



## VORTEKS TÜPÜNDEKİ AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN ÇOK POZİSYONLU SICAK TEL YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Mehmet KAYA\*, Mehmet YILMAZ\*\*, Ömer ÇOMAKLI\*\* ve Şendoğan KARAGÖZ\*\*

\*Türk Hava Yolları, Cumhuriyet Cad. Eren İş Merkezi, Erzurum, [mkaya24@yahoo.com](mailto:mkaya24@yahoo.com)

\*\*Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Böl. Erzurum,  
[yilmazm@mailcity.com](mailto:yilmazm@mailcity.com), [ocomakli@atauni.edu.tr](mailto:ocomakli@atauni.edu.tr), [skaragoz@atauni.edu.tr](mailto:skaragoz@atauni.edu.tr)

(Geliş Tarihi: 15. 12. 2005)

**Özet:** Bu çalışmanın amacı, tek eğimli sıcak tel probu için geliştirilen çok pozisyonlu sıcak-tel yöntemini kullanarak vorteks tüpünün hidrodinamik karakteristiklerini deneysel olarak araştırmaktır. Boyu 80 cm ve iç çapı 89 mm olan pürüzsüz bir boru vorteks borusu olarak kullanılmış ve havanın borunun girişinde 120° açılarla açılan 3 lüleden teğetsel olarak girmesiyle boru içerisinde vorteks akış elde edilmiştir. Orifis çapı ve hava debisinin üç ortalama hız bileşeni, üç normal ve üç Reynolds gerilmelerine etkisini incelemek amacıyla, 4 farklı orifis çapı (20, 40, 60 ve 89 mm) ve 3 farklı debi (5, 10 ve 15 L/s) kullanılmıştır. Fitouri *vd.* (1995) tarafından geliştirilen minimum çatal etkileşimli dönme açılarını kullanan çözüm yöntemi kullanılmıştır. Akış rejiminin çıkış koşullarına çok duyarlı olduğu belirlenmiştir. Teğetsel hız bileşeninin baskın olduğu ve radyal hız bileşeninin eksenel ve teğetsel hız bileşeninden daha küçük olduğu bulunmuştur. Radyal yöndeki teğetsel hız profili, çevresel bölgede serbest vorteks ve merkezi bölgede zorlanmış vorteks bölgelerinden oluşmuştur. Eksenel hız bileşenleri, vorteks borusunun bazı bölgelerinde önemli olmuş ve bu bölgelerin boru cidarına yakın bölgeler olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Vorteks tüpü, Sıcak tel, Çok pozisyonlu yöntem, Ortalama hız, Türbülans.

## INVESTIGATION OF FLOW CHARACTERISTICS IN VORTEX TUBES BY MULTIPOSITION HOT-WIRE TECHNIQUE

**Abstract:** The purpose of this study is to investigate experimentally the hydrodynamic characteristics of a vortex tube by using a multiposition hot-wire technique for a single yaw hot-wire probe. A smooth pipe of length 80 cm and of inner radius 89 mm was used as the vortex tube, and the swirl flow was obtained by the tangential inlet of air through the three nozzles opened 120° apart from each other at the inlet of the tube. Four different orifice diameters (20, 40, 60 and 89 mm), and three different flow rates (5, 10 and 15 L/s) were used to study the effect of orifice diameter and the flow rate on the three mean velocity components and three normal and three Reynolds stresses. The solution procedures using roll angles with minimal prong interference developed by Fitouri *et al.* (1995) were used. An extreme sensitivity of the flow regime to the exit conditions was determined. The tangential velocity component was predominant, and radial velocity component were smaller than that of the axial and tangential components. The tangential velocity profile in the radial direction was composed of a peripheral region of quasi-free vortex and a central part of quasi-forced vortex flow. Axial velocity components became significant in some zones of the vortex tube, and these zones were generally close the tube wall.

**Keywords:** Vortex tube, Hot wire, Multiposition technique, Mean velocity, Turbulence.

### GİRİŞ

Vorteks tüpü sıkıştırılmış bir gazdan sıcak ve soğuk gaz üreten bir cihazdır. Yüksek basınçlı bir gaz akımının birisi giriş gazından daha sıcak diğeri giriş gazından daha soğuk düşük basınçlı iki akıma ayrılabilceğini ilk olarak 1933 yılında Ranque, 1947 yılında Hilsch keşfetmiştir. Bu nedenle bu tüpler Ranque Vorteks Tüpü, Hilsch Vorteks Tüpü ve Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü olarak adlandırılmaktadır. Ranque ve Hilsch'ten sonra vorteks tüpler, deneysel ve teorik bir çok araştırmaya konu olmuş, vorteks tüplerle ilişkili çok sayıda makale yayınlanmış ve patent alınmıştır. Vorteks

tüplerle ilgili yapılan araştırmalarda çok farklı tüp boyutları ve çalışma koşulları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan vorteks tüplerinin çapı ve uzunluğu geniş bir aralıkta değişmekte, lüleler ve orifislerin boyutlarında ve konfigürasyonlarında oldukça farklılıklar görülmektedir.

Literatürde vorteks akışlarla ilişkili yapılan çalışmalar iki kategoriye ayrılabilir (Nabhani, 1989): vorteks tüp (vortex tube) ve vorteks odası (vorteks chamber). Akışı incelemek için problemlerin tüpe girmesini gerektiren geleneksel yöntemlerin oluşturduğu dezavantajlar tüpün çapı küçüldükçe daha da artmaktadır. Buna dayanarak

vorteks odası olarak isimlendirilen büyük çaplı borularda vorteks akış karakteristikleri araştırılmak istenmiştir. Vorteks odasındaki akışın kompleks 3 boyutlu yapısı bu tip akışların modellenmesini zorlaştırmaktadır. Türbülanslı vorteks akışların sayısal analizi için vorteksin ortalama hız ve türbülans karakteristiklerine etkisini tamamen belirlemek gereklidir. Vorteks odalarının geliştirilmesi ve kullanılmasındaki amaç geometri ve debideki değişimlerin sınırlandırılmış vorteks akışa etkisini araştırmaktır. Bu konfigürasyonun kullanılmasındaki diğer bir amaç, pratik mühendislik uygulamalarında kullanılan diğer geometrilerdeki vorteks odalarına uygulanabilecek, vorteks odasındaki akışın yapısıyla ilişkili bazı genel bilgiler elde etmektir. Vorteks odaları ile ilişkili yapılan çalışmalar arasında Holman ve Moore (1961), Rosenzweig *vd.* (1962), Savino ve Keshock (1965), Baluev ve Troyankin (1967), Farris *vd.* (1969), Lewellen (1971), Koats (1976), Bank ve Gauvin (1977), Abujelal ve Lillely (1983), Yoon ve Lillely (1984), Ogawa (1984), Vatistas *vd.* (1986), Nabhani (1989), Chang ve Dhir (1994), Fitouri *vd.* (1995), Volchkov *vd.* (2004) tarafından yapılan çalışmalar sayılabilir.

Nabhani (1989) sınırlandırılmış vorteks borusundaki dönmeli akış karakteristiklerini sıcak tel anemometre kullanarak incelemiştir. Dönmeli akış, 32 mm giriş çapına sahip 2 adet giriş lülesiyle üretilmiştir. Ortalama aksenal, teğetsel ve radyal hız bileşenleri ölçülmüş ayrıca türbülans karakteristikleri de incelenmiştir. Chang ve Dhir (1994) cidarından üniform olarak ısıtılan bir boruda akışkanın teğetsel olarak girmesi ile oluşturulan türbülanslı akış alanını deneysel olarak çalışmışlardır. 2.5 m boyunda ve 88.9 mm iç çapında uzun bir akrilik borunun çevresine yerleştirilmiş enjektörler içinden havanın gönderilmesi ile vorteks akış oluşturulmuştur. Aksenal ve teğetsel yönlerdeki ortalama hız ve Reynolds gerilmeleri için profiller, sıcak-tel anemometresinde tekli dönel düz sıcak-tel probu ve tekli dönel eğimli sıcak-tel probu kullanılarak elde edilmiştir. Volchkov *vd.* (2004) diyaframlı bir vorteks odasındaki dönmeli akışın ortalama hız ve türbülans karakteristiklerini iki bileşenli lazer anemometre kullanarak incelemişlerdir. Çapı 100 mm ve yüksekliği 160 mm olan vorteks odası düşey olarak yerleştirilmiş ve vorteks akış, oda tabanının çevresine yerleştirilen dönmeli akış cihazıyla sağlanmıştır. Ortalama aksenal, teğetsel ve radyal hızlar ölçülmüştür.

Vorteks akışlarla ilgili bu çalışmaların temel amacı, vorteks akışın temel karakteristiklerini belirlemek ve alınan sonuçlarla akış karakteristiğini belirleyecek modellemeler yapmaktır. Dönmeli veya vorteks akış; soğutma sistemleri için Ranque-Hilsch vortex tüpü, benzinli ve dizel motorlar, yanmalı aygıtlar, kütle ve enerji ayırıcıları, sprey kurutucuları ve ısı değiştiricileri vb. gibi çeşitli teknik uygulama alanlarına sahiptir. Bu uygulamalarda vorteks akışın; akış alanını modifiye etmesi, karışımı veya dispersiyonu iyileştirmesi, gazlardan sıvı damlacıklarını veya partikülleri ayırması, performansı iyileştirmesi gibi önemli

fonksiyonları vardır (Nabhani, 1989; Bruun 1995). Çalışmalardaki akış üretme ve sistem geometrilerinin farklılığından dolayı, vorteks akış için genel olarak geçerli olabilecek ortak sonuçlar çıkarmanın imkansızlığı ortadadır. Vorteks akışla ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, vorteks akışın mekanığı, özellikle akış deseni ve türbülans profilleri ile ilişkili özellikleri tam olarak anlaşılamamıştır. Bu çalışmalar; ya cihazın bütüncül davranışının belirlenmesi ile ya da iyi bilinen uygulamalar için gerekli özel konfigürasyonların ayrıntılı akış çalışmalarıyla ilişkilidir. Diğer taraftan, vorteks akış, yukarıda kullanım alanları belirtilen sistemlerde dizaynın çok önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle vorteks akış kullanılan cihazların verimli, ekonomik ve güvenilir bir tasarımı için, her bir vorteks üretme sistemine ait vorteks akış karakteristiklerinin iyi belirlenmesi ve ayrıca bu karakteristikler üzerine sistem geometrisinin ve çalışma koşullarının etkilerinin saptanması büyük önem taşımaktadır (Nabhani, 1989). Bu çalışmanın amacı, tek eğimli sıcak tel probu için geliştirilen çok pozisyonlu sıcak-tel yöntemini kullanarak vorteks borusunun hidro dinamik karakteristiklerini araştırmaktır. Farklı orifis çapı ve farklı debiler kullanılarak vorteks borusu geometrisinin ve akış debisinin vorteks akış karakteristiklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

## **VORTEKS TÜPLERİN SICAK TEL ANEMOMETRE KULLANILARAK İNCELENMESİ**

Vorteks tüp içerisindeki basınç, sıcaklık ve hız dağılımlarının incelenmesi için kullanılan akış inceleme yöntemlerinden bazısı, akışı incelemek için problemlerin tüpe girmesini gerektirirken (basınç problemleri, sıcak tel anemometresi), diğerleri (akış görüntüleme yöntemi, lazer doppler hız ölçer, parçacık görüntü hız ölçeri, nümerik yöntemler ve *CFD* analizi) bunu gerektirmemektedir. Akışı incelemek için problemlerin tüpe girmesini gerektiren geleneksel yöntemlerin kullanımında, çeşitli problemler oluşmaktadır (Baydar ve Onur, 1992; Cockerill, 1995; Volchkov *vd.*, 2004):

- (i) Farklı problemlerin akışa yerleştirilmesi, akış yapısının bozulmasına ve gerçek akış karakteristiklerinin değişmesine neden olmaktadır.
- (ii) Subkritik akışlarda atalet dalgaları probun önünde ve arkasındaki tüm akış profilini bozmaktadır.
- (iii) Akışın çok dönmesi kendi iz bölgesinden etkilenmesine neden olmakta, bu da yanlış ve çok çalkantılı okumalara neden olabilmektedir.
- (iv) Katı yüzeylere çok yakın bölgelerde ölçüm yapma zorluğu vardır.

Pitot tüpü ve sıcak tel yöntemleri vorteks tüplerinde hız ölçümleri için kullanılabilir. Silindirik Pitot Tüpü (*CPT*) teknikleri sadece ortalama hız bileşenlerini bulmak için kullanılabilir ve sadece hızın iki bileşeni belirlenebilir. Sıcak tel yöntemleri ise ortalama hızların yanında çalkantı bileşenlerini de bulmak için kullanılabilir. *CPT*'yi akış alanına yerleştirme vorteks tüpün

içerisindeki akışı etkileyebilir ve hatalar oluşturabilir. Gao (2005)  $\rho V_e$  terimindeki deneysel hatanın % 4 olduğunu belirlemiştir. Tek problu sıcak tel anemometresiyle radyal hız bileşeni  $V_r$  ölçülürken belirsizliğin yaklaşık % 10 olduğu belirlenmiştir. *CPT* ile ölçülen Mach sayısında tipik hata %15'den daha az, tek problu sıcak tel anemometresinde %5'den daha az, termoçift hatası ise %1'den daha az bulunmuştur (Gao, 2005).

Akışı incelemek için problemlerin tüpe girmesini gerektiren geleneksel yöntemlerin oluşturduğu zorlukları ortadan kaldırmanın yolu, akış profilini incelemek için akışa yerleştirilmeyen modern yöntemler kullanmaktır. Bunlar arasında için *parçacık görüntü hız ölçeri (PIV, particle image velocimetry)*, *lazer doppler hız ölçer (LDA, laser-doppler anemometry)* ve *kızılötesi kamera* sayılabilir. Bu yöntemlerin şu özellikleri vardır (Nabhani, 1989; Cockerill, 1995; Volchkov vd., 2004):

- Araştırmaların doğruluğunda önemli artışlar meydana gelmektedir.
- Akışı bozmasına rağmen, vorteks akış kapalı bir akış olduğundan tüplerin eğrisel yüzeyleri imaj problemlerinin oluşmasına neden olmaktadır.
- Optik ışın ile vorteks tüpün eğrisel yüzeylerinin etkileşmesi sonucu oluşan imaj problemlerini engellemek için vorteks tüplerin/odalarının tüm uzunluğu boyunca düzlem optik camların yerleştirilmesi gibi önlemler alınabilmektedir.

### Sıcak Tel Yöntemi Kullanılarak Hızların Ölçülmesi

Vorteks tüplerdeki akış üç boyutludur. Bu üç ortalama hız bileşenlerini ve bunlara ait çalkantı hız bileşenlerini ölçmek için kullanılacak temel iki sıcak-tel anemometre yöntemi bulunmaktadır (Fitouri vd., 1995):

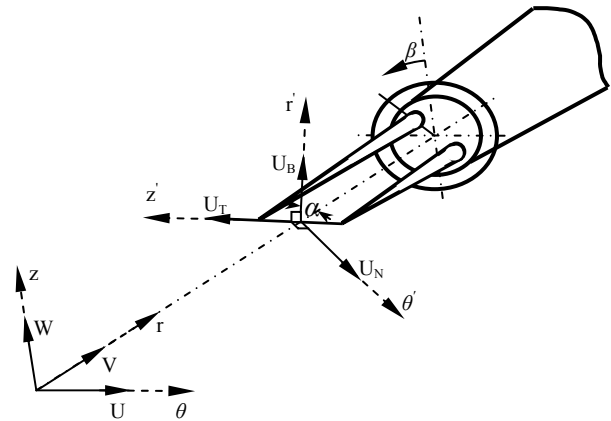
- Çok problu yöntemler: Bu yöntemlerde üç veya dört telli problemler kullanılır. Bu yöntemin iki dezavantajı vardır. Bu dezavantajlardan birincisi; çoklu problemlerin tek telli problemlerden oldukça daha kompleks olmasıdır. Çünkü üç ani sıcak tel voltajlarını değerlendirmek için nispeten gelişmiş sinyal işleme elektronik sistemi gereklidir. Dezavantajlardan ikincisi; vorteks tüplerdeki akış çalışmalarında birincisinden daha önemli olanı, prob gövdesinin ve çoğu çatalının boyutunun akış alanını önemli şekilde etkilemesi ve bozmasıdır.
- Çok yönlü (çok pozisyonlu) yöntemler: Bu yöntemlerde ise tek telli veya  $X$  telli sıcak tel probu kullanılır. Bu yöntemlerin avantajı ise (i) şıkında belirtilen probun akımı bozucu etkilerinin büyük oranda azalmasıdır.

Bu çalışmada, vorteks tüpündeki hız karakteristiklerini elde etmek için çok pozisyonlu sıcak tel yöntemi kullanıldığından bu yöntemin ana hatları aşağıda verilmiştir. Sıcak-tel probu için en çok kullanılan yanıt denklemi

$$E^2 = A + BV_{eff}^n \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Sıcak-tel probu sinyali, genellikle Şekil 1'de görülen tel-bazlı koordinat sistemi kullanılarak değerlendirilir. Şekilde  $r-\theta-z$ , laboratuvar koordinat sistemini;  $V$ ,  $U$  ve  $W$  ise sırasıyla  $r$ ,  $\theta$  ve  $z$  koordinatlarındaki hız bileşenlerini göstermektedir.  $r'-\theta'-z'$ , tel koordinat sistemini;  $U_B$ ,  $U_N$ , ve  $U_T$  hızları ise sırasıyla  $r'$ ,  $\theta'$  ve  $z'$  koordinatlarındaki hız bileşenlerini göstermektedir.  $\alpha$  yaw açısı,  $\beta$  ise  $z\theta$  düzleminde roll (döndürme) açısıdır. Çatalı içeren düzlem " $zr$ " düzleminde olduğu zaman  $\beta$  açısı sıfır olmaktadır. Efektif hız  $\bar{V}_{eff}$  ile tel-bazlı hız bileşenleri  $\bar{V}$  arasındaki ilişki şu şekilde verilmektedir (Fitouri vd., 1995):

$$V_{eff}^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad (2)$$



Şekil 1. Vorteks tüpü ve tel bazlı koordinat sistemi.

Burada  $k$  eksen boyunca olan teğetsel hızla ilişkili olan yaw faktörünü,  $h$  ise çatal-sensör düzlemine dik hız bileşeni ile ilişkili olan pitch faktörünü göstermektedir.  $k$  ve  $h$  için yaklaşık değerler, standart prob tipleri için literatürden elde edilebilir. Bununla birlikte, daha doğru değerler kalibrasyon ile belirlenebilir.

Tel koordinat sistemine göre olan  $U_N$ ,  $U_T$ , ve  $U_B$  hızları laboratuvar koordinat sistemindeki  $V$ ,  $W$  ve  $U$  cinsinden

$$U_N = [V \cos \alpha + (W \cos \beta - U \sin \beta) \sin \alpha] \quad (3)$$

$$U_T = [(W \cos \beta - U \sin \beta) \cos \alpha - V \sin \alpha] \quad (4)$$

$$U_B = [W \sin \beta + U \cos \beta] \quad (5)$$

şeklinde yazıldıktan ve uzun süren ara işlemler yapıldıktan sonra ortalama efektif hız  $\bar{V}_{eff}$  ve efektif çalkantı hızının karelerinin ortalamasının  $\overline{v_{eff}^2}$  sırasıyla aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabileceği gösterilebilir:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{eff} &= R_1 \bar{W} + R_2 \bar{U} + R_3 \bar{V} + R_4 \frac{\bar{U}^2}{\bar{W}} \\ &+ R_5 \frac{\bar{V}^2}{\bar{W}} + R_6 \frac{\bar{U}\bar{V}}{\bar{W}} + R_7 \frac{\bar{U}^2}{\bar{W}} + R_8 \frac{\bar{V}^2}{\bar{W}} + R_9 \frac{\bar{U}\bar{V}}{\bar{W}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\overline{v_{eff}^2} &= Z_1 \overline{w^2} + \left[ Z_2 + 2Z_{10} \frac{\overline{U}}{\overline{W}} + Z_{12} \frac{\overline{V}}{\overline{W}} \right] \overline{u^2} \\
&+ \left[ Z_3 + Z_{13} \frac{\overline{U}}{\overline{W}} + 2Z_{15} \frac{\overline{V}}{\overline{W}} \right] \overline{v^2} \\
&+ \left[ Z_4 + 2Z_7 \frac{\overline{U}}{\overline{W}} + Z_8 \frac{\overline{V}}{\overline{W}} \right] \overline{wu} \\
&+ \left[ Z_5 + Z_8 \frac{\overline{U}}{\overline{W}} + 2Z_9 \frac{\overline{V}}{\overline{W}} \right] \overline{vw} \\
&+ \left[ Z_6 + Z_{11} \frac{\overline{U}}{\overline{W}} + Z_{14} \frac{\overline{V}}{\overline{W}} \right] \overline{uv}
\end{aligned} \quad (7)$$

$R_1$ - $R_6$  ve  $Z_1$ - $Z_{15}$  katsayıları Fitouri vd. (1995)'de bulunabilir.

### Ölçme ve Çözüm Yöntemleri

Ölçümler tek telli-eğimli (55P02) sıcak-tel probuyla 10 oryantasyonda yapılmıştır:  $\beta=45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ$  ve  $315^\circ$ . Her bir pozisyonda probdan gelen sinyal online olarak bilgisayara iletilmiştir. Ölçülen  $\overline{V_{eff}}$  sinyalinin zamana bağlı değişiminden, buna karşılık gelen ortalama değer ve standart sapma aşağıdaki denklemlerden hesaplanmıştır:

$$\overline{V_{eff}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{eff}(i) \quad (8)$$

$$\overline{v_{eff}^2} = \frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{i=1}^N V_{eff}^2(i) - N \overline{V_{eff}}^2 \right\} \quad (9)$$

Ölçümler yapıldıktan sonra,  $\overline{V_{eff}}$  için 10 değer ve  $\overline{v_{eff}^2}$  için 10 değer elde edilmiş ve bu değerler ileri analiz için bilgisayara gönderilmiştir.

### Reynolds Gerilmeleri için Çözüm

(7) denklemini yeniden şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned}
\overline{v_{eff}^2} &= A_i \overline{w^2} + B_i \overline{u^2} + C_i \overline{v^2} + D_i \overline{wu} \\
&+ E_i \overline{vw} + F_i \overline{uv}
\end{aligned} \quad (10)$$

Buradaki  $\overline{v_{eff}^2}$  ile  $\overline{U/\overline{W}}$  ve  $\overline{V/\overline{W}}$  terimlerini içeren  $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i$  ve  $F_i$  düzeltme katsayıları bilinen terimlerdir ve  $i$  indisi bu katsayıların  $\beta$  roll açısının fonksiyonu olduğunu gösterir. Matris yöntemini kullanarak Reynolds gerilmelerini çözmek için sadece 6 oryantasyon gerekmesine rağmen, hesaplamalar ayrıca en küçük kareler yöntemi için 8 (farklı kombinasyonlarla) ve 10 oryantasyon açısını kullanarak

yapılmıştır. 6 oryantasyon açıları için tipik set denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & E_1 & F_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 & E_2 & F_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 & E_3 & F_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 & E_4 & F_4 \\ A_5 & B_5 & C_5 & D_5 & E_5 & F_5 \\ A_6 & B_6 & C_6 & D_6 & E_6 & F_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{w^2} \\ \overline{u^2} \\ \overline{v^2} \\ \overline{wu} \\ \overline{vw} \\ \overline{uv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{v_{eff,1}^2} \\ \overline{v_{eff,2}^2} \\ \overline{v_{eff,3}^2} \\ \overline{v_{eff,4}^2} \\ \overline{v_{eff,5}^2} \\ \overline{v_{eff,6}^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(11) denkleminin çözümü 6 Reynolds gerilmesini verir. 6 Reynolds gerilmesinin ilk değerleri yaklaşık değerlerdir; çünkü (10) denklemini düzeltilmemiş teğetsel ortalama hızı  $\overline{W}$  içermektedir. Bununla beraber Reynolds gerilmelerinin son değerleri iteratif olarak hesaplanır. Kısaca çözüm yöntemi 6 Reynolds gerilmesi bileşenlerini bulmak için bir matris ve en küçük kareler yönteminin kullanılmasını içermektedir.

### Ortalama Hız Bileşenlerinin Ayrı Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, prob gövdesi esas akış yönüne diktir ve bunun sonucu olarak  $\beta$  ile birlikte  $R_1$  ve  $R_6$  katsayılarında farklı değişimler oluşur. Denklem (6)'daki  $R_1$  ve  $R_6$  katsayılarını değerlendirerek ve  $\beta=45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 300^\circ$  roll (döndürme) değerleri alınarak aşağıda verilen toplama ve fark bağıntıları bulunabilir:

$$\overline{V_{eff,270}} - \overline{V_{eff,90}} = \frac{(1-k^2) \sin^2 \alpha}{h} \left[ \frac{\overline{U\overline{V}}}{\overline{W}} + \frac{\overline{uv}}{\overline{W}} \right] \quad (12)$$

$$\overline{V_{eff,-45}} - \overline{V_{eff,45}} = c_1 \overline{U} + c_2 \left[ \frac{\overline{U\overline{V}}}{\overline{W}} + \frac{\overline{uv}}{\overline{W}} \right] \quad (13)$$

$$\overline{V_{eff,300}} - \overline{V_{eff,60}} = c_3 \overline{U} + c_4 \left[ \frac{\overline{U\overline{V}}}{\overline{W}} + \frac{\overline{uv}}{\overline{W}} \right] \quad (14)$$

$$\overline{V_{eff,240}} - \overline{V_{eff,60}} = c_5 \overline{V} + c_6 \left[ \frac{\overline{U\overline{V}}}{\overline{W}} + \frac{\overline{uv}}{\overline{W}} \right] \quad (15)$$

$$\overline{V_{eff,300}} - \overline{V_{eff,120}} = c_7 \overline{V} + c_4 \left[ \frac{\overline{U\overline{V}}}{\overline{W}} + \frac{\overline{uv}}{\overline{W}} \right] \quad (16)$$

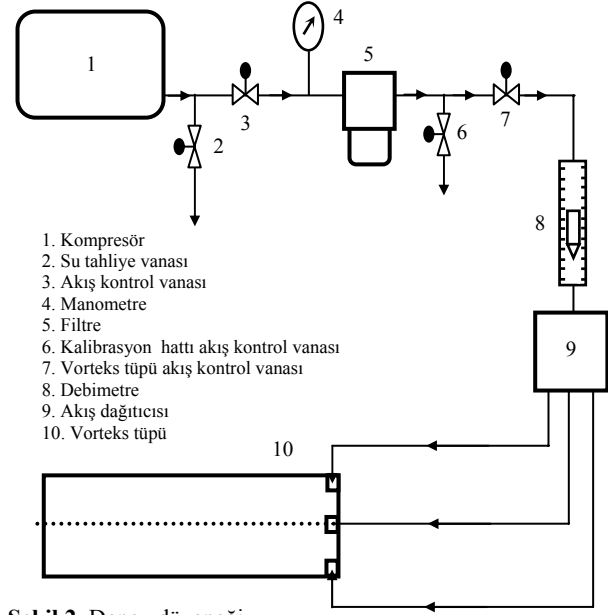
$$\bar{V}_{eff,270} + \bar{V}_{eff,90} = \frac{I}{h} \left[ \begin{array}{l} 2h^2 \bar{W} \\ + (\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha) \frac{\bar{U}^2}{\bar{W}} \\ + (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) \frac{\bar{V}^2}{\bar{W}} \\ + (\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha) \frac{\bar{u}^2}{\bar{W}} \\ + (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) \frac{\bar{v}^2}{\bar{W}} \end{array} \right] \quad (17)$$

Bu denklemlerdeki  $c$  katsayıları ve bu yöntemi kullanarak ortalama hızları bulma aşamaları Kaya (2005)'de bulunabilir.

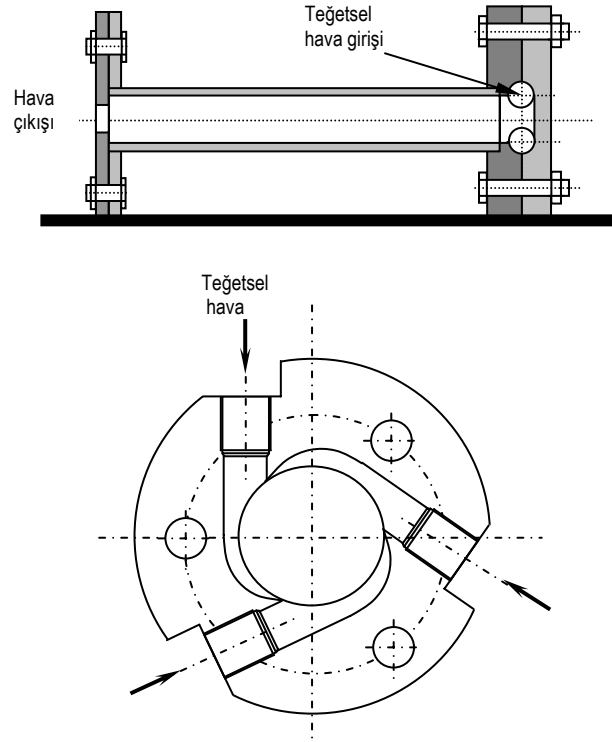
## DENEY DÜZENEGİ VE DENEYSEL YÖNTEM

### Deney Düzenegi

Şekil 2 deney düzenegini göstermektedir. Deney için gerekli havayı, 20 bar basınca kadar hava sıkıştırma kapasitesine sahip olan kompresör (1) temin etmekte, havanın depolanması esnasında oluşacak suyu tahliye etmek için ise kompresörün en altında bir su tahliye vanası (2) bulunmaktadır. Kompresörün çıkışında hava debisini ayarlamak için kontrol vanası (3) ve hava basıncını ölçen bir Bourdon tipi bir manometre (4) kullanılmıştır. Vorteks tüpüne ve kalibrasyon ünitesine gönderilen havada bulunan toz, yağ ve su partiküllerinin filtrelenmesini sağlamak amacıyla manometreden sonra bir hava filtresi (5) kullanılmıştır. Havanın debisi filtreden sonra monte edilmiş olan bir rotametre (8) ile ölçülmüştür. Vorteks tüpünün girişinde 3 adet teğetsel giriş lülesi kullanıldığından, kompresörden gelen hava debisinin 3 eşit debiye ayrılarak bu teğetsel lülelere girmesi gerekmektedir. Bunun için çevresinde 120°'lik aralıklarla açılmış 3 delik bulunan akış dağıtıcısı (9) kullanılarak havanın üç eşit debiye bölünmesi sağlanmış ve böylece simetrik vorteks akış elde edilmiştir. Vorteks tüpü (10); 80 cm boyunda, 89 mm iç çapında ve içi pürüzsüz olan bir borudur. Hava dağıtıcısında üç eşit debiye ayrılarak çıkan hava, vorteks tüpüne 3 teğetsel lüle vasıtasıyla girmektedir (Şekil 3). Bu lüleler, vorteks tüpünün hava giriş kısmına monte edilen iki adet flanşın içerisine 120°'lik aralıklarla açılan 23 mm çapında, boru eksenine tam 90° teğet olan hava giriş kanallarından oluşmaktadır. Vorteks tüpüne, 9 tanesi hız ölçümü için 1 tanesi ise sıcaklık ölçümü için olmak üzere toplam 10 tane delik açılmıştır. Vorteks borusundaki hız dağılımını bulmak için açılan bu 9 ölçüm istasyonu Şekil 3'de gösterilmiştir. Vorteks tüpünün çıkış tarafında ise çıkış orifisi bulunmaktadır. Vorteks akış hız karakteristikleri üzerine çıkış orifisinin etkisini araştırmak amacıyla, vorteks tüpünün çıkış tarafında kolayca sökülüp takılabilen dört adet (20, 40, 60 ve 89 mm çaplarında) orifis kullanılmıştır.



Şekil 2. Deney düzenegi.



İstasyon (Ölçüm Noktaları)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vorteks borusu girişinden olan uzaklık (cm)	2	10	18	26	34	42	50	58	66

Şekil 3. Vorteks tüpü ve ölçüm noktaları.

### DeneySEL Yöntem

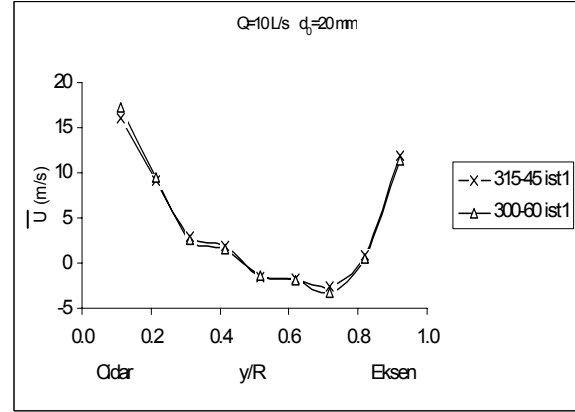
20 mm çapındaki hava çıkış orifisi deney ünitesine takılmış ve travers ünitesi, CTA ünitesi ve osiloskob, bilgisayarla bağlantıları sağlanarak deneye başlamak için hazır hale getirilmişlerdir. Hava debisi 5 L/s'ye ayarlanmış ve sistem çalıştırılarak kararlı duruma gelinceye kadar beklenmiştir. Tek telli-eğimli 55P02

sıcak-tel probu otomatik olarak radyal doğrultuda ilerletilmiş ve kendi eksenini etrafında  $\beta = 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ$  ve  $315^\circ$  roll (döndürme) açılarında döndürülmesi sağlanarak hız ölçümleri yapılmıştır. İlk radyal pozisyon vorteks tüpünün cidarından 5 mm içeride seçilmiştir. Bunun nedeni cidar etkilerini en aza indirmektir. Daha sonra 4.5 mm aralıklarla radyal yönde boru eksenine doğru toplam 9 noktada ölçümler alınarak boru eksenine 3.5 mm kala ölçümler tamamlanmıştır. Boru merkezine 3.5 mm kala ölçümlerin tamamlanmasının nedeni, boru merkezi yakınında oluşan yüksek türbülans şiddeti ve bu bölgede alınan datanın güvenilir olmamasıdır (Nabhani, 1989). Böylece bir aksel istasyon için belli bir debi ve belli bir çıkış orifis çapında cidardan boru eksenine doğru 10 (döndürme açısı) x 9 (ilerleme noktası) olmak üzere toplam 90 adet hız ölçümü yapılmıştır. Daha sonra bu işlemler diğer 8 aksel ölçüm istasyonları için tekrarlanmış ve bu istasyonların her birisi için boru cidarından boru eksenine doğru olan istasyonlara ait hızlar ölçülmüştür. Bu işlemler sırasıyla 10 ve 15 L/s debi değerleri için de tekrarlanmıştır. Daha sonra vorteks tüpünden 20 mm çaplı orifis çıkarılmış ve sırasıyla 40, 60 ve 89 mm hava çıkış orifisleri takılarak bu aşamaya kadar yapılan işlemler bu orifisler için de tekrarlanmıştır. Deney düzeneği ve deney yöntemi ile ilişkili ayrıntılı bilgi Kaya (2001, 2005)'de bulunabilir.

## DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### İlk Ölçümler ve Doğrulama Deneyleri

Akış cihazları ve ölçme aletlerinin doğru çalıştığını kontrol etmek için doğrulama deneyleri yapılmıştır. 20 mm çapındaki çıkış orifisi sisteme takılmış ve debi 10 L/s değerine ayarlanmıştır. 55P02 tek-eğimli sıcak-tel probu, ilk aksel istasyona yerleştirilip kendi eksenini etrafında döndürülerek önce  $315^\circ$  ve  $45^\circ$  açılarında ortalama efektif hızlar ( $\bar{V}_{eff,315}$  ve  $\bar{V}_{eff,45}$ ) daha sonra ise  $300^\circ$  ve  $60^\circ$  açılarında ortalama efektif hızlar ( $\bar{V}_{eff,300}$  ve  $\bar{V}_{eff,60}$ ) elde edilmiştir.  $\bar{V}_{eff,315}$  ve  $\bar{V}_{eff,45}$  ortalama efektif hızları (13) denklemde,  $\bar{V}_{eff,300}$  ve  $\bar{V}_{eff,60}$  hızları ise (14) denklemde kullanılarak iki ortalama aksel hız değeri ( $\bar{U}$ ) bulunmuştur. Bulunan aksel ortalama hız değerleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Şeklin incelenmesi, her iki aksel hız değerlerinin birbiriyle tam uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Doğrulama deneyleri diğer 8 aksel istasyon için de yapılmış ve iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak ölçüm yönteminin doğru olduğu ve ölçüm cihazlarının doğru ölçüm yaptığı ifade edilebilir. Aynı doğrulama yöntemi Fitouri vd. (1995) tarafından da kullanılmıştır.

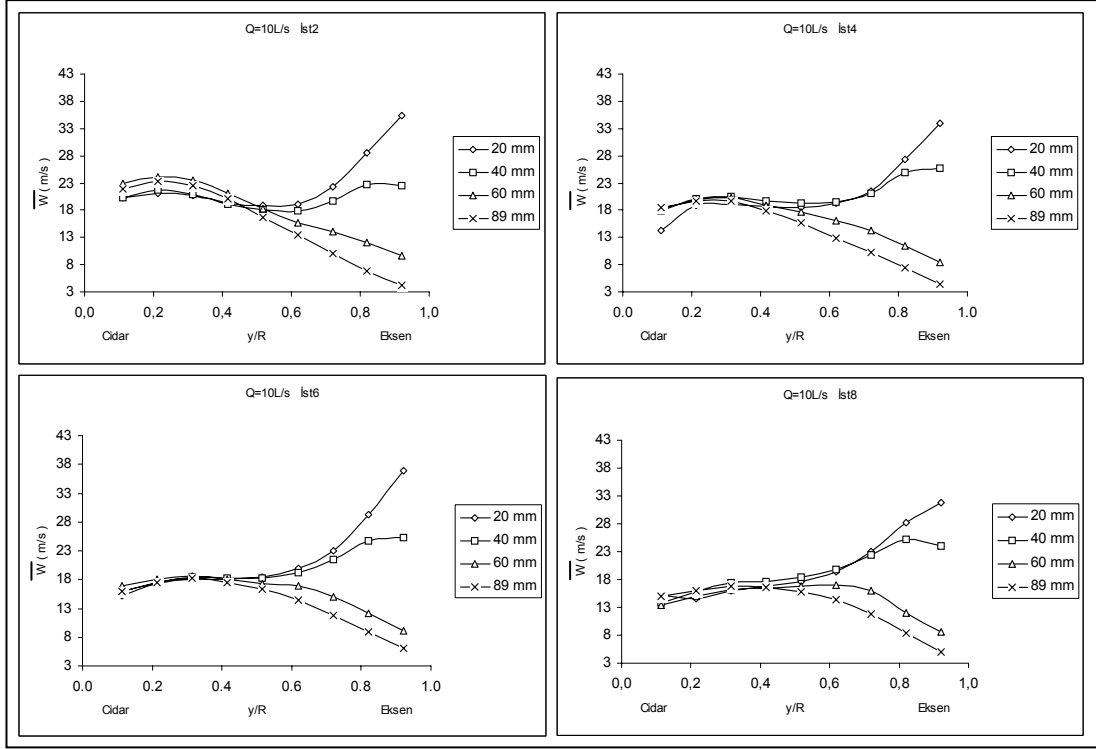


Şekil 4. Birinci aksel istasyonda ortalama aksel hız ( $\bar{U}$ ) profilleri.

### Ortalama Teğetsel Hız ( $\bar{W}$ ) Dağılımına Çıkış Orifis Çapının Etkisi

20, 40, 60 ve 89 mm orifis çıkış çapları için elde edilen teğetsel hız ( $\bar{W}$ ) profilleri Şekil 5'de görülmektedir. Sabit çıkış orifis çapı için ortalama teğetsel hız profilleri benzer akış desenleri göstermiştir. Ortalama teğetsel hız tüm akışkan debisi ve çıkış orifis çaplarında hiçbir zaman negatif olmamıştır. 60, 89 mm gibi büyük çıkış orifis çaplarında teğetsel hız, vorteks tüpünün merkezinden itibaren yaklaşık  $y/R=0.30$  radyal pozisyonuna kadar artmakta, bu nokta civarında ise maksimum olmaktadır. Bu bakımdan, ortalama teğetsel hızın, büyük çıkış orifis çaplarında, bir tipik zorlanmış vorteks biçiminde olduğu ifade edilebilir. Maksimum ortalama teğetsel hızın bulunduğu noktadan sonra cidara doğru gidildikçe teğetsel hızın değeri azalmaktadır. Teğetsel hızın maksimum olduğu bu noktadan itibaren vorteks akışın serbest vorteks (potansiyel vorteks) şeklinde olduğu ifade edilebilir.

20, 40 mm gibi küçük çıkış orifis çaplarında, büyük orifis çaplarında elde edilen teğetsel hız profillerinin oldukça farklılaştığı görülmektedir. Küçük çıkış orifis çaplarında maksimum teğetsel hız boru merkezi yakınında yaklaşık  $y/R=0.9$  radyal pozisyonda gerçekleşmiştir. Bu maksimum değerden sonra cidara doğru gidildikçe teğetsel hızın değerinin genel olarak azaldığı görülmektedir. Bu gözlemlerden, bazı küçük farklılıklara rağmen küçük orifis çaplarında oluşan vorteks yapısının boru merkezinden cidara doğru genişleyen bir potansiyel ya da serbest vorteks profili olduğu söylenebilir. Büyük çıkış orifis çaplarında sadece boru cidarı yakınında oluşan serbest vorteks akışın, küçük çıkış orifis çaplarında neredeyse boru merkez hattının yakınına kadar genişlemekte olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Sabit debi için çıkış orifis çaplarının ortalama teğetsel hız ( $\bar{W}$ ) dağılımına etkisi.

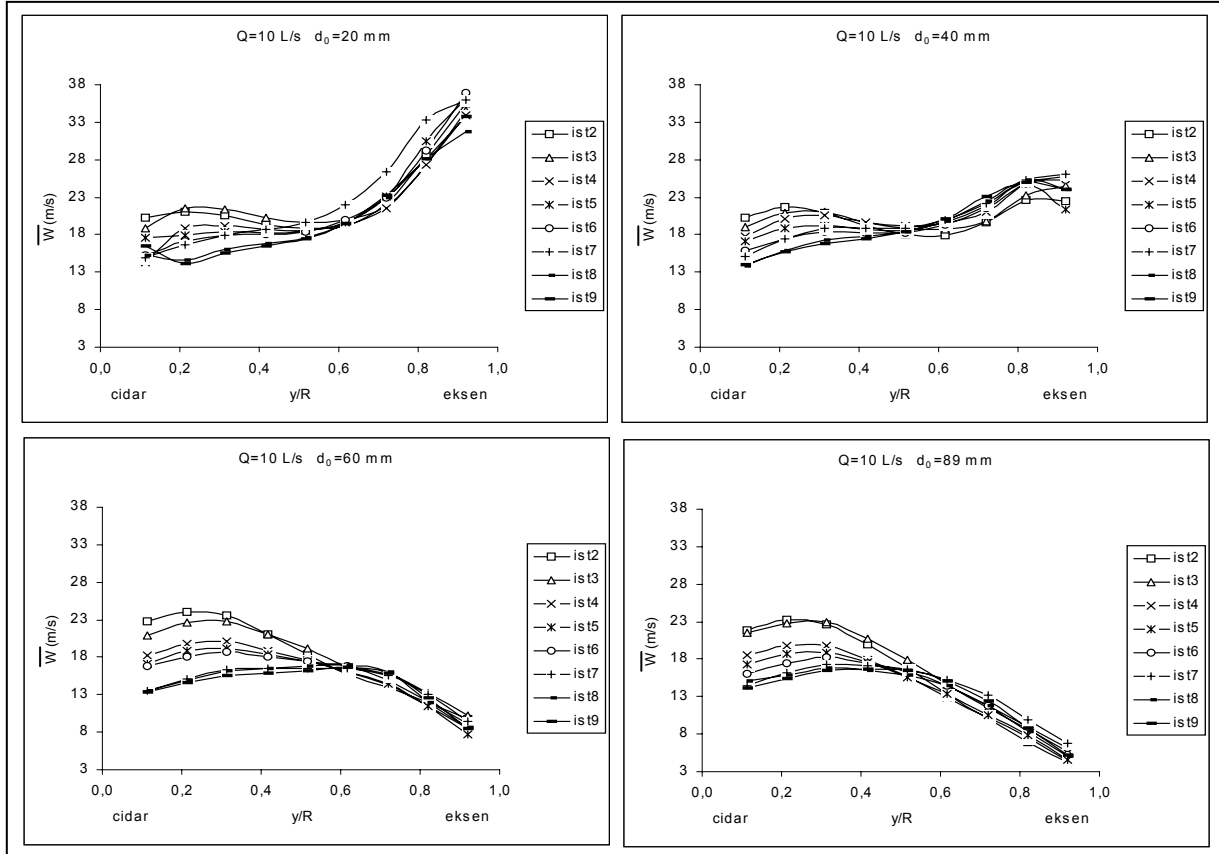
### Ortalama Teğetsel Hız ( $\bar{W}$ ) Eksenel Gelişimi

Şekil 6'da çeşitli istasyonlar için verilen teğetsel hız eğrilerinin birbirlerinden uzaklaşması teğetsel hızın eksenel uzaklığa bağlı olduğunu ifade etmektedir. Ortalama teğetsel hızın vorteks tüpünün cidara yakın kısımlarında eksenel uzunluğa daha bağımlı olduğu, buna karşın tüpün merkezine doğru ilerledikçe ortalama teğetsel hızın eksenel pozisyona bağlı olmadığı gözlemlenmiştir. Küçük orifis çaplarında ( $d_0=20$  ve  $40$  mm) cidardan itibaren yaklaşık  $y/R=0.40$  radyal pozisyonuna kadar ortalama teğetsel hızda küçük değişimler olduğu,  $y/R=0.40$  radyal pozisyonundan sonra ise ortalama teğetsel hızın eksenel pozisyona bağlı olmadığı görülmektedir. Benzer değişimlerin büyük orifis çapları ( $d_0=60$  ve  $89$  mm) için de geçerli olduğu bulunmuştur. Tüm bu sonuçlardan vorteks gücünün vorteks tüpü boyunca hemen hemen sabit olduğu çıkarılabilir. Ortalama teğetsel hızın eksenel gelişimiyle ilgili literatürdeki çalışmalara bakıldığında Ogawa (1984), Vatistas vd. (1986), Nabhani (1989) ve Fitouri vd. (1995) de ortalama teğetsel hızın eksenel uzunluğunun fonksiyonu olmadığını ve vorteks gücünün vorteks tüpü boyunca hemen hemen sabit olduğunu ifade etmişlerdir.

### Ortalama Teğetsel Hız ( $\bar{W}$ ) Dağılımının Diğer Araştırma Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Holman ve Moore (1961) paralel akışlı vorteks tüpünde teğetsel hız profillerinin  $Wr^n = c$  bağıntısına göre modellenebileceğini göstermişlerdir. Bu ise Rankine vorteks profilinin iç kısımlarına çok benzemektedir.

Chang ve Dhir (1994) sınırlandırılmış vorteks akışta Rankine tip vorteksin şiddetinin akış ilerledikçe eksponansiyel olarak sönmüldüğünü ve giriş hariç silindirik kanalın çoğu kısmında bu yapının oluştuğunu belirlemiştir. Eksenel hızların teğetsel hızlarla benzer büyüklükte olduğunu ve eksenin yakınında küçük bir ters akış bölgesi oluştuğunu ve girişten itibaren bu bölgenin gittikçe küçüldüğünü gözlemlemiştir. Ayrıca radyal akışın içe doğru oluştuğu ve maksimum teğetsel hızın %1'inden daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar ve literatürde bu çalışmada da kullanılan vorteks odalarıyla ilişkili araştırmalar tarandığında, tüp içerisindeki vorteks akış alanının tipik olarak 4 bölgeye ayrıldığı görülür (Hartnett ve Eckert, 1957; Lay, 1959; Nissan ve Bresan, 1961; Scott ve Rask, 1973; Razgaitis ve Holman, 1976; Yapıcı, 1992; Yılmaz, 1996; Cockerill, 1995): zorlanmış vorteks (katı cisim dönmesi) bölgesi, serbest vorteks (potansiyel vorteks) bölgesi, geçiş (birleşik vorteks) bölgesi ve sınır tabaka bölgesi. Bu bölgelerin özellikleri kısaca şu şekilde özetlenebilir: (i)- Zorlanmış vorteks bölgesinde teğetsel hız daima  $W = Cr^n$  ( $0 \leq n \leq 1$ ) bağıntısına göre artan çapla artar; (ii)- Serbest vorteks bölgesinde ise teğetsel hız daima  $W = Cr^n$  ( $-1 \leq n \leq 0$ ) bağıntısına göre artan çapla azalır; (iii)- Geçiş (birleşik vorteks) bölgesi genellikle maksimum teğetsel hızın yerini içerir; (iv)- Sınır tabaka bölgesinde ise teğetsel hız gradyanı negatiftir ve cidardaki tüm hız bileşenleri sıfırdır. Şekil 5 ve 6'nın incelenmesi sonucunda büyük orifis çapları için ortalama teğetsel hız profillerinin Rankine vorteksi veya Birleşik vorteksi andırdığı görülebilir. Rankine vorteks yapısında dış cidar bölgesinde potansiyel veya serbest vorteks mevcut iken belirli bir radyal pozisyonda ( $r_0$ ) hız profili zorlanmış vortekse dönüşür.



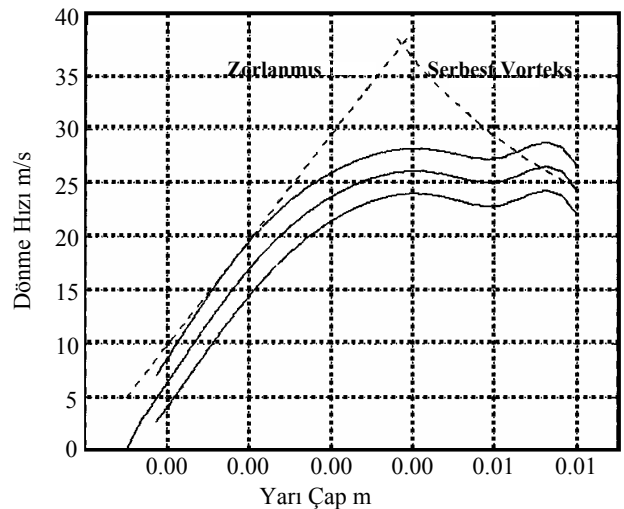
Şekil 6. Ortalama teğetsel hızın ( $\bar{W}$ ) aksenal gelişimi.

Zorlanmış vorteks bölgesi ise bu radyal pozisyonlardan vorteks tüpünün eksenine kadar devam eder. Rankine vorteksi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} W &= cr^n & 0 \leq n \leq 1 & \quad r < r_0 \\ W &= cr^n & -1 \leq n \leq 0 & \quad r > r_0 \end{aligned} \quad (18)$$

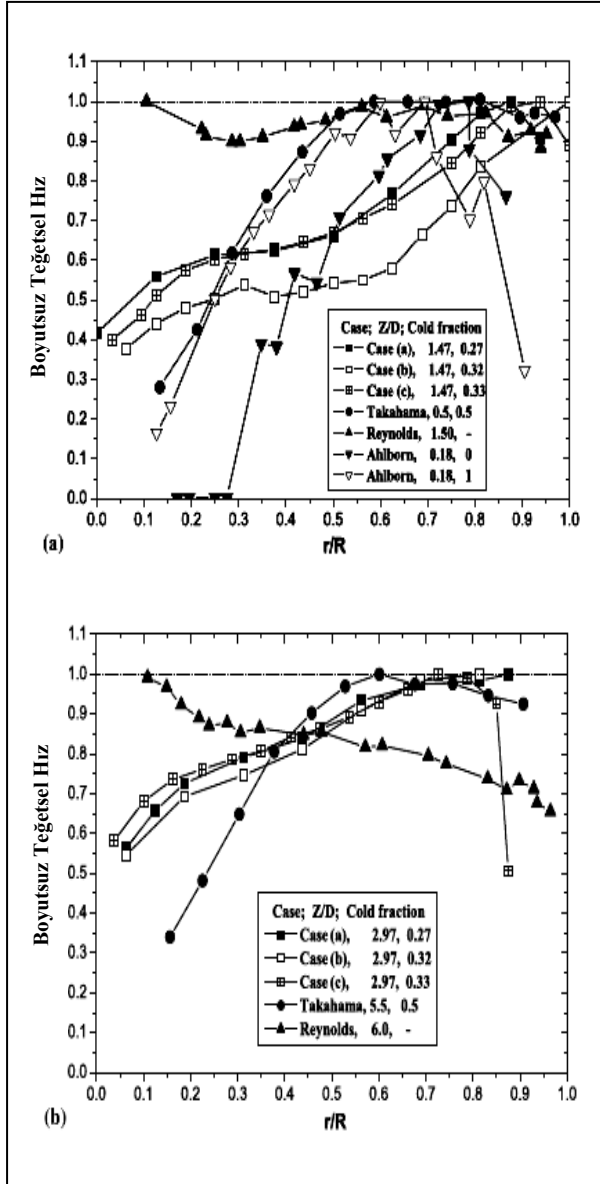
Şekil 7’de Cockerill’in (1995) CUED vorteks tüpünde bulunduğu teğetsel hız dağılımı gösterilmiştir. Şekilde üst ve alt katı çizgiler hız dağılımının limitlerini göstermekte ortadaki çizgi ise ortalama değerleri vermektedir. Kesikli çizgiler ise hız dağılımındaki üst limitin bir Rankine tip vorteks olarak modellenebileceğini göstermektedir. Şekil 8a-b’de Reynolds (1962), Takahama (1965), Takahama ve Soga (1966), Ahlborn vd. (1994, 2000) ve Gao (2005) tarafından çeşitli vorteks tüplerinde bulunan boyutsuz teğetsel hız dağılımları gösterilmiştir (Gao, 2005). Bu grafikten çıkarılabilecek temel sonuçlar şunlardır: (i) Profiller arasında farklılıklar olmasına rağmen, genel olarak, profilin dış yarıçap civarında yani cidara yakın bölgede maksimum oluşturdukları görülmektedir. Vorteks tüpünün merkezinde yüksek hızlar gösteren Reynolds’un sonuçları bu sonuçlardan farklıdır. Bunun nedeni vorteks sütununun osilasyonu olabilir. (ii) Giriş yakınında teğetsel hız dağılımı katı-cisim vorteksini andırmaktadır. Akış ilerledikçe bu dağılım Rankine vorteksine dönüşmektedir. (iii) Vorteks tüpü içerisindeki akış profilinin ikincil sirkülasyon gösterdiği

belirlenmiştir. Profillerdeki farklılıkların nedeni vorteks tüplerinin boyutlarının, lüle sayılarının, ve kullanılan basınç problemlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarını direkt olarak bu sonuçlarla karşılaştırmak doğru olmayabilir. Çünkü bu çalışmada tek çıkışı olan vorteks odası kullanılmıştır. Bununla birlikte sonuçlara ait ortak noktanın borunun içerisinde Rankine tip vorteksin oluşmasının olduğu ifade edilebilir (Şekil 5 ve 6).



Şekil 7. Vorteks tüpündeki teğetsel hız dağılımı (Cockerill, 1995).





Şekil 8. Boyutsuz teğetsel hızların karşılaştırılması (Gao vd., 2005).

### Ortalama Eksenel Hız ( $\bar{U}$ ) Dağılımına Çıkış Orifis Çapının Etkisi

Tüm çıkış orifis çapları için eksenel hız dağılımı incelendiğinde (Şekil 9), maksimum eksenel hızın boru cidarı yakınında olduğu, radyal doğrultuda boru eksenine doğru eksenel hızın azaldığı ve yaklaşık  $y/R=(0.4-0.9)$  olan radyal bölgede eksenel hızın negatif değerler aldığı görülmektedir. Ortalama eksenel hızın negatif değerler alması ters akışın oluştuğunu ve akışın vorteks tüpün girişine doğru yönlendiği anlamına gelir. Eksenel hız, yaklaşık  $y/R=0.7$  radyal pozisyonunda minimum değere ulaşmakta ve  $y/R=0.9$  radyal pozisyonundan sonra boru eksenine kadar olan bölgede durma noktasına eriştikten sonra tekrar pozitif değerler almaktadır. Genel olarak ortalama eksenel hız dağılımı için çıkış orifis çapı değiştiğinde, radyal doğrultuda ortalama eksenel hızda önemli değişiklikler gözlenmediği, ortalama eksenel hızın tüm çıkış orifis

çapları için benzer profiller oluşturduğu söylenebilir. Eksenel hız profillerinin bu karakteri Rankine tip vorteks yapısına bağlanabilir. Rankine tip vorteks yapısında baskın basınç gradyenti radyal yönde oluşmaktadır. Bu, akışkan partiküllerinin dairesel hareketi için merkezci ivme oluşturmada ve böylece eksene yakın bölgelerde düşük basınç, çevresel bölgede ise yüksek basınç oluşmaktadır. Ayrıca vorteks tüpünün girişi ile çıkışı arasında ikincil bir basınç gradyenti oluşmaktadır. Borunun çevresinde bu basınç gradyenti pozitif olmakta ve akışı eksenel olarak çıkışa yönlendirmektedir. Bu eksenel basınç gradyenti ve vorteks yapının oluşturduğu radyal basınç gradyenti birlikte borunun eksenel yakınlarında ters bir basınç gradyenti oluşturmada ve böylece borunun eksenel yakınlarında ters akış bölgesi meydana gelmektedir (Cockerill, 1995).

Ortalama eksenel hızlar ile ilgili olarak ayrıca bu hızların daima teğetsel hız bileşenlerinden küçük çıkmakta olduğu belirlenmiştir. Bu ise vorteks tüplerdeki akışın genel bir karakteristiğidir (Nabhani, 1989; Fitouri vd., 1995; Cockerill, 1995).

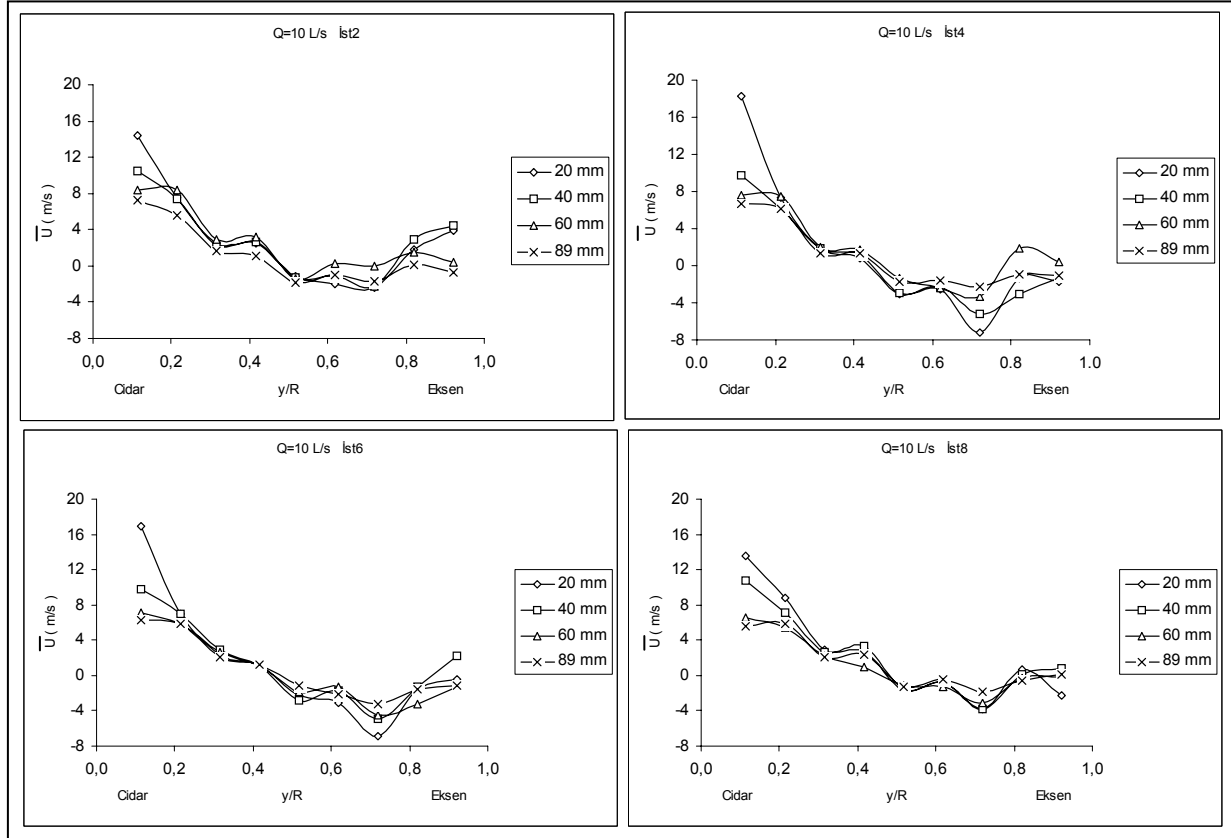
### Ortalama Eksenel Hızın ( $\bar{U}$ ) Eksenel Gelişimi

Ortalama eksenel hızın boru uzunluğu boyunca olan eksenel değişiminin genel olarak küçük olduğu belirlenmiştir. Başka bir deyişle ortalama eksenel hız, eksenel uzunluğa çok az bağlıdır. Sönümlenmeli vorteks akış için tüm araştırmacılar, teğetsel hız dağılımının eksenel değişiminin, eksenel hız dağılımının eksenel değişiminden oldukça büyük olduğunu bulmuşlardır. Özel olarak deney sistemi bu çalışmayla daha bir benzerlik gösteren Nabhani (1989) ve Fitouri vd. (1995)'nin vorteks tüpünde yaptıkları çalışmalarda da ortalama eksenel hızın eksenel uzunluğunun fonksiyonu olmadığına belirlendiği görülmektedir.

### Ortalama Eksenel Hız ( $\bar{W}$ ) Dağılımının Diğer Araştırma Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Literatürde vorteks odalarıyla ilgili çalışmalara bakıldığında ortalama eksenel hızın, genel olarak cidar yakınlarında maksimum değer aldığı, cidardan eksene doğru gidildikçe eksenel hızın azaldığı, belirli radyal pozisyonlarda ters akış olduğu ve daha sonra boru eksenine kadar olan bölgede ortalama eksenel hızın tekrar pozitif değerler aldığı görülmektedir (Nabhani, 1989; Fitouri vd., 1995). Bu çalışmadan elde edilen bulguların bu sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da Reynolds (1962), Takahama (1965) Takahama ve Soga (1966), Ahlborn vd. (1994, 2000) ve Gao (2005) tarafından çeşitli vorteks tüplerde bulunan boyutsuz eksenel hız dağılımları gösterilmiştir (Gao, 2005). Bu çalışmalardan; (i) maksimum eksenel hızların aynı istasyondaki maksimum teğetsel hızların



Şekil 9. Sabit debi için çıkış orifis çaplarının ( $\bar{U}$ ) ortalama eksenel hız dağılımına etkisi.

yarısından daha küçük olduğu, (ii) giriş lülesi yakınındaki istasyonda eksenel hızlar iki bölgeye ayrıldığı (yaklaşık  $0.5R$  büyüklüğünde merkezi bölge ve halkasal çevresel bölge) ve merkezi bölgedeki gazın soğuk uca, halkasal bölgedeki gazın ise sıcak uca gittiği, (iii) eksenel hızın sıfır olduğu yarıçapın yaklaşık olarak  $0.55$  olduğu, Ahlborn'un ise bu değeri  $0.35$  olarak bulduğu belirlenmiştir. Gao'nun sonuçları diğer araştırmacıların sonuçlarından özellikle Takahama'nın sonuçlarından farklılık göstermektedir. Bu farklılıkların nedeni vorteks tüplerin farklı boyutları, farklı giriş lüle sayıları ve ölçme problemlerinin farklı boyutlarından kaynaklanmaktadır. Sadece tek çıkışı olan vorteks odasında yapılan bu çalışmanın sonucunda da, eksenel hızların, teğetsel hızlardan daha küçük olduğu ve maksimum hızların boru cidarı yakınında olduğu belirlenmiştir (Şekil 9).

### Ortalama Radyal Hız Dağılımı ( $\bar{V}$ )

Ortalama radyal hız değerlerinin, teğetsel ve eksenel hız değerlerinden genel olarak daima küçük olduğu gözlemlenmiştir. Sınırlandırılmış vorteks akışta, radyal hızın çok küçük olduğu ve dizayn amaçları için genellikle ihmal edilebileceği diğer birçok araştırmacı tarafından da belirlenmiştir (Baluev ve Troyankin 1967; Nabhani 1989; Fitouri *vd.*, 1995; Volchkov *vd.*, 2004). Şekil 11'in incelenmesi, ortalama radyal hız profillerinin cidar yakınında maksimum bir pozitif değer almakta olduğunu ve boru merkezine doğru gidildikçe ortalama radyal hızın hızlı bir şekilde

düşerek negatif değerler almakta olduğunu göstermektedir. Radyal hızın pozitif değerler alması akışın radyal yönde dışa doğru akış olduğu, negatif değerler alması ise akışın radyal yönde içe dışa doğru akış olduğu yani akışın boru göbeğine doğru olduğu anlamına gelmektedir. Daha sonra yaklaşık  $y/R=0.8$  değerinden sonra bazı ölçüm noktalarında radyal hızın negatif değerinde bir azalma olmakta ve pozitif değerlere tekrar ulaşılmaktadır. Bazı ölçüm noktalarında ise radyal hızın negatif değerinde artış olmaktadır. Pozitif ortalama radyal hızın en yüksek olduğu çıkış orifisinin çapı en küçük olan çıkış orifisi, pozitif ortalama radyal hızın en küçük olduğu çıkış orifisinin ise çapı en büyük olan çıkış orifisi olduğu gözlemlenmiştir.

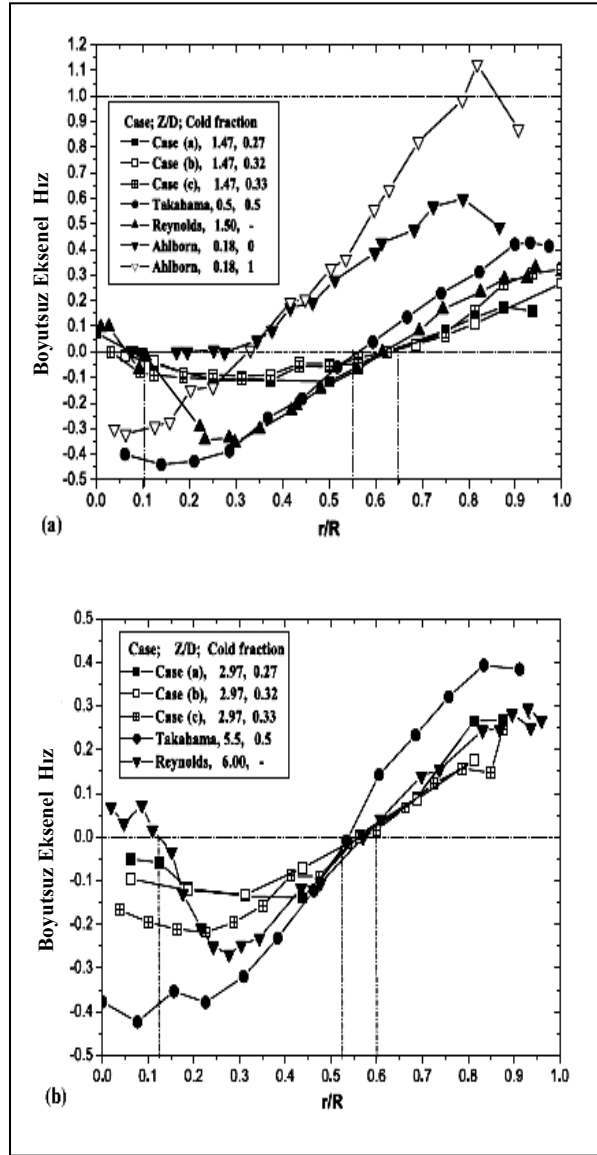
### Türbülans Sonuçları

Türbülans sonuçları 3 adet normal gerilme değeri ( $\overline{w^2}$ ,  $\overline{u^2}$ ,  $\overline{v^2}$ ) ile 3 adet Reynolds gerilmesine ( $\overline{wu}$ ,  $\overline{wv}$ ,  $\overline{vu}$ ) ait sonuçları içermektedir.

### Normal gerilmeler ( $\overline{w^2}$ , $\overline{u^2}$ , $\overline{v^2}$ )

Türbülans sonuçlarına ait genel bir değerlendirme yapılırsa, normal gerilmelerin değerinin Reynolds gerilmelerin değerinden büyük gerçekleştiği görülür. Diğer taraftan normal gerilmeler arasında bir karşılaştırma yapıldığında eksenel gerilme değerlerinin

teğetsel ve radyal gerilme değerlerinden daha büyük gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 10. Boyutsuz eksenel hızların karşılaştırılması (Gao vd., 2005).

Teğetsel normal gerilme ( $\overline{w^2}$ ) dağılımlarına bakıldığında, çıkış orifisinin teğetsel normal gerilme dağılım profilleri üzerinde önemli derecede etkisi olduğu görülmektedir. Büyük çıkış orifis çaplarında ( $d_o=60$  mm ve  $d_o=89$  mm) cidardan boru eksenine doğru gidildikçe teğetsel normal gerilmenin hafifçe arttığı, bununla birlikte maksimum teğetsel normal gerilmenin boru cidarı yakınında olduğu görülmektedir (Şekil 12). Maksimum teğetsel normal gerilmenin olduğu noktadan boru eksenine doğru gidildikçe gerilmenin azaldığı ve boru eksenine civarında minimum değerler aldığı görülmektedir. Oysaki küçük çıkış orifis çaplarında ( $d_o=20$  mm ve  $d_o=40$  mm) oluşan teğetsel normal gerilme dağılımlarına ait profiller bu değişime uymamaktadır. Küçük çıkış orifislere ait teğetsel normal gerilme dağılımları incelendiğinde, gerilmenin cidardan boru eksenine doğru bir artış eğilimine sahip olduğu görülür. Akış debisinin

teğetsel, eksenel ve normal gerilmeler üzerine önemli etkisi olduğu ve akış debisi arttıkça normal gerilmelerin arttığı belirlenmiştir.

### Reynolds Gerilmeleri ( $\overline{wu}$ , $\overline{wv}$ , $\overline{vu}$ )

Reynolds gerilmeleri, akışta momentum transportuna neden olur. Reynolds gerilmeleri için bir genelleme yapılacak olursa, bu gerilmelerin profillerinin çok az farklılıklar göstererek sıfır değeri civarında oldukları ve bu nedenle akışı etkileyen büyüklükte Reynolds gerilmelerinin oluşmadığı ifade edilebilir (Şekil 13). Reynolds gerilmeleriyle ilişkili olarak şu bulgular özetlenebilir:

- (1)  $\overline{wu}$ ,  $\overline{wv}$  ve  $\overline{vu}$  Reynolds gerilmelerinin, akış debisi ve çıkış orifis çapıyla değişimlerinin büyük olmadığı görülmüştür. Kayma gerilmelerine akış debisinin etkisi, ortalama hız bileşenlerine akış debisinin etkisi ile benzer karakterler göstermektedir. Yani, akış debisi arttıkça, kayma gerilmesinin profil şekli hemen hemen aynı kalırken gerilme büyüklüğü artmaktadır.
- (2)  $\overline{vw}$  kayma gerilmesinin,  $\overline{uv}$  kayma gerilmesinden daha küçük olduğu belirlenmiştir.
- (3) Çıkış orifis çapının azalması, normal gerilmelerde olduğu gibi kayma gerilmelerinde de tüpün merkezi bölgesinde türbülans şiddetini artırmaktadır. Bunun nedeni ise teğetsel ve radyal yöndeki çalkantıların diğer kayma gerilmelerinden daha az etkileşimli olmasıdır.

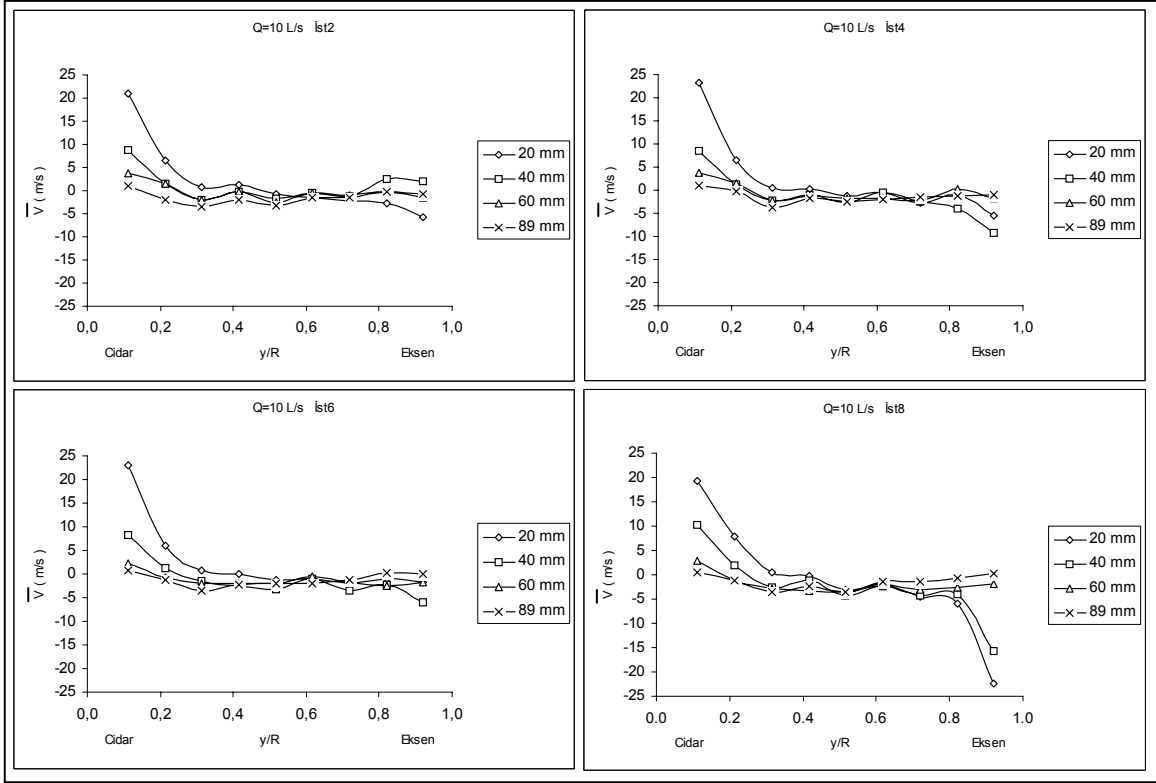
### SONUÇLAR

Bu makale, tek eğimli sıcak tel probu için geliştirilen çok pozisyonlu sıcak-tel yöntemini kullanarak bulunan vorteks tüpünün hidrodinamik karakteristiklerinin deneysel sonuçlarını içermektedir. Fitouri vd. (1995) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak, üç adet ortalama hız bileşeni ile bu hızlara ait üç adet normal gerilme ve üç adet Reynolds gerilmesi elde edilmiştir. Bu yöntem, çatal etkileşimini en aza indirgeyecek döndürme (roll) açılarının kullanıldığı bir yöntemdir. Çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgulara erişilmiştir:

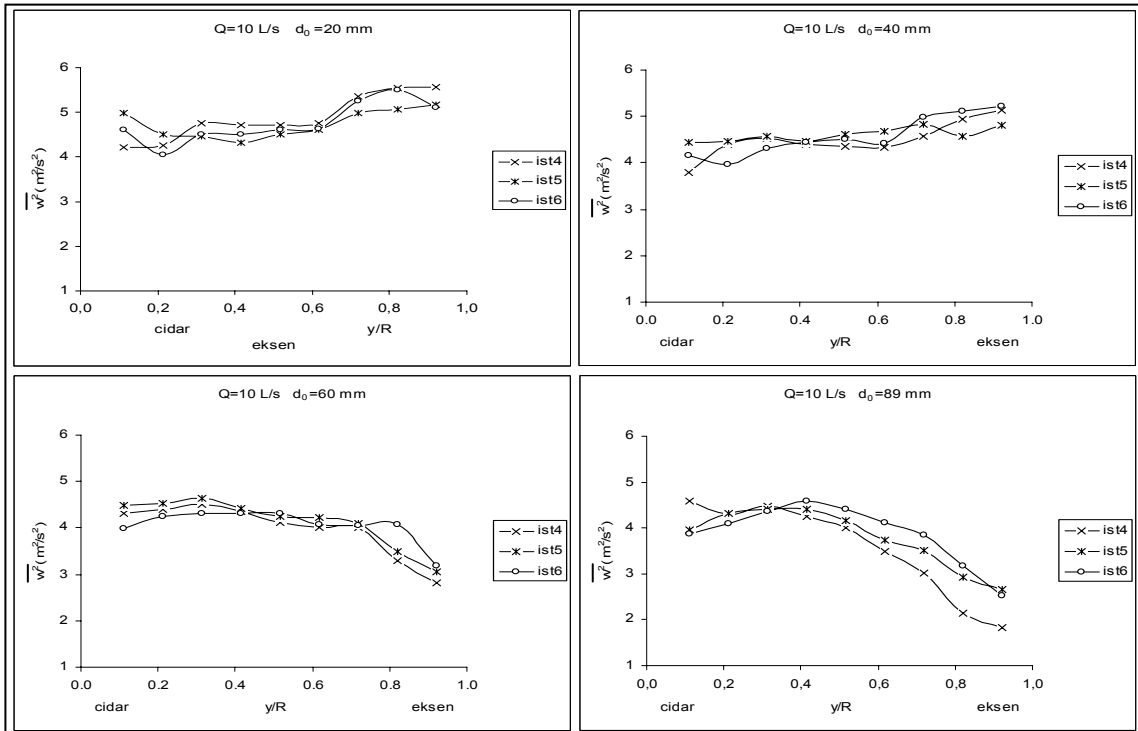
- 1- Ortalama teğetsel hız, tüm akışkan debisi ve çıkış orifis çaplarında hiçbir zaman negatif olmamıştır.
- 2- Büyük orifis çapları için ortalama teğetsel hız profilleri Rankine vorteksi veya Birleşik vorteksi andırmaktadır. Küçük çıkış orifis çaplarında oluşan vorteks yapısının boru merkezinden cidara doğru genişleyen bir potansiyel ya da serbest vorteks profili olduğu söylenebilir.
- 3- Ortalama teğetsel hız eksenel uzunluğa bağımlı değildir ve vorteks gücü vorteks tüpü boyunca hemen hemen sabittir.
- 4- Ortalama eksenel ve radyal hız bileşenleri, daima teğetsel hız bileşenlerinden küçük çıkmaktadır. Bu ise sınırlanmış vorteks akışın genel bir karakteristiğidir.

5- Maksimum ortalama aksel hız değeri boru cidarı yakınında oluşmakta ve boru eksenine doğru azalarak  $y/R=(0.4-0.85)$  olan radyal bölgede negatif değerleri almaktadır. Bazı deneysel koşullarda ortalama aksel hız boru ekseninde tekrar pozitif değerler almaktadır.

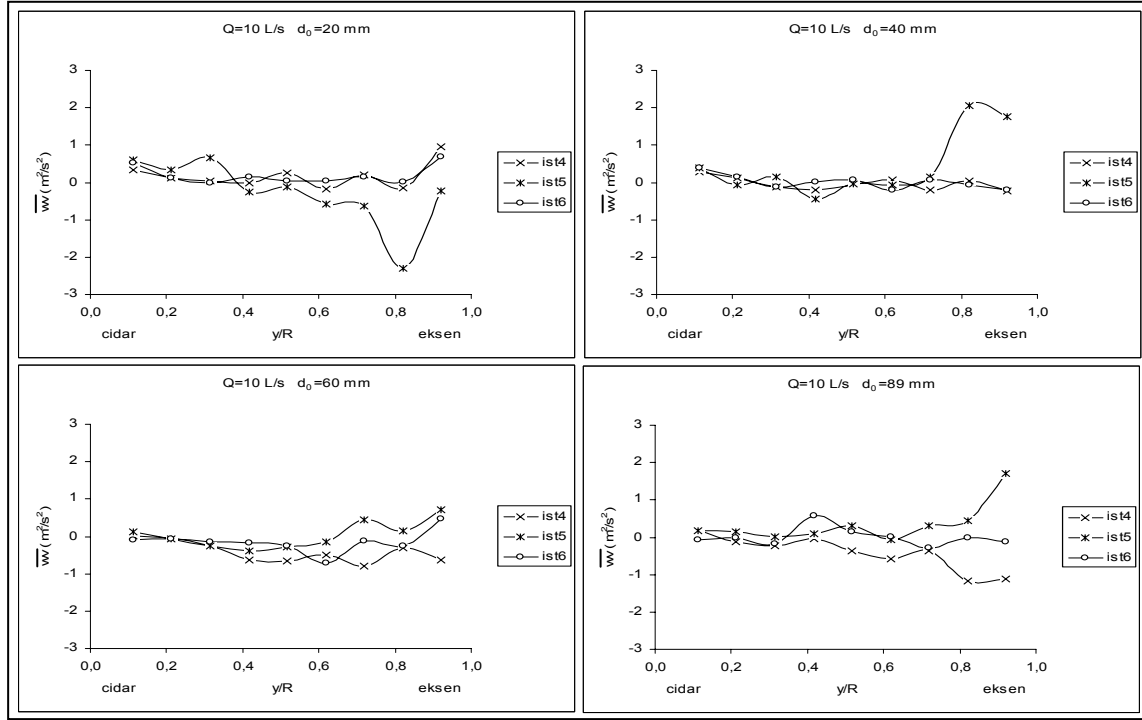
6- Ortalama radyal hız değerlerinin, teğetsel ve aksel hız değerlerinden genel olarak daima küçük olduğu gözlemlenmiştir. Vorteks akışta, radyal hızın çok küçük olduğu ve dizayn amaçları için genellikle ihmal edilebileceği ifade edilebilir.



Şekil 11. Sabit debi için çıkış orifis çaplarının ortalama radyal hız ( $\bar{V}$ ) dağılımına etkisi.



Şekil 12. Çıkış orifis çaplarının teğetsel normal gerilme ( $w^2$ ) dağılımına etkisi.



Şekil 13. Çıkış orifis çaplarının Reynolds gerilme ( $wv$ ) dağılımına etkisi.

7- Tüm çıkış orifis çapları için ortalama radyal hız cidar yakınında maksimum olmaktadır. Boru eksenine doğru gidildikçe radyal hızın azaldığı, bazı noktalarda ise negatif değerler aldığı belirlenmiştir.

8- Türbülans normal gerilmelerin Reynolds gerilmelerden büyük olduğu belirlenmiştir. Normal gerilmeler arasında bir karşılaştırma yapıldığında, eksenel gerilme değerlerinin teğetsel ve radyal gerilme değerlerinden daha büyük gerçekleştiği görülmüştür.

9-  $\overline{wu}$ ,  $\overline{vw}$  ve  $\overline{vu}$  Reynolds gerilmelerinin değerinin, sıfır civarında olduğu ve akışı etkileyen büyüklükte Reynolds gerilmelerinin meydana gelmediği ifade edilebilir.

## TEŞEKKÜR

Bu makale Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen 2003/63 nolu "Vorteks Borusunda Optimum Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi" isimli proje kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar, destekleri nedeniyle Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu'na teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

Abujelal, M. T. and Lillely, D. G., Confined Swirling Flow Predictions, *AIAA 21st Aerospace Sciences Meeting*, Reno Nevada, 10-13, 1983.

Ahlborn, B., Keller, J. U., Staudt, R., Treitz, G. and Rebhen, E., Limits of Temperature Separation in a Vortex Tube, *Journal of Physics, D: Applied Physics* 27, 480-488, 1994.

Ahlborn, B. and Gordon, J. M., The Vortex Tube as a Classic Thermodynamic Refrigeration Cycle, *J. Appl. Phys.* 88(6), 3645-3653, 2000.

Baluev, E. D. and Troyankin, Yu V., Study of the Aerodynamic Structure of Gas Flow in a Cyclone Chamber, *Teploenergetika* 14 (1), 63-65, 1967.

Bank, N. and Gauvin, W. H., Measurements of Flow Characteristics in a Confined Vortex Flow, *Canadian J. of Chemical Engineering* 55, 397-402, 1977.

Baydar, E. ve Onur, H.Ş., Kızgın Tel Anemometresi ile Düşük Akış Hızlarının Ölçülmesi, *Mühendis ve Makina* 33 (391), 33-36, 1992.

Bruun, H.H., *Hot-Wire Anemometry*, Oxford University Press, 1995.

Chang, F. and Dhir, V. K., Turbulent Flow Field in Tangentially Injected Swirl Flows in Tubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 15(5), 346-356, 1994.

Cockerill, T., The Ranque-Hilsch Vortex Tube, PhD. Thesis, *Cambridge University Engineering, Susderland*, 1995.

Farris, G. J., Kidd, G. J., Lick, D. W. and Textor, R. E., A Theoretical and Experimental Study of Confined Vortex Flow, *J. Applied Mechanics*, 687-692, 1969.

Fitouri, A., Khan, M. K. and Bruun, H.H., A Multiposition Hot-Wire Technique for the Study of

- Swirling Flows in Vortex Chambers, *Experimental Thermal and Fluid Science* 10, 142-151, 1995.
- Gao, C. M., Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube, PhD Thesis, *Technische Universiteit Eindhoven*, 2005.
- Gao, C. M., Bosschaart, K. J., Zeegers, J. C. H. and de Waele, A. T. A. M., Experimental Study on a Simple Ranque-Hilsch Vortex Tube, *Cryogenics* 45, 173-183, 2005.
- Hartnett, J. P. and Eckert, E. R. G., Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High Velocity Vortex Type Flow, *Trans. ASME*, 751-758, 1957.
- Holman, J. P. and Moore, G. D., An Experimental Study of Vortex Chamber Flow, *Trans. ASME, Series D, J. Basic. Eng.* 83, 632-636, 1961.
- Kaya, M., Dönmeli Akışta Hız Karakteristiklerinin Sıcak-Tel Anemometre ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*, 2001.
- Kaya, M., Vorteks Borusundaki Türbülanslı Dönmeli Akışın Çok Pozisyonlu Sıcak Tel Yöntemi ile İncelenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*, 2005.
- Koats, T. J., An Experimental Study of the Three-Dimensional Boundary Layer on the End Wall of a Vortex Chamber, *Proc. R. Soc. London, Series A* 352, 169, 1976.
- Lay, J. E., An Experimental and Analytical Study of Vortex Flow Temperature Separation by Superposition of Spiral and Axial Flows, *Journal of Heat Transfer (ASME Trans)* 81, 202-212, 1959.
- Lewellen, W. S., A Review of Confined Vortex Flow, *NASA Contractor Report (NASA CR-1772)*, 1971.
- Nabhani, N., Hot-Wire Anemometry Study of Confined Turbulent Swirling Flow, PhD Thesis, Bradford University, Bradford, U.K., 1989.
- Nissan, A. and Bresan, P., Swirling Flow in Cylinders, *AIChE Journal* 7, 543-547, 1961.
- Ogawa, A., Estimation of the Collection Efficiencies of the Three Types of the Cyclone Dust Collectors from the Standpoint of the Flow Pattern in the Cylindrical Cyclone Dust Collectors, *JSME* 27(223), 64-69, 1984.
- Özgür, A. E., Vorteks Tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta*, 2001.
- Razgaitis, R. and Holman, J. P., A Survey of Heat Transfer in Confined Swirl Flows, *Heat and Mass Trans. Processes* 2, 831-866, 1976.
- Reynolds A. J., A Note on Vortex-Tube Flows, *J. Fluid Mech* 14(2), 18-20, 1962.
- Rosenzweig, M. L., Ros, D. H., Lewellewn, W. S., On Secondary Flows in Jet Driven Vortex Tubes, *J. Aerospace Sci.* 29, 1142, 1962.
- Savino, J. M. and Keshock, E. G., Experimental Profiles of Velocity Components and Radial Pressure Distributions in a Vortex Contained in a Short Cylindrical Chamber, *NASA, TND-3072*, 1965.
- Scott, C. J. and Rask, D. R., Turbulent Viscosities for Swirling Flow in a Stationary Annulus, *Journal of Fluid Engineering* 557-566, 1973.
- Takahama, H., Studies on Vortex Tubes (1) Experiments on Efficiency of Energy Separation (2) on Profiles of Velocity and Temperature, *Bulletin of JSME* 8(31), 433-440, 1965.
- Takahama H. and Soga N., Studies on Vortex tubes (2nd report), *Bulletin of JSME* 9(33), 121-130, 1966.
- Vatistas, G. H., Lin, S. and Kwok, C. K., Theoretical and Experimental Studies on Vortex Chamber Flows, *AIAA Journal* 24 (4), 635-642, 1986.
- Volchkov, E. P., Lebedev, V. P. and Lukashov, V. V., The LDA Study of Flow Gas-Dynamics in a Vortex Chamber, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 35-42, 2004.
- Yapıcı, S., Electrochemical Mass Transfer in Annular Swirl Flow, PhD Thesis, *University of Exeter, Exeter, U.K.*, 1-22, 1992.
- Yılmaz, M., Azalan Dönmeli Akışta Isı Transferi, Sürtünme ve Performans Karakteristiklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*, 1996.
- Yoon, H. K. and Lillely, D. G., Further Time-Mean Measurement in Confined Swirling Flow, *AIAA Journal* 22(4), 514-515, 1984.