

532.525  
E 65 e

1996 - 2144

MAG 625/A

1996-2144

MFN: 2144

532.525

E65 e

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU  
MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA GRUBU

PROJE NO.: MAG-625-A

TÜRKİYE  
BİLİMSEL VE TEKNİK  
ARAŞTIRMA KURUMU  
MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA GRUBU

EŞ-EKSENEL JETLERİN

KARIŞIM BÖLGESİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

Yürütücüsü : Prof.Dr. O.Cahit ERALP

Yardımcı Araştırmacı: Doç.Dr. Kahraman ALBAYRAK

6764

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU  
MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA GRUBU

PROJE NO.: MAG-625-A

EŞ-EKSENEL JETLERİN  
KARIŞIM BÖLGESİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

Proje Yürütücüsü: Prof.Dr. O.Cahit ERALP

ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yardımcı Araştırmacı: Doç.Dr. Kahraman ALBAYRAK

ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Bu Proje Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumunun Desteği ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında yapılmıştır.

Mayıs 1992

ANKARA

## ÖNSÖZ

Bu proje ilk olarak 1984 yılında TÜBİTAK'a sunulmasından bu yana, kesintili de olsa, süren çalışmalar ile ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'nde bu yönde bir bilgi birikimine neden olmuştur. Proje paralelinde geliştirilen ölçme sistemleri ve imkanlar diğer projelerde imkan doğurmuş ve ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarının gelişiminde rol oynamıştır. Proje kapsamındaki temel ölçüm hata analizi ve veri analizi eylem ve yöntemleri lisans öğrencilerin eğitiminde kullanılmıştır.

Bu projenin tamamlanmasında katkıları bulunan Y.Müh. Bilgin ÇELEN, ME 483 öğrencileri ve esas olarak da TÜBİTAK-MİSAG'a teşekkürü borç biliriz.

## ABSTRACT

The mixing region of coaxial jets are investigated experimentally and the results are expressed in terms of velocity and turbulence intensity distributions.

The measurements are performed at different cross sections by using Prandtl tube, hot-wire anemometer and pressure transducers. The development of jets, their mixing and entrainment are studied for various outer to inner jet mean velocity ratios and for different outer to inner pipe diameter ratios.

The turbulence intensity distributions are obtained from hot wire anemometer measurements and analysed on a microcomputer. The flow field demonstrated graphically displaying distributions of velocity and turbulence intensity at various axial positions from the exit plane. Turbulence intensity is used as a measure of the mixing process. Similarity profiles of velocities are also shown. The mixing process is said to be completed when the coaxial jet velocity profile approaches to a normal distribution interms of similarity parameters.

## ÖZET

Eşeksenel jetlerin karışım bölgesi deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar hız ve türbülans şiddeti dağılımı ile ifade edilmiştir.

Ölçümler akış alanının değişik kesimlerinde Prandtl tüpleri, sıcak tel anemometresi ve basınç duyarları ile yapılmıştır. Jet akışlarının gelişimi ve karışımı çeşitli dış-iç ortalama jet hızları oranı ve değişik dış-iç çap oranları için incelenmiştir.

Türbülans şiddeti dağılımı sıcak tel anemometresi ölçümleri ile bulunmuş ve veriler bir mikrobilgisayarda analiz edilmiştir. Akış alanı, çıkış ağzından başlamak üzere ekseksenel olarak hız ve türbülans seviyelerinin değişimi grafiksel olarak belirlenmiştir. Türbülans şiddeti karışım prosesinin ölçütü olarak kullanılmıştır. Ayrıca hızların benzeşim profilleri de gösterilmiştir. Karışımın tamamlanması benzeşim parametreleri cinsinden tanımlanan hız profilinin normal dağılıma ulaşması ile tanımlanmaktadır.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖZET .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
TABLO LİSTESİ .....	x
BÖLÜM 1 GİRİŞ	
1.1 Kapsam ve Amaç .....	1
1.2 Kaynak Araştırması .....	1
BÖLÜM 2 DENEY DÜZENİ	
2.1 Deney Düzeni .....	17
2.2 Fan, Kalibrasyon Tüneli, Dinlenme Bölgesi ve Borular .....	19
2.2.1 Fan .....	19
2.2.2 Kalibrasyon Tüneli .....	21
2.2.3 Dinlenme Bölgesi .....	21
2.2.4 Borular .....	23
2.3 Ölçüm Sistemi .....	23
2.3.1 Pitot Tüp, Mikrometre ve Konumlama .....	23
2.3.2 Sıcak Tel Anemometresi .....	24

## BÖLÜM 3 DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1 Birinci Faz Deneyler .....	26
3.1.1 Basit Jet ( $\lambda = 0$ ) .....	27
3.1.2 Halka Jet ( $\lambda = \infty$ ) .....	29
3.1.3 Eş-Eksenel Jet .....	30
3.2 İkinci Faz Deneyler .....	32
3.3 Sonuçlar .....	36
KAYNAKÇA .....	55
EK A .....	58
EK B .....	66



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Eksenel Jetlerin Karışma Geometrisi ve Karışma Bölgesi .....	3
Şekil 1.2a İkincil Jet Karışma Bölgesinde Hız Oranının Boyutsuz Değişim Eğrileri .....	5
Şekil 1.2b İç Karışım Bölgesi için Hız Oranının Boyutsuz Değişim Eğrileri .....	5
Şekil 1.2c Tam Karışım Bölgesinde Hız Oranının Boyutsuz Değişim Eğrileri .....	6
Şekil 1.3 Türbülans Şiddeti Seviyesinin Radyal Yönde Dağılımı .....	7
Şekil 1.4a Türbülans Şiddeti Seviyesinin İkincil Jet Karışım Bölgesinde Boyutsuz Değişim Eğrileri .	8
Şekil 1.4b Türbülans Şiddeti Seviyesinin Birincil Jet Karışım Bölgesinde Boyutsuz Değişim Eğrileri .	9
Şekil 1.4c Türbülans Şiddeti Seviyesinin Orta ve Tam Karışım Bölgesinde Boyutsuz Olarak Değişim Eğrileri .....	10
Şekil 3.1 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = 0$ , $Re_{id} = 57400$ .....	38
Şekil 3.2 Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile Benzeşimi, $\lambda = 0$ , $\frac{x}{D_i} = 7.0$ , $Re_{id} = 57400$ ....	38

Şekil 3.3	Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı, $\lambda = 0$ , $Re_{id} = 57400$ .....	39
Şekil 3.4	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = \infty$ , $Re_{od} = 48250$ .....	40
Şekil 3.5	Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile Benzeşimi, $\lambda = \infty$ , $\frac{x}{D_i} = 7.0$ , $Re_{od} = 48250$ .....	40
Şekil 3.6	Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı, $\lambda = \infty$ , $Re_{od} = 48250$ .....	41
Şekil 3.7	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda > 1$ , $Re_{id} = 55200$ , $Re_{od} = 101400$ .....	42
Şekil 3.8	Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile Benzeşimi, $\lambda > 1$ , $\frac{x}{D_i} = 7.0$ , $Re_{id} = 55200$ , $Re_{od} = 101400$ .....	42
Şekil 3.9	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda > 1$ , $Re_{id} = 81200$ , $Re_{od} = 94400$ .....	43
Şekil 3.10	Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile Benzeşimi, $\lambda = 1$ , $\frac{x}{D_i} = 7.0$ , $Re_{id} = 81200$ $Re_{od} = 94400$ .....	43
Şekil 3.11	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda < 1$ , $Re_{id} = 129250$ , $Re_{od} = 74950$ .....	44
Şekil 3.12	Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile Benzeşimi, $\lambda < 1$ , $\frac{x}{D_i} = 7.0$ , $Re_{id} = 129250$ , $Re_{od} = 74950$ .....	44
Şekil 3.13	Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı, $\lambda > 1$ ( $\lambda = 1.22$ ), $Re_{id} = 57340$ , $Re_{od} = 47830$ .....	45

Şekil 3.14	Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı, $\lambda < 1$ ( $\lambda = 0.8$ ), $Re_{id} = 46230$ , $Re_{od} = 70030$ .....	45
Şekil 3.15	Hız Profillerinin Karşılaştırılması, $\lambda > 1$ ..	46
Şekil 3.16	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = 1.53$ , $Re_o = 23554$ , $Re_i = 20080$ , $V_i = 5.02$ m/s $\frac{D_o}{D_i} = 1.83$ .....	47
Şekil 3.17	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = 1.53$ , $Re_o = 34205$ , $Re_i = 29160$ , $V_i = 7.29$ m/s $\frac{D_o}{D_i} = 1.83$ .....	48
Şekil 3.18	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = 0.65$ , $Re_o = 8945$ , $Re_i = 17951$ , $V_i = 4.38$ m/s .....	49
Şekil 3.19	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = 0.65$ , $Re_o = 14174$ , $Re_i = 28443$ , $V_i = 6.94$ m/s .....	50
Şekil 3.20	Türbülans Yoğunluğu Radyal Dağılımı, $\lambda = 1.53$ , $Re_o = 23554$ , $Re_i = 20080$ , $V_i = 5.02$ m/s $\frac{D_o}{D_i} = 1.83$ .....	51
Şekil 3.21	Türbülans Yoğunluğu Radyal Dağılımı, $\lambda = 1.53$ , $Re_o = 34205$ , $Re_i = 29160$ , $V_i = 7.29$ m/s $\frac{D_o}{D_i} = 1.83$ .....	52
Şekil 3.22	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = 0.65$ .....	53
Şekil 3.23	Eksenel Hızın Radyal Dağılımı, $\lambda = 1.53$ .....	53

Şekil 3.24	Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,	
	$\lambda = 0.65$	..... 54
Şekil 3.25	Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,	
	$\lambda = 1.53$	..... 54

## TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Fan Teknik Özellikleri .....	20
Tablo 2.2 Dinlenme Bölgesi .....	22
Tablo 2.3 Basınç Algılayıcı Teknik Özellikleri .....	25

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1 KAPSAM VE AMAÇ

Bu araştırma, eşeksenel iki ayrı akım alanının birbiriyle karışımı, etkileşimi ve akım alanı türbülans seviyelerinin ölçülmesi ile karışım bölgesi uzunluklarının saptanmasını içeren deneysel bir çalışmadır. Karışıma esas olan her iki akışkanın hızlarının değişik olması halinde karışım alanının radyal ve ekstenel yönde göstermiş olduğu değişim araştırmanın temel konusunu oluşturmaktadır.

Eşeksenel iki akış arasındaki karışma olayı mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır. Gerek yanma gerekse diğer bazı kimyasal işlemlerin oluşumunda bu tür bir karışım süreci söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada, iki akış arasındaki karışım olayı ile ilgili genel bilgi birikimine katkıda bulunmanın yanında, ağırlıklı olarak yakıcı (brülör) tasarımına ilişkin daha pratik araştırmalara bir temel oluşturacaktır.

#### 1.2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

Eksenel jetlerin karışma bölgesinde yapılan deneysel çalışmalar literatür araştırmasında en çok ağırlığı olan araştırma olmuştur. Öncelikle karışma olayının fiziği ince-

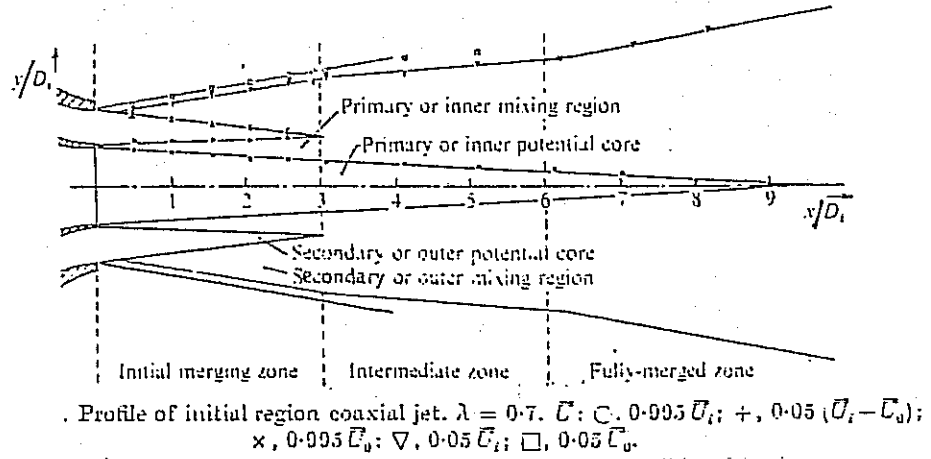
lenmiş ve karışmanın incelenmesi için gerekli bölgelerin tarifi yapılmıştır.

N.W.M. Ko ve A.S.H. Kwan [1] çalışmalarında bu ilk karışım bölgesini üç ana bölgeye ayırmışlardır. Bunlar sırasıyla:

- a) ilk girişim bölgesi,
- b) orta girişim bölgesi,
- c) tam karışım bölgesi'dir.

İkincil jetin ortalama çıkış hızının birincil jetin ortalama çıkış hızından az olması halinde, birincil jetin potansiyel konisi basit bir jete göre daha uzun olmaktadır. Lüle çıkışına en yakın olan ve yaklaşık ikincil veya dış potansiyel koninin kaybolduğu yere kadar uzanan bölgeye ilk karışım bölgesi denilmektedir. Bu bölgenin bitiş sınırları ise genellikle ortalama hız oranlarına ( $\lambda = V_{dış}/V_{iç}$ ) bağlanmaktadır. Dolayısıyla bu bölge içinde iç ve dış potansiyel konileri birlikte bulunmaktadır. Yine bu bölge içinde dış karışım bölgesinin sınırları eksen boyunca lineer bir değişim göstermektedir (Şekil 1).

Bu bölgenin hemen ardından orta karışım (girişim) bölgesi gelmektedir. Bu bölge ilk ve tam karışım bölgeleri arasında bir geçiş bölgesi olmaktadır. İki akım arasındaki karışım bu bölgede olmakta ve bölgenin uzunluğu ise yaklaşık 2 veya 3 ana jet çapı kadar uzaklıkta olmaktadır. Tam karışım bölgesi ise orta karışım bölgesinin hemen ardından gelmekte-



Şekil 4.1 Eksenel Jetlerin Karışma Geometrisi ve Karışma Bölgesi

dir. Bu bölge içindeki ana jetin potansiyel konisinin uzunluğu ise ortalama jet hızlarının oranlarına bağlıdır.

Bölgelerin ana özellikleri bu şekilde tarif edildikten sonra bölgeler arasındaki esas farklılık, ortalama hız ve türbülans şiddeti benzeşim eğrilerinin incelenmesinden sonra ortaya çıkmaktadır.

Ortalama yerel hız değerlerinin ortalama dış jet çıkış hızına bölünmesi ile elde edilen boyutsuz hız oranının  $(\bar{u}/\bar{u}_0)$ , boyutsuz radyal mesafeye  $y_0 = (y - 1/2 D_0)/x$  göre çizilmesiyle elde edilen eğrilere benzeşim eğrileri adı verilmektedir.

Benzeşim eğrileri arasındaki uygunluk  $(x/D_1)$  mesafesinin 1.5 ile 4 arasında kalan bölgesinde çok fazla, fakat  $(x/D_1)$ 'nin 1.5'dan küçük olduğu yerler için ise tamamen kaybolmaktadır. Bu bulgu Ko & Davies [5] tarafından da rapor



edilmektedir.  $(x/D_i) > 4$  olduğu zaman benzeşim eğrileri arasındaki uyum yine kaybolmaktadır. Bu da orta karışım bölgesinin başladığını göstermektedir.

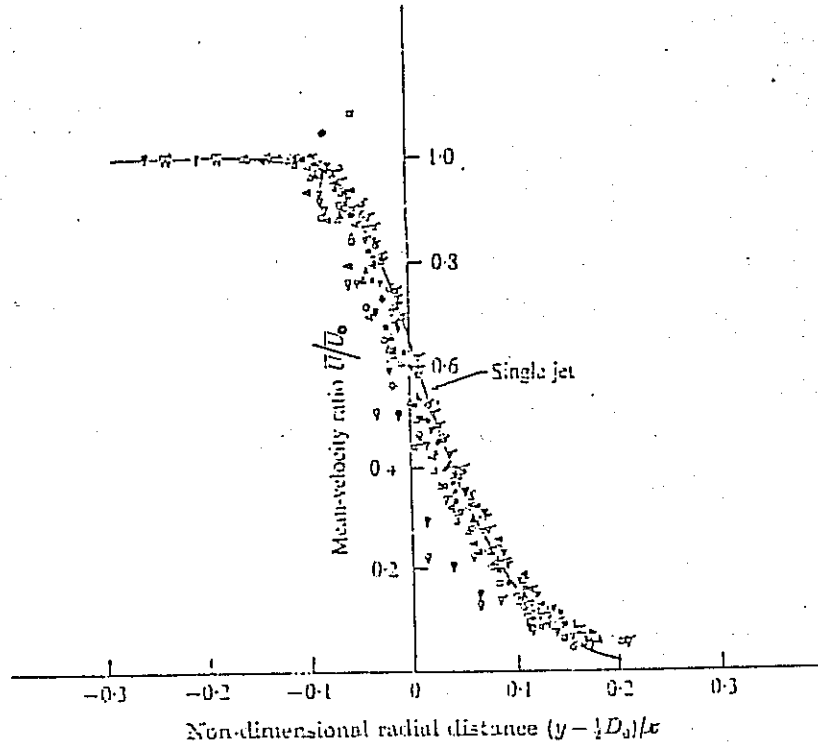
İç karışım bölgesi için, benzeşim eğrilerinin bulunmasında daha farklı bir yöntem uygulanmaktadır. Bu da,  $u/u_i$  yerine  $(u-u_0)/(u_i-u_0)$  boyutsuz hız değerlerinin  $\eta = (y-y_{0.5})/(y_{0.9}-y_{0.1})$  boyutsuz radyal mesafeye göre çizilmesini gerektirmektedir.  $y_{0.5}$ ,  $y_{0.9}$ ,  $y_{0.1}$  yerel ortalama hızın, iç jet ve dış jet hız farklarının  $(u_i-u_0)$  0.5, 0.9 ve 0.1 değerlerine ulaştığı radyal pozisyonlar olarak tarif edilmektedir.

Tam karışım bölgesinde,  $(x/D_i) > 6$ , hız eğrilerinin benzeşimi tekrar ortaya çıkmaktadır. Bu bölgede benzeşim eğrileri  $(u/u_i)$  değerlerinin  $\eta_e = (y - 1/2 D_e/x_e)$  değerlerine karşı çizilmesi ile elde edilmektedir. Benzeşim eğrileri ile ilgili örnek grafikler Şekil 2a, 2b ve 2c'de gösterilmiştir. Bu eğriler Ko ve Kwan'nın çalışmalarından elde edilmiştir.

Türbülans şiddeti benzeşim eğrilerine gelince: Türbülans şiddeti genel olarak:

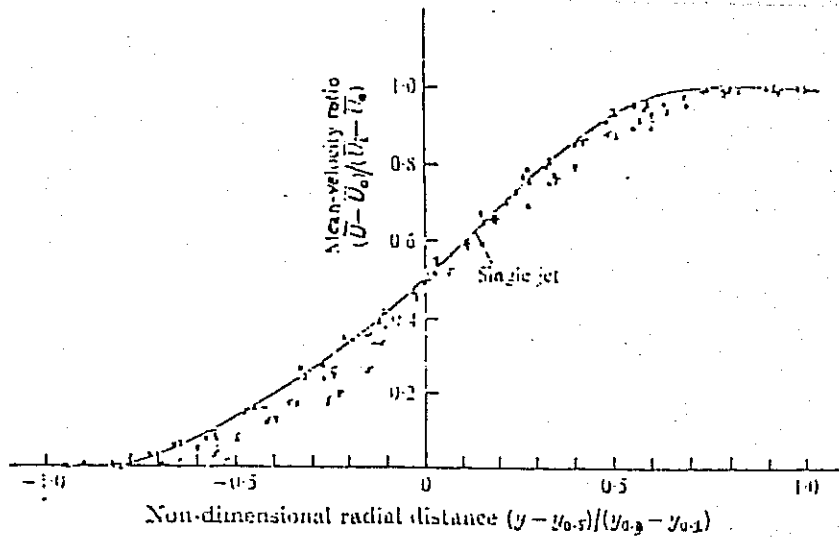
$$\text{Türbülans Şiddeti} \rightarrow I = \frac{\sqrt{u'^2}}{u_0} (\%) \quad \text{veya} \quad \frac{U_{rms}}{u_0} \times 100$$

olarak tarif edilmektedir. Eksenel jetler için tipik bir türbülans eğrisinin radyal yöndeki değişimi Şekil 3'de gösterilmektedir. Şekilde görülen iki ayrı pik iki ayrı karışım



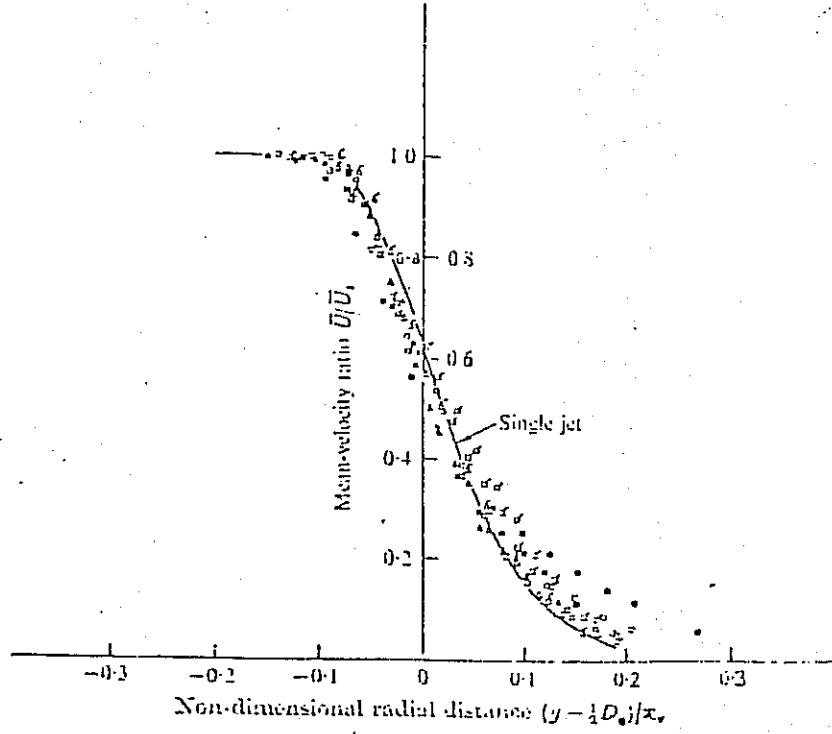
Non-dimensional plot of mean velocity ratio in the secondary mixing region.  
 $\lambda = 0.3, x/D_0$ :  $\Delta$ , 0.5;  $\nabla$ , 1;  $\circ$ , 1.5;  $\triangle$ , 2;  $\triangleleft$ , 2.5;  $\nabla$ , 3;  $\diamond$ , 4;  $\square$ , 5;  $\triangleright$ , 6;  $\square$ , 7.  $\lambda = 0.5$ .  
 $r/D_0$ :  $\triangle$ , 0.5;  $\nabla$ , 1;  $\circ$ , 1.5;  $\triangle$ , 2;  $\triangleleft$ , 2.5;  $\nabla$ , 3;  $\diamond$ , 4;  $\square$ , 5;  $\triangleright$ , 6;  $\square$ , 7.  $\lambda = 0.7, x/D_0$ :  $\triangle$ ,  
 0.5;  $\nabla$ , 1;  $\circ$ , 1.5;  $\triangle$ , 2;  $\triangleleft$ , 2.5;  $\nabla$ , 3;  $\diamond$ , 4;  $\square$ , 5;  $\triangleright$ , 6;  $\square$ , 7.

Şekil4.2a İkincil Jet Karışma Bölgesinde Hız Oranının  
 Boyutsuz Değişim Eğrileri



Non-dimensional plot of mean velocity ratio in the primary mixing region.  
 Symbols same as figure 2.2.

Şekil4.2b İç Karışım Bölgesi için Hız Oranının  
 Boyutsuz Değişim Eğrileri

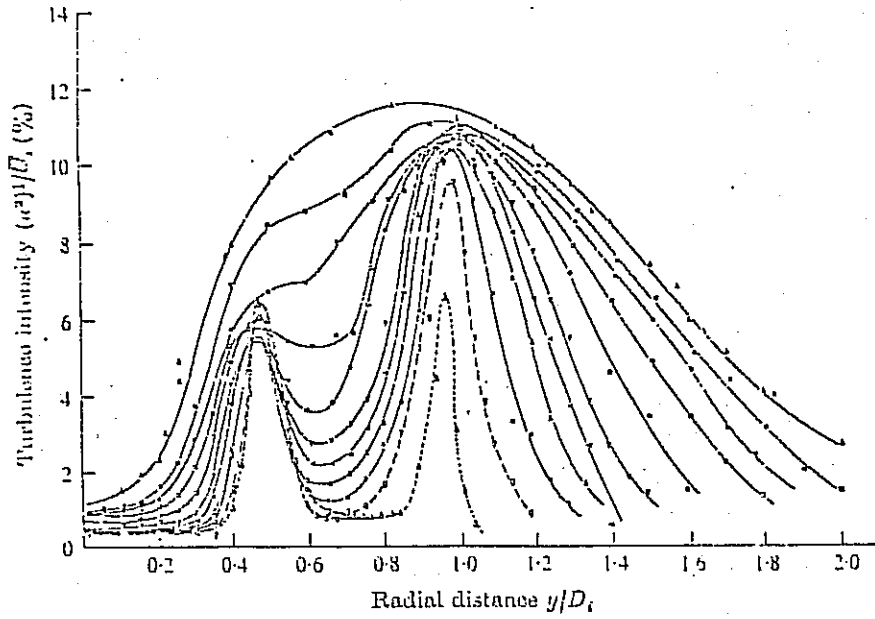


Non-dimensional plot of mean-velocity ratio in the intermediate and fully-merged zones.  $\lambda = 0.3$ .  $x/D_0$ :  $\circ$ , 6;  $\square$ , 7;  $\triangle$ , 8.  $\lambda = 0.5$ .  $x/D_0$ :  $\bullet$ , 6;  $\square$ , 7;  $\triangle$ , 8.  $\lambda = 0.7$ .  $x/D_0$ :  $\circ$ , 6;  $\square$ , 7;  $\triangle$ , 8.

Şekil.2c Tam Karışım Bölgesinde Hız Oranının Boyutsuz Değişim Eğrileri

bölgesinin (iç karışım ve dış karışım bölgelerinin) varlığını kanıtlamaktadır. Dolayısıyla aksenal yönde uzaklık arttıkça jetlerin karışması tamamlanmakta ve bu pikler tamamen ortadan kalkıp yerine genelde bir tek karışım için yüksek türbülansla bir eğri vermektedir.

Türbülans şiddetinin ilk karışım bölgesindeki benzeşim eğrisi ise  $\eta_0 = (y - 1/2 D_0)/x$  boyutsuz mesafesine göre çizilmesi ile elde edilmektedir. Benzeşim eğrileri  $1.5 < (x/D_0) < 4$  arasında ikincil jet karışım bölgesi için gayet iyi bir uyum göstermektedirler. Birincil jet için ilk karışım bölgesinde türbülans eğrilerinin benzeşimi, hız eğrilerinde olduğu gibi  $(\sqrt{u'^2}/u_1 - u_0)$  değerlerinin  $\eta_1 = (y - y_{0.5})/(y_{0.9} - y_{0.1})$  değerlerine karşı çizilmesi ile



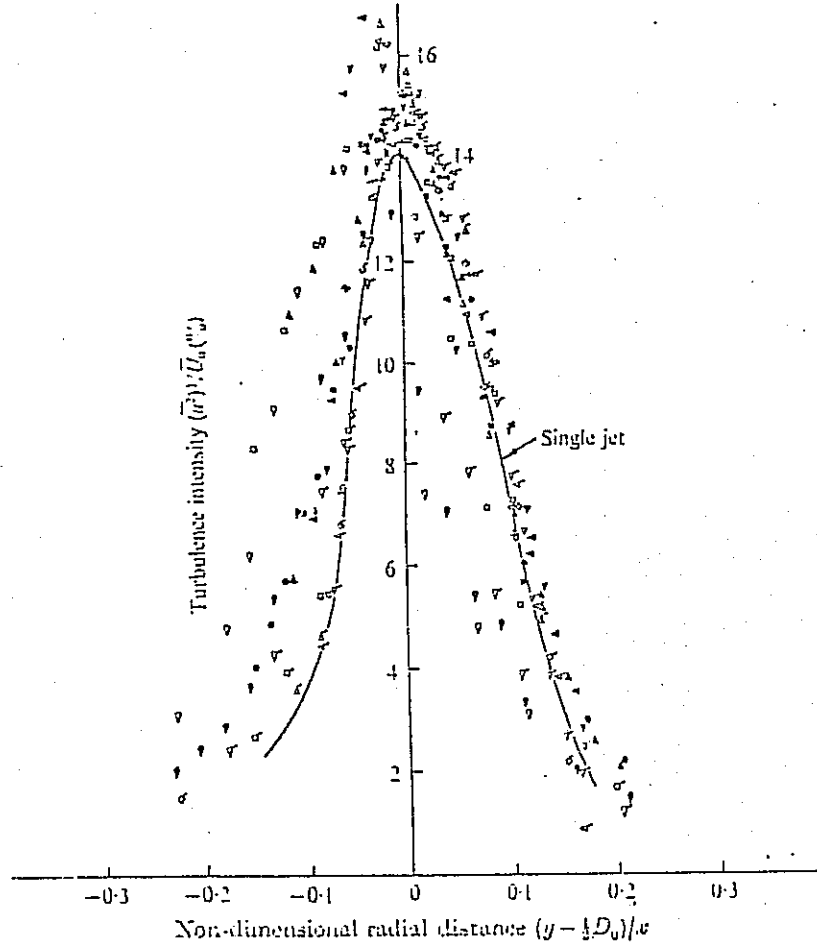
Radial distribution of turbulence intensity level.  $\lambda = 0.7$ .  $x/D_e$ :  $\Delta$ , 0.5;  $\nabla$ , 1;  $\circ$ , 1.5;  $\triangle$ , 2;  $\triangleleft$ , 2.5;  $\nabla$ , 3;  $\diamond$ , 4;  $\square$ , 5;  $\oplus$ , 6;  $\boxplus$ , 7;  $\blacktriangle$ , 8.

Şekil 4.3 Türbülans Şiddeti Seviyesinin Radyal Yönde Dağılımı

elde edilmektedir. Orta ve tam karışım bölgelerinde ise türbülans şiddeti benzeşim eğrilerinin uyuşumları türbülans şiddeti  $\sqrt{u'^2}/(u_e)$ 'nin  $(y - 1/2 D_e)/x_e$  göre çizilmesi ile elde edilmektedir.

Türbülans şiddeti eğrilerinin benzeşimlerini Şekil 4a, 4b ve 4c'de yukarıda belirtilen üç ayrı bölge için ayrı ayrı izlemek mümkündür. Bu şekiller Ko ve Kwan [1]'dan alınmıştır.

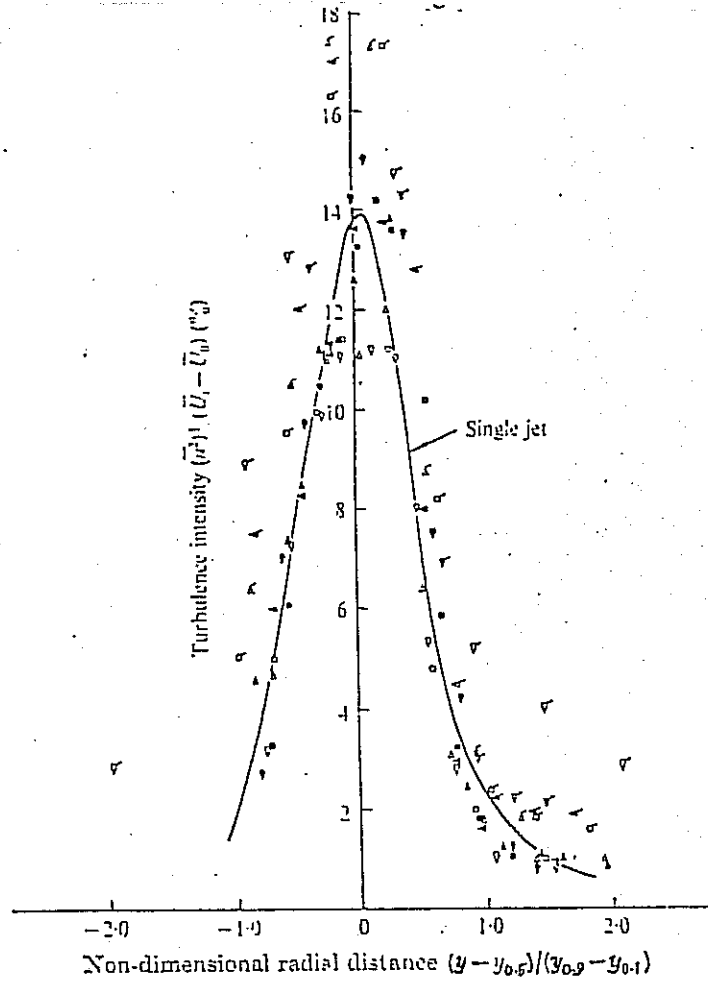
M.M. Ribeiro ve J.H. Whitelaw [2] aksenal jetler üzerinde yaptıkları çalışmalarda ortalama hız ölçümlerinin yanısıra, Reynolds gerilimlerini ( $u'v'$ ) ve değişen hız değerlerinin olasılık yoğunluğu dağılımlarını ölçtüler. Ölçme-



Non-dimensional plot of turbulence intensity level in the secondary mixing region.  
Symbols same as figure 2.

Şekil 4.4a Türbülans Şiddeti Seviyesinin İkincil Jet  
Karışım Bölgesinde Boyutsuz Değişim Eğrileri

lerde sıcak tel anemometresi ve ölçümleri gerçekleştirmek üzere de bir mini-bilgisayar kullandılar. Deney düzenekleri uzunlukları 2.00 m iç çapı 2.16 cm ve dış çapı da 4.5 cm olan iki borudan oluşan aksenal jetleri içermekteydi. Sabit sıcaklık anemometreleri ile çapraz tel problemleri kullanarak aldıkları hız değerlerini mini-bilgisayar vasıtasıyla değerlendirdiler. Dönüşümlü ve dönüşümü olmayan aksenal jetlerin incelendiği bu araştırmada dönüşümsüz aksenal jetler için

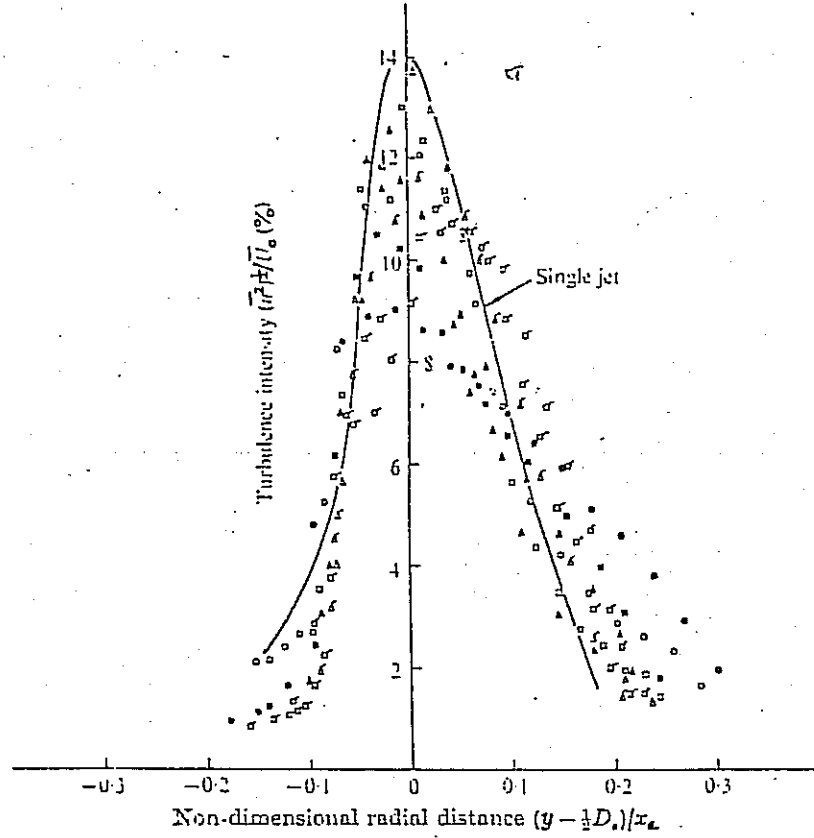


Non-dimensional plot of turbulence intensity level in the primary mixing region.  
Symbols same as figure 2.

Şekil 4.4b Türbülans Şiddeti Seviyesinin Birincil Jet  
Karışım Bölgesinde Boyutsuz Değişim Eğrileri

benzeşim durumunun yuvarlak bir jete göre daha kısa bir mesafede oluştuğu izlendi. Yazarlar bunun nedenini jetlerin çıkışından sonraki karışma tabakasına ve kopan girdaplara bağladılar.

Annular (çembersel) jetlerin ilk karışma bölgelerindeki benzeşim eğrileri yine Ko ve Chan tarafından [3,4] incelenmiştir. Bu çalışmada üç ayrı tip geometriye sahip çembersel



Non-dimensional plot of turbulence intensity level in the intermediate and fully-merged zones. Symbols same as figure 4.

**Şekil 4.4c** Türbülans Şiddeti Seviyesinin Orta ve Tam Karışım Bölgesinde Boyutsuz Olarak Değişim Eğrileri

jetler; (esas çembersel jetler, konik çembersel jet, ellip-tik çembersel jet) incelenmiştir. Sıcak tel anemometresi kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada jetlerin dış çapı 6.2 cm ve iç çapı da 2.8 cm olarak seçilmiştir. Ortalama jet hızının 50 m/s olduğu bu her üç tip jet için sıcak tel anemometresi yöntemi kullanılarak, ortalama hız eşdeğer eğrilerini veren haritalar çıkarılmıştır. Türbülans şiddetinin ek-senel yönde ve radyal yönde olan dağılımları da verilmiştir.

Ortalama hız oranlarının benzeşim eğrileri ile türbülans şiddetinin benzeşim eğrileri de ayrıca bu çalışmada incelenmiştir.

Çembersel jetler üzerinde Ko daha sonra çalışmalarını yoğunlaştırmış ve özellikle jet çapının küçük ve büyük olması durumlarındaki farklılığı araştırmıştır [5,6]. Çembersel jetin çapının küçük olması durumunun incelendiği çalışmada [5], Ko daha ziyade basınç ve gürültü ölçümlerine önem vermiş, bu arada akımın görüntülenmesi için de "z" tipi bir Schlieren görüntüleme yöntemi uygulamıştır. Gürültü ve basınç ölçmeleri sonucunda elde edilen spektrumdaki tek tepeye tekabül eden Strouhal sayısı  $St=(fD/u)$ 'nin aksenel yönde değişim ve görüntüleri fotoğraflardan vortex (girdap) yapılarının sürüklenme hızlarını bulmuştur. Daha sonraki çalışmasında [6] iç çapın daha büyük olması durumunda, "wake vortex"lerinin dış karışım bölgesine olan etkilerini incelemiştir. Sınırın arkasında oluşan "wake vortex"lerinin Strouhal sayısının jetin tercih edilen modlarından birine yakın olması durumunda dış karışım bölgesinde ikinci bir wake'den doğan bir vortex dizisinin oluştuğunu göstermiştir. "z" tipi Schlieren görüntüleme yönteminin yanısıra çalışmada basınç ölçmeleri için bir mikrofona kullanılmıştır.

Çembersel jetlerin dış karışım bölgesinde oluşan uyumlu yapıların incelenmesi yine Ko ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. W.T. Chan ve N.W.H. Ko [7] daha önce birlikte gerçekleştirdikleri çalışmadaki [3] deneysel düzeneği



kullanıp, sıcak tel anemometresi ve mikrofon kullanarak, ortalama hızın aksenal yöndeki değişimini, toplam ses basıncı düzeyinin dağılımının ve bu dağılımının aksenal yöndeki değişimini incelemişlerdir. Hız ve basınç değişimlerinin spektrum analizlerinin de yapıldığı bu çalışmada çembersel jet için karışım bölgesindeki uyumlu yapıların varlığı ortaya konmuştur.

A.E. Perry, T.T. Lim ve M.S. Chong daha sonraki araştırmalarında [8] Chan ve Ko'nun bulgularını daha ileriye götürmüşlerdir. Çapraz tel anemometresi ve dumanla akım görüntüleme yönteminin kullanıldığı bu çalışmada ölçümler ve görüntüleme faz kilitlemesi tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin titreşimlerle aynı fazda olabilmesini sağlamak amacıyla uygulanan bu yöntem makalede etraflıca verilmiştir. Daha ziyade fiziksel izahatın verildiği bu çalışma sonucunda iki türlü sürüklenmenin tarifi yapılmıştır. Bunlar, akım çizgisi boyunca veya zaman içinde ortalama vortisite taşıyan akım çizgileri zarfının genişlemesi (difüzyon), diğeri de akışkan hacimlerinin bu zarfı geçmesi yöntemidir.

Ko'nun bu konuda en son yayınlarından biri F.C. Chu ile gerçekleştirdiği ve değişik çaplardaki çembersel jetleri içeren çalışmasıdır [9]. İki ayrı tip; (esas ve konik) çembersel jetin incelendiği bu çalışmalarda mikrofon ölçümleri ve Schlieren görüntüleme yöntemleri kullanılmıştır. Çıkış Mach sayısının 0.3, dış çapın 30 mm olduğu jetlerin iç çapları değiştirilerek  $D_i/D_o$  oranları 0.67, 0.5, 0.43, 0.33,

0.23 olan çembersel jetler elde edilmiştir. Ortalama basınç dağılımı ve  $P_{rms}$ 'nin aksenel yönde değişimlerinin yanısıra ses basıncı güç spektrumları elde edilmiştir. Jetin dışındaki mikrofön tarafından başlatılan bir yöntem ile Schlieren fotoğraflar çekilmiş, uyumlu yapıların, duran girdapların (standing vortices) ve wake'den oluşan girdapların varlığı ortaya konmuştur.

Ko ve arkadaşlarının çalışmalarının dışında literatürde aksenel jetlerin karışması üzerinde çalışmalar oldukça yoğundur. Bu çalışmalar arasında en eski olanlarından biri N.A. Chigier ve J.M. Beer [10] tarafından gerçekleştirilendir. İki ayrı fan tarafından beslenen, iki ayrı hızdaki aksenel jetlerin iç ve dış çapları 2.5 cm ve 6.4 cm'dir. Dış jetin hızı 30 m/s ve iç jetin hızı ise 60 m/s civarındadır. Hız ölçümlerinin toplam basınç pitot tüpü, statik basıncın ise disk tipi problemlarla ölçüldüğü bu çalışmada hız dağılımları basınç farklarından bulunmuş, türbülans ölçümleri yapılmamıştır. Gerçekleştirilen ölçümler şunlar olmuştur: Aksenel hızın radyal yönde değişimi, akım çizgilerinin elde edilmesi, geri dönmeli alanların belirlenmesi, potansiyel koninin uzunluğu, CO<sub>2</sub> konstrasyon dağılımı.

F.H. Champagne, I.J. Wygnanski [11] aksenel jetler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalarında çapraz ve düz sıcak tel problemleri kullanmışlar ve değişen (iç/dış) jet hızlarında türbülans şiddetinin, ortalama aksenel hızın ve Reynolds gerilimlerinin ( $u'v'$ ) aksenel ve radyal yöndeki dağılımlarını

bulmuşlardır. Kullanılan ölçme teknikleri açısından bu çalışma projemiz kapsamında kullanılan yöntemlere çok yakındır.

R. Matsumoto, K. Kimoto ve N. Tsuchimoto bu konudaki çalışmalarında [12] lüle çıkış şartlarının ve geometrisinin jetlerin ana bölgesindeki özelliklerine olan etkilerini incelediler. Ortalam değerlerin ve türbülans şiddetinin sıcak tel anemometre problemleri, toplam basınç tüpü (pitot tüpü 1.2 mm dış çap, 0.8 mm iç çap) ve statik basınç tüpleri (1.2 mm dış çap, 0.8 mm iç çap, 4x0.3 mm delikli) ile gerçekleştirildiği bu çalışmadaki bulgular şunlar olmuştur.

1. Ana bölgedeki boyutsuz radyal hız profilleri kosinüs eğrisine uymaktadır.
2. Eksen boyunca hızın ve türbülans şiddetinin sönümü hız oranının ( $\lambda$ ) küçük olduğu durumlarda lüle duvarının kalınlığına bağlı olmamaktadır. Ne varki büyük olduğunda hızın sönümü ve türbülans şiddeti lülenin ardındaki wake'den ve dolayısıyla lüle kalınlığından fazlasıyla etkilenmektedir.
3.  $\lambda$ , Prandtl'in karışma uzunluğu ve  $\epsilon$  eddy vizkozitenin değerleri radyal ve aksenal yönde  $\lambda$ 'nin büyüklüğüyle değişmektedir.

Eksen çıkış hızının 20 m/s ile 100 m/s, iki jetin hız oranlarının ise 0.2 ile 0.8 arasında değiştiği bu çalışmada jetlerin lüle duvar kalınlığı da 0.7 ile 4.3 mm arasında değiştirilmiştir.

L.J. Alpinieri [13] aksenel jetlerin türbülanslı karışımı adlı çalışmasında yoğunlukları farklı iki ayrı gazın CO<sub>2</sub> ve H (birincil jet) ayrı ayrı hava akımına (ikincil jet) karışmalarını incelemişlerdir. Kütle ve momentum taşınımının incelendiği bu çalışmada akım hızları subsonik seviyede tutulmuştur. Aksenel ve radyal yönde hız dağılımları ve konsantrasyon dağılımları ölçülmüştür. Ölçmeler sonucunda, yerel yoğunluk ile eddy kinematik vizkozitesinin çarpımının sadece aksenel yönde değiştiği ortaya konmuştur. Kütlenin yayılımının ise momentuma oranla daha çabuk olduğu bulunmuştur.

M.M. Ribeiro ve J.H. Whitelaw (1975) yaptıkları bir çalışmada [14] ve daha sonra (1980) beraberce yapmış oldukları [2] çalışmalarına esas teşkil eden; türbülanslı bir jet içindeki istatistikî değerleri ölçmüşlerdir. Hız olasılık dağılımlarını ve oto-korrelasyon fonksiyonlarının ölçüldüğü bu çalışmada sıcak tel anemometresi ve X sıcak tel problemleri kullanılmıştır. Verilerin dijital olarak işlendiği çalışmada özellikle hızın aksenel ve radyal bileşkelerinin ayrı ayrı olasılık dağılımları ile eksen üzerinde bileşkeler arasındaki açı,  $r/x=0.087$  mesafesinde maksimum kayma gerilmesi üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak eksen üzerinde aksenel hızın olasılık dağılımının Gaussian olmadığı, u hızının olasılık dağılımının v hızının negatif ve pozitif olması durumuna bağlı olduğu ortaya konmuştur. Dışa doğru taşınımın (+v) genellikle Gaussian "u" dağılımına, içe doğru taşınımın (-v) genellikle Gaussian olmayan "u" dağılımına neden olduğu or-

taya konmuştur. Ölçülen oto korrelasyon ve çapraz korrelasyonların büyük ölçüde yarı çapa bağlı olmadığı bulunmuştur.

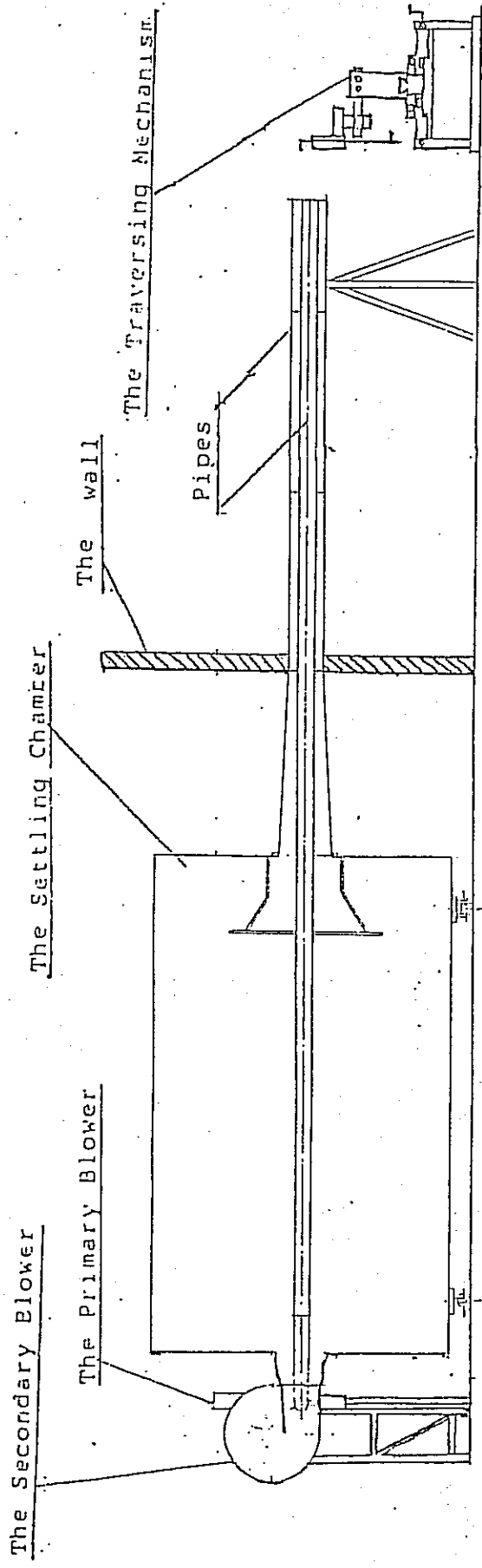
## BÖLÜM 2

### DENEY DÜZENEGİ

#### 2.1 DENEY DÜZENİ

Eşeksenli karışimli (turbulent) jet akışların elde edildiği deney düzeneği, iki fan ve bunlara bağlı iki adet dinlenme bölgesi ile eşeksenli olarak iç içe yerleştirilmiş olan borulardan oluşturulmuştur. Fandan çıkan hava dinlenme bölgelerine girmekte, burada fandan kaynaklanan akış bozuklukları giderildikten sonra iç veya dış borudan geçmektedir. Deney düzeneğinin genel görünüşü Şekil 1'de verilmiştir. Aynı ayrı iki fandan çıkan hava iç ve dış borulardan geçirilmiştir. Böylece borulardaki hava hızı gerekli ölçülerde ayrı ayrı ayarlanabilmiş ve hız oranları ( ) istenilen değerde tutulmuştur.

Ölçüm sisteminde iki adet konumlama mekanizması, pitot-tüpler, sıcak tel anemometresi, basınç algılayıcıları, eğik manometre ile ölçümlerin kayıt ve analizinin yapıldığı MINC 23/11 veri kayıt ve analiz sistemi kullanılmıştır. Ayrıca, karışimli eşeksenel jet akışları akış görüntüleme yöntemi ile de incelenmesi için "tuft" çerçevesi imal edilmiş ve kullanılmıştır. Eşeksenli jet akışların çevre koşullarından etkilemesini önlemek için deney bölgesi tül ile kapatılmıştır.



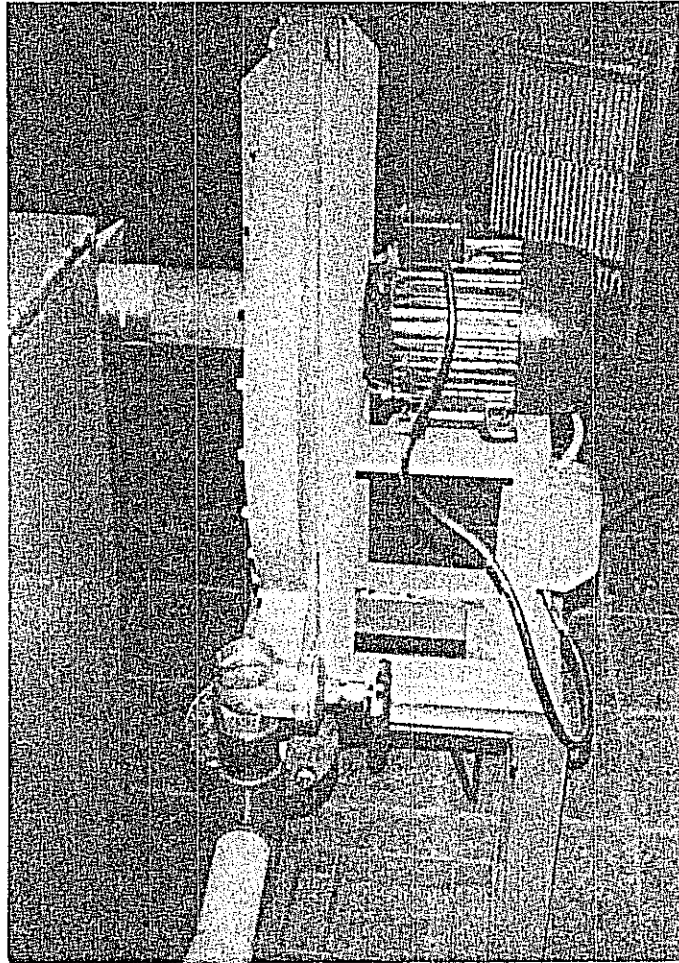
Şekil 2.1 Deney Düzenegi

Sıcak tel anemometre sondalarının kalibrasyonu için küçük bir rüzgar tünelinin tasarım ve imali yapılmış ve sıcak tel anemometre kalibrasyonları bu tünelde yapılmıştır.

## 2.2 FAN, KALİBRASYON TÜNELİ DİNLENME BÖLGESİ VE BORULAR

### 2.2.1 Fan

İç jet ve dış jet akışı için kullanılan fanlar Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 İç Jet Akış Fanı





Şekil 2.3 Dış Jet Akış Fanı

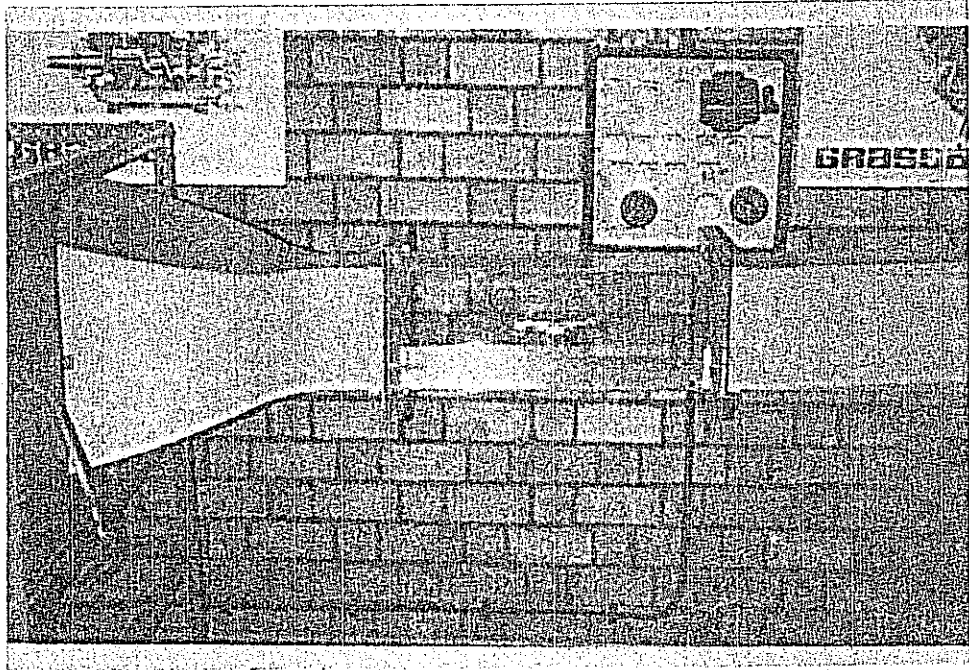
iki ayrı jet akışı için kullanılan fanların teknik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Fan Teknik Özellikleri

Adı	Tipi	Gücü kW	Devir/dak	Statik Basınç	Debi m <sup>3</sup> /h
Fan (İç Jet)	Alarko	2.25	2880	700 mm H <sub>2</sub> O	360
Fan (Dış Jet)	42 RU180 (MAKS)	7.5	2880	300 mm H <sub>2</sub> O	3600

### 2.2.2 Kalibrasyon Tüneli

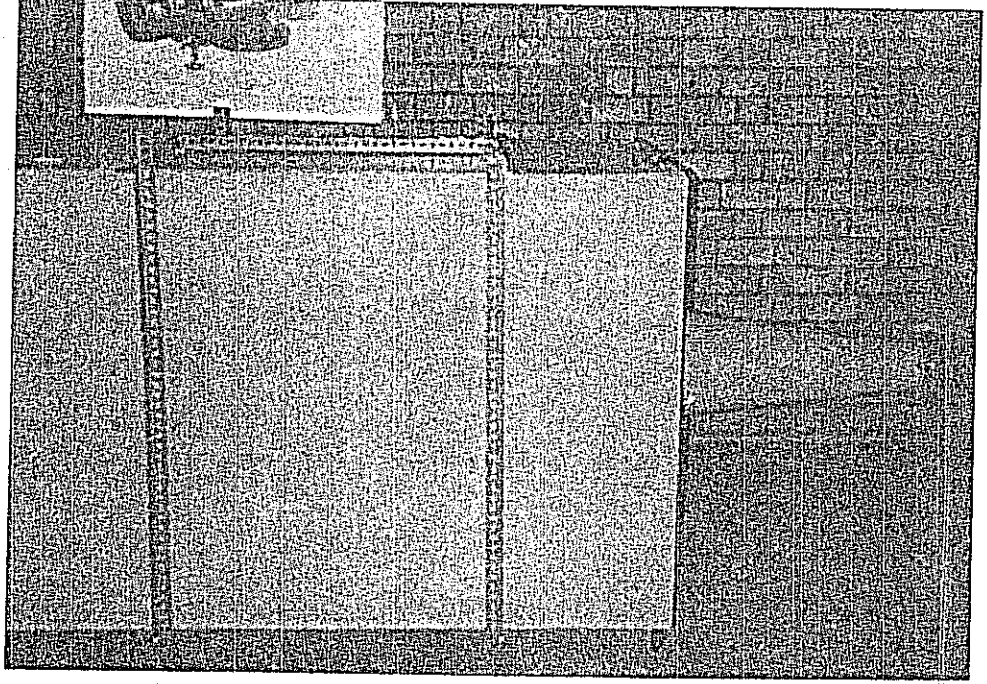
Sıcak tel anemometre sondalarının kalibrasyonu için tasarlanıp imal edilen kalibrasyon tüneli Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Giriş, lüle, deney bölgesi ve yayıcıdan oluşan bu küçük tünelin deney bölgesi boyutları 250 mmx250 mmx800 mm olup pleksiglastan saydam olarak imal edilmiştir. Kalibrasyon tüneli açık devre ve emme tiplidir. Dış jet fanının emme tarafı tünelin yayıcı sonuna bağlanmış olup, tünelden geçen hava dış jet tarafına gönderilmek üzere merkezi dinlenme bölgesine girmektedir. Böylece bir fan ile hem tünel çalıştırılmış hem de dış jet akışı için hava temin edilmiştir.



Şekil 2.4 Kalibrasyon Tüneli

### 2.2.3 Dinlenme Bölgesi

Emiş tarafı kalibrasyon tüneline bağlı olan fan, çıkış tarafında bir dinlenme bölgesine bağlanmıştır. Şekil 2.5'de



Şekil 2.5 Dinlenme Bölgesi ve Boru Giriş Lülesi

gösterilmiş olan bu dinlenme bölgesinin boyutları aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

Çizelge 2.2 Dinlenme Bölgesi

Boy (m)	1.88
Geniřliđi (m)	1.10
Yüksekliliđi (m)	1.12
Toplam Hacim (m <sup>3</sup> )	2.32
Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )	1.23

Fan çıkışındaki akış bozuklukları dinlenme bölgesinde giderilmiştir. Dinlenme bölgesi çıkışı ile boru girişi arasında bir lüle yerleştirilmiş ve akış alanı lüle sonunda boru çapına düzgün bir şekilde indirgenmiştir. Böylece boru girişinde akış bozukluğuna izin verilmemiştir.

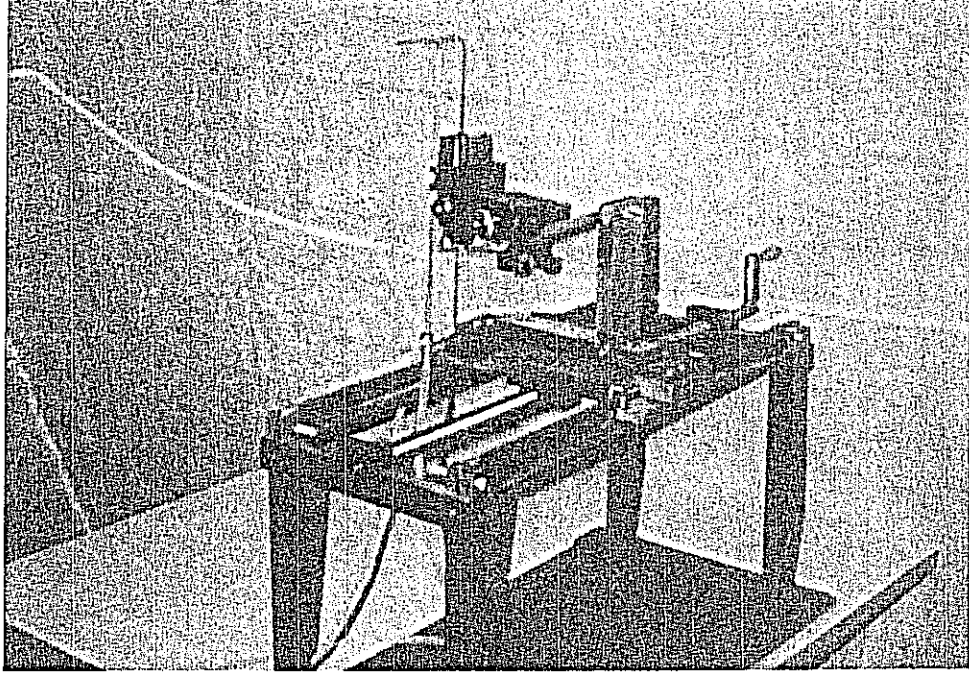
#### 2.2.4 Borular

İç ve dış akış boruları PVC'den olup eşeksenel olarak iç içe yerleştirilmiştir. İç borunun yerleşiminde merkezleme elemanları kullanılmıştır. Böylece boruların eşeksenliği sağlanmıştır. İlk deneyler için, iç boru çapı 50 mm ve uzunluğu 4800 mm, dış boru çapı 110 mm ve uzunluğu 3000 mm'dir. Daha sonraki deneylerde, çap oranlarının karışım bölgesine ve türbülans seviyelerine olan etkilerini incelemek için değişik çaplı iç ve dış borular kullanılmış ancak boru uzunluklarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

#### 2.3 ÖLÇÜM SİSTEMİ

##### 2.3.1 Pitot-Tüp Mikromanometre ve Konumlama Mekanizması

Eşeksenel iki jet akışının ortalama hız ölçümleri Prandtl tipi Pitot tüp ve mikromanometre ile yapılmıştır. Ayrıca sıcak tel anemometre kalibrasyonları da aynı Prandtl tipi Pitot tüp ile yapılmıştır. İki adet konumlama mekanizmasının tasarım ve imali gerçekleştirilmiştir. Manuel çalışan ilk konumlama mekanizması Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Konumlama mekanizması ileri-geri 350 mm, sağa-sola 200 mm 0.5 mm hassasiyetle hareket edebilmektedir. Bu mekanizma üzerine, hassasiyeti 0.05 mm olan ayrı bir konumlama mekanizması yerleştirilmiştir. Bu konumlama mekanizması ile Pitot tüp veya sıcak tel anemometresi hassas olarak hareket ettirilebilmiştir. Hassas konumlama mekanizması birbirine dik üç yönde, 55 mm, 20 mm ve 10 mm hareket ettirilebilmektedir.



Şekil 2.6 Konumlama Mekanizması

### 2.3.2 Sıcak Tel Anemometresi

Eşeksenel jet akışı hız ve türbülans seviyeleri ölçümleri için sıcak tel anemometre sistemi kullanılmıştır. Bu sistem aşağıdaki ünitelerden oluşmuştur.

DISA 55 D01 Sıcak tel anemometresi

DISA 55 D10 Linearizatör (Düzeltici)

DISA 55 D30 DC voltmetre

DISA 55 D35 RMS voltmetre

Temel çalışma prensibi sabit sıcaklık olan anemometre detayları Apendiks A'da verilmiştir.

### 2.3.3 Basınç Algılayıcıları

Basınç algılayıcıları toplam ve statik basınç ölçümlerinde kullanılmıştır. Bu verilerden hız değerleri bulunmuş-

tur. Deneylerde kullanılmış olan iki adet basınç algılayıcı teknik özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Basınç Algılayıcı Teknik Özellikleri

Modeli	Entran Device Inc. EPIL. M4B-.35	
Tipi	Difransiyel	
Hassasiyeti	Algılayıcı 1	273.76 mV/bar
	Algılayıcı 2	273.18 mV/bar
Ölçüm Aralığı	0.35-1.5 bar	
Ölçüm Sıcaklık Aralığı	-40/121 °C	

## BÖLÜM 3

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Eş-eksenel jetler üzerine yapılmış olan deneysel çalışmalar iki fazda tamamlanmıştır. Birinci fazda genel olarak yapılan araştırmaların sonuçları Referans [15] ve [16]'da sunulmuştur. Bu sonuçların niteliksel değerlendirilmesinde belirlenen eksiklikler, deney düzeneğinin elverdiği ölçüde, ikinci faz deneylerle giderilmiş, önemli görülen bazı sonuçlar ise tekrarlanmıştır. Bu arada ikinci faz deneyler öncesi geliştirilen iki yönde basamak motor kontrollü ve üç yönde manual olarak hassas ayarlı konumlama mekanizması, gerek Prandtl tüpünün ve gerekse sıcak-tel anemometre sondasının jet içinde istenilen noktaya hassas olarak yerleştirilmesinde etkin olmuştur.

#### 3.1 BİRİNCİ FAZ DENEYLER

Jet üzerinde, eksenel hızın radyal dağılımı 10 değişik kesitte ölçülmüştür. Bu kesitlerin belirlenmesinde boru çıkışından itibaren eksen üzerinden ölçülen kesit mesafesi, üç jet çapının tam katları olarak belirlenmiş ve " $X/D_1$ " olarak ifade edilmiştir. Her bir seçilen kesitte yarıçap üzerinde seçilen 14 değişik radyal noktadan değer alınmıştır. Bu ölçümler yapılmadan akışın dönümü (swirl) ve simetrisi gerek sapma açısı sondası (yawmeter) ve gerekse "ipçik-matrisi"

akış görüntüleme yöntemi ile kontrol edilmiştir. Akışta yeterli simetri ve ihmal edilebilecek boyutta dönüm olduğu belirlenmiştir. Radyal konumun belirlenmesinde  $r/D_0$  boyutsuz parametresi kullanılmış ve 14 değer merkezden jet dışına kadar belirlenmiş aralıklarla ölçülmüştür.

Deneylerde, iç ve dış jetleri birbirlerine göre belirleyen hız oranı boyutsuz sayısı  $\lambda$ , hem birden büyük ( $\lambda > 1$ ) (yani daha hızlı bir dış jet için) ve hem de birden küçük  $\lambda < 1$  (yani daha hızlı bir iç jet için) değerler için, deney düzeniğinin elverdiği bir ölçüde değiştirilmiştir. Bunlara ek olarak  $\lambda$ 'nın limit değerleri olan  $\lambda = 0$ , yani basit jet durumu ile  $\lambda = \infty$ , yani halka jet durumu mukayese açısından incelenmiştir.

### 3.1.1 Basit Jet ( $\lambda = 0$ )

Yalnızca iç jetin var olduğu durumda elde edilen maksimum jet hızı 22 m/s'dir. Bu durumda, eksendeki maksimum hız ve iç boru çapına bağlı olarak hesaplanan Reynolds sayısı 68700'dür ve akışın türbülanslı olduğuna işaret eder. Basit jet (Şekil 3.1) ortalama hızı 19 m/s ve Reynolds sayısı 57400 olan bir örnek verilmiştir. Basit jetin yayılması  $X/D_1 = 7$  kesitinde iyice belirginleşmektedir. Bu kesitte hız dağılımı Gaussian olmaktadır. Böyle bir hız dağılımı Schlichting tarafından analitik olarak aşağıdaki formda verilmektedir [17].

$$\frac{u(r,x)}{U_{max}} = A/(1 + 0.25 \eta^2)^2/U_{max} \quad (3.1)$$



Yukarıda 3.1 eşitliğinde verilen boyutsuz hızın dağılımı aşağıdaki boyutsuz radyal uzunluk değişimi ile saptanır.

$$vs \quad r/r(0.5 U_{max}) \quad (3.2)$$

burada  $\eta = 7.67 (r/x)$ 'dir.  $r(0.5 U_{max})$  ise hızın maksimum hızın yarısına ulaştığı radyal pozisyonudur. A sabiti eksen-deki ( $r = 0$ ) hızın değeridir. Bu çalışmada ölçülen basit jet hız profilleri yukarıdaki analitik form'a iyi bir uyum göstermektedir (Şekil 3.2).

Eksenel hız ölçümlerinden hesaplanan eksenel türbülans seviyesi (intensitesi) her ölçüm noktası için bulunmuştur. Türbülans seviyesi  $I = \sqrt{U'^2}/U_{max}$  olarak tanımlanmıştır. Burada  $U'$  hızın değişken bileşkesi,  $U_{max}$  ise maksimum ortalama hızdır. Şekil 3.3'de eksenel türbülans seviyesinin radyal dağılımı verilmektedir. Burada orta bölgede türbülans seviyesinin düşük olduğu, ancak  $r/D = 0.5$  pozisyonun da yüksek olduğu görülmektedir. Bu da bu bölgede karışım olduğunun göstergesidir. Türbülans seviyesinin yüksek olduğu bölgeler karışım bölgesi olarak nitelendirilmektedir. Yine aynı şekilde, basit jetin etrafındaki hava ile karışımını 7 jet çapı ( $x/D = 7$ ) kadar bir mesafede tamamladığı görülmektedir. Jetin boruyu terk ettiği noktadan ( $x/D = 0$ ) uzaklaştıkça türbülans seviyesi yükselmekte ve boru çeperinin etkisi zayıflayarak ortadan kalkmaktadır.

### 3.1.2 Halka Jet ( $\lambda = \infty$ )

Halka jet için elde edilebilen maksimum ortalama hız 12.5 m/s'dir. Halka kesitin hidrolik çapına göre ve maksimum hıza göre tanımlanmış Reynolds sayısı 48250'dir. Bu da halka akışın türbülanslı olduğunun bir göstergesidir. Bu halka jet için hız dağılımı Şekil 3.4'de verilmiştir. Bu şekilde, halka jetin boru çıkışındaki hız profilinin hemen hemen düzgün bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Çıkış noktasından uzaklaştıkça halka jetin maksimum hız radyal pozisyonu jet eksenine doğru yaklaşmaktadır.  $x/D_i = 1.0$  ve  $x/D_i = 1.5$  kesitlerinde bir ters akışın olduğu ortaya konmuştur. Jet akışı geliştikçe bir durağanlık noktası oluşmaktadır. O noktadan sonra ters akış ortadan kalkmakta ve halkalı akış, basit jete benzer bir şekilde yayılmaktadır. Şekil 3.5'de verildiği gibi halka jet düzgün Gauss dağılımına çıkıştan 7 çap sonra ( $x/D_i = 7.0$ ) ulaşmaktadır.

Eksenel türbülans seviyesinin radyal dağılımı Şekil 3.6 de verilmiştir. Halka akışın iç tarafında, başlangıçta ters akışın olduğu bölgede, bu yüzden oluşan vortex oluşumları türbülans şiddetini yükseltmektedir. Örneğin  $r/D_o = 0.5$  radyal konumu ile  $x/D_i = 0.5$  kesiti civarında iç boru çeperinin türbülans seviyesine etkisi gözlenmektedir. Boru çıkışından 2 çap ( $x/D_i = 2.0$ ) ve daha fazla uzaklıklarda, iç boru çapının etkisi azalmakta ve hatta ortadan kalkmaktadır. Bu durumda iç kısımdaki türbülans seviyesi düşmektedir.

### 3.1.3 Eş-Eksenel Jet

Bu araştırmada eşeksenel jetlerin hız oranının birden küçük ( $\lambda < 1$ ), birden büyük ( $\lambda > 1$ ) ve yaklaşık olarak bire eşit ( $\lambda \approx 1$ ) olduğu durumlar incelenmiştir.

Eşeksenel jet hız oranının birden büyük olduğu durumlar için, iç jetin ortalama hızı, halka jetinkine oranla daha küçüktür. Şekil 3.7'de  $\lambda \approx 1.5$  için ( $\lambda = 1.44$ ) hız profilleri verilmektedir. Burada boru çıkışında iç jetin ortalama hızı 18.4 m/s, dış jetin ortalama hızı ise 26.5 m/s olarak belirlenmiştir. İç ve dış jetlere karşı gelen Reynolds sayıları sırası ile  $Re_{i,d} = 55200$  ve  $Re_{o,d} = 101400$  olarak bulunabilir. Bu da her iki jetin türbülanslı olduğunun işaretidir. Her iki jetin hız profilleri incelendiğinde dış jetin hızlarının iç jetten daha yüksek olması sonucu bir vorteks bölgesi oluşmakta ve iç jete göre ters bir akış meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak iç jet hızı düşmektedir. Jet ilerledikçe oluşan vorteks'in kuvveti azalmakta ve gittikçe daha düzgün bir Gauss dağılımına ulaşan birleşik bir jet oluşmaktadır. Bu da boru çıkışından takriben 7 çap uzaklıkta ( $x/D_i = 7.0$ ) gelişimini tamamlamaktadır. Her iki jetin ortalama hızlarının yaklaşık eşit olma durumunda ( $\lambda = 1$ ), her iki jetten birleşik ve gelişmiş bir jete ulaşma daha kolay olmaktadır. Yine boru çıkışından yaklaşık 7 çap ileride ( $x/D_i = 7$ ) karışım bölgesinin ortadan kalktığı ve basit jet durumuna ulaşıldığı söylenebilir. Şekil 3.8'de hız profilleri verilmekte Şekil 3.9'da ise analitik Gauss eğrisi ile sonuçların bir karşılaştırılması verilmektedir.  $\lambda = 1$  durumun-

daki deneylere karşılık gelen Reynolds sayıları iç jet için  $Re_{id} = 81200$  ve dış jet için  $Re_{od} = 94400$ 'dür.

İç jet ortalama hızlarının dış jete göre daha büyük olduğu durumlar ( $\lambda < 1$ ) için hız profilleri Şekil 3.10'da verilmiştir. Burada karışım olayının kontrolü iç jettedir. Öncelikle karışım yaptığı ve kendisinden daha yavaş olan halka jeti kendine çeker ve halka jetin zayıflamasına yol açar. Bu arada halka jetin ekseni de iç jetin ekseni olan simetri eksenine yaklaşmaktadır.

Şekil 3.11'de verilen sonuçlar  $\lambda = 0.48$  yani iç jetin dış jete göre hemen hemen iki misli hızlı olduğu bir duruma tekabül etmektedir. Burada iç jet için Reynolds sayısı  $Re_{id} = 129250$ , dış jet için ise,  $Re_{od} = 74950$ 'dir. Akış altı yönde ilerledikçe, halka jetin iç jet tarafından yutulduğu ve sonuçta Şekil 3.12'de de görüldüğü gibi, Gauss dağılımına yaklaşan bir basit jet durumuna dönüşmekte olduğu gösterilmektedir.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de türbülans şiddetinin radyal dağılımları sırası ile  $\lambda > 1$  ( $\lambda = 1.22$ ) ve  $\lambda < 1$  ( $\lambda = 0.8$ ) değerleri için verilmektedir. Karışımından önce, her iki potansiyel jet odağına karşı gelen bölgelerde türbülans şiddetinin beklendiği gibi düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde her iki karışım bölgesinde (iç jet ile halka jet arası ve halka jetle çevredeki durgun hava arası) türbülans şiddeti yaklaşık bir mertebe büyümektedir. Jetlerin gelişimi ile birlikte iç taraftaki karışım bölgesi ortadan kalkmakta, ya-

ni karışım tamamlanmakta ve boru çıkışından yaklaşık 7 çap aşağıda ( $x/D_i = 7.0$ ) tek karışım bölgesi kalmaktadır. Şekil 3.13'de yani dış (halka) jetin kuvvetli olduğu  $\lambda > 1$  durumunda iki jet arasındaki karışım bölgesinin  $x/D_i = 7.0$ 'ye kadar tamamlanamadığı ölçülen yüksek türbülans şiddeti değerleri ile ortaya konmaktadır.

Genel olarak bu şekillerden iç ve dış jetler arasındaki karışımın iç jetin kuvvetli olduğu  $\lambda < 1$  durumunda daha çabuk tamamlandığı, dış (halka) jetin kuvvetli olduğu durumlarda ise karışımın tamamlanmasının daha uzun sürdüğü görülmektedir. Bütün bu sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında, aksenal hızın ve türbülans şiddetinin radial değişimi iyi bir corelasyon göstermektedir.

Şekil 3.15'de ölçülen hız profilleri  $\lambda > 1$  ( $\lambda \approx 1.5$ ) için Kaynak [18]'deki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu iki deneyin Reynolds sayıları farklı olmasına rağmen karışım bölgesinin gelişiminde büyük bir benzerlik görülmüştür. Bu sonuç, her iki deneyde hemen hemen aynı olan parametresinin, eşksenel jetin ve karışım bölgesinin açıklanmasında çok önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

### 3.2 İKİNCİ FAZ DENEYLER

Bu deneylerde birinci faz deneylerde ölçülenlere ek olarak manyetik banda kaydedilmiş olan aksenal hız verileri veya veri alma sistemi kullanılarak direkt olarak sayısal hale dönüştürülüp analiz edilen ve türbülans bilgisi içermeye-

si için 5 kHz hızda alınmış veriler kullanılmıştır. Bu veriler 1024 verilik 16 adet kayıta toplanmış ve bu 16 kayıt arasında yapılan grup ortalaması (ensemble average) ile incelenmiştir. Ayrıca uygulanan hızlı Fourier transformu (FFT) ile olayın frekans düzleminde incelenmesi mümkün olmuştur. Kayıt edilen sinyallerin güç spektralleri incelenmiş ve içerdikleri frekanslar bulunmuştur. Eksenel hızın radyal dağılımı biri birden küçük diğeri birden büyük iki  $\lambda$  değeri için araştırılmıştır. Bu hız oranlarında Reynolds sayısının eksenel hız dağılımına ve karışım olayına etkisi araştırılmıştır. Verilerin alındığı, eksenel noktalar iç çapın katları olarak seçilmiştir.

Önce Pitot tüpü kullanarak bir hız dağılımı çıkarılmış ve bu dağılımın simetrisi her seferinde kontrol edilmiştir. Bu veriler ve hız dağılımları sonucu akışın simetrisi ispatlanmıştır. Bu ispattan sonra sıcak tel sondası ile yapılan ölçümler eksenden radyal olarak tek yönde alınmıştır.

Sıcak tel anemometresi ile yapılan eksenel hız ölçümlerini baz alan türbülans şiddeti manyetik teybe kaydedilen analog veriler veya direk olarak sayısal hale dönüştürüldükten sonra bilgisayarda saklanan veriler kullanılarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.16'da verilen ve  $\lambda > 1$  ( $\lambda = 1.53$ )'e tekabül eden düşük Reynolds sayılı akış incelendiğinde iç jetin maksimum hızının hemen hemen sabit kaldığı gözlenmiştir. Burada dış jetin sürüklemesi ile önce artması gereken iç jet hızı

$x/D_i = 5$  değerlerinde artmamış karışım bölgesinin iç jete nüfusu ile azalarak  $x/D_i = 10$ 'da Gauss dağılımına ulaşan bir form almıştır.

Şekil 3.17,  $\lambda > 1$  ( $\lambda = 1.53$ ) değeri için, yüksek Reynolds sayısında hız profillerini vermektedir. Aynı gelişmeler burada daha çabuk kendini toparlamakta ve dış jetin iç jete sürüklenme etkisi daha iyi görülmektedir. Akış  $x/D_i = 10$  da yine tamamen gelişmiştir.

Şekil 3.18'de  $\lambda < 1$  ( $\lambda = 0.65$ ) için düşük Reynolds sayısında hız dağılımları verilmektedir. Doğal olarak jetlerin karışımı ile Gauss dağılımına ulaşmak bu durumda daha kolay olmaktadır.

Şekil 3.19,  $\lambda < 1$  ( $\lambda = 0.65$ ) için yüksek Reynolds sayılı akış için hız profillerini vermektedir. Bu durumda karışımın daha çabuk tamamlandığı görülmektedir.

Şekil 3.20 ve 21,  $\lambda > 1$  ( $\lambda = 1.53$ ) için sırası ile alçak ve yüksek Reynolds sayılarında türbülans şiddetlerinin bir karşılaştırmasını vermektedir. Her iki durumda da  $r = 55$  mm de boru yarı çapına tekabül eden karışım bölgesinde çok yüksek türbülans şiddetleri görülmektedir. İç ve dış jetlerin merkezi ise akışta karışım bölgesine en uzak noktalar olarak, ve kayma gerilmesinin en düşük olduğu noktalar olarak türbülans şiddeti en düşük seviyeye inmektedir. Buna mukabil dış jetin dış hava ile karışım bölgesinde türbülans şiddeti çok yüksek seviyelere çıkmaktadır.

Dış/iç çap oranı  $D_o/D_i = 1.83$ 'e karşılık gelen bu deneylere ek olarak yine aynı  $\lambda$  değerleri ( $\lambda = 0.65$  ve  $\lambda = 1.53$ ) için jet dış/iç çap oranı  $D_o/D_i = 2.2$  için deneyler tekrarlanmıştır. Bu durum için hız profilleri sırası ile Şekil 3.22 ve 23'de türbülans şiddetleri ise Şekil 3.24 ve 25'de verilmektedir.

Niceliksel olarak hız profili ve türbülans şiddeti değişimleri çap oranına büyük bir bağımlılık göstermemekte, yine Reynolds sayısına bağlı olan bir çabuklukta karışımın tamamlanarak hız profili en geç  $x/D_i = 10$  değerinde Gauss dağılımına ulaşmaktadır. Bir diğer gözlem ise boru et kalınlıklarının etkisidir. Bu kalınlık karışım bölgesini etkilemekte ve bir tampon bölge oluşturarak ana bölgedeki karışma olayını geciktirmektedir. Ancak bu konu fiziksel imkansızlıklar nedeni ile yeteri kadar araştırılamamıştır.

Ek B'de bütün bu deney seti içinden her iki  $\lambda$  değeri için ( $\lambda = 0.65$  ve  $\lambda = 1.85$ ) seçilmiş ve maksimum iç jet hızları olarak  $5.02$  m/s ve  $7.29$  m/s'ye karşı gelen düşük ve yüksek Reynolds sayıları için her üç  $x/D_i$  oranında ( $x/D_i = 1, 5$  ve  $10$  için) yine seçilmiş radyal konumlarda sıcak tel anemometresi ölçümlerini temel alan, hız değişimlerinin güç spektrumları, türbülansın frekans içeriğini belirlemektedir.

Bu spektraların incelenmesi ile değişik deneylerdeki akışın genel kalitesi belirlenmekte ve akışın dış etkilerden arınlığı belirlenmektedir. Burada belirgin bir frekansın



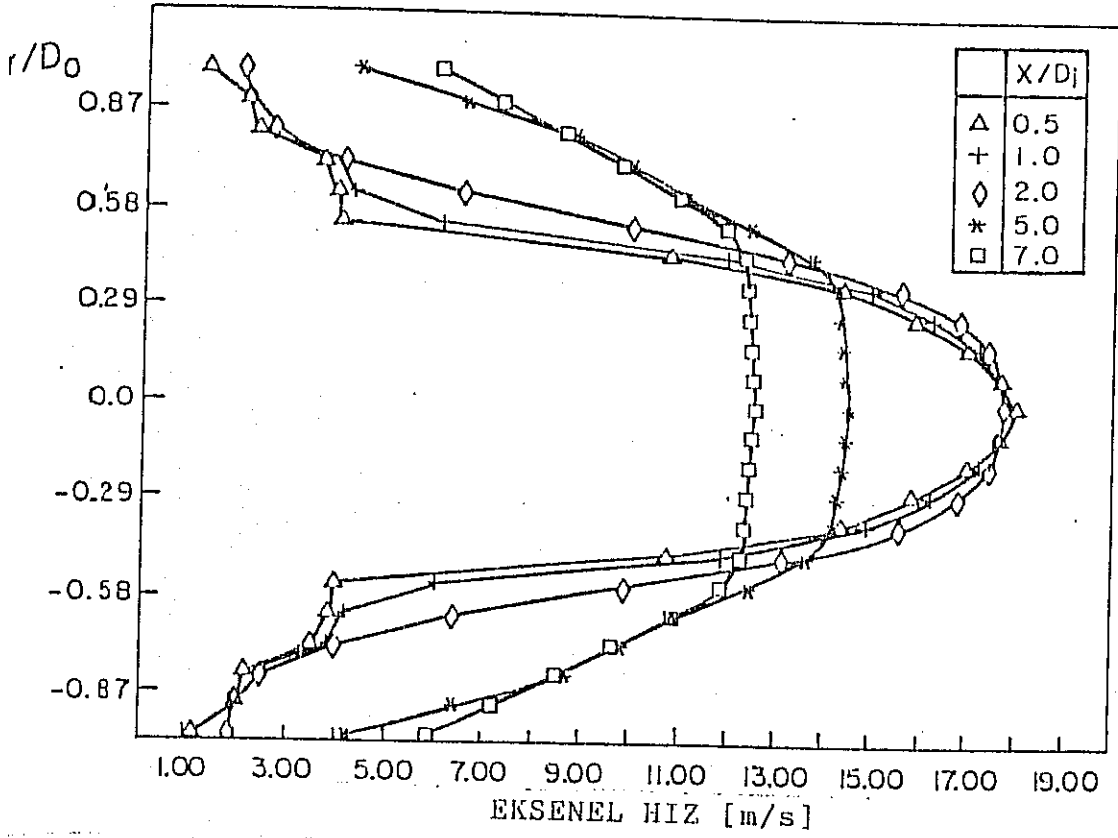
bulunmayışı deneyin kontrol edilebilirliğinin bir işareti-  
dir. Yükselen frekansa karşılık desibel-Bell ölçeğinde (loga-  
ritmik) olarak azalan titreşim gücü, bu gücün frekanslara  
düzgün dağılımının işaretidir. Ayrıca akış kaynağı olan fan-  
ların devir ve kanat geçiş frekansları ile dış jette görüle-  
bilecek tank doğal frekanslarının belirginleşmemesi, karışım  
bölgesinin ve karışım olayının bu gibi dış etkenlerden koru-  
nabildiğinin bir göstergesidir.

### 3.3 SONUÇLAR

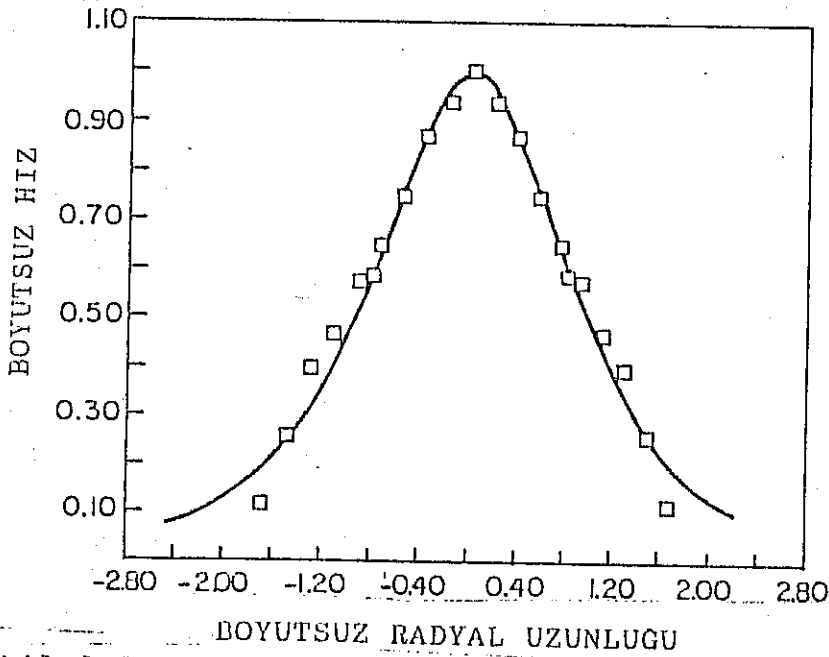
Sonuçta karışım bölgesinin ve bu bölgenin tamamlanması  
ile ilgili boyutların belirlenmesi için en önemli parametre-  
nin  $\lambda$  olduğu diğer önemli parametre olan Reynolds sayısının  
ise karışımı kolaylaştırmasına karşı, hızlanan jetlerden do-  
layı karışım bölgesinin yine  $x/D_i = 10$ 'a kadar uzadığı  
tesbit edilmiştir.

Değişik  $\lambda$  değerlerinin etkileri verilmeye çalışılmış  
ancak  $x/D_i \approx 10$  değeri iç ve dış akışların basit jet duru-  
muna ulaşabilecekleri uzunluk olarak tesbit edilmiştir. Bu  
sonuç özellikle eşeksenel jetli brülörlerin tasarımı için  
önemli bir sonuçtur. Ancak bu jetlerin çevresindeki yanma  
odasının jet üzerinde meydana getireceği duvar etkisi ayrı  
bir araştırma konusudur ve bu konu şu anda araştırılmaya  
başlanmıştır. Ayrıca doğal gaz hava karışımı yakacak böyle  
bir brülörün ilk tasarımı ve deneyleri de önümüzdeki aylarda  
planlanmaktadır. Bu araştırmanın sonuçları müteakkip araş-

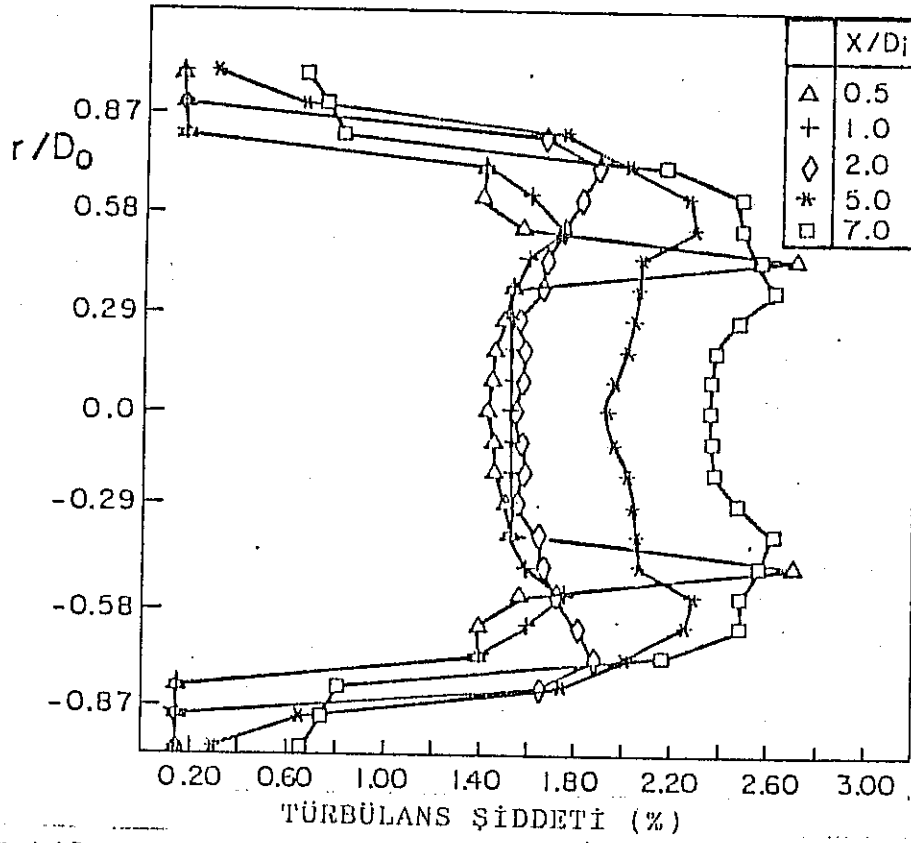
tirmada optimum çözüme ulaştıracak deneylerin planlanmasına temel teşkil edecek bilgi birikimini ve ölçüm düzeneklerinin tasarım ve imalatını sağlamıştır.



Şekil 3.1 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = 0$ ,  
 $Re_{id} = 57400$

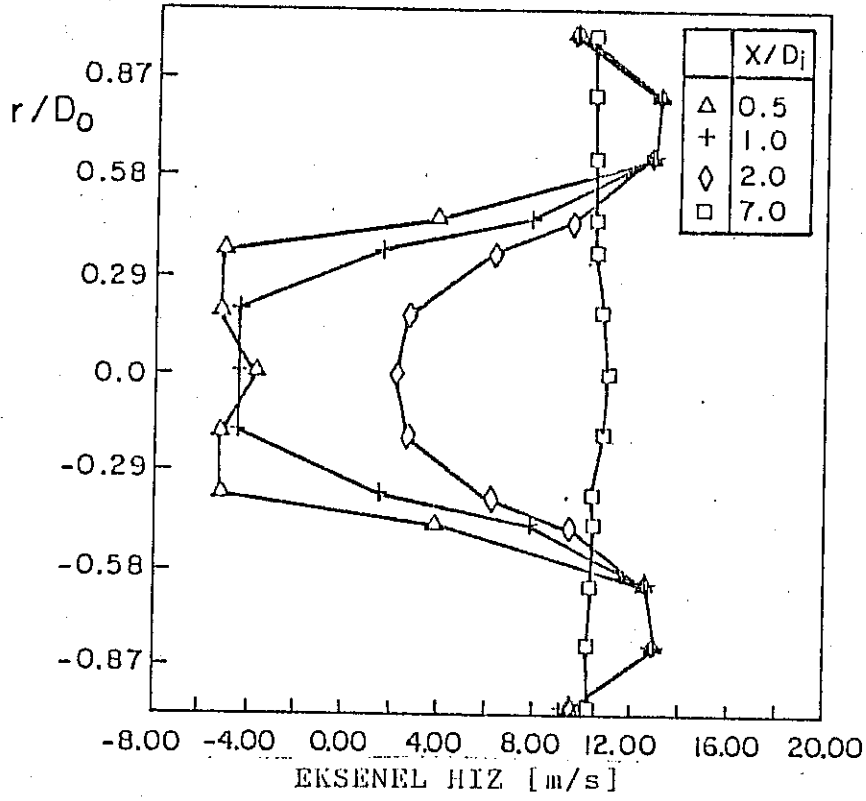


Şekil 3.2 Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile  
 Benzeşimi,  $\lambda = 0$ ,  $\frac{x}{D_i} = 7.0$ ,  $Re_{id} = 57400$



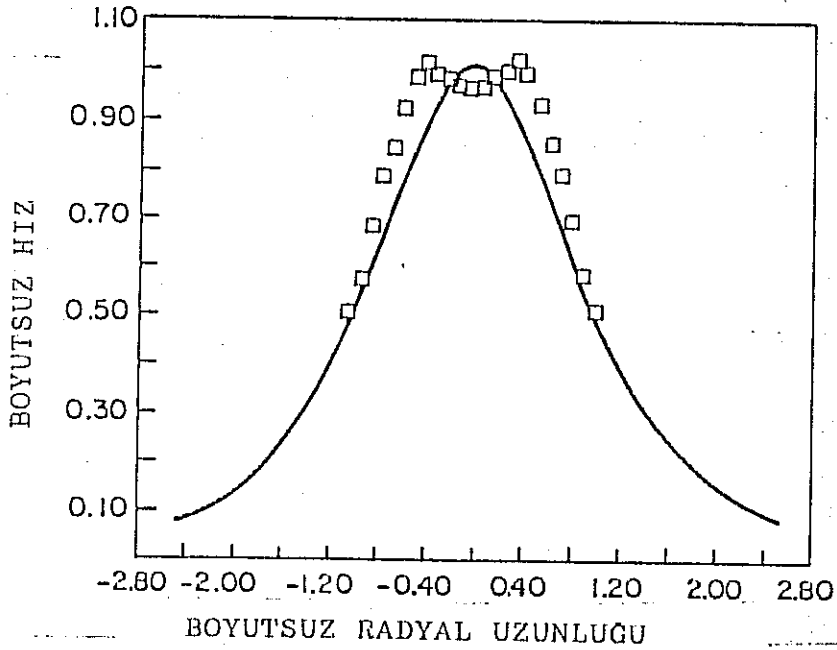
Şekil 3.3 Aksenal Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,

$\lambda = 0, Re_{id} = 57400$



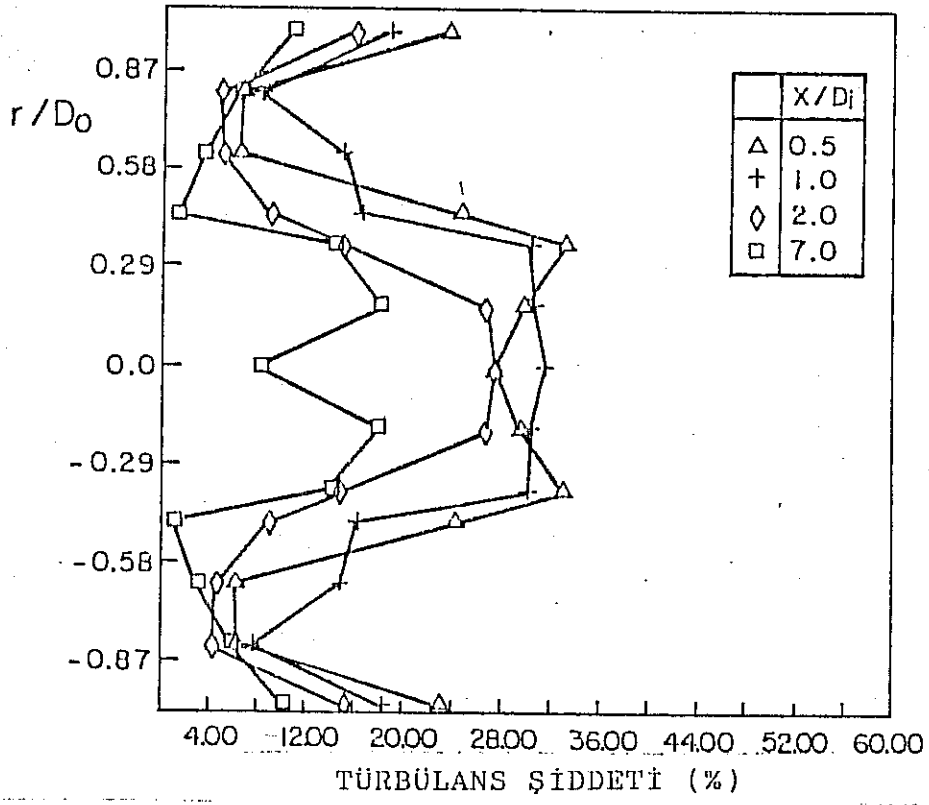
Şekil 3.4 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = \infty$ ,

$Re_{od} = 48250$



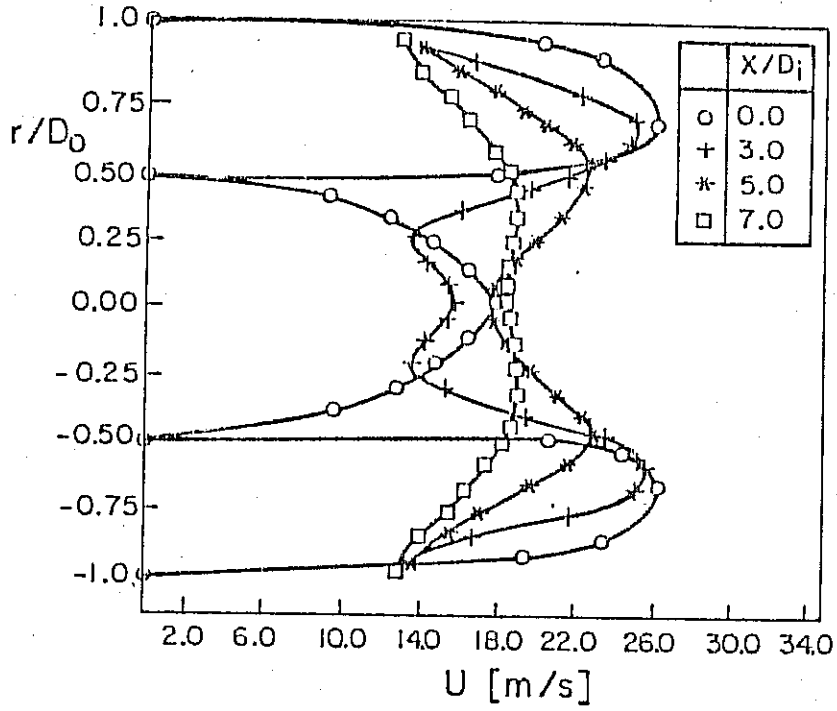
Şekil 3.5 Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile

Benzeşimi,  $\lambda = \infty$ ,  $\frac{x}{D_i} = 7.0$ ,  $Re_{od} = 48250$

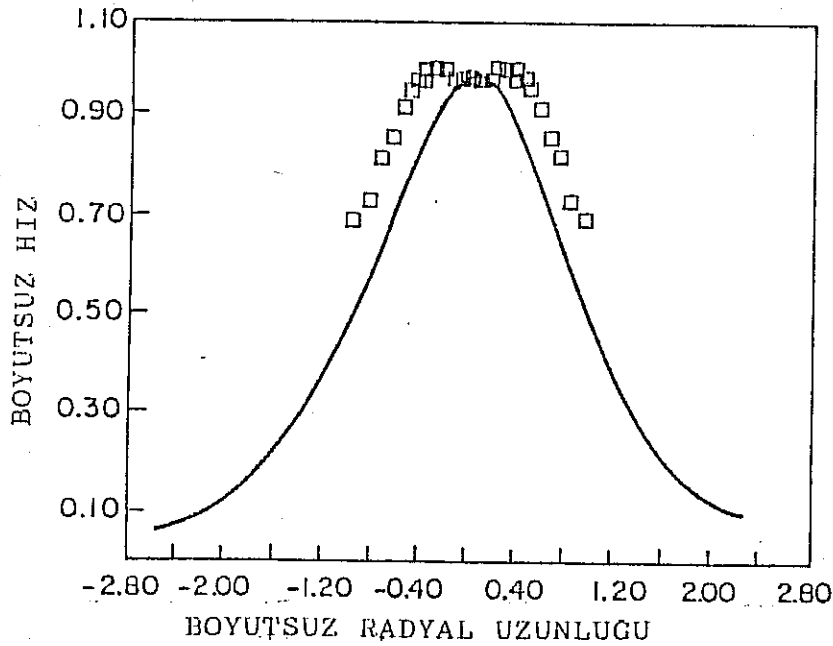


Şekil 3.6 Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,

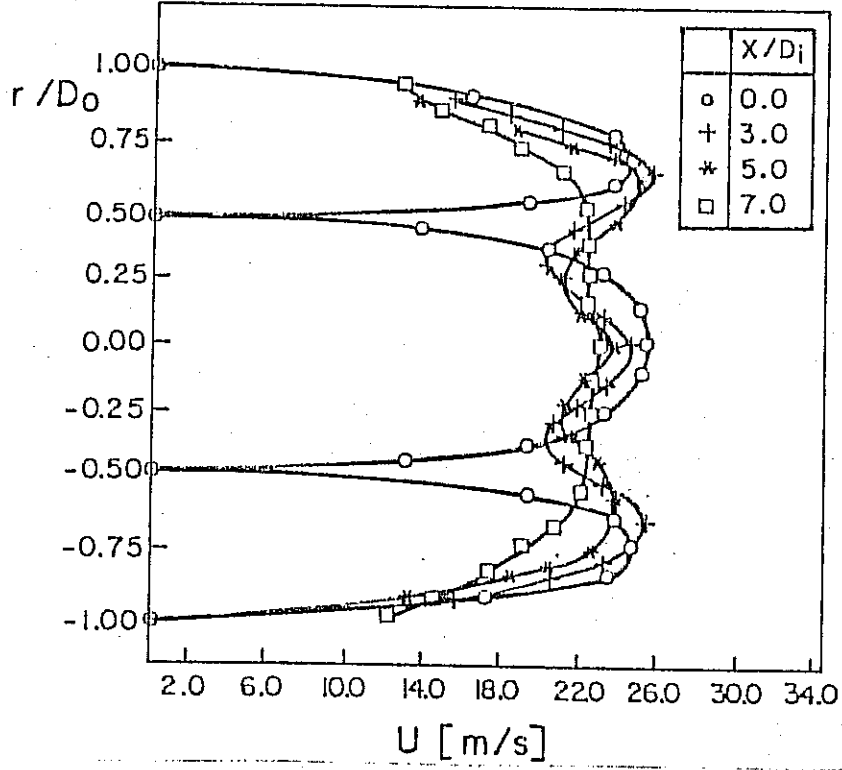
$$\lambda = \infty, Re_{bd} = 48250$$



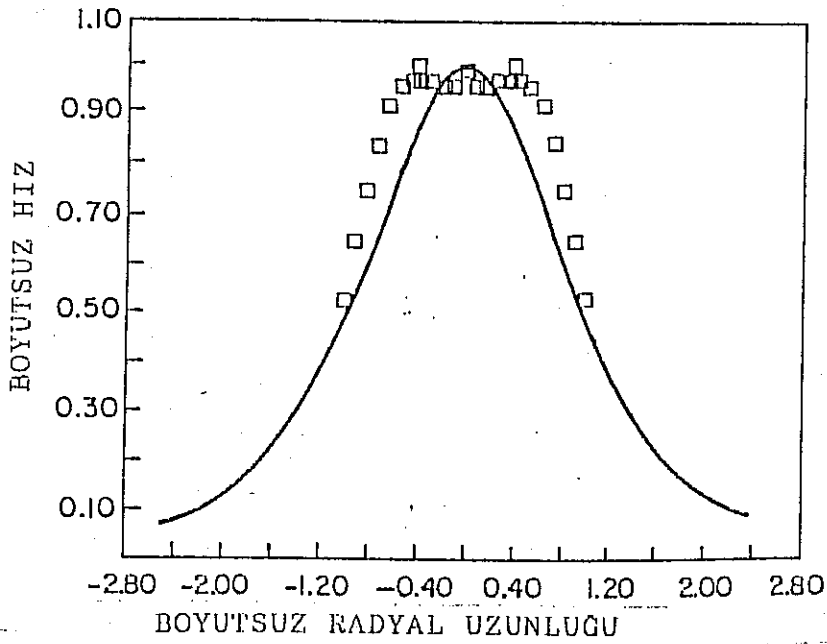
Şekil 3.7 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda > 1$ ,  
 $Re_{id} = 55200$ ,  $Re_{od} = 101400$



Şekil 3.8 Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile  
 Benzeşimi,  $\lambda > 1$ ,  $\frac{x}{D_i} = 7.0$ ,  $Re_{id} = 55200$ ,  
 $Re_{od} = 101400$

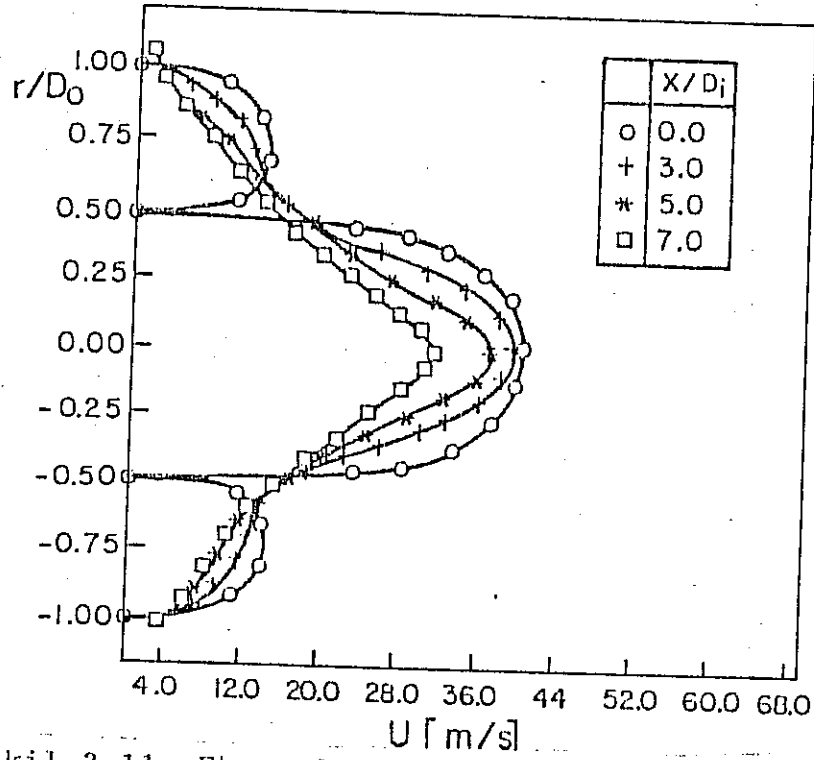


Şekil 3.9 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda > 1$ ,  
 $Re_{id} = 81200$ ,  $Re_{od} = 94400$



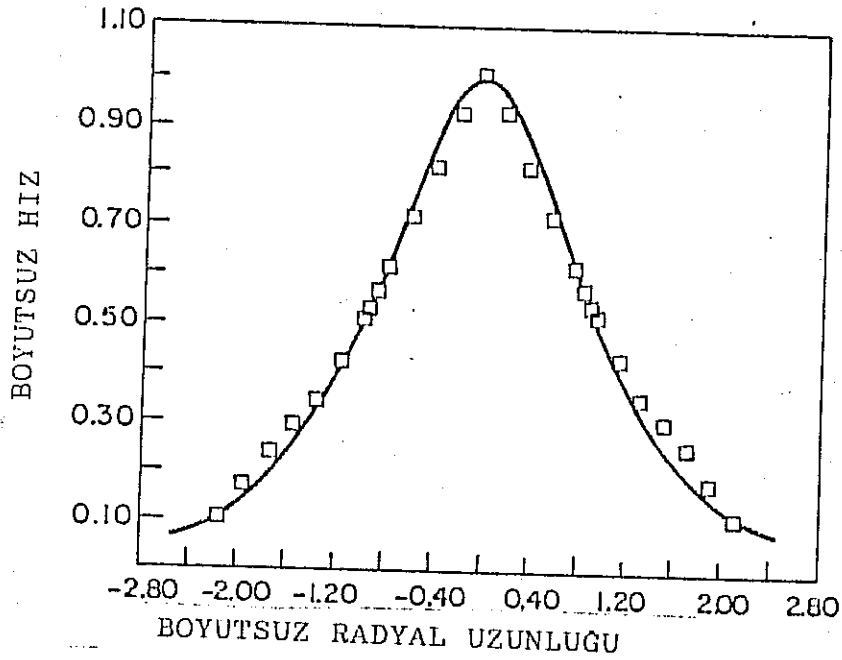
Şekil 3.10 Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile  
 Benzeşimi,  $\lambda = 1$ ,  $\frac{x}{D_i} = 7.0$ ,  $Re_{id} = 81200$   
 $Re_{od} = 94400$





Şekil 3.11 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda < 1$ ,

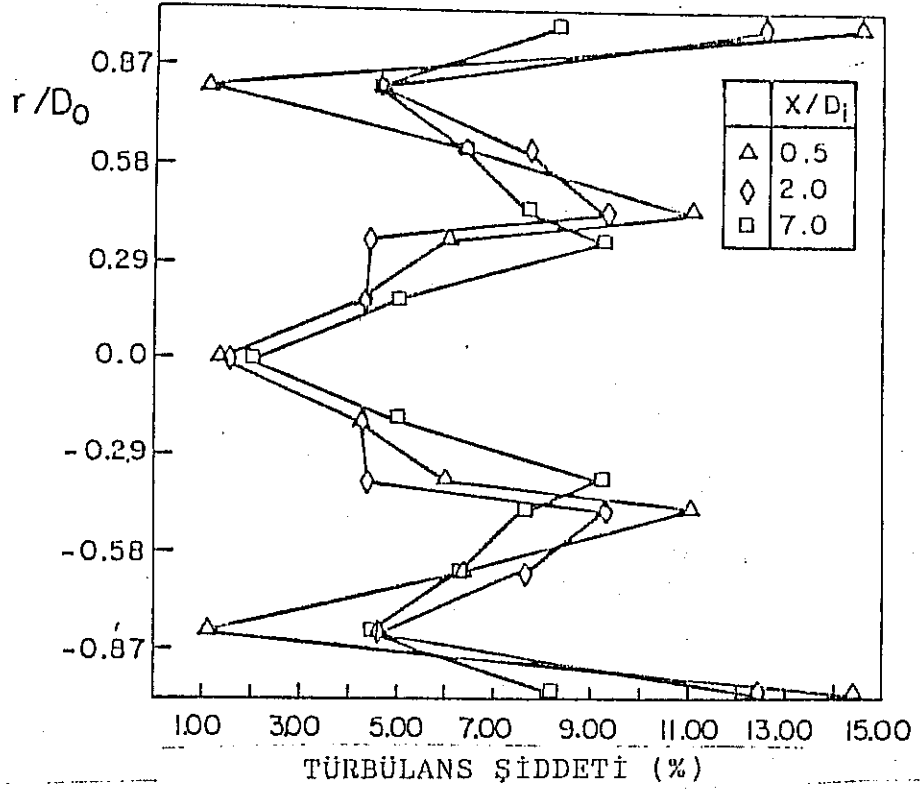
$Re_{id} = 129250$ ,  $Re_{od} = 74950$



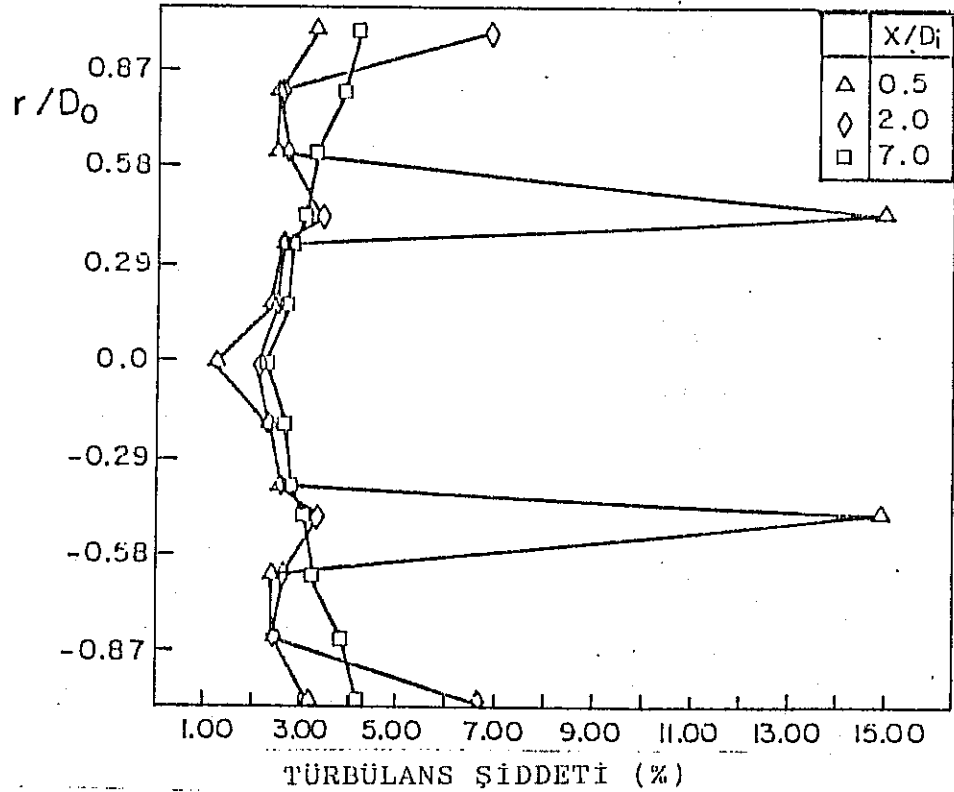
Şekil 3.12 Boyutsuz Hızın Teorik Dağılım Eğrisi ile

Benzeşimi,  $\lambda < 1$ ,  $\frac{x}{D_i} = 7.0$ ,  $Re_{id} = 129250$ ,

$Re_{od} = 74950$

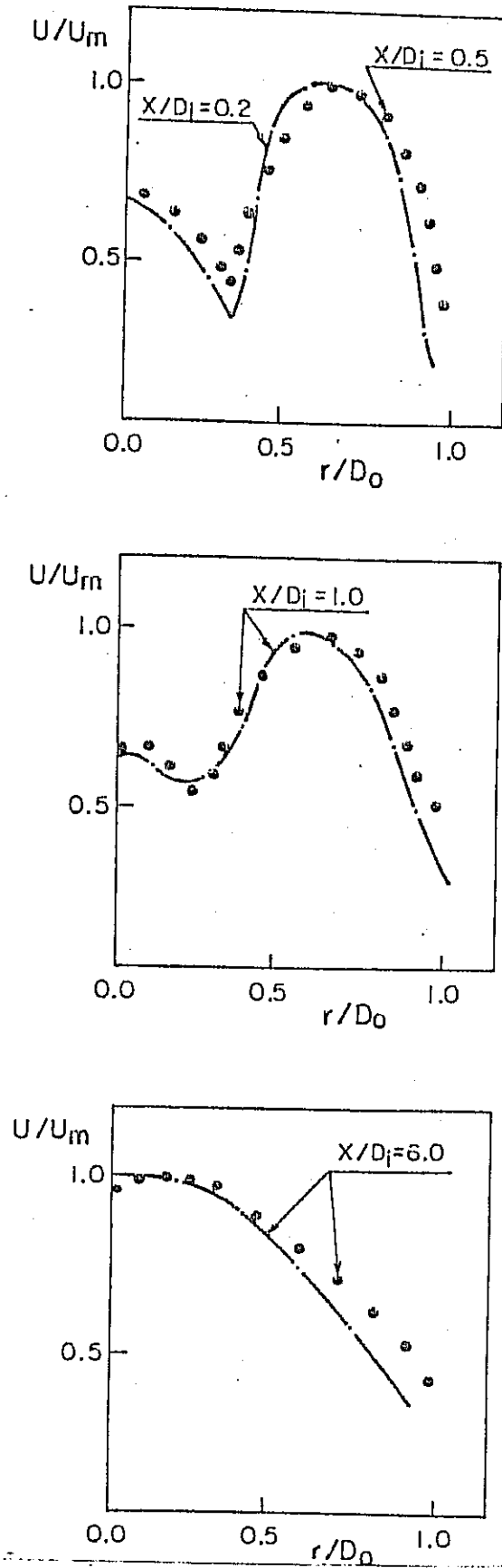


Şekil 3.13 Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,  
 $\lambda > 1$  ( $\lambda = 1.22$ ),  $Re_{id} = 57340$ ,  $Re_{od} = 47830$

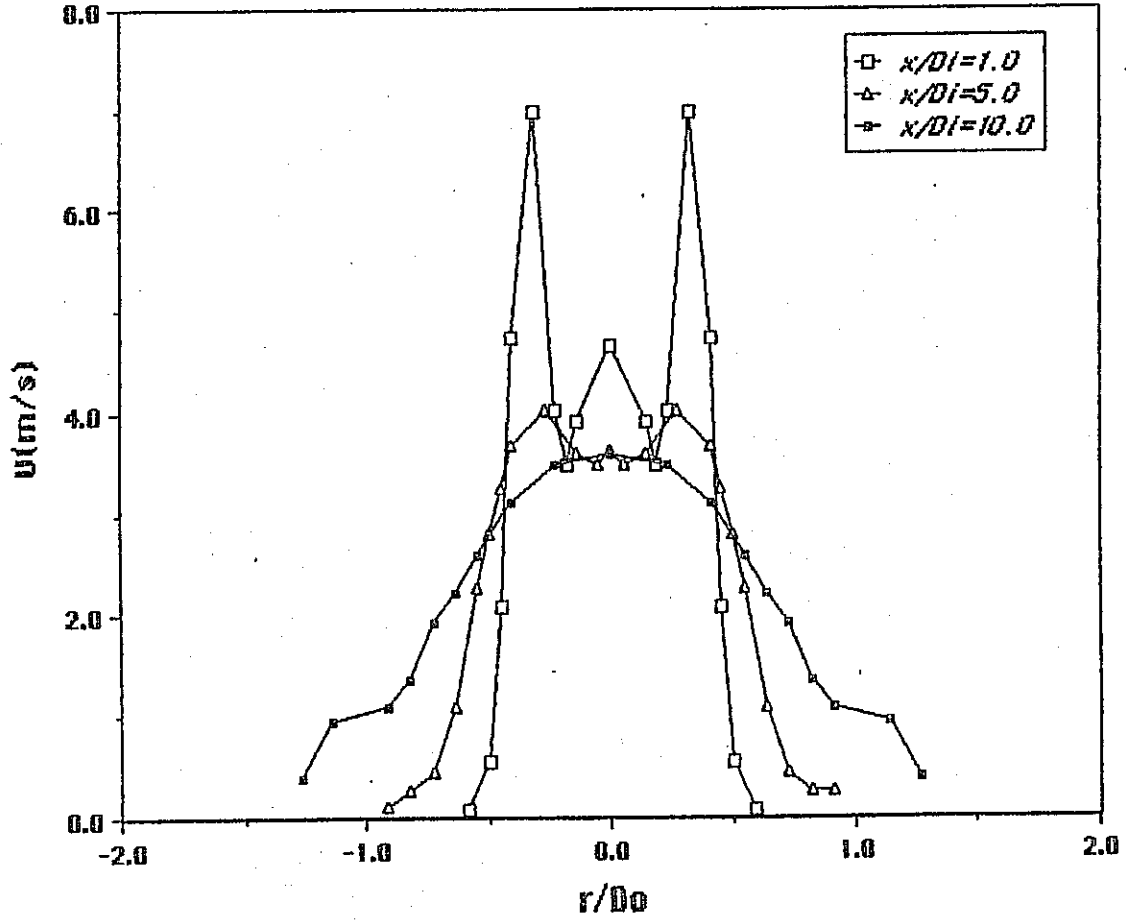


Şekil 3.14 Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,  
 $\lambda < 1$  ( $\lambda = 0.8$ ),  $Re_{id} = 46230$ ,  $Re_{od} = 70030$

ÖRNEK SONUÇLAR  $\lambda=1.5$ ,  $Re_{od}=101400$ ,  $Re_{id}=55170$ ,  $D_o/D_i=2.2$   
KAYNAK [18]  $\lambda=1.53$ ,  $Re_{od}=58900$ ,  $Re_{id}=25600$ ,  $D_o/D_i=2.04$



Şekil 3.15 Hız Profillerinin Karşılaştırılması,  $\lambda > 1$

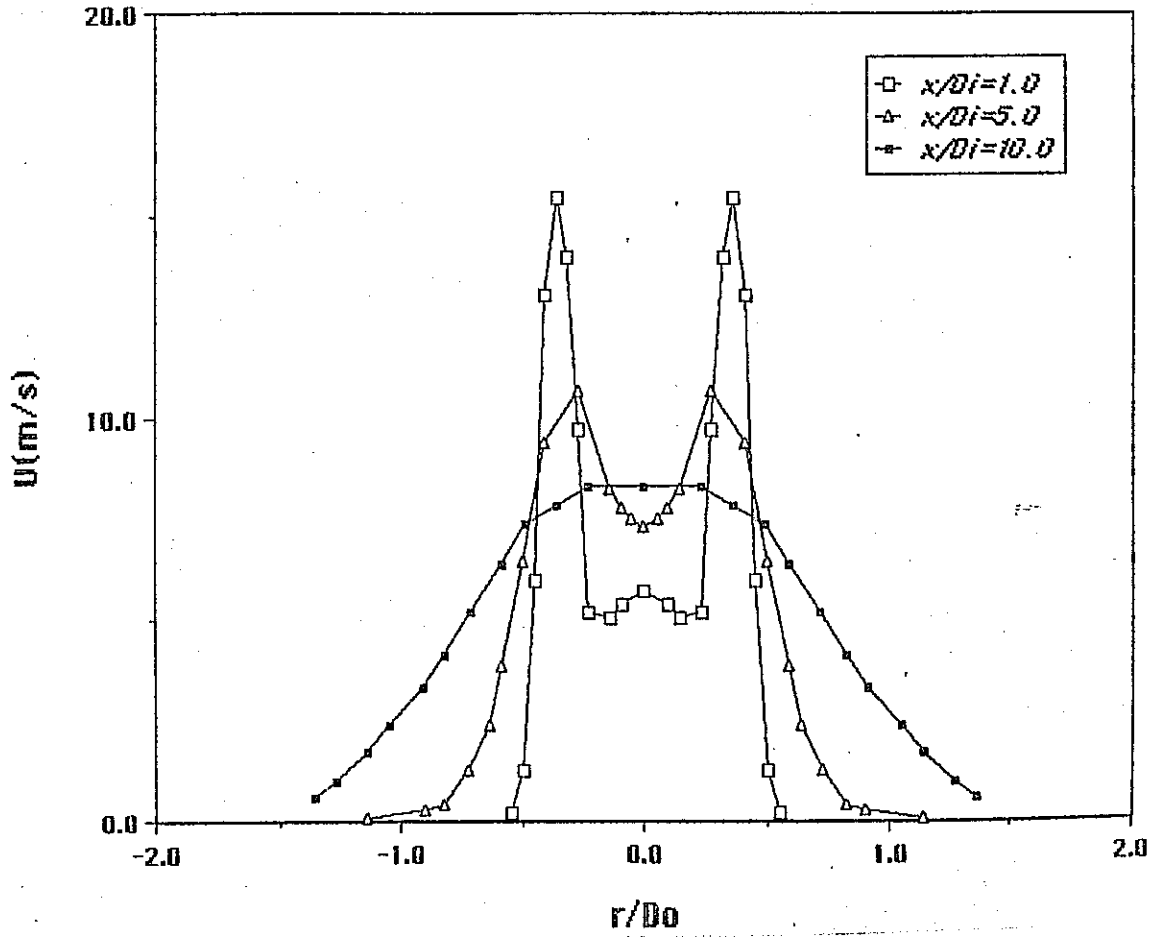


Şekil 3.16 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = 1.53$ ,

$Re_o = 23554$ ,  $Re_i = 20080$ ,  $V_i = 5.02$  m/s

$D_o$   
 $\text{---} = 1.83$

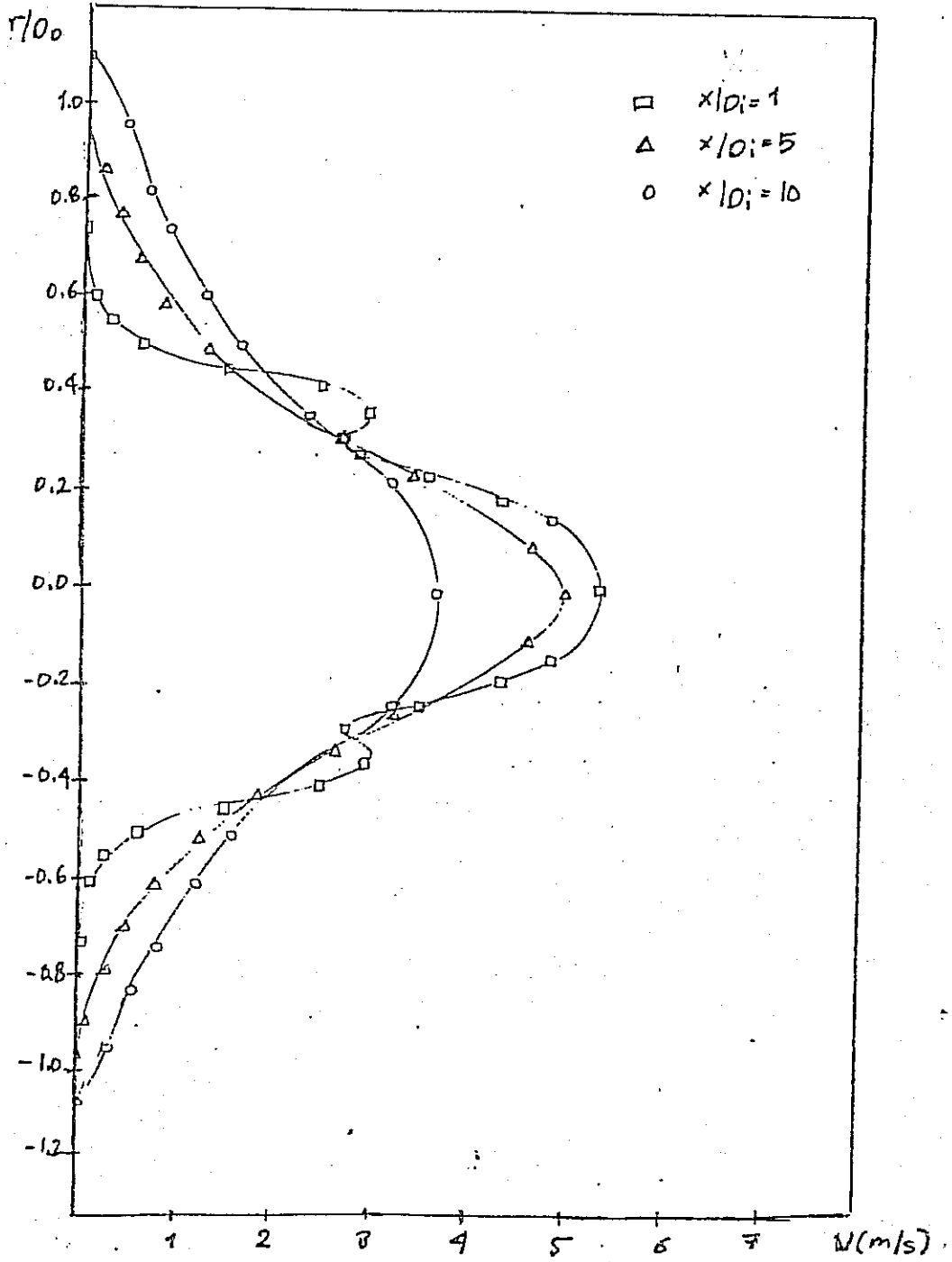
$D_i$



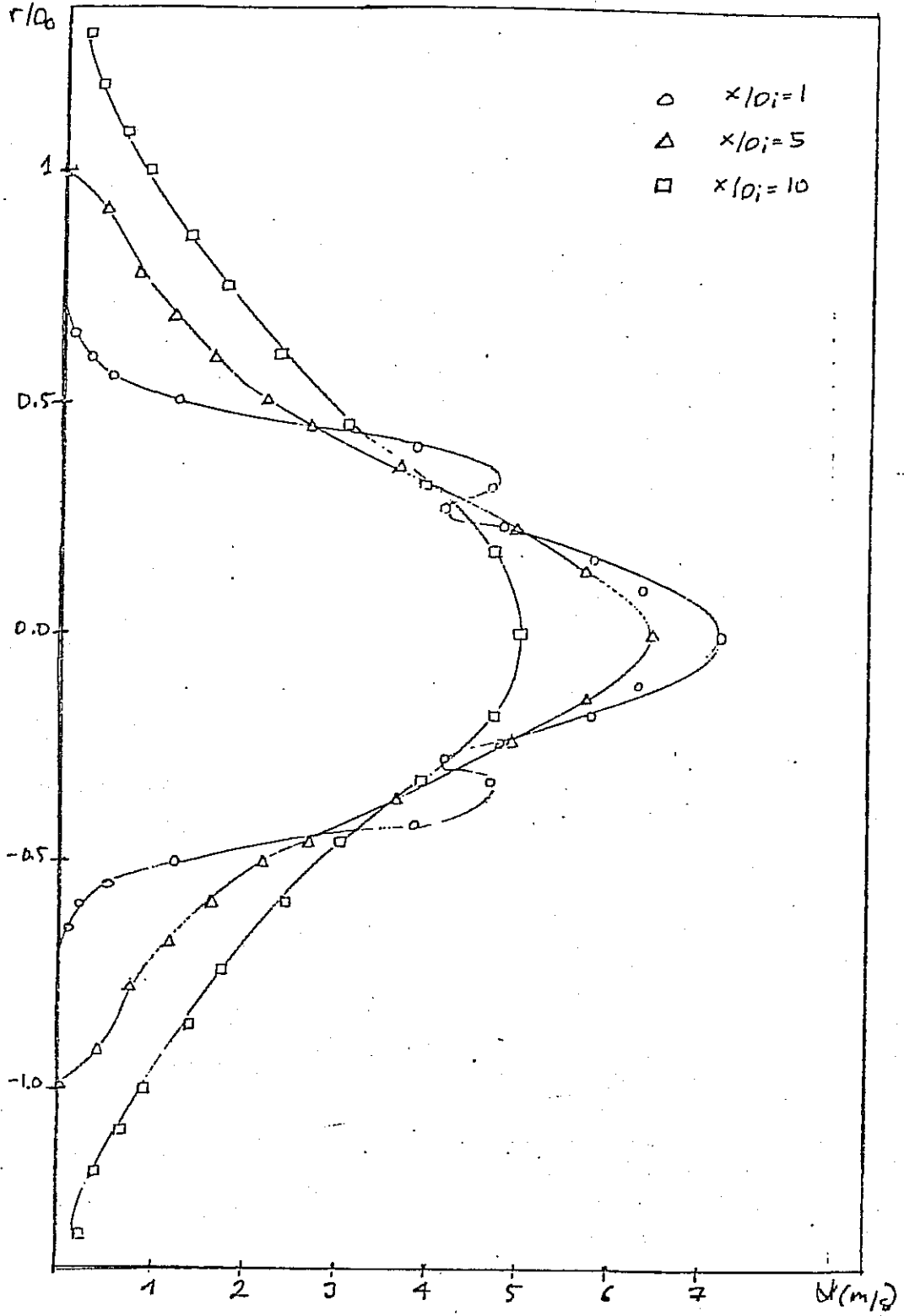
Şekil 3.17 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = 1.53$ ,

$Re_o = 34205$ ,  $Re_i = 29160$ ,  $V_i = 7.29$  m/s

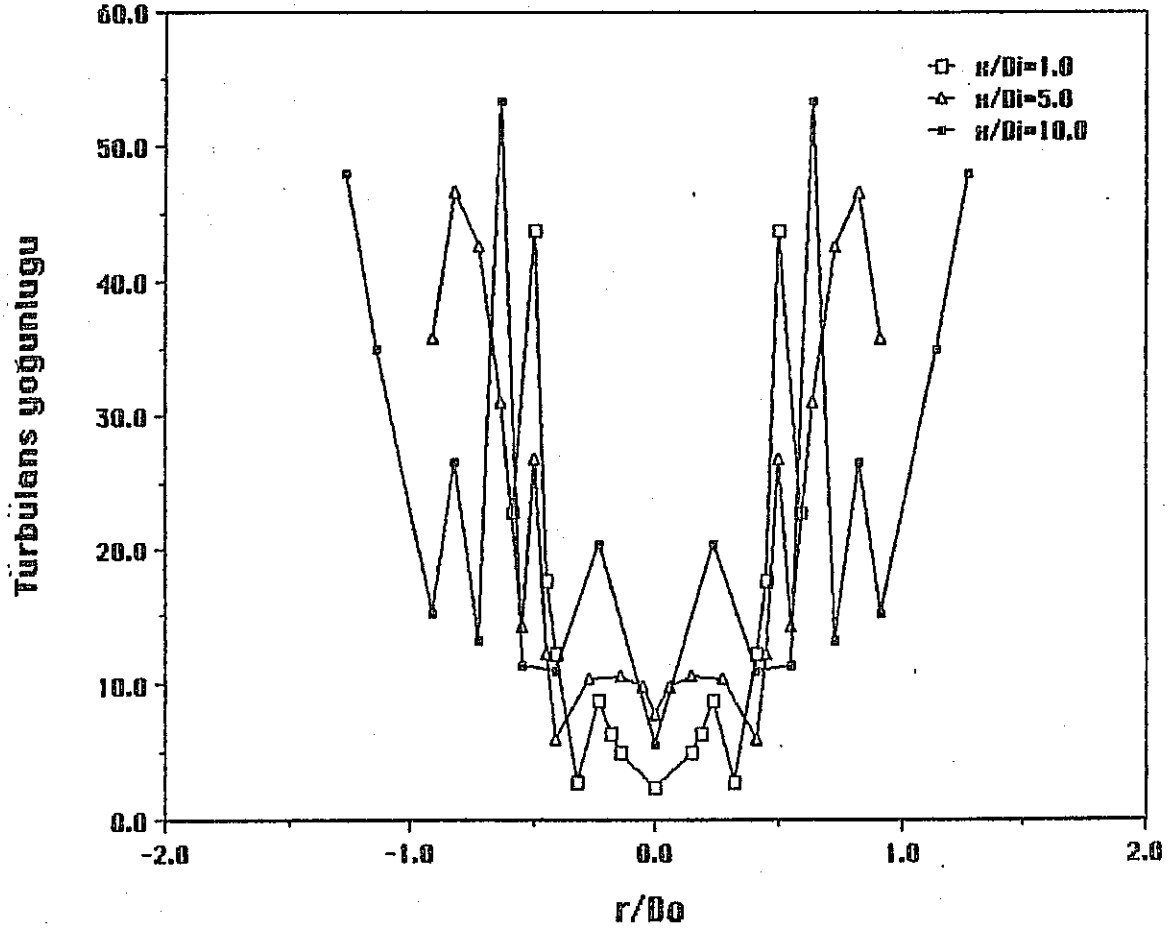
$$\frac{D_o}{D_i} = 1.83$$



Şekil 3.18 Aksenal Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = 0.65$ ,  
 $Re_0 = 8945$ ,  $Re_i = 17951$ ,  $V_i = 4.38$  m/s



Şekil 3.19 Eksenel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = 0.65$ ,  
 $Re_o = 14174$ ,  $Re_i = 28443$ ,  $V_i = 6.94$  m/s

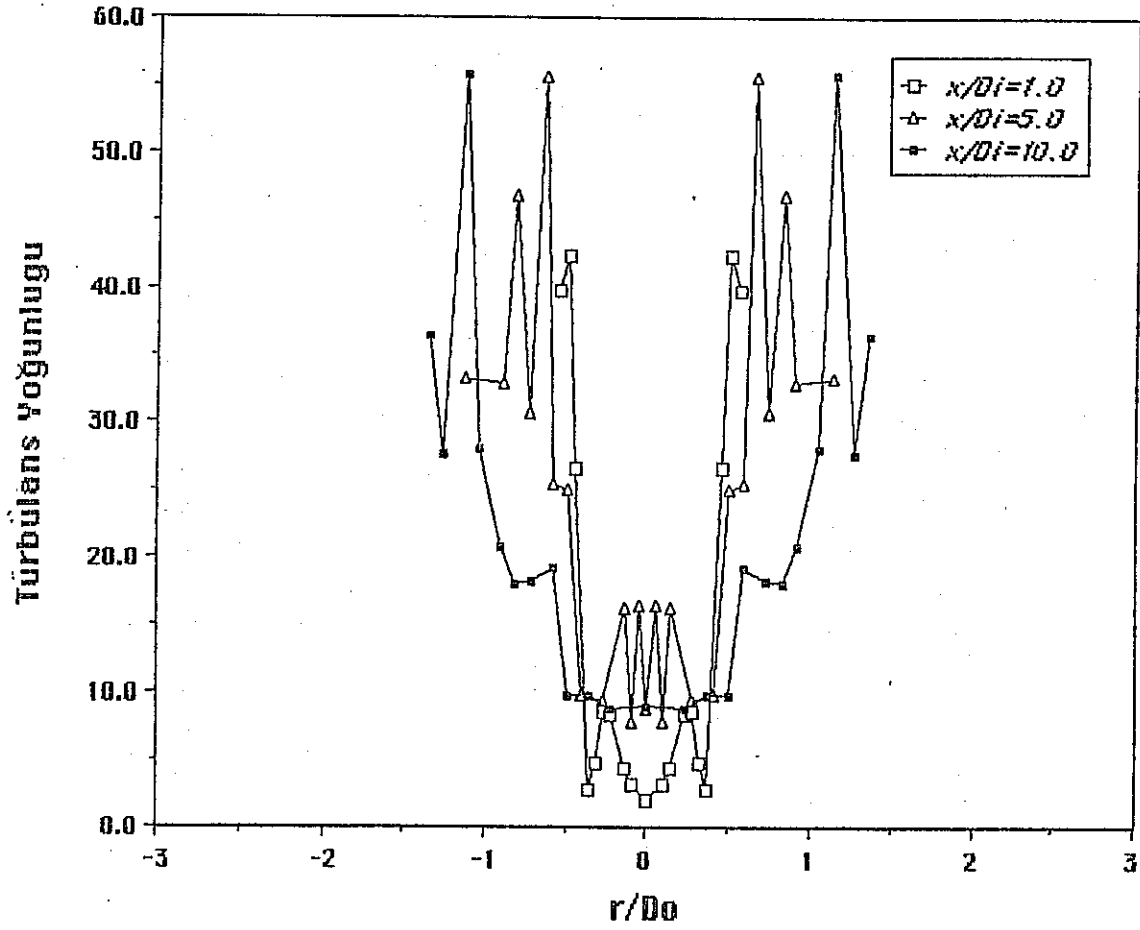


Şekil 3.20 Türbülans Yoğunluğu Radyal Dağılımı,  $\lambda = 1.53$ ,

$Re_o = 23554$ ,  $Re_i = 20080$ ,  $V_i = 5.02$  m/s

$\frac{D_o}{D_i} = 1.83$



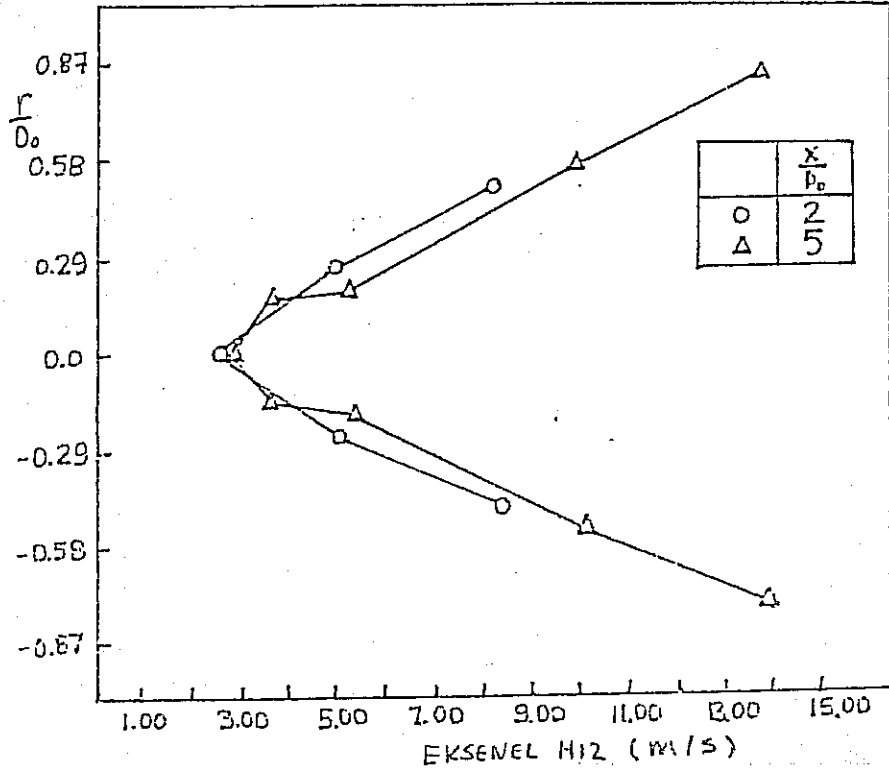


Şekil 3.21 Türbülans Yoğunluğu Radyal Dağılımı,  $\lambda = 1.53$ ,

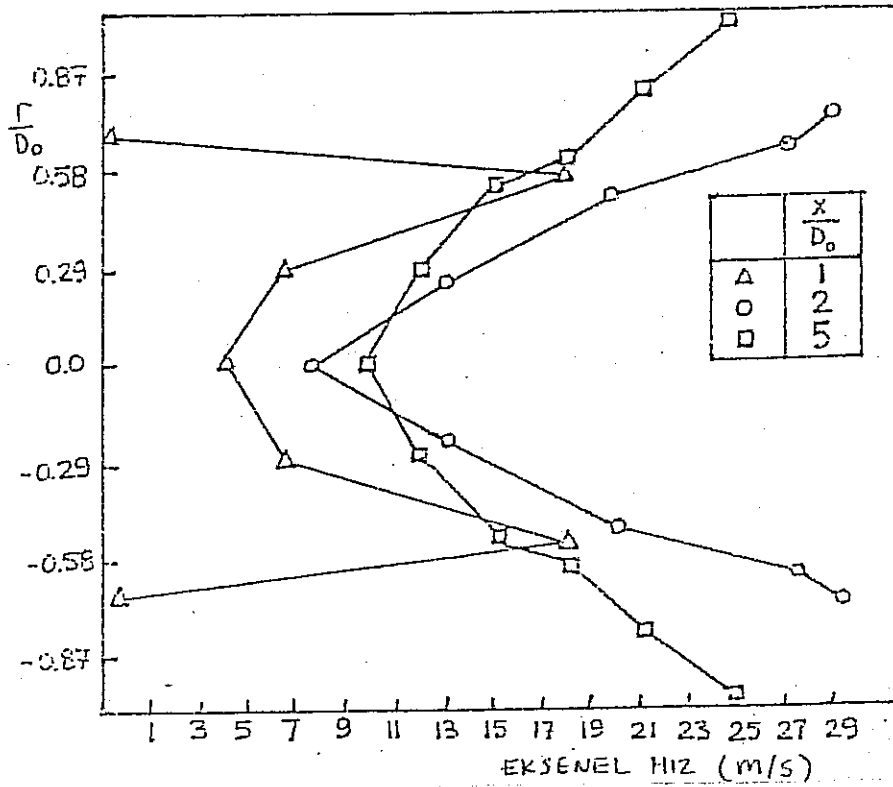
$$Re_o = 34205, Re_i = 29160, V_i = 7.29 \text{ m/s}$$

$$\frac{D_o}{D_i} = 1.83$$

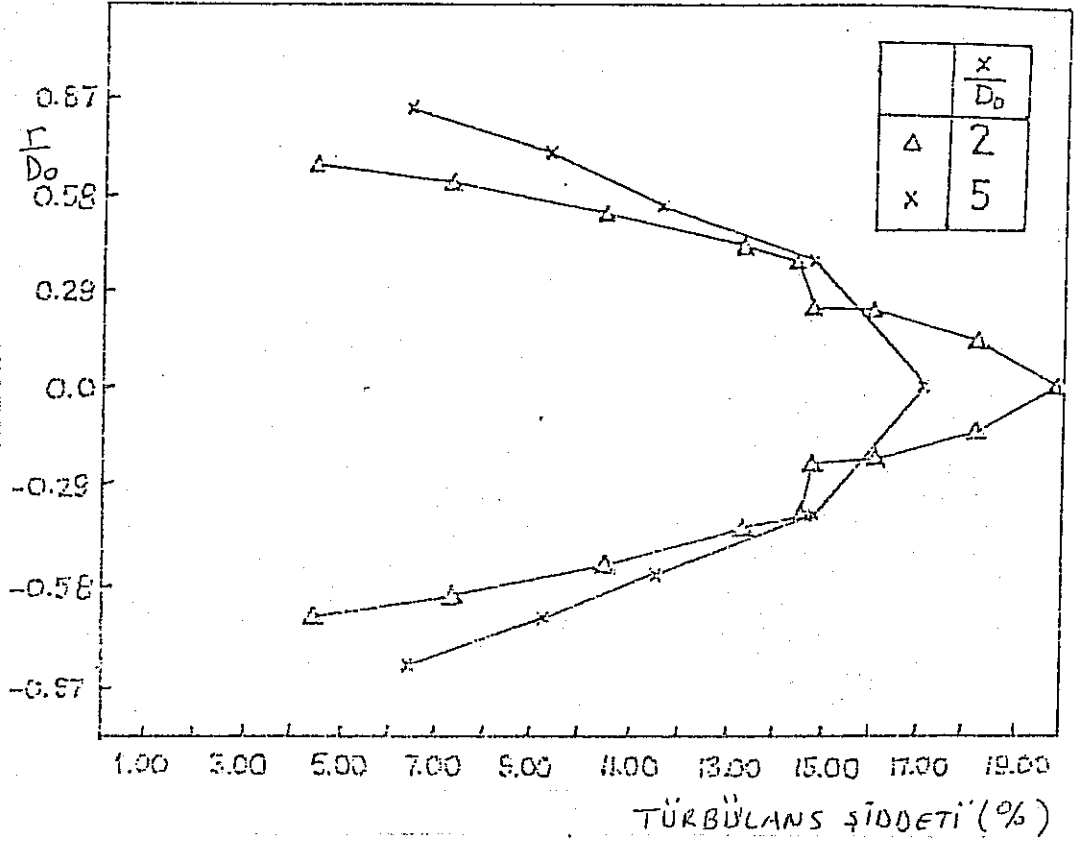
$D_i$



Şekil 3.22 Eksevel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = 0.65$

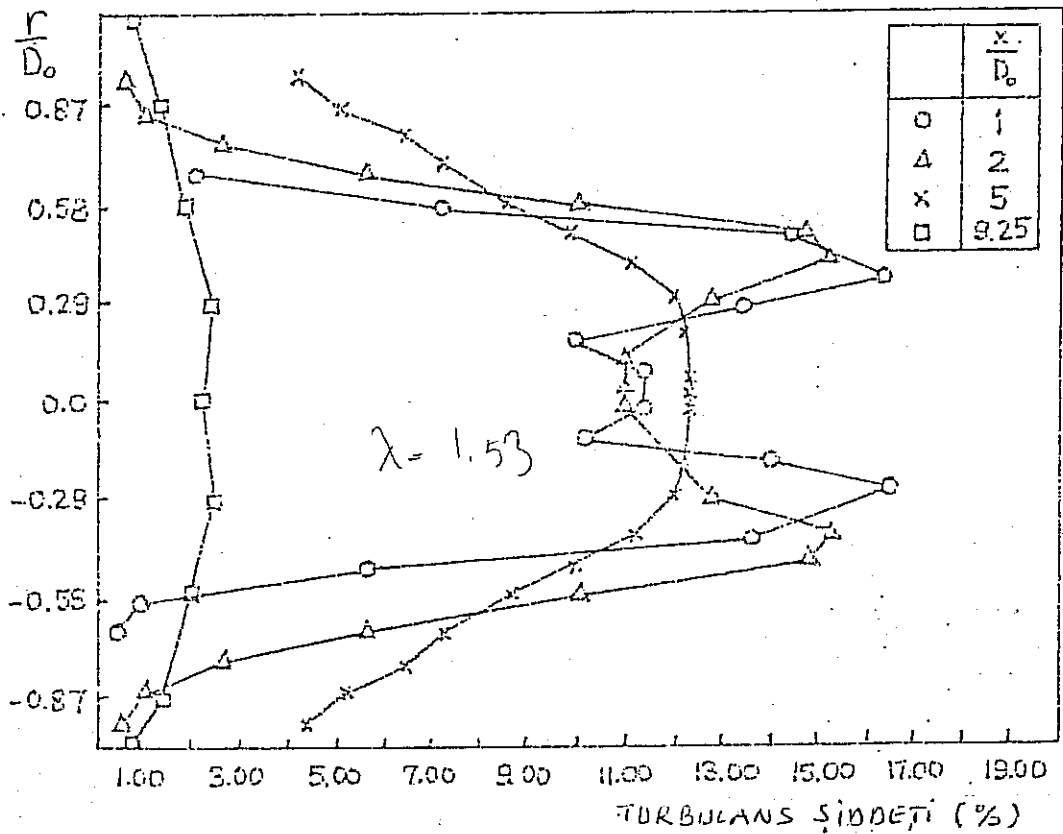


Şekil 3.23 Eksevel Hızın Radyal Dağılımı,  $\lambda = 1.53$



Şekil 3.24 Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,

$\lambda = 0.65$



Şekil 3.25 Eksenel Türbülans Şiddetinin Radyal Dağılımı,

$\lambda = 1.53$

## KAYNAKLAR

1. Ko, N.W.M. and Kwan, A.S.H.  
"The initial region of subsonic coaxial jets"  
Journal of Fluid Mechanics Vol.73 pt.2 pp.305-332  
(1976).
2. Ribeiro, M.M. and Whitelaw, J.H.  
"Coaxial jets with and without swirl"  
Journal of Fluid Mechanics vol.69 pp.769-795 (1980).
3. Ko, N.W.M. and Chan, W.T.  
"Similarity in the initial region of annular jets: Three configurations"  
Journal of Fluid Mechanics vol.84 pp.641-656 (1978).
4. Ko, N.W.M. and Chan, W.T.  
"The inner regions of annular jets"  
Journal of Fluid Mechanics vol.93 pp.549-584 (1979).
5. Ko, N.W.M.  
"Annular jets of small inner diameter"  
Journal of Sound and Vibration 68(3), 468-472 (1980).
6. Ko, N.W.M.  
"Annular jets of large inner diameter"  
Journal of Sound and Vibration 69(4), 616-621 (1980).
7. Chan, W.T. and Ko, N.W.M.  
"Coherent structures in the outer mixing region of annular jets"

- Journal of Fluid Mechanics Vol.89 pt(3) pp.515-533.
8. Perry, A.E., Lim, T.T., Chong, M.S.  
"The instantaneous velocity fields of coherent structures in coflowing jets and wakes"  
Journal of Fluid Mechanics vol.101 pt.2 pp.243-256 (1980).
  9. Ko, N.W.M. and Chu, F.C.  
Annular jets of Different Diameter Ratios
  10. Chigier, N.A. and Beer, J.M.  
"The flow region near the nozzle in double concentric jets"  
Journal of Basic Engineering (Dec.1964 pp.1797) (1964).
  11. Champagne, F.H. and Wygnanski, I.J.  
"An experimental investigation of coaxial turbulent jets"  
Int. Journal of Heat and Mass Transfer vol.14 pp.1445-1464 (1971).
  12. Matsumoto, R., Kimoto, K. and Tsuchimoto, N.  
"A study on double concentric jets"  
Japanese Society of Mechanical Engineers Bulletin vol.16 No.93 (1973).
  13. Alpinieri, L.J.  
"Turbulent mixing of coaxial jets"  
AIAA Journal vol.2 No.9 pp.1560-1567 (Sept. 1964).
  14. Ribeiro, M.M. and Whitelaw, J.H.  
"Statistical characteristics of a turbulent jet"  
Journal of Fluid Mechanics, vol.70 pt.1 pp.1-15 (1975).

15. Çelen, B.  
"Experimental Investigation on the Mixing Region of Coaxial Turbulent Jets"  
Master's Thesis, November 1987
16. Albayrak, K., Eralp, O.C., Çelen, B.  
"An Investigation on the Mixing Region of Coaxial Jets"  
Modelling Simulation and Control, ASME Press. Vol. 33,  
No:4, 1990, pp.49-64.
17. Schlichting, H.  
Boundary Layer Theory, McGraw Hill New York, 1968.
18. Riberio, M.M. and Whitelaw, J.H.  
"Coaxial Jets with and Without Swirl"  
J. of Fluid Mechanics, Vol. 69, pp.769-795, 1980.
19. Turbulence  
Hinze, McGraw Hill, 1975.
20. Hotwire Anemometry  
A.E. Perry, Oxford Science Publications, 1982.

## EK A

### SICAK TEL ANEMOMETRESİ ÇALIŞMA PRENSİBİ

Sıcak tel anemometresinin çalışma prensibi çok yayına konu olmuştur ve resistans tipi termometrenin çalışma prensibinden değişik değildir. Bu konudaki en önemli yayınlar arasında Hinze'nin Turbulence [19] ve Perry'nin Hotwire Anemometry [20] adlı kitabını sayabiliriz.

Sıcak tel anemometresinde ölçümü yapan eleman sıcaklık rezistivitesi yüksek çok ince metalik bir telden oluşmaktadır. Telin çapı genellikle ~ 5 mikron mertebesindedir. Bu ince tel Wheatstone köprüsünün bir dalını teşkil eder. Üzerinden geçen akımla ısıtılan telin soğuması ise üzerinden geçen akışkanla olan konveksiyon ısı transferi ile olmaktadır.

Genellikle 2 tip sıcak tel anemometresi kullanılmaktadır. Bunlar,

1. Sabit akım anemometresi (telden geçen akım sabit tutulmuştur)
2. Sabit sıcaklık anemometresi (telden geçen akım bir feedback devresi ile kontrol edilip telin resistansı sabit tutulmuştur, böylece telin sıcaklığı da sabit bir değerde tutulur.

Sıcak tel ile akım arasındaki ısı alışverişini içeren kanunların genel bir incelenmesi yapıldığında bu transferin daha ziyade akımın hızına, akışkanın yoğunluğuna ve sıkıştırılabilir bir akımda ise genellikle toplam sıcaklığa bağlı olduğu görülür.

Akıma dik olarak yerleştirilen sonsuz bir silindir etrafındaki konveksiyonla ısı transferinin incelenmesi sonucunda şu dört boyutsuz sayının etken olduğu görülecektir.

Reynolds sayısı =  $Ud/\nu$      $d$  = silindir çapı,  $\nu$  kinematik viskozite

Nusselt sayısı =  $hd/k$

Prandtl sayısı =  $\mu C_p/k$

ve

Grashof sayısı'dır.

Soğutma kanunu da bu parametreler cinsinden ifade edilebilir. Eğer tabii konveksiyonla olan ısı transferini ihmal edecek olursak, Nusselt sayısını Prandtl ve Reynolds sayıları cinsinden Kramer'in empirik bağıntısını kullanarak yazabiliriz.

$$Nu = \alpha.Pr^{m1} + \beta.Pr^{m2} Re^{1/n}$$

$T_w$  sıcaklığında  $l$  uzunluğunda ve  $d$  çapındaki kızgın bir telden  $T_f$  sıcaklığında ve  $U$  normal hızında akan bir akışkana olan ısı transferini

$$h.\pi dl(T_w - T_f) = k_f \pi l(T_w - T_f) Nu \quad (A1)$$



şeklinde yazabiliriz.

$R_f$  rezistansında bulunan tel için enerji dengesini yazacak olursak;

üretilen ısı = transfer edilen ısı

$$\eta \cdot R_f I^2 = k_f \cdot \pi l (T_w - T_f) Nu \quad (A2)$$

bu ifadede  $I$  : telden geçen akım şiddetini

$R_f$  : telin rezistansını

$\eta$  : ısınma katsayısını

$k_f$  : akışkanın ısıl geçirgenlik katsayısını göstermektedir.

Eğer (A1) ve (A2) ifadelerini birleştirecek ve sıcak telin iki ucu arasındaki voltaj farkı olan  $V$ 'i bu ifadelerde kullanacak olursak;

$$V^2 = A + BU^{1/n} \quad (A3)$$

ifadesini elde ederiz. Burada

$$A = \pi k_f \eta R_f l (T_w - T_f) \alpha \pi Pr^{m1}$$

$$B = \pi l k_f \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{1/n} d^{1/n} R_f (T_w - T_f) \beta Pr^{m2}$$

Sabit sıcaklık anemometresinde  $T_w =$  sabit olacağından, fazla ısınma katsayısı verilmiş olacaktır. Bilindiği gibi  $k_f (\rho/\mu)^{1/n}$  katsayısı sıcaklıkla pek fazla değişmediğinden, Prandtl sayısı da değişen sıcaklık farklılıkları için sabit kalacağından (A3) ifadesi

$$V^2 = k_f (T_w - T_f) A' + (T_w - T_f) B' \cdot U^{1/n} \quad (A4)$$

olarak basitleştirilebilecektir. Burada A' ve B' terimleri birer sabit olup, T<sub>w</sub> sıcaklığındaki telin özelliklerine bağlıdır.

Görüldüğü gibi A ve B değerleri (T<sub>w</sub>-T<sub>f</sub>) sıcaklık farkına bağlıdır. Eğer T<sub>w</sub> sabit tutulursa A ve B sadece T<sub>f</sub>'nin yani akışkanın sıcaklığına bağlı olarak değişecektir. (A3) ifadesine literatürde King kanunu adı verilmektedir.

Eğer sıcaklığı değişmeyen ve U hızıyla akan bir akışkan için bu ifadeyi kullanacak olursak, sıcak tel anemometresini daha önceden kalibre etmemiz gerekecektir. Böylece kalibrasyon sonucunda A ve B değerleri aynı ortam için elde edilmiş olacaktır. Bu nedenle sıcak tel anemometresinin kullanılması onun muhakkak daha önceden kalibrasyonunu gerektirmektedir.

#### Sıcak Tel Anemometresinin Kalibrasyonu

Bu çalışmada daha ziyade linearize edilmemiş çıkış kullanılacağından sıcak tel anemometresinin çıkışındaki linear olmayan çıkışın kalibrasyonu anlatılacaktır. Kalibrasyon, bilinen akış hızına göre anemometre çıkışındaki E<sup>2</sup> voltajının çizilmesi ile elde edilmektedir. bu nedenle öncelikle hızın doğru olarak bilinmesi, daha sonra anemometre çıkışının sabit tutulabilmesi için akımın türbülanssız olması gerekmektedir. Böyle bir akımının yaratılması için akımın daha önceden düzgün duruma getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle

bir kalibrasyon tüneli imal edilmiştir. Kalibrasyon tüneli-  
nin özellikleri ve elemanları şu şekilde tanımlanabilir.

- a) Sıkıştırılmış hava rezervi
- b) Genişleme kabı (veya dinlendirme odacığı) bu odacık içinde akımın hızının mümkün olduğu kadar düşük tutulması gerekmektedir.
- c) Çıkış lülesi; çıkış lülesi kesit alanının dinlendirme odacığının alanına olan oranın mümkün olduğu kadar küçük olması gerekmektedir.

$$\frac{A_{\text{odacık}}}{A_{\text{lüle}}} > 20$$

Lüleden çıkan hava akımının hızını bulmak için odacık içindeki sıcaklığı ve statik basıncı ölçmek yeterli olacaktır. Sıcaklık ölçümü ile havanın yoğunluğu düzeltilecek, basınç ölçümü ile de lüleden çıkış hızı hesaplanacaktır.

Havanın Yoğunluğu

$$\rho_{\text{hava}} = 1.293 * \frac{P_{\text{atm}}}{760} * \left[ \frac{273}{273 + T_{\text{hava}}} \right] \quad (\text{A5})$$

ifadesi ile düzeltilmelidir. Manometre içinde kullanılan sıvının (suyun) yoğunluğunun ise doğru olarak ve akımın sıcaklığında hesaplanması gerektiğinden

$$\rho_{\text{sıvı}} = 1063.2 - 0.8937 * TC \quad (\text{A6})$$

ifadesi kullanılarak akan havanın hızı Bernoulli denklemin-  
den hesaplanabilir. Buna göre;

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$

$$V_1 = 0 \text{ veya } (V_1 \ll V_2)$$

$$P_2 = P_{atm} \text{ basınç}$$

$$V_2 = \left[ \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$V_2 = \left[ \frac{2\Delta p}{\rho_{hava}} \right]^{1/2}$$

$$P_1 - P_2 = \Delta p$$

$$\Delta p = \rho_{sıvı} hg$$

$$g = \text{yerçekimi ivmesi } 9.81 \text{ m/s}^2$$

h = manometre içindeki sıvının yüksekliği

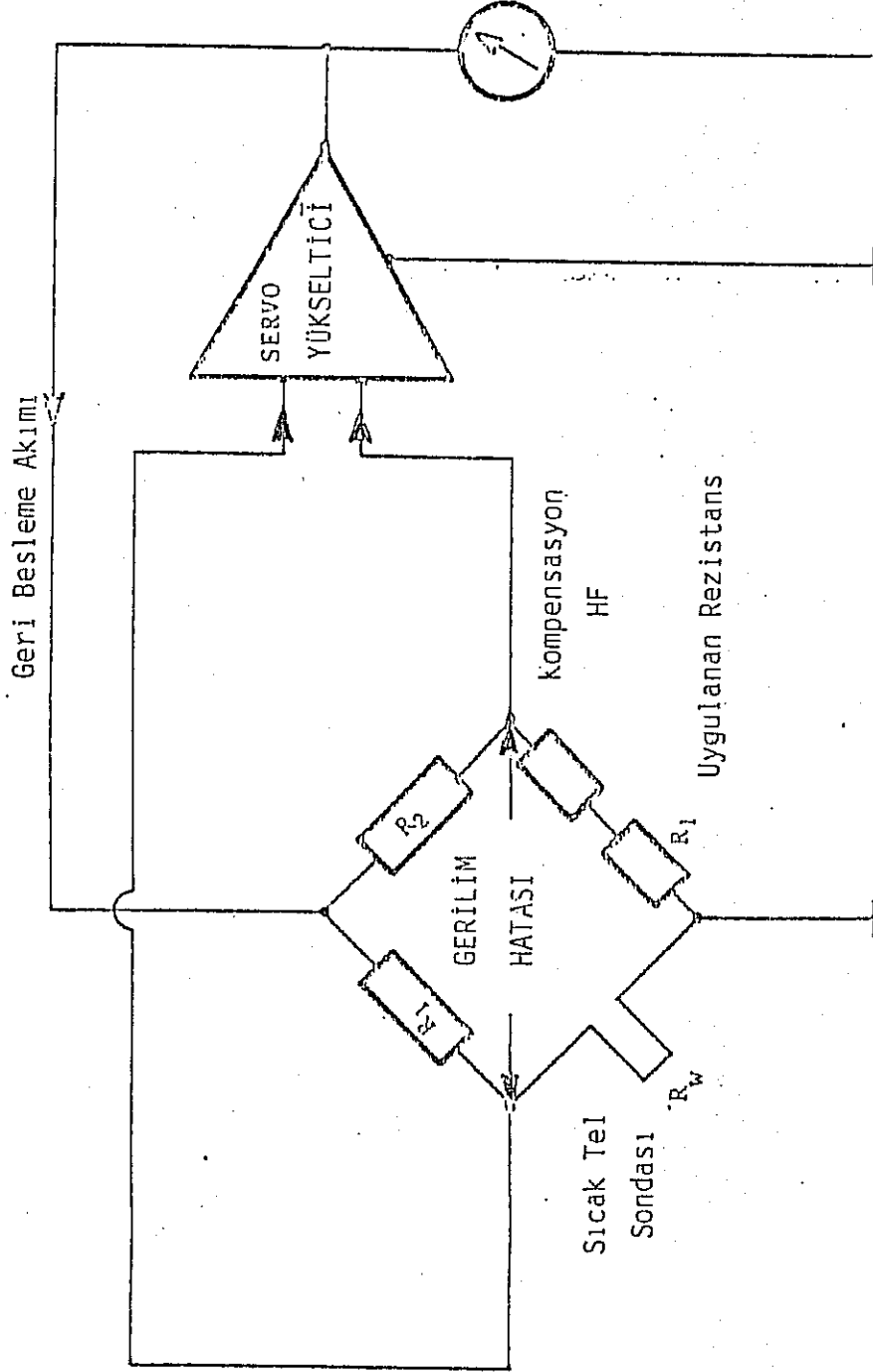
$$V_2 = \left[ \frac{2(\rho_{sıvı})hg}{\rho_{hava}} \right]^{1/2} \quad (A7)$$

Bundan sonra yapılacak iş, anemometre çıkışının voltaj olarak, hıza göre çizilmesi ve bu eğriye uyacak en uygun analitik ifadenin;

$$E^2 = A + BU^{1/n}$$

(A8)

denkleminin kullanılarak hesaplanmasını içermektedir. Kalibrasyon eğrisine en uygun analitik ifadenin bulunması için en küçük kareler yöntemi kullanılarak bir bilgisayar programı yazılmış ve bulunan analitik ifadenin deneysel sonuçlara olan yakınlığı lineer regresyon yöntemiyle elde edilen korelasyon katsayısı ile ifade edilmiştir.



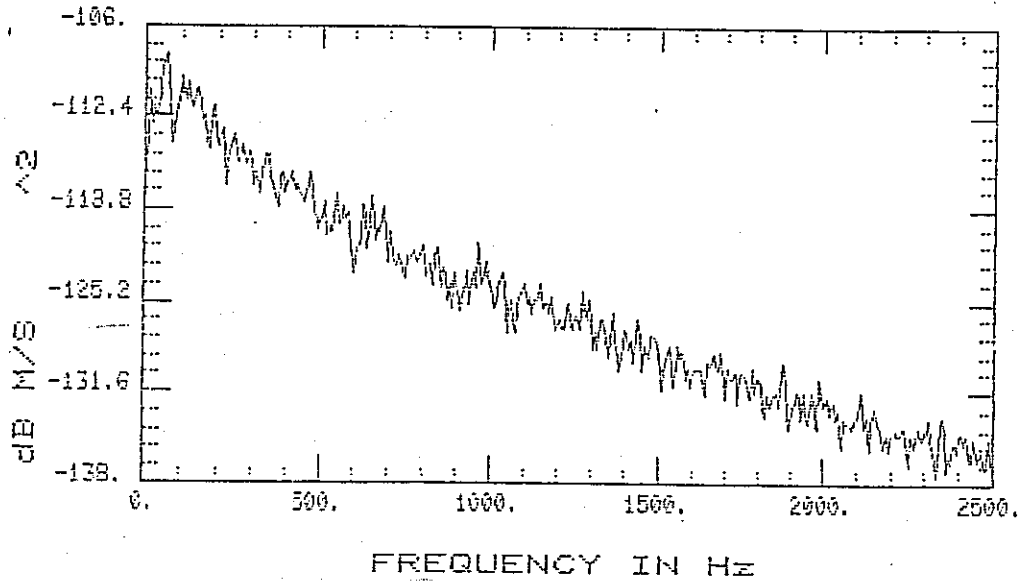
$\frac{R_1}{R_2}$  = Wheatstone köprüsünün kolları arasındaki orantı

Şekil A1. Sabit Sıcaklıkta Çalışan Kızgıntel Anemometresi Çalışma Prensibi

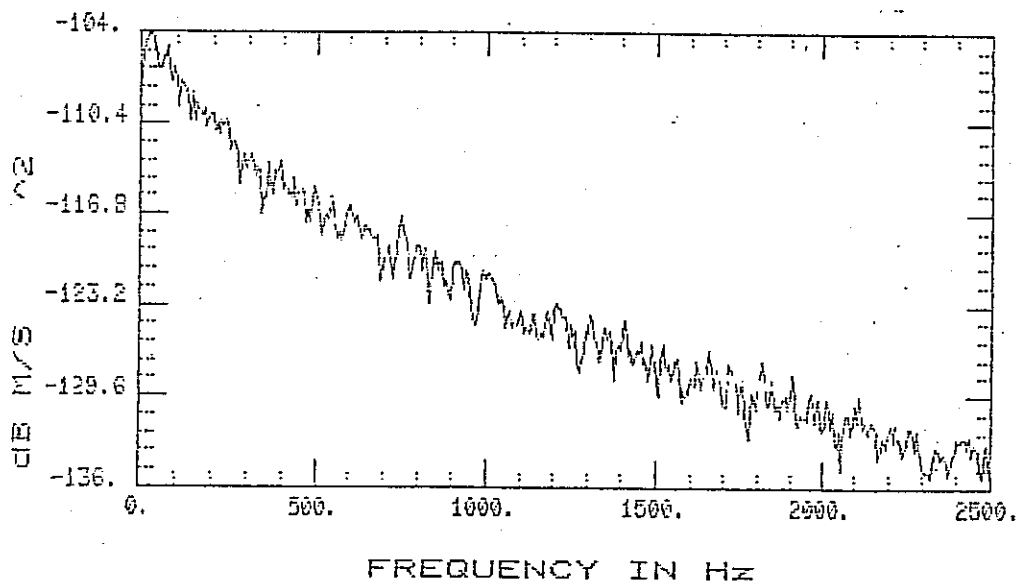
EK B

EKSENEL HIZ GÜÇ SPEKTRUMLARI

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**



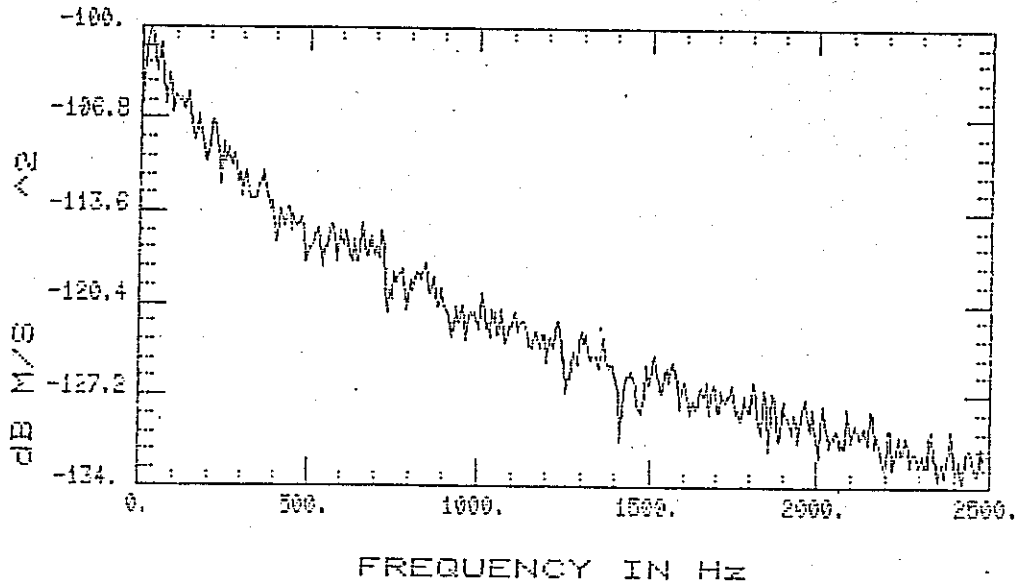
$\lambda=1.53$   $V_i=7.29$  m/s  $x/D_i=1.0$   $r/D_o=0.00$



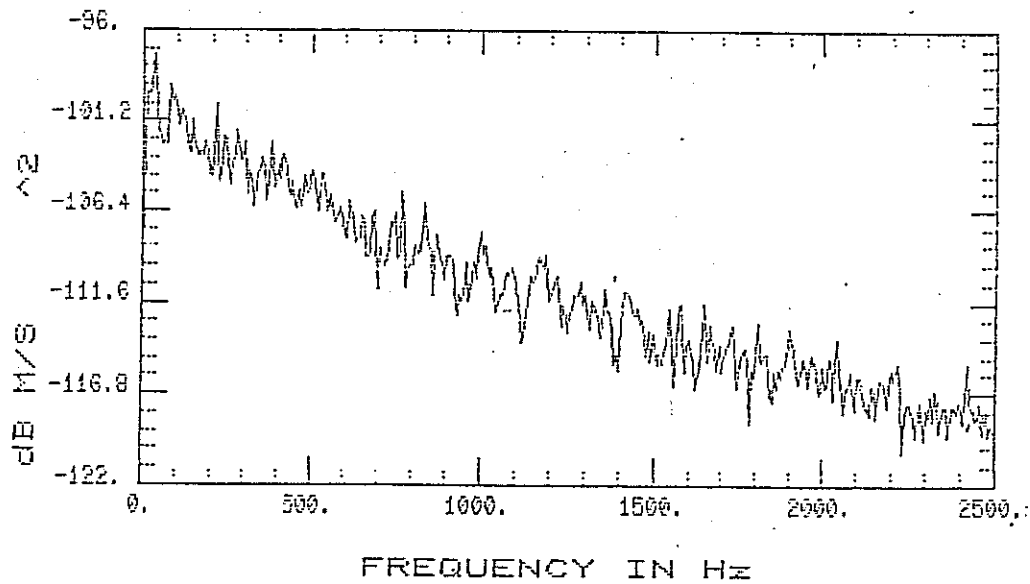
Sekil B1  $\lambda=1.53$   $V_i=7.29$  m/s  $x/D_i=1$   $r/D_o=0.09$



SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA

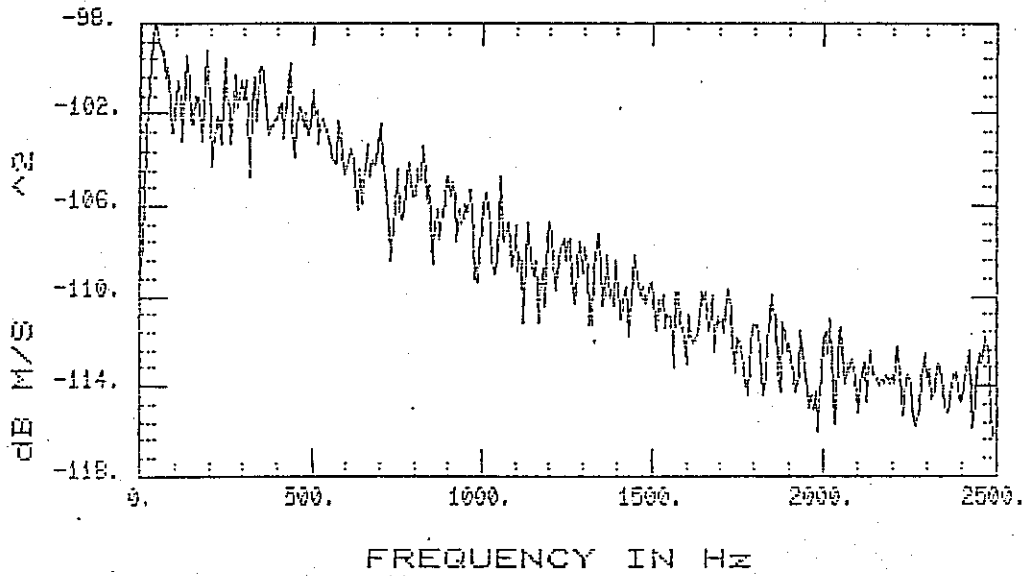


$\lambda=1.53$   $V_i=7.29$  m/s  $h/D_i=1.0$   $r/D_0=0.14$

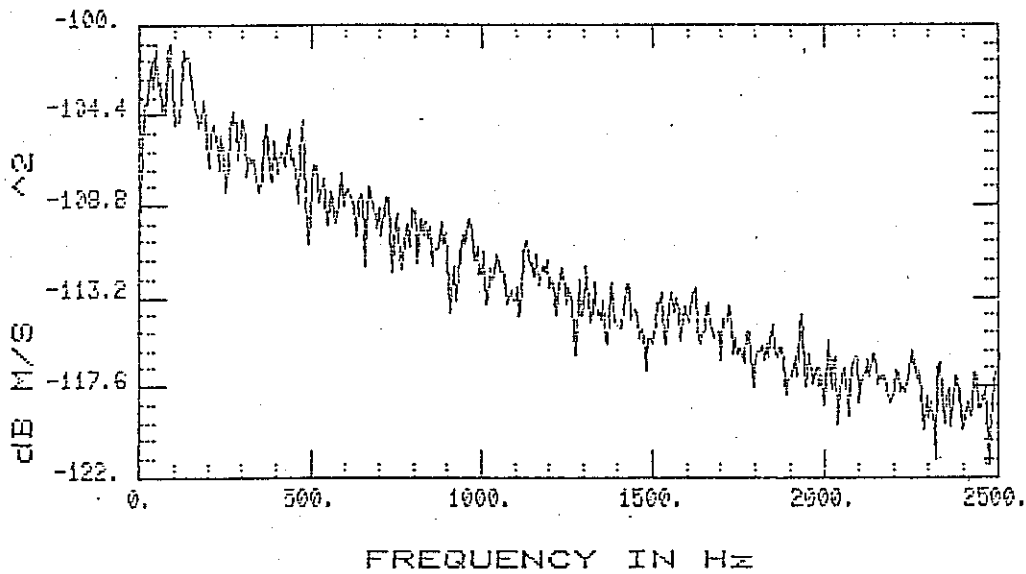


Şekil B2  $\lambda=1.53$   $V_i=7.29$  m/s  $h/D_i=1$   $r/D_0=0,23$

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**

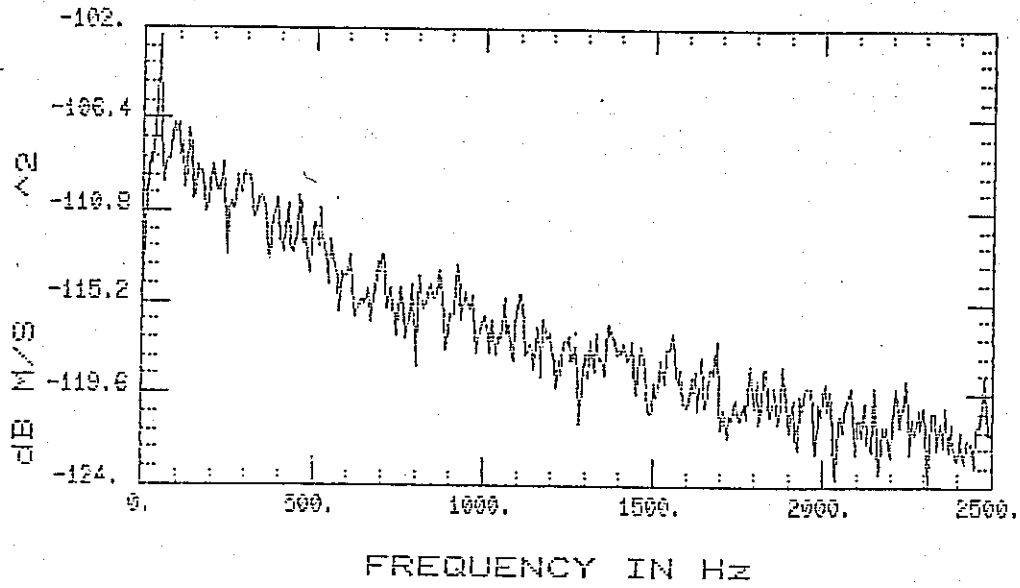


$\lambda = 1.53$   $U_i = 7.29$  m/s  $h/D_i = 1.0$   $r/D_0 = 0.27$

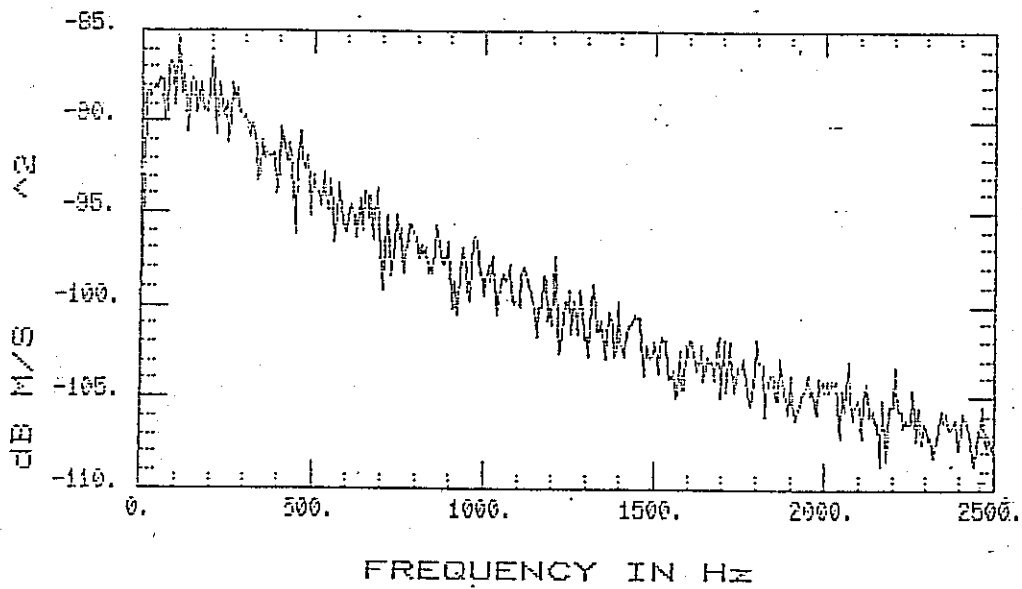


Şekil B3  $\lambda = 1.53$   $U_i = 7.29$  m/s  $h/D_i = 1.0$   $r/D_0 = 0.32$

### SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA

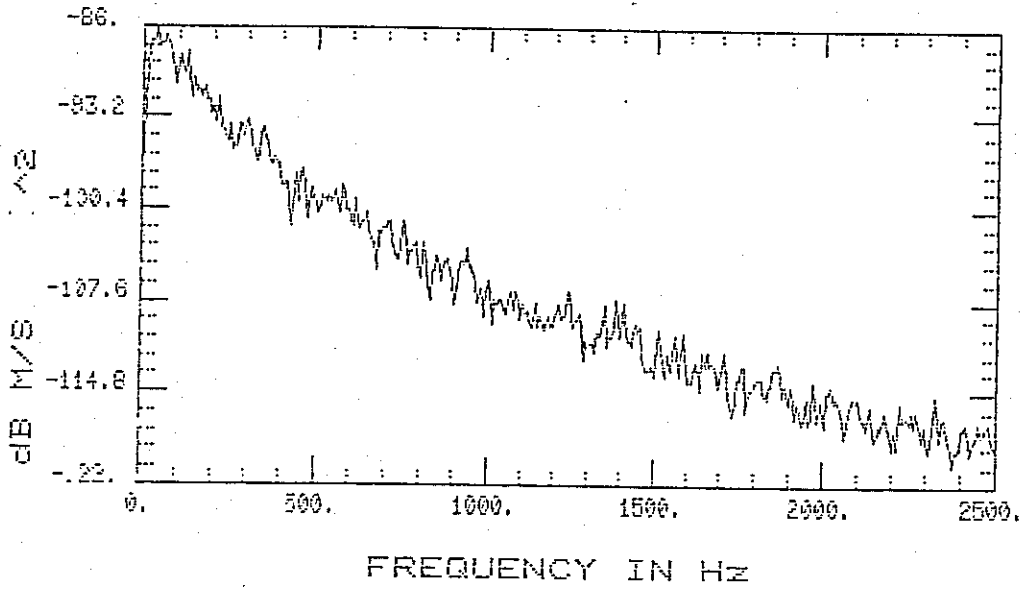


$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=1.0$   $r/D_0=0.36$

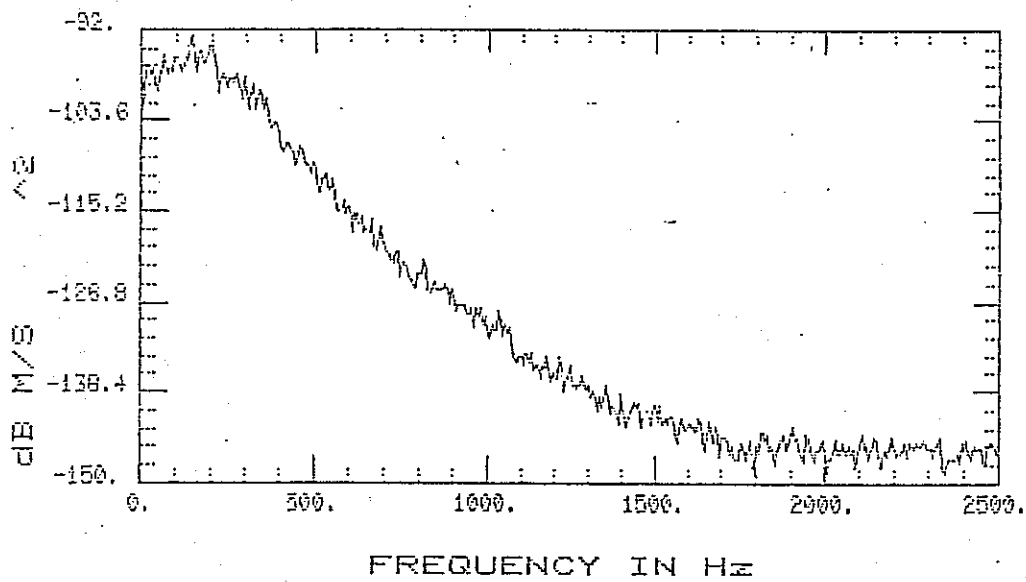


Sekil B4  $\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=1.0$   $r/D_0=0.45$

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**

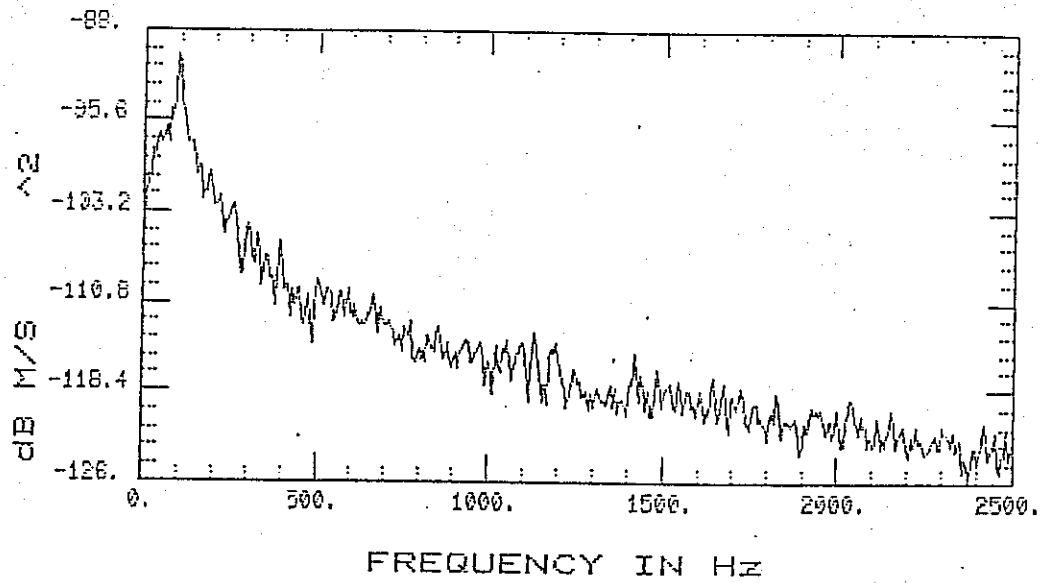


$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $r/D_0=0.50$

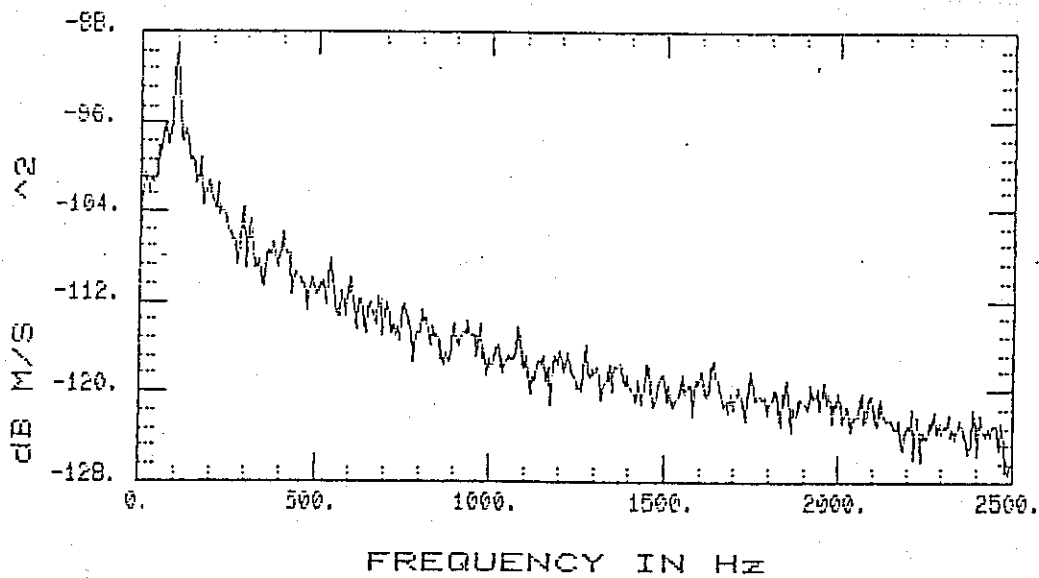


Şekil B5  $\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $u/D_i=1.0$   $r/D_0=0.55$

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**

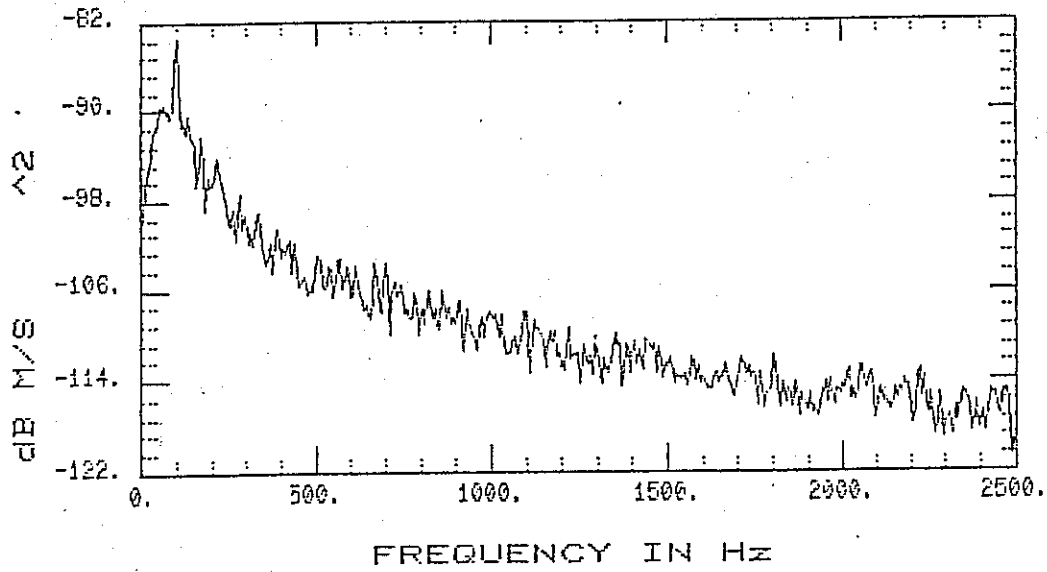


$\lambda=1.53$   $D_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_0=0.00$

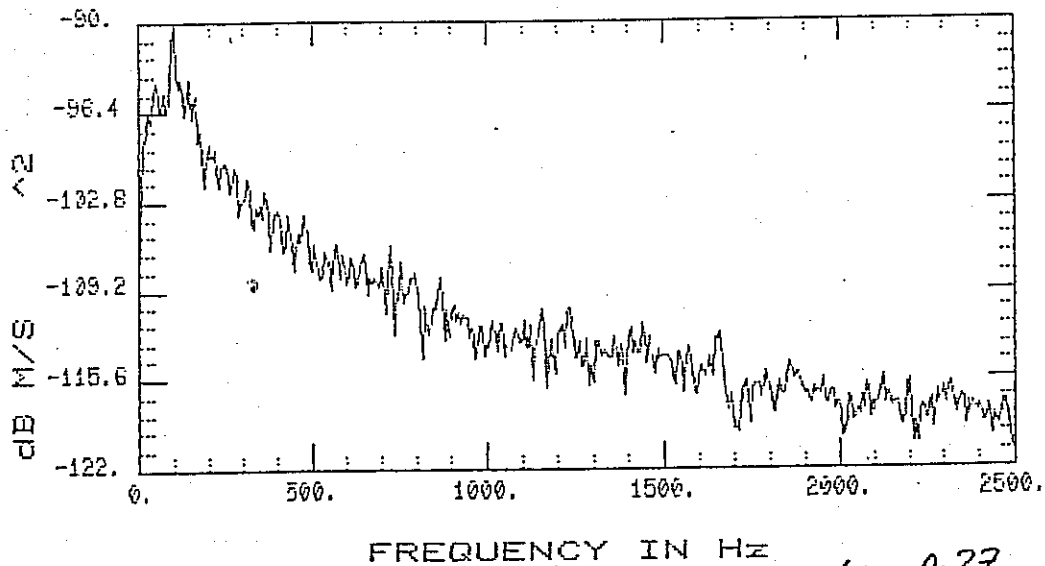


Şekil B6  $\lambda=1.53$   $D_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_0=0.09$

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**

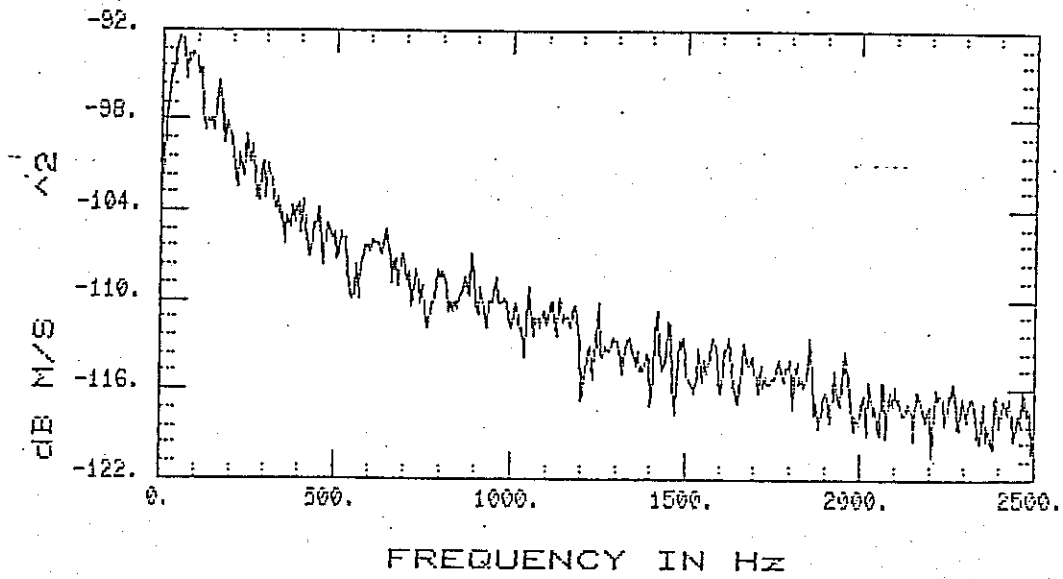


$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_0=0.14$

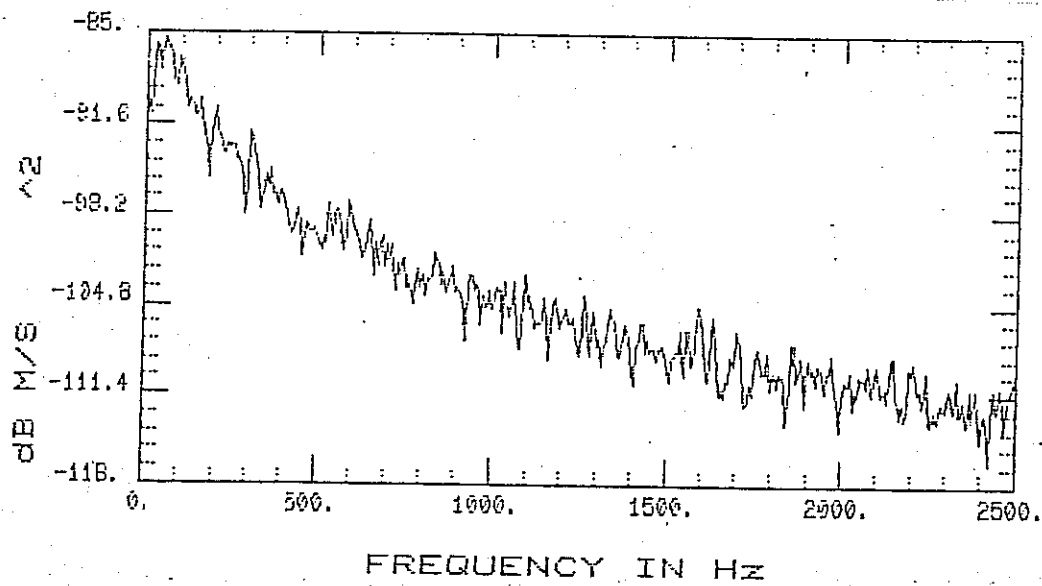


Şekil B7  $\lambda=1.53$   $v=7.29$  m/s  $x/D_i=5$   $r/D_0=0.27$

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**

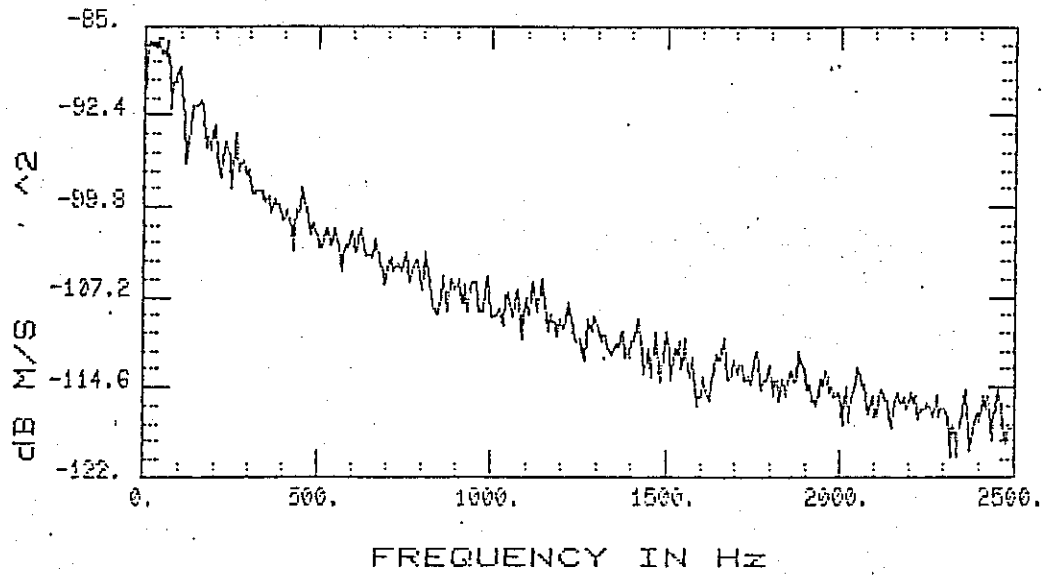


$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_0=0.41$

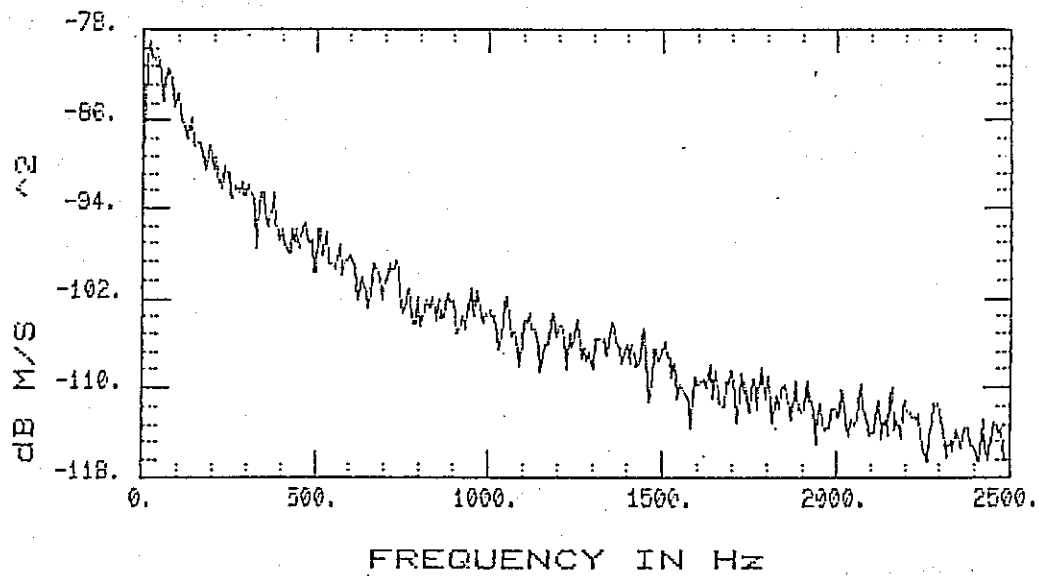


Sekil B8  $\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_0=0.50$

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**



$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_0=0.59$

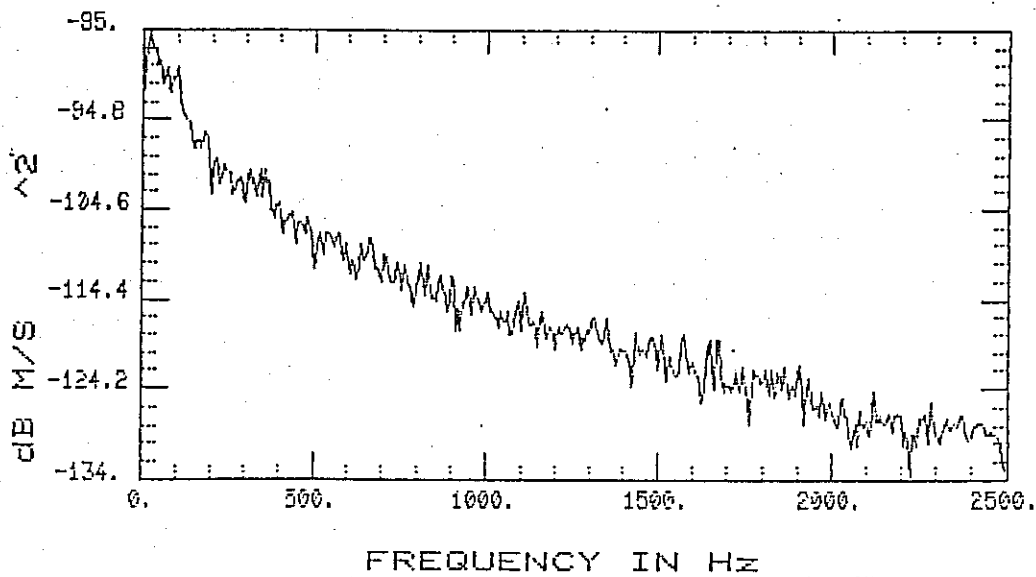


Sekil B9

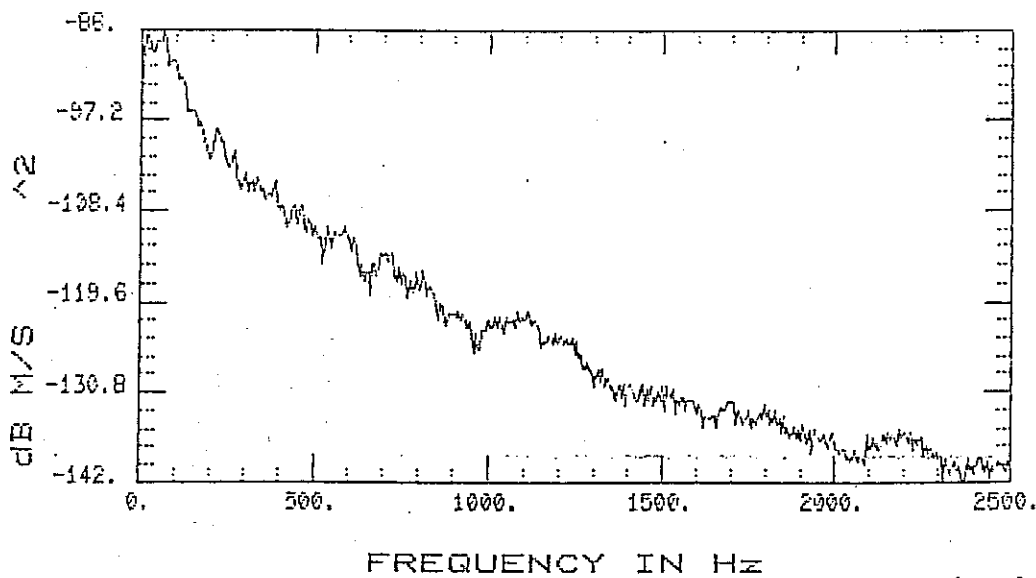
$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_0=0.64$



**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**

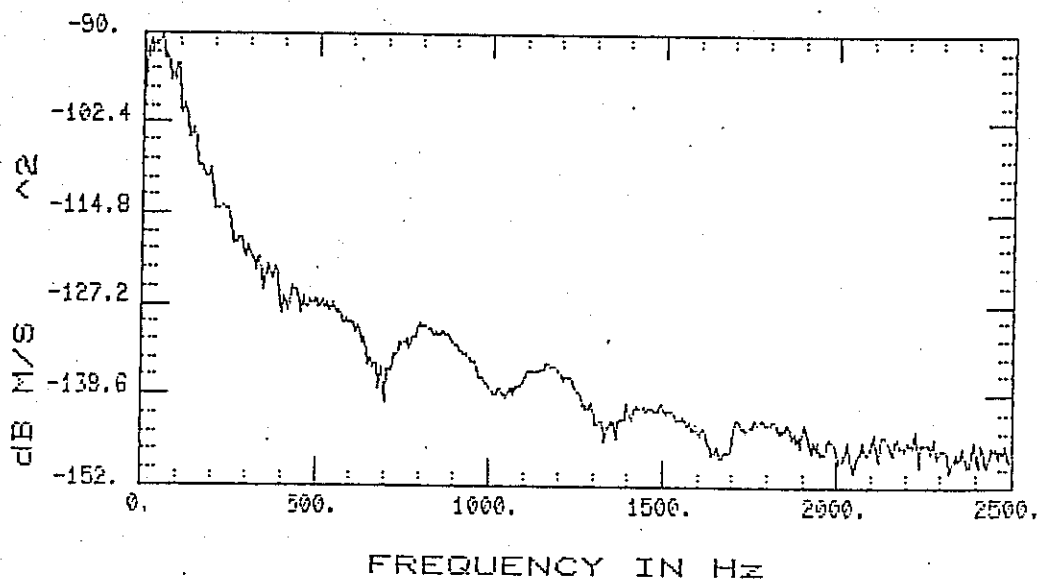


$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $h/D_i=5.0$   $r/D_o=0.73$

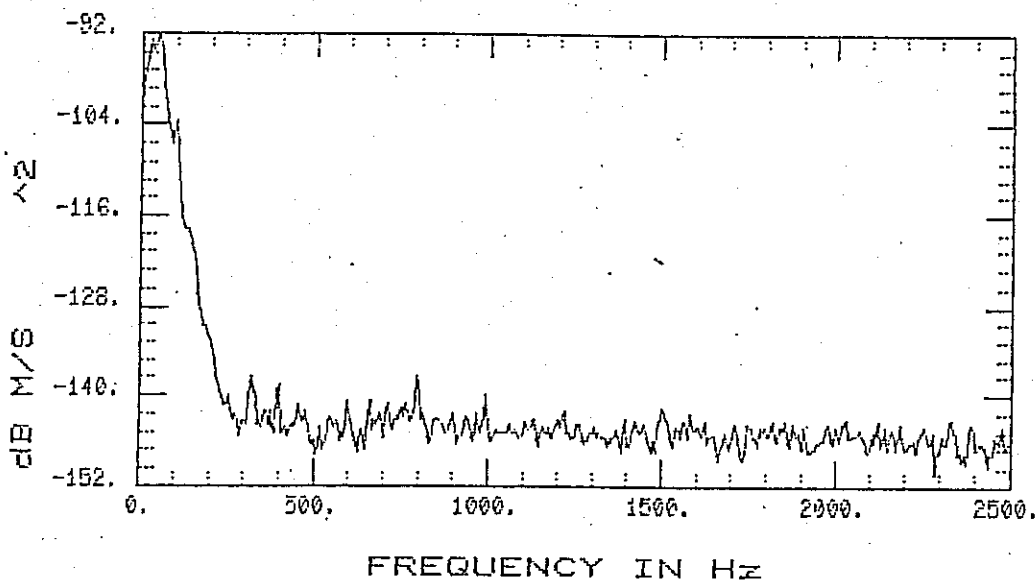


Şekil B10  $\lambda=1.53$   $U=7.29$  m/s  $x/D_i=5$   $r/D_o=0.82$

**SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA**

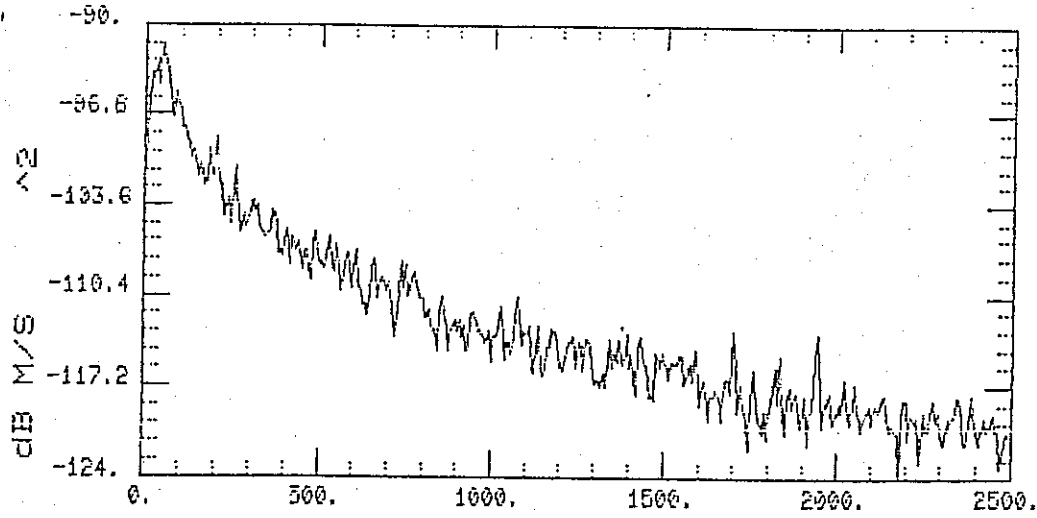


$\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $x/D_i=5.0$   $r/D_0=0.91$



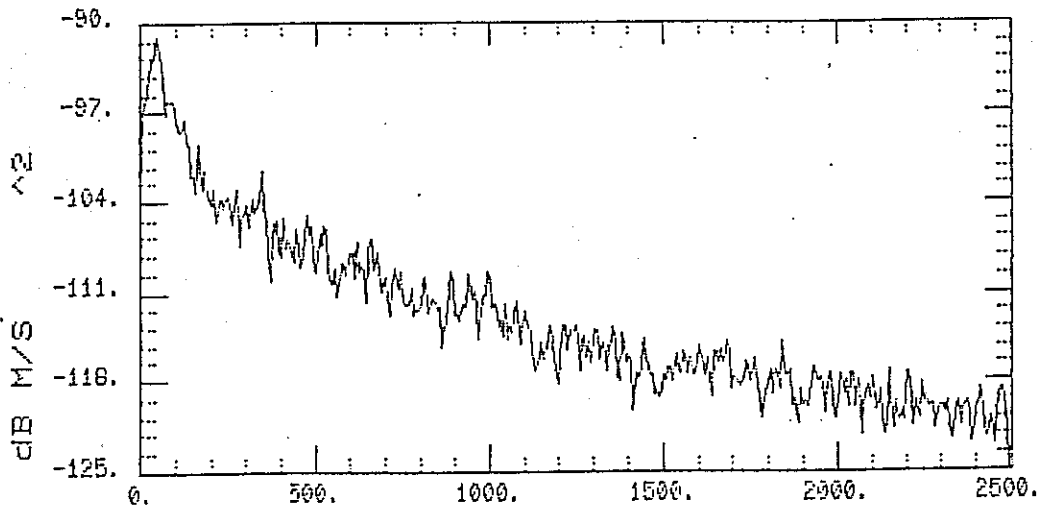
Şekil B11  $\lambda=1.53$   $U_i=7.29$  m/s  $x/D_i=5.0$   $r/D_0=1.14$

SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



FREQUENCY IN HZ

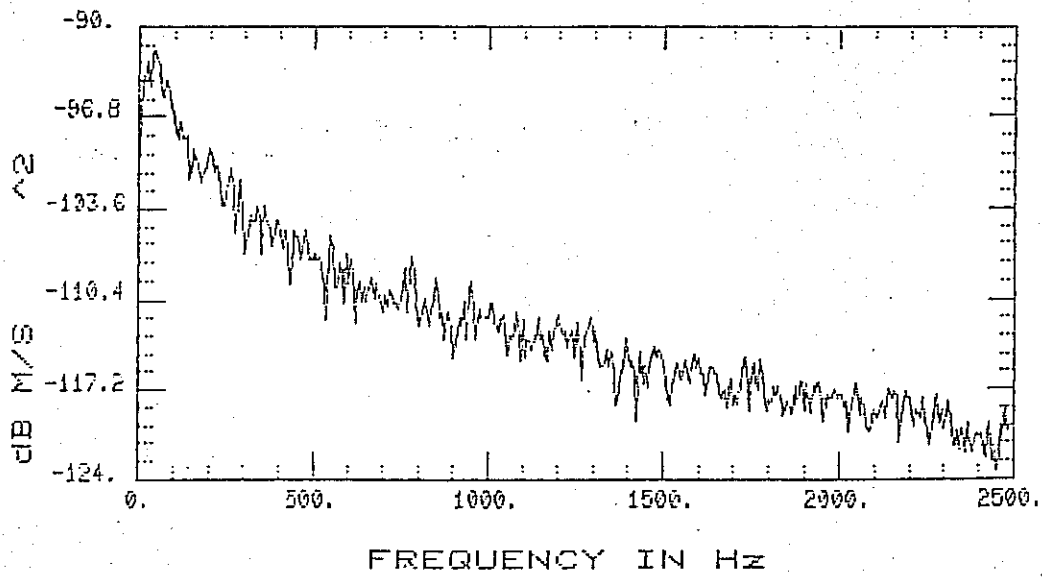
$\lambda = 1.53$   $V_i = 7.29 \text{ m/s}$   $\kappa/\rho_i = 10$   $r/\rho_0 = 0$



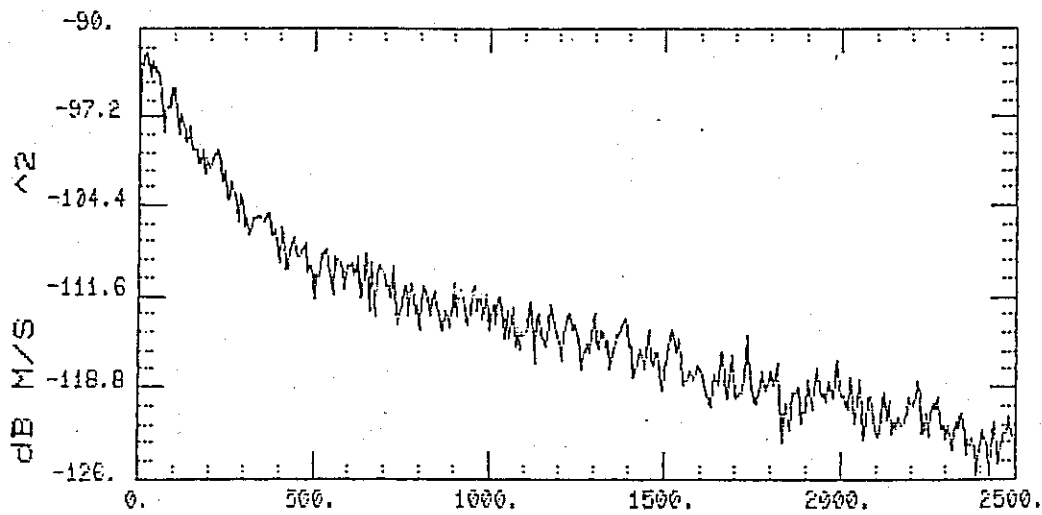
FREQUENCY IN HZ

Sekil B12  $\lambda = 1.53$   $V_i = 7.29 \text{ m/s}$   $\kappa/\rho_i = 10$   $r/\rho_0 = 0.23$

SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA

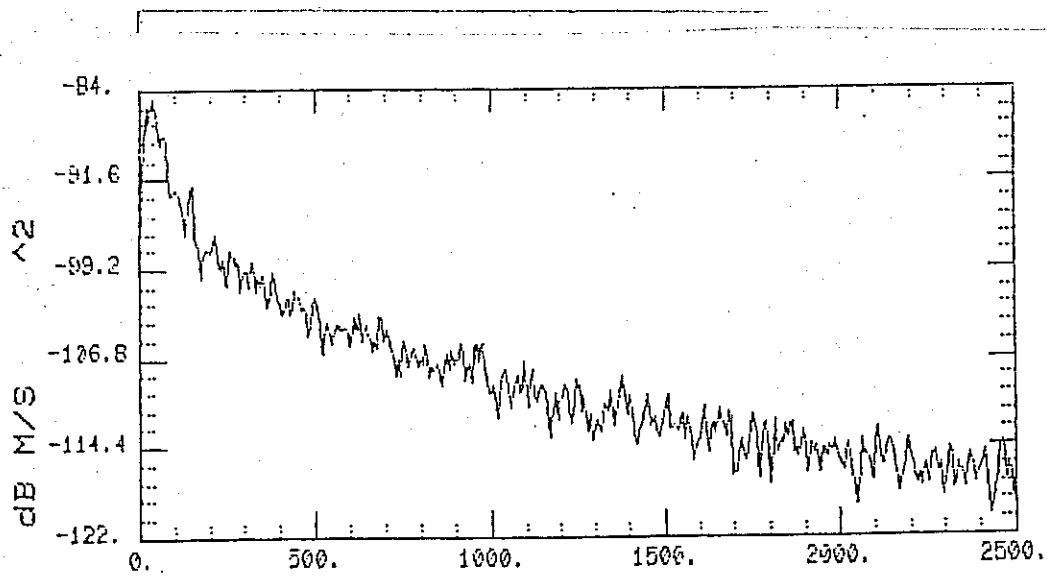


$\lambda = 1.53$   $V_i = 7.29 \text{ m/s}$   $x/D_i = 10$   $r/D_o = 0.36$



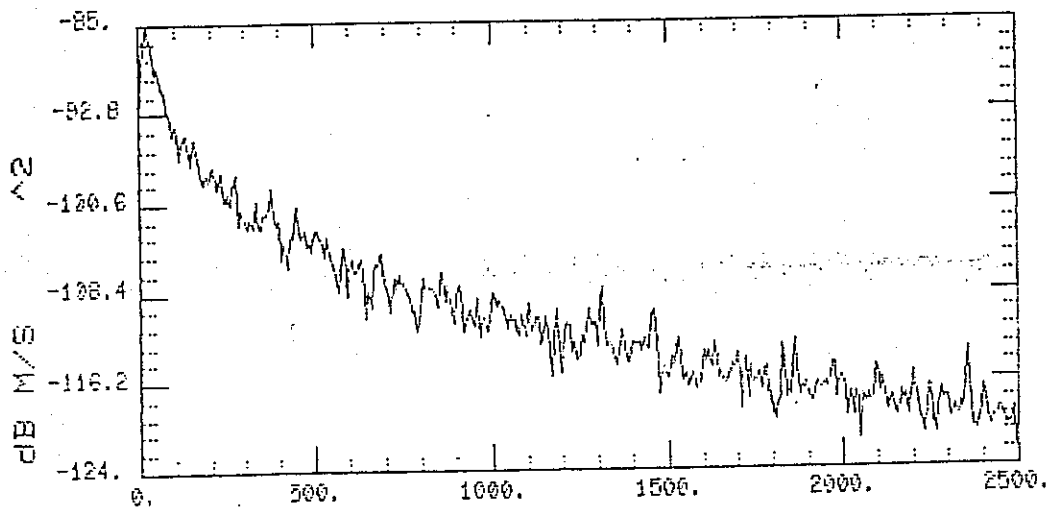
Şekil B13

$\lambda = 1.53$   $V_i = 7.29 \text{ m/s}$   $x/D_i = 10$   $r/D_o = 0.49$



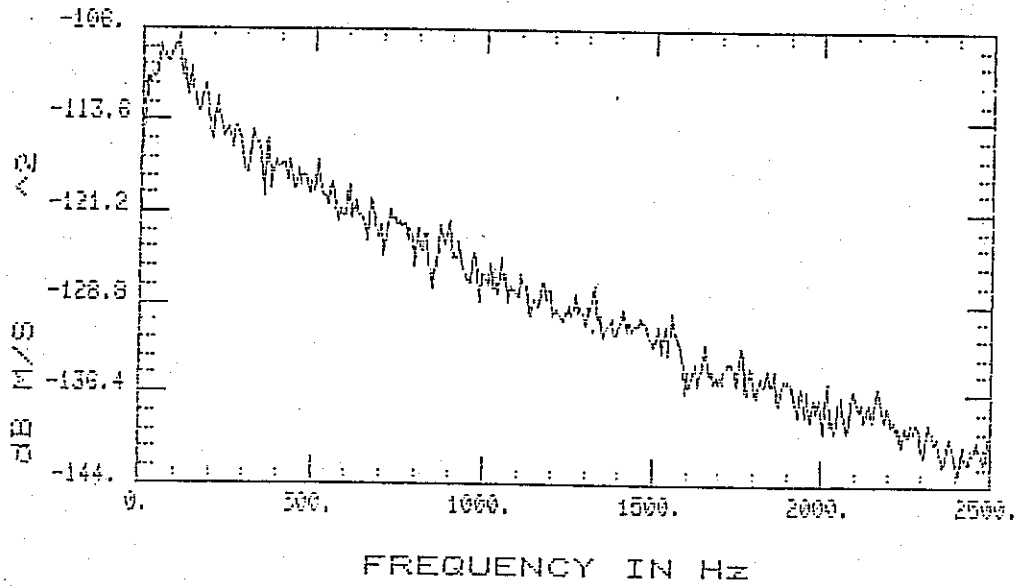
$\lambda = 1.53$   $v_i = 7.29 \text{ m/s}$   $x/d_i = 10$   $r/d_o = 0.59$

SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



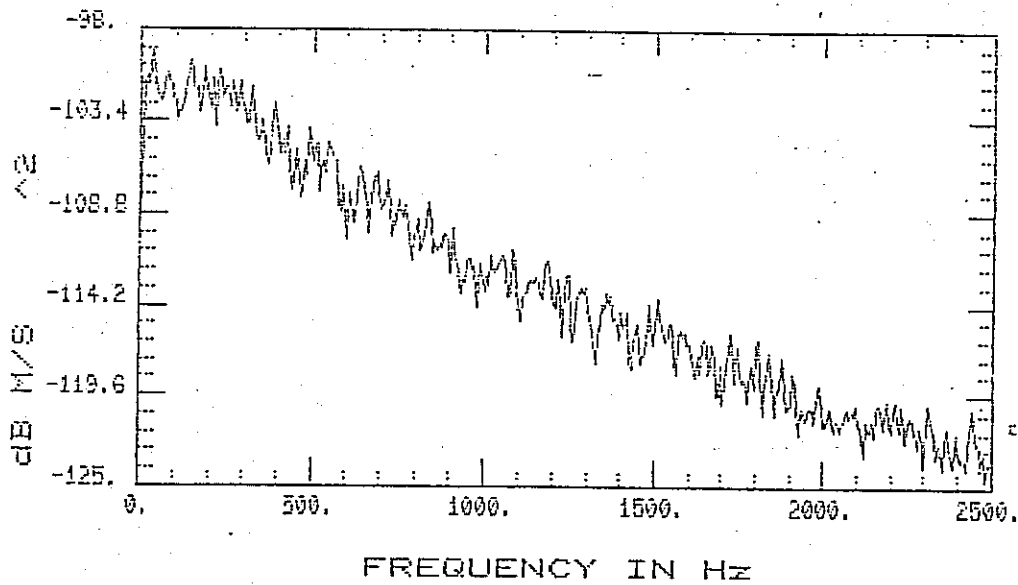
Şekil B14  $\lambda = 1.53$   $v_i = 7.29 \text{ m/s}$   $x/d_i = 10$   $r/d_o = 0.72$

SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



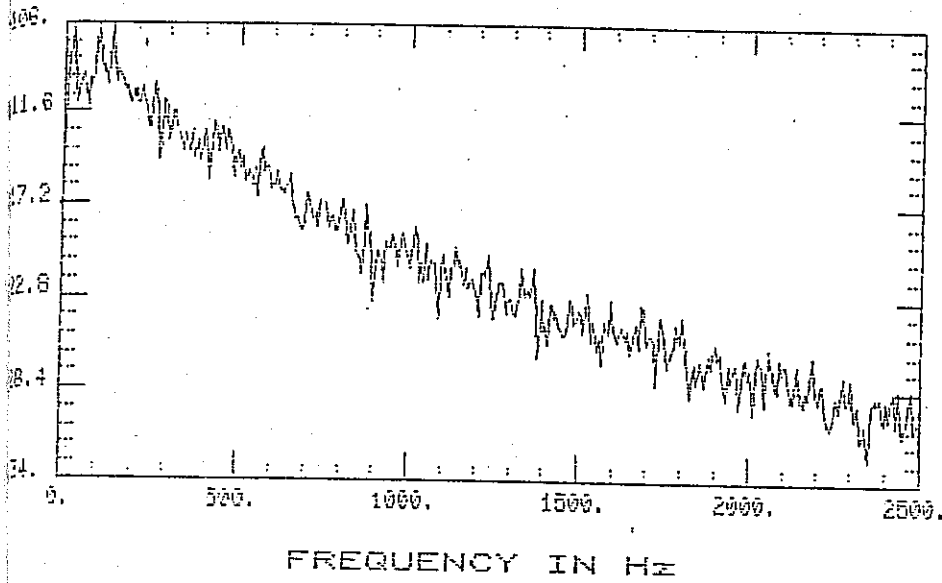
$\lambda=1,53 \quad V_i=5,02 \text{ m/s} \quad x/D_i=1 \quad r/D_0=0$

SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



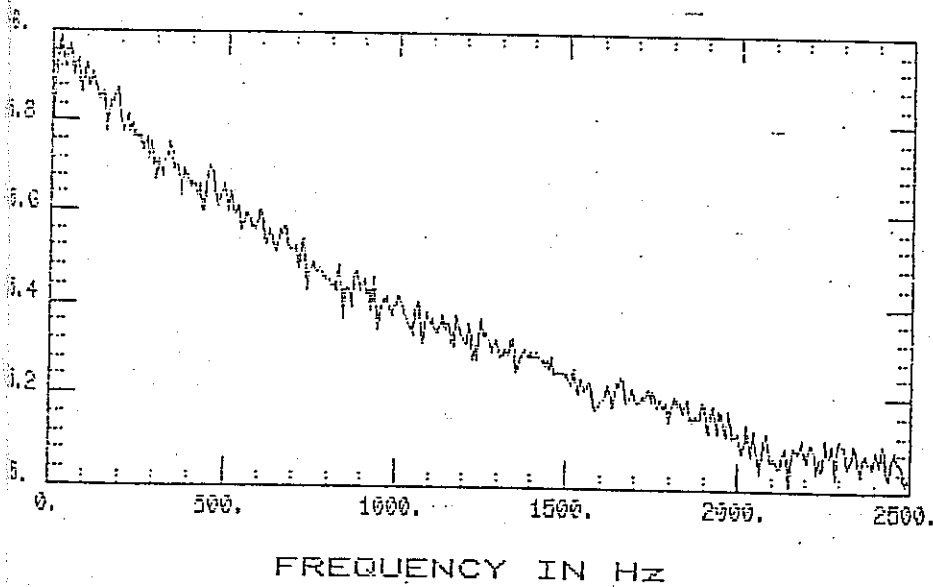
şekil B15  $\lambda=1,53 \quad V_i=5,02 \text{ m/s} \quad x/D_i=1 \quad r/D_0=0,23$

SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



$\lambda = 1.53$   $V_i = 5.02$  m/s  $x/D_i = 1$   $r/D_0 = 0.32$

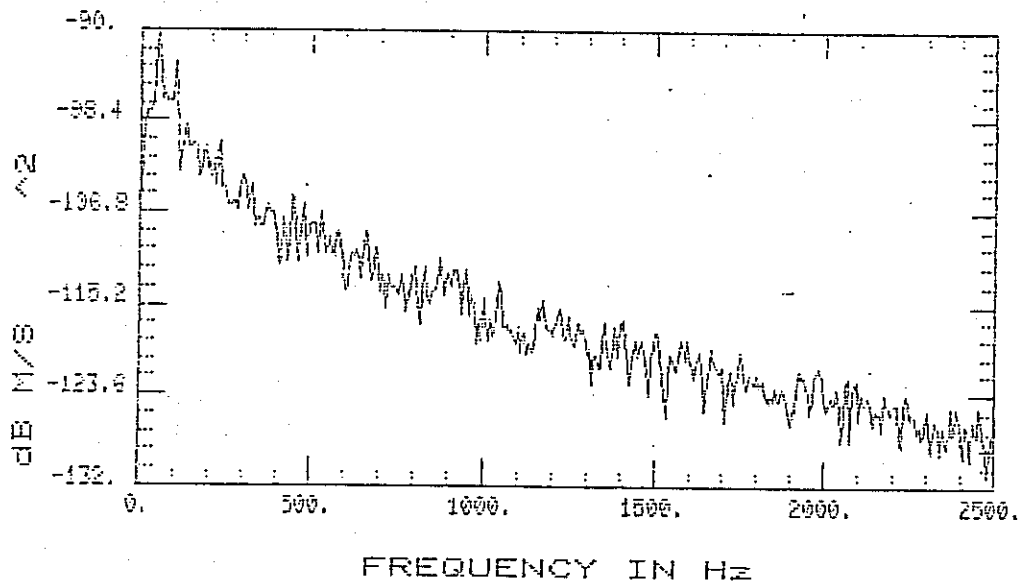
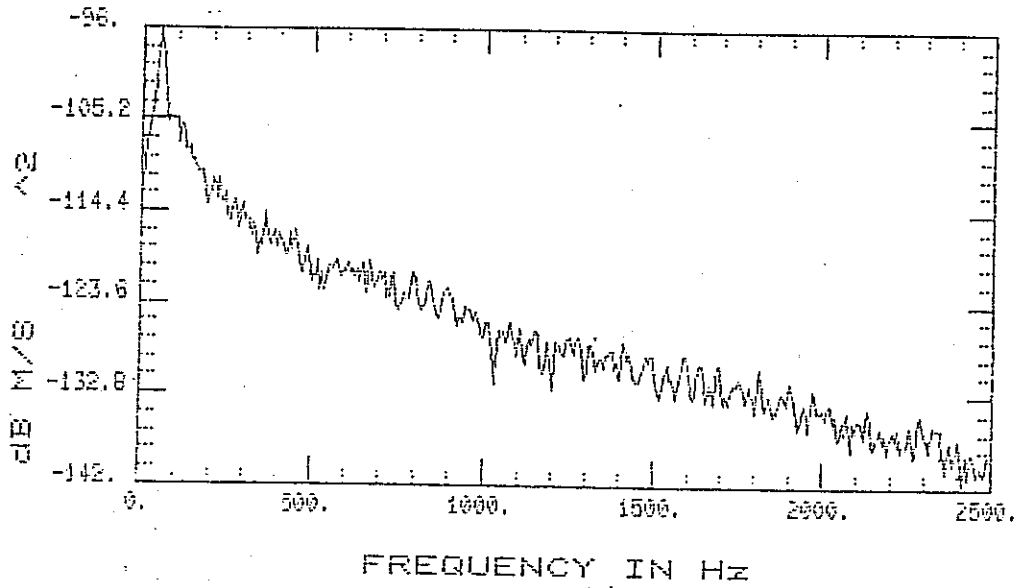
SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



Şekil B16  $V_i = 5.02$  m/s  $x/D_i = 1$   $r/D_0 = 0.41$

Fig 18:  $\lambda = 1.53$   $V_i = 5102 \text{ m/s}$   $x/D_i = 5$   $r/D_0 = 0$

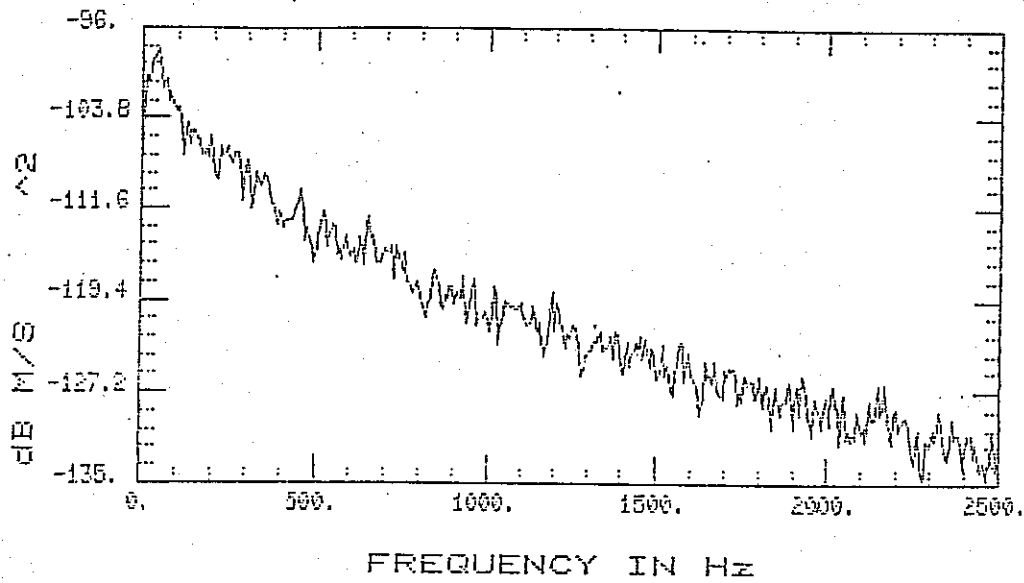
SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



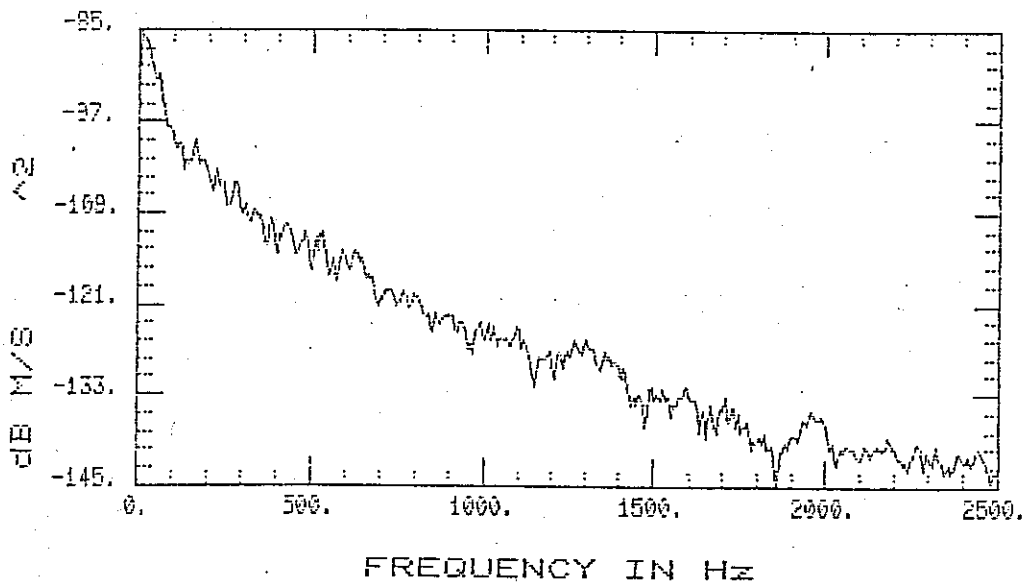
Şekil B17  $\lambda = 1.53$   $V_i = 5102 \text{ m/s}$   $x/D_i = 5$   $r/D_0 = 0.14$



SINGLE CH. AVERAGE POWER SPECTRA



$\lambda = 1.53 \quad v_i = 5.02 \text{ m/s} \quad x/D_i = 5 \quad r/D_o = 0.41$



Şekil B18  $\lambda = 1.53 \quad v_i = 5.02 \text{ m/s} \quad x/D_i = 5 \quad r/D_o = 0.82$