dan %29 seviyelerine ulaşmıştır. 2011 yılında dünyadaki toplam kömür arzı ise bir önceki yıla göre %8,8 düzeyindeki yüksek bir artışla 3.777 milyon ton eşdeğer petrol (mtep) olarak gerçekleşmiştir. Son yıllardaki tüketim artış hızlarıyla, kömürün, birkaç yıl içerisinde petrolün tahtını ele geçirmesi kaçınılmaz görünmektedir [1].



Şekil 1.1: 2011 yılı Dünya birincil enerji arzı kaynak payları.

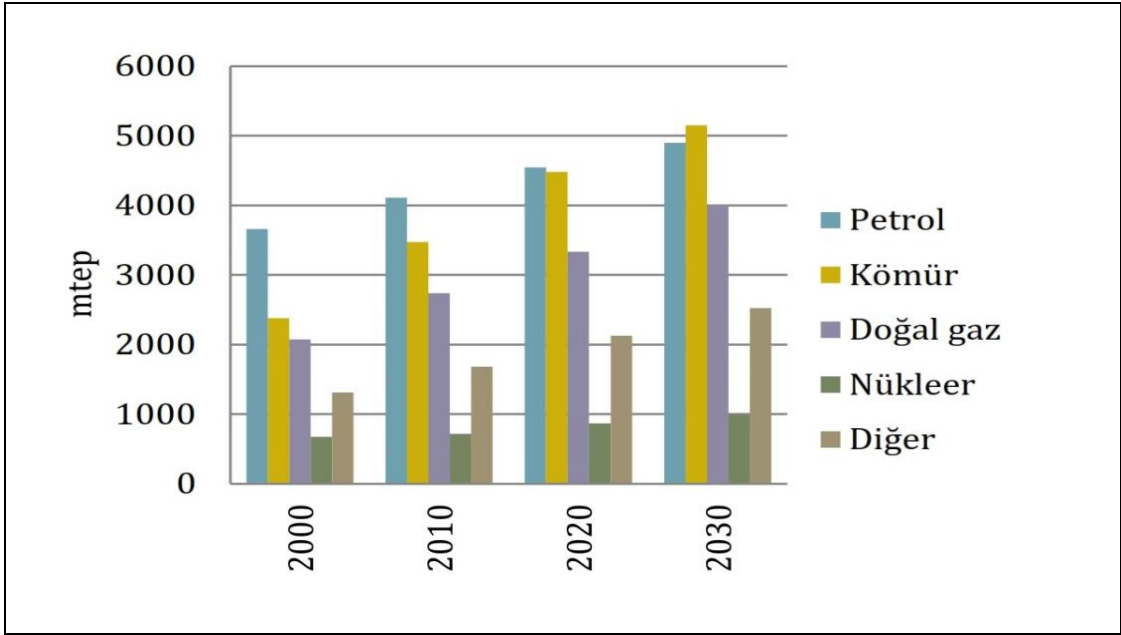
Ülkemizde enerji arzının kaynaklara göre dağılımında 2012 yılı verileri göz önüne alındığında 39,3 mtep ile kömür ilk sırayı almaktadır. Doğal gaz 37,4 mtep ile ikinci, petrol 31,2 mtep ile üçüncü, hidrolik ise 5 milyon tep ile dördüncü sırada gelmektedir. Enerji arzının yaklaşık 7 mtep'lik bir kısmı ise biyoyakıt ile jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilmektedir [1].



Şekil 1.2: 2012 yılı Türkiye birincil enerji arzı kaynak payları.

Mevcut enerji politikalarının benzer eğilimi sürdürmesi durumunda Uluslararası Enerji Ajansı'nın tahminlere göre kaynak dağılımlarında önemli bir fark olmadan 2030 yılında dünya birincil enerji arzının 2011 yılına oranla %34 civarında bir yükseliş göstererek 17.572 mtep seviyesine ulaşacağı ve petrolün enerji arzındaki liderliğini diğer fosil yakıtlardan kömüre bırakacağı öngörülmektedir. Bu durumda

kömür 2030 yılı itibariyle %29,3 pay ile enerji arzında ilk sırayı almış olacaktır. Petrolün ise %27,9 pay ile ikinci, doğal gazın %22,8 pay ile üçüncü sırayı alması öngörülmektedir. Nükleer enerji, hidrolik enerji, yenilenebilir enerji ve diğer enerji kaynaklarından gelecek arzın ise toplamda %21 dolaylarında olması öngörülmektedir [2].



Şekil 1.3: Dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre gelişimi.

Yukarıda sıralanan bilgiler ışığında bakıldığında kömürün enerji arz piyasası içindeki önemini önümüzdeki 20 yıl içerisinde de koruyacağı hatta artıracığı öngörülebilmektedir. Bu durum kömür kaynakları bakımından zengin olan ülkemiz açısından stratejik bir öneme sahiptir. Ülkemiz kömür kaynakları açısından zengin bir ülkedir ancak kömür kalitesi genel anlamda düşüktür. Türkiye’de çıkarılan kömürlerin %90’ının alt ısı değeri 3000 kcal/kg değerinden düşüktür. Yerli linyitler düşük kalorifik değerlerinin yanı sıra yüksek nem ve kül bileşimine de sahiptir. Çıkarılan yerli linyitlerin elementel analizleri incelendiği zaman kükürt ve azot oksitler gibi zararlı gaz salınımlarına neden olan elementlerin varlığı görülmektedir. Tüm bunların sonucunda yerli linyitler için uygun teknolojilerin üretilmesi ve kullanılması bu önemli kaynağın çevre ile dost biçimde verimli şekilde kullanılması için gereklidir.

Sonuç olarak ülkemizin artan enerji talebi karşısında ithal etmek durumunda kaldığı enerjinin neden olduğu cari açıkların azaltılması için ülkemizin öz

kaynaklarından olan linyitin yüksek verimle ve çevresel zararlara neden olmayan düşük gaz salınımları ile yakılması ülkemizin stratejik enerji güvenliği açısından önem arz etmektedir.

1.2. Pülverize Kömür Yakma Teknolojileri

Pülverize kömür, kömürün değirmen ya da benzer ekipmanlar vasıtasıyla toz haline getirilmiş halidir. Kömürün toz haline getirilme işlemine pülverizasyon denir. Pülverize edilmiş kömürün yakma sürecinde bir takım avantajları ön plana çıkmaktadır. Bunlar; tane boyutunun küçülerek daha hızlı şekilde yakılabilmesi, hava ile yakıtın daha hızlı karışabilmesi, geniş hacimlerde çok miktarda kömürün yakılabilmesi ve pnömatik yollar ile kömürün kazana kolayca beslenebilmesi olarak sıralanabilir.

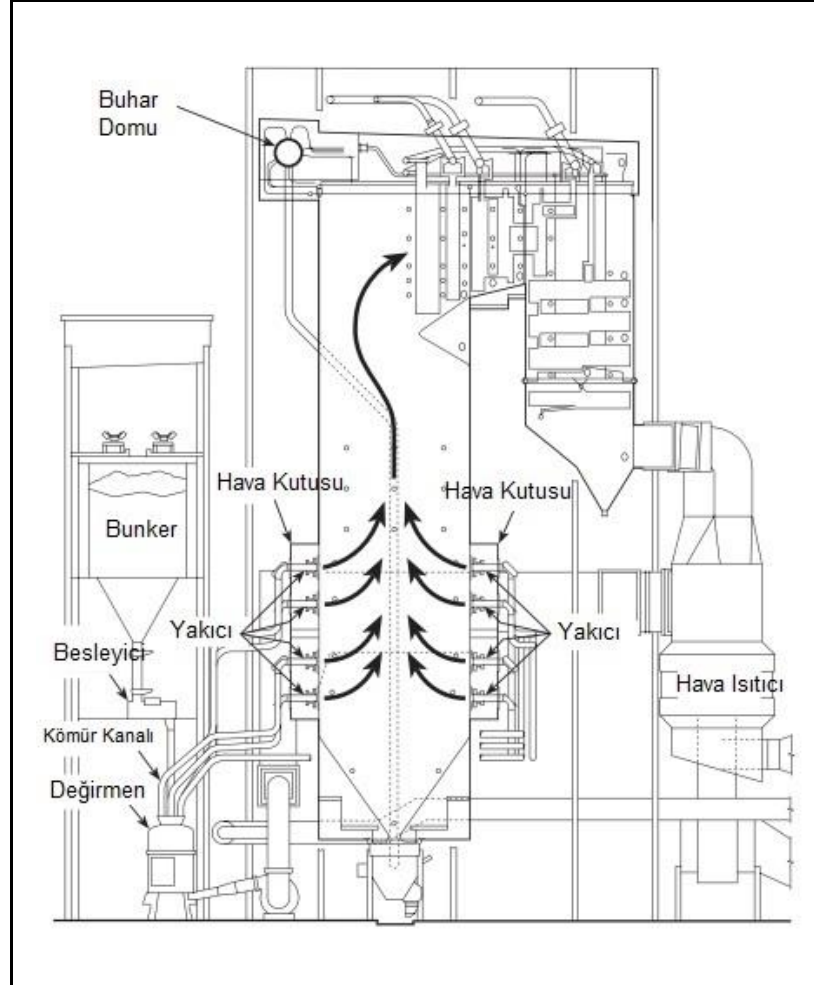
Pülverizasyon boyutu, farklı kömür tiplerine göre farklılık gösterebilmektedir. Bu durum kömürün sahip olduğu nem, kül ve uçan kok gibi bileşenlerden ileri gelmektedir. Yine genel olarak öğütülen her kömür taneciğinin tane boyutunun aynı büyüklüğe getirilmesi zor olduğu için belli bir boyutun altında öğütülmüş kömür yüzdesinin istenen bir değerinin üstünde kalması sağlıklı yanma için yeterli görülmektedir. Subbitümlü kömür, linyit ve bitümlü kömür türleri için pülverizasyon boyutları hakkında gerekli ölçütler Tablo 1.1'de gösterilmektedir [3]. Tabloya bakıldığı zaman öğütülen kömürlerin tane boyutlarının neredeyse tamamının 300 μm 'den küçük olması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 1.1: Pülverize kömür yakma teknolojisinde parçacık boyutları.

Kömürün Türü	74 μm'den küçük kömür (%)	297 μm'den küçük kömür (%)
Subbitümlü ve linyit	65	98
Bitümlü	70	98

Pülverize kömür yaygın olarak termik santrallerde elektrik üretimi amaçlı kullanılmaktadır. Bu santrallerde değirmenlerde öğütülen kömür birincil hava kanalı yardımıyla yakıcılar üzerinden kazana beslenmektedir. Kazana beslenen kömür kazanın merkezindeki bir ateş topu üzerine beslenmek suretiyle yakılarak

bünyesindeki kimyasal enerjiyi açığa çıkarmaktadır. Açığa çıkan ısı enerjisi kazan çeperlerinden geçen su ve su buharına aktarılarak kimyasal enerjinin ısı enerjeye dönüşümü gerçekleşmiş olmaktadır. Geleneksel bir pülverize kömür kazanının şematik gösterimi Şekil 1.4'te verilmiştir [4].



Şekil 1.4: Geleneksel bir pülverize kömür kazanının şematik çizimi.

Pülverize kömür yakma teknolojileri kömür yakma teknolojisinde bir dönüm noktası olmuştur. Kömürün pülverize edilerek yakılması neticesinde daha çok miktarda kömür daha kısa sürede yakılması sayesinde kazan kapasiteleri artmaya başlamış ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bugünkü yüksek kapasitelere ulaşılmıştır. Pülverize kömürlü bir yakma sistemi ilk olarak 1918 yılında ABD Milwaukee’de bir buhar kazanında hayata geçirilmiştir [4].

1.3. Amaç ve Kapsam

Girdaplı akış turbo makineler, jet motorları ve pompalar gibi mühendislikte önemli bir yere sahip pek çok uygulamada temel dinamik prosesleri etkileyen önemli bir konu durumundadır. Yanma uygulamalarında da yakıcı çıkışında meydana getirdiği geri dönüş alanı sayesinde alev kararlılığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Yakma sistemlerinde yanma verimi yakıt ve havanın karışma hızıyla artmaktadır. Girdaplı yakıcılarda yakıt hava karışımının etrafını çevreleyen girdaplı akış sayesinde normal girdapsız yakıcılara göre yakıt ile havanın karışımı daha hızlı olmaktadır. Hava ve yakıtın erken karışması yanma kararlılığı ve verimini açısından faydalı olmaktadır [5].

Tezin amacı pülverize kömür yakıcılarında alev kararlılığı açısından büyük önem arz eden girdap üretici için en uygun kanat tasarım parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesidir. Taguchi yöntemi kullanılarak parametreleri belirlenen dokuz adet girdap üretici imal ettirilerek soğuk akış için kurulan düzeneğe test edilmiştir.

Tez konusunun literatüre katkısı kanat parametrelerinin girdap sayısı üzerine olan etkisinin Taguchi yöntemi ile analiz edilerek en uygun girdap üreticinin belirlenmesidir. Ayrıca kanat parametrelerinin basınç kayıpları üzerindeki etkisi de Taguchi yöntemiyle incelenmiştir.

Tez kapsamında, 250 kWt kapasiteli bir pülverize kömür yakma sisteminin (PKYS) soğuk modeli olarak tasarlanan bir soğuk test düzeneğinde (STD) 5-delikli pitot tüpü yardımıyla 9 farklı girdap üretici için eksenel, teğetsel, radyal hızlar ve basınç düşümleri ölçülmüş, daha sonra üreteçlerin düzeneğe içerisinde meydana getirdikleri girdap etkileri hesaplanmıştır. Son olarak yapılan ölçüm ve hesaplamalar Taguchi yöntemine göre analiz edilerek en uygun kanat tasarım parametreleri karşılaştırma yöntemiyle elde edilmiştir.

2. PÜLVERİZE KÖMÜR YAKICILARI

Pülverize kömür yakma sistemlerinde kömür değirmenlerde 5-400 µm boyutlara kadar küçültülerek yakma havasının bir kısmını oluşturan birincil hava yardımıyla yakıcılara taşınır ve yakıcı çıkışında yakma havasının çoğunu oluşturan ikincil hava ile uygun yanma şartlarını oluşturabilecek şekilde karışması sağlanarak yakılır. Düşük NO_x salımlı yakıcılarda ise birincil ve ikincil yakma havalarına ilave olarak üçüncül yakma havası da. Yakma havaları arasındaki etkileşim ve yanma esnasında açığa çıkan ısı miktarı yanma reaksiyonunun gelişimini, yanma bölgesi sıcaklığını ve birincil, ikincil havaların stokiyometrisini belirlemektedir [6].

Pülverize kömür, jet yakıcılar ve tek yakıcılar yardımıyla farklı şekillerde yakılabilmektedir. Tek yakıcılarda aleve girdap etkisi genellikle ikincil hava kanalı üzerine konan kanatçıklar sayesinde gerçekleştirilir.

Bu bölümde pülverize kömürün hava jetleri yardımıyla yakılması ve girdap üreteçli yakıcılar hakkında bilgi verilmiştir. Yakma yöntemlerinin literatürdeki yerleri ve işleyen dinamikleri ile alakalı bilgiler sunulmuş ve meydana getirdikleri basınç kayıpları incelenmiştir.

2.1. Jet Yakıcılar

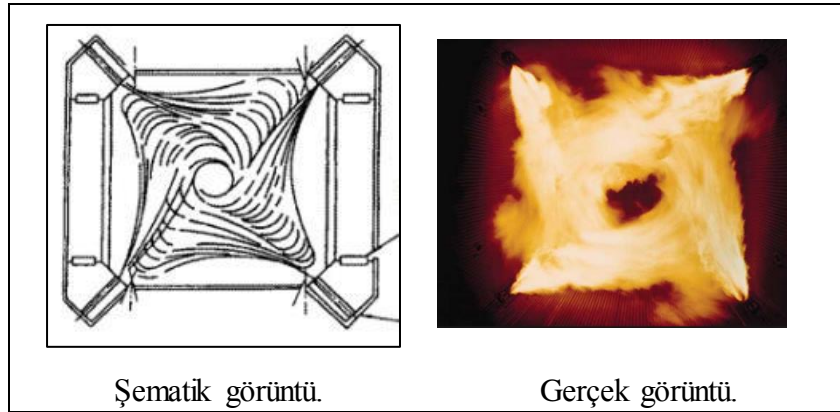
Jet yakıcılar kazan içerisine farklı konum ve yönelimlerde yerleştirilerek yakıt-hava karışımına girdap etkisini veren yakıcılardır. Yakıcı kanalları içinde girdap etkisi sağlayacak herhangi bir kanat bulunmamaktadır. Jet yakıcılarda aleve girdap etkisini tek bir yakıcı değil, birden fazla yakıcı kazanı uygun yerleşimlerde besleyerek verir. Pülverize kömürü hava jetleri yardımıyla yakmak için farklı yöntemler kullanılır. Bunlar teğetsel ateşlemeli yakıcılar, aşağı ateşlemeli yakıcılar ve karşı ateşlemeli yakıcılardır.

2.1.1. Teğetsel Ateşlemeli Yakıcılar

Teğetsel ateşlemeli yakıcılar yaygın kullanılan yakma sistemlerinden biridir. Farklı kömür tiplerine uygunluk göstermesi, işletme kolaylığı, yüksek yanma verimi

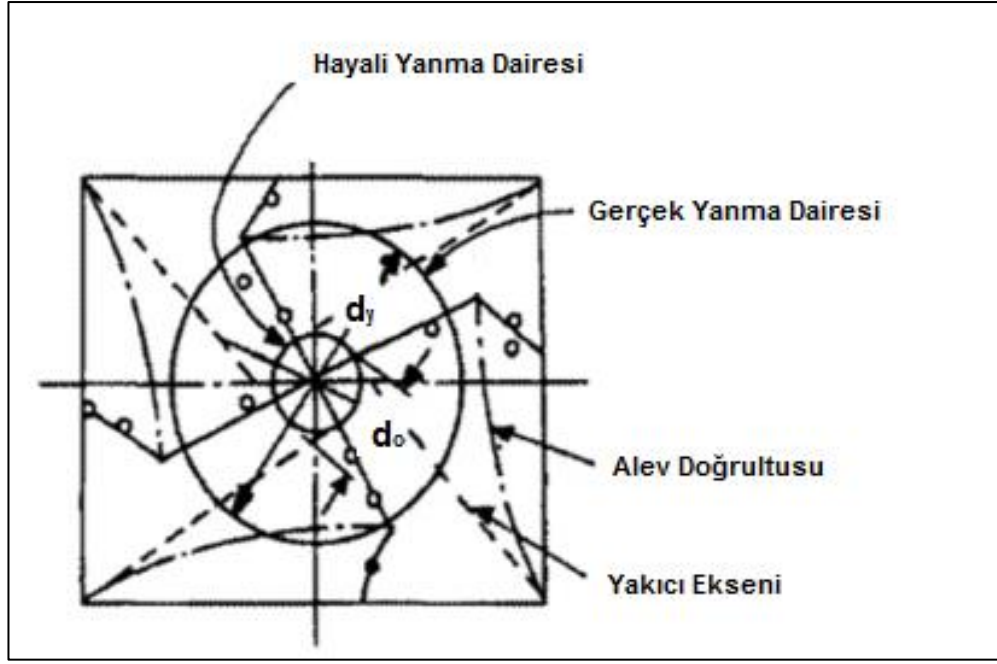
sağlaması ve NO_x salınımlarının düşük olması gibi üstünlüklerinden ötürü dünya genelinde birçok termik santralde tercih edilmektedir [7].

Teğetsel yakıcılar, ocağın dört köşesinde bulunan yakıcı eksenlerinin ocağın merkezindeki hayali bir çembere teğet olacak şekilde yönlendirildiği yakıcılardır. Bu yöntem orta ve büyük ölçekli, katı veya sıvı yakıtlı kazanlarda kullanılır. Birincil hava jeti pülverize kömürü taşır. Aynı zamanda sıcak gazları beraberinde sürükler ve ocaktan ışımla ısı alır. Bu sayede karışımın sıcaklığı artar ve pülverize kömür tutuşur [8].



Şekil 2.1: Teğetsel yakıcı bir kazanda alevin şematik ve gerçek görüntüleri.

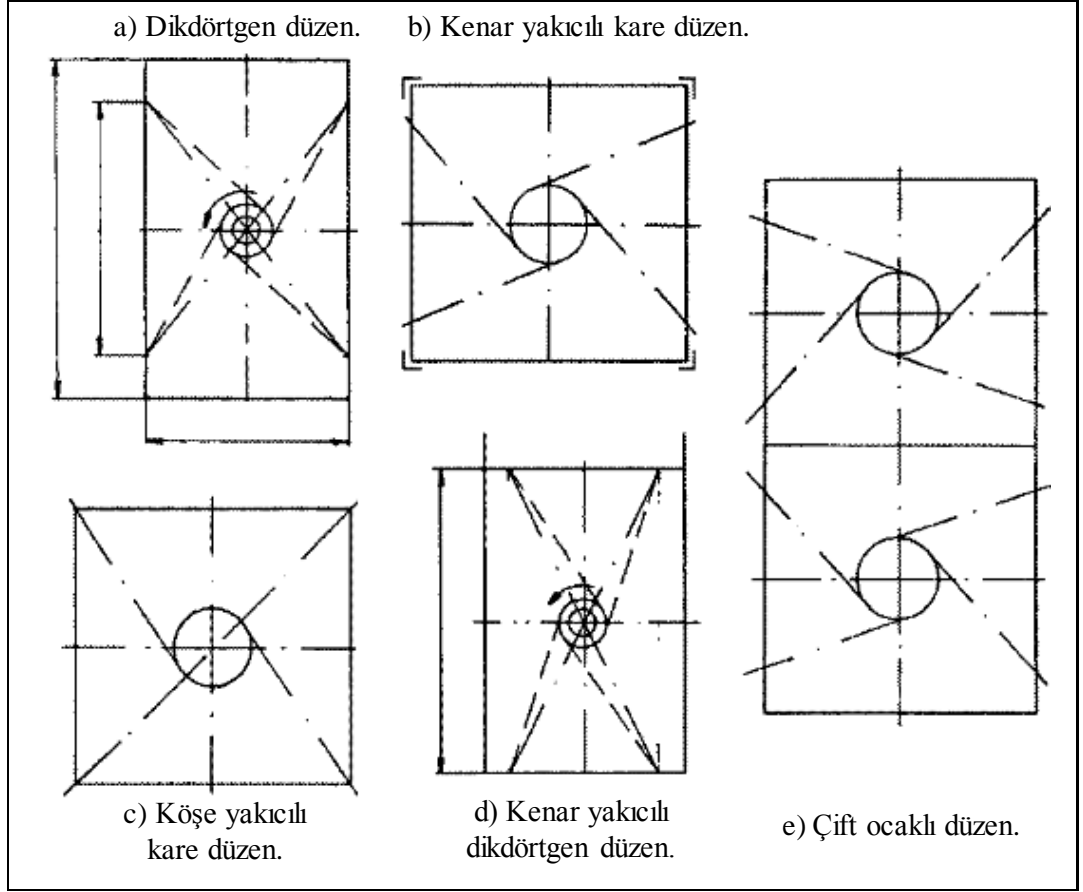
Teğetsel yakma sistemlerinde güçlü bir hava sarmalı ocağın ekseni boyunca yükselir. Hava sarmalı yükselirken üst yakıcıların meydana getirdiği hava sarmalı ile karşılaşır. Bu sayede tüm hava jetleri ocağın merkezinde güçlü bir girdap oluştururlar. Bununla birlikte pratikte, komşu jetlerin etkileşimleri nedeniyle hava jetleri tasarlandıkları eksenden biraz sapar. Bunun sonucunda gerçekte oluşan dairenin çapı, tasarlanan hayali dairenin çapından daha büyük olur. Gerçek dairenin çapı ocaktaki maksimum teğetsel hızı gösteren akış çizgileri tarafından belirlenir. Kazanın dört köşesinde yer alan yakıcıların kuvvetleri ve giriş açıları bazı nedenlerden ötürü ideal olamayacağı için gerçekte akım çizgileri eliptiktir. Şekil 2.2’de gerçek yanma dairesinin, hayali yanma dairesinin ve alev doğrultusunun şematik görüntüsü yer almaktadır [8].



Şekil 2.2: Teğetsel ateşleme sisteminde etkin aerodinamikler.

Teğetsel yakıcıların ocağın merkezinde meydana getirdiği hız profili iki kısımda incelenebilir. Gerçek dairenin içinde kalan vorteks bölgesi ve gerçek dairenin dışında kalan kısım olarak birbirlerinden farklı özellik gösterirler. Dış kısımda geriye doğru sürüklenen gazların teğetsel hızları ocak merkezinden uzaklaştıkça azalır [8].

Teğetsel yakıcı kömür yakma sistemlerinde ocaktaki elverişli koşullar sayesinde alev kararlılığı iyidir ancak ocakta oluşan akış yanma koşullarından kolayca etkilenebilir. Ocak içerisinde meydana gelen akış yakıcı eğim açısı, birincil ve ikincil hava hızları ile yakıt gibi birçok parametreye bağlıdır [9]. Bu nedenle teğetsel yakıcılar yakıcıların kazan içerisindeki konumlarına göre, ateşleme tiplerine göre ve hava kanalı dizilişlerine göre farklılık göstermektedir Şekil 2.3'de ocak kesitinde yakıcıların kullanılan farklı dizilişleri yer almaktadır [8]. Kazan kapasitesi, ocak geometrisi ve yapısal farklılıklara göre farklı çözümler geliştirilmiştir.

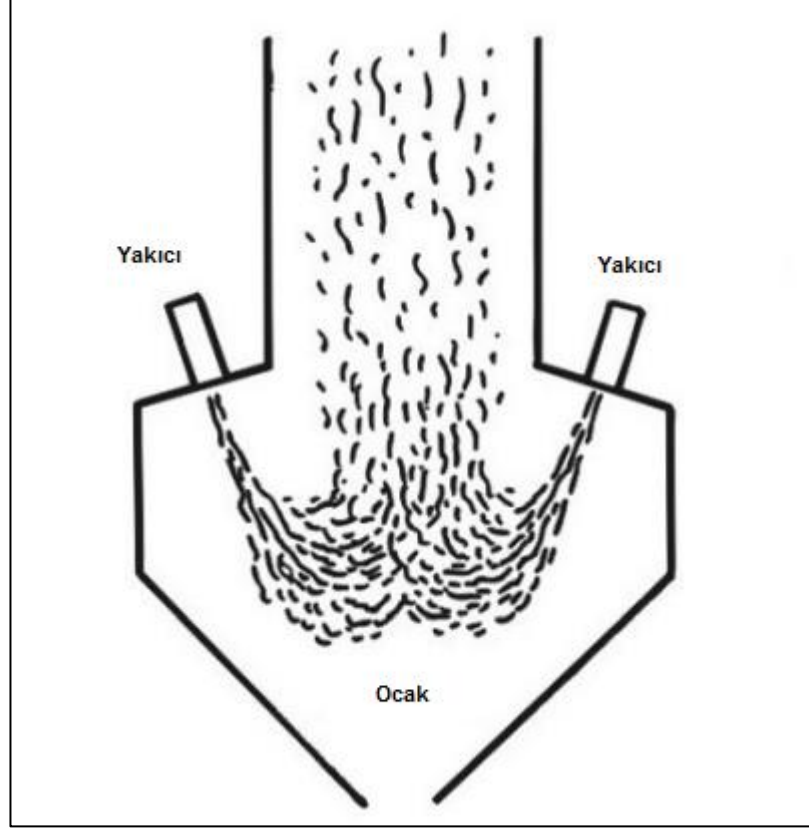


Şekil 2.3: Farklı teğetsel yakma düzenleri.

2.1.2. Aşağı Ateşlemeli Yakıcılar

Aşağı ateşlemeli yakma sistemleri sağladıkları uzun alev boyu sayesinde düşük uçucu madde içeren kömürlerin yüksek verimle yakılmasını sağlarlar. Kömürün içerdiği uçucu madde bileşiminin düşüklüğüne ve kül içeriğinin yüksekliğine göre iki farklı uygulama alanı mevcuttur. Bazı durumlarda kömürün yanmasının tamamlanabilmesi için ilave yardımcı yakıt beslemesine veya uzun kazan boylarına ihtiyaç duyulmaktadır [10]. Bu sistemde pülverize kömür kazanın refrakter yüzeyle kaplı alt kesimlerine doğru beslenir. Burada kömür alev olarak yükselir ve ocak içerisinde yükselirken yanmasını tamamlar. Bu yöntem tutuşması zor olan ve dolayısıyla yanma süreleri yüksek kömürler için elverişlidir. Ocağın alt bölümünde ısınan refrakter yüzey kömürün daha hızlı tutuşmasını sağlar ve kömür taneciğinin önce aşağı yönleneceği ve daha sonra yukarı yükselmesi arasında geçen süre içerisinde çoğunluğu karbon esaslı çar kısımdan meydana gelen kömürlerin yanması için uygun bir yöntem olarak kullanılmıştır. Ancak geliştirilen yeni yakma

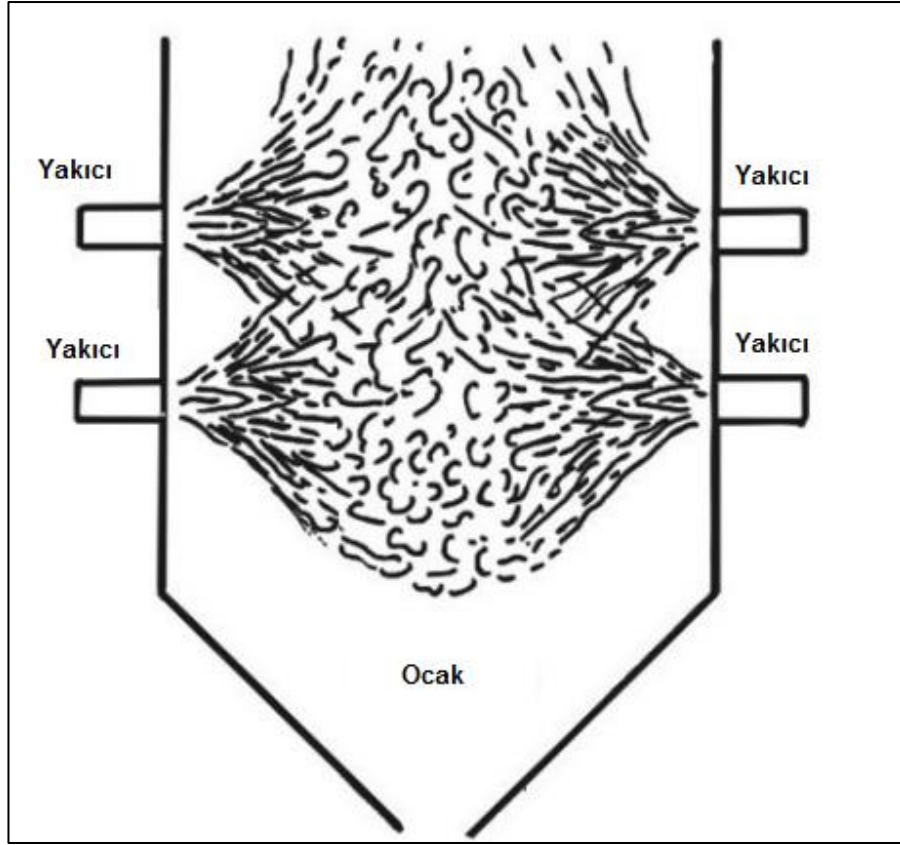
teknolojilerinin kömür için yeterli yanma süresi tanımları sonucunda artık yaygın olarak kullanılmamaktadır. Aşağı ateşlemeli yakıcılara sahip bir kazanın kesit görünüşü Şekil 2.4’de gösterilmektedir [11].



Şekil 2.4: Aşağı ateşlemeli yakma düzeni.

2.1.3. Yatay Ateşlemeli Yakıcılar

Yatay ateşlemeli yakma sistemlerinde pülverize kömür ocağa yatay ve karşılıklı sıralanan yakıcılar üzerinden beslenmektedir. Aşağı ateşlemeli yakma sistemlerine benzer şekilde her bir yakıcı kendi yanma bölgesini beslemektedir. Yanmanın tamamlanması için gerekli debide ikincil hava beslenmelidir. Yatay ateşlemeli bir kazanın ve içinde alevin şematik görünümü Şekil 2.5’de gösterilmektedir [11].



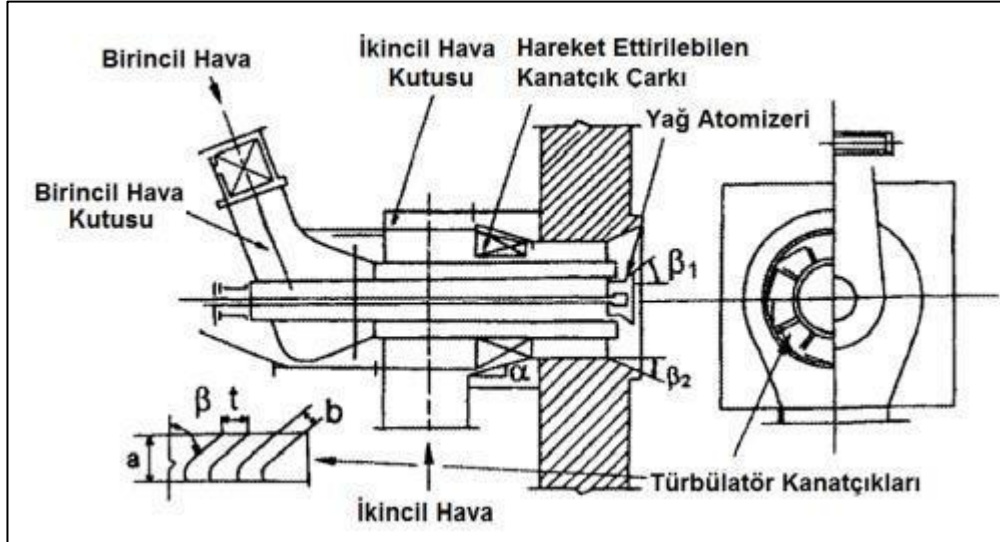
Şekil 2.5: Yatay ateşlemeli yakma düzeni.

2.2. Tek (Duvar Tipi) Yakıcılar

Tek yakıcılar genel olarak yatay yakma sistemlerinde kullanılırlar. Tek yakıcılarda yakıcı çıkışında yüksek türbülans ve girdap etkisinin yakma havasına verilebilmesi için iki yöntem kullanılır. Bu yöntemlerden ilkinde yakma havasına girdap etkisi veren kanatçıklardan yararlanır. İkinci yöntemde ise yakma havası ikincil hava lülesinden teğetsel olacak şekilde beslenir. Bu iki yöntem sayesinde teğetsel hızlar yükselerek akış girdap etkisi kazanır ve diğer yöntemlerde birden fazla jet yardımı ile sağlanan girdap ve türbülans etkisi bu tip yakıcılarda tek bir yakıcı tarafından sağlanabilir [11]. Duvar tipi yakıcılar tek başlarına küçük ölçekli kazanlarda kullanılabilecekleri gibi, büyük kapasiteli kazanlarda birden fazla olarak kullanılabilirler.

2.2.1. Eksenel Kanatçıklı Yakıcılar

Bu yakıcı tasarımımda (Şekil 2.6), ikincil havaya girdap etkisi kanala yerleştirilen eksenel kanatçıklar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Diğer taraftan birincil hava yakıcı eksenine paralel ya da girdap etkili olarak kazan içerisine gönderilir. Eksenel kanatçıklı yakıcılar genellikle uçucu madde miktarı kuru bazda %25'ten fazla, ısı değeri 16,8 MJ/kg (4000 kcal/kg)'dan yüksek olan linyitler ve bitümlü kömürleri yakmada kullanılırlar. Eksenel kanatçığın eğim açısı yakıcı performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Büyük açılar ikincil hava direncinin artmasına neden olabilir. Linyit ve bitümlü kömür yakan sistemler için kanat eğim açısı 50° ile 60° arasında seçilir.



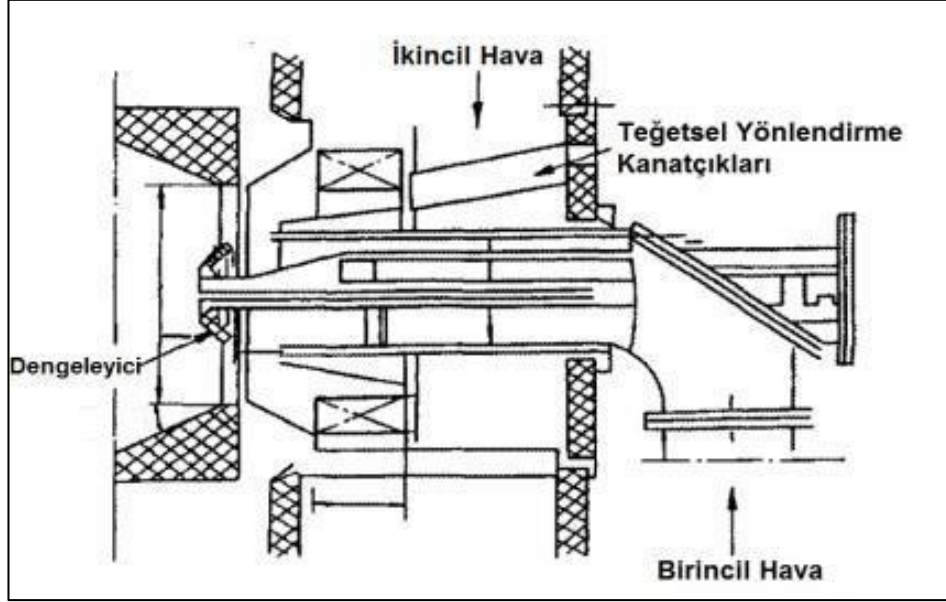
Şekil 2.6: Eksenel kanatçıklı yakıcı modeli.

İkincil havanın girdap yoğunluğu eksenel kanat çarkının hareket ettirilmesi ile ayarlanır. Operatör kanatçığın eksenel pozisyonunu ayarlayarak akışkanın girdap yoğunluğunu ve doğrultusunu değiştirebilir [8].

2.2.2. Teğetsel Kanatçıklı Yakıcılar

Teğetsel kanatçıklı yakıcılarda ikincil hava, ayarlanabilir teğetsel yönlendirme kanatçıklarından geçerek kazana girer. İkincil havanın girdap yoğunluğu, yönlendirme kanatçıkları eğim açısının değiştirilmesi ile ayarlanabilir. Teğetsel

yakıcılarda bu kanatçıkların sayısı 8 ile 16 arasında olabilir. Birincil havaya girdap etkisi verilip verilmeme durumuna göre iki tür teğetsel kanatçıklı girdap etkili yakıcı bulunmaktadır.



Şekil 2.7: Teğetsel kanatçıklı yakıcı modeli.

Birincil havaya girdap etkisi verilmeyen yakıcı tiplerinde, birincil hava doğrudan yakıcı merkezindeki kanaldan kazan içerisine girer. Bu nedenle akış direnci çok düşük olur. Birincil havanın girdap etkili olduğu diğer model de endüstride kullanılan ilk girdap etkili yakıcı modellerinden birisidir. Bu yakıcıların ısı güçleri 15 MW ile 80 MW arasındadır. Birincil hava ve kömürün birlikte taşındığı yakıcının merkezindeki kanalda, teğetsel kanatçıkların dizildiği bir dengeleyici bulunmaktadır. Merkezi geri dönüş bölgesi dengeleyicinin arkasında oluşturulur. Bu dengeleyici ileri ve geri hareket ettirilerek geri dönüş bölgesinin boyutları ayarlanır. Teğetsel kanatçıklı yakıcılar, uçucu madde miktarı %25'in üzerinde olan bitümlü kömürler ile iyi çalışırlar [8].

3. SOĞUK TEST DÜZENEĞİ (STD)

STD, hava akışının yanma odası içerişindeki davranışının parametrik olarak incelenebilmesi amacıyla kurulmuştur. STD'de yapılan testlerin sonucunda elde edilen verilerle yanma için elverişli girdap desenini oluşturan en uygun kanat açıları, hava hızları gibi parametreler belirlenmiştir. Bu bölümde STD'ye ait tasarım hesaplamaları, ekipman seçimi ve ölçüm sonuçları yer almaktadır.

STD' de incelenen parametreler ve gerçekleştirilen testler şu şekilde sıralanabilir:

- Tasarımı yapılan girdap üreteçlerinin farklı kanat açıları, kanat sayıları, kanat genişlikleri ve kanat eğim açıları için oluşacak akışın incelenerek en iyi girdap desenini veren kanat parametrelerinin belirlenmesi,
- Farklı birincil/ikincil hava oranları için aksenal, radyal ve teğetsel akış hız profillerinin belirlenmesi,
- Girdap üreteçlerinin meydana getirdiği girdap etkisinin Taguchi yöntemiyle parametrik olarak incelenmesi,
- Girdap üreteçlerinin oluşturduğu basınç kayıplarının Taguchi yöntemi ile analiz edilmesi.

Yayınlarda girdap üreteçlerinin farklı tasarım parametrelerine göre meydana getirdikleri akış profillerinin soğuk test sistemlerinde ölçülmesi çalışmaları mevcuttur. Raj ve Ganesan 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 aksenal, teğetsel ve radyal hızları ölçmüşlerdir. Sonuç olarak 30° kanat açısına sahip bir girdap üreticinin alev kararlılığına yardımcı bir geri dönüş bölgesi oluşturduğunu bulmuşlardır. Hız ölçümlerinin yakıcı akış karakteristiğinin anlaşılmasındaki önemini ortaya koymuşlardır [12]. Bir başka çalışmada Shah ve arkadaşları girdap üretici kanat sayısının akış karakteristiği ve geri dönüş bölgesi üzerine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Kurulan soğuk sistemde 6 ve 8 kanat sayılarına sahip 45° kanat açılı iki aksenal girdap üreticini test etmişlerdir. 8 kanadın 6 kanada oranla daha makul bir geri dönüş bölgesi meydana getirdiği sonucuna varmışlardır. Yapılan basınç ölçümlerinde 8 kanatlı girdap üreticinin daha düşük basınç düşümüne neden olduğunu bulmuşlardır [13].

Yayınlarda girdap üretici kanat parametrelerinin akışı önemli ölçüde etkilediği vurgulanmıştır. Bir çalışmalarında Raj ve Ganesan girdap üretici kritik tasarım parametrelerinin kanat açısı, kanat sayısı ve kanat taban çapının kanat ucu çapına oranı olduğunu ifade etmişlerdir [14].

Raj ve Ganesan, yanma uygulamaları için, aerodinamik açıdan en uygun parametreleri tespit edebilmek amacıyla, farklı kanat açısı, sayısı ve kanat kökü ile ucu çapları arasındaki oranın akışa etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel veriler ile HAD analizleri karşılaştırılarak doğrulama işlemi yapılmıştır. HAD analizlerinde, düşük girdap sayılı akışlar için standart k- ϵ modelinin yeterli olduğunu belirtirken, yüksek girdap sayılı akışlar için Reynolds Stress modelinin daha doğru sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Girdap akışının karakteristiği, geri dönüş bölgesinin boyutları, geri dönüş bölgesinde tutulan kütle ve basınç düşümü ile değerlendirilmiştir. İncelenen tüm modeller arasında 45°'lik kanat açısı, 8 kanat sayısı ve 0,3 kök/uç çap oranına sahip girdap üretici alev kararlılığı ve geri dönüş bölgesinin boyutları açısından en iyi sonuçları vermiştir [14]. Ganesan yapmış olduğu bir başka çalışmada kanat açısının artması ile geri dönüş bölgesinin genişlik ve uzunluğunun arttığını belirtmiştir [15].

Sheen ve arkadaşları, farklı Reynolds sayıları ve kanat açılarında, radyal tip bir girdap üreticinin, girdap sayısı için yeni bir bağıntı belirlemek amacıyla deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmalarında kullanılan girdap üretici dairesel olarak dizilmiş 16 kanatçıktan oluşmaktadır. Reynolds sayıları 60 ile 60.000 arasında alınırken, kanat açıları da 0 ile 56 derece arasında değiştirilerek incelenmiştir. Hız ölçümü için optik bir yöntem olan Laser Doppler anemometresi kullanmışlardır. Akışın görselleştirilmesi ve geri dönüş bölgelerinin izlenebilmesi amacıyla duman beslemesi yaparak fotoğraflamışlardır. Çalışmanın sonucunda düşük Reynolds sayısı şartı altında, girdap uzunluğunun güçlü bir şekilde Reynolds sayısına ve kanat açısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [16].

Orfanoudakis ve arkadaşları, 100 kW ısı gücünde bir yakıcının farklı girdap sayılarına göre iç geri dönüş bölgesinin yapısını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda, 0,6 ile 0,9 aralığındaki girdap sayılarında iç geri dönüş bölgesinin davranışını incelemişler ve en az 0,65 girdap sayısı değerinde iç geri dönüş bölgesinde girdap halkalarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Girdap sayısı değerinde %60'lık bir artışın, iç geri dönüş bölgesi genişliğinde %30'luk bir artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Akışa katı parçacıklar beslenmesi durumunda

geri dönüş bölgesi genişliğinin tek fazlı akıştan %20 daha fazla olduğu görülmüştür. HAD analizlerinde türbülans modeli olarak standart k- ϵ ve RNG k- ϵ modelleri kullanılmıştır. Yüksek girdap sayılarında RNG k- ϵ modelinin daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Standart k- ϵ modeli aksenal hız bileşenlerini ve iç geri dönüş bölgesinin boyutlarını belirlemede uygunken, yüksek girdap sayısı değerlerinde, teğetsel ve radyal hız bileşenlerinin hesabında hatalı sonuçlar verebilmektedir [17].

Surjosatyo ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmalarında düşük girdaplı yakıcıların alev karakteristiğini farklı girdap üreteçleri kullanarak incelemişlerdir. Kanatları yatay eksenle 30° açı ile yerleştirilmiş 56 mm çapında, 6, 8 ve 10 kanat sayılarındaki farklı girdap üretici modelleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda 8 kanatlı girdap üretici modelinin en düşük CO salınım değerini sağlayarak en çevreci sonucu verdiğini belirtmişlerdir [18].

3.1. STD Tasarımı Ve Yapılan Hesaplamalar

Soğuk Test Düzeneği, yüksek sıcaklıkta çalışan bir Pülverize Kömür Yakma Sistemi'nin davranışını incelemek için tasarlanan, ancak atmosferik çevre şartlarında çalışan bir sistemdir. PKYS ile STD arasındaki sıcaklık farkı fiziksel koşulları önemli ölçüde değiştirmektedir. Örnek olarak standart bir kazanda yakıcı ağız bölgesinde sıcaklıklar 1000 °C mertebelerindeyken, soğuk test düzeneklerinde bu sıcaklık 15-20 °C seviyesindedir. Bu iki farklı sıcaklık aralığında havanın özgül kütlesi, dinamik ve kinematik viskoziteleri, özgül ısı gibi fiziksel ve termodinamik özellikleri değişiklik gösterecektir. Bu nedenle PKYS'de oluşacak koşullarla STD'de elde edilecek sonuçların benzeşebilmesi için, uygun boyutsuz sayıların eşitliği sağlanmalıdır. STD tasarım hesaplamalarında boyutsuz sayılar, fiziksel ve matematiksel formüller gibi birçok kanun ve eşitlikten yararlanılmıştır. Tasarım esnasında kullanılan her bir parametrenin ve ekipmanın seçimi bilimsel temellere dayandırılmıştır. Kabuller mümkün olduğunca en aza indirilerek sistem sonuçları gerçeğe yakınsanmıştır.

STD akış modellemesinde PKYS ile aerodinamik açıdan benzeşim sağlanmıştır. Aerodinamik açıdan benzeşimde PKYS'ye ait hava koşullarından STD'nin sahip olması gereken hava koşulları elde edilmiştir.

3.1.1. STD Ölçeklendirme ve Boyutlandırma Hesaplamaları

STD tasarımında sıcak sistemden soğuk sisteme geçiş yapılırken yayınlarda mevcut çalışmalarda aktarılan bir takım benzeşim kurallarından yararlanılmıştır. Smart ve arkadaşları yapmış oldukları 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 [19]. Smart ve arkadaşları ortaya koyduğu çalışmada yakıcıları ölçeklendirmek için iki pratik yöntemden yararlanılabileceğini ifade etmişlerdir. 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.

STD tasarlanırken sabit hız yönteminden yararlanılmıştır. PKYS'ye ait hız değerleri ile birincil ve ikincil hava kanallarının momentum akış hızları oranı korunarak sıcak sistemden soğuk sisteme modelleme yapılmıştır. Bir akışa ait momentum akış hızı;

$$M = \dot{m}V = \rho V^2 A \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada “ M ” momentum akış hızını, “ \dot{m} ” akışkanın kütleli debisini, “ ρ ” akışkan yoğunluğunu, “ V ” akışkan hızını ve “ A ” akışkanın aktığı kesit alanını ifade etmektedir. PKYS için birincil ve ikincil kanallarda momentum akış hızı değerleri hesaplanarak, STD'ye ait birincil ve ikincil kanalları aynı momentum akış hızı oranını koruyacak şekilde boyutlandırılmıştır.

PKYS tasarımına ait kanalların momentum değerleri ise şu sıra ile hesaplanmıştır. Öncelikle 250 kW kapasite için gerekli stokiyometrik hesaplar yapılmıştır. Hesaplamalara göre elde edilen sonuçlar Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: PKYS'ye ait bazı değerler.

Sitokiyometrik Hava Debisi	261	Nm ³ /h
Referans Sıcaklık	15	°C
Referans Yoęunluk	1,23	kg/m ³
Havanın Oksijen Oranı	21	%
Hava Fazlalık Katsayısı	1,2	-

PKYS yakma işleminde toplam gerekli yakma havasının %85'i ikincil kanaldan %15'i ise birincil kanaldan sisteme verilmektedir. Birincil kanaldan ayrıca bir miktar baca gazı birincil kanaldaki oksijen oranının düşürülerek kömürün kanal içerisinde tutuşmasını engellemek için sisteme geri beslenmektedir. Geri besleme debisi karışımdaki oksijen oranı tutuşma için gerekli en az oksijen oranı olan %12 değerini geçmeyecek şekilde ayarlanmaktadır. Geri besleme gaz debi hesaplamaları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Baca gazı geri besleme debisi hesabı.

Geri Besleme Kütlesel Debisi	Baca Gazı O₂ Oranı	Gaz Sıcaklığı	Özgül Kütle	Geri Besleme Hacimsel Debisi	Karışım O₂ Oranı
kg/s	%	°C	kg/m ³	m ³ /h	%
0,025	5	180	0,78	115,31	11

Geri besleme debisinin ve birincil hava debisinin toplanmasıyla birincil kanaldan geçen gaz debisi hesaplanır. Birincil kanal hızı PKYS ve STD için 15 m/s olarak tayin edilmiştir. Hesap sonucu elde edilen PKYS ve STD parametreleri ile momentumlar Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: PKYS ve STD'nin birincil kanallarına ait hesap sonuçları.

Sistem	Sıcaklık	Özgül Kütle	Hava Debisi	İç Çap	Alan	Hız	Momentum Akış Hızı
	°C	kg/m ³	m ³ /h	mm	m ²	m/s	kg.m/s ²
PKYS	180	0,78	74	67	0,003526	15	0,61
STD	15	1,23	551	114	0,010207	15	2,82

PKYS ve STD'ye ait birincil ve ikincil kanallar iç içe olacak şekilde eş eksenli tasarlandıkları için ikincil kanal simit şeklindedir. Ayrıca ikincil kanal üzerinde girdap üretici bulunmaktadır. Girdap üretici kanat uzunluğu ve genişliği gibi geometrik özellikleri nedeniyle kanal içerisinde hava geçişini bir miktar engeller. Bu

nedenle engel alanları ikincil kanal alanından çıkarılarak havanın geçtiği net kanal alanı hesaplanmıştır. Hesap sonucu elde edilen PKYS ve STD parametreleri ile momentumlar Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4: PKYS ve STD’nin ikincil kanallarına ait hesap sonuçları.

Sistem	Sıcaklık	Özgül Kütle	Hava Debisi	Et kalınlığı	İç Çap	Dış Çap	Alan	Hız
	°C	kg/m ³	m ³ /h	mm	mm	mm	m ²	m/s
PKYS	300	0,6	530	3	73	125	0,0069	22
STD	15	1,2	1445	3	125	200	0,0146	22

Kanal engelleme oranları ve hesap neticesinde elde edilen gerçek hız ve gerçek momentum akış hızı değerleri Tablo 3.5’de gösterilmektedir. Tablolardan hesaplanan ve gerçek hız değerleri arasında bir miktar farklılık olduğu görülebilmektedir.

Tablo 3.5: PKYS ve STD ikincil kanallarında engelleme, gerçek hız ve momentum akış hızı değerleri.

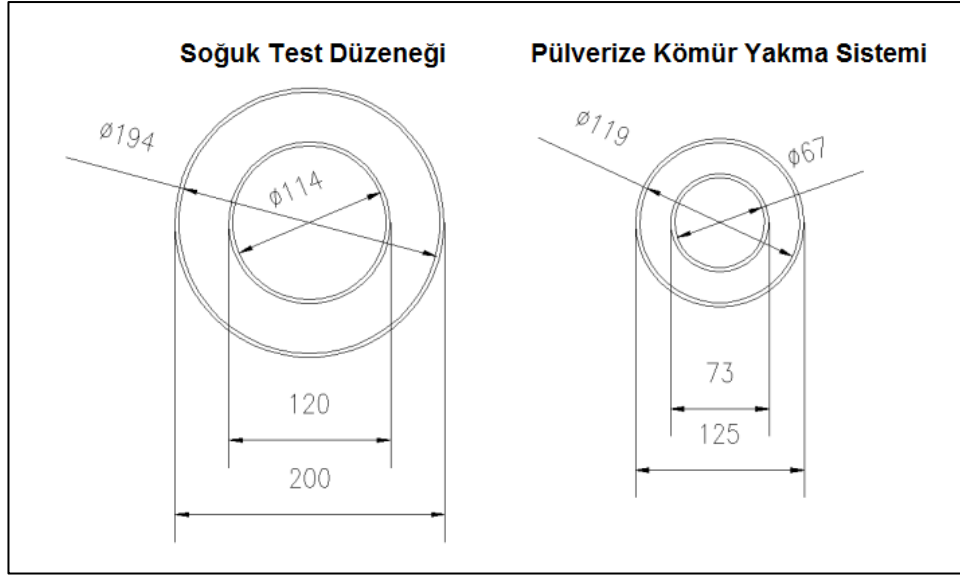
Sistem	Kanat Sayısı	Kanat Kalınlığı	Kanat Genişliği	Kanat Alanı	Blokaj Oranı	Gerçek Hız	Momentum Akış Hızı
	-	mm	mm	m ²	%	m/s	kg.m/s ²
STD	15	1	26	0,00039	2,1	22,4	9,0
PKYS	15	1	35	0,00053	7,6	22,8	2,0

Tablo 3.6’da tüm hesaplamalar sonucu elde edilen STD ve PKYS’ye ait birincil ve ikincil kanallardaki momentum akış hızları ile oranları yer almaktadır.

Tablo 3.6: STD ve PKYS kanallarının momentum akış hızları ve oranları.

Sistem	Birincil Kanal Momentum Akış Hızı	İkincil Kanal Momentum Akış Hızı	Momentum Akış Hızları Oranı
STD	2,82	9,0	0,3
PKYS	0,61	2,0	0,3

Hesaplamalar ve ölçeklendirme sonucunda STD ve PKYS’ye ait kanalların çapları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: STD ve PKYS kanal çapları.

3.2. STD Kurulumu ve Ekipman Seçimi

STD’de yanma bölgesini simüle etmesi amacıyla alüminyum profil iskelet üzerinde taşınan pleksiglas malzemeden bir hacim oluşturulmuştur. Hazne farklı boyut ve kalınlıklarda pleksi levhaların birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Hazneye birincil ve ikincil kanal olarak isimlendirilen, eş merkezli ve farklı çaplarda iki kanal bağlanmıştır. Halka kesitli dış kanalda girdap üretici bulunmaktadır. Birincil ve ikincil kanallara farklı kapasitelerde iki adet santrifüj fan ile hava beslenmektedir. Kömür tozunu simüle etmesi için sisteme bir silo üzerinden kum beslemesi de yapılabilmektedir. Pleksiglas haznenin çıkışında 160 mm çapında dairesel hava tahliye delikleri bulunmaktadır. Deliklere esnek çember ağızlı 1 m uzunluğunda 500 gr/m² kumaştan dikilmiş silindirik torba filtreler geçirilmiştir. Bu çalışma kapsamında tanecik hareketi incelenmediği için kum silosu ve torba filtreler kullanılmamıştır. Sistem en genel hatlarıyla bu şekilde tanımlanabilir.

STD pleksiglas hazne, taşıyıcı profiller ve bağlantı elemanları, birincil fan, ikincil fan ve ölçüm cihazlarından oluşur.

3.2.1. Pleksiglas Hazne ve Alüminyum Profil Bağlantıları

Pleksi, renkli, renksiz, saydam ve yarı saydam çeşitleri bulunan, kolay işlenebilen, hafif ve esnek yapısıyla taşınması kolay bir malzemedir.

Haznenin akış eksenine dik kesitinin boyutları, hazne cidarlarının hız profiline etkisi en az olacak şekilde belirlenmiştir. Haznenin giriş kesiti 1,5 m genişlikte ve 1 m yükseklikte dikdörtgen şeklinde tasarlanmıştır ve hazne akış eksenini boyunca genişlemektedir. Hazne tabanı filtrelerin bulunduğu bölüme kadar akış eksenine yaklaşık 7°'lik bir açı ile yerleştirilerek genişleme sağlanmıştır. Bu sayede akışın genişlemesi için yeterli hacmin sağlanması ve tanecik hareketinin incelendiği çalışmalarda (bu çalışmanın kapsamı dışında) kum taneciklerinin pleksi hazne içinde birikmesinin engellenmesi amaçlanmıştır.

Sistemde kullanılan pleksi malzemeler farklı boyutlarda levhalar ve dairesel kanallar olmak üzere iki farklı tipte ele alınabilir. Pleksi levhaların boyutları sistemin AutoCAD programı üzerinde çiziminin yapılması neticesinde elde edilmiştir. Bu çizim dosyasına göre de siparişi verilmiş ve imal ettirilmiştir. Pleksi kanallar ise girdap üretici iç ve dış çaplarına denk gelecek şekilde sırasıyla 120 mm ve 200 mm çaplarında ve 2 m uzunluğunda sipariş edilmiştir. Fanlar pleksi kanallara esnek hortumlarla bağlanmıştır.



Şekil 3.2: Pleksiglas hazne ve alüminyum profil bağlantıları.

Alüminyum profil, alüminyum malzemeden elde edilen, çeşitli fonksiyonları yerine getiren tırnak, yuva, kulak vb. gibi girinti ve çıkıntılara sahip ekstrüzyon yöntemi ile elde edilmiş kapalı veya açık formdaki üründür. Pleksiglas haznenin ve kanalların taşınabilmesi için alüminyum profiller kullanılmıştır.



Şekil 3.3: Bağlantı parçalarıyla yapılan bir köşe bağlantısı.

Profillerin birbirleriyle ve pleksiglas hazneyle bağlantılarının sağlanabilmesi için çeşitli bağlantı elemanları kullanılmıştır. Bu elemanlar sayesinde sistem sökülüp takılabilmek için esnekliği kazanarak üzerinde değişikliklerin yapılması mümkün olmuştur. Bağlantı elemanları ve bazı özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.7: Bağlantı elemanları.

Parça Adı	Standart	Adet
Sigma Profil Light	45x45 K10	36
Tırtıllı Somun	45x45x M8 K10	200
İmbus Civata	M8x16	200
Pul	M8	200
İki Yönlü Bağlantı Sacı	45x45 K10 Çinko	30
Üç Yönlü Bağlantı Sacı	45x45 K10 Çinko	40
Dört Yönlü Bağlantı Sacı	45x45 K10 Çinko	10
Köşe Bağlantı Dar	45x45 K10	30
Köşe Bağlantı Düz	45x45 K10 Gri Mat	30
Tekerlek	45x45 Ø50 Tekli Frenli	16
Gizli Bağlantı Parçası	45x45 90° K10	20

3.2.2. Birincil ve İkincil Fanlar ve Bağlantıları

Sistemde birincil ve ikincil olmak üzere iki adet fan kullanılmıştır. Bu fanların karakteristikleri sistemin hava debisi gereksinimlerinin hesaplanması sonucunda ortaya çıkmıştır. Fan seçiminde iki önemli ölçüt vardır. Bunlar fanın beslediği sistemdeki basınç düşümü ve gerekli hava debisi ihtiyacıdır. Fanlar seçilirken havanın geçtiği kanal ve bölümlerdeki basınç düşümleri hesaplanmış bu basınç düşümleri gerekli hava debileriyle birleştirilerek lazım olan minimum fan karakteristikleri elde edilmiştir. Belirli bir güvenlik payı da bırakılarak fan karakteristikleri belirlenmiştir. Bu kapasitelere göre uygun santrifüj fanlar seçilerek süreç tamamlanmıştır.

Kullanılan fanlar tek emiş ağızlı, akuple motorlu, santrifüj fanlardır. İkincil fanın çalışma debisi birincil hava fanınınkinden yaklaşık iki kat fazladır. Yine ikincil kanallar boyunca kesit değişimleri ve yerel kayıplar birincil kanaldan büyük olması nedeniyle biri büyük biri küçük olmak üzere 2 adet fan seçilmiştir. Birincil fan 1,1 kW, ikincil fan ise 3 kW motor gücüne sahiptir. Fanlar 50 Hz, yani 3000 d/d hızlarda güvenli ve sürekli olarak çalıştırılabilmektedir. Fanların devir ayarı için frekans dönüştürücüler kullanılmıştır.



Şekil 3.4: Birincil ve ikincil santrifüj hava fanları.

Tablo 3.8’de STD’de kullanılan fanlara ait bazı teknik özellikler yer almaktadır.

Tablo 3.8: Birincil ve ikincil fan özellikleri ve çalışma koşulları.

Fanlar	Birincil	İkincil
Tip	Santrifüj	Santrifüj
Debi (m ³ /h)	1300	2200
Basınç (mmSS)	300	450
Gücü (kW)	1,1	3
Voltaj (V)	380	380
Devir (d/d)	3000	3000

Fanların motor gücüne göre seçilen bu dönüştürücüler bir pano içerisine yerleştirilmiş ve pano kapağında yer alan potansiyometreler sayesinde fanların devirleri kontrol edilebilmektedir.



Şekil 3.5: Fan kontrol panosu.

Birincil ve ikincil hava fanlarından beslenen havalar pleksi kanallar ve esnek bağlantı hortumlarından geçtikten sonra pleksi hazneye ulaşmadan önce eş eksenli hale gelirler. İkincil kanal birincil kanalla eş eksenli olacak şekilde iç içe yerleştirilmiştir. İkincil hava, ikincil kanala 45° açıyla girer. Bunun nedeni ikincil hava fanından hızlıca gelen havanın 90°'lik sert dönüş yerine daha yumuşak dönüş yaparak yerel kayıpların ve hava akış düzensizliklerinin azaltılmasıdır. Hava akış düzensizliklerinin azaltılması için ayrıca ikincil kanal üzerine örme telden yapılmış halka şeklinde iki adet hava düzeltici yerleştirilmiştir. Birincil ve ikincil kanalların bağlantıları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Birincil ve ikincil kanal bağlantıları.

STD’de bütün bu ekipmanlara ilave olarak tanecikli çalışma olması durumunda kullanılmak üzere torba filtreler de bulunmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılmayan bu filtreler kum beslemeli çalışmalar sırasında kumun sistemde tutularak havanın tahliyesini mümkün kılmaktadır. Sistem tasarımında torba filtre seçimi fan kapasitelerini doğrudan etkilemesi ve çalışan sağlığı nedeniyle önem arz etmektedir. Filtrelerin yanlış seçilmesi, fanların istenen hava debilerini sağlayamamasına veya kum taneciklerinin sistemden kaçarak çeşitli solunum rahatsızlıklarına neden olmaktadır.

3.2.3. Ölçüm Ekipmanları

Soğuk test düzeneğinde başlıca hava hızı ölçümü yapılmaktadır. Bu ölçümler kanal içi ve hazne içi hız ölçümleri olarak ikiye ayrılabilir. İlk ölçüm pervane tip anemometre yardımı ile yapılan kanal içi hız ölçümleridir. Beslenen hava debilerinin bilinmesi için birincil ve ikincil kanal içerisinde hava hızlarının ölçülmesi gerekmektedir. İkinci ölçüm ise pleksiglas hazne içerisinde pitot tüpü yardımıyla yapılan hız ölçümleridir. Hazne üzerine açılan deliklerden akışa daldırılan kobra başlı pitot tüpü yardımıyla hız ölçümleri yapılarak aksenal, radyal ve teğetsel hız profilleri belirlenir.

Pervane tip anemometre kanal içi hava hızlarını ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Cihaz hava akımına dik olarak daldırılan bir pervaneden oluşmaktadır.

Pervane üzerinde bulunan bir kablo ile dijital bir anemometreye bağlanmaktadır. Hava hız değerleri bu cihaz üzerinden pratik ve hızlı şekilde okunmaktadır. Anemometre sapı teleskopik geçmeli olup ölçüm yapılacak derinliğe göre uzayıp kısalabilmektedir. Cihaz 40 m/s hıza kadar sağlıklı ölçüm yapabilmektedir. Cihazın kalibrasyon vb. işlemleri düzenli olarak takip edilmektedir.



Şekil 3.7: Pervane tip anemometre ile kanal içi hız ölçümü.

Anemometre ikincil kanal içerisine kanal üzerine açılan bir ölçüm deliğinden girmektedir. Birincil hava hızı da doğrudan birincil kanalın pleksi hazneye bağlandığı noktadan ölçülmektedir.

Pitot tüpü, bir akışkanın meydana getirdiği toplam ve statik basınç farklarından bu akışkana ait hızı ölçmeye yarayan cihazdır. Soğuk test düzeneğinde standart pitot tüpü esas itibarıyla yardımcı ve doğrulayıcı ölçüm cihazı olarak kullanılmıştır. Eksenel yönde hız ölçme kabiliyetinden yararlanılarak gerekli durumda diğer ölçüm cihazlarıyla ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan pitot tüpü 1 metre uzunluğundadır. Hazne üzerinde açılan deliklerden akışa daldırılarak ölçüm alabilmektedir. Pitot tüpü üzerine her 5 cm mesafede bir işaret konularak ölçümler her delik için ve pitot tüpü üzerindeki her bir çizgi için yapılarak hazne içerisindeki eksenel hız profilleri elde edilmiştir.



Şekil 3.8: Pitot tüpü ile aksenal hız ölçümü.

Ölçümler sırasında pitot tüpünün sarsılmadan sağlıklı ölçüm alabilmesi için alüminyum profilden bir adet destek ünitesi yapılmıştır. Ünite üzerinde bulunan dar köşe bağlantısı sayesinde istenilen ölçüm deliğinde pitot tüpü sabit olarak tutulabilmektedir.

Standart pitot tüpü ile ölçüm alma işlemi şu şekilde özetlenebilir: Pitot tüpü pleksiglas hazne üzerine açılmış her hangi bir ölçüm deliğinden akışa dik olarak daldırılır. Pitot tüpü üzerine her 5 cm mesafede bir şeritler yerleştirilmiştir. Bu şeritler okuma şeritleridir. Bu sayede ölçümün port üzerinde hangi derinlikten alındığı anlaşılabilir. Her bir şeritte ortalama 20 saniye beklenip dijital basınç farkı manometresinin pitot tüpünden gelen basınç değerlerini okuması sağlanır. Dijital manometre okunan basınç değerlerini hıza çevirerek 20 saniyelik ölçülen ortalama hız değerini ekrana yazdırır. Aynı işlem her bir şerit için 3 kere tekrar edilerek elde edilen okuma değerleri Excel programı üzerinden kayda alınır. Kayda alınan değerlerin ortalaması ve standart sapma değerleri hesaplanır. Gerekli görüldüğü takdirde ölçüm işlemi tekrarlanabilir. Elde edilen sonuçlarla ilgili grafikler oluşturularak ölçüm sonuçları yorumlanmaya hazır hale getirilir.

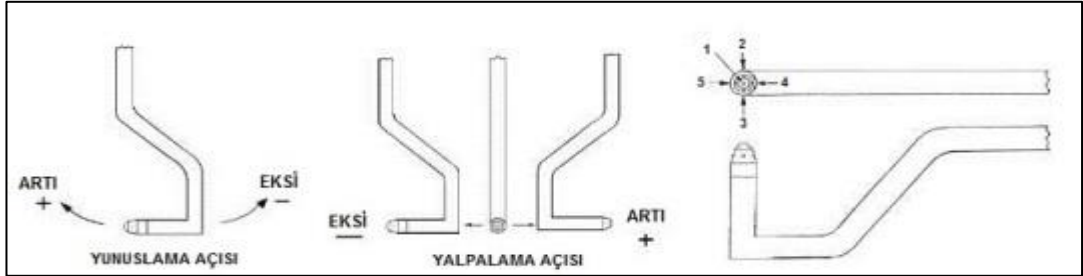
Kobra başlı pitot tüpü akışın yönünü tayin ederek akışa ait aksenal, radyal ve teğetsel hız bileşenlerinin ölçülmesini mümkün kılan bir cihazdır. Yayınlarda kobra başlı pitot tüpü, 5-delikli pitot tüpü gibi farklı isimlerle bilinmektedir. Daha çok

havacılık gibi alanlarda uçakların yere göre burun ve kanat açılarının tayininde kullanılır [12–14]. Üç ve yedi delikli gibi farklı çeşitleri de mevcuttur.



Şekil 3.9: Kobra başlı pitot tüpünün görünüşü.

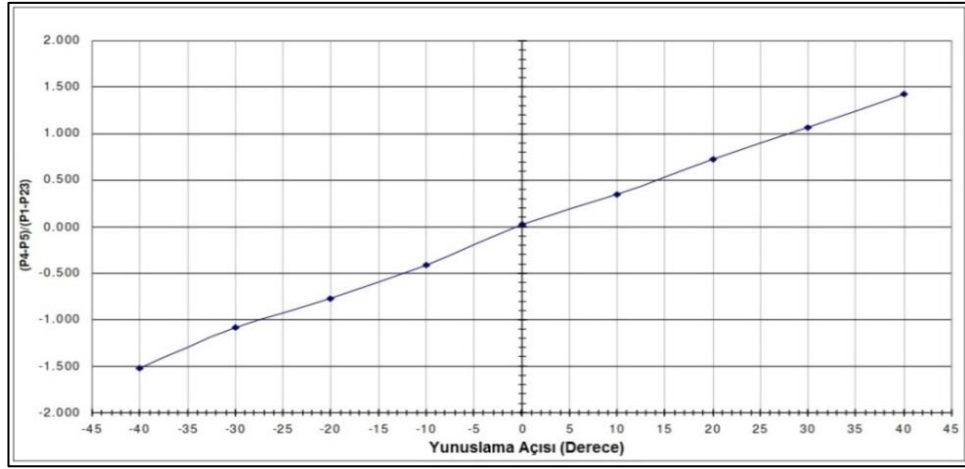
Çok boyutlu bir akışta akışın bir noktasındaki hız bileşenlerini bulabilmek için o noktaya ait yalpalama (yaw) ve yunuslama (pitch) açılarının bilinmesi gerekmektedir. Kobra başlı pitot tüpünün sağ ve sol yanındaki 2 ve 3 numaralı delikler yalpalama açısının tayininde kullanılır. Üst ve altında bulunan 4 ve 5 numaralı delikler ise yunuslama açısının hesaplanmasında kullanılır. Proben tam ortasındaki 1 numaralı delik ise o noktadaki toplam basıncın ölçülmesinde kullanılır.



Şekil 3.10: Yunuslama, yalpalama açıları ve delik numaralarının gösterimi.

Kobra başlı pitot tüpü yardımıyla yalpalama ve yunuslama açılarının değeri uygulanan bir dizi işlem sonucunda tayin edilebilmektedir. Yalpalama açısının belirlenmesi için akışa dik daldırılan pitot tüpü 2 ve 3 numaralı deliklerdeki basınçlar eşit olana kadar döndürülür. Basınçların eşitlendiği yerdeki döndürme açısı değeri o akışa ait yalpalama açısıdır. Döndürme açısı değeri pitot tüpünün takılı bulunduğu platform üzerindeki gönyeden ölçülebilmektedir (Şekil 3.12). Yunuslama açısının değeri ise hesaplama yöntemi ile bulunmaktadır. Bunun nedeni yunuslama açısının değerini okumak için döndürülen probun akış içerisindeki konumunun değişecek

olmasıdır. Yunuslama açısının hesap edilebilmesi için öncelikle 4 ve 5 numaralı deliklere ait basınç farkı değeri dijital basınç farkı manometresi okunarak not edilir. Daha sonra 1 ve 2 numaralı deliklerdeki basınç değerleri de okunarak not edilir. Bu işlemlerin ardından okunan değerler ve proba ait kalibrasyon eğrileri yardımıyla yunuslama açısı değeri hesap edilebilmektedir. 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı deliklerden okunan basınç değerleri yardımıyla hesaplanan $(P_4-P_5)/(P_1-P_{23})$ değerine eğri üzerinde karşılık gelen açı değeri yunuslama açısı olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Yunuslama açısı kalibrasyon eğrisi.



Şekil 3.12: Yalpalama açısı okuma gönyesi.

Yalpalama ve yunuslama açılarının hesaplanmasının ardından akış hız değerleri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir:

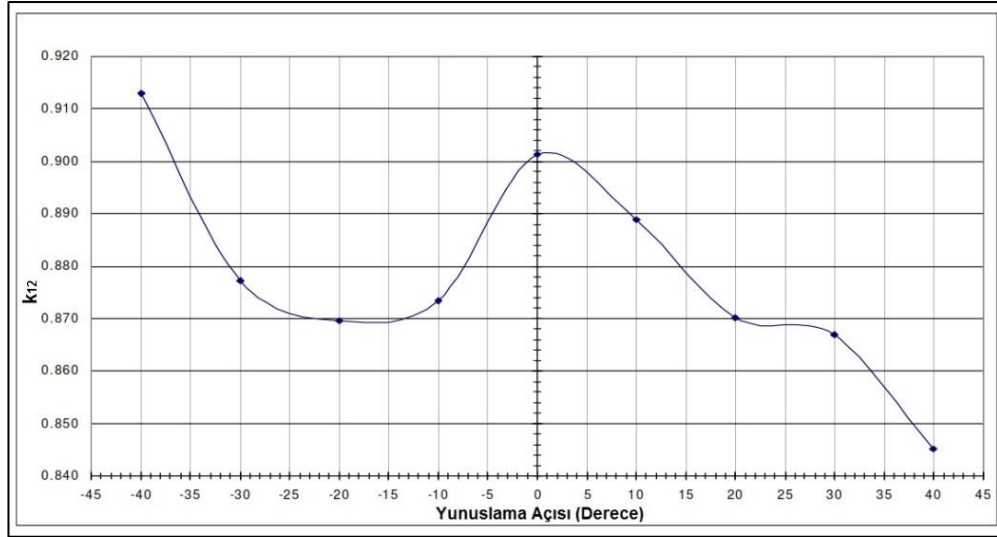
$$\bar{U} = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho * k_{12}}} \quad (3.2)$$

$$U = \bar{U} \cos \alpha \cos \beta \quad (3.3)$$

$$V = \bar{U} \sin \beta \quad (3.4)$$

$$W = \bar{U} \cos \beta \sin \alpha \quad (3.5)$$

Burada; \bar{U} ölçüm noktasındaki bileşke hız, U aksenal hızı, V radyal hız, W teğetsel hız, $P_1 - P_2$ 1 ve 2 No'lu deliklerden okunan basınç farkı, α yalpalama açısı, β yunuslama açısı, ρ havanın yoğunluğu, k_{12} kalibrasyon eğrilerinden okunan dinamik basınç sabitidir.



Şekil 3.13: Yunuslama açısına göre k_{12} değeri eğrisi.

3.3. STD Ölçümleri ve Değerlendirme

STD'de deneysel ve parametrik bir çalışma yapıldığı için veri toplama ve hesaplama işlemleri sonuçların doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi açısından önemlidir. Bu bölümde deneylerde kullanılan girdap üreteçlerinin tasarım ve seçimi, deney durumlarının oluşturulması, belirsizlik analizi, ölçüm ve veri işleme ile deney sonuçları konularına yer verilmiştir.

3.3.1. STD'de Test Edilen Girdap Üreteci Tasarımları

Yaynlarda girdap üreteçleri için çeşitli geometrik parametreler kullanılmaktadır. Bunlardan dört tanesi soğuk düzende test edilen girdap üreteçlerinin geometrik özelliklerini ifade etmek için seçilmiştir: kanat açısı, kanat sayısı, kanat genişliği ve kanat eğim açısı. Tüm bu değişkenlerin yakıcının oluşturduğu akış alanı üzerinde etkileri mevcuttur ve birbirleriyle olan etkileşimlerini incelemek gerekmektedir. Mevcut yakıcı uygulamalarında kanat açısı için genellikle 30° ile 60° , kanat sayısı için 12 ile 18, kanat eğim açısı için 0° ile 20° arasında seçilen değerler görülebilmektedir. Her bir değişken için bu aralıklarda farklı değerler seçilebilir ve buna uygun tasarım geliştirilebilir.

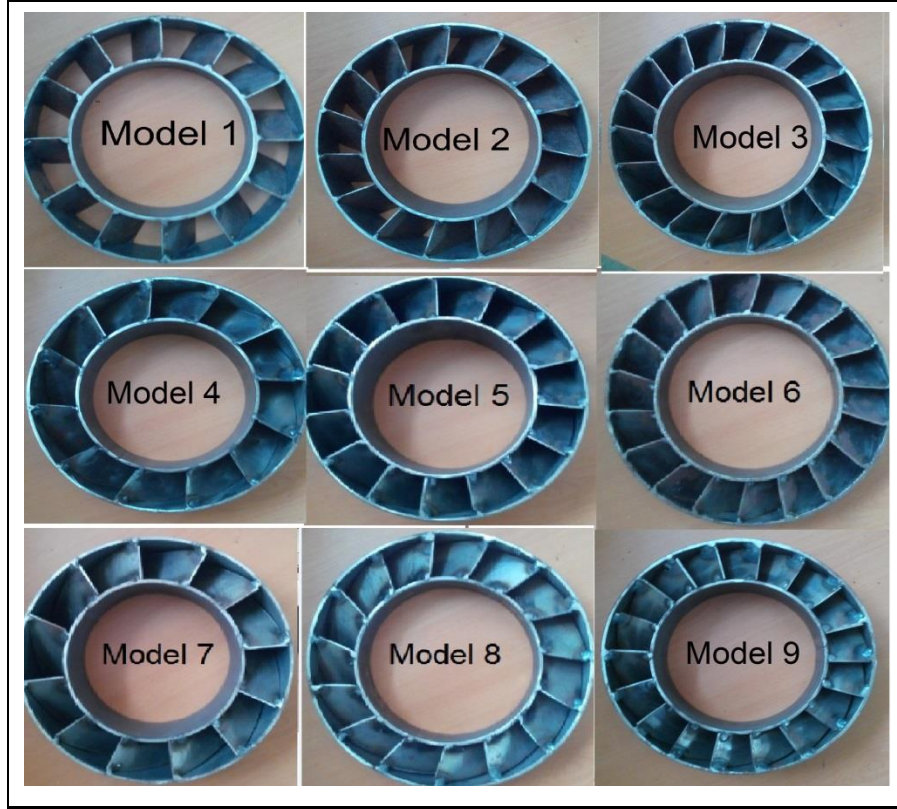
Tablo 3.9: Girdap üreteç özellikleri ve farklı değerleri.

Değer	Kanat Açısı	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği	Kanat Eğim Açısı
	(°)	(adet)	(mm)	(°)
1	30	12	35	0
2	45	15	50	10
3	60	18	65	20

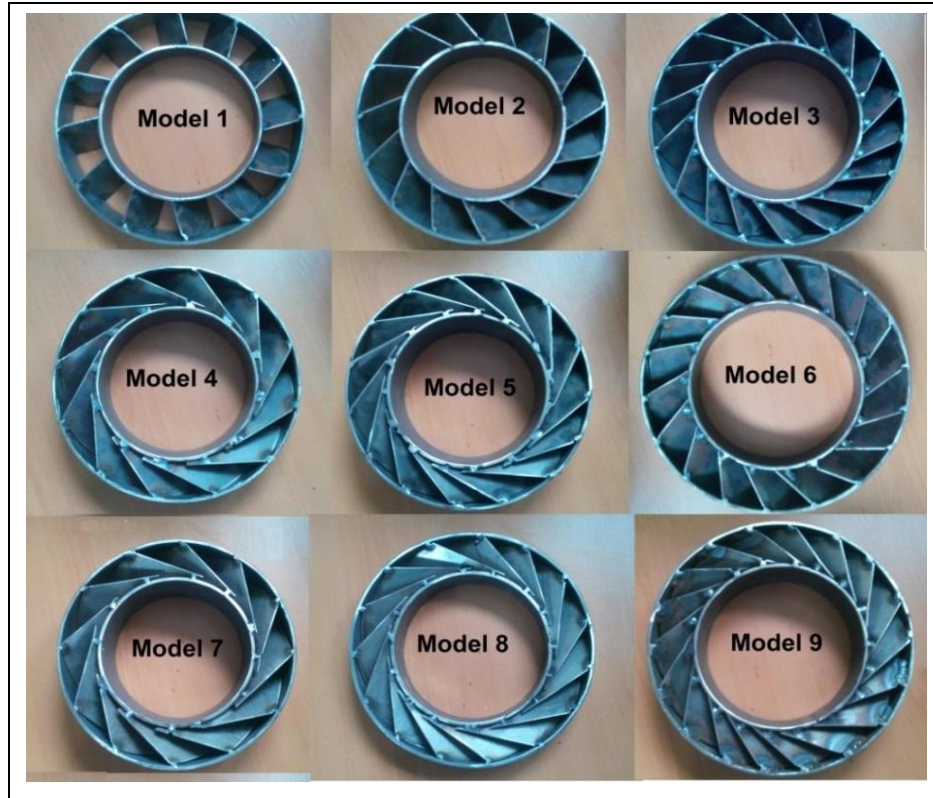
Girdap üreteçlerinde denenmek üzere her bir değişken için 3 farklı değer belirlenmiştir. Yayınlarda sık kullanılan değerler seçilmiştir. Her bir değişkenin ve bu değişkenlere ait farklı değerlerin tasarım üzerindeki etkilerinin incelenmesi için teker teker denenmesi gerekmektedir. Değişken sayısı m, değer sayısı n olmak üzere tasarlanan bir sistemde n^m tane birbirinden farklı tasarım elde edilebilmektedir. STD’ de kullanılan girdap üreteçleri için düşünüldüğünde bu değer $3^4=81$ olmaktadır. Bu durumda 81 farklı girdap üreticinin STD’de denenmesi gerekmektedir. Bu durum hem girdap üreteçlerinin üretilmesi, hem de bu kadar çok sayıda modelin test edilmesi açısından oldukça zordur. Taguchi yöntemi ile en iyi performans gösteren modeli yeterli sayıda test ile belirlemek mümkündür. Taguchi yöntemi Dr. Genichi Taguchi tarafından 1950’lerde süreç optimizasyon tekniği olarak geliştirilmiştir. Taguchi yöntemi farklı parametrelerin, farklı değerleri arasından en iyi kombinasyonu saptamak için oldukça kullanışlı bir algoritmadır. Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu kullanılarak çok daha az sayıda deneysel çalışmayla sonuca ulaşmak mümkündür [20].

Kullanılan bu yöntemle göre hesaplanan 81 modelin test edilmesi yerine, 9 modelin test edilmesi aynı etkilerin incelenmesi için yeterli olmaktadır.

Tablo 3.10’de STD için farklı girdap üretici tasarımlarına ait çeşitli geometrik özellikler görülebilmektedir.



Şekil 3.15: STD’de test edilen girdap üretici modelleri giriş kesitleri.



Şekil 3.16: STD’de test edilen girdap üretici modelleri çıkış kesitleri.

Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da STD’de test edilen 9 girdap üretici modelinin ön ve arka görünüşleri gösterilmektedir. Her bir model sistemde test edilerek en uygun model, girdap sayısı, minimum basınç düşümü ve hız profili gibi ölçütlere göre belirlenmiştir.

Taguchi yönteminde kayıp fonksiyonu olarak adlandırılan bir fonksiyon istenen 3 amaca göre ifade edilmektedir. Bu amaçlar “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal olan en iyi” olarak isimlendirilmektedir.

“En küçük en iyi” olduğu durum için [20]:

$$S/G=-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.6)$$

“En büyük en iyi” olduğu durum için:

$$S/G=-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.7)$$

Ve “nominal olan en iyi” olduğu durum için:

$$S/G=10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} - \frac{1}{n} \right) \quad (3.8)$$

formülleri kullanılmaktadır. Burada S/G sinyal/gürültü oranını, n ölçüm (tekrar) sayısını, y_i ölçüm değerini, \bar{y} ölçülen değerlerin aritmetik ortalamasını ve σ^2 varyansı göstermektedir.

3.3.2. Deney Setleri Oluşturma

Soğuk test düzeneğinde asıl incelenen konu farklı girdap üretici tasarımlarının akış profiline olan etkisidir. Farklı hava hızları için girdap üreteçlerinin meydana getirdiği akış alanları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bununla birlikte bir girdap üreticinin farklı hava hızları karşısındaki davranışının incelenebilmesi ve oluşturduğu akış alanındaki farklılıkların da anlaşılabilmesi adına aynı girdap

üretisinde iki farklı birincil ve ikincil hava hızları için ölçümler tekrarlanmıştır. Kullanılan hava hızları ve hava debi oranları Tablo 3.11'de gösterilmiştir.

Tablo 3.11: STD deney tablosu.

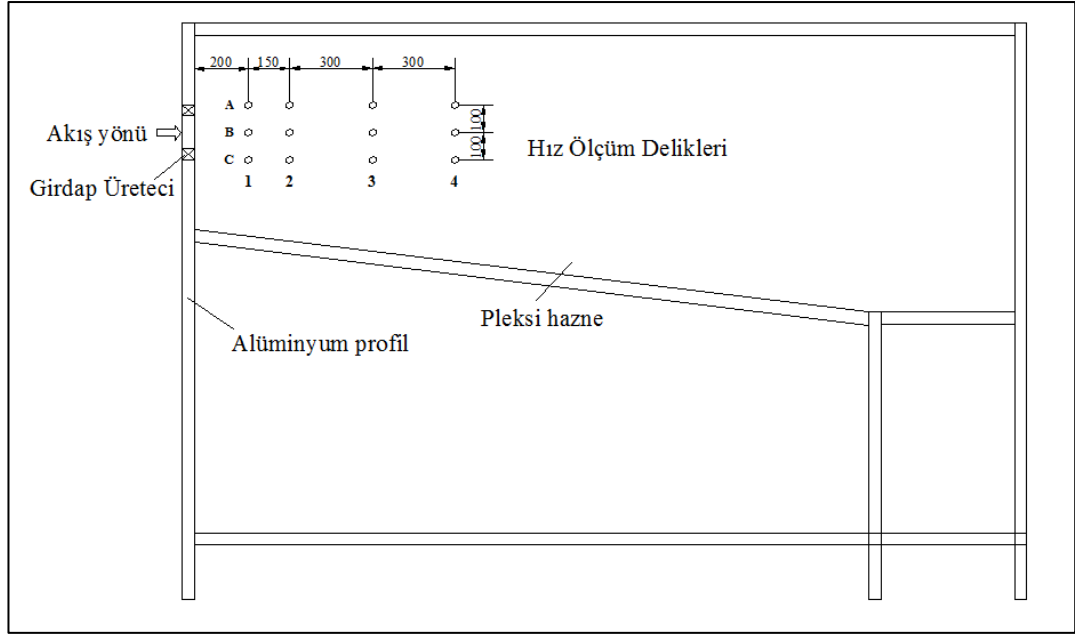
Test No	Test Kodu	Girdap Üretici	Birincil Hava			İkincil Hava		
			Hızı (m/s)	Oranı (%)	Reynolds Sayısı	Hızı (m/s)	Oranı (%)	Reynolds Sayısı
1	M1-1	Model - 1	15	30	123.300	22	70	120.560
2	M1-2	Model - 1	13	25	106.860	24,5	75	134.041
3	M2-1	Model - 2	15	30	123.300	22	70	120.560
4	M2-2	Model - 2	13	25	106.860	24,5	75	134.041
5	M3-1	Model - 3	15	30	123.300	22	70	120.560
6	M3-2	Model - 3	13	25	106.860	24,5	75	134.041
7	M4-1	Model - 4	15	30	123.300	22	70	120.560
8	M4-2	Model - 4	13	25	106.860	24,5	75	134.041
9	M5-1	Model - 5	15	30	123.300	22	70	120.560
10	M5-2	Model - 5	13	25	106.860	24,5	75	134.041
11	M6-1	Model - 6	15	30	123.300	22	70	120.560
12	M6-2	Model - 6	13	25	106.860	24,5	75	134.041
13	M7-1	Model - 7	15	30	123.300	22	70	120.560
14	M7-2	Model - 7	13	25	106.860	24,5	75	134.041
15	M8-1	Model - 8	15	30	123.300	22	70	120.560
16	M8-2	Model - 8	13	25	106.860	24,5	75	134.041
17	M9-1	Model - 9	15	30	123.300	22	70	120.560
18	M9-2	Model - 9	13	25	106.860	24,5	75	134.041

3.3.3. Ölçümler ve Veri İşleme

Soğuk test sisteminde ölçüm yapmak ve data toplamak için pleksiglas hazne üzerine toplam 12 adet hız ölçüm deliği açılmıştır. Bu ölçüm delikleri hazne içerisindeki akış profilini en az sayıda delikle en doğru şekilde elde edebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Soğuk test düzeneği üzerine açılan ölçüm deliklerinin dizilimi Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Ölçüm delikleri yatayda 4 sıra, düşeyde 3 sıra olacak şekilde açılmıştır. İhtiyaca göre miktarları yeni delikler açmak suretiyle artırılabilir. Numaralandırma yatay yönde rakam, düşey yönde harf ile yapılmıştır. Herhangi bir deliğin konumu bir harf ve rakamdan oluşan bir kombinasyonla belirlenebilmektedir. A ve C ölçüm sıralarından alınan ölçümler ile akışın merkezinden geçen B eksenine göre simetrik olup olmadığı kontrol edilirken, B eksenini boyunca alınan ölçümler ile asıl hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Düşey

sıralar arası mesafe sırasıyla 150 mm, 300 mm ve 300 mm, yatay sıralar arası boşluk ise 100 mm olacak şekilde ölçüm delikleri açılmıştır. Akışın tam merkezindeki hız profiline görülebilmesi için delikler yakıcı eksenle eş merkezli ve radyal yönde simetrik olacak şekilde açılmıştır.

Pleksi hazne içinde hız ölçümleri yapılırken bölüm 3.2.3.'de anlatılan kobra başlı pitot tüpü kullanılmıştır. Pitot tüpü üzerine seviye çizgileri işaretlenmiştir. Her seviye için hız ölçümleri yapılarak girdap üreticinin radyal ekseni boyunca olan alan taranmıştır. Girdap üretici merkezinin 20 cm gerisinden başlayarak 20 cm ilerisine kadar uzanan bir çizgide belirli mesafelerle ölçümler yapılmıştır. Gerekli durumlarda hız dağılımını daha net görebilmek için ölçüm mesafeleri artırılıp azaltılmıştır. Bir delikte bir nokta için ölçüm alma süreci şu şekilde gerçekleşmektedir: Kobra başlı pitot tüpünün 2 ve 3 numaralı deliklerindeki basınç eşit olana kadar ($P_2=P_3$) kendi ekseni etrafında yukarı ya da aşağı yönde döndürülür. Basınç farkının sıfır ya da minimum olduğu yerdeki dönme açısı yalpalama açısı olarak kaydedilir. Daha sonra aynı yalpalama açısı için pitot tüpünün 4 ve 5 numaralı deliklerinin basınç farkı (P_4-P_5) 10 saniyelik periyotlarla 3 kere ölçülerek kaydedilir. Bir sonraki aşamada pitot tüpünün 1 ve 2 numaralı deliklerindeki basınç farkı (P_1-P_2) aynı şekilde 3 kere ölçülerek kaydedilir. $(P_4-P_5)/(P_1-P_2)$ oranı ve pitot tüpüne ait kalibrasyon eğrilerinden o noktaya ait yunuslama açısı da tayin edilmiş olur. Daha sonra hesaplanan yunuslama açısına karşılık gelen hız basınç katsayısı kalibrasyon eğrilerinden okunur ve son olarak denklem (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) yardımıyla o ölçüm noktasına ait tüm hız bileşenleri hesap edilir. Daha sonra hesaplar grafiğe dökülerek istenen düzlemde akış hız profili elde edilir. Hız profilleri elde edildikten sonra eksenel ve teğetsel momentum akıları hesap edilerek girdap üreticilerine ait girdap sayıları hesaplanmıştır.



Şekil 3.17: Soğuk test düzeneği ölçüm deliklerinin dizilimi.

3.3.4. Belirsizlik Analizi

Ölçümlerde kesinlik matematiksel olarak belirsizlik cinsinden ifade edilebilir. Belirsizlik belirli bir güvenilirlik seviyesiyle ölçülmek istenen değer civarındaki gerçek değeri de içeren bir aralık olarak tanımlanır. Ölçüm belirsizliği %95 güvenilirlik seviyesinde:

$$\text{Gerçek Değer} = X \pm U_{95} \quad (3.9)$$

Burada “ X ” ölçülen değeri, “ U_{95} ” ise gerçek değer %95 ihtimalle ölçülen değer civarında olduğunu ifade eden belirsizlik miktarıdır. Bir ölçümde ölçüm hatası şu şekilde ifade edilebilir:

$$\xi = \mu + \varepsilon \quad (3.10)$$

Burada “ ξ ” toplam ölçüm hatasını, “ μ ” sistematik ölçüm hatasını ve “ ε ” ise rastgele (random) ölçüm hatasını ifade eder. Bir ölçüm sonucu için standart sapma şu formül ile ifade edilir:

$$S_x = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(X_k - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (3.11)$$

“ S_x ” ölçülen değerlerin standart sapması, “ X_k ” ölçülen değeri, “ \bar{X} ” ölçüm ortalamasını, “ N ” ise örnekleme sayısını göstermektedir. Toplam ölçüm belirsizliği rastgele ve sistematik ölçüm belirsizlikleri yardımıyla şu şekilde ifade edilir:

$$U_{95} = 2 \sqrt{\left(\frac{\mu}{2}\right)^2 + (S_x)^2} \quad (3.12)$$

STD’de hızlar basınç ölçümleri üzerinden dolayı olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla belirsizliğe sebep olan etken basınç ölçümleridir. Basınç ölçümü için kullanılan cihazın teknik bilgileri şu şekildedir:

Tablo 3.12: Ölçümlerde kullanılan basınç farkı manometresinin teknik özellikleri.

Ölçüm Genişliği	0 t1 +25 hPa
Kesinlik	± 0,02 hPa
Çözünürlük	0,01 hPa
Maks. Yük	200 hPa

Hız ölçümleri basınç ölçümlerine bağlı olmaktadır. Herhangi bir noktadaki hız değeri aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$V = \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho * k}} \quad (3.13)$$

Burada “ V ” hızı, “ ΔP ” dinamik basıncı, “ ρ ” akışkanın yoğunluğunu ve “ k ” ise kalibrasyon eğrisinden gelen katsayıyı ifade etmektedir. Formülden görüleceği üzere hız basıncın kareköküyle orantılıdır. Bu nedenle basınç ölçümündeki belirsizlik hız ölçümünde biraz daha azalmış olacaktır. Cihaza ait ölçüm belirsizliği olan 0,02 hPa değer hız olarak 1,84 m/s’ye denk gelmektedir. Hızların 2-3 m/s gibi düşük değerlerde olduğu uç bölgelerde bu nedenden ötürü ölçüm belirsizlikleri

yükselmektedir. Örnek olarak 1. durum hız ölçümleri B1 ölçüm deliği için yapılan bileşke hız ölçümlerindeki belirsizlikler aşağıdaki tabloda verilmektedir:

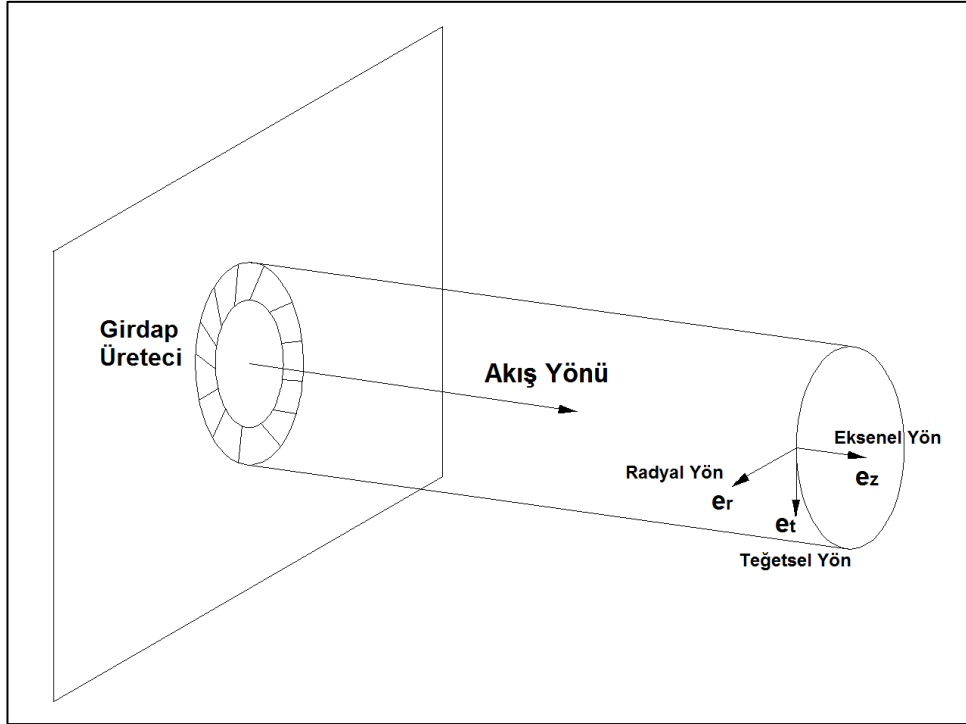
Tablo 3.13 Ölçüm belirsizliği hesabı.

Ölç. Yeri	Ölçüm Tekrarı			Ort.	Std. Sap.	Sistemik Ölçüm Hatası		U ₉₅	Belirsizlik	
	1.	2.	3.			Pa	m/s		Basınç Ölçümü Kaynaklı	Toplam Belirsizlik
mm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	Pa	m/s	m/s	%	%
-130	17,8	18,1	17,9	17,9	0,20	2,00	1,84	1,9	2	10
-120	24,5	23,4	22,2	23,4	1,13	2,00	1,84	2,9	10	12
-110	27,2	26,0	26,2	26,5	0,62	2,00	1,84	2,2	5	8
-100	26,0	26,1	25,2	25,8	0,51	2,00	1,84	2,1	4	8
-90	22,5	23,8	20,5	22,3	1,67	2,00	1,84	3,8	15	17
-80	18,2	17,1	18,0	17,8	0,57	2,00	1,84	2,2	6	12
-70	11,2	13,2	10,8	11,8	1,29	2,00	1,84	3,2	22	27
-60	9,1	8,5	8,0	8,6	0,54	2,00	1,84	2,1	13	25
-40	5,8	5,8	5,2	5,6	0,36	2,00	1,84	2,0	13	35
0	6,4	6,7	6,4	6,5	0,22	2,00	1,84	1,9	7	29
40	9,3	8,9	9,1	9,1	0,19	2,00	1,84	1,9	4	21
60	22,0	21,4	21,2	21,5	0,43	2,00	1,84	2,0	4	9
70	24,0	24,3	25,6	24,6	0,83	2,00	1,84	2,5	7	10
80	27,2	28,1	28,0	27,8	0,47	2,00	1,84	2,1	3	7
90	25,1	25,1	25,4	25,2	0,18	2,00	1,84	1,9	1	7
100	20,4	20,8	21,5	20,9	0,55	2,00	1,84	2,1	5	10
110	15,1	13,7	16,7	15,2	1,48	2,00	1,84	3,5	19	23
120	10,9	11,1	10,7	10,9	0,22	2,00	1,84	1,9	4	17
130	7,9	8,3	9,0	8,4	0,55	2,00	1,84	2,1	13	25
							ORT.	2,35	8,3	16,6

Tablo 3.13'e göre, basınç ölçümü kaynaklı belirsizlikler %8,3 olarak hesaplanırken toplam belirsizlikler %16,6 olarak hesaplanmıştır.

3.3.5. Hız Ölçüm Sonuçları

Kurulan test düzeneğinde 9 adet girdap üreticinin her biri iki farklı birincil ve ikincil hava debisi oranları için ayrı ayrı test edilmiştir. Her testte, her ölçüm noktası için aksenal, radyal ve teğetsel hız bileşenleri ölçülerek aksenal mesafeye bağlı grafikleri çizdirilmiştir. Aksenal, radyal ve teğetsel hız bileşenleri Şekil 3.18’de gösterilmektedir.



Şekil 3.18: Aksenal, radyal ve teğetsel hız bileşenlerinin gösterimi.

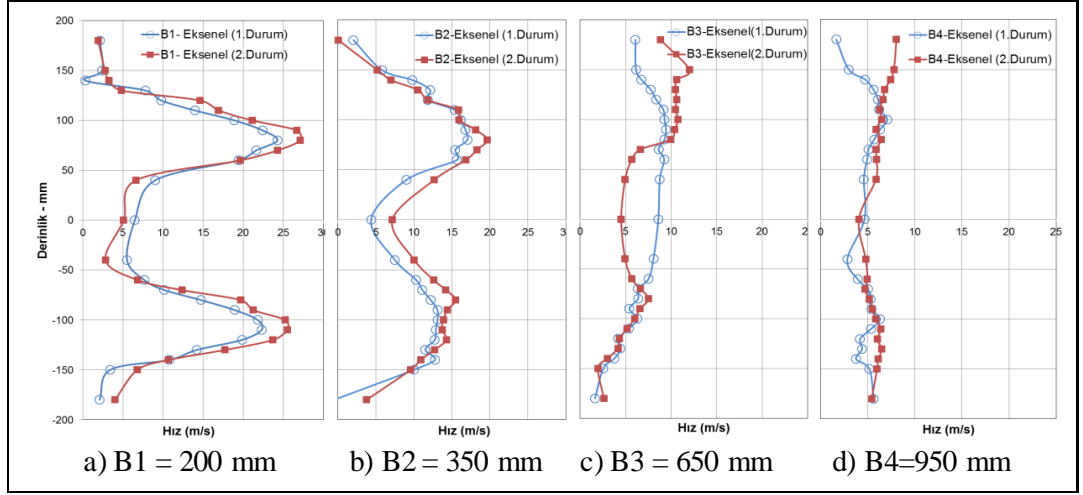
Ölçüm sonuçlarına göre birincil ve ikincil hava hızlarının değiştirilmesi kanat açısı 30° olan girdap üreticilerinde belirgin bir hız profili değişimine neden olmazken kanat açısı 45° ve 60° olan girdap üreticilerinde akışın daha erken açılmasına ve dağılmasına neden olmuştur. Girdap mesafeleri azalmış ve akış formu hızlıca dağılarak hava hızları oldukça düşmüştür.

Ölçümlerde elde edilen en yüksek aksenal hız değeri 30 m/s mertebelerinde iken radyal hız değeri 11 m/s, teğetsel hız ise 17 m/s’dir. En yüksek bileşke hız değeri de 34,6 m/s olarak kaydedilmiştir. M1, M2 ve M3 No’lu girdap üreticilerinde aksenal ve teğetsel hızlar daha yüksek iken kanat açıları 60° olan M8 ve M9 No’lu girdap üreticilerinde radyal hız değerleri görece daha yüksek olarak ölçülmüştür.

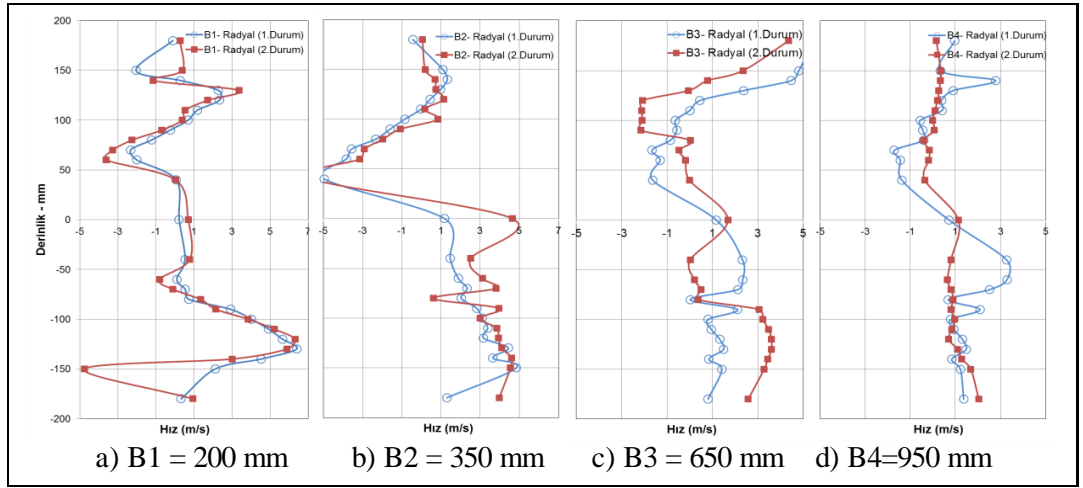
Kanat açılarının hız profili üzerine olan etkileri incelendiğinde kanat açısı arttıkça hız profilinin genişleyerek dağıldığı görülmüştür. Bununla beraber geri dönüş bölgesi de açılarak belirsizleşmektedir. En yüksek aksel ve teğetsel hız profilleri 30° kanat açılı girdap üreteçlerinde ölçülmüştür. En yüksek radyal hız profilleri ise 60° kanat açılı girdap üreteçlerinde gözlemlenmiştir. M8 ve M9 No'lu girdap üreteçlerinde radyal hızın bazı bölgelerde aksel hızdan yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı kanat açısına sahip girdap üreteçlerinde kanat sayısı arttıkça M1, M2, M3 için aksel hız profili genişliğinde artış olmazken, M4, M5, M6 için genişlik azalmış, M7, M8, M9 için ise profil genişliği artarak akış daha fazla dağılmıştır. Ölçümler sonucunda 30° kanat açısına sahip girdap üreteçlerinin yanma için daha uygun aksel ve teğetsel hız profili ile daha belirgin geri dönüş alanı meydana getirdikleri bulunmuştur. Değerlerinin değişmesine rağmen meydana gelen hız profillerinin değişmemesinden ötürü kanat genişliği ve kanat eğim açısının akış hız profilleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

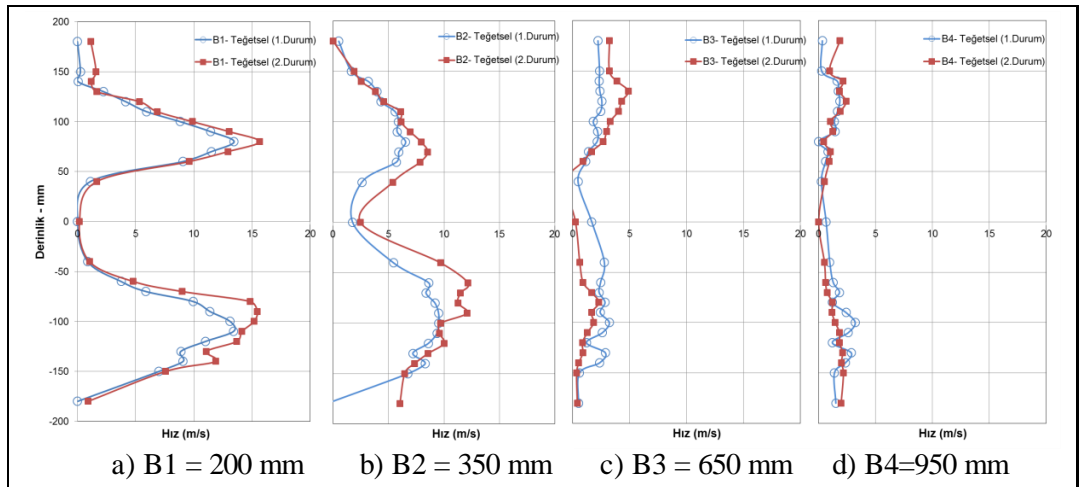
Aşağıda tüm girdap üreteçleri için iki farklı birincil/ikincil hava oranlarına göre yapılan testler sonucunda aksel mesafe boyunca hesaplanan aksel, radyal ve teğetsel hız profilleri verilmiştir. Grafiklerde aksel mesafe boyunca sıralanmış olan B1, B2, B3 ve B4 deliklerinden alınan ölçüm sonuçları yan yana dizilerek verilmiştir. Deliklerin aksel mesafe olarak girdap üreticiden uzaklıkları sırasıyla 200 mm, 350 mm, 650 mm ve 950 mm olarak belirlenmiştir.



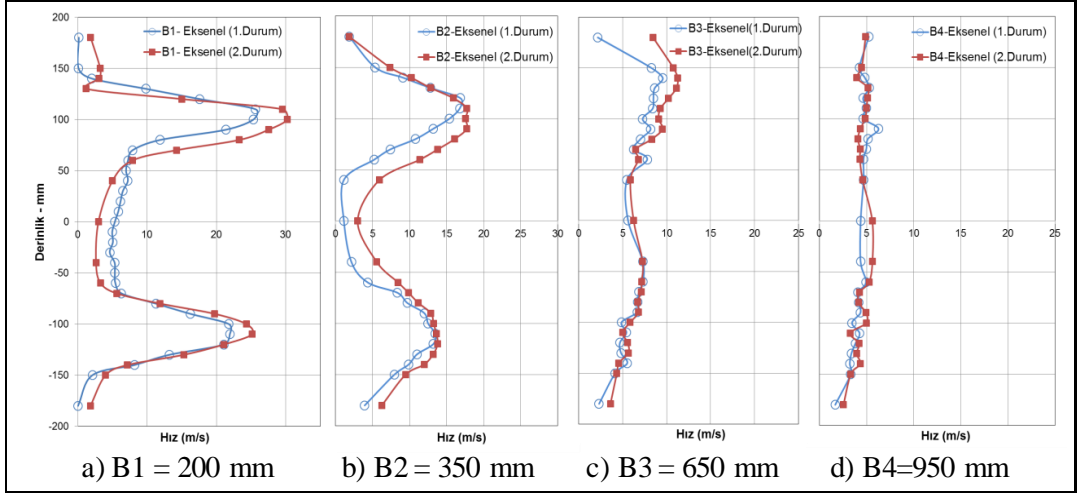
Şekil 3.19: M1 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



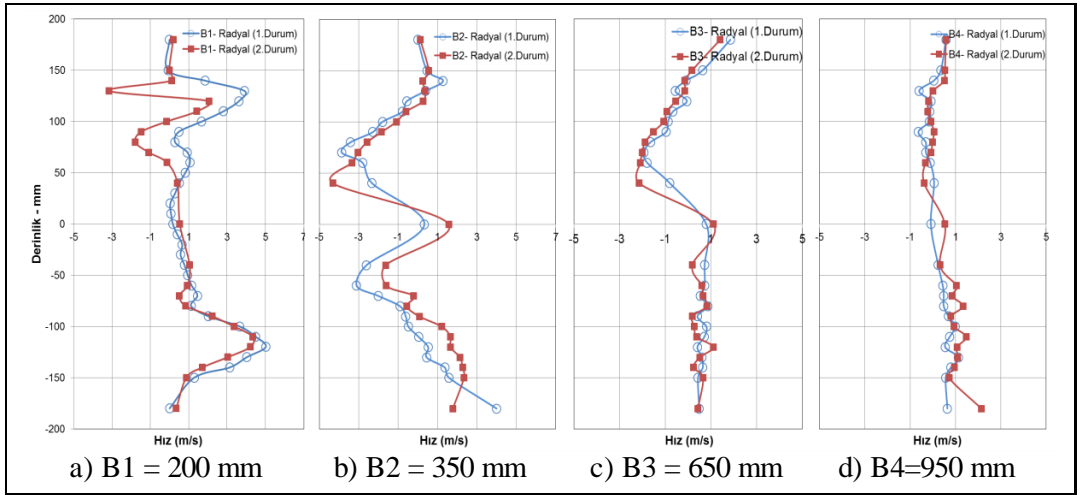
Şekil 3.20: M1 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



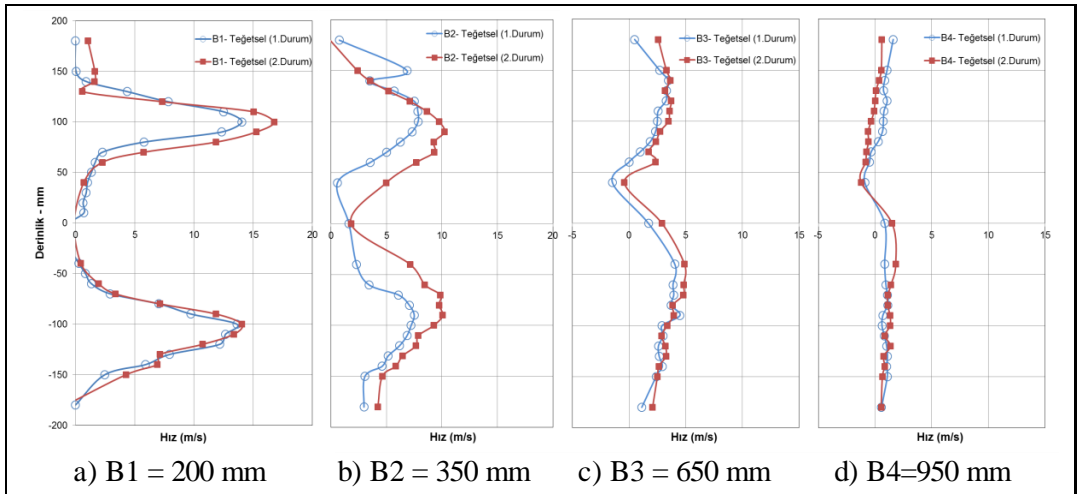
Şekil 3.21: M1 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



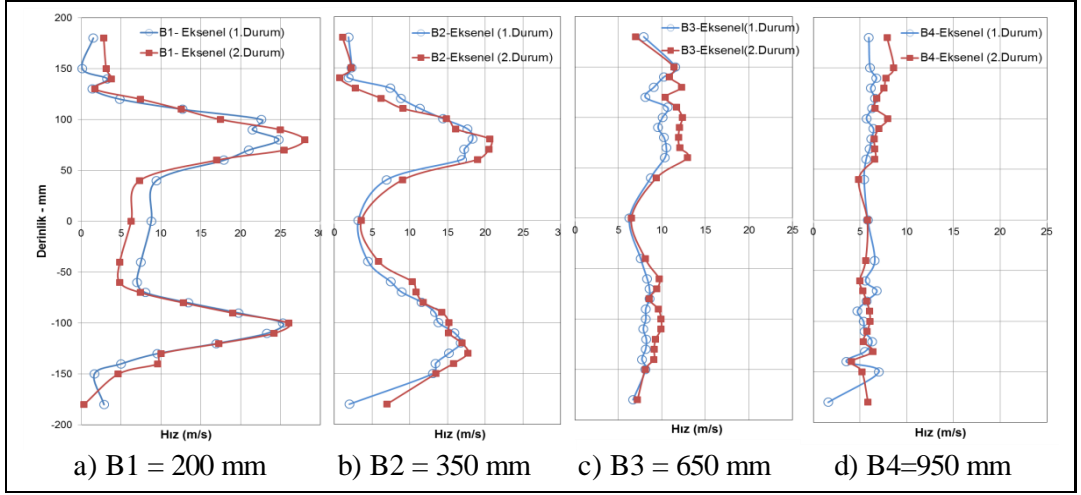
Şekil 3.22: M2 No'lu girdap üretici için aksenal hız ölçüm sonuçları.



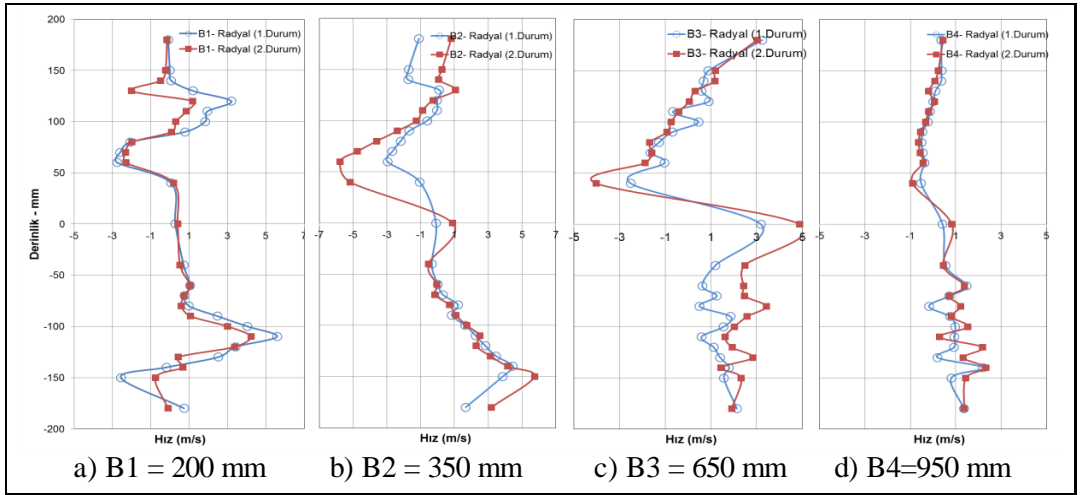
Şekil 3.23: M2 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



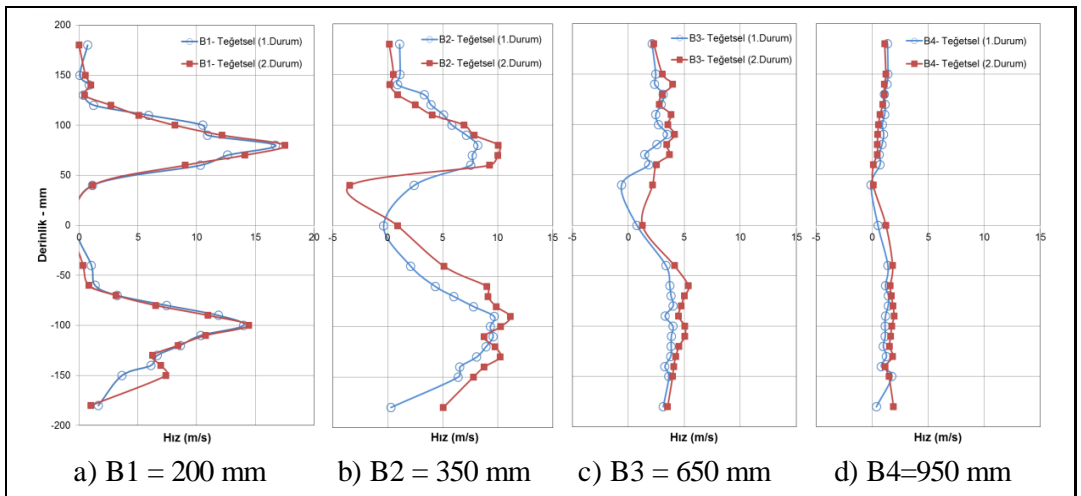
Şekil 3.24: M2 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



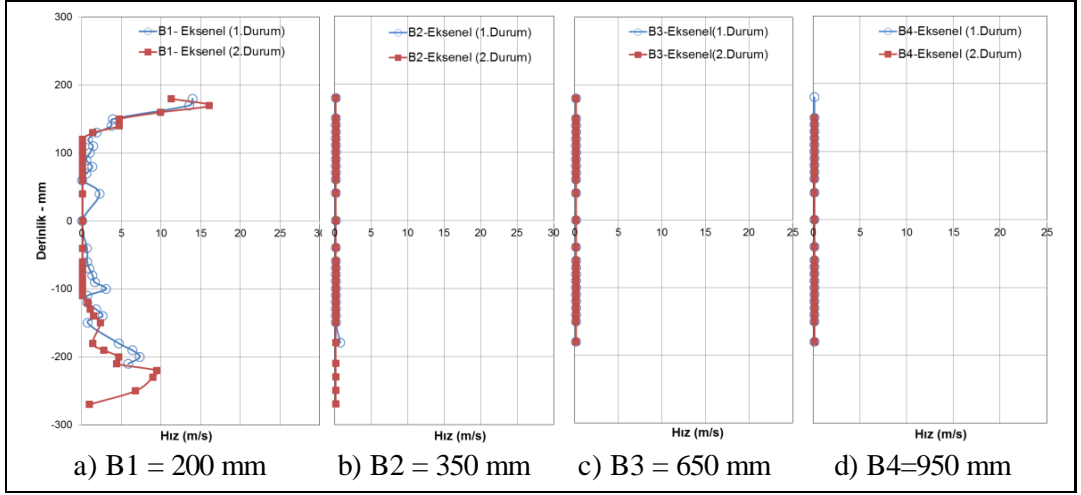
Şekil 3.25: M3 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



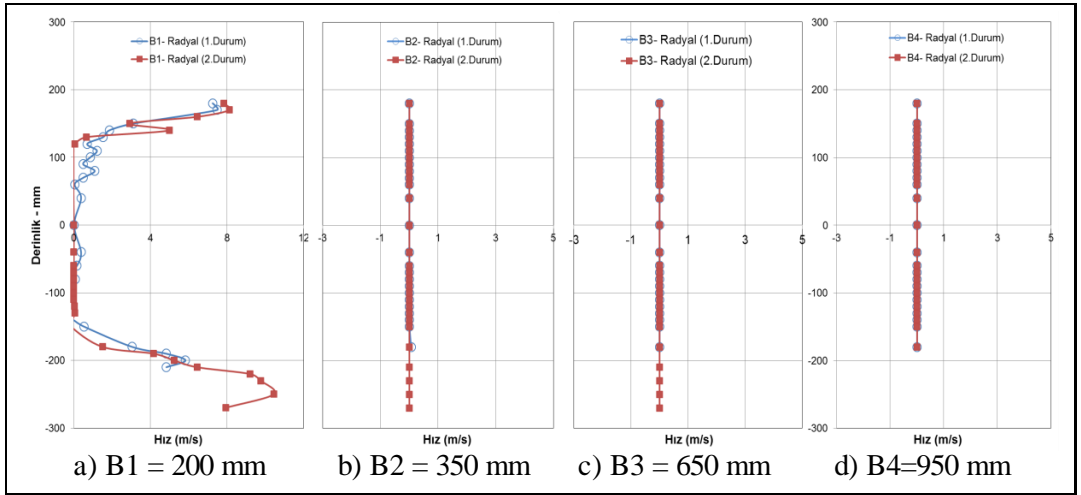
Şekil 3.26: M3 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



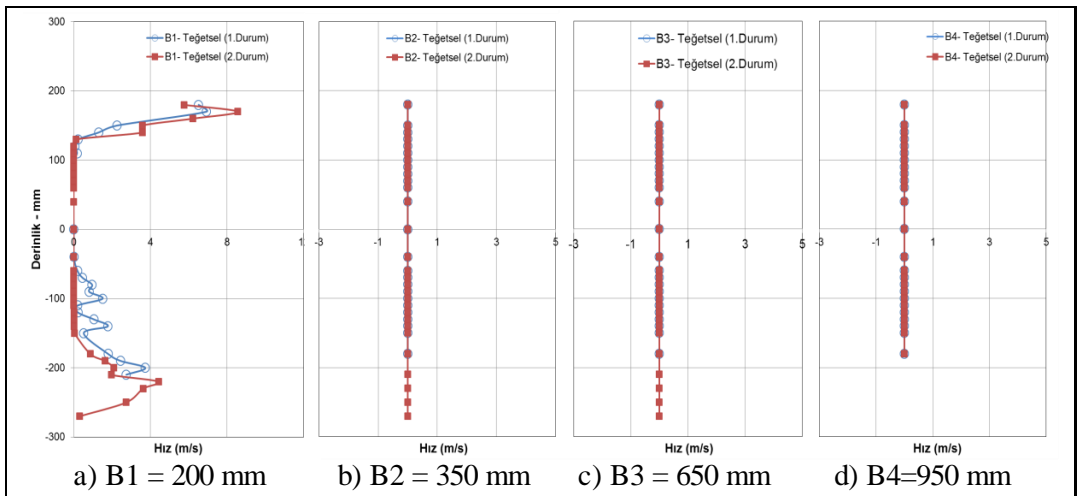
Şekil 3.27: M3 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



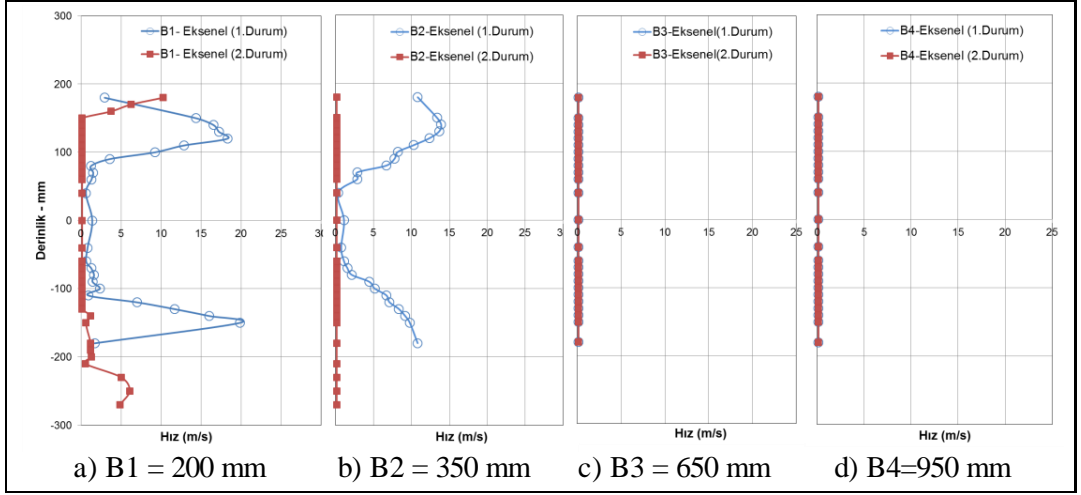
Şekil 3.28: M4 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



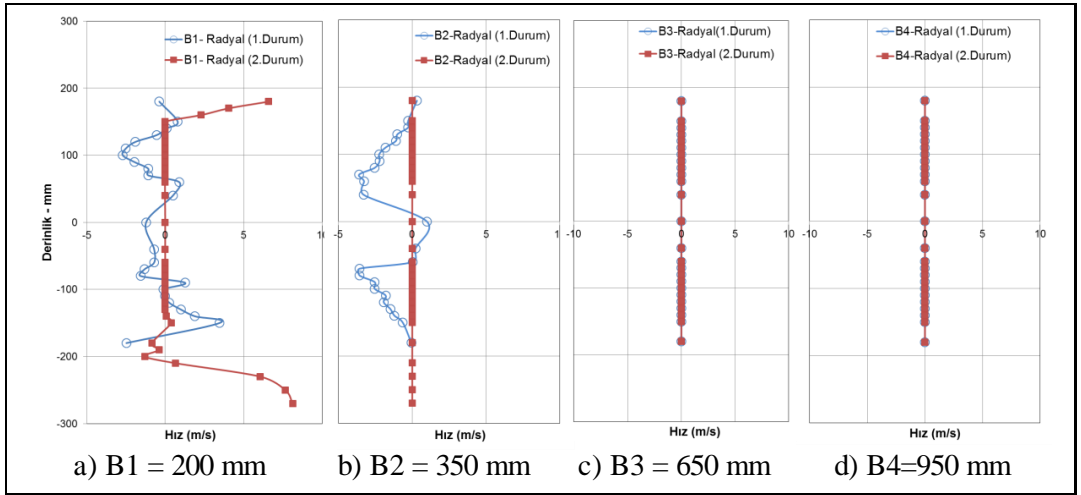
Şekil 3.29: M4 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



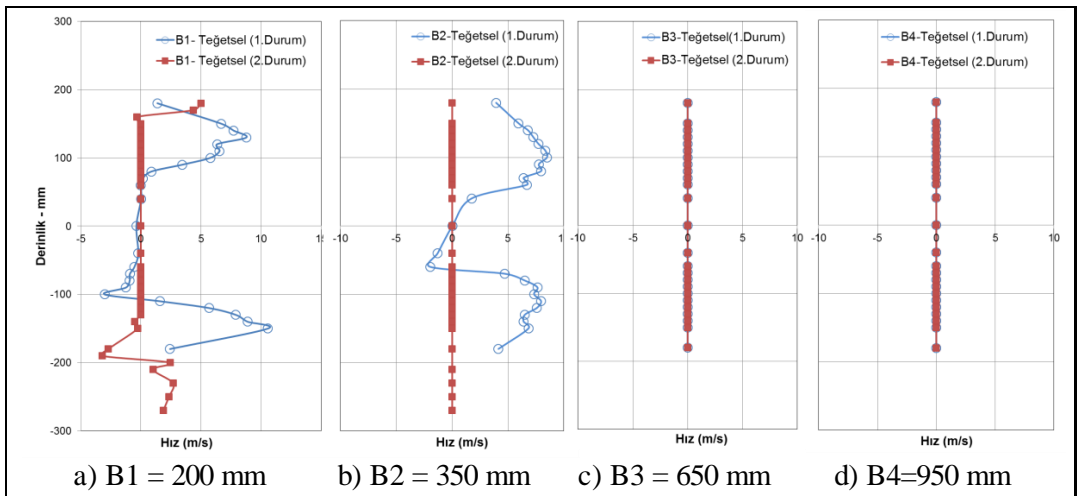
Şekil 3.30: M4 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



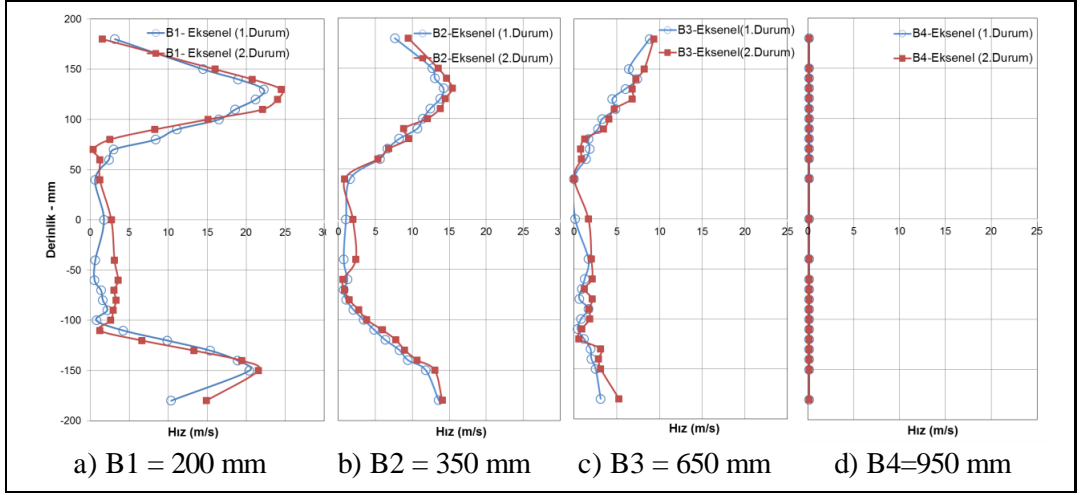
Şekil 3.31: M5 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



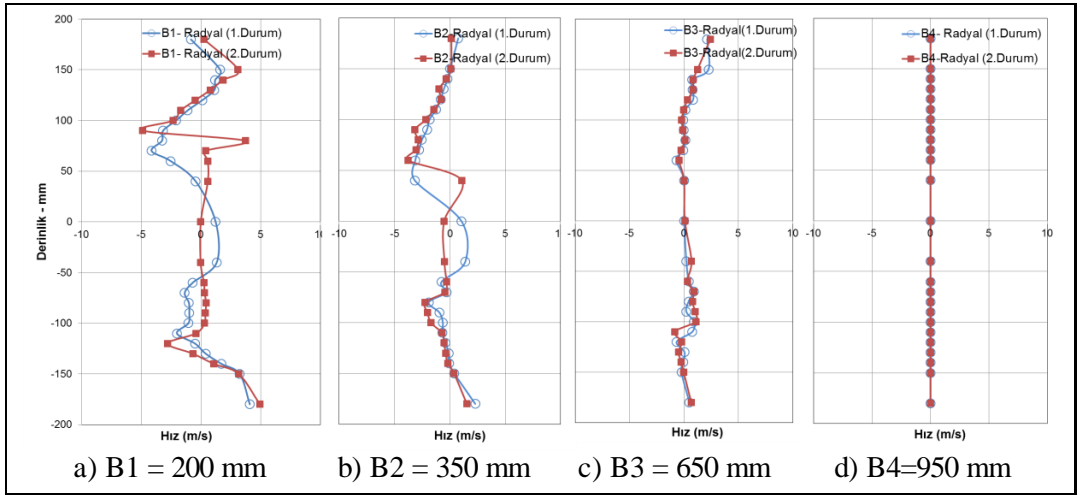
Şekil 3.32: M5 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



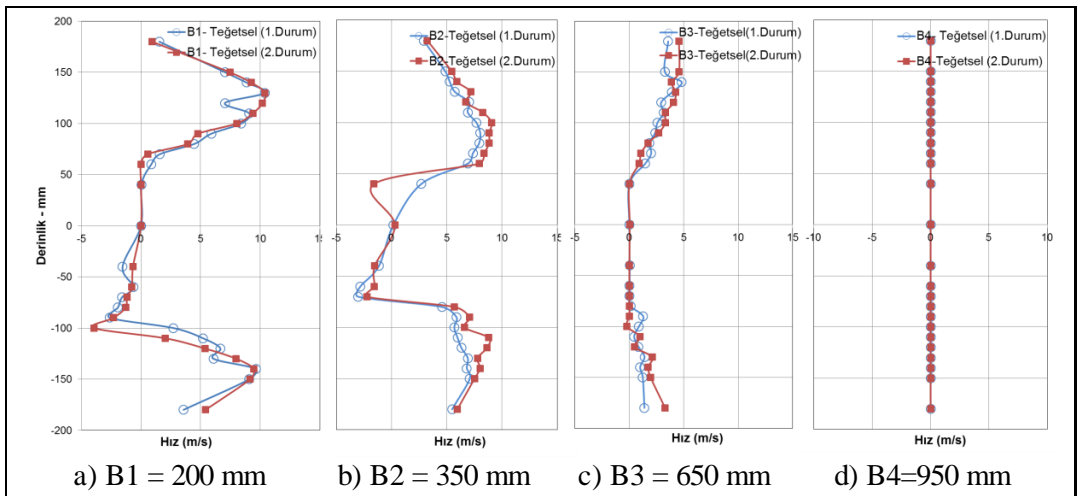
Şekil 3.33: M5 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



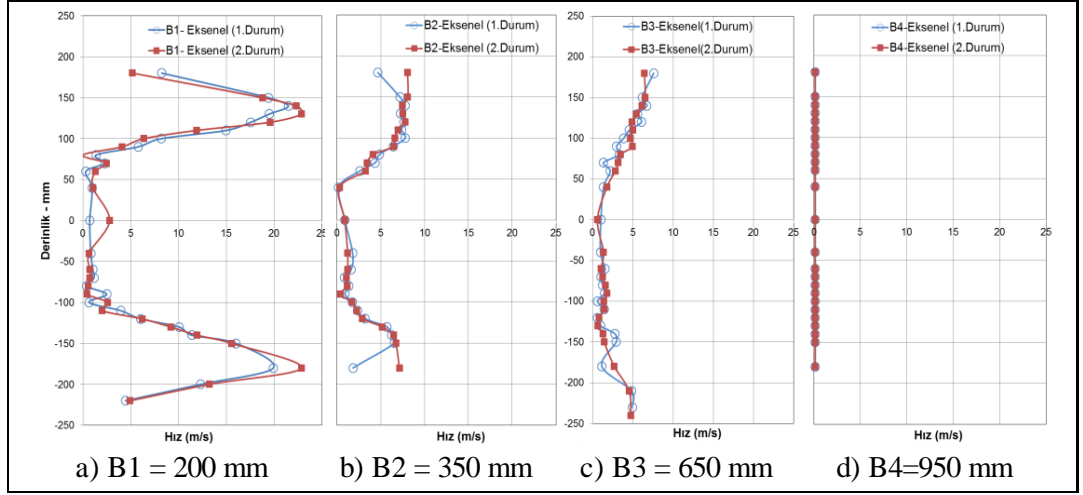
Şekil 3.34: M6 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



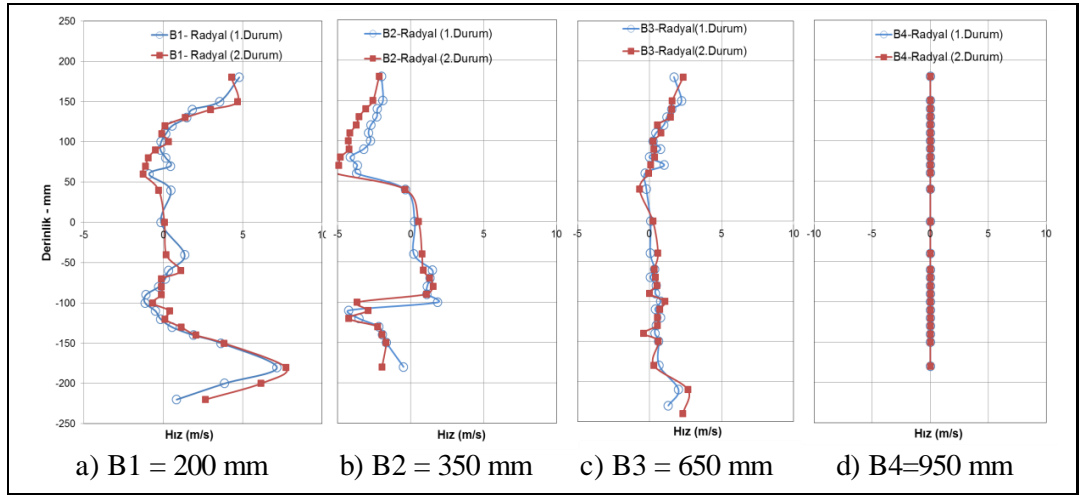
Şekil 3.35: M6 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



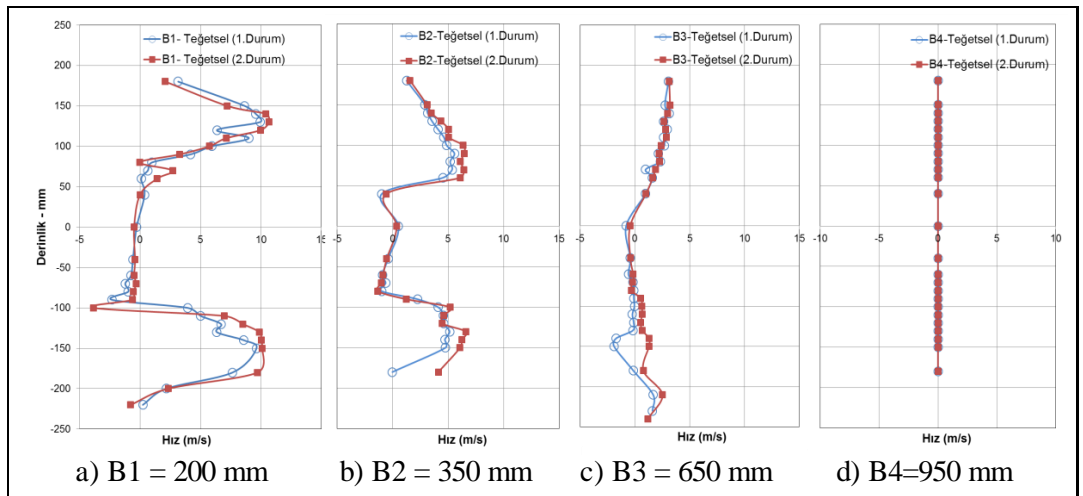
Şekil 3.36: M6 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



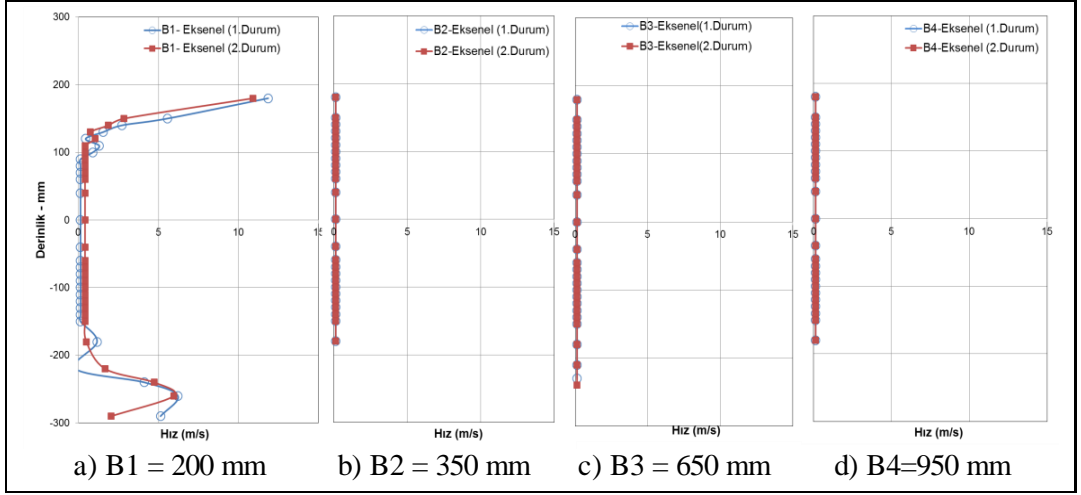
Şekil 3.37: M7 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



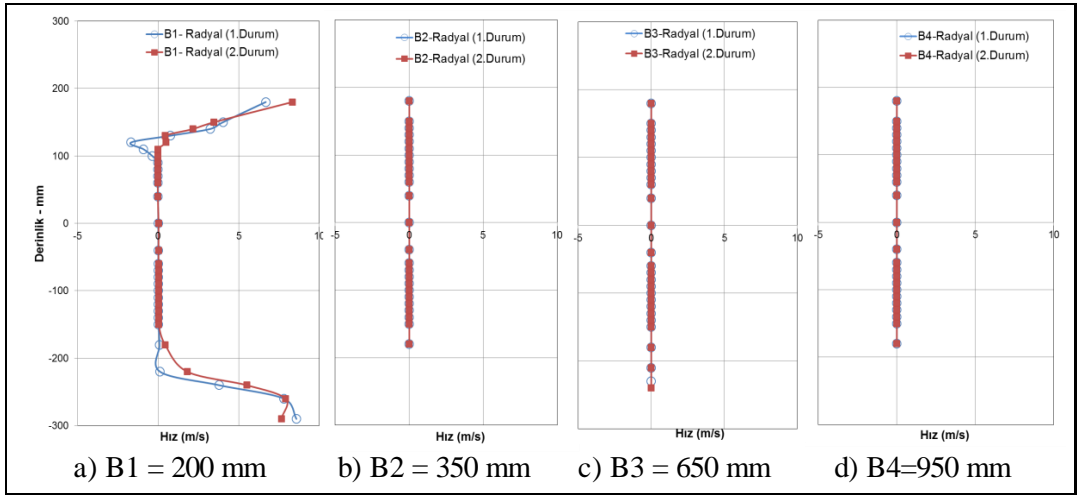
Şekil 3.38: M7 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



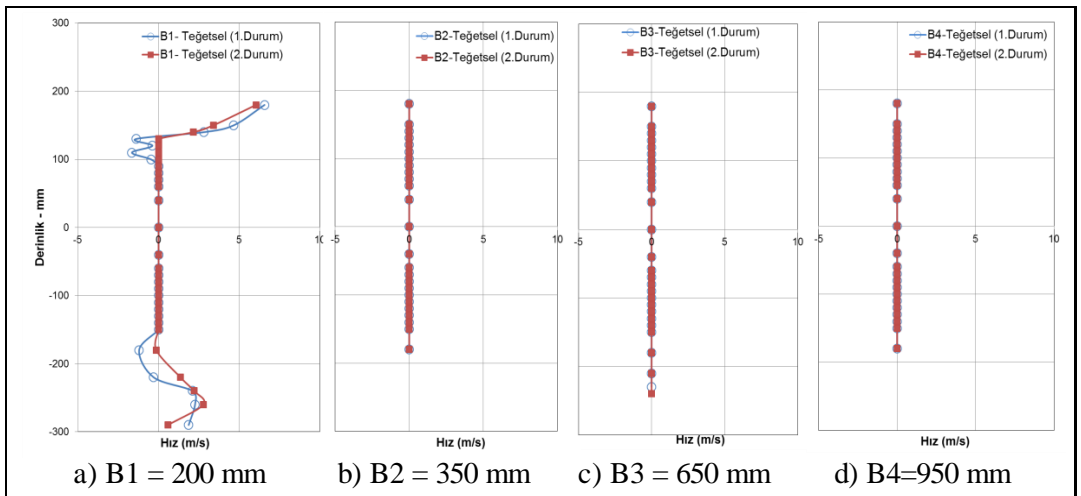
Şekil 3.39: M7 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



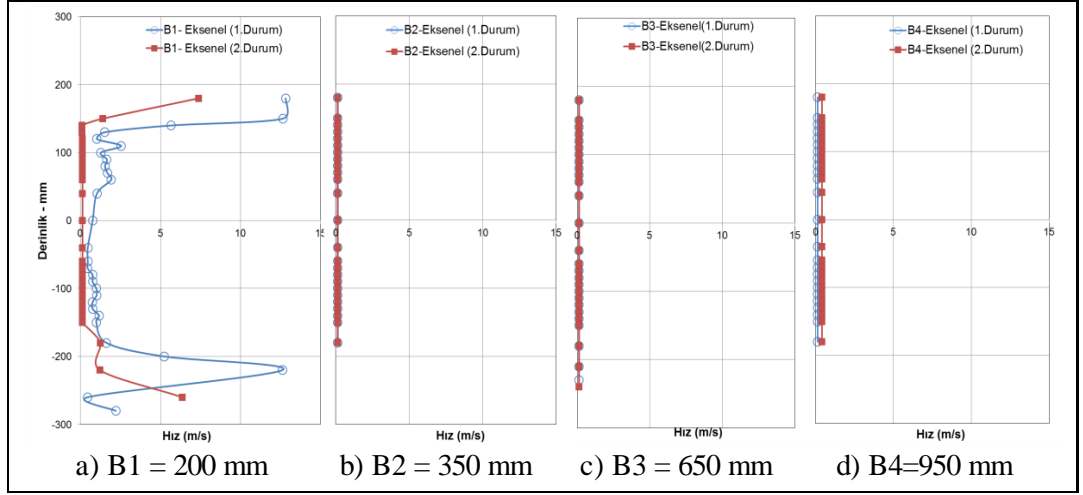
Şekil 3.40: M8 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



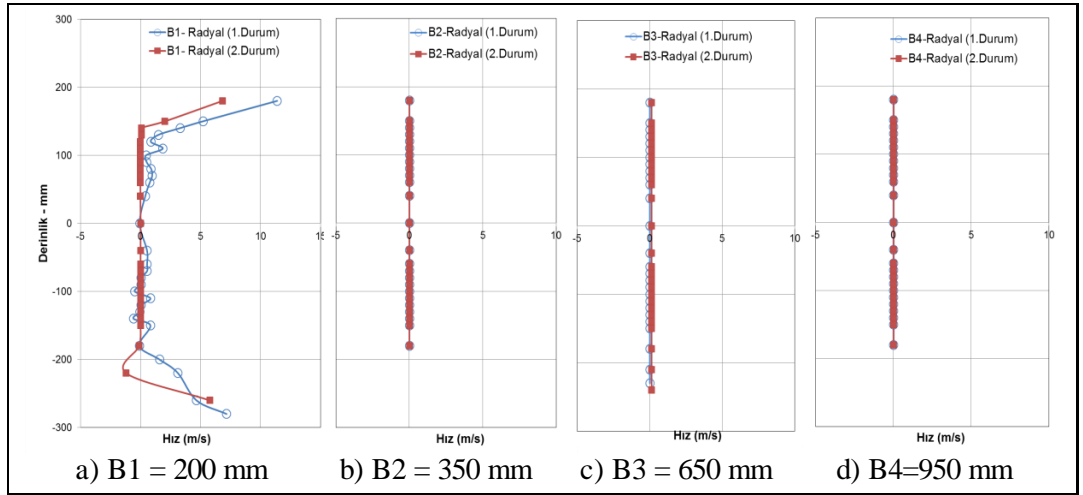
Şekil 3.41: M8 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



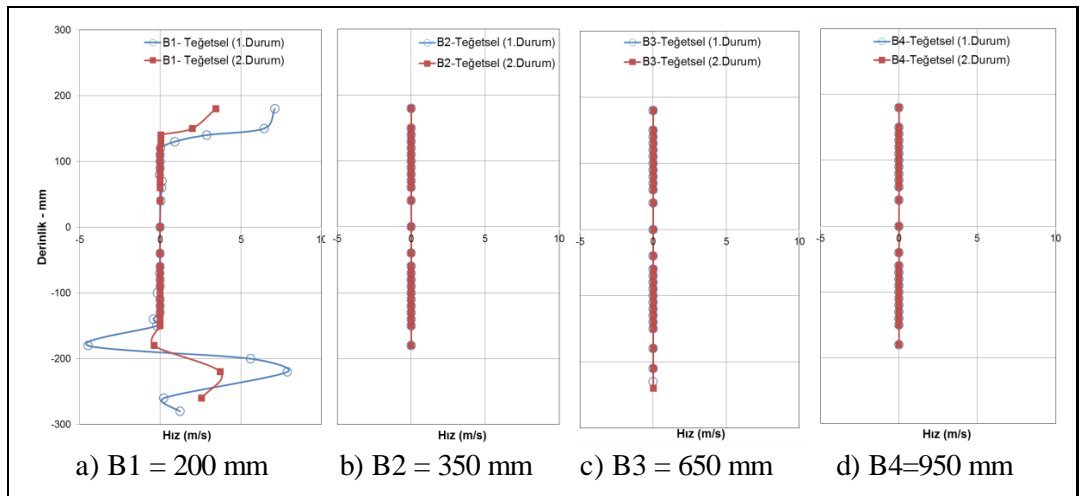
Şekil 3.42: M8 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.



Şekil 3.43: M9 No'lu girdap üretici için eksenel hız ölçüm sonuçları.



Şekil 3.44: M9 No'lu girdap üretici için radyal hız ölçüm sonuçları.



Şekil 3.45: M9 No'lu girdap üretici için teğetsel hız ölçüm sonuçları.

3.3.6. Girdap Sayısı Hesaplamaları

Girdap üreteçlerinin oluşturdukları girdap şiddetini ifade eden girdap sayısı farklı tasarımlar için aşağıdaki formüller yardımı ile hesap edilmiştir;

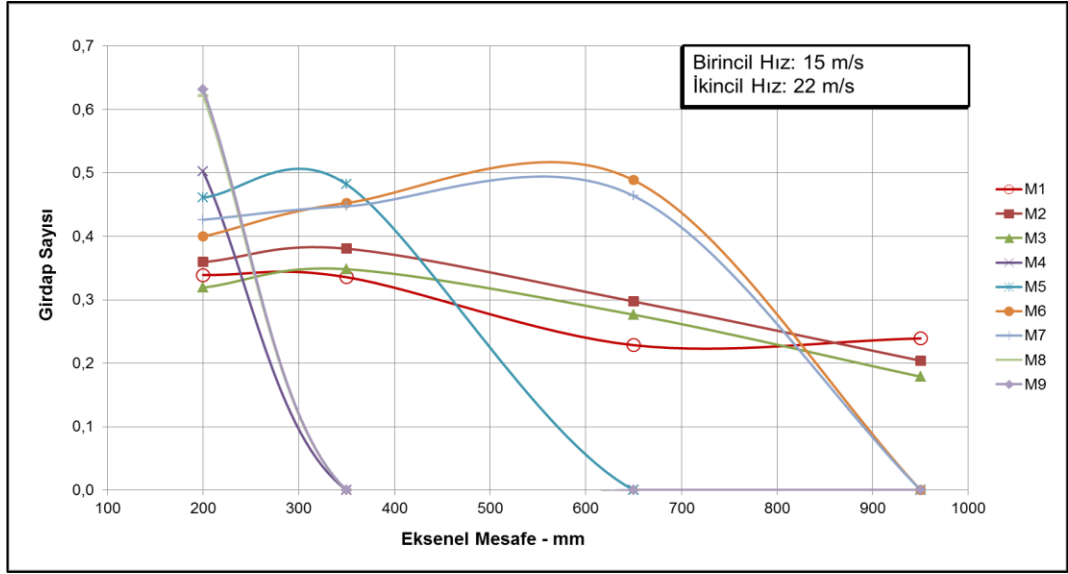
$$S = \frac{G_{\phi}}{RG_x} \quad (3.14)$$

Burada G_{ϕ} ve G_x üreteç eksenine dik bir kesitte sırasıyla açılmal ve aksenal momentum akış hızlarını, R ise yakıcının dış yarıçapını ifade etmektedir. Denklemdede yer alan G_{ϕ} ve G_x ifadeleri şu şekilde hesaplanır [21]:

$$G_{\phi} = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr \quad (3.15)$$

$$G_x = \int_0^R U \rho U 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr \quad (3.16)$$

Burada “ U ” aksenal hızı, “ W ” teğetsel hızı ve “ p ” ise hava jetinin herhangi bir kesitindeki statik basıncı ifade etmektedir. Yayımlarda girdap sayısının derecesi için bazı değerlendirmeler yapıldığı görülebilmektedir. Girdap sayısı $S < 0,6$ olduğunda zayıf girdap, $S > 0,6$ olduğunda kuvvetli girdap tanımları yapılmıştır [21]. Bir başka tanımlamada ise $S < 0,3$ hali zayıf girdap, $0,3 < S < 0,6$ hali orta şiddetli girdap, $S > 0,6$ hali ise kuvvetli girdap olarak adlandırılmaktadır [14]. Denklem (3.14), (3.15) ve (3.16)’e göre B1, B2, B3 ve B4 ölçüm deliklerinde alınan ölçümler sonucu hesaplanan girdap sayılarının aksenal konumla değişimleri farklı girdap üretici tasarımları için Şekil 3.46 ve Şekil 3.47’de sunulmuştur.



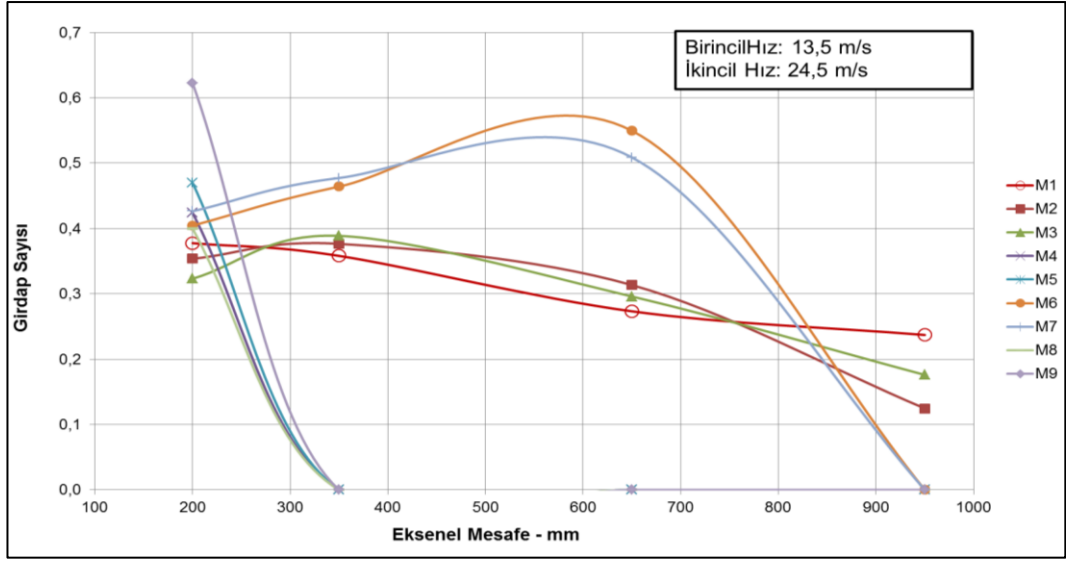
Şekil 3.46: Girdap sayısının aksel konum ile değişimi (1. durum).

Şekil 3.46'da 1. durumda (birincil hız: 15 m/s, ikincil hız: 22 m/s) yapılan ölçümler için hesaplanan girdap sayıları farklı girdap üreticileri için gösterilmiştir. Grafığe göre 30° kanat açısına sahip M1, M2 ve M3 girdap üreticileri aynı eğilimi göstermektedir ve girdap sayıları zayıf girdap bölgesinde yaklaşık 0,3 değerindedir. Aynı zamanda girdap etkisi eksen boyunca yavaşça azalmaktadır.

Kanat açısının 45°'ye yükseldiği M4, M5 ve M6 model girdap üreticilerinde girdap sayısının yükselerek kuvvetli girdap bölgesine yaklaştığı görülmektedir. Ancak bununla birlikte M4 girdap üreticisi girdap etkisini kısa mesafe içerisinde kaybetmiştir. M5, M4'e göre girdap etkisini 650 mm aksel mesafeye kadar devam ettirebilirken M6 45° kanat açısına sahip üreticiler içerisinde en uzun aksel mesafe boyunca girdap etkisini devam ettirebilen üreticiler olmuştur.

Kanat açısı 60°'ye yükseldiği zaman 200 mm aksel mesafede en yüksek girdap sayısı değerlerine ulaşılmaktadır. M8 ve M9 kuvvetli girdap ile başlayıp kısa mesafe içerisinde girdap etkisini kaybetmektedir. M7'nin ise M6'ya benzer bir eğilim göstererek girdap etkisini 950 mm aksel mesafelere kadar devam ettirdiği görülmektedir.

Sonuç olarak girdap etkisini en uzun mesafe boyunca koruyan üreticilerin M1, M2 ve M3 olduğu, girdap etkisini uzun mesafe boyunca azalarak koruyan üreticilerin M6 ve M7 olduğu, girdap etkisi başlangıçta yüksek olmakla beraber hızlı bir şekilde kaybeden üreticilerin ise M5, M8 ve M9 olduğu görülebilmektedir.



Şekil 3.47: Girdap sayısının aksel konum ile değişimi (2. durum).

Şekil 3.47’de ise 2. durum şartlarında (birincil hız: 13,5 m/s, ikincil hız: 24,5 m/s) farklı girdap üreteçleriyle yapılan ölçümler sonucunda hesaplanan girdap sayıları aksel konumun fonksiyonu olarak çizilmiştir. Hesap sonuçlarına göre 30° kanat açısına sahip M1, M2 ve M3 No’lu üreteçler 1. durum ölçüm sonuçlarına benzer bir eğilim göstererek tüm eksen boyunca girdap etkilerini 0,3- 0,4 girdap sayısı mertebelerinde sürdürmüşlerdir.

Kanat açısı 45° olan girdap üreteçlerinden M4 No’lu modelin 1. durum ölçümleri ile aynı eğilimi göstererek girdap etkisini hızlıca kaybettiği görülmektedir. M5 No’lu modelin girdap sayısının 1. duruma göre hem azaldığı, hem de girdap etkisini daha kısa mesafede yitirdiği görülmektedir. M6 No’lu girdap üreteci 1. durum ölçümleri ile neredeyse aynı eğilimi göstererek girdap etkisini kuvvetli girdap sayısı alt sınırı olan 0,6 değeri civarında 650 mm aksel mesafeye kadar koruduktan sonra azalarak yitirmektedir.

Kanat açıları 60° olan girdap üreteçlerinden M7 No’lu modelin 1. durumdakine benzer bir eğilim göstererek girdap etkisini eksen boyunca azalarak koruduğu görülmektedir. M8 No’lu üretecin ise giriş girdap sayısı 0,6 mertebelerinden 0,4’e düşmekle beraber, yine 1. durumdakine benzer şekilde girdap etkisi hızla azalarak sifira yaklaşmaktadır. M9 No’lu üreteç ise 1. duruma benzer şekilde eğilim göstermektedir.

Sonuç olarak M1, M2 ve M3 No’lu girdap üreteçlerinin her iki ölçüm durumu için girdap etkisini en uzun mesafede en az değişimle koruduğu sonucu elde

edilmektedir. M6 ve M7 No'lu girdap üreteçlerinin ise M1, M2 ve M3'e göre daha yoğun bir girdap sayısı meydana getirdiği ancak sağladıkları girdap etkisinin 650 mm aksenal mesafe sonrasında dramatik şekilde azalarak sıfıra yaklaştığı söylenebilir. M4 No'lu girdap üreticinin her iki durumda da meydana getirdiği girdap etkisinin zayıf ve kısa mesafeli olduğu gözlemlenmiştir. M8 ve M9 No'lu girdap üreteçleri ise diğer girdap üreteçlerine göre daha yüksek girdap sayısı ile hazneye giriş yapımlarıyla beraber, girdap etkisini çok kısa mesafede kaybetmelerinden dolayı daha kararsız bir akış profili meydana getirdikleri sonucuna varılmıştır.

Yapılan ölçümler sonucunda kanat açısının girdap sayısı üzerinde en etkili parametre olduğu görülmektedir. Ancak kanat açısının yanında kanat sayısı, kanat genişliği ve kanat eğim açısı gibi tasarım parametrelerinin de girdap sayısına etkisinin olması beklenmektedir. Bu parametrelerin tek başlarına ve birbirleri ile etkileşim yaparak meydana getirecekleri sonucun anlaşılabilmesi için Bölüm 3.3.1.'de bahsedilen Taguchi yöntemine göre farklı girdap üretici tasarımları incelenmiştir. Taguchi yönteminde kullanılan "nominal olan en iyisi" kayıp fonksiyonuna göre grafikler oluşturulmuştur.

Tablo 3.14: 1. durum girdap sayısı hesapları için istatistik tablosu.

1. Durum Ölçümlerine Göre Hesaplanan Girdap Sayıları						
Üreteç No:	Girdap Sayısı			İstatistik		
	1. Tekrar	2. Tekrar	3. Tekrar	\bar{y}	σ^2	S/G
M1	0,29	0,28	0,29	0,29	0,00	41,73
M2	0,31	0,31	0,32	0,3	0,00	35,67
M3	0,28	0,28	0,28	0,3	0,00	38,15
M4	0,12	0,12	0,12	0,1	0,00	37,92
M5	0,24	0,23	0,24	0,2	0,00	32,65
M6	0,34	0,32	0,34	0,3	0,00	30,90
M7	0,36	0,34	0,34	0,3	0,00	29,51
M8	0,16	0,16	0,14	0,2	0,00	24,88
M9	0,14	0,14	0,14	0,1	0,00	30,87

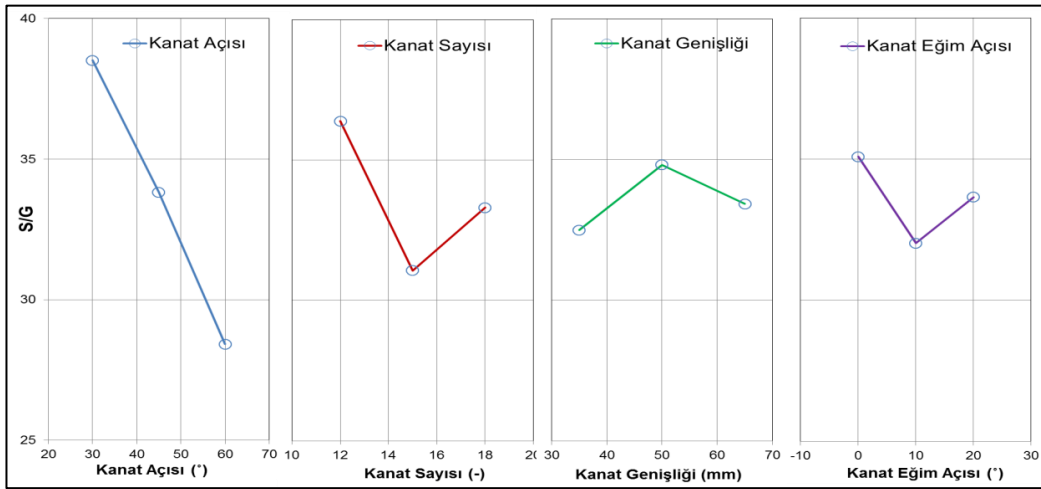
Bu tablonun oluşturulmasından sonra parametrelerin farklı değerlerinin etkisinin incelenmesi için bir cevap tablosu oluşturulur. Cevap tablosu, parametrelerin farklı değerlerinin ortogonal matriste yani Tablo 3.14'de oluşturdukları S/G'lerin ortalamaları alınarak hesaplanır. Örnek olarak kanat açısı M1, M2, M3 için 1. değer 30°, M4, M5, M6 için 2. değer 45° ve M7, M8, M9 için 3.

değer 60° olarak tasarlanmıştır. Kanat açısı için cevap tablosu oluşturulurken 1. değer için M1, M2, M3'ün S/G oranlarının ortalaması, 2. değer için M4, M5, M6'nın S/G oranlarının ortalaması ve 3. değer için M7, M8, M9'un S/G oranlarının ortalaması alınarak kanat açısı için cevap tablosu sütunu oluşturulur. Diğer kanat parametreleri için aynı işlem tekrar edilerek tüm cevap tablosu sütunu elde edilmiş olur.

Tablo 3.15: 1. durum için cevap tablosu.

S/G Ortalamaları				
Değer	Kanat Açısı	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği	Kanat Eğim Açısı
1	38,5	36,39	32,50	35,08
2	33,8	31,06	34,82	32,02
3	28,4	33,31	33,44	33,65

Tablo 3.15'de 1. durum ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan girdap sayıları için oluşturulan cevap tablosu gösterilmektedir. Bu cevap tablosuna göre oluşturulan grafikler yardımıyla hangi parametrenin girdap sayısı büyüklüğüne ne kadar etkisi olduğu yorumlanabilmektedir. Taguchi yöntemine göre grafikler yorumlanırken en büyük S/G oranına sahip olan parametrenin en iyi olduğu varsayılır. Bu sayede değişen her değer sonucunda sistemin verdiği cevap incelenmiş olur ve bir parametre için en uygun değerinin yanında hangi değerlerin nasıl bir etkisi olduğu da görülmüş olmaktadır.



Şekil 3.48: 1. durum için parametre etki grafikleri.

Şekil 3.48’de cevap tablolarına ait grafikler yer almaktadır. Grafiğe göre kanat açısı arttıkça girdap sayısı etkisini yitirmektedir ve 30° kanat açısının girdap sayısı açısından daha kararlı olduğu sonucuna varılır. Kanat sayısı incelendiğinde en uygun kanat sayısının 12 olduğu, 18 kanatlı tasarımların ise 15 kanatlı tasarımlara göre iyi ancak 12 kanatlı tasarımlara göre kötü olduğu yorumu yapılabilir. Kanat genişliğinin etkisinin kanat açısı ve kanat sayısına göre daha az etkili olduğu eğrinin eğiminden söylenebilmektedir. Bununla birlikte 50 mm kanat genişliği 35 ve 65 mm’ye göre daha iyi sonuç vermektedir. Kanat eğim açısı incelendiği zaman kanat genişliğine benzer olarak girdap sayısı üzerinde fazla etkin olmadığı, bununla beraber 0° eğim açısının daha iyi olduğu sonucuna varılabilir. Sonuç olarak 1. durum ölçümleri için en uygun kanat parametrelerinin kanat açısı 30°, kanat sayısı 12, kanat genişliği 50 mm ve kanat eğim açısı 0° olduğu yorumu yapılabilir. Aynı hesaplamalar ve grafikler 2. durum ölçümleri için de oluşturulmuştur. Sırasıyla Tablo 3.16 ve Tablo 3.17 oluşturularak bu tablolara göre Şekil 3.49’deki grafikler çizdirilmiştir.

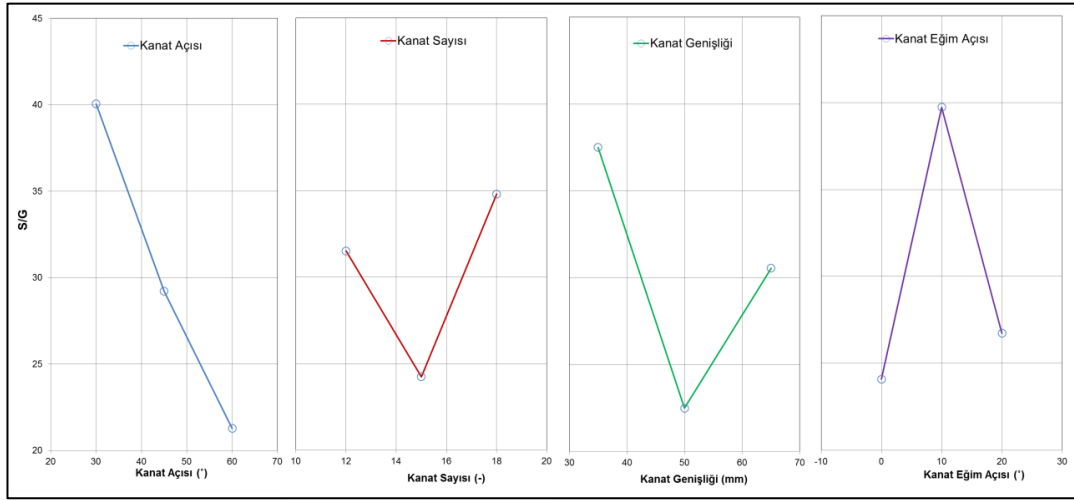
Tablo 3.16: 2. durum girdap sayısı hesapları için istatistik tablosu.

Üreteç No:	Girdap Sayısı			İstatistik		
	1. Tekrar	2. Tekrar	3. Tekrar	\bar{y}	σ^2	S/G
M1	0,31	0,31	0,31	0,31	0,00	42,6
M2	0,30	0,30	0,31	0,3	0,00	36,0
M3	0,30	0,29	0,30	0,3	0,00	41,6
M4	0,12	0,10	0,11	0,1	0,00	19,4
M5	0,15	0,15	0,12	0,1	0,00	17,5
M6	0,36	0,36	0,36	0,4	0,00	50,7
M7	0,35	0,34	0,35	0,3	0,00	32,5
M8	0,11	0,14	0,13	0,1	0,00	19,2
M9	0,15	0,17	0,10	0,1	0,00	12,1

Tablo 3.17: 2. durum için cevap tablosu.

S/G ortalamaları				
Değer	Kanat Açısı	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği	Kanat Eğim Açısı
1	40,1	31,5	37,5	24,1
2	29,2	24,2	22,5	39,7
3	21,3	34,8	30,5	26,7

Şekil 3.49 yardımıyla kanat parametrelerinin farklı değerlerinin 2. durum ölçümleri için girdap sayısı üzerine etkileri görülebilmektedir. Şekil 3.49'a göre 30° kanat açılı tasarımların S/G oranı 45° ve 60° kanat açılı tasarımlara göre daha yüksektir. Bunun sonucu olarak kanat açısı 30° olan tasarımların 45° ve 60° kanat açılı tasarımlara göre daha uygun bir girdap etkisi meydana getirdiği söylenebilir. Böylece 2. durum ölçümlerinde de 1. durumla aynı olarak en uygun kanat açısının 30° olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.49: 2. durum için parametre etki grafikleri.

Kanat sayısı incelendiği zaman 12 kanatlı ve 18 kanatlı tasarımların yaklaşık aynı etkide olduğu, 15 kanatlı tasarımın ise daha az etkin olduğu görülmektedir. En uygun kanat sayısının az bir farkla 18 kanat olduğu görülmektedir. 2. durumda kanat sayısının girdap sayısı üzerindeki etkisi 1. durum ölçümleri ile kıyaslandığında etkinin yaklaşık aynı olduğu, ancak 1. durumda 12 kanat sayılı tasarımlar daha etkili olurken 2. durumda 18 kanatlı tasarımların daha uygun bir girdap etkisi meydana getirdikleri söylenebilir.

Kanat genişliği sonuçları incelendiği zaman 1. duruma kıyasla 2. durum ölçümlerinde kanat genişliğinin girdap sayısı üzerinde daha önemli bir etkisi olduğu söylenebilir. 2. durum ölçümleri için en uygun kanat genişliği 35 mm olarak öne çıkmaktadır.

Kanat eğim açısı da kanat genişliği ve kanat sayısı etkinliğine benzerlik göstererek 2. durumda daha etkin hale gelmiştir. En uygun kanat eğim açısı ise 10° olarak saptanmıştır.

3.3.7. Basınç Düşümü Ölçümleri

Bir yakıcının aerodinamik direnci (basınç düşümü) yakma havasının sahip olması gereken basınç miktarını etkilediği için önemli bir tasarım parametresi olarak kabul edilmektedir [8]. Bu nedenle kanat tasarım parametreleri belirlenirken diğer ölçütleri sağlamakla birlikte en düşük basınç düşümünü sağlayan kanat özelliklerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Her bir girdap üreticinin basınç düşümü, sabit 22 m/s hız değeri için, ölçülerek tespit edilmiştir.

Girdap üreticilerinin basınç düşümü kanat açıları arttıkça genellikle artmasına karşın, kanat sayısı arttıkça genellikle azalmıştır. En düşük basınç kaybı 30° açılı 18 kanatlı M3'te meydana gelirken en yüksek basınç düşümü ise 60° eğimli 15 kanatlı M8'de meydana gelmiştir. Girdap üreticilerinin meydana getirdiği basınç düşümleri Tablo 3.18'de gösterilmiştir. Tabloya bakıldığında kanat açısı 45° ve 60° olduğu durumlardaki basınç kayıplarının 30°'de meydana gelen basınç kayıplarından yaklaşık 2 kat fazla olduğu görülebilmektedir. Kanat sayısı arttığında ise basınç düşümü değişkenlik göstermektedir. Kanat eğim açısı ile basınç düşümü arasında belirgin bir ilişki göze çarpmamaktadır. Bununla beraber kanat genişliği arttıkça basınç düşümü 30° ve 60° için azalma gösterirken 45° için yaklaşık aynı kalmıştır. Kanat parametrelerinin basınç düşümü üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması için girdap sayısı hesabına benzer şekilde Taguchi yöntemine başvurulmuştur. Yine aynı şekilde istatistik tablosu ve cevap tablosu oluşturularak cevap tablolarının grafikleri elde edilmiştir.

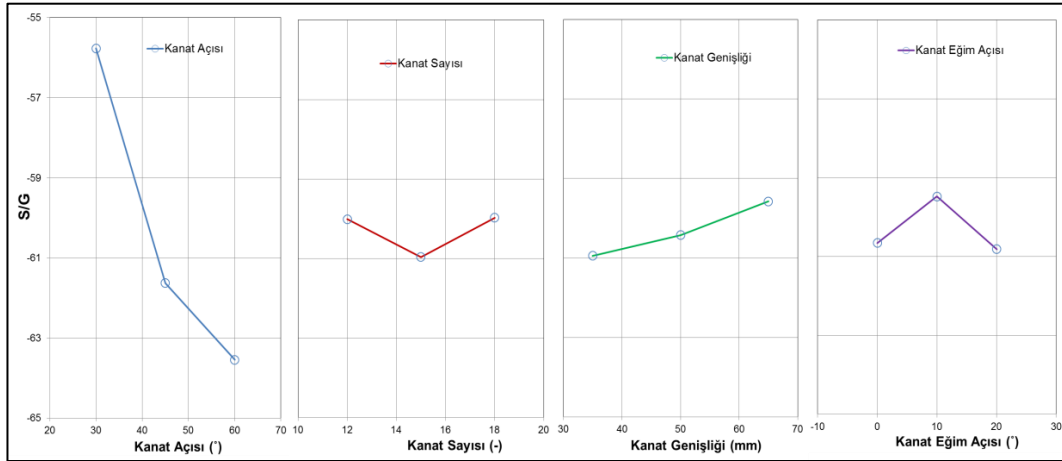
Tablo 3.18: Girdap üreticilerinin basınç düşümü istatistik tablosu.

Üreteç No:	Basınç Düşümü (Pa)			İstatistik		
	1. Tekrar	2. Tekrar	3. Tekrar	\bar{y}	σ^2	S/G
M1	660	668	662	663,3	17,3	-56,43
M2	599	605	621	608,3	129,3	-55,68
M3	572	575	575	574,0	3,0	-55,18
M4	1259	1245	1244	1249,3	70,3	-61,93
M5	1235	1253	1236	1241,3	102,3	-61,88
M6	1131	1132	1135	1132,7	4,3	-61,08
M7	1210	1225	1198	1211,0	183,0	-61,66
M8	1839	1856	1842	1845,7	82,3	-65,32
M9	1530	1517	1519	1522,0	49,0	-63,65

Taguchi yöntemi ile kanat parametrelerinin basınç düşümü üzerine olan etkileri incelenirken en uygun tasarımın en düşük basınç düşümünü veren tasarım olması gerektiği için ‘En küçük en iyi’ yöntemini formüle eden denklem (3.6)’ya göre Tablo 3.19 ve Şekil 3.50 oluşturulmuştur.

Tablo 3.19: Basınç düşümü cevap tablosu.

S/G Ortalamaları				
Değer	Kanat Açısı	Kanat Sayısı	Kanat Genişliği	Kanat Eğim Açısı
1	-55,8	-60,0	-60,9	-60,7
2	-61,6	-61,0	-60,4	-59,5
3	-63,5	-60,0	-59,6	-60,8



Şekil 3.50: Basınç düşümü için parametre etki grafikleri.

Şekil 3.50 basınç düşümünde en etkin parametrenin en yüksek S/G oranına sahip olan kanat açısı olduğunu göstermektedir. Kanat açısı arttıkça basınç düşümü artmaktadır ve bu nedenle basınç düşümü açısından en uygun tasarım değeri 30° olmaktadır. Kanat sayısının etkisi incelendiğinde kanat sayısı 12 kanattan 15 kanada çıktığında basınç düşümü bir miktar artmaktadır ancak 18 kanatlı tasarımlarda basınç düşümü biraz azalmaktadır. 12 ve 18 kanatlı tasarımların basınç düşümüne etkisi hemen hemen aynıdır.

Kanat genişliği kanat açısından daha az etkilidir. Kanat genişliğinin basınç düşümüne olan etkisinin çok az olduğu grafik eğiminin düşük olmasından anlaşılmaktadır. Bununla beraber kanat genişliği arttıkça basınç düşümü bir miktar artmaktadır. En uygun kanat genişliği 35 mm olmakla beraber, 50 mm veya 65

mm'lik tasarımlar da kabul edilebilir. Kanat eğim açısı ise kanat açısına göre az, kanat sayısı ve kanat genişliğine göre yaklaşık aynı etkenliktedir. Kanat eğim açısı arttıkça basınç düşümü bir miktar azalmakta, sonrasında tekrar artmaktadır. Grafiğe göre en uygun kanat eğim açısı 10° olmakla beraber kanat genişliği ve kanat sayısında olduğu gibi diğer kanat eğim açısı seviyeleri de (0° ve 20°) kabul edilebilir.

3.3.8. İdeal Kanat Tasarım Parametreleri

Hız profil ölçümleri ile girdap sayısı hesaplamalarının ve basınç düşümü ölçümlerinin Taguchi yöntemiyle analizi sonucunda Tablo 3.20'de yer alan kanat tasarım parametreleri ön plana çıkmaktadır.

Tablo 3.20: Ölçüm ve hesaplamalar sonucu öne çıkan kanat tasarım parametreleri.

		Kanat Açısı ($^\circ$)	Kanat Sayısı (-)	Kanat Genişliği (mm)	Kanat Eğim Açısı ($^\circ$)
Girdap Sayısına Göre	1. Durum	30°	12-18	35-50-65 mm	$0^\circ - 20^\circ$
	2. Durum	30°	12-18	35 mm	10°
Basınç Düşümüne Göre		30°	12-15-18	35-50-65 mm	$0^\circ - 10^\circ - 20^\circ$
Ortak Parametreler		30°	12	35 mm	0°

Tablo 3.20'ye göre kanat açısı 30° olan tasarımların hem girdap sayısı açısından hem de basınç kayıpları açısından en uygun değer olduğu görülmektedir. Kanat sayısında ise 12 kanatlı tasarım her durumda uygun görülmektedir. Kanat genişliğine bakıldığında 35 mm kanat tasarımının ortak olduğu görülmekle beraber, daha önce yapılan analizler sonucu kanat genişliğinin girdap sayısı ve basınç düşümü üzerinde fazla etkisi olmadığından ötürü herhangi bir tasarım değeri kullanılabilir. Kanat eğim açısı için her durumda ortak olan bir parametre bulunmamaktadır, ancak kanat genişliğine benzer şekilde kanat eğim açısının da girdap sayısı ve basınç düşümü üzerinde belirgin bir etkisinin olmamasından ötürü herhangi bir tasarım değeri seçilebilir.

Tablo 3.10'da yer alan girdap üretici modellerinden M1'in ölçüm, hesaplamalar ve Taguchi analizleri sonucu elde edilen ortak parametre değerleri ile aynı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte M3 No'lu girdap üreticinin de kanat

açısı ve sayısı bakımından ortak parametrelerle uyumlu olduğu, kanat genişliği ve kanat eğim açısı bakımından ise tam uyumlu olmadığı görülmüştür. Kanat genişliği ve eğim açısının girdap sayısı ve basınç düşümünde etkinliğinin daha az olmasından ötürü M3 de alternatif tasarımlar arasında olabilmektedir.

En uygun tasarımın M1 olduğu sonucuna varılmıştır.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bir pülverize kömür yakma sisteminin performansını etkileyen birçok parametre mevcuttur. Girdap üretici sağladığı girdap etkisi sayesinde özellikle yanma kararlılığını etkilediğinden ötürü en uygun tasarımın yapılması önem kazanmıştır. Tez kapsamında yapılan testlerde girdap üreticine ait farklı parametrelerin etkileri ölçülmüştür. 250 kW_t kapasiteli bir prototip yakıcının soğuk modeli tasarlanmıştır. Girdap üreticinin dört kanat tasarım parametresi için üçer değer belirlenmiştir. Daha sonra Taguchi yönteminde kullanılan L9 ortogonal matrisi yardımıyla 9 farklı tasarım elde edilerek ürettirilmiştir. Ürettirilen farklı girdap üretici tasarımları soğuk test düzeneğinde iki farklı birincil/ikincil hava oranı için test edilerek farklı kanat parametrelerinin akış hız profili üzerine olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, önceki yayınlardan farklı olarak birden fazla kanat parametresinin etkisi Taguchi yöntemiyle aynı anda incelenmiştir.

Bu çalışmada farklı kanat tasarım parametrelerine sahip girdap üreteçlerinin yanma bölgesinde meydana getireceği akış hız profili 5-delikli pitot tüpü yardımıyla ölçülmüş, yanma bölgesinde meydana getirdikleri girdap etkisi incelenmiş ve girdap üretici basınç kayıpları ölçülmüştür. Kanat açısı arttıkça hız dağılımı radyal yönde genişleme göstermiştir. Özellikle kanat açısının 60° olduğu M8 ve M9 No'lu girdap üreteçlerinde aşırı radyal genişlemeden ötürü düzgün bir hız profili ölçülememiştir.

Girdap üreteçlerine ait girdap sayıları ve basınç düşümleri ölçülmüş sonuçlar Taguchi yöntemi ile analiz edilerek en uygun girdap sayısını ve en düşük basınç kaybını veren parametreler elde edilmiştir. Girdap sayısı ölçümleri sonucunda M1, M2 ve M3 No'lu girdap üreteçlerinin her iki durum hız ölçümlerinde daha kararlı, etkisini eksen boyunca yaklaşık olarak muhafaza eden girdap etkisi meydana getirdiği görülmüştür. M6 ve M7 No'lu girdap üreteçlerinin ise daha büyük girdap sayısı ile yanma bölgesine hava gönderdikleri, ancak girdap etkisinin daha kısa mesafede sönmüldüğü görülmüştür. Basınç ölçüm sonuçlarında ise basınç düşümünün kanat açısıyla yakından ilişkili olduğu, kanat sayısı, genişliği ve eğim açısı etkilerinin daha az olduğu saptanmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan gelecekte yapılabilecek çalışmalar ve öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Kanat genişliği ve kanat eğimi gibi girdap sayısına ve basınç kaybına etkisi daha az parametrelerin kullanılması yerine, kanat açısı ve sayısı gibi daha etkin parametrelerin daha fazla değerleri için inceleme yapılması,
- Sabit kanat açılı helisel kanatlardan farklı olarak değişken kanat açılı helikon kanatlı tasarımların da incelenmesi,
- Geri dönüş bölgesinin daha iyi saptanabilmesi için birincil hava jeti kullanılmaması,
- İkincil havanın girdap üreticinin her bölgesine eşit şekilde dağılması için birincil ve ikincil hava kanallarının mümkün oldukça eş eksenli yerleştirilmesi, dirsek sayılarının düşürülmesi ve gerekli hallerde hava düzeltici plakalar yerleştirilmesi,
- Ölçüm belirsizliklerini azaltmaya yönelik olarak ölçüm hassasiyeti yüksek dijital basınç farkı manometresi kullanılması.

KAYNAKLAR

- [1] TKİ, (2013), “Kömür Sektör Raporu (Linyit)”, Türkiye Kömür İşletmeleri.
- [2] IEA, (2011), “Key World Energy Statistics 2011”, International Energy Agency.
- [3] B&V, (1996), “Power Plant Engineering”, Black & Veatch.
- [4] B&W, (2005), “Steam its generation and use”, 41th Edition, Babcock & Wilcox.
- [5] Liang H., Maxworthy T., (2005), “An Experimental Investigation of Swirling Jets”, Journal of Fluid Mechanics, 525, 115–59.
- [6] Williams A., Pourkashanian M., Jones J. M., (2001), “Combustion of Pulverised Coal and Biomass”, Progress in Energy and Combustion Science, 27, 587–610.
- [7] He B., Chen M., Liu S., Fan L., Xu J., Pan W. P., (2005), “Measured Vorticity Distributions in a Model of Tangentially Fired Furnace”, Experimental Thermal and Fluid Sciences, 29, 537–54.
- [8] Basu P., (2000), “Boilers and Burners Design and Theory”, 1st Edition, Springer.
- [9] Habib M., Ben-Mansour R., Antar M., (2005), “Flow Field and Thermal Characteristics in a Model of a Tangentially Fired Furnace Under Different Conditions of Burner Tripping”, Heat and Mass Transfer/Waerme-und Stoffuebertragung, 41, 909–20.
- [10] Rayaprolu K., (2009), “Boilers for Power and Process”, 1st Edition, CRC Press.
- [11] Chaplin R. A., (2009), “Thermal Power Plants”, 1st Edition, Encyclopedia of Life Support Systems.
- [12] Raj R. T. K., Ganesan V., (2009), “Experimental Study of Recirculating Flows Induced by Vane Swirler”, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences”, 16, 14–22.
- [13] Shah B. K., Dhakiya A. K., Mohite A. S., (2012), “Experimental Study on the Effect of Various Parameters of Recirculating Flows Induced by Vane Swirler”, 3, 40–6.

- [14] Raj R. T. K., Ganesan V., (2008), “Study on the Effect of Various Parameters on Flow Development Behind Vane Swirlers”, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1204–1225.
- [15] Ganesan V., (1974), “Recirculation and Turbulence Studies in an Isothermal Model of a Gas Turbine Combustor Chamber”, Ph.D. Thesis, Indian Institute of Technology.
- [16] Sheen H. J., Chen W. J., Jeng S. Y., Huang T. L., (1996), “Correlation of Swirl Number for a Radial-Type Swirl Generator”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 12, 444–451.
- [17] Orfanoudakis N., Hatziapostolou A., Mastorakos E., Sardi E., Krallis K., Vlachakis N., (2003), “Design, Evaluation Measurements and CFD Modeling of a Small Swirl Stabilised Laboratory Burner”, *Computational Methods in Sciences and Engineering*, 474–478.
- [18] Surjosatyo A., Ani F. N., (2011), “Study of Enhancing the Swirl Burner Performance On a Small Scale Biomass Gasification”, *International Journal of Engineering & Technology*, 11, 21.
- [19] Smart J. P., Morgan D. J., Roberts P. A., (1992), “The Effect of Scale on the Performance of Swirl Stabilised Pulverised Coal Burners”, *Symposium (International) on Combustion*, 24, 1365–1372.
- [20] Roy R. A., (1990), “Primer on the Taguchi Method”, 1st Edition, Society of Manufacturing Engineers.
- [21] Beér J. M., Chigier N. A., (1983), “Combustion Aerodynamics”, 2nd Edition, Robert E. Krieger Publishing Company.

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzcan Gündüz 1988 yılında İzmit'te doğdu. İlköğretim eğitimini de aynı şehirde tamamladıktan sonra 2002 yılında Sakarya Fen Lisesi'ne başladı. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümüne girdi. 2012 yılında lisans eğitiminden mezun olmasının akabinde bir süre özel sektörde çalıştı. 2013 yılından beri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'nde termik santraller konusunda çalışan ekipte araştırmacı olarak görev almaktadır. Yine aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Oğuzcan Gündüz halen TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'ndeki görevine devam etmekte ve ağırlıklı olarak kömür yakma teknolojileri üzerine çalışmaktadır.