

## VORTEKS TÜPLERİ : 2 Enerji Ayırma Mekanizması ve Performans Karakteristikleri

**Mehmet YILMAZ**

Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

**Ömer ÇOMAKLI**

Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

**Mehmet KAYA**

Dr., Türk Hava Yolları

**Süleyman KARSLI**

Ürd., Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, Pasinler Meslek Yüksek Okulu

### ÖZET

1928 yılında, bir metalurjist ve fizikçi olan Fransız bilim adamı Georges Joseph Ranque tarafından keşfedilmesinden itibaren, vorteks tüpleri, teorik ve pratik uygulama açısından oldukça ilgi çeken bir konu olmuştur. Yaygın olarak "Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü" ismi ile anılan bu tüpler günümüzde çok çeşitli kullanım alanları bulmakta ve ticari firmalar tarafından seri imalatları yapılmaktadır. İki bölümden oluşan makalenin birinci bölümünde, vorteks tüplerin sınıflandırılması, vorteks tüplerin konstrüksiyonu, vorteks tüplerde kullanılan akışkanlar, vorteks tüplerin kullanım alanları ve vorteks tüplerin ticari üretimi konuları incelenmiştir. İkinci bölümü olan makalenin bu bölümünde ise vorteks tüp araştırmaları, vorteks tüp inceleme yöntemleri, vorteks tüplerde enerji ayrışması, vorteks tüplerin performansını etkileyen parametreler ve vorteks tüplerin performansı konuları incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Vorteks tüpü, enerji ayrışması, performans, araştırma yöntemleri

### ABSTRACT

Since its discovery in 1928 by a Frenchman, metallurgist and physicist Georges Joseph Ranque, the vortex tube has been the subject of considerable interest both from the theoretical and practical application standpoints. These tubes, widely called "Ranque-Hilsch Vortex Tube", have found many applications and are being mass-manufactured by commercial companies. First section of this article contains the classification of vortex tubes, the construction of vortex tubes, the working fluids in vortex tubes, the applications of vortex tube, and the commercial production of vortex tubes. The investigations on vortex tubes, the methods of investigation on vortex tubes, energy separation mechanism, the parameters affecting performance, and the performance of vortex tubes are described in detail in this section of the article.

**Keywords:** Vortex tube, energy separation, performance, methods of investigation

### Giriş

Vorteks tüpler Ranque ve Hilsch'den sonra çok sayıda araştırmaya konu olmuş ve sıcaklık ayırma mekanizmasını açıklamak ve performanslarını etkileyen optimum parametreleri belirlemek amacıyla çok sayıda araştırmalar yapılmıştır. Vorteks tüplerle ilgili yapılan çalışmalar "deneysel çalışmalar" ve "teorik çalışmalar" olarak kategorize edilebilir. Deneysel çalışmalar kendi arasında "dış çalışmalar" ve "iç çalışmalar" olarak iki büyük sınıfa ayrılabilir [1, 2]:

(1) Dış çalışmalar: Dış çalışmalar, vorteks borusu elemanlarının geometrisini değiştirmenin çalışma karakteristiklerine etkilerini inceleyen araştırmalardır. Bu

çalışmalar; tüp uzunluğu ve çapı, giriş lülesi konfigürasyonu, giriş lüleleri sayısı, orifis çapı, giriş basıncı, giriş sıcaklığı, tüpü eğimli yapma vb. parametre/tasarımların performansa etkisini belirlemeye yönelik araştırmaları içermektedir.

(2) İç çalışmalar: İç çalışmalar; basınç, hız ve sıcaklık profillerini ölçerek vorteks tüpü içerisindeki akışı inceleyen araştırmalardır.

### Dünyada Vorteks Tüp Araştırmaları

Ranque, 1928 yılında yüksek basınçlı bir gaz akımının birisi giriş gazından daha sıcak diğeri giriş gazından daha soğuk düşük basınçlı iki akıma ayrılabilceğini keşfetmiştir.

Ranque, bu konuda 1932 ve 1934 yıllarında sırasıyla Fransa ve Amerika'da patent almış ve Vortec adında ilk ticari firmayı kurmuştur. 1946 yılında Alman mühendis Dr. Rudolf Hilsch, birkaç atmosfer basıncında ve 20°C sıcaklığındaki sıkıştırılmış havanın 200°C kadar sıcak ve -5°C kadar soğuk akımlar üretebildiğini deneysel olarak ispatlamış ve bir hidrojen sıvılaştırma tesisinde vorteks tüp ile soğutma olayını başarılı bir şekilde uygulamıştır [1, 2]. Ranque ve Hilsch'ten sonra vorteks tüpler, deneysel ve teorik birçok araştırmaya konu olmuş, vorteks tüplerle ilişkili çok sayıda makale yayınlanmış ve patent alınmıştır. Bu makalenin kapsamı bunların tümünden bahsetmeye yeterli olmadığından aşağıda önemli ve karakteristik olan bazı araştırmalar özetlenmiştir.

Rusya'da 1950'li yılların başlarında Odessa Institute of Refrigeration Technology'de Martynovskii ve Alexeev [3] tarafından vorteks etkisiyle ilgili sistematik araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda karşıt akışlı bir vorteks tüpte giriş lülesi konfigürasyonu, giriş lüleleri sayısı, orifis çapı, boru uzunluğu ve çapı, nem, giriş basıncı, giriş sıcaklığı ve farklı gazların etkisi araştırılmıştır. Stechkin ve Dubinsky ilk vorteks vakum aparatını ve vorteks ejektörlerini geliştirmiş ve vorteks etkisiyle ilişkili teorik makaleler yayınlamıştır [4]. Brodyansky ve Martynov'un yönettiği MEI (Moscow Power Engineering Institute) araştırma ekibi, vorteks tüpler ve gaz separatörleriyle ilişkili araştırmalar yapmışlardır [4]. 1954 yılında Westley "Bibliography and Survey of the Vortex Tube" ismiyle bir literatür taraması yapmıştır [4]. Vorteks tüpünü silindirik yerine konik yapmanın etkilerini inceleyen çalışmalar arasında Martynovskii ve Alekseev, Gulyaev, Raikii ve Tunkel tarafından yapılan araştırmalar sayılabilir [1, 2, 3]. Hartnett ve Eckert, Takahama, Bruun, Soni ve Thompson, Piralishvili ve Polyayev vorteks tüp parametreleriyle ilişkili önemli deneysel çalışmalar yapmışlardır [1, 2, 4].

Lewins ve Bejan [5] vorteks tüp sistemi performansını Termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını kullanarak optimize etmiştir. Silverman [6] basit bir analizle vorteks

tüpünün çalışmasının termodinamiğin ikinci yasasına aykırı olmadığını ispatlamıştır. Mischner ve Bespalov [7] Ranque-Hilsch vorteks tüpünü, entropi üretimini baz alan yeni bir yaklaşımla simüle etmişlerdir. Saidi ve Yazdi [8] vorteks tüpün boyutlarını ve çalışma koşullarını optimize etmek için ekserji analizini içeren yeni bir yaklaşım kullanmışlardır.

Fulton, Deissler ve Perlmutter, Kurosaka, Lindstrom-Lang, Stephan vd., Nabhani, Ahlborn vd., Fitouri vd., enerji ayrışması ile sıcaklık ve hız profillerinin teorik ve analitik tanımlamalarıyla ilişkili yaptıkları çalışmalarla Ranque-Hilsch tüpün davranışının anlaşılmasına önemli katkıda bulunmuşlardır [1, 2, 9-11].

Vorteks tüplerle ilgili ilk sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) çalışması Khalil ve Assaf [12] tarafından yapılan karşıt akışlı vorteks tüpün akış alanının incelenmesine yönelik çalışmadır. Bundan sonra vorteks tüpünü SAD yöntemleri kullanarak analiz eden çalışmalar artmaya başlamıştır. Frohlingsdorf ve Unger [13] CFX Code'unu kullanarak vorteks tüpündeki akışı nümerik olarak simüle etmişlerdir. Aljuwayhel vd. [14] güç ayrışma olayını doğuran temel prosesleri anlayabilmek amacıyla vorteks tüpün SAD modelini başarılı bir şekilde kullanmışlardır. Behera vd. [15] tarafından, SAD kullanılarak, lüle sayılarının, lüle arofillerinin, soğuk uç çapının, uzunluk/çap oranının soğuk ve sıcak gaz oranlarının optimizasyonu yapılmak suretiyle vorteks tüpünde yaptıkları deney sonuçları ile karşılaştırmışlar ve SAD yöntemlerinin vorteks tüp dizaynında ve vorteks tüplerin yeni uygulamalarda kullanılmasının belirlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Sınırlı sayıdaki bu araştırmalara rağmen, vorteks tüplerindeki akış profillerini SAD yöntemleri kullanarak simüle etmeye yönelik ciddi teşebbüslerin yetersizliği ortadadır.

#### Türkiye'de Vorteks Tüp Araştırmaları

Türkiye'de vorteks tüplerle ilgili yapılan araştırmalar sınırlı sayıdadır. Süleyman Demirel Üniversitesi'nde "Ranque-Hilsch Vorteks Tüpünün Endüstriyel

Uygulamaları" isimli bir proje yapılmıştır [17]. Vorteks tüplerin endüstriyel amaçlarla kullanım imkanlarının araştırılması amacıyla yapılan projede, vorteks tüplerin fiziksel olaylarından yararlanılarak, baca gazlarında zararlı olarak bulunan hafif ve ağır bileşenlerin ayrıştırılması hedeflenmiştir. Özgür [18], yüksek lisans tez çalışmasında; tüpe uygulanan basınç, sıcak akış çıkış vanası kesit alanı, soğuk akış çıkış çapı, giriş lülesi çapı gibi vorteks tüplerin çalışma kriterlerine etki eden faktörlerin performansa etkisini araştırmıştır. Özgür vd. [19] vorteks tüplerin soğutma amacıyla kullandıkları alanları ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Usta vd. [20] vorteks tüpünde akışkan olarak hava ile oksijeni kullandıkları çalışmada, soğutma sıcaklık performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Hava içinde bulunan  $O_2$ 'nin vorteks tüpündeki soğutmaya etkisinin havaya göre değişimini incelemek amacıyla  $O_2$  gazını seçmişlerdir. Dinçer vd. [21] giriş ve çıkış kütsel debilerinin vorteks tüpünün performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Kaya [22] "Vorteks Borusundaki Türbülanslı Dönmeli Akışın Çok Pozisyonlu Sıcak Tel Yöntemi İle İncelenmesi" ismiyle yaptığı doktora tezinde tek eğimli sıcak tel probu için geliştirilen çok pozisyonlu sıcak-tel yöntemini kullanarak vorteks borusunun hidrodinamik karakteristiklerini araştırmıştır.

Türkiye'de çeşitli yöntemlerle elde edilen dönmeli akışlarla ilişkili çok sayıda ısı transfer ve akış karakteristikleriyle ilgili çalışmalar olmasına rağmen, yazarlarca, Türkiye'de yukarıda belirtilenler dışında vorteks tüpleriyle ilişkili çalışmalara rastlanılmamıştır.

## VORTEKS TÜP İNCELEME YÖNTEMLERİ

Vorteks tüplerin karakteristiklerini incelemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Akışı incelemek için problemlerin tüpe girmesini gerektiren geleneksel yöntemler kullanıldığında büyük zorluklar oluşmaktadır. Bu zorluklar arasında, subkritik akışlarda atalet dalgalarının probun önünde ve arkasındaki tüm akış profilini bozması, akışın çok dönmesinin kendi iz bölgesinden etkilenmesine

neden olması, bunun da yanlış ve çok çalkantılı okumalara neden olması sayılabilir. Bu zorlukları ortadan kaldırmanın yolu, akış profilini incelemek için parçacık görüntü hız ölçeri (PIV, particle image velocimetry), lazer doppler hız ölçer (LDA, laser-doppler anemometry) ve kızılötesi kamera gibi akışa yerleştirilmeyen modern yöntemler kullanmaktır. Bu yöntemler akışı bozmamasına rağmen, vorteks akış kapalı bir akış olduğundan tüplerin eğrisel yüzeylerinin neden olduğu bozulan imaj problemleri oluşmaktadır [1, 2].

### Akış Görüntüleme Yöntemi

Vorteks akış alanının bölgelerini nitel olarak belirlemek için akış görüntüleme yöntemi çok kez kullanılmasına rağmen, bunları nicel hale getirmek nadiren başarılı olmaktadır. Bu nedenle vorteks akış hız alanı genellikle aşağıda açıklanan diğer yöntemler kullanılarak belirlenmiştir [2].

### Basınç Problemleri

Bu yöntem, akıştaki basınç seviyesini ölçerek hızları belirleme yöntemidir. Basınç ölçmek için pitot tüpü veya daha kompleks basınç problemleri kullanılır. Bu yöntemin dezavantajları kalibrasyonlarının zor olması ve dinamik yanıtlarının olmamasıdır. Okunan değerler zaman ortalamalı değerlerdir. Bazı problemlerin büyük ebatlı oluşu okunan değerlerin alan ortalamalı değer olmasına ve probun akış alanını bozmasına neden olur. Bu etkileşim vorteks tüplerdeki akışlarda özellikle önemlidir. Çünkü vorteks akışlar fiziksel etkileşime karşı oldukça hassastır. Türbülanslı akışlarla kullanıldığı zaman basınç problemleri nedeniyle; (i)- sabit yoğunluklu akışlarda hız ve basınç çalkantılarının neden olduğu hatalar oluşur, (ii)- değişken yoğunluklu akışlarda ise hız, basınç ve yoğunlukta türbülans çalkantıları nedeniyle hatalar meydana gelir [2, 23].

### Sıcak Tel Anemometresi

Sıcak-tel anemometresinin çalışma prensibi, akış içerisine yerleştirilmiş ve elektriksel olarak ısıtılmış sıcak bir

tel veya filmde akışkana taşınım yoluyla ısı transferi esasına dayanır. Sıcak tel anemometre sistemleri; lazer doppler hız ölçer gibi lazerli sistemlere göre oldukça ucuz olması, sistemin frekans cevabının (özellikle sabit sıcaklık anemometresi) çok yüksek olması, ölçüm yapılabilmesi için akış alanına partikül enjekte edilmesine gerek olmaması, sadece prob değişikliği yapılarak sıcaklık veya iki, üç boyutlu akış ölçümünün mümkün olması gibi avantajlarının yanı sıra, probun direkt olarak akış içerisine yerleştirilmesinden dolayı akışı bozma olasılığının bulunması, yüksek hızlardan dolayı telin kopma olasılığının yüksek olması, katı yüzeylere çok yakın bölgelerde ölçüm yapma zorluğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır [2, 23].

#### Lazer Doppler Hız Ölçer

Lazer Doppler Hız Ölçer (*LDA, laser doppler anemometry*), akışı rahatsız etmeden, akış içerisinde asılı duran yaklaşık 1µm çapındaki parçacıkların hareketlerinin doppler frekansı ile ölçülmesi prensibine dayanır. LDA; kullanım maliyetinin yüksek olmasına karşın, akışı rahatsız etmemesi, bütün yönlerde hız bileşenlerinin ve Reynolds gerilmelerinin ölçülmesine olanak sağlaması, voltaj çıkışının hız ile lineer olarak değişmesi, çözünürlüğün yüksek olması, kalibrasyon gerektirmemesi gibi avantajlara sahip olması nedeniyle tercih edilir. LDA, vorteks tüpe direkt uygulanabilir ve tüm akış alanının haritasının çıkarılmasını sağlayabilir. LDA'nın bu avantajlarına rağmen, vorteks tüpün eğrisel yüzeyleri, bazı optik problemler oluşturmaktadır. Ayrıca, vorteks tüplerde kullanımında, yüksek merkezkaç ivme nedeniyle gaz akışkana enjekte edilen tüm partiküller tüp cidarına yakın kalmakta ve saçılma merkezleri vorteks tüpün aksel bölgelerine ulaşmamaktadır. Bu durum ise, borunun merkezine doğru olan akış hızlarının doğru ölçülmesini engelleyebilmektedir [1, 2, 23].

#### Parçacık Görüntü Hız Ölçeri

Parçacık görüntü hız ölçer (*PIV, particle image velocimetry*) vorteks tüpün lens-benzeri eğrisel yüzeyleri

tarafından bozulan imajı yorumlamadaki zorluklar ve sınırlı girişi olan kapalı hacimleri aydınlatmak ve fotoğrafını çekmekte karşılaşılan geometrik sınırlamalar gibi problemleri vardır [1].

#### Sayısal Akışkanlar Dinamiği Analizi

Son yıllarda, vorteks tüplerdeki enerji ayrışma olayının mekanizmasını açıklayabilmek için sayısal akışkanlar dinamiğini (SAD) kullanmaya yönelik çabalar artmaktadır. SAD modelleri, güç ayrışım olayı, farklı akışkanları, giriş sıcaklık ve basınçları, lüle açıları ve tüp geometrisi gibi vorteks tüp performansını etkileyen parametreleri araştırmak için güvenli bir şekilde kullanılabilir. Bu parametrelerin etkilerini nümerik olarak araştırmak, vorteks tüpü imal edip dizayn değişimlerini test etmekten daha az zaman alıcı ve daha ekonomiktir [16].

### VORTEKS TÜPLERDE ENERJİ AYRIŞMASI

Vorteks tüplerde vorteks etkisi veya Ranque-Hilsch etkisi çok sayıda araştırmaya konu olmuş ve bu etkinin varlığı birçok deneysel çalışma tarafından doğrulanmıştır. Hilsch, Deissler ve Perlmutter, Ahlborn vd., Kurosaka, Gutsol, Cockerill ve diğer araştırmacılar Ranque etkisini açıklamak için çeşitli teoriler ortaya atmışlardır [1, 2, 10, 24, 27]. Sayısı 10'u geçen bu teorilere rağmen günümüzde bile bu etkinin kesin bir fiziksel açıklamasını tatminkar bir şekilde yapan tam bir teori halen mevcut değildir. Bu teorilerin her birisi vorteks tüp cihazının belli yönlerini açıklayabilirken, hiç birisi sıcaklık ayrışmasının optimizasyonuna olanak tanıyacak yeterli açıklayıcı güce sahip değildir. Bu teoriler aşağıda özetlenmiştir.

1. Santrifüj Kuvvetler: Ranque 1932 yılında aldığı patentinde, dönen gazın tüp cidarında kalın bir tabaka oluşturduğunu, santrifüj kuvveti nedeniyle iç tabakaların dış tabakalar üzerine basınç uyguladığını ve sıkıştırdığını belirtmiştir. Bu sıkıştırma sonucunda dış tabakalar

ısınmakta ve aynı zamanda iç tabakalar genişleyerek soğumaktadır [2].

**2. İç sürtünme:** Hilsch, giriş alanındaki vorteksin iç tabakalardaki basıncın oldukça azalmasına neden olacak şekilde bir basınç dağılımı oluşturduğunu, basıncın azalmasının ise iç tabakalarda soğumaya yol açtığını ifade etmiştir. Hilsch'e göre ısıtma, sürtünme etkileri sonucu oluşmaktadır. Daha sonra yapılan araştırma sonuçlarının da teyit ettiği gibi, vorteks tüpte sıkıştırılmış dış tabakalar düşük hızlara oysaki genişlemiş olan iç merkezi tabakalar ise büyük hızlara ve dolayısıyla yüksek kinetik enerjiye sahiptirler. Bu hız dağılımı, farklı tabakalar arasında yüksek sürtünmeye neden olmakta ve bunun sonucunda ise enerji, iç tabakalardan dış tabakalara doğru radyal olarak iletilmektedir [1, 2].

**3. Akustik Etki:** Kurosaka [24] 1982 yılında vorteks tüpündeki enerji ayrışmasına farklı bir mekanizmanın neden olduğunu önermiş ve bunu deneylerle desteklemiştir. Çok gürültülü hava, jet motoru veya vakum temizleyicide olduğu gibi vorteks tüpünden türbülanslı bir şekilde büyük bir gürültüyle akar. Bu gürültünün içinde "vortex whistle" olarak adlandırılan saf bir ton vardır. Vortex whistle, gazın sabit bir tüpe teğetsel girişi ve dönmesiyle üretilir. Kurosaka'ya göre, vorteks tüpündeki sıcaklık ayrışmasına bu saf ton neden olmaktadır. Daimi olmayan tedirginliklerin olmaması durumunda, hava, boru eksenine civarında serbest vorteks olarak akar; havanın hızı merkezde sıfıra yakın bir değerdedir, orta yarıçap civarında maksimum olur ve cidar civarında küçük bir değere düşer. Bununla birlikte, akustik etki, hava hızının merkezden çevreye lineer olarak arttığı bölgede serbest vorteksi zorlanmış vortekse dönüştürür. Sadece statik santrifüj etki değil, akustik etki ve zorlanmış vorteks üretimi de Ranque-Hilsch etkisine neden olur. Akustik etkinin, enerji ayrışmasında türbülanslı çok daha etkin olduğu deneysel sonuçlar ile de desteklenmiştir.

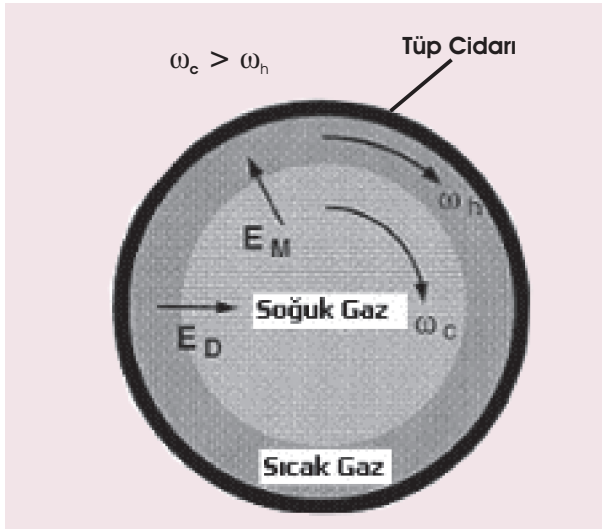
**4- Katmanlı Akışta Türbülanslı Isı Transferi:** Schultz-Grunow ve Linderstrom Lang sıcaklık ayrışmasının katmanlı akışta türbülanslı ısı transferi nedeniyle olduğunu ifade etmişlerdir. Bu teoriye göre, enerji ayrışması, soğuk akış bölgesinden sıcak akış bölgesine doğru olan ısı transferi nedeniyledir. Bu ısı transferi, sıcak akışın statik sıcaklığının, büyük kinetik enerjisi nedeniyle, soğuk akışın statik sıcaklığından gerçekten daha az olduğu periyod esnasında oluşur [1, 2].

**5. Goertler Vorteksleri:** Stephan vd. [9] yalıtılmış ve yalıtılmamış tüplerde yaptıkları deneysel çalışmalarda enerji ayrışmasının temel nedeninin Goertler vorteksi olduğunu ifade etmişlerdir. Goertler vorteksleri, konkav cidarlar üzerinde teğetsel akış tarafından üretilen bir sınır tabaka olayıdır.

**6. İş Yapan Akışkanın Sıkıştırılabilirliği:** Amitani vd. [25] sıcaklık ayrışmasını, iş yapan akışkanın sıkıştırılabilirliğine bağlamışlardır.

**7- İç Bölgelerdeki Akışkanın Dış Bölgedeki Akışkan Üzerinde İş Yapması:** Vorteks tüplerin çalışmasıyla ilişkili en yaygın kabul edilen teori, Fulton tarafından ifade edilen ve Hilsch'in teorisine benzer olan teoridir. Gaz akımı tüp giriş lülelerinden geçerek yüksek hızla tüpe teğetsel olarak girer ve tüpün silindirik formu nedeni ile dönmeye başlar. Böylece tüp cidarı yakınındaki çevresel bölgede serbest vorteks oluşur. Çok yüksek açısız hızlarda dönen akış, merkezkaç kuvvetin etkisi ile tüp cidarına doğru açılmaya zorlanır. Bu etki neticesinde tüp merkezindeki basınç ile tüp cidarındaki basınç arasında fark oluşur. Tüp cidarı ile tüp merkezi arasında oluşan basınç farkı nedeni ile tüp merkezine doğru radyal akış olur. Merkeze gelen akışın açısız hızı, açısız momentumun korunumu ilkesi gereğince tüp cidarındaki akışın açısız hızından daha yüksek değerlere ulaşır. Bu sebepten dolayı tüp içerisinde iki farklı hızda dönen iki akış oluşur. Merkezdeki akış daha yüksek hızla sahip olduğundan cidardaki akışı

ivmelendirmeye çalışır. Bu durumda merkezdeki akıştan cidardaki akışa mekanik enerji transferi gerçekleşir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkezdeki akış, soğuk akış; cidardaki sürtünme enerjisinin etkisi ile ve merkezdeki akıştan aldığı mekanik enerjinin etkisiyle de cidardaki akış, sıcak akış oluşturur. Aynı zamanda, vorteksin merkezi, dış tabakalardan daha soğuk olduğundan içe doğru bir ısı transferi gerçekleşir. Vorteksin merkezine doğru oluşan ısı akışı, merkezden dışarı doğru olan iş akışından daha düşük hızda gerçekleşir. Bu olayın sonucu olarak, dış gaz tabakaları, kaybettikleri ısı enerjisinden daha fazla kinetik enerji alırlar. Bu iç enerjiye dönüşür, durma sıcaklıkları yükselir ve kısma valfinden yüksek sıcaklığa sahip gaz akımı olarak tüpten çıkarlar. Tersine, eksenel gaz tabakaları aldıkları ısı enerjisinden daha fazla kinetik enerji kaybederler. Bu, tüpe girerken genişleme sonucu soğutuldukları gerçeğiyle birlikte, durma sıcaklıklarının azalmasına ve orifisten düşük sıcaklıklı gaz olarak tüpü terk etmelerine neden olur (Şekil 1) [1, 2, 13].



Şekil 1. Vorteks Tüpünde Radyal Enerjinin Şematik Gösterimi (EM mekanik enerji akısı, ED: Difüz enerji akısı)

**8. Isı Pompası Mekanizması:** Ahlborn vd. 1994 yılında vorteks tüpündeki sıcaklık farkının esas olarak normalize edilmiş basınç düşümüne ve gaza bağlı

olduğunu ifade etmişlerdir. 2000 yılında ise yeni teorilerini, adyabatik genişleme ve sıkıştırma prosesli klasik termodinamik çevrim olarak sunmuşlardır [26].

**9. Özel İş Yapan Akışkan ile İlişkili Etkiler:** Erdelyi soğuk ve sıcak gazın sıcaklıkları arasındaki farkın sadece kullanılan gazın tipine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [1, 2].

**10. Durgun Elemanların Santrifüj Ayrışması ve Adyabatik Genişlemesi:** Gutsol [27] durgun elemanların santrifüj ayrışması ve adyabatik genişlemesinin vorteks tüp sisteminde enerji ayrışmasına neden olduğunu öne sürmüştür.

**11. Vorteks Tüpündeki Entropi Üretimi:** Mischner ve Bespalov [7] enerji ayrışmasıyla ilişkili farklı bir teori ortaya atmışlardır. Bu teoride, enerji ayrışmasının nedeni, vorteks tüpündeki entropi üretimine bağlanmıştır.

## VORTEKS TÜPLERİN PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELER

Vorteks tüplerin performansını etkileyen parametreler; bağımlı ve bağımsız parametreler olarak kategorize edilebilir. Bağımsız ve bağımlı parametrelere ait değişkenlerin neler olduğu Tablo 1'de toplu halde verilmiştir.

## VORTEKS TÜPLERİN PERFORMANSI

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. Bu nedenlerle, tüm çalışmalar için geçerli olabilecek ortak sonuçlar çıkarmanın zorlukları ortadadır. Buna karşın, vorteks tüplerin performansı ile ilişkili olarak günümüze kadar yapılan çalışmalardan çıkarılabilecek bazı önemli sonuçlar kategorize edilerek Tablo 2'de özetlenmiştir.

**Teşekkür:** Bu makale Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen 2005/20 nolu "Vorteks Tüplerin Soğutma Tekniğinde Kullanılması" ve TÜBİTAK tarafından desteklenen 105M028 nolu "Vorteks Tüplerin

Soğutma Tekniğinde Kullanılması" isimli projeler kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar, destekleri nedeniyle Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu ve TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

Tablo 1. Vorteks Tüplerin Performansını Etkileyen Bağımlı/Bağımsız Parametreler [1]

Parametre Tipi	Parametre/Değişken İsmi	Değişken İsmi
Bağımsız Parametreler	<i>Geometrik Parametreler</i>	Tüp Uzunluğu
		Tüp İç Çapı
		Giriş Lülesi Efektif Çapı
		Orifis Çapı
		Sıcak Akış Orifisinin Efektif Çapı
	<i>Kütleli Akışlar</i>	Soğuk Uçtan Çıkan Kütleli Oran
		Toplam Kütleli Debi
	<i>Depo Koşulları</i>	Giriş (Depo) Basıncı
		Giriş (Depo) Sıcaklığı
		Tüp Girişindeki Gaz Yoğunluğu
	<i>Gaz Özellikleri</i>	Mutlak Viskozite
		Isı İletim Katsayısı
		Sabit Basıncıta Özgül Isı
		İzentropik Üs
		Isıl Genleşme Katsayısı
		Girişte Karışımın i'inci Gaz Bileşeninin Mol Oranı
	<i>İç Akış Parametreleri</i>	Soğuk Çıkışta Statik Basıncı
		Sıcak Çıkışta Statik Basıncı
		Tüp Girişinde Swirl Hızı
	<i>Koordinatlar</i>	$r, \theta, z$
<i>Diğer Faktörler</i>	Boru Malzemesi	
	İç Pürüzlülük	
	Gazın Moleküler Kütleli	
Bağımlı Parametreler	<i>Alan Değişkenleri</i>	3 Hız Bileşeni, $u, v, w$
		Basıncı
		Sıcaklık
		Yoğunluk
		Bileşen Konsantrasyonları
	<i>Entegre Özellikler</i>	Soğuk Çıkış Sıcaklığı
		Sıcak Çıkış Sıcaklığı

Tablo 2. Vorteks Tüplerin Performansına Ait Karakteristik Sonuçlar

Parametre	Karakteristik Sonuçlar
<b>1- Tüp Boyutları</b>	<p>(i) Genel olarak tüpün boyutlarını artırmak verimi artırmaktadır [3].</p> <p>(ii) Optimum <math>L/D</math> oranıyla ilişkili çalışmalarda, Gulyaev minimum uzunluğun çapın 13 katı olması gerektiğini, diğer araştırmacılar ise optimum çalışma için genel olarak <math>40 &lt; L/D &lt; 50</math> olması gerektiğini belirlemişlerdir [1].</p> <p>(iii) Tüp uzunluğunun artmasıyla, sıcaklık farkı artmakta ve ekserji tüketimi azalmaktadır. Bununla birlikte, tüp uzunluğunun kritik uzunluğa kadar artmasıyla enerji ayrışması artarken tüp uzunluğunu kritik uzunluktan daha fazla artırma enerji ayrışmasını artırmaz [8].</p> <p>(iv) Tüpün uzunluğunu kısaltma, enerji ayrışması için az zaman bırakacağından soğutma açısından tüpün verimini azaltır. Diğer taraftan, kısa tüp uzunluğu ısıtma verimini artırır [28].</p>
<b>2- Konik Tüp</b>	<p>(i) Daralan veya genişleyen konik tüpler vorteks etkisini geliştirmede önemsizdirler [3].</p>
<b>3- Tüp Malzemesi</b>	<p>(i) Daha pürüzsüz yüzeyli malzemeler ve ısı iletim katsayıları düşük malzemeler kullanmak, daha yüksek ikinci yasa verimiyle sonuçlanmaktadır [8].</p> <p>(ii) Birbirine eşdeğer <i>PVC tüp</i> ile çelik tüp, aynı koşullarda çalıştırıldığında <i>PVC</i> tüp çelik tüpe göre daha iyi sonuç vermektedir. Bunun nedeni, iç pürüzlülük ve ısı iletim katsayısının <i>PVC</i> tüpte daha az olmasıdır.</p> <p>(iii) Genel olarak, perspexin performansı, bakır tüpün performansından daha yüksek olduğundan, perspex, vorteks tüp imalatı için daha iyi bir malzemedir Bunun nedeni, bakırın ısı iletim katsayısının perspexin ısı iletim katsayısından daha yüksek olmasıdır [29].</p>
<b>4- Lüleler</b>	<p>(i) Maksimum sıcaklık düşümü için lüleler, akışkanın vorteks tüpüne tamamen teğetsel girmesini sağlamalıdır [3].</p> <p>(ii) Optimum lüle çapı, vorteks tüpünün çapı ile değişmektedir. Optimum sonuçlar için tüp çapı arttıkça lüle çapı artırılmalıdır [3].</p> <p>(iii) Giriş lüle çapının artması, ekserji tüketimini azaltmakta ve ikinci yasa verimini artırmaktadır [8].</p> <p>(iv) Optimum lüle sayısı bulunmaktadır. Daha çok sayıda lüle kullanımı, verimin azalmasına neden olur.</p> <p>(v) Giriş lülesinin efektif yüksekliğini artırma sıcak ve soğuk akımların sıcaklıklarında artış oluşturmaktadır.</p>
<b>5- Orifis çapı</b>	<p>(i) Optimum orifis çapı çoğunlukla <math>0.4 &lt; d/D &lt; 0.6</math> aralığında olmaktadır [1].</p>
<b>6- Akışkan Özellikleri ve Akış Parametreleri</b>	<p>(i) Giriş basıncının artmasıyla sıcaklık farkı artmakta ve giriş basıncının belli bir değerinde optimum verim oluşmaktadır. Giriş basıncında % 40'lık bir değişim sıcak ve soğuk sıcaklıklarda %2'lik bir değişim oluşturmaktadır. Giriş basıncının artmasıyla ekserji tüketimi azalmaktadır [8].</p> <p>(ii) Giriş havasının sıcaklığını değiştirme, durma sıcaklık farklarında bir değişim oluşturmamaktadır [3]. Bunun yanında, giriş sıcaklığında %2'lik bir değişim statik sıcak ve soğuk sıcaklık değerlerinde %2'ye kadar bir değişim oluşturabilmektedir [30].</p> <p>(iii) Sıkıştırılabilirlik, enerji ayrışmasının oluşması için önemli değildir. Sıkıştırılabilirlik, esaslı bir soğutmanın olması için önemlidir bu ise genel olarak enerji ayrışmasına katkı yapar.</p> <p>(iv) Viskoz etkiler enerji ayrışmasına katkıda bulunabilir.</p> <p>(v) Özgül ısı oranı (<math>\gamma</math>) vorteks borusunda enerji ayrışma miktarını etkileyen bir giriş gaz parametresidir [29].</p> <p>(vi) Giren akışın nemli olması durumunda enerji ayrışması ve tüpün verimi oldukça azalmaktadır [3,29].</p> <p>(vii) Islaklık oranı arttıkça verim azalmaktadır [28].</p> <p>(viii) Soğuk akış kütle oranı ve tüpe uygulanan basınç arttıkça, vorteks tüpü, insan kulağı için rahatsız edici ses frekans değerlerine ulaşmaktadır [18].</p>



<p><b>7-Enerji Ayrışması</b></p>	<p>(i) Enerji ayrışması direkt olarak dönme ile ilişkilidir. Dönme artarsa enerji ayrışması da artar.</p> <p>(ii) Vorteks tüpü çapının artmasıyla açılmal hızlar azalır ve bu nedenle enerji ayrışması azalır [33].</p> <p>(iii) Karşıt akışlı vorteks tüpte, sıcak ve soğuk gaz akışları arasındaki sıcaklık farkı, durma noktasını lüle girişinden daha uzağa bir yere taşıyacak şekilde <math>L/D</math> oranının artırılmasıyla maksimum yapılabilir [15].</p> <p>(iv) Karşıt akışlı tüplerde tüpün çevresi ile merkezi arasındaki durma sıcaklık farkı akış sıcak uça yaklaştıkça azalmasına rağmen, <math>c_p \Delta T_o / v_{\max}^2</math> ile tanımlanan <i>bağlı ayrışma</i> akış geliştikçe artmaktadır [1].</p> <p>(v) Sıcaklık ayrışması, mutlak giriş basıncı yerine, vorteks tüpünün giriş ve soğuk çıkış portu arasındaki bağlı basınç farkının, <math>X = (P_o - P_c) / P_o</math> lineer fonksiyonudur. Sıcaklık ayrışması ayrıca, akışkanın tipine ve soğuk akış kütleli debisine de bağlıdır [10].</p> <p>(vi) İki bileşenli modele göre, sıcak taraftaki sıcaklık artışı için üst limit <math>(T_h - T_i) / T_i \leq X (k - 1) / k</math> ifadesiyle, soğuk taraftaki sıcaklık azalması için alt limit <math>T_c \geq T_i (1 - X)^{(k-1)/k}</math> ifadesi ile bulunur [10].</p> <p>(vii) Her ikisinin de swirl gerektirmesi hariç, vorteks tüpte farklı atomik kütlelere sahip maddelerin fiziksel ayrışması enerji ayrışmasıyla direkt bağlantılı değildir.</p> <p>(viii) Hava kullanıldığında, bir vorteks tüp <math>-48^\circ\text{C}</math> kadar düşük sıcaklık ve <math>+190^\circ\text{C}</math> kadar yüksek sıcaklıklar sağlayabilir. Bu sıcaklıklar ise, birçok ısıtma ve soğutma uygulamaları için kullanılabilir [18].</p>
<p><b>8-Akış profili</b></p>	<p>(i) Vorteks tüplerde, aksel hız, swirl hıza göre ihmal edilebilir bu da enerji ayrışmasında aksel hızın çok az etkin olduğunu gösterir.</p> <p>(ii) Karşıt akışlı vorteks tüpte, durma noktasına kadar zorlanmış ve serbest vorteks mevcuttur.</p> <p>(iii) Düşük <math>d_c/D</math> değerlerinde vorteks tüplerde ikincil akışlar oluşmaktadır. İkincil sirkülasyon akışı, vorteks tüplerinde performansı azaltıcı bir etkiye sahiptir. Optimal olarak dizayn edilen vorteks tüplerinde zorlanmış ve serbest vorteks olmak üzere sadece iki rejim vardır ve optimum <math>d_c/D</math> değerinde ikincil akış yok olmakta, bu ise soğuk ve sıcak uç arasında daha yüksek sıcaklık farkı oluşturmaktadır [15].</p>
<p><b>9-Verim</b></p>	<p>(i) Sıcak uç (veya soğuk uç) ile giriş gazı arasındaki normalize sıcaklık farkı <math>(T_h - T_i) / T_i</math> (veya <math>(T_c - T_i) / T_i</math>) performansın bir ölçüsüdür.</p> <p>(ii) Vorteks tüpün maksimum <math>COP</math>'u ısı pompası olarak 0.59, soğutucu olarak ise 0.83 olarak bulunmuştur [15].</p> <p>(iii) Vorteks tüplerin <math>COP</math>'u aynı sıcaklık koşullarındaki Carnot çevriminin <math>COP</math>'una göre düşük olmasına rağmen, vorteks tüplerin oluşturduğu ısıl ayrışma, normal ısıtma ve/veya soğutma gereksinimlerinin olduğu ve hazır basınçlı havanın olduğu yerlerde hazır uygulamalar bulabilir [15].</p> <p>(iv) Tüpün dış yüzeyini soğutma, soğuk akış sıcaklığını azaltır ve böylece soğutma amacıyla kullanılacak olan tüpün verimini artırır [28].</p> <p>(v) En düşük soğuk akış sıcaklık modu 0.3 civarındaki soğuk akış kütleli debi oranında, maksimum soğutma modu ise 0.7 civarındaki soğuk akış kütleli debi oranında elde edilmektedir [18].</p> <p>(vi) Ekserji tüketimi 0.7 civarındaki soğuk akış kütleli oranında minimum olmaktadır. Bu ise, vorteks tüpünün etkin çalışma noktasının bu oranda oluştuğu anlamına gelir [8].</p> <p>(vii) Havanın içinde bulunan <math>O_2</math> gazı miktarı artırılırsa, vorteks tüplerindeki soğutma performansları artmaktadır [20].</p>

## KAYNAKÇA

1. **T. Coccerill**, "Thermodynamics and Fluid mechanics of a RanqueHilsch Vortex tube", MSc thesis, University of Cambridge, 1998.
2. **N. Nabhani**, "Hot-wire Anemometry Study of Confined Turbulent Swirling flow", PhD Thesis, Bradford University, Bradford, U.K., 1989.
3. **V.S. Martynovskii and V.P. Alekseev**, "Investigation of the Vortex Thermal Separation Effect for Gases and Vapors", Soviet Physics : Technical Physics, 26(2);pp. 22332243, 1957.
4. **Sh.A. Piralishvili, and V.M. Polyaev**, "Flow and Thermodynamic Characteristics of Energy Separation in a Double-Circuit Vortex Tube - An Experimental Investigation", Experimental Thermal and Fluid Science, 12, 399-410, 1996.
5. **J. Lewins A. Bejan**, "Vortex Tube Optimization Theory", Energy, 24: 931-943, 1999.
6. **M.P. Silverman**, "The Vortex Tube: a Violation of the Second Law", Eur. J. Phys. 3, 88-92, 1982.
7. **J. Mischner, V.I. Bepalov**, "On the Entropy Generation in the Ranque-Hilsch tube", Forschung im Ingenieurwesen 67, 1-10, 2002.
8. **M.H. Saidi, and M.R. Yazdi**, "Exergy Model of a Vortex Tube System With Experimental Results", Energy, 24. 625-632, 1999.
9. **K. Stephan, S. Lin, M. Durst, F. Huang, and D. Seher**, "A Similarity Relation For Energy Separation In A Vortex Tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, 27(6);pp. 911920, 1984.
10. **B. Ahlborn, J.U. Keller, R. Staudt, G. Treitz, and E. Rebhan**, "Limits of Temperature Separation in a vortex tube", J. Phys.D: Appl. Phys., 27;pp. 480488, 1994.
11. **A. Fitouri, M.K. Khan, H.H. Bruun**, "A Multiposition Hot-Wire Technique for the Study of Swirling Flows In Vortex Chambers", Experimental Thermal and Fluid Science, 10, 142-151, 1995.
12. **E.E. Khalil and H.M.W. Assaf**, "Computer Modelling of Turbulent Recirculating Flows in Engineering Applications", In Proceedings of the Second International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Venice, 1981.
13. **W. Fröhlingdorf, and H. Unger**, "Numerical investigations of the Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, 415-422, 1999.
14. **N.F. Aljuwayhel, G.F. Nellis, S.A. Klein**, "Parametric and Internal Study of the Vortex Tube Using a CFD Model", Int J Refrigeration 28 (3) 442450, 2005.
15. **U. Behera, P.J. Paul, S. Kasthuriangan, R. Karunanithi, S.N. Ram, K. Dinesh, S. Jacob**, "CFD Analysis and Experimental Investigations Towards Optimizing the Parameters of RanqueHilsch Vortex Tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, 48. 1961 1973, 2005.
16. **H.M. Skye, G.F. Nellis, S.A. Klein**, "Comparison of CFD Analysis to Empirical Data in a Commercial Vortex Tube", International Journal of Refrigeration, In Press, Corrected Proof, 2005.
17. **İ. Üçgül**, "Ranque-Hilsch Vorteks Tüpünün Endüstriyel Uygulamaları", Süleyman Demirel Üniversitesi Araştırma Projeleri Yönetim Birimi (SDÜBAP) Proje No: 03-M-658, Isparta, 2003.
18. **A.E. Özgür**, "Vorteks tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2001.
19. **A.E. Özgür, R. Selbaş, İ. Üçgül**, "Vorteks Tüpler İle Soğutma Uygulamaları", V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 387-397, 2001.
20. **H. Usta, K. Dinçer, V. Kırmacı**, "Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava İle Oksijenin Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel İncelenmesi", Teknoloji, Cilt 7, Sayı 3, 415-425, 2004.
21. **K. Dinçer, Ş. Başkaya, İ. Üçgül, B. Z. Uysal**, "Giriş ve Çıkış Kütleli Debilerinin Bir Vorteks Tüpün Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi", 14. Ulusal Isı Bilimi Ve Tekniği Kongresi, Isparta, 3-5 Eylül 2003.
22. **M. Kaya**, "Vorteks Borusundaki Türbülanslı Dönmeli Akışın Çok Pozisyonlu Sıcak Tel Yöntemi İle İncelenmesi", Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2005.
23. **H.H. Bruun**, "Hot-Wire Anemometry", Oxford University Press, 1995.
24. **M. Kurosaka**, "Acoustic Streaming in Swirling Flow and the Ranque-Hilsch Vortex Tube Effect", J. Fluid Mech., 124. 139-172, 1982.
25. **T. Amitani, T. Adachi and T. Kato**, "A study on Temperature Separation in a Large Vortex Tube", Japan. Soc. Mech. Eng., 49, 877-884, 1983.
26. **B. Ahlborn, JM. Gordon**, "The Vortex Tube as a Dassic Thermodynamic Refrigeration Cycle", J Appl Phys; 88(6): 3645, 2000.
27. **AF. Gutsol**, "Vortex effect", Journal of Physical Successes; 167 (6):665 687, 1997.
28. **P.K. Singh, R.G. Tathgir, D. Gangacharyulu, G.S. Grewal**, "An Experimental Performance Evaluation of Vortex Tube", IE (I) Journal MC, Vol 84, 149-153, 2004.
29. **K. Singh**, "Ranque-Hilsch Vortex Tube", Online. Available: <http://sps.nus.edu.sg>, 20 October 2005.
30. **B. A. Shannak**, "Temperature Separation and Friction Losses in Vortex Tube", Heat and Mass Transfer 40 779785, 2004.

Makalenin birinci bölümü "Vorteks Tüpleri : 1 Teknolojik Gelişmeler" Mühendis ve Makina Dergimizin Şubat 2006, 553. Sayısında yayımlanmıştır.