

## Investigation of the Vortex Cooling Method to Machining Method and Cutting Parameters

 Duygu GÜRKAN\*  Saltuk Alper YAŞAR  Gültekin UZUN  İhsan KORKUT 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

 Research article  
 Received: 04/05/2020  
 Revision: 24/08/2020  
 Accepted: 02/09/2020

#### Highlights

- Cooling
- Machining
- Review

#### Keywords

 Vortex Tube  
 Cooling Method  
 Machining Operation

In this study, the working principle of vortex tubes and the usage in the machining was reviewed with the help of previous literature studies. The effect of vortex tubes on machining operations was evaluated in separated titles and discussed its advantages and disadvantages.

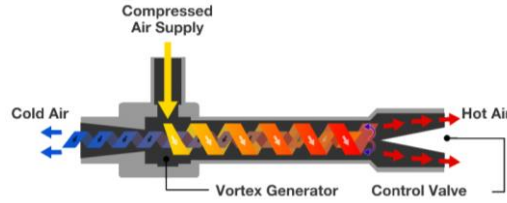


Figure A. Vortex tube

**Purpose:** In this study, the usage of vortex tubes in turning, milling, drilling and grinding operations were investigated in separated titles. The effects of vortex tube usage on tool life, surface roughness and cutting forces were evaluated. Thus, the advantageous areas of the usage of vortex tube were summarized.

**Theory and Methods:** The effects of vortex tubes on manufacturing processes were examined under four different titles. The materials, cutting tools and the cutting parameters of the processes done with vortex tube were stated in detail.

**Results:** The effect of vortex tube usage in cutting performance was evaluated separately for each of four machining operations in Discussion and Finding section.

**Conclusion:** When the previous studies investigated, the literature of the usage of vortex tube was concentrated upon turning and milling operations in general.

In turning operations, it was determined that vortex tube effects positively compared to the dry cutting condition in terms of cutting forces, tool life and cooling performance. However, the surface quality depends onto the material selection.

In milling operations, the surface quality obtained with vortex tube was better than the dry cutting condition. Cooling fluids resulted lower surface roughness values compared to vortex tube.

In drilling operations, vortex tube showed lower performance than conventional cooling method in terms of cutting forces and torque.

In grinding operations, vortex tube showed better performance than conventional cooling method in terms of grinding force, residual stresses and energy consumption.



## Vorteks Soğutma Yönteminin Talaşlı İmalat Yöntemleri Ve Kesme Parametrelerine Göre İncelenmesi

Duygu GÜRKAN\* Saltuk Alper YAŞAR Gültekin UZUN İhsan KORKUT

Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Vorteks ile soğutma yöntemi son yıllarda araştırma konularında yer almakta ve kullanımı artış göstermektedir. Yapılan çalışmalar ile kesme işlemi üzerindeki etkileri incelenerek, çevre dostu bir soğutma yöntemi olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada vorteks soğutma yönteminin talaşlı imalat yöntemlerine ve kesme performansı üzerine etkileri ayrı başlıklar altında irdelenmiştir. Kesme işlemi üzerindeki performansının diğer soğutma yöntemlerine göre avantajları ve dezavantajları konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda, Vorteks yönteminin kuru işleme, geleneksel sıvı soğutma ve geleneksel hava ile soğutmaya göre tornalama ve frezeleme yöntemlerindeki kesme işlemini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Kriyojenik ve MQL soğutma yöntemlerine göre ise bu etkinin daha az olduğu görülmüştür.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 04/05/2020  
Düzeltilme: 24/08/2020  
Kabul: 02/09/2020

### Anahtar Kelimeler

Vorteks Tüpü  
Soğutma Yöntemleri  
Talaşlı İmalat

### Keywords

Vortex Tube  
Cooling Method  
Machining

### Investigation of the Vortex Cooling Method to Machining Method and Cutting Parameters

### Abstract

In recent years, vortex cooling is stated in the research subjects and its usage shows an increase. Researchers examined its effects on cutting process and it is stated in the literature that vortex cooling is an eco-friendly cooling method. In this study, the effect of vortex cooling method on both machining methods and cutting performance was examined in separate titles. Its performance was evaluated in terms of advantages and disadvantages comparing to other cooling methods in cutting process. As a result of this evaluation, vortex cooling effects the cutting process positively in turning and milling processes comparing to dry machining, conventional liquid cooling and conventional air cooling methods. This effect is less comparing to cryogenic and MQL cooling methods.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaş kaldırma sırasında harcanan enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir [1-3]. Çeşitli imalat operasyonlarında oluşan bu ısının %80'i talaş ile uzaklaştırılırken; %10'u takım, %10'u iş parçası üzerinde kalmaktadır [4-5]. Kesme bölgesinde oluşan ısı; takım ömrü, kesme kuvvetleri, talaş biçimi ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [2,6]. Talaşlı imalat esnasında meydana gelen ısının zararlı etkilerini azaltmak, kesici takım ömrünü uzatmak ve verimi yükseltmek amacıyla soğutma sıvıları kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sektöründe kullanılan soğutucu sıvılar; madeni yağ, sabun, sentetik deterjan, aktif ya da nötr katı dolgu maddesi ve kimyasal katkı maddeleri içermektedir. Başarılı bir üretim süreci sadece ürün kalitesine ve üretim süresine bağlı değildir; çevre ve insan sağlığı da dikkate alınmalıdır [7]. Soğutucu sıvıların içerdikleri katkı maddeleri çalışana ve çevreye büyük ölçüde zarar vermektedir. Soğutucu sıvılardan kalan atıkların yok edilmesi de oldukça uzun zaman ve maliyet gerektirmektedir [8]. Kuru işlemede ise oluşan ısıdan dolayı kesici takım ömrü olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle daha az kimyasal içeren farklı alternatif soğutucular için araştırmalar devam etmektedir.

Talaşlı imalat işlemlerinde bor yağı, hava, MQL (Minimum miktarda yağlama) ve kriyojenik, soğutma işlemi için kullanılan yöntemlerdir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, hava ile soğutma yöntemi içinde yer alan Vorteks tüpü ile soğutma işlemi de çevre dostu ve kolay uygulanabilirliği açısından öne çıkmaktadır.

Modern takım uçları, kesici kenarlarını daha yüksek sıcaklıklarda koruyabilmektedir, ancak takım malzemelerindeki bu iyileştirmelerle bile, çeşitli imalat operasyonlarında kesici takımlar aşınmaya devam etmektedir. Bu modern uçların takım ara yüzüne soğuk hava uygulanmasının, kesme maliyetini düşürerek takım ömrünü uzatmaya yardımcı olacağı düşünülmektedir [9] Bu kapsamda pek çok araştırmacı Vorteks yönteminin avantajlarını ortaya koymak için çalışmalar yapmaktadır.

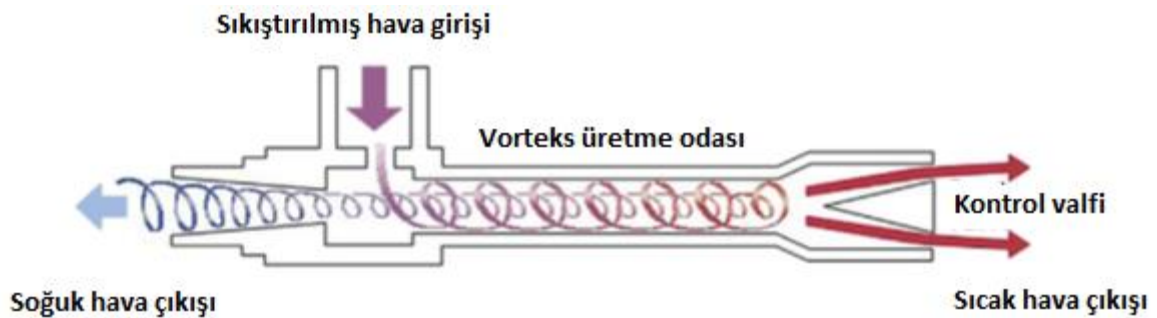
Vorteks tüpleri, 1931 yılında metalurjist ve fizikçi olan George Joseph Ranque tarafından bulunmuş ve Rudolph Hilsch tarafından geliştirilmiştir [10]. Vorteks tüplerinin küçük, hafif ve basit geometriye sahip oluşu imalat ve bakımını kolaylaştırmıştır. Bu özellikleri nedeni ile kurulumu ve kullanımı diğer soğutma yöntemlerine göre daha rahattır. Vorteks tüplerinin hareketli elemanları olmadığından, aşınma ve erozyon minimum düzeyde gerçekleşmekte bu nedenle uzun bir süre sorunsuz çalışabilmektedir. Fanlar, ısı değiştiriciler, soğutkan, sızıntı oluşturabilen borular veya tesisat malzemeleri gerektirmemekte ve tekrar çözünme işlemine gereksinim duymamaktadırlar. Vorteks tüplerinin başlıca avantajları; ekstra elektriksel ya da kimyasal güç gerektirmemesi, ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması ve ekolojik açıdan zararsız olması şeklinde belirtilmektedir. Veriminin diğer soğutuculara göre düşük olması ise vorteks tüpünün dezavantajıdır [11].

Ranque-Hilsch Vorteks tüpü olarak da bilinen hava soğutucu sistem, temiz ve soğuk hava akımı sağlamaktadır [12]. Çalışmalarda, vorteks tüpünün diğer soğutma sistemlerinden daha temiz bir ortamda soğutma gerçekleştirmeyi sağladığı ve aynı zamanda kesme işleminde ortaya çıkan ısıyı azaltması sonucu kuru işleme ve geleneksel sıvı soğutma yöntemine göre kesme performansını arttırdığı vurgulanmaktadır.

Bu çalışmada, Vorteks tüpünün tornalama, frezeleme, delme ve taşlama operasyonlarında kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar başlıklar halinde toplanmış, vorteks tüpünün bu alanlarda kullanımının avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

## 2. VORTEKS TÜPLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ (WORKING PRINCIPLE OF VORTEX TUBES)

Vorteks tüpleri; yüksek basınçlı havanın teğetsel olarak girdiği, sıcak ve soğuk olmak üzere iki düşük basınçlı sıcaklık akışına ayrılan bir ana tüpten oluşmaktadır. Bu iki hava akışının hacmi ve sıcaklığı sıcak hava egzozuna yerleştirilmiş bir valf ile ayarlanabilmektedir. Vorteks tüpleri ile  $-46^{\circ}\text{C}$  ve  $127^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkları arasında hava üretimi mümkün olmaktadır. Şekil 1'de vorteks tüpünün çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1. Vorteks tüpünün çalışma prensibi [13]

Basınçlı hava Şekil 1'de gösterilen sıkıştırılmış hava girişi bölümünden vorteks tüpüne girmekte ve boru içindeki nozullardan geçmektedir. Bu nozullar havanın basıncını azaltıp hızını arttırmak dolayısıyla vorteks oluşturmak için kullanılmaktadır. Vorteks tüpünün şeklinin silindirik olmasının etkisiyle tüp içerisindeki havanın açılma hızı yüksektir. Çok yüksek açılma hızlarında dönen hava, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle tüp cidarında ve tüp merkezinde farklı basınç oluşturmakta ve hava basınç farkı nedeniyle radyal yönde

merkeze doğru genişlemektedir. Merkeze gelen havanın açısal hızı, açısal momentumun korunumu ilkesi gereğince tüp yüzeyindeki havanın açısal hızından daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu sebepten dolayı tüp içerisinde iki farklı hızda dönen iki hava akışı oluşmaktadır. Merkezdeki hava, daha yüksek hıza sahip olduğu için yüzeydeki akışı ivmelendirmeye çalışmakta ve bu durumda merkezdeki hava akışı yüzeydeki akışa mekanik enerji transferi gerçekleştirmektedir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkezdeki akış, soğuk havaya; tüp cidarındaki sürtünme etkisi ve merkezdeki havadan aldığı mekanik enerjiden dolayı tüp yüzeyindeki akış, sıcak havaya dönüşmektedir. Isınan hava sıcak hava çıkışına doğru hareket etmektedir. Vorteks tüpünün sıcak hava çıkışında bulunan kontrol valfi, havanın tüpün cidarında kalan sıcak bölümünün dışarı atılmasını sağlamaktadır. Tüp içerisinde kalan hava ise, çapı daha küçük olan iç vortekse geri dönmeye ve merkez deliğinden geçmeye zorlanmaktadır. İç vorteks etkisiyle soğuyan hava, soğuk hava çıkışından dışarı atılmaktadır. Bu sayede tüpün bir ucundan sıcak hava diğer ucundan ise soğuk hava elde edilmektedir [14-15].

Vorteks tüpleri genellikle; termal testler, nem alma, gaz sıvılaştırma, buz üretimi ve karışım ayrımı gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılırken, işleme proseslerinde soğutma ve ısıtma da sağlamaktadır [16-17].

Daha önce yapılan derleme çalışmaları incelendiğinde genel olarak soğutma tipleri [18], MQL sistem ve vorteks tüpü ile birlikte kullanımları [19], Ti ve Ni bazlı süper alaşımlarda vorteks tüpü ile birlikte kriyjenik soğutma kullanımı [20] ve vorteks tüpünün bazı imalat prosesleri için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü etkisi üzerine [21] çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Ancak vorteks tüplerinin imalat proseslerinde ayrı ayrı kesme performansına etkisinin incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır.

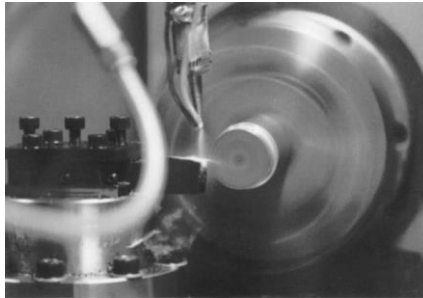
Bu çalışmada, gelecek çalışmalara ışık tutmak amacıyla, farklı malzemelerin çeşitli imalat operasyonlarında vorteks tüpü kullanımının yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri gibi parametrelere etkisi derlenmiştir.

### 3. VORTEKS TÜPLERİNİN İMALAT YÖNTEMLERİNE ETKİSİ (THE EFFECT OF VORTEX TUBES ON THE MANUFACTURING METHOD)

Yapılan çalışmalar incelendiğinde vorteks tüplerinin en çok torna ve freze operasyonlarında kullanıldığı, taşlama ve delme operasyonlarında ise nispeten daha az kullanıma sahip olduğu görülmektedir.

#### 3.1. Tornalama Yöntemine Etkisi (Effect on Turning Method)

Tornalama üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde kesici takım olarak genellikle kaplamalı ve kaplamasız karbür takım tercih edildiği ve az sayıda HSS (Yüksek Hız Çeliği) takımların da kullanıldığı gözlemlenmiştir. Tornalama operasyonu için vorteks tüpü genellikle kuru işleme ve geleneksel soğutma yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2’de vorteks tüpünün tornalama operasyonunda kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 2. Vorteks tüpünün tornalama operasyonunda kullanımı [22]

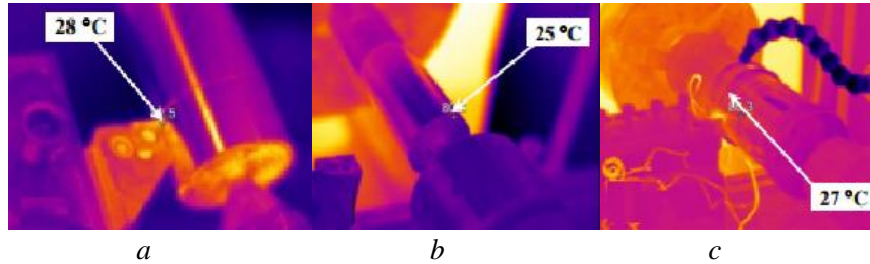
İş parçaları genellikle çelik ve alaşımları arasından seçilmiştir. Tablo 1’de tornalama operasyonu için kullanılan malzemelerin dağılımı gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Tornalama operasyonunda kullanılan malzemeler

Kaynak No	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Malzeme																						
Çelik ve alaşımları	.			.					.	.	.	.				.		.	.	.		
Al ve alaşımları		.	.						.	.	.											
Ti ve alaşımları					.		.	.						.			.					
Süper alaşımlar															.							
Dökme demir						.																
Paslanmaz çelik																					.	
Diğer														.								.

Çelik ve alaşımlarının tornalama operasyonunda, vorteks tüp kullanımının, kuru kesmeye göre genel olarak kesme sıcaklığını [25,30,32], aşınmayı ve kesme kuvvetlerini azalttığı [22, 25], yüzey kalitesini artırdığı [22,30] gözlemlenmiştir. Ancak Ekinović ve arkadaşları, ıslah çeliklerinde 60 m/dk kesme hızı, 0.098 mm/dev ilerleme, 0.5 mm kesme derinliği ile kuru kesme ve geleneksel soğutucu kullanımının, vorteks tüpü kullanımına göre kesme kuvvetlerine daha olumlu etki sağladığını belirtmişlerdir [33]. Ayrıca A36 alaşımının 160 m/dk sabit hızla ve değişken ilerleme ve kesme derinliklerinde tornalanmasında vorteks tüpü kullanımının, kuru kesmeye göre kesme sıcaklıklarını azaltırken güç tüketimini ve yüzey pürüzlülüğünü artırdığını gözlemlenmiştir [41]. Naumov ve arkadaşları, vorteks tüp ile soğutma ve yağlamanın aynı anda yapıldığı sistemlerin, yapı çeliğinde kesme işleminin temel özelliklerinin iyileştirilmesine ve takım ömrüne katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir [37]. Araştırmacılar, Al ve alaşımlarının tornalanmasında vorteks tüpünün, soğutma performansı [23-24,32] ve aşınmayı azaltma [23-24] açısından kuru işlemeye ve geleneksel soğutuculara göre daha verimli; kesme kuvveti açısından ise daha az etkin olduğunu vurgulamışlardır [33].

Şekil 3'te sırasıyla ıslah çeliğinin, alüminyum bronzun ve saf alüminyumun tornalanmasında vorteks tüpü kullanımının kesme sıcaklığına etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 3.** a) Islah çeliği b) Alüminyum bronz c) Saf alüminyumun tornalanmasında vorteks tüpünün soğutma etkisi [33]

Ti ve alaşımlarında, vorteks tüp kullanımının, kesme sıcaklığı, takım aşınması [29] ve yüzey pürüzlülüğü [29,38] açısından performansının kuru kesmeye göre daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. 29 numaralı çalışmada, kesme hızları 80,100,120 m/dk; ilerleme oranları 0.025, 0.05, 0.075 mm/dev; kesme derinlikleri 0.5, 0.75 ve 1 mm olarak belirlenmiştir. 38 numaralı çalışmada ise; 120,150,180 m/dk kesme hızları; 0.11, 0.16, 0.22 mm/dev ilerleme değerleri kullanılmıştır.

Araştırmacılar, MQL ve kriyojenik soğutma ile karşılaştırıldığında, vorteks tüpünün Ti tornalama operasyonunda takım aşınması ve soğutma performansı açısından daha zayıf kaldığını vurgulamışlardır [38]. Bu nedenle; Ti alaşımları üzerine yapılan çalışmalarda yalnızca vorteks tüpü kullanımı yerine kriyojenik soğutma ile vorteks tüpü [26], soğuk su ile sis jeti [28] ya da MQL ile vorteks tüpü [35] gibi sistem kullanımları tercih edilmiş kesme performansı açısından önemli ölçüde fayda sağlanmıştır.

Süper alaşımlar için yapılan çalışmalarda, kriyojenik soğutmanın vorteks tüpü ile soğutmadan daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha az takım aşınması sağlayacağını belirtmişlerdir [36]. Çelik, Ti ve Al

alaşımlarının yanında vorteks tüpünün dökme demir [27] ve paslanmaz çelik [42] için de kesme sıcaklığını büyük ölçüde azalttığını vurgulamışlardır.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa tornalama operasyonunda vorteks tüpü ile soğutma yönteminin, kuru işleme, geleneksel sıvı soğutma ve geleneksel hava ile soğutmaya göre kesme işlemine pozitif etkide bulunduğu söylenebilir. Kriyojenik ve MQL soğutma yöntemlerine göre ise etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

### 3.2. Frezeleme Yöntemine Etkisi (Effect on Milling Method)

Frezeleme operasyonu için yapılan çalışmalar incelendiğinde, vorteks tüpünün genellikle kuru işleme ve geleneksel sıvı soğutucu kullanarak işleme ile karşılaştırıldığı, süper alaşımlar ve bazı malzemeler için MQL ile beraber kullanımın önerildiği [48,61], paslanmaz çeliklerde ise karşılaştırmanın emülsiyon ve sentetik yağ kullanımı ile olduğu görülmektedir [50]. Kesici takım olarak genellikle kaplamalı ve kaplamasız karbür takım kullanılmış, iş parçaları genellikle polimerler ile Al ve alaşımları arasından seçilmiştir. Şekil 4'te frezeleme operasyonunda vorteks kullanımı, Tablo 2'de kullanılan frezeleme operasyonu için literatürde kullanılan iş parçası malzemeleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Vorteks tüpünün frezeleme operasyonunda kullanımı [50]

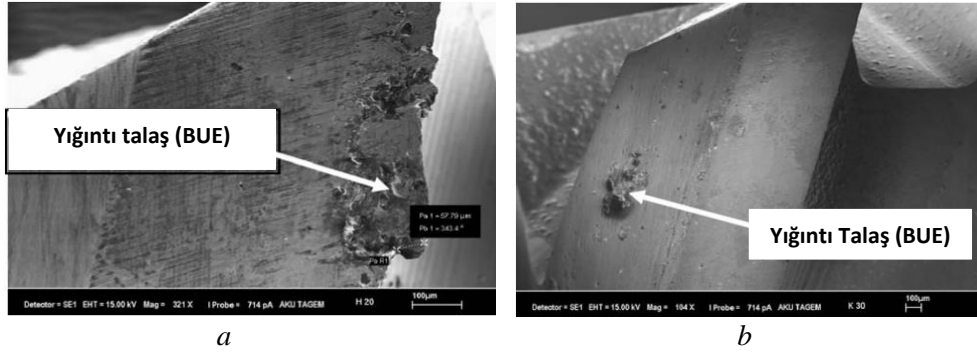
Tablo 2. Frezeleme operasyonunda kullanılan malzemeler

Kaynak No	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	
Malzeme																			
Çelik		•	•									•							
Al alaşımları	•							•					•						•
Ti alaşımları						•													
Süper alaşım					•														
Paslanmaz çelik							•												
Polimerler (CFRP, Biyopolimer)										•	•				•				•
Kompozitler																•			
Diğer (Pirinç, WC)				•														•	

Çelik malzemelerin frezeleme operasyonunda vorteks tüpü kullanımının; kesme sıcaklığı [55], takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü [46] açısından kuru kesmeden daha yüksek; ancak geleneksel soğutucudan daha düşük performansta olduğu belirtilmiştir. Şekil 5'te AISI 1050 çeliğinin; 20m/dk kesme hızı,

0.4 mm/dev ilerleme ve 2.5 kesme derinliği kullanılarak yapılan frezeleme operasyonunda, kuru işleme ve vorteks tüpü ile işlemede yığıntı talaş oluşumlarının karşılaştırması gösterilmiştir.





Şekil 5. a) Kuru işleme ile yığıntı talaş oluşumu b) Vorteks tüpü ile yığıntı talaş oluşumu [46]

Şekil 5 incelendiğinde AISI 1050 çeliğinin frezeleme operasyonunda vorteks tüpü kullanımının kuru işleme göre yığıntı talaş oluşumunu büyük ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.

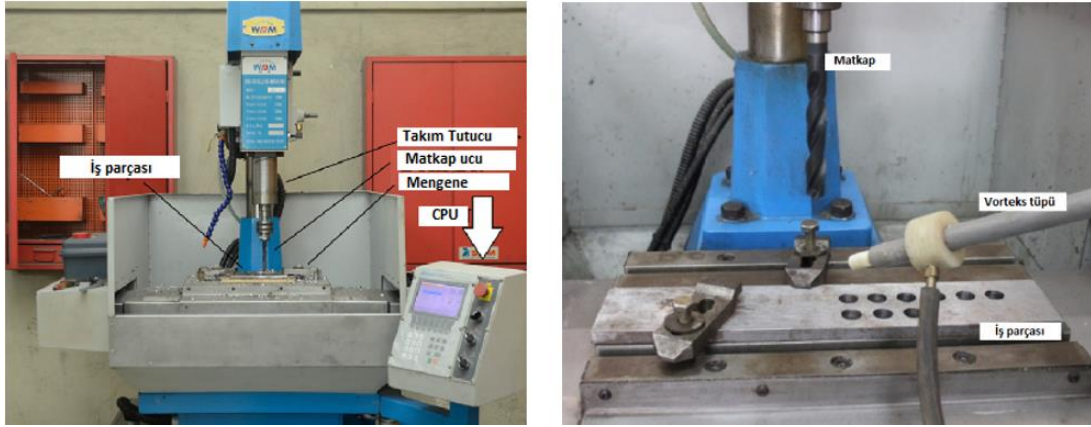
MQL soğutma yöntemi kullanılarak yapılan deneylerin yüzey kalitesinin, vorteks tüple yapılan deneylere göre daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Takım aşınması performansını ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla frezeleme operasyonunda 175 m/dk kesme hızı, 0.08 mm/diş ilerleme ve 4 mm talaş derinliği kesme parametrelerinde vorteks tüpü ile birlikte MQL soğutma yöntemi de kullanılmıştır [45]. Bu durumun kesme işlemini pozitif yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Polimer malzemelerin frezelenmesinde vorteks tüpü kullanımının kuru kesmeye göre kesme sıcaklığını, kesme kuvvetlerini [52], takım aşınmasını [58,60] ve malzemede işleme sonrası meydana gelen çapak yüksekliğini düşürdüğünü [53] gözlemlemişlerdir. 53 numaralı çalışma deneylerinde kullanılan devir 25000 rpm, ilerleme oranı 120 mm/dk, kesme derinliği 0.1 mm'dir.

Al ve alaşımlarının 100,150,250 m/dk kesme hızları ve 1, 2.5 mm kesme derinlikleri kullanılarak frezelenmesinde geleneksel soğutucuların daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağladığını ve çapak yüksekliğinin daha az olduğunu vurgulamışlardır [44,56]. Ayrıca yağlama ve soğutmaya eş zamanlı olarak yapan sistemler de geliştirmiş; daha iyi takım performansı ve daha uzun takım ömrü elde etmişlerdir [59]. Polimer, çelik ve alüminyum alaşımlarının yanı sıra pirinç, süper alaşımlar, Ti alaşımları, paslanmaz çelik ve kompozit malzemeler üzerine de çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Pirinci 850 rpm dönme hızı ve 0.5 mm kesme derinliğinde vorteks tüpü ile frezelemenin, kuru frezeleme ve geleneksel soğutucu ile frezelemeye göre kesme sıcaklığı açısından daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir [47]. Süper alaşımlar işlenirken vorteks tüpü ve MQL'in birlikte kullanıldığı bir sistem ile yapılan frezelemede kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün daha düşük değerlerini elde etmişlerdir. Deneylerde 31.4 m/dk kesme hızı; 0.025, 0.050, 0.075 mm/diş ilerleme oranları ve 0.5,0.75,1 mm kesme derinlikleri kullanılmıştır [48]. Ti alaşımları için, vorteks tüpü ile frezelemede kaplamasız takım kullanmanın daha düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sağlayacağını belirlemişlerdir [49]. Paslanmaz çelik frezelenirken sentetik yağ ya da su bazlı emülsiyon kullanımının yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri açısından kuru frezeleme ve vorteks tüpü ile frezelemeye göre daha avantajlı olduğunu vurgulamışlardır [50]. Vorteks tüpü ile kompozit bir malzeme frezelenmesinde çapak yüksekliğinin soğutucu ile frezelemeye göre daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [57].

### 3.3. Delme Yöntemine Etkisi (Effect on Drilling Method)

Delme operasyonlarında deneysel çalışmalar için, genellikle CFRP kompozit malzeme tercih edilmiş, vorteks tüpü geleneksel soğutucu ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, delme operasyonu için vorteks tüpü kullanmanın geleneksel soğutucu kullanmaktan daha büyük kesme kuvvetine, torka ve yüzey pürüzlülüğüne yol açtığını, bazı koşullar altında ise, kesme gücü veya tork değerlerinin her iki soğutma tipi için yaklaşık olarak aynı olduğunu saptamışlardır. Ayrıca vorteks tüpü kullanımında, 500 ila 6000 rpm dönme hızı ve 0,1 ila 0,9 mm/s ilerleme hızı aralığında kesme kuvveti ve torkun, ilerleme hızı ile doğru, dönme hızı ve ultrasonik güç ile ters orantılı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir [62-64]. AISI 1040 çeliğinin 500,1000,1500 rpm hızlarında ve 5,10,15 mm/dk ilerleme oranlarında yapılan delme operasyonuna ilişkin bir çalışmada ise vorteks kullanımının standart soğutucu ile delme ve kuru delme

işlemlerine göre daha iyi yüzey kalitesi sağladığını vurgulamışlardır. Şekil 6’da vorteks tüpü ile delme operasyonu gösterilmektedir.

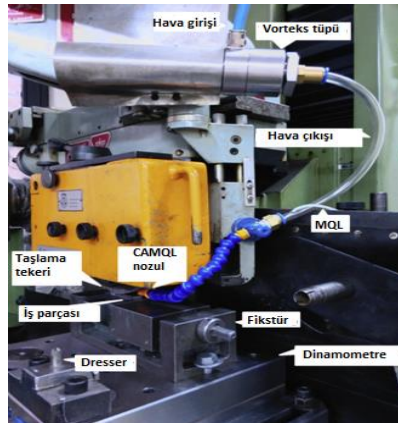


Şekil 6. Vorteks tüpü ile delme operasyonu [65]

### 3.4. Taşlama Yöntemine Etkisi (Effect on Grinding Method)

İncelenen çalışmalarda taşlama operasyonu için vorteks tüp kullanımının kuru taşlama ve geleneksel soğutucu ile taşlamaya göre karşılaştırması yapılmıştır. Bazı çalışmalarda, sentetik yağ ile vorteks tüpü ve MQL ile vorteks tüpü kullanılmıştır. Kesici olarak CBN taş ve iş parçası malzemesi olarak çelik tercih edilmiştir.

Araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü açısından, geleneksel soğutucu kullanımının vorteks tüpü kullanımına göre daha iyi sonuç verdiğini, vorteks tüp ile soğutmada geleneksel soğutucuya göre daha az kalıntı gerilme meydana geldiğini belirtmiştir. Ayrıca vorteks tüpü kullanımının silindirik taşlama operasyonunda daireselliği iyileştirdiğini saptamışlardır [67-68,70]. 67 ve 68 numaralı çalışmalarda iş parçası hızı 18 m/dk; kesme derinlikleri 3,5,10,20,30  $\mu\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Vorteks tüpü ile soğutma yönteminin, çeliklerde enerji sarfıyatı açısından kuru işlemeye ve geleneksel soğutucu ile işlemeye göre daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır. Tekerlek hızının 23 m/s, tabla hızının 400 mm/dk ve kesme derinliğinin 10,20  $\mu\text{m}$  değerlerinde olduğu deney şartlarında; vorteks tüpü ile ve bitkisel yağın beraber kullanımının geleneksel soğutuculara göre daha az kalıntı gerilmeye neden olduğu tespit edilmiştir [69]. Çeliklerin taşlanması vorteks tüp kullanımının ya da vorteks tüp ile birlikte MQL kullanımının, taşlama kuvvetini kuru taşlamaya göre düşürdüğünü gözlemlenmiştir [70]. Şekil 7’de vorteks tüpü ile birlikte MQL’in kullanıldığı bir sistem görülmektedir.



Şekil 7. Vorteks tüpü ile birlikte MQL kullanımı [70]



#### 4. TARTIŞMA VE BULGULAR (DISCUSSION AND FINDING)

##### 4.1. Tornalama Operasyonu İçin Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Turning Operation)

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde tornalama operasyonu için çalışmaların, vorteksin soğutma performansı, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve takım ömrüne etkisi üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Özellikle takım ömrü ve kesme sıcaklığı arasında bağıntılar kurularak ideal kesme şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Tablo 3'te incelenen çalışmaların yoğunlaştığı konular görülmektedir.

**Tablo 3.** Tornalama operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Malzeme																						
Kesme Sıcaklığı		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•									•
Aşınma/Takım ömrü	•	•	•	•			•	•						•	•	•	•	•				•
Kesme Kuvvetleri	•			•	•							•								•		
Yüzey pürüzlülüğü	•						•	•	•	•				•	•		•	•	•	•	•	•

Tablo 3 incelendiğinde 23 ile 34 arası numaralandırılan çalışmalarda araştırmacılar, vorteks tüpünün kesme sıcaklığına olan etkisini incelemiş ve vorteks tüpü kullanımının kesme sıcaklığını malzemelere göre %7 ila %66 arasında azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca sıvı ile birlikte vorteks tüpü kullanımı ve kriyojenik soğutma ile birlikte vorteks tüpünün kullanımı ile ilgili çalışmalar da yapmış; soğutma sıvılarına göre sırasıyla %12 ve %22 daha iyi soğutma performansı elde etmişlerdir. 22-25, 28-29 ve 35-39 arası çalışmalarda daha çok aşınma ve takım ömrü için vorteks tüpünün etkisini incelemişlerdir. Vorteks tüpü kullanımının kuru kesmeye göre takım aşınmasını %25-%50 oranında azalttığını ancak soğutucu sıvı ile karşılaştırıldığında beklenen performansı gösteremediğini gözlemlemişlerdir. Vorteks tüpünün, sıvı ile birlikte kullanıldığında, takım aşınması performansını yalnızca soğutucu sıvı kullanımına göre %50 iyileştirdiği görülmüştür.

22, 28-31, 35-36 ve 38-40 numaralı çalışmalarda vorteks tüpünün yüzey kalitesine etkisini incelemiş, vorteks tüpü kullanımının soğutma sıvılarına göre %5-%28 oranında daha iyi yüzey kalitesi sağladığını gözlemlemişlerdir. Ancak kuru işleme ile karşılaştırıldığında, işlenen malzeme ve kullanılan kesici takım önem kazanmaktadır. AISI 1010 için kuru işlemedeki yüzey kalitesi vorteks tüpü kullanarak işlemeye göre %20 daha iyi olurken, Ti-6Al-4V alaşımı TiAlN kaplamalı karbür takım ve vorteks tüpü ile işlendiğinde kuru kesmeye göre %26 oranında avantaj elde etmektedir. 22, 25, 26, 33 ve 41 numaralı çalışmalar vorteks kullanımının kesme kuvvetlerine etkisi üzerinde durmuştur. Araştırmacılar, vorteks tüpü kullanımının kesme kuvvetini kuru işlemeye göre %15 oranında azalttığını belirtmişlerdir. Kuru kesme yerine kriyojenik soğutma ve vorteks tüpü bir arada kullanıldığında esas kesme kuvveti yaklaşık %20 oranında azalmaktadır. Ancak önceden soğutma ve geleneksel soğutma ile karşılaştırıldığında vorteks tüpü daha az etkin kalmıştır.

##### 4.2. Frezeleme Operasyonu İçin Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Milling Operation)

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde frezeleme operasyonu için çalışmaların, vorteksin soğutma performansı, kesme kuvveti, aşınma-takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliğine etkisi üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Tablo 4'te frezeleme operasyonu için incelenen çalışmaların yoğunlaştığı konu dağılımı görülmektedir.

**Tablo 4.** Frezeleme operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	Çalışma konusu																	
	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
Kesme Sıcaklığı				•					•	•	•	•						
Aşınma/Takım ömrü		•	•				•							•	•	•	•	•
Kesme Kuvvetleri					•	•	•	•	•									
Yüzey Pürüzlülüğü	•	•	•	•	•	•	•	•										
Çapak Yüksekliği										•			•					

Tablo 4 incelendiğinde frezeleme operasyonu için en çok çalışmanın yüzey pürüzlülüğü üzerine yapıldığı görülmektedir. 44-51 arası çalışmalarda; vorteks tüp kullanımına göre soğutucu sıvı kullanımının yaklaşık %10-%15, MQL kullanımının ise %14 daha düşük yüzey pürüzlülüğü gösterdiğini, yalnızca vorteks tüp kullanımının kuru işlemeye göre %13 daha iyiyken, vorteks tüpü ile birlikte MQL kullanımının kuru işlemeye göre %15 daha iyi yüzey kalitesi sağladığını, paslanmaz çeliklerin vorteks tüpü ile işlenmesinde kaplamasız takım kullanmanın daha avantajlı olacağını gözlemlemişlerdir. 45-46, 57-61 numaralar arası çalışmalarda vorteks tüp kullanımının aşınmaya ve takım ömrüne olan etkisi incelenmiştir. Yan kenar aşınması için vorteks tüp ve MQL kullanımının, sadece MQL kullanımına göre %4, kuru işlemeye göre %16 daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Vorteks tüp kullanımının kuru kesmeye göre yüksek ilerleme ve kesme hızında takım ömrünü %30-%45 aralığında arttırdığını vurgulamışlardır. Ayrıca MQL ile birlikte vorteks tüp kullanımının takım ömrü açısından daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir [51]. 47,52-55 numaralı çalışmalarda vorteks tüpünün genellikle kuru kesmeye göre kesme sıcaklığına olan etkisi ve soğutma performansı araştırılmıştır. Vorteks tüp kullanımının, kullanılan malzemeye göre değişmekle birlikte kuru işlemeden %12-%35, geleneksel soğutucu ile işlemeden ise %5 daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. 48-52 numaralar arası çalışmalarda vorteks tüp kullanımının kesme kuvvetlerine etkisi üzerinde durulmuştur. Çalışmalarda; vorteks tüpünün kesme kuvvetlerini kuru kesmeye göre %12; vorteks tüp ve MQL'in birlikte kullanımının geleneksel soğutmaya göre %5-8 oranında düşürdüğünü, yalnızca vorteks tüp kullanımının geleneksel soğutmaya ve sentetik yağa karşı daha az başarılı olduğunu belirtmişlerdir. 53 ve 56 numaralı çalışmalarda vorteks tüpünün çapak yüksekliği ile ilişkisi incelenmiştir. Vorteks tüpü kullanımının kuru kesmeye göre %62 daha düşük çapak yüksekliği sağladığı ancak geleneksel soğutucuların vorteks tüp kullanımına göre %84 daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

#### 4.3. Delme Operasyonu için Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Drilling Operation)

Literatür çalışmalarına bakıldığında Vorteks tüpünün imalat proseslerine olan etkisi bakımından en az çalışmanın delme operasyonu için yapıldığı gözlemlenmiştir. Delme operasyonu için genellikle CFRP kompozit malzeme tercih edilmiş, kesme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitesi ve takım aşınması dikkate alınmıştır. Tablo 5'te delme çalışmalarının yoğunlaştığı konular görülmektedir.

**Tablo 5.** Delme operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	Çalışma Konusu			
	62	63	64	65
Soğutma Etkisi	•			
Takım Aşınması			•	
Kesme kuvvetleri		•	•	
Yüzey Pürüzlülüğü		•	•	•
Tork		•	•	

Araştırmacılar (62), vorteks tüpü ile delme operasyonunun kuru işlemeye göre soğutma performansı üzerinde durmuş, daha yüksek soğuk hava basıncı ile daha iyi soğutma performansı elde edileceğini belirlemişlerdir. 63 ve 64 numaralı çalışmalarda vorteks tüpü ile delme operasyonunun soğutma sıvısına göre kesme kuvvetlerini %10, torku %15, yüzey pürüzlülüğünü ise %30 arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ilerleme hızı azaldıkça, kesme kuvveti ve torkun azaldığını vurgulamışlardır. 65 numaralı çalışmada vorteks tüpü kullanılarak yapılan deneylerde yüzey kalitesinin kuru işleme ile yapılan deneylere göre %22, geleneksel soğutma sıvısı ile yapılan deneylere göre %13 daha iyi olduğunu belirlemişlerdir.

#### 4.4. Taşlama Operasyonu için Elde Edilen Sonuçlar (Results for the Grinding Operation)

Vorteks tüpünün taşlamaya olan etkisi üzerine yapılan makaleler incelendiğinde çalışmaların genellikle kalıntı gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü üzerine yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Tablo 6'da vorteks tüpünün taşlamaya etkisini incelemek için çalışılan konular gösterilmektedir.

**Tablo 6.** Taşlama operasyonu için yapılan çalışmaların konu dağılımı

Kaynak No	66	67	68	69	70
Çalışma Konusu					
Enerji Sarfıyatı				•	
Kalıntı Gerilmeler		•	•		
Yüzey Pürüzlülüğü	•	•	•		
Taşlama Kuvveti	•				•

Araştırmacılar (66) vorteks tüpünün kesme derinliği ve ilerleme esas alındığında kesme kuvvetlerini %17-%24 oranında azalttığını ve yüzey kalitesini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. 70 numaralı çalışmada MQL ile birlikte vorteks tüpü kullanılarak yapılan düzlem taşlama operasyonunda, taşlama kuvvetinin kuru taşlamaya göre %42, geleneksel soğutucu ile taşlamaya göre %27 düştüğünü gözlemlemişlerdir. 67 ve 68 numaralı makalelerde taşlama operasyonu için vorteks tüp ile soğutmada geleneksel soğutucuya göre %22-%50 arası daha az kalıntı gerilme meydana geldiğini ancak yüzeyde yağlama yapması nedeniyle soğutma sıvısı kullanmanın, daha iyi yüzey kalitesi sağladığını gözlemlemişlerdir. 69 numaralı çalışmada araştırmacılar vorteks tüpü ile taşlamanın kuru hava ile taşlamaya göre %19 geleneksel soğutucu ile taşlamaya göre %37 daha az enerji sarfıyatı sağladığını gözlemlemişlerdir. Vorteks tüpünden üretilen soğuk hava ile birlikte bitkisel yağ kullanıldığında ise kalıntı gerilmelerin geleneksel soğutucu kullanımına göre %20 daha az olduğu görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmaların incelenmesi sonucu, vorteks tüpünün kesme performansına etkisiyle ilgili çalışmaların genel olarak tormalama ve frezeleme operasyonları üzerine yoğunlaştığı, delme ve taşlama operasyonları için daha az çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir. Genel değerlendirmeler aşağıdaki gibidir.

Vorteks tüpü kullanımının tormalama operasyonu için kuru kesmeye göre genel olarak kesme kuvvetleri, takım ömrü ve soğutma performansını olumlu etkilediği ancak yüzey kalitesinin malzeme seçimine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Geleneksel soğutma ile karşılaştırıldığında vorteks tüpü daha iyi yüzey kalitesi sağlarken kesme kuvvetleri ve takım aşınması performansı geleneksel soğutmaya göre daha az etkin olmaktadır. Ti ile alaşımları, süper alaşımlar için vorteks tüpünün MQL ve kriyojenik soğutma yöntemleriyle birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir.

Frezeleme operasyonlarında vorteks tüpü kullanımı kesme sıcaklığını, kuru işlemeye ve geleneksel soğutuculara göre daha fazla düşürmektedir. Vorteks tüpü kullanarak elde edilen yüzey kalitesi kuru işlemeye göre daha iyi olurken, soğutucu sıvılar, vorteks tüp kullanımına göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağlamaktadır. Bunun nedeni soğutucu sıvıların soğutma işlemine ek olarak yüzeyde yağlama işlemi yapmasıdır. Bu nedenle frezeleme operasyonlarında çok yüksek yüzey kalitesi istenen yerlerde vorteks tüp kullanımı uygun olmayacaktır. Kesme kuvvetleri esas alındığında vorteks tüpü kullanımı kuru kesmeye göre kesme kuvvetlerini düşürmekte ancak geleneksel soğutucu sıvısı ve sentetik yağa göre daha az etkin kalmaktadır.

Delme operasyonlarında vorteks tüpü kullanımı kesme kuvvetleri ve tork performansı açısından geleneksel soğutmaya göre daha düşük performans göstermiştir. Yüzey kalitesi ise delme operasyonunda kullanılan iş parçası malzemesine göre değişiklik göstermektedir.

Taşıma operasyonlarında vorteks tüpü kullanımı taşıma kuvveti, kalıntı gerilmeler ve enerji tüketimi açısından geleneksel soğutma yöntemine göre daha iyi performans göstermektedir. Ancak geleneksel soğutucular aynı zamanda yüzeyde yağlayıcı görevi de yaptığı için vorteks tüpü ile soğutmaya göre daha iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, tornalama ve frezeleme için çok yüksek yüzey kalitesi beklenmeyen durumlarda vorteks tüpünün kullanımı avantajlı olacaktır. Delme ve taşıma operasyonları için farklı malzemeler üzerine daha çok çalışma yapılması doğru tespit ve karşılaştırma açısından daha faydalı olacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çakır, O., Kılıçkap, E., "Metallerin Soğuk Talaşlı İşlenmesi", Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, 279-283, 2001.
- [2] Çakır, O., M. Kıyak, and Erhan Altan. "Comparison of gases applications to wet and dry cuttings in turning." *Journal of Materials Processing Technology* 153 (2004): 35-41.
- [3] Özçatalbaş, Yusuf, And B. A. Ş. Ali. "Tornalamada Hava Püskürtme İle Soğutmanın Kesme Kuvvetleri Ve Takım Ömrüne Etkilerinin Araştırılması." *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21.3 (2006).
- [4] Yılmaz, Bahattin, Şener Karabulut, and Abdulkadir Güllü. "Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters." *Journal of Manufacturing Processes* 32 (2018): 553-563.
- [5] Kus, Abdil, et al. "Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting." *Sensors* 15.1 (2015): 1274-1291.
- [6] Yamane, Yasuo, Norihiko Narutaki, and Katsura Hayashi. "Suppression of tool wear by using an inert gas in face milling." *Journal of materials processing technology* 62.4 (1996): 380-383.
- [7] Çakır, A., et al. "The effect of minimum quantity lubrication under different parameters in the turning of AA7075 and AA2024 aluminium alloys." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 84.9-12 (2016): 2515-2521.
- [8] Nguyen, T., and L. C. Zhang. "An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding." *Journal of Materials Processing Technology* 140.1-3 (2003): 224-230.
- [9] Boswell, Brian, and Tilak Chandratilleke. "Air-cooling used for metal cutting." *American Journal of Applied Science* 6.2 (2009): 251-262.
- [10] Kırmacı, Volkan. "Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava, Oksijen, Karbondioksit, Karışım Gazının Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi." (2007).
- [11] Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Kay, M., Karşı, S., "Vorteks Tüpler: 1- Teknolojik Gelişim", *Mühendis ve Makine*, 47, 554, s. 42-51, (2006).
- [12] TMMOB Makina Mühendisleri Odası aylık yayın organı, *Mühendis ve Makina* Cilt:51, Sayı:610 (2010).
- [13] Jozić, Sonja, Dražen Bajić, and Luka Celent. "Application of compressed cold air cooling: achieving multiple performance characteristics in end milling process." *Journal of Cleaner Production* 100 (2015): 325-332.

- [14] <https://www.thesisat.org/vorteks-tupu-sogutma-sistemi.html>
- [15] Kırmacı, Volkan; Usta, Hüseyin; MENLİK, Tayfun. Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma-Sogutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması. *Sakarya University Journal of Science*, 10.2 (2006): 39-44.
- [16] Salaam, H. A., et al. "Minimum quantity lubrication (MQL) using Ranque–Hilsch vortex tube (RHVT) for sustainable machining." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 217. Trans Tech Publications Ltd, 2012.
- [17] Kırmacı, Volkan. "Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air." *international journal of refrigeration* 32.7 (2009): 1626-1633.
- [18] Rubio, E. M., et al. "Cooling systems based on cold compressed air: A review of the applications in machining processes." *Procedia engineering* 132.1 (2015): 413-418.
- [19] Boswell, Brian, et al. "A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92.1-4 (2017): 321-340.
- [20] Elshwain, A. E. I., Norizah Redzuan, and Noordin Mohd Yusof. "Machinability of Nickel and Titanium alloys under of gas-based coolant-lubricants (cls)—A Review." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2.11 (2013): 690-702.
- [21] Cong, Weilong, and Z. J. Pei. "Dry machining using vortex-tube generated cold air as coolant: a literature review." *ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2008.
- [22] Ko, Tae Jo, Hee Sool Kim, and Bo Gu Chung. "Air–oil cooling method for turning of hardened material." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15.7 (1999): 470-477.
- [23] Liu, Jie, and Y. Kevin Chou. "Vortex-tube cooling for tool wear reduction in A390 dry machining." *World Tribology Congress III*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2005.
- [24] Liu, Jie, and Y. Kevin Chou. "On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al–Si alloys with vortex-tube cooling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.3-4 (2007): 635-645.
- [25] Hu, Jing Shu, et al. Experimental investigation on air cooling of GCr15. In: *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2008. p. 197-200.
- [26] Sun, S., M. Brandt, and M. S. Dargusch. "Machining Ti–6Al–4V alloy with cryogenic compressed air cooling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50.11 (2010): 933-942.
- [27] Selek, Murat, et al. "Experimental examination of the cooling performance of Ranque-Hilsch vortex tube on the cutting tool nose point of the turret lathe through infrared thermography method." *International journal of refrigeration* 34.3 (2011): 807-815.



- [28] An, Q. L., Y. C. Fu, and J. H. Xu. "Experimental study on turning of TC9 titanium alloy with cold water mist jet cooling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51.6 (2011): 549-555.
- [29] Liu, Nun-Ming, Ko-Ta Chiang, and Chen-Ming Hung. "Modeling and analyzing the effects of air-cooled turning on the machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy using the cold air gun coolant system." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.5-8 (2013): 1053-1066.
- [30] Nelge, Balaji, et al. Thermal and Metallographic Investigation for H13A and AISI1050 using Vortex Tube Jet Assisted (VTJA) Machining, 2015.
- [31] Yüksel, S., and A. Y. H. A. N. Onat. "Investigation of CNC Turning Parameters by Using a Vortex Tube Cooling System." *Acta Physica Polonica A* 127.4 (2015): 881-885.
- [32] Balki, Nilesh; Nelge, Balaji; Ingle Asha. Experimental Investigation of Environment Friendly Cooling Methods for Different Machining Conditions. *International Journal of Engineering Sciences&Research Technology*, 6.11 (2017): 186-191.
- [33] Ekinović, Sabahudin, et al. "Cold Air Dry Machining, Part 1: Experimental Setup." *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology* 18.1 (2014): 39-42.
- [34] Boswell, Brian, and Tilak Chandratilleke. "Air-cooling used for metal cutting." *American Journal of Applied Science* 6.2 (2009): 251-262.
- [35] Singh, GurRaj, and Vishal S. Sharma. "Analyzing machining parameters for commercially pure titanium (Grade 2), cooled using minimum quantity lubrication assisted by a Ranque-Hilsch vortex tube." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88.9-12 (2017): 2921-2928.
- [36] Fernandez, David, et al. "Comparison of machining Inconel 718 with conventional and sustainable coolant." *MM Science Journal* 514 (2014): 506-510.
- [37] Naumov, Alexander, et al. "System of High-performance Cutting with Enhanced Combined Effect of Cooling and Lubrication Medium Based on Ranque-hilsch Effect." *Procedia CIRP* 57 (2016): 457-460.
- [38] Boswell, Brian, and Mohammad Nazrul Islam. "Sustainable cooling method for machining titanium alloy." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 114. No. 1. IOP Publishing, 2016.
- [39] Sanchez, Luiz EA; Scalon, Vicente L.; Abreu, Guilherme GC. Cleaner machining through a toolholder with internal cooling. In: *3rd International Workshop Advances in cleaner production. Brazil*. 2011.
- [40] Onat, A., S. Yüksel, and S. Hartomacıoğlu. "OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS OF TURNING OPERATION WITH VORTEX TUBE COOLING SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METHOD." *Machines. Technologies. Materials*. 11.9 (2017): 439-442.
- [41] Taha, Zahari, et al. "Vortex tube air cooling: The effect on surface roughness and power consumption in dry turning." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 8 (2013): 1477.
- [42] Kostadin, Tihana, Goran Cukor, and S. Jakovljevic. "Analysis of corrosion resistance when turning martensitic stainless steel X20Cr13 under chilled air-cooling." *Advances in Production Engineering & Management* 12.2 (2017): 105.

- [43] Gupta, Upendra Sharan, et al. A Proposed Method For Cooling Of Conventional Machines By Vortex Tube Refrigeration. 2017
- [44] Pinar, Ahmet Murat, Serhat Filiz, and Bekir Sadık Ünlü. "A comparison of cooling methods in the pocket milling of AA5083-H36 alloy via Taguchi method." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83.9-12 (2016): 1431-1440.
- [45] Su, Y., et al. "Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.6 (2007): 927-933.
- [46] Yalçın, B., A. E. Özgür, and M. Koru. "The effects of various cooling strategies on surface roughness and tool wear during soft materials milling." *Materials & Design* 30.3 (2009): 896-899.
- [47] Alsayyed, Basel, Mohammad O. Hamdan, and Saud Aldajah. "Vortex Tube Impact on Cooling Milling Machining." *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012.
- [48] Yuan, Song Mei, et al. "Investigation of Machinability in Minimum Quantity Lubrication Milling of GH4169 Aerospace Superalloy." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 34. Trans Tech Publications Ltd, 2010.
- [49] Safari, H., et al. "Cutting force and surface roughness characterization in cryogenic high-speed end milling of Ti-6Al-4V ELI." *Materials and Manufacturing Processes* 29.3 (2014): 350-356.
- [50] Chockalingam, P., and Lee Hong Wee. "Surface roughness and tool wear study on milling of AISI 304 stainless steel using different cooling conditions." *International Journal of Engineering and Technology* 2.8 (2012): 1386-1391.
- [51] Boswell, Brian, and Mohammad Nazrul Islam. "The challenge of adopting minimal quantities of lubrication for end milling aluminium." *IAENG Transactions on Engineering Technologies*. Springer, Dordrecht, 2013. 713-724.
- [52] Ha, Seok Jae, et al. "Influence of cutting temperature on carbon fiber-reinforced plastic composites in high-speed machining." *Journal of Mechanical Science and Technology* 31.4 (2017): 1861-1867.
- [53] Miranda-Giraldo, Michael, et al. "Burr formation and control for polymers micro-milling: A case study with vortex tube cooling." *Dyna* 84.203 (2017): 150-159.
- [54] Perri, Gian Marco, et al. "Numerical modelling and analysis of the influence of an air cooling system on a milling machine in virtual environment." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86.5-8 (2016): 1853-1864.
- [55] Brandão, Lincoln Cardoso, Reginaldo Teixeira Coelho, and Alessandro Roger Rodrigues. "Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl) N-coated and PcBN-tipped tools." *Journal of materials processing Technology* 199.1-3 (2008): 234-244.
- [56] Pınar, Ahmet; Filiz, Serhat. AA5083-H36 Malzemesinin Farklı Soğutma Ortamlarında Frezelenmesinde Çapak Oluşumunun İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12.2, 2006.

- [57] Gisip, Judith, Rado Gazo, and Harold A. Stewart. "Effects of cryogenic treatment and refrigerated air on tool wear when machining medium density fiberboard." *Journal of Materials Processing Technology* 209.11 (2009): 5117-5122.
- [58] Khairusshima, MK Nor, and I. S. S. Sharifah. "Study on tool wear during milling CFRP under dry and chilled air machining." *Procedia engineering* 184 (2017): 506-517.
- [59] Nevala, Shawn E., et al. "Relative Effects of Cooling and Lubrication in Micro-milling of Aluminum and the Design of Atomization cooling and Lubrication systems." *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2012.
- [60] Khairusshima, MK Nor, et al. "Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic." *Wear* 302.1-2 (2013): 1113-1123.
- [61] Balmer, R. T. "Pressure-driven Ranque-Hilsch temperature separation in liquids." (1988): 161-164.
- [62] Cong, W. L., et al. "Rotary ultrasonic machining of CFRP using cold air as coolant: feasible regions." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30.10 (2011): 899-906.
- [63] Cong, W. L., et al. "Dry machining of carbon fiber reinforced plastic composite by rotary ultrasonic machining: effects of machining variables." *ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2011.
- [64] Cong, W. L., et al. "Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: using cutting fluid vs. cold air as coolant." *Journal of Composite Materials* 46.14 (2012): 1745-1753.
- [65] Patwari, Anayet U., et al. "Thermal investigation of vortex generated green coolant on surface texture for drilling process." *Procedia Engineering* 105 (2015): 808-813.
- [66] Lee, Pil-Ho, and Sang Won Lee. "Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51.3 (2011): 201-209.
- [67] Choi, H. Z., S. W. Lee, and H. D. Jeong. "A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel." *Journal of Materials Processing Technology* 111.1-3 (2001): 265-268.
- [68] Choi, Hon Zong, Suk Woo Lee, and Hae Do Jeong. "The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels." *Journal of Materials Processing Technology* 127.2 (2002): 155-158.
- [69] Nguyen, Thai; Zhang, Liang Chi. A note on two cooling methods in surface grinding. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd (2011). p. 5-8.
- [70] Saberi, A., et al. "Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube." *Journal of cleaner production* 131 (2016): 728-738.