

Ti6Al4V Alaşımının Delme ve Frezeleme Proseslerinde İşleme Parametrelerinin Talaş Formları, Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesici Takımların Aşınması Üzerine Etkileri

Şakir ALTINSOY^{1*}, Nuray BEKÖZ ÜLLEN²

¹ Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakülte, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

*¹ sakir.altinsoy@yeniuyuzil.edu.tr, ² nbekoz@iuc.edu.tr

(Geliş/Received: 09/09/2024;

Kabul/Accepted: 15/11/2024)

Öz: Savunma, uzay ve medikal alanlarda kullanımı gittikçe artan Ti6Al4V alaşımı, işlenmesi oldukça zor ileri mühendislik malzemelerindendir. Ürünlerin genelde karmaşık şekilli olması, yüksek boyutsal hassasiyet gerektirmesi talaşlı işlem gerektirmektedir. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımının farklı matkap çapı ve soğutma ortamında delme davranışı; farklı kesme hızı ve soğutma ortamına göre frezeleme davranışı incelenmiştir. Kuru ve kesme sıvısı ortamlarında; 7,5 mm ve 8,4 mm çaplı matkaplar ile delme işlemi ve 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızları ile frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Seçilen kesici takımlar ve parametreler çalışmanın yeniliğini oluşturmaktadır. İşlenebilirlik analizleri; talaş formları, işlenen yüzeylerin yapısı ve pürüzlülük değerleri, kesici takımların aşınma mekanizması ve takım ömürlerinin tespit edilmesi ile çok yönlü olarak yapılmıştır. Delme işlemi sonuçlarına göre; düşük çapta ve kesme sıvısı kullanımında yüzey pürüzlülük değerleri azalmış ve helisel talaş formu elde edilmiştir. Artan çap ve kuru ortam burğu talaş oluşumuna ve matkap aşınmasında artışa neden olmuştur. Elde edilen frezeleme sonuçlarına göre; artan kesme hızıyla kuru ortamda uzun spiral talaş oluşumu gözlenirken, kesme sıvısı ile homojen dağılımlı kısa spiral talaş oluşumu gerçekleşmiştir. Matkap çapının düşmesi ile uç ömrü kuru ortamda %42, kesme sıvısı kullanımında %22 bir artış göstermiştir. Kuru ortamda kesme hızının artmasıyla freze uç ömründe %23,53 artış olmuş, kesme sıvısı kullanımında ise %16,67 oranında artış olmuştur. Kesme sıvısının kullanımında freze uç ömrü, düşük kesme hızında %13,34, yüksek kesme hızında %5,56 oranında artmıştır.

Anahtar kelimeler: Ti6Al4V, işlenebilirlik, delme, frezeleme, takım ömrü ve aşınma mekanizması.

Effects of Processing Parameters on Chip Forms, Surface Roughness and Wear of Cutting Tools in Drilling and Milling Processes of Ti6Al4V Alloy

Abstract: Ti6Al4V alloy is an engineering material that is increasingly used in defense, aerospace and medical fields and is difficult to process. The products generally have complex shapes and require high dimensional precision, necessitating machining operations. In this study, drilling behavior of Ti6Al4V alloy with different drill diameter and cooling environment; and milling behavior was examined according to different cutting speed and cooling environment. Drilling (with 7.5 mm and 8.4 mm diameter drill bits) and milling (with 50 m/min and 100 m/min cutting speeds) operations were carried out in dry and cutting cooling environment. The cutting tools and parameters selected in the study constitute the innovation of the work. Machinability analyses; the chip forms, structure and roughness values of the machined surfaces, wear mechanisms of the cutting inserts and tool life were determined in a versatile way. According to the results of the drilling process; with low diameter and cutting fluid usage, surface roughness values decreased and helical chip form was obtained. The increased diameter and dry environment have caused the formation of auger chip and an increase in drill bit wear. According to the milling results obtained; while long spiral chips were formed in a dry environment with increasing cutting speed, homogeneously distributed short spiral chips were formed with cutting fluid. As the drill diameter decreased, bit life increased by 42% in dry conditions and 22% in cutting fluid usage. With the increase in cutting speed in a dry environment, there was a 23.53% increase in milling tip life and a 16.67% increase in cutting fluid usage. With the use of cutting fluid, milling cutter life increased by 13.34% at low cutting speed and 5.56% at high cutting speed.

Key words: Ti6Al4V, machinability, drilling, milling, tool life and wear mechanism.

1. Giriş

Ti6Al4V alaşımları içerdikleri üstün özelliklerinden dolayı; havacılık, savunma sanayi, otomotiv endüstrisi, medikal implantlar, kimya sanayi, enerji santralleri ve üst düzey spor ekipmanlarında kullanım alanlarına sahiptir [1–3]. Bu özellikler; yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci, yüksek sıcakta sertlik özelliği, mükemmel biyouyumluluk, yorulma direnci, düşük termal iletkenlik ve düşük termal genleşmedir [4–7]. Kullanım alanları itibarıyla Ti6Al4V alaşımından üretilen parçaların ölçüsel doğruluk ve yüzeysel kalite gerektirmesi nihai işlem

* Sorumlu yazar: sakir.altinsoy@yeniuyuzil.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1893-2266, ² 0000-0003-2705-2559

olan talaşlı işleme proseslerini ön plana çıkarmıştır. Talaşlı işlemenin tercih edilme nedenleri istenilen boyut, ölçüsel ve yüzey kalitenin elde edilmesi, seri ve ekonomik olması, sektörde ileri tekniklerin kullanımı ve yetişmiş eleman sorunun olmamasıdır. Düşük termal iletkenliği, düşük elastisite modülü ve yüksek kimyasal reaktiviteye sahip olması gibi özelliklerinden dolayı talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi zor bir malzemedir [8]. Talaşlı imalat ile işlemede; düşük takım ömrü, düşük talaş kaldırma oranı ve kötü yüzey kalitesi gibi sorunlar üretim maliyetinin ve işleme zamanının artmasına neden olmaktadır [9]. Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalatında kesici takım performansının ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi yaşanan sorunları çözüme kavuşturmak için araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Geleneksel talaşlı işleme yöntemleri, ölçüsel doğruluk ve yüzey bütünlüğü açısından Ti alaşımlarının işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde; tornalama, frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat işlemleri içinde; delik delme işleminin bu işlemler arasında yaklaşık % 33 gibi bir paya sahip olduğu bilinmektedir [9]. Uçak kanatlarında ve gövde kısımlarında, silindir kapaklarında, motor gövdesinde ve birçok parçada delik oranı oldukça fazla olduğundan havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde yaklaşık %40-60 aralığında delme işlemi olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca uçak ve uzay endüstrisinde kullanılan pervane üretiminin %60'ında frezeleme işlemi, gaz türbinlerinin disk ve kompresör kapak üretiminde %40 frezeleme ve %20 delme işlemi yapılmaktadır [10]. Ti6Al4V alaşımının ısı iletkenliğinin düşük olması, talaşlı imalat ile işlenmesinde ortaya çıkan ısının kesme alanında yoğunlaşmasına ve bölgesel olarak kalmasına neden olmaktadır. Isının belli bir bölgede hapsolup yayılmaması da kesici takımda aşınmayı arttırmaktadır. Özellikle delme işlemi esnasında, plastik deformasyonun %90'ı ısıya dönüşmekte, deformasyon bölgesinde takımın, iş parçası ve talaşla temas ettiği bölgelerde yüksek ısı oluşturmaktadır. Isının çoğu kesme bölgesinde kalarak kesici ucun aşınmasına sebep olur. Yüzey kalitesini düşürerek, işlem maliyetini ve işlem süresini artırır [9]. Delik delme işlemi birçok teknikle yapılmasına rağmen matkapla delik delme hala en yaygın kullanılan yöntemdir [11,12]. Literatürde Ti6Al4V alaşımının riskli alanlarda kullanımından dolayı delinme işleminde matkap cinsi, geometrisi, işlem parametreleri ve kesme ortamı gibi değişkenlerin optimizasyonu üzerine birçok çalışma devam etmektedir [6,9,13]. Ti6Al4V alaşımının frezeleme işlemi ile yüksek doğruluk ve aşınma dayanımına sahip olması için gereken yüksek yüzey kalitesi sağlanır [14,15]. Frezeleme işleminde delme prosesine göre açık ortamda kesme yapıldığından; kesici takıma gelen kesme kuvveti ve takım aşınması daha azdır. Ancak titanyum alaşımlarının yüksek mekanik özellikler içermesi, ani olan titreşim ve darbelerde kesici ucun kırılmasına sebep olur. Bu yüzden sert kesici karbür takımlarla işlenmesi önerilmez. Titanyum alaşımlarının freze ile işlenmesinde uygun kesme hızının seçilmesi oldukça önemlidir. Çok düşük seçilen kesme hızlarında parçayı işlemek, kesici takım ucunda talaş sıvanması ve yapışması meydana getirebilir. Bu durum kesici takım geometrisini değiştirerek bütünlüğünü bozar. Çok yüksek seçilen kesme hızlarında parçayı işlemek, kesici takımın çok hızlı aşınmasına sebep olarak sürekli uç değişimi gerektirebilir. Bu durum çok yüksek maliyet artışına sebep olabilir [16]. İşlenebilirliğin anlaşılması için çıkan talaş formlarının iyi değerlendirilmesi gerekir. Talaş morfolojisi, işlenen yüzeyin kalitesi ve kesici takım ömrü açısından önemli kistaslardandır [17]. Yüzey kalitesini belirleyen en önemli özelliklerden biri de yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesidir. Bu değer soğutma ortamı, kesme parametreleri, kesici takım özellikleri ve tezgâh rijitliği gibi kriterlere bağlıdır [17-19]. İşlenen malzemenin ve kesici ucun özellikleri, kesme parametreleri, kesme ortamı, tezgâh kalitesi, operatör becerisi gibi birçok etken yüzey pürüzlülük değerinde belirleyicidir. Parçanın kullanım yerine göre istenen yüzey kalitesini elde etmek için çok farklı talaşlı imalat yöntemleri ve işleme parametreleri kullanılır. Talaşlı imalat ürünlerinin fiyatını belirlenen en önemli kalemlerden olan kesici takımların uzun ömürlü olması, hem istenen kalitede ürün elde etmek için hem de uç değişim sürecini azaltarak üretim sürecini iyileştirmek için önemlidir. Kesici takım ömründe etkili olan tüm unsurların belirlenmesi ve değerlendirilmesi işlenebilirlik açısından çok önemlidir ve belirlenmesi gereklidir [20]. Talaşlı imalat sonrasında işlenen parçanın yüzey kalitesi, ölçüm hassasiyeti ve işlemin verimliliği kesici takımların aşınmasıyla doğrudan etkilenmektedir [21,22]. Bu yüzden kesici takımlarda oluşan aşınma mekanizmalarının tanımlanması çok önemlidir. Bu faktörlerin iyileştirilmesi ile Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde; parça yüzey kalitesinin ve kesici takımların performansının artırılması mümkündür.

Genel olarak işlenebilirliğin değerlendirmesi; talaş oluşum mekanizmasının anlaşılması, işlenen yüzey kalitesinin ve kesici takım aşınması ile beraber kullanım ömrünün belirlenmesi ile yapılmaktadır [5,23-26]. İşleme performansının optimizasyonu işleme kalitesi ve maliyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde Ti6Al4V alaşımı işleme operasyonlarının ve parametrelerinin çeşitli yöntemler kullanılarak optimizasyonu üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen; hala yetersizliğinden bahsedilmekte ve işlenebilirliğindeki problemlere çözüm aranmaktadır. Düşük işlenebilirlik derecesine sahip bu alaşımların işlenmesinde yüzey bütünlüğü ve kesici takım aşınması gibi problemlerle sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının farklı çapta matkap ve soğutma ortamları kullanılarak delinmesi ve farklı kesme hızları ve soğutma ortamları kullanılarak frezelenmesi sonucu işlenebilirlik davranışları incelenmiştir. Delinen ve frezelenen parçalardan çıkan talaş

formları, işlenen yüzeylerin yapısı ve pürüzlülük değerleri, matkap ve freze uçlarının aşınma mekanizmaları ve aşınmaya bağlı kesici takım ömürleri belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen işlenebilirlik konusu literatürden farklı kesici takım ve parametrelerinin kullanımı ile ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışmayla ilgili literatür ışığı altında tartışılmıştır. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde karşılaşılan zorluklar da bilimsel bir dille değerlendirilmiştir.

2. Deneysel Metot

2.1. İş Parçası Malzemesi

Bu çalışmada, 30 mm çapa sahip Ti6Al4V alaşımı içi dolu profil çubuklar kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımının firma tarafından verilen kalite belgesinde kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (ağ.%) [6].

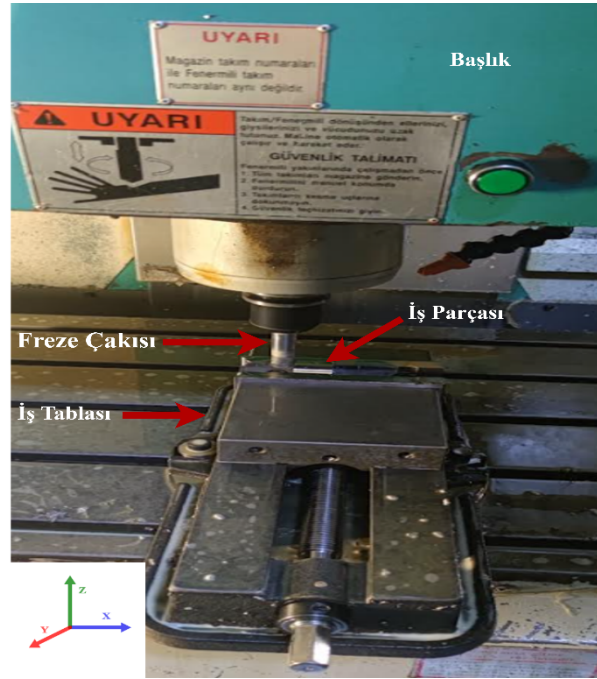
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6,09	3,91	0,13	0,02	0,01	0,001	0,09	Kalan

Tablo 2. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri [6].

Çekme dayanımı, MPa	Akma dayanımı, MPa	Sertlik, HV	Elastik Modülü, GPa
992	935	310	110

2.2. Parçaları Talaşlı İşleme Koşulları

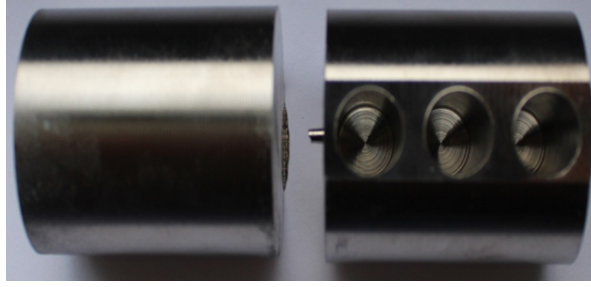
Gerek parçaların temini gerekse parçalar üzerinde yapılan tüm işlemlerin sanayide bulunan ve aktif olarak çalışan firmalarda gerçekleştirilmesi bakımından; Ti6Al4V alaşımını işleyen firmalar için çalışmanın sonuçlarının doğruluğu ve kabul edilebilirliği yüksektir. İş parçasının delik delme ve frezeleme işlemleri, AGMA VMC Serisi, VMC-115, X, Y ve Z eksenli, FANUC Serisi 18i-MB kontrolü 1-10,000 mm/dak kesme ilerlemesine sahip dik işleme tezgâhında yapılmıştır. Delme işleminde; 7,5 mm ve 8,4 mm çapında standart boylu iki ağız sayılı karbür matkaplar kullanılmıştır. Delme işleminde kör delikler; kesme hızı 50 m/dak, ilerleme hızı 0,08 mm/dev ve delme derinliği 20 mm olarak işlenmiştir. Her bir delme işlemi, üç parçaya üçer kör delik olmak üzere toplam dokuz delik delinerek yapılmıştır. Frezeleme işleminde; takımın alın kısmındaki dişlerin desteği ile kaldırılması olan alın frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Frezeleme APXT-1003-PDR freze ucu ile yapılmıştır. Frezeleme işlemlerinde; kesme hızları 50 m/dak, ve 100 m/dak, ilerleme hızı 0,25 mm/dev ve kesme derinliği 0,4 mm olarak belirlenmiştir. Her bir frezeleme işlemi iki parçanın üç tarafı işlenerek gerçekleştirilmiştir. Delme ve frezeleme işlemlerinde, iş parçalarının tezgâha bağlanmasında yüksek hassasiyetli sıkma sağlayan eş merkezli mengene kullanılmıştır. Delme ve frezeleme işlemleri kuru ve kesme sıvısı kullanılarak yapılmıştır. Her iki işlem de soğutucu sıvı olarak; %5 Estra 320 mikroemülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımı kullanılmıştır. Delme ve frezeleme işlemlerinin yapıldığı işleme tezgâhın görseli Şekil 1’de gösterilmiştir. Delme ve frezeleme testleri için kullanılan matkap ucunun ve frezeleme kesici ucunun görüntüleri ve teknik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Delik delme ve frezeleme işlemlerinden sonra iş parçalarının fotoğrafları sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3’de verilmektedir.



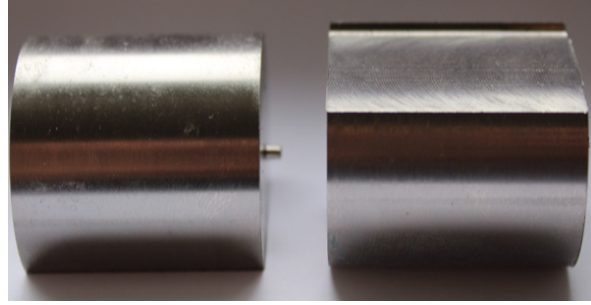
Şekil 1. Delme ve frezeleme işleminin yapıldığı işleme tezgâhı.

Tablo 3. (a) Matkap ve (b) freze uçlarının özellikleri ve görüntüleri.

(a)	Tip		Karbür Matkap
	Biçim		Elmas
	Boy		Standart Boy
	Üretici firma		MASTERCUT
	Uç ve Helis Açısı (°)		135 ve 28
	Ağız Sayısı		2
	Çap (mm)		7,5 8,4
	Kesme Boyu (mm)		69 75
	Tam Boy (mm)		109 117
	Tip		APXT Serisi
(b)	Biçim		Elmas
	ISO Kodu		ISO 8688
	Üretici Kodu		APXT-1003-PDR
	Üretici firma		KLP Cutting Tool
	Kalite		KLB 1255
	İç Daire (mm)		3
	Kalınlık (mm)		3,5
	Köşe Yarıçapı (mm)		0,80
	En (mm)		6,30
	Uzunluk (mm)		11,30
	Boşluk ve Talaş açıları (°)		11 ve 90



Şekil 2. Delme işleminden sonra iş parçasının yüzeyi.



Şekil 3. Frezeleme işleminden sonra iş parçasının yüzeyi.

2.3. İşlenen İş Parçalarının Karakterizasyonu

İşleme sonucu elde edilen talaş formlarının görüntüleri Canon marka EOS 1300D model 18-55MM DC-III fotoğraf makinesi kullanılarak çekilmiştir. İşlenen parçaların yüzey pürüzlülük ölçümleri SurfTest SJ-210 model Mitutoyo marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Deliklerin yüzey pürüzlülük ölçümleri için, 60°'lik açıya ve 2 µm'lik tipik uç yarıçapına sahip küresel tipteki prob ucu kullanılmıştır. 0,8 mm kalınlığında olan özel bir aparat yardımıyla problemler delik içlerine sokularak yüzeylerden ölçüm alınmıştır. İnce ayar el çarkı kullanarak prob pozisyonlandırılmıştır. Her bir delikten toplam beş ölçüm alınarak yüzey pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması (Ra) hesaplanmıştır. Kesici takımların aşınan yüzeylerinin ve işlem sonrası parça yüzeylerinin görüntü analizleri, JEOL™ JCM-6000 Benchtop model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. İşlenen parçalardan alınan örnekler ve kesici takımlar çift taraflı karbon bant kullanılarak numune tutuculara sabitlenmiştir. Kesici takımların aşınan yüzeyleri numune tutucularda yukarı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. SEM görüntüleri farklı büyütme oranları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelediğimiz aşınma SEM görüntüleri, kesici takımın asıl kesme kenarından alınmıştır. Takım ömrü belirlenirken aşınma kriteri olarak; kesici takımda oluşan ortalama serbest yüzey aşınmasının 200 µm'den fazla olması, kesici takımda herhangi bir kopma veya kırılma gerçekleşmesi durumu ele alınmıştır. Bu aşamalardan sonra kesme işlemine devam edilmemiş sonlandırılmıştır. Yapılan tüm karakterizasyon çalışmalarında sonuçlar verilirken; delme işleminde matkap çapı ve soğutma ortamına göre, frezeleme işleminde kesme hızına ve soğutma ortamına göre gruplandırma yapılmıştır.

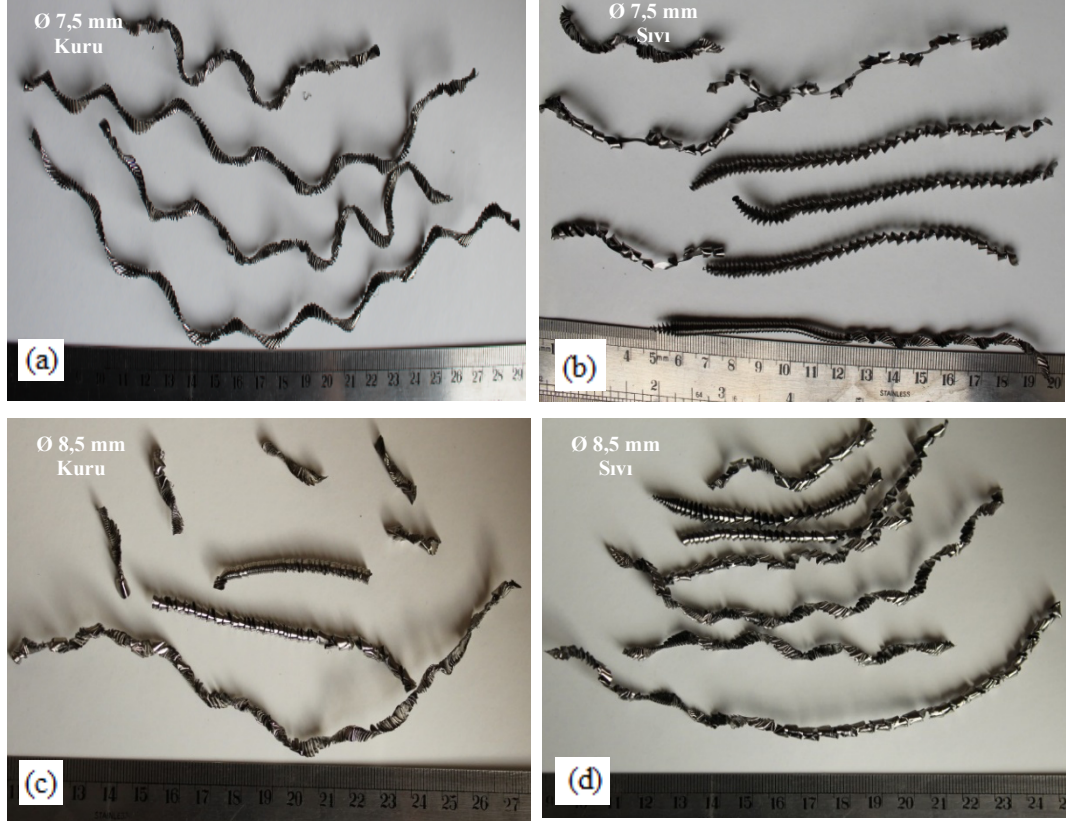
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Talaş Formları

Talaşlı işleme sırasında oluşan kesme şartlarını anlamak açısından, meydana gelen talaşların formu, boyutu ve rengi oldukça önemlidir [22]. Talaşların genel yapısını yorumlamak, takım aşınması ve işlenmiş yüzeyin kalitesi gibi işleme karakteristikleri hakkında bilgi vermek açısından önemlidir. Talaş formlarının kabul edilebilir sınırlar içinde olması ve boyutunun kısa oluşu, talaşın ortamdan uzaklaştırılması, tezgâhın güvenliği, işlenen yüzeyin kalitesinin biriken talaşlardan dolayı bozulmaması ve çalışanın güvenliği bakımından dikkate alınmalıdır [20,27,28].

3.1.1. Delme işlemi sonucu oluşan talaşlar

Şekil 4 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak 7,5 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları; Şekil 4 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak 8,4 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları verilmiştir.



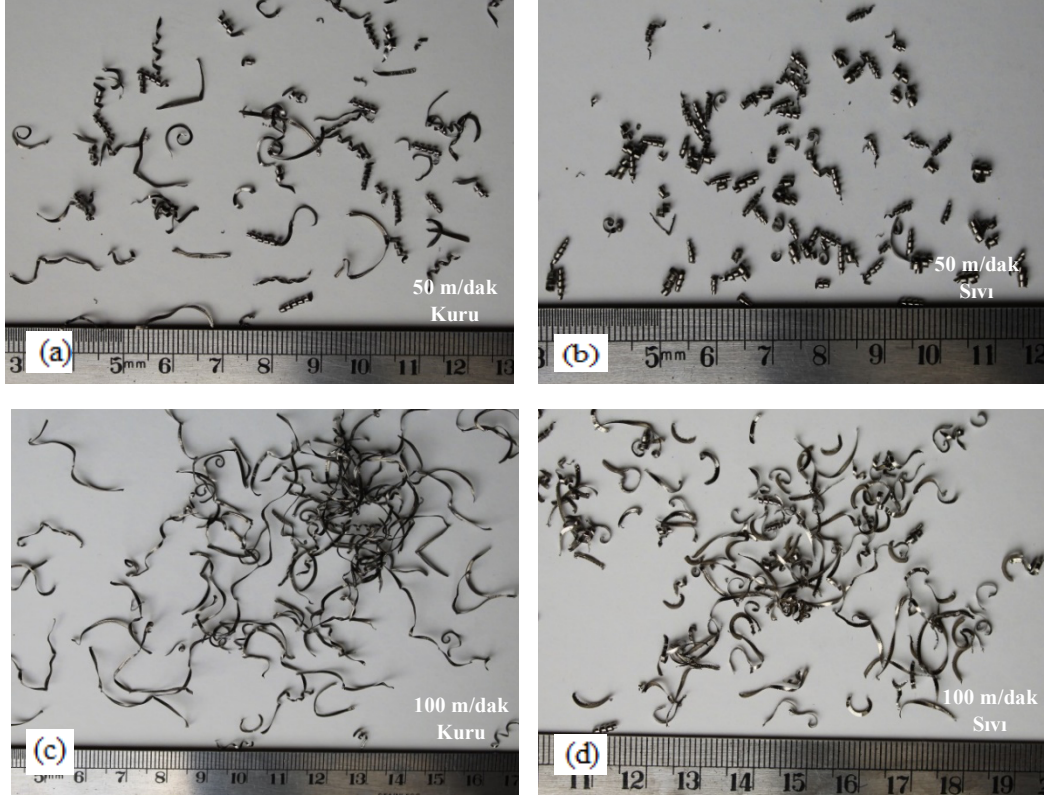
Şekil 4. (a) Ø 7,5 mm uç ile kuru ortamda, (b) Ø7,5 mm uç ile kesme sıvısıyla, (c) Ø 8,4 mm uç ile kuru ortamda, (d) Ø 8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası talaş formları.

Talaşlı işlemler sonrası ortaya çıkan talaş formlarını değerlendirmek için; literatürde genel talaş formlarının sınıflandırılmasında kullanılan genel terimlere göre değerlendirme yapılmıştır [29]. Şekil 4'te 7,5 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları incelendiğinde; (a) kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu gözlemlenirken, (b) kesme sıvısı ile işlemede ise kabul edilebilir sınırın en altında olan helisel talaş oluşumu gözlenmiştir. Her iki koşulda da talaşlar uzun boyutlu ve düzenli şekilde kırılmıştır. Burgu talaş formu, talaş boşaltma kanalında kolayca talaşın sıkışmasına sebep olacağından dolayı arzu edilmez [30]. Delme işleminde, 7,5 mm ve 8,4 mm çapındaki karbür matkaplar ile sırasıyla 57,2 mm³ ve 68,4 mm³ hacminde talaş kaldırılmıştır. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde yaşanan en büyük sorunlardan biri kesici takım ile talaş arasında meydana gelen yüksek sıcaklık oluşumudur. Oluşan talaşın ilk kısmı ve son kısmı arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı yaşanan ısı genleşme ve büzülme burgu veya helisel olarak bilinen kıvrımlı talaş yapısının oluşmasına neden olmaktadır [31]. Şekil 4'te 8,4 mm çapında karbür matkap ile elde edilen talaş formları incelendiğinde, (c) kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu düzensiz olarak farklı boyutlarda, (d) kesme sıvısı ile işlemede ise burgu ve helisel talaş formları bir arada, boyutları birbirinden farklı talaş oluşumları gözlenmiştir. Sonuç olarak, kesme sıvısı ile yapılan delme işlemlerinde, kabul edilebilir sınırın en altında kalan helisel talaş oluşumu gözlenirken, kuru ortamda delmede istenmeyen ve işlem sırasında deliği tıkayarak talaş çıkışına sebep olan burgu talaş oluşumu gözlenmiştir. 8,4 mm çapında matkap ile kuru işlemede ise boyutsal düzensizlik oldukça belirgindir. Görüntülere talaş rengi açısından bakıldığında ise tüm şartlarda oluşan talaş renkleri birbirine benzerdir. Genel olarak; matkap çapının, kesme sıvısı kullanımı kadar talaş şekli üzerinde

belirleyici olmadığı söylenebilir. Elde edilen burgulu ve helisel talaş formlarının takım aşınmasına hızlandırıcı etkisinin olduğu birçok çalışmada ifade edilmiştir [30–32].

3.1.2. Frezeleme işlemi sonucu oluşan talaşlar

Şekil 5 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları, Şekil 5 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları verilmiştir. Görüntüsü alınan talaşların tamamı son parçanın frezeleme işleminden sonra elde edilmiştir.



Şekil 5. 50 m/dak kesme hızında (a) kuru ortamda, (b) kesme sıvısıyla; 100 m/dak kesme hızında (c) kuru ortamda ve (d) kesme sıvısıyla frezeleme sonrası talaş formları.

50 m/dak kesme hızıyla frezeleme sonrası elde edilen talaş formları incelendiğinde; (a) kuru işlemede kısa helisel, kısa boru ve kısa virgül şeklinde talaş oluşumları, (b)'de kesme sıvısı ile işlemede ise sadece kısa helisel talaş oluşumu gözlenmiştir. Kuru işlemede talaş kırılmaları düzgün olmasına rağmen düzensiz ve farklı formlarda talaşlar oluşmuştur. Kesme sıvısı ile işlemede daha stabil bir durum gözlenmiş ve tek tip talaş formu oluşmuştur. Şekil 5'te 100 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları incelendiğinde (c) kuru işlemede karmaşık uzun spiral talaş oluşumu, (d)'de kesme sıvısı ile işlemede ise daha homojen ve kısa spiral talaş oluşumu gözlenmiştir. Aslantaş ve Karabulut, yaptıkları çalışmada, kesme hızının talaş formları üzerine oldukça belirleyici olduğunu ve birincil deformasyon bölgesindeki şekil değiştirme hızının kesme hızıyla arttığını belirtmişlerdir [33]. Literatürde şerit, dolaşık ve burgu şekilli talaş formları kabul edilebilir sınırların dışında işlenebilirliği zor olarak tanımlanırken, uzun veya kısa forma sahip helisel şekilli talaşlar kabul edilebilir sınırlar içinde, iyi işlenebilir olarak tanımlanırlar [29]. Bu çalışmada her iki durumda da kabul edilebilir talaş formları oluşumu ve talaş kırılmaları düzgün bir şekilde gerçekleşmiştir. Frezeleme işlemi kesintili talaş kaldırma işlemi olduğundan dolayı, işleme sırasında sistem sürekli olarak titreşime zorlanmakta ve kesme hızlarındaki artış titreşim seviyesini arttırmaktadır. Bu durumun sebebini artan kesme hızıyla kesici takım ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden kaynaklandığı yönünde literatür çalışmaları bulunmaktadır. Birçok çalışmada titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında oluşan termoplastik kararsızlık ve talaşın dış yüzeyinden çatlakların başlaması ve yayılması

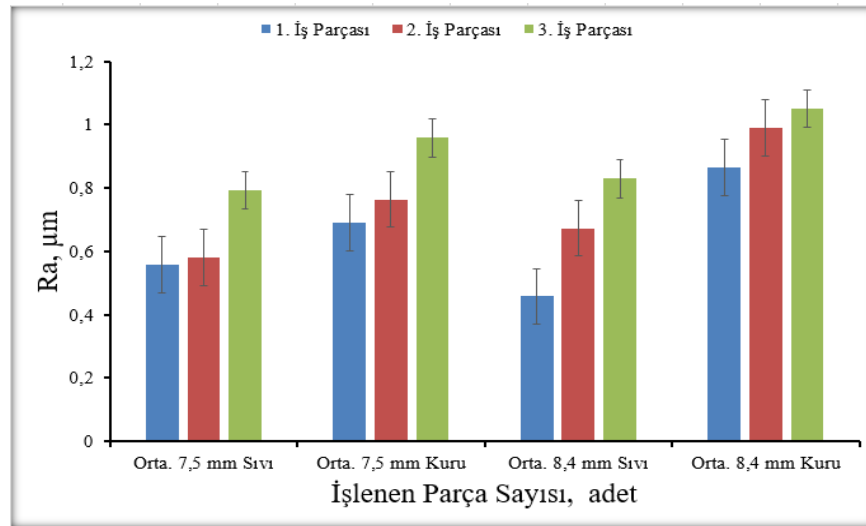
kesintili talaş oluşumunu ifade etmektedir [34]. Frezeleme işleminde, 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızları ile sırasıyla 67,9 mm³ ve 78,4 mm³ hacminde talaş kaldırılmıştır. Şekil 5'teki görüntülere talaş rengi açısından bakıldığında 50 m/dak kesme hızıyla frezelemede talaş rengi daha koyu, 100 m/dak kesme hızıyla frezelemeden elde edilen talaşlar daha açık renktedir. Genel olarak kesme hızının, kesme ortamından talaş formu üzerine daha belirleyici etkisinin olduğunu söyleyebiliriz.

3.2. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

İşlenebilirliğin en önemli belirleyicisi olan yüzey pürüzlülük değerleri, yüzey kalitesinin de bir ölçütüdür. Yüzey pürüzlülüğü değerinin işleme parametrelerine bağlı olarak değişebileceği bilinen bir gerçektir [17,35]. İşlenen ürünlerin kalite değerlendirmesinde, boyutsal tamlik ve yüzey pürüzlülük ölçümleri mutlaka yer alır. Yüzey pürüzlük değeri, parçanın kullanım yerine göre değişen bir unsur olmakla beraber, bu değer aşağı düştükçe yüzey daha pürüzsüz hale gelmektedir. İşleme prosesinde tüm süreçlerin optimizasyonu ile iyi bir yüzey kalitesi mümkündür [36].

3.2.1. Delme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri

Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 7,5 mm ve 8,4 mm çapında karbür matkaplar ile işlenen Ti6Al4V alaşımının delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Değişen kesme koşullarına ve matkap çapına göre delinen yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin değişimini Şekil 6'da grafik olarak gösterilmiştir.

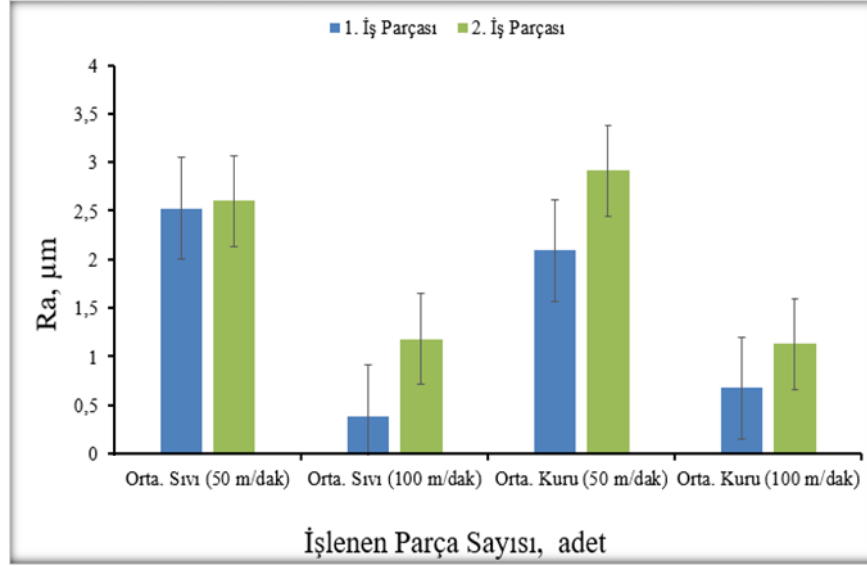


Şekil 6. 7,5 ve 8,4 mm matkap ile kuru ve sıvı ortamda işlenen parçaların yüzey pürüzlük değerlerinin değişimi.

Kuru ve kesme sıvısı ile işlemede delinen parça sayısının artması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. 7,5 mm ve 8,4 mm çapında karbür matkaplar kullanılarak kesme sıvısı ile işlenen Ti6Al4V alaşımı parçalarının yüzey pürüzlülük değerleri kuru işlemeye göre daha düşük, yüzey kalitesi daha iyidir. Matkap çapı Ø7,5 mm'den Ø8,4 mm'ye çıktığında hem kuru işlemede hem de kesme sıvısı ile işlemede delinen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla yaklaşık %13,75 ve % 9,8 artmıştır. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri 8,4 mm çapında karbür matkap kullanılarak kuru kesme ortamında, en düşük değer ise 7,5 mm çapında karbür matkap kullanılarak kesme sıvısı ortamında tespit edilmiştir. Ti6Al4V alaşımı talaşlı işlem sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinde mukavemetini korurken, kesici takım koruyamamaktadır [37]. Bu çalışmada da artan matkap çapı ve kuru ortam, delinen yüzeye uygulanan sıcaklık ve basıncı artırarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Kuru ortamda delinen delikten talaşların çıkmasını zorlaştırmakta, kesme alanını olumsuz etkilemektedir ve bu durum artan matkap çapı ile daha da artmaktadır. Sonuç olarak düşük matkap çapı ve kesme sıvısı kullanımında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir.

3.2.2. Frezeleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri

Kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımı yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Değişen kesme koşullarına ve kesme hızına göre işlenen yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin değişimi Şekil 7’de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızı ile kuru ve sıvı ortamda freze ile işlenen parçaların yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimi.

Kuru ve kesme sıvısı ile işlemede işlenen parça sayısının artması ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığı, ancak 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısı ile işlemede kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımı parçaların yüzey pürüzlülük değerleri 100 m/dak kesme hızı ile frezelemekten daha yüksektir. Kesme hızı 50 m/dak’dan 100 m/dak’ya çıktığında hem kuru işlemede hem de kesme sıvısı ile işlemede delinen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla yaklaşık %37,5 ve %30,4 azalmıştır. Her iki kesme hızında da kesme sıvısı ile işlemede yüzey pürüzlülük değerleri daha düşüktür. Altınsoy ve diğ., (2024)’nın yaptıkları çalışmada, soğutma sıvısı ile Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir [29]. Soğutma sıvısı ile kesme yüzeyinde oluşan ısının dağılması ile işlenen malzeme yüzeyinin sertlik değerinin değişmemesi sağlanarak talaş yapışmalarının önüne geçilmiş ve yüzey kalitesi artırıldığını rapor etmişlerdir. Sonuç olarak frezeleme işleminde artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülük değerleri azalmış, kesme sıvısı kullanımı ile kuru ortam bertaraf edilerek yüzey özelliği iyileşmiştir.

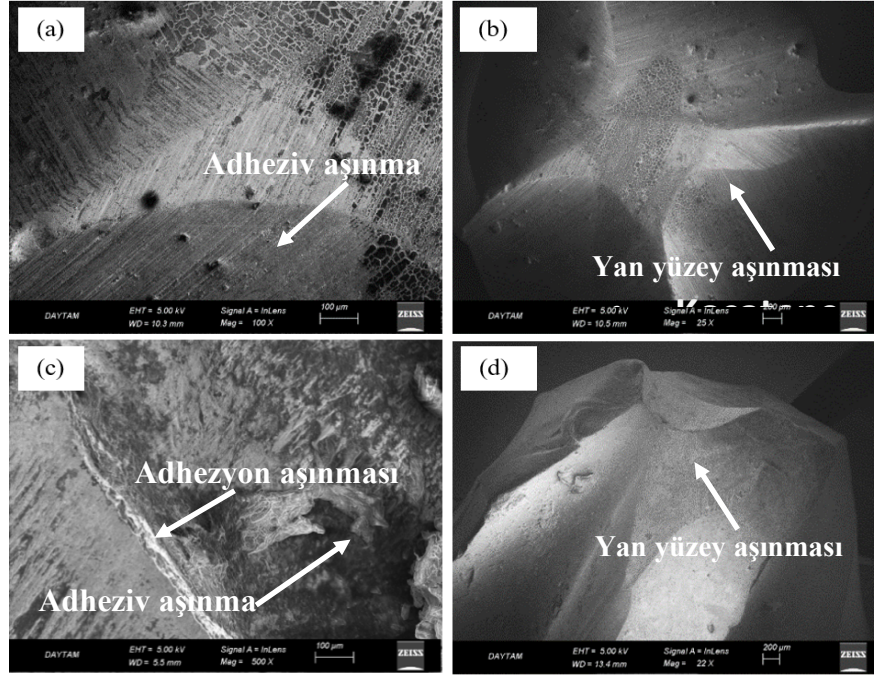
3.3. Kesici Takımların SEM Analizleri

Talaşlı imalat işlemlerinde genellikle, maliyet açısından takım ömrü ve üretilen malzemenin kalitesi açısından işlenen yüzey kalitesi ölçüt olarak kabul edilir. Aşınmış uçlar ile oluşturulan delikler ve yüzeyler parçanın kalitesini aşağı çeker ve ortaya çıkan ürünün kullanıcı tarafından reddedilmesine neden olabilir. Takım aşınmasının belirlenmesi; malzemeye uygun işleme prosesinin ve kesici takım sınıfının tespit edilmesinde optimum verimlilik için önemli işlenebilirlik çıktılarından biridir.

3.3.1. Delme sonrası matkap uçlarının aşınma analizi

Şekil 8 (a) ve (b)’de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak delme sonrası 7,5 mm çapında karbür matkapta meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 8 (c) ve (d)’de sırasıyla kuru ve kesme

sıvısı kullanılarak delme sonrası 8,4 mm çapında karbür matkapta meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8. 7,5 mm uç ile (a) kuru delme ve (b) kesme sıvısıyla delme; 8,4 mm uç ile (c) kuru delme ve (d) kesme sıvısıyla delme sonrası kesici takımların SEM görüntüleri.

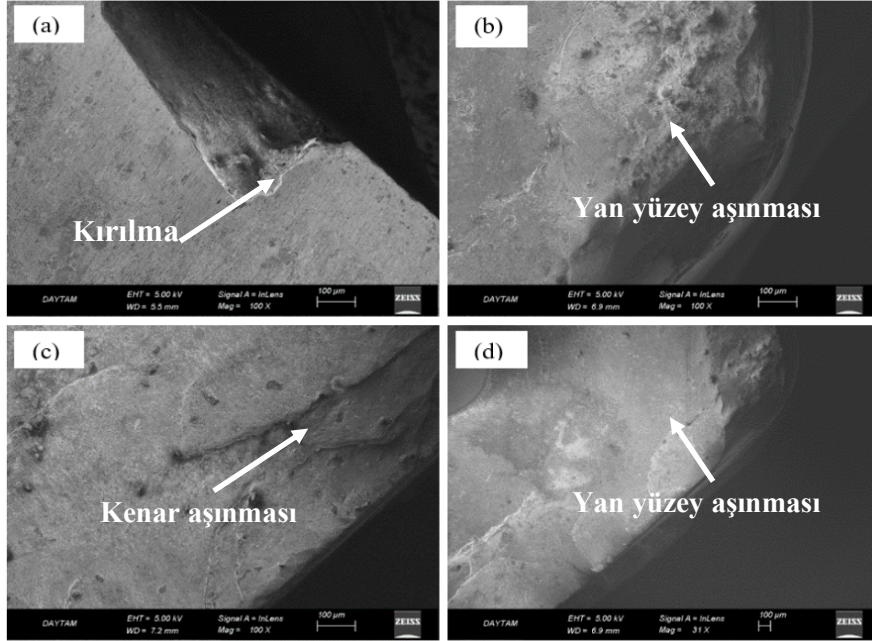
Şekil 8 (a) ve (c)'de sırasıyla 7,5 mm ve 8,4 çapında karbür matkap ile kuru delmeden sonra matkap incelendiğinde burğu talaş oluşumundan kaynaklı matkap yüzeyinde aşınmalar oluşmuştur. Ayrıca kesici takım ve delinen yüzey arasında kuru işlemekten kaynaklı yüksek ısıyla ortaya çıkan malzeme kaybı yani adhezyon aşınması gerçekleşmiştir. Kuru işlemekten kaynaklı basınç ve sıcaklığa bağlı olarak talaş ve matkap arasında oluşan difüzyon da aşınmaya neden olmuştur. Artan matkap çapıyla beraber kesici takımdaki aşınma da artmıştır. Kuru kesme ortamından kaynaklı matkaplarda oluşan adheziv aşınma yüzey kalitesinin düşmesine sebep olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini düşürmüştür. Şekil 8 (b) ve (d)'de sırasıyla 7,5 mm ve 8,4 çapında elmas karbür matkapla kesme sıvısı ile delmeden sonra matkap ucu incelendiğinde kabul edilebilir sınırlar içinde kalan helisel formda talaş oluşumundan kaynaklı aşınma kuru işlemeye göre daha azdır. Kesici ucun işlem yapan yüzeyinde serbest yüzey aşınması meydana gelmiştir. Meydana gelen bu aşınma sonucunda yüzey aşınması matkap çapının artması ile artmıştır. Sonuç olarak kesme sıvısıyla yapılan işlemlerde aşınma azalmıştır. Matkap çapının büyümesi ile her iki kesme ortamında da uç aşınması artmıştır. Bütün şartlarda meydana gelen aşınma matkap kesici kısmının merkeze yakın alanda yan yüzey aşınması şeklinde olduğu belirlenmiş fakat kuru ortamda kesme durumunda matkabin dış kısmına yakın bölgelerde kırılma ağızı şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Çiftçi ve Gökçe'nin, Ti6Al4V alaşımının delinebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada gerçekleşen matkap aşınmaların kesici ağzın merkeze yakın olan bölümleri ve yan yüzeyinde olduğunu, matkap kırılmalarının da dışa doğru ağız kırılması şeklinde gerçekleştiğini açıklamışlardır [9].

Ti6Al4V alaşımı ile ilgili yapılan delme işlemi çalışmalarına bakıldığında; matkap geometrisi ve malzemesi, işleme parametreleri ve soğutucu ortam gibi kriterlerin optimize edilmesine yönelik çok sayıda bilimsel yayın olduğu görülmektedir [10,29,38,39]. Bu çalışmada da kesici takım aşınmasını, soğutma ortamının matkap çapından daha fazla etkilediği belirlenmiştir.

3.3.2. Frezeleme sonrası kesici uçların aşınma analizi

Şekil 9 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızıyla; Şekil 9 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızıyla frezeleme sonrası kesici takımda meydana

gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir. Kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici takımda meydana gelen aşınmada oluşan kırık bölgeden alınan SEM görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. 50 m/dak kesme hızında (a) kuru ortamda ve (b) kesme sıvısıyla; 100 m/dak kesme hızında (c) kuru ortamda ve (d) kesme sıvısıyla frezeleme sonrası kesici takımların SEM görüntüleri.



Şekil 10. 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda yapılan frezeleme sonrası kesici takımda oluşan kırık bölgenin SEM görüntüsü.

Şekil 9 (a) ve (b)'de 50 m/dak kesme hızı ile sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak frezeleme sonrası kesici takımlar incelendiğinde kuru kesmede kesici takımda kırılma olduğu, kesme sıvısı kullanımında ise yan yüzeyde aşınma olduğu gözlemlenmiştir. Kırılmaya kuru şartlarda oluşan karmaşık formlarda talaş oluşumları da sebep olabilir. Özellikle kuru kesmede talaş bölgesindeki sıcaklık ve titreşimin artması, kesici takım ve iş parçası arasındaki aşınmayı hızlandırarak kırılmaya sebep olabilir. Şekil 10'da kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici takımın uç bölgesinde meydana gelen kırılmanın daha net görüntüsü incelendiğinde kuru kesme şartı altında gerçekleşen plastik deformasyonun sebep olduğu görülmektedir. Kesici takımdan sıcaklık etkisi ile parça kopması çentik aşınması olarak da nitelendirilebilir. Kırılma detayının verildiği alanda sıcaklık farkından kaynaklanan termal çatlaklar da görülmektedir. Şekil 9 (c) ve (d)'de 100 m/dak kesme hızı ile sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak frezeleme sonrası kesici takımlar incelendiğinde aşınmaların kesici takım

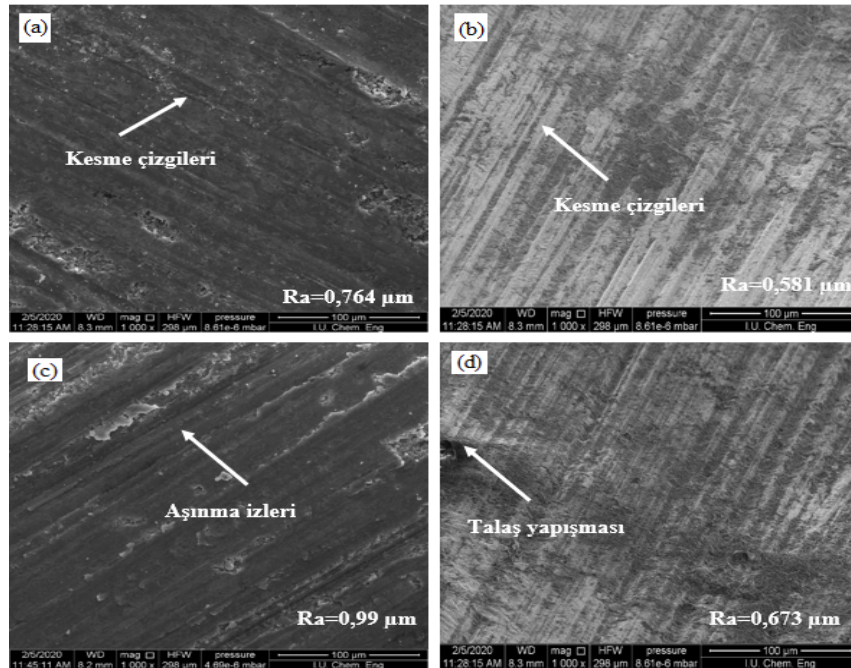
kenarının serbest yüzeyinde oluştuğu görülmektedir. Talaş çıkışında ve sonrasında asıl kesen yüzey ve yardımcı yan yüzey işlenen parça ile temas halindedir. Bu aşınma şekli yaygın olan, normal sayılan ve emniyetli görülen bir aşınma türü olarak literatürde geçer [22]. Bu sonuçlar değerlendirilecek olursa kesme sıvısı kullanıldığında kesici takım yüzeyine talaş yapışması önlenerek aşınmalar azaltılmıştır. Takım aşınmasının esas nedeninin kesici takım ve işlenen parça arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır ve sürtünme kaynaklı ısının aşınmayı hızlandırıcı etkisi vardır [1]. Bu çalışmada da kesme sıvısı kullanımı ile sürtünmeden kaynaklı olumsuz etkiler ortadan kaldırılmıştır. Artan ilerleme hızı ile aşınma azalmıştır. Buna istinaden frezelemede artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülük değeri azalmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirini desteklemektedir.

3.4. İşlenen Yüzeylerin SEM Analizleri

Titanyum alaşımları düşük elastik modülüne sahip olmasından dolayı talaşlı imalatı esnasında oluşan titreşimler yüzey kalitesi üzerine oldukça etkilidir [40]. Talaşlı imalat ile işlenen parçaların yüzeylerinin görüntülenmesi kesici takım performansının değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Kesme parametreleri ve kesme ortamının işlenen parçanın yüzey kalite üzerindeki etkileri delme ve frezeleme işlemleri sonrası belirlenmiştir.

3.4.1. Delme işlemi sonrası yüzeylerin SEM analizi

Şekil 11 (a) ve (b)'de sırasıyla, kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 7,5 mm çapında matkap ile delme sonrası aşınan yüzeylerin, Şekil 11 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 8,4 mm çapında matkap ile delme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir.



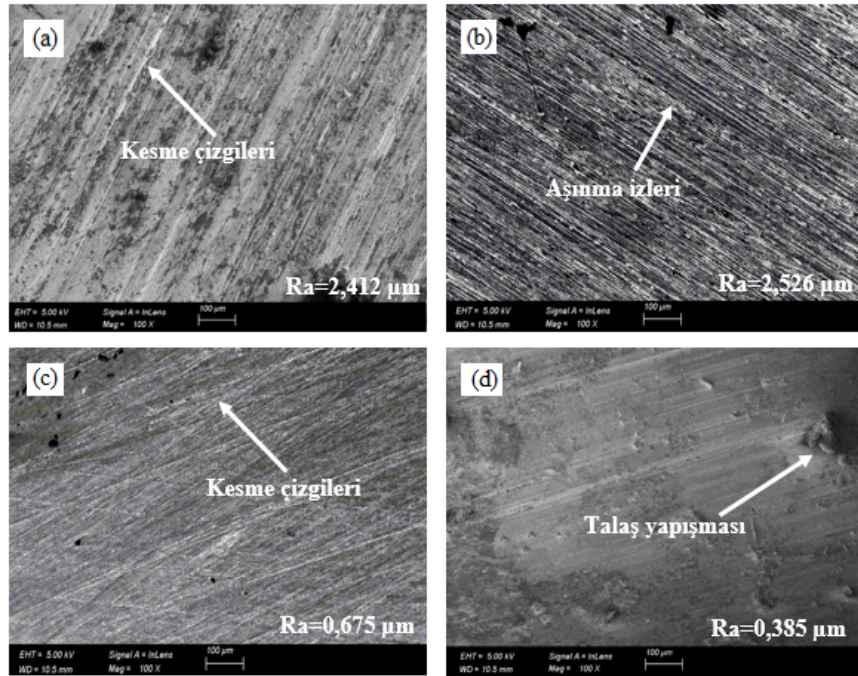
Şekil 11. 7,5 mm uç ile (a) kuru delme, (b) kesme sıvısıyla delme, 8,4 mm uç ile (c) kuru delme ve (d) kesme sıvısıyla delme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.

Ti6Al4V alaşımı düşük elastisite modülüne ve ısı iletkenliğe sahip olduğundan özellikle delik delme gibi kaba işlemlerde daha güçlü takımlara ihtiyaç duyulur. Matkap ile delik delinmesinde yaşanan en büyük problem, talaşın delikten dışarı atılmasında zorluk ve artan sıcaklıktır. Bu durum kesici takımın sürtünme, yüzeyde bozukluk ve boyutsal sapmalara sebep olur. Ayrıca artan sıcaklık ve sürtünme ile çıkan talaşlar matkap ile delik yüzeyi arasında sıkışarak matkap yüzeyine yapışır ve yığıntı talaş (BUE) oluşumuna sebep olur. Yaşanan talaş yapışması sonucu işlenen yüzeyler daha kaba olmaktadır [41]. Aşınan yüzeylerde oluşan beyaz çizgiler iki ilerleme (besleme) arasındaki tepelerdir. Bazı kaynaklar oluşan bu çizgileri düzensiz bir plastik deformasyon akışı sonucu kesici

kenarda termomekanik koşulların değişmesine bağlamaktadır [42]. Şekil 11’de görüldüğü gibi Ø7,5 mm matkap ile yapılan delme işlemlerinde aynı şartlar altında Ø8,4 mm matkap çapı ile delme işleminden daha iyi kalitede yüzeyler elde edilmiştir. Matkap çapının artması ile paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafenin arttığı da görülmektedir. Kuru ortamda işleme sonucu elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde derin yarık dışında kopmuş parçacıkların taşınırken yapıştıkları ve dalgalı yüzeylerin oluşumuna sebep oldukları görülmektedir. Kesme sıvısı ile delinen yüzeylere paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafenin azaldığı görülmektedir. Her iki matkap ile delme işlemi sonunda kuru kesme ortamında işlenmiş yüzey görüntülerinde yüzeye yapışmış malzeme kalıntıları görülmektedir. Delinen parçaların aşınan yüzeylerinin görüntüleri, verilen yüzey pürüzlülük ve takım aşınması sonuçlarını desteklemektedir.

3.4.2. Frezeleme işlemi sonrası yüzeylerin SEM analizi

Şekil 12 (a) ve (b)’de sırasıyla, kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin, Şekil 12 (c) ve (d)’de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 12. 50 m/dak kesme hızında (a) kuru ortamda ve (b) kesme sıvısıyla; 100 m/dak kesme hızında (c) kuru ortamda ve (d) kesme sıvısıyla frezelemede aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.

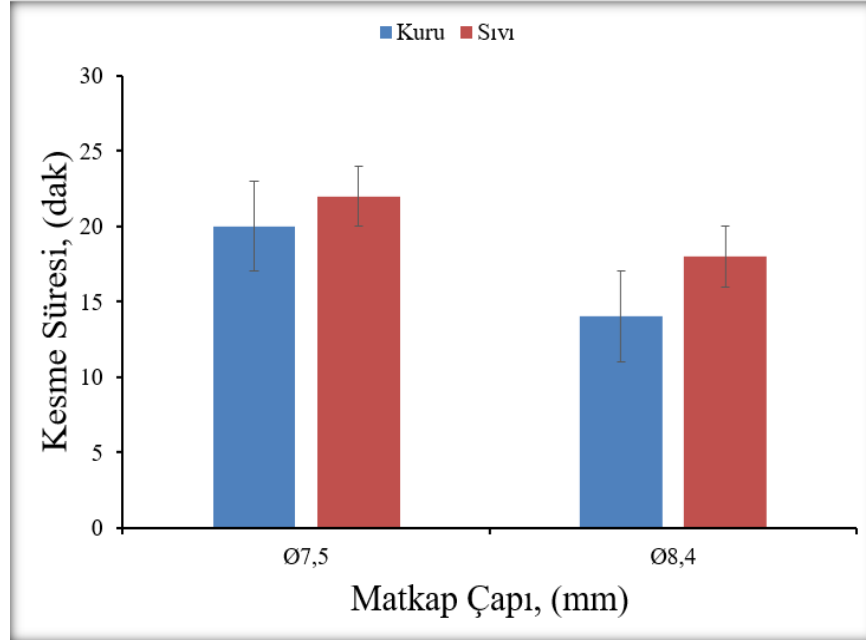
Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızları ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin görüntüleri incelendiğinde artan kesme hızı ile yüzeysel aşınmanın azaldığı görülmektedir. Kuru ortamda işleme sonucu elde edilen yüzeylerin sıvı ortamda işlenen yüzeylere göre her iki kesme hızında da bozulduğu belirlenmiştir. Azalan kesme hızı ve kuru kesme ortamına geçişle işlenen yüzeyin bütünlüğü bozulmuş, aşınma izleri daha da belirginleşmiştir. Sonuçlar yüzey pürüzlülük değerleri ile uyum içerisindedir. Kuru işlemlerde deformasyon sonucu oluşan ilerleme çizgilerinin arasındaki tepeler net bir şekilde ortaya çıkmakta ve artan kesme hızı ile azalmaktadır. Her iki kesme hızında da freze ile işlenmiş yüzeye yapışmış malzeme kalıntıları görülmektedir. Sonuç olarak; hem kesme hızının hem de kesme ortamının işlenen parçanın yüzey kalitesi üzerine etkisi vardır. Bu çalışmada kesme hızının etkisi, keme ortamına göre daha baskındır.

3.5. Takım Ömrü

İşlenebilirliğin belirlenmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birisi kesici takım ömrüdür ve kullanım ömrünün arttırılması, kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının optimizasyonu ile mümkündür. Kesici takım ömrü imalat maliyetini ve iş parçası yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir [1]. Çalışmada takım ömrü kriteri olarak yüzey aşınması ele alınmıştır. Bu aşamada belirlenen şartlar; işlenen parçanın yüzey kalitesinin bozulması durumu, kesici takımda oluşan ortalama serbest yüzey aşınması 200 μm 'den fazla olması durumu ve kesici takımda kopma veya kırılma gerçekleşmesi durumunda kesici takım ömrünü tamamlamış olmaktadır. Aşınmadan kaynaklanan takım ömrünün tamamlanması kesme süresinin belirlenmesiyle ifade edilir. Çalışmanın takım ömürlerini belirleyen kesici ucun aşınma süresi olan kesme süreleri, delme işleminde matkap çapı ve soğutma ortamı, frezeleme işleminde kesme hızı ve soğutma ortamı kriterleri ele alınarak değerlendirilmiştir.

3.5.1. Delme işleminde takım ömrü

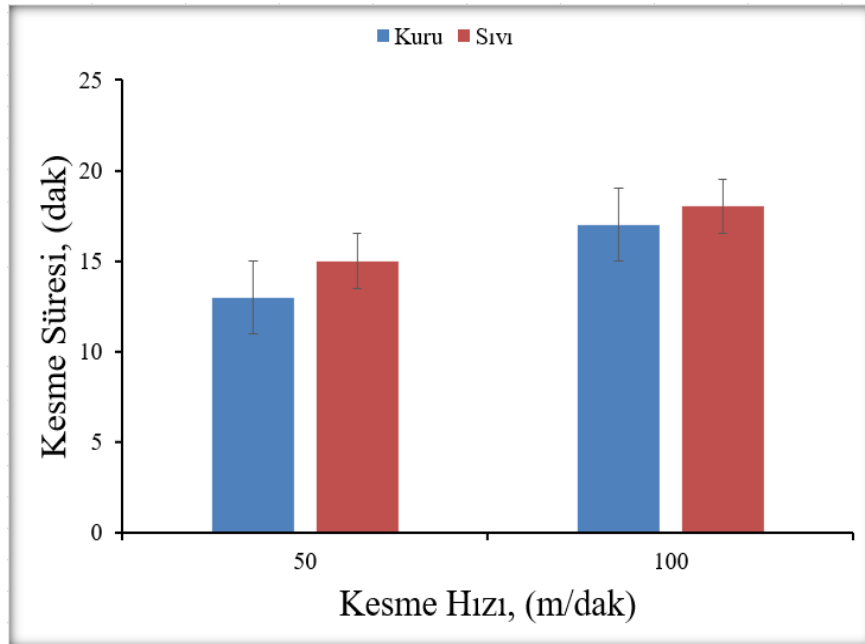
Ti6Al4V alaşımının delme sonrası matkap çapı ve soğutma ortamına göre, matkap aşınma süreleri yani kesme süreleri grafik görüntüsü Şekil 13'de verilmiştir. Matkap çapına göre aşınma süreleri incelendiğinde; 7,5 ve 8,4 mm çapındaki matkap ömürlerinin kesme sıvısı kullanımında kuru işlemeye göre daha uzun olduğu görülmektedir. 7,5 mm çapındaki matkaptaki artış %9,1 olarak tespit edilirken, bu oran 8,4 mm çapında %22,23 olarak belirlenmiştir. Kuru ortamda matkap çapının 8,4 mm'den 7,5 mm'ye inmesiyle matkap ömründe %42 artış belirlenmiştir. Sıvı ortamda delmede ise matkap çapının 8,4 mm'den 7,5 mm'ye inmesiyle matkap ömründe %22 artış belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; delme sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, takım aşınması ve işlenen yüzeyin aşınma sonuçları ile uyum içindedir. Kuru ortamda delme işlemi, her iki matkaptaki kesici ucun kullanım ömrünü kesme sıvısı kullanımına göre azaltmıştır. Titanyum alaşımlarının düşük ısı iletkenliklerinden dolayı oluşan ısının kesme alanında dar bir bölgede kalmasına neden olmaktadır. Yaşanan bu sorun delme işleminde diğer yöntemlere istinaden daha belirgindir. Çünkü talaşın delinen bölgeden tahliyesi zor ve yavaştır. Bu yüzden oluşan ısının çoğu kesme bölgesinde kalır ve matkabin kullanım ömrünü azaltmaktadır [9]. Bu bağlamda delme işlemi üzerine kesici takım ömrü açısından sonuçlarımız önem taşımaktadır.



Şekil 13. Matkap çapına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında delme sonrası kesici takımların aşınma süreleri.

3.5.2. Frezeleme işleminde takım ömrü

Ti6Al4V alaşımının frezeleme sonrası kesme hızına ve soğutma ortamına göre, kesici ucun aşınma sürelerinin grafik görüntüsü Şekil 14’de verilmiştir. Frezeleme sonrası kesme hızına ve soğutma ortamına göre kesici freze ucunun aşınma süreleri incelendiğinde 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızlarında kesme sıvısı ile işlemede freze uçları ömürlerinin kuru işlemeye göre daha uzun olduğu görülmektedir. Kesme sıvısı kullanımını kuru ortam ile kıyasladığımızda 50 m/dak kesme hızında freze ucunda %13,34 artış tespit edilirken bu oran 100 m/dak kesme hızında %5,56 olarak tespit edilmiştir. Artan kesme hızı ile her iki kesme ortamında da kesici takım ömrünün arttığı tespit edilmiştir. Kuru ortamda frezelemede kesme hızının 50 m/dak’dan 100 m/dak’ya çıkarılmasıyla kesici takım ömründe %23,53 artış olmuştur. Sıvı ortamda frezelemede ise kesme hızının 50 m/dak’dan 100 m/dak’ya çıkarılmasıyla kesici takım ömründe %16,67 artış tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar frezeleme sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, takım aşınması ve işlenen yüzeyin aşınma sonuçları ile uyum içindedir. Sonuç olarak frezeleme işleminde kesme sıvısı kullanımının ve kesme hızının artmasının kesici takım ömrü üzerine olumlu etkisi olmuştur. Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalatında karşılaşılan kesici takımlarda oluşan bölgesel sıcaklık sorunu kesme sıvısı kullanımı ile giderilmiş ve takım ömrünü yukarı çekmiştir. Frezeleme işlemi tornalama ve delme işlemlerinden farklı olarak, kesici takımın ömrü kesici takımın iş parçasına defalarca temasından dolayı uçta oluşan deformasyon, çatlak ve kırıklara bağlıdır [43]. Bu çalışmada frezeleme işlemi sonrası 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızlarında kesme sıvısı ile işlemede kesici takımların ömürleri kuru işlemeye göre daha yüksektir. Zhao ve diğ., Ti6Al4V titanyum alaşımının işlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, takım ömrünün kesme sıvısı kullanımı ile arttığını tespit etmişlerdir [44]. Bu çalışmada da artan kesme hızı ile farklı kesme ortamların da kesici takım ömrünün arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 14. Kesme hızına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında frezeleme sonrası kesici takımların aşınma süreleri.

4. Sonuçlar

Ti6Al4V alaşımı parçaların delme ve frezeleme işlemleri sonrası işlenebilirlik performanslarının değerlendirilmesine ait elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- **Kesme Ortamı ve Kesme Hızı:** Delme işleminde kesme ortamının etkisi, frezeleme işleminde ise kesme hızının etkisi daha belirgindir. Delme işlemi sırasında, helisel talaş oluşumu artan matkap çapı ve kuru kesme şartlarında gözlemlenmiştir. Frezeleme işlemi ile artan kesme hızı ve kesme sıvısı kullanımı sonucunda daha homojen kısa spiral talaş formu elde edilmiştir.

- **Yüzey Kalitesi:** İşlenilen yüzeylerin kalitesi, delme işleminde düşük çaplı matkap ve kesme sıvısı kullanımı ile iyileşirken, frezeleme işleminde artan kesme hızı ve kesme sıvısı kullanımıyla iyileşmiştir. Matkap çapının düşmesi, kuru ortamda uç ömründe %42, kesme sıvısı kullanımında ise %22 artış göstermiştir. Kuru ortamda kesme hızının artması, freze uç ömründe %23,53 artış sağlarken, kesme sıvısı kullanımında %16,67 oranında bir artış olmuştur.
- **Kesici Takım Aşınması:** Kesici takım aşınması, kesme sıvısı kullanımı ile azalmıştır. Delme işleminde artan matkap çapı ve frezeleme işleminde azalan kesme hızı, kesici takım aşınmasını artırmıştır. Kesme sıvısı kullanımı ile freze uç ömrü, düşük kesme hızında %13,34 ve yüksek kesme hızında %5,56 oranında artış göstermiştir.
- **Sıcaklık Sorunları:** Titanyumun talaşlı işlenmesindeki en ciddi sorun, işlem esnasında kesici takımda oluşan dar alana sıkışmış bölgesel sıcaklıktır. Bu çalışmada, kesme sıvısı kullanımı ile bu sorunun yarattığı olumsuzluklar azaltılmıştır. Isının dar bir alanda etkili olduğu göz önünde bulundurulduğunda, kesme sıvısının çok yayılmadan tam olarak kesme alanına verilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Çalışma kapsamında kullandığımız parçaların işlenmesi konusunda bizlere yardımcı olan ve teknik destek sağlayan Bor Kesici Takım ve Makine San. Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- [1] Aslantas K, Haşcelik A, Erçetin A, Danish M, Alatrushi LKH, Rubaiee S, Bin Mahfouz A. Effect of cutting conditions on tool wear and wear mechanism in micro-milling of additively manufactured titanium alloy. Tribol Int 2024; 193: 109340.
- [2] Karakılıç U, Ergene B, Yalçın B, Aslantaş K, Erçetin A. comparative analysis of minimum chip thickness, surface quality and burr formation in micro-milling of wrought and selective laser melted Ti64. Micromachines 2023; 14 (6): 1160.
- [3] Katta S, Chaitanya G. Key Improvements in Machining of Ti6Al4V Alloy: A Review. 2017 AIP Conference Proceedings: AIP Publishing LLC.
- [4] Kürşad G. Havacılık ve uzay malzemelerinde soğutma sıvısının elektro erozyonla delinen deliklerin performans parametrelerine etkisinin deneysel incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2017; 32 (1): 293-301.
- [5] Rotella G, Imbrogno S, Candamano S, Umbrello D. Surface integrity of machined additively manufactured Ti alloys. J Mater Process Technol 2018; 259: 180-185.
- [6] Sawant SN, Patil SK, Unune DR, Nazare P, Wojciechowski S. Effect of copper, tungsten copper and tungsten carbide tools on micro-electric discharge drilling of Ti6Al4V alloy. J Mater Res Technol 2023; 24: 4242-4257.
- [7] Subaşı M, Karataş Ç. Ti6Al4V alaşım tozundan hazırlanan besleme stokunun kalıplama ve sinterleme parametrelerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2016; 31 (2): 473-483.
- [8] Garbiec D, Siwak P, Mróz A. Effect of compaction pressure and heating rate on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Ti6Al4V alloy. Arch Civ Mech Eng 2016; 16: 702-707.
- [9] Çiftçi İ, Gökçe H. Ti6Al4V titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi. Politeknik Dergisi 2019; 22 (3): 627-631.
- [10] Kıvak T, Şeker U. Effect of cryogenic treatment applied to M42 HSS drills on the machinability of Ti-6Al-4V alloy. Mater Technol 2015; 49 (6): 949-956.
- [11] Altıng L. Manufacturing Engineering Processes. ABD: CRC Press, 2020.
- [12] Nee AYC. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. Incorporated: Springer Publishing Company, 2014.
- [13] Darsin M, Pasang T, Chen Z. Performance of TiAlN PVD Coated Carbide Drill When Drilling Titanium 6246 Alloy. 2017 MATEC Web of Conferences, EDP Sciences; Sibiu, Romania, 02001.
- [14] Yıldız H. Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin delik üzerine ve kesici takıma etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Batman Üniversitesi, Batman, 2015.
- [15] Gültekin U, Yaşar SA, Korkut İ. "Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi 2017; 7 (2): 469-475.
- [16] Safari H, Sharif S, Izman S, Jafari H. Surface integrity characterization in high-speed dry end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. Int J Adv Manuf Technol 2015; 78: 651-657.

- [17] Ullen NB, Hasak SMA, Dirikolu MH. Factors influencing the machinability during turning sinter-hardened Cu-Ni-Mo based steel: Dependency on cutting speed, feed rate and cutting depth. *J Eng Res* 2020; 8 (4): 236-257.
- [18] Stephenson DA, Agapiou JS. *Metal Cutting Theory and Practice*, CRC Pres, Boca Raton, 2016.
- [19] Wei X, Liu X, Yue C, Liang SY, Wang L, Sun Y, Qin Y. Surface roughness prediction framework for flank milling Ti6Al4V alloy based on CLBAS-BP algorithm. *Int J Comput Integr Manuf* 2023; 36(6): 830-841.
- [20] Altınsoy Ş, Yardımcı R, Köse FZ, Koç G. Farklı soğutma ortamları kullanılarak ısıtılma işlemi görmüş Ti6Al4V alaşımının SBF ve Hank solüsyonlarında biyokorozyon davranışının incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 2024; 15 (2): 453-462.
- [21] Lindvall R, Lenrick F, M'Saoubi R, Ståhl JE, Bushlya V. Performance and wear mechanisms of uncoated cemented carbide cutting tools in Ti6Al4V machining. *Wear* 2021; 477: 203824.
- [22] Sert A. Improving machinability of Ti6Al4V alloy with cryogenic process applied WC-Co cemented carbide tool. Doctoral Dissertation, Eskişehir Osmangazi University. Eskişehir, 2017.
- [23] Chen Z, Wu X, Tomus D, Davies CHJ. Surface roughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy components. *Addit Manuf* 2018; 21: 91-103.
- [24] Gong Y, Sun Y, Wen X, Wang C, Gao Q. Experimental study on surface integrity of Ti-6Al-4V machined by LS-WEDM. *Int J Adv Manuf Technol* 2017; 88: 197-207.
- [25] Groover MP. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, ABD: John Wiley & Sons, 2020.
- [26] Pervaiz S, Rashid A, Deiab I, Nicolescu M. Influence of tool materials on machinability of titanium-and nickel-based alloys: A review. *Mater Manuf Processes* 2014; 29 (3): 219-252.
- [27] Demir H, Ulaş HB, Binali R. Toolox 44 malzemesinde talaş kaldırma miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Technological Applied Sciences* 2018; 13 (1): 19-28.
- [28] Yılmaz B, Güllü A. AISI 1050 çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerine etkilerinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2020; 26 (4): 628-633.
- [29] Altınsoy Ş, Üllen NB, Ersoy M, Can D. Machining performance of uncoated and carbide coated cutting inserts in Ti6Al4V turning: An experimental and numerical approach. *J Mater Eng Perform* 2024; 33 (15): 6903.
- [30] Yavuz M, Gökçe H, Şeker U. Matkap geometrisinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkisinin araştırılması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2017; 3 (1):11-19.
- [31] An Q, Wang C, Xu J, Liu P, Chen M. Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool. *Int J Refract Met Hard Mater* 2014; 43: 94-101.
- [32] Strano M, Albertelli P, Chiappini E, Tirelli S. Wear behaviour of PVD coated and cryogenically treated tools for Ti-6Al-4V turning. *Int J Mater Form* 2015; 8: 601-611.
- [33] Verma M, Pradhan SK. Experimental and numerical investigations in CNC turning for different combinations of tool inserts and workpiece material. *Mater Today Proc* 2020; 27: 2736-2743.
- [34] Mahmat A, Tosun N, Ağar S. Ti6Al4V alaşımının ultrasonik yüksek hızlı mikro frezelenmesinde talaşların incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2023; (46): 27-36.
- [35] Üllen NB, Hasak SMA, Dirikolu MH. The Effect of Cutting Speed on Tool Life in The Machining of Powder Metal Parts. 2019 IMCOFE, Young Scholars Union (YSU), Antalya, Turkey Proceeding and Abstract Book, 40.
- [36] Memiş F. AISI 2205 (EN 1.4462) paslanmaz çeliğin CNC torna tezgahında işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin deneysel araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2015.
- [37] Küçükköse M. a-C:N/TiAlN kaplamaların karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın, 2017.
- [38] Rodríguez A, Calleja A, de Lacalle LNL, Pereira O, Rubio-Mateos A, Rodríguez G. Drilling of CFRP-Ti6Al4V stacks using CO2-cryogenic cooling. *J Manuf Processes* 2021; 64: 58-66.
- [39] Zhu Z, Sui S, Sun J, Li J, Li Y. Investigation on performance characteristics in drilling of Ti6Al4V alloy. *Int J Adv Manuf* 2017; 93 (1): 651-660.
- [40] Çelik YH, Kılıçkap E. Titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 2018; 6 (1):163-175.
- [41] Xu J, Li C, Chen M, El Mansori M, Paulo Davim J. On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies. *Compos Struct* 2020; 234: 111708.
- [42] Özçatalbaş Y. Machinability of elongated coarse grain Fe-based superalloys. *Mach Sci Technol* 2014; 18 (4): 626-637.
- [43] Üllen NB. Tornalama İşlemlerinde Çeşitli Kesici Takım Uçlarının Hasar Mekanizmaları. 2020 In 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, EurasianSciEnTech.
- [44] Muthukrishnan N, Davim P. Influence of coolant in machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology* 2011; 1: 9-14.