

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇAPRAZ AKIŞTAKİ TÜRBÜLANSLI JET AKIŞLARININ
DENEYSEL VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ ANALİZİ**

Gemi İnş. ve Gemi Mak.Yük. Müh. Seyfettin BAYRAKTAR

**FBE Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 20 Mayıs 2008
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tamer YILMAZ (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mesut GÜNER (YTÜ)
: Prof. Dr. Ali KODAL (İTÜ)
: Doç. Dr. Nurten VARDAR (YTÜ)
: Doç. Dr. Ahmet ERDİL (Kocaeli Üniv.)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	6
1.1.1 Nozul Geometrisinin Etkisi	10
1.1.2 Nozul Açısının Etkisi.....	11
1.1.3 Çapraz Akışta Birden Fazla Jet Bulunması	11
1.1.4 Yükseltilmiş (Elevated) Jet.....	12
1.1.5 Türbin Kanatlarında Film Soğutma	14
1.1.6 Jet Yörüngesi	16
1.2 Tezin Önemi, Hedefi ve Yöntemi.....	23
2. BÜYÜK ÖLÇEKLİ YAPILARIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ	25
2.1 Matematiksel Denklemler.....	27
2.2 Türbülans Modelleri	28
2.2.1 k-ε türbülans modelleri	30
2.2.1.1 Standart k-ε türbülans modeli	30
2.2.1.2 RNG k-ε türbülans modeli.....	31
2.2.1.3 Realizable k-ε türbülans modeli	32
2.2.2 Reynolds Gerilme Türbülans Modeli (RSTM).....	32
2.3 Problemin Geometrisi ve Sınır Şartları	34
2.4 Yakınsama Kriterleri	36
2.5 Çalışma Alanı ve Uygulanan Ağ Yapısı.....	37
2.6 Türbülans Modellerinin Performans Analizi ve Uygun Türbülans Modelinin Seçimi	47
2.7 Dairesel Kesitli Tek Lüle Kullanılması Durumunda Görülen Girdap Yapıları.....	51
2.8 Dairesel Kesitli Üç Lüle Kullanılması Durumunda Görülen Girdap Yapıları	83
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE TERMAL FİLM SOĞUTMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ	107
3.1.1 Dairesel Kesitli Tek Lüle Kullanılması Durumunda Sıcaklık Dağılımları ve Termal Film Soğutma Verimleri	109
3.1.2 Dairesel Kesitli Üç Lüle Kullanılması Durumunda Sıcaklık Dağılımları ve Termal Film Soğutma Verimleri	120
3.1.3 Kare Kesitli Üç Lüle Kullanılması Durumunda Sıcaklık Dağılımları ve Termal	

	Film Soğutma Verimleri	133
4.	DENEYSEL ANALİZ	138
4.1	Deney Düzeneği	139
4.1.1	Rüzgar Tüneli	139
4.1.2	CTA Sistemi	141
4.1.2.1	Sinyal Şartlandırıcı	144
4.1.2.2	Hava Filtresi Ünitesi	146
4.1.2.3	StreamWare [®] Uygulama Yazılımı.....	146
4.1.2.4	Kalibrasyon Sistemi.....	146
4.1.3	Travers Sistemi	150
4.1.4	Duman Üretici.....	151
4.2	Belirsizlik Analizi	151
4.3	DeneySEL Verilerin Fourier Analizi	155
4.4	DeneySEL Verilerin Dalgacık (Wavelet) Analizi.....	162
4.4.1	Matematiksel Alt Yapı.....	163
4.4.2	Verilerin Wavelet Analizi.....	165
4.5	DeneySEL Verilerin Uygun Ortogonal Ayrıklaştırma (POD) Yöntemi ile Analizi.....	171
4.5.1	Matematiksel Alt Yapı.....	173
4.5.2	Verilerin POD Analizi	174
4.6	Akım Görüntüleme Tekniği ile Akış Alanının İncelenmesi.....	176
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	181
5.1	Sonuçlar	181
5.2	Öneriler.....	183
	ÖZGEÇMİŞ.....	193

SİMGE LİSTESİ

A/D	Analog/Dijital
ac	Adyabatik çeper
α	Jet akışının sağlandığı lüle ile çapraz akışın sağlandığı kanal arasındaki eğim açısı
ρ	Akışkanın yoğunluğu
τ	Viskoz gerilme tensörü
μ	Dinamik viskozite
ν	Kinematik viskozite
δ	Kronecker delta
Φ	Viskoz kayıp oranı
ε	k-epsilon türbülans modellerinde türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı
ω	k-omega türbülans modellerinde türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı
β	Termal genişleme katsayısı
Γ	Yayılm (difüzyon)
σ	Türbülans Prandtl sayısı
η	Termal film soğutma verimi
C_f	Çapraz akış
C_{f_i}	Plaka için sürtünme katsayısı
c_v	Sabit hacimde özgül ısı
c_p	Sabit basınçta özgül ısı
D	Lüle çapı
H	Kanal yüksekliği
G_k	Ortalama hız farklarından dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimi
G_b	Yoğunluk değişimlerine bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi üretimi
i, j, k	1, 2, 3
J	Jet
HP	Beygir gücü
K	Kelvin derecesi
V	Ortalama hız
U_τ	Sürtünme hızı
y_p^+	Kontrol hacminin merkezinin en yakın çepere olan uzaklığı
y^+	Kontrol hacminin merkezinin en yakın çepere olan boyutsuz uzaklığı
t	Zaman
k	Türbülans kinetik enerjisi
Y_k	Türbülansın kinetik enerji kaybı
P	Basınç
R	Jet hızının çapraz akış hızına oranı
Ma	Mach sayısı
Re	Reynolds sayısı
Pr	Prandtl sayısı
L	Lüle boyu
x, y, z	Kartezyen koordinat eksenleri
u, v, w	Kartezyen koordinat ekseninde hızın sırasıyla x, y ve z-yönlerindeki bileşenleri
J	Jet momentumunun çapraz akış momentumuna oranı
Tu	Türbülans yoğunluğu
T	Sıcaklık

KISALTMA LİSTESİ

CTA	Constant Temperature Anemometer
EVM	Eddy Viskosity Model
DNS	Direct Numerical Simulation
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HWA	Hot-Wire Anemometer
V/STOL	Vertical/Short Take Off/Landind
ZDGÇ	Zıt-Dönüslü Girdap Çifti
LES	Large Eddy Simulation
PIV	Particle Image Velocimetry
PLIF	Particle Laser-Induced Fluorescence
PSV	Particle Strike Velocimetry
SE	Sonlu elemanlar
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RMS	Root Mean Square

Şekil 1.1 Çapraz akıştaki jet akışlarının şematik gösterimi.....	1
Şekil 1.2 Havadan yere/yerden havaya dikey inip/kalkabilen uçaklar (V/STOL).	3
Şekil 1.3 Termal dumanların yükselerek atmosfere karışması.....	3
Şekil 1.4 Bir gaz türbini kanadından yakıtın çapraz akışta püskürtülmesi, (Hale, 2000).	4
Şekil 1.5 Soğutma kulelerinden atmosfere bırakılan su buharı.	4
Şekil 1.6 Nehirlerin açık denizlere karışması.....	5
Şekil 1.7 Denizaltıdan atılan bir roketin ilerlemesi, (Vigneau, 2001).	5
Şekil 1.8 Çapraz akıştaki jetlerde görülen baskın girdap yapıları, (Johnston ve Khan, 1997)...	6
Şekil 1.9 PLIF ile elde edilen akış durumu ve kayma tabakası girdapları, (Rivero vd., 2001)..	8
Şekil 1.10 Jet ile kanal akışının aynı ve zıt yönlü olması, (Peterson ve Plesniak, 2004).	9
Şekil 1.11 Jet ile kanal akışının aynı ve zıt yönlü olmasına göre elde edilen hız vektörlerinin farklı hız oranlarına göre değişimi, (Peterson ve Plesniak, 2004).	9
Şekil 1.12 Kelvin-Helmholtz kararsızlığından dolayı oluşan girdap yapısı, (Said vd., 2007). 13	
Şekil 1.13 İçerisine film soğutma yapılabilmesi için delikler açılan bir gaz türbini kanadı. ...	14
Şekil 1.14 Türbin kanadı üzerinde film soğutma.	15
Şekil 1.15 Çapraz akış türbülans yoğunluğunun aynı yöndeki değişimi, (Tyagi ve Acharya, 1999).	19
Şekil 2.1 Sayısal hesaplamada kullanılan çalışma alanının boyutları ve sınır şartları.	35
Şekil 2.2 Çalışma alanının boyutları ve sınır şartları.	35
Şekil 2.3 İterasyon (ardışık hesap) ve artık grafikleri	36
Şekil 2.4 Tek jette $R=1.0$, $\alpha=60^\circ$ için artık grafiği.....	37
Şekil 2.5 Kanala uygulanan sınır tabaka ağı.....	39
Şekil 2.6 Kanal ve dairesel kesitli tek bir lüle etrafındaki ağ yapısı.	40
Şekil 2.7 Kanal ve dairesel kesitli üç lüle etrafındaki ağ yapısı.	40
Şekil 2.8 Kanal ve lüleye uygulanan ağ yapısının koordinatlara göre dağılımı (a), lüle etrafındaki ağ yapısının üstten görünümü (b).	41
Şekil 2.9 Sıfır eğrilikli (a), çok-eğrilikli (b) üçgensel ve dikdörtgensel elemanlar.	42
Şekil 2.10 $\alpha=30^\circ$ eğim açılı lülenin varlığı durumunda görülen maksimum eğrilığe sahip dikdörtgensel eleman.	43
Şekil 2.11 Hızın x-bileşeninin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$	44
Şekil 2.12 Hızın y-bileşeninin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$	44
Şekil 2.13 Hızın z-bileşeninin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$	45
Şekil 2.14 Sıcaklığın değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$	45
Şekil 2.15 Türbülans kinetik enerjisinin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$	46
Şekil 2.16 HAD sonuçlarının doğruluğunu göstermek amacıyla deneysel ve simülasyon sonuçlarının mukayesesi, $x/D=0$, $y/D=0$, $R=2.0$	47
Şekil 2.17 Türbülans modellerinin mukayesesi için kullanılan 2-Boyutlu çalışma alanı (a) ve uygulanan ağ yapısı (b).	48
Şekil 2.18 Değişik türbülans modelleri kullanılarak elde edilen çeper basınç dağılımlarının O'Malley, 1984 tarafından yapılan deneysel sonuçlarla mukayesesi, a) $R=0.8$, b) $R=0.1$	49
Şekil 2.19 Farklı istasyonlarda u-hız bileşenlerinin $\alpha=90^\circ$ için farklı türbülans modelleri ve deney sonuçlarıyla mukayesesi, a) $R=0.1$, b) $R=0.8$	50
Şekil 2.20 Dairesel kesitli bir lüleden çapraz akışa püskürtülen bir jet akışına ait a) bileşke hız (m/s) ve b) basınç (Pa) kontürleri, $y/D=1.5$, $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$	51
Şekil 2.21 Akışa ait en yüksek hız değerlerinin ZDGÇ merkezinde görülmesi ($x/D=4.0$, $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$)	52
Şekil 2.22 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması halinde $\alpha=90^\circ$, $R=0.5$ için kanal boyunca	

farklı istasyonlarda iki farklı akışkanın ZDGÇ tarafından taşınması, (Bayraktar, 2007).	53
Şekil 2.23 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	54
Şekil 2.24 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	56
Şekil 2.25 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	57
Şekil 2.26 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	58
Şekil 2.27 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	59
Şekil 2.28 Kanal üst çeperi ile ana ZDGÇ arasında oluşan ikincil ve yakın-çeper ZDGÇ ve dönme yönleri.	60
Şekil 2.29 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda hız oranı R 'nin ZDGÇ üzerindeki etkisi ($\alpha=30^\circ$, $x/D=6.0$).....	62
Şekil 2.30 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda hız oranı R 'nin ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$, $x/D=6.0$	63
Şekil 2.31 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $x/D=6.0$	64
Şekil 2.32 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.....	67
Şekil 2.33 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.....	68
Şekil 2.34 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.....	69
Şekil 2.35 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.....	70
Şekil 2.36 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.....	71
Şekil 2.37 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=0.0$ 'da akış ayrılması ve girdap oluşumları.....	72
Şekil 2.38 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-0.2$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.....	73
Şekil 2.39 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-0.5$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.....	74
Şekil 2.40 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-0.7$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.....	75
Şekil 2.41 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-1.0$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.....	76
Şekil 2.42 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=0.0$ 'da hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$	78
Şekil 2.43 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=-0.2$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$	79
Şekil 2.44 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=-0.5$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$	80
Şekil 2.45 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=-0.7$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$	81
Şekil 2.46 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=-1.0$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$	82

Şekil 2.47 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	85
Şekil 2.48 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	86
Şekil 2.49 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	87
Şekil 2.50 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	88
Şekil 2.51 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.....	89
Şekil 2.52 Kanal ile lüle arasındaki eğim açısının akım hatları üzerindeki etkileri, $y/D=1.5$, $R=2.0$	90
Şekil 2.53 İz girdabı, $R=3.3$	91
Şekil 2.54 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.....	93
Şekil 2.55 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.....	94
Şekil 2.56 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.....	95
Şekil 2.57 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.....	96
Şekil 2.58 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.....	97
Şekil 2.59 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=6.0$ 'da ZDGÇ'nin gelişimi.....	98
Şekil 2.60 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=5.8$ 'de ZDGÇ'nin gelişimi.....	99
Şekil 2.61 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=5.5$ 'de ZDGÇ'nin gelişimi.....	100
Şekil 2.62 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=5.3$ 'de ZDGÇ'nin gelişimi.....	101
Şekil 2.63 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=6.0$ ' da hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.	103
Şekil 2.64 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=5.8$ ' de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.	104
Şekil 2.65 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=5.5$ ' de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.	105
Şekil 2.66 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=5.3$ ' de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.	106
Şekil 3.1 Bir türbin kanadı üzerinde film soğutma, (Hass vd., 1992).	108
Şekil 3.2 Film soğutma işleminde tek lüle (a) ve üç lüle (b) kullanılması durumlarında çalışma alanına ait genel ölçüler.	109
Şekil 3.3 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda düşey doğrultuda sıcaklık değişimleri, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$	110
Şekil 3.4 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $z/D=-0.7$	111
Şekil 3.5 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda sıcaklık değişimlerinin lüle girişinden kanal çıkışına doğru değişik istasyonlardaki enine değişimi, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$	112
Şekil 3.6 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının enine kesitlerdeki	

sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $x/D=3.0$	113
Şekil 3.7 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının sıcaklık alanı üzerindeki etkisi, $y/D=1.5$, $R=2.0$	114
Şekil 3.8 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda farklı eğim açıları ve farklı hız oranlarında elde edilen boyuna film soğutma verimi değişimleri.	115
Şekil 3.9 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.....	116
Şekil 3.10 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.....	117
Şekil 3.11 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.....	118
Şekil 3.12 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.....	119
Şekil 3.13 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.....	120
Şekil 3.14 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda sıcaklık kontürlerinin kanal üst çeperinden 1.0D kadar kanal içerisindeki farklı istasyonlardaki değişimi, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$	123
Şekil 3.15 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda eğim açısının sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $z/D=5.3$	124
Şekil 3.16 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda sıcaklık değişimlerinin lüle girişinden kanal çıkışına doğru değişik istasyonlardaki enine değişimi, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$	125
Şekil 3.17 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda eğim açısının enine kesitlerdeki sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $x/D=3.0$	126
Şekil 3.18 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda hız oranlarının enine kesitlerdeki sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$, $x/D=3.0$	127
Şekil 3.19 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.....	128
Şekil 3.20 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.....	129
Şekil 3.21 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.....	130
Şekil 3.22 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.....	131
Şekil 3.23 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.....	132
Şekil 3.24 Kare kesitli çoklu çapraz lülelerde sıcaklık değişimlerinin kanal üst çeperinden $z/D=-1.0$ 'e kadar olan istasyonlardaki değişimi, $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$	134
Şekil 3.25 Kare kesitli çoklu çapraz lülelerde hız oranlarının sıcaklık değişimleri üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$, $x/D=3.0$	135
Şekil 3.26 Kare kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.	136
Şekil 3.27 Kare kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için değişik eğim açılarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.....	137

Şekil 4.1 FLOTEK rüzgar tünelinin ana boyutları.	140
Şekil 4.2 FLOTEK rüzgar tüneli ve travers mekanizmasının resmi.....	140
Şekil 4.3 Lülenin rüzgar tüneli üst çeperinde konumlandırılması.....	141
Şekil 4.4 Deneyde kullanılan CTA ünitesi, kalibrasyon cihazı ve hava filtresinin resmi.	142
Şekil 4.5 Sabit-sıcaklık hızölçerinin çalışma prensibi, Dantec Dynamics, 2002.	143
Şekil 4.6 Wheatstone köprüsü.	143
Şekil 4.7 5µm çaplı, 1.25 mm uzunluğundaki platin kaplı tungsten sıcak tel (a), 4 mm uzunluğundaki destek (b) ve 215 mm uzunluğundaki montaj tübü (c).	144
Şekil 4.8 CTA ünitesi, kalibrasyon cihazı, travers mekanizması ve bilgisayar bağlantıları. .	145
Şekil 4.9 Kalibrasyon cihazı.....	147
Şekil 4.10 Kalibrasyon işleminin farklı şekillerde yapılması.....	147
Şekil 4.11 Bir-boyutlu proba ait a) kalibrasyon eğrisi ve b) hata grafiği.	148
Şekil 4.12 Kalibrasyon cihazından 5 m/s ile akış olduğunda sıcak tel ile ölçülen hız değeri.	149
Şekil 4.13 Jet akışının sağlandığı lüleden 10 m/s ile akış olduğunda sıcak tel ile ölçülen hız değeri.....	149
Şekil 4.14 Tasarlanıp üretilen 3-Boyutlu travers mekanizmasının resmi.....	150
Şekil 3.15 Akım görüntülemeye kullanılan duman üretici, hortum ve özel sıvısı.....	151
Şekil 4.16 Sadece jet akışı olması durumunda a) hız verisi b) güç tayfı, ($Re_{jet}=4800$, $x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=14$).	156
Şekil 4.17 Sadece lüleden 10 m/s ile akış olduğunda farklı istasyonlara ait güç tayfları, ($x/D=0$, $y/D=0$).	157
Şekil 4.18 Farklı çıkış hızlarına sahip serbest jet akışı (a) ve lüle ile kanaldan aynı anda farklı hız oranlarında olmak üzere çapraz jet akışı olması halinde (b) elde edilmiş güç tayfları, ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=10$).	158
Şekil 4.19 Sadece rüzgar tüneline 10 m/s ile akış olduğunda farklı istasyonlara ait güç tayfları, ($x/D=0$, $y/D=0$).	159
Şekil 4.20 Farklı hız oranlarında elde edilen güç tayfları, a) $z/D=0$, b) $z/D=6$, ($x/D=0$, $y/D=0$).	160
Şekil 4.21 $R=1.5$ için farklı istasyonlarda elde edilen güç tayfları, ($y/D=0$, $z/D=0$).	161
Şekil 4.22 $R=1.0$ için farklı istasyonlarda elde edilen güç tayfları, ($x/D=2$, $y/D=0$).	162
Şekil 4.23 Serbest jetin farklı Re sayılarında kanala girmesi durumunda jet merkezindeki ($z/D=0$) ve $z/D=10$ 'daki dalgacık (wavelet) haritaları, ($x/D=0$, $y/D=0$).	166
Şekil 4.24 Farklı hız oranları için elde edilen dalgacık (wavelet) haritaları, a) $R=0.5$, b) $R=1.0$, c) $R=1.5$, ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=10$).	167
Şekil 4.25 Çapraz akış yönünde farklı istasyonlardaki dalgacık (wavelet) haritaları, a) $x/D=0$, b) $x/D=2$, c) $x/D=4$, ($R=1.5$, $y/D=0$, $z/D=10$).	168
Şekil 4.26 Sadece jet akışının olduğu durumda jet merkezinden kanal içine doğru farklı istasyonlardaki dalgacık (wavelet) güç tayfları, ($Re_j=2400$, $x/D=0$, $y/D=0$). ..	169
Şekil 4.27 Serbest jetin farklı giriş hızlarıyla kanala girmesi durumunda dalgacık (wavelet) güç tayfları, a) $z/D=0$, b) $z/D=10$, ($x/D=0$, $y/D=0$).	170
Şekil 4.28 Hız oranlarının dalgacık (wavelet) güç tayfları üzerindeki etkileri, ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=10$).	171
Şekil 4.29 Hız oranı $R=1.5$ için dalgacık (wavelet) güç tayflarının çapraz akış yönünde farklı istasyonlardaki değişimleri, ($y/D=0$, $z/D=10$).	171
Şekil 4.30 Çapraz akıştaki jet akışında iki farklı hız oranı için lüle merkezinde ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=0$) elde edilen ilk on moda ait aktivasyon dağılımları.	174
Şekil 4.31 Hız oranı $R=1.5$ için dalgacık (wavelet) ayrıştırması ile elde edilen güç tayflarının çapraz akış yönünde farklı istasyonlardaki değişimleri, ($y/D=0$, $z/D=0$).	175
Şekil 4.32 Sadece jet akışı olduğunda iki farklı istasyon için $z/D=0$ 'da u-hızlarının ilk on modunun aktivasyon dağılımları.....	175
Şekil 4.33 İlk beş modun $R=1.5$ için farklı istasyonlardaki aktivasyon dağılımları,	

(y/D=0, z/D=0).....	176
Şekil 4.34 Duman üretici ile akış alanının tespiti için kurulan deney düzeneği.....	177
Şekil 4.35 Serbest jet akışının duman ile görüntülenmesi.....	177
Şekil 4.36 Rüzgar tüneli ve jet en düşük hızlarda çalıştırılırken oluşan akış yapısı.....	178
Şekil 4.37 Çapraz akış hızı sabit iken jet hızının arttırılması (artan R) halinde akış alanının değişimi.....	179
Şekil 4.38 Jet çıkış hızı sabit iken çapraz akış hızının kademeli olarak arttırılması halinde akış alanının değişimi (azalan R durumu).....	180

Çizelge 2.1 Standart k- ϵ türbülans modelinde kullanılan katsayıların değerleri, (Launder ve Spalding, 1972).	31
Çizelge 2.2 Kanal ve lülenin uzunlukları ve kullanılan ağ noktaları (dairese kesitli tek lüle için).	37
Çizelge 2.3 Hesaplamada kullanılan kanal ve lüleye ait sayısal değerler.	38
Çizelge 4.1 Normal laboratuvar şartlarında tek bir hız örneklemede kullanılan CTA için hata kaynakları ve belirsizlikleri.....	155
Çizelge 4.2 Deneysel çalışmada serbest jet ve farklı hız oranları için ölçüm alınan kesitler.	156

ÖNSÖZ

Deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak çapraz akıştaki türbülanslı jet akışlarının incelendiği bu tez uzun ve zahmetli bir çalışmanın ürünüdür. Tez konusu belirlendiği zaman bölümümüzde tez çalışmasıyla ilgili henüz ne bir HAD yazılımı ne de deney yapmaya imkan verecek rüzgar tüneli, sıcak tel hızölçeri (CTA), travers sistemi vd. cihazlar mevcuttu. Uzun, yorucu ve sabır dolu aylar boyunca gerekli piyasa araştırmaları yapılmış, ilgili yerlerden teklifler alınarak YTÜ Rektörlüğüne alımlar için başvuruda bulunulmuş ve uzun bürokratik yazışmalardan sonra gerekli sistem ve cihazlar tek tek alınarak önce bir laboratuvar kurulmuş sonra deney seti ve sistemler deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir.

Tezin en başından sonuna kadar büyük bir özveri ile bir doktora öğrencisi gibi benimle beraber çalışmaktan kaçınmayan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Tamer Yılmaz'ın maddi ve manevi desteğini unutmam mümkün değildir. Tez çalışmam için gerekli laboratuvar ortamını sağlamak üzere bizlere yer tahsis ederek bu çalışmanın yapılmasında katkıları olan rektörümüz sayın Prof. Dr. Durul Ören, bölüm başkanımız sayın Prof. Dr. Bahri Şahin ve Makine Fakültesi dekan yardımcısı sayın Doç. Dr. Nurten Vardar'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

FLUENT yazılımı konusunda yardımlarını esirgemeyen ANOVA yöneticilerinden Kaan Koz ve Mustafa Özer Gelişli'ye, rüzgâr tüneli test kesidi pleksiglaslarını ve değişik kesit ve sayıda lüle temininde yardımcı olan BEST Makine'den Mak. Yük. Müh. Oğuzhan Kukul'a ve travers sisteminin tasarımı, üretimi ve her türlü arızasında elinden gelenin en iyisini yapmaya gayret eden Emre Günaşan'a ayrıca teşekkür ederim.

Hesaplamalı ve deneysel akışkanlar dinamiği laboratuvarının kurulmasının ilk aşamalarından tezimi bitirdiğim son güne kadar bana yardımcı olan mesai arkadaşlarım sevgili Ar. Gör. Y.Hakan Özdemir'e, Özgür Demir'e, oda arkadaşım Y. Doç. Dr. Fuat Alarçin'e, Y. Doç. Dr. Aykut Safa'ya, Y. Doç. Dr. Serkan Ekinci'ye ve Ar. Gör. Uğur B.Çelebi'ye, özellikle sınav görevlerinin dağıtımında benim daha fazla çalışabilmem için kendilerine daha fazla sınav görevi yazdırmak isteyerek iyi niyet gösteren Ar. Gör. Osman Çetin'e, Ar. Gör. Bekir Şener'e, Ar. Gör. Serkan Türkmen'e ve Ar. Gör. Erkin Altunsaray'a sevgilerimi sunarım.

Gerek üniversitede gerekse evde aynı sıkıntıları paylaştığımız, benzer aşamalardan geçtiğimiz, beni dinleyen, anlayan, bana her konuda güvenip destek olan sevgili eşim Ar. Gör. Meral Bayraktar'a sonsuz sevgi ve teşekkürler. Aynı zaman diliminde kendisi de doktora tezini hazırlamakta iken bile benim lehime olmak üzere her türlü sıkıntı ve zorluğa sabrederek daha güzele, daha iyiye ulaşmamızı amaçlayan maddi ve manevi desteklerini sözlerle takdir etmek mümkün değildir. 2006 yılının sıcak bir Mayıs ayında ailemize katılarak bizleri sonsuz sevinç ve şükranla sevk eden sevgili İkramızın varlığı benim için ayrı bir çalışma ve motivasyon kaynağı olmuştur. Şüphe yok ki sizler olmasaydınız hayat bu kadar anlamlı ve güzel olmayacaktı. Her ikinize de ayrı ayrı sonsuz sevgiler.

Erzurum'un ücra bir mecrasında doğup yetişmelerine, okula gitme fırsatı bulamamalarına rağmen okumayı ve okutmanın engin zenginliğine olan inançlarını hayatlarının en kötü zamanlarında bile kaybetmemiş olan, bana ve diğer dört kardeşime ilkokuldan bugünlerimize kadar maddi-manevi destek olan başta sevgili anneme, babama, ablama ve kardeşlerim Hasret, Sevgi ve Hakan'a şükranlarımla.

ÇAPRAZ AKIŞTAKİ TÜRBÜLANSLI JET AKIŞLARININ DENEYSEL VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ

ÖZET

Bilindiği üzere doğadaki hemen hemen tüm akışlar türbülanslıdır. Türbülansın görüldüğü akışlardan biri de çapraz akıştaki jet akışları ya da diğer adıyla çapraz jetlerdir. Çapraz akıştaki jet akışları jet akış yönünün içerisine püskürtüldüğü serbest akış yönünden tamamen farklı olduğu bir akış türünü ifade eder. Serbest akış, sahip olduğu momentumun etkisiyle lüleden püskürtülerek sağlanan jet akışını kendi doğrultusunda akmaya zorlayarak yönünü değiştirir. Çapraz akıştaki jetler, düşük hızlı baca dumanlarından, yüksek hızlara sahip jet motorlarının yanma odalarındaki akışa ve hipersonik roket ve füze kontrol sistemlerine, düşük kütle akışlı sınır tabaka kontrol sistemlerinden, dikey olarak inip havalanabilen V/STOL uçaklara kadar pek çok mühendislik olayında kendini göstermektedir.

Bu çalışmada çapraz akıştaki jet akışları problemi deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak ele alınmıştır. HAD ile çapraz akıştaki jet akışlarının incelenmesi amacıyla, gerek endüstriyel uygulamalarda mühendislerce, gerekse de üniversite ve araştırma enstitülerinde bilim adamları ve araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan FLUENT 6.3.26 programından yararlanılmıştır. Sayısal kısımda lüle kesit geometrisi, lüle sayısı, hız oranlarının etkisinin yanında ayrıca lüle ile çapraz akış arasındaki eğim açısı da dikkate alınarak, bu gibi değişkenlerin akış yapısı üzerindeki etkileri kapsamlı olarak ele alınmıştır. Bunun için dairesel ve kare kesitli olmak üzere iki farklı lüle kesit geometrisi, bir lüle ve üç tane lüle yan yana olmak üzere iki farklı lüle sayısı, $R=0.2, 0.5, 1.0$ ve 2.0 olmak üzere dört farklı hız oranı ve $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90° olmak üzere beş farklı eğim açısı incelenmiştir. Çapraz akıştaki baskın girdap yapılarından en önemli olan zıt-dönüslü girdap çiftinin hız oranı, eğim açısı ve lüle kesit geometrisi ile nasıl değiştiği araştırılmıştır. Eğim açısı ve hız oranının artmasıyla zıt-dönüslü girdap çiftinin ölçek olarak büyüdüğü ve yan yana üç tane lüle kullanılması durumunda oluşan zıt-dönüslü girdap çiftinin, tek bir lüle kullanılmasına göre daha farklı bir yapıda olduğu görülmüştür. Bunun yanında özellikle gaz türbinlerinin film soğutulmasında büyük öneme sahip film soğutma verimi de en uygun lüle kesit geometrisi, eğim açısı ve hız oranı için araştırılarak sonuçlar irdelenmiştir. Film soğutma veriminin en yüksek değeri, eğim açısı 30° için elde edilmiş ve dairesel kesitli lüle kullanılmasının daha iyi olacağı sonucuna varılmıştır.

Deneysel ölçümler $304\text{ mm} \times 304\text{ mm} \times 914\text{ mm}$ test kesidine sahip bir rüzgâr tüneline değişik hız oranları için farklı yatay ve düşey mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Lüleden sağlanan jet akışı ve rüzgâr tüneline gerçekleştirilen serbest akış hızı sabit sıcaklık hızölçeri (sıcak tel hızölçeri) kullanılarak ölçülmüştür. Jet akışının sağlandığı lüle dairesel kesitli olup, ölçümler 90° eğim açısında $R=0.5, 1.0$ ve 1.5 için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler Fourier, dalgacık (wavelet) ve uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) metotları kullanılarak incelenmiş, akışa ait güç tayfları (power spectrum), dalgacık haritaları ve frekans-zaman alanındaki değişimleri sunulmuştur. Fourier analizine göre, bir serbest jette lüle çıkışındaki güç tayfı ilerleyen diğer mesafelere göre laminar karakter göstermiş ve lüle çıkış hızı artırıldığında frekans enerjisi düşmüştür. Üç farklı hız oranı ($R=0.5, 1.0$ ve 1.5) için yapılan mukayesede daha yüksek hız oranında daha düşük frekans enerjisi saptanmıştır. Bu durum lülenin merkezinde jetin çapraz akış önünde bir engel gibi davranarak çapraz akış etkisini sönümlemesi ve ilerleyen mesafelerde etkisini kaybetmesine bağlanmıştır. Verilerin dalgacık (wavelet) analizinde en düşük hız oranı olan $R=0.5$ 'te baskın frekansın 45 Hz 'te kendini gösterdiği, ancak $R=1.0$ olduğunda bu değerin 85 Hz ile 105 Hz arasında olduğu gözlenmiştir.

Enerjinin modlara göre dağılımlarının gösterildiği uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) metodunda ise düşük hız oranındaki modların yüksek hız oranındaki modlara nazaran daha fazla enerji taşıdıkları görülmüştür. Lüle çıkışından uzaklaştıkça toplam enerjinin daha fazla sayıda moda dağıldığı gösterilmiştir.

Akım görüntüleme tekniği kullanılarak çapraz akıştaki jet akışlarında görülen büyük ölçekli yapılar ve akış yapısı gösterilmiştir. Bunun için bir duman üretici ve dijital video kayıt cihazı kullanılarak rüzgâr tüneli ve jet hızları değiştirilerek akış alanı incelenmiştir. Yüksek jet hızlarında lüleden püskürtülen jet, çapraz akış içerisine daha dik bir şekilde nüfuz ederek akmaya devam etmiştir. Lüle hızı kademeli olarak azaltıldığında ise rüzgâr tüneline sağlanan çapraz akış daha baskın hale gelmiş ve jet akışını yenerek, kendi doğrultusunda akmaya zorlamıştır. Rüzgâr tüneli yüksek hızda çalıştırıldığında bu baskın özellik daha çok görülmüş ve jet akışı gittikçe düzleşerek test kesidinden akmaya başlamıştır. Rüzgâr tüneli ve lülenin düşük hızlarda aktığında saptanan kayma tabakası girdapları, özellikle çapraz akışın yüksek hızlarında tespit edilememiştir.

Anahtar kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), türbülans modelleri, çapraz jet, sabit sıcaklık hızölçeri, dalgacık ayrıklaştırması, uygun ortogonal ayrıklaştırma, Fourier ayrıklaştırması, güç tayfı.

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS OF TURBULENT JET IN CROSSFLOW

ABSTRACT

As it is well known that, most of the flows in the nature are turbulent. One of the turbulent flows seen in the nature is jet in cross flow or transverse jet. Jet in cross flow expresses the flow at which its direction is completely different from the cross flow. Free stream forces the jet flow to change its direction due to its momentum. Jet in crossflow is encountered from the stack smoke to flow in combustion room and hypersonic missile and rocket control systems, low mass flux boundary layer control systems to V/STOL aircrafts.

In this study, jet in cross flow is taken into account by using experimental and computational fluid dynamics (CFD). In computational fluid dynamics calculations a CFD code of FLUENT 6.3.26 which has been used commonly in industry by engineers and in institutions and universities by academicians and researchers are considered. In the numerical section, nozzle geometry, number of nozzles, velocity ratio and inclination angle between the crossflow and nozzle are investigated to explore the effect of these parameters on the flow structure. For this reason two different nozzle section geometries; two different nozzle arrangements; circular and square nozzles, one and three-side by side nozzles, four different velocity ratios; $R=0.2$, 0.5 , 1.0 and 2.0 , five different inclination angle; $\alpha=0^\circ$, 45° , 60° , 75° ve 90° are considered. It was realized that, the high velocity ratio and inclination angle between the channel and nozzle, the more penetration of jet and the enlarge the counter-rotating vortex pair (CRVP) in size. It was also reported that using three nozzles side by side lead to high CRVP in size than the use of one nozzle. Film cooling which is very important for cooling technique was also investigated for different jet inclination angle and blowing ratios. It can be concluded that, the high thermal film cooling efficiency was obtained for the lowest inclination angle of 30° .

Experimental measurements are done in a wind tunnel which has $305\text{ mm}\times 305\text{ mm}\times 914\text{ mm}$ test section for different jet-to-crossflow velocity ratios at different stations. Jet in crossflow are measured by using constant temperature anemometer (CTA) which is traditional but most commonly used in the experiments. Nozzles used in the experiments are considered as circular and the inclination angle between the nozzle and crossflow are designed as 90° . All measurements are conducted for $R=0.5$, 1.0 and 1.5 . The results are then decomposed by using Fourier, wavelet and proper orthogonal decomposition (POD) techniques. Besides power spectrums and histograms dealing with the flow, velocity distributions are showed. According to Fourier analysis, the power spectrum at the center of the nozzle are more similar to the laminar character that the streamwise stations. When jet exit velocity was increased, it was seen that the energy of the flow decreased ironically. Comparisons were made for three velocity ratios, ($R=0.5$, 1.0 and 1.5) and it was seen that, the highest velocity ratio has the lowest energy. At the center of the nozzle, jet acts as an obstacle to the coming crossflow and damps the effect of the crossflow. The most dominant frequency of the flow was detected as 45 Hz at the ratio of $R=0.5$ by using wavelet technique. At $R=1.0$, dominant frequencies were seen at 85 Hz to 105 Hz . Energy contribution of the flow was calculated by using proper orthogonal decomposition (POD) technique and it was seen that the lower velocity ratio leads to carry more energy of the flow than the higher velocity ratio.

Flow visualization technique was also performed to reveal the flow structure. A fog generator and digital video camera were used for this purpose. The flow field was investigated for different jet to crossflow velocity ratio by changing the velocity of the jet and wind tunnel,

respectively. At the highest velocity ratio, jet penetrate directly into the crossflow due to its high momentum and acts as obstacle on the coming crossflow. It was also showed that, when the jet velocity was increased, crossflow become more dominant and sweep the jet flow, bending it to the crossflow direction. Shear layer vortices were detected especially at lower velocity ratio while it could not be seen at high crossflow.

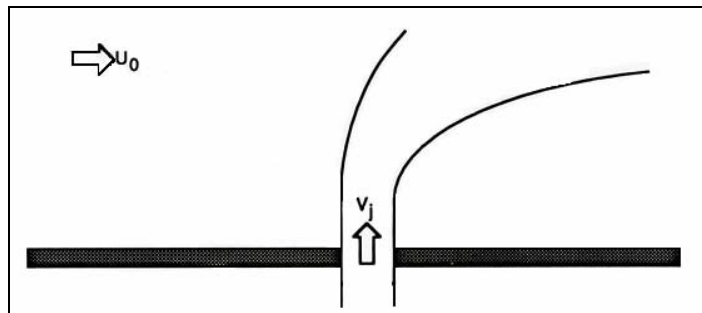
Keywords: Computational fluid dynamics (CFD), turbulence models, transverse jet, constant temperature aneometer (CTA), wavelet transform, proper ortogonal decomposition (POD), Fourier decomposition, power sprectrum.

1. GİRİŞ

“Yeterince küçük” ölçekler ve “yeterince düşük” hızlarda, yani Reynolds sayısının (Re) çok büyük olmadığı durumlarda viskoz akışkanın hareket denklemleri süreklilik yaklaşımıyla kolayca çözülebilirler. Bu tip akışlar girdap ve momentumun viskoz difüzyonu ile kontrol edilirler. Doğada da deneysel olarak rahatça gözlemlenebilen böyle akışlara laminar akış denir.

Yüksek Reynolds sayılarında, atalet kuvvetleri viskoz gerilmeleri yener ve akış kararsız hale gelir. Akışın hız ve basınç değerlerinde ani dalgalanmalar görülür ve akış üç boyutlu olup süresizleşir (daimi olmayan akış). Söz konusu bu durum oluşmaya başladığında akış artık türbülanslıdır. Esas itibari ile pratik mühendislikteki tüm akışlar türbülanslıdır. Roket, uçak, gemi ve otomobil gibi araçların etrafındaki akışlar, ısı değiştirgeçleri, türbin pervaneleri, güç santrallerinden atmosfere karışan yanma sonu atık gazlar türbülanslı ortamlarda bulunurlar. Bundan dolayı, genel uygulamalar için akış alanını analiz etmek gerektiğinde türbülans mutlaka göz önüne alınmalıdır. Her ne kadar günümüze dek türbülans ile ilgili oldukça geniş ve kapsamlı çalışmalar yapılmış ise de, günümüz klasik fiziğinde türbülans, bilim adamları ve mühendisler için hala çözülememiş temel bir problem olarak durmakta ve önemini muhafaza etmektedir (Wilcox, 2002).

Türbülansın görüldüğü akışlardan biri de, aşağıda örnekleri verilmiş olan ve endüstriyel uygulamalarda sık sık karşımıza çıkan çapraz akıştaki jet akışlarıdır. “*çapraz akıştaki jet akışı*” veya “*çapraz jet*”, jet akış yönünün serbest akış yönünden farklı olduğu bir akış türünü ifade eder. Çeşitli geometrik kesitlere sahip bir delikten çıkan jet kendi eksenıyla belli bir açıda olan bir kanala püskürtülür. Kanaldan akmakta olan serbest akış ya da çapraz akış sahip olduğu momentumdan dolayı, lüleden kanala belli bir açıda püskürtülerek sağlanan jet akışını kendi doğrultusunda akmaya zorlayarak yönünü değiştirir. Böyle bir akışı gösteren oldukça basit bir şema Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1 Çapraz akıştaki jet akışlarının şematik gösterimi.

Çapraz akıştaki jet akışlarıyla ilgili kapsamlı çalışmalar AGARD CP-534, 1993'te bulunabilir. Çapraz akıştaki jetler, düşük hızlı baca dumanlarından yüksek hızlara sahip jet motorlarının yanma odalarındaki akışa ve hipersonik roket ve füze kontrol sistemlerine, düşük kütle akışlı sınır tabaka kontrol sistemlerinden yüksek kütle akışlı V/STOL uçaklara kadar (Şekil 1.2) pek çok mühendislik olayında kendini göstermektedir (Viti, 2002). Ayrıca;

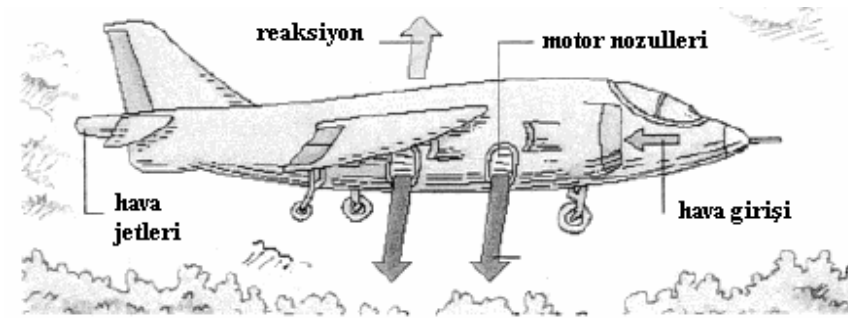
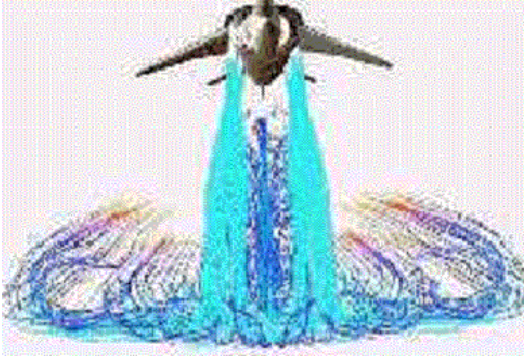
- Volkanlardan püsküren dumanların atmosfere karışması,
- Gemi, fabrika ya da petrol arama ve çıkarma platformlarından atılan atık gazların atmosfere karışması (Şekil 1.3),
- Giriş kenarına hava jetlerinin çarptırılmasıyla iç soğutmanın yapıldığı türbin kanatları,
- Endüstriyel binalarda açık alanlardan içeriye soğuk havanın girmesini önlemek için kullanılan hava perdeleri,
- Bir gaz türbini kanadından yakıtın çapraz akışta püskürtülmesi, (Şekil 1.4)
- Soğutma kulelerinden havaya karışan su buharları (Şekil 1.5),
- Gaz türbinli motorların yanma odası çevresi boyunca açılmış deliklerden hava jetlerinin yanma odasına radyal olarak püskürtülmesi,
- Nehirlerin açık denizlere karışması (Şekil 1.6),
- Döküm işleminin bazı çeşitleri,
- Su altından atmosfere fırlatılan roketlerin ilerlemesi (Şekil 1.7)

gibi pek çok alanda çapraz akıştaki jet akışlarına rastlanabilir.

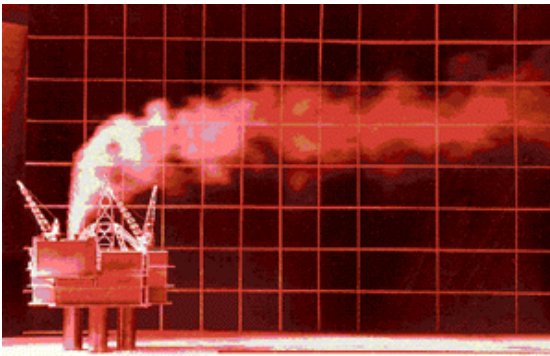
Çapraz akıştaki jet akışlarıyla ilgili problemler pek çok değişkene bağlıdır. Bu değişkenler:

- Jet hızının çapraz akış hızına oranı ($R=V_{jet}/V_{\text{ça}}$),
- Jet püskürtme açısı (α),
- Jetin eğrilik açısı,
- Jetin akış şartları (ses altı veya ses üstü),
- Serbest akışın akış şartlarıdır (ses altı, ses üstü, laminar veya türbülanslı),
- Jet çıkış geometrisi (kare, parabolik, dairesel vb.),

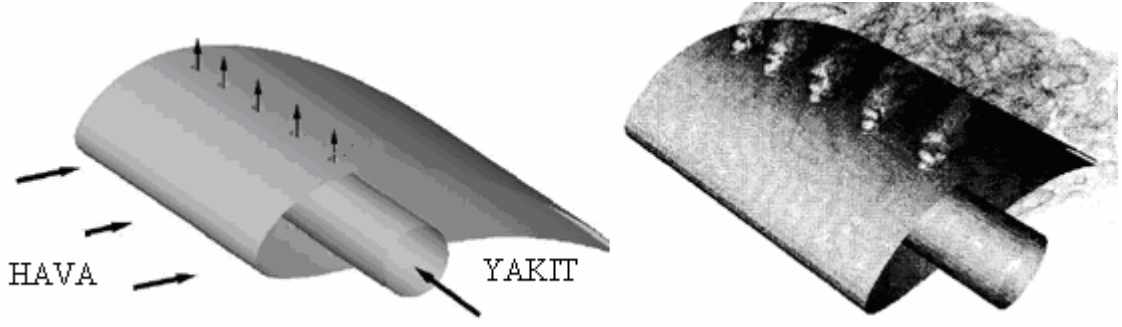
- Türbülans profilleri,
- Jetin tek veya çok fazlı olması, tepkimeli veya tepkimesiz karışım olması vb.



şekil 1.2 Havadan yere/yerden havaya dikey inip/kalkabilen uçaklar (V/STOL).



şekil 1.3 Termal dumanların yükselerek atmosfere karışması.



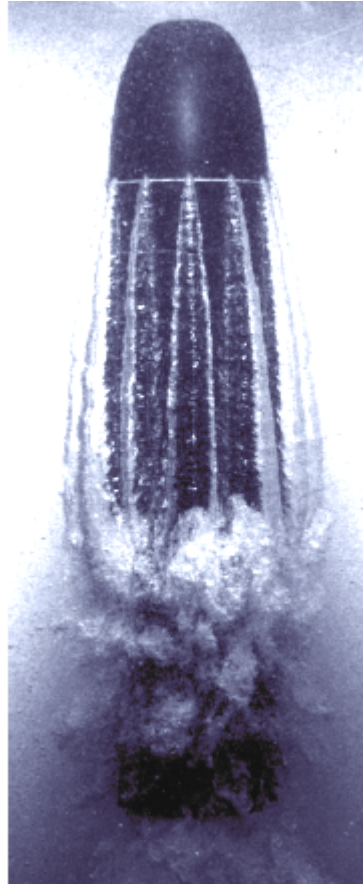
Şekil 1.4 Bir gaz türbini kanadından yakıtın çapraz akışta püskürtülmesi, (Hale, 2000).



Şekil 1.5 Soğutma kulelerinden atmosfere bırakılan su buharı.



Şekil 1.6 Nehirlerin açık denizlere karışması.

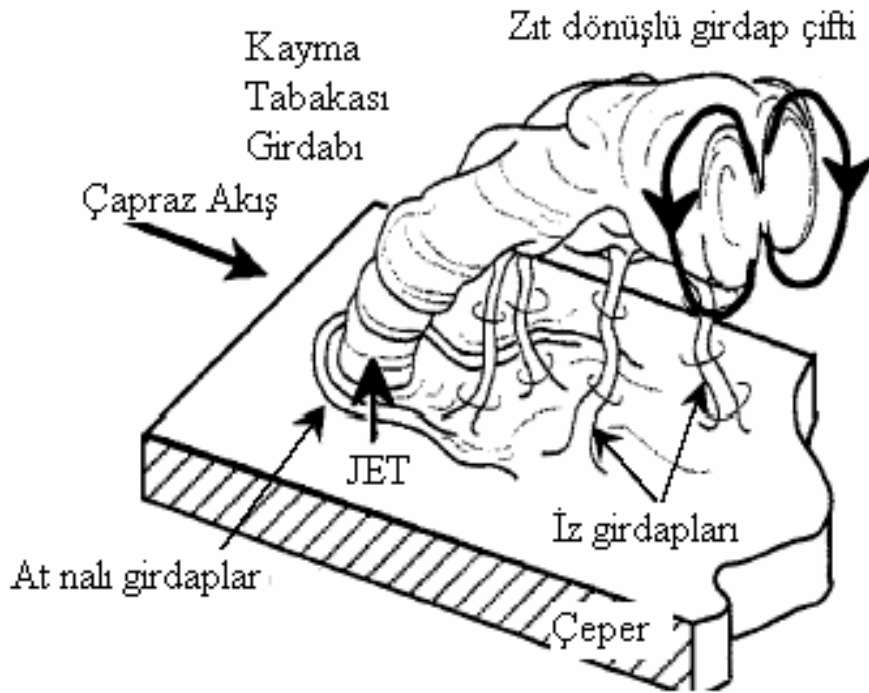


Şekil 1.7 Denizaltıdan atılan bir roketin ilerlemesi, (Vigneau, 2001).

Çapraz akışa püskürtülen bir jet birbirinden oldukça farklı ve karmaşık özelliklere sahip akım alanları oluşturur. Yukarıda da bahsedildiği gibi lüleden bir jet akışı olduğunda, söz konusu

bu jet, çapraz akış tarafından yönü ve doğrultusu saptırılarak eğrisel bir yol izlemeye zorlanır ve çapraz akış yönünde akmaya başlar. Jet kendisine doğru belli bir açıyla gelen serbest akış ile karşılaştığında yönünü değiştirerek aşağıdaki girdap yapılarının da oluşmasına neden olur. Şekil 1.8 çapraz akıştaki jet akışında görülen girdap yapılarını göstermektedir (Johnston ve Khan, 1997). Bunlar aşağıdaki gibi sayılabilir:

- At nalı girdaplar,
- İz girdapları,
- Zıt-dönüslü girdap çifti (ZDGÇ),
- Kayma tabakası girdapları (Şekil 1.9).



Şekil 1.8 Çapraz akıştaki jetlerde görülen baskın girdap yapıları, (Johnston ve Khan, 1997).

1.1 Literatür Araştırması

Çapraz akıştaki jet akışları üzerine çalışmalar özellikle 2. Dünya Savaşı'ndan sonra başlamıştır. Gelişen bilgisayar teknolojileri ve hassas ölçümler yapmaya imkân veren cihazların gelişimiyle beraber konu ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Literatürde çapraz

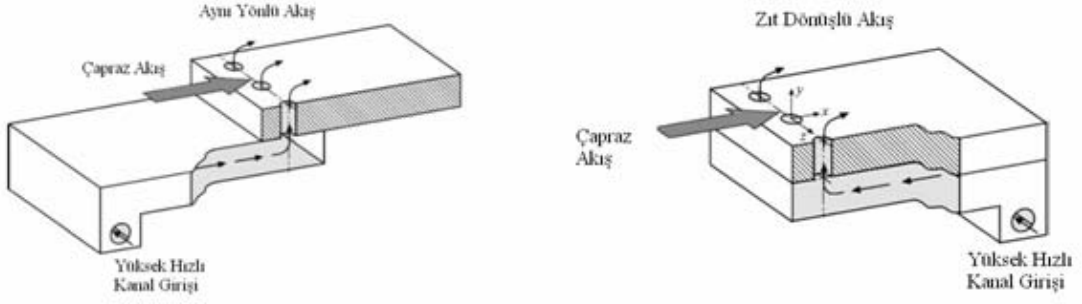
akış içerisindeki jet akışları ile ilgili pek çok sayıda yalnızca deneysel, yalnızca sayısal ve hem deneysel hem de sayısal çalışmalara rastlanmıştır. Bunlar arasında Margason, 1993, tarafından yapılan inceleme 1932'den 1982'ye kadar olan elli yıllık zaman sürecinde çapraz akıştaki jet akışları ile ilgili yapılmış olan çalışmaların derlenmiş olduğu, konu ile temel bilgi ve sonuçların gösterildiği bir kaynaktır. Konunun derinlemesine ele alınması özellikle 1970'li yıllarda *düzenli yapıların* (koherent yapılar) keşfi ve kabulü ile başlamıştır. Henüz düzenli yapılarla ilgili kesin bir tanım yapılamamışsa da, çapraz akıştaki jet akışlarında görülen değişik doğrusal olmayan (non-linear) etkiler düzenli yapılarla açıklanmaya çalışılmıştır. Şimdiye dek çapraz akıştaki jet akışlarında dört değişik türde düzenli yapıya rastlanmıştır (Margason, 1993). Bunlar içerisinde en etkili ve pek çok çalışmanın da ana araştırma konusu olanı zıt dönüşlü girdap çiftidir (Şekil 1.8). Gerek deneysel gerekse de sayısal olarak incelenen düzenli hareketlerle ilgili çalışmalar özellikle bu tür yapıların nasıl ve niçin olduğunu anlamaya yönelik olmuştur. Jet çıkışına yakın bölgede gözlenen büyük ölçekli yapılar hem serbest bir jetin *kayma tabakasında* Kelvin-Helmholtz kararsızlığı altında oluşan yapılara hem de bir silindir ile çeper birleşiminde meydana gelen at nalı girdaplara benzemektedir. Çapraz jetlerin kayma tabakasındaki bu *yuvarlanma* işlemi hem jetin önünde hem de ardında meydana gelmektedir. Ancak jet çıkışından sonraki bölgede meydana gelen bu kayma tabakası, jet çıkışından önce oluşanlardan daha belirgin ve baskın olarak görülebilir. Bunun sebebi ise jetten sonraki bu yapıların çabucak kırılması ve karışım işleminin çok hızlı bir şekilde meydana gelmesidir. Şekil 1.9 çapraz jetlerde görülen kayma tabakasını göstermektedir (Rivero vd., 2001).

Jetten uzaktaki bölgelerde oluşan girdaplar *Karman* girdapları ve zıt-dönüşlü girdap çiftidir. Özellikle zıt-dönüşlü girdap çifti (ZDGÇ) hem ortalama hız alanında uzun süreli görülebilmeleri hem de ölçümlerinin nispeten kolay olmalarından dolayı pek çok araştırmacının çalışma konusu olmuştur. Konu ile ilgili yapılmış çalışmalar göstermiştir ki çapraz jetlerdeki bazı değişkenler her ne olursa olsun akış alanında zıt-dönüşlü girdap çifti mutlaka görülecektir çünkü bu akışın temel bir özelliğidir. Bu değişkenler ise jet hızının çapraz akış hızına oranı (R), sınır tabakanın laminar veya türbülanslı olması, sınır tabakanın kalınlığı, Reynolds sayısının değeri, jetin püskürtüldüğü nozulun şekli vb.'dir. Rivero vd., 2001, tarafından sıcak tel hızölçeri ve parçacık lazer kaynaklı floresans (PLIF) kullanılarak yapılan deneylerde ZDGÇ ile ilgili bilgiler verilmiş ve akımdaki girdap yapıları gösterilmiştir (Şekil 1.9).

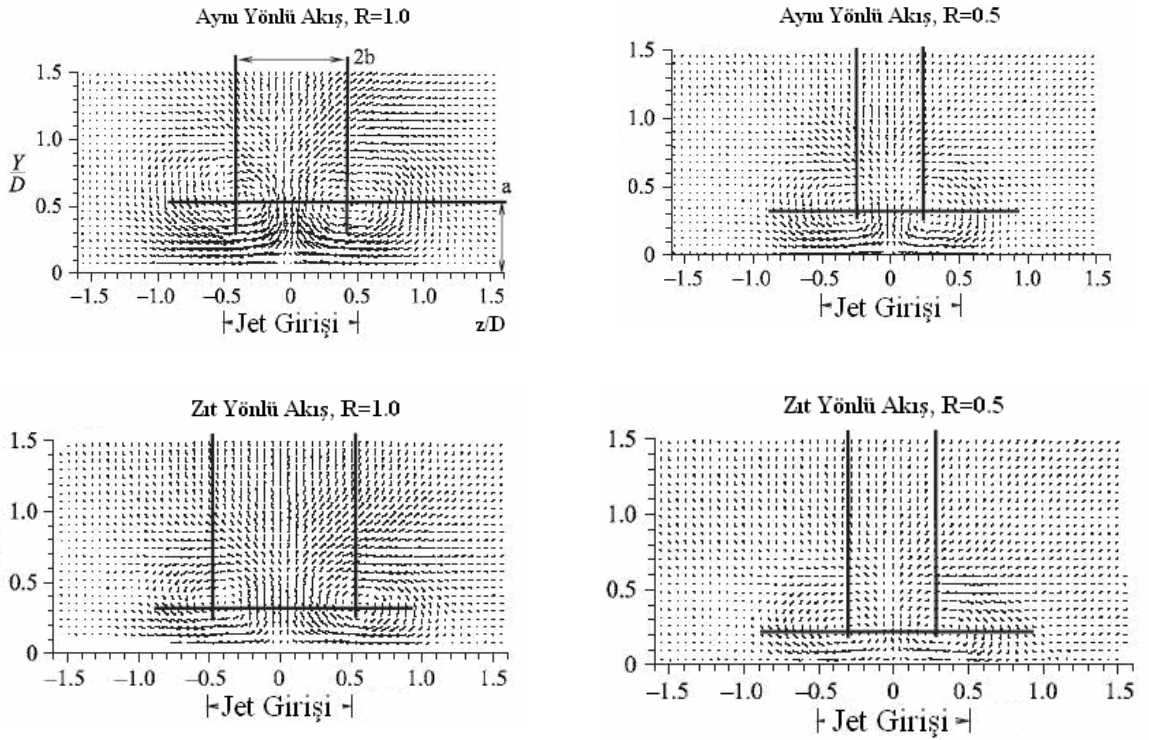


Şekil 1.9 PLIF ile elde edilen akış durumu ve kayma tabakası girdapları, (Rivero vd., 2001).

Zıt dönüşlü girdap çiftinin yoğunluğu zamanla büyük çalkantılar göstermiş ve bu çalkantılar ise *Karman* girdaplarının bir sonucu olarak düşünülmüştür. Zıt-dönüşlü girdap çiftinin uzunluk ölçeği türbülans enerjisi taşıyan küçük yerel girdapların uzunluk ölçeğinden oldukça büyüktür. Bu nedenle türbülansın ziyade ortalama akış alanı ile ilgilidir. Peterson ve Plesniak, 2004'e göre zıt dönüşlü girdap çifti ile ilgili ilk çalışmalar 1940'lı yıllarda akışın iki-boyutlu olarak ele alınmasıyla başlamıştır. Peterson ve Plesniak, 2004, tarafından gerçekleştirilen çalışma, PIV kullanılarak zıt-dönüşlü girdap çifti ile ilgili yapılmış deneysel bir çalışma olup, çapraz akış ile jeti besleyen akışın aynı veya zıt yönlü olup olmamasına göre akıştaki karakteristikler incelenmiştir (Şekil 1.10). Elde edilen sonuçlar çapraz akış ile jet akışının zıt yönlü olması durumunda oluşan zıt-dönüşlü girdap çiftinin birbirlerinden aynı yönlü akışa göre daha uzakta, ancak alt çepere daha yakın oluştuğunu ortaya koymuştur. Aynı zamanda jet ile kanal akışının aynı yönlü olduğu durumda oluşan ZDGÇ aynı hız oranlarında diğerine nazaran daha belirgindir. Hız oranlarının büyük olmasıyla da ZDGÇ daha belirgin görünmektedir. Hız oranlarının artmasıyla jetin yörüngesinde ve jetin enine yayılmasında da artış gözlenmiştir (Şekil 1.11). Bu sonuç film soğutma açısından ele alındığında istenen bir sonuçtur çünkü soğuk jetin türbin kanadı üzerine yayılmasıyla soğutma işleminin verimi artmış olacaktır. Ancak jet yörüngesinin artmasıyla jetin kanat yüzeyinin çok üzerinde olması sıcak gazların kanada nüfuz etmesine sebep olacağından arzu edilen bir sonuç değildir.



Şekil 1.10 Jet ile kanal akışının aynı ve zıt yönlü olması, (Peterson ve Plesniak, 2004).



Şekil 1.11 Jet ile kanal akışının aynı ve zıt yönlü olmasına göre elde edilen hız vektörlerinin farklı hız oranlarına göre değişimi, (Peterson ve Plesniak, 2004).

Çapraz akıştaki jet akışlarıyla ilgili yapılmış ilk çalışmalar genelde jet yörüngesi ve buradaki akış yapılarını anlamaya yönelik olmuştur. 1980'lerden sonra özellikle bilgisayar donanım ve yazılımlarının gelişmesi ve sayısal olarak benzeşim kurmaya imkân vermeleriyle çapraz akıştaki jet akışları hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla ele alınabilmektedir. Çapraz jette karşılaşılan ve yukarıda sayılan girdap yapıları deneysel çalışmaların yanında HAD ile de incelenmiştir. Fric ve Roshko, 1989'a göre *iz girdapları* düz plakanın sınır tabakasından kaynaklanmaktadır. Üiform yoğunluğa sahip bir akışkanda girdap yalnızca düz

plakanın yüzeyinde ve jet nozulunda oluşabilir. Fric ve Roshko, 1989, yaptıkları çalışmada düzlem plaka üzerindeki sınır tabakasının jetten sonraki akış yönünde ayrıldıklarını görmüşlerdir. Kelso ve Delo, 1993, tarafından yapılan çalışma ise iz bölgesinde girdabın nasıl oluştuğunu ve iz girdabının çapraz akışla nasıl taşındığını inceleyen bir çalışmadır. Araştırmacılara göre sınır tabaka ayrışırken meydana gelen girdaplar jet akış doğrultusunda hareket etmekte, ayrıca jetin önündeki iz girdapları jetin ardında oluşan iz girdaplarından daha fazla büyümektedir.

Yukarıda sayılanların dışında, çapraz akıştaki jet akışları ile ilgili literatür araştırması akışın fiziğine etki eden değişkenler ve jet akışının türüne göre sınıflandırılarak gerçekleştirilmiştir. Jet akışının sağlandığı lüle ile kanal arasındaki eğim açısı, lülenin kesit geometrisi, bir veya birden çok lülenin yan yana ya da ardışık olarak yerleştirilmesi ve özellikle baca gazlarının sayısal ve deneysel olarak incelenmesinde kullanılan lülenin belli bir yüksekliğe kadar kanal içerisine uzatılarak meydana gelen akıştaki etkilerin incelenmesi gibi alt başlıklar halinde toplanabilen literatür araştırması, film soğutma ve jet yörüngesi ile ilgili çalışmalar da dahil edilerek sunulmuştur.

1.1.1 Nozul Geometrisinin Etkisi

Foster ve Engblom, 2003, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS-Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemleri için Mentor'un Gerilme Taşınım Türbülans Modelini kullanarak Mach (Ma) sayısının 1.2 olduğu bir çapraz akıştaki jet akışında çeşitli püskürtücü geometrilerinin etkilerini incelemişlerdir. Karışım ve jetin çapraz akışa girişinin jet geometrisine olan duyarlılığının ele alındığı diğer bir çalışma da Tomioka vd., 2003, tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise Ma sayısı 3 alınmıştır. Çalışmada jet dinamik basıncının ($p_{din}=1/2\rho V^2$) çapraz akışın dinamik basıncına oranının, püskürtücü lüle şeklinin ve püskürtme açısının etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Hatch vd., 1995, tarafından yapılmış benzer bir çalışmada püskürtülen jet soğuk alınarak ısıtılmış çapraz akışa gönderilen akışta, geometri ve akış özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Nozul kesidinin tamamen dikdörtgen olduğu durumlar için akışın ele alındığı çalışmalardan biri olan Hatch vd.,1992'nin yanısıra Tyagi ve Acharya, 1999 kesidi dörtgen olan bir püskürtücünün değişik L/D oranlarında geometrinin soğutucu akışkan üzerindeki etkilerini Büyük Girdap Benzeşimi (LES-Large Eddy Simulation) ile incelemişlerdir. Haven ve Kurosaka, 1997, tarafından da belirtildiği gibi düşük R'lerde ve özellikle jet çıkışına yakın bölgede çapraz akıştaki jet dinamiği jet çıkış geometrisine bağlı olarak değişir. Beklendiği üzere jetin çapraz akış içerisine dikey olarak nüfuz etmesi yüksek R'lerde çok, düşük R'lerde ise az olmaktadır.

1.1.2 Nozul Açısının Etkisi

Çapraz akıştaki jet akışlarında görülen önemli değişkenlerden biri de, akış yapısını kontrol etmekte ve jetin çapraz akış içerisine yayılmasında önem arz eden jet eğim açısıdır. Tyagi ve Acharya, 2000, kare kesitli bir nozuldan çıkan soğuk bir jetin iki farklı meyil açısında (30° ve 90°) jetin yayılma ve çapraz akış içerisine girmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Burada elde edilen bulgulara göre, jet çapraz akışa dik olarak ($\alpha=90^\circ$) püskürtüldüğünde akış alanında daha büyük yayılım göstererek çapraz akışa karışır. Bunun yanında normal püskürtme halinde, akış alanında büyük basınç gradyenlerine rastlanırken, benzer durumlar 30° ’ lik püskürtme açılarında görülememiştir. Literatürde 30° ve 90° gibi eğim açılarından başka 25° , 35° , 45° ve 60° gibi çeşitli eğim açıları için de benzer çalışmalar yapılarak hız ve girdap mukayeseleri yapılmıştır (Fuller ve Walters, 1991; Williams ve Hartfield, 1996; Clarence vd.,1999 ve Wang, 2000). Donat ve Schatzmann, 1999, tek fazlı ağır gazlardan oluşmuş jetlerin değişik açılarda türbülanslı çapraz akışa püskürtülmelerini deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, zararlı gazlar içeren jetin püskürtme açısının tehlikeli bölge olarak adlandırılan alanlar üzerinde oldukça etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Wegner vd.,2004, jet ile çapraz akış arasındaki açının 30° , 60° ve 90° için yaptıkları sayısal çalışmalarında jetin çapraz akışa dik olarak püskürtülmesi durumu için elde ettikleri sonuçları Andreopoulos, 1983 ve Andreopoulos ve Rodi, 1984’ün deneysel verileriyle karşılaştırarak benzeşimlerinin doğruluğunu göstermişlerdir.

1.1.3 Çapraz Akışta Birden Fazla Jet Bulunması

Çapraz akışta tekli jet ile ilgili çalışmalar çok geniş sayıda olmasına rağmen, birden fazla jetin (çoklu jet) bulunmasıyla meydana gelen akım alanının incelendiği çalışmalar daha seyrek. Çapraz akıştaki çoklu jet ile ilgili çalışmalar ilk kez 1977 yılında gerçekleştirilmiştir (Kolar vd., 2003). Konu ile ilgili yapılan daha sonraki çalışmalarda jetler çoğunlukla ard arda ve/veya yan yana konumlanmış şekilde ve genelde deneysel yapılmış araştırmalardır (Isaac ve Jacobowski, 1985, Savory ve Toy, 1991, Barata vd., 1991). Kolar vd, 2003, ve Kolar vd., 2001, çapraz akıştaki ikiz jetleri ele alarak girdap dağılımı üzerine yoğunlaşmışlardır. Deneysel olan bu çalışmalarında akışa ait hız vektörleri ve çapraz akıştaki ikiz jetlerle ilgili türbülans istatistikleri standart çapraz sıcak tel hızölçeri tekniğini kullanılarak elde edilmiştir. Çalışma neticesinde baskın girdap yapısının oluşumu ve azalıp yok olmasının türbülans girdap taşınımı ile ilgili olduğu görülmüştür. Ardışık yerleştirilmiş jetlerdeki girdap dağılımının çapraz akıştaki tek bir jetin girdap dağılımıyla benzerlik gösterdiği ifade edilmiştir. Toy vd., 1993, ardı ardına yerleştirilmiş jetlerin, çapraz akışa maruz tek bir jette

olduğu gibi yalnızca bir girdap çiftiyle eğilmeye zorlandığını saptamışlardır.

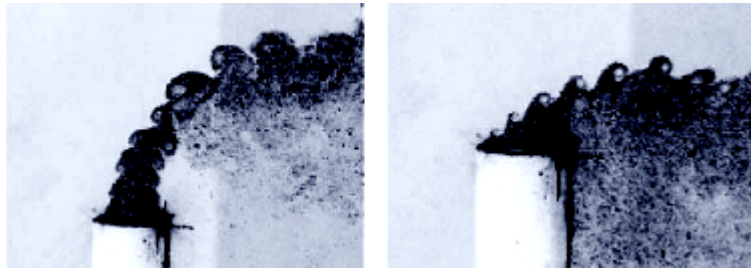
Çapraz akıştaki birden fazla jet uygulamalarında kullanılan jetler bir yüzeye çarptırılarak da kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalar genellikle kâğıt ve film kurutma işleminde, camın tavlanması, gaz türbinleri ve elektronik bileşenlerin soğutulmasında vb. görülmektedir (Nakabe vd., 2001).

Çapraz akıştaki türbülanslı jet akışları yapıları gereği üç boyutludurlar ve literatürde yapılmış çalışmaların büyük çoğunluğunun da beklendiği üzere üç boyutlu çalışmalar olduğu görülmüştür. Bunun yanında çapraz akıştaki jet akışlarının iki boyutlu olarak ele alındığı çalışmalara rastlamakta mümkündür. Jetin gelişiminin ve zıt dönüşlü girdap çiftinin oluşum evresinin incelendiği çalışmada çapraz akış, çoğu çalışmada kabul edildiğinin aksine laminar olduğu kabul edilmiştir, (Muppidi ve Mahesh, 2005). Çapraz akıştaki jet akışlarının iki-boyutlu, çapraz akışın ise laminar olarak alındığı bir diğer çalışma ise Hahn ve Choi, 1997'nin yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmada hesap zamanının ve ağ genişlemesinin iki-boyutlu akış alanı üzerindeki etkileri belirlenmiş ve buradan hareketle çapraz akışın türbülanslı, akım alanının üç-boyutlu ve süreksiz olması kabulüyle doğrudan sayısal benzeşim (DNS) yapılarak çalışma tamamlanmıştır.

1.1.4 Yükseltilmiş (Elevated) Jet

Yapılan literatür araştırmasında çapraz akıştaki jet akışlarında çok çeşitli akış yapılarının ele alındığı görülmüştür. Bunlar arasında özellikle bacalardan, soğutma kulelerinden vb. çıkan gazların incelendiği akış türlerinde, çapraz akışa karışan jet akışları düzlem yüzeyden belli bir yüksekliğe sahip olarak püskürtülürler (Huang ve Hsieh, 2002, Huang ve Hsieh, 2003). Böyle akışlar *yükseltilmiş jet* olarak isimlendirilebilirler. Bir jet çapraz akışa püskürtüldüğünde çapraz akış doğrultusunda yönünü değiştirirken aynı zamanda jetten sonra iz girdapları denen girdaplar oluşturur. Bir jet referans düzlem hizasından itibaren çapraz akışa püskürtüldüğünde çeperin sınır tabakası ile etkileşime girer. Bu etkileşimin nasıl olduğu ile ilgili detaylı bir çalışma Fric ve Roshko, 1994, tarafından sunulmuştur. Türbülanslı jetin bir bacadan püskürtülmesi durumunda jet izi ile baca iz girdapları etkileşime girerler ve jet izinde normal akışa göre farklılıklar görülür. Eiff ve Keffer, 1997, bir bacadan çıkan yüksek Re sayılı baca gazları akışında girdapların nasıl oluştuğunu anlamak ve bunları tanımlamak için sıcak tel hızölçeri ile ölçüm yapmışlardır. Çalışmalarında çapraz akışla karşılaşan bir bacadan çıkan türbülanslı jet ile baca iz girdapları arasında bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Diğer bir deneysel çalışmalarında, çoklu sıcak tel ölçümleri yaparak akışı kontrol etmede kullanılan

parametrelerin değiştirilmesi durumunda bu ilişkilerin hala var olup olmadığını araştırmışlardır (Eiff ve Keffer, 1999). $1.5 \leq R \leq 6.0$ hız oranları ve $0.63 \leq \theta \leq 0.83$ çap oranlarında jet iz girdapları ile baca iz girdapları arasındaki ilişkinin mevcut olduğu gözlenmiştir. Burada θ , jet çıkış çapının baca çapına oranı, R ise jet hızının çapraz akış hızına oranını ifade etmektedir. Bir bacadan dikey olarak çapraz akışa bırakılan dairesel kesitli ve türbülanslı bir jet akışındaki düzenli hareketleri elde etmeyi amaçlayan bir çalışma ise Said vd., 2007, tarafından gerçekleştirilmiştir. Parçacık görüntüleme tekniği (PIV) ve sıcak tel hızölçeri (HWA) kullanılarak gerçekleştirilen deneyde özellikle bacanın en üst noktasındaki iz bölgeleri üzerinde yoğunlaşmıştır. PIV kullanılarak hız alanı elde edilirken HWA ile de test bölgesinin girişindeki rüzgâr hızları ölçülmüştür. Bacanın çıkışına yakın bölgede gazların dönmesi ve ortalama akışın akış açısı nedeniyle deneysel veri elde etmek oldukça güç olmuştur. Bacadan önceki bölgede çapraz akış düz devam etmekte iken, bacadan sonraki bölgede ters yönlü akışlar meydana gelmiştir. Baca çıkışında türbülanslı akışların tipik bir karakteristiği olan ve Kelvin-Helmholtz kararsızlığından dolayı oluşan akış dalgalanmaları görülmüştür (Şekil 1.12). Çapraz akışın hızına yani R 'ye göre bu dalgalanmanın yönü saat veya saatin tersi yönünde olabilir.



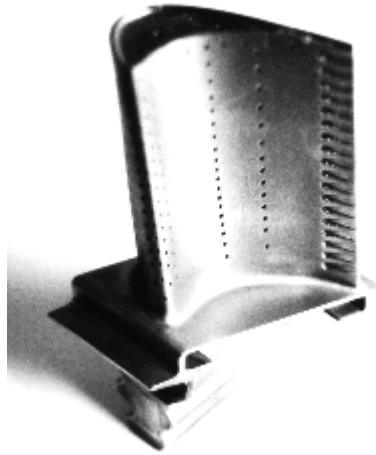
Şekil 1.12 Kelvin-Helmholtz kararsızlığından dolayı oluşan girdap yapısı, (Said vd., 2007).

Klasik baca düzeneklerinde atık gazlar tek bir borudan atmosfere bırakılırken, günümüzde bir baca içerisine çok sayıda boru yerleştirilerek atık gazları bu şekilde uzaklaştırma eğilimi hakim olmaya başlamıştır (Prabhakar, 1988). Bunun başlıca sebebi ise pek çok kazandan gelen değişik hızlara sahip akışkanların tek bir boruya akmasında meydana gelen zararlı etkiyi en aza indirmedir. Ayrıca baca bakıma alındığında akışkanı atmosfere bırakan boru ister istemez devre dışı kalmaktadır. Bir bacada tek bir boru yerine çoklu boru kullanıldığında böyle bir durumla karşılaşmaz. Ayrıca çoklu boru kullanmakla her bir boru ayrı ayrı tasarlanabileceğinden, dizayn parametrelerinin sayısında da azalma görülür (König ve Mokhtarzadeh-Deghan, 2001). Bornoff ve Mokhtarzadeh-Deghan, 2001, bir soğutma kulesinden atmosfere karışan dumanların yan yana ve arka arkaya yerleştirilmiş borulardan

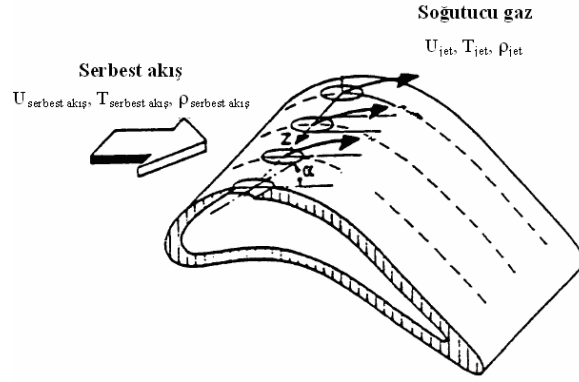
olmak üzere farklı konumlanmasının çevre üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir.

1.1.5 Türbin Kanatlarında Film Soğutma

Çapraz akıştaki jet akışlarının görüldüğü pratik mühendislik uygulamalarından biri olan türbin kanatlarının soğutulması işlemi yıllardır uygulanan ve halen araştırılmaya devam edilen bir konudur. Özellikle gaz türbinlerinde birim ağırlık başına daha fazla itiş gücü elde etmek için çalışmalar yapılmaktadır. Ancak karşılaşılan en büyük zorluklardan biri askeri uygulamalarda performansı, ticari havacılıkta ise enerji verimini artırmak olmuştur. Karada elektrik enerjisi üretiminde kullanılan gaz türbinlerinde de bu performans ve verim artışına ihtiyaç duyulmaktadır. Gaz türbinlerindeki bu verim ve performans artış ihtiyacı, türbin tasarımcılarını giriş sıcaklığını türbin kanadı malzemesinin dayanabildiği sıcaklıkların çok üstünde tutmaya sevk etmektedir. Ancak bu durumda meydana gelen zararlı etkilerden korunmak için özenle tasarlanmış soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gaz türbini elemanlarını soğutmada kullanılan en yaygın teknik ise ayrı deliklerden film soğutma yapmaktır. Film soğutma yapmak amacıyla tasarlanmış bir türbin kanadının resmi Şekil 1.13'te görülmektedir. Film soğutma tabiri Şekil 1.14'de de görülebileceği gibi bir türbin kanadından akışa belli bir açıda püskürtülen jetin, türbin kanadını sararak etrafında bir film tabakası meydana getirmesinden ileri gelmektedir. Burada soğutucu hava bir kompresörden alınıp iç kanallardan pompalanarak türbin kanadına püskürtülür.



Şekil 1.13 İçerisine film soğutma yapılabilmesi için delikler açılan bir gaz türbini kanadı.



Şekil 1.14 Türbin kanadı üzerinde film soğutma.

Püskürtülen hava soğuk olduğundan yoğunluğu ortam akışkanının yoğunluğundan daha fazladır ve bu yüksek yoğunluktan dolayı türbin kanadı üzerine yayılarak bir film tabakası gibi kanadı korur. Bekleneceği üzere oluşan akım alanı oldukça karmaşık olduğundan özellikle jet çıkış bölgesinde akışı ve ısı transferi mekanizmasını tahmin etmek oldukça zorlaşmaktadır. Buradaki akış yapıları baskın olan böbrek şeklindeki girdap ve diğer girdap yapıları ile karakterize edilirler. Türbin kanadı soğutulması probleminde görülen türbülans isotropik değildir ve mevcut türbülans modelleri ile temsil edilmeleri güçtür (*isotropik türbülans, bütün normal gerilme bileşenlerinin birbirine eşit ve teğetsel gerilmelerin sıfıra eşit olduğu, yönden bağımsız türbülanstır. İotropik türbülantta hız bileşenlerinin çarpım ve kareleri ve ilgili türevleri yönden bağımsızdır*).

Günümüze kadar çapraz akıştaki jet akışlarının sayısal olarak çözülmesi için çeşitli model yaklaşımlar kullanılmıştır. Acharya vd, 2001 film soğutma problemlerinde kullanılan yaklaşımları integral, cebirsel, iki denklemlili türbülans modelleri, Reynolds gerilme taşınım modelleri, doğrudan sayısal benzeşim (DNS) ve büyük girdap benzeşimi (LES) olmak üzere ayrı ayrı ele almışlardır. Benzer bir çalışmayı yapan Demuren, 1994'e göre deneysel sonuçlara dayanan ampirik modellerle birinci dereceden tahminleri sağlamada daha hızlı ve basit modeller elde etmek mümkündür. Ampirik modellerin kullanılmasıyla jet yörüngesi, jetin genişlemesi, eksenel yöndeki sıcaklık ve hız düşümleri hakkında detaylı bilgi edinilebilir. İntegral modeller temel korunum kanunlarının matematiksel olarak ifadesidir ve ampirik modellerden daha fazla uygulanmaktadır. İntegral modellerin tek sakıncalı tarafı olayın fiziği hakkında az bilgi vermeleridir. Bütün bu modeller içerisinde en doğru sonuçları veren modeller ise sayısal olanlarıdır.

Roy, 1998 bir türbin kanadının soğutulması probleminde birden fazla jetin belli bir açıyla çapraz akışa püskürtmesi problemini iki farklı hız oranı, yirmi farklı jet arasındaki mesafe ve dört farklı püskürtme açısı için ele almıştır. Burada tahmin edilebileceği gibi jet soğuk, çapraz akış ise sıcak gazlardan meydana gelmektedir. Sayısal olarak ele alınan problemin çözümünde yüksek hız oranlarında ve düşük püskürtme açılarında soğumanın daha verimli yapıldığı görülmüştür.

Benz vd., 1993 bir türbin kanadının soğutulması probleminde jet ile çapraz akış arasındaki etkileşimi hem deneysel hem de sayısal olarak inceleyerek bir kanaldan beslenen soğutucu jetin türbin kanadı etrafındaki çapraz akıştan oldukça etkilendiğini görmüşlerdir. Sayısal çalışmalarında türbülans modeli olarak k-ε türbülans modelini ve ağ oluşturma tekniği olarak da oldukça karmaşık geometrilerde bile çok basit ağ yapısına imkan veren ve her bir elemanı ayrı ayrı alt çalışma alanlarına bölen çoklu-blok tekniği kullanmışlardır. Jetin girişinde uniform hız profili seçilerek bunun oldukça doğru bir tahmin olduğu belirtilmiştir. Sayısal çalışma daha sonra deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

1.1.6 Jet Yörüngesi

Çapraz akıştaki jet akışlarıyla ilgili ilk çalışmalar daha çok jet yörüngesi üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan araştırmada konu ile ilgili pek çok çalışmaya rastlanılmışsa da sonuçların tamamen birbirine benzer olmadığı görülmüştür. Margason, 1993 jet yörüngesi ile ilgili çalışmaları derleyerek jet yörüngesi için en uygun denklemi aşağıdaki gibi önermiştir.

$$\frac{y}{rD} = A \left(\frac{x}{rD} \right)^B \quad (1.1)$$

Burada A ve B katsayılarıdır ve değerleri sırasıyla 1.6 ve 1/3'tür. D jet çapı ve r ise jet momentumunun çapraz akış momentumuna oranıdır. Çapraz akıştaki jet akışlarını karakterize eden en önemli nicelik momentumların oranı olan J'dir.

$$J = \sqrt{\frac{\rho_{jet} U_{jet}^2}{\rho_{kanal} U_{kanal}^2}} \quad (1.2)$$

Burada ρ_{jet} , jetin yoğunluğu, ρ_{kanal} ise çapraz akışın yoğunluğudur. U_{jet} ve U_{kanal} ise sırasıyla jet ve çapraz akışların hız değerleridir. Pek çok durumda jetten çıkan akışkan ile çapraz akışkan aynı türde ve sıcaklıkta olurlar. Bu durumda ($\rho_{jet} = \rho_{kanal}$) olur ve momentumların oranı olan J, aşağıdaki gibi sadeleşerek hızların oranı (R) olarak adlandırılır.

$$R = \frac{U_{jet}}{U_{kanal}} \quad (1.3)$$

Hızların oranı olan R'ye bağlı olarak değişik türde akış rejimlerine rastlanabilir. $R < 0.5$ olan çapraz akıştaki jet akış durumu özel bir yere sahiptir. Bu durumda jet akışı çapraz akıştan daha zayıftır ve çapraz akışın çeper sınır tabakasını kırarak güce sahip değildir. Aynı zamanda çapraz gelen akışkan için bir engel görevi göremez. Bu durumda çapraz akıştaki jet akış türü incelenirse daha pek çok ilave değişkenin de göz önüne alınması gerekir. Çeper sınır tabakasının kalınlığına da bağlı olmak üzere bu akış rejimi hız oranlarının en az 1'e eşit olması durumunda oluşmaya başlar. Bu tip akışlar ise özellikle türbin kanatlarının soğutulmasında önemlidirler (Hasselbring ve Mungal, 2001). Demuren, 1994 ise jet yörüngesi için aşağıdaki ifadeyi önermiştir.

$$\frac{y}{D} = aJ'^b \left(\frac{x}{D} \right)^c \quad (1.4)$$

Burada D, jet çapı a, b ve c ise değerleri deneysel şartlara bağlı olmak üzere sırasıyla 0.7-1.3, 0.36-0.52 ve 0.28-0.40 olan katsayılarıdır. J' 'nin değeri 2 ile 2000 arasında değişir ve Denk.1.5'teki gibi tanımlanmıştır:

$$J' = \frac{\rho_{jet}}{\rho_{kanal}} R^2 \quad (1.5)$$

Burada R ise Denk.1.3'te tanımlanan hızların oranıdır. J' 'nin ortalama değeri için $a=0.85$, $b=0.47$ ve $c=0.36$ alınabilir. Demuren, 1994'e göre Denk.1.4 sadece bir tek jet için olduğu gibi çapraz akıştaki birden fazla jet için de geçerlidir. Jetin fiziksel sınırları için $b=0.36$ ve $c=0.28$, iç ve dış çeperler için $a=1.35$ ve 2.63 alınabilir. Jet merkezindeki yörünge için ise $a=2.05$ alınmalıdır.

Jet yörüngesi ile ilgili çeşitli analitik modeller Hasselbrink ve Mungal, 2001 tarafından önerilmiştir. Karagozian, 1986, bir jet orifisinden çapraz akışa püskürtülen jetin yörüngesi için bir zıt dönüşlü girdap çiftini göz önüne almıştır. Bu girdap çiftiyle ilgili denklemlerin sayısal olarak çözülmesiyle bir jet yörüngesi için elde edilen ve *üs kanunu* olarak adlandırılan Denk.1.6'yı vermiştir.

$$\frac{y}{D} = aR^\beta \left(\frac{x}{D} \right)^\gamma \quad (1.6)$$

Burada D orifisin çapı, $\alpha=0.527$, $\beta=1.178$, ve $\gamma=0.314$ olarak sabit sayılardır. Broadwell ve Breidenthal, 1984, jet çıkışını momentumun nokta kaynağı olarak düşünüp benzerlik teorisinden yararlanmışlardır. Jetten daha uzaktaki bölgelerde uzunluk ölçeğini (RD) olarak önermişlerdir. Bu uzunluk ölçeği ise jet yörüngesini hesaplamada kullanılmıştır (Denk.1.7).

$$\frac{y}{RD} = A \left(\frac{x}{RD} \right)^B \quad (1.7)$$

Burada A ve B sabitlerdir ve deneysel çalışmalardan bu değerler $A=2.05$ ve $B=0.28$ olarak belirlenmiştir. Jet yörüngesini hesaplamada kullanılan uzunluk ölçeği olarak bazı araştırmacılar (D) veya (R^2D) kullanmışlarsa da Smith ve Mungal, 1998 hızların oranı olan R'nin 5 ile 25 arasındaki değerleri için yaptıkları çalışmada jet yörüngesi için en uygun ölçeğin (RD) olduğu sonucuna varmışlardır. Hasselbrink ve Mungal, 2001 yaptıkları çalışmada hız, debi ve jet yörüngesi için sırasıyla yakın ve uzak bölgede geçerli Denk.1.8 ve Denk.1.9'u elde etmişlerdir.

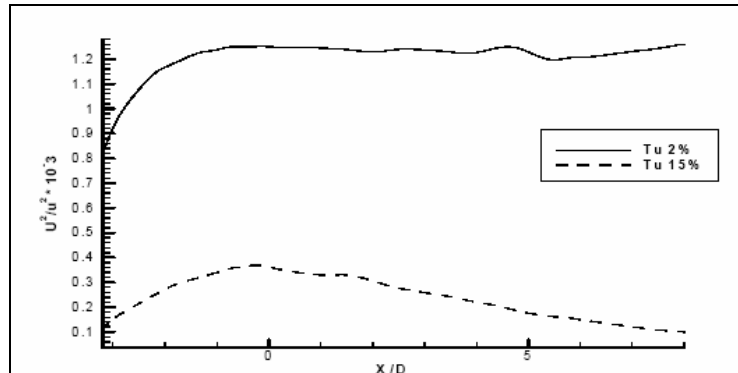
$$\frac{y}{RD} = \left\{ \left(\frac{2}{c_{ej}} \right) \left(\frac{x}{RD} \right) \right\}^{1/2} \quad (1.8)$$

$$\frac{y}{RD} = \left\{ \left(\frac{3}{e_{ew}} \right) \left(\frac{x}{RD} \right) \right\}^{1/3} \quad (1.9)$$

Burada bazı araştırmacılar jet yörüngesini maksimum skaler konsantrasyonunun yeri olarak (Smith ve Mungal, 1998), bazıları ise deneysel çalışmalara dayanarak maksimum hızın yeri olarak tanımlamışlardır. Smith ve Mungal, 1998'e göre maksimum hız kullanılarak elde edilen jet yörüngesi, sıcaklık gibi bir skaler kullanılarak oluşturulan jet yörüngesine göre akışa yaklaşık % 8 daha fazla nüfuz etmektedir. Muppidi ve Mahesh, 2005 çalışmalarında jet hız profili ve çapraz akış sınır tabaka kalınlığının jet yörüngesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 11 milyon ağ elemanı yardımıyla doğrudan sayısal benzeşim (DNS) kullanarak değişik hız oranları ve sınır tabaka kalınlıkları için yörüngenin bu değişkenlere bağıllığı çalışılmıştır. Aynı hız oranlarında çapraz akışın daha kalın sınır tabakasına sahip olduğu ve jetin daha yüksek çıkış hızlarında akış alanına daha fazla nüfuz ettiği görülmüştür. Diğer araştırmacıların aksine jet yörüngesi hesabında kullanılmak üzere yeni bir uzunluk ölçeği olarak (h) tanımlanmıştır. Burada (h) jetin çapraz akış etkisiyle yönünü değiştirmeden önceki dik yüksekliğidir.

Alt başlıklar halinde gruplandığımız bu çalışmalardan başka çapraz akıştaki jet akışlarıyla ilgili çeşitli faktörlerin incelendiği çalışmalar da mevcuttur. Tyagi ve Acharya, 1999 LES ile yaptıkları sayısal çalışmada, türbülans yoğunluğunun ve türbülans gerilme tensörünün çeşitli bileşenlerinin farklı düzenli yapıların gelişimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Burada çapraz akış türbülans yoğunluğu küçük ölçekli ağ oluşturan türbülans olarak karakterize edilerek, türbülans yoğunluklarının %2 ve %15 değerleri için karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 1.15). Yapılan sayısal çalışmada görülmüştür ki çapraz akışın türbülans yoğunluğu arttığında, jet çapraz akışa daha yüksek oranda nüfuz etmekte ve böylece jet ile çapraz akış arasındaki karışım oranı artmaktadır.

Çapraz akıştaki jet akışlarında türbülans yoğunluğunun incelendiği diğer bir çalışma Toften vd., 1993 tarafından yapılmış deneysel çalışmadır. Bu deneysel çalışmada sıcak tel hızölçeri kullanılarak çapraz akış türbülans yoğunluğunun girdap, sürüklenme kuvvetleri ve jet yörüngesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çapraz akışın türbülans yoğunluğunun artmasıyla ana girdap yapılarının mukavemetinde belli bir düşüş gözlenirken hız oranlarının artmasıyla bu etki azalmıştır. Ana girdap yapılarındaki mukavemet düşüşünün bir sonucu olarak çapraz akış türbülans yoğunluğu artarken, ortalama hızda düşüş olmuştur. Jet, çapraz akışa paralel hızlarda herhangi bir düşüşe sebebiyet vermediğinden, jetin saptırılmasına yol açan sürüklenme kuvvetleri de değişmemiştir. Bu nedenle jet yörüngesinde de değişiklik olmadığı görülmüştür.



Şekil 1.15 Çapraz akış türbülans yoğunluğunun aynı yöndeki değişimi, (Tyagi ve Acharya, 1999).

Krothapalli ve Shih, 1993, ses altı çapraz akış içerisindeki ses altı bir jetin ayrı akış alanlarını incelemek için yaptıkları deneyde jet etrafındaki girdapları gözlemlemiş ve Strouhal sayısının yalnızca hızların oranı olan R ile değiştiğini bulmuşlardır.

Camussi vd. 1999, çapraz akıştaki büyük ölçekli yapıları bir su tüneline parçacık görüntüleme hızölçeri (PIV) ile deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı R değerleri için deneyler tekrarlanmış, jetin zorlanmasıyla özellikle jetin kayma tabakasındaki girdap ve düzenli yapıların arttığı görülmüştür. Herhangi bir akış koşulunda halka şeklindeki girdapların jet çıkışından oldukça uzakta meydana geldiği de saptanan diğer önemli bir sonuçtur. Ancak jet-benzeri girdapların R 'den bağımsız olarak her koşulda meydana geldiği belirtilmiştir. Jetten çapraz akışa doğru bir akış söz konusu olduğunda zıt-dönüslü girdap çiftlerinin hemen oluşmaya başladığı ve bunun R ile doğru orantılı olarak arttığı saptanmıştır. Parçacık görüntüleme hızölçerinin yanısıra parçacık lazer kaynaklı floresans (PLIF) kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada Özcan vd., 2001, Camussi vd., 1999'nin yaptığı gibi kare kesitli bir su tüneline dairesel keside sahip bir lüleden püskürtülen jet akışında iki farklı Reynolds sayısı ($Re_{cf}=675$ ve 33750) ve iki farklı hız oranı ($R=1.3$ ve $R=3.3$) için akım hatları, ortalama hız değişimleri, Reynolds gerilmeleri, girdap yayılımı ve türbülans Schmidt sayının değişimini elde etmişlerdir. Türbülans Schmidt sayısı jet çıkına yakın bölgede 0 ile 10 arasında değişirken jet yörüngesinden uzaklaştıkça azalmaya başlamıştır.

Hale vd., 2000, yan yana sıralanmış jetlerden çapraz akışa püskürtülen akışları hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Zayıf at nalı girdapların olduğu bölgelerde jet akışının önünde sınır tabaka ayrılması görülmüştür. Jetten çapraz akışa momentum transferiyle jet bölgesine yakın alanlarda zıt-dönüslü girdap çifti oluşmuştur. Birinci ZDGÇ'nin altındaki iz bölgesinde zayıf da olsa ikinci bir ZDGÇ daha meydana gelmiştir. Yapılan sayısal çalışmalar iz girdapları ve lüle içinde oluşan girdapların jet ile çapraz akış ara bölgesinde görülen girdaplarla ilişkili olduğunu göstermiştir.

Klein vd., 2003, düzlemler arasında meydana gelen ve düzlemsel jet olarak bilinen bir jet akışında Re sayısının etkisini ele almışlar ve çapraz akıştaki jet akışının, giriş koşullarına ve Re sayısına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Hahn ve Choi, 1997 bir çeperden püskürtülen düzlemsel bir jetin iki-boyutlu (2-B) laminar sınır tabaka üzerinde zaman adımı ve ızgara yapısının etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Bunun yanında doğrudan sayısal benzeşim (DNS) kullanılarak çapraz akıştaki jet akışının akış alanını incelemek için üç-boyutlu (3-B) sayısal benzeşim de yapılmıştır. Jetin hemen ardında türbülanslı girdaplar saptanmış ve bunlar akış yönünde ani bir genişleme göstermiştir. Çapraz akıştaki jet akışları dinamiğinde ZDGÇ'lerinin oldukça önemli bir role sahip oldukları, üç-boyutlu jet akışlarında görülen at nalı girdapların iki-boyutlu jet akışlarında saptanamadıkları belirtilmiştir. Üç-boyutlu jet akışlarında jetin önünde oluşan ayrılma ve jetin hemen ardında

ve akış yönünde oluşan at nalı girdap, girdap dağılması ve böbrek kesidi şeklindeki girdapların varlığı gösterilmiştir.

Blanchard vd., 1999, LIF (Laser-Induced Fluorescence) ve parçacık çizgi hızöçeri (PSV) gibi çeşitli optik metotlardan yararlanarak çapraz akıştaki bir jet akışında meydana gelen ZDGÇ'lerin jetin dengesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çapraz akıştaki jet akışlarında meydana gelen girdapların kesitlerinin eliptik olmasından dolayı jetin dengesinde bir azalma olacağı ifade edilmiştir. Denge halinde olmayan jet durumunun ise jetin sınır tabakası üzerindeki dönel ve süreksiz olan çapraz yapıların üretimiyle karakterize edildiği ileri sürülmüştür. Bu çalışma çapraz akıştaki jet akışlarında denge mekanizması üzerinde boyuna yapıların etkisini göstermesi açısından önemlidir.

Hasselbrink ve Mungal, 2001 benzerlik kanunlarından yararlanarak çapraz akıştaki bir baskın jetin analizini yapmışlardır. Bu analizlerinde ilgili denklemlerde geçen basınç terimlerini ihmal ederek hız alanı ve jet izi ile ilgili benzeşim kanunları elde etmişlerdir.

Schlüter ve Schönfeld, 2000, bir gaz türbini kanadından çapraz akışa maruz bırakılan yakıt jetine büyük girdap benzeşimi (LES) uygulamışlar ve sonuçların literatürde mevcut sonuçlarla büyük uyum içinde olduklarını ifade etmişlerdir. Demuren ve Wilson, 1999, doğrudan sayısal benzeşim (DNS), Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ve büyük girdap benzeşimi (LES) kullanarak dikdörtgen kesitli bir jette hem laminar, hem de türbülantlı akış koşulları için girdap üretimini incelemişlerdir. Geniş pratik mühendislik uygulamalarında görülen çapraz akıştaki jet akışına yanma olayında da karşılaşılır. Burada yanma verimini etkileyen parametrelerden bazıları jet hızının, çapraz akış hızının, yakıt türünün, yakıt gazlarının hacimsel enerji bileşeni ve dış sınır tabaka rejiminin fonksiyonudur (Johnson vd., 1999). Yanma işleminde çapraz akıştaki alev jeti yakıtın hava ile daha iyi karışmasını sağlayarak verimi artırır (Lee ve Shin, 2003).

Guo ve Li, 2006 bir kanalın yanal kenarlarından 30° ve 60° eğim açılarıyla püskürtme yapılması durumlarında oluşan hız ve türbülans kinetik enerji alanlarının dağılımlarını RNG k- ϵ türbülans modeli kullanarak üç farklı hız oranı, $R=1.0$, 2.0 ve 3.0 için incelemişlerdir. Eğim açısı ve hızların oranının akım alanını etkilediğini rapor ettikleri çalışmalarında akım boyunca türbülans kinetik enerjisinin kademeli olarak azaldığını ancak en yüksek değerin jet ile çapraz akışın karşılaştığı bölgede görüldüğünü gözlemlemişlerdir.

Sau vd., 2006 ise böbrek ve böbrek benzeri olmayan girdap yapılarının oluşumu ve gelişimlerini kare kesitli bir lüle için sayısal olarak incelemişlerdir.

Azzi ve Jubran, 2007 üç-boyutlu bir çalışma alanında iki farklı lüle şekli (dairesel kesitli ve konsol tipli lüle -girişte dairesel kanalda ise parabolik kesitli lüle-) için ısı transferi ve film soğutma verimlerinin değişimlerini RANS denklemleri kullanarak incelemişlerdir. Sonuç olarak konsol tipli delik yapısının film soğutmada termal verimi artırdığı rapor edilmiştir.

Cardenaz vd., 2007 iki-boyutlu LIF ve PIV ölçümler yaparak çapraz akıştaki jet akışlarında gerilme haritalarını elde etmişlerdir. LES kullanılarak sayısal olarak sonuçların mukayese edildiği çalışmada, ZDGÇ'nin çalkantı bileşenleri ve jet ile çapraz akışın karışımı üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Salewski vd., 2008 çapraz akıştaki jet akışlarında görülen düzenli yapıları ve karışım alanını hem LES kullanarak sayısal, hem de PIV ve LIF kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada sıcaklık gibi ortalama skaler alanlar ve türbülans bilgileri dairesel, eliptik ve kare kesitli lüleler için sunulmuştur. Uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) metodu kullanılarak akıştaki düzenli yapıların lüle şekli ve yerleşimine bağlı olmak üzere önemli rol oynadığı ifade edilmiştir.

Renze vd., 2007 hız ve yoğunluk oranlarının film soğutma olayı üzerindeki etkisini LES ile incelemişlerdir. Burada soğutma eğim açısı 30° ve Re sayısı 4.10^4 için yapılmıştır. Çalışmada hız oranlarının ayrılma, tekrar birleşme, türbülans istatistikleri ve film soğutma verimi üzerinde büyük etkiye sahip olduğu ancak yoğunluk değişimlerinin sabit hız oranında pek önem arz etmediği görülmüştür.

Ramezanizadeh, M. Vd., 2007 LES ile kare kesitli bir lüleden püskürtülen çapraz jetteki hidrodinamik etkileri incelemişlerdir. Benzeşimler 0.5, 1.0 ve 2.0 olmak üzere üç farklı hız ve yoğunluk oranları için yapılmıştır. Bu çalışmada ise yoğunluk oranlarının akışın hidrodinamiği üzerinde büyük etkilere sahip olduğu ifade edilmiştir. Sıcaklık değişimlerine bağlı olarak yoğunluk değişimlerinin ZDGÇ'nin genişleyerek konumu değiştirmesine sebep olmuştur.

Hui ve Jie, 2007 yan yana ve ardışık sıralı lüleler kullanarak çapraz jetlerdeki girdap yapılarının oluşumu ve gelişimini LES kullanarak üç boyutlu olarak incelemişlerdir. Elde edilen bulgular çapraz akıştaki jet akışlarında görülen ZDGÇ, kayma tabakası girdabı gibi girdap yapılarının bağımsız fiziksel oluşumlar olmadığını ancak bu tip akışlarda görülen yerel girdap yapıları olduğunu göstermiştir.

Celata vd., 2007 sıcak bir yüzeye spreysel şekilde soğutma yaparak film soğutma ile mukayese yapmışlardır. Sıvı damlacıklarını yüzey üzerine spreysel şekilde göndermek suretiyle yaptıkları çalışmada soğutma oranının, çeper sıcaklığının, damlacık hız ve çapının ve damlacıkların çarptığı noktanın konumunun bir fonksiyonu olduğunu bulmuşlardır.

Salewski vd., 2007 hem tek hem de çift fazlı çapraz akıştaki jet akışlarını sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında iki fazlı akışta oluşan ZDGÇ'nin tek fazda oluşana göre daha güçlü olduğunu gözlemlemişlerdir.

Shahzad vd., 2007 bir su kanalında yaptıkları deneysel çalışmalarında duman yörüşesi üzerinde Reynolds sayısının etkisini incelemişlerdir.

Fan ve Zhang, 2007 girdap yapılarını inceledikleri sayısal çalışmalarında eğrisel bir jetin kayma tabakasında değişik modlarda girdap yapılarını incelemişlerdir.

1.2 Tezin Önemi, Hedefi ve Yöntemi

Bu çalışmada büyük öneme sahip çapraz akıştaki jet akışları ya da diğer adıyla çapraz jetlerdeki akış yapısı deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Daha önce de anlatıldığı gibi çapraz jetlerle ilgili problemlerle savunma sanayinde, çevre, kimya ve enerji endüstrilerinde çok sık karşılaşmıştır. Bundan dolayı konu ile ilgili yapılmış deneysel, sayısal veya her iki tekniğin beraber kullanıldığı çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Ancak gerek akışın türbülanslı, zamana bağlı ve üç-boyutlu olması, gerekse de baskın girdap yapılarının varlığı çapraz akıştaki jet akışlarıyla ilgili henüz tam bir sonuca varılamamasına yol açmaktadır. Problem doğası gereği pek çok sayıda değişkene bağlı olduğundan, deneysel ve sayısal çalışmaların devam etmesi de kaçınılmazdır. İlerleyen bölümlerde de görüleceği üzere çapraz akıştaki jet akışlarında görülen baskın girdap yapıları ve film soğutma ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Ancak jet akışının sağlandığı lüle kesit geometrisi ve sayısı, jet ile çapraz akış arasındaki eğim açısı ve jet hızının çapraz akış hızına oranı gibi çok sayıda değişkenin bu yapıların oluşum ve gelişimi ve film soğutma verimi üzerindeki etkilerinin beraber ele alındığı çalışmalar hemen hemen yok denecek kadar azdır. Deneysel ve sayısal tekniklerin beraber kullanılarak çapraz jet akışlarında sonuca etki eden çok sayıda değişkenin etkisinin incelenmesi ve uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD), Fourier ve dalgacık (wavelet) analizi gibi ayrıklaştırma tekniklerinin uygulanması çalışmanın katkısını ve konuya kazandırdığı yenilikler olarak sayılabilir.

Bu amaçla Y.T.Ü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü bünyesinde hesaplamalı ve deneysel çalışmalara olanak tanıyacak *Hesaplamalı ve Deneysel Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı* kurularak temel program ve cihazlar mevcut imkânlar dâhilinde temin edilmiştir. Bunlar arasında en önemlileri olarak rüzgar tüneli ve sıcak tel hızölçeri sayılabilir. Tezin deneysel kısmında 304 mm×304 mm×914 mm'lik test kesidine sahip bir rüzgar tünelinde sıcak tel hızölçeri (CTA) ile ölçümler yapılarak akışa ait hız ve türbülans ile ilgili karakteristikler gösterilmiştir. Çalışmanın ikinci ayağı olan simülasyon kısmında ticari bir program olan FLUENT 6.3.26 kullanılmıştır. FLUENT sonlu hacimler metodu kullanarak ısı transferi ve akışkanlar mekaniği ile ilgili problemlerin çözülmesinde dünyada yaygın olarak kullanılan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programıdır. Çalışmanın bu bölümünde rüzgar tüneli ve buraya yerleştirilen dairesel kesitli lüleden sağlanan jet akışı sayısal olarak modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle mukayese edilmiş ve deneysel çalışma ile elde edilemeyen bazı bilgilerin HAD ile elde edilmesi yoluna gidilerek bu iki çalışmanın birbirini tamamlaması amaçlanmıştır. Çalışmada büyük ölçekli yapılara etki eden parametreler incelenerek, bunların fiziki davranışları ve gaz türbini kanadının film soğutma işleminde önemli olan termal verim değerlerinin bu parametrelere olan bağlılığı gösterilmiştir.

Beş bölümden oluşan tezin 1.bölümünde yer alan girişte, konu ile ilgili yapılmış sayısal ve deneysel çalışmalar özetlenerek, incelenen değişkenlere göre gruplandırma yapılmıştır. 2.bölümde hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak çapraz jetlerdeki büyük ölçekli yapılardan zıt-dönüslü girdap çiftinin eğim açısı, hız oranı, lüle kesit geometrisi ve kullanılan lüle sayısına bağlı değişimleri ortaya konulmuştur. Aynı değişkenler kullanılarak gaz türbini soğutulmasında göz önüne alınan film soğutma verimlerinin mukayesesi ise 3.bölümde verilmiştir. 4. bölümde deneysel çalışmada kullanılan sistemler ve cihazlar tanıtılmış, sıcak tel hızölçeri kullanılarak elde edilen veriler farklı düşey ve yatay mesafeler için işlenmiştir. Verilerin işlenmesi amacıyla Fourier ayrıklaştırması, dalgacık (wavelet) ve uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) metotları kullanılmıştır. Bu bölümde, akım görüntüleme tekniği yardımıyla akış alanının değişimleri farklı hız oranları için gösterilmiştir. 5. bölümde sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular özetlenmiş ve konu ile ilgili bir takım önerilerde bulunulmuştur.

2. BÜYÜK ÖLÇEKLİ YAPILARIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ

Bilindiği üzere mühendislik sistemlerinde akışla ilgili analizler iki temel yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilirler. Bunlar deneysel ve sayısal çalışmalardır. Birincisi bir rüzgar tüneli veya başka bir yerde incelenecek cismin küçük bir modelinin yapılmasını, ikincisi ise akışla ilgili diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülmesini gerektirir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) bilgisayar(lar) kullanarak akışla ilgili denklem takımlarının çözülmesidir. Günümüzde birbirlerini tamamlamaları dolayısıyla gerek endüstriyel çalışmalarda gerekse de akademik araştırmalarda deneysel ve hesaplamalı çalışmalar beraber gerçekleştirilmektedir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri, basınç düşüşü veya güç analizleri deneysel olarak incelenirken, kayma gerilmeleri, hız ve basınç profilleri ve akım hatları gibi akışa ait detaylı bilgilere HAD kullanılarak erişilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2006).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere ve matematik hesaplarındaki ilerlemelere bağlı olarak gittikçe daha fazla bir biçimde akademik ve endüstriyel çalışmalarda kendini göstermeye başlamıştır. İlk zamanlarda deneysel akışkanlar dinamiğinin yanında sınırlı olarak kullanılırken sonraları (geçerliliği ve doğruluğu kanıtlanmak üzere) tasarım iyileştirmelerinde daha fazla kullanılır olmuştur. Geometrinin kolayca oluşturulup analiz edilmesine imkan vermesinin yanında, deneysel çalışmalara oranla oldukça da ucuz olması HAD'nin yerini sağlamlaştırmıştır. Günümüzde enstitülerde, üniversitelerde ve endüstride yaygın olarak HAD'dan yararlanılmaktadır. Buna örnek olarak, ticari uçak pazarının lideri olan BOEING firmasında yılda ortalama 20000 HAD çalışmasının yürütülmesi gösterilebilir (Forrester vd., 2005). Ancak bu kadar yaygın olarak kullanılmasının yanında yukarıda da bahsedildiği gibi HAD ile yapılan analizlerin hemen hemen her safhasında sonuçların geçerliliği ve doğruluğu ya deneysel sonuçlarla ya da doğruluğu kabul edilmiş bir referans çalışma ile mutlaka mukayese edilmelidir (Castro, 2003; Castro ve Graham, 1999).

Bu kısımda çapraz akıştaki jet akışı HAD kullanılarak incelenmiştir. İlerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak tanımlanmış dikdörtgen kesitli bir kanala yönü yukarıdan aşağıya doğru olmak üzere dairesel ve kare kesitli lüle(ler)den belli eğim açılarında püskürtme yapılmıştır. Bunun için k-ε türbülans modellerinden en uygun olanı seçilmiş ve hız oranlarının, eğim açılarının ve farklı lüle kesitlerinin akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkileri incelenerek film soğutma verimi için en uygun püskürtme oranı ve eğim açısı belirlenmiştir.

Sayısal çalışma ticari bir yazılım olan FLUENT 6.3.26 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FLUENT sonlu hacimler yöntemini kullanan bir HAD yazılımıdır. 1983'ten bu yana dünya çapında birçok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen FLUENT, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede çözümler sunmaktadır.

FLUENT, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler vb.), kimya ve gıda gibi birbirinden farklı birçok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde kullanıcılarına birbirinden farklı birçok probleme aynı arayüzü kullanarak çözüm alma olanağı sağlar. FLUENT, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminar, geçişli ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üreterek, Araştırma-Geliştirme (AR-GE) bölümlerinin tasarım esnasındaki en güvenilir aracı olmaya adaydır, (ANOVA).

İlerleyen bölümlerde daha ayrıntılı olarak anlatılacağı üzere, çapraz akıştaki jet akışları probleminin sayısal olarak çözümü için ilk adım olarak jet ve çapraz akışların sağlandığı lüle ve kanal geometrileri üç-boyutlu (3-B) oluşturularak çalışma alanı meydana getirilmiştir. Bunun için HAD analizlerinde gerek çalışma alanının oluşturulması gerekse de buna uygun ağ yapısının geliştirilmesinde büyük kolaylıklar sağlayan GAMBIT 2.4.6 kullanılmıştır. GAMBIT, HAD ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemcidir. GAMBIT, HAD ve SE analizlerinin üzerinde en fazla vakit harcanan kısmı olan model hazırlama ve sayısal ağ oluşturma işlemlerini, bünyesinde barındırdığı araçların da yardımıyla, kolaylaştırma ve hızlandırmayı amaçlayan bir yazılımdır. Program, sunduğu araçlarla kullanıcıya kaliteli bir çözüm için gerekli ilk şart olan kaliteli sayısal ağa sahip olma imkânı tanır.

GAMBIT, iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elemanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağın basit ve hızlı bir şekilde oluşturulmasına imkân verir. Bununla beraber barındırdığı çeşitli fonksiyonlarla model içinde ve kritik noktalarda eleman yoğunluğunun ve kalitesinin kontrol edilmesine de olanak sağlar.

2.1 Matematiksel Denklemler

Viskoz, ısı transferi içeren, reaktif olmayan, sıkıştırılamaz, üç-boyutlu ve daimi olmayan akışa ait denklemler kütle korunumu (Denk.2.1), Newton'un ikinci kanunu olan momentumun korunumu (Denk.2.2) ve termodinamiğin birinci kanunu olan enerjinin korunumu (Denk.2.4) denklemleridir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_k)}{\partial x_k} = 0 \quad (2.1)$$

Navier-Stokes denklemi:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_k)}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

Burada τ_{ij} viskoz gerilme tensörü olup Denk.2.3'teki gibidir;

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2.3)$$

Bu ifade momentumun üç bileşeninin korunumunu gösterir. Sol taraftaki ifade birim hacimdeki momentum değişimini, sağ taraftaki ise akışkana etkiyen viskoz ve basınç kuvvetlerini gösterir. Akıştaki ısı transferi de incelendiğinden bu denklemlere ilaveten ayrıca enerjinin korunumu denklemi kullanılmaktadır (Denk.2.4).

$$c_v \frac{(\rho T)}{\partial t} + c_v \frac{(\rho u_k T)}{\partial x_k} = \frac{\gamma}{\text{Re Pr}} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) - (\gamma - 1) p \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \frac{\gamma - 1}{\text{Re}} \Phi \quad (2.4)$$

Denklemin sağ tarafındaki ifadeler sırasıyla iletimden, basınç işinden ve viskoz ısıtmadan dolayı akışkan sıcaklığındaki değişimi gösterirken Φ ise viskoz kayıp fonksiyonunu temsil eder (Denk.2.5);

$$\Phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

2.2 Türbülans Modelleri

Bütün problemlerin çözümünde kullanılabilecek tek bir türbülans modeli henüz mevcut olmadığından, çapraz jetlerin sayısal olarak incelenmesinde kullanılabilecek türbülans modelinin seçimi sonuçlardan beklenen doğruluk derecesi ve hassasiyet göz önüne alınarak yapılmıştır. Akıştaki en küçük uzunluk ölçeği cinsinden çözümlere imkan veren doğrudan sayısal benzeşim (DNS) ve büyük girdap benzeşimi (LES) çok yüksek sayılarda ağ elemanına ihtiyaç duyduğundan ve problemi zamana bağlı olarak çözdüğünden çok hızlı işlemci(ler) ve yüksek kapasiteli bellek kartlarına sahip olmayı gerektirmektedir. Çok fazla sayıda ağ elemanı kullanmayı gerektirdiklerinden ve çözümlerinin uzun sürmesi nedeniyle DNS ve LES yerine Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılarak çözüm yapılması kararlaştırılmıştır. Problemin sayısal çözümünde hızların oranı, eğim açısı, lüle kesit geometrisi gibi pek çok sayıda değişkenin etkisi incelendiğinden DNS ve LES ile çözüm yoluna gidilememiştir. Çapraz jet akışları problemini üç-boyutlu ve zamana bağlı olarak çözeceğinden eldeki mevcut bilgisayarların kapasitelerinin yetersizliği RANS çözüm yapılmasına sebep olmuştur. Bu tip akışlarda görülen baskın girdap yapılarından en önemlisi olan zıt-dönüslü girdap çiftinin oluşum ve gelişimi üzerinde durulduğundan, zamana bağlı çözüm yapılmaması önemli bir eksiklik olarak görülmemektedir. Bu nedenle RANS çözüm yapılması, incelenen değişkenlerin etkilerini göstermesi açısından tatminkâr olmaktadır. RANS denklemleri kullanılarak çözüm yapılması kararlaştırıldıktan sonra iki-denklemlilik türbülans modellerinden hangisinin kullanılması gerektiği ise $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerinin literatürden elde edilen deneysel sonuçlarla mukayese yapmak suretiyle cevaplanmıştır. $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerinden hangisinin kullanılabileceği ile ilgili bir çalışma Bayraktar, 2006 tarafından yükseltilmiş jet akışı için gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal çalışmada $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerinin performansları PIV kullanılarak elde edilmiş deneysel verilerle mukayese yapmak suretiyle incelenmiştir. $R=1.375$ için üç farklı istasyon ve iki hız bileşeni (u ve v) için yapılan karşılaştırmada $k-\omega$ türbülans modelleri oldukça yetersiz kaldığından çalışmaların $k-\epsilon$ türbülans modelleri içerisinde en uygun olanı ile yapılması kararlaştırılmıştır. Gerek bu karşılaştırmadan gerekse de ilerleyen bölümlerde detaylı olarak verilen ve normal jet akışı için yapılan bir deneysel çalışmayla mukayese yapmak suretiyle elde edilen bilgilere göre, $k-\epsilon$ türbülans modelleri $k-\omega$ türbülans modellerine göre daha iyi bir performans sergilemektedir. Bu nedenle bu gruba dahil olan standart, Realizable ve Renormalized (RNG) $k-\epsilon$ türbülans modellerinin her biri ayrı ayrı tekrar denenmiştir.

Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model, RSM) ise ikinci derece türbülans modeli olarak anılan ve çözümde yedi adet denklemi ayrı ayrı çözmeyi gerektiren bir türbülans modelidir. RSM ile sıcaklık alanı da göz önüne alındığında, toplam sekiz denklemin çözdürülmesi gerekeceğinden böyle bir parametrik çalışma için ekonomik olmadığı saptanmıştır. Örneğin Bayraktar, 2007 tarafından tek bir hız oranı ve tek bir eğim açısı için yapılan çalışmada Reynolds gerilme türbülans modelinin (RSM) deneysel sonuçlarla nispeten iyi sonuçlar vermesine rağmen Pentium-4, 3 GHz, 1 GB bellek ile yapılan bir çalışmanın yaklaşık 10 gün sürdüğü görülmüştür. Bu sonuç ise ikinci-derece türbülans modelinin k-ε gibi birinci derece türbülans modelleri kadar hızlı çözüm sağlamadığını göstermektedir.

Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) türbülans modelleri Reynolds gerilme tensörlerinin kabuller ve fiziksel ilişkiler kombinasyonu kullanıp kullanmamasına (birinci derece türbülans modelleri) ve altı bileşeni doğrudan çözüp çözmemesine (ikinci derece türbülans modeli) göre iki ana gruba ayrılabilirler. Birinci derece türbülans modelleri girdap viskozite modelleri (EVM) olarak da bilinirler ve Boussinesq kabülünü kullanırlar. Boussinesq kabülü türbülans kayma gerilmelerinin ortalama gerilme ile ilişkili olduğunu ifade eder. Matematiksel olarak bu ifade Denk.2.6'daki gibi yazılabilir:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \overline{\rho} k \quad (2.6)$$

Burada μ_t türbülans viskozitesi ve k ise türbülans çalkantılarının türbülans kinetik enerjisidir (Denk.2.7).

$$k = \frac{1}{2} \tilde{u}_i \tilde{u}_i = \frac{1}{2} \frac{\overline{\rho u'_i u'_i}}{\overline{\rho}} \quad (2.7)$$

Akışkanın belirli bir özelliği olan moleküler viskozitenin aksine türbülans viskozitesi akışa ait bir özelliktir. Diğer bir deyişle ikinci derece türbülans modelleri Boussinesq yaklaşımı kullanmayıp gerilmeler için cebirsel ilişkiler kurmak yerine her bir Reynolds gerilmesini ayrı ayrı doğrudan çözerler. Bu nedenle ikinci derece türbülans modelleri Reynolds gerilmelerinde ani değişikliklerin olduğu akışların çözümünde birinci derece türbülans modellerine göre daha fazla tercih edilirler.

2.2.1 k-ε türbülans modelleri

Bu bölümde Standart k-ε, RNG (Renormalized group) k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleri tanıtılacaktır. Bu üç türbülans modeli özellikle türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı (ε) açısından benzer formda olmalarına rağmen türbülans viskozitesinin hesabı, k ve ε denklemlerindeki Prandtl sayısı ve ε denkleminde üretim ve kayıp terimlerine göre farklılıklar gösterirler. Alt bölümlerde taşınım denklemleri, türbülans viskozitesi hesabı ve model sabitleri her bir türbülans modeli için ayrı ayrı verilmiştir.

2.2.1.1 Standart k-ε türbülans modeli

Standart k-ε türbülans modeli iki ayrı taşınım denkleminin çözümüne imkan vermek suretiyle türbülans hız ve uzunluk ölçeğini saptamaya izin veren en basit ve temel iki-denklemlilik türbülans modelidir. Launder ve Spalding, 1972 tarafından teklif edildiği günden itibaren özellikle pratik mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Standart k-ε türbülans modelinde akış tümüyle türbülanslı kabul edilir ve moleküler viskozitenin etkisi ihmal edilir. Bu nedenle standart k-ε türbülans modeli yalnızca tam türbülanslı akışlar için geçerlidir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı (ε) için ilgili taşınım ifadeleri Denk.2.8 ve Denk.2.9'da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.9)$$

Bu denklemlerde G_k ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerji üretimini (Denk.2.10), G_b sıcaklık farklarından dolayı oluşan yoğunluk değişimlerine bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi üretimini (Denk.2.11) göstermektedir.

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.10)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.11)$$

Standart k-ε türbülans modelinde türbülans veya girdap viskozitesi μ_t , k ve ε'nun beraber göz

önüne alınmasıyla şu şekilde hesaplanır: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$. Burada C_μ bir katsayıdır. Bu sabitin ve diğer katsayıların değerleri deneysel çalışmalardan elde edilmiş olup Çizelge 2.1'deki gibidir.

Çizelge 2.1 Standart k-ε türbülans modelinde kullanılan katsayıların değerleri, (Launder ve Spalding, 1972).

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

Denk.2.11'de görülen Pr_t enerji için türbülans Prandtl sayısı, g_i i-yönündeki yerçekimi vektör bileşenidir. Standart k-ε ve Realizable k-ε türbülans modellerinde Prandtl sayısının değeri sabit olup 0.85'tir. RNG k-ε türbülans modelinde Pr_t sabit alınmayıp Denk.2.12'deki gibi hesaplanır:

$$Pr_t = \frac{1}{\alpha} \quad (2.12)$$

Denk.2.11'de görülen termal genişleme katsayısı β Denk.2.13'te verilmiştir.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (2.13)$$

2.2.1.2 RNG k-ε türbülans modeli

Bu türbülans modeli oldukça geniş istatistiksel teknikler kullanılarak çıkarılmıştır. Temelde standart k-ε türbülans modeline benzemekle beraber *RNG (Renormalized) k-ε türbülans modeli* (Yakhot ve Orszag, 1986) aşağıdaki iyileştirmeleri içermektedir:

- Türbülans kinetik enerjisi denkleminde hızlı değişen akışlarda daha fazla doğruluk sağlayan ilave terimler içerir.
- Dönmenin türbülans üzerindeki etkisi RNG modelinde göz önüne alınmıştır. Bu özellikle dönen akışlarda RNG modelini daha uygun kılar.
- Türbülans Prandtl sayısı için analitik ifade sağlar. Oysaki Prandtl sayısı standart k-ε türbülans modelinde sabit alınmaktadır.

- Standart k-ε türbülans modeli yüksek Reynolds sayılı türbülans modeli iken, RNG k-ε türbülans modeli düşük Reynolds sayılı akışlarda söz konusu olan efektif viskozite için analitik olarak çıkarılmış diferansiyel formüller sağlar. Ancak bu özelliğin verimli olarak kullanılması uygun yakın-çeper bölgesinin seçimine bağlıdır.

Yukarıdaki bu özellikler *RNG k-ε türbülans modelini* standart k-ε türbülans modeline göre daha doğru ve güvenilir kılar. RNG k-ε türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi (Denk.2.14) ve kayıp oranı (Denk.2.15) aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{ef} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.15)$$

Denk. 2.14'te görülen α_k ve α_ε sırasıyla k ve ε için ters efektif Prandtl sayılarıdır. Bu türbülans modeli ile ilgili daha fazla bilgi için Choudhury, 1993 incelenebilir.

2.2.1.3 Realizable k-ε türbülans modeli

Realizable k-ε türbülans modeli (Shih vd., 1995) standart k-ε türbülans modeline göre daha yeni ve aşağıda verilen özelliklerden dolayı standart k-ε türbülans modelinden ayrılan bir türbülans modelidir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Türbülans viskozitesi için yeni bir formülasyon içerir.
- türbülans kinetik enerjisi kaybı (ε) denklemi için yeni yaklaşım içermektedir.

Realizable terimi modelin Reynolds gerilmeleri üzerindeki matematiksel kısıtları türbülanslı akışların fiziğine uygun olarak sağlamasından ileri gelmektedir.

2.2.2 Reynolds Gerilme Türbülans Modeli (RSTM)

Reynolds gerilme türbülans modeli en açık ve ayrıntılı türbülans modelidir. RSTM türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı ile beraber Reynolds gerilmeleri için taşınım denklemlerini çözerek Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemlerini kapar. Bu ise iki-boyutlu (2-B) akışlarda 5, üç-boyutlu (3-B) akışlarda ise 7 ilave denklemin çözülmesini gerektirir.

Dönme ve girdapdaki hızlı değişimler için daha kapsamlı bilgiler vermesinden dolayı bir ve iki-denklemlili türbülans modellerine nazaran özellikle karmaşık problemlerin çözümünde daha iyi sonuçlar verir. RSTM diferansiyel taşınım denklemlerini kullanarak $\overline{u'_i u'_j}$ Reynolds gerilmelerinin her birini çözer (Gibson ve Launder, 1978, Launder, 1989, Launder vd., 1975). Ayrı ayrı çözülen bu Reynolds gerilmeleri daha sonra Reynolds-ortalamalı momentum denklemlerinin kapamasında kullanılır.

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j})}_{\text{Yerel zamantürevi}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}_{C_{ij}=\text{Konveksiyon}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i) \right]}_{D_{T,ij}=\text{Türbülans Difüzyonu}} + \\
& + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{D_{L,ij}=\text{Moleküler Difüzyon}} - \underbrace{\rho \left(\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)}_{P_{ij}=\text{Gerilme Üretimi}} - \underbrace{\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta})}_{G_{ij}=\text{Buoyancy Üretimi}} + \\
& \underbrace{p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}_{\phi_{ij}=\text{Basınç Strain}} - \underbrace{2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}_{\varepsilon_{ij}=\text{Kayıp}} + \underbrace{2\rho \Omega_k (\overline{u'_i u'_j} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm})}_{F_{ij}=\text{Sistem Dönmesinin Kaynaklanan Üretim}}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Denk.2.16'da C_{ij} , $D_{L,ij}$, P_{ij} ve F_{ij} herhangi bir modelleme gerektirmez ancak denklemleri kapamak için $D_{T,ij}$, G_{ij} , ϕ_{ij} ve ε_{ij} 'nin modellenmesi gerekir. RSTM türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi k 'nın da ayrıca modellenmesi lazımdır. Bu ise Reynolds gerilmelerinin bulunmasıyla gerçekleşir.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \tag{2.17}$$

Ancak Reynolds gerilmelerinin hesaplanması için aşağıdaki taşınım denklemi için uygun sınır şartlarının tanımlanmasıyla da türbülans kinetik enerjisi hesaplanabilir (Denk.2.18):

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2M_t^2) \tag{2.18}$$

Burada $\sigma_k=0.82$ olarak alınmıştır (Fluent 6.3 User's Guide, 2006). Denk.2.18 her ne kadar bütün akış boyunca çözülüyorsa da k değeri yalnızca sınır şartları için kullanılır. Diğer bütün durumlarda türbülans kinetik enerjisi Denk.2.17 kullanılarak bulunur. Türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı tensörü ise Denk. 2.19'daki gibi hesaplanır:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \varepsilon) \tag{2.19}$$

Skalar kayıp oranı ε ise standart k- ε türbülans modelindeki gibi bulunur. RSTM türbülans modelinde türbülans viskozitesi μ_t ise:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilir. Denk.2.20'deki C_μ Standart k- ε türbülans modelinde olduğu gibi bir katsayıdır ($C_\mu=0.09$).

2.3 Problemin Geometrisi ve Sınır Şartları

Çapraz akıştaki jet akışlarının akış ve sıcaklık alanlarını benzeşim ile çözmek amacıyla Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bir dikdörtgen kanal ve değişik kesit geometrilerine sahip lüleler kullanılmıştır. Burada serbest akış kanal içerisinde, jet akışı ise bir lüleden kanalın içine doğru olmaktadır. Şekil 2.1'den de görülebileceği gibi kartezyen koordinat merkezi lülenin tam ortasına gelecek şekilde konumlandırma yapılmıştır. Alt, üst ve $y/D=1.5$ 'deki çeperler katı yüzey olup duvar olarak tanımlanırken, kanalın sol tarafı ve lülenin $z/D=4.0$ yüksekliğindeki girişi hız girişi olarak verilmiştir. Kanalın sağ taraftaki kesit alanı basınç çıkışı ve $y/D=0$ düzlemi ise simetri şartı olarak tanımlanmıştır. Patankar, 1980'e göre girişte hız tanımlandığından çıkışta basıncı tanımlamaya gerek yoktur. Kanal ve lüle girişlerinde hız, türbülans kinetik enerjisi, türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı ve sıcaklık üniform olarak tanımlanmışlardır.

Üst ve alt çeperlerde kaymasızlık (no-slip) şartı da göz önüne alınarak sınır şartları duvarlarda: $u=v=w=0$; kanal girişinde: u_{cf} , T_{cf} ; lüle girişinde: v_j , T_j ve kanal çıkışında: P_{cf} olarak alınmıştır.

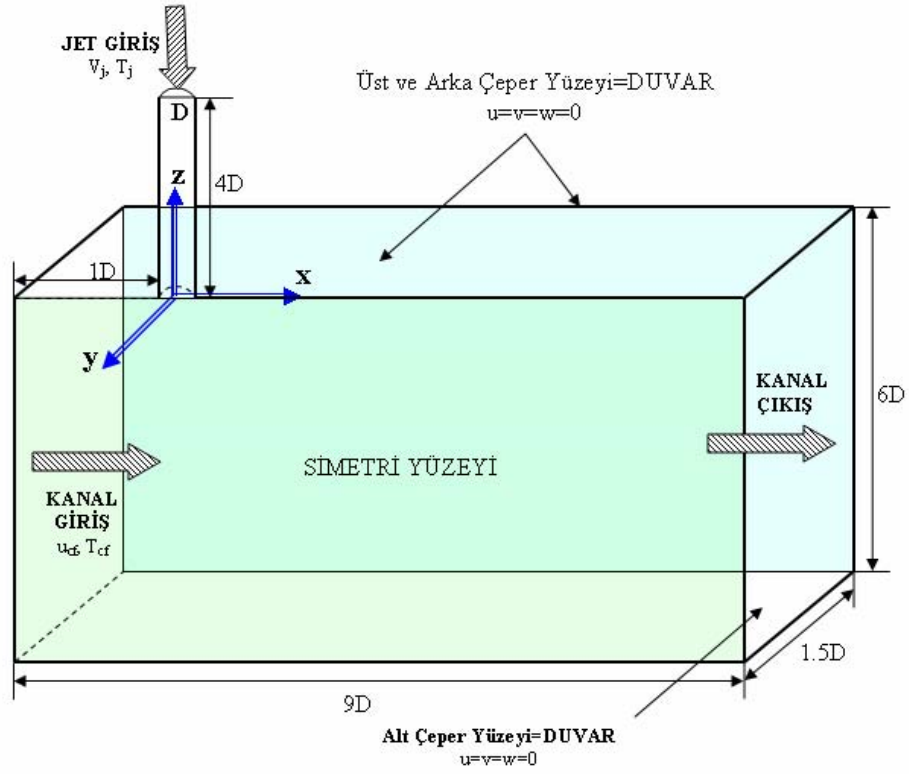
Kanal ve lüle girişlerindeki türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisi kaybı için Demuren ve Rodi, 1987 tarafından önerilen ve aşağıda verilen bağıntılar kullanılmıştır.

$$k_j = 0.0020(V_j)^2 \quad (2.21)$$

$$k_{cf} = 0.00010(U_{cf})^2 \quad (2.22)$$

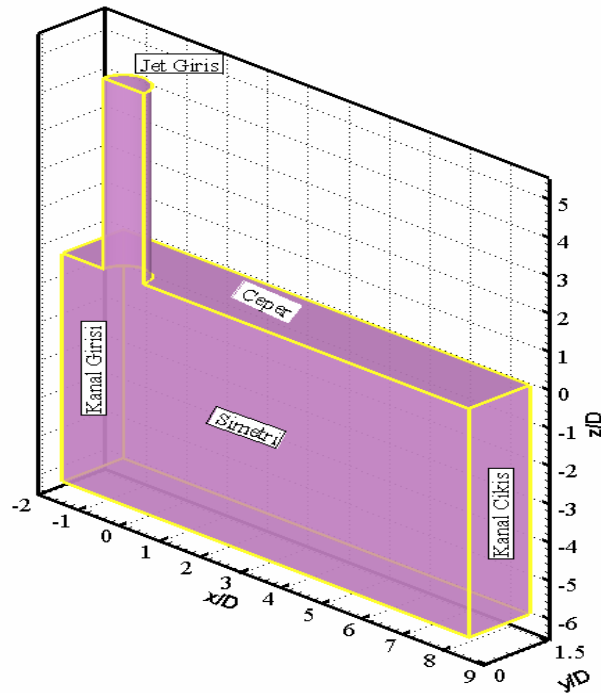
$$\varepsilon_j = \frac{k_j^{3/2}}{0.5 \times D} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{cf} = \frac{k_{cf}^{3/2}}{0.2 \times H_{cf}} \quad (2.24)$$



Şekil 2.1 Sayısal hesaplamada kullanılan çalışma alanının boyutları ve sınır şartları.

Simetri şartının kullanılmasından dolayı Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de görüldüğü gibi 3-B hesaplama alanı rüzgar tüneli test kesidi ve lülenin yalnızca yarısını göstermektedir.



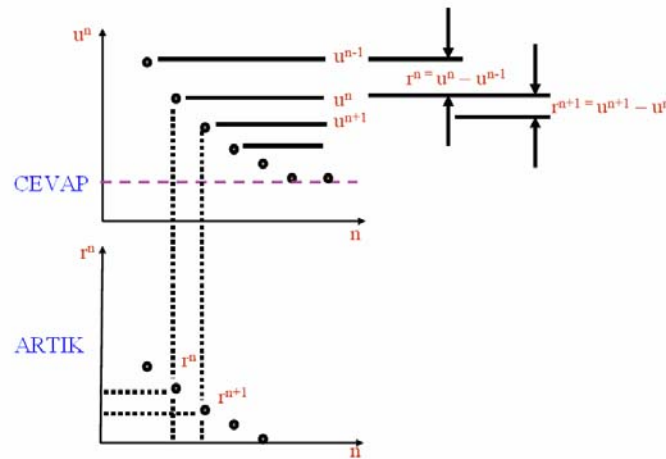
Şekil 2.2 Çalışma alanının boyutları ve sınır şartları.

Akış x-z düzlemine göre simetrik olduğundan çalışma bölgesinin yalnızca yarısı için benzeşim yapılmıştır. Böylece daha az sayıda ağ oluşturulduğundan analizler daha ekonomik ve hızlı olarak gerçekleştirilmiştir. Burada şunu söylemek gerekir ki çapraz akıştaki türbülanslı jet akışları aslında tam olarak simetrik değildir. Ancak fazla sayıda ağ elemanının oldukça büyük boyutlara sahip bir çalışma bölgesinde kullanılması çok sayıda parametrenin incelendiği böyle bir çalışma için eldeki mevcut bilgisayarlar ile mümkün olmadığından simetri şartının kullanılması literatürdeki mevcut sayısal çalışmalarda da çok sık başvuru bir yöntemdir.

2.4 Yakınsama Kriterleri

Bir HAD çalışmasında yakınsama doğru çözüme ulaşmada oldukça önem arz eder. HAD'da yakınsama ağ elemanları arasındaki mesafe, kontrol hacminin boyutları veya elemanın ölçülerine bağlı olarak ya daha hızlı gerçekleşir ya da yakınsama güç olur, bazen de yakınsamayarak analizde istenmeyen yanlış sonuçlar verir.

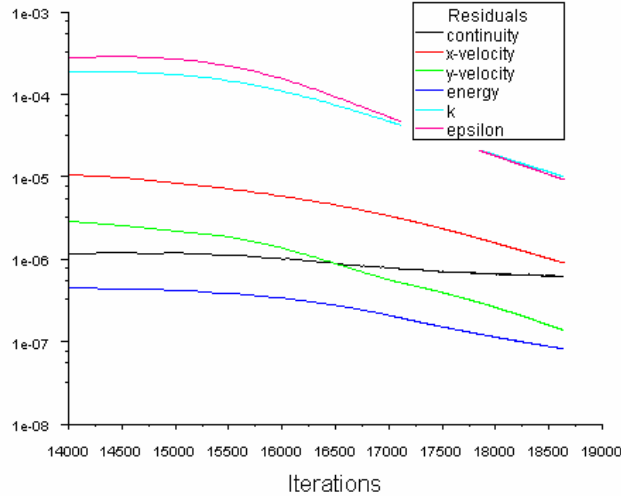
Yakınsamadan bahsederken artıklardan da (residual) bahsetmek gerekir çünkü akışa ait denklemlerin yakınsayıp yakınsamadığını artık grafiğinden görmek mümkündür. Yakınsama bir noktadaki değişkenin değeri ile bir önceki noktada bu değişkene ait eski değer farkının önceden tanımlanmış bir yakınsama kriterine eşit olana kadar ardışık (iteratif) analiz yapmadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 İterasyon (ardışık hesap) ve artık grafikleri

Bu çalışmada yakınsama kriteri enerji denklemi için 10^{-06} , süreklilik, hızın x-bileşeni (u), y-bileşeni (v), z-bileşeni (w) türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisi kaybı

oranı (ϵ) için ise 10^{-5} olarak tanımlanmıştır. Bütün hız oranları ve eğim açılarında tüm değişkenler için denklemler farklı iterasyon sayılarında bir örneği Şekil 2.4’de görüldüğü gibi yakınsatılmıştır.



Şekil 2.4 Tek jette $R=1.0$, $\alpha=60^\circ$ için artık grafiği.

2.5 Çalışma Alanı ve Uygulanan Ağ Yapısı

Çalışma bölgesi, kesit alanı $1.5D \times 6D$ ve uzunluğu $9D$ olan bir dikdörtgen kanaldan ve çapı $D=7$ mm olan dairesel kesitli bir lüleden oluşmaktadır. Kanaldan sıcaklığı 80°C olan bir akışkan (hava) geçmektedir. Soğutucu lüleden ise sıcaklığı 20°C olan hava kanala girerek kanal çıkışından çalışma alanını terk etmektedir.

Çizelge 2.2 Kanal ve lülenin uzunlukları ve kullanılan ağ noktaları (dairesel kesitli tek lüle için).

Yön		Uzunluk	Ağ noktası
Kanal	Akım yönü (x)	$x/D=-1 \dots 8$	140
	Çapraz yön (y)	$y/D=0 \dots 1.5$	30
	Normal yön (z)	$z/D=-6 \dots 0$	100
Jet	Akım yönü (x)	$x/D=-0.5D \dots 0.5D$	60
	Çapraz yön (y)	$y/D=0 \dots 0.5D$	30
	Normal yön (z)	$z/D=0 \dots 4$	140

Lüleden kanala püskürtülerek sağlanan jetin giriş hızının kanal giriş hızına oranı olan hızların oranı (R) üç farklı jet giriş hızı ve iki farklı kanal giriş hızı için sırasıyla $R=0.2$, 0.5 , 1.0 ve 2.0 olarak tanımlanmıştır. Lüle çapı ve jet giriş hızına bağlı jet Reynolds sayısı $Re_{jet}=960$, 2400

ve 4800'dür. Kanal giriş hızı ve kanal uzunluğuna bağlı hesaplanan kanal Reynolds sayısı $Re_{kanal}=8390$ ve 16780'dir. Akışa ait genel veriler Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Koordinat eksenini lülenin merkez noktasında olup, kanalın girişinden 1D kadar ileride yerleştirilmiştir. Burada x kanal akış yönünü, z ise borudan püskürtülen jet akış yönünü göstermektedir. u, v ve w sırasıyla x, y ve z-yönlerindeki hız bileşenlerini temsil etmektedir. L_{jet} ve L_{kanal} sırasıyla jet akışının sağlandığı lülelerin ve kanalın toplam uzunluklarını göstermektedir.

Çizelge 2.3 Hesaplama kullanılan kanal ve lüleye ait sayısal değerler.

Hızların Oranı	Kanal				Jet				
	U_{kanal}	Re_{kanal}	T_{kanal}	L_{kanal}/D	U_{jet}	Re_{jet}	T_{jet}	D	L_{jet}/D
$(R=v_{jet}/u_{kanal})$	(m/s)		(K)		(m/s)		(K)	(mm)	
0.2	10	16780	353	9	2	960	293	7	4
0.5	10	16780	353	9	5	2400	293	7	4
1.0	10	16780	353	9	10	4800	293	7	4
2.0	5	8390	353	9	10	4800	293	7	4

Problemin geometrisi ve ağ üretimi için GAMBIT adlı bir programdan yararlanılmıştır. GAMBIT düzgün (structured) ve/veya düzgün-olmayan (unstructured) sonlu hacimler üretmeye izin veren bir ön-işlemcidir. Düzgün ağ yapısı altı yüzeye sahip dikdörtgenler prizması şeklindeki bir hücreyi ifade ederken düzgün-olmayan ağ yapısında değişik şekillere sahip elemanlar kullanılmaktadır (tetrahedron, hexahedron).

Sınır tabakada akış değişkenleri çepere normal yönde çok hızlı değiştikleri için buralarda daha sık ve kaliteli ağ kullanmak gerekir. Sınır tabaka için üretilecek ağların düzgün ağ yapısı kullanılarak elde edilmesi daha doğru sonuçlar verecektir. Ayrıca bunları çepere yakın bölgede istenilen sıklıkta yerleştirmekte ağ kontrolü açısından daha kolaydır. Ağ yapısı oluşturulurken sınır tabakanın oluşacağı çeperlerde kaç adet ve çepere hangi uzaklıkta bir kontrol hacminin (ağ) atanacağı y^+ kontrol edilerek bulunabilir. Düzgün yüzeyler için y^+ hesabı Denk.2.25 ve Denk.2.26'da verilmiştir.

$$y^+ = \frac{y_p u_\tau}{\nu} \quad (2.25)$$

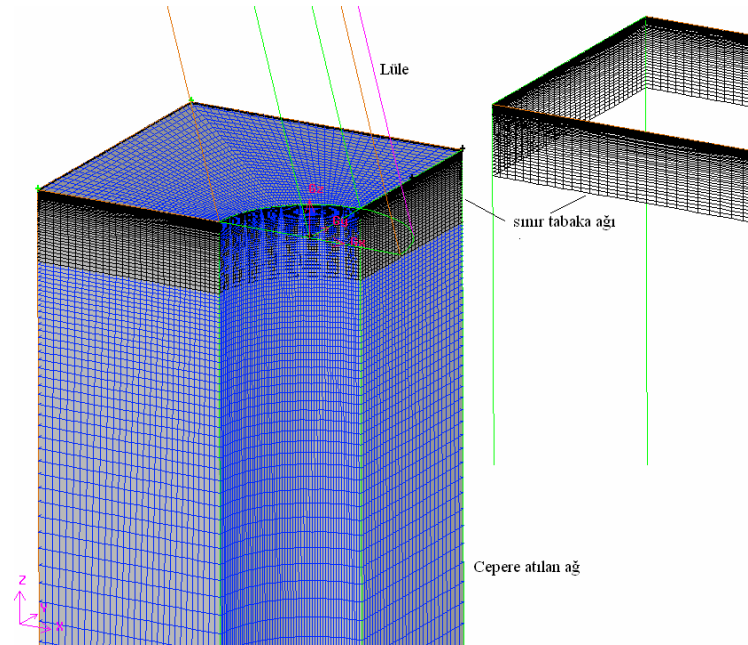
Burada y_p çepere en yakın noktadaki kontrol hacminin merkezinin çepere olan uzaklığını, u_τ sürtünme hızını ve ν ise viskoziteyi göstermekte olup sürtünme hızının daha açık bir ifadesi Denk.2.26'da verilmiştir.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = u_e \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (2.26)$$

Denk.2.26 plaka için geçerli bir ifade olup burada görülen ρ , u_e ve C_f sırasıyla kullanılan akışkanın yoğunluğunu, akışkanın akış hızını ve plaka için sürtünme katsayısını göstermektedir. Plaka için sürtünme katsayısı Reynolds sayısına bağlı olarak Denk. 2.27'deki gibidir.

$$\frac{C_f}{2} = \frac{0.037}{Re^{1/5}_L} \quad (2.27)$$

Buna göre $y^+=1.0-2.5$ arasında olmak üzere çepere en yakın kontrol hacminin merkezinin çepere olan uzaklığı belirlenerek ağ oluşturulmuştur. Sınır tabaka içerisinde normal yönde toplam 40 adet kontrol hacmi oluşturularak buradaki değişimler göz önüne alınmıştır (Şekil 2.5). Bu çalışmada görülen en yüksek eğrilik değeri 0.7126 ile $\alpha=30^0$ eğim ile kanala giren lüle akışında görülmüştür. Diğer geri kalan eğimli jet ve normal çapraz jet durumları için görülen eğrilik değeri 0.5712 olup bu değer oluşturulan ağın eğrilik yönünden oldukça kaliteli olduğunu göstermektedir.

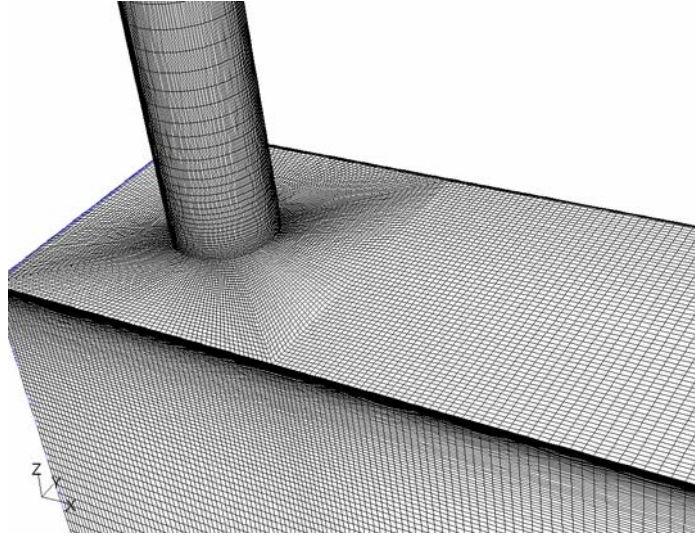


Şekil 2.5 Kanala uygulanan sınır tabaka ağı.

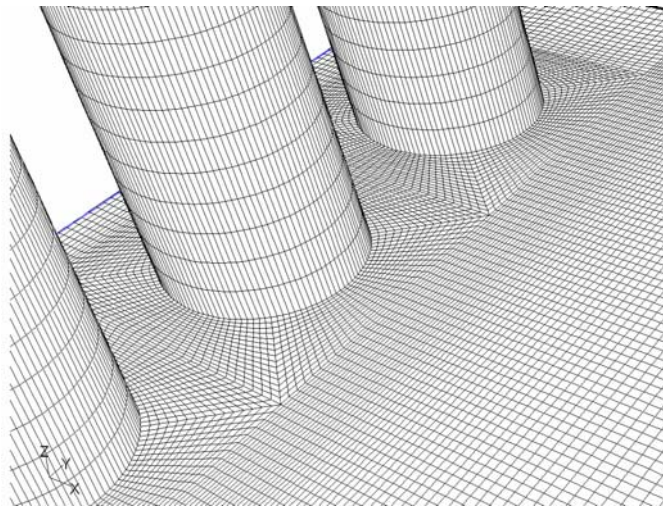
Ağ kalitesini gösteren bir diğer faktör ise ardışık ağ elemanlarının büyüklüklerinin birbirlerine yakın olması ve/veya bunlar arasındaki geçişin herhangi bir yakınsama problemine yol

açmayacak şekilde kademeli olarak arttırılmış veya azaltılmış olmasıdır. Söz konusu bu çalışmada ardışık ağ elemanları arasındaki geçişlere özellikle dikkat edilmiş olup Şekil 2.6-Şekil 2.8’de görüldüğü gibi düzenlenmiştir.

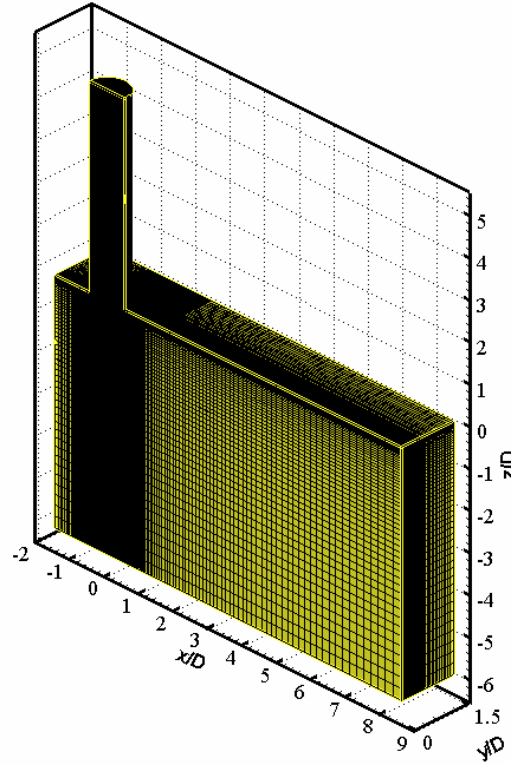
Kanal girişinden lüleye kadar olan mesafede ilk nokta ile ikinci nokta arasındaki mesafe $0.04285D$ olacak şekilde 30 adet nokta, lülide çap boyunca 60 adet nokta, lüleden sonraki ilk nokta ile en yakındaki nokta arası $0.04285D$ olacak şekilde 30 adet nokta kullanılırken ondan sonra kanal çıkışına kadar ilk iki nokta arasındaki uzunluğun son iki nokta arasındaki uzunluğa oranı 4 olacak şekilde 80 adet noktaya bölünerek ağ atılmaya hazır hale getirilmiştir. y ve z-yönlerinde de buna benzer bir uygulamayla oluşturulan ağ Şekil 2.8’de görülmektedir.



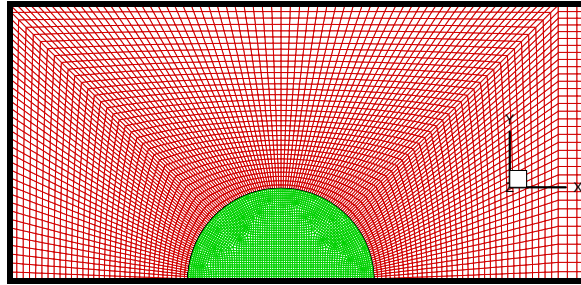
Şekil 2.6 Kanal ve dairesel kesitli tek bir lüle etrafındaki ağ yapısı.



Şekil 2.7 Kanal ve dairesel kesitli üç lüle etrafındaki ağ yapısı.



(a)

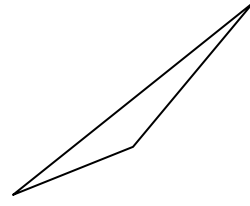
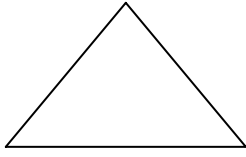


(b)

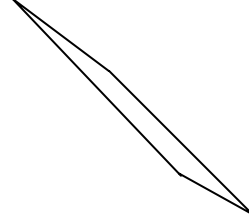
Şekil 2.8 Kanal ve lüleye uygulanan ağ yapısının koordinatlara göre dağılımı (a), lüle etrafındaki ağ yapısının üstten görünümü (b).

Kullanılan ağ türünden başka (düzgün, düzgün-olmayan, dikdörtgen prizma veya üçgen prizma, vb.) HAD çalışmalarında çok kritik bir öneme sahip olan ağ kalitesini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Tüm ağ atılırken her bir ağa ait kontrol hacminin çok eğrilikli (skewness) olmamasına dikkat etmek gerekir ki çok yüksek eğrilikli kontrol hacimleri sayısal çözümde yakınsama zorluklarına ve çözümde yanlışlığa yol açabilmektedir. Şekil 2.9’da eğrilik kavramının açıklamada yardımcı olabilecek iki farklı 2-B eleman türü gösterilmiştir.

Üçgensel eleman



Dikdörtgensel eleman



(a)

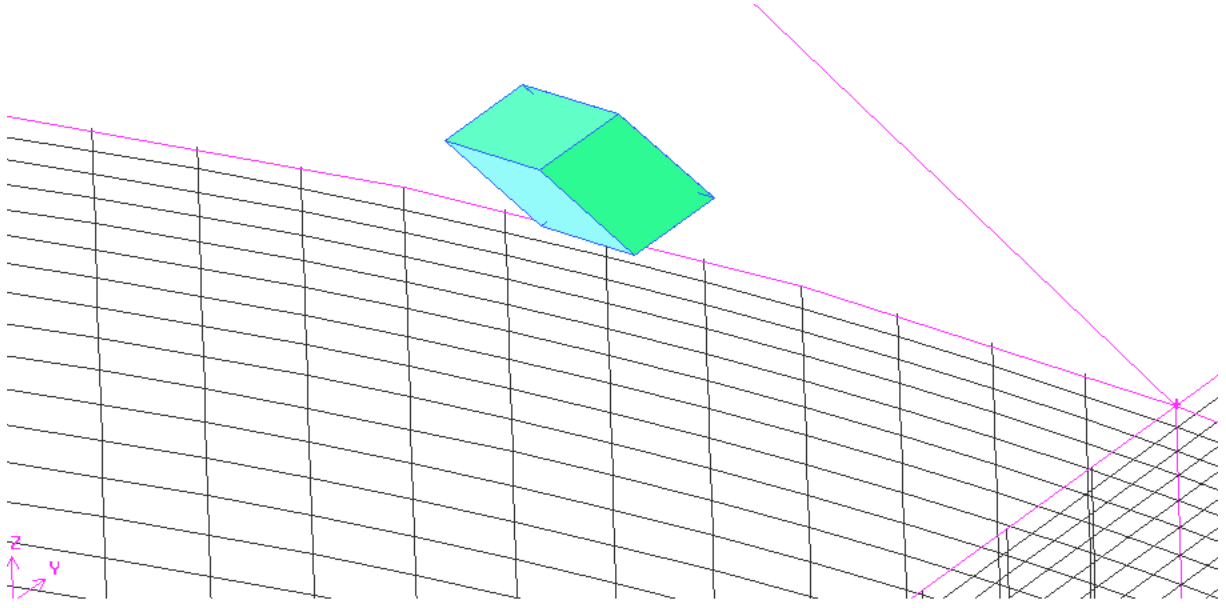
(b)

Şekil 2.9 Sıfır eğrilikli (a), çok-eğrilikli (b) üçgensel ve dikdörtgensel elemanlar.

İki-boyutlu bir eleman için eğrilik ifadesi Denk.2.28'deki gibi yazılabilir (Çengel ve Cimbala, 2006).

$$\text{Eğrilik} = \text{Maks} \left(\frac{\theta_{\text{maksimum}} - \theta_{eş-açı}}{180^\circ - \theta_{eş-açı}}, \frac{\theta_{eş-açı} - \theta_{\text{minimum}}}{\theta_{eş-açı}} \right) \quad (2.28)$$

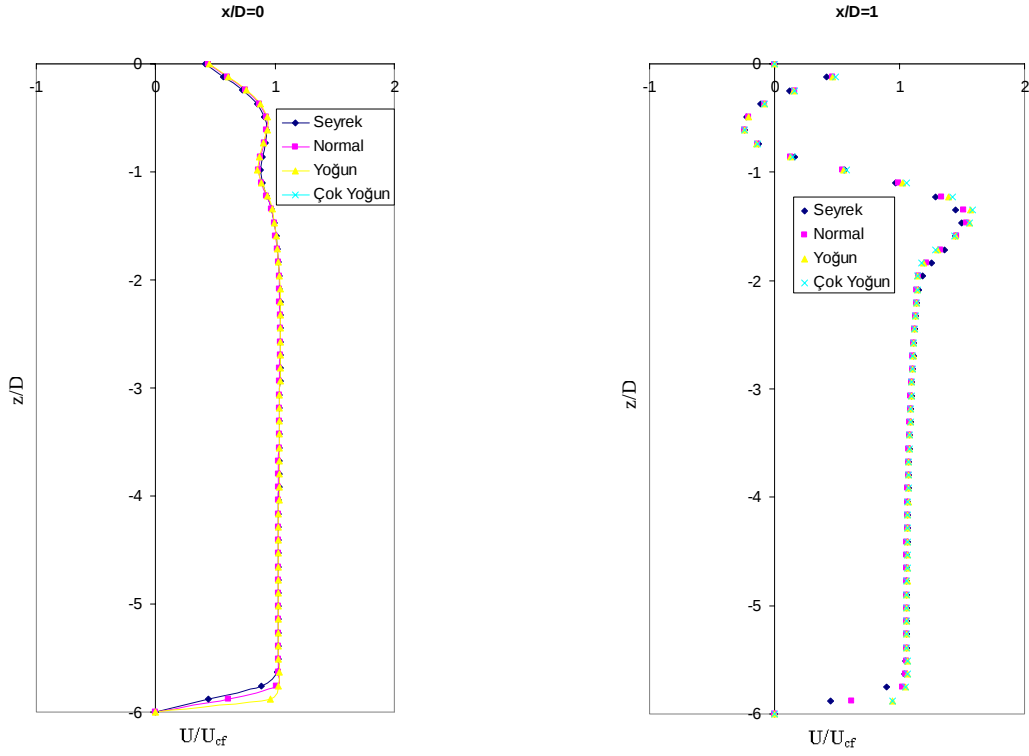
Burada θ_{minimum} ve θ_{maksimum} herhangi iki kenar arasındaki derece cinsinden en az ve en fazla açığı, $\theta_{eş-açı}$ ise üçgensel eleman için 60° , dikdörtgensel eleman için ise 90° 'dir. Örneğin eşkenar üçgensel eleman veya dikdörtgensel bir eleman için eğrilik değerinin sıfır olduğu görülebilir. Bu çalışmada kanal için dikdörtgensel elemanlar, lüle için ise hem dikdörtgensel hem de üçgensel elemanlar kullanılmış olup en fazla eğrilik 0.7126 değeri ile $\alpha=30^\circ$ durumunda görülmüştür (Şekil 2.10). Diğer bütün eğim açıları için görülen en yüksek eğrilik değeri 0.5712 olup oldukça kaliteli kabul edilebilir (Fluent User's Guide, 2006).



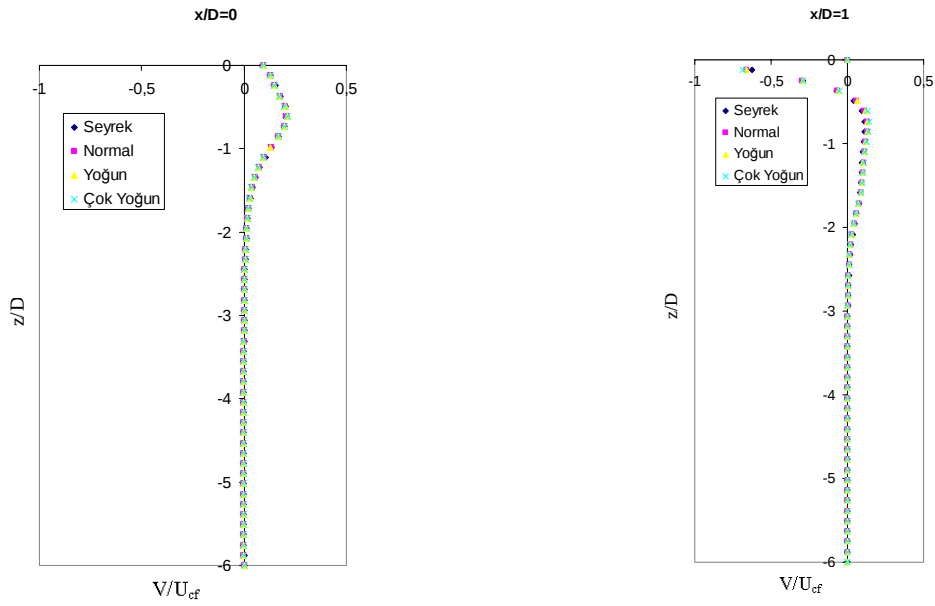
Şekil 2.10 $\alpha=30^\circ$ eğim açılı lülenin varlığı durumunda görülen maksimum eğriliğe sahip dikdörtgensel eleman.

Yüksek kaliteli ağa sahip çalışma alanlarının HAD ile çözümü doğru sonuçların alınmasında çok büyük öneme sahip olduğu daha önce vurgulanmıştı çünkü düşük kaliteli veya az sayıda eleman kullanılarak oluşturulmuş ağla yapılan analizlerin yanlış sonuç vermesi kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle HAD kullanıcılarının oluşturdukları ağlarda kullandıkları eleman sayısını göreceli olarak artırıp analizleri bu yeni ağ sayısı ile yapmaları en doğru ve yeterli ağ elemanı ile çalışma imkanı vermiş olacaktır. Bu ise analizin ağ elemanı sayısından bağımsızlığıdır. Bu çalışmada analizler dört farklı sayıda eleman içeren ağ yapılarıyla gerçekleştirilmiş ve sonuçların bunlara bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. Bunun için 472880 (seyrek ağ), 847800 (normal ağ), 1292000 (yoğun ağ) ve 2879560 (çok yoğun ağ) eleman kullanılarak $x/D=0$ ve $x/D=1$ numaralı istasyonlarda hızın x-bileşeni (u), y-bileşeni (v), z-bileşeni (w), türbülans kinetik enerjisi (k) ve sıcaklık profillerinin (T) söz konusu ağ yapılarıyla nasıl değiştiği $R=2.0$ için Şekil 2.11-2.15'te sırasıyla gösterilmiştir.

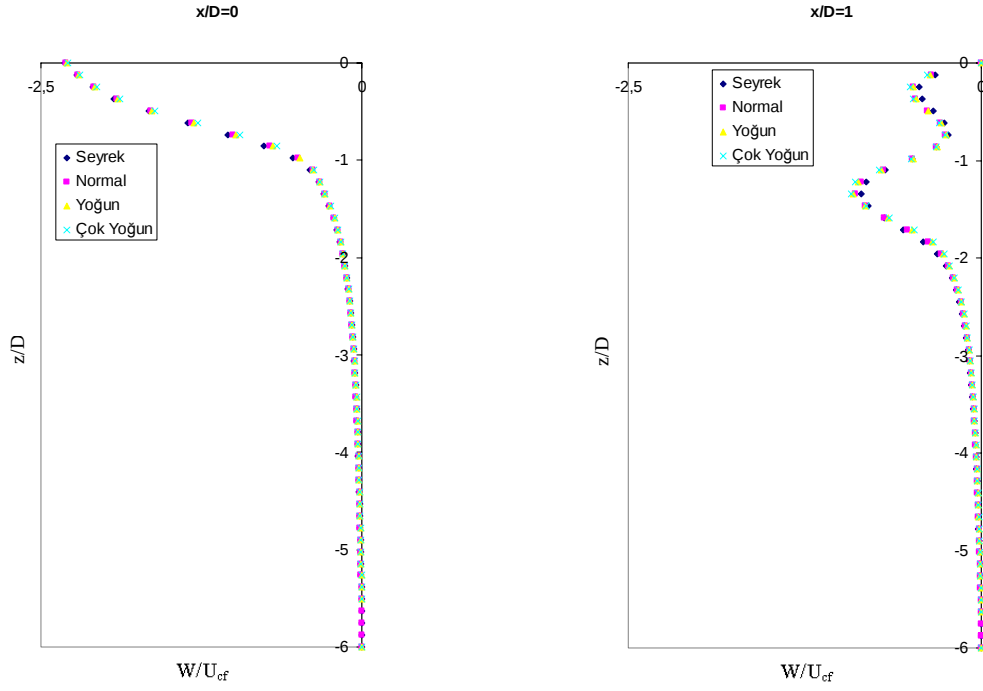
Hızın x, y ve z-bileşenleri kanal giriş hızı ile boyutsuzlaştırılırken sıcaklık, kanal giriş sıcaklığı ve türbülans kinetik enerjisi ise kanal giriş hızının karesi ile bölünerek boyutsuz olmaları sağlanmıştır. Kanal boyunca olan yükseklikler ise z'nin lüle çapına oranıyla gösterilmiştir. Gerek hız bileşenleri gerekse de sıcaklık ve türbülans kinetik enerjisi $x/D=0$ 'da eleman sayısından tamamen bağımsız olup $x/D=1$ 'de sadece türbülans kinetik enerjisi $z/D=-1.2$ civarında değişmektedir.



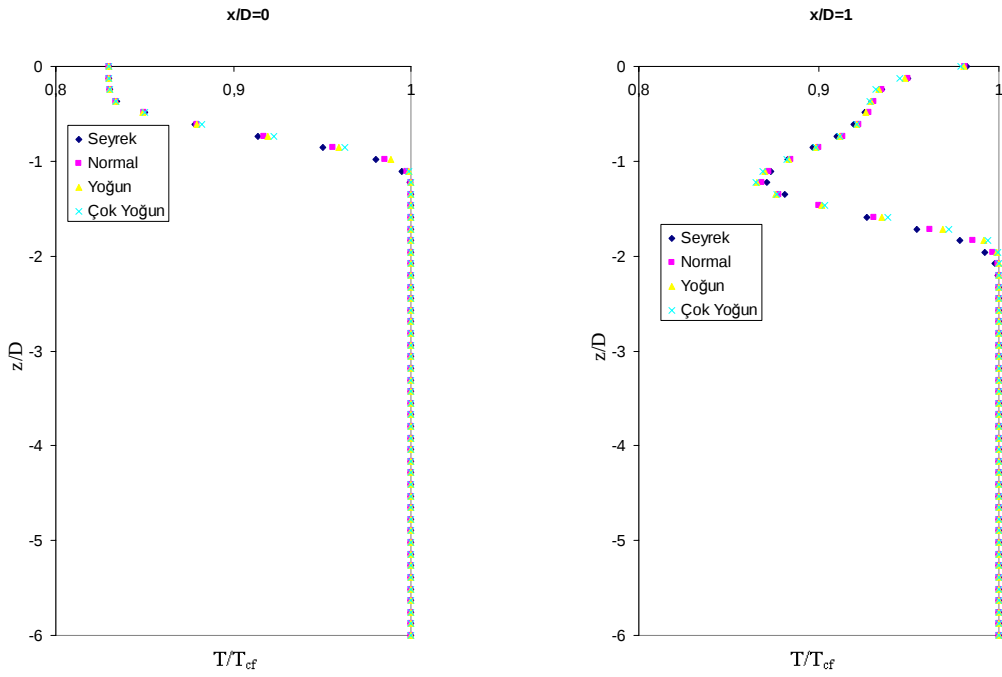
Şekil 2.11 Hızın x-bileşeninin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$.



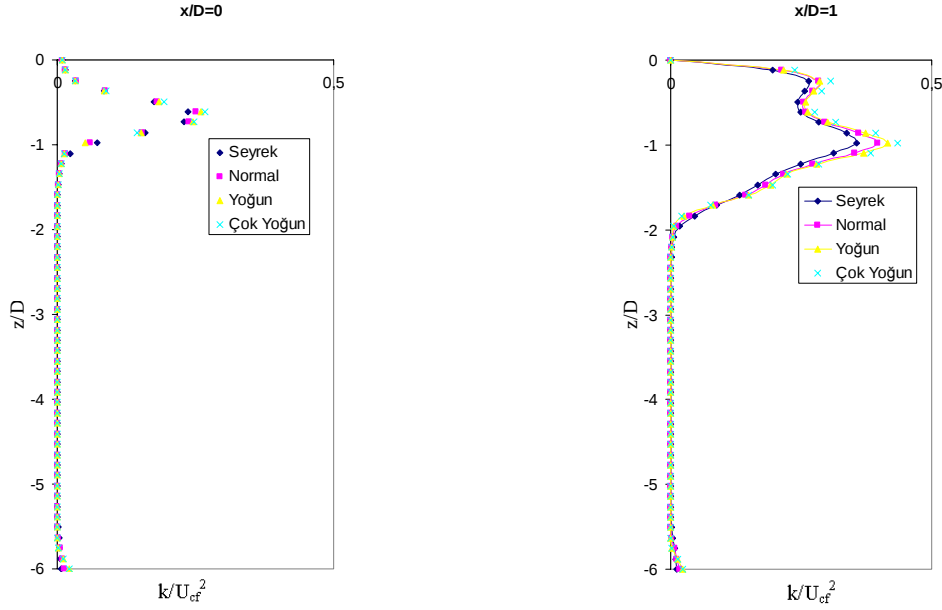
Şekil 2.12 Hızın y-bileşeninin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$.



Şekil 2.13 Hızın z-bileşeninin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$.



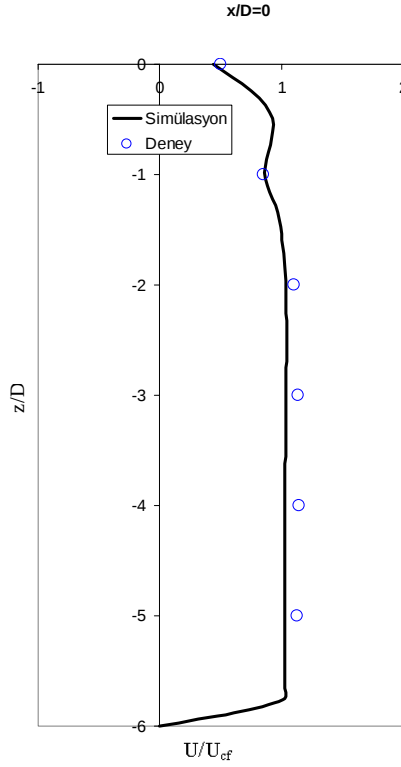
Şekil 2.14 Sıcaklığın değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$.



Şekil 2.15 Türbülans kinetik enerjisinin değişik ağ sayılarına göre değişimi, $R=2.0$.

Ancak bu değişiklik seyrek ağ yapısı ile diğerleri arasında yüksek olup normal ağ, yoğun ağ ve çok yoğun ağ yapıları arasında çok az olmaktadır. Özellikle çok yoğun ağ yapısı ile analizleri gerçekleştirmenin yoğun ağ yapısı kullanılarak elde edilen sonuçlardan farklı olmadığı görülmektedir. Normal ağ ile yoğun ağ arasındaki farkın az olmasından dolayı tek bir dairesel kesitli lüle kullanılması durumunda bütün analizlerin 847800 elemana sahip normal ağ ile yapılması kararlaştırılmıştır. Lüle sayısının birden üçe yükseltilmesi durumunda, kanal boyutları da y/D yönünde artırıldığından kullanılan ağ elemanlarının sayısı da doğal olarak artmıştır. Üç tane lüle kullanılması durumunda tüm benzeşimler 1459500 eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

HAD çalışmasında kurulan modelin doğruluğu ve geçerliliği x -yönündeki hız bileşenin kanaldan serbest olarak akmakta olan kanal giriş hızına oranı şeklinde boyutsuz olarak Şekil 2.16'da $x/D=0$, $y/D=0$ koordinatlarında $R=2.0$ için gösterilmiştir. Görüleceği gibi simülasyon sonuçları ile sıcak tel probu (55P11) kullanılarak lüle merkezinden kanal içerisine değişik z/D istasyonlarında elde edilen u -hızları birbirleriyle oldukça uyumludur.

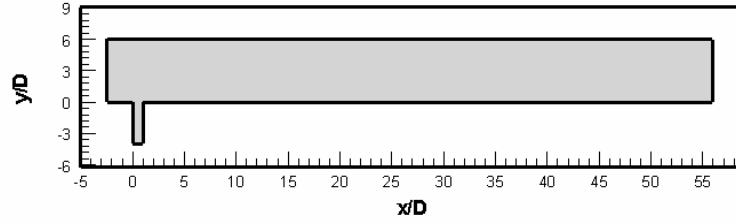


Şekil 2.16 HAD sonuçlarının doğruluğunu göstermek amacıyla deneysel ve simülasyon sonuçlarının mukayesesi, $x/D=0$, $y/D=0$, $R=2.0$.

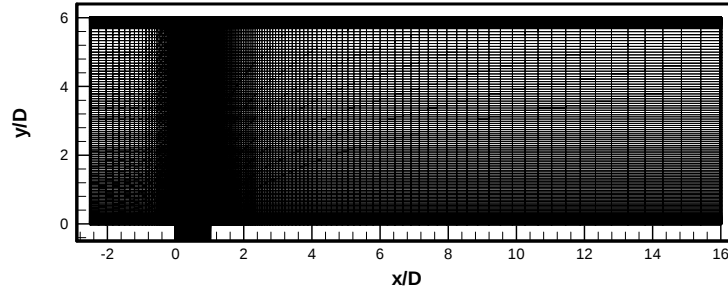
2.6 Türbülans Modellerinin Performans Analizi ve Uygun Türbülans Modelinin Seçimi

Bilindiği gibi bütün problemlerin çözümünde kullanılabilecek tek bir türbülans modeli henüz mevcut değildir ve bu nedenle söz konusu problem için en uygun türbülans modelinin seçimi bir takım işlemler gerektirmektedir. Bunun en yaygın olanı çeşitli türbülans modelleri kullanılarak elde edilen çözüm sonuçlarını deneysel sonuçlarla mukayese etmektir. Burada bu amaçla Standard k- ϵ türbülans modeli, RNG k- ϵ türbülans modeli ve Realizable k- ϵ türbülans modelleri test edilerek elde edilen HAD sonuçları O'Malley, 1984 tarafından gerçekleştirilen deneysel verilerle mukayese edilmiştir. Mukayese için göz önünde bulundurulan 2-Boyutlu çalışma alanı ve buna uygulanan ağ yapısı Şekil 2.17'de görülmektedir. Burada lülenin yüksekliği $2.5D$ olup deneyde kullanılan lüle çapının değeri $D=40$ mm olarak alınmıştır. Çapraz akışın serbest olarak içerisinde aktığı kanalın uzunluğu ve yüksekliği sırasıyla $57D$ ve $6D$ 'dir. Kartezyen koordinat sistemi lülenin giriş kenarında merkezlenmiştir. Mukayese için kullanılan 2-B çalışma alanına uygulanan ağ yapısı Şekil 2.17b'de yalnızca lüle ve kanalın birleştiği bölge için gösterilmiştir. Alt çeper üzerinde oluşacak sınır tabaka bölgesindeki

keskin akış gradyenlerini yakalamak amacıyla bu bölgede ağ yapısı $y^+=1.0$ olacak şekilde sıkılaştırılmıştır. Kanal uzunluğuna göre $0.315D$ olarak hesaplanan sınır tabaka bölgesinde alt çeper ile en yakın kontrol hacim merkezi arasındaki mesafe $0.000185D$ olacak şekilde toplam 54 sıra ağ kullanılmıştır.



(a)

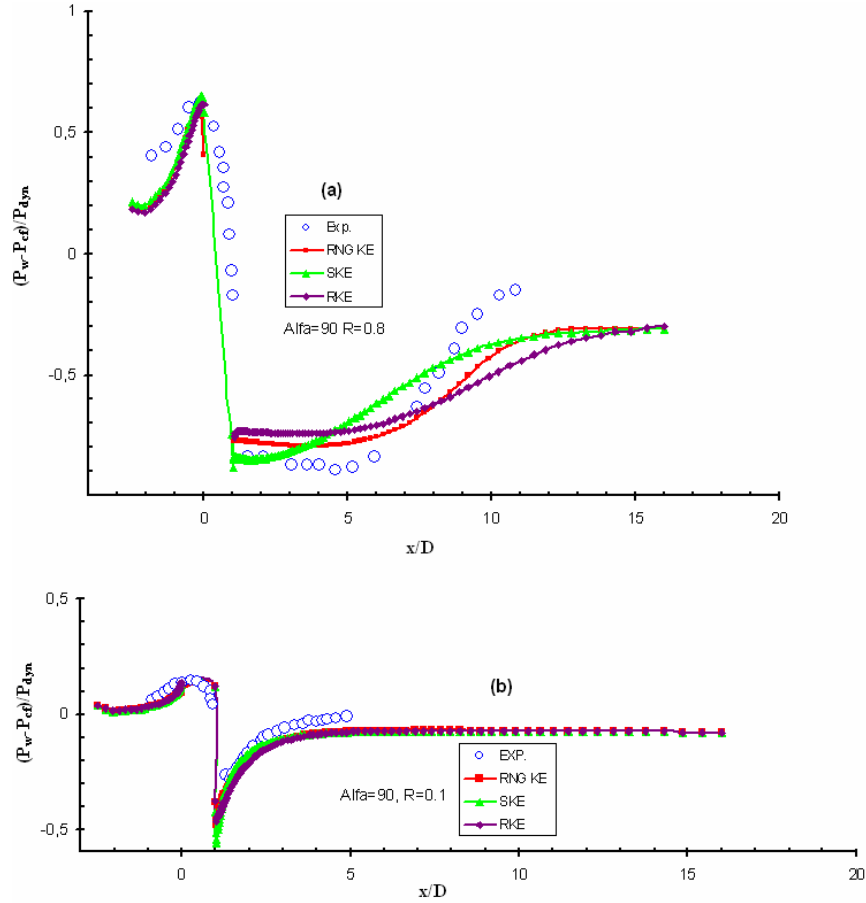


(b)

Şekil 2.17 Türbülans modellerinin mukayesesi için kullanılan 2-Boyutlu çalışma alanı (a) ve uygulanan ağ yapısı (b).

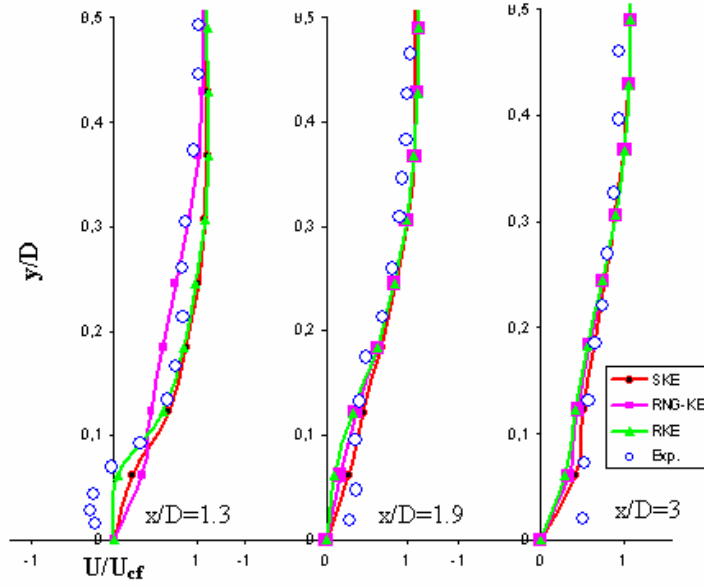
Şekil 2.18’de $R=0.1$ ve 0.8 hız oranları için çeper basınç dağılımlarının deneysel verilerle mukayesesi verilmiştir. Jet çapraz akışa püskürtüldüğünde jet ile çapraz akış arasındaki etkileşimden dolayı yüzey basıncı özellikle lüle çıkışına yakın bölgede değişmektedir. Burada jet bir engel gibi davranarak gelen akışı engellemiş ve kanal alt çeperi üzerindeki sınır tabakanın akış yönünde ayrılmasına neden olmuştur. Şekil 2.18’de gösterilen basınç, çapraz akış giriş basıncı ve dinamik basınç ($P_{din} = 0.5\rho u_{cf}^2$) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Grafikten de görülebileceği gibi basınç değeri jetin çapraz akış ile karşılaştığı nokta olan $x/D=0$ ’da yükselmektedir. Burası lülenin giriş kenarı olup bu noktadan sonra çapraz akış hız değişimi üzerinde büyük etkiye sahip olan soğuk jet akışı nedeniyle basınç düşmektedir. Her iki hız oranında da basınç dağılımları birbirine benzemekte ise de $R=0.1$ ’e göre $R=0.8$ ’de görülen uyumsuzluklar daha fazladır. Bu durum Kassimatis vd., 2000 tarafından da ifade edildiği gibi kullanılan türbülans modelinin düşük hız oranlarında daha uygun sonuçlar vermesi şeklinde yorumlanabilir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında püskürtme noktasından önceki benzer dağılımlar hem deneyde hem de sayısal çalışmada benzer giriş ve sınır şartlarının

kullanılmasında da kaynaklanabilir. $x/D=0$ 'a kadar türbülans modelinin etkisi henüz görülmediğinden deneysel ve sayısal sonuçlar birbiriyle büyük uyum içerisinde. Eğri düzleşene kadar basınç $R=1.0$ için $x/D=4.0$ 'te, $R=0.8$ için ise $x/D=12$ 'de tekrar yükselmekte ve çapraz akıştaki jet akışlarında görülen zıt-dönüslü girdap çiftinin oluşumuna sebep olmaktadır.

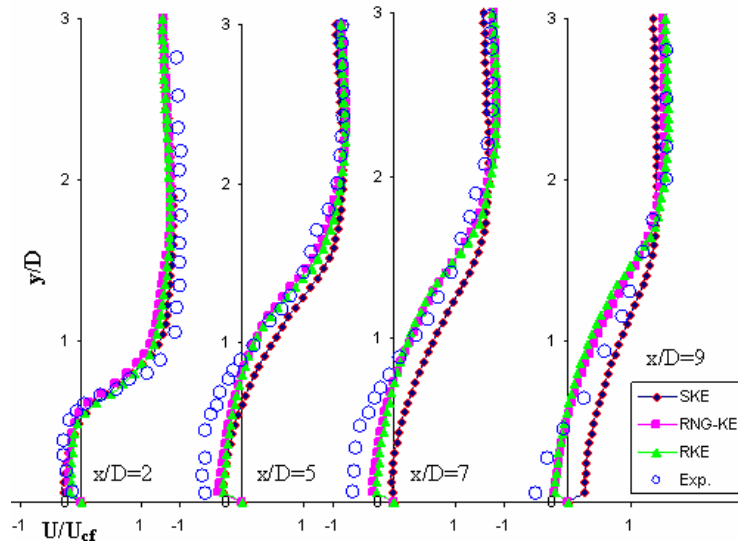


Şekil 2.18 Değişik türbülans modelleri kullanılarak elde edilen çeper basınç dağılımlarının O'Malley, 1984 tarafından yapılan deneysel sonuçlarla mukayesesi, a) $R=0.8$, b) $R=0.1$.

Standart k- ϵ , RNG k- ϵ ve Realizable k- ϵ türbülans modellerinin performans analizi $R=0.1$ ve 0.8 için çapraz akış giriş hız değeri ile boyutsuzlaştırılan x-yönündeki hız bileşeninin (u/u_{cf}) değişimleri gösterilmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Jet ile kanal arasındaki eğim açısı, $\alpha=90^\circ$ için benzeşimler farklı x/D istasyonlarındaki dağılımlar Şekil 2.19'da görülmektedir.



(a)



(b)

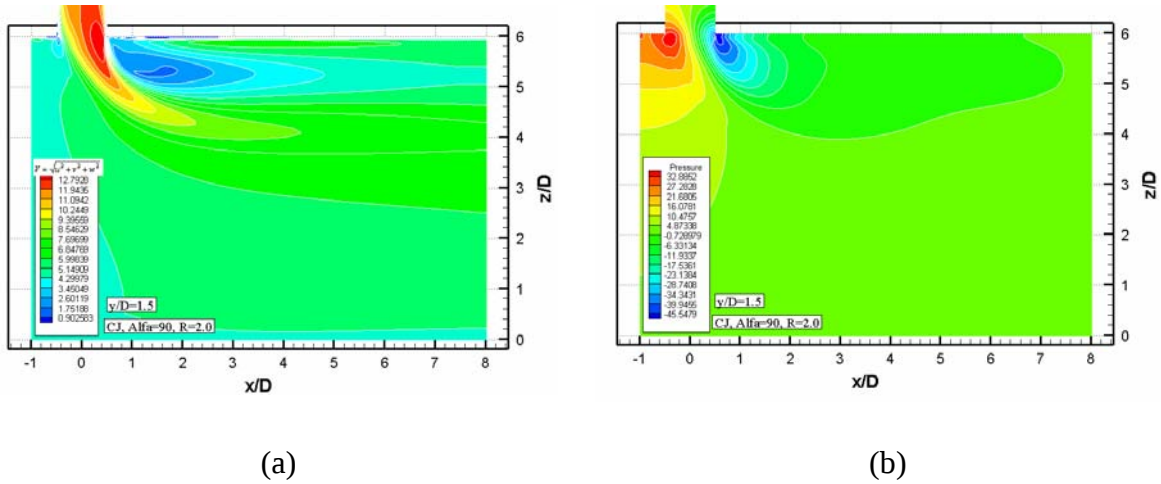
Şekil 2.19 Farklı istasyonlarda u -hız bileşenlerinin $\alpha=90^\circ$ için farklı türbülans modelleri ve deney sonuçlarıyla mukayesesi, a) $R=0.1$, b) $R=0.8$.

Çalışma alanının çıkışına doğru sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumsuzluk azalmaktadır. Hızların oranı arttırıldığında ise uyumsuzluklar da artmaktadır. Her iki hız oranında yapılan mukayese de görüldüğü gibi diğer türbülans modelleri içerisinde en uyumsuz olanı standart $k-\epsilon$, en yakın sonuçları veren ise Renormalized group (RNG) $k-\epsilon$ türbülans modeli olmuştur. Bu nedenle bütün sayısal çalışmalar RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir.

2.7 Dairesel Kesitli Tek Lüle Kullanılması Durumunda Görülen Girdap Yapıları

Daha önce de belirtildiği gibi “çapraz akıştaki jet akışı” veya “çapraz jet” jet akış yönünün serbest akış yönünden tamamen farklı olduğu bir akış türünü ifade eder. Çeşitli geometrik kesitlere sahip bir lüleden çıkan jet kendi eksenine belli bir açıda olan bir kanala püskürtülür. Şekil 2.20’de de görüldüğü gibi kanaldan akmakta olan serbest akış ya da çapraz akış, jetten çıkan akışı kendi doğrultusunda akmaya zorlayarak yönünü değiştirir.

Kanalda herhangi bir akış olmadığı durumda buraya püskürtülen hava normal bir jet akışı (serbest jet) gibi davranır ve lüle çıkışından itibaren hızı ve ivmesi azalır. Jetin olmadığı durumda kanaldan akmakta olan serbest akış ise bir düzlem üzerinde görülen laminar akış özelliğine sahiptir. Kanal ve lülenin her ikisinde de akış olması durumunda, jet kanalda akmakta olan serbest akış önünde bir engel teşkil ederek bu akış yapısını bozar. Bu durum özellikle lüle çıkışında kendini daha çok belli eder. Şekil 2.20a’da $-z$ yönünden püskürtülen jet akışı ve $+x$ yönünde akmakta olan serbest akışa ait bileşke hız kontürleri ($V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$) eğim açısı $\alpha=90^\circ$ ve $R=2.0$ için gösterilmiştir. Görüldüğü gibi lüle çıkışına yakın bölgede jet, serbest akış önünde silindirik bir cisim gibi davranarak akışa bir engel teşkil etmiş ve kanal içerisine doğru çapraz akışın yüksek momentumunun da etkisiyle yön ve doğrultusunu değiştirerek kanal akışı ile aynı yönde akmaya başlamıştır.



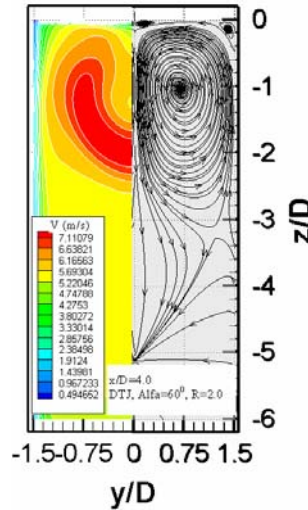
Şekil 2.20 Dairesel kesitli bir lüleden çapraz akışa püskürtülen bir jet akışına ait a) bileşke hız (m/s) ve b) basınç (Pa) kontürleri, $y/D=1.5$, $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$.

Şekil 2.20b’de bu akışa ait basınç kontürleri verilmiştir. Lüle çıkışında akışa ters yönde yüksek basınç değerleri mevcut iken lüleden sonra negatif basınç değerleri görülmektedir. Buradaki yüksek basınç, ters basınç gradyanına yol açarak çapraz akışı lüle girişine doğru iter.

İlerleyen kısımlarda da görülecek olan bu durumun yanında lüleden çapraz akışa püskürtülen jet, zıt-dönüslü girdap çifti (ZDGÇ) ya da böbrek kesitli girdap olarak adlandırılabilir bir girdabın oluşumuna da sebep olur. ZDGÇ çapraz akıştaki jet akışlarında görülen en baskın ve en etkili girdap çiftidir. Lüleden kanala girer girmez jet akış yönünde oluşan ZDGÇ, kanal içerisinde akmakta iken kanaldaki serbest akış yönünde ilerlemesine de devam eder. Bu çalışmada aşağıdaki şekillerden de görülebileceği üzere ZDGÇ oldukça erken bir zamanda oluşmaya başlamaktadır ($x/D=0.0$ 'dan hemen sonra).

Çapraz jetlerde görülen girdap yapıları içerisinde en büyük ölçekli olanı ZDGÇ'dir. Daha ilk istasyondan itibaren beliren bu yapı kanal içerisinde çok uzun mesafelerde bile görülebilir (Pratte ve Baines, 1968). ZDGÇ'nin kanalda akmakta olan serbest akışa ait sınır tabaka ayrışmasından dolayı oluştuğu pek çok araştırmacı tarafından ifade edilmişse de bunun doğru bir yaklaşım olmadığı söylenebilir. Çapraz akış içerisinde doğru yükseltilmiş jet akışlarında da ZDGÇ görülmesi, bu girdap yapısının sınır tabakadan bağımsız olarak meydana geldiğini ortaya koymaktadır (Eiff vd., 1995; Bayraktar, 2006). İlerleyen bölümlerde de görüleceği üzere ZDGÇ sıcaklık gibi skaler alanların taşınmasında da oldukça etkilidir.

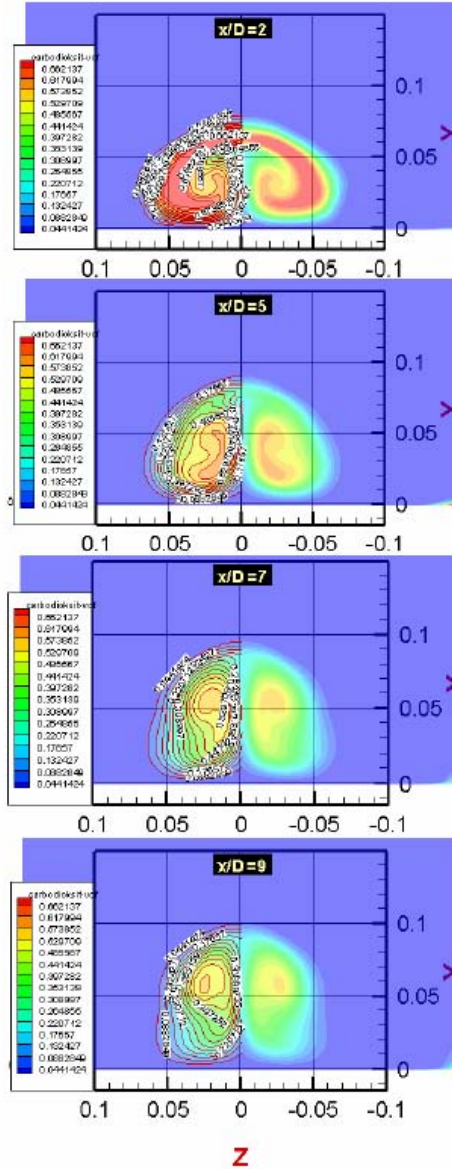
Yapılan analizler çapraz akıştaki jet akışlarında görülen en yüksek hız değerlerinin ZDGÇ'nin merkezinde olduğunu göstermiştir (Şekil 2.21). ZDGÇ hem kanalda akmakta olan akışkanı hem de lüleden kanala püskürtülen jet akışına ait sınır tabaka akışkanlarını içerir.



Şekil 2.21 Akışa ait en yüksek hız değerlerinin ZDGÇ merkezinde görülmesi ($x/D=4.0$, $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$) .

Bu ifadenin daha net olarak anlaşılmasına yardımcı olacak bir çalışma kanal akışı için hava, jet akışı için CO_2 gazı kullanılarak gerçekleştirilerek Bayraktar, 2007 tarafından gösterilmiştir.

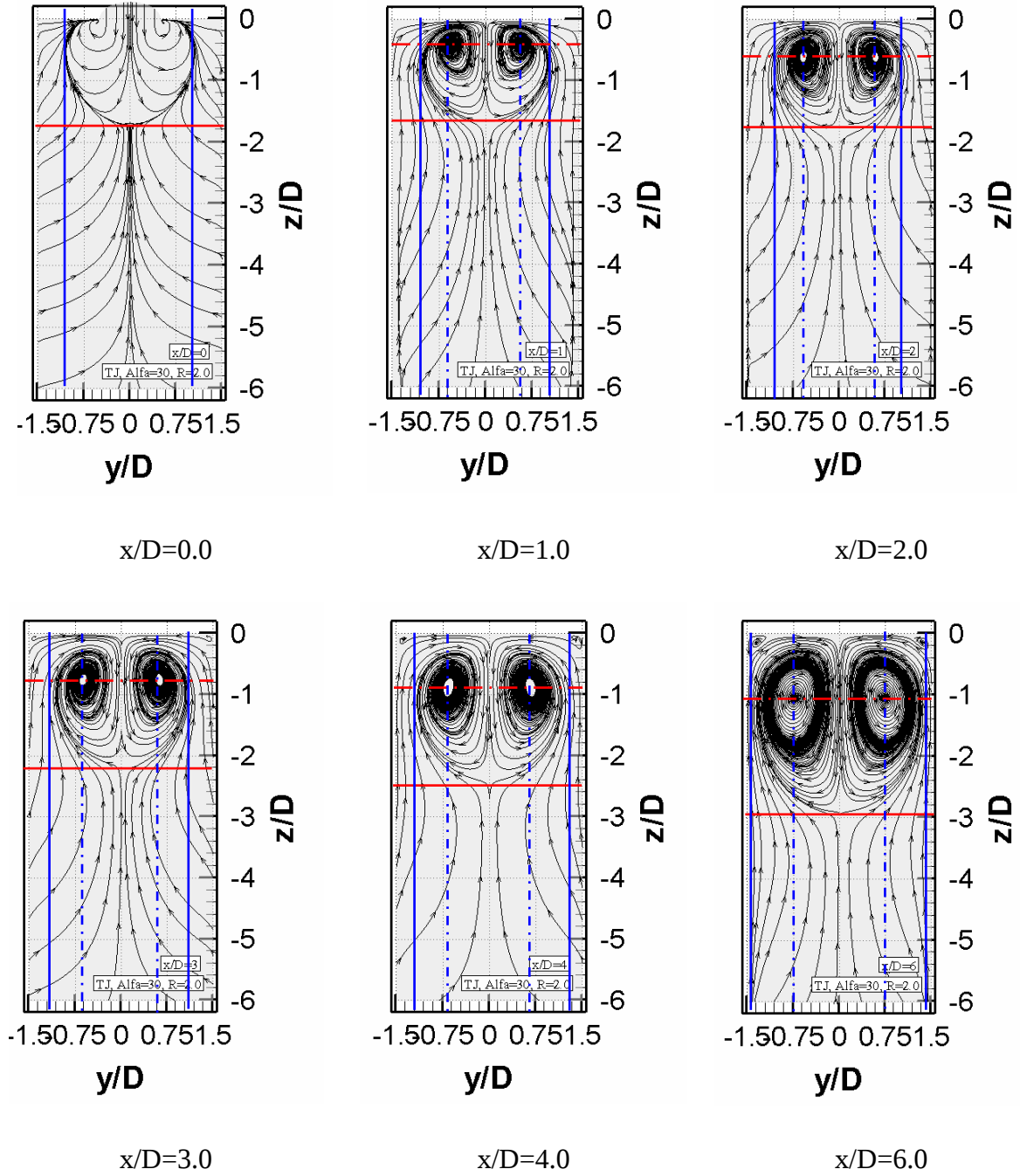
Şekil 2.22’de görülebileceği üzere ZDGÇ hem kanaldan akmakta olan havayı hem de lüleden püskürtülen CO₂ gazını içermektedir ve kanal çıkışına doğru ilerleyen istasyonlarda CO₂ miktarı azalmaktadır.



Şekil 2.22 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması halinde $\alpha=90^\circ$, $R=0.5$ için kanal boyunca farklı istasyonlarda iki farklı akışkanın ZDGÇ tarafından taşınması, (Bayraktar, 2007).

Çapraz akıştaki jet akışlarında en önemli değişkenlerden biri, jet giriş hızının kanaldan serbest olarak akmakta olan çapraz akış giriş hızına oranı olan R' 'dir. Hız oranının değerine göre akışta önemli değişiklikler görüldüğü ifade edilmiştir. Buna göre $R>2.0$ yüksek hız oranı, $R<2.0$ düşük hız oranı olarak tanımlanmıştır (Sherif ve Pletcher, 1989). Yüksek hız oranlarında lüleden kanala püskürtülen jet, kanala daha fazla nüfuz edeceğinden çeperden

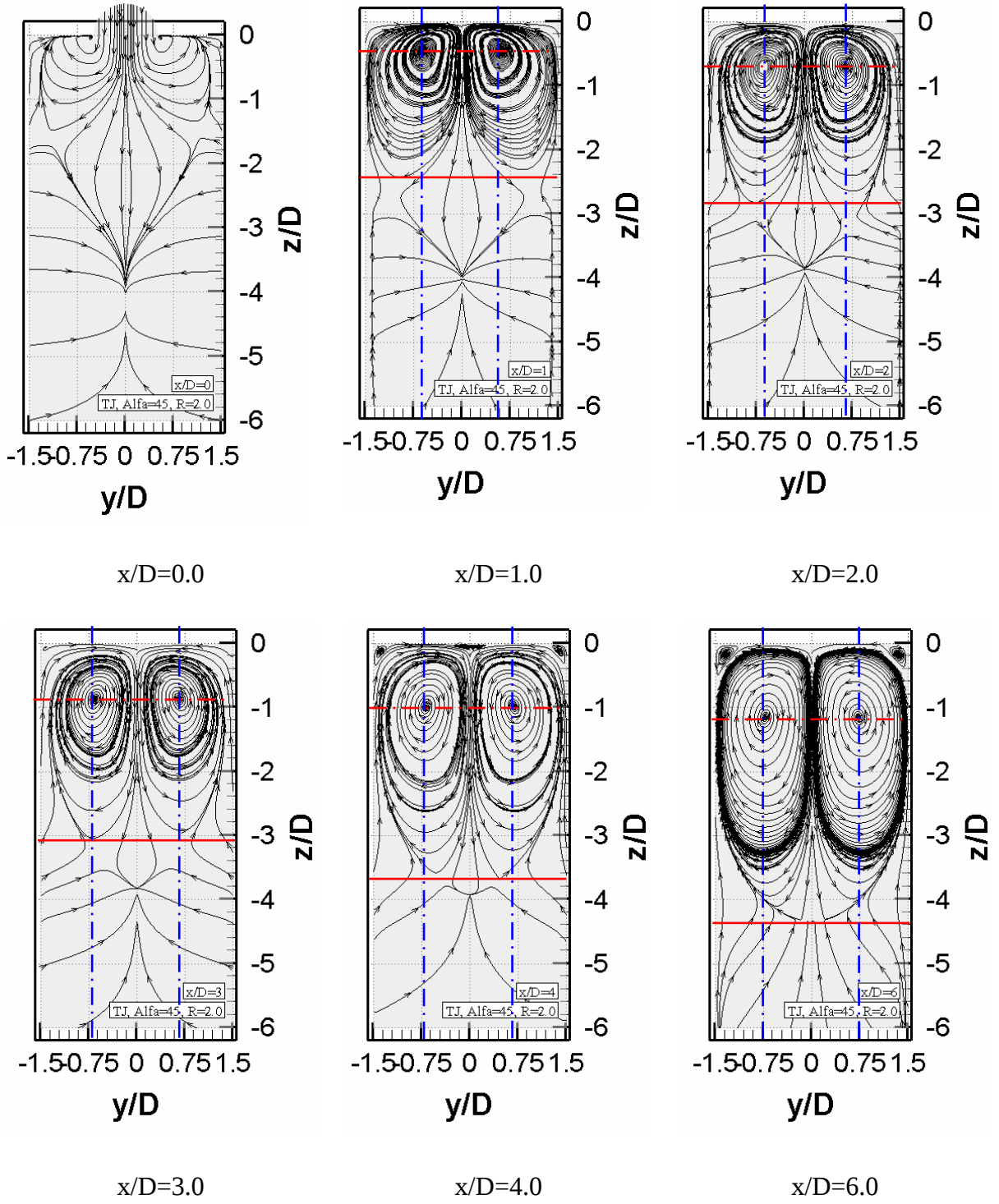
uzaklaşmakta ve çeper etkilerinden kurtulmaktadır. Bu durum özellikle yakın-çeper ZDGÇ olarak tanımlanabilecek ve ilerleyen şekillerde de gösterilmiş olan girdap yapısının görülmemesine yol açması açısından önem arz eder. Şekil 2.23'te $\alpha=30^\circ$ eğim açısıyla kanala giren dairesel kesitli tek bir lüleden çıkan jet akışında görülen ZDGÇ'nin lüle girişinden kanal çıkışına doğru gelişimi gösterilmiştir. Kanal boyunca değişik istasyonlarda ($x/D=0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$, ve 6.0) kesit alınarak akım hatlarının değişimi $R=2.0$ için verilmiştir.



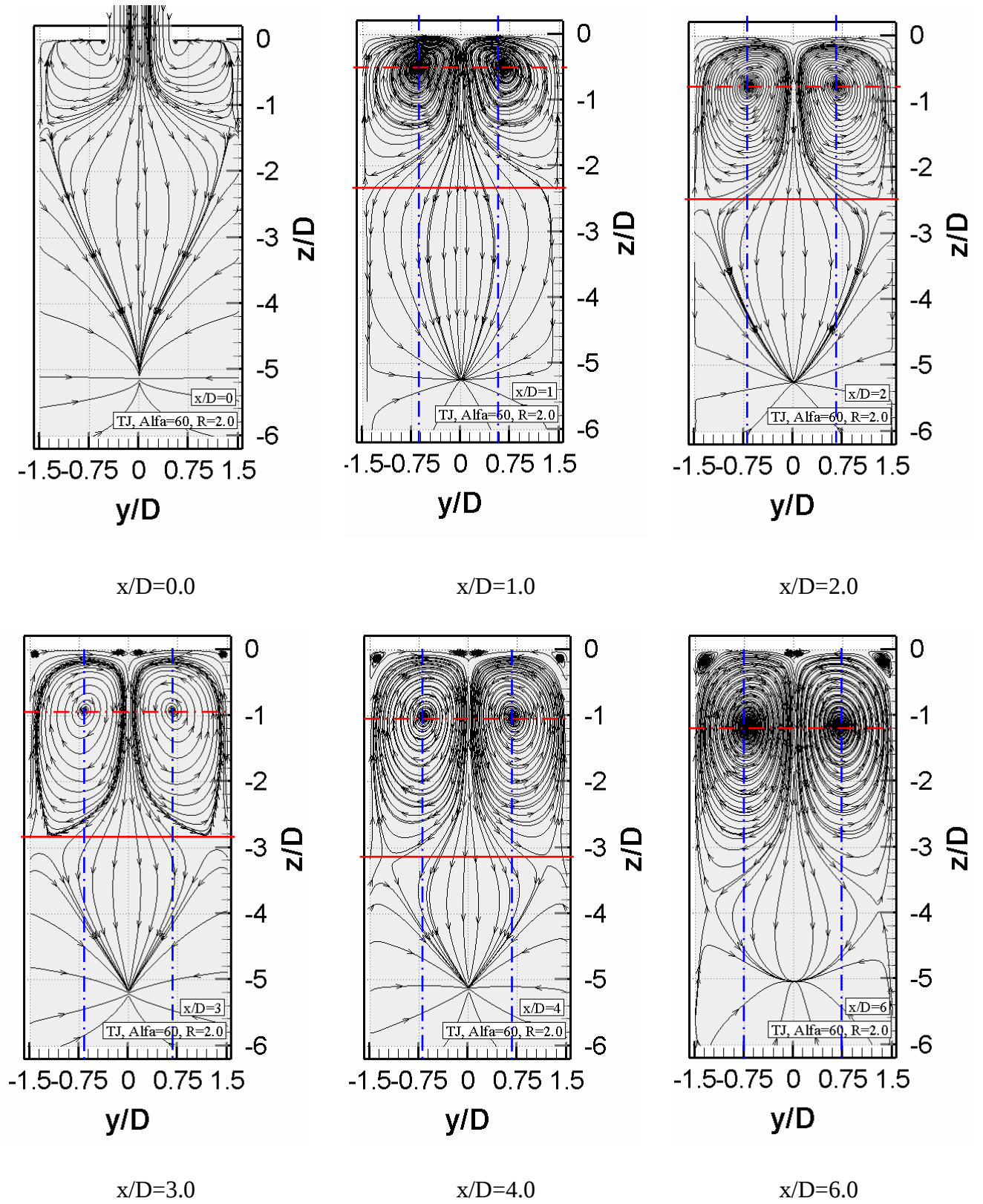
Şekil 2.23 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.

Lüleden kanala püskürtülen jetin serbest akış ile etkileşiminden kaynaklanan bir girdap yapısı, daha ilk istasyon olan $x/D=0.0$ 'da genişliği $-1.05 < y/D < +1.05$, yüksekliği ise $0.0 < z/D < 1.8$ arasında değişen bir yapılanma ile kendini göstermektedir. Buradaki girdabın merkezi çepere çok yakın bir yerde iken ikinci istasyon olan $x/D=1.0$ 'de merkez $y/D = \pm 0.60$, $z/D = \pm 0.40$ 'a taşınmakta ve son istasyon olan $x/D=6.0$ 'da ise $y/D = \pm 0.75$, $z/D = \pm 1.01$ 'e doğru kaymaktadır. Çapraz akıştaki jet akışlarında görülen bu girdap yapısına ZDGÇ veya böbrek kesitli girdap denilmektedir. ZDGÇ çapraz akış üzerindeki jetin uyguladığı impulslardan (darbeden) kaynaklanan ve ortalama akışa ait yapısal bir özelliktir. Jetin yörüngesi hem jeti çeperden uzaklaştıran çapraz jet akışından hem de çapraz akış yönünde yörüngeyi taşıyan hareketlerden oluşur. İkincisi jetin çapraz akış içerisine nüfuz etmesinden kaynaklanan bir sonuçtur. Bazı araştırmacılar, jet kayma tabakasından çıkan girdapların ZDGÇ'nin ana nedeni olduğunu ileri sürmüşlerdir (Andreopoluos ve Rodi, 1994; Coehlo ve Hunt, 1989). Buna göre akış yönünde taşınan farklı jet kayma tabakasına ait girdap halkalarının birbirlerine göre gerçekleşen farklı hareketleri buna sebep olmaktadır. Bir girdap halkası diğer bir girdap halkası arkasından oluştuğundan daha geride ve aşağıda kalmaktadır. İlk ve son girdap halkalarının akış yönünde ve gerisindeki son kısımları farklı girdaplara sahip olurlar. Bu girdap elemanları çapraz yayılma neticesinde birbirleriyle etkileşime girerek birbirlerini iptal ederler. Bu iki halkanın kenarları aynı girdap değerine sahip olup birbirlerini sararlar ve ZDGÇ'nin oluşumuna sebep olurlar.

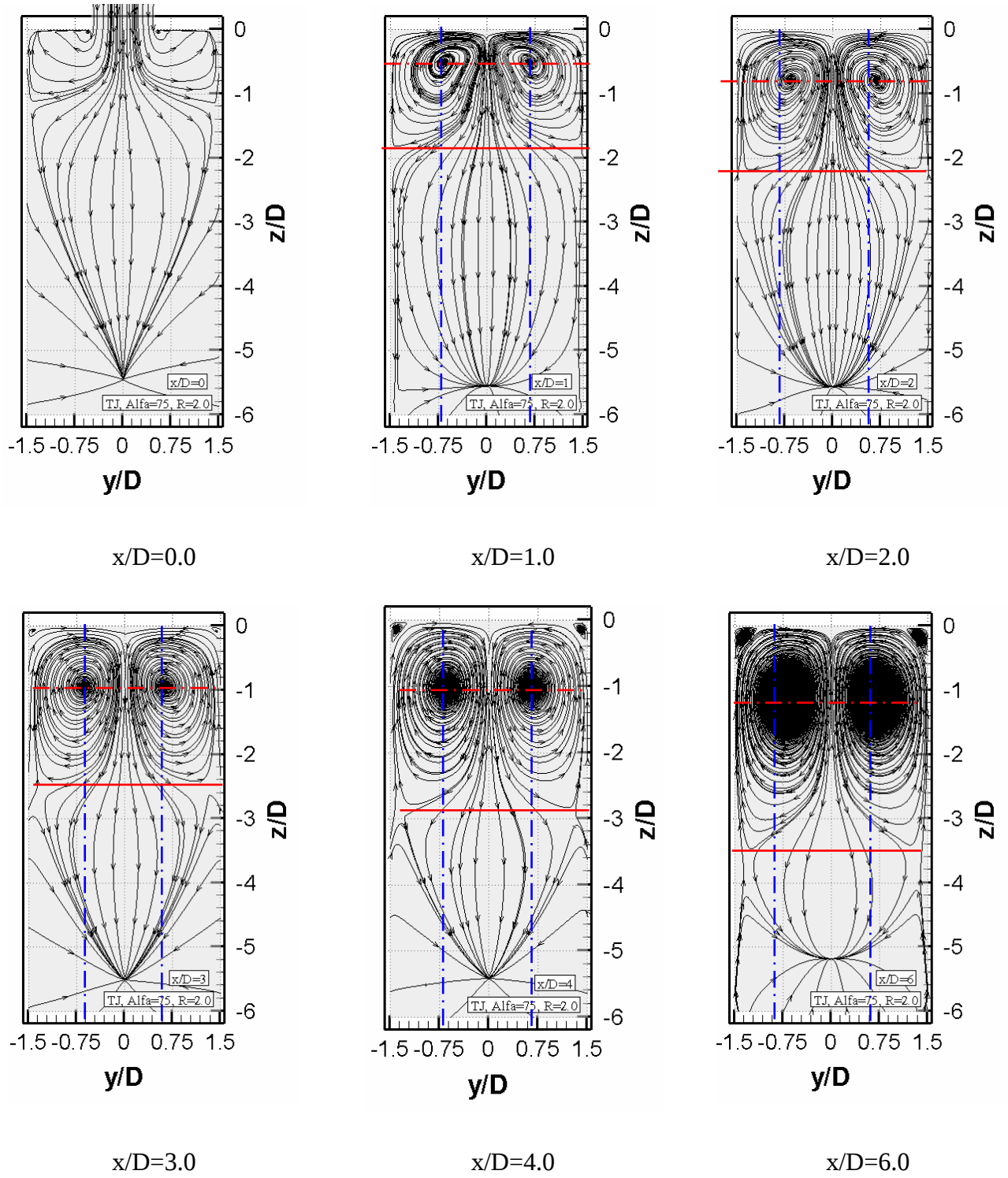
Eğim açısının ZDGÇ üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 2.23'ten Şekil 2.27'ye kadar gösterilmiştir. ZDGÇ'nin $\alpha=45^\circ$ eğim açısındaki gelişimi Şekil 2.24'te, $\alpha=60^\circ$ eğim açısında Şekil 2.25'te, $\alpha=75^\circ$ eğim açısında Şekil 2.26'da ve $\alpha=90^\circ$ eğim açısındaki (normal çapraz jet) gelişimi ise Şekil 2.27'de görülmektedir. Özellikle daha yüksek eğim açılarında kendini belli eden bazı farklı yapılar bu şekillerde görülmektedir. Ana ZDGÇ'nin yanında kanal üst çeperi ile ana ZDGÇ arasında ikincil bir dönme bölgesinin varlığı dikkat çekmektedir (yakın-çeper ZDGÇ) . Büyük kesit alanlarına sahip ana girdaplar gibi, bunlar da eğim açısının artmasıyla daha büyük kesit alanlarına sahip olmaktadırlar. Düşük eğim açılarında sadece son istasyonlarda görülen bu ikincil dönme bölgelerine eğim açısı arttırıldıkça $x/D=3.0$ ve $x/D=4.0$ gibi kanal ortasına yakın istasyonlarda da rastlanmaktadır. Eğim açısının ZDGÇ üzerindeki en belirgin özelliği ise eğim açısı arttırıldıkça ZDGÇ'nin kesit alanının büyümesi ve kanalı (-y) ve (+y) yönlerinde gittikçe doldurmasıdır. Ayrıca bu artış ZDGÇ'nin merkez koordinatları y/D ve z/D yönlerinde kanal yan ve içerisine doğru değişmesine ve böbrek kesidi gibi görünmesine sebep olmaktadır.



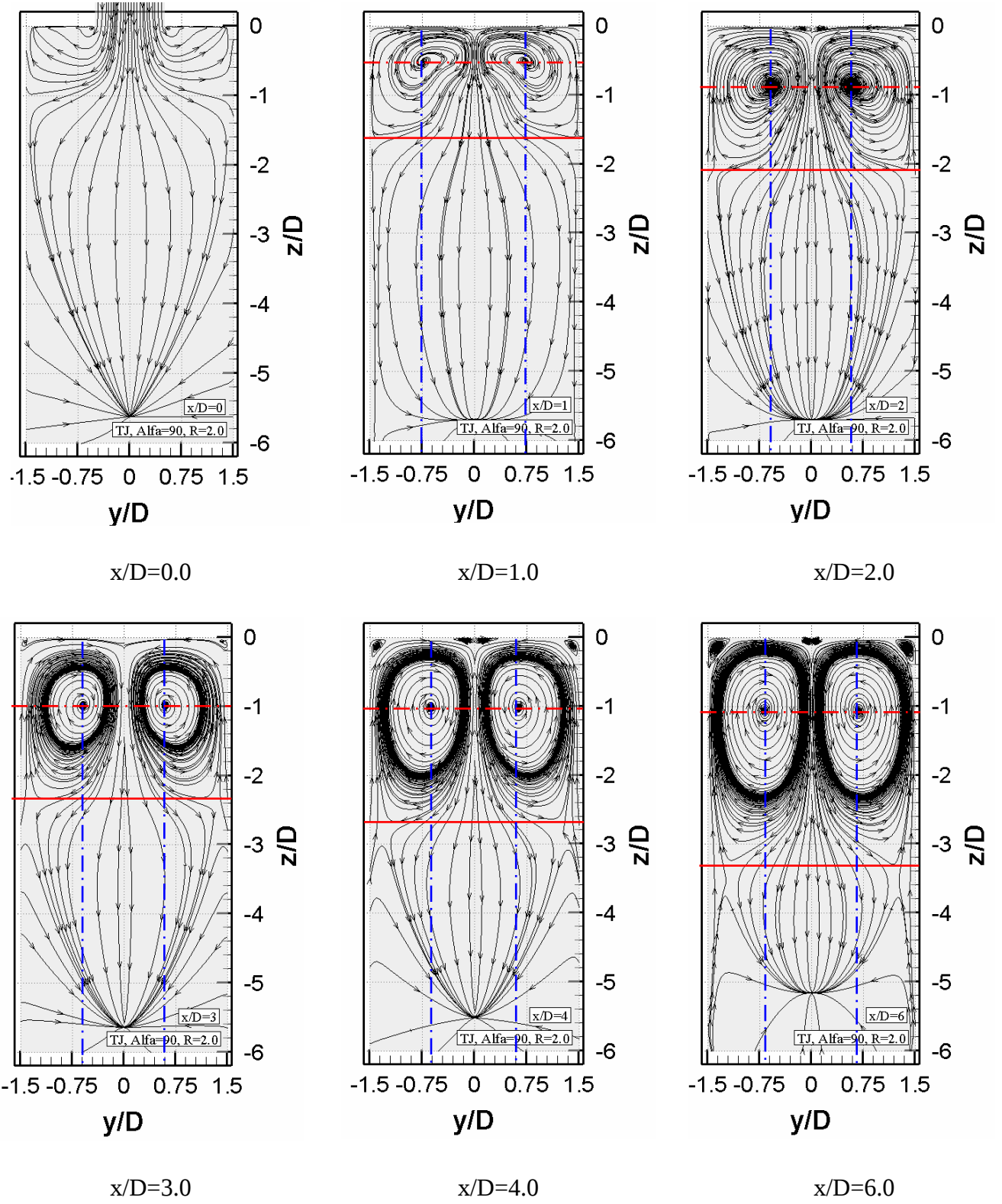
Şekil 2.24 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.



Şekil 2.25 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.



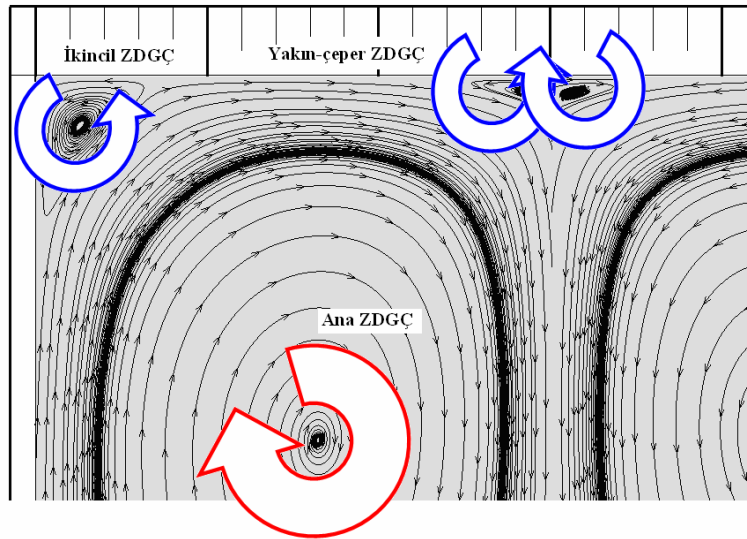
Şekil 2.26 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.



Şekil 2.27 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.

İkincil girdap yapıları ile ilgili söylenmesi gereken en önemli özellik ise bunların ana girdap çiftinden farklı ve tamamen ana ZDGÇ'nin tersi yönünde dönmeleridir (Şekil 2.28). Yanal çeperlere yakın bölgede görülen ikincil ZDGÇ'nin yanında ayrıca kanal merkezinin sağında ve solunda ($\pm x/D$) olmak üzere ana ZDGÇ'in dönme yönünün tersi yönde dönmekte olan ve yakın-çeper olarak adlandırılabilen bir girdap çifti daha saptanmıştır. Bu yakın-çeper ZDGÇ'nin varlığı $\pm y/D$ yönlerinde mevcut ters basınç gradyanlarının varlığına işaret etmektedir. Daha önceki çalışmalar jetin serbest akış yönü tarafındaki kısmında mevcut olan ters basınç gradyanlarının kanal çeperi üzerine etkidiğini ve çapraz akıştan dolayı oluşan sınır tabakayı ayrılmaya zorladığını göstermiştir. Kanal üst ve yan çeperlerindeki ayrılma ise Şekil 2.28'de gösterilen ikincil ve yakın-çeper ZDGÇ oluşumuna sebep olmaktadır. Ancak bu ikincil girdap çiftlerinin dönme yönü, kendilerinin oluşumuna sebep olan ana ZDGÇ'nin dönme yönünün tersidir. Çepere yakın bulunan akışkan elemanları akış yönünde ilerlerken, daha uzun süre ters basınç gradyanına maruz kalırlar ve bu da daha büyük ayrılma bölgelerinin oluşumuna sebep olur. Ancak viskoz difüzyon (yayılma) daha büyük dönme bölgelerinin oluşumuna sebep olan bazı etkilere de sahip olabilir.

Daha önce yapılmış çalışmalar, ikincil girdap içeren dönme bölgelerinin akış yönünde ilerlerken büyümesi gerektiğini göstermiştir. Burada ise akış yönünde değişik istasyonlarda alınan kesitlerde de görüldüğü gibi, ikincil girdapların bulunduğu dönme bölgeleri büyümemekte, aynı ölçülere sahip olarak mevcudiyetini korumaktadır. Bu durum ise yakın-çeper ZDGÇ'nin viskoz tepkime sebebi ile oluştuğunu göstermektedir.



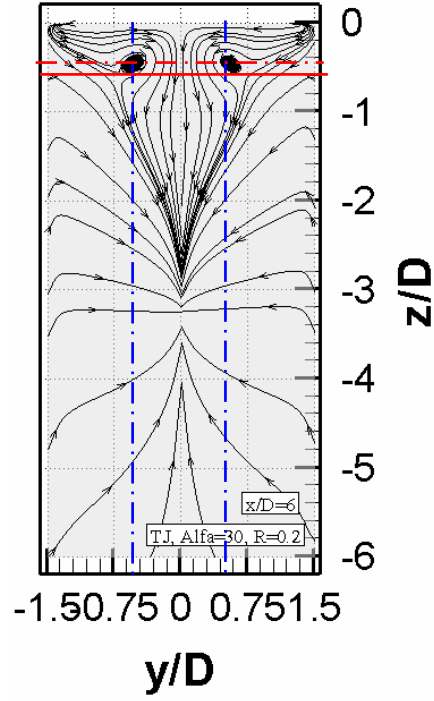
Şekil 2.28 Kanal üst çeperi ile ana ZDGÇ arasında oluşan ikincil ve yakın-çeper ZDGÇ ve dönme yönleri.

ZDGÇ üzerinde hız oranlarının etkisi iki farklı eğim açısı ($\alpha=30^\circ$ ve 90°) için Şekil 2.29 ve Şekil 2.30'da gösterilmiştir. Her iki eğim açısında da hız oranı R 'nin ZDGÇ üzerindeki etkisi çok net bir şekilde görülebilmektedir. Çok düşük hız oranlarında kanal akışına ait momentum, lüleden püskürtülen jet akışına ait momentumdan oldukça büyük olduğundan lüleden kanala giren akışkan, çapraz kanal akışı ile etkileşime giremeyecek kadar zayıf kalmakta ve çok güçsüz bir girdap oluşumuna yol açmaktadır. Eğim açısının en küçük olduğu 30° 'de (Şekil 2.29) $R=0.2$ hız oranında ZDGÇ'nin merkezi $y/D=\pm 0.525$, $z/D=0.45$ 'te iken, $R=0.5$ hız oranında ve aynı konumda ($z/D=0.45$) $y/D=\pm 0.45$ 'e taşınmaktadır. $R=1.0$ için bu sefer y/D değişerek eski noktaya dönmekte ($y/D=\pm 0.525$) iken, z/D merkez noktası değişerek $z/D=0.65$ olmaktadır. ZDGÇ merkez noktası en yüksek hız oranında gerek derinliğine gerekse de enine taşınarak $y/D=\pm 0.75$, $z/D=1.15$ 'e taşınmıştır. Her ne kadar bazı hız oranlarında ZDGÇ'nin merkez noktaları değişmemekte ise de girdabın y/D ve z/D yönlerinde kademeli olarak artarak kanalı doldurduğu gözlenmekte ve kanal içerisinde daha baskın bir hale geldiği görülmektedir.

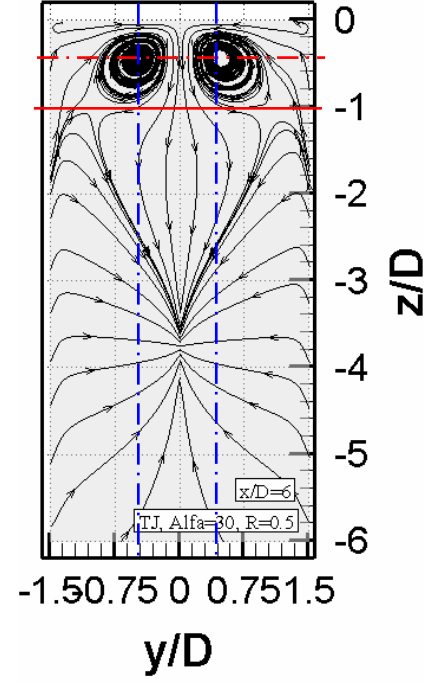
Eğim açısının ZDGÇ üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması için Şekil 2.31'de kanal çıkışında ($x/D=6$) $R=2.0$ için oluşan akım hatları verilmiştir. Hız oranlarında görüldüğü gibi eğim açısının arttırılması da ZDGÇ üzerinde büyük etkiye sahiptir. Eğim açısı yükseltilip normal çapraz jet durumuna yaklaşıldıkça ZDGÇ hem daha belirgin hale gelmekte hem de daha büyük bir kesit alanı kavuşmaktadır. Gerek hızların oranı olan R , gerekse de kanal ile jet akışının sağlandığı lüle arasındaki eğim açısı α arttığı zaman, ZDGÇ'nin merkezleri hem kanal içerisine hem de yanal çeperlere taşınarak kanalı dolduracak şekilde büyümesine sebep olduğu saptanmıştır.

Eğim açısının ve hız oranlarının arttırılması ana ZDGÇ'nin yanında ikincil girdap bölgelerinin oluşumuna da sebep olmakta ve bu yapıların daha da büyümesine yol açmaktadır. Eğim açısı 15° arttırılarak değişik istasyonlarda farklı eğim açıları ve hız oranlarındaki çapraz akış durumunu gösteren yukarıdaki şekillerden çıkarılabilecek sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

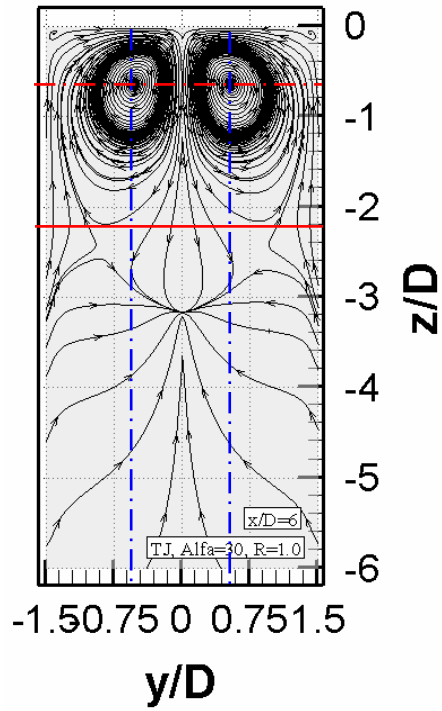
- Eğim açısı arttıkça aynı hız oranına sahip akış durumunda ZDGÇ daha geniş bir alanı kaplamakta ve merkezi ise üst çeperden kanal ortasına doğru taşınmaktadır.



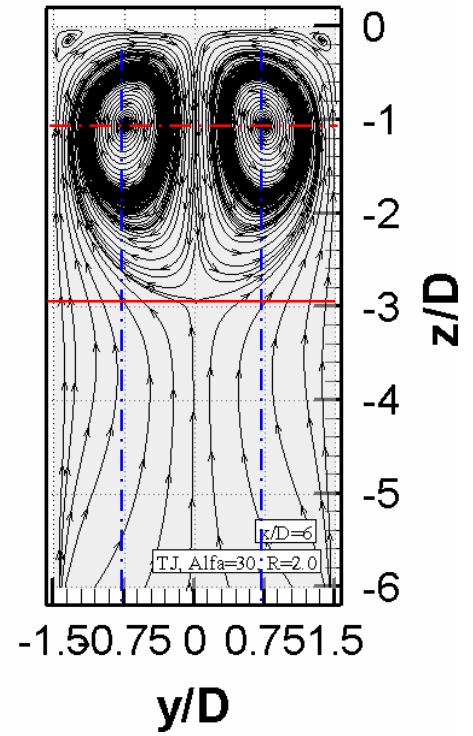
R=0.2



R=0.5

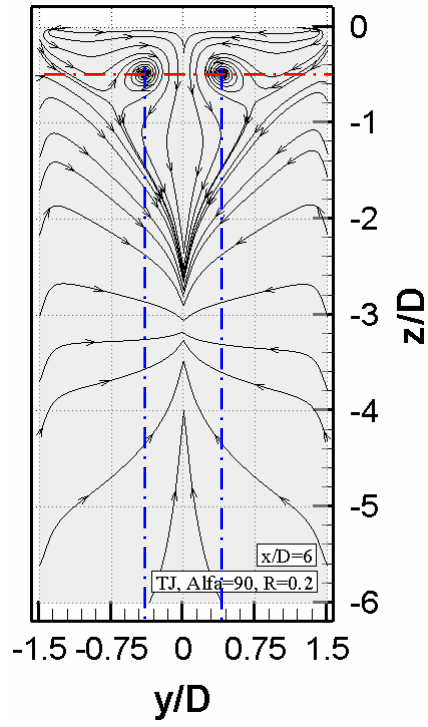


R=1.0

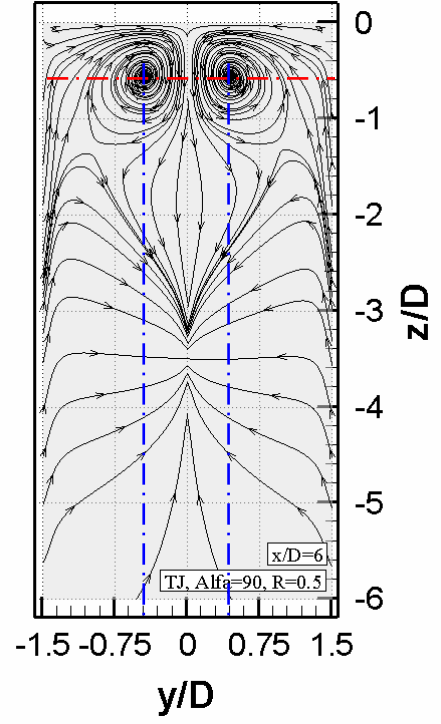


R=2.0

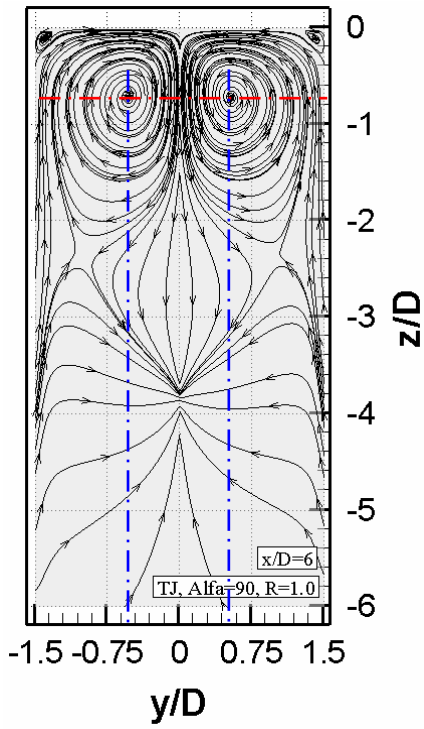
Şekil 2.29 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda hız oranı R 'nin ZDGÇ üzerindeki etkisi ($\alpha=30^\circ$, $x/D=6.0$).



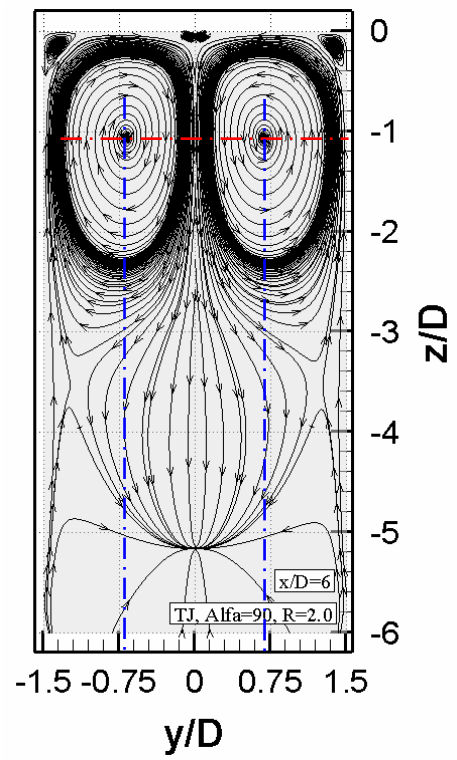
$R=0.2$



$R=0.5$

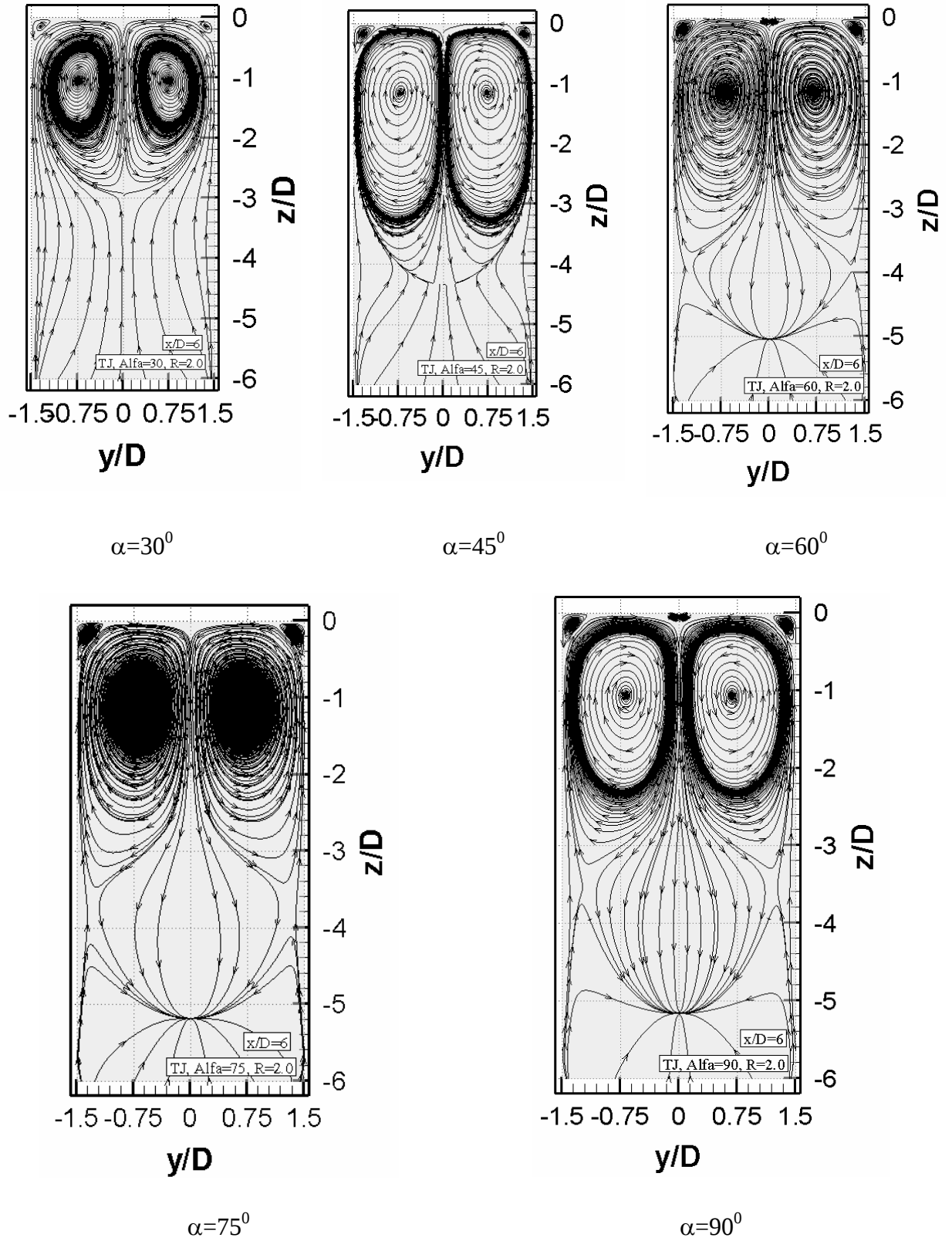


$R=1.0$



$R=2.0$

Şekil 2.30 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda hız oranı R 'nin ZDGC üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$, $x/D=6.0$.



Şekil 2.31 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $x/D=6.0$.

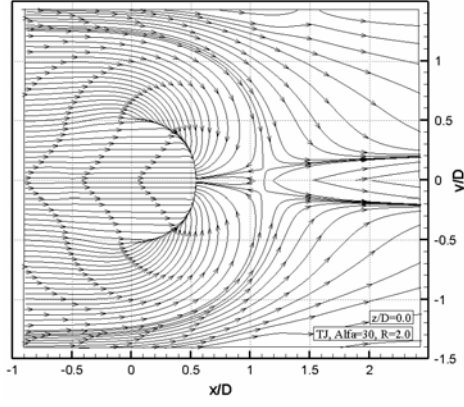
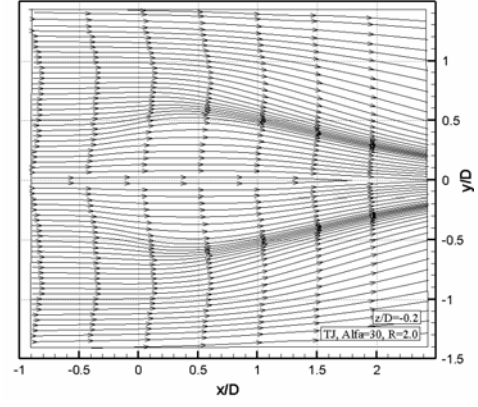
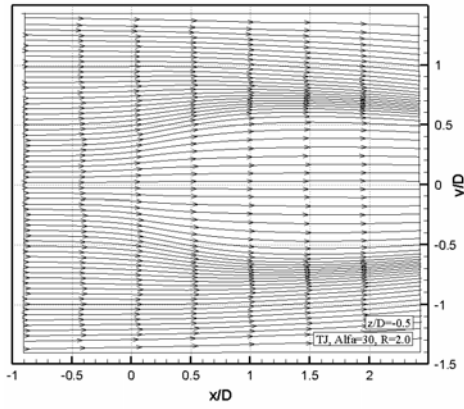
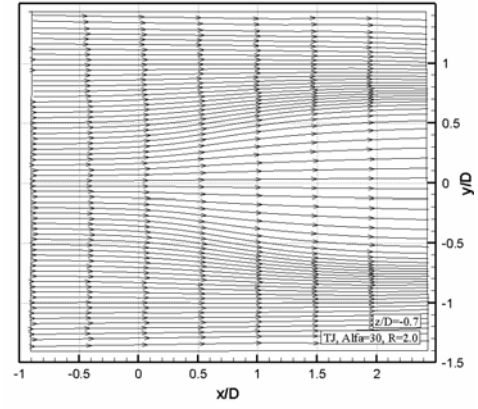
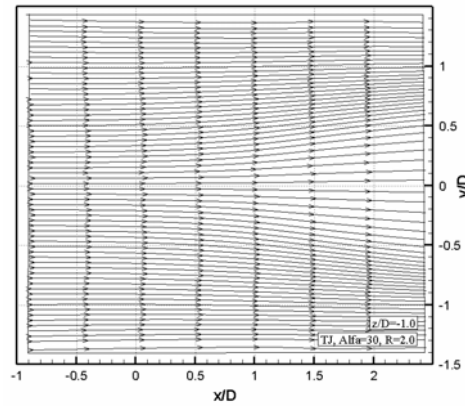
- Aynı eğim açısında hızların oranının artırılması da aynı sonuca yol açmaktadır. Hızların oranı olan R 'nin 0.2'den 2.0'ye kadar artırılmasıyla hem jet merkezi değişmekte hem de ZDGÇ daha güçlü olarak daha geniş bir alanda hareket etmektedir.
- Özellikle yüksek hız oranları ve yüksek eğim açılarında kanal üst çeperi ile ana girdap yapısı arasında gerek kanal merkezine gerekse de kanal yan çeperlerine yakın ikincil girdaplar oluşmakta ve bunlarda tıpkı ana girdap yapıları gibi eğim açısı ve hız oranlarıyla doğru orantılı olarak büyüyüp küçülmektedirler. Bunların dönme yönü ana girdap yapısının dönme yönünün tersi olup ölçüleri, kuvveti ve akım yönündeki yerleri eğim açısı ve hızların oranına bağlıdır.
- Çok düşük hız oranları ($R=0.2$ ve 0.5) ve çok düşük eğim açılarında ($\alpha=30^\circ$ ve 45°) lüleden kanala giren akışkan kanal akış momentumunu yenemediğinden dolayı kanal içerisine nüfuz edememekte ve kanal akışı tarafından bastırılarak çok güçsüz ve daha küçük kesit alanına sahip girdapların görülmesine sebep olmaktadır.

Şekil 2.32'den Şekil 2.36'ya kadar olan şekillerde $R=2.0$ hız oranında akım hatlarındaki değişim değişik z/D istasyonlarında farklı eğim açıları için gösterilmiştir. Değişimler sadece kanal üst çeperinden kanal içerisine doğru olup $z/D=0.0$, -0.2 , -0.5 , -1.0 ve -2.0 için verilmiştir. Eğim açısı $\alpha=30^\circ$ olduğu zaman kanal üst çeperinden kanal içerisine doğru akıştaki değişim Şekil 2.32'de sunulmuştur. Eğim açısı çok düşük olduğundan lülenin kanal ile kesiştiği ilk istasyon olan $z/D=0.0$ dışında akım hatlarında çok fazla bozulma görülmemektedir. $\alpha=45^\circ$ 'de (Şekil 2.33) $z/D=-0.2$ no'lu istasyonda akımda bir ayrılma olacağı kendini belli etmekte ve eğim açısı 45° 'den 60° 'ye arttırıldığında (Şekil 2.34) $z/D=-0.2$ 'de akışın $x/D=0.80$ ve $y/D=-0.05$ ile $y/D=+0.05$ merkezli bir girdap oluşturduğu görülmektedir. Eğim açısının daha da arttırılmasıyla (Şekil 2.35) $z/D=-0.2$ no'lu istasyondaki girdabın merkezinin değişerek $x/D=0.70$, $y/D=\pm 0.10$ 'a taşındığı tespit edilmiştir. Bunun yanında söz konusu bu eğim açısında ($\alpha=75^\circ$), $z/D=0.5$ ve $z/D=-0.7$ 'de de birer akış ayrılması daha görülmüştür. Eğim açısı $\alpha=90^\circ$ olduğunda ise (Şekil 2.36) bu istasyonlarda oluşan girdapların varlığı artık tamamen kendini göstermiş ($x/D=1.10$, $y/D=\pm 0.28$ merkezli) ve $z/D=-0.2$ 'deki girdabın merkezi artık $x/D=0.65$, $y/D=\pm 0.20$ olmuştur. Tüm bu şekillerde lüleden çapraz akış içerisine püskürtülen jet akışının değişik eğim açıları ve hız oranlarında meydana gelmesine sebep olduğu girdap yapıları, kanal üst çeperinden kanal içerisine doğru değişik yüksekliğine kesitler (z/D) alınmak suretiyle gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi kanal üst çeperinden itibaren kanal içerisine püskürtülen jet akışı kanalda serbest olarak

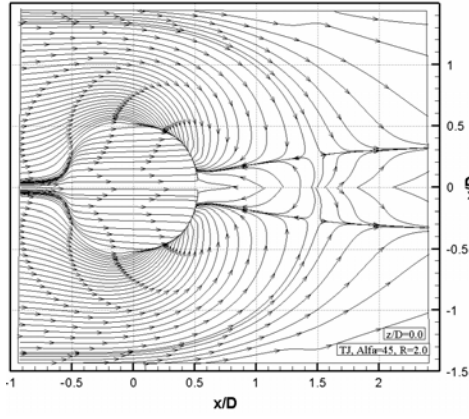
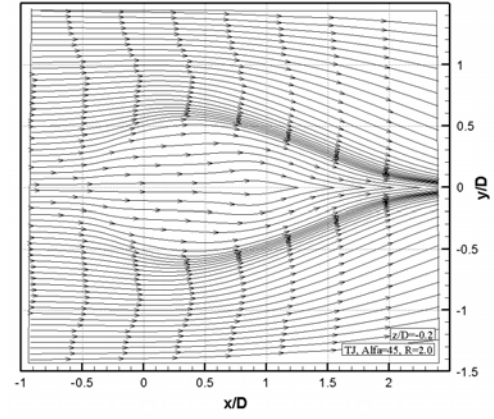
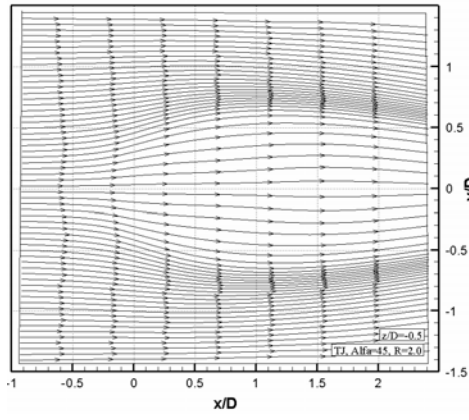
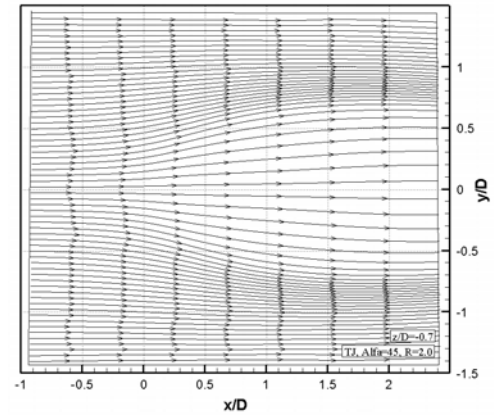
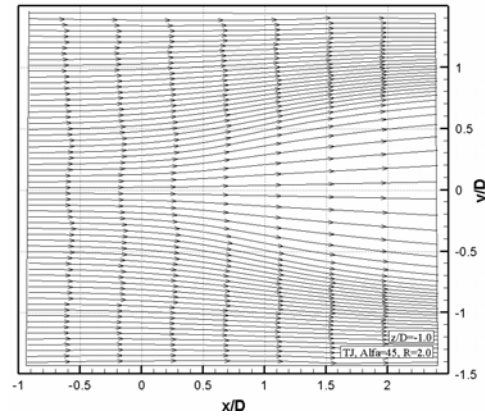
akmakta olan çapraz akışa ait sınır tabakayı bozarak yan yüzeylere doğru olmak üzere akışta ayrılmalara sebep olmuştur. At nalı girdap olarak tanımlanabilecek olan bu çeşit bir girdabın varlığı ZDGÇ gibi çapraz jet akışlarında görülen bir özelliktir. Sınır tabakanın lüleden hemen önceki kısmındaki durma noktasında vortisitinin birikmesinden dolayı oluşan bu girdap yapısı akışın lüleden hemen önce ayrılmasıyla kendini gösterir. Buradaki ayrılma çapraz akışa maruz kalmış bir silindirin etrafında oluşan at-nalı girdap gibi olup, jet akışının bu katı silindir cisim gibi davranması nedeniyle oluşur. At nalı girdabın saptandığı bütün şekillerde görülebileceği gibi kanal ortasına doğru inildikçe bu girdabın merkezi de kanal girişine doğru taşınmaktadır.

Eğim açısının etkisi değişik yüksekliğine kesitlerde (z/D) verilerek bu değişim adım adım gösterilmiştir. $z/D=0$ 'daki değişim $R=2.0$ için Şekil 2.37'de $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90° için sunulmuştur. Lüleden kanala giriş yapan jet akışının sebep olduğu akış ayrılması özellikle bu ilk istasyonda bütün eğim açıları için gözlenmektedir. $0.2D$ kadar kanal içerisine inildiğinde görülecek bir alt istasyon olan $z/D=-0.2$ 'de ise (Şekil 2.38) girdapların sadece $\alpha=60^\circ, 75^\circ$ ve 90° 'de meydana geldiği görülmektedir. Ancak burada daha net olarak görülen özellik, eğim açısının arttırılmasıyla girdabın merkezinin kanal girişine doğru yaklaşması ve yanal olarak (y/D yönünde) girdabın daha büyük bir alanı doldurmasıdır.

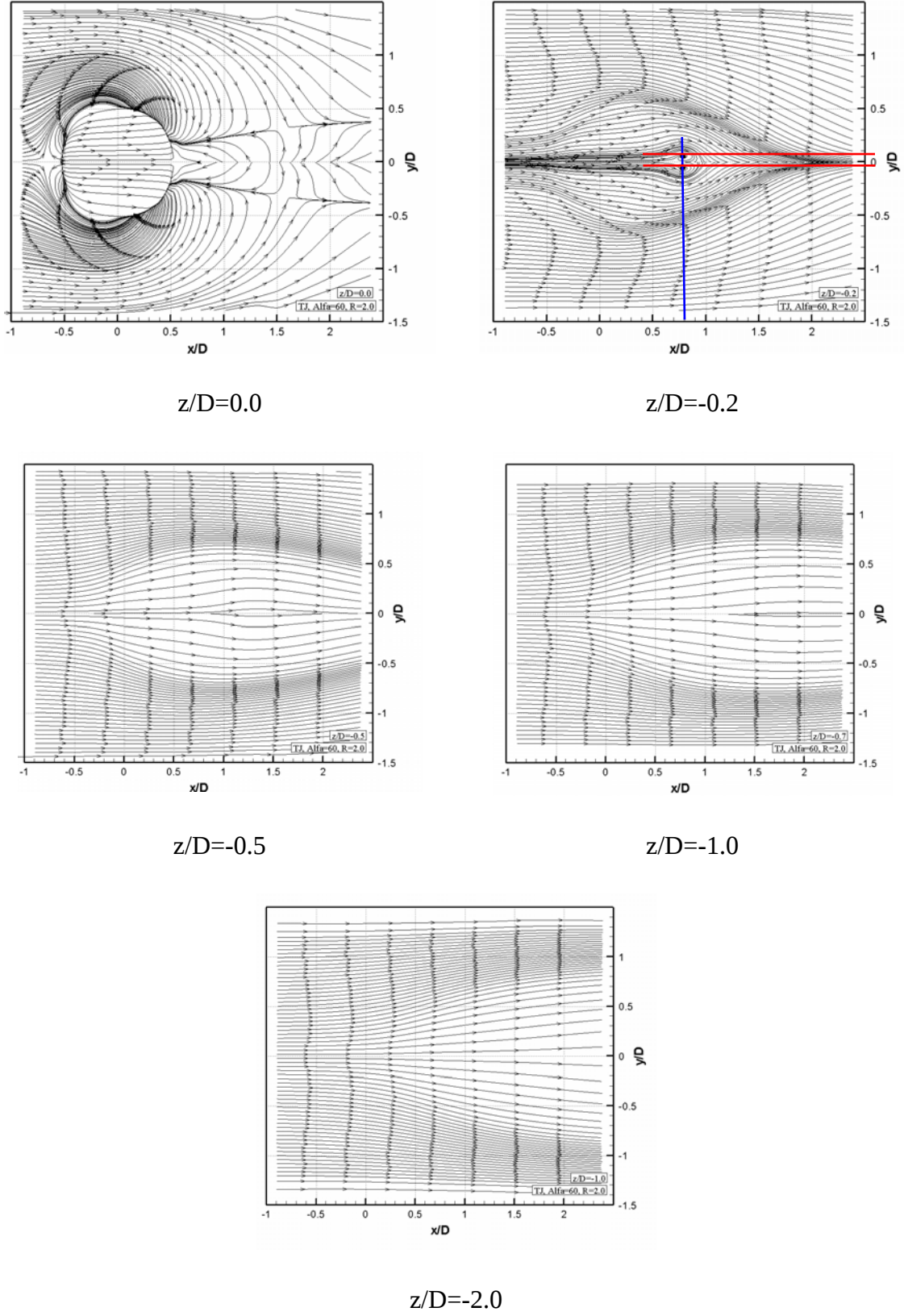
Üstten itibaren üçüncü istasyon olan $z/D=-0.5$ 'de (Şekil 2.39) sadece $\alpha=90^\circ$ 'de bir girdap saptanırken diğer istasyonların hiçbirinde herhangi bir girdap varlığı görülmemekte ve akış daha düzgün olarak yoluna devam etmektedir. Ancak sadece 75° 'de akışta bir ayrılma görülmekte ancak bu herhangi bir girdaba sebep olmamaktadır. Şekil 2.40'da $z/D=-0.7$ 'deki akım hatlarının farklı eğim açılarında $R=2.0$ için aldığı şekil gösterilmektedir. Burada lüleden püskürtülerek sağlanan jet akışı kanal içerisine iyice nüfuz ettiğinden, sadece normal jet akışı ($\alpha=90^\circ$) durumunda çapraz akışta bir ayrılma görülmektedir. $z/D=-1.0$ 'de ise bu durum daha az belirgin olacak şekilde devam etmektedir (Şekil 2.41). Kanal ortasına doğru daha da inildiğinde herhangi bir eğim açısında artık herhangi bir akış ayrılması görülmeyeceği bu şekillerden anlaşılmaktadır. Bu durum lüleden çıkan akışkan ile kanaldan serbest olarak akmakta olan akışkan arasında herhangi bir etkileşim olmadığını göstermesi bakımından önemlidir.

 $z/D=0.0$  $z/D=-0.2$  $z/D=-0.5$  $z/D=-1.0$  $z/D=-2.0$

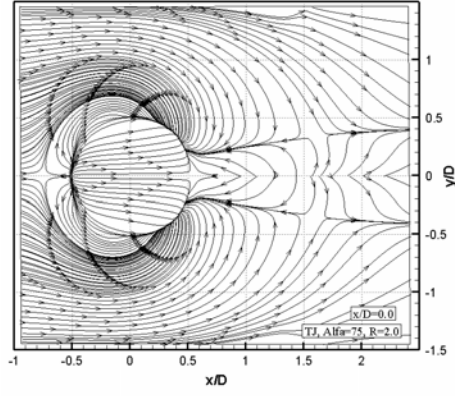
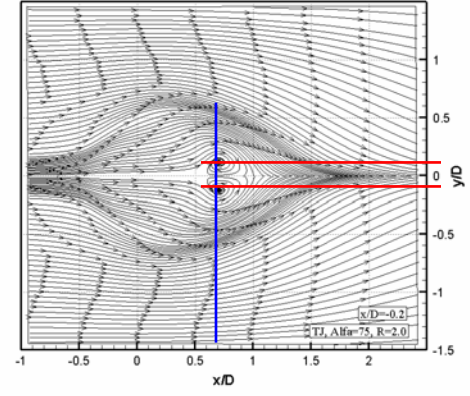
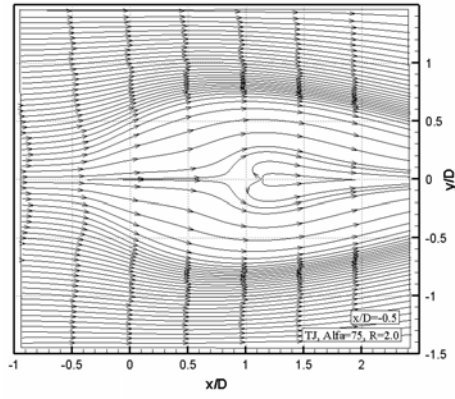
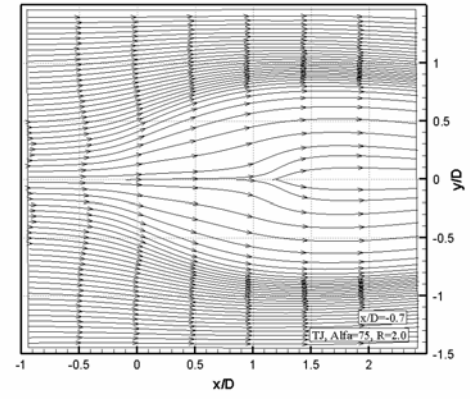
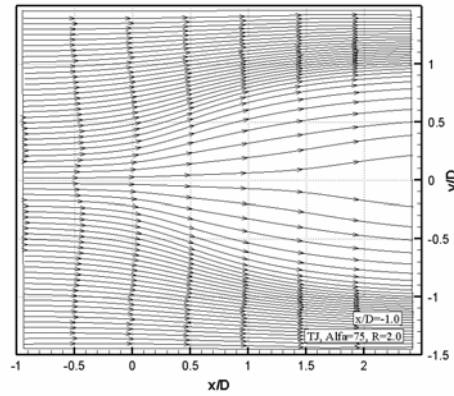
Şekil 2.32 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.

 $z/D=0.0$  $z/D=-0.2$  $z/D=-0.5$  $z/D=-1.0$  $z/D=-2.0$

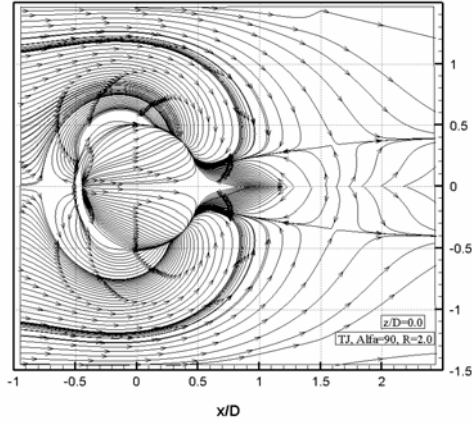
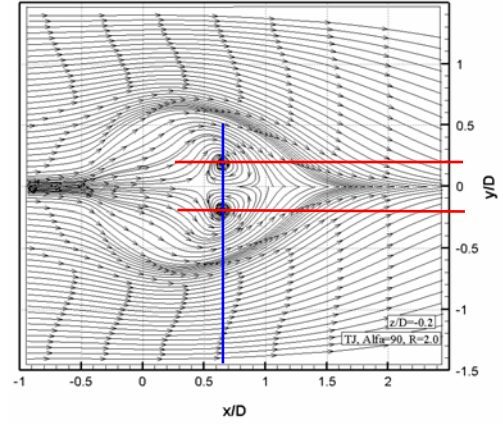
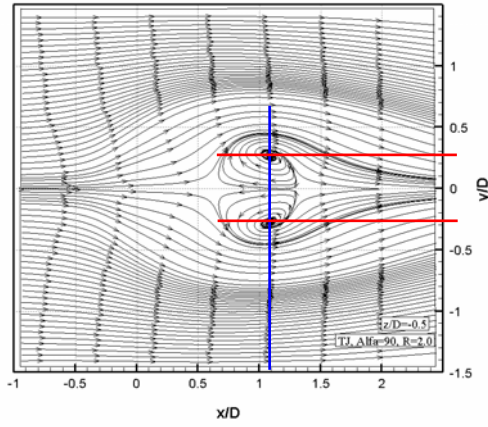
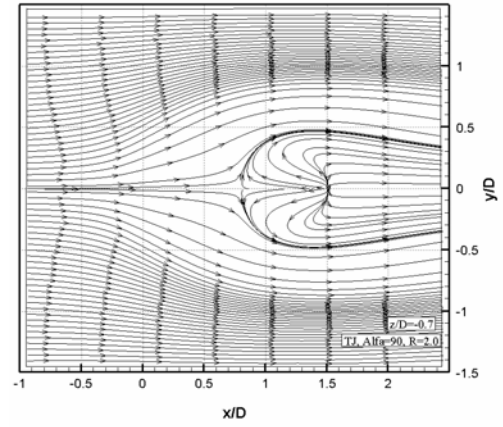
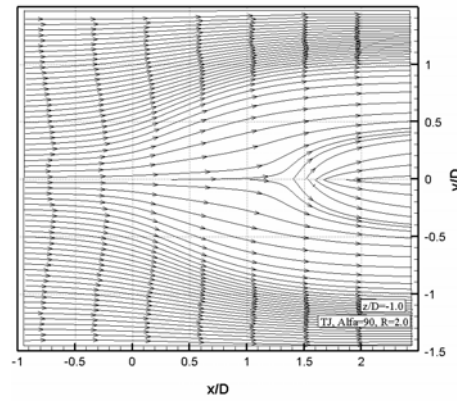
Şekil 2.33 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içersine doğru akım hatlarındaki değişim.



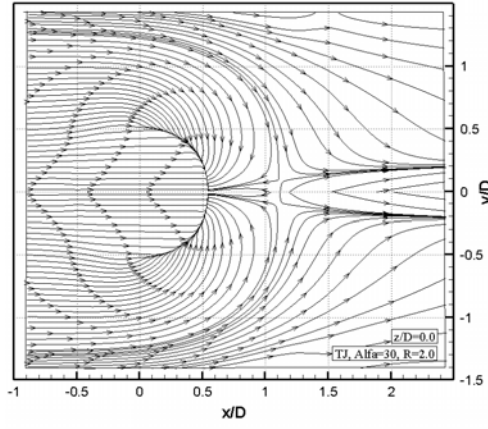
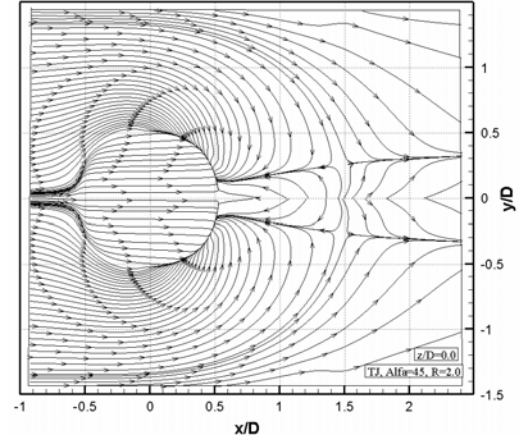
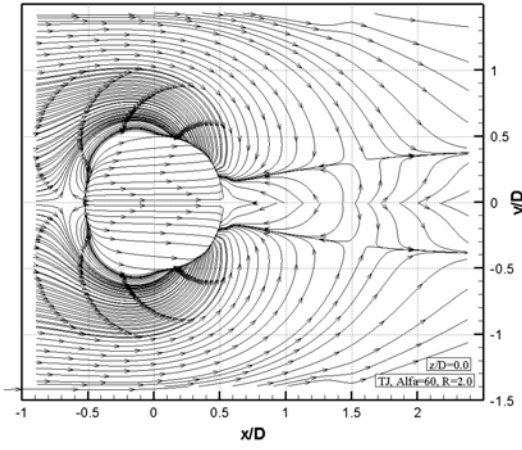
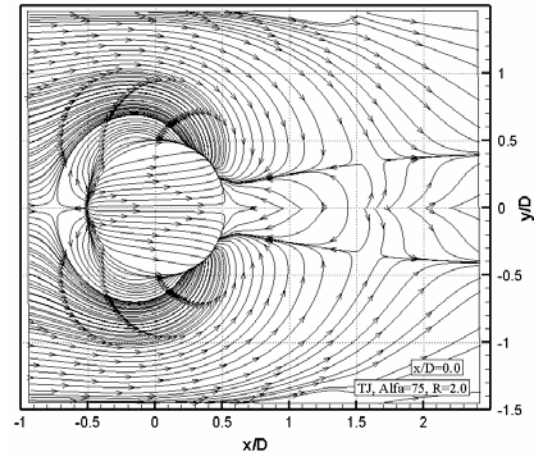
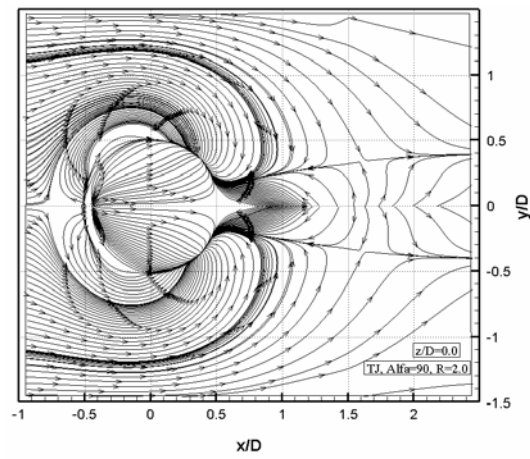
Şekil 2.34 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.

 $z/D=0.0$  $z/D=-0.2$  $z/D=-0.5$  $z/D=-1.0$  $z/D=-2.0$

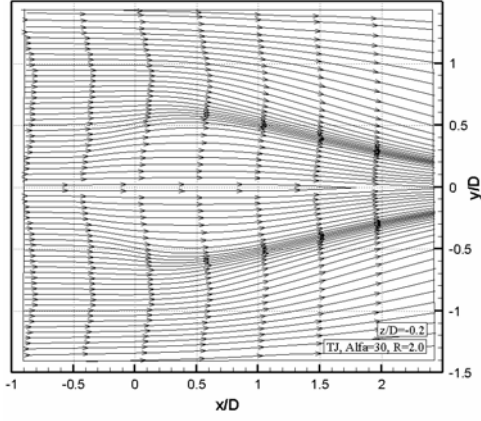
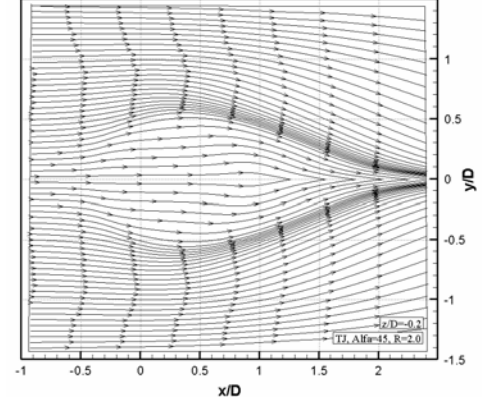
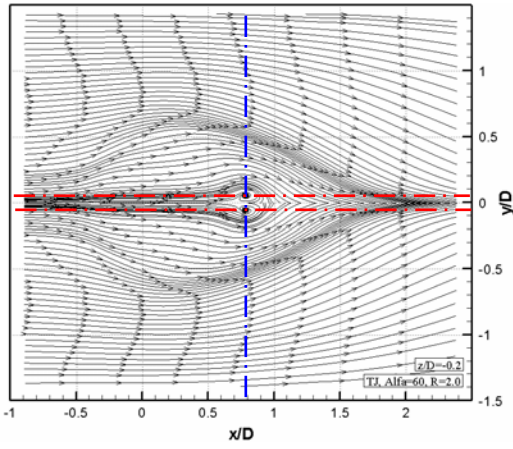
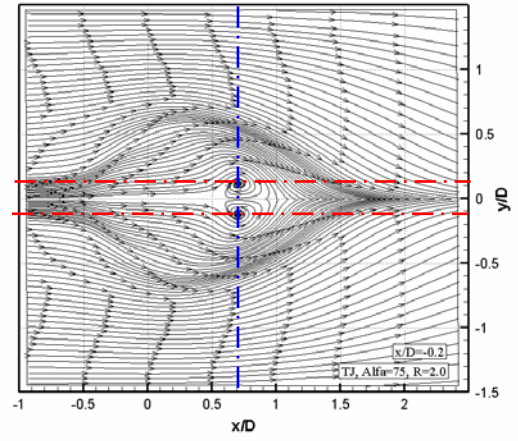
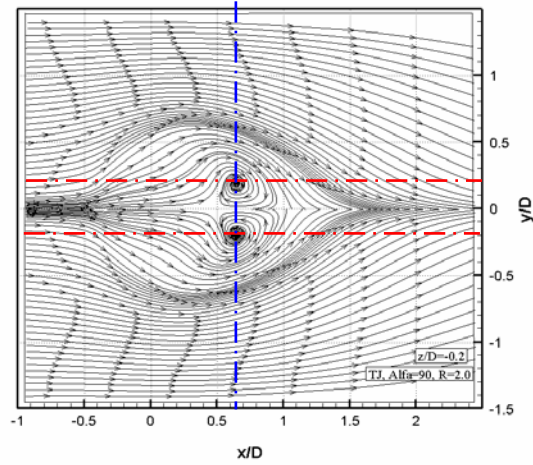
Şekil 2.35 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.

 $z/D=0.0$  $z/D=-0.2$  $z/D=-0.5$  $z/D=-1.0$  $z/D=-2.0$

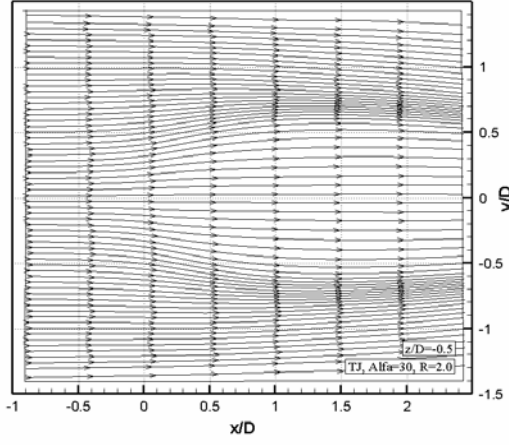
Şekil 2.36 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için lüle etrafındaki akım ayrılması ve kanal içerisine doğru akım hatlarındaki değişim.


 $\alpha=30^\circ$

 $\alpha=45^\circ$

 $\alpha=60^\circ$

 $\alpha=75^\circ$

 $\alpha=9^\circ$

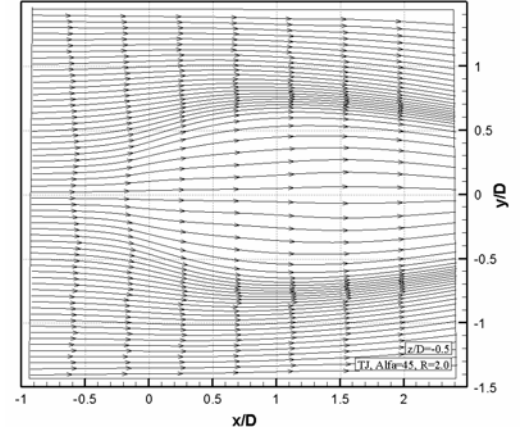
Şekil 2.37 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=0.0$ 'da akış ayrılması ve girdap oluşumları.


 $\alpha=30^\circ$

 $\alpha=45^\circ$

 $\alpha=60^\circ$

 $\alpha=75^\circ$

 $\alpha=90^\circ$

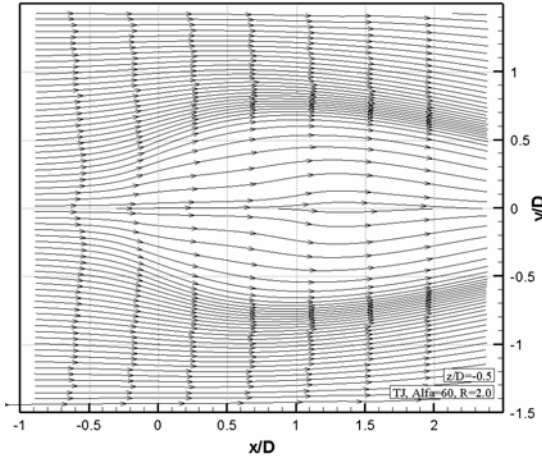
Şekil 2.38 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-0.2$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.



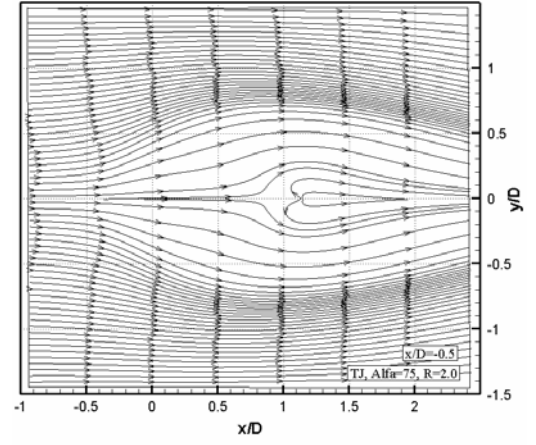
$\alpha=30^\circ$



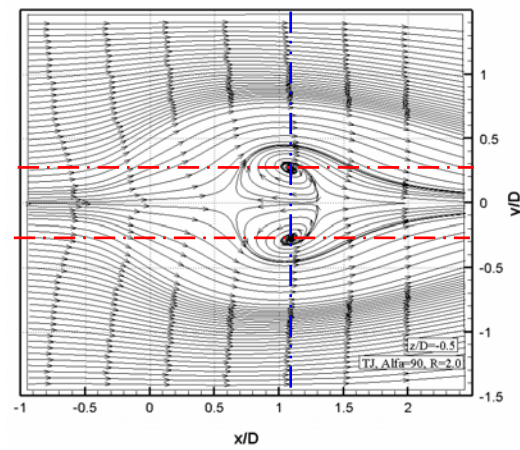
$\alpha=45^\circ$



$\alpha=60^\circ$

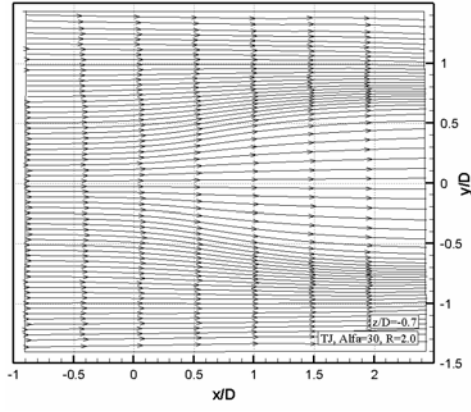


$\alpha=75^\circ$

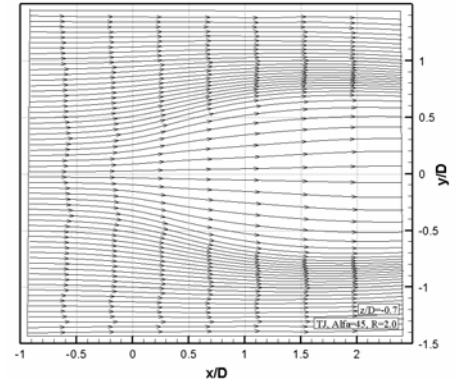


$\alpha=90^\circ$

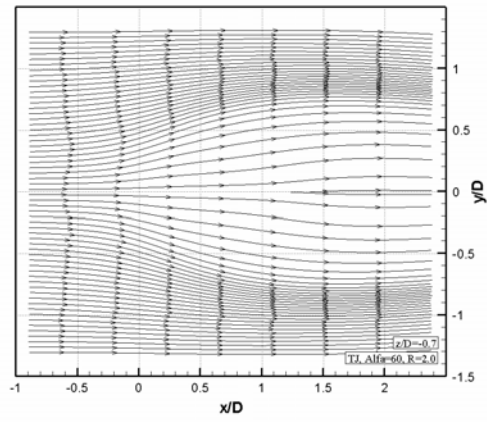
Şekil 2.39 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-0.5$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.



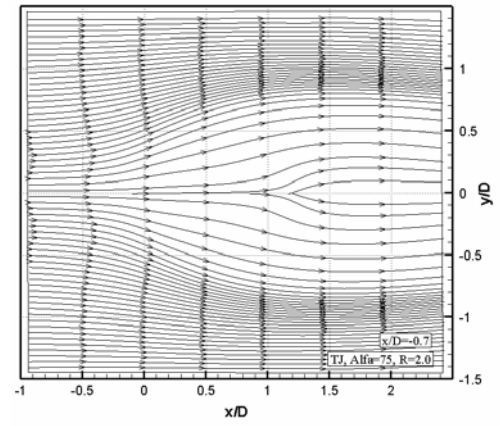
$\alpha=30^\circ$



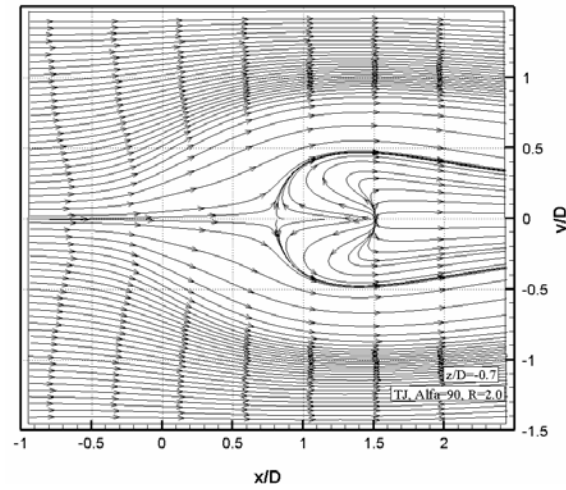
$\alpha=45^\circ$



$\alpha=60^\circ$

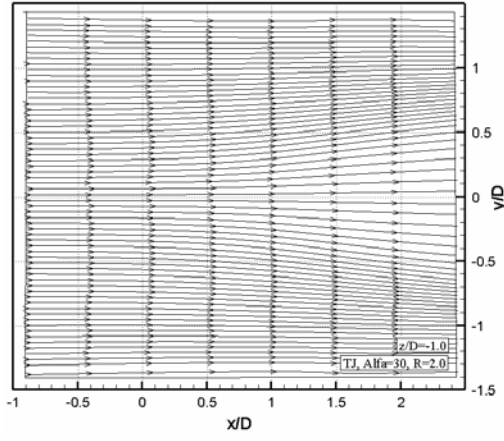


$\alpha=75^\circ$

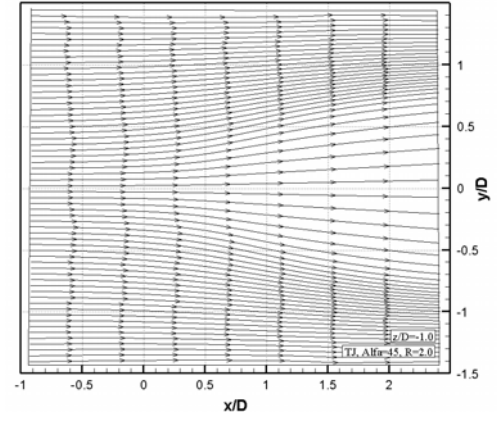


$\alpha=90^\circ$

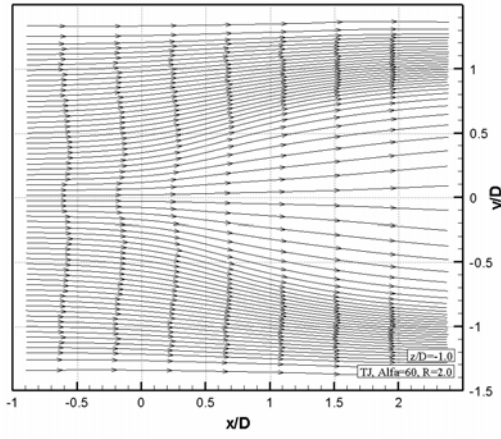
Şekil 2.40 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-0.7$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.



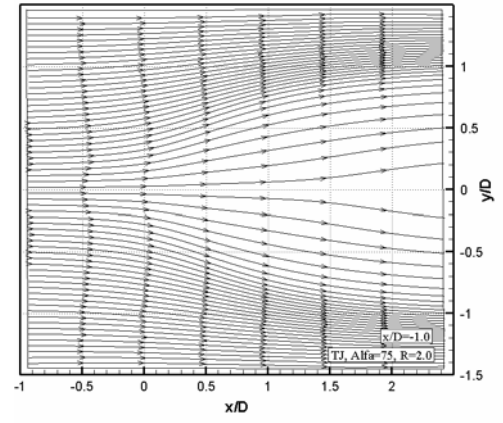
$\alpha=30^\circ$



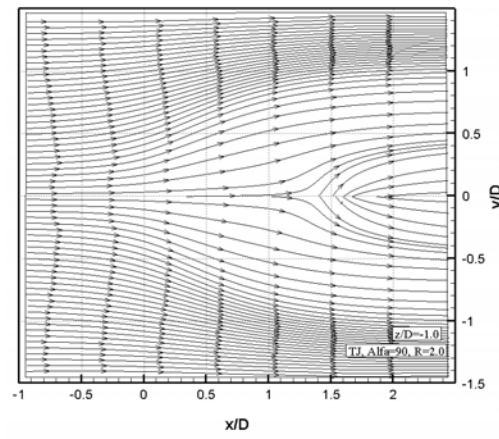
$\alpha=45^\circ$



$\alpha=60^\circ$



$\alpha=75^\circ$



$\alpha=90^\circ$

Şekil 2.41 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=-1.0$ 'de akış ayrılması ve girdap oluşumları.

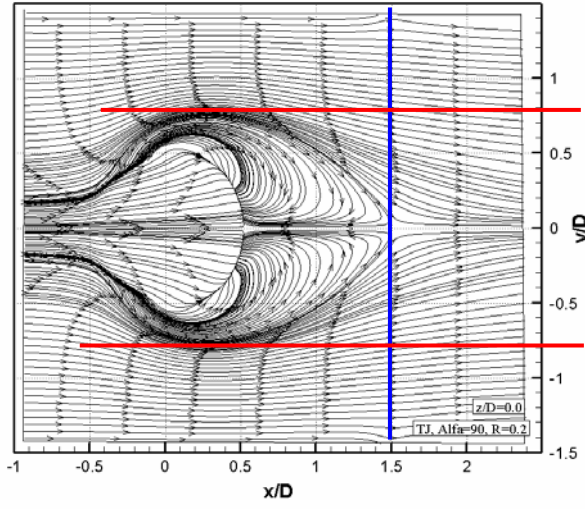
Çapraz akış önündeki silindirik bir engelin varlığında olduğu gibi, lüleden bir kanala püskürtülen jet, kanal üst çeperi üzerinde ve lüleden sonra bir ters basınç gradyeni oluşmasına neden olur. Oluşan ters basınç gradyeni sebebi ile lüleye yaklaşan sınır tabaka ayrılmaya başlar ve aynen at nalına benzeyen bir akım ayrılmasına neden olur. Bu durum ise bir yüzey üzerine monte edilmiş bir katı cismin varlığı durumunda görülen akış ayrılmasına benzer. Lüle ile karşılaşan sınır tabaka, jet akışının gerçekleştiği lülenin sağından ve solundan geçecek şekilde ayrılarak yoluna devam eder. Ancak bu durumda görülen akım hatlarının aldığı şekil, eğim açısının yanında hızların oranı olan R 'ye de oldukça bağlılık arz eder.

Hız oranlarının girdap oluşumu ve bu girdap yapılarının değişimi üzerindeki etkileri $\alpha=90^\circ$ için farklı yüksekliğine kesitlerde Şekil 2.42'den Şekil 2.46'ya kadar olan resimlerde gösterilmiştir. İlk istasyon olan $z/D=0.0$ incelendiğinde (Şekil 2.42) en düşük hız oranı olan $R=0.2$ durumunda akım hatlarındaki değişim lüleden önce çok az iken, hız oranlarının arttırılmasıyla akış ayrılmasının daha geniş bir alanda meydana geldiği görülmektedir ($\pm y/D$ yönlerinde).

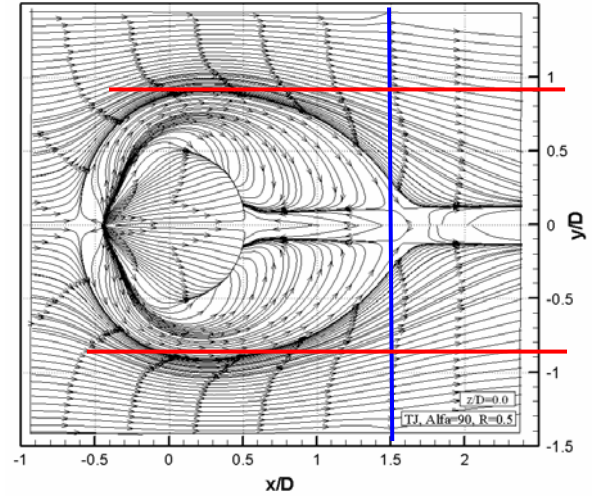
Hız oranı 2.0'ye doğru kademeli olarak arttırıldığında lüleden hemen sonra meydana gelen ayrılma bölgesinin ise lüle çıkışına doğru yaklaştığı saptanmıştır. $0.2D$ kadar kanal içerisine girildiğinde üç farklı hız oranında da akışta ayrılma ve girdap bölgesi olduğu Şekil 2.43'ten de izlenebilir. İkinci hız oranında ($R=0.5$) başlayan akım ayrılması ve girdap oluşumu sırasıyla $R=1.0$ ve $R=2.0$ 'de gözlenmektedir. Akıştaki ayrılma y/D eksenine göre birbirine zıt dönen girdapların oluşumuna neden olmakta ve oluşan bu girdap yapılarının merkezi $R=0.5$ 'te $y/D \pm 0.20$, $x/D=1.05$ 'te iken, $R=1.0$ 'de $y/D \pm 0.25$, $x/D=0.8$ 'e taşınmakta ve $R=2.0$ 'de $y/D \pm 0.20$, $x/D=0.60$ olmaktadır. Girdap yapısı en büyük ölçeğine $R=1.0$ 'de sahip olmakta ve $R=2.0$ 'de $R=0.5$ 'e göre daha da küçülmektedir.

$z/D=-0.5$ 'te hız oranlarının akımdaki ayrılma ve girdap merkezleri üzerindeki etkisi Şekil 2.44'te gösterilmiştir. Bir önceki istasyon olan $z/D=-0.2$ 'de görülen girdaplar bu istasyonda kaybolmuş ve sadece $R=2.0$ 'de meydana geldiği saptanmıştır. Buradaki girdabın merkez koordinatları ise $y/D=\pm 0.28$, $x/D=1.08$ 'dir. Şekil 2.45'te $z/D=-0.7$ no'lu istasyona ait akım hatları gösterilmiştir. İlk iki hız oranında akış gayet düzgün olup akım hatlarında herhangi bir değişim görülmemektedir. Sadece $R=1.0$ için $x/D=1.3$ 'te akışta ayrılma olmuş ve hız oranı $R=2.0$ 'ye yükseltildiğinde bir önceki istasyonda da görülen akış ayrılması ve girdap yapısı göze çarpmaktadır. $z/D=-1.0$ 'de alınan kesit resmi Şekil 2.46'da verilmiştir. Bir önceki istasyonda $R=2.0$ için görülen girdap burada kaybolmuştur. Burada sadece akış ayrılmasından

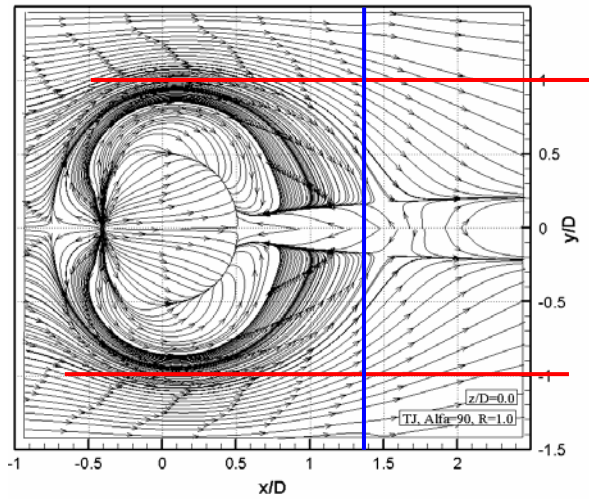
bahsedilebilmektedir.



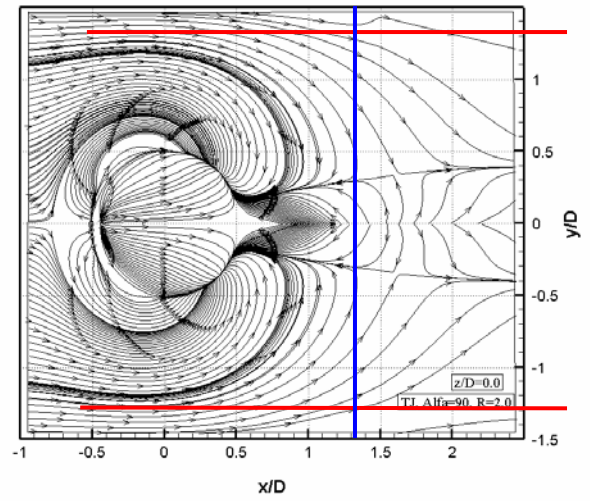
R=0.2



R=0.5

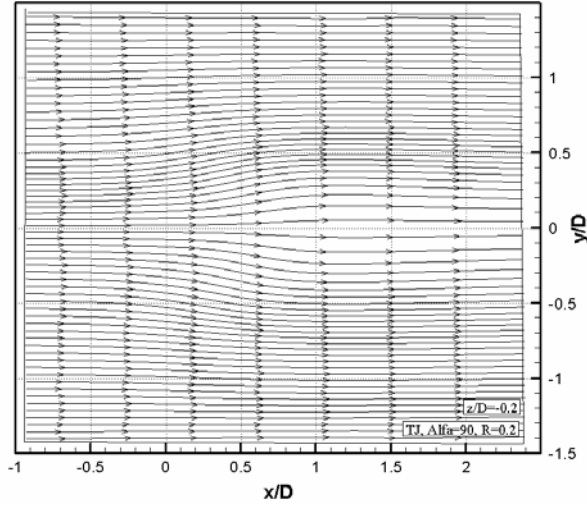


R=1.0

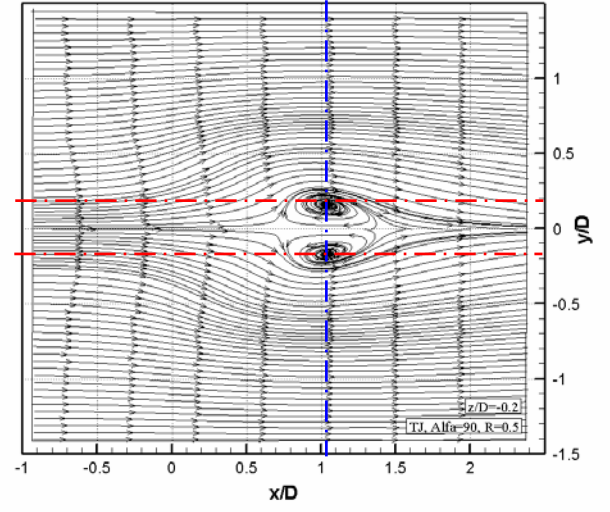


R=2.0

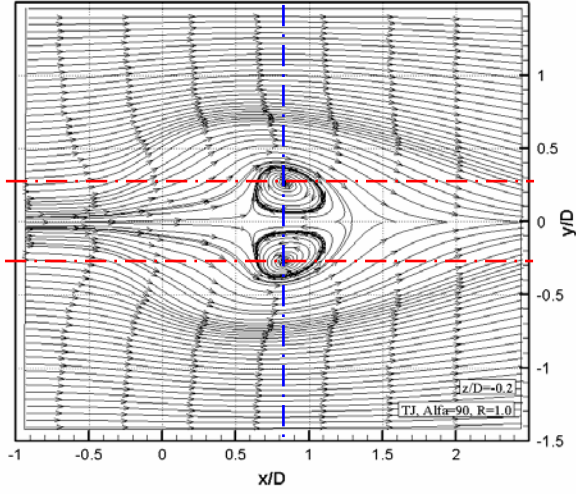
Şekil 2.42 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=0.0$ ' da hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$.



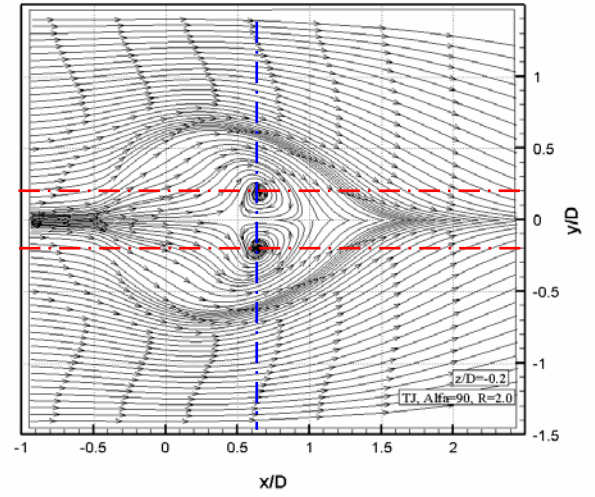
R=0.2



R=0.5

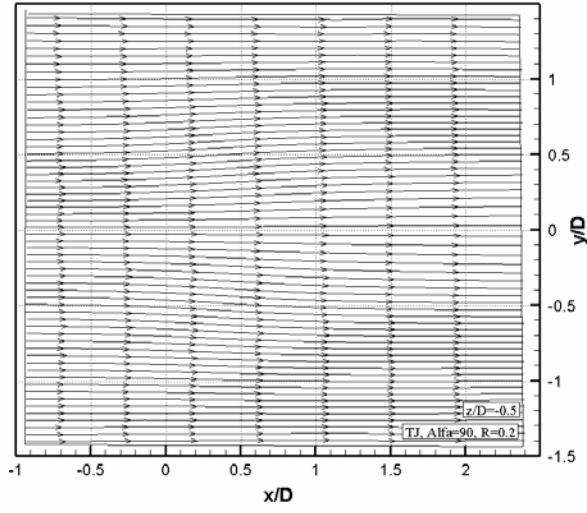


R=1.0

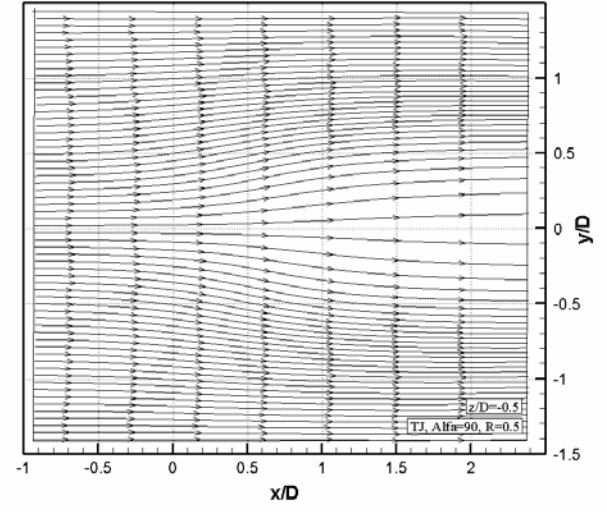


R=2.0

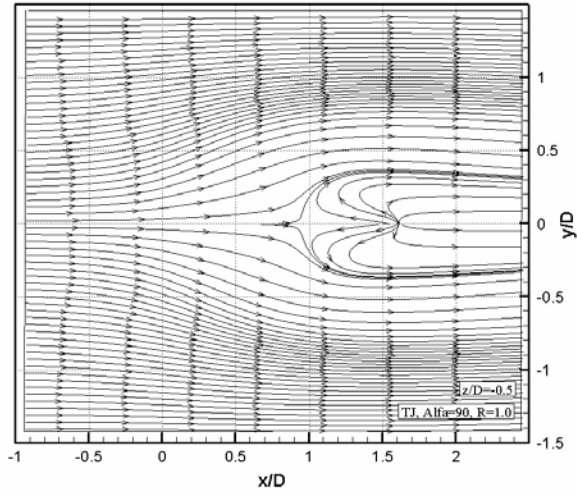
Şekil 2.43 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=-0.2$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$.



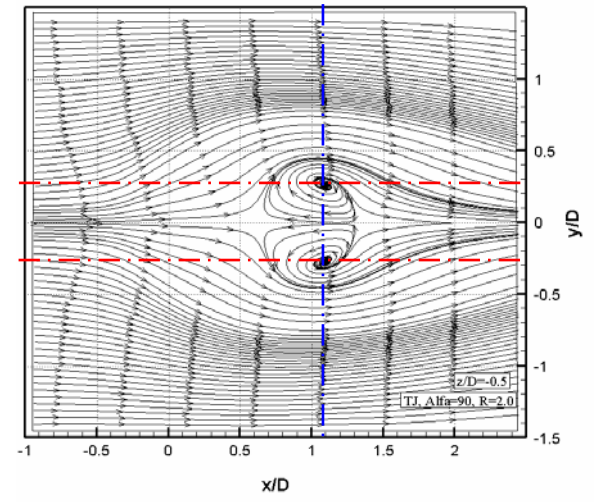
R=0.2



R=0.5

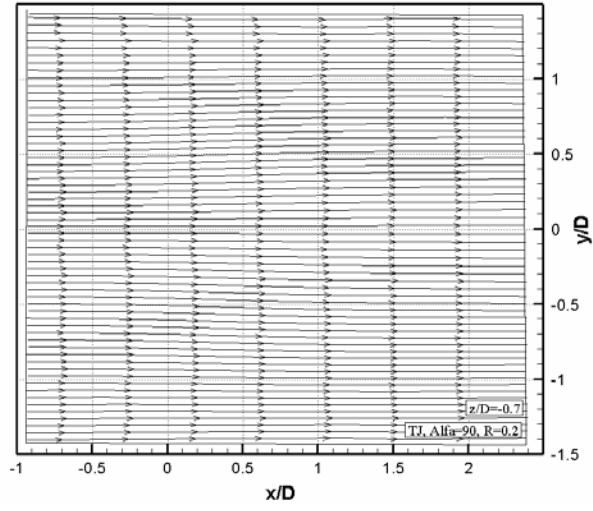


R=1.0

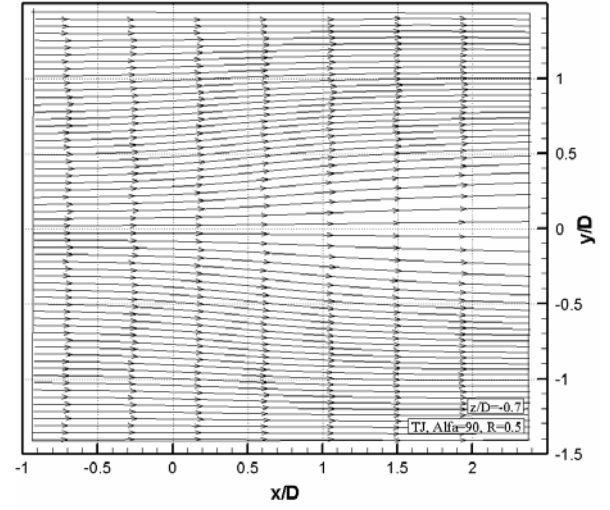


R=2.0

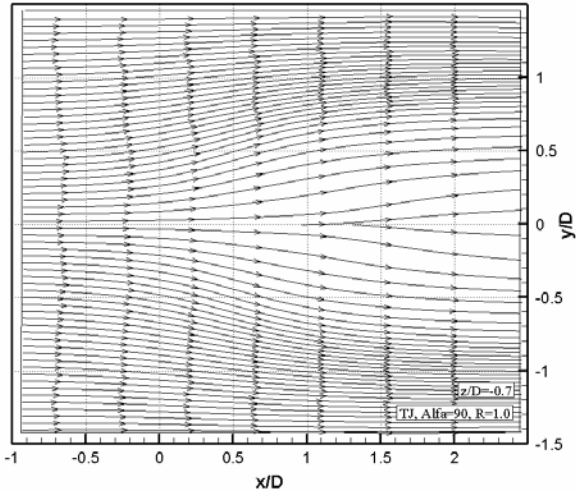
Şekil 2.44 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=-0.5$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$.



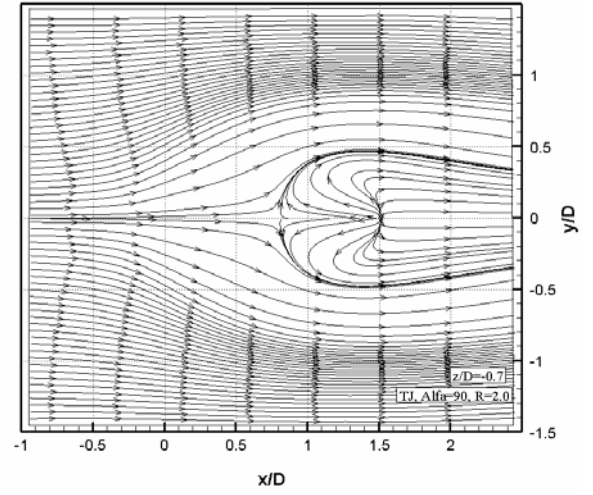
R=0.2



R=0.5

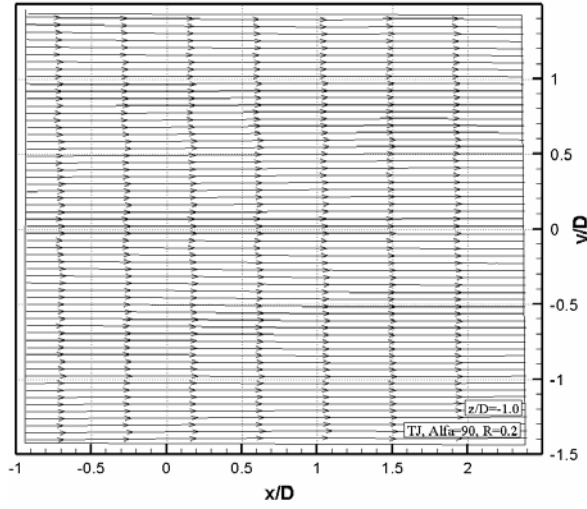


R=1.0

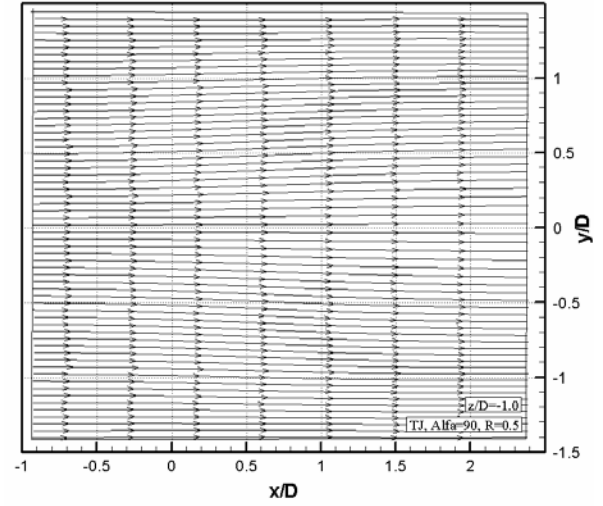


R=2.0

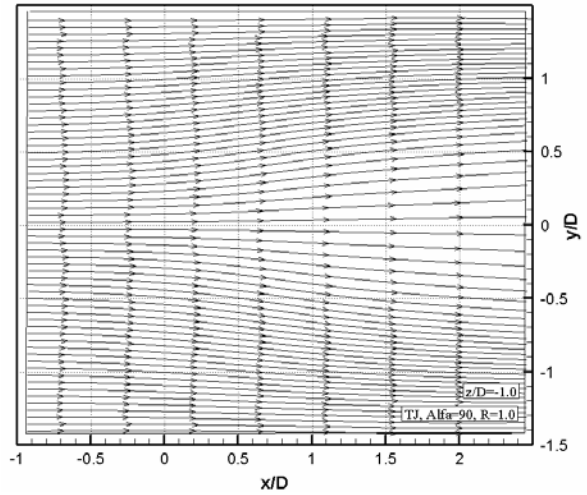
Şekil 2.45 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D = -0.7$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha = 90^\circ$.



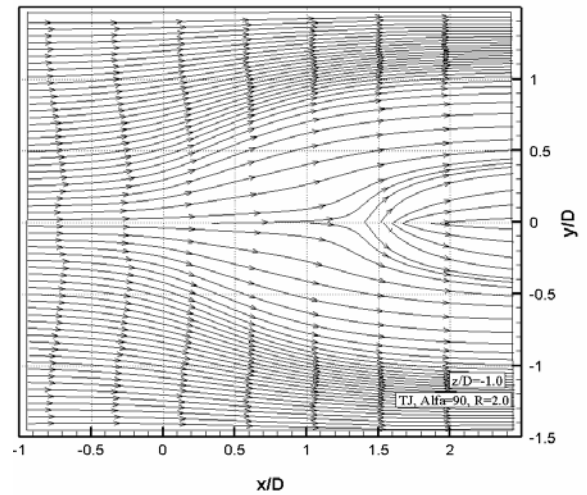
R=0.2



R=0.5



R=1.0



R=2.0

Şekil 2.46 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $z/D=-1.0$ 'de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$.

Tüm eğim açıları ve hız oranları göz önüne alındığında en belirgin girdap yapısı $\alpha=90^\circ$ ve $R=2.0$ için görülmüştür. Jet momentumunun kanal momentumundan büyük olması sebebiyle bu hız oranıyla kanala dik olarak püskürtülen jet akışı kanal üst çeperinde oluşan sınır tabakayı delerek kanal içerisine daha fazla nüfuz etmiş ve daha geniş bir alana yayılarak çapraz akış yönünde akmıştır.

2.8 Dairesel Kesitli Üç Lüle Kullanılması Durumunda Görülen Girdap Yapıları

Yan yana yerleşik üç tane dairese kesitli lüleden (çoklu lüle) dikdörtgen kesitli bir kanala $R=2.0$ hız oranında akış olması durumunda görülen akım alanı Şekil 2.47'den Şekil 2.51'e kadar olan şekillerde görülmektedir. Bu şekiller lüle ile kanal arasındaki eğim açısının $\alpha=30^\circ$, 45° , 60° , 75° ve 90° olması durumunda akım alanındaki değişimleri lüle girişinden kanal çıkışına doğru farklı istasyonlarda ($x/D=0.0$, 1.0 , 2.0 , 3.0 , 4.0 ve 6.0) göstermektedir. Şekillerden de net olarak takip edilebileceği üzere, çoklu lülelerden kanala akış olması durumunda oluşan akış yapısı tek bir lüleden akış olmasına nazaran oldukça farklılık göstermektedir. Bu farklılık bütün eğim açılarında ve tüm istasyonlarda kendini belli etmektedir.

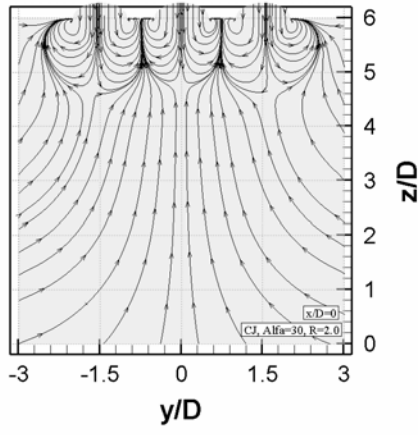
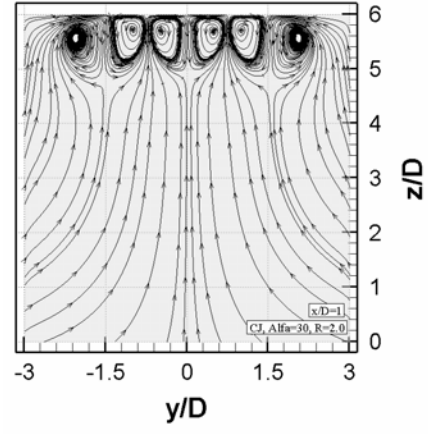
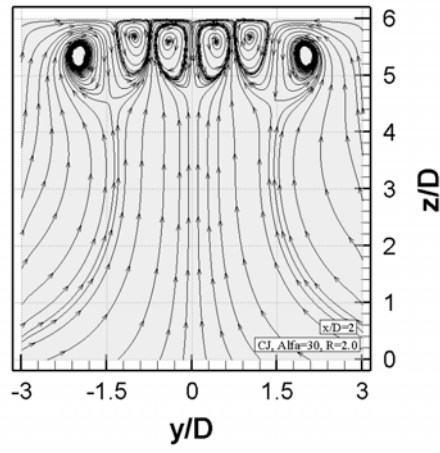
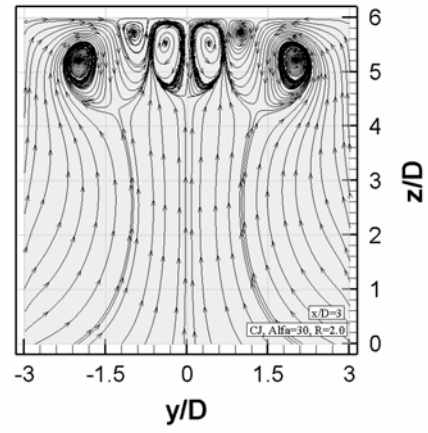
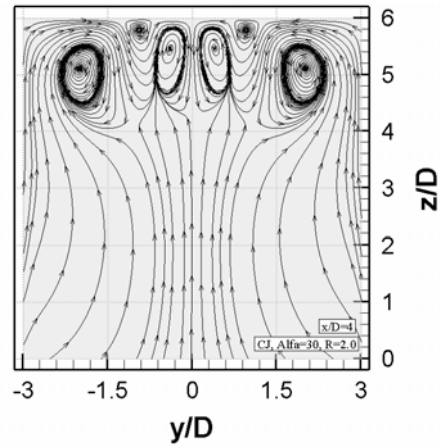
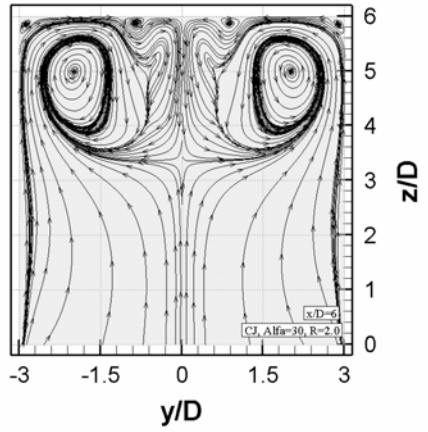
Çapraz akıştaki jet akışlarında görülen girdap yapılarını inceleyen daha önceki çalışmalar daha çok dairese, kare, dikdörtgen ve/veya parabolik kesitli tek bir lüle kullanılması halinde görülen girdap yapılarını göstermişlerdir. Yan yana birden fazla lüle kullanılması durumunda görülen girdap yapılarına literatürde daha önce hiç rastlanılmamış olması bu başlık altında gösterilen şekilleri daha da önemli hale getirmektedir.

Şekil 2.47-Şekil 2.51 arasındaki şekiller incelendiğinde dairese kesitli lülelerden püskürtülen akışkanın kanala girdiği ilk istasyon olan $x/D=0.0$ 'da yan yana üç ayrı ZDGÇ'nin varlığı bütün eğim açıları için göze çarpmakta ve ikinci istasyon olan $x/D=1.0$ 'den itibaren eğim açılarına göre farklılıklar görülmektedir. Şekil 2.47'de $x/D=1.0$ 'de yan yana üç lüleden kanala püskürtülen jetin sebep olduğu üç tane yan yana ZDGÇ mevcut iken $x/D=6.0$ 'da bu girdaplar birleşerek iki tane ana ZDGÇ meydana getirmişlerdir. Bu işlemin oluşu ise ara istasyonlarda net olarak görülmekte olup, girdabın yanal çeperlere yakın olan kısmı giderek büyümekte, kanal merkezi tarafında kalan diğer yarının küçülmesine sebep olmakta ve ilerleyen istasyonlarda girdabın bu yarısını kanal üst çeperine doğru iterek kendisi ile yanal çeperler arasında ikincil bir ZDGÇ oluşumuna yol açmaktadır. Kanal yanal kenarlarına daha yakın olan girdabın dıştaki yarısı büyürken ortadaki lüleden çıkan akışkana ait ZDGÇ'de $x/D=3.0$ kadar artmakta ancak daha sonra $\pm y/D$ yönlerinde daralarak ve girdabın en dıştaki yarısıyla birleşmek suretiyle yok olmaktadır.

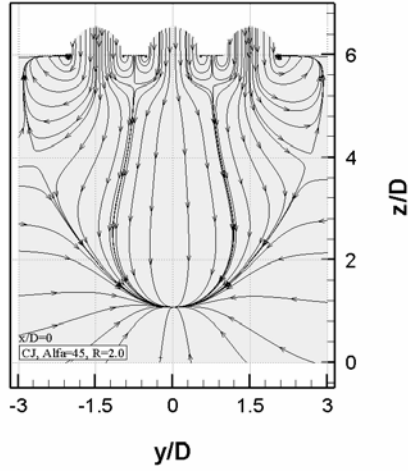
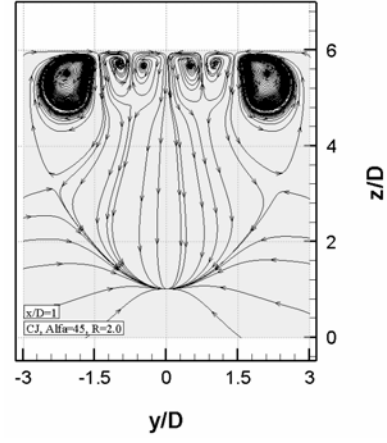
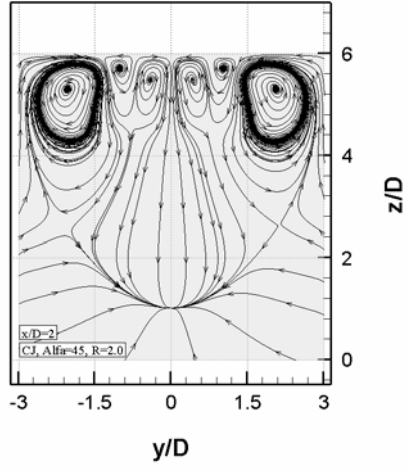
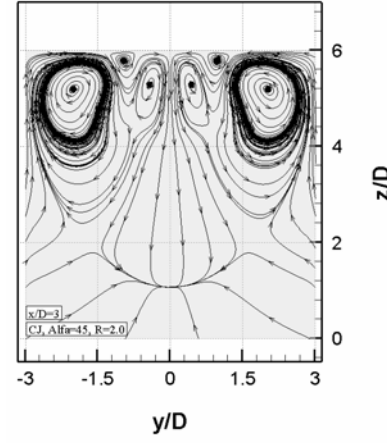
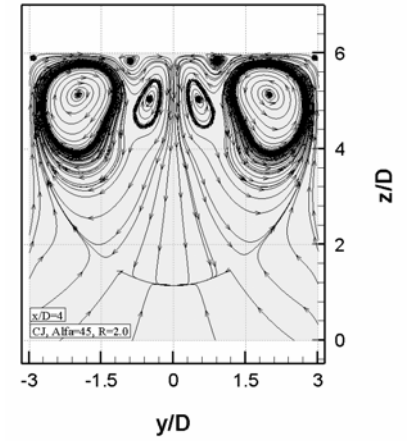
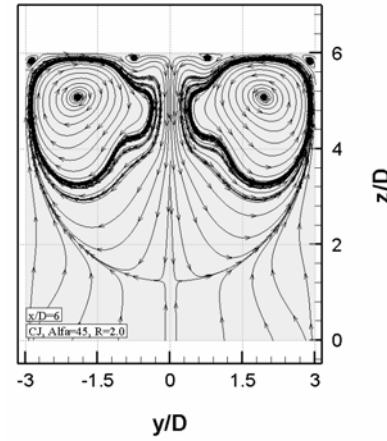
Şekil 2.48'te eğim açısının 45° olması durumunda oluşan ZDGÇ gelişimi $R=2.0$ için gösterilmiştir. Bir önceki eğim açısına göre $\alpha=45^\circ$ 'lik eğim açısında yapılan çoklu püskürtmede dikkati çeken en önemli husus, daha ilk istasyon olan $x/D=0.0$ 'da bile dairese kesitli yan yana üç lüleden kanala giren akışkanların oluşturdukları girdap yapısının daha

farklı geliştiği olmuştur. Girdabın yanal çeperlere yakın olan kısmı, $\alpha=30^\circ$ 'de görüldüğünden daha büyük bir alanda hareket etmiş ve ortadaki girdap yapıları daha önce küçülmeye başlamıştır. $\alpha=30^\circ$ 'de $x/D=0.0$ ve 1.0 'de yan yana olan girdap yapıları birbirleriyle hemen hemen aynı ölçekte iken, eğim açısının 45° 'ye yükseltilmesi bu simetrimin daha ilk istasyonda bozulmasına sebep olmuştur. Ayrıca $\alpha=30^\circ$ 'de $x/D=2.0$ 'den itibaren küçülmeye başlayan ortadaki lüleeye ait ZDGÇ bu eğim açısında z/D yönüne doğru olmak üzere daha aşağıya doğru kaymaya başlamış ve ölçek olarak küçülmektedir. Eğim açısının 60° olması bu taşınmanın daha da fazla olmasına yol açarak, ana ZDGÇ'nin daha geniş ölçekte hareket etmesine yol açmıştır (Şekil 2.49). Şekil 2.47 ve Şekil 2.48'de ilk iki eğim açısına ait akım hatlarından ana ZDGÇ'nin yanında yanal çeperlere yakın oluşan ikincil ZDGÇ ve ana ZDGÇ ile kanal üst çeperi arasındaki yakın-çeper ZDGÇ mevcut iken $\alpha=60^\circ$ 'de $x/D=6.0$ no'lu istasyonda, $\alpha=75^\circ$ 'de $x/D=4.0$ (Şekil 2.50) ve $\alpha=90^\circ$ 'de ise $x/D=3.0$ 'te (Şekil 2.51) artık yakın-çeper ZDGÇ'nin olmadığı gözlenmiştir.

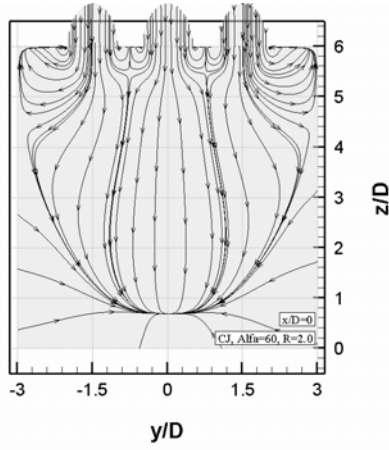
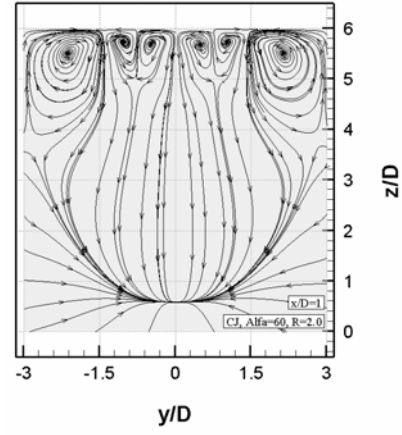
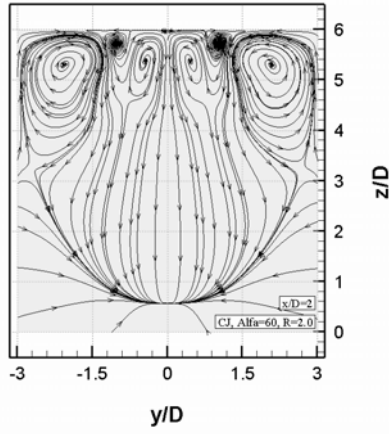
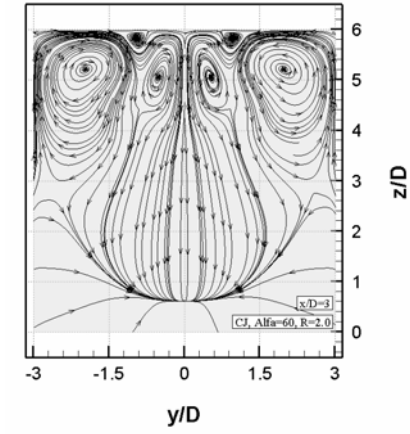
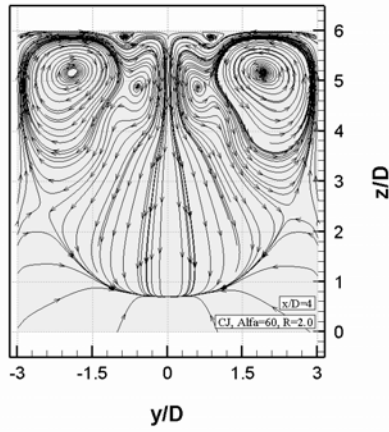
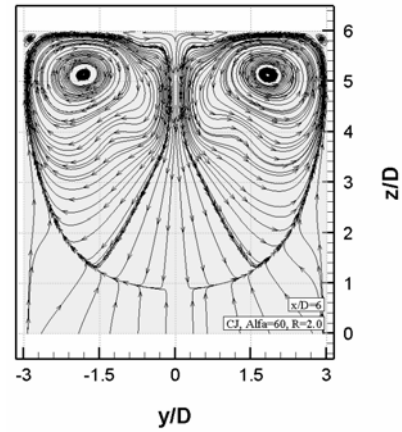
Tüm bu farklı hız oranları ve enine kesitler göz önüne alındığında akım hatlarındaki değişim şu şekilde özetlenebilir: Özellikle $x/D=2.0$ 'den sonra ortadaki lüleden püskürtülen akış birbirine eş iki ZDGÇ oluşturmakta iken yanlardaki lülelerden çıkan jetlere ait girdapların kanal çeperine yakın olan kısımları iç tarafa nazaran daha büyük olmakta ve ilerleyen istasyonlarda bu büyümenin içteki girdabı da bünyesine katarak büyüdüğü ve tüm kanal için tek bir ZDGÇ meydana getirdiği gözlenmektedir. Bu tekli ZDGÇ oluşurken özellikle $\alpha=45^\circ$ 'ye kadar bu girdap yapısı ile kanal üst çeperi arasında yanlarda ve kanal merkezine yakın bölgede birer tane olmak üzere ikincil girdap oluşumları dikkat çekmektedir. Ancak $\alpha=60^\circ$ 'den sonra merkezdeki küçük girdaplar yok olurken kenarlardaki küçük girdap bölgeleri varlıklarına devam etmektedirler.

 $x/D=0.0$  $x/D=1.0$  $x/D=2.0$  $x/D=3.0$  $x/D=4.0$  $x/D=6.0$

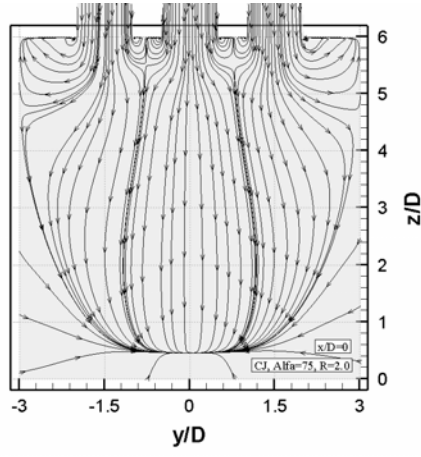
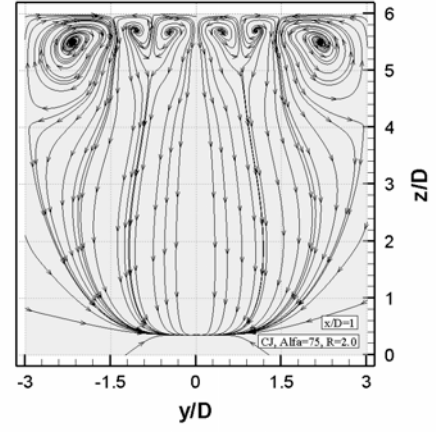
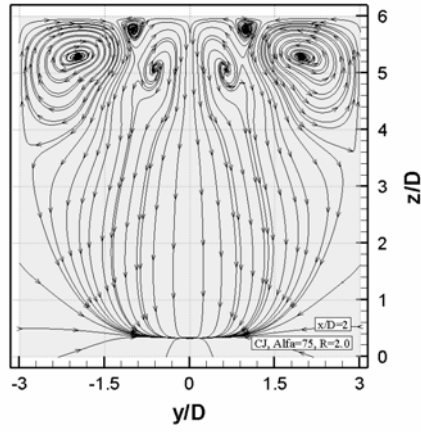
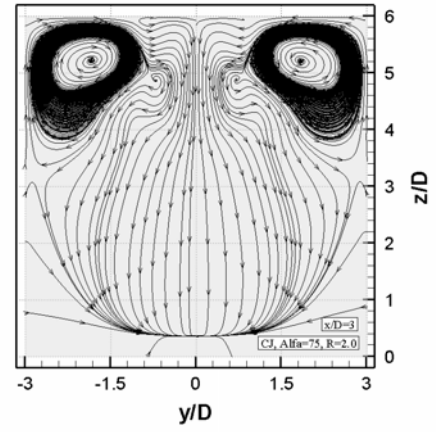
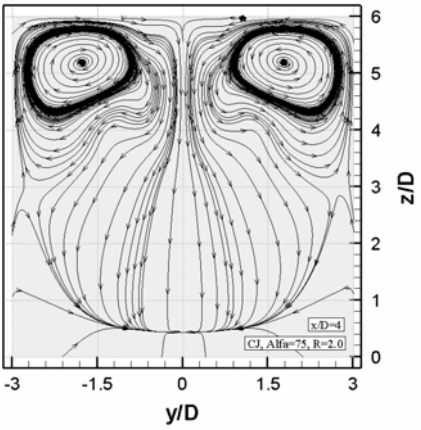
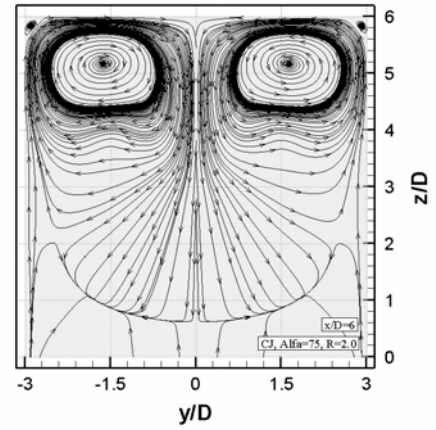
Şekil 2.47 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.

 $x/D=0.0$  $x/D=1.0$  $x/D=2.0$  $x/D=3.0$  $x/D=4.0$  $x/D=6.0$

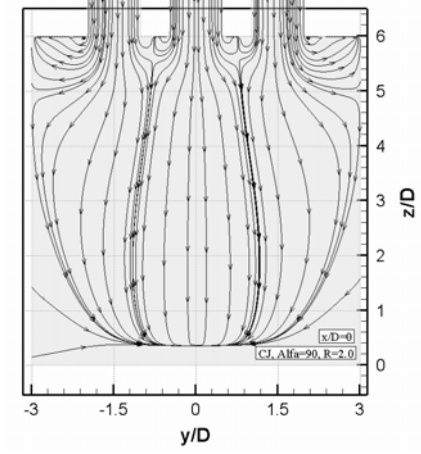
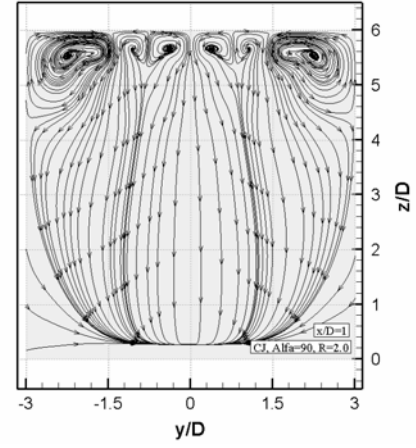
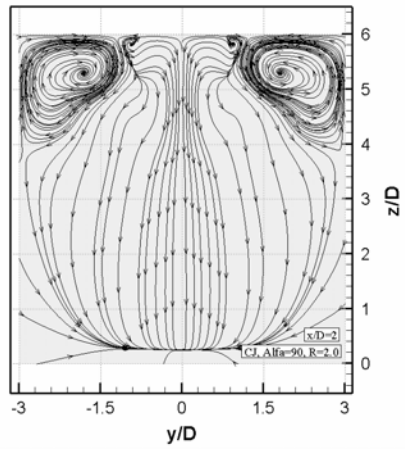
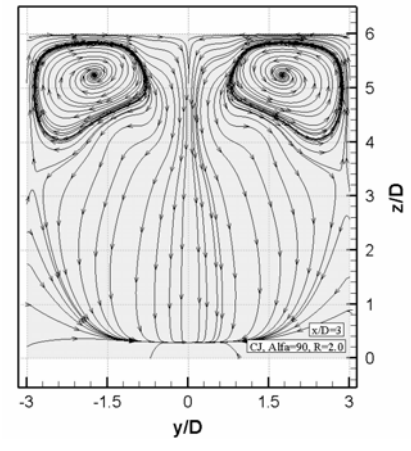
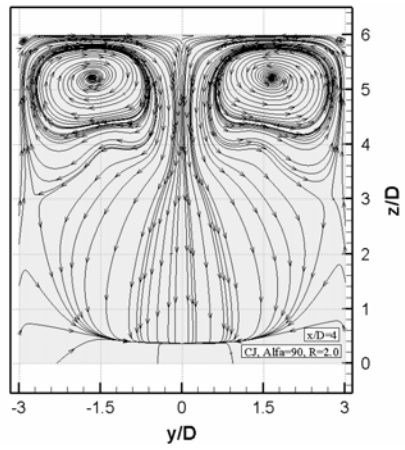
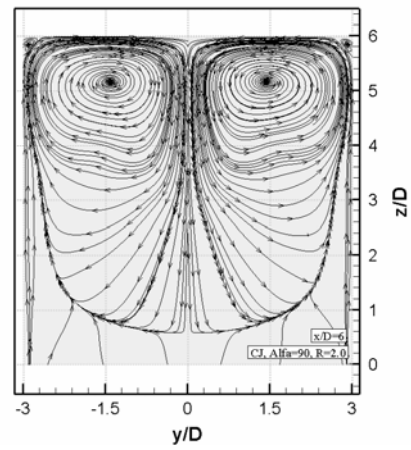
Şekil 2.48 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.

 $x/D=0.0$  $x/D=1.0$  $x/D=2.0$  $x/D=3.0$  $x/D=4.0$  $x/D=6.0$

Şekil 2.49 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için ZDGÇ'nin gelişimi.

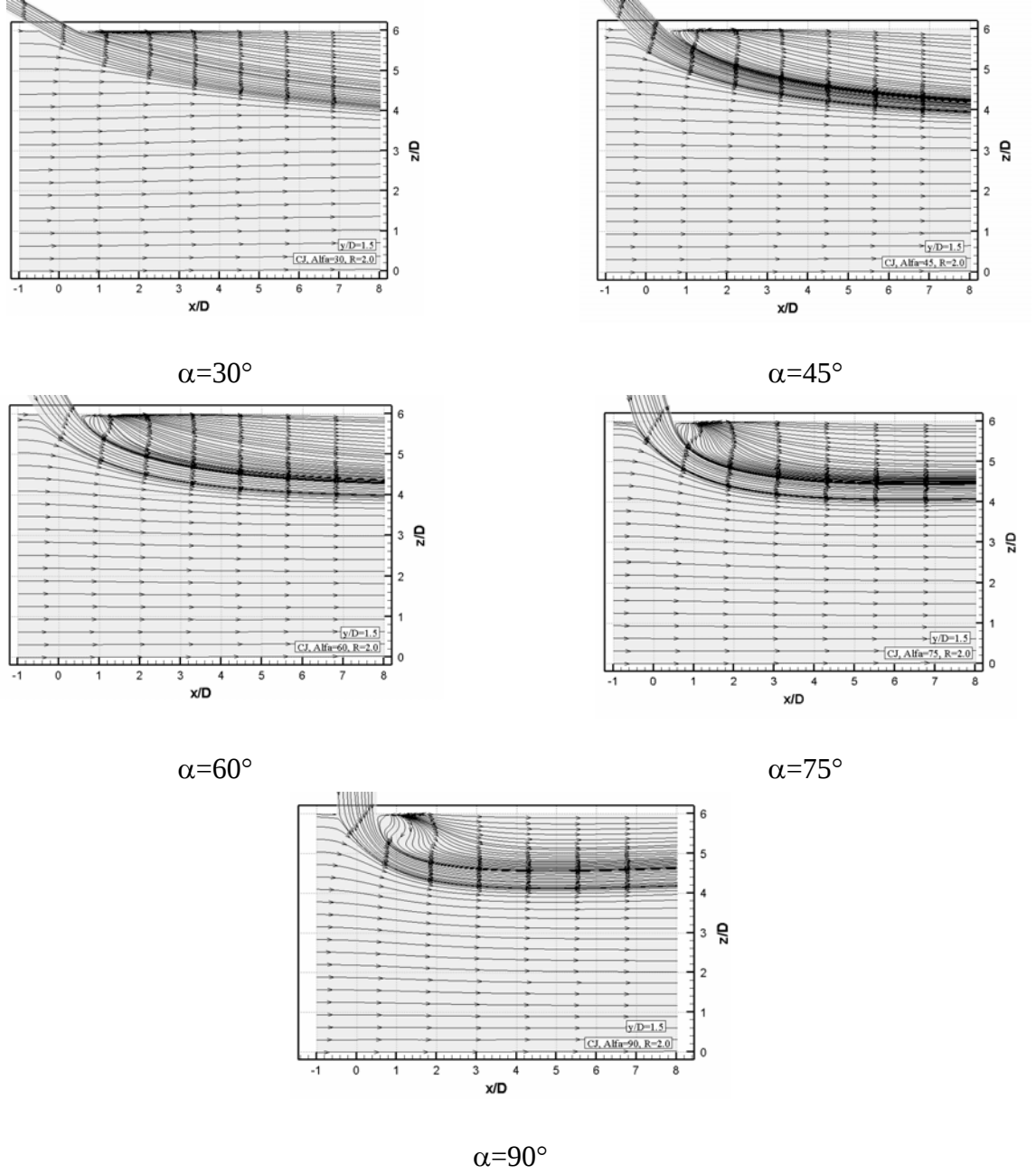
 $x/D=0.0$  $x/D=1.0$  $x/D=2.0$  $x/D=3.0$  $x/D=4.0$  $x/D=6.0$

Şekil 2.50 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için ZDGC'nin gelişimi.

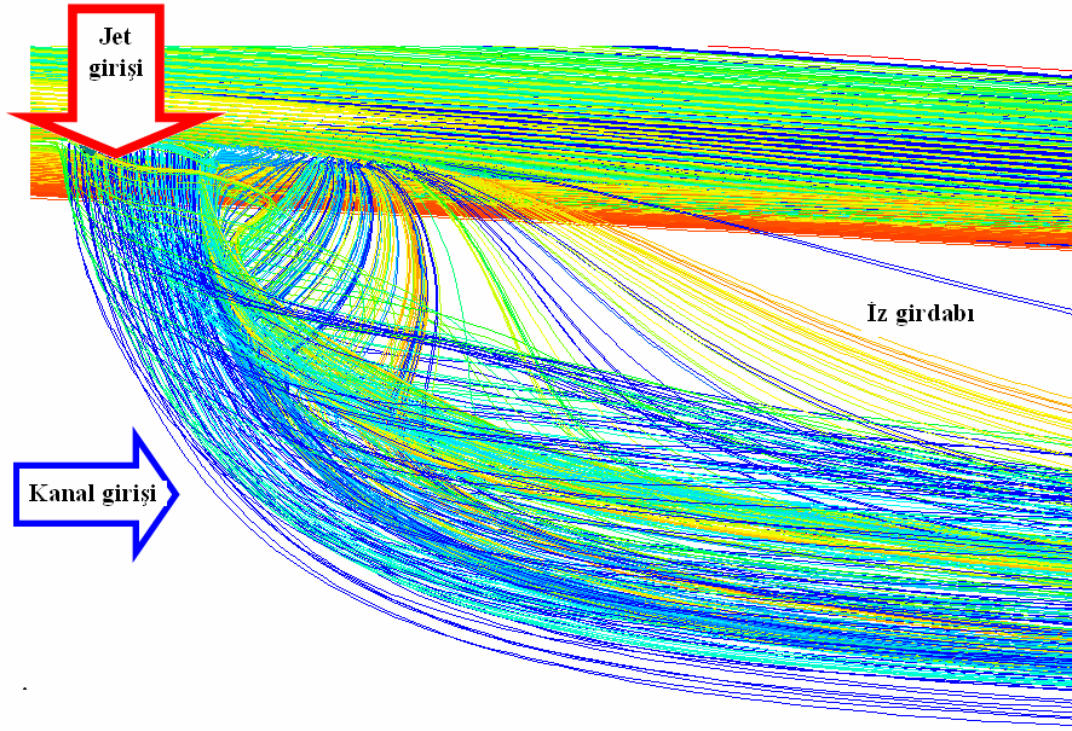
 $x/D=0.0$  $x/D=1.0$  $x/D=2.0$  $x/D=3.0$  $x/D=4.0$  $x/D=6.0$

Şekil 2.51 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için ZDGC'nin gelişimi.

Kanal ile lüle arasındaki eğim açısının akım hatları üzerindeki etkisi $y/D=1.5$ 'ta, $R=2.0$ için Şekil 2.52'de gösterilmiştir. Şekillerden görülebileceği üzere eğim açısı arttırıldıkça lüleden püskürtülen hava kanala daha dik bir şekilde girmiştir. Düşük açılarda lüleden çıkan hava, kanaldan serbest olarak akmakta olan akışkanın da etkisiyle hemen kanal üst çeperi üzerine yayılarak kanal akış yönünde akmaya başlamakta iken, eğim açısının arttırılmasıyla kanal akışını yenerek çapraz akış önünde bir engel gibi davrandığı ve kanal içerisine daha fazla nüfuz ettiği görülmüştür.



Şekil 2.52 Kanal ile lüle arasındaki eğim açısının akım hatları üzerindeki etkileri, $y/D=1.5$, $R=2.0$.



Şekil 2.53 İz girdabı, $R=3.3$.

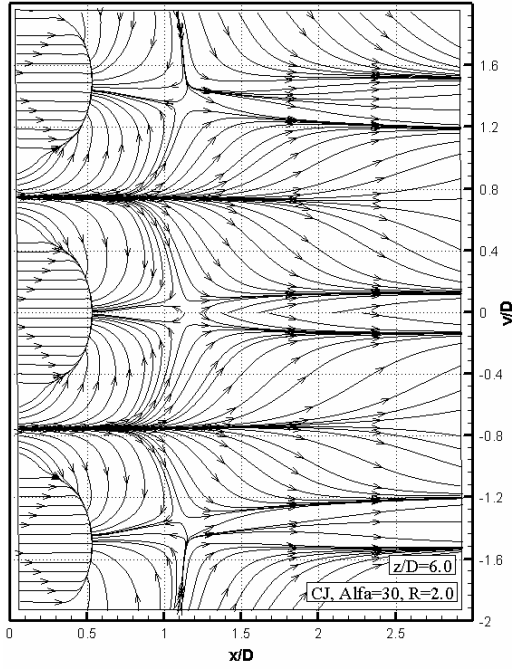
Şekil 2.53'te akışkan elemanlarının yörüngesi $R=3.3$ için gösterilmektedir. Dairesel kesitli yan yana üç tane lüle kullanılması durumunda akım hatlarındaki ayrılma ve girdap bölgeleri Şekil 2.54-Şekil 2.59 farklı eğim açıları ve $R=2.0$ için değişik yüksekliğine kesitlerde Şekil 2.54'ten Şekil 2.59'a kadar olan şekillerde gösterilmiştir.

En düşük eğim açısı olan $\alpha=30^\circ$ 'ye ait akım hatlarının değişimi Şekil 2.54'te sunulmuştur. Görüldüğü gibi kanal üst çeperinin hemen altındaki akım hatlarını gösteren $z/D=6.0$ no'lu istasyonda üç farklı ayrılma bölgesi göze çarpmaktadır. Kanaldan akmakta olan çapraz akış lülelerle karşılaşır karşılaşmaz, lüleler etrafında y/D yönlerinde ikiye ayrılmakta ve farklı akış yapılarına neden olmaktadır. $x/D=1.1$ 'den sonra kanal çıkışına yönelerek kanalı terk etmektedirler. Lüleler etrafındaki bu toplanma ikinci istasyonda ($z/D=5.8$) kaybolmakta ancak akım hatları üzerindeki etkisini de devam ettirmektedir. Birinci istasyonda görülen bu durumun bir sonucu olarak akışta oluşacak ayrılma Şekil 2.55'te $\alpha=45^\circ$ için $z/D=5.8$ 'de kendini göstermeye başlamaktadır. Ancak burada gösterilen akıştaki ayrılma, ortadaki lüle ve yanlardaki diğer lüleler için farklı yerlerden başlamaktadır. Örneğin $z/D=5.8$ 'de görülen ayrılma (Şekil 2.55) ortadaki lüle için daha önce, yanlardaki lüleler için ise daha sonraki noktalarda olmaktadır. Yüksekliğine kesitlerde oluşacak akım ayrılması ve olası bir girdap bölgesinin varlığı eğim açısı 60° 'de kendini çok belirgin olarak göstermektedir. Ortadaki

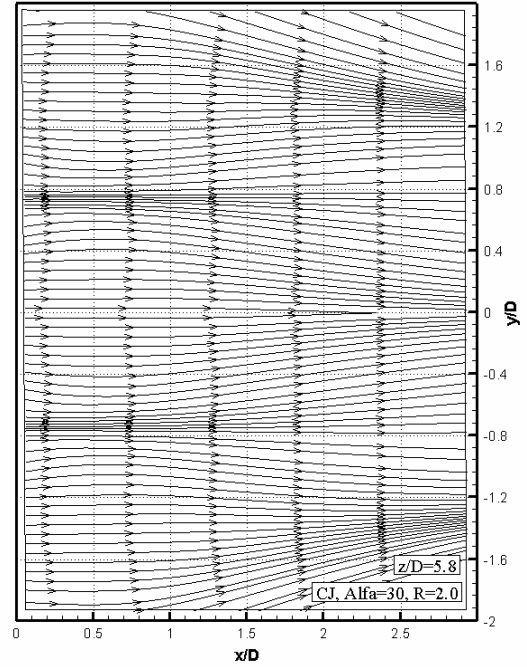
lüleden kanala püskürtülen jet akışı, kanal simetri hattında ($y/D=0.0$) ok küçük bir girdap bölgesinin varlığına neden olurken, yanal lülelerden püskürtülen jet akışları bu eğim açısında ancak akış ayrılmasıyla kendilerini göstermişlerdir (şekil 2.56). Ancak bu eğim açısında görülen akım ayrılması, eğim açısı 75° olduğuunda birer girdap bölgesine dönüşmüşlerdir.

Kanal simetri hattında 60° 'lik eğim açısında oluşan girdap bölgesi ise eğim açısının 75° 'ye yükseltilmesiyle ölçek olarak büyüyerek daha geniş bir alanda kalmıştır (şekil 2.57). Merkezdeki girdabın y/D eksenine göre (+) ve (-) taraflarında kalan kısımları birbirlerine göre simetrik iken, kanalın yanal kenarlarına yakın meydana gelen girdapların yarı kısımları bu özelliği göstermemektedir. Eğim açısının 90° olması durumunu gösteren şekil 2.58'de grldğu gibi en yüksek eğim açısında bu bölgedeki girdap yapıları birbirlerine daha çok benzemektedirler.

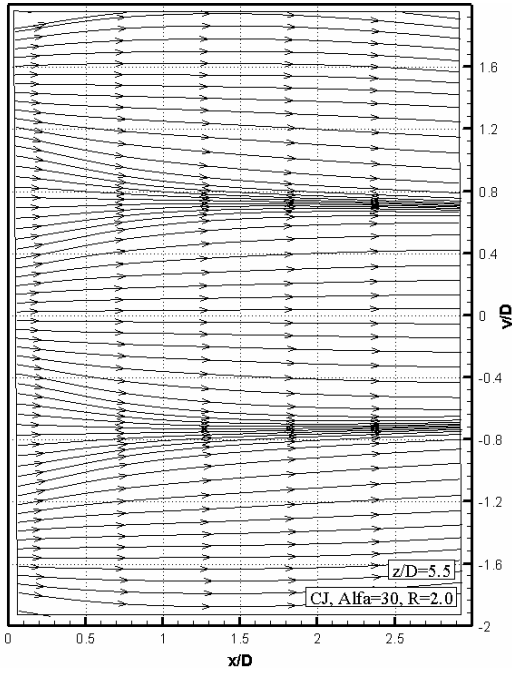
Dört farklı eğim açısı için yüksekliğine kesitlerdeki değişimlerin gösterildiği şekil 2.59'dan şekil 2.62'ye kadar olan resimler incelendiğinde eğim açısının etkisi çok net olarak görülebilir. Dikkat edilirse eğim açısı arttırıldığıa akışta ayrılmalar daha belirgin olmakta ve var olan girdap bölgeleri daha da büyüyerek kanalın daha geniş bir kısmında hareket etmektedir.



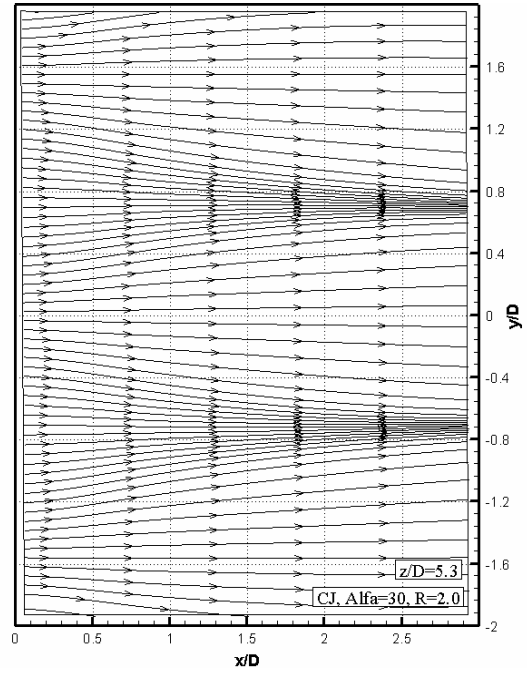
z/D=6.0



z/D=5.8

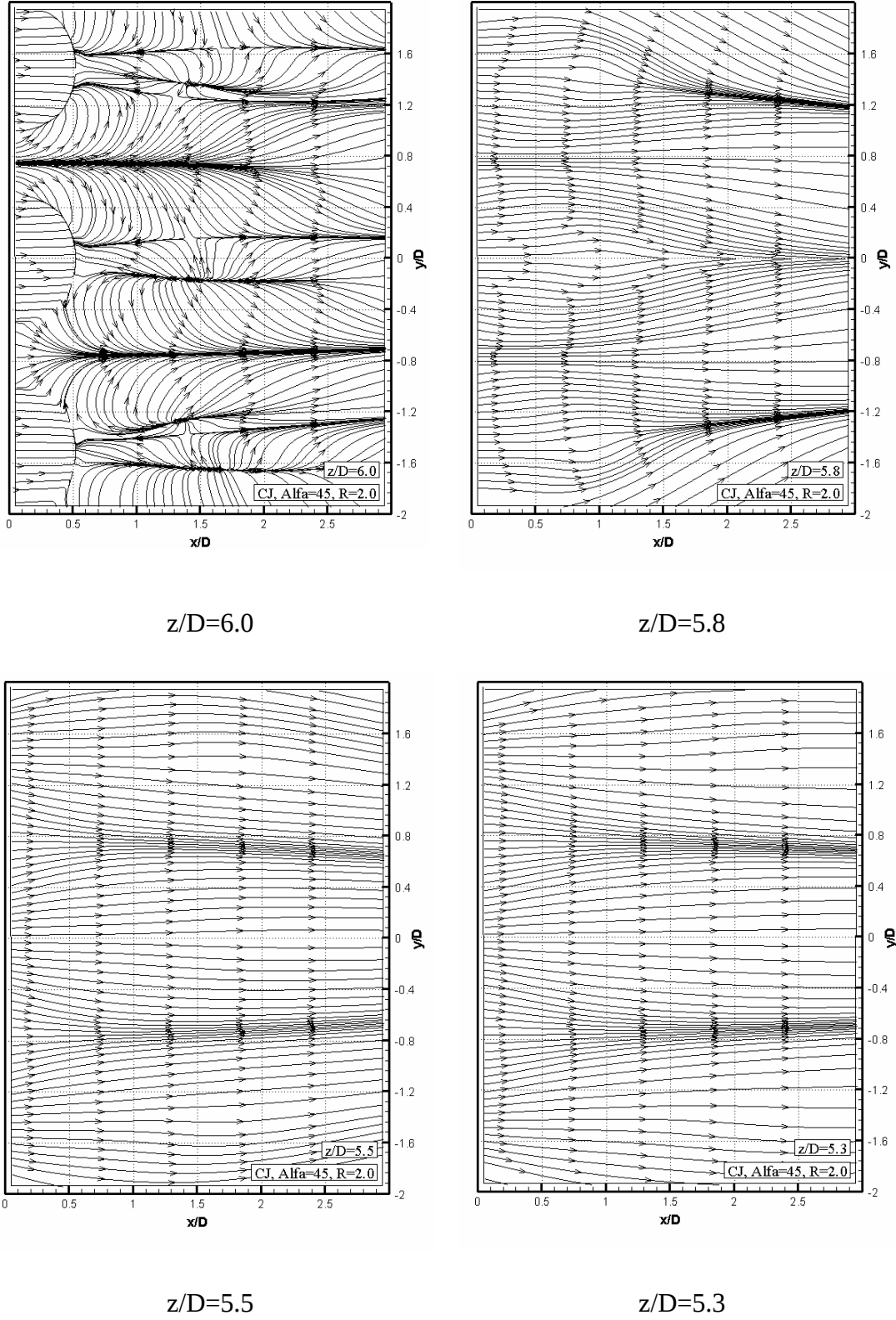


z/D=5.5

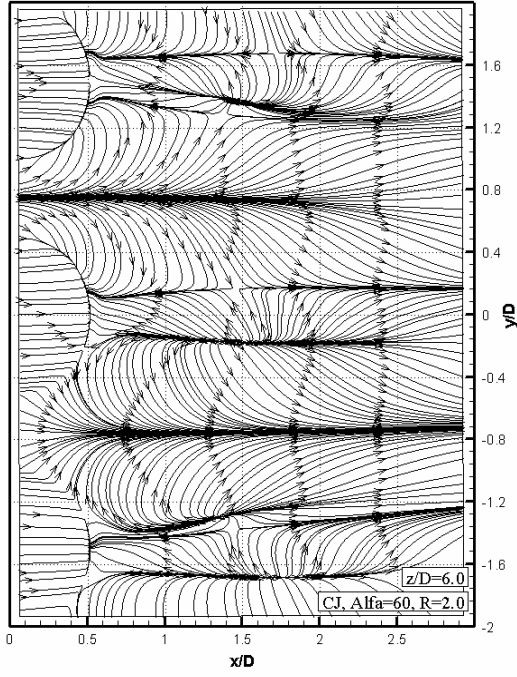


z/D=5.3

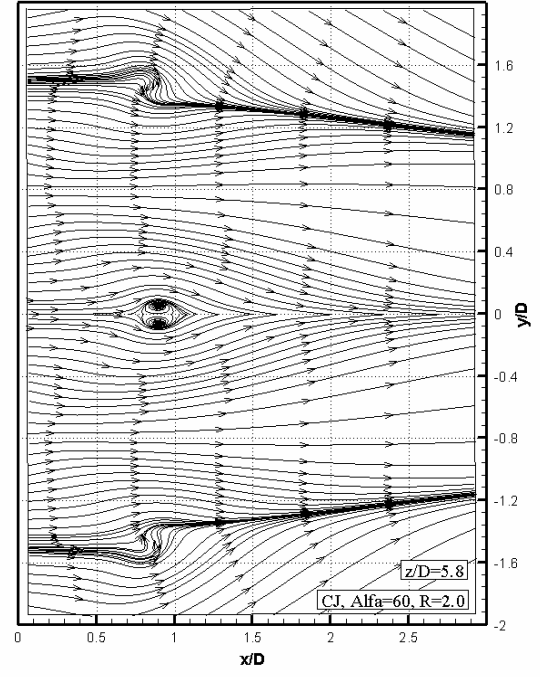
Şekil 2.54 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.



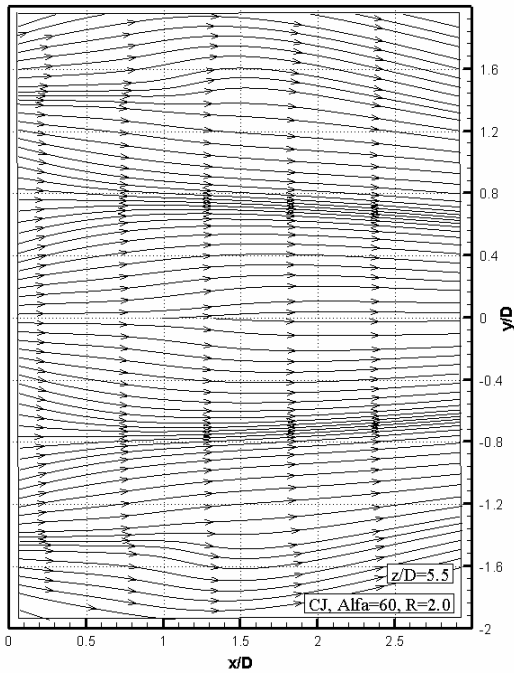
Şekil 2.55 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.



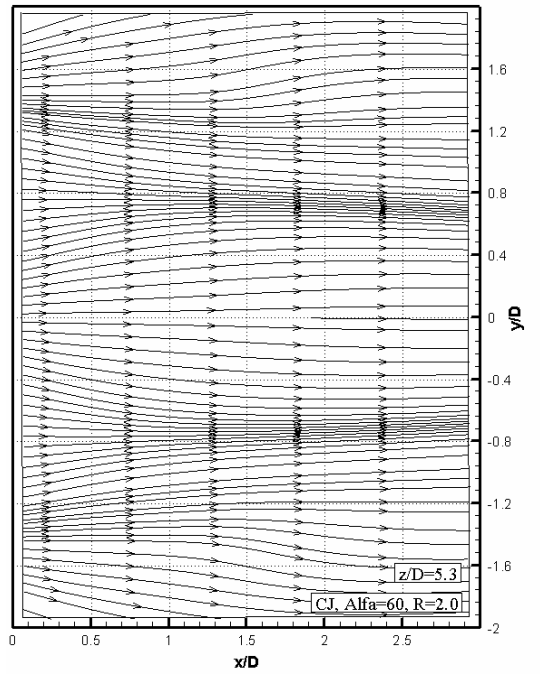
z/D=6.0



z/D=5.8

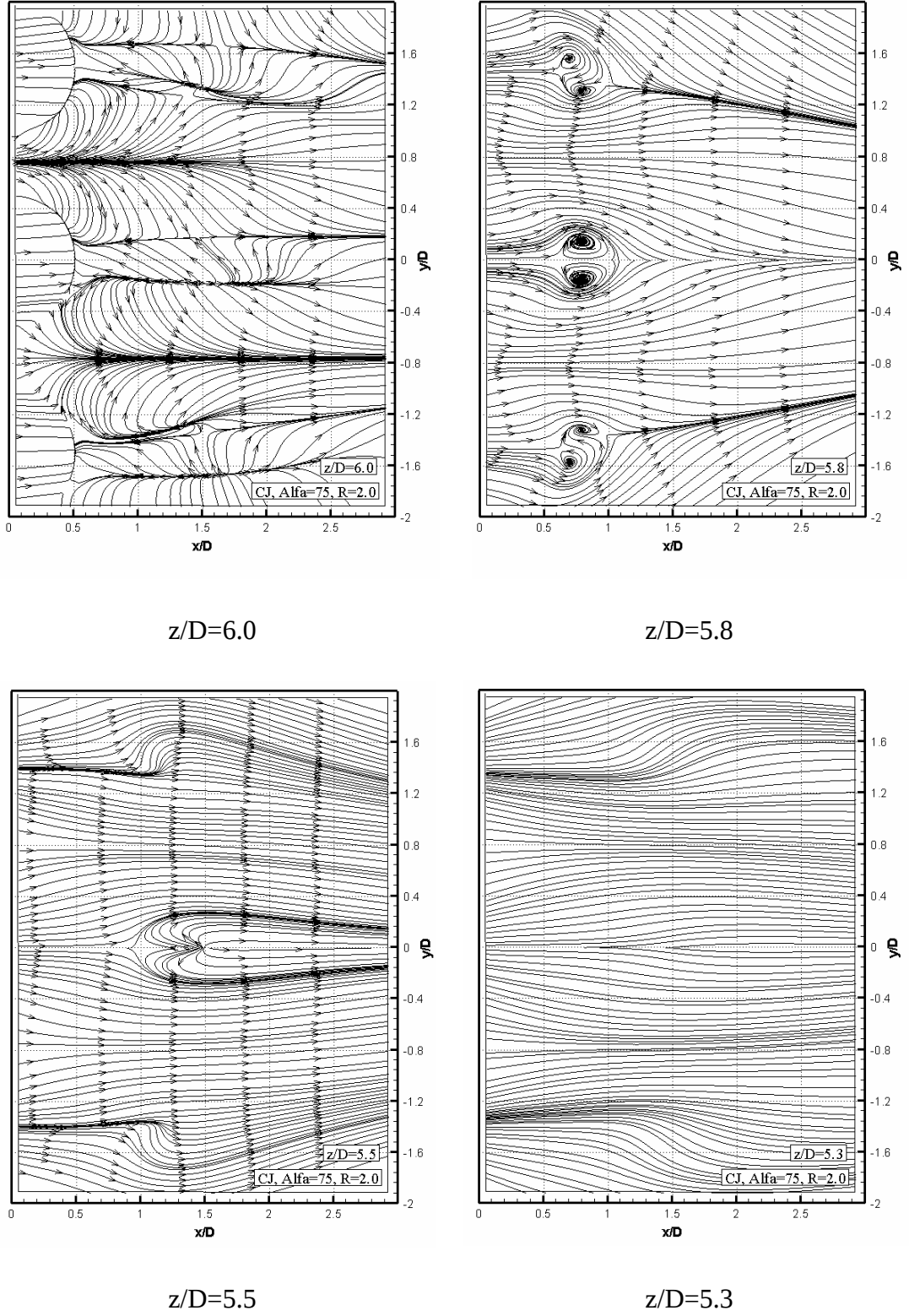


z/D=5.5

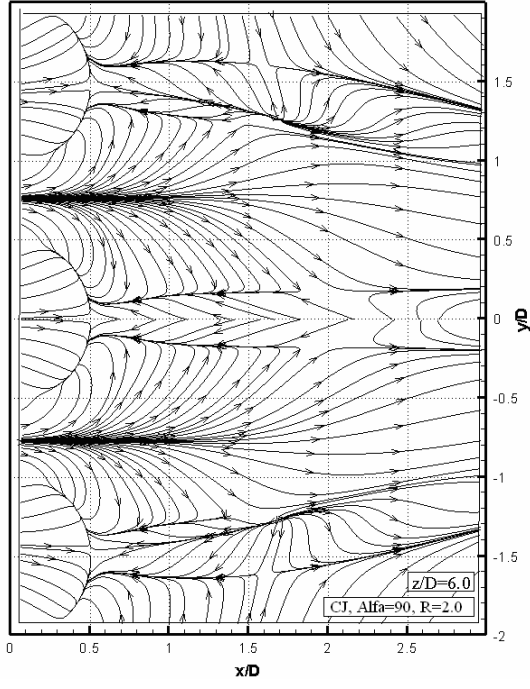
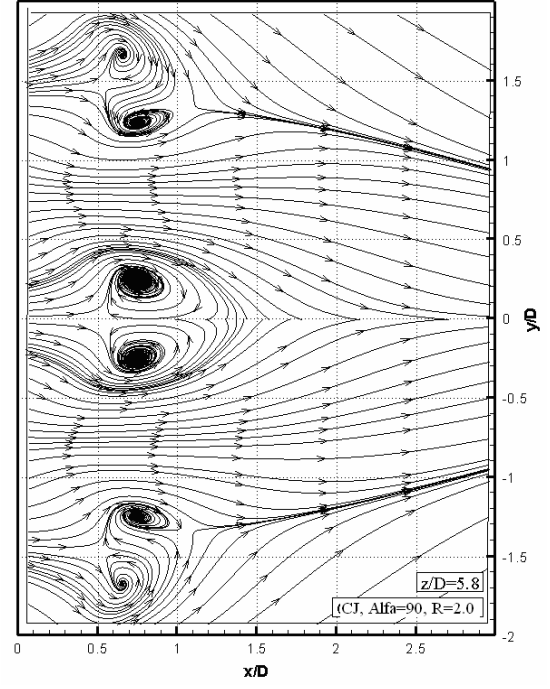
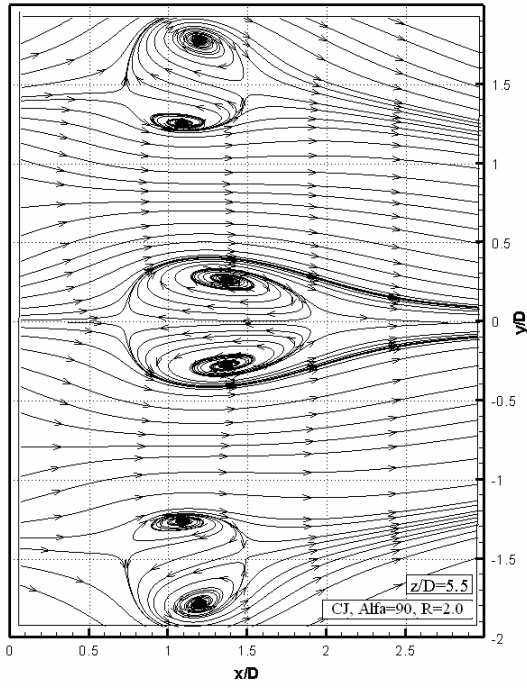
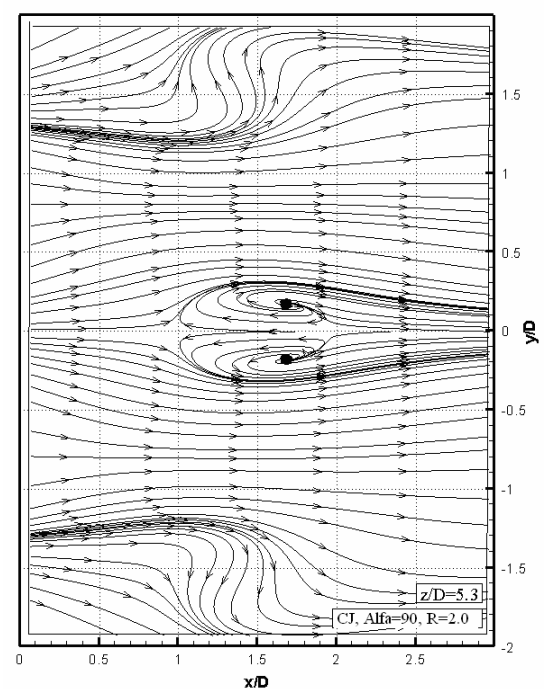


z/D=5.3

Şekil 2.56 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.

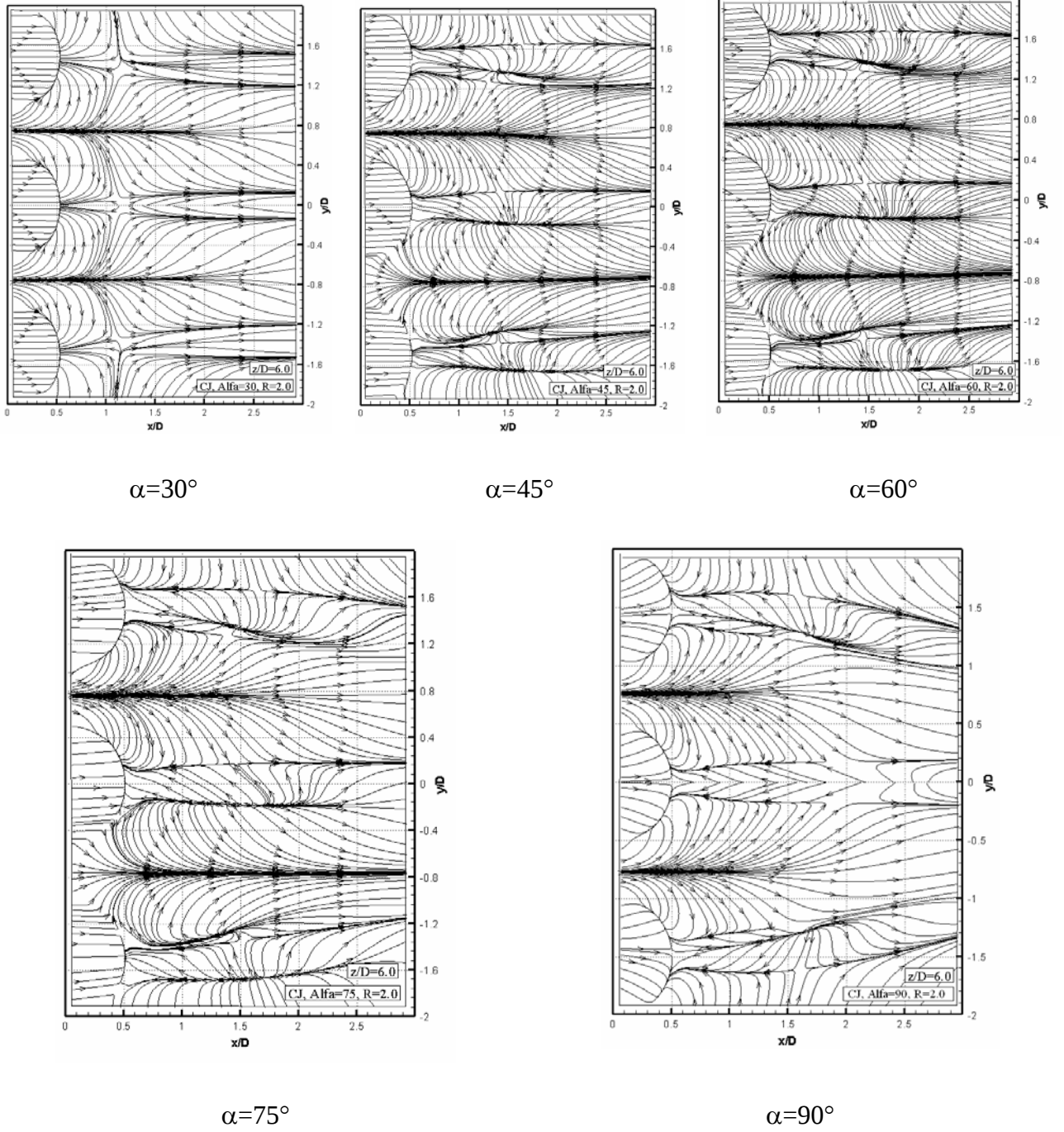


Şekil 2.57 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.

 $z/D=6.0$  $z/D=5.8$  $z/D=5.5$  $z/D=5.3$

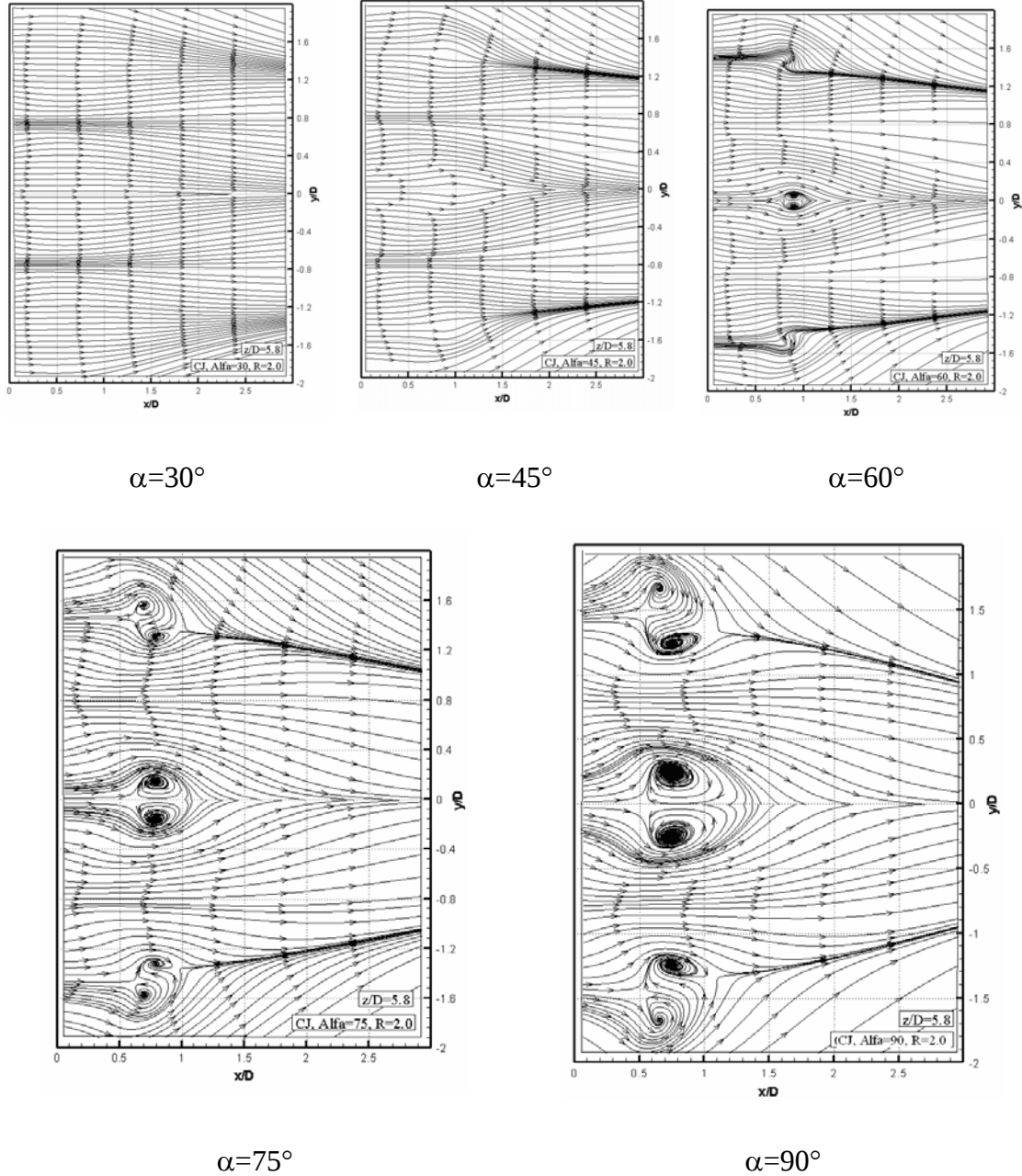
Şekil 2.58 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$ için at nalı girdap oluşumu ve kanal içerisine doğru olan değişimi.

Kanal üst çeperinin hemen altındaki noktada meydana gelen akışı gösteren resimler Şekil 2.59'da görülmektedir. Görüldüğü gibi eğim açısının artırılması akım hatları üzerinde pek önemli olmamaktadır.

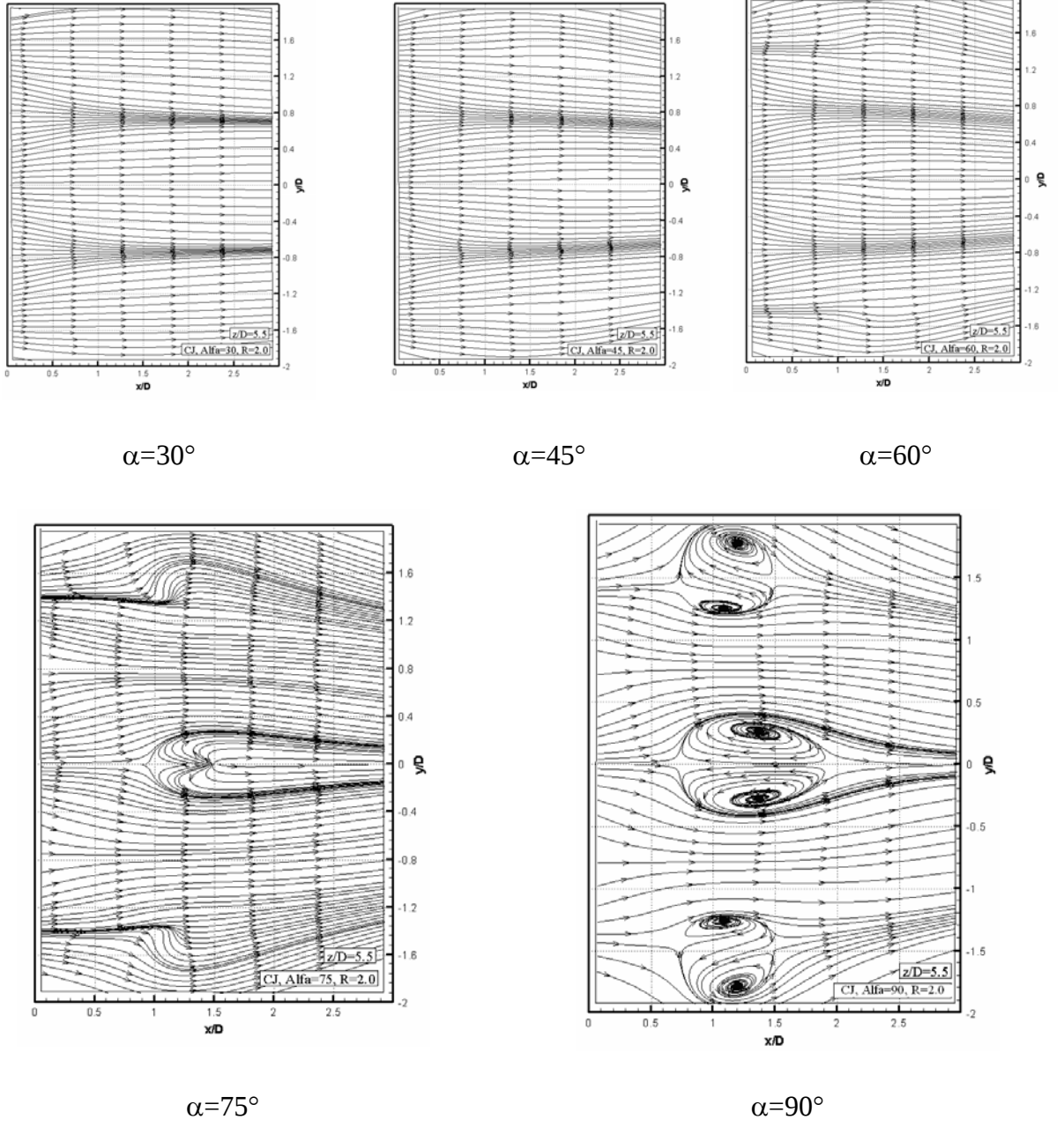


Şekil 2.59 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=6.0$ 'da ZDGÇ'nin gelişimi.

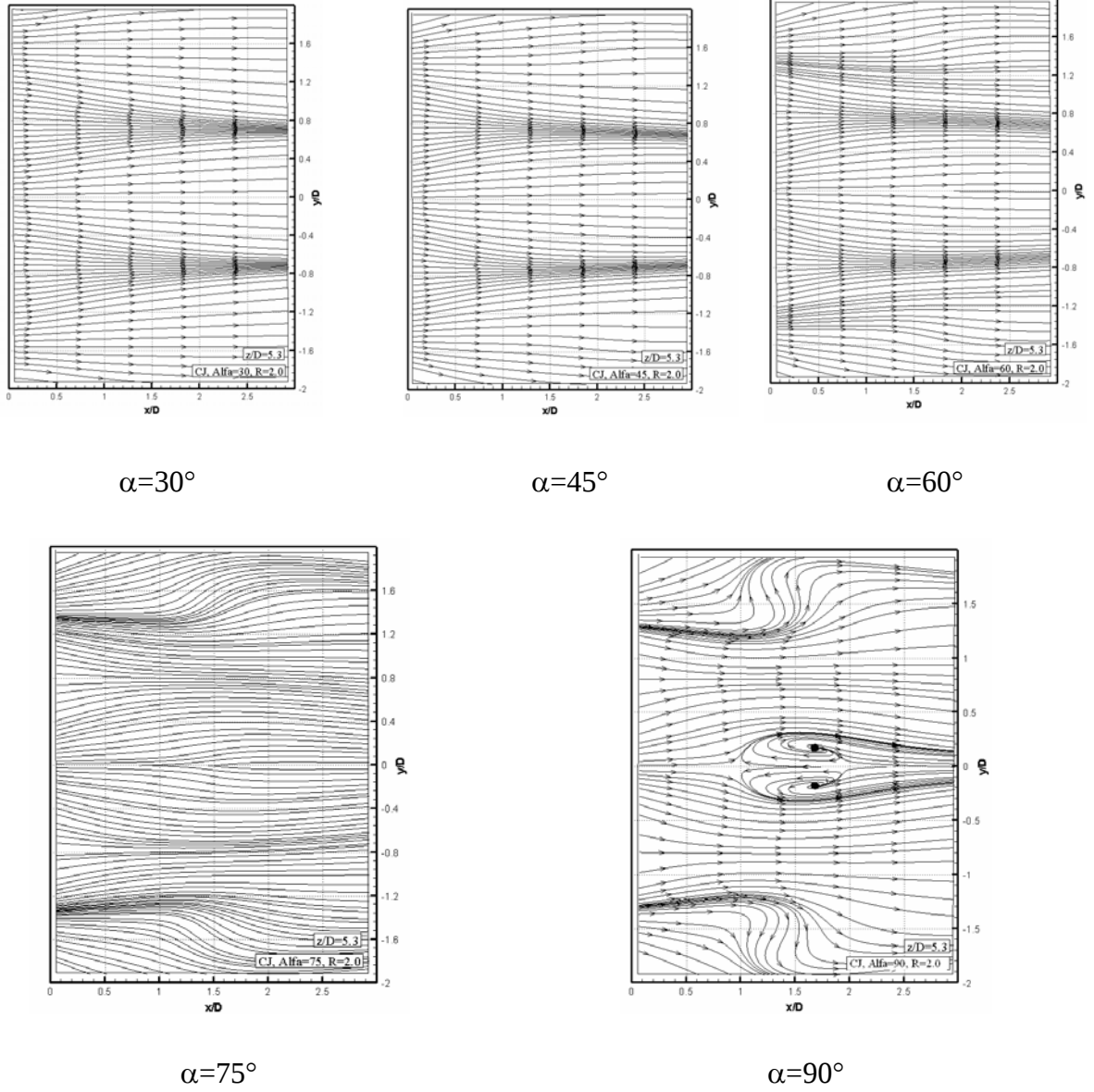
Kanalın $-0.2D$ kadar içerisine doğru gidildiğinde karşılaşılan durum Şekil 2.60'daki gibidir. Bu şekilde, $\alpha=45^\circ$ için akışta ayrılma başlamış ve artan eğim açılarında bu ayrılma girdap oluşumuna dönüşmüştür. Ancak kanal içerisine doğru gidildikçe $\alpha=45^\circ$ ve 60° için herhangi bir ayrılma söz konusu olmayıp sadece 75° ve 90° 'lik eğim açıları için akışta ayrılma ve girdap görülmüştür (Şekil 2.61). $z/D=5.3$ 'te ise en yüksek eğim açısı olan 90° dışında hiçbir açıda akım hatlarında ayrılma görülememiştir (Şekil 2.62).



Şekil 2.60 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=5.8$ 'de ZDGÇ'nin gelişimi.



Şekil 2.61 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=5.5$ 'de ZDGÇ'nin gelişimi.



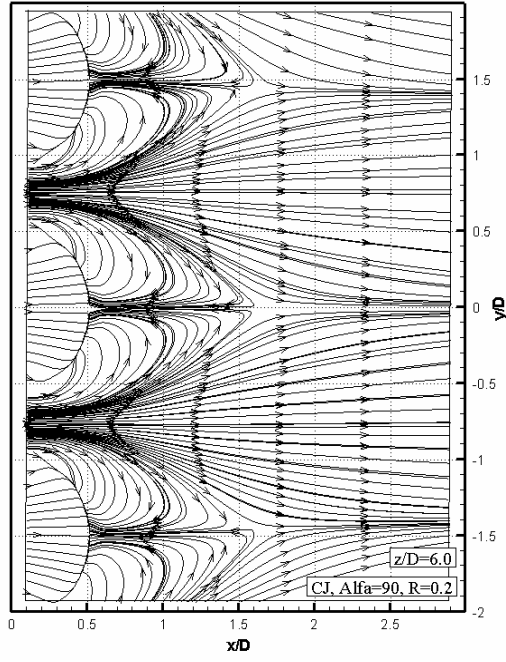
Şekil 2.62 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için $z/D=5.3$ 'de ZDGÇ'nin gelişimi.

Eğim açısının dışında, hız oranlarının da belli bir istasyon ve belli bir eğim açısındaki etkisini göstermek üzere Şekil 2.63'ten Şekil 2.66'ya kadar olan resimler düzenlenmiştir. Bu şekiller normal jet ($\alpha=90^\circ$) için elde edilmiş olup $R=0.2, 0.5, 1.0$ ve 2.0 için gösterilmiştir. Kanalin üst çeperinin hemen altındaki akışı gösteren resimler Şekil 2.63'te verilmiş olup burada da hız oranının etkisini görmek mümkündür. Hız oranı arttıkça lülelerden hemen sonra oluşan girdap yapıları x/D yönünde büyümekte ve lüleler etrafındaki akış ayrılması daha belirgin olmaktadır.

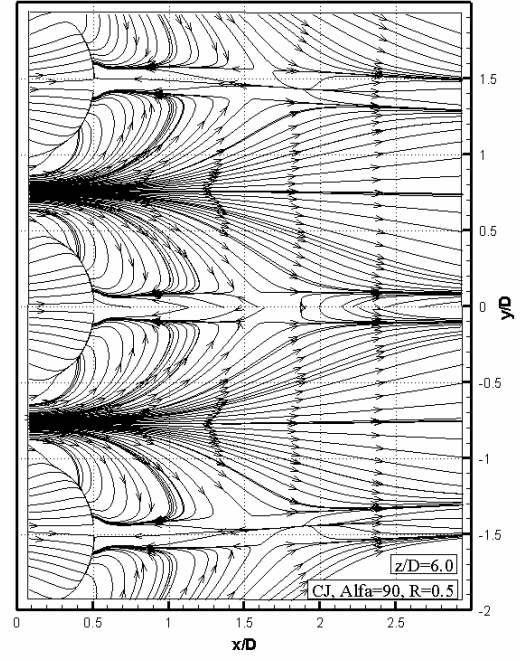
Şekil 2.64'te $z/D=5.8$ no'lu istasyondaki akım hatları görülmektedir. $R=0.2$ 'de akış gayet düzgün olup kanal üst çeperinin $0.2D$ kadar altında kanal akışı etkisinde akmaktadır. Ancak hız oranı arttırıldığında üç lüleden püskürtülerek sağlanan jet akışı daha yüksek momentuma ulaşmakta ve kanal içerisine nüfuz ederek akışta ayrılmalara ve girdap bölgelerinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. $R=0.5$ 'te y/D ve x/D yönlerinde daha dar bir alanı dolduran girdap bölgesi $R=1.0$ olduğunda büyümekte ve $R=2.0$ ' de tekrar küçülmektedir. Ancak bu küçülme sadece yanlardaki girdap bölgeleri için geçerli olup ortadaki bölgeden farklıdır. Ortadaki lüleden sağlanan jet akışının sebep olduğu girdap yapısı $R=2.0$ ' de bir önceki hız oranına göre büyümektedir. Bu durum ise $R=1.0$ ve merkez lülenin akış yapısı üzerindeki özel etkisini ifade etmektedir.

Şekil 2.65'te görüldüğü gibi $z/D=5.5$ no'lu istasyondaki akım ayrılması sadece $R=1.0$ ve 2.0 için mevcutken daha düşük hız oranlarında akım gayet düzgündür. Bu durum kanal ortasına doğru $0.5D$ kadar ilerlendiğinde $R=0.2$ ve $R=0.5$ hız oranlarının burada bir akış ayrılmasına sebebebiyet veremeyecek kadar kanal içerisine nüfuz edemediğini gösterir. Ancak bu konumda $R=1.0$ hala baskın bir hız oranı olup akışta ayrılmalara neden olabilmektedir.

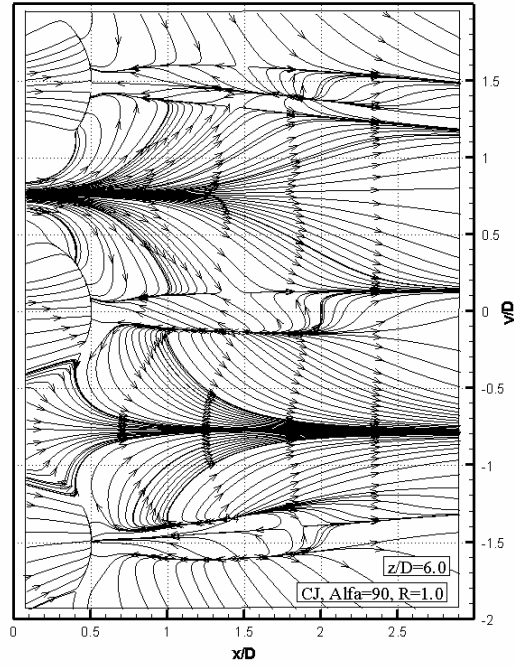
Kanal içerisine doğru üçüncü istasyon olan $z/D=5.3$ 'teki akım hatlarının durumu Şekil 2.66'da gösterilmektedir. Şekilden de göze çarpacağı üzere bu istasyonda tek bir girdap bölgesi mevcuttur. Bu girdap bölgesi ise sadece en yüksek hız oranı olan $R=2.0$ 'de olduğundan, diğer bütün hız oranlarında jet akışının kanal akışını bu bölgede yenemeyecek kadar zayıfladığı anlaşılmaktadır.



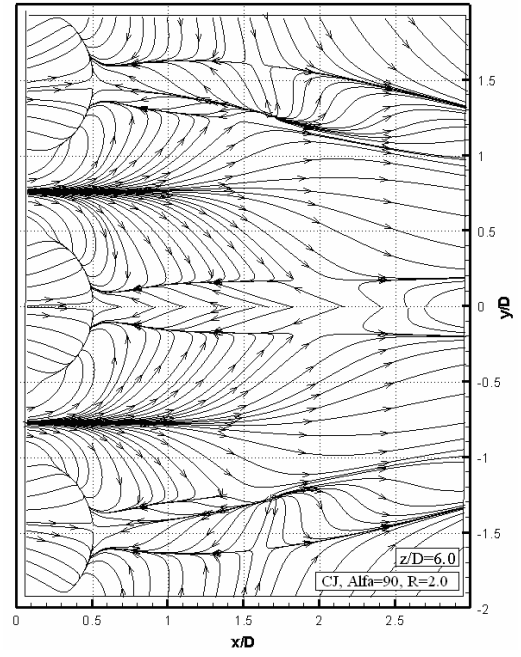
R=0.2



R=0.5

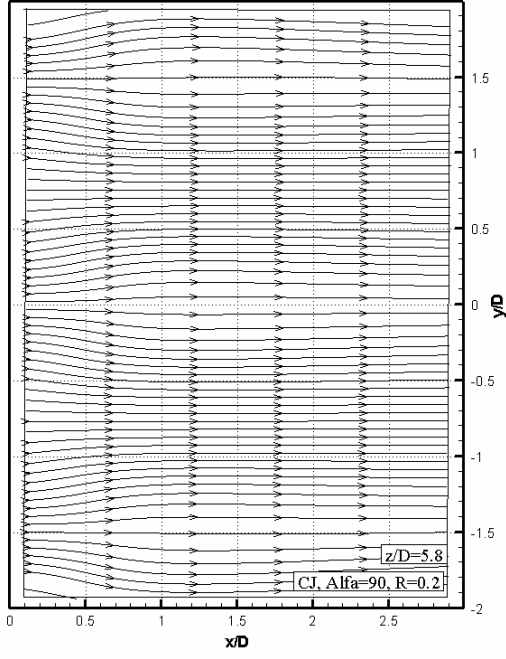


R=1.0

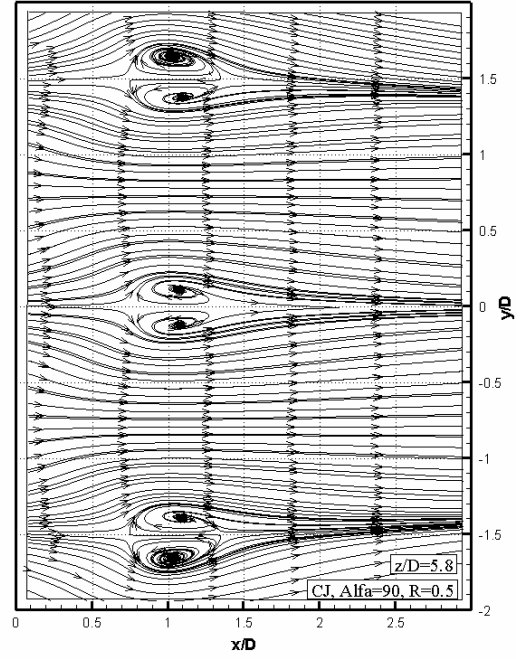


R=2.0

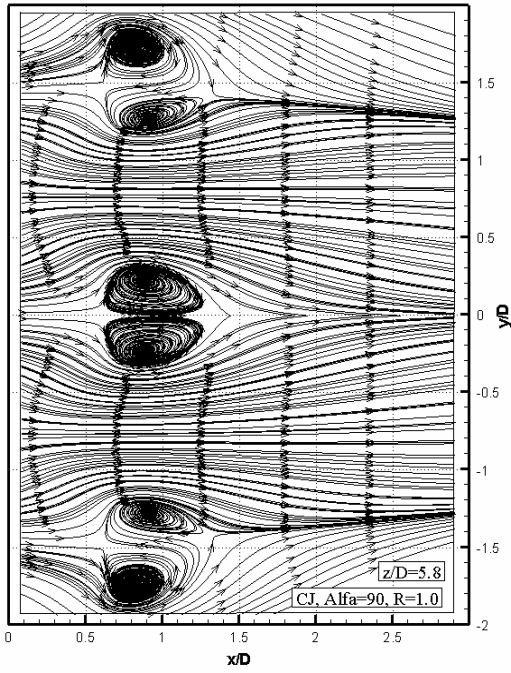
Şekil 2.63 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=6.0$ ' da hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.



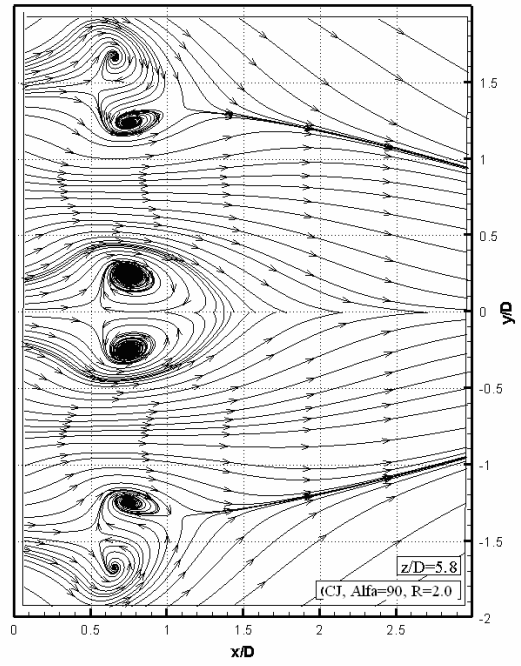
R=0.2



R=0.5

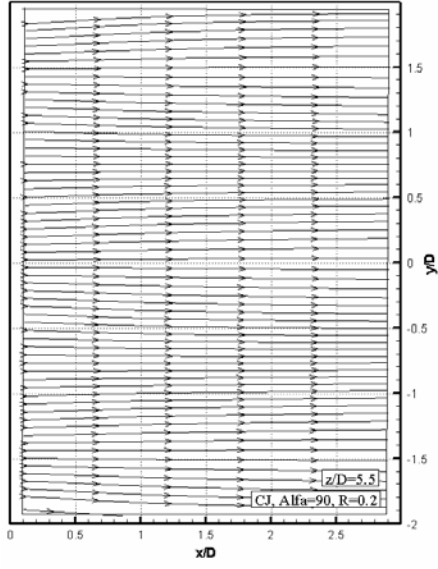


R=1.0

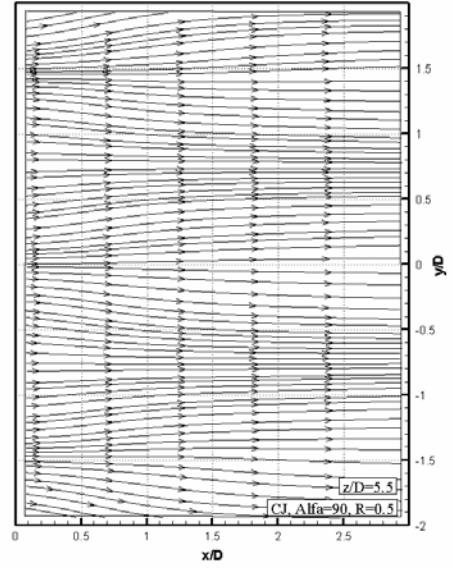


R=2.0

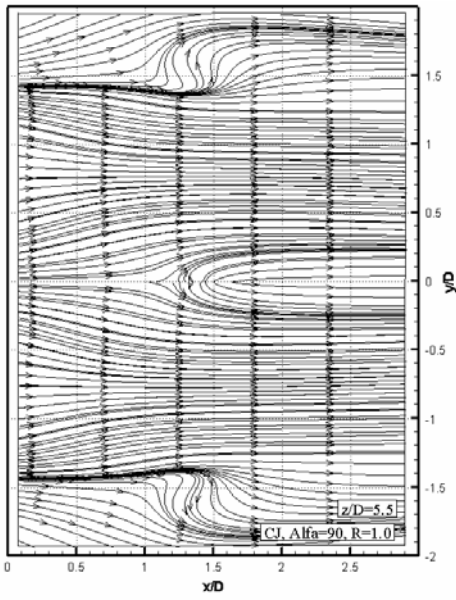
Şekil 2.64 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=5.8$ ' de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.



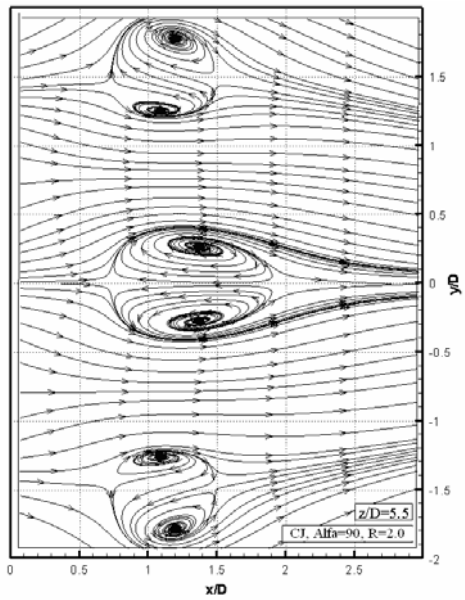
R=0.2



R=0.5

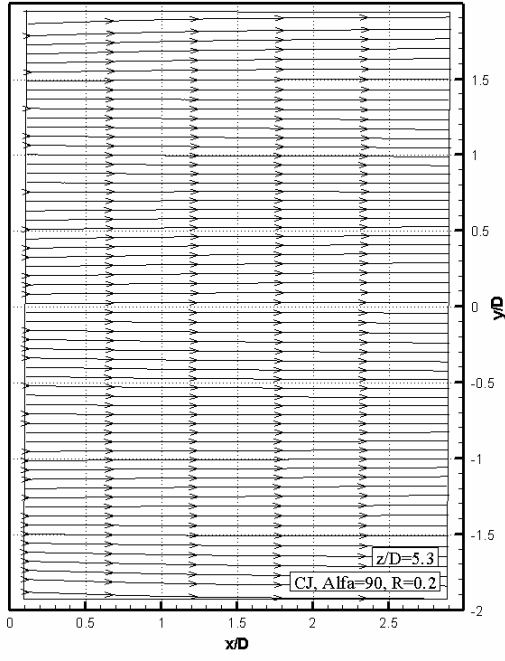


R=1.0

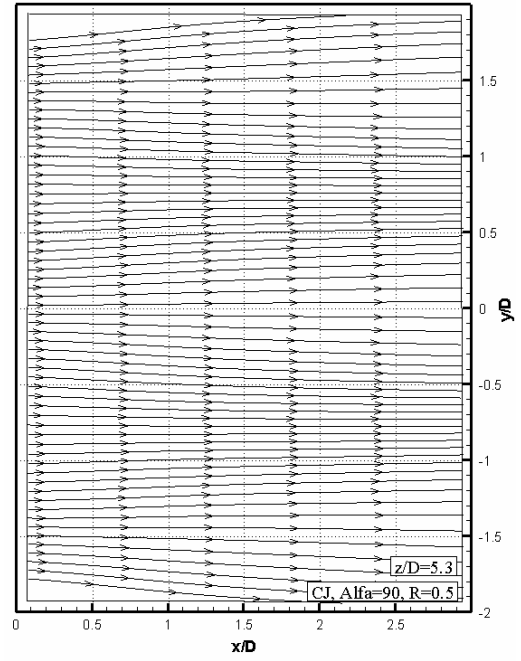


R=2.0

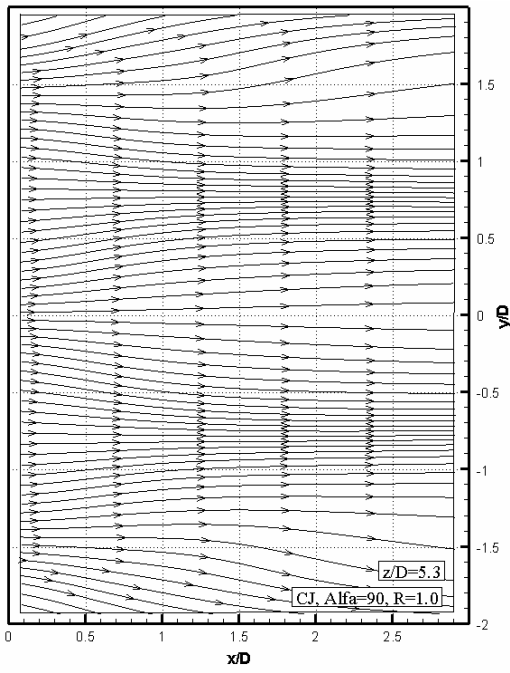
Şekil 2.65 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=5.5$ ' de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.



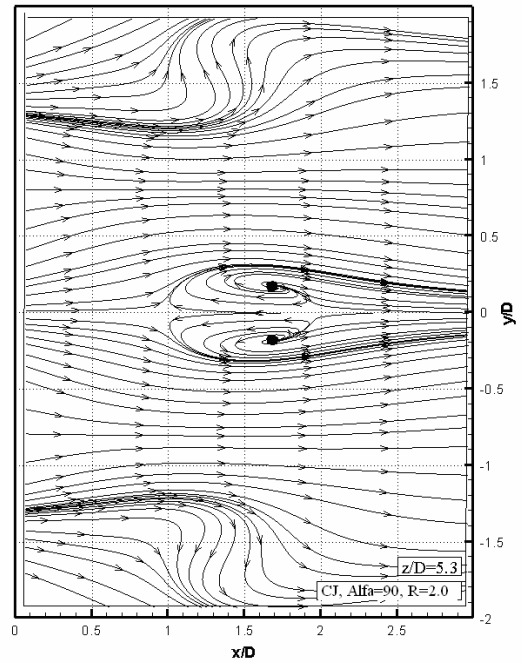
R=0.2



R=0.5



R=1.0



R=2.0

Şekil 2.66 Dairesel kesitli üç lüle kullanılması durumunda $z/D=5.3$ ' de hız oranlarının ZDGÇ üzerindeki etkisi.

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE TERMAL FİLM SOĞUTMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

Gaz türbinli motorların performansını iyileştirmek için yapılan çalışmalar, türbin giriş sıcaklığının da arttırılmasına neden olmuştur. Günümüzde türbin giriş sıcaklığı 2000 K'in üzerinde olmasına rağmen metalik türbin malzemelerinin dayanabileceği en yüksek sıcaklık 1300 K'de kalmıştır. Türbin kanatlarını bu derece yüksek giriş sıcaklığının zararlı etkilerinden koruyarak daha uzun ömürlü olmasını sağlamak için türbin kanadının soğutulması gerekmektedir. Günümüzde seramik ve daha yüksek sıcaklıklara dayanabilen malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmakta ise de sonuçlar henüz arzu edilen bir seviyeye gelmemiştir. Bu tip malzemelerin kullanılmasının önündeki en büyük engel ise metalik olmayan malzemedeki gevrek yapıdan kaynaklanan kolay kırılmadır. Bu tip metalik olmayan malzemelerin soğutma işlemine gerek duymaksızın türbin kanatlarında kullanılması kısa vadede mümkün görülmediğinden günümüzde hala metalik malzemelerin kullanılmasına devam edilmektedir. Ancak yüksek giriş sıcaklıklarının kullanılması bu sıcaklıklara maruz kalan türbin kanatlarının soğutulmasını zorunlu kılmaktadır. Günümüzde türbin kanatlarının soğutulması için değişik soğutma tekniklerinden yararlanılmaktadır. Bu işlem için soğuk gazlar bir kompresör yardımıyla türbin kanadı üzerine gönderilirler. Her ne kadar kompresördeki sıkıştırma nedeniyle soğutmada kullanılacak gazın sıcaklığında artma olacaksa da bu sıcaklık, türbin kanadı üzerinden geçecek gazların sıcaklığına nazaran çok düşüktür. Değişik soğutma teknikleri içerisinde en az soğutucu akışkan kullanarak en yüksek verimi sağlayan, film soğutma olduğundan günümüzde bu problem yaygın olarak araştırılmaktadır.

Film soğutma tekniğinde soğutucu akışkan (çoğunlukla hava) küçük deliklerden türbin kanadı üzerine gönderilir. Sıcak gazlara maruz kalan türbin kanadı üzerinde yayılan soğutucu akışkan yanma odasından gelen yüksek sıcaklıklara sahip akışkan ile türbin kanadı arasında bir film tabakası oluşturarak kanadı korur. Bu delikler genellikle basınç yüzeyi ve kanadın giriş kenarına yakın bölgede açılırlar. Daha iyi olması için soğutucunun yüzeye yakın olması ve serbest akış yönünde çok yayılmaması istenir. Bu nedenle, kanat üzerindeki delikler serbest akış yönünde belli bir açıda açılırlar. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi soğutucu akışkanın küçük deliklerden türbin kanadı üzerindeki sınır tabaka üzerine püskürtülerek kanat yüzeyi üzerinde koruyucu bir film tabakası oluşturması ve sıcak olan serbest akıştaki enerjinin bir kısmını emmesi sağlanır.

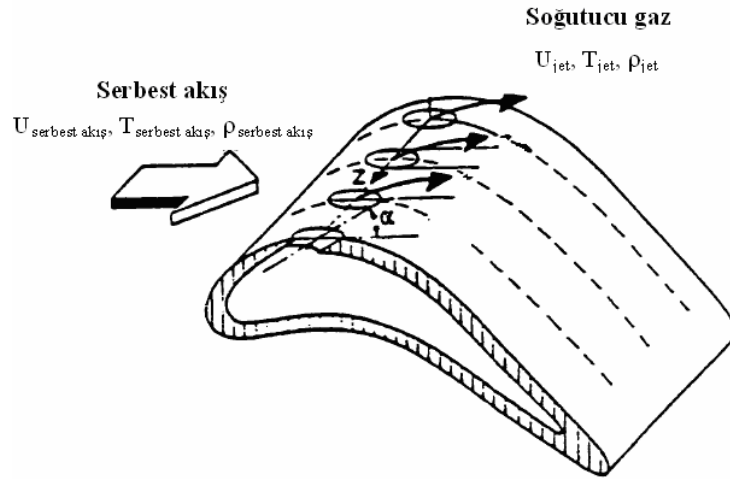
Film soğutma tekniğinde üç önemli değişken vardır. Bunlar sırasıyla soğuk jet akışının sıcak olan serbest akışın yoğunluğuna oranı, soğutucu akışkanın debisinin sıcak gazların debisine

oranı olan üfleme oranı ve momentumların oranıdır. Momentumların oranı ise soğutucunun sıcak olan serbest akışın momentumuna oranıdır. Film soğutma tekniğinde soğutma performansı üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu için bu üç değişken arasında en çok kullanılan üfleme oranıdır.

Termal film soğutma verimi η , Denk.3.1'deki gibi tanımlanmış olup adyabatik çeper sıcaklığı soğutucu akışkan ile aynı olduğunda en yüksek değeri verir ($\eta=1.0$).

$$\eta = \frac{T_{ac} - T_{kanal}}{T_{jet} - T_{kanal}} \quad (3.1)$$

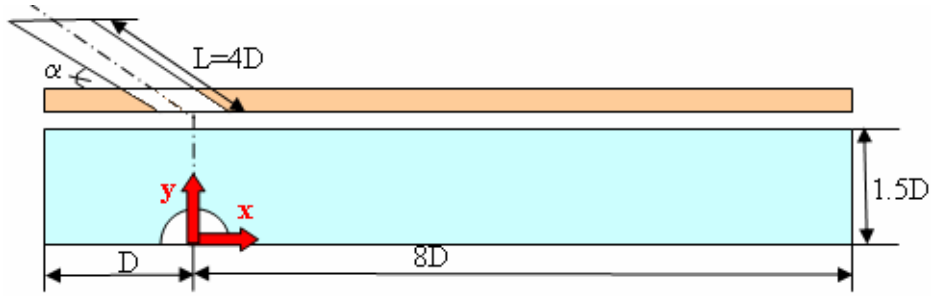
Burada alt notasyon olan “ac” adyabatik çeper, “kanal” ve “jet” ise kanalın ve soğutucu akışkan olarak jetin sıcaklıklarını temsil etmektedir. Film soğutmanın amacı türbin kanadı etrafındaki sıcak gazlardan türbin kanadına olması muhtemel olan ısı transferini en aza indirmektir.



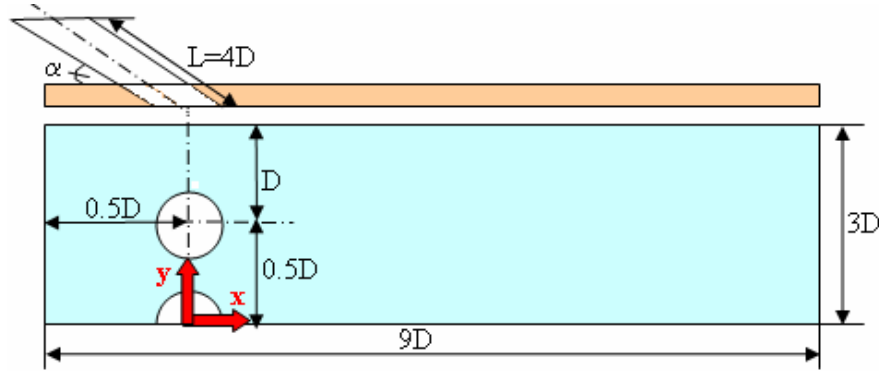
Şekil 3.1 Bir türbin kanadı üzerinde film soğutma, (Hass vd., 1992).

Soğutucu akışkanın sıcak çapraz akış içerisinde püskürtülmesiyle oluşan akış alanı ve kanat yüzeyi üzerinde meydana gelen ısı transferi olayı serbest akışın türbülans yoğunluğuna, soğutucu akışkanın püskürtüldüğü lülenin kesit alanının şekline, türbin kanadının kalınlığına, lülenin uzunluk/çap oranına (L/D), soğutucu akışkanın depolandığı yerin geometrisine, buradaki akışın serbest akış ile aynı ya da ters yönlü olup olmamasına, lüle ile kanat yüzeyi arasındaki eğim açısına, soğutucu ve sıcak gazlar arasındaki yoğunluk farkına, jet ile çapraz akış arasındaki üfleme ya da hızların oranına (her iki akışkanın da aynı yoğunluğa sahip olması durumu), yan yana ve/veya ardışık yerleştirilmiş lüleler arasındaki yanal mesafe gibi

değişik parametrelere bağlıdır. Bu çalışmada lüle uzunluğunun lüle çapına oranı dört olup ($L/D=4$) iki farklı lüle kesidi (daireysel ve kare), beş farklı eğim açısı ($\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90°) dört farklı üfleme oranı ($R=0.2, 0.5, 1.0$ ve 2.0) için sıcaklık dağılımları ve film soğutma verimleri incelenmiştir. Şekil 3.2’den de görüleceği üzere lüle merkezleri arasındaki mesafe $0.5D$ olup en dıştaki lüle merkezinin yan çepere olan uzaklığı $1.0D$ ’dir. Üzerinde çalışılan bu geometrik ölçüler literatürde genel kabul görmüş ölçüler olup $L/D<5$ olduğu için “kısa delik film soğutma” olarak tabir edilmektedir.



(a)



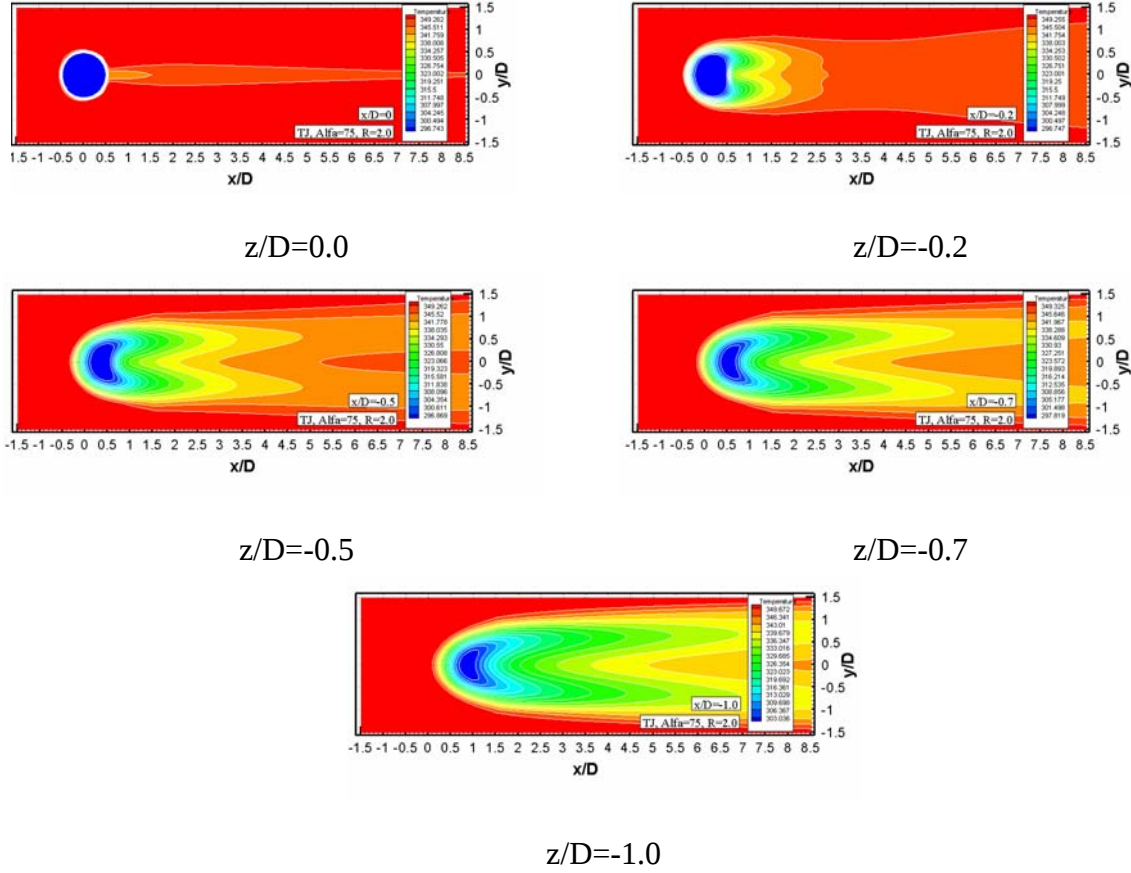
(b)

Şekil 3.2 Film soğutma işleminde tek lüle (a) ve üç lüle (b) kullanılması durumlarında çalışma alanına ait genel ölçüler.

3.1.1 Dairesel Kesitli Tek Lüle Kullanılması Durumunda Sıcaklık Dağılımları ve Termal Film Soğutma Verimleri

Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılarak yapılan film soğutma işlemine ait sıcaklık kontürleri Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Burada kanal üst çeperinden kanal içerisine $1.0D$ kadar olan derinlikteki sıcaklık dağılımları eğim açısı $\alpha=75^\circ$ ve hız oranı $R=2.0$ için gösterilmiştir. Kanal üst çeperinde lüleden henüz püskürtülmüş soğuk hava kanaldan akmakta olan sıcak hava ile henüz karşılaştığı ve kanal içerisine doğru dik olarak girmiş olduğundan, herhangi bir yöne

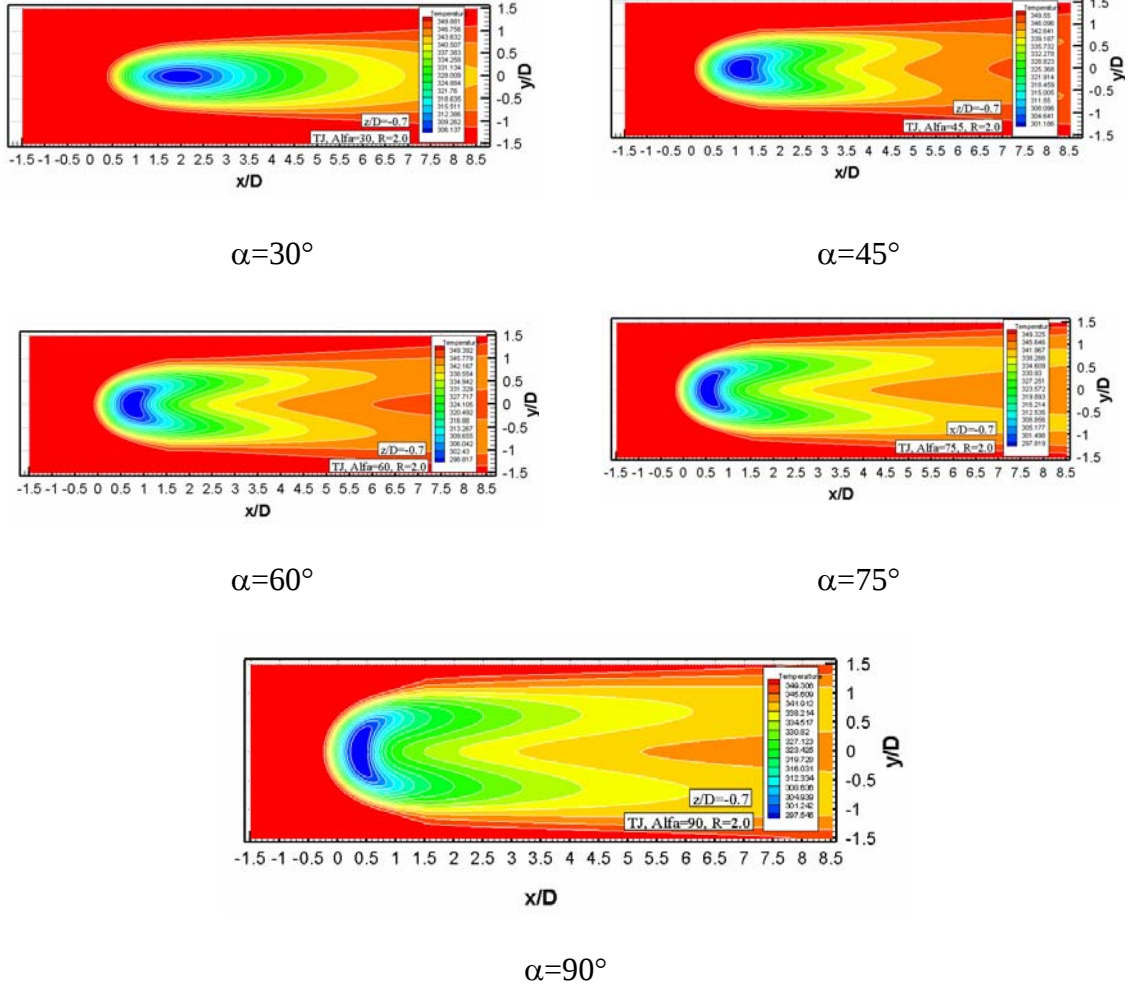
doğru yayılma gösterememiştir. Ancak ilerleyen istasyonlarda sıcak olan çapraz akışın etkisi kendini göstermiş ve lüleden püskürtülen jet akışını kendi doğrultusunda akmaya zorlayarak x/D yönünde yayılmasına neden olmuştur.



Şekil 3.3 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda düşey doğrultuda sıcaklık değişimleri, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$.

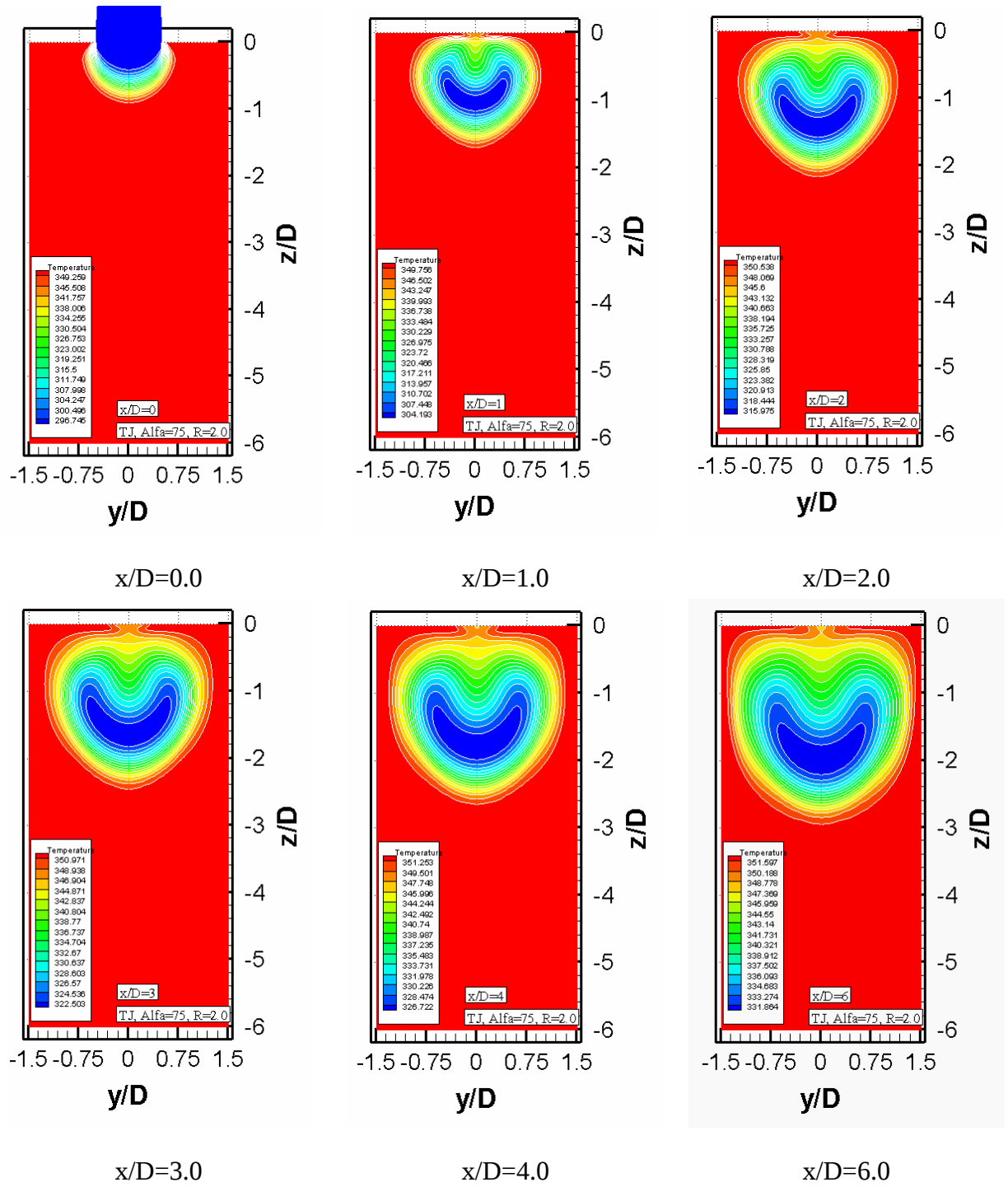
Lüleden hemen sonra oluşan girdap yapıları nedeniyle iki gaz burada daha iyi bir karışım sergilemiş ve ZDGÇ şeklini alarak daha derinlerde yan çeperlere doğru da yayılmıştır. ZDGÇ kanal içerisinde ilerlerken y/D ve z/D yönlerinde büyüdüğünden, kanala püskürtülmüş soğuk havayı da beraber taşıyarak daha iyi soğutma yapılmasını sağlamıştır. Her ne kadar ilerleyen istasyonlarda soğuk hava bir önceki istasyona göre daha fazla taşınmışsa da ilk istasyonlarda jet momentumunun kanaldaki çapraz akışın momentumuna göre daha fazla olması jetin serbest akıştan etkilenmesini engellemiş ve ilk istasyonlarda daha yüksek yanal soğutma verimleri elde edilmiştir. Bu durum ilerleyen şekillerde gösterilmiş olup ayrıntılı olarak bahsedilecektir. Tekli lüle kullanılarak yapılan film soğutma işleminde eğim açısının yüksekliğine kesitlerdeki (z/D) sıcaklık kontürleri üzerindeki etkisi $z/D=-0.7D$ 'de $R=2.0$ olması durumunda $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90° için Şekil 3.4'te sunulmuştur.

Şekillerden de görüleceği üzere düşük eğim açılarında özellikle kanal merkezinde x/D yönüne doğru daha düşük sıcaklıkta havaya rastlanırken eğim açısının artırılması, yanıl yüzeylere doğru da soğuk havanın yayılması sağlamış ancak aynı x/D 'de daha düşük termal verime neden olmuştur.



Şekil 3.4 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $z/D=-0.7$.

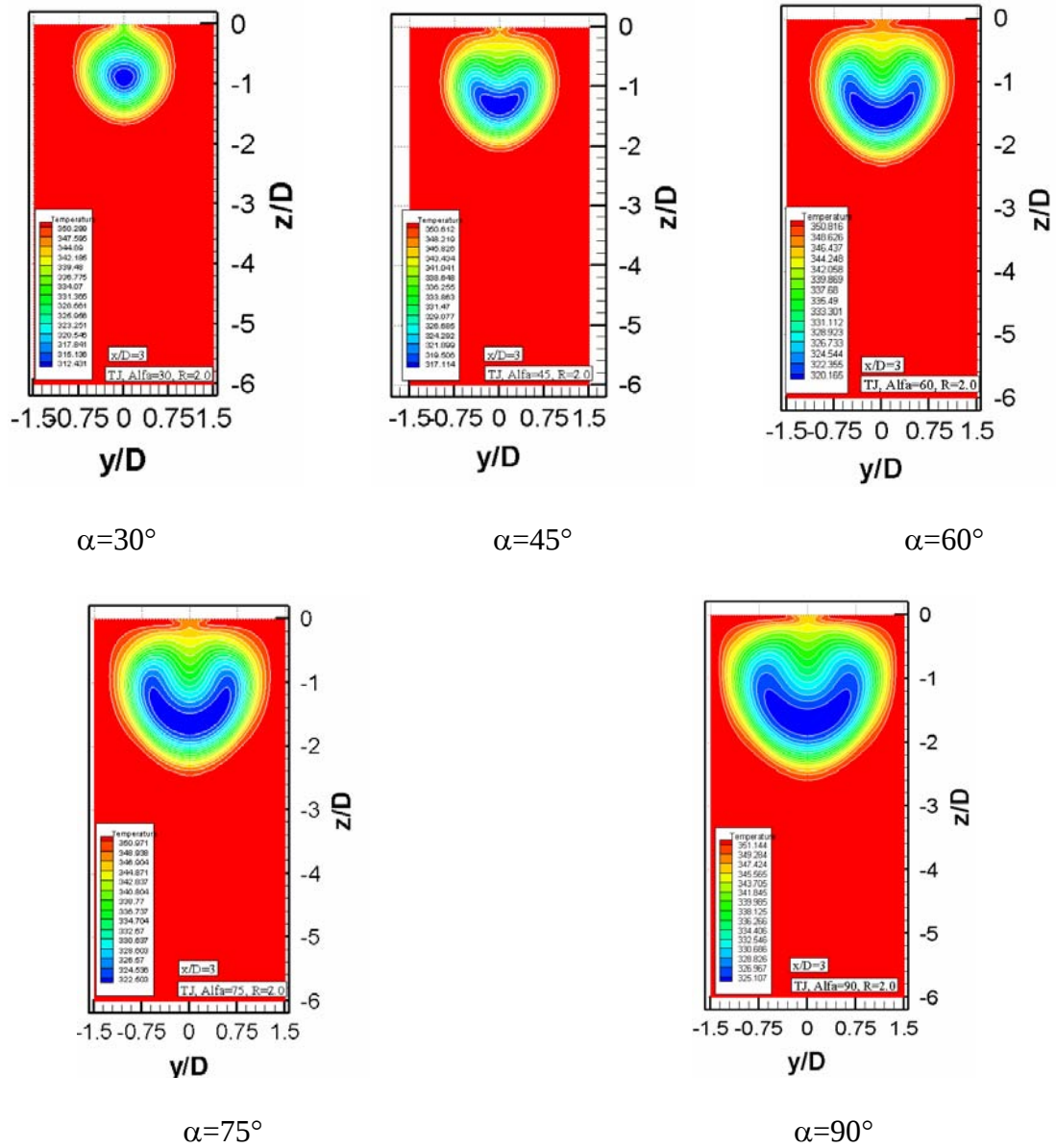
Şekil 3.5 tek lüle kullanılması durumunda eğim açısı $\alpha=75^\circ$ ve hız oranı $R=2.0$ için sıcaklık kontürlerinin enine kesitlerdeki ($x/D=0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ ve 6.0) değişimini göstermektedir. İlk istasyon olan $x/D=0.0$ 'da lüleden kanala giren akışkan lüle içerisinde hareketine devam ediyormuş gibi jet özelliğini muhafaza etmekte ve sıcak havanın meydana getirdiği termal sınır tabakayı delerek en yüksek termal verimi sağlayacak bir sıcaklık alanı oluşturmaktadır. İkinci istasyondan itibaren ZDGÇ'nin etkisiyle yanıl çeperlere doğru yayılmakta ve kanal içerisine daha fazla nüfuz ederek soğuk olan jet akışkanını bu bölgelere taşımaktadır.



Şekil 3.5 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda sıcaklık değişimlerinin lüle girişinden kanal çıkışına doğru değişik istasyonlardaki enine değişimi, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$.

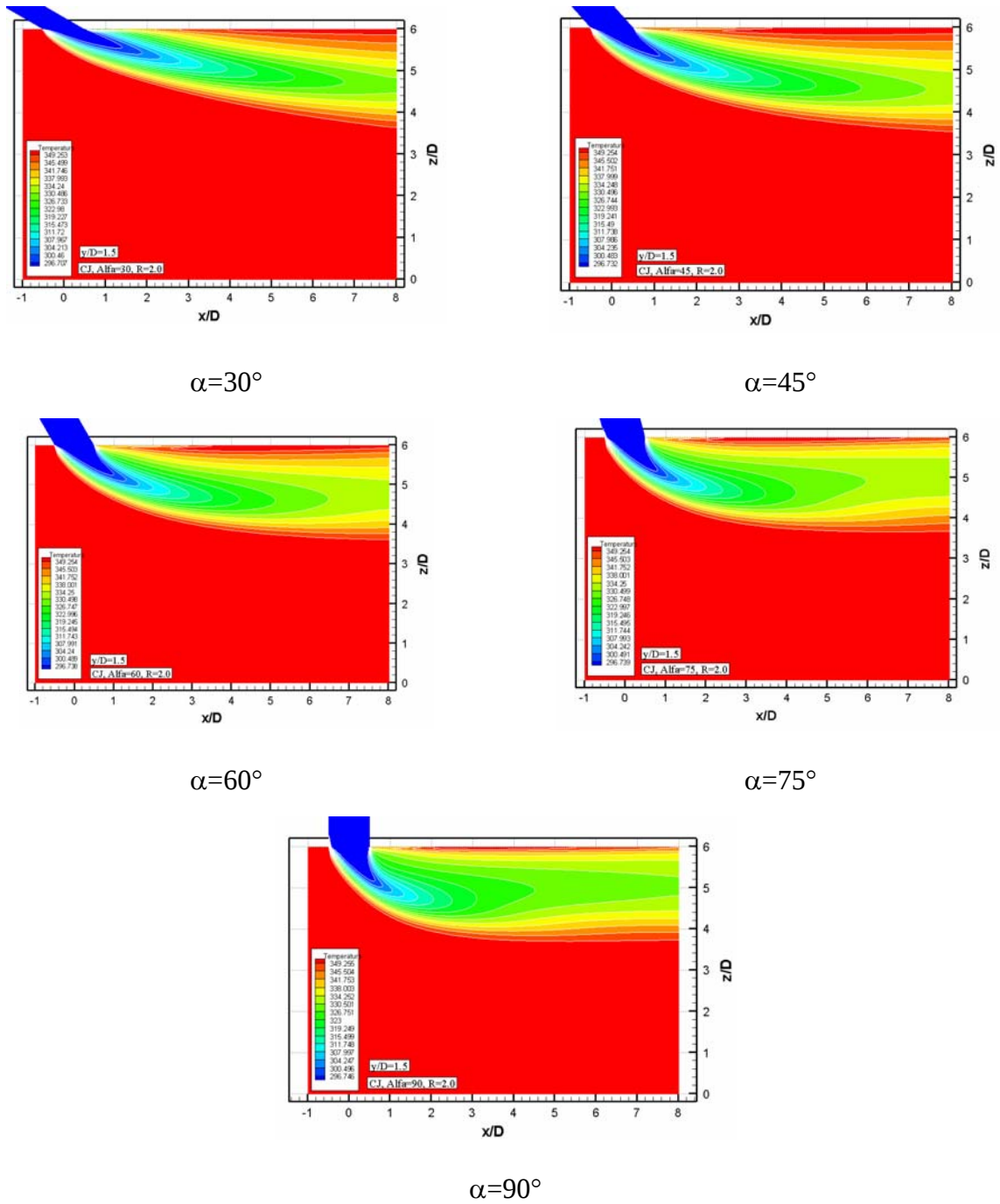
Eğim açısının x/D kesitlerinde görülen sıcaklık alanı üzerindeki etkileri ise Şekil 3.6’da $R=2.0$ için ortadaki istasyon üzerinde ($x/D=3.0$) gösterilmiştir. Düşük eğim açılarında lüleden kanala giren akışkan, kanaldaki serbest akışa yakın doğrultuda aktığından üst çepere çok yakın akmakta ve dolayısıyla sıcak olan çarpraz akışın üst çepere temasını engelleyerek yüksek

termal verim elde edilmesine neden olmaktadır.



Şekil 3.6 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının enine kesitlerdeki sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $x/D=3.0$.

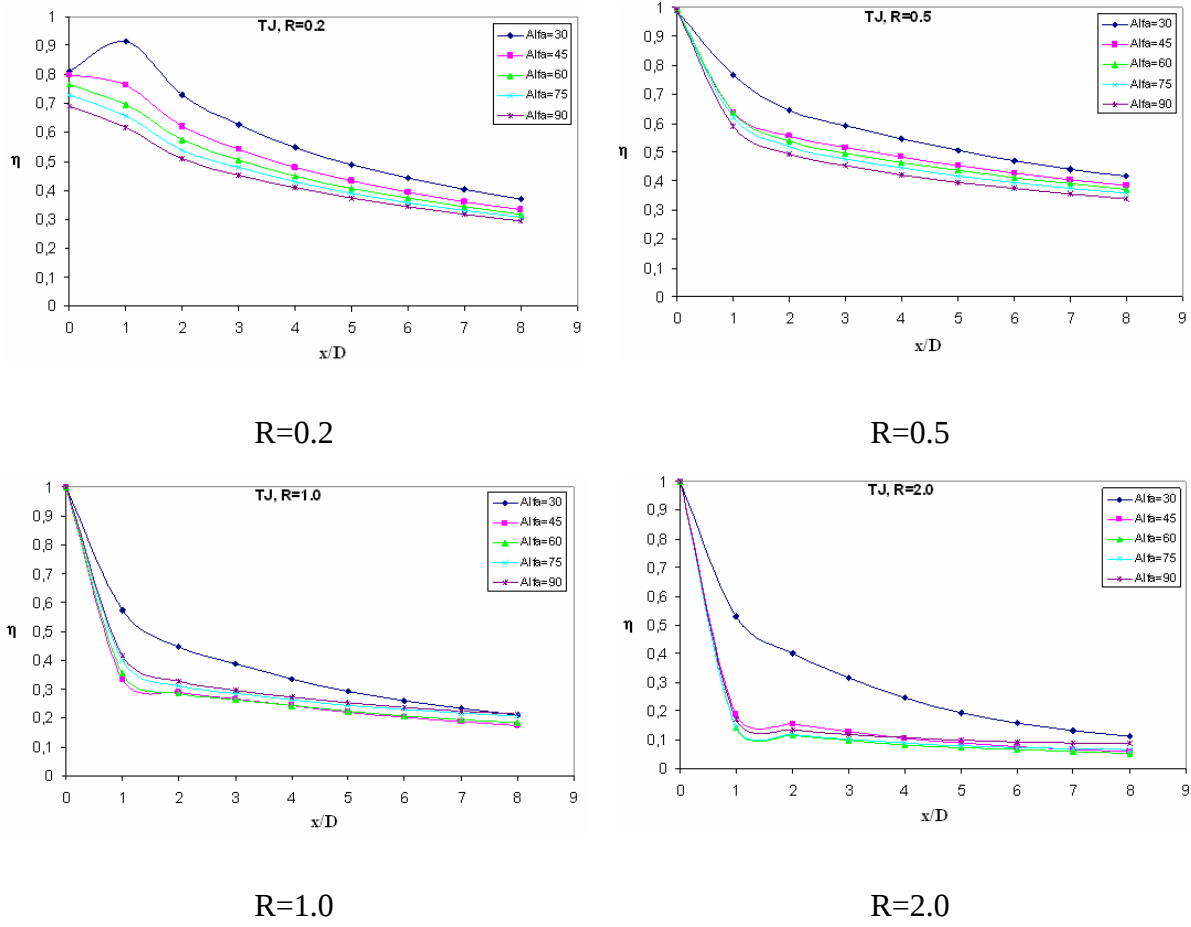
Eğim açısı arttıkça yani jet daha dik olarak kanala püskürtüldükçe, lüleden gelen soğuk hava daha fazla yayılma göstererek kanal yan çeperlerine ve ortasına taşınmaktadır. Film soğutmada önemli olan türbin kanadını zararlı sıcak gazlardan korumak olduğundan, soğuk havayı taşıyan jet akışının çeperden uzaklaşması istenen bir durum olmayacaktır. Bunun daha net olarak anlaşılmasını sağlayan Şekil 3.7'deki şekiller hız oranı $R=2.0$ için $y/D=1.5$ 'deki sıcaklık kontürleridir.



Şekil 3.7 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda eğim açısının sıcaklık alanı üzerindeki etkisi, $y/D=1.5$, $R=2.0$.

Görüldüğü gibi eğim açısı arttıkça lüleden kanala püskürtülen jet daha dik olarak kanal içerisine girmekte ve kanal üst çeperinden uzaklaşmaktadır. Oysa düşük eğim açılarında kanala girer girmez serbest akış yönüne akmaya başlayarak kanal üst çeperi üzerinde koruyucu bir film tabaka oluşturarak, sıcak türbin gazlarının kanat çeperine vereceği zarardan korumaktadır. Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda hız oranlarının ve eğim

açıların termal film soğutma verimi üzerindeki etkileri kanal simetri ekseninde boyutsuz kanal uzunluğu boyunca Şekil 3.8’de sunulmuştur.

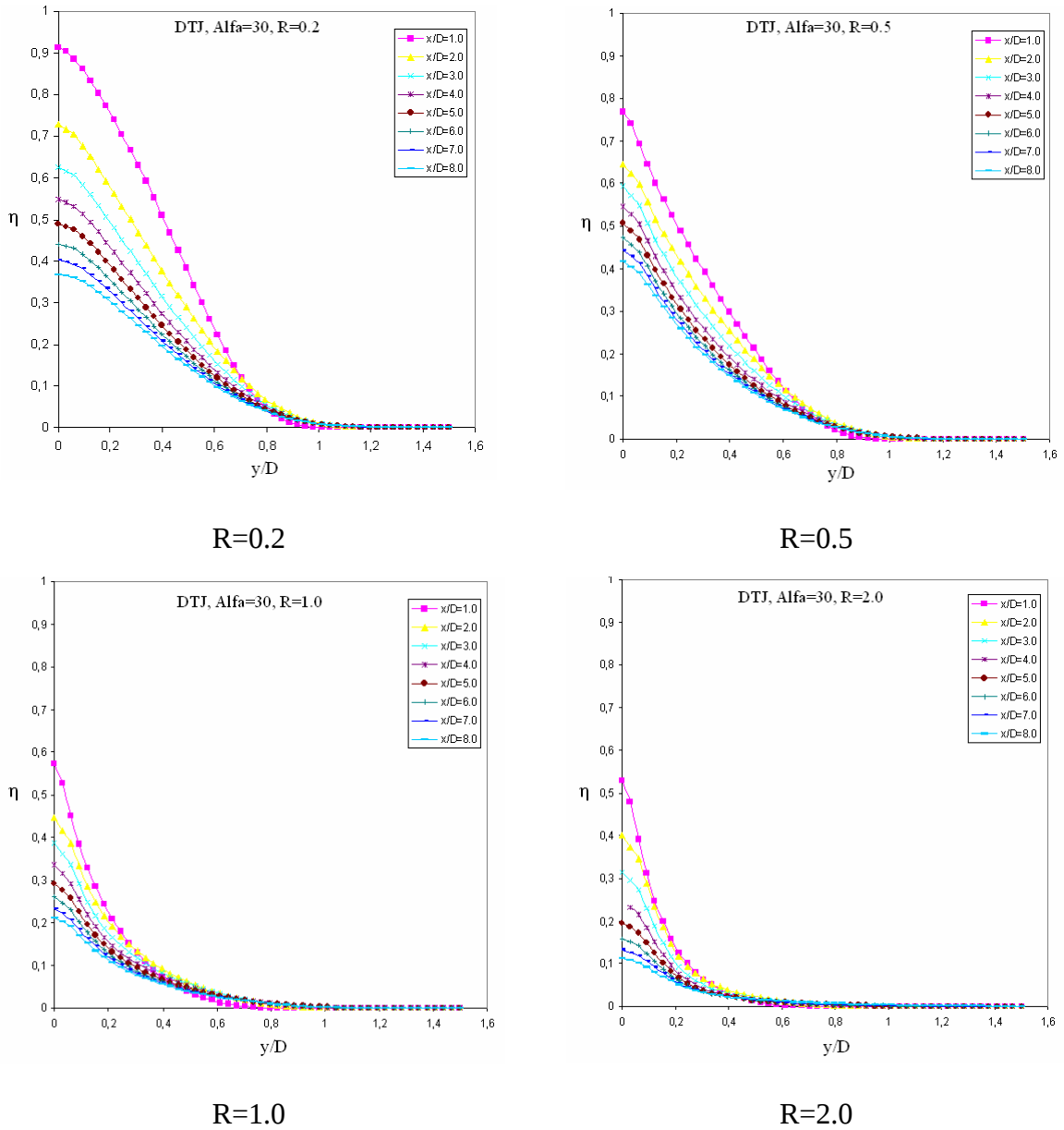


Şekil 3.8 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda farklı eğim açıları ve farklı hız oranlarında elde edilen boyuna film soğutma verimi değişimleri.

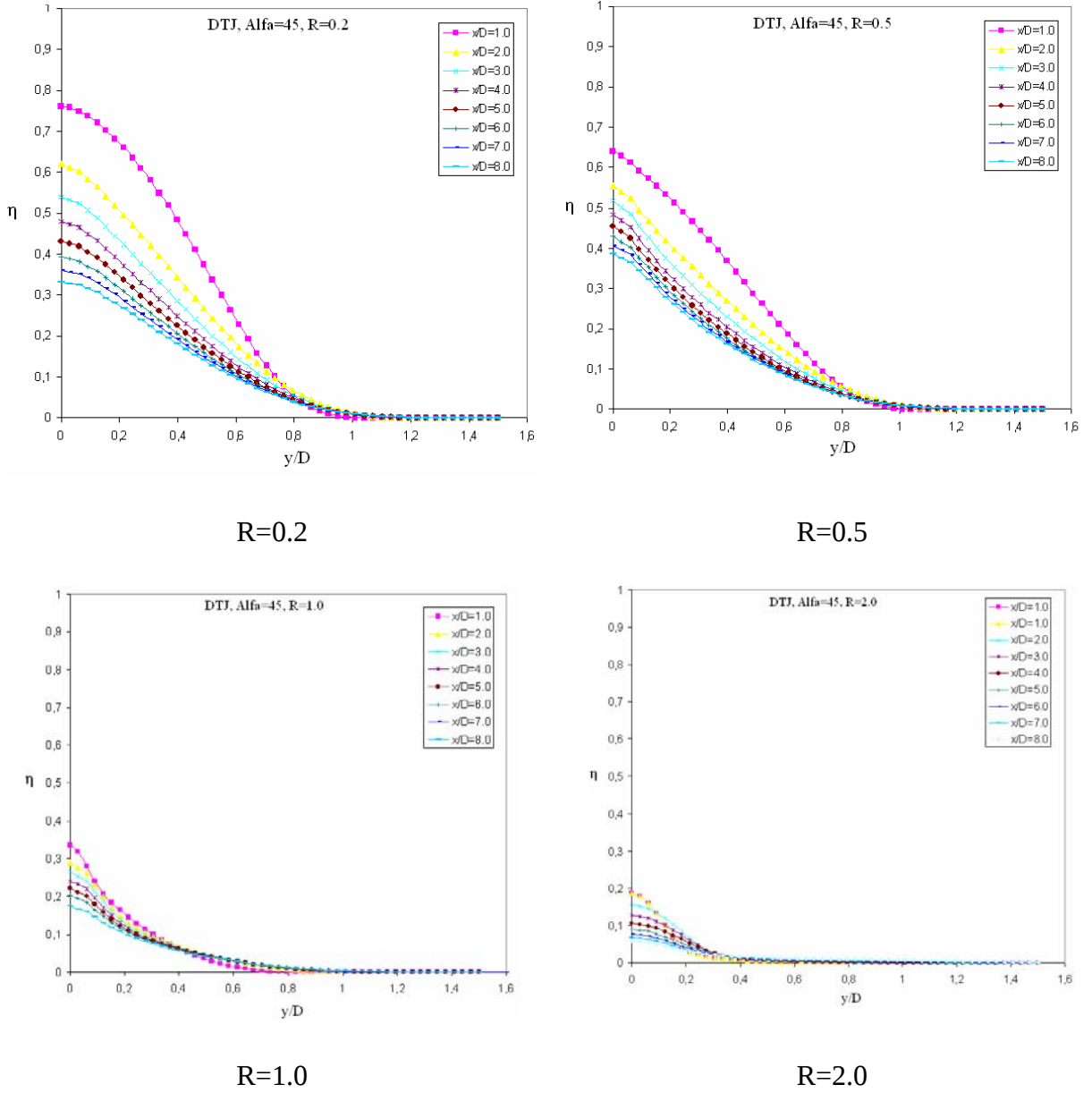
Şekil 3.8’de görülen grafiklerde dikkati çeken en önemli husus, hızların oranı R ’nin arttıkça termal verimin (η) özellikle $x/D=2.0$ ’ye kadar ani olarak azalması ve daha sonraki istasyonlarda da azalmaya devam etmesidir. Bütün eğim açıları için geçerli olan bu durum $\alpha=30^\circ$ için diğer eğim açılarından farklılık göstermektedir. $\alpha=30^\circ$ dışında bütün eğim açıları benzer bir davranış gösterirken bu eğim açısında elde edilen termal film soğutma verimi bütün hız oranları için daha üst değerlerde kalmıştır.

Özellikle $x/D=1.0$ ’den sonra $\alpha=30^\circ$ ’nin dışındaki tüm eğim açılarında elde edilen verimler birbirlerine çok yakın olup R ’nin artırılmasıyla bu yakınlık artmaktadır. Burada bütün hız oranlarında geçerli olmak üzere $\eta_{30^\circ} > \eta_{45^\circ} > \eta_{60^\circ} > \eta_{75^\circ} > \eta_{90^\circ}$ olduğu görülmektedir. Aynı şekilde belli bir eğim açısında düşük hız oranları daha yüksek termal verim sağlamıştır

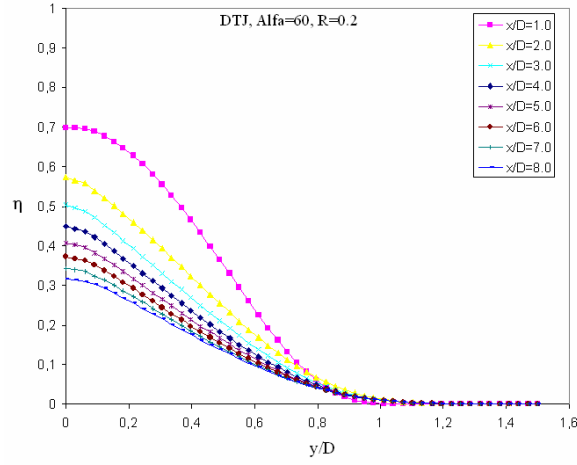
($\eta_{R=0.2} > \eta_{R=0.5} > \eta_{R=1.0} > \eta_{R=2.0}$). Kanalda serbest akış boyunca elde edilen termal film soğutma yanında lüleden püskürtülen jetin kanal yanal çeperlerine doğru yayılması sonucu elde edilen enine film soğutma verim değişimleri Şekil 3.9'da eğim açısı $\alpha=30^\circ$ için, Şekil 3.10'da $\alpha=45^\circ$ için, Şekil 3.11'de $\alpha=60^\circ$ için, Şekil 3.12'de $\alpha=75^\circ$ için ve nihayet Şekil 3.13'da ise $\alpha=90^\circ$ için dört farklı hız oranı ($R=0.2, 0.5, 1.0, 2.0$) ve dokuz farklı istasyon için ($x/D=0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0$ ve 8.0) ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği üzere en yüksek termal verim sırasıyla $\alpha=30^\circ$ için elde edilmiş olup eğim açısının artırılmasıyla termal film soğutma verimi kademeli olarak düşmüştür.



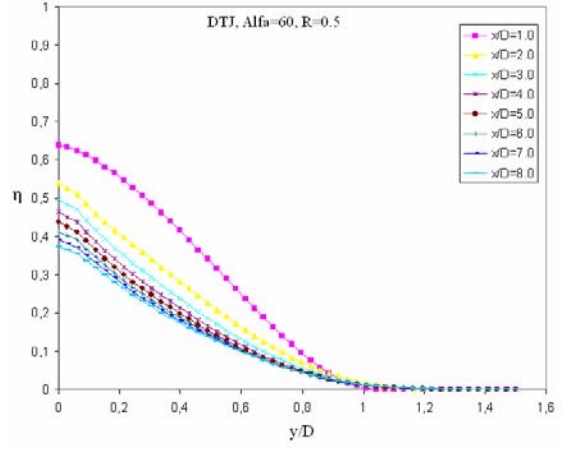
Şekil 3.9 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.



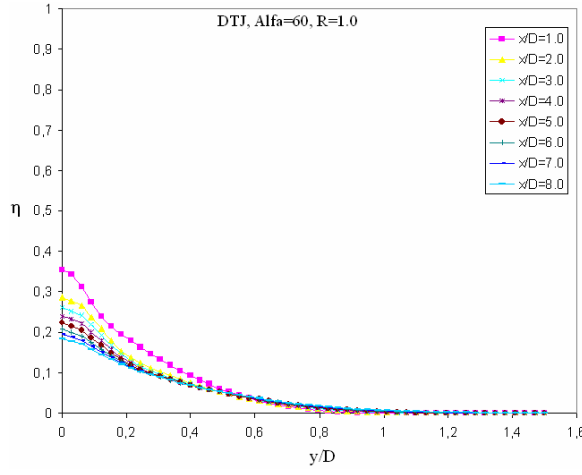
Şekil 3.10 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.



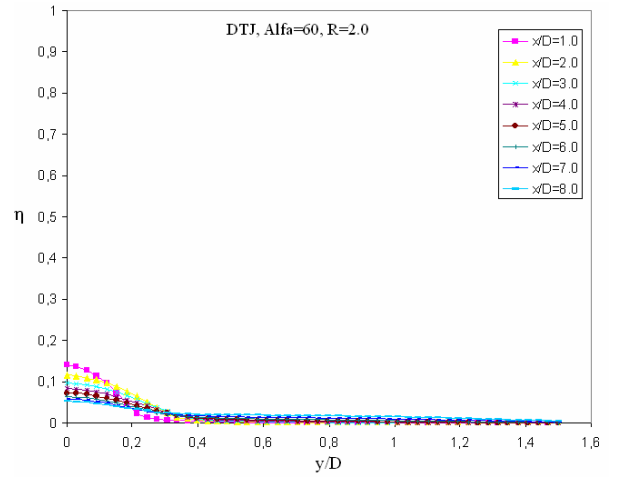
R=0.2



R=0.5

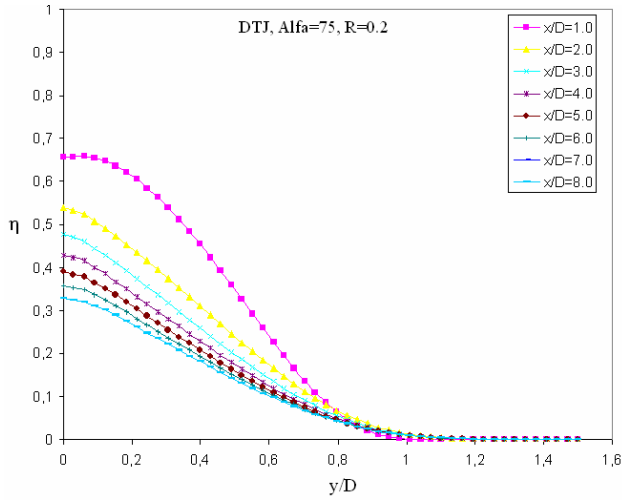


R=1.0

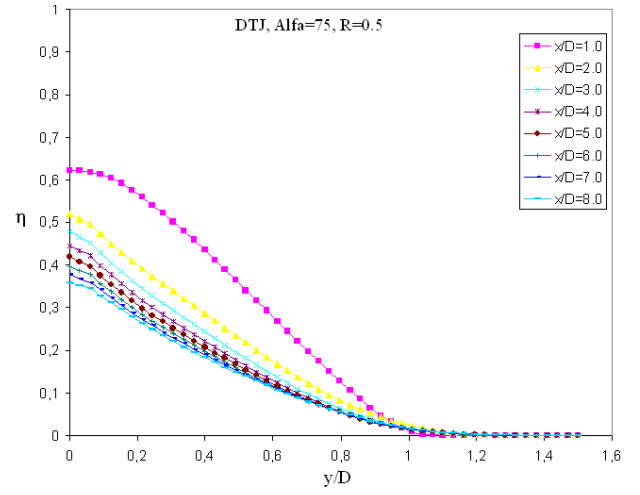


R=2.0

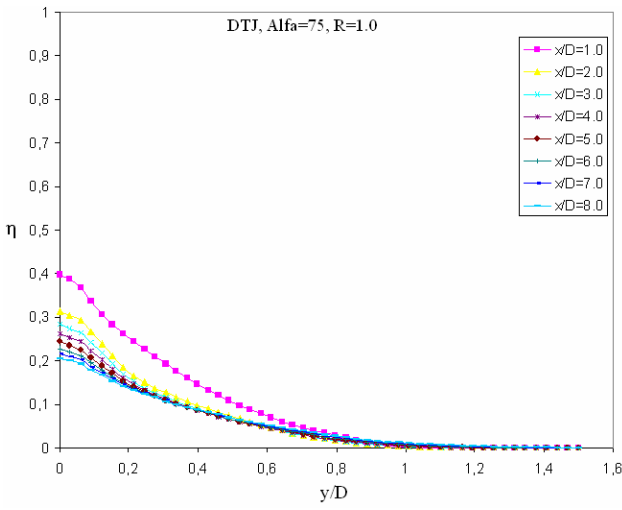
Şekil 3.11 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.



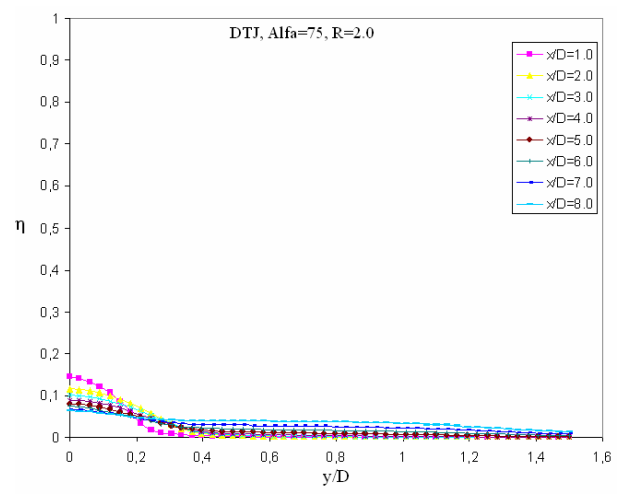
R=0.2



R=0.5

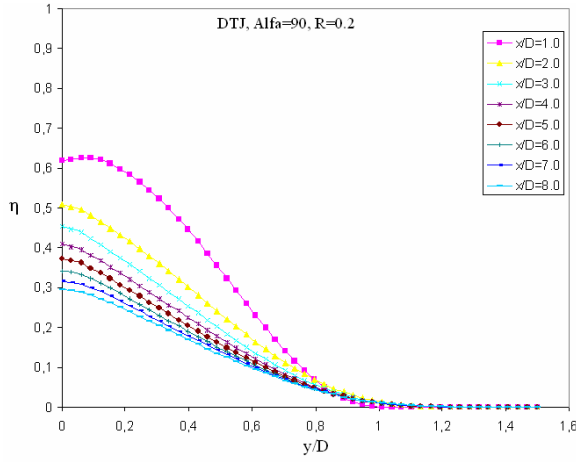


R=1.0

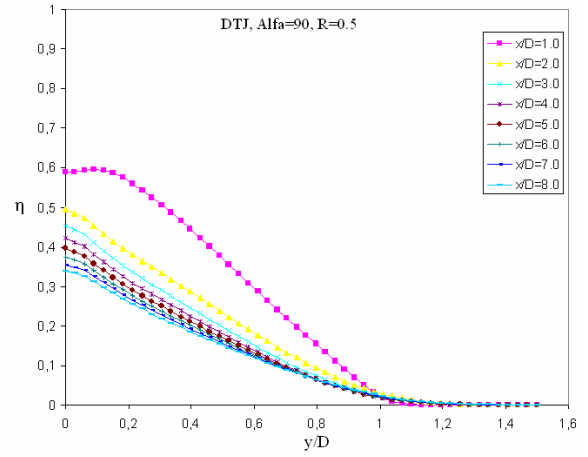


R=2.0

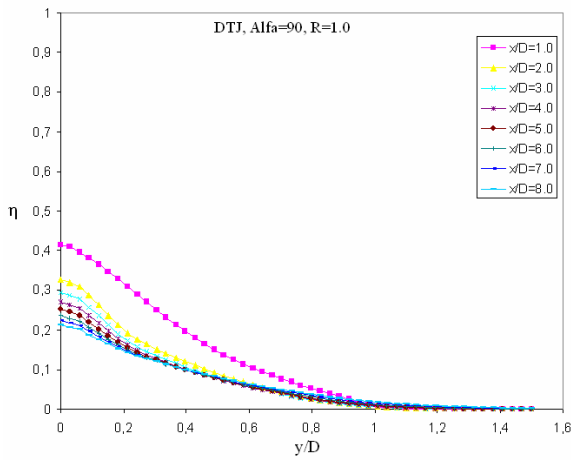
Şekil 3.12 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.



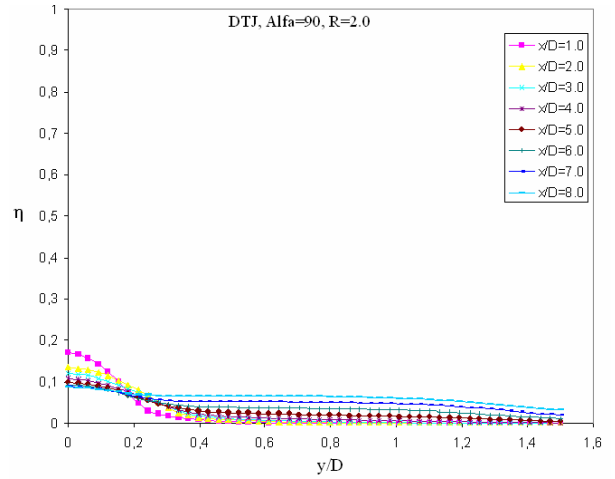
R=0.2



R=0.5



R=1.0



R=2.0

Şekil 3.13 Dairesel kesitli tek bir lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$ için kanal boyunca değişik istasyonlarda görülen enine film soğutma verimlerinin hız oranlarına göre değişimi.

3.1.2 Dairesel Kesitli Üç Lüle Kullanılması Durumunda Sıcaklık Dağılımları ve Termal Film Soğutma Verimleri

Tek bir lüle kullanmak yerine daha fazla lüle kullanmanın soğutma verimi üzerindeki etkisi Şekil 3.14'ten 3.18'e kadar olan şekiller incelendiğinde rahatlıkla görülmektedir. Her şeyden önce birden fazla soğutucu akışkanın püskürtüldüğü çok sayıda lüle kullanılması durumunda, soğutulacak yüzey artmasına rağmen soğutma yapacak akışkanın tek bir lüle kullanılması durumuna göre miktar olarak artmasına imkan vereceğinden, daha iyi bir soğutma yapılmasına yol açacaktır. Üç tane lüle kullanılmasıyla sıcak havanın akmakta olduğu kanala püskürtülen soğuk akışkan daha fazla yüzeyde etkili olmakta ve kanalın daha geniş bir

yüzeyinde kendini göstermektedir. Eğim açısının 75° , hız oranının ise 2.0 olması durumunda kanal üst çeperinden lüle çapı kadar kanal içerisine doğru inmek suretiyle farklı düşey mesafelerde alınan kesitlerin gösterildiği Şekil 3.14 incelendiğinde, lülelerden püskürtülen havanın serbest akış yönünde belli bir mesafeden sonra ($x/D=1.0$ 'de) birbirleriyle karışarak ve yüzey alanlarını akış yönünde daraltarak kanaldan çıktıkları görülür. $0.2D$ ve $0.3D$ gibi farklı mesafelerle kanal içerisindeki akış incelendiğinde üst çeperden kanal içerisine doğru lülelerden çıkan soğuk havanın daha ilk lüle çıkışından sonra birbirleriyle karışmaya başladıkları ve kanal içerisine nüfuz ettikçe, yanal çeperlere ($\pm y/D$) doğru yayılarak daha geniş bir yüzeyde aktıkları saptanmıştır.

Şekil 3.15'de ise yüksekliğine kesitte kanal ile lüleler arasındaki eğim açısının sıcaklık alanı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Buradaki mukayese hızların oranı $R=2.0$ için tek bir istasyonda ($z/D=5.3$) yapılmıştır. En düşük eğim açısı olan $\alpha=30^\circ$ 'de ortadaki (merkez) lüleden çıkan soğuk gaz, yanal kenarlara yakın duran diğer iki lüleden çıkan gazlara oranla serbest akım yönünde daha fazla yayılma gösterirken, en büyük eğim açısında ($\alpha=90^\circ$) ise diğerleriyle hemen hemen aynı hızda ilerlemektedir. Burada dikkati çeken en önemli husus, eğim açısı arttırıldıkça lülelerden çıkan gazların daha geniş bir yüzeyde yayılmaya başlamalarıdır. Eğim açısı arttıkça lülelerden püskürtülen soğuk hava kanaldan akmakta olan serbest akış yönünden ziyade yanal kenarlara doğru fazla yayılmakta ve yanal soğutma veriminin artmasına katkıda bulunmaktadır. Sıcaklık kontürleri incelendiğinde taşınan sıcaklık alanının lülelerden sonra görülen akış ayrılması ve dönme bölgelerinin etkisinde kaldığı görülecektir.

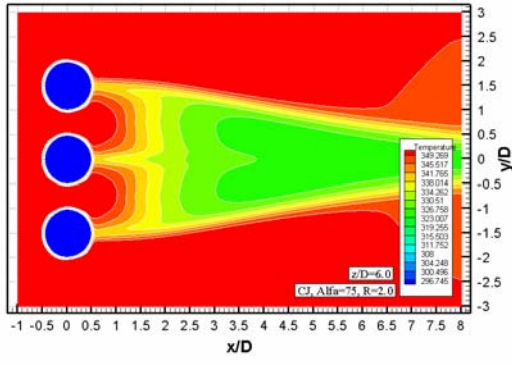
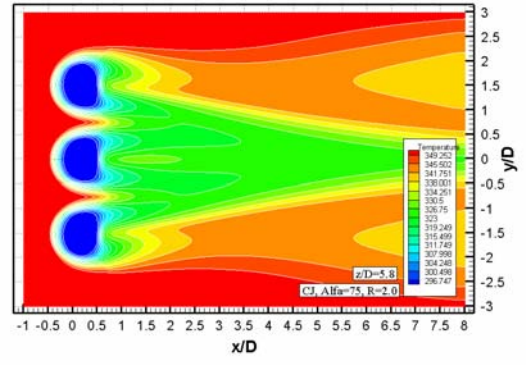
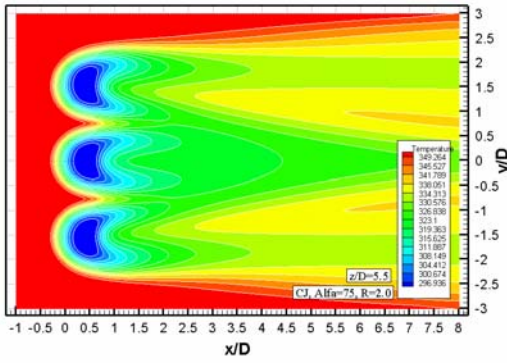
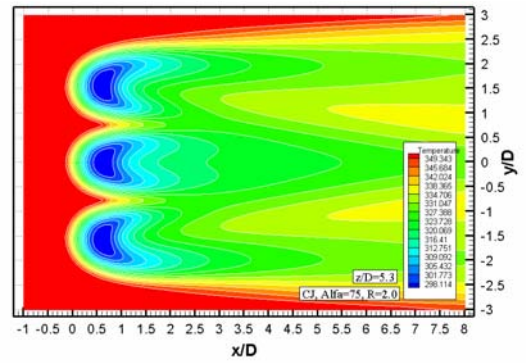
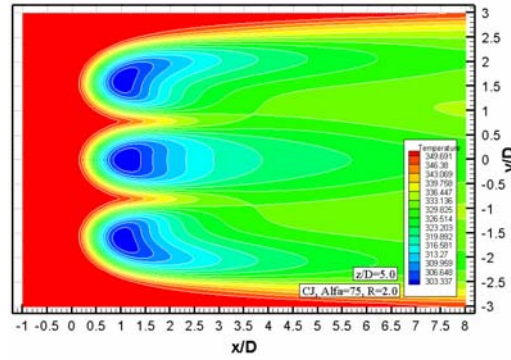
Dairesel kesitli çoklu lüle kullanılması durumunda oluşan sıcaklık alanını çapraz akış yönünde alınan farklı enine kesitlerde ($x/D=0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ ve 6.0) gösteren sıcaklık kontürleri $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$ için Şekil 3.16'da gösterilmiştir. İlk istasyon olan $x/D=0.0$ 'da lülelerden kanala püskürtülen soğuk hava henüz kanalda akmakta olan serbest akış etkisine girmemiş olduğundan, dik olarak kanala girmekte ve gerek z/D yönünde gerekse de y/D yönlerinde çok düşük yayılma göstermektedir. Bu ilk istasyonda henüz bir karışımdan bahsedilmediğinden soğuk havanın etkisi sadece lüle etrafında görülmektedir. Ancak ikinci istasyon olan $x/D=1.0$ 'de lülelerden püskürtülen soğuk hava kanaldan akmakta olan sıcak havanın momentumunun etkili olmaya başlamasından dolayı, çapraz akış yönünde eğilmeye başlayarak bu yönde karışmaya başlamıştır.

Kanal boyunca alınan diğer kesitler, çoklu lülelerden kanaldaki sıcak hava ortamına püskürtülen soğuk jetlerin artık beraber hareket ederek hem z/D yönünde hem de y/D yönlerinde daha fazla alana nüfuz ettiklerini göstermektedir. Kanal boyunca alınan ve sıcaklık kontürlerinin değişimini gösteren bu şekillerde lülelerden çıkan soğuk havanın ana ZDGÇ'nin etkisinde kalarak onun kesit şeklini aldığı gözlenmektedir. Gerek yüksekliğine (z/D) gerekse de enine (x/D) kesitlerde gösterilen sıcaklık kontürleri, sıcaklık alanının bu girdap yapılarına ne kadar bağlı olduğunu göstermesi açısından önem arz etmektedir.

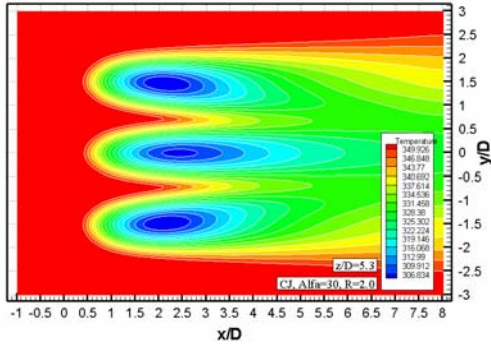
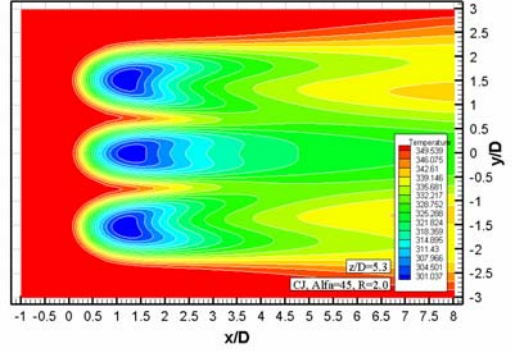
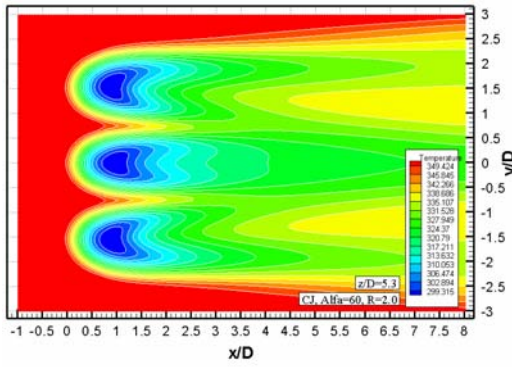
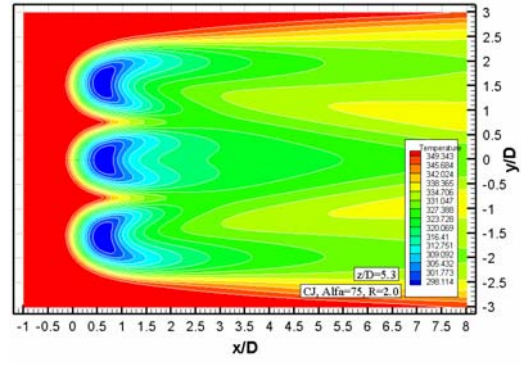
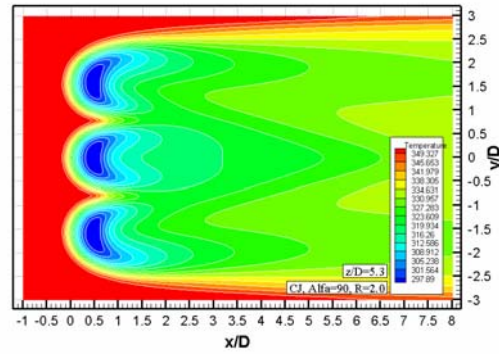
Şekil 3.17 hız oranı $R=2.0$ için kanal ortasındaki $x/D=3.0$ no'lu istasyonda farklı eğim açılarının sıcaklık alanı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Düşük açılarda kanal üst çeperine oldukça yakın akarak, sıcak hava ile kanal üst çeperi arasında olası bir ısı transferine engel olacak bir film tabakası meydana getiren soğuk hava, eğim açısının arttırılmasıyla daha dik bir şekilde kanala girmekte ve kanal üst çeperinden uzaklaşarak kanal ortasında taşınmaktadır. Bu durum ise film soğutma verimini düşüreceğinden arzu edilen bir durum değildir.

Şekil 3.18'de dairesel kesitli yan yana üç lüle kullanılması halinde enine kesitlerdeki ($x/D=3.0$) sıcaklık kontürlerinin dağılımı, hız oranları $R=0.2, 0.5, 1.0$ ve 2.0 için gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hız oranı arttırıldıkça ZDGÇ'nin merkezinin koordinatlarının değişmesine paralel olarak, soğuk hava gerek kanalın yanal çeperlerine gerekse kanal ortasına doğru olacak şekilde taşınmaktadır. Bu bakımdan hızın arttırılması sıcak olan çapraz akışın kanal üst çeperine nüfuz etmesine sebep olacağından istenen bir durum değildir.

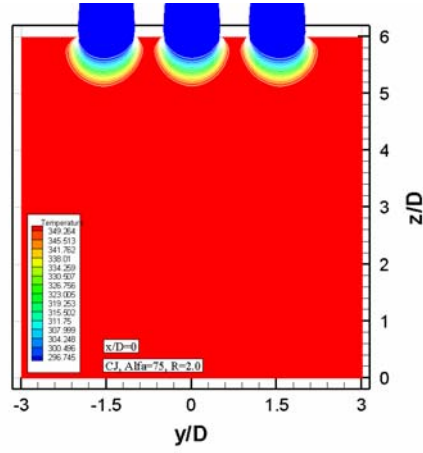
Yan yana yerleşik üç tane dairesel kesitli lüle kullanılması durumunda enine kesitlerde (x/D) değişik istasyonlardaki sıcaklık kontürleri ile görsel olarak saptanan sıcaklık alanının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi Şekil 3.19'da eğim açısı $\alpha=30^\circ$ ve hızların oranı $R=0.2, 0.5$ ve 2.0 için sekiz farklı istasyonda ($x/D=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0$ ve 8.0) gösterilmiştir. Bütün hız oranlarında geçerli olmak üzere lüleden hemen sonraki ilk istasyonlara ait yanal film soğutma verimi daima yüksek olmakta ve kanal çıkışına doğru bu verim değerleri kademeli olarak azalmaktadır. İlk istasyonlardan sonra sıcak hava ile karışmaya başlayan ve kanal içerisine daha fazla nüfuz eden soğuk hava, karışımdan dolayı sıcak hava ile arasında ısı transferi olmakta ve soğutucu özelliğini kaybetmektedir.

 $z/D=6.0$  $z/D=5.8$  $z/D=5.5$  $z/D=5.3$  $z/D=5.0$

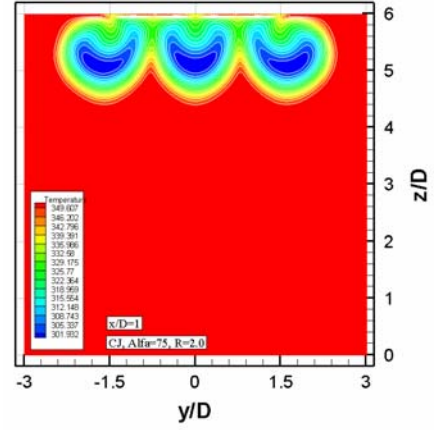
Şekil 3.14 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda sıcaklık kontürlerinin kanal üst çeperinden 1.0D kadar kanal içerisindeki farklı istasyonlardaki değişimi, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$.


 $\alpha=30^\circ$

 $\alpha=45^\circ$

 $\alpha=60^\circ$

 $\alpha=75^\circ$

 $\alpha=90^\circ$

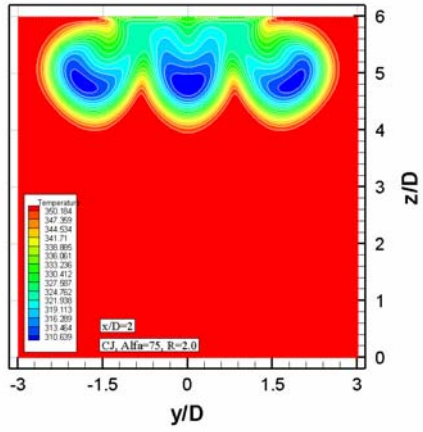
Şekil 3.15 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda eğim açısının sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $z/D=5.3$.



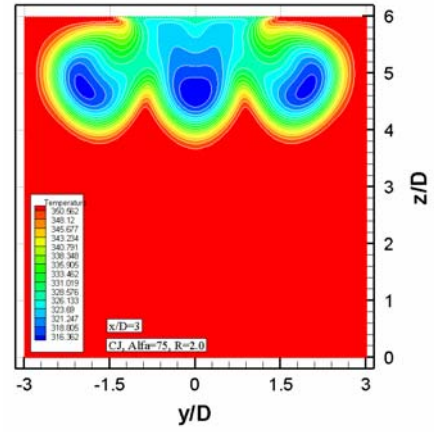
x/D=0.0



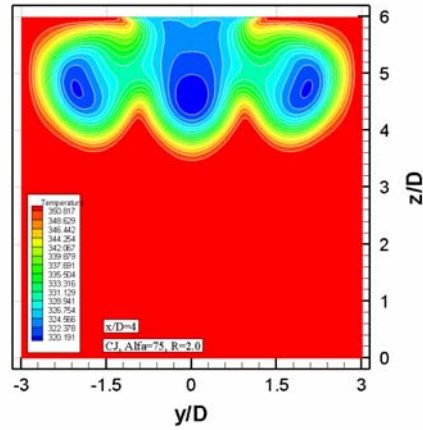
x/D=1.0



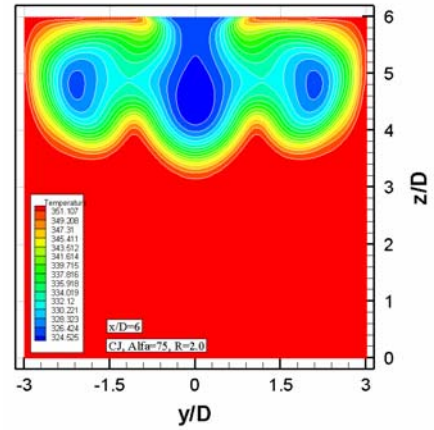
x/D=2.0



x/D=3.0

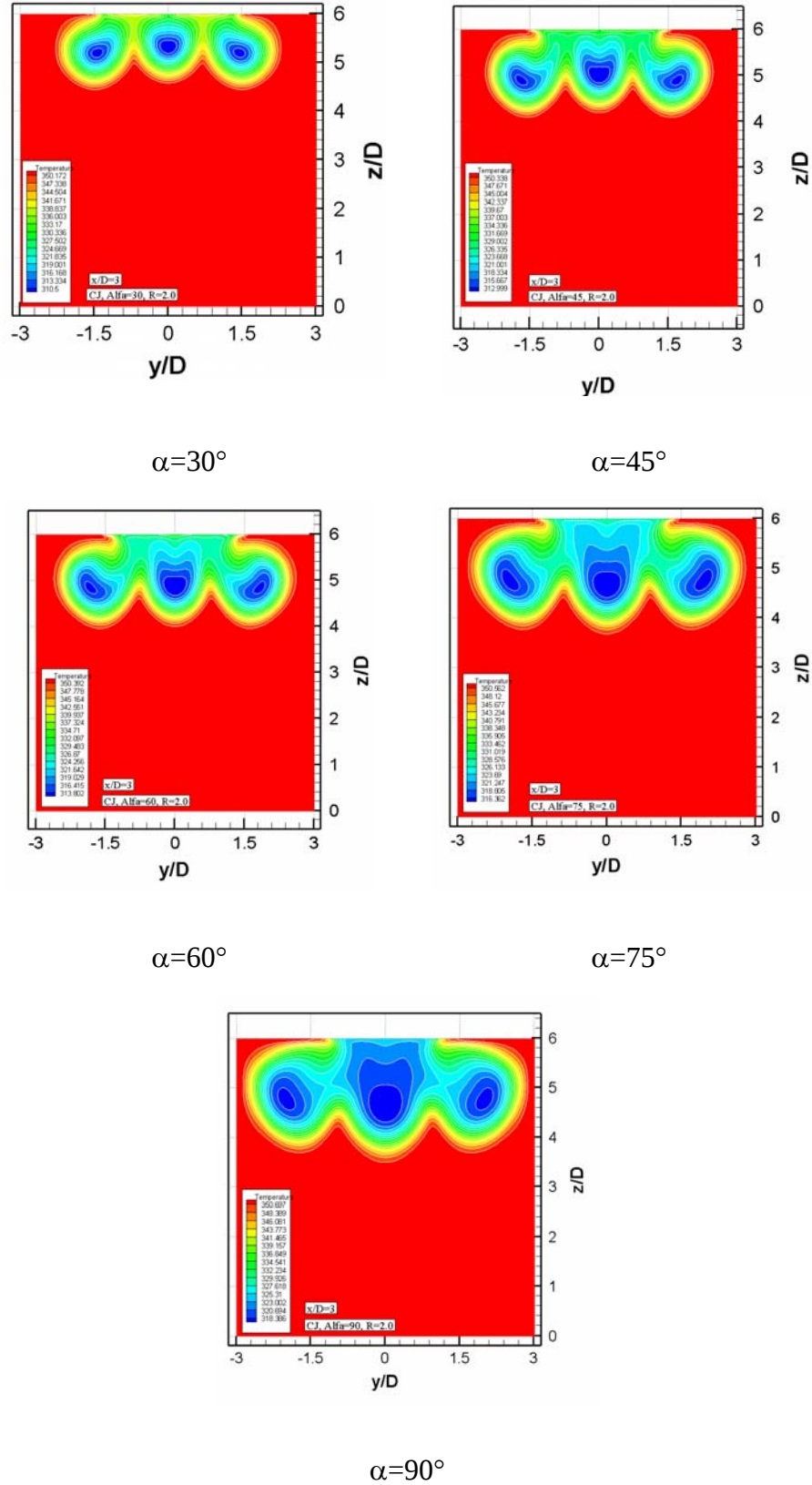


x/D=4.0

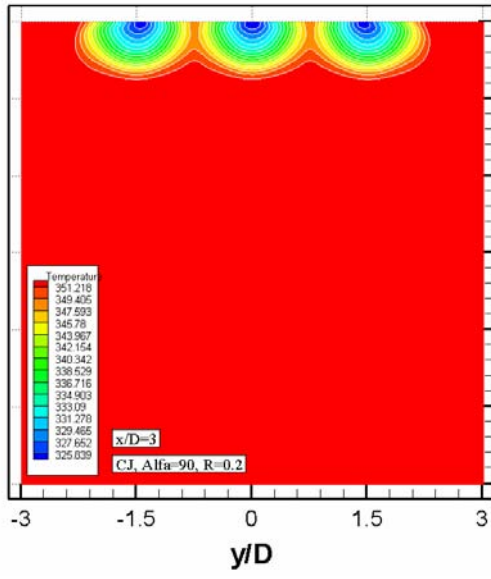


x/D=6.0

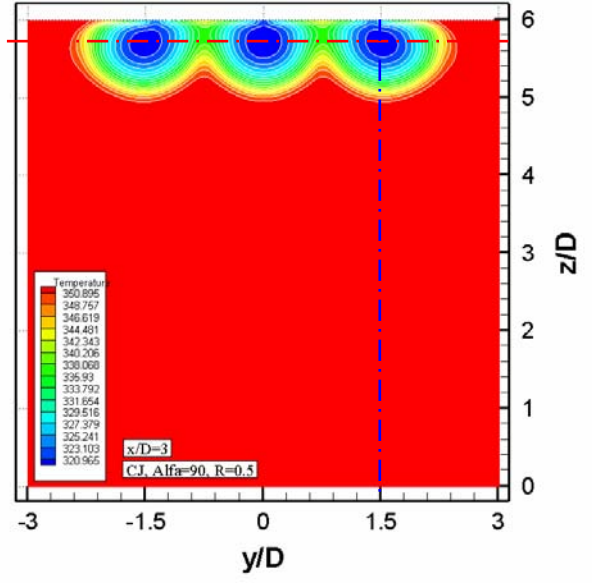
Şekil 3.16 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda sıcaklık değişimlerinin lüle girişinden kanal çıkışına doğru değişik istasyonlardaki enine değişimi, $\alpha=75^\circ$, $R=2.0$.



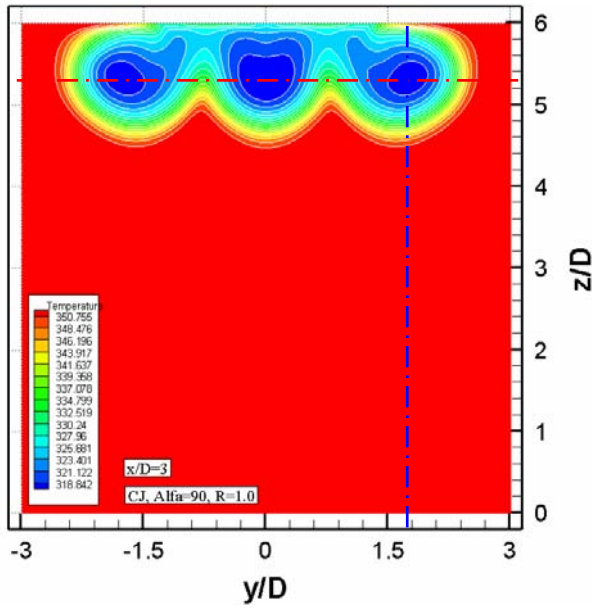
Şekil 3.17 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda eğim açısının enine kesitlerdeki sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $R=2.0$, $x/D=3.0$.



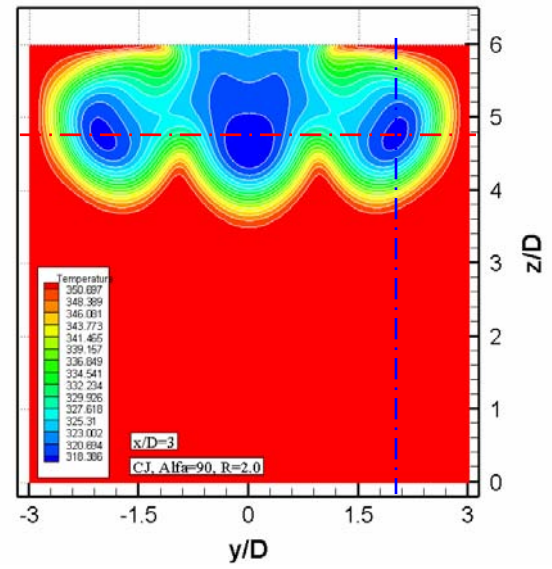
R=0.2



R=0.5

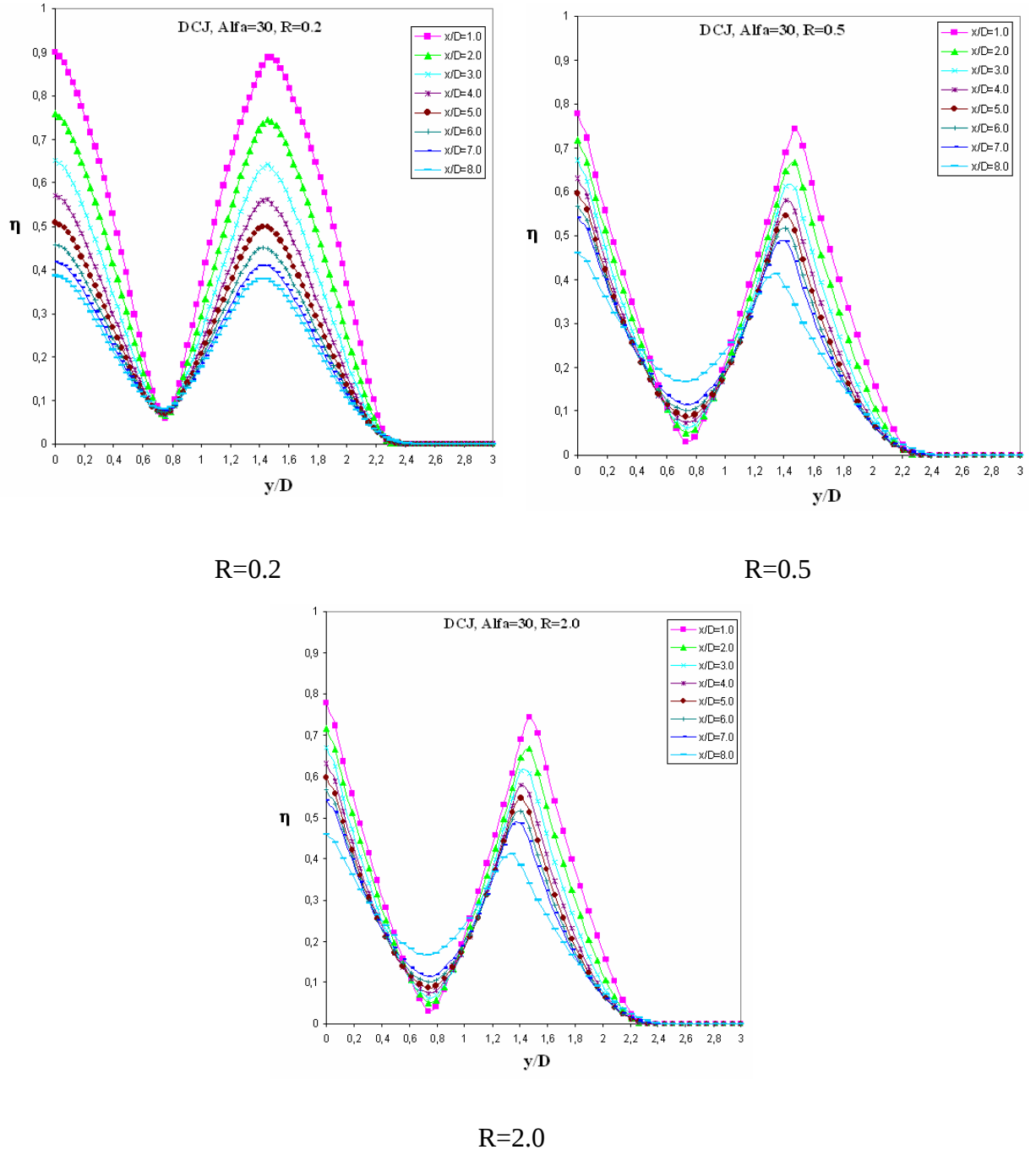


R=1.0

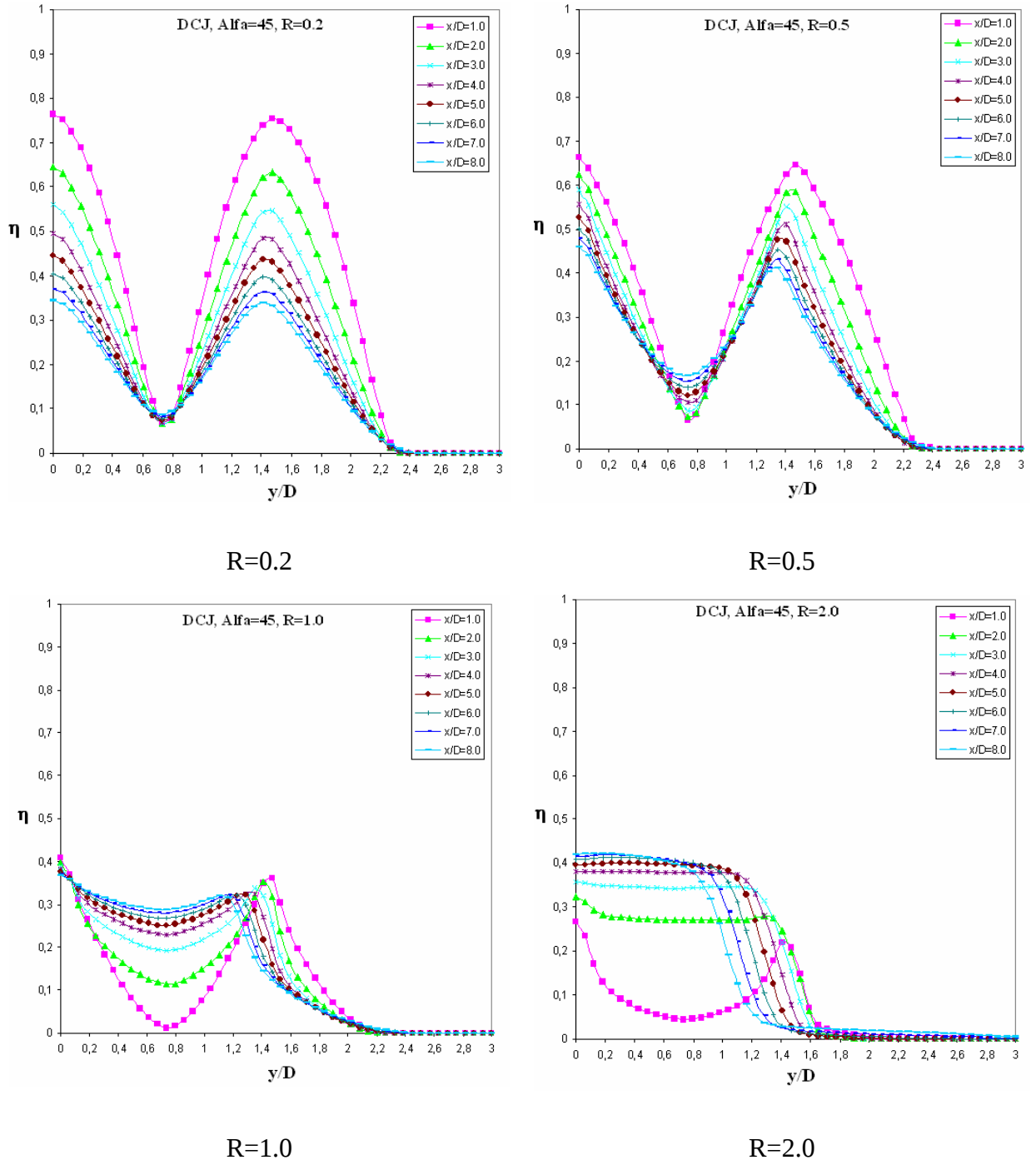


R=2.0

Şekil 3.18 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda hız oranlarının enine kesitlerdeki sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$, $x/D=3.0$.



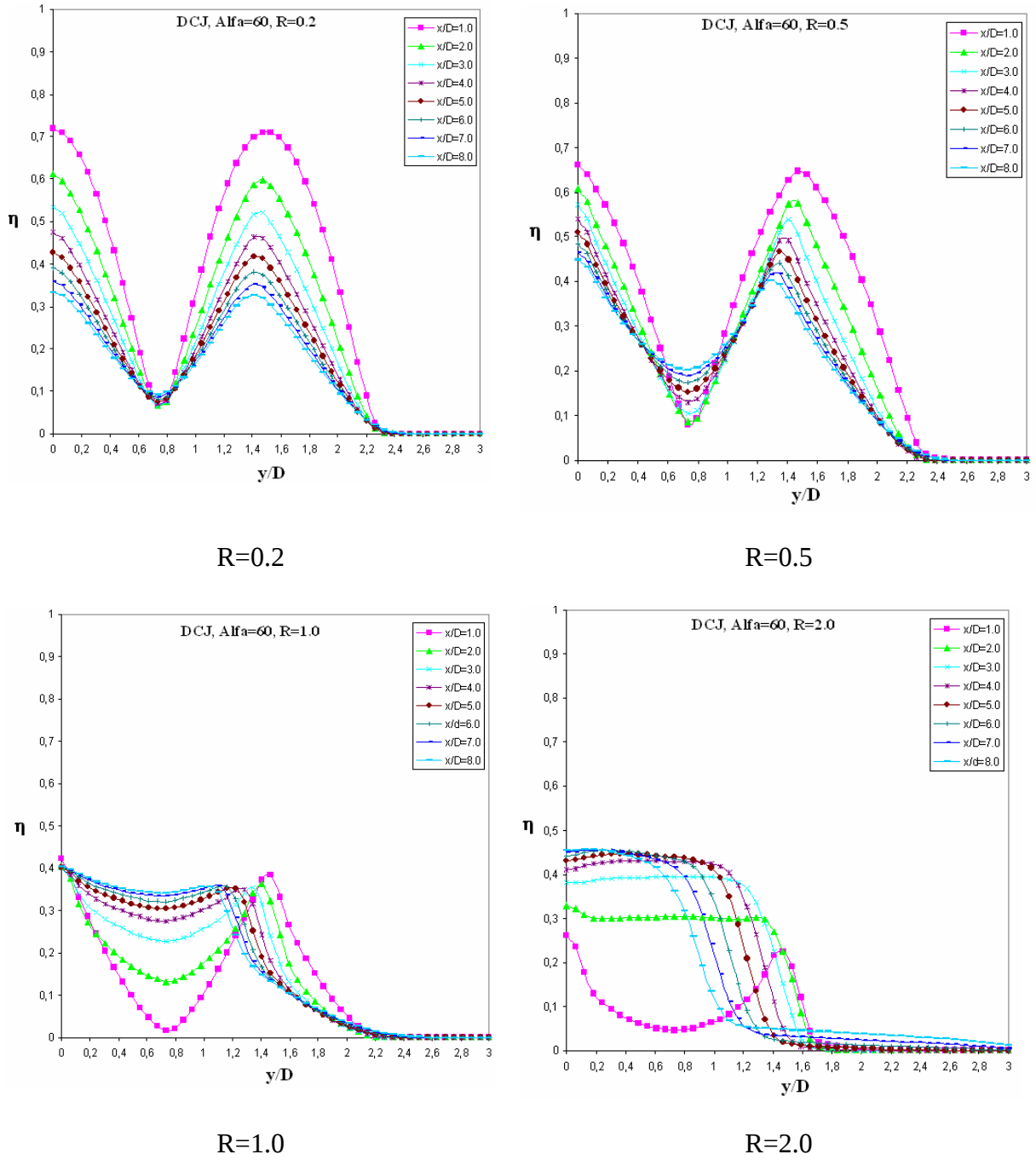
Şekil 3.19 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=30^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.



Şekil 3.20 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=45^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.

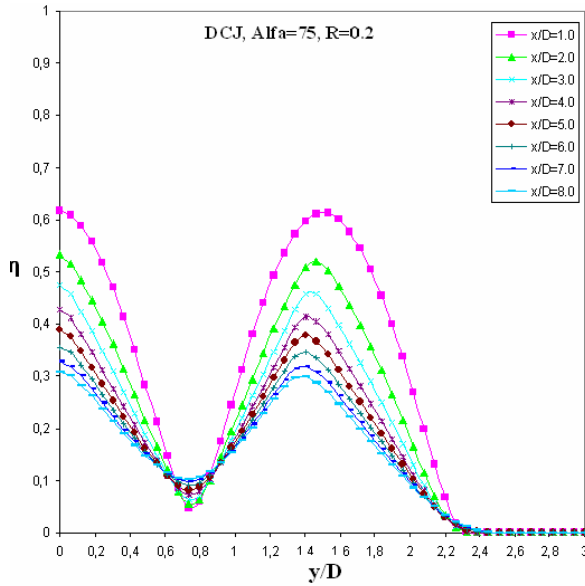
Hız oranlarının artırılmasıyla bütün istasyonlarda termal yanal film soğutma veriminin düştüğü de açıkça görülmektedir. Verim ifadesinin hız oranlarına göre sıralaması şu şekilde yapılabilir: $\eta_{R=0.2} > \eta_{R=0.5} > \eta_{R=1.0} > \eta_{R=2.0}$.

Ancak eğim açısı 30° 'ye ait yanal film soğutma verimlerinin değişik istasyonlardaki şekli bütün hız oranlarında benzer iken bu durum eğim açısı 45° 'den sonra bütün hız oranları için geçerli olmamaya başlamıştır. En düşük eğim açısında bütün istasyonlara ait termal film soğutma verimi 0.1'in altına düştükten sonra yanındaki lüleden çıkan soğuk hava ile karşılaşması sebebiyle tekrar verimin yükselmesine sebep olmuş ve nihayet yanal çeperlerde etkisini kaybederek 0 değerine inmiştir.

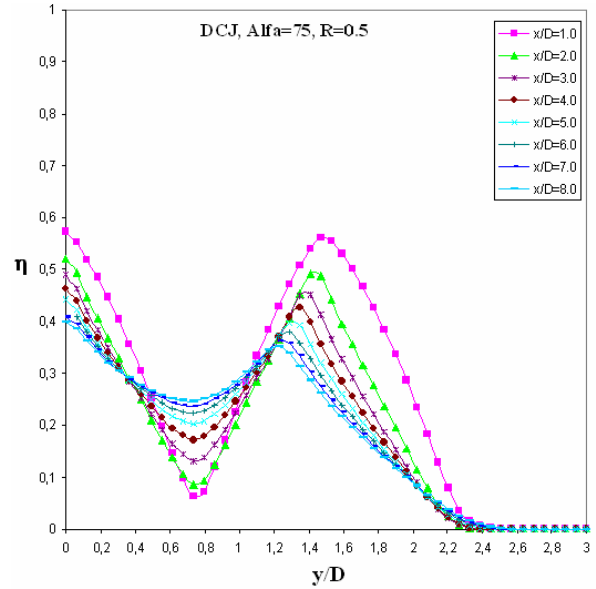


Şekil 3.21 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=60^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.

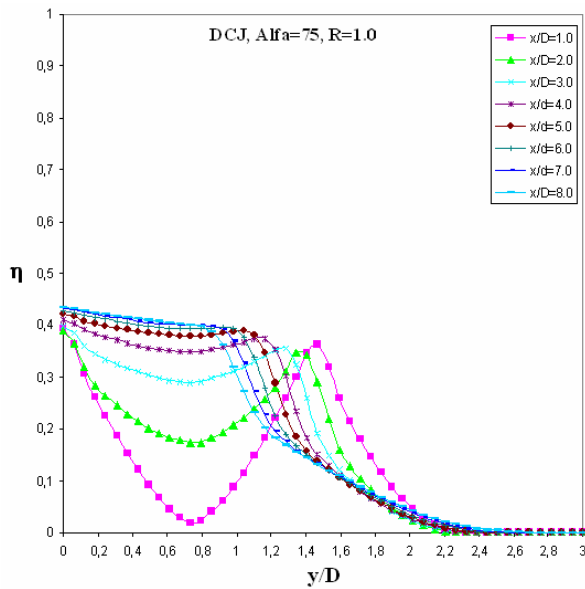
$R=0.2$ hız oranı için bu durum, bütün eğim açılarında ilk istasyon için geçerlidir. Belli bir noktadan sonra lülelerden püskürtülen soğuk havanın birbirleriyle karışmasından dolayı soğutma verimi tekrar yükselmektedir. $R=0.5$ 'te ise daha farklı bir durum göze çarpmaktadır. Bu hız oranında $0.3 < y/D < 1.2$ arasında son istasyonlara ait termal verimlerin daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu bölgeden sonra termal verim ilk istasyonlardan itibaren artmaktadır.



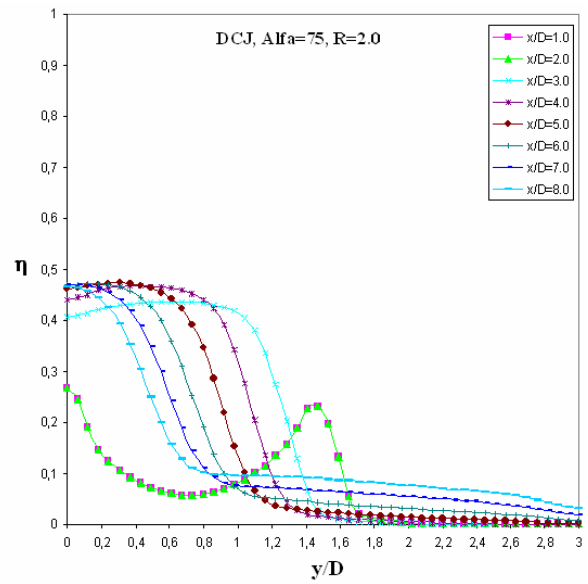
R=0.2



R=0.5

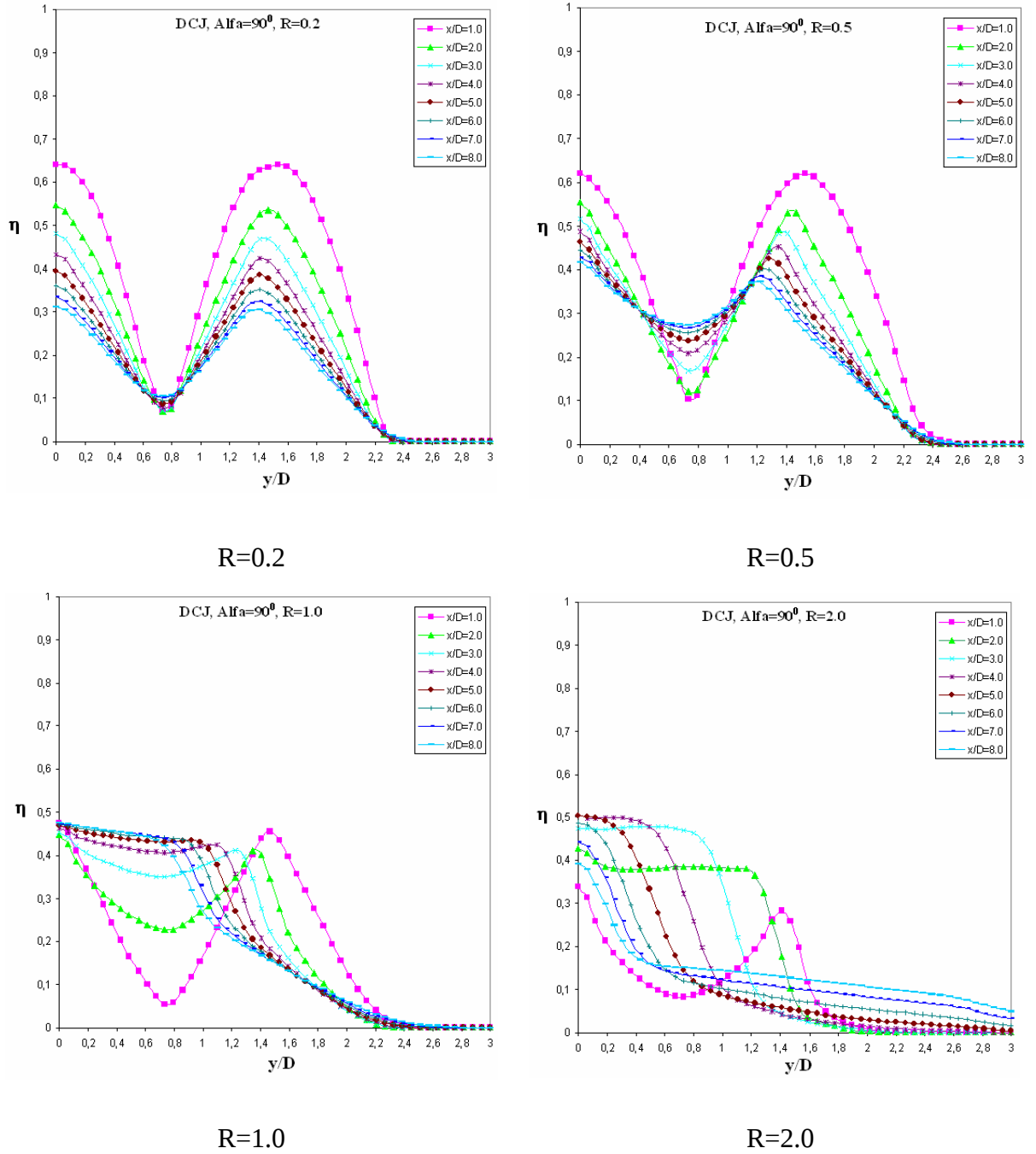


R=1.0



R=2.0

Şekil 3.22 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=75^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.



Şekil 3.23 Dairesel kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.

Hız oranının artırılmasına bağlı olarak bu durum daha belirgin olmaktadır. Sıcaklık kontürlerinden de görüleceği üzere soğuk hava kanaldaki serbest akış yönünde daha ilerideki istasyonlara taşınmaktadır. $R=1.0$ 'den itibaren $\alpha=45^\circ$, 60° , 75° ve 90° eğim açıları için geçerli olmak üzere diğer hız oranlarında görülen değişimlerden daha farklı bir verim dağılımı görülmektedir (Şekil 3.20'den 3.23'e kadar olan grafikler). Bu hız oranında verim değerleri

$\eta_{x/D=8.0} > \eta_{x/D=7.0} > \eta_{x/D=6.0} > \eta_{x/D=5.0} > \eta_{x/D=4.0} > \eta_{x/D=3.0} > \eta_{x/D=2.0} > \eta_{x/D=1.0}$ şeklinde iken $y/D=1.5$ 'ten sonra tersine dönmektedir. Benzer bir durum $R=2.0$ için de söylenebilir.

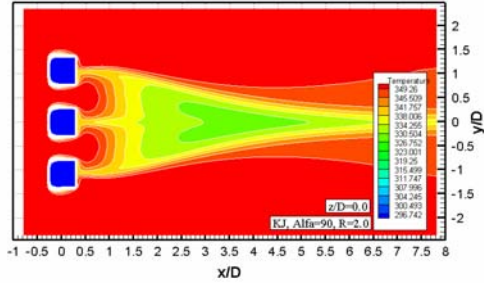
3.1.3 Kare Kesitli Üç Lüle Kullanılması Durumunda Sıcaklık Dağılımları ve Termal Film Soğutma Verimleri

Kare kesitli yan yana üç tane lüle kullanılması durumunda yüksekliğine kesitlerdeki farklı istasyonlara ait sıcaklık kontürleri Şekil 3.24'te $\alpha=90^\circ$ ve $R=2.0$ için gösterilmiştir. Buradaki şekillerde gösterilen istasyon isimleri dairesel kesitli sıcaklık kontürleri gösterilirken kullanılan istasyon isimlerinden farklıdır. Bunun nedeni kare kesitli lüle kullanılması durumunda koordinat merkezinin farklı olarak yerleştirilmiş olmasıdır. Ancak kanal içerisine aynı oranlarda girilerek kesitler alındığından, aynı istasyonlardaki kontürler gösterilmiş olmaktadır. Dairesel kesitli üç tane yan yana lüle kullanılması durumunda oluşan sıcaklık kontürlerini gösteren Şekil 3.14 tekrar incelendiğinde, kare kesitli lüle kullanılması daha farklı sıcaklık yayılımına sebep olduğu saptanacaktır. Her şeyden önce aynı hidrolik çapa sahip olmalarına rağmen $((D_h)_{daire}=(D_h)_{kare}=D)$, kare kesitli lüle kullanılması soğuk havanın daha dar bir alanda karışarak kanal boyunca ilerlemesine yol açmıştır. Dairesel kesitli üç tane yan yana lüle kullanılmasına göre meydana gelen bu farklılık bütün yüksekliğine kesitlerde geçerli olmaktadır. Dairesel kesitli lüle kullanılmasına nazaran kare kesitli lüle kullanılması halinde, lülelerden kanala püskürtülen soğuk hava hem x/D hem de y/D yönlerinde daha az karışmakta ve daha düşük termal verime neden olmaktadır.

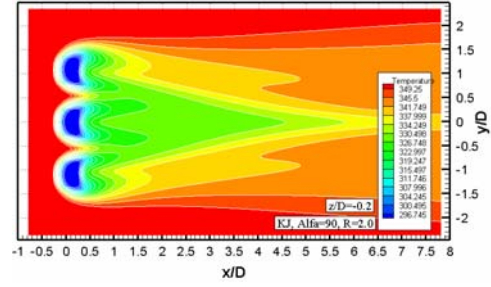
Tek bir enine kesitte ($x/D=3.0$) hız oranının kare kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda sıcaklık kontürleri üzerindeki etkisi Şekil 3.25'te verilmiştir. Lülelerden kanala püskürtülen soğuk havanın kanal içerisinde hem y/D hem de z/D yönlerindeki dağılım ve karışımlarını gösteren bu şekil, kare kesitli lüle kullanılması halinde hem yanal hem de derinliğine yayılmanın daha az olduğunu göstermektedir. Böyle bir sıcaklık dağılımının ise daha yüksek termal verim değerlerini sağlayacağı açıktır. $R=0.5$ 'te $y/D=1.1$, $z/D=0.2$ olan merkez, daha yüksek hız oranlarında $y/D=1.2$, $z/D=0.3$ 'e ve nihayet $y/D=1.4$, $z/D=1.0$ 'e taşınmaktadır. Bu durum ise ZDGÇ ile doğrudan ilgili olup soğuk havanın bu girdap yapısı ile taşındığını göstermektedir.

Kare kesitli lülelerdeki sıcaklık kontürlerinin y/D yönlerindeki yayılmasına dikkat edildiğinde, yanal çeperlere doğru daha az yayılmadan dolayı aynı eğim açısı ve aynı hız oranlarından dairesel kesitli lüle kullanılması durumuna göre daha düşük yanal termal film verimi sağladığı görülecektir. Her bir istasyondaki termal verim ifadeleri her iki lüle kesidi

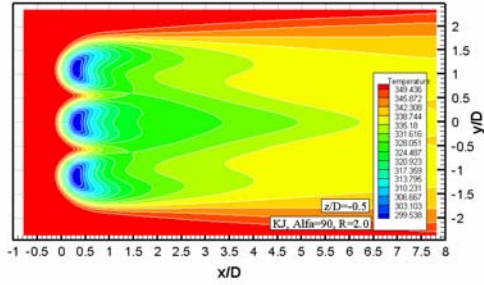
(kare kesitli ve dairesel kesitli lüleler) için benzer karakteristiği göstermekte ise de, kare kesitli lüle kullanılması durumunda bütün hız oranları için daha düşük termal film soğutma verim değerleri elde edilmiştir



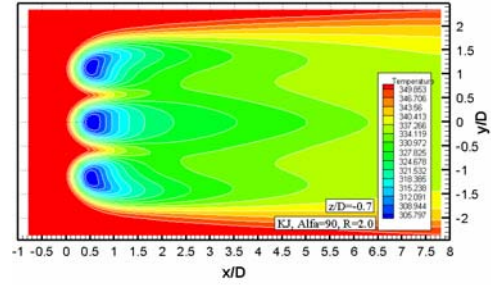
$z/D=0.0$



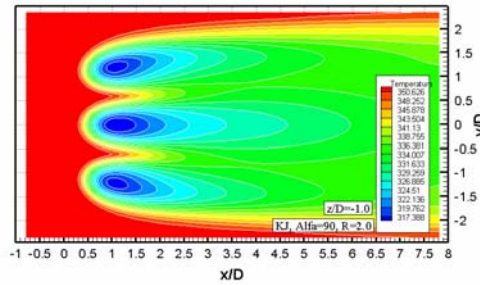
$z/D=0.2$



$z/D=-0.5$

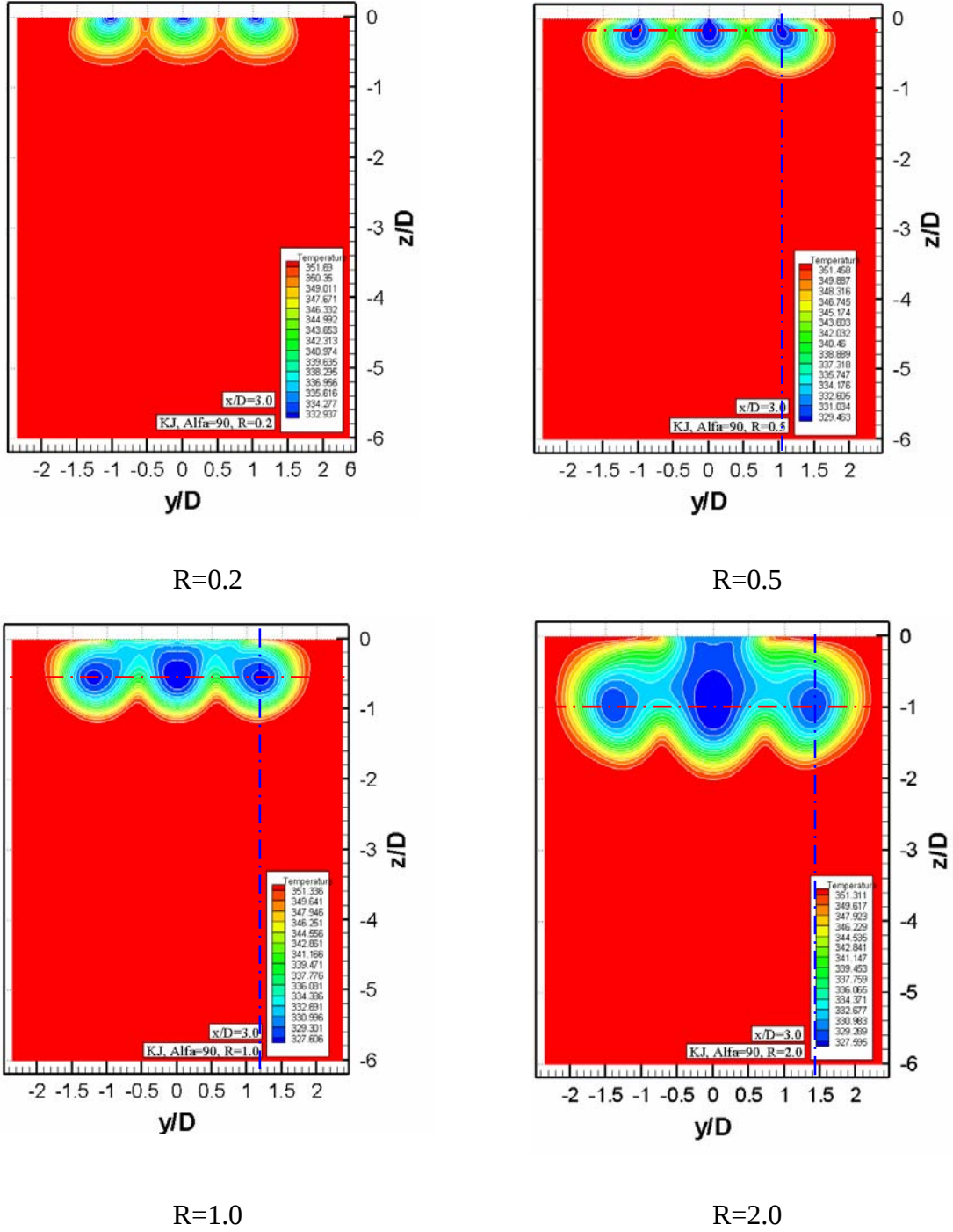


$z/D=-0.7$



$z/D=-1.0$

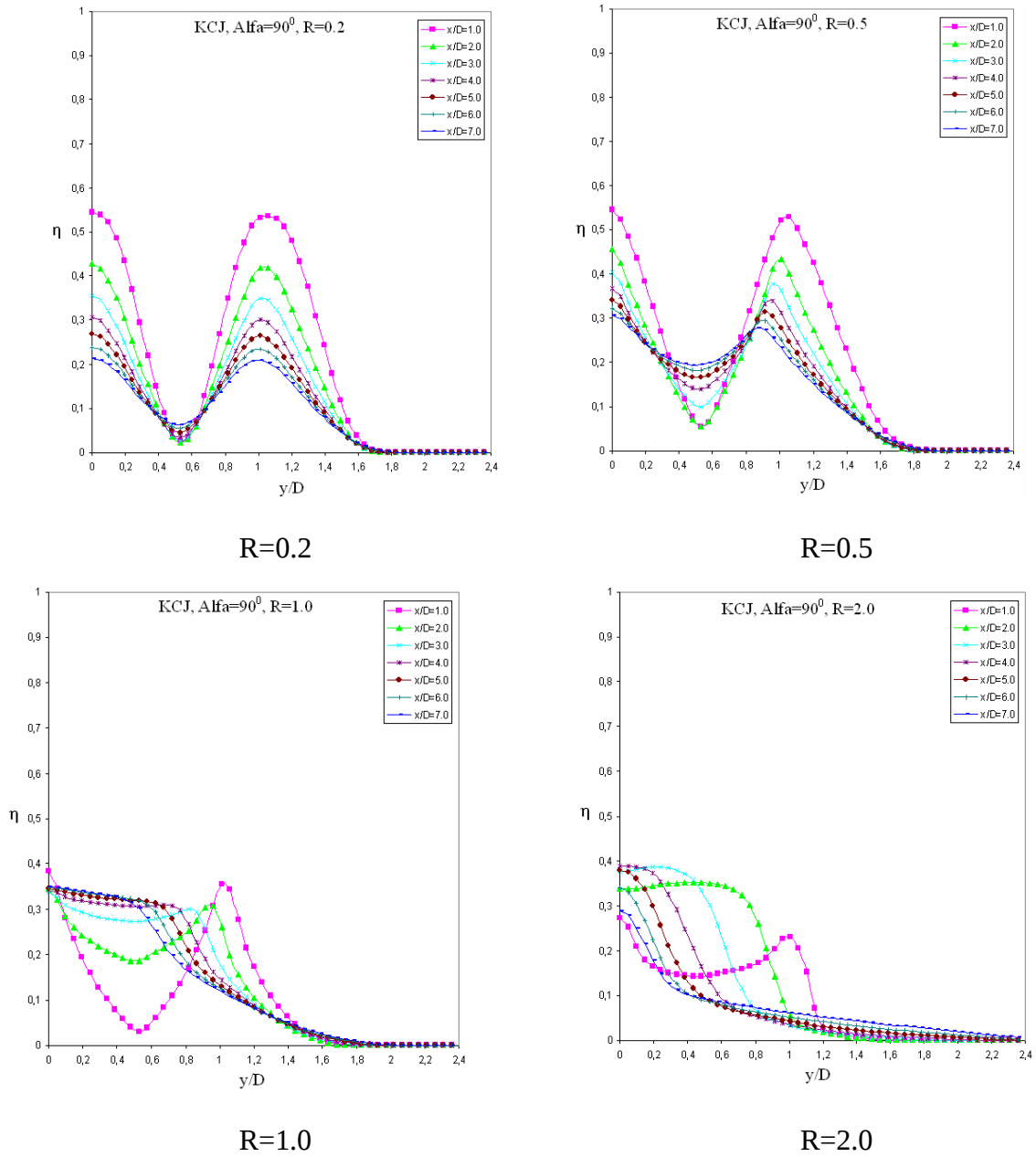
Şekil 3.24 Kare kesitli çoklu çapraz lülelerde sıcaklık değişimlerinin kanal üst çeperinden $z/D=-1.0$ 'e kadar olan istasyonlardaki değişimi, $\alpha=90^\circ$, $R=2.0$.



Şekil 3.25 Kare kesitli çoklu çapraz lülelerde hız oranlarının sıcaklık değişimleri üzerindeki etkisi, $\alpha=90^\circ$, $x/D=3.0$.

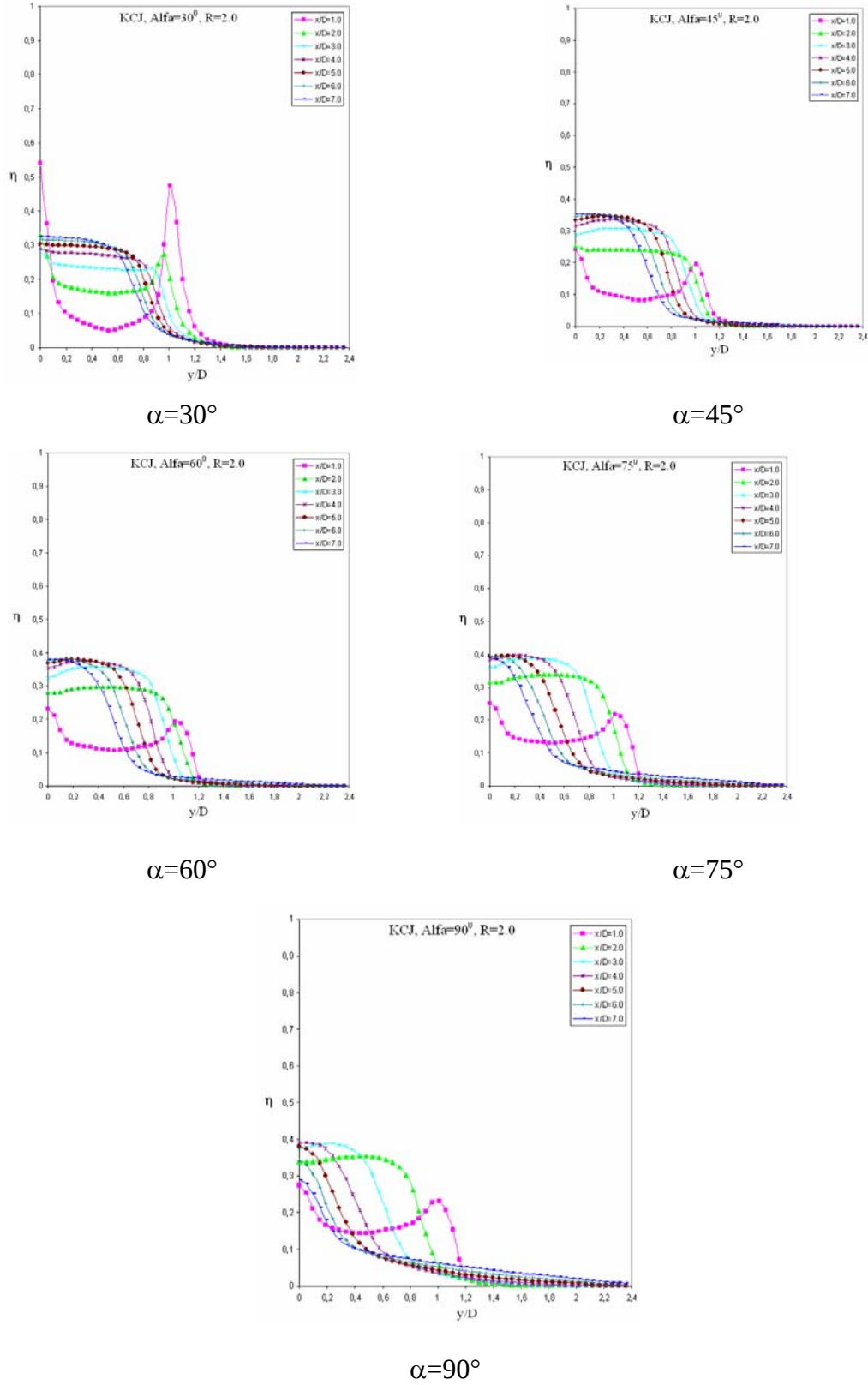
Şekil 3.26’da sadece eğim açısı 90° için yanal film soğutma verimleri gösterilmiştir. Lüle girişinden kanal çıkışına doğru verim değişimlerini göstermek amacıyla dairesel kesitli lüledeki verim grafiklerinde olduğu gibi burada da yedi farklı istasyondaki ($x/D=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$ ve 7.0) verim değişimleri sunulmuştur. Her bir istasyona ait verim dağılımı,

dairesel kesitli lüle kullanılması halinde elde edilen dağılımlara benzemekte ise de verim değerlerinin daha düşük olduğu gayet açıktır.



Şekil 3.26 Kare kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $\alpha=90^\circ$ için hız oranlarının yanal film soğutma verimi üzerindeki etkisi.

Kare kesitli lüle için eğim açısının yanal film soğutma üzerindeki etkisi Şekil 3.27’de gösterilmiştir. En düşük eğim açısı olan 30° ’nin dışındaki bütün eğim açılarında benzer dağılım görülmekte olup, birinci ve ikinci istasyonlardan sonrakilerde daha yüksek verim değerleri görülmektedir. $y/D=1.0$ ve $y/D=-1.1$ arasında ilk iki istasyona ait verim değerleri daha yüksek olup kanal çıkışına doğru azalmaktadır.



Şekil 3.27 Kare kesitli üç tane lüle kullanılması durumunda $R=2.0$ için değişik eğim açılarının yanıl film soğutma verimi üzerindeki etkisi.

4. DENEYSEL ANALİZ

Bilindiği üzere bilimsel bir metot olarak deney, belli bir problemi çözmek amacıyla yapılan gözlemler takımı olarak tanımlanmaktadır. Bir problemin fiziğine ilişkin bilgilerin toplanması için ampirik yaklaşımların köşe taşlarından biridir. Akışkanlar mekaniği ilgi alanına giren problemlerin çözümü için analitik akışkanlar dinamiği, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve deneysel akışkanlar dinamiği olmak üzere temelde üç yaklaşımın mevcut olduğu önceki bölümlerde ifade edilmişti. Ancak bu yaklaşımların birbirlerinden tamamen ayrı olmadıkları, tam tersine birbirlerini tamamladıkları da bilinmesi gereken bir gerçektir. Günümüzde teknolojiye hızlı gelişmelere bağlı olarak, kullanılan bilgisayarlara ait daha hızlı işlemci ve daha yüksek bellekler, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin oldukça yaygın olarak kullanılmasına imkân verirken, deneysel çalışmalar en eski ve en güvenilir metot olarak varlığını devam ettirmektedir. Akışkanlar mekaniği bir üçgen olarak düşünüldüğünde analitik, hesaplamalı ve deneysel yaklaşımlar bu üçgenin köşegenlerini oluştururlar. Böyle bir düşünce tarzı akışkanlar mekaniği ile ilgili problemlerin çözümünde bu üç yaklaşımın da göz önünde tutulmasını gerekli kılar. Bu noktadan hareketle çapraz akıştaki jet akışlarının fiziğine ilişkin daha kapsamlı bilgilere ulaşılması amacıyla deneysel bir çalışma yapılması gerekmiştir. Böylece HAD ile elde edilemeyen bazı bilgilere deneysel yaklaşımlarla ulaşılması hedeflenmiştir.

Deneysel çalışmaları gerçekleştirmek amacıyla Hesaplamalı ve Deneysel Akışkanlar Dinamiği laboratuvarı kurulmuş, türbülans ölçümlerinde uzun zamandan beri yaygın olarak kullanılan sıcak tel hızölçeri ve havaya maruz kalan cisimlerin veya hava akışı ile ilgili her türlü problemin modellenerek üzerinde çalışılmasına olanak tanıyan bir rüzgar tüneli gibi deney donanımları temin edilmiştir.

Deneysel çalışmada jet akışını sağlamak üzere dairesel kesitli bir lüle, rüzgâr tüneli test kesidinin üzerine sabitlenerek çapraz akıştaki jet akışı sağlanmıştır. Oluşan akış alanına ait veriler farklı istasyonlarda sıcak tel hızölçeri ile elde edilerek Fourier, wavelet (dalgacık) ve uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) metotları yardımıyla incelenerek akış karakteristiği hakkında bilgilere ulaşılmıştır. Akış alanının görselleştirilmesi ve hız oranlarının çapraz akıştaki jet akışları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemek amacıyla bir duman üretici ve video kamera kullanılarak akım görüntüleme yapılmıştır.

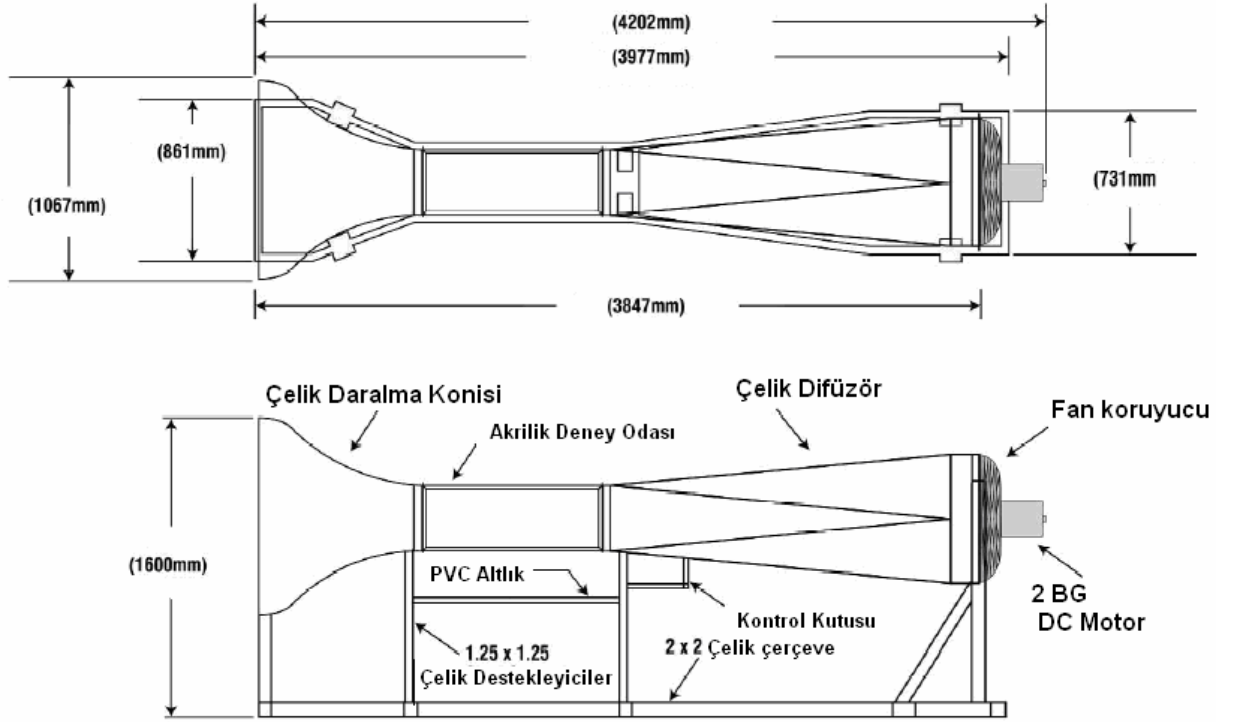
4.1 Deney Düzenegi

Deneyisel çalışmalar 305 mm×305 mm×914 mm test kesidine ve 33.5 m/s maksimum hıza sahip bir rüzgar tüneline yapılmıştır. Hız ölçümleri sabit sıcaklık hızölçeri (CTA) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler rüzgâr tüneli test kesidi boyunca farklı yatay (x/D) ve düşey (z/D) mesafelerde tarama yapmak suretiyle tamamlanmıştır. Bu bölümde önce veri alımında kullanılan rüzgar tüneli, CTA sistemi, sıcak teli konumlandırma kullanılan travers mekanizması ve duman üretici tanıtılarak deneyisel veriler sunulmuştur. Farklı hız oranları ve değişik istasyonlarda elde edilen deneyisel veriler daha sonra Fourier analizi, dalgacık (wavelet) ve uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) metotları yardımıyla işlenerek sonuçlar irdelenmiştir. Akım görüntüleme tekniği yardımıyla üç farklı akış durumu incelenmiştir. Bunlar sırasıyla jetin ve çapraz akışın minimum hızlarda karışması, jet hızının çapraz akış hızından büyük olması ve son olarak çapraz akışın jet akışından baskın olduğu durumdur. Her üç akış halinde oldukça farklı akış durumları gözlenmiş ve akış alanının hızların oranına oldukça bağlı olduğu görülmüştür.

4.1.1 Rüzgar Tüneli

Deneyisel çalışmada kullanılan FLOTEK marka rüzgâr tüneli 305 mm×305 mm×914 mm test kesidine sahiptir. Bir koniden test kesidine giren hava bir fan yardımıyla emiş yapar. Fanı tahrik eden motor değişken hızlı 2 BG'lik bir Baldor motordur. Havanın tünele girdiği plastik bal peteğinin yükseklik/genişlik oranı 10:1'dir. Giriş konisi 1067 mm×1067 mm keside sahip olup daralma oranı 12:1'dir. Bu daralma oranı tünele giren havanın hızında düzgün ve sürekli bir artışa imkân vererek test kesidine oldukça düşük türbülansla girmesini sağlamaktadır. Özellikle giriş kısmının şekli ters basınç gradyanlarının oluşmasına engel olarak, sınır tabaka ve çeper ayrılmasını önlemektedir. FLOTEK rüzgâr tüneli, 11 adet çelik parçadan oluşan bir destek üzerine monte edilmiştir. Söz konusu rüzgâr tünelinin ana boyutları ve üç-boyutlu bir resmi sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

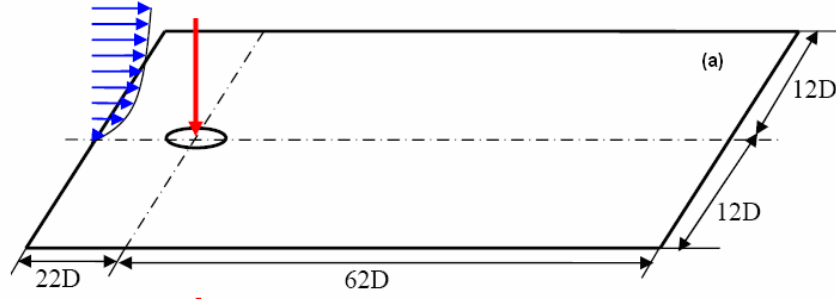
Jet akışının sağlanacağı lüle, dairesel kesitli olarak tasarlanıp rüzgâr tüneli test kesidinin üstüne monte edilerek jet akışının yukarıdan aşağıya doğru olması sağlanmıştır. Lülenin çapı $D=7$ mm'dir. Lüle, test kesidinin girişinden $22D$ kadar ileride ve $24D$ genişliğe sahip test kesidinin tam ortasında açılan dairesel kesitli deliğe denk gelecek şekilde sabitlenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.1 FLOTEK rüzgar tünelinin ana boyutları.



Şekil 4.2 FLOTEK rüzgar tüneli ve travers mekanizmasının resmi.



Şekil 4.3 Lülenin rüzgar tüneli üst çeperinde konumlandırılması.

4.1.2 CTA Sistemi

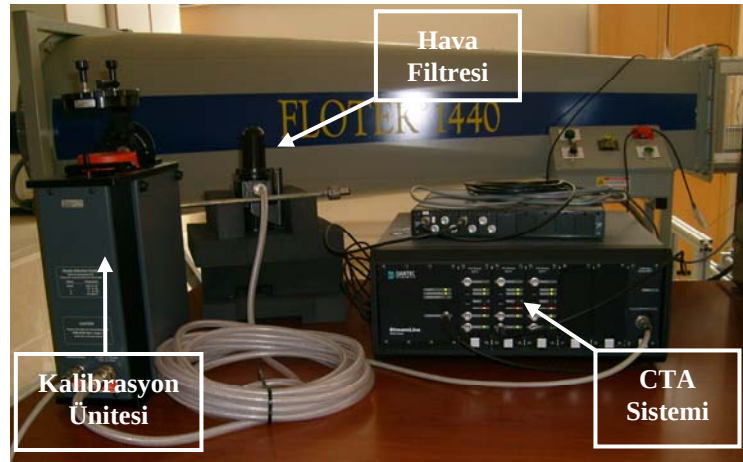
Çoğu akışta hızdaki çalkantılar büyük önem arz etmektedir. Bunlar arasında kanatların üzerindeki ve uçak gövdesi etrafındaki sınır tabaka, akıştaki engellerin ardındaki iz bölgeleri, roket ve gaz türbini motorlarının lülelerinden sağlanan jet akışları ve motor parçalarının içinde oluşan akışlar sayılabilir. Özellikle bu tip akışlarda görülen çalkantılar kayma gerilmesi, sınır tabaka ayrışması, motorlarda yakıt-hava karışımı ve türbomakinelerde titreşim gibi olayların oluşumu üzerinde büyük etkiye sahiptir. Ancak akıştaki çalkantıların deneysel olarak incelenmesi oldukça güçtür. Bunların başında, akıştaki en küçük değişiklikleri anında ölçebilen sensörler gelir. Bu tip cihazların çalkantının yüksek olduğu akışlarda bile kırılmayacak kadar sağlam olması ve gecikme yapmadan sinyalleri iletmesi beklenir. Akış alanını bozmadan akış ile ilgili bilgilerin elde edilmesi de ayrıca büyük önem taşımaktadır. Bu özelliklerinden dolayı sıcak tel hızölçeri akışkanlar mekaniğinde uzun yıllardır araştırma amaçlı kullanılan bir cihazdır. “Sıcak tel” elektrik akımıyla ısıtılan oldukça kısa ve küçük bir elemanı ifade etmektedir. Tipik bir sıcak tel 0.0038 mm’den 0.0050 mm’ye kadar değişen çaplarda ve 1 mm’den 2 mm’ye kadar değişen uzunluklarda olabilir. Böyle bir sıcak tel hızölçeri rüzgar tüneline türbülans seviyesi, bir model etrafındaki akış yapısı vb. gibi yerlerde kullanılabilir.

CTA kullanılarak herhangi bir anda ve noktada akışa ait ortalama hız, çalkantı hızları, türbülans yoğunluğu, oto-korelasyon ve güç tayfı (power spectrum) alınabilir. CTA’nın diğer ölçüm sistemlerine göre bazı üstün yönleri şu şekilde sıralanabilir:

- Birkaç cm/s’den ses-üstü hızlara kadar değişen hız aralıklarında ölçüm yapılabilir.
- Çok yüksek frekanslara kadar çıkarak yüksek çözünürlüğe imkân verir.
- Aynı anda hızın üç bileşeni de eş-zamanlı olarak elde edilebilir.

- Anlık hız değişimlerinin elde edilmesine imkân verir.

Çapraz akıştaki jet akışları ile ilgili deneysel veriler sabit sıcaklık hızölçeri kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.4'te Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü Deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği laboratuvarında yerleşik, araştırma amaçlı üç kanallı sabit sıcaklık hızölçeri (CTA) ünitesi, veri almada kullanılan probun kalibrasyonunda kullanılan kalibrasyon cihazı ve kompresörden kalibrasyon cihazına gönderilen basınçlı havadaki zararlı parçacıkların temizlendiği hava filtresinin resmi gösterilmiştir.

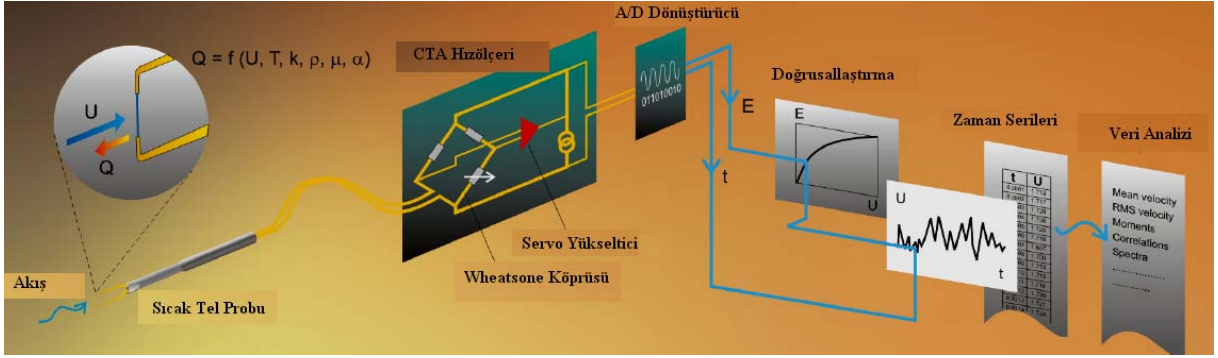


Şekil 4.4 Deneyde kullanılan CTA ünitesi, kalibrasyon cihazı ve hava filtresinin resmi.

CTA sisteminin çalışma prensibi ısıtılan telden soğuk çevre akışkanına transfer olan ısıнын akış hızının bir fonksiyonu olmasıdır. Şekil 4.5'te CTA sisteminin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir. Burada Q iletimle ısı transferi olup Denklem 4.1'de gösterildiği gibi probun içerisinde bulunduğu akış hızına, tel sıcaklığına ve akışkanın fiziksel özelliklerine bağlıdır. Q ve hız ifadesi U arasındaki ilişki King tarafından 1914 yılında önerildiğinden *King Kuralı* olarak bilinir.

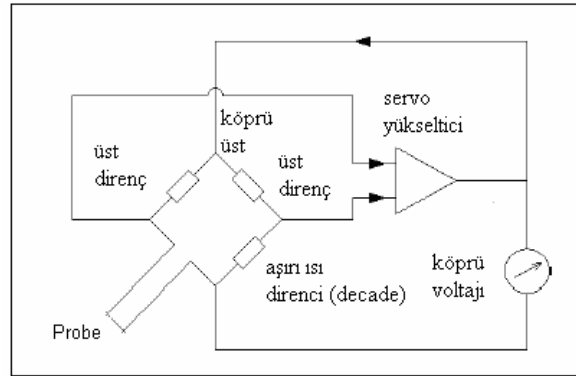
$$Q = (T_w - T_a)A_w h = A + BU^n \quad (4.1)$$

Burada T_w telin, T_a ise çevre sıcaklığı olup A_w telin yüzey alanını, h ise ısı transfer katsayısını ifade etmektedir. A ve B kalibrasyon sabitleri, n ise değeri 0.5 olan üs sabitidir.



Şekil 4.5 Sabit-sıcaklık hızölçerinin çalışma prensibi, Dantec Dynamics, 2002.

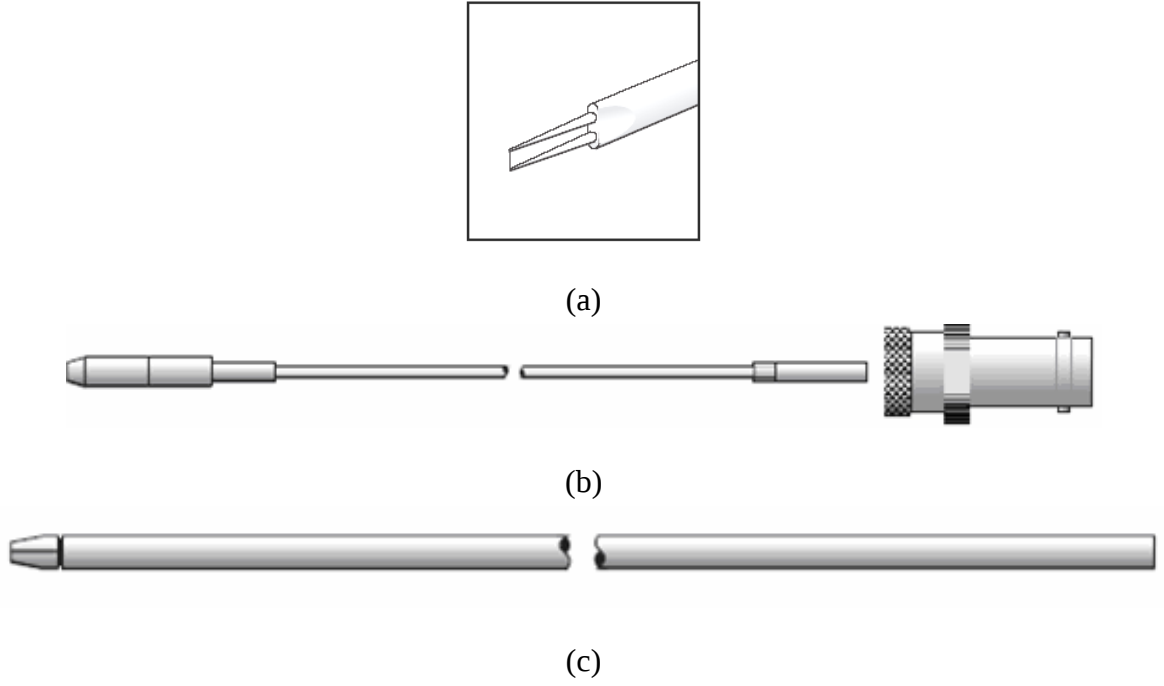
Sıcak tel hızölçeri, Şekil 4.6’da gösterilen Wheatstone köprüsünün bir parçası olarak telin sabit sıcaklıkta tutulması prensibine göre çalışır. Köprünün köşegenlerindeki hata sinyallerinin dengede tutulmasıyla prob dirençlerinin ve böylece sıcaklığının akıştan bağımsız olarak sabit kalması sağlanmış olur. Köprü çıkış voltajı proba etkiyen soğutma hızının bir fonksiyonudur. Bir prob akış alanına bırakıldığında akış ortamındaki hava akışı teli soğutacaktır. Sıcaklığı sabit tutmak için köprü voltajının artması gerekir. Bu nedenle akış hızı ne kadar yüksek olursa, voltajlar da o kadar yüksek olur.



Şekil 4.6 Wheatstone köprüsü.

Modüllerden ve çevre sıcaklık problemlerinden alınan analog sinyaller BNC bağlayıcılar (konnektörler) yardımıyla bilgisayarda mevcut olan bir analog/dijital çevirici ile yazılıma aktarılır. CTA sisteminden bilgisayara veri transferi bir adet kontrolcü vasıtasıyla gerçekleştirilir. CTA sistemi toplamda 3 adet üniteye ve bir adet çevre sıcaklığını ölçen sıcaklık sensörüne sahiptir.

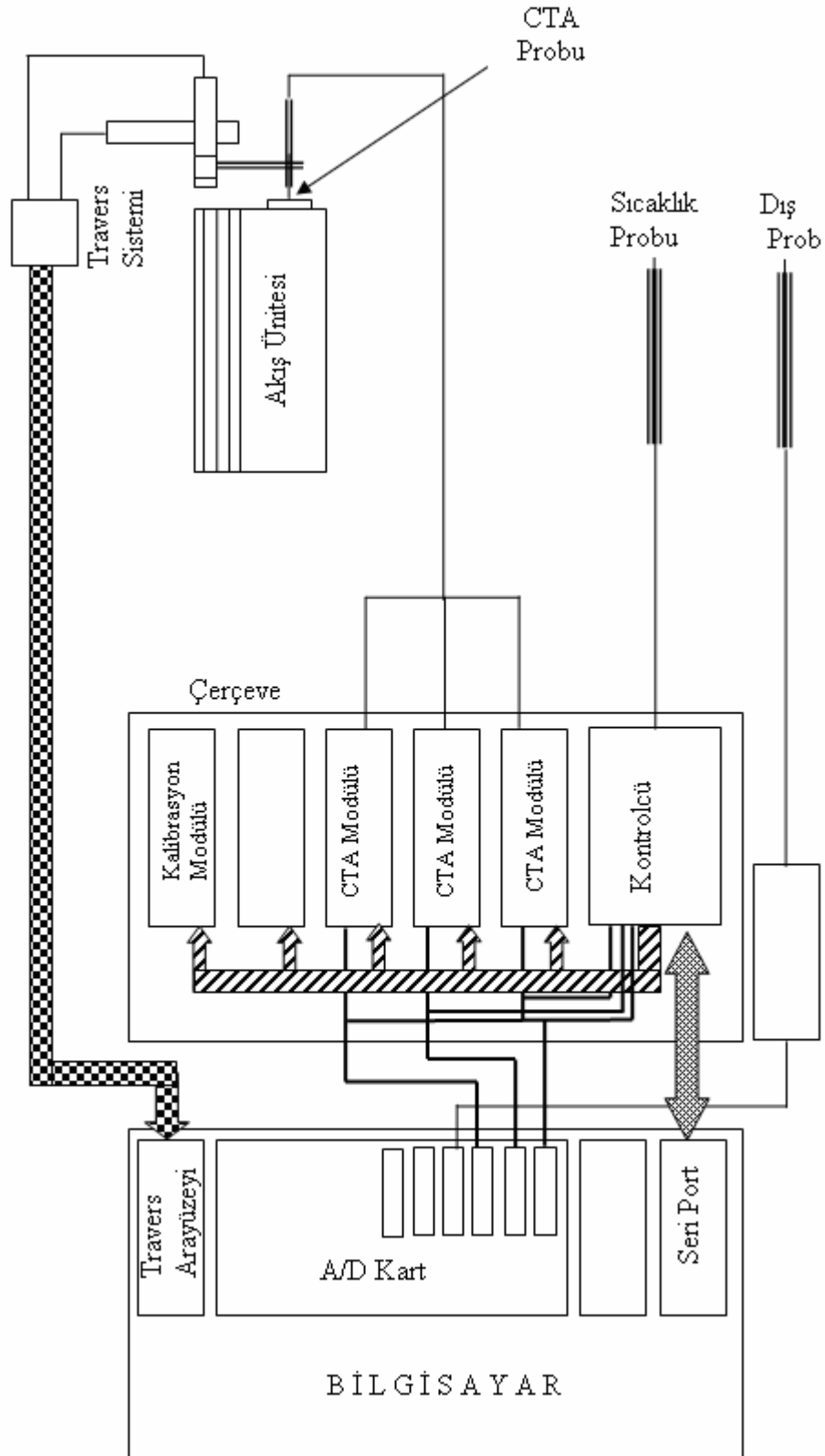
CTA sisteminin en önemli parçası çapı 5 μ m, uzunluğu 1.25 mm olan ve platin kaplı tungsten sıcak teldir. Bu çalışmada Dantec tarafından üretilen 55P11 no'lu sıcak tel, bu teli tutturmaya yarayan 4 mm uzunluğundaki destek (55H20) ve 215 mm uzunluğundaki montaj tüpü kullanılmıştır (Şekil 4.7). Aynı anda 3 adet ünite uygun bir yazılımla beraber çalıştırılabilir. Şekil 4.8'de gösterilen parçalar ve işlevleri alt başlıklar halinde kısaca açıklanmıştır.



Şekil 4.7 5 μ m çaplı, 1.25 mm uzunluğundaki platin kaplı tungsten sıcak tel (a), 4 mm uzunluğundaki destek (b) ve 215 mm uzunluğundaki montaj tübü (c).

4.1.2.1 Sinyal Şartlandırıcı

Sinyal şartlandırıcı CTA çıkış voltajlarının bilgisayardaki A/D çeviricinin giriş oranlarını eşleştirir ve sinyalleri filtreler. Bir sinyal şartlandırıcı hem doğru akım (DC) hem de alternatif akım (AC) durumlarında çalışabilir. Sinyal şartlandırıcı içerisinde köprü çıkış voltajından 1mV hassasiyetle maksimum 10 Volta yükseltebilecek (ya da eksiltebilecek) bir *offset* devresi ve bileşke sinyalleri 1024 kez büyültebilecek bir *kazanç* fonksiyonu barındırır. Bu ise DC parçadan herhangi bir filtreleme yapmadan en küçük türbülans sinyallerinin uygun bir seviyeye çıkarılmasına imkan verir. Sinyal şartlandırıcı ile *düşük filtreleme (low pass filtering)* yaparak yüksek frekanslardaki hatalardan kaçınılabilir. Düşük filtreleme 300 kHz'e kadar çıkabilen 3. dereceden bir filtrelemedir. *Yüksek filtreleme (high pass filtering)* ise 10 kHz'e kadar çıkabilen 1. dereceden bir filtrelemedir.



Şekil 4.8 CTA ünitesi, kalibrasyon cihazı, travers mekanizması ve bilgisayar bağlantıları.

4.1.2.2 Hava Filtresi Ünitesi

Dantec firması tarafından seçime bağlı olarak sunulan hava filtresi ünitesi, akış ünitesine giren basınçlı havanın yağ ve tozlardan arındırılması amacıyla kullanılır. Maksimum akış koşulunda 300 saat çalışabilme kapasitesine sahiptir.

4.1.2.3 StreamWare® Uygulama Yazılımı

Streamware, CTA donanım sistemi kullanılarak verilerin alınması, işlenmesi ve sunulmasında kullanılmak üzere Windows işletim sisteminde kullanılabilecek bir yazılımdır. Bu uygulama yazılımı her bir ünitenin ayarını aşırı ısı oranı (overheat ratio), kare dalga testi (square wave test), prob sinyallerini filtreleme ve yükseltme işlemlerini ayrı ayrı yapmak, problemlerin kalibrasyon işlemlerini gerçekleştirmek, verileri almak ve voltajları kalibrasyon eğrisini göz önüne alarak hız cinsinden ifade etmek amacıyla kullanılır. Veriler bir çalışma sayfasında gösterilir ve Excel gibi herhangi bir Windows uygulamasında açılıp işlenebilir. Program kendi içerisinde bir deneyin gerçekleştirilmesi için işlem basamaklarını tanımlamaya ve diğer donanımlarla ilişkisini gerçekleştirmeye izin verecek tarzdadır. *Streamware* yazılımı 1, 2 ve 3-boyutlu tel ve film problemleriyle çalışmaya imkân verecek şekildedir. Dantec tarafından üretilen problemlerle çalışılabileceği gibi başka firmalara ait problemler de kullanılabilir.

4.1.2.4 Kalibrasyon Sistemi

CTA sistemiyle beraber kullanılan mevcut kalibrasyon sistemi birkaç cm/s hızlardan 1 Mach sayısına kadar değişik hızlarda problemlerin hava veya başka gazlar kullanılarak kalibrasyonuna imkan verir (Şekil 4.9). Kalibrasyon cihazı kullanılmaksızın problemlerin bir Pitot tüpü ile kalibrasyonu da mümkündür (Şekil 4.10).

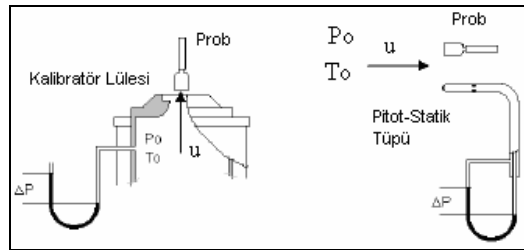
Kalibrasyon sistemi CTA ünitesinde yer alan bir kalibrasyon modülü ve bu modüle bir kablo vasıtasıyla bağlanmış bir akış ünitesinden meydana gelir. Kalibrasyon sistemi kompresörden ya da üfleme (blower) gibi bir hava sağlayıcısından aldığı havayı basınçlandırarak bir serbest jet oluşturur ve problemlerin bu serbest jete maruz kalmasıyla kalibrasyon işleminin yapılmasını sağlar. Kalibrasyon sistemi tamamen bilgisayar kontrollü olup otomatik kalibrasyon işlemlerinde kullanılabilir.

Akış ünitesi yüksek çözünürlüğe sahip bir kontrol valfi ve çeşitli lüle yapılarıyla karşı basınç ne olursa olsun sabit debide akış olmasını sağlar. Akış ünitesindeki lülelerden çıkan hava düzgün, uniform ve düşük türbülanslı bir jet akışı meydana getirir.



Şekil 4.9 Kalibrasyon cihazı.

Kalibrasyon işleminde dört farklı lüle ile çalışmak mümkündür. Bunlar sırasıyla 20 mm², 60 mm², 120 mm² ve 1400 mm² çıkış alanlarına sahip lüleler olup, 0.02 m/s hızdan 1 Ma hızlara kadar jet akışı sağlayabilirler. Lüleler çıkışta eliptik şekle sahiptirler, bunun sebebi ise sınır tabaka büyümesini azaltmak ve düz bir serbest jet oluşturabilmektir.



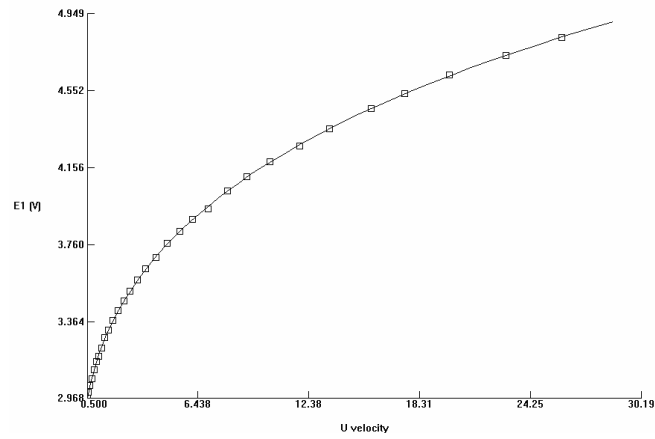
Şekil 4.10 Kalibrasyon işleminin farklı şekillerde yapılması.

Çıkış hızı, lüledeki basınç kayıpları, durma basıncı, durma sıcaklığı ve gazın özgül sıcaklığı göz önünde tutularak hesaplanır. Bu amaçla akış ünitesi bir diferansiyel manometre, bir mutlak basınç ve iki sıcaklık dönüştürücüsüne sahiptir. Sıcaklık ve basınç dönüştürücüleri Dantec firmasında ayrı ayrı kalibre edilerek transfer fonksiyonları kalibratörde depolanırlar. CTA yazılım programı olan *StreamWare* bir deneyde CTA ilk kez çalıştırıldığında kalibrasyon sabitlerini okur. Akış kontrol ünitesi referans bir lüle ve diferansiyel basınç dönüştürücüsü içerir. Deneysel çalışmalarda polinom uydurma metodu kullanılarak kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir. Bunun için aşağıdaki gibi 4.dereceden bir polinomdan yararlanılmıştır.

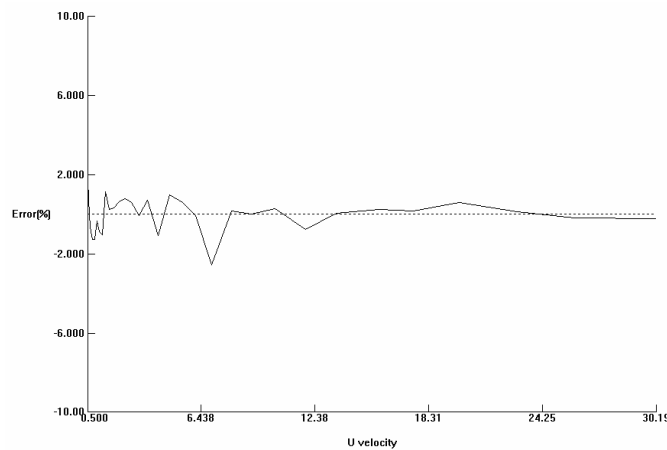
$$U = C_0 + C_1 E_{corr} + C_2 E_{corr}^2 + C_3 E_{corr}^3 + C_4 E_{corr}^4 \quad (4.2)$$

Burada U hızı, E_{corr} kalibrasyon esnasında sıcaklıktaki değişimlere bağlı olarak düzeltilen voltajları göstermektedir. C_0 , C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 ise kalibrasyon sabitleridir. Üs kanununa göre polinom kullanmak daha uygun sonuçlar vermektedir.

Sıcak tel hızölçerinden veri almak için öncelikle hız-voltaj ilişkisini gösteren bir kalibrasyon eğrisi kullanılır. Bu işlem değerleri bilinen bir takım hızlarda (U) buna karşılık gelen CTA çıkış voltaj değerlerinin (E) kaydedilmesiyle akış hızı ve probdan geçen akım arasında bir ilişki kurmaya yarar. Bu şekilde, bilinen hızlara karşılık gelen voltaj değerleri kullanılarak bir eğri uydurulur ve voltaj değerleri hıza çevrilmiş olur. Kalibrasyon işleminde elde edilen 4.dereceden bir eğri ve bu eğri oluşturulurken oluşan maksimum hata değişimleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



(a)

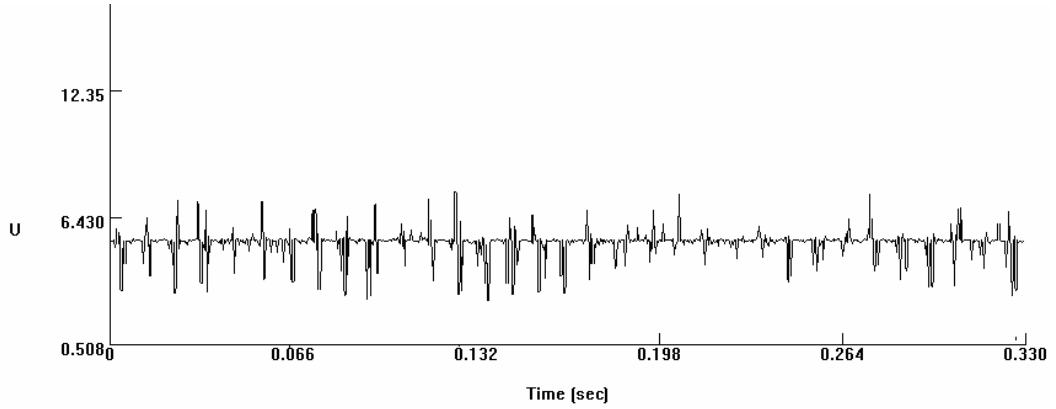


(b)

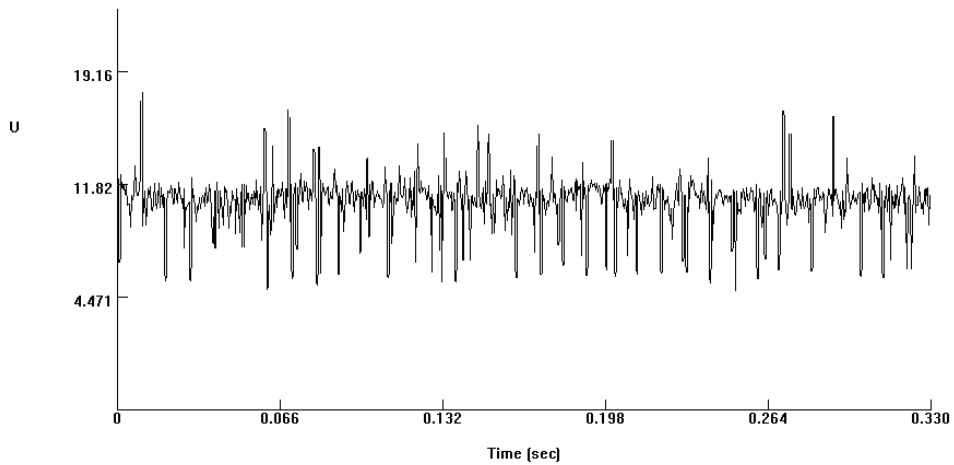
Şekil 4.11 Bir-boyutlu proba ait a) kalibrasyon eğrisi ve b) hata grafiği.

Bu eğri oluşturulurken sıcaklık düzeltmesi uygulanarak sıcaklık yükü eklenmiştir. Sıcaklık düzeltmesi için CTA sistemine bağlı bir sıcaklık sensörü ile ölçülen ve referans sıcaklık olarak göz önünde bulundurulmuş 22.7°C kullanılmıştır. Bir-boyutlu (1-B) ölçüm yapabilen 55P11 no'lu prob ve sıcaklık sensörü için sıcaklık yükü olarak $m=0.20$ seçilmiştir. Polinom şeklindeki kalibrasyon eğrisine ait hata grafiğinden de görülebileceği üzere, istenen ve kalibrasyon ünitesi tarafından sağlanan hızlar arasındaki ortalama maksimum hata %1.72 olup oldukça iyi olduğu üretici tarafından ifade edilmektedir (Dantec Dynamics, 2002)

Kalibrasyon eğrisi elde edildikten sonra kalibrasyon ünitesinden istenen ortalama 5 m/s'lık hız dağılımı Şekil 4.12'de ve jet akışının sağlandığı lüleden 10 m/s'lık bir hava akışı olduğunda 55P11 prob kullanılarak elde edilen anlık hız değişimleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Kalibrasyon cihazından 5 m/s ile akış olduğunda sıcak tel ile ölçülen hız değeri.



Şekil 4.13 Jet akışının sağlandığı lüleden 10 m/s ile akış olduğunda sıcak tel ile ölçülen hız değeri.

Pitot tübü ve buna bağlı bir dijital manometreden okunan değer 10 m/s iken CTA sistemindeki sıcak tel ile yukarıdaki kalibrasyon eğrisi kullanılarak ölçülen hız 10.683 m/s olmuştur. Bu ise uygun bir eğri kullanıldığını ve CTA sistemine ait 55P11 numaralı probun istenen hızları doğru olarak okuduğunu göstermektedir.

Akışa ait ortalama hız (U_{ort}), hızdaki ortalama sapma (U_{RMS}) ve türbülans yoğunluğu (Tu) sırasıyla (4.3, 4.4 ve 4.5) eşitliklerindeki gibi hesaplanmaktadır. Bilindiği üzere U_{RMS} çalkantı hızlarının ortalama hız etrafındaki değerini gösterir.

$$U_{ort} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (4.3)$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{ort})^2 \right)} \quad (4.4)$$

$$Tu = \frac{U_{RMS}}{U_{ort}} \quad (4.5)$$

4.1.3 Travers Sistemi

Konumlandırma gereken pek çok yerde kullanılabilen travers sistemleri ihtiyaca göre bir-boyutlu (1-B), iki-boyutlu (2-B) ve üç-boyutlu (3-B) olabilirler. Ancak en çok arzu edileni, her üç yönde de hareket edebilen ve mümkün olduğu kadar akışı bozmayan 3-B travers mekanizmasıdır.



Şekil 4.14 Tasarlanıp üretilen 3-Boyutlu travers mekanizmasının resmi.

Özellikle akışın türbülanslı olduğu ölçümlerde 3-B travers mekanizması kullanmak bu açıdan daha doğru olacaktır. Travers mekanizmasının en temel amacı lazer ışık hızölçeri (LDA), sabit sıcaklık hızölçeri (CTA) ve parçacık görüntüleme hızölçeri (PIV) gibi ölçüm cihazlarını konumlandırmadır (Shayesteh ve Bradshaw, 1987). Bu amaçlar gözönünde bulundurularak 3-B bir travers mekanizması tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 4.14). Bu aşamaların hepsinde de basitlik, kullanım kolaylığı, yenileme ve ucuzluk gözönünde tutulmuştur.

4.1.4 Duman Üretici

Akışın görsel olarak gösterilmesi amacıyla Dantec tarafından üretilen 10D15-60 modeli duman üretici kullanılmıştır. Bu tip bir duman üretici PIV ve LDA için oldukça uygundur ve küçük ebatla olmalarından dolayı kolayca taşınıp konumlandırılabilir. Duman görüntülemeye kullanılan parçacıklar su bazlı damlalar olup yaklaşık $1\mu\text{m}$ çapındadırlar ve buharlaşarak beyaz bir duman üretirler. Akımın görüntülenmesinde kullanılan duman üretici, özel sıvısı ve yardımcı aksesuarları Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Akım görüntülemeye kullanılan duman üretici, hortum ve özel sıvısı.

4.2 Belirsizlik Analizi

Günümüzde % 100 doğru veya kesin sonuç veren bir deneysel ölçüm, teknik veya cihaz mevcut değildir. Bu nedenle zaman, sıcaklık, basınç, hız gibi herhangi bir şeyi tam ve kesin olarak ölçmek de mümkün değildir. Günümüzde ileri ölçüm cihazları ve gereken dikkatle deneylerdeki belirsizlikler ancak kabul edilebilir bir seviyeye düşürülebilir. Deneysel hata analizi bir deneydeki belirsizliklerin değerlendirilmesi işlemidir ve deneyden elde edilen sonuçların analizinde göz önüne alınması gerekir.

Standart belirsizlik $u(y_i)$ giriş değişkeninin standart sapmasının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

$$u(y_i) = \frac{1}{y_i} S \left(\frac{\Delta x_i}{k_i} \right) \quad (4.6)$$

Bu denklemde $S = \frac{\partial y_i}{\partial x_i}$ olarak duyarlılık ya da hassasiyet faktörü ve k_i ise giriş değişkeninin dağılımıyla (Gaussian, dikdörtgen, vb.) ilişkili bir faktördür. Çoğu mühendislik uygulamalarında Gaussian hata dağılımı kabul edildiğinden istenen % 95 güven seviyesi, standart belirsizlik ile $k=2$ faktörünün çarpılmasıyla elde edilir.

Bu durumda toplam kısmi belirsizlik aşağıdaki gibi olur:

$$U(\text{toplam}) = 2 \sqrt{\sum u(y_i)^2} \quad (4.7)$$

CTA hızölçerinden kaynaklanan belirsizlik, hıza dönüşümünde kullanılan her bir voltajın belirsizliğinden ve hız serilerinin istatistikî analizinden kaynaklanan belirsizliğin bir bileşimidir. Diğer ticari hızölçerlerde olduğu gibi, Dantec tarafından üretilen hızölçerler düşük gürültülü olduklarından ve tekrarlara imkân verdiğinden bunlarla ilgili belirsizlikler diğerleriyle karşılaştırıldığında çok düşük kalmaktadır. Bu nedenle üretici firma tarafından bu tip belirsizliklerin ihmal edilebileceği iddia edilmektedir.

Kalibrasyon Belirsizlikleri:

İster bu çalışmada olduğu gibi bir kalibrasyon cihazı, ister Pitot-statik tüp kullanılsın kalibrasyon işlemlerinin en büyük belirsizlik kaynağı olduğu söylenebilir. Buradaki kısmi standart belirsizlik aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$U(U_{kal}) = \frac{1}{100} STDV(U_{kalibrasyon} (\%)) \quad (4.8)$$

Kalibrasyon cihazı belirsizliği, a_{kal} , genelde kısmi standart belirsizlik (STDV) şeklinde yüzde olarak ve buna sabit b_{kal} dağılımının m/s cinsinden ilavesiyle verilir:

$$STDV(U_{kalibrasyon}) = \pm(\%) + b_{kal} (m/s) \quad (4.9)$$

b_{kal} sabit dağılımı hızların 5 m/s'nin üzerinde olması durumunda ihmal edilebilir.

	$a_{kal} (\%)$	$b_{kal} (m/s)$
Kalibrasyon cihazı kullanıldığında	± 1	0.02
Pitot-statik tüp kullanıldığında	± 2	-

Dönüşüm Belirsizleri:

Dönüşüm belirsizlikleri voltajların hızlara çevrilmesi için kullanılan kalibrasyon eğrisinin uydurulmasıyla ilişkilidir. Dönüşüm ile ilgili kısmi belirsizlik aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$U(U_{\text{dönüşüm}}) = \frac{1}{100} STDV(\Delta U_{\text{dönüşüm}} (\%)) \quad (4.10)$$

Buradaki $STDV(\Delta U_{\text{dönüşüm}})$ eğri uydurulurken kalibrasyon noktalarındaki % olarak standart sapmadır.

A/D kart çözünürlüğü:

A/D kartın çözünürlüğünden doğabilecek belirsizlik aşağıdaki gibidir:

$$U(U_{\text{çözünürlük}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{U} \frac{E_{AD}}{2^2} \frac{\partial U}{\partial E} \quad (4.11)$$

Burada E_{AD} A/D kartın giriş aralığı, n bit şeklinde çözünürlüğü, U hız ve $\frac{\partial U}{\partial E}$ ise $U=f(E)$ eğrisinin ters eğimidir (duyarlılık faktörüdür).

Probun konumlandırma belirsizlikleri:

Prob belirsizliği kalibrasyondan sonra deneyde veri alma esnasında probun doğru olarak konumlandırılmasıyla ilgilidir. Buradaki belirsizlik kare dağılımlı olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$U(U_{\text{konumlandırma}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} (1 - \cos \theta) \quad (4.12)$$

Normalde bir prob $\Delta\theta=1^\circ$ hata ile konumlandırılabilir.

Sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan belirsizlikler:

Kalibrasyondan deneye ya da deney esnasındaki sıcaklık değişimleri sistematik hatalara sebep olur. Eğer düzeltilmezse, sıcaklıktaki değişim probun aşırı-sıcaklığını (over-temperature) değiştirir ve dikdörtgensel dağılımlı stokastik belirsizliklere neden olur. Sıcaklıkla ilgili kısmi standart belirsizlik:

$$U(U_{\text{sıcaklı}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{U} \frac{1}{(T_w - T_0)} \left(\frac{A}{B} U^{-0.5} + 1 \right)^{0.5} \quad (4.13)$$

Burada T_w sensörün, T_0 ise referans ortam sıcaklıklarıdır. ΔT referans ortam sıcaklığı ile ölçüm esnasındaki sıcaklık farkıdır. Bu yaklaşım kalibrasyon fonksiyonundaki üs kanununa dayanmaktadır.

$$E^2 = (T_w - T_0) \left(A + B(U_{\text{kalibrasyon}})^{0.5} \right) = (T_w - T_0) \left(A + B_1(\rho U)^{0.5} \right) \quad (4.14)$$

Buradaki $U_{\text{kalibrasyon}}$ gerçekte debiyi (ρU), sıcaklığa bağlı olarak yoğunluktaki değişimi (ρ) gösterdiğinden bunu belirsizliğe eklemiş olacaktır. Gazlar için kısmi standart belirsizlik:

$$U(U_{\rho,T}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta \rho_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\Delta T}{273} \quad (4.15)$$

Ortamın basıncının değişmesinden kaynaklanan belirsizlik:

Ortam basıncın değişmesi akışkanın (hava) yoğunluğunun dolayısıyla da hızının değişmesine neden olacağından dikkate alınmalıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$U(U_{\nu,P}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{P_0}{P_0 + \Delta P} \right) \quad (4.16)$$

Hız örnekleme belirsizliği:

Tek-boyutlu bir sensör kullanılarak tek bir hız örnekleme ile ilgili kısmi belirsizlik ölçüm alınan ortamın hava olması durumu için Çizelge 4.1’de özetlenmiştir. Bu çizelge için giriş verileri olarak: $(T_w - T_0) = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 15 \text{ m/s}$, $A = 1.396$, $B = 0.895$, $\partial U / \partial E = 46.5 \text{ m/s/Volt}$ kullanılmıştır.

Görüldüğü üzere bir sıcak tel kullanan bir CTA sisteminde kalibrasyondan kaynaklanan belirsizlikler de dâhil edildiğinde tek bir hız örnekleme için belirsizlik yaklaşık % 3 olmaktadır. Görüldüğü gibi en büyük belirsizlik kalibrasyondan, akıştaki sıcaklık değişimlerinden ve voltajların hıza dönüştürülmesinden (eğri uydurma) kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.1 Normal laboratuvar şartlarında tek bir hız örneklemede kullanılan CTA için hata kaynakları ve belirsizlikleri

	Giriş Değişkeni	Tipik Değer	İlgili Çıkış Değişkeni (Varyans)	Tipik Değer	Kapsama (Coverage) Faktörü	Kısmi Standart Belirsizlik
Belirsizlik Kaynağı	Δx_i	Δx_i	$\frac{1}{U} \Delta y_i$	$\frac{1}{U} \Delta y_i$	k	$\frac{1}{k} \frac{1}{U} \Delta y_i$
Kalibrasyon sistemi	$\Delta U_{kalibrasyon}$	% 1.72	$2STDV(100\Delta U_{kalibrasyon})$	0.02	2	0.01
Dönüşüm	$\Delta U_{dönüşüm}$	% 0.5	$2STDV(100\Delta U_{uydurma})$	0.01	2	0.005
A/D çözünürlük	E_{AD} n	10 volt 12 bit	$\frac{1}{U} \frac{E_{AD}}{2^n} \frac{\partial U}{\partial E}$	0.008	$\sqrt{3}$	0.0013
Prob konumlandırma	θ	1°	$1 - \cos\theta$	0.00015	$\sqrt{3}$	≈ 0
Sıcaklık değişimleri (sadece sensör aşırı ısınmasına göre)	ΔT	1 °C	$\frac{1}{U} \frac{\Delta T}{(T_w - T_0)} \left(\frac{A}{B} U^{-0.5} + 1 \right)$	0.013	$\sqrt{3}$	0.008
Sıcaklık değişimleri (sadece havanın yoğunluğunun değişmesine göre)	ΔT	1 °C	$\frac{\Delta T}{273}$	0.004	$\sqrt{3}$	0.002
Ortam basıncının değişmesi	ΔP_{wv}	10 kPa	$\frac{P_0}{P_0 + \Delta P}$	0.01	$\sqrt{3}$	0.006
Nem	ΔP_{wv}	1 kPa	$\frac{1}{U} \frac{\partial U}{\partial P_{wv}} \Delta P_{wv}$	0.0006	$\sqrt{3}$	≈ 0
Kısmi genişletilmiş belirsizlik: $U(U_{örnekleme}) = 2\sqrt{\sum \left(\frac{1}{k} \frac{1}{U} \Delta y_i \right)^2} = 0.030 = \%3$						

4.3 Deneysel Verilerin Fourier Analizi

Çapraz akıştaki jet akışları için sıcak tel hız verileri değişik hız oranlarında ve yatay (x/D) ve düşey (z/D) mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Böylece jet hızı/kanal akış hızı oranının (R) akış

karakteristiğine etkileri ile değişik yatay ve düşey mesafelerde büyük ölçekli yapıların davranışları hakkında bilgi sağlanmaya çalışılmıştır. Deney şartları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Tüm veriler 15 kHz frekansta $2^{15}=32768$ adet örnekleme sayısı ile elde edilmiştir.

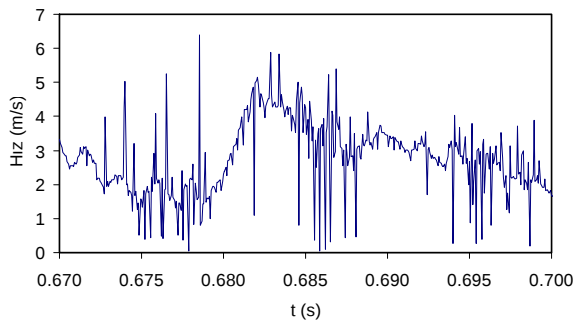
Çizelge 4.2 Deneysel çalışmada serbest jet ve farklı hız oranları için ölçüm alınan kesitler.

Ölçüm Alınan Kesitler	Serbest Jet	R		
		0.5	1	1.5
x/D	0	0	0, 2	0, 2, 4
y/D	0	0	0	0
z/D	0, 4, 8, 10, 14	6, 10	0, 4, 6, 8, 10	0, 6, 10

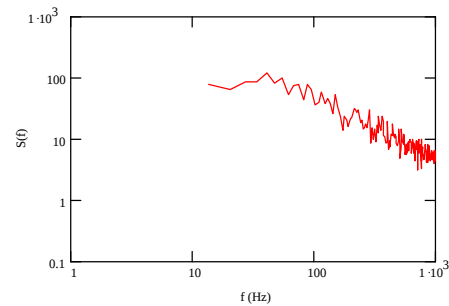
Şekil 4.16’da sadece jet akışı olması durumunda lüle çıkışındaki ortalama hız 10 m/s iken ($Re_{jet}=4800$) $z/D=14$ düşey konumunda elde edilen hız verisi ve bu veriye ait FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) kullanılarak elde edilen güç tayfı verilmiştir.

Verilen bir sinyal için güç tayfı (power spectrum), bu sinyalin gücünü yani birim zamandaki enerjisini gösterir. Bir güç tayfını elde etmede kullanılan en yaygın metot Fourier dönüşümüdür.

Spektral analiz sinyal enerjilerinin frekansa göre nasıl bir dağılım gösterdiğini sağlamada kullanılır ve Nyquist-Shannon örnekleme kriterine göre elde edilmiş verilerle gerçekleştirilir. Spektral analizin doğruluğu kullanılan verilerin sayısına bağlıdır. Nyquist-Shannon örnekleme kriteri özellikle sinyal işleme alanında dikkat edilmesi gereken bir metottur. Örnekleme zaman veya konumun fonksiyonu olarak bir sinyali ayrık zaman veya konum fonksiyonu olan sayısal düzene çevirme işlemidir.



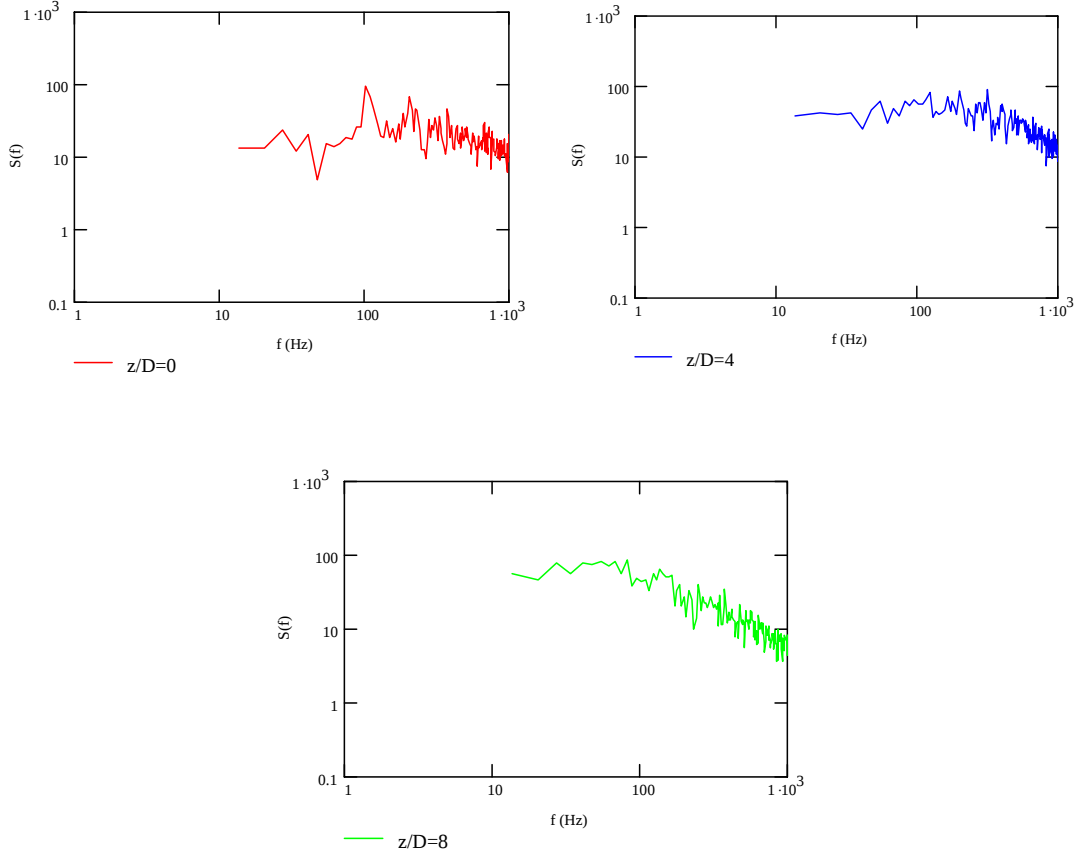
(a)



(b)

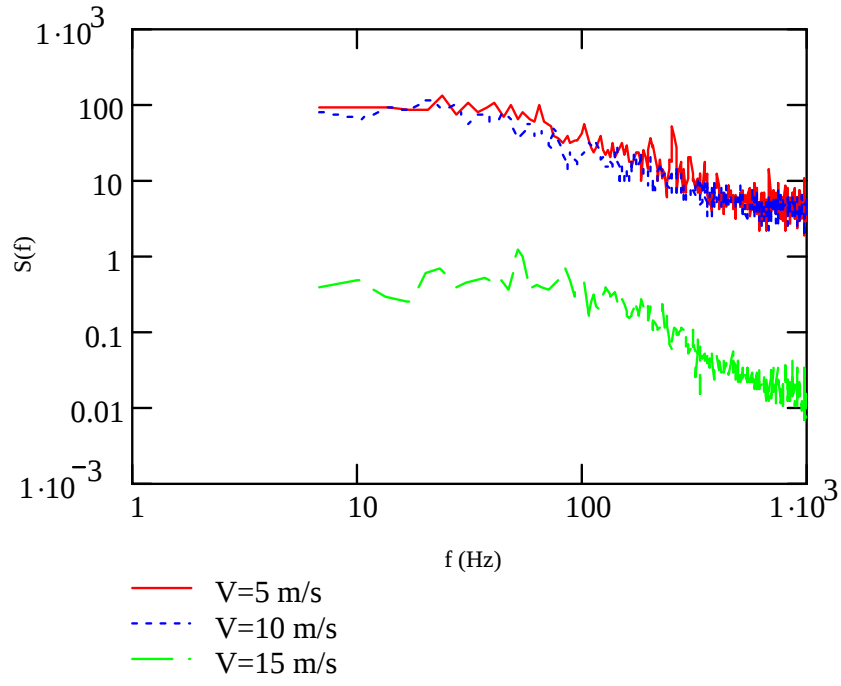
Şekil 4.16 Sadece jet akışı olması durumunda a) hız verisi b) güç tayfı, ($Re_{jet}=4800$, $x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=14$).

Şekil 4.17’de çapraz akışın olmadığı ve sadece lüleden 10 m/s hız ile püskürtülen jet akışına ait güç tayflarının değişik düşey mesafelerdeki ($z/D=0, 4, 8$) değişimleri verilmiştir. Lülenin hemen çıkışındaki ölçümü gösteren $z/D=0$ istasyonuna ait güç tayfı diğer istasyonlardakilerden farklı olup daha laminar bir karakter göstermektedir. Lülenin hemen çıkışında olması dolayısıyla lüledeki akışı aynen devam ettirmesi laminar akış özelliği göstermesine neden olmaktadır. Ancak ilerleyen istasyonlarda akış giderek daha türbülans özelliği kazanmaktadır.

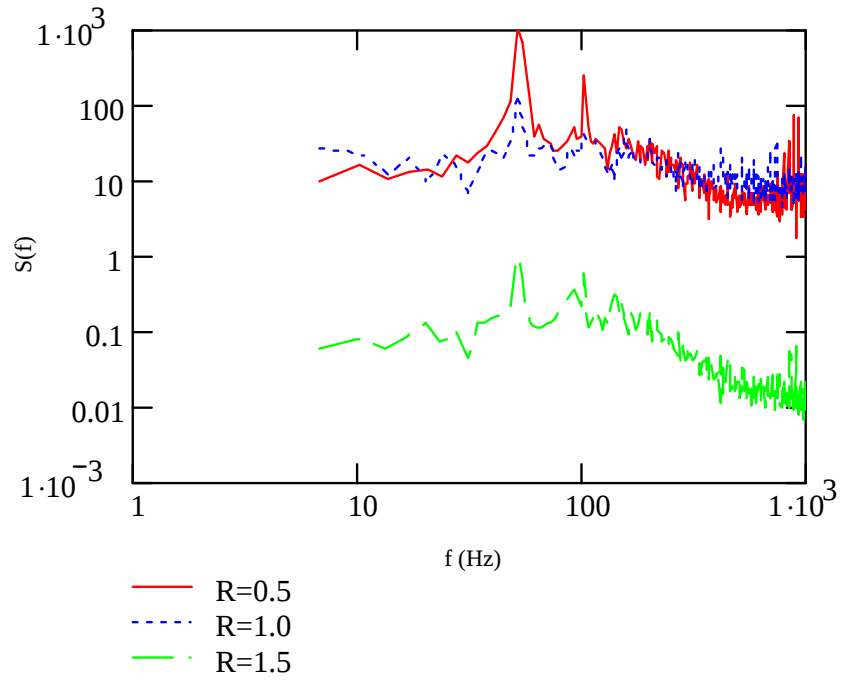


Şekil 4.17 Sadece lüleden 10 m/s ile akış olduğunda farklı istasyonlara ait güç tayfları, ($x/D=0, y/D=0$).

Şekil 4.18a’da lüleden farklı hızlarda (5 m/s, 10 m/s ve 15 m/s) püskürtülen serbest jetlere ait güç tayfları gösterilmiştir. Bu grafikler sadece lüleden akış olması durumu için elde edilmiş olup, farklı lüle çıkış hızlarının etkisini göstermektedir. Lüledeki farklı akış hızları için kanaldan tek bir hız değeri ile çapraz akış olması halinde elde edilen güç tayfları ise Şekil 4.18b’deki gibidir. Görüldüğü gibi kanaldan çapraz akış olması halinde her üç hız oranında da güç tayflarında tepe noktaları meydana gelmektedir. Sadece lüleden serbest jet akışı olması ve çapraz akışında aynı anda gerçekleşmesi durumlarında baskın frekansların enerjilerinde hız oranlarıyla ters orantılı bir düşme görülmektedir.



(a)

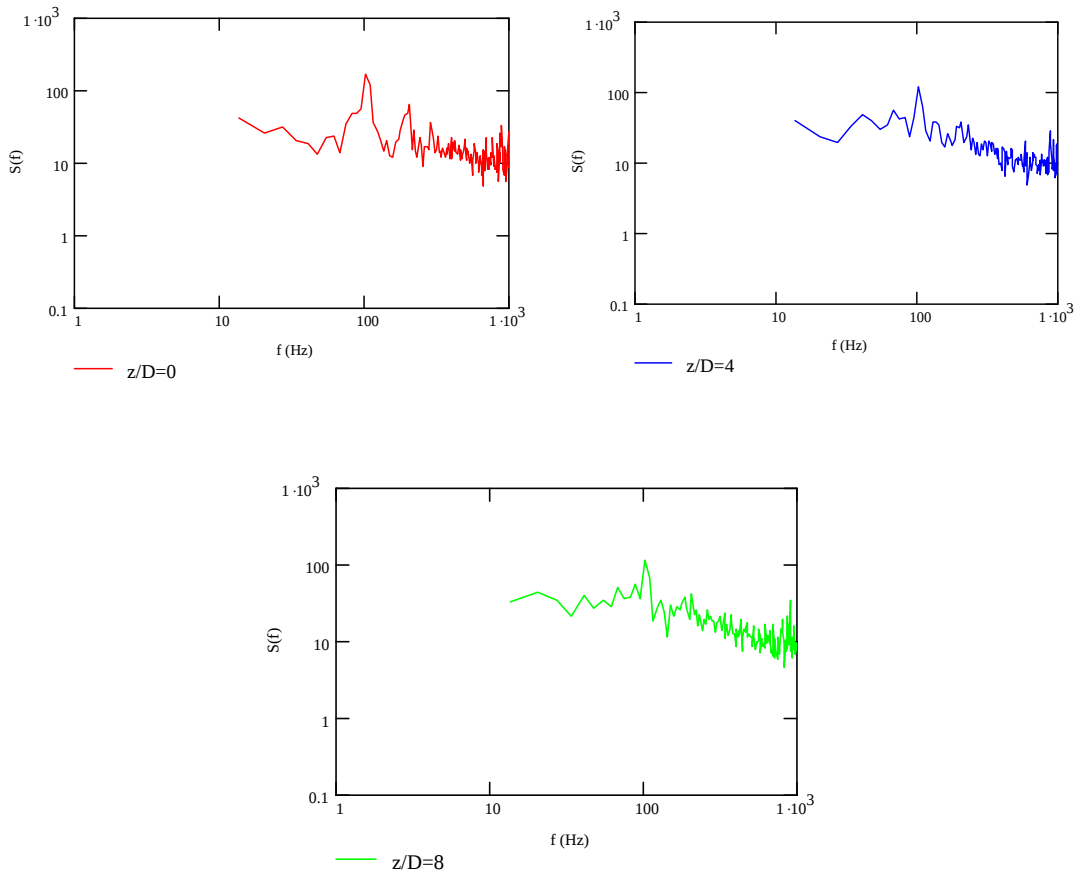


(b)

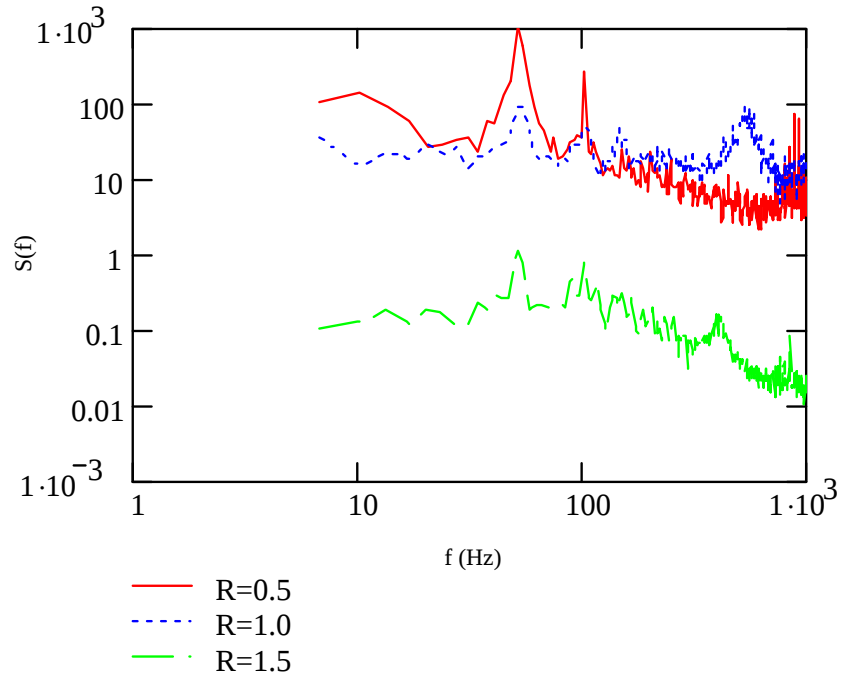
Şekil 4.18 Farklı çıkış hızlarına sahip serbest jet akışı (a) ve lüle ile kanaldan aynı anda farklı hız oranlarında olmak üzere çapraz jet akışı olması halinde (b) elde edilmiş güç tayfları, ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=10$).

Şekil 4.19’da lüleden akış olmadığı ve sadece rüzgâr tüneline 10 m/s ile çapraz akış olması durumunda $z/D=0$, 4 ve 8 no’lu istasyonlardaki güç tayfları görülmektedir. Burada dikkati çeken en önemli farklılık, yaklaşık 85 Hz civarında bir tepe noktasının var olmasıdır. Serbest jet olması durumunda görülmeyen (Şekil 4.17) bu tepe noktaları rüzgâr tüneline meydana getirdiği bir titreşim veya bir frekans bozucunun varlığına işaret etmektedir.

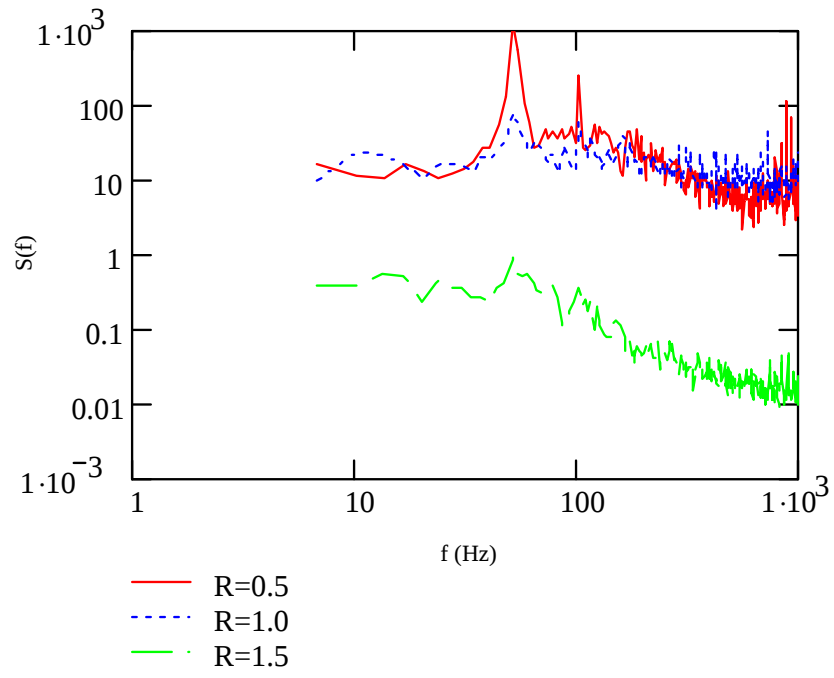
Hem lüle hem de rüzgar tüneline jet ve çapraz akışların olması durumunda elde edilen güç tayflarının lüle merkezinden kanal içerisine doğru farklı istasyonlardaki ($z/D=0$ ve $z/D=6$) değişimi ise hızların oranı $R=0.5$, 1.0 ve 1.5 için Şekil 4.20’de verilmiştir. Rüzgâr tüneline ait güç tayflarında görülen tepe noktalarının varlığı ve güç tayflarının dağılımları, lüleden püskürtülerek sağlanan jet akışından ziyade daha çok çapraz akışın etkisinde kalmakta olduğundan sadece rüzgâr tüneline çalışırken elde edilen çapraz akış tayflarına benzemektedir. Şekillerden R arttığı yani çapraz akış azaldığında kinetik enerjinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.19 Sadece rüzgar tüneline 10 m/s ile akış olduğunda farklı istasyonlara ait güç tayfları, ($x/D=0$, $y/D=0$).



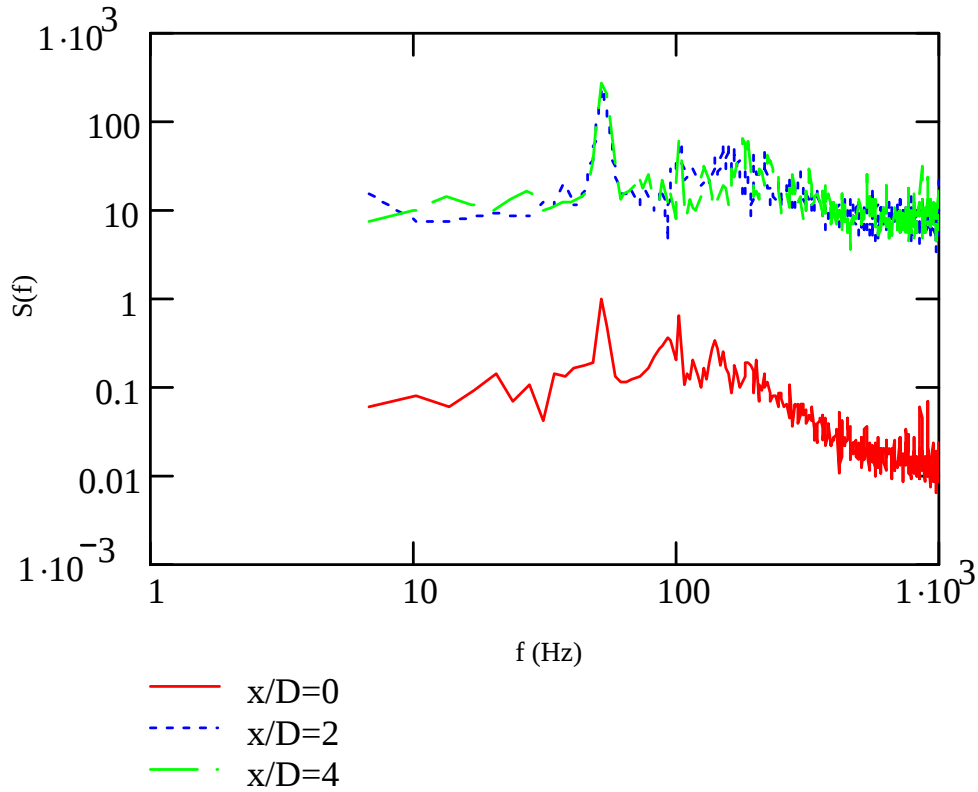
(a)



(b)

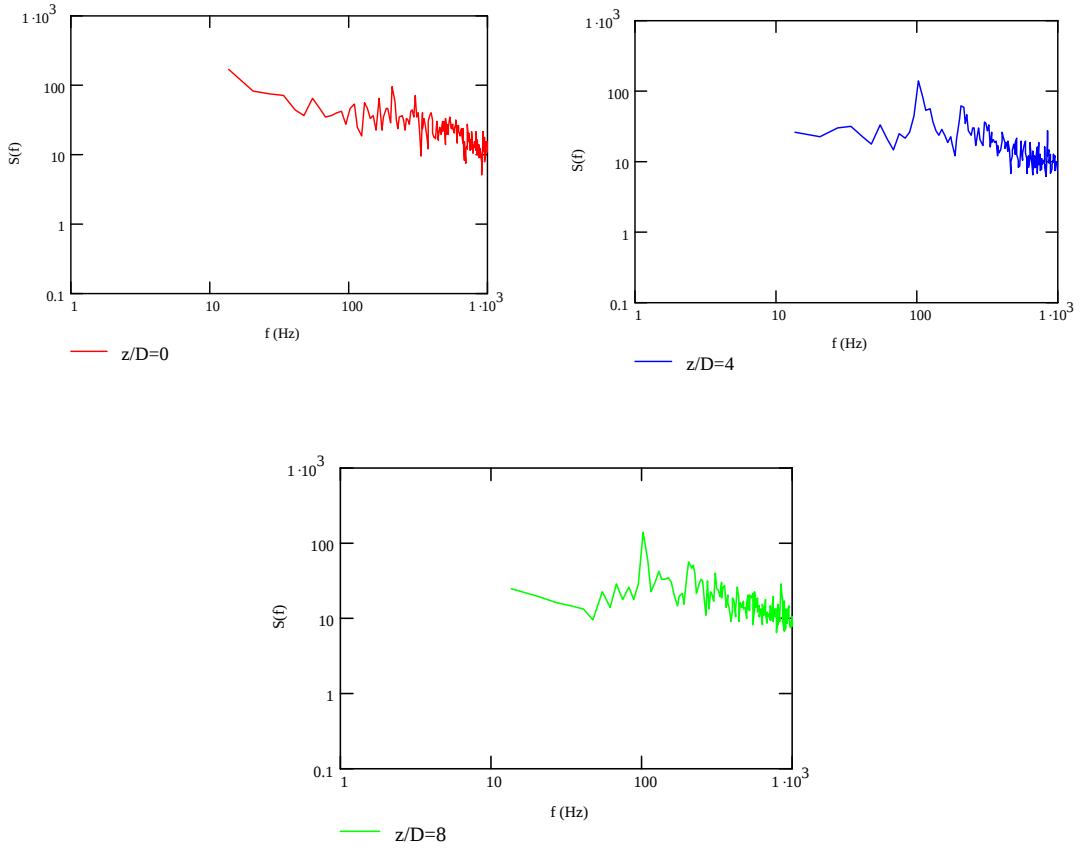
Şekil 4.20 Farklı hız oranlarında elde edilen güç tayfları, a) $z/D=0$, b) $z/D=6$, ($x/D=0$, $y/D=0$).

Çapraz akıştaki jet akışlarında Fourier metodu kullanılarak elde edilen güç tayflarının çapraz akış yönündeki değişimi üç farklı istasyon ($x/D=0, 2$ ve 4) ve $R=1.5$ için Şekil 4.21’de sunulmuştur. Görüldüğü gibi son iki istasyon olan $x/D=2$ ve $x/D=4$ ’e ait güç tayflarının değişimi benzer olup ilk istasyona ait güç tayfından farklıdır. Çapraz akış yönünde ilk istasyon olan $x/D=0$ ’daki enerji seviyesi daha düşüktür. Bunun nedeni jete yaklaştıkça jetin etkisiyle çapraz akışın enerji seviyesinin düşmesidir. Bu etkiden kurtuldukça çapraz akış etkisi baskın gelmekte ve bu da enerji seviyesini artırmaktadır.



Şekil 4.21 $R=1.5$ için farklı istasyonlarda elde edilen güç tayfları, ($y/D=0, z/D=0$).

Kanal boyunca jet merkezinden 2D kadar akış yönünde ($x/D=2$) $R=1.0$ için ölçülen hızlara ait güç tayfları Şekil 4.22’de görülmektedir. Buradaki ilk istasyon olan $z/D=0$ ’da herhangi bir tepe noktası olmaması, bu noktanın lülenin kanala girdiği nokta olması sebebiyle jet akışının etkisinde kaldığını göstermektedir. Kanal içerisine doğru inildikçe elde edilen dağılımlar $x/D=0$ istasyonunda ölçülenlere benzer olup, hemen hemen aynı frekanslarda tepe noktaları oluşmaktadır. Bu durum bu istasyonlarda jetten ziyade çapraz akışın daha yüksek momentuma sahip olduğunu ve bu bölgelerde baskın gelerek jet akışını etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.22 $R=1.0$ için farklı istasyonlarda elde edilen güç tayfları, $(x/D=2, y/D=0)$.

4.4 Deneysel Verilerin Dalgacık (Wavelet) Analizi

Bu alt bölümde, sabit-sıcaklık hızölçeri kullanılarak dairesel kesitli bir lüleden rüzgar tünelinin test kesidine dik olarak püskürtme yapmak suretiyle elde edilen deneysel veriler dalgacık (wavelet) ayrıklaştırması metodu kullanılarak değerlendirilecektir. Elde edilen deneysel veriler hem değişik çıkış hızlarına sahip serbest jet akışları hem de farklı hız oranlarındaki ($R=0.5, 1.0, 1.5$) çapraz jetler için çapraz akış yönü (x/D) ve jet akış yönlerindeki (z/D) farklı istasyonlar arasında mukayese yapılarak değerlendirilmiştir.

Wavelet ifadesi “küçük dalga” anlamına gelir. Wavelet, verilen bir fonksiyon veya zaman alanındaki sinyalleri bölmeye yarayan matematiksel bir fonksiyondur. Bir wavelet dönüşümü bir fonksiyonun dalgacıklarla gösterilmesidir. Dalgacıklar sonlu uzunluktaki veya çok hızlı bozulmuş dalgaformlarının (ana dalgacık) kopyaları olabilirler (evlat dalgacık). Dalgacık dönüşümü süreksiz ve keskin tepe noktalı fonksiyonların gösteriminde klasik Fourier dönüşümlerine göre daha avantajlıdır. Dalgacık teorisi pek çok konuya uygulanabilir. Bütün dalgacık dönüşümleri zaman-frekans veya sürekli–zaman (analog) sinyaller olarak düşünülebilir bu nedenle harmonik analizle ilişkilidirler. Bilindiği üzere Fourier analizi sinyal

işleme alanında geniş olarak kullanılmaktadır. Ancak frekans alanında bilgi veren analitik bir method olmasından dolayı zaman alanında bilgi içermemektedir. Bu nedenle dalgacık (wavelet) analizi geliştirilmiştir. Fourier dönüşümü (FT) ve hızlı Fourier dönüşümüne (FFT) göre wavelet analizi, konum (ve zaman) ve frekans alanında önemli bilgiler sunmaktadır. Sinyaldeki farklı frekans düzeylerinin incelenmesine imkan verdiği için wavelet, “matematiksel mikroskop” olarak düşünülebilir (Li vd., 2007).

Li vd., 2007, bina çevrelerindeki havanın çalkantı karakteristiklerine dalgacık dönüşümünü uygulayarak, binalar etrafındaki doğal rüzgar ve santrifüj bir fandan beslenen bir serbest jet oluşturularak elde edilen zorlamalı bir akış arasındaki benzerlik ve farklılıkları bulmuşlardır.

4.4.1 Matematiksel Alt Yapı

Bir dalgacık, gerçekte ve kompleks değerli bir $\psi \in L^2$ fonksiyonu olabilir (L integral uzunluk ölçeğidir). Bu fonksiyon ise dalgacık kabul şartını sağlamalıdır.

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty \quad (4.16)$$

Burada C_ψ kabul edilebilirlik sabiti ve $\hat{\psi}(\omega)$ ise $\psi(t)$ 'nin Fourier dönüşümüdür.

$$\hat{\psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4.17)$$

$\psi(t) \in L^2$ olduğundan Denk. 4.17, $\psi(t)$ 'nin sıfır olmasını gerektirir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \text{ veya } \hat{\psi}(\omega = 0) = 0 \quad (4.18)$$

$\psi(t)$ ana dalgacık (mother wavelet) olarak tanımlanmıştır ve sürekli dönüşüm ve genişleme ile bir dalgacık ailesinin üretilmesinde kullanılır (Denk. 4.19)

$$\psi_{a\tau} = p(a) \psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right) \quad (4.19)$$

Burada $a \in \mathfrak{R}^+$ genişleme ölçeği değişkeni, $\tau \in \mathfrak{R}$ genişleme değişkeni ve $p(a)$ ise ilave (weighting) fonksiyon olup değişik amaçlar için farklı seçilebilir. Literatürde $p(a)$ 'nın değeri $a^{-1/2}$, a^{-1} ve $a^0=1$ olarak alınabildiği görülmüştür (Farge, 1992, Lewalle, 1998). Bu çalışmada $p(a)$ değeri $a^{-1/2}$ olarak alınmış olduğundan dalgacık örneği olan L^2 a'dan bağımsız olmuştur.

Böylece bütün dalgacıklar her bir ölçekte aynı enerjiye sahip olmuşlardır.

$F(t)$ 'nin sürekli dalgacık dönüşümü L^2 ile f ve dalgacık ailesi olan $\psi_{a\tau}$ arasındaki iç çarpımı olarak tanımlanabilir:

$$W(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a\tau}^* dt \quad (4.20)$$

Denk. 4.20'deki $\psi_{a\tau}^*$, $\psi_{a\tau}$ 'nin kompleks bileşimidir. Sürekli dalgacık dönüşümünde dalgacıklar dikey (orthogonal) olmayıp dönüşüm çok fazla bilgi içerir. Bunun yanında, kabul edilebilirlik şartından dolayı $f(t)$ 'nin sinyali kendi dalgacık katsayılarından düzeltilebilir:

$$f(t) = 1/C_\psi \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} W(a, \tau) \psi_{a\tau} da d\tau / a^2 \quad (4.21)$$

Bunun yanında Parseval eşitliğinden,

$$\|f\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = (1/C_\psi) \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} |W(a, \tau)|^2 da d\tau / a^2 \quad (4.22)$$

Kıvrım (büküm) teoreminden dalgacık dönüşüm katsayıları aşağıdaki gibi $p(a)=a^{-1/2}$ için hesaplanabilir:

$$W(a, \tau) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) [\hat{\psi}_a(\omega)]^* e^{i\omega\tau} d\omega \quad (4.23)$$

Denk. 4.23'te görülen $\hat{\psi}_a(\omega) = a^{1/2} \hat{\psi}(a\omega)$, $a^{-1/2} \psi(t/a)$ 'nın Fourier dönüşümüdür. Böylece a 'nın her bir ölçeğinde $W(a, \tau)f(t)$ 'nin filtrelenmiş ve $\hat{\psi}_a(a)$ tarafından band filtrelenmiş sürüm olarak yorumlanabilir.

Dalgacık ve Fourier sonuçlarını karşılaştırmak için, bir ölçek sayısının tanımlanması oldukça yararlı olacaktır ($s=1/a$, Hudgins vd., 1993). Bu ölçek sayısı ise Fourier analizindeki frekans gibi önemli bir role sahiptir. Bu yeni s değişkeni cinsinden Parseval eşitliği şu şekilde değişir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = (1/C_\psi) \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} |W(s, \tau)|^2 ds d\tau \quad (4.24)$$

Dalgacık güç tayfı (wavelet power spectrum) aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$P_W(s) = (1/C_\psi) \int_{-\infty}^{\infty} |W(s, \tau)|^2 d\tau \quad (4.25)$$

Dalgacık (wavelet) güç tayfını Fourier güç tayfı ($P_F(\omega) = \left(\frac{1}{2}\pi\right) |\hat{f}(\omega)|^2$) ile ilişkilendirmek için aşağıdaki ifade elde edilmiştir:

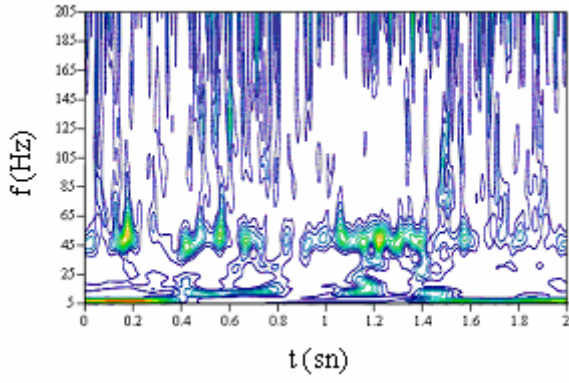
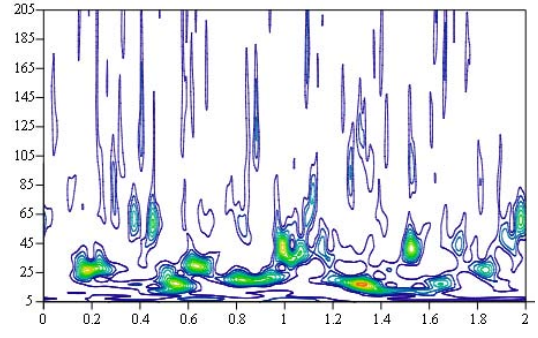
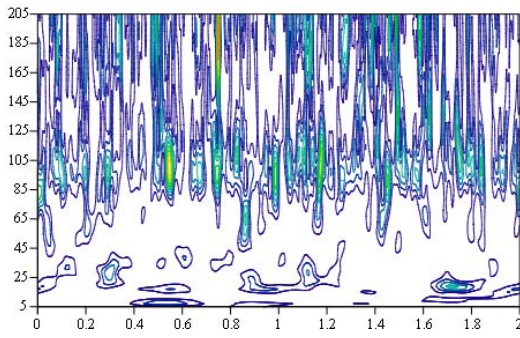
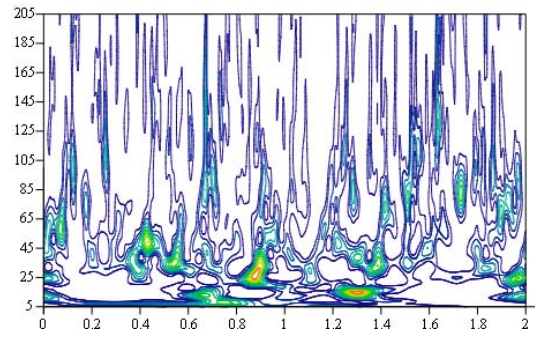
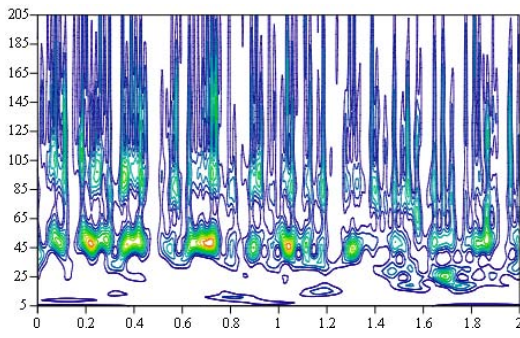
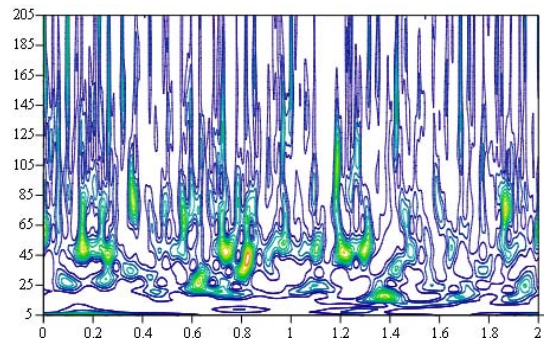
$$P_W(s) = (1/C_\psi) \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}_s(\omega)|^2 P_F(\omega) d\omega \quad (4.26)$$

Burada $\hat{\psi}_s = s^{-1/2} \hat{\psi}(\omega/s)$ ifadesi $\hat{\psi}_s(t) = s^{1/2} \psi(st)$ 'nin Fourier dönüşümüdür.

Böylece, $P_{W(s)}$ ifadesi $P_F(\omega)$ Fourier güç tayfının ortalaması olup dalgacık filtresinin güç tayfı ile dengelenmiştir. Bu nedenle dalgacık analizi Fourier analizine göre güç tayfını daha düzgün ve temiz bir şekilde gösterilmesini sağlar. Bu özellik ise deneysel olarak elde edilmiş türbülans hız sinyallerindeki baskın frekansların saptanmasında Fourier analizine göre daha büyük avantaj sağlar.

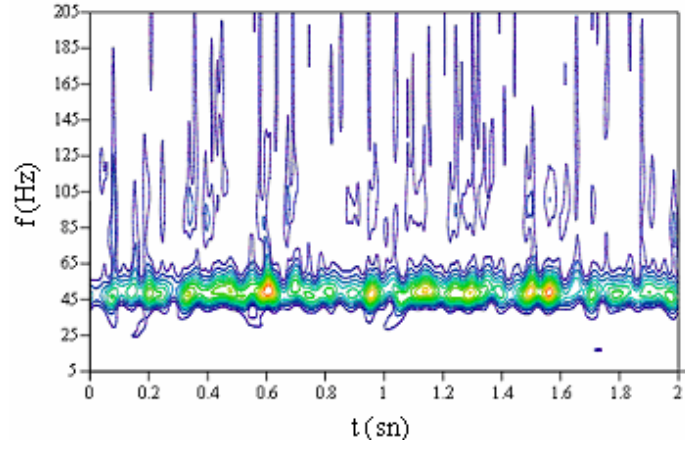
4.4.2 Verilerin Wavelet Analizi

Şekil 4.23 dairesel kesitli lüleden farklı çıkış hızlarında serbest jet akışı olması halinde lüle merkezinde ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=0$) ve $x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=10$ 'da frekansların zamana göre değişimlerini göstermektedir. Dalgacık (wavelet) analizinin en büyük yararlarından biri de, akışta meydana gelen olayların sıklığı ya da periyodu hakkında fikir edinmeyi sağlamaktır. Serbest jetin en düşük hız ile kanala girmesi durumunda lüle merkezindeki baskın frekans çok düşük zaman aralıklarında ve düşük değerlerde iken, hızın artırılması ile frekansın değeri 85 Hz civarına yükselmiştir. Serbest jet en yüksek hıza ulaştığında baskın frekans daha uzun zaman aralığında olmak üzere yaklaşık 45 Hz civarında da görülmeye başlamıştır. Lüle merkezinden ($z/D=0$) kanal içerisine inildikçe ($z/D=10$), baskın frekansların genel olarak daha düşük değerlerde ve daha seyrek olarak görüldüğü Şekil 4.23'ün sol tarafındaki haritalardan saptanmaktadır.

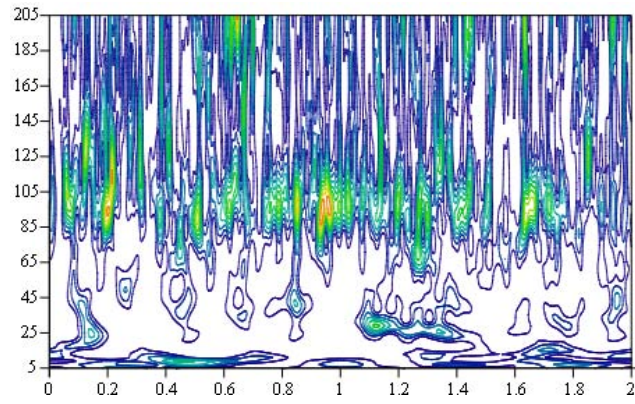
(Re_{jet}=2400, z/D=0)(Re_{jet}=2400, z/D=10)(Re_{jet}=4800, z/D=0)(Re_{jet}=4800, z/D=10)(Re_{jet}=7200, z/D=0)(Re_{jet}=7200, z/D=10)

Şekil 4.23 Serbest jetin farklı Re sayılarında kanala girmesi durumunda jet merkezindeki (z/D=0) ve z/D=10'daki dalgacık (wavelet) haritaları, (x/D=0, y/D=0).

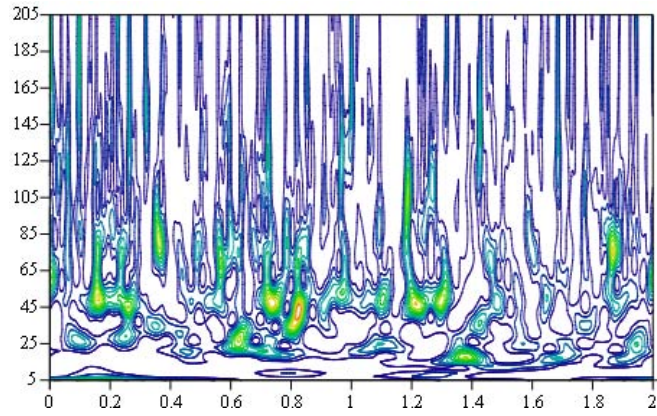
Şekil 4.24 lüle ve kanaldan jet ve çapraz akış olması durumundaki frekans-zaman ilişkisini x/D=0, y/D=0, z/D=10'de üç farklı hız oranı, R=0.5, 1.0 ve 1.5 için göstermektedir. En düşük hız oranı R=0.5'te baskın frekans 45 Hz'te olup zamanla frekans değeri ve sürekliliği değişmemektedir.



(a)



(b)

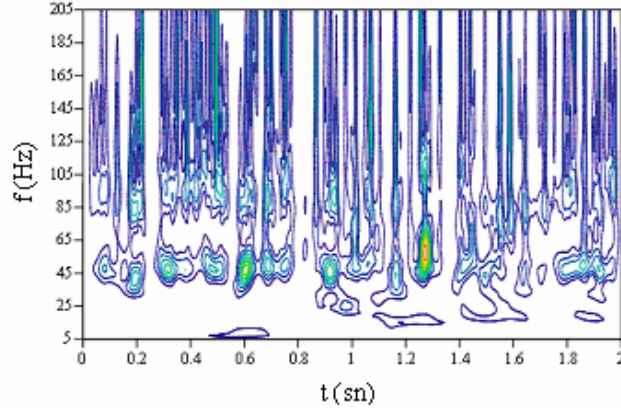


(c)

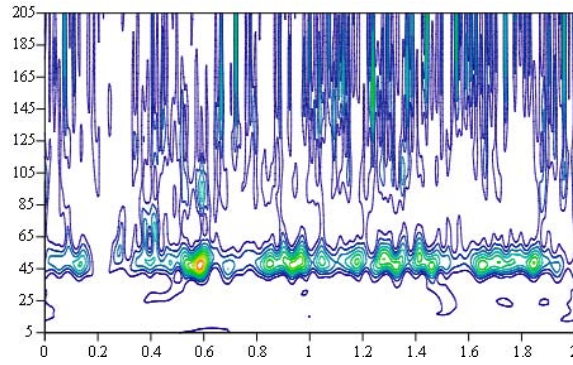
Şekil 4.24 Farklı hız oranları için elde edilen dalgacık (wavelet) haritaları, a) $R=0.5$, b) $R=1.0$, c) $R=1.5$, ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=10$).

Hızların oranı $R=1.0$ olduğunda ise baskın frekans daimi olarak 85 Hz ile 105 Hz arasında görülmekte ve en düşük hız oranındaki kadar olmasa da sıklığı zamanla çok fazla

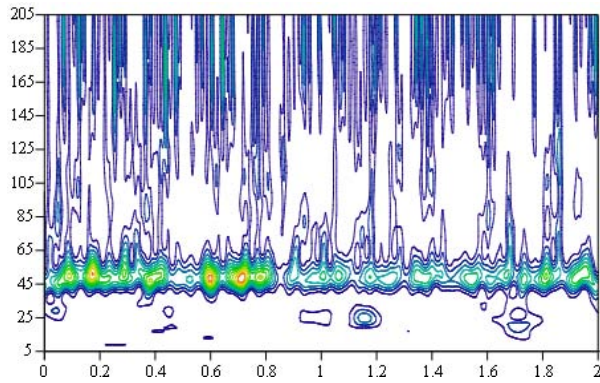
değişmemektedir. $R=1.5$ hız oranında çapraz akış yönündeki üç farklı istasyonda ($x/D=0, 2$ ve 4) görülen dalgacık haritaları çapraz akış yönünde baskın frekansın genlik olarak değişmediğini (45 Hz) ancak zamanla daha sıklaştığını ifade etmektedir (Şekil 4.25).



(a)



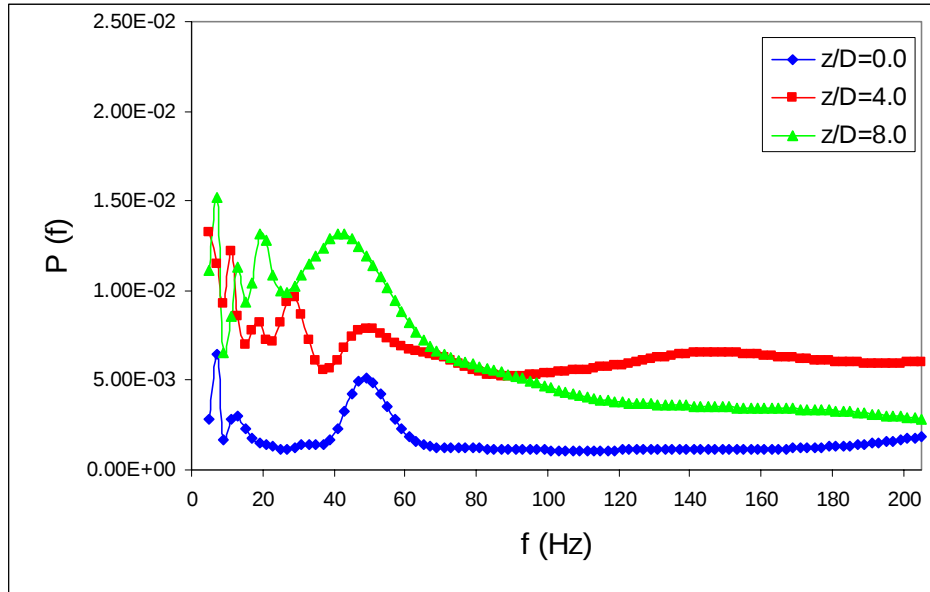
(b)



(c)

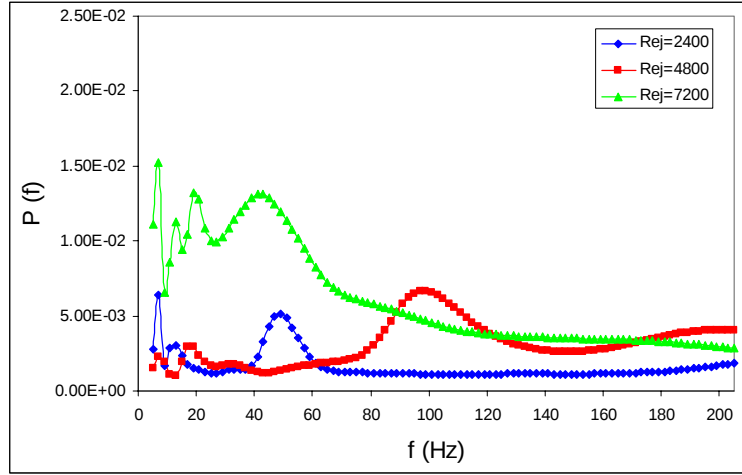
Şekil 4.25 Çapraz akış yönünde farklı istasyonlardaki dalgacık (wavelet) haritaları, a) $x/D=0$, b) $x/D=2$, c) $x/D=4$, ($R=1.5$, $y/D=0$, $z/D=10$).

Dalgacık analizi kullanılarak serbet jet için farklı z/D istasyonlarında elde edilen güç tayfları Şekil 4.26’da verilmiştir. Fourier ayrıklaştırma metodu kullanılarak elde edilen güç tayflarına göre, frekans hakkında daha anlaşılır bilgiler sunan wavelet (dalgacık) analizinin üstünlüğü burada görülmektedir. Wavelet güç tayfı, Fourier’e göre baskın frekansların daha açık izlenebilmesine imkân tanımaktadır. Serbest jet akış yönündeki her üç istasyonda da genlikleri farklı olmak üzere en baskın frekans 45 Hz civarında görülmektedir. Lüle merkezinden kanal içerisine doğru gidildikçe baskın frekansın enerjisi de büyümektedir.

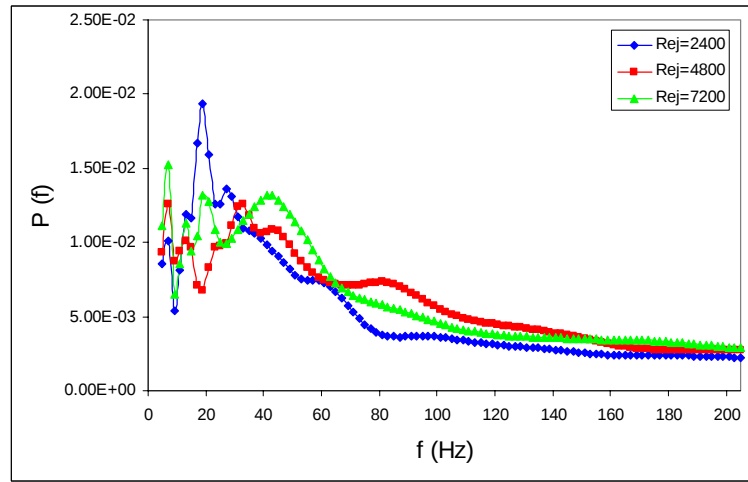


Şekil 4.26 Sadece jet akışının olduğu durumda jet merkezinden kanal içine doğru farklı istasyonlardaki dalgacık (wavelet) güç tayfları, ($Re_j=2400$, $x/D=0$, $y/D=0$).

Farklı çıkış hızlarına sahip serbest jet akışlarının lüle merkezinden kanal içerisine doğru iki farklı istasyondaki frekans ve genlik ilişkisi ise Şekil 4.27’dedir. En düşük ve orta hızlara sahip serbest jet akışında baskın frekans değerleri yaklaşık aynı iken (45 Hz), orta hızlı serbest jet akışında bu değer 100 Hz olarak görülmektedir. Serbest jet akışında giriş hızının, dolayısıyla serbest jet momentumunun frekans ve genlik üzerindeki etkisinin yanında ölçüm yapılan istasyondaki akışın etkisi de Şekil 4.27b’de sunulmuştur. Lüle merkezinde görülen değişimin aksine $z/D=10$ ’daki frekans dağılımları her üç çıkış hızı içinde benzer olmuştur.



(a)

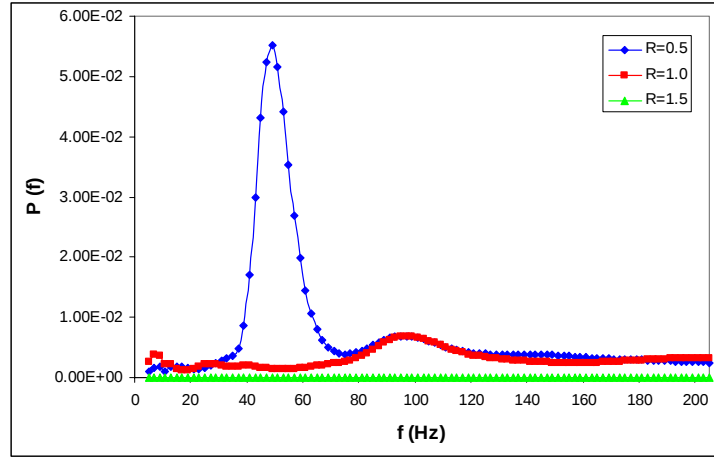


(b)

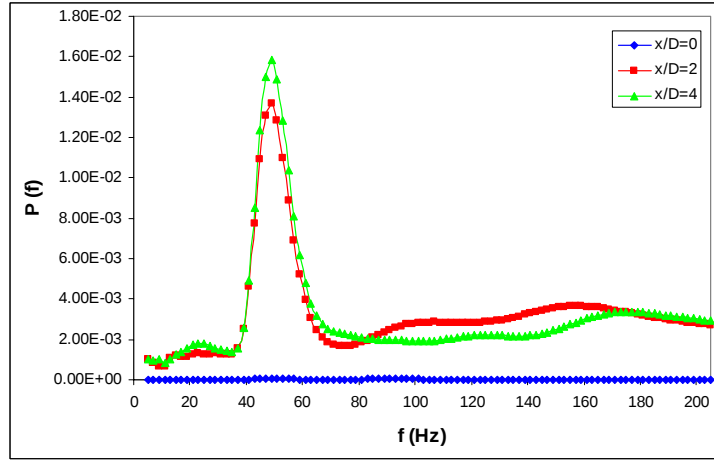
Şekil 4.27 Serbest jetin farklı giriş hızlarıyla kanala girmesi durumunda dalgacık (wavelet) güç tayfları, a) $z/D=0$, b) $z/D=10$, ($x/D=0$, $y/D=0$).

Lüle merkezinde çapraz akıştaki jet akışlarına ait frekans dağılımı ise üç farklı hız oranı için ($R=0.5$, 1.0 ve 1.5) Şekil 4.28’de gösterilmiştir. $R=1.0$ ve 1.5 hız oranlarındaki değişimler hemen hemen aynı iken $R=0.5$ hız oranındaki çapraz jet oldukça farklı bir değişim göstererek 45 Hz civarındaki maksimum genliğini muhafaza etmiştir.

Hız oranının en büyük değeri için çapraz akış yönünde üç farklı istasyonda görülen frekans değişimleri Şekil 4.29’da verilmiştir. Daha önce de görüldüğü gibi, ilk istasyon (lüle merkezi) dışında sonraki ikinci ve üçüncü istasyonlarda 45 Hz’lik bir baskın frekans göze çarpmaktadır.



Şekil 4.28 Hız oranlarının dalgacık (wavelet) güç tayfları üzerindeki etkileri, ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=10$).



Şekil 4.29 Hız oranı $R=1.5$ için dalgacık (wavelet) güç tayflarının çapraz akış yönünde farklı istasyonlardaki değişimleri, ($y/D=0$, $z/D=10$).

4.5 Deneysel Verilerin Uygun Ortogonal Ayırıklaştırma (POD) Yöntemi ile Analizi

Holmes vd., 1996, tarafından ifade edildiği üzere, değişik çalışma alanlarında Karhunen-Loeve ayırıklaştırması, asıl bileşen analizi, tekil sistem analizi ve tekil değer ayırıklaştırması gibi değişik isimler alan uygun ortogonal ayırıklaştırma (POD) ilk olarak Lumley, 1967, tarafından önerilmiştir. Bu teknik, hem deneysel hem de sayısal verilere uygulanarak hız alanını en uygun ortogonal fonksiyonlar olarak seriler cinsinden sunmayı amaçlar. Burada “*en uygun*” ifadesi hangi ortogonal fonksiyonlarla metodun seçileceğini ifade etmektedir. POD açılımında ilk ortogonal fonksiyon, akışta en fazla enerjiyi içerecek şekilde optimize edilmiştir. Diğer ardışık fonksiyonlar ise giderek azalan miktarlarda enerji içerirler.

Uygun ortogonal ayrıklaştırma metodunda akış alanı, toplam enerjiye olan katkılarına göre ortogonal modlara ayrılır. Bu ortogonal modların en büyük enerjili olanı, organize hareket olarak düşünülebilir. Hız alanlarına POD metodunun uygulandığı çalışmalar arasında Berkooz, 1993 sayılabilir. Moin, 1984 ve Moin ve Moser, 1989, akış alanındaki baskın girdapların türbülans kinetik enerjisinin %76'sını içerdiğini ifade etmişlerdir. Glezer vd.,1989, periyodik zorlamalı bir karışım tabakasına POD uygulayarak kinetik enerjinin %70'inin ilk üç modda toplandığını söylemişlerdir.

Allery vd., (2005), havalandırılmış iki boyutlu bir oyuktaki parçacık dağılımını Lagrange metodu kullanarak inceledikleri çalışmalarında parçacıkların bulunduğu yerdeki anlık hız alanını POD kullanarak elde etmişlerdir. Büyük girdap benzeşimi (LES) kullanarak 1000 parçacığın dağılımını hesaplamak için 19 gün gerekirken, POD yardımıyla 10000 parçacık için yalnızca üç gün gerektiği ileri sürülmüştür. Bu ise uygun ortogonal ayrıklaştırmanın kullanmanın gerek hesap zamanı gerekse de bilgisayar hafızası açısından oldukça ekonomik olduğunu göstermektedir.

Santa Cruz vd., 2005, çapı D olan bir yarım silindirin 0, 0.5D ve 1D kadar ilerisinde konumlandırılmış bir düzlem etrafındaki akış için iki-boyutlu PIV kullanılarak elde edilmiş hız alanlarına POD uygulayarak akış ile ilgili temel girdap yapılarının elde edilmesini amaçlamışlardır. Akış alanının anlık olarak incelenmesiyle akış dinamiğinin zaman-konum mod karakteristikleri tanımlanmıştır. Buna göre ikinci ve üçüncü modlar iki farklı Re sayısı için ($Re=410$ ve 1280) çalkalanan yapıların toplam enerjisinin sırasıyla %70 ve %50'sini içermektedir.

O'Donnel ve Helenbrook, 2007, bir küre üzerindeki sürtünme kuvvetlerini farklı Re sayıları için POD kullanarak incelemişlerdir. POD tekniğinin hız alanı üzerine uygulandığı önceki çalışmaların aksine basınç alanlarına POD uygulanması oldukça yeni bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilen sayısal akış çözümlemelerinde POD modları elde edilmiştir. Birinci ve ikinci modlar için küre etrafındaki akım hatları gösterilerek bu tip akış olaylarında görülen girdap yapılarının ilk iki modda yakalandığı gösterilmiştir. Onbirinci moda kadar yapılan çalışmaların sonunda sürüklenme kuvvetinin % 100'ü hesaplandığından tam bir HAD çözümünün gerekmediği de ifade edilmiştir.

Galvanetto ve Violaris, 2007, bir kırışteki hasarın ve bu hasarın yerinin tespiti için POD kullanmışlardır. Druault ve Chaillou, 2007, bir silindir içerisinde PIV kullanılarak elde

edilen iki-boyutlu hız alanlarına POD uygulayarak üç-boyutlu anlık hız alanlarını elde etmişlerdir. Bu ise POD yönteminin ne kadar kullanışlı ve ekonomik bir yöntem olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Bu bölümde iki farklı hız oranı, $R=0.5$ ve 1.5 için çapraz akış yönünde üç ve jet akışı yönünde iki farklı istasyonda elde edilen hız alanlarına POD uygulanarak çapraz akıştaki jet akışlarında enerjinin hangi modlara dağıldığı, konum ve hız oranlarının bunun üzerindeki etkileri incelenmiştir. Her bir modun aktivasyonu (harekete geçme enerjisi) saptanarak akışın toplam enerjisinin her bir POD modunda nasıl dağıldığı da ayrıca sunulmuştur.

4.5.1 Matematiksel Alt Yapı

Uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD), organize verileri ortogonal modlara ayırmasıyla son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Lumley, 1970, türbülans gibi karmaşık alanları tanımlarken bunun mümkün olduğu kadar hız alanı vektörü u 'ya paralel olacak şekilde düşünmüştür. İstatistikî açıdan vektör ile deterministik fonksiyonun çarpımının karesinin maksimum olacak şekilde bir ifade sunulmuştur.

$$\int_{-\infty}^{\infty} R_{uu}(t, t') k(t') dt' = \lambda k(t) \quad (4.27)$$

Burada $R_{uu}(t, t')$ zaman gecikmeli korelasyon fonksiyonu ve k ise deterministik öz vektördür. Denk. 4.27'nin çözümü veri serilerinin izin verdiği kadar pek çok öz modları (λ ve $k(t)$) verir. λ eigen değer ve $k(t)$ ise öz vektör olarak tanımlanmıştır. Böylece ayrıklaştırmanın her bir modu şu şekilde ifade edilebilir:

$$u_i = (u, k_i) k_i \quad (4.28)$$

Denk. 4.28'de (u, k_i) iki vektör fonksiyonunun iç çarpımıdır. Her bir öz modu bir düzenli yapı olarak düşünülebilir. u vektörü şu şekilde çözülür:

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} (u, k_i) k_i \quad (4.29)$$

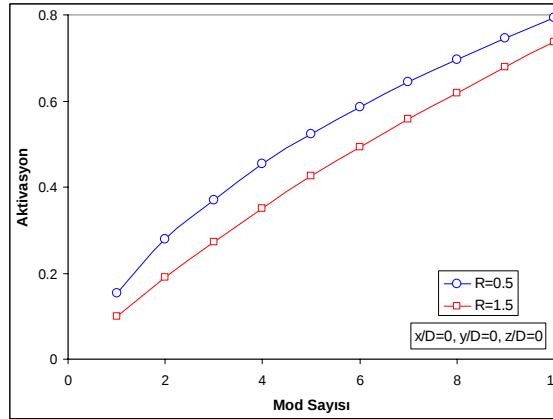
Durağan (sabit) işlemler için bu öz fonksiyonları harmonik olur ve açılımı Fourier dönüşümü halini alır. Modların aktivasyonu ortogonal modların akıştaki toplam enerjiye katkısını karakterize eder. Her bir i 'inci modun aktivasyonu şu şekilde hesaplanır:

$$\Lambda_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j} \quad (4.30)$$

Burada Λ_i , i 'inci modun aktivasyonu ve λ_i ise i . modun öz değeridir. Düşük Reynolds sayılı akışlarda enerjinin büyük bir kısmı oldukça az sayıdaki modlarda görülmektedir. Bu nedenle akıştaki düzenli yapılar kolaylıkla saptanıp POD tekniğiyle tanımlanabilir.

4.5.2 Verilerin POD Analizi

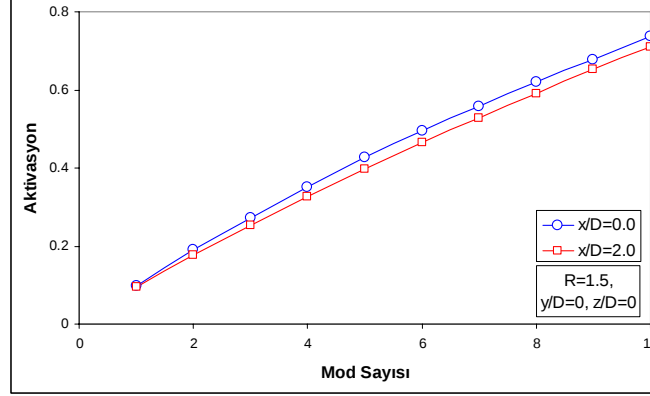
Şekil 4.30'da lüle merkezinde ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=0$) iki farklı hız oranı ($R=0.5$ ve 1.5) için ilk on modun enerji aktivasyonları gösterilmiştir. Burada gösterilen modların aktivasyonu akıştaki toplam enerjiye ortogonal modların yapmış olduğu katkıyı karakterize eder. Görüldüğü gibi aktivasyon değerleri her iki hız oranı için de modlarla beraber artmaktadır. Ancak düşük hız oranı olan $R=0.5$ 'teki modların, yüksek hız oranındaki modlara göre nazaran daha yüksek enerji içerdikleri görülmektedir. Görüldüğü gibi $R=1.5$ hız oranındaki enerji, $R=0.5$ 'e göre daha çok sayıda moda dağılmaktadır.



Şekil 4.30 Çapraz akıştaki jet akışında iki farklı hız oranı için lüle merkezinde ($x/D=0$, $y/D=0$, $z/D=0$) elde edilen ilk on moda ait aktivasyon dağılımları.

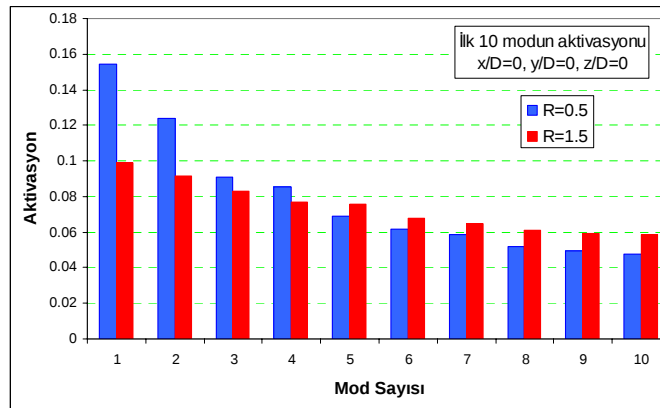
$R=1.5$ için farklı istasyonlardaki enerji aktivasyon değerlerinin modlara göre dağılımı Şekil 4.31'deki gibidir. Buradaki enerji dağılımları, lüle merkezinde ($x/D=0$) ve çapraz akış yönünde ($x/D=2$) olmak üzere iki istasyon için gösterilmiştir. İlk istasyon olan lüle merkezindeki modların bir sonraki istasyona göre daha yüksek enerjiye sahip oldukları net olarak görülmektedir. Bu durum özellikle yüksek modlara çıkıldıkça daha da belirgin olmaktadır.

Gerek Şekil 4.30'dan gerekse Şekil 4.31'den görüldüğü gibi, düşük hız oranında ilk on mod toplam enerjinin yaklaşık % 80'ini, daha yüksek hız oranı olan $R=1.5$ 'ta ise ilk on mod toplam enerjinin yaklaşık %70'ini taşımaktadır. Aynı şekilde lüle merkezinde enerjinin %75'i, ikinci istasyon olan $x/D=2$ 'de ise %70'i ilk on modda toplanmaktadır.



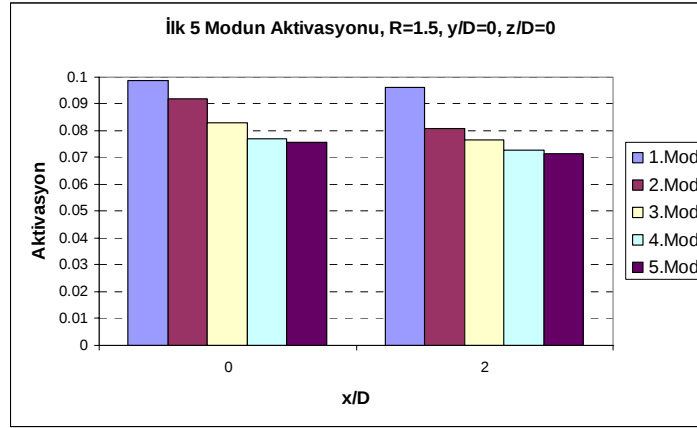
Şekil 4.31 Hız oranı $R=1.5$ için dalgacık (wavelet) ayrıklaştırması ile elde edilen güç tayflarının çapraz akış yönünde farklı istasyonlardaki değişimleri, ($y/D=0$, $z/D=0$).

Şekil 4.32 lüle merkezinde $R=0.5$ ve $R=1.5$ için ilk on modun taşımış oldukları enerjinin dağılımlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Bu grafikte düşük hız oranındaki modların daha yüksek hız oranına göre taşıdıkları enerjinin büyüklüğü daha net olarak görülmektedir. Örneğin $R=0.5$ hız oranındaki birinci mod toplam enerjinin yaklaşık %15.5'ini taşıırken $R=1.5$ 'daki birinci mod toplam enerjinin yalnızca %10'unu içermektedir. $R=0.5$ lehine olan bu durum dördüncü moddan sonra değişmekte ve bu sefer daha yüksek enerji taşıyan modlar $R=1.5$ hız oranında görülmektedir. Her iki hız oranı için de enerjinin büyük çoğunluğunun ilk modlarda taşındığı ifade edilebilir.



Şekil 4.32 Sadece jet akışı olduğunda iki farklı istasyon için $z/D=0$ 'da u-hızlarının ilk on modunun aktivasyon dağılımları.

$R=1.5$ hız oranı için ilk beş modun çapraz akış yönünde toplam enerjiden aldıkları pay oranları Şekil 4.33'teki gibidir. Bu grafikten hem çapraz akış yönünde ilk istasyonun bir sonrakine göre bütün modlarının daha yüksek enerji içerdikleri, hem de her bir modun ayrı ayrı toplam enerjinin daha yüksek kısmını taşıdıkları sonucu çıkarılabilir. İkinci istasyonda ($x/D=2$) birinci mod hariç enerji dağılımları birbirlerine çok yakın iken, ilk istasyonda ($x/D=0$) enerji dağılımları modlar arasında daha büyük farklılıklar içermektedir

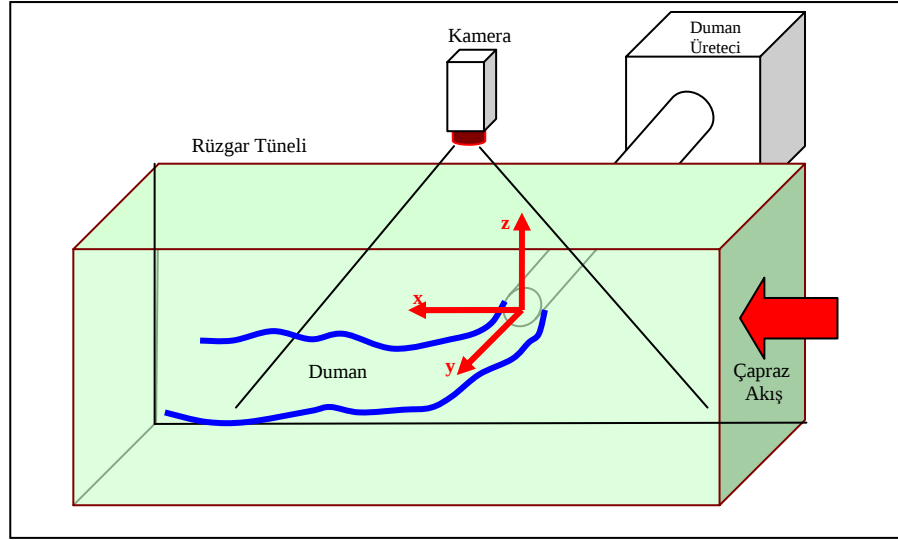


Şekil 4.33 İlk beş modun $R=1.5$ için farklı istasyonlardaki aktivasyon dağılımları, ($y/D=0, z/D=0$).

Hızların oranı R arttıkça enerjinin daha çok moda dağıldığı, bu da türbülans karakteristiğinin baskın hale gelebildiğini göstermektedir. Lüle çıkışına yaklaşıldıkça ilk modlar daha enerjili olmakta, lüle çıkışından uzaklaşıldıkça enerji daha fazla sayıda moda dağılmaktadır. Bu durum ise türbülans karakteristiğinin beklendiği gibi jet çıkışına yaklaşıldıkça artması ile açıklanabilir.

4.6 Akım Görüntüleme Tekniği ile Akış Alanının İncelenmesi

Çapraz jetlerdeki akış alanının farklı hız oranlarındaki değişimi akım görüntüleme tekniği ile incelenmiştir. Bunun için Dantec tarafından üretilen 10D15-60 numaralı bir duman üretici kullanılmıştır. Duman üretmede kullanılan parçacıklar su bazlı olup yaklaşık $1 \mu m$ çapındadırlar. Akımın görüntülenmesinde DCR-DVD 405E SONY marka dijital bir video kamera kaydedici kullanılmış olup, çekimler farklı hız oranlarında gerçekleştirilmiştir. Jet akışı, duman üreticiden gelen akışkanın bir lüle yardımıyla tünel içine gönderilmesi ile görünebilir hale getirilmiştir. Şekil 4.34'de görüldüğü gibi rüzgâr tünelinin üstüne konumlandırılan video kamera ile çapraz akıştaki jet akışı görüntüleri elde edilmiştir.



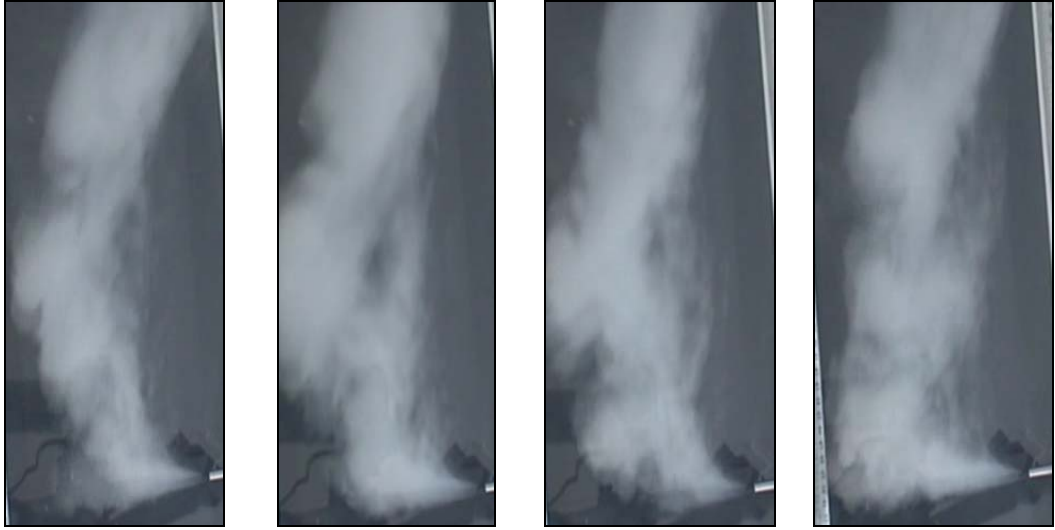
Şekil 4.34 Duman üretici ile akış alanının tespiti için kurulan deney düzeneği.

Çekimlere önce serbest jet akışı oluşturularak başlanmış, daha sonra jet ve çapraz akış hızları artırılarak hız oranlarının etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.35`te serbest jet akışı gösterilmiştir. Bu resimde elde edilen akış alanı, rüzgar tünelinin tamamen kapalı ve duman üreticinin ise minimum hızda çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Lüleden ortama püskürtülen dumanın hızı, ortamın hızından çok farklı olduğundan jetin kenarlarında kayma tabakası girdapları oluşmaktadır.



Şekil 4.35 Serbest jet akışının duman ile görüntülenmesi.

Şekil 4.36 duman üretici ile rüzgar tünelinin minimum hızlarda çalıştırılması durumunda oluşan akış yapısını göstermektedir. Akış zamana bağlı olduğundan, farklı zamanlarda kaydedilen görüntüler akışın zamanla nasıl değiştiğini ve akış alanındaki değişimleri ortaya koymaktadır.

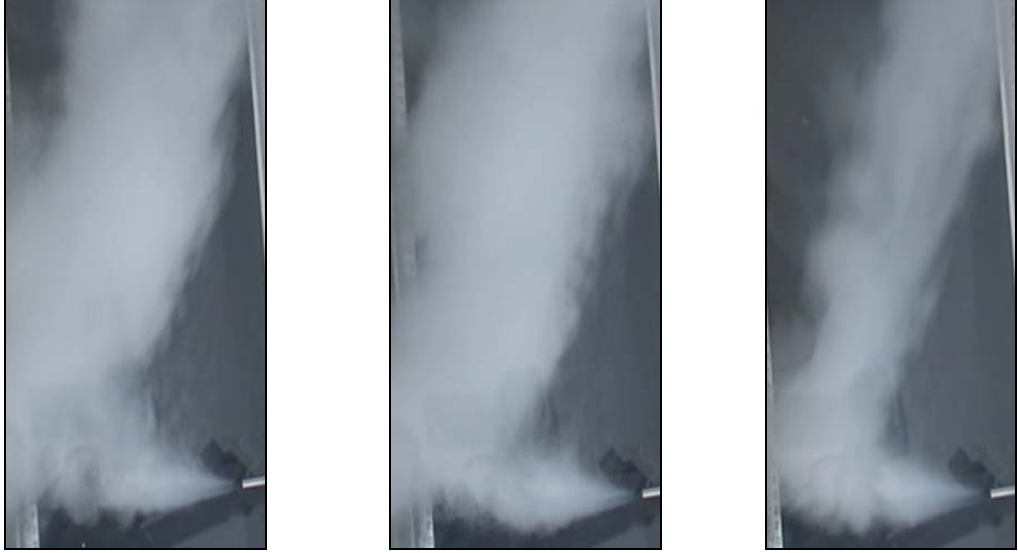


Şekil 4.36 Rüzgar tüneli ve jet en düşük hızlarda çalıştırılırken oluşan akış yapısı.

Şekillerden görüleceği gibi, duman üreticinden sağlanan jet hızının yüksek olması nedeniyle jet akışı özellikle lüle çıkışında çok baskın olmaktadır. Şekil 4.36'da farklı zamanlarda elde edilen görüntülerde lüleden uzak bölgede jetin çapraz akış etkisine girdiğini ancak lüle çıkışında jet momentumun çok yüksek olması sebebiyle çapraz akışın bu bölgede baskın olamadığını ortaya koymaktadır. Elde edilen resimler, jet akışının baskın olduğu bölgeden sonra jetin çapraz akış etkisinde kalarak çapraz akış doğrultusunda akmaya başladığını ancak özellikle jetten uzak bölgelerde akışta ayrılmaların da olduğunu gözler önüne sermektedir. Bilindiği gibi Kelvin-Helmholtz kararsızlığı farklı hızlara sahip iki akışın karşılaşmasının sonucu olarak, akışlara ait parçacıkların bu iki akış arayüzeyinde birbirleri üzerinden kaymalarından meydana gelmektedir. Bu nedenle jetin baskın olduğu lüle çıkışında bu durumun görülmemesi gayet normaldir. Jetin çapraz akış etkisinde akmaya başladığı lüleden uzak bölgelerde ise, duman üreticinden püskürtülen mikro-parçacıklar rüzgâr tünelinden sağlanan havayla karışmakta ancak hızlarının farklı olması sebebiyle bu tip akış yapılarına sebep olmaktadır. Bunun dışında, rüzgâr tünelinin emişi lüleden uzak bölgede daha etkili olduğundan, buradaki hızlar ani olarak yükselmekte ve resimlerde görülen ayrılma ve kopmalara yol açmaktadır.

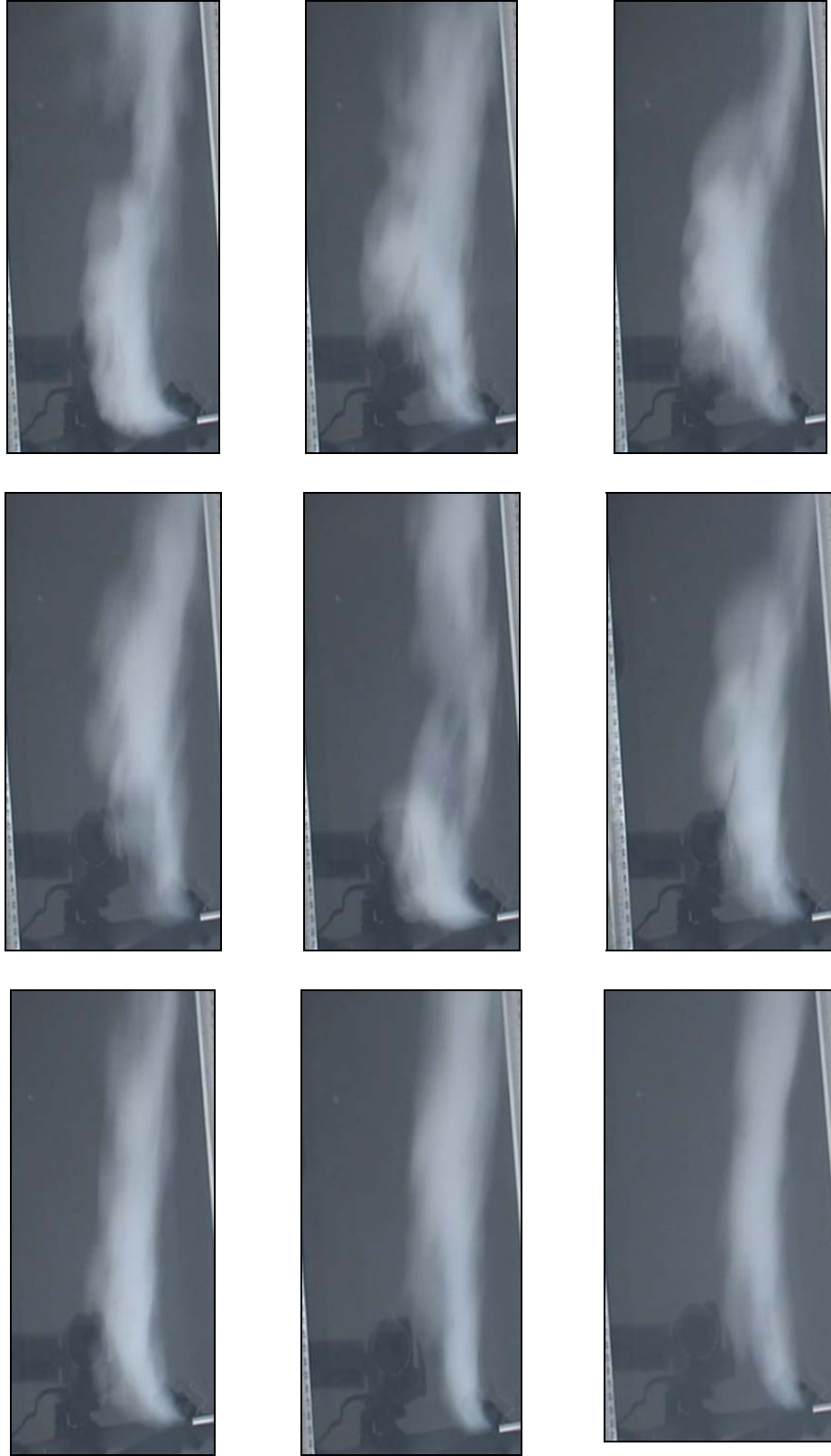
Şekil 4.37'de çapraz akış hızı sabit tutularak, jet hızının artırılması durumunda (artan R durumu) akış alanındaki değişimler gösterilmiştir. Lüleden püskürtülen jet sahip olduğu yüksek hıza bağlı olarak daha büyük momentumla akış alanına girdiğinden, lüleye yakın bölgede çapraz akışı yenerek akış alanına dik olarak nüfuz etmiştir. Rüzgâr tüneli test kesidinin yan çeperlerine kadar etkili olan jet, bu noktadan sonra rüzgar tüneli fanı tarafından

emilen havayla beraber kanal çıkışına doğru bükülmeye başlayarak ortamı terk etmektedir. Akış hızı oranının (R) daha düşük olduğu önceki durumda görülen akış ayrılmasına bu safhada rastlanmamıştır. Bu ise jetin herhangi bir ayrılmaya izin vermeyecek kadar baskın olmasından ileri gelmektedir.



Şekil 4.37 Çapraz akış hızı sabit iken jet hızının artırılması (artan R) halinde akış alanının değişimi.

Yukarıdaki yüksek hızlı jet için (Şekil 4.37) rüzgar tüneli hızını arttırarak, R oranının azaltılması durumunda Şekil 4.38'deki gibi bir akış alanı elde edilebilir. Jetin tünele göre daha yüksek hızda olması durumunda görülen baskın özellik burada kaybolmakta ve tünelin sahip olduğu momentuma bağlı olarak daha etkili olmasına yol açtığı görülmektedir. Rüzgar tüneli hızının artırılmasıyla beraber lüleden kanala giren jet, çapraz akış etkisine girmekte ve lüle çıkışından sonra çapraz akış yönünde bükülerek yoluna devam etmektedir. Tünel hızının daha artırılması, çapraz akışın etkisinin daha çok hissedilmesine neden olmuş ve jet akışı hemen hemen lüle çıkışından itibaren kıvrılmaya başlamıştır. Bu durumda lüleden püskürtülerek sağlanan jet daha düz bir yörüngeye kavuşarak kesintisiz bir şekilde çapraz akış yönünde akmaktadır.



Şekil 4.38 Jet çıkış hızı sabit iken çapraz akış hızının kademeli olarak arttırılması halinde akış alanının değişimi (azalan R durumu).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, sayısal ve deneysel olarak incelenen çapraz akıştaki jet akışlarıyla ilgili sonuçlara dikkat çekilerek, konu ile ilgili bazı önerilerde bulunulmuştur. Bu öneriler, çapraz jet akışı ve film soğutma üzerine çalışacak araştırmacılara yol göstermeyi hedeflemektedir.

5.1 Sonuçlar

Sunulan çalışmada çapraz akıştaki jet akışları deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) teknikleri kullanılarak incelenmiştir. HAD ile çapraz akıştaki jet akışlarında görülen baskın yapıların oluşumu üzerinde büyük etkilere sahip olan bazı değişkenlerin etkisi incelenmiştir. Analizlerde lüle sayısı, lüle kesit geometrisi, lüle eğim açısı ve jet hızının çapraz akış hızına oranı (R) gibi parametreler değiştirilmiştir. Bunun için $R=0.2, 0.5, 1.0$ ve 2.0 olmak üzere dört farklı hız oranı, dairesel ve kare kesitli olmak üzere iki farklı lüle kesit geometrisi, $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90° olmak üzere beş farklı eğim açısı kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalar, gerek endüstride gerekse de akademik araştırmalarda yaygın olarak kullanılan FLUENT programı ile gerçekleştirilmiştir.

Sayısal çalışmaların ilk adımında çapraz akıştaki jet akışlarının modelleneyeceği hesap alanı oluşturularak buna uygun ağ yapısı geliştirilmiştir. Çözümün ağ elemanı sayısından bağımsızlığı için çalışma alanı üzerinde dört farklı ağ yapısı denenerek (seyrek: 472880 elemanlı, normal: 847800 elemanlı, yoğun: 1292000 elemanlı, çok yoğun: 2879560 elemanlı) en uygun ağ elemanı sayısı saptanmıştır. Bu amaçla çapraz akış yönünde iki farklı istasyonda ($x/D=0$ ve $x/D=1$) hızın x -bileşeni (u), y -bileşeni (v), z -bileşeni (w), türbülans kinetik enerjisi (k) ve sıcaklık (T) değişimleri incelenerek ağ elemanı sayısının 847800 olduğu normal ağ yapısı ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Bütün problemlerin çözümünde kullanılabilecek tek bir türbülans modeli henüz mevcut olmadığından, çapraz jetlerin sayısal olarak incelenmesinde kullanılabilecek türbülans modelinin seçimi sonuçlardan beklenen doğruluk derecesi ve hassasiyet göz önüne alınarak yapılmıştır. Akıştaki en küçük uzunluk ölçeği cinsinden çözümlere imkân veren doğrudan sayısal benzeşim (DNS) ve büyük girdap benzeşimi (LES) çok yüksek sayılarda ağ elemanına ihtiyaç duyduğundan ve problemi zamana bağlı olarak çözdüğünden çok hızlı işlemci(ler) ve yüksek kapasiteli bellek kartlarına sahip olmayı gerektirmektedir. DNS ve LES ile yapılan çözümler Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılarak yapılan analizlerden daha iyi sonuç vermesine rağmen yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı RANS çözüm yapılması kararlaştırılmıştır. Bu tip akışlarda görülen baskın girdap yapılarından en önemlisi olan zıt-

dönüştürme girdap çiftinin oluşum ve gelişimi hakkında RANS ile tatminkâr bilgiler ele edilmesi mümkün olmuştur. İki denklemlili $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerinden Re-normalized group (RNG) $k-\epsilon$ türbülans modelinin çapraz jet akışlarında en uygun sonucu verdiği görüldüğünden bütün analizler daimi çözüm yapılarak RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan HAD analizlerinde hızların oranı, eğim açısı, lüle kesit geometrisi vb. değişkenlerin bu tip akışlarda görülen baskın girdap yapıları özellikle de zıt-dönüştürme girdap çiftinin (ZDGÇ) oluşum ve gelişimi üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur. Buna göre hız oranı ve eğim açısı arttıkça ZDGÇ hem yanal kenarlara doğru hem de kanal derinliği boyunca büyümekte ve kanalı doldurmaya başlamaktadır.

HAD analizinin ikinci kısmında çapraz jet akışlarının sanayide karşılaşılan en yaygın uygulaması olan film soğutma etkinliği analiz edilmiştir. Bunun için lüle ile kanal arasındaki eğim açısı, jet hızının çapraz akış hızına oranı, soğutmada kullanılan jetin sağlandığı lüle kesit geometrisi ve kullanılan lülelerin sayısı yanında, konumlandırılmasının etkileri de incelenerek sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan mukayeselerde film soğutma veriminin en yüksek değeri, eğim açısı 30° için elde edilmiş ve dairesel kesitli lüle kullanılmasının daha iyi olacağı sonucuna varılmıştır.

Deneyisel çalışmalar sabit sıcaklık hızölçeri (CTA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için 33.5 m/s gibi yüksek hızlara çıkabilen bir rüzgar tüneline çapraz akış sağlanmış ve dairesel kesitli bir lüle kullanılarak normal püskürtme ($\alpha=90^\circ$) durumu için jet akışı elde edilmiştir. Bu amaçla bir, iki ve üç boyutlu hız bileşenlerini elde etmeye imkan verecek üç kanallı bir CTA sistemi, kalibrasyon ünitesi ve ilgili prob setleri Dantec firmasından temin edilerek kurulumları tamamlanmıştır. Çapraz akış (x-ekseni) ve jet akış doğrultularındaki (z-ekseni) farklı istasyonlarda hız alanına ait ölçümler yapılarak elde edilen veriler dalgacık (wavelet), Fourier ve uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. $R=0.5$, 1.0 ve 1.5 olmak üzere üç farklı hız oranı için güç tayfları, baskın frekans değerleri ve türbülans enerjisinin modlara göre dağılımı üzerinde durulmuştur. Fourier analizine göre, bir serbest jette lüle çıkışındaki güç tayfı ilerleyen diğer mesafelere göre laminar karakter göstermiş ve lüle çıkış hızı artırıldığında ise akış enerjisi düşmüştür. Üç farklı hız oranı ($R=0.5$, 1.0 ve 1.5) için yapılan mukayesede yüksek hız oranında daha düşük frekans enerjisi saptanmıştır. Bu durum lülenin merkezinde jetin çapraz akış önünde bir engel gibi davranarak çapraz akış etkisini sönmülmesi ve ilerleyen mesafelerde etkisini kaybetmesine bağlanmıştır. Verilerin dalgacık (wavelet) analizinde en düşük hız oranı olan $R=0.5$ 'te baskın frekansın 45 Hz'te kendini gösterdiği, ancak $R=1.0$ olduğunda bu değerin 85

Hz ile 105 Hz arasında olduğu gözlenmiştir. Enerjinin modlara göre dağılımlarının gösterildiği uygun ortogonal ayrıklaştırma (POD) metodunda ise düşük hız oranındaki modların yüksek hız oranındaki modlara nazaran daha fazla enerji taşıdıkları görülmüştür. Lüle çıkışından uzaklaştıkça toplam enerjinin daha fazla sayıda moda dağıldığı gösterilmiştir. Akış alanının deneysel olarak incelenmesi amacıyla bir duman üretici ve video kamera kullanılarak akım görüntüleme yapılmıştır. Farklı jet ve çapraz akış hızlarında akış alanına duman göndermek suretiyle hız oranlarının etkisi incelenmiştir. Yüksek hız oranlarında lüleden püskürtülerek sağlanan jet akışı sahip olduğu momentumun etkisiyle akış alanına daha dik olarak girerek, çapraz akış önünde bir engel gibi davranmıştır. Jet ve çapraz akış hızlarının birbirlerine yakın olduğu durumda, jet kayma tabakası net bir şekilde saptanmış ve akışta ayrılmalar olmuştur. Düşük hız oranlarında çapraz akışın jet akışını yenerek kendi doğrultusunda akmaya zorladığı ve jeti süpürerek, lüle çıkışından itibaren yönünü değiştirdiği görülmüştür.

5.2 Öneriler

Çapraz akıştaki jet akışları sahip olduğu büyük önemden dolayı, üzerinde çalışılan bir konu olmaya devam edecektir. Bu nedenle gelecekte aşağıda sayılan konular üzerinde çalışılması önerilmektedir. Bu çalışmada sıcak tel hızölçeri kullanılarak akış alanında yalnızca hızın tek bir bileşeni elde edilebildiğinden, diğer hız bileşenlerine ait verilerin eş zamanlı olarak elde edilip aralarındaki korelasyonun incelenmesi, akış alanı hakkında daha fazla bilgi edinmesine yardım edecektir. Sıcak tel hızölçeri gibi deneysel akışkanlar dinamiği çalışmalarında kendine yer edinmiş klasik ölçüm sistemlerinin yanında, parçacık görüntüleme (PIV) ve lazer doppler (LDA) hızölçerleri gibi nispeten daha ileri teknoloji içeren ölçüm sistemlerinin kullanılması yararlı olacaktır. Özellikle yüksek çözünürlüğe sahip PIV kullanılması ile akış alanının deneysel çalışma ile görselleştirilmesi sağlanmış olacaktır. Çapraz jetlerin film soğutma işleminde kullanılması, film soğutmanın deneysel olarakta incelenmesini gerektirmektedir. Temin edilecek çok sayıda ısı-ayrışım (thermo-couple) cihazlarıyla farklı hız oranları ve değişik eğim açılarındaki termal film soğutma verimleri ölçülerek sayısal çalışmalarla mukayese edilmesi, gerek film soğutma işleminde en uygun türbülans modelinin belirlenmesi gerekse en uygun geometrinin belirlenmesi açısından fayda sağlayacaktır.

Gelişen bilgisayar teknolojileri, yüksek hızlı işlemcilerin ve bellek kartlarının kullanılmasına imkân tanımaktadır. Bunun yanında ileri ayrıklaştırma teknikleri de sayısal çalışmaların araştırmacılar tarafından gittikçe benimsenmesine yol açmaktadır. Deneysel çalışmalara göre

daha az maliyetli ve daha hızlı sonuç almaya imkân verdiğinden sayısal çalışmalar gittikçe önem kazanmaktadır. Bu nedenle, yüksek kapasiteli paralel işlemcilere sahip bilgisayarlarla çapraz akıştaki jet akışlarının doğrudan sayısal benzeşim (DNS) ve/veya büyük girdap benzeşimi (LES) gibi akış alanında görülen en küçük ölçekleri modellemeye imkan veren fakat yüksek sayıda ağ elemanı kullanılmasını gerektiren türbülans modellerinin kullanılması hem burada görülen girdap yapılarının zamana bağlı değişimleri hem de en küçük yapıların bile saptanmasına imkan tanıyacaktır. Bu nedenle gelecekte konu ile ilgili yapılacak sayısal çalışmaların LES ve/veya DNS kullanılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Acharya, S., Tyagi, M., Hoda, A., (2001), "Flow and Heat Transfer Predictions for Film Cooling", Heat Transfer in a Gas Turbine Systems, Annals of the New York Academy of Sciences 934, 110-125.
- AGARD CP-534, (1993), "Computational and Experimental Assessment of Jets in Crossflow", AGARD Conference Proceedings, No.534, Winchester, United Kingdom.
- Allery, C., Beghein, C., Hamdouni, A., (2005), "Applying Proper Orthogonal Decomposition to the Computation of Particle Dispersion in a Two-Dimensional Ventilated Cavity", Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation 10, 907-620.
- Andreopoulos, J., (1983), "Heat Transfer Measurements in a Heated Jet Pipe Flow Issuing into a Cold Cross Stream", Physics of Fluids 26, 3201-3210.
- Andreopoulos, J., Rodi, W., (1984), "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow", Journal of Fluid Mechanics 138, 93-127.
- Arneodo, A., Grasseau, G., Holschneider, M., (1988), "Wavelet transform of Multifractals, Physics Review Letters, Vol 61, pp. 2281-2284.
- Azzi, A., Jubran, B.A., (2007), "Numerical Modelling of Film Cooling from Converging Slot-Hole", Heat Mass Transfer, 43, 381-388.
- Barata, J.M.M., Duaro, D.F.G., Heitor, M.V., McGuirk, J.J., (1991), "Impingement of Single and Twin Turbulent Jets Trough a Crossflow" AIAA Journal 29, 595-602.
- Bayraktar, S., Yılmaz, T., (2005), "CFD Analysis of jet in Crossflow", 2nd International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEEES2), 03-07 July 2005Kos Island, Greece.
- Bayraktar, S., Yılmaz, T., (2006), "Numerical Analysis of Elevated Jet in Crossflow", 19th Int. Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2006), 12-14 July 2006, Crete Island, GREECE.
- Bayraktar, S., Yılmaz, T., (2007), "Çapraz Jetlerdeki Girdap Yapılarının İkinci Derece Türbülans Modeli ile İncelenmesi", Havacılık ve Uzaya Teknolojileri Dergisi, Cilt.3, Sayı.22, Sayfa.7-15.
- Benocci, C., Olivari, D., (1984), "The Equations of Turbulent Motion", Course Note 137/EA, Vol.16, pp.365-424.
- Benz, E., Witting, S., Beeck, A., Fottner, L., (1993), "Analysis of Cooling Jets Near the Leading Edge of Turbine Blades", Presented at an AGARD Meeting on Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow".
- Berkooz, G., Holmes, P., Lumley, J. L., (1993), The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows, Annual Reviews of Fluid Mechanics, Vol 25, pp. 539-575.
- Blanchard, J.N., Brunet, Y., Merlen, A., (1999), "Influence of a Counter Rotating Vortex Pair on the Stability of a Jet in a Cross Flow: An Experimental Study by Flow Visualizations", Experiments in Fluids, 26, pgs.63-74.
- Bornoff, R.B., Mokhtarzadeh-Dehghan, (2001), "A Numerical Study of Interacting Buoyant Cooling-Tower Plumes", Atmospheric Environment 35, 589-598.

- Broadwell, J.E., Breidenthal, R.E., (1984), "Structure and Mixing of a Transverse Jet in Incompressible Flow", *J. of Fluid Mechanics* 148, 405-412.
- Camussi, R., Stealla A., Guj, G., Kowalevski, T.A., (1999), "Large-Scale Structures Forming in a Cross Flow": Particle Image Velocimetry Conditional Analysis", *Machine Graphics & Vision*, Vol.8, No.4, pgs. 579-595.
- Cardenaz, C., Suntz, R., Denev, J.A., Bockhorn, H., (2007), "Two-Dimensional Estimation of Reynolds-Fluxes and -Stresses in a Jet-in-Crossflow Arrangement by Simultaneous 2D-LIF and PIV", *Appl. Phys. B88*, 581-591.
- Castro, I.P, Graham, J.M.R., (1999), "Numerical Wind Engineering: The Way Ahead?", *Proc. Institute of Civil Engineers, Structures and Buildings*, vol. 134, pp.275-277.
- Castro, I.P., (2003), "CFD for External Aerodynamics in the Built Environment", *The QNET-CFD Network Newsletter*, vol. 2, pp.4-7.
- Celata, G. P., Cumo, M., Mariani, A., Saraceno, L., (2007), "A Comparison Between Spray Cooling and Film Cooling During the Rewetting of a Hot Surface", *Heat and Mass Transfer*.
- Choudhury, D., (1993), "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling", *Fluent Inc., Technical Memorandum TM-107*.
- Clarence F. Chenault, P. S. Beran, R. D. Bowersox, (1999), "Numerical Investigation of Supersonic Injection Using a Reynolds-stress Turbulence Model", *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 10, pp. 1257-1269.
- Coehlo, S.L.V., Hunt, J.C.R., (1989), "The Dynamics of the Near Field of Strong Jets in Crossflows", *J. of Fluid Mechanics* 200, 71.
- Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., (2006), "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", McGraw-Hill.
- Demuren, A.O., Rodi, W., (1987), "Three-Dimensional Numerical Calculations of Flow and Plumes Spreading Past Cooling Towers", *Journal of Heat Transfer*, 109, pp.113-119.
- Demuren, A.O., (1994), "Modeling Jets In Cross Flow", *ICASE Report* 94-71.
- Demuren, A.O., Wilson, R.V., (1999), "Streamwise Vorticity Generation in Laminar and Turbulent Jets", *NASA/CR-1999-209517, ICASE Report No.99-33*.
- Donat, J., Schatzmann, M., (1999), "Wind Tunnel Experiments of Single-Phase Heavy Gas Jets Released Under Various Angles into Turbulent Cross Flows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 83, 361-370.
- Druault, P., Chaillou, C., (2007), "Use of Proper Orthogonal Decomposition for Reconstructing the 3D in-cylinder Mean-Flow Field From PIV Data", *C.R. Mécanique* 335, 42-47.
- Eiff, O., Kawall, J.G., Keffer, J.F., (1995), "Lock-in of Vortices in the Wake of an Elevated Round Turbulent Jet in a Crossflow", *Exp. Fluids* 19, 203-213.
- Eiff, O., Keffer, J.F., (1997), "Aspects of Ring Vortex Lock-in for the Turbulent Jet Discharging from a Stack", *Experimental Thermal and Fluid Science* 14, 52-59.
- Eiff, O., Keffer, J.F., (1999), "Parametric Investigation of the Wake-Vortex Lock-in for the Turbulent Jet Discharging from a Stack", *Experimental Thermal and Fluid Science* 19, 57-66.

- Fan, J.Y., Zhang, Y., (2007), "Large-Eddy Simulation of Three Dimensional Vortical Structures for an Impinging Transverse Jet in the Near Region", *Journal of Hydrodynamics*, Ser.B 19 (3), 314-321.
- Farge, M., (1992), "Wavelet transforms and their application to turbulence", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol 24, pp. 395-457, (1992).
- Fluent 6.3 User's Guide, September 2006.
- Forrester, T.J., Edward, N.T., Jong, J., (2005), "Thirty Years of Development and Application of CFD at BOEING Commercial Airplanes, Seattle", *Computers & Fluids*, 34, pp.1115-1151.
- Foster, L.E., Engblom, W.A., (2003), "Computation Of Transverse Injection Into Supersonic Crossflow With Various Injector Orifice Geometries", NASA/TM-2003-212878.
- Fric, T.F. and Roshko, A., (1989), "Structure in the near Field of the Transverse Jet", 7th Symposium on turbulent shear flows, pp. 6.4.1.-6.4.6.
- Fric, T.F., Roshko, A., (1994), "Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet", *J. Fluid Mechanics* 279, 1-47.
- Fuller, E. J., Walters, R. W., (1991), "Navier-Stokes Calculations for 3D gaseous fuel injection with data comparisons", AIAA Paper 91-5072.
- Galvanetto, U., Violaris, G., (2007), "Numerical Investigation of a New Damage Detection Method Based on Proper Orthogonal Decomposition", *Mechanical Systems and Signal Processing* 21, 1346-1361.
- Gibson, M.M., Launder, B.E., (1978), "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer", *J. of Fluid Mech.* 89, 491-511.
- Glezer, A., Kadioglu, Z., Perlsten, A. J. , (1989), "Development of an extended proper orthogonal decomposition and its application to a time periodically forced plane mixing layer, *Physics of Fluids*, A1, pp. 1363-1374.
- Guo, T., Li, S., (2006), "Numerical Simulation of Turbulent Jets with Lateral Injection into a Crossflow", *Journal of Hydrodynamics*, Ser.B 18(3), 319-323.
- Haas, W., Rodi, W., Schonung, B., (1992), "The Influence of Density Difference Between Hot and Coolant Gas on Film Cooling by Row of Holes: Predictions and Experiments", *Journal of Turbomachinery*, 114, 747-755.
- Hahn, S., Choi, H., (1997), "Unsteady Simulation of Jets in a Cross Flow", *Journal of Computational Physics* 134, 342-356.
- Hale, C.A., Plesniak, M.W., Ramadhyani, S., (2000), "Structural Features and Surface Heat Transfer Associated with a Row of Short-Hole Jets in Crossflow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.24, pgs.542-553.
- Hasselbrink, J.R.E.F., Mungal, M.G., (2001), "Transverse Jets and Jet Flames. Part 1. Scaling Laws for Strong transverse Jets", *Journal of Fluid mechanics*, Vol. 443, pp. 1-25.
- Hasselbrink, E.F., Mungal, M.G., (2001), "Transverse Jets and Jet Flames. Part 2. Velocity and OH Field Imaging", *J. of Fluid Mechanics* 443, 27-68.
- Hatch, M. S., W. A. Sowa, G. S. Samuelsen, J. D. Holdeman, (1995), "Geometry and Flow Influences on Jet mixing in a Cylindrical Duct", *J. Propulsion and Power*, 11, 402.

- Hatch, M.S., Sowa, W.A., Samuelsen, G.S., (1992), "Influence of Geometry and Flow Variation on Jet Mixing and NO Formation in a Model Staged Combustor Mixer", NASA CR 189094.
- Haven, B.A. and Kurosaka, M., (1997), "Kidney and Anti-kidney Vortices in Crossflow Jets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 352, pp.27-64.
- Holmes, P., Lumley, J.L., Berkooz, G., (1996), "Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry", Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Huang, R.F., Hsiesh, R.H., (2002), "An Experimental Study of Elevated Round Jets Deflected in a Crosswind", *Experimental thermal and Fluid Science* 27, 77-86.
- Huang, R.F., Hsiesh, R.H., (2003), "Flow Visualization and LDV Measurement on Near-Wake of Elevated Jets in a Crossflow", *Proceedings of PSFVIP-4*, June 3-5, Chamonix, France.
- Hudgins, L., Friehe, C. A., Mayer, M. E., (1993), "Wavelet transforms and Atmospheric Turbulence", *physics Review Letters*, Vol 71, pp. 3279–3282.
- Hui, G., Jie, W. C., (2007), "Large-Eddy Simulations and Vortex Structures of Turbulent Jets in Crossflow", *Sci. China- Phys. Mech. Astron.*, vol.50, no.1, 118-132.
- Isaac, K.M., Jacubowski, A.K., (1985), "Experimental Study of the Interaction of Multiple Jets and Crossflow", *AIAA Journal* 23, 1679-1683.
- Johnston, J.P., Khan, Z., (1997), "The Origins of the Dominant Vortex From a Pitched and Skewed Jet", Paper 1201 (Session Keynote Lecture), *Int. Conf. on Fluids Engng.*, JSME, Tokyo, 13-16.
- Johnson, M.R., Zastavniuk, O., Dale, J.D., Kostiuk, L.W., (1999), "The Combustion Efficiency of Jet Diffusion in Cross-flow", Presented at the Joint Meeting of the United States Sections-The Combustion Institute, Washington, D.C., March 15-17.
- Karagozian, A.R., (1986), "An Analytical Model for the Vorticity Associated with a Transverse Jet", *AIAA J.* 24, 429-436.
- Kassimatis, P.G., Bergeles, G.C., Jones, T.V., Chew, J.W., (2000), Numerical Investigation of the Near-Slot Film Cooling, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32:97-117.
- Kelso, R.M., Delo, C., (1993), "Unsteady Wake Structures in Transverse Jets", Presented at an AGARD Metin on "Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow.
- King, L.V., (1914), "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires with Applications to Hot-wire Anemometry", *Phil. Trans. Roy. Soc.* A214, 373–432.
- Klein, M., Sadiki, A., Janicka, J., (2003), "Investigation of the Reynolds Number on a Plane Jet Using Direct Numerical Simulation", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.24, pgs.785-794.
- Kolar, V., Takao, H., Todoroki, T., Savory, E., Okamoto, S., Toy, N., (2001), "Vorticity Transport Associated with the Dominant Vortical Structure of Twin Jets in Crossflow", 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia, 10-14.

- Kolar, V., Takao, H., Todoroki, T., Savory, E., Okamoto, S., Toy, N., (2003), "Vorticity Transport within Twin Jets in Crossflow", *Experimental and Fluid Science*, Vol.27, pgs.563-571.
- König, C.S., Mokhtarzadeh-Dehghan, (2001), "Numerical Study of Buoyant Plumes from a Multi-Flue Chimney Released into an Atmospheric Boundary Layer", *Atmospheric Environment* 36, 3951-3962.
- Krothapalli, A., Shih, C., (1993), "Separated Flow Generated by a Vectored Jet in a Crossflow", Presented at an AGARD Meeting on "Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow".
- Launder ve Spalding, (1972), *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Pres, London, England.
- Launder, B.E., Reece, G.J., Rodi, W., (1975), "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure", *J. Fluid Mech.* 68, 537–566.
- Launder, B.E., (1989), "Second-Moment Closure:Present and Future?", *Int. J. Heat and Fluid Flow* 10, 282–300.
- Lee, W.J., Shin, H.D., (2003), "Visual Characteristics, Including Lift-off of the Jet Flames in a Cross-flow High-Temperature Burner", *Applied Energy* 76, 257-266.
- Lewalle, J., (1994), "Wavelet Analysis of Experimental Data: Some Methods and the Underlying Physics", *AIAA paper*, Vol 94, pp. 2281–2288.
- Li, H., Chen, X., Ouynag, Q., Zhu, Y., (2007), "Wavelet Analysis on Fluctuating Characteristics of Airflow in Building Environments", *Building and Environment* 42, 4028-4033.
- Lumley, J.L., (1967), "The Structure of Homogenous Turbulence", *Atmospheric Turbulence and Wave Propagation*, Moscow, pp.166-178.
- Lumley, J. L., (1970), *Stochastic tools in turbulence*, Academic Press, NewYork.
- Margason, R.J., (1993), "Fifty Years of Jet in Cross Flow Research", Presented at an AGARD Meeting on Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow.
- Menter, F.R., (1994), "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA Journal* 328, 1598-1605.
- Moin, P., (1984), "Probing Turbulence via Large Eddy Simulation", *AIAA paper* 84-0174.
- Moin, P., Moser, R. D., (1989), "Characteristic Eddy Decomposition of Turbulence in a Channel", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 200, pp. 471–485.
- Muppidi, S., Mahesh, K., (2005), "Velocity Field of a Round Turbulent Transverse Jet", 4th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Williamsburg, Virginia, paper TSFD4-197.
- Muppidi, S., Mahesh, K., (2005), "Study of Trajectories of Jets in Crossflow Using Direct Numerical Simulations", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.530, pp.81-100.
- Nakabe, K., Fornalik, E., Eschenbacher, J.F., Yamamoto, Y., Ohta, T., Suzuki, K., (2001), "Interactions of Longitudinal Vortices Generated by Twin Inclined Jets and Enhancement of Impingement Heat Transfer", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 22, 287-292.

- O'Donnel, B.J., Helenbrook, B.T., (2007), "Proper Orthogonal Decomposition and Incompressible Flow: An Application to Particle Modeling", *Computers & Fluids* 36, 1174-1186.
- O'Malley, K., (1984), "Theoretical Aspect of Film Cooling" PhD Thesis, University of Oxford.
- Özcan, O., Meyer, K.E., Larsen, P.S., Westergaard, C.H., (2001), "Simultaneous Measurement of Velocity and Concentration in a Jet in Channel-Crossflow", *Proceedings of FEDSM2001, 2001 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, May 29-31, New Orleans, Louisiana, USA.*
- Patankar, S.V., (1980), "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", First Edition, McGraw-Hill, NY, USA.
- Peterson, S.D., Plesniak, M.W., (2004), "Evolution of Jets Emanating from Short Holes into Crossflow", *Journal of Fluid Mechanics* 503, 57-91.
- Prabhakar, N., (1988), "Multiflue Chimneys in India", *Proceedings of the 6th International Chimney Conference, Brighton, England, 18-20 May, CICIND, pp.1-9.*
- Pratte, B.D., Baines, W.D., (1968), "Profiles of the Round Turbulent Jet in a Crossflow", *J. Hydraulics, Div. Proc. ASCEi* 94-HY6, 53-64.
- Ramezanizadeh, M., Taeibi-Rahni, M., Saidi, M.H., (2007), "Investigation of Density Ratio Effects on Normally Injected Cold Jets into a Hot Crossflow", *Arch. Appl. Mech.* 77, 835-847.
- Renze, P., Schröder, W., Meinke, M., (2007), "Large-Eddy Simulation of Film Cooling Flows with Variable Density Jets", *Flow Turbulence Combustion.*
- Rivero, A., Ferre, J.A., Giralt, F., (2001), "Organised Motions in a Jet in Crossflow", *Journal of Fluid Mechanics* 444, pp.117-149.
- Roy, S., (1998), "Numerical Investigation of the Blade Cooling Effect Generated by Multiple Incompressible Jets", *Proceedings of FEDSM'98, 1998 ASME Fluids Engineering Division, Summer Meeting, June 21-25, 1998, Washington DC.*
- Said, N. M., Habli, S., Mhiri, H., Bournot, H., Palec, G., (2007), "Flow Field Measurement in a Crossflowing Elevated Jet", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 129, pp.551-562.
- Salewski, M., Stankovich, D., Fuchs, L., (2007), "A Comparison of Single and Multiphase Jets in a Crossflow Using Large Eddy Simulation", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol.129, pp.61-68.
- Salewski, M., Stankovic, D., Fuchs, L., (2008), "Mixing in Circular and Non-Circular Jets in Crossflow", *Flow Turbulence Combustion*, vol.80, no.2, 255-283.
- Santa Cruz, A., David, L., Pecheux, J., Texier, A., (2005), "Characterization b Proper-Orthogonal-Decomposition of the Passive Controlled Wake Flow Downstream of a Half Cylinder", *Experiments in Fluids* 39, 730-742.
- Sau, A., Hsu, T., Ou, S., (2006), "Growth of Kidney Vortices over a Square Jet in Crossflow", *Physics of Fluids* 18.

- Savory, E., Toy, N., (1991), "Real-Time Video Analysis of Twin Jets in a Crossflow", ASME Journal of Fluid Engineering 113, 68-72.
- Schlüter, J.U., Schönfeld, T., (2000), "LES of Jets in Cross Flow and Application to a Gas Turbine Burner", Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 65, pp.177–203.
- Shahzad, K., Fleck, B.A., Wilson, D.J., (2007), "Small Scale Modeling of Vertical Surface jets in Cross-Flow: Reynolds Number and Downwash Effects", Journal of Fluids Engineering, vol.129, pp.311-318.
- Shayesteh, M.V., Bradshaw, P., (1987), "Microcomputer-Controlled Traverse Gear For Three-Dimensional Flow Explorations", J.Phys.E:Sci, Instrum., (20), pp. 320–322.
- Sherif, S.A., Pletcher, R.H., (1989), "Measurements of the Flow and Turbulence Characteristics of Round Jets in Crossflow", Trans. ASME I: J. Fluids Engng. 111, 165–171.
- Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J., (1995), "A New $k-\epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation, Computers & Fluids 24, 227–238.
- Smith, S.H., Mungal, M.G., (1998), "Mixing, Structure and Scaling of the Jet in Crossflow", J. of Fluid Mechanic 357, 83-122.
- Toften, T.H., Holda, A.E., Kapter, (1993), "Effects of Free-Stream Turbulence on a Jet in a Cross Flow", Presented at an AGARD Meeting on "Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow".
- Tomioka, S., Jacobsen, L.S., Schetz, J.A., (2003), "Sonic Injection From Diamond Shaped Orifices Into A Supersonic Crossflow", Journal of Propulsion and Power, Vol.19, No.1.
- Toy, N., Savory, E., McCuster, S., (1993), "The Interaction Region Associated with Twin Jets and a Normal Crossflow", Presented at an AGARD Meeting on Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow".
- Tyagi, M., Acharya, S., (1999), "Large Eddy Simulations of Rectangular Jets in Crossflow: Effect of Hole Aspect Ratio", Second AFSOR Conference on DNS/LES, Rutgers Univ., NJ.
- Tyagi, M., Acharya, S., (1999), "Large Eddy Simulations of Jets in Crossflow I: Effect of Freestream Turbulence Intensity", ASME-FEDSM 99-7799, ASME/JSME Fluids Engineering Meeting, San Francisco.
- Tyagi, M., Acharya, S., (2000), "Large Eddy Simulations of Jets in Crossflow: Effect of Jet Inclination Angle", Proc. ASME-ISHMT Heat Transfer Conference, pp.1353–1358, Pune.
- Vigneau, O., Pignoux, S., Carreau, J.L., Roger, F., (2001), "Interaction of Multiple Gas Jets Horizontally Injected into a Vertical Water Stream", Flow, Turbulence and Combustion 66, 183-208.
- Viti, V., (2002), "Numerical Studies of the Jet Interaction Flowfield with a Main Jet and an Array of Smaller Jets", PhD Thesis, Virginia Polytechnic and State University, Aerospace Engineering.
- Wang, C.R., (2000), "Application of a Turbulence Model for Jet and Crossflow Interaction", AIAA Paper 2000–2655.

Wegner, B., Huai, Y., Sadiki, A., (2004), “Comparative Study of Turbulent Mixing in Jet in Cross-Flow Configurations Using LES”, International Journal of Heat and Fluid Flow 25, 767-775.

Wilcox, D.C., (2002), “Turbulence Modeling for CFD”, DCW Industries, Inc. La Canada, California, USA.

Williams, S., Hartfield, R., (1996), “An Analytical Investigation of Angled Injection into a Compressible Flow”, AIAA Paper 96-3142.

Yakhot, V and Orszag, S.A., (1986), “Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory, Journal of Scientific Computing, 1(1):1-51.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] ANOVA, <http://www.anova.com.tr/fluvent.asp>

[2] Slater, J.W., “Glossary and Tutorial, CFD Verification and Validation Website”, NPRACC Alliance ([www.wind/valid/tutorial /glossary.html](http://www.wind/valid/tutorial/glossary.html)).

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 20.04.1975

Doğum yeri Muş

Lise 1991–1994 Gemlik Lisesi

Lisans 1994–1998 Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi
Gemi İnşaatı Mühendisliği BölümüYüksek Lisans 1998–2001 Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı Mühendisliği BölümüYab. Dil Hazırlık 2001–2002 Yıldız Teknik Üniversitesi, Yabancı Diller Yüksekokulu
Temel İngilizce BölümüDoktora 2002–2008 Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Programı**Çalıştığı kurum(lar)**1998–1999 DMT Ltd Şti.
(Mak. Müh.)1999- YTÜ Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Böl.
(Arş. Gör.)