



## Micro milling of NiTi shape memory alloy and determination of critical chip thickness

Kubilay Aslantaş<sup>1\*</sup>, Yusuf Kaynak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, 03200, Afyonkarahisar, Turkey

<sup>2</sup>Marmara University Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Göztepe Campus, Kadıköy, 34722 Istanbul, Turkey

### Highlights:

- Minimum chip thickness should not be less than 30% of the tool edge radius to obtain good surface quality
- Due to the martensite transformation, the cutting forces increase with increasing cutting speed.
- The burr width is larger at the down milling side and increases with increasing cutting speed

### Keywords:

- NiTi Shape Memory Alloy,
- Micro milling
- Critical chip thickness
- Surface roughness

### Article Info:

Research Article  
Received: 29.11.2017  
Accepted: 15.08.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.460515

### Acknowledgement:

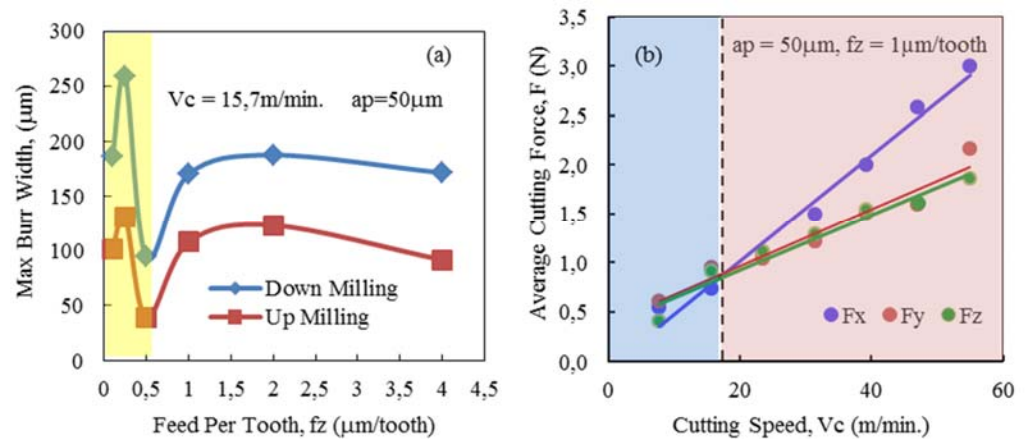
K.Asiantaş would like to thank to Afyon Kocatepe University for its contribution to this study with AKU-BAP 16.Kariyer.123 ve 16.Teknoloji.ALTY.01projects

### Correspondence:

Author: Kubilay Aslantaş  
e-mail: aslantas@aku.edu.tr  
phone: +90 272 228 1446

### Graphical/Tabular Abstract

Shape memory alloys (SMA) are widely used in the biomedical field due to their unique properties. Among these alloys, NiTi alloys are the most widely used. Machining process is one of the techniques to form these materials. If the NiTi alloys are mechanically forced to be cut, the crystal lattice structure can change and thus phase transformation can occur. This naturally affects cutting forces and tool life. In this study, the critical chip thickness is experimentally determined by milling the NiTi alloy under micro cutting conditions. For this, an experimental setup with high precision and cutting at high cutting speeds was used. A wide range of depth of cut and feed per tooth were used in the study. Cutting forces, surface quality and burr formation were taken into account as output parameters in the study.



**Figure A.** a) Variation of burr width depending on feed per tooth b) Variation of cutting forces with cutting speed

**Purpose:** For NiTi shape memory alloy, the variation of cutting forces, surface roughness and burr width were investigated in micro milling conditions.

**Theory and Methods:** The study was carried out experimentally. The forces during cutting are measured by Kistler dynamometer. The NiTi shape memory alloy is a binary alloy containing mainly Ni (55,82%) and Ti (residual quantity). SEM analysis was performed on both the machined slots and the worn tools. Surface roughness measurements were performed by optical profilometer.

**Results:** In terms of cutting forces,  $fz = 0,5$  Nm/tooth feed value can be considered as minimum chip thickness for the shape memory NiTi alloy. At greater feed values, the cutting process is performed as a result of the sliding mechanism. Depending on the increasing cutting speed, the cutting forces are also increasing linearly. The load applied by the cutting tool to the workpiece during cutting causes high cutting stresses in the cutting zone. These stresses force the material to phase transformation. Burr width is increased at feed rates lower than minimum chip thickness.

### Conclusion:

As a result of the phase transformation, the increase of the cutting speed causes the cutting forces to increase. For NiTi shape-memory alloy, the ratio of the minimum chip thickness to the edge radius is about 0.3. The increased cutting speed also increases the burr width.



## Şekil hafızalı NiTi alaşımının mikro frezelenmesi ve kritik talaş kalınlığının belirlenmesi

Kubilay Aslantaş<sup>1\*</sup> , Yusuf Kaynak<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, 03200, Türkiye

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Göztepe Kampüsü, Kadıköy, İstanbul, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetleri de lineer olarak artmaktadır.
- Kritik talaş kalınlığı 0,5µm olarak tespit edilmiştir. Bu değer hem kesme kuvvetleri hem de yüzey pürüzlülüğü sonuçları ile doğrulanmıştır.
- Kritik talaş kalınlığından daha küçük ilerleme değerlerinde çapak genişlikleri artmaktadır.

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.11.2017

Kabul: 15.08.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.460515

### Anahtar Kelimeler:

NiTi şekil hafızalı alaşım,  
mikro frezeleme,  
kritik talaş kalınlığı,  
yüzey pürüzlülüğü

### ÖZET

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), benzersiz özelliklerinden dolayı, biyomedikal alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar arasında, NiTi alaşımları en çok kullanılan malzemelerdir. Bu alaşımları şekillendirmek için kullanılan bir yöntem de talaşlı imalat tekniğidir. NiTi alaşımları mekanik olarak kesilmek zorunda kalıyorsa, kristal kafes yapısı değişebilir ve faz dönüşümü meydana gelebilir. Faz dönüşümü, doğal olarak kesme kuvvetlerini ve takım ömrünü etkiler. Bu çalışmada, NiTi alaşımının mikro kesme koşulları altında frezelenmesi, deneysel olarak araştırılmıştır. Bunun için, yüksek hassasiyette ve yüksek kesme hızlarında kesme yapabilen bir deney düzeneği kullanılmıştır. Çalışmada, geniş bir aralıkta diş başına düşen ilerleme değeri ve talaş derinliği dikkate alındı. Böylece NiTi alaşımının frezelenmesinde kritik olan talaş kalınlığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen çıktı parametreleri; kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve çapak genişliğidir. Elde edilen sonuçlar, NiTi ŞHA için kritik talaş kalınlığının 0,5µm olduğu tespit edilmiştir. Kritik talaş kalınlığı, kesici kenar radyüsünün yaklaşık %33 ne karşılık gelmektedir. Artan kesme hızına bağlı olarak, hem kesme kuvvetleri hem de çapak genişlikleri artmaktadır.

## Micro milling of NiTi shape memory alloy and determination of critical chip thickness

### HIGHLIGHTS

- The cutting forces increase linearly with increasing cutting speed.
- Critical chip thickness is determined as 0.5µm. This value is confirmed both by the cutting forces and the surface roughness results.
- Burr width increases at smaller feed rates than critical chip thickness.

### Article Info

Research Article

Received: 29.11.2017

Accepted: 15.08.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.460515

### Keywords:

NiTi shape memory alloy,  
micro milling,  
critical chip thickness,  
surface roughness

### ABSTRACT

Shape memory alloys (SMA) are widely used in the biomedical field due to their unique properties. Among these alloys, NiTi alloys are the most widely used. Machining process is one of the techniques to form these materials. If the NiTi alloys are mechanically forced to be cut, the crystal lattice structure can change and thus phase transformation can occur. Phase transformation naturally affects cutting forces and tool life. In this study, the milling of NiTi alloy under micro-cutting conditions was investigated experimentally. For this, an experimental setup with high precision and cutting at high cutting speeds was used. A wide range of depth of cut and feed per tooth were used in the study. Therefore, it was tried to determine the chip thickness which is critical in milling NiTi alloy. Output parameters obtained at the end of the study; cutting forces, surface roughness and burr width. The obtained results show that for NiTi SHA, the critical chip thickness is 0.5µm. The critical chip thickness corresponds to about 33% of the radius of the cutting edge. However, depending on the increased cutting speed, both the cutting forces and the burr widths increases.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: kaslantaş@gmail.com, yusuf.kaynak@marmara.edu.tr / Tel: +90 272 228 1446 / 2520  
1202

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şekil hafızalı NiTi alaşımlar son yıllarda endüstride karşılaşılan problemlerin çözümü için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Bu alaşımların sahip oldukları özellikler endüstri için önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle bu malzemelerin biyo uyumluluğu, süper elastik bir yapıya sahip olması ve şekil hafızalı özelliği biyomedikal alanında bu malzemeyi benzersiz kılmaktadır [1, 2]. NiTi alaşımlarının en dikkat çeken özelliği şekil hafızalı bir yapıya sahip olmasıdır. Çift yönlü martenzitik bir dönüşümün neden olduğu bu özellik, ısı, gerilme ve manyetik alan etkisi altında aktif hale gelmektedir. Bu sayede endüstride aktivatör olarak önemli bir fonksiyonu yerine getirmektedir [2]. Bu alaşımın diğer mühendislik malzemelerinden en önemli farkı; ısıya, yüke veya manyetik alana maruz kaldığında faz değişikliğine uğramasıdır. Bu faz değişikliği, malzemenin şekil hafızalı olmasına ve bazı hallerde artan sıcaklıkla orijinal şekline dönmesine neden olur. NiTi alaşımından endüstrinin ihtiyacı olan fonksiyonel ekipmanların üretilmesi ve uygulanan üretim prosesinin verimliliği önemli bir konudur. Bunun için kullanılan üretim yöntemlerinin genellikle alışılmamış imalat yöntemleri (Lazerle mikro kesme, elektro erozyon, ultrasonik elektro erozyon, mikro işleme, su jeti ile kesme gibi) olduğu dikkat çekmektedir [3-6]. Talaşlı imalat yöntemlerinin bu malzemenin şekillendirilmesinde kullanımı, malzemenin sahip olduğu mekanik özelliklerden dolayı oldukça kısıtlıdır. Çünkü malzeme yüksek bir sünekliğe sahip ve şekil değiştirme sertleşmesine yatkın bir malzemedir. Bu durum takım ömrü üzerinde ve işlenen yüzeyin kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi vardır [7]. Ayrıca, şekil hafızalı özelliği malzemenin imalat sırasında değişken bir elastiklik modülüne sahip olmasını sağlamaktadır. Bu durumda malzemenin işlenebilirliğini ve işlenen geometrinin boyutsal hassasiyetini olumsuz etkilemektedir [6].

Mikro frezeleme işleminde takım aşınması çoğunlukla konvansiyonel frezelemeden farklılık göstermektedir. Özellikle Titanyum ve Nikel bazlı alaşımların işlenmesinde çok kısa takım ömrü ve aşırı çapak oluşumu göze çarpmaktadır [8, 9]. Mikro frezelemede takım ömrünü etkileyen hasarlar çoğunlukla abrasiv aşınma, kesici kenarlarda görülen ufalanma (Chipping), yorulma ve aşırı gerilmelerin neden olduğu kırılmalardır [10, 11]. Bununla birlikte işlemin boyutundan dolayı kullanılan kesme parametrelerinin de takım ömrü üzerindeki etkisi konvansiyonel frezeleme işlemine göre farklılık göstermektedir [12-14]. Özellikle kesici kenar radyüsünün talaş kalınlığına oranının çok küçük olduğu durumda düzgün bir talaş oluşumu meydana gelmemektedir. Bu da kesici takıma etki eden kesme kuvvetlerinde artışa neden olmaktadır. NiTi alaşımlar talaşlı işlenebilirliği boyunca maruz kaldıkları mekanik yükler ve kesme sırasında oluşan sıcaklık malzemedeki yüksek şekil değiştirme sertleşmesine neden olmaktadır. Bu durum kullanılan kesici takımlarda, çentik ve yan yüzey aşınması şeklindeki hasarları hızlandırmaktadır [10]. Dolayısıyla bu malzemenin talaşlı

imalatında takım ömrü öncelikli problemdir. NiTi alaşımının talaşlı imalatında, tornalama ve delik delme en çok uygulanan kesme işlemlerdir. Bu çalışmalarda, takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey bütünlüğünün kesme parametreleriyle nasıl değiştiği tespit edilmiştir [1, 2, 6, 7]. Tornalama işleminde malzemenin yüksek sünekliğinden dolayı talaş kırılmasının zayıf olması ve çapak oluşumu önemli bir problem olduğu görülmüştür. Weinert ve Petzoldt [8]in bir çalışması ise, NiTi alaşımının mikro freze ile işlenmesine yöneliktir. Bu çalışmada da yine takım aşınması kesme kuvveti ve iş parçası kalitesi dikkate alınmıştır. Ayrıca minimum miktar yağlama işleminin performansı da test edilmiştir.

NiTi alaşımlarının talaşlı imalatı sırasında takım ömrünün ve işleme kalitesinin artırılmasına yönelik çeşitli stratejilerin uygulandığı görülmektedir. Kaynak ve diğerleri [15], oda sıcaklığında, martenzit fazda olan NiTi alaşımının, kriyojenik soğutma tekniği kullanarak, tornalama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, kuru ve MQL yardımıyla yapılan talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılmıştır. Kriyojenik soğutma ile takım aşınma hızının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Kaynak vd. [6] bir diğer çalışmada, kuru kesme, ön ısıtma işlemi ve kriyojenik soğutmanın NiTi alaşımının işlenmesi boyunca, takım aşınması ve kesme kuvveti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Özellikle kriyojenik soğutmanın takımda görülen çentik aşınmasını önemli ölçüde azalttığını ifade etmişlerdir. NiTi alaşımında üretilmiş minyatür boyuttaki ürünler özellikle biyomedikal alanında oldukça ilgi görmektedir. NiTi alaşımından yapılmış minyatür ekipmanların üretimi için mikro mekanik işleme yöntemleri (mikro frezeleme, mikro delik delme) son dönemlerde alternatif bir üretim yöntemi olarak dikkat çekmektedir [1]. Konvansiyonel talaş kaldırma işlemlerinde karşılaşılan sorunlar mikro mekanik işleme yöntemleri içinde söz konusudur. Özellikle takım ömrünün ve ürün kalitesinin artırılması (hassas geometrik yapı ve minimum çapak oluşumu) araştırmacıların yoğunlaştığı konulardır [1]. Piguard vd. [16] NiTi alaşımının mikro frezelemede malzemedeki faz dönüşümünü ve kesme parametrelerinin çapak oluşumu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İlerleme miktarının artmasının ve kesme genişliğinin azalmasının çapak oluşumunu azalttığını ifade etmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise, Weinert ve Petzoldt [10] NiTi alaşımının mikro frezelemede takım aşınması kesme kuvveti ve işlenen geometrinin kalitesi açısından bir değerlendirmede bulunmuşlardır. Ayrıca mikro frezeleme işlemi boyunca MQL ile yağlama işleminin imalat işleminin performansını artırdığını ifade etmişlerdir. Minyatür boyutta karmaşık iş parçası geometrilerinin işlenmesine yönelik diğer bir çalışma ise Biermann vd. [1] tarafından gerçekleştirilmiştir. Küresel uçlu kesici takımlar kullanılarak 3 ve 5 eksenli bir mikro frezeleme uygulaması gerçekleştirilerek, üretim verimliliği için, takım eğim açısını optimize eden bir algoritma kurmuşlardır. Ayrıca aynı çalışmada, mikro derin delik işleminde, takım aşınması ve delik kalitesi açısından bir değerlendirme yapmışlardır.

Yapılan çalışmada ise, geniş bir aralıkta kesme parametreleri kullanılarak, kesme kuvvetlerinin, yüzey pürüzlülüğünün ve çapak genişliğinin değişimi araştırılmıştır. Geleneksel mühendislik malzemelerden farklı olan bu alaşım için daha iyi bir yüzey kalitesi ve daha az çapak oluşumuna neden olacak kesme parametreleri deneysel olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, minimum çapak genişliği ve maksimum yüzey kalitesi için kritik talaş kalınlığı tespit edilmiştir.

## 2. MALZEME VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

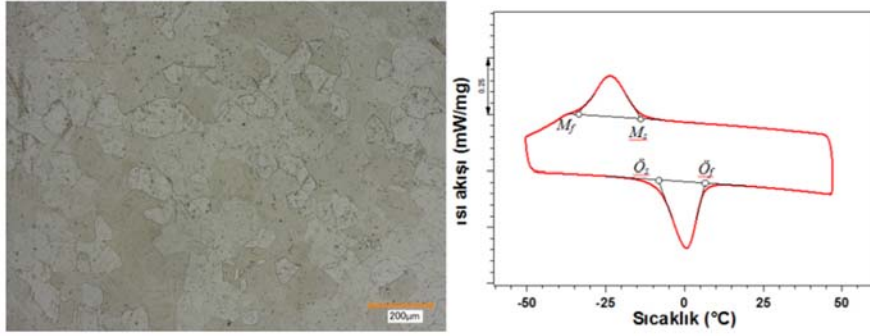
### 2.1. İş Parçası Malzemesi (Workpiece Material)

Çalışmada, özellikle biyomedikal endüstrisinde yaygın olarak kullanılan oda sıcaklığında östenit faza sahip şekil hafızalı NiTi alaşımı iş parçası malzemesi kullanılmıştır. Şekil hafızalı NiTi alaşım ağırlıklı olarak Ni (%55,82) ve Ti (kalan miktar) alaşımlarının ihtiva eden ikili bir alaşımdır. Malzemenin mikro yapısı Şekil 1'de sunulmuştur. Ortalama tane boyu 100  $\mu\text{m}$  olan malzemenin, mikroyapı resminde de

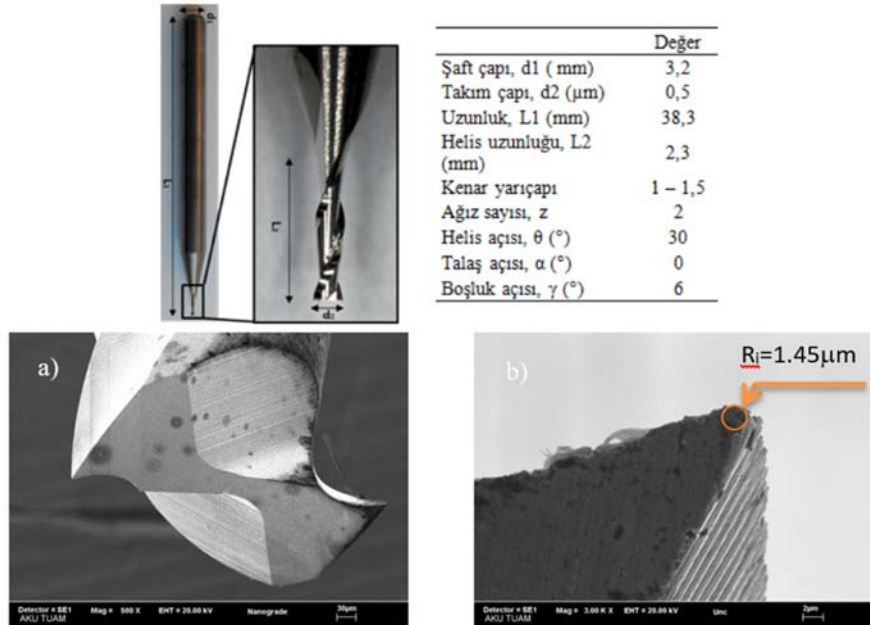
oda sıcaklığında tamamen östenit fazdadır. Alaşımın en önemli özelliği şekil hafızalı olması ve belli sıcaklık seviyelerinde veya aşırı deformasyon durumlarında faz dönüşümüne uğramasıdır. Kullanılan iş parçası malzemesi, oda sıcaklığında östenitik bir yapıdadır. Daha düşük sıcaklıklarda ise martenzite dönüşmektedir (Şekil 1). Alaşımın faz dönüşüm sıcaklıkları sırasıyla martenzit başlangıç,  $-14^{\circ}\text{C}$  martenzit bitiş  $-34^{\circ}\text{C}$ , östenit başlangıç  $-8^{\circ}\text{C}$  ve östenit bitiş ise  $6^{\circ}\text{C}$  dir [6].

### 2.2. Kesici Takım (Cutting Tool)

Malzemenin mikro şartlarda işlenebilirliği 0,5 mm çapında ve iki ağızlı mikro karbür freze uçları ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kesici takımlar Performance Micro Tool firmasından tedarik edilmiştir ve kaplamasızdır. Kesici takıma ait geometrik detaylar Şekil 2'de verilmektedir. Mikro frezeleme işleminde kesici kenar radyüsü hem kesme kuvvetlerini hem de yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir unsurdur. Bu nedenle kesme deneyleri öncesinde



Şekil 1. Oda sıcaklığında östenit faza sahip NiTi alaşımın mikroyapısı b) NiTi alaşımın diferansiyel taramalı kalorimetre analizi [6]. (Microstructure of NiTi alloy with austenite phase at room temperature b) Analysis of NiTi alloy with differential scanning calorimeter)



Şekil 2. Mikro kesici takımın geometrik detayları ve kenar radyüsüne ait SEM görüntüsü (Geometrical details of the micro cutting tool and SEM image of edge radius)



takımlara ait kenar radyüslerini tespit etmek amacıyla Scanning Electron Microscope (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de takıma ait SEM fotoğrafları verilmiştir. Mikro takımlara ait kesici kenar radyüsünün yaklaşık 1,5  $\mu\text{m}$  olduğu tespit edilmiştir. Kesme deneylerinde kesme hızının etkisini görmek adına yedi farklı kesme hızı ve altı farklı ilerleme ve yedi farklı talaş derinliği dikkate alınmıştır. Bu sayede kritik talaş derinliğinin hem kesme kuvvetleri hem yüzey pürüzlülüğü açısından tespitine çalışılmıştır.

### 2.3. Mikro Frezeleme İçin Deney Düzenegi (Experimental Setup for Micro Milling)

İş parçası dört farklı noktadan dinamometreye sabitlenmiş olup, eşit sıkma momenti için torkmetre kullanılmıştır. Frezeleme esnasında, meydana gelen radyal ve teğetsel kuvvetlerin ölçümü Kistler 9119AA1 mini dinamometre ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzeneginin bir görüntüsü de Şekil 3’te verilmiştir. Kullanılan dinamometre çok hassas olması nedeniyle, kesme deneyleri aynı ortam sıcaklığında yapılmaya özen gösterilmiştir. Şekil 4’de ayrıca kesme esnasında takım ucunda meydana gelen  $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$  kuvvetler ve deneyde kullanılan koordinat sistemi gösterilmektedir. Mikro frezeleme işleminde kritik talaş kalınlığını etkileyen en önemli unsur, kesme

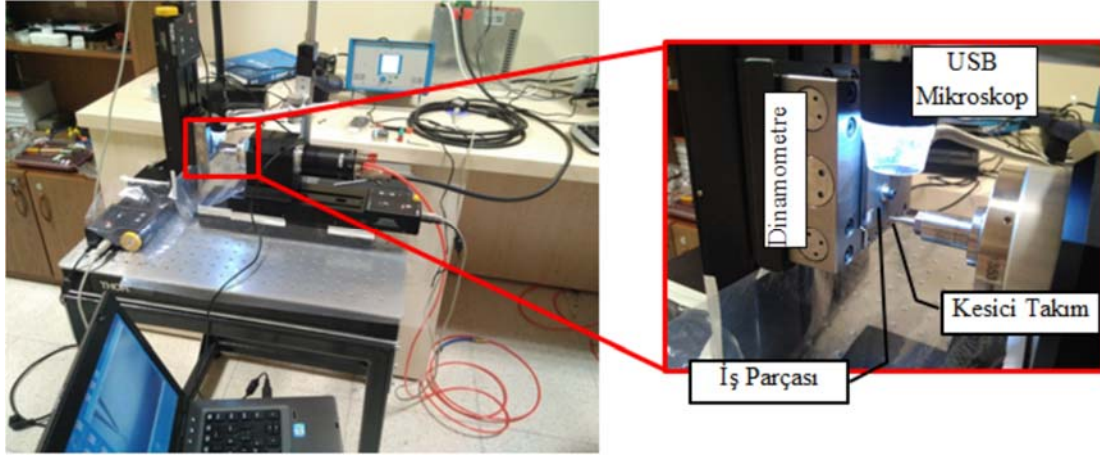
parametreleridir. Özellikle dış başına düşen ilerleme değeri, kritik talaş derinliğini doğrudan etkileyen kesme parametresidir. Yapılan deneysel çalışmada, kritik talaş kalınlığını tespit etmek adına, geniş bir yelpazede kesme parametresi kullanılmıştır. Tablo 1 de deneysel çalışmada kullanılan kesme parametreleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmada kullanılan kesme parametreleri  
(Cutting parameters used in experimental study)

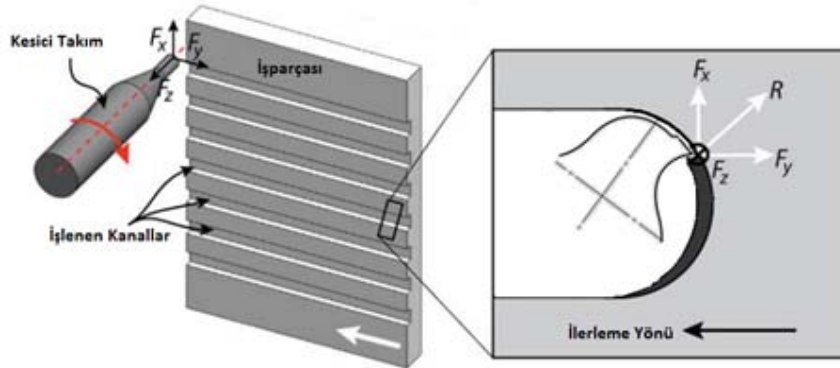
Kesme Parametresi	Değer
Dış başına düşen ilerleme, $f_z$ ( $\mu\text{m}$ )	0,1-0,25-0,5-1-2-4
Talaş Derinliği, $ap$ ( $\mu\text{m}$ )	5- 10-20-40-80-120-160
Kesme hızı, $V_c$ (m/dk)	5-10-15-20-25-30-35
Kesme Koşulları	Kuru

### 2.4. Mikro Kanallar İçin Yüzey Analizi ve Çapak Ölçümü (Surface Analysis for Micro Slots and Burr Measurement)

İşlenen kanallara ait yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Nanovea 3D optik yüzey profilometresi (Şekil 5a) kullanıldı. Kesme işlemi sonrasında, her bir kanaldan 0,5mmx0,5mm lik bir alanda ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) ve maksimum



Şekil 3. Deney düzeneginin genel görünümü (General view of the experimental setup.)



Şekil 4. Mikro frezeleme işleminin şematik gösterimi (Schematic representation of the micro-milling process).

yüzey pürüzlülüğü (Sz) alsansal olarak ölçülmüştür. Ayrıca yine işlenen her bir kanalın üst yüzeyinden ve dört farklı noktadan çapak genişliği (Şekil 5b) ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler SEM fotoğrafları üzerinden gerçekleştirilmiştir ve ölçümler için Screen Caliper yazılımı kullanıldı. Böylece kullanılan kesme parametrelerinin (Kesme hızı, Diş başına düşen ilerleme değeri ve Talaş derinliği) çapak genişliğine etkisi de tespit edilmiştir.

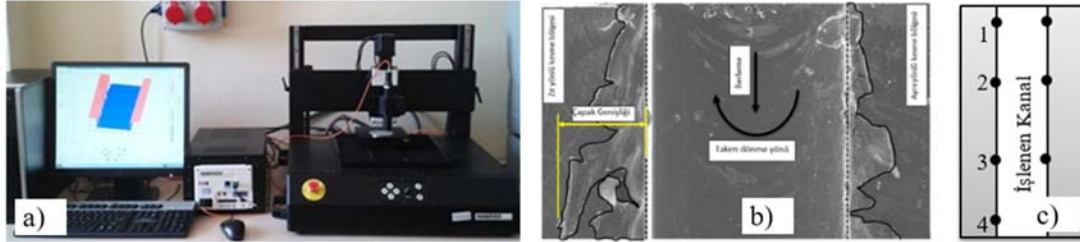
### 3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

#### 3.1. Kesme Kuvvetlerinin Değişimi (Variation of Cutting Forces)

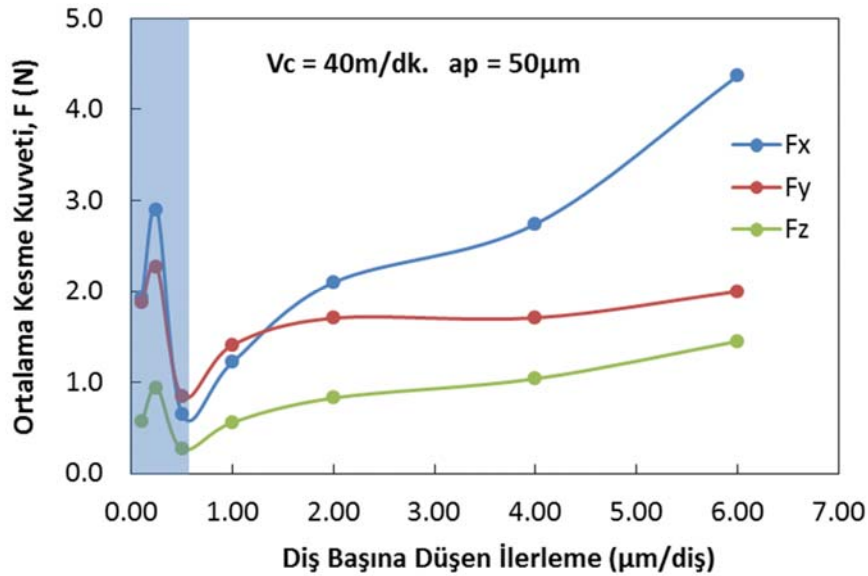
Şekil 6'da  $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$  kuvvetlerinin diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Geleneksel frezeleme işleminde artan ilerleme değeri ile kesme kuvveti de artmaktadır. Boyut etkisinden dolayı mikro frezeleme işleminde bu durum farklılık göstermektedir. Kritik talaş derinliğinden daha küçük olan talaş derinliklerinde kesme kuvvetleri artma eğilimi göstermektedir [11, 12]. Şekil 6'da da bunu görmek mümkün.  $f_z < 0,5 \mu\text{m}/\text{diş}$  için kesme kuvvetleri artmaktadır. Bu da kesme işleminin daha çok kazınma ağırlıklı olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Kesme kuvvetleri açısından bakıldığında  $f_z = 0,5 \mu\text{m}/\text{diş}$  ilerleme değeri şekil hafızalı

NiTi alaşımı için kritik ilerleme değeridir. Daha büyük ilerleme değerlerinde kesme kuvvetleri artan ilerleme değerine bağlı olarak artmaktadır. Kesme işlemi kayma mekanizmasının bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Yani boyut etkisinin yansımaları bu aralıkta geçerli değildir ve kesme işlemi geleneksel frezelemeyi andırmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda minimum talaş kalınlığının takım kenar radyüsünün %40'ı kadar olması gerektiği önerilmektedir [13]. Fakat bu değer işlenen malzemenin türüne ve takım kaplama malzemesine bağlı olarak değişebilmektedir [12]. Bu çalışmada da takım kenar radyüsünün yaklaşık  $1,5 \mu\text{m}$  olduğu dikkate alındığında minimum talaş kalınlığının 0,6 olması önerilmektedir. Şekil 6'da elde edilen grafikte, şekil hafızalı NiTi alaşım için bu değer yaklaşık  $0,5 \mu\text{m}$  olduğunu teyit etmektedir.

Bilindiği üzere artan talaş derinliği de talaş kesitinin artmasına neden olmaktadır. Geleneksel frezeleme işleminde artan talaş derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin de lineer olarak artması beklenir. Bu çalışmada da kesme kuvvetleri artan talaş derinliği ile artmaktadır.  $F_z$  kuvvetinin minimum kuvvet olduğu ve artış eğiliminin de diğer kuvvetlere nazaran daha düşük kaldığı Şekil 7'den görülmektedir. Kesme esnasında takıma etki eden  $F_x$  kuvveti teğetsel,  $F_y$  kuvveti ise radyal kuvvettir.  $80 \mu\text{m}$  talaş

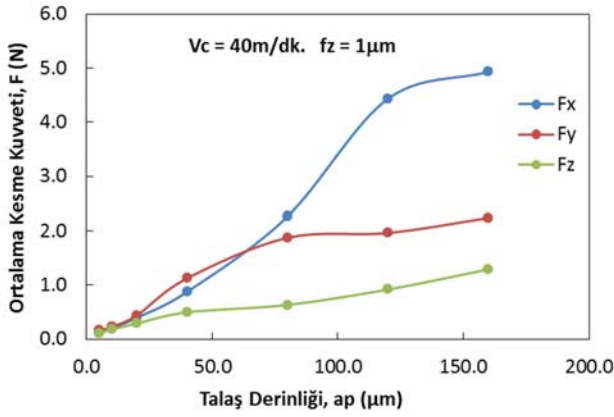


Şekil 5. a)Yüzey analizlerinde kullanılan optik profilometre b) Çapak genişliğinin ölçümü c) Kanal boyunca çapak ölçümü yapılan noktalar. (a) Optical profilometer for surface analysis b) Measurement of burr width c) Points measured for burrs along the machined slot)



Şekil 6. Kesme kuvvetlerinin diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak değişimi (Variation of cutting forces versus feed per tooth.)

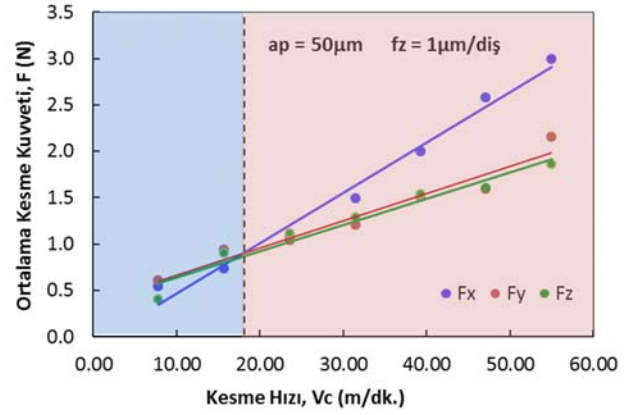
derinliğinde  $F_x$  ile  $F_y$  arasında bir ayrışma söz konusudur. İlerleme yönündeki kuvvet talaş derinliği ile çok fazla değişmezken, teğetsel kuvvet önemli oranda artmıştır. Bunun da nedeni, talaş derinliğinin dış başına düşen ilerleme değerine çok büyük olmasıdır. Çünkü talaş derinliğinin  $50 \mu\text{m}$  ve altında seçildiği durumda radyal kuvvetin bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir. Tüm bu sonuçlar beraber değerlendirildiğinde, sadece kesme kuvvetleri açısından, talaş derinliğinin  $80 \mu\text{m}$  ve altında alınması bu aşım için uygun olacaktır. İş parçasının tane boyutunun  $100 \mu\text{m}$  olduğu da düşünülecek olursa,  $F_x$  teğetsel kuvvetin  $80 \mu\text{m}$  talaş derinliğinden sonra artması da anlamlı olabilir. Fakat daha kesin bir yargıya varabilmek için farklı tane boyutuna sahip malzemeler için de kesme deneyleri yapmak gerekir.



**Şekil 7.** Kesme kuvvetlerinin talaş derinliği ile değişimi (Variation of cutting forces with depth of cut).

Geleneksel frezeleme işleminde artan kesme hızı kesme işleminin kolaylaşmasına neden olur. Kesicinin yüksek devirde dönmesi kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasına neden olur ki bu da ısıl yumuşamanın etkisiyle kesme kuvvetlerinin azalmasına katkıda bulunur. Yüksek devirle dönen kesici daha yüksek bir enerji depolayacağı için iş malzemesine daha kolay dalacaktır. Mikro frezeleme işleminde de kesme hızının artması kesme kuvvetlerinin azalmasına katkıda bulunur. Fakat kesici geometrisinin zayıf olması nedeniyle meydana gelen hızlı takım aşınması yukarıda durumu tersine çevirebilir. Tüm bu söylenenler geleneksel mühendislik malzemeleri için geçerli olup, şekil hafızalı alaşımlar için durum farklı olabilmektedir. Çünkü ŞHA lar maruz kaldıkları mekanik ve ısıl yük nedeniyle faz dönüşümüne uğrayabilen malzemelerdir. Bu çalışmada kullanılan malzeme de oda sıcaklığında östenit bir faza sahip. Üzerine yük uygulandığında, östenit faz, martenzit faza dönüşmektedir. Pekleşme kabiliyeti daha yüksek yapıya sahip olan bu martenzit fazı üzerine etki eden yükün kaldırılmasıyla tekrar eski haline (östenit fazına) dönebilir. Östenit olan faz ise martenzite göre deformasyon süreci daha rahat kontrol edilebilen bir fazdır. Artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'den de görüldüğü üzere artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetleri de lineer artmaktadır. Alışılmışın dışında olan bu davranışın temeli yukarıda bahsi geçen

gerilmeye bağlı faz dönüşümüne dayanmaktadır. Kesme esnasında kesici takımın iş parçasına uygulamış olduğu yük kesme bölgesinde yüksek kesme gerilmelerine neden olmaktadır [17]. Bu gerilmeler malzemeyi faz dönüşümüne zorlamaktadır. Artan kesme hızı kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasına dolayısı ile martenzit fazından uzaklaşmaya neden olurken, malzemede plastik birim şekil değişimi ve faz dönüşümü birim şekil değişimi eş zamanlı meydana gelmeye çalışmakta bu da malzemenin kalıcı deformasyonu için daha fazla mekanik enerjiye ihtiyaç duyulmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda da doğal olarak kesme kuvvetleri de artmaktadır. Nikel esaslı alaşımlar (Inconel 718 vb) ile Titanyum esaslı (Ti6Al4V vb) alaşımlarda bu faz değişimi oluşmadığından artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetleri de azalmaktadır [18].



**Şekil 8.** Kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi (Variation of cutting forces with cutting speed).

### 3.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi (Variation of Surface Roughness)

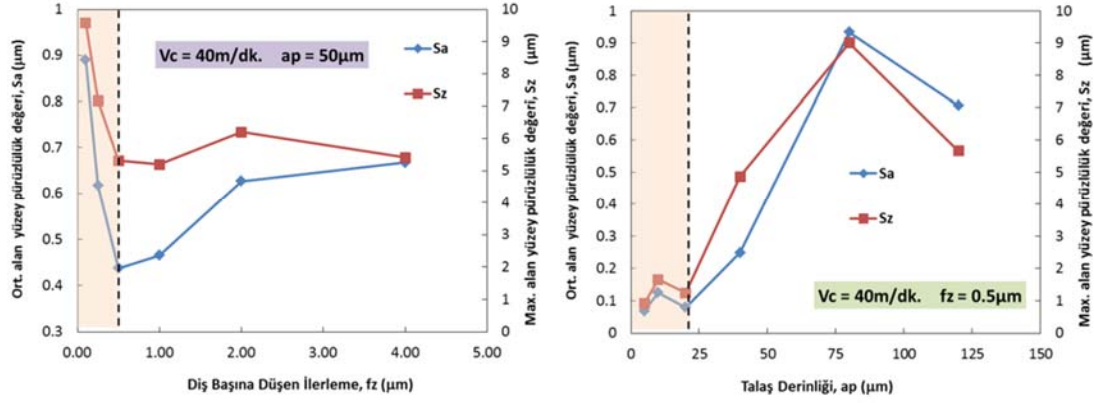
Bilindiği üzere geleneksel kesme işleminde ilerleme değerinin azalması ile  $R_a$  değeri de azalır. Fakat mikro mekanik işlemede boyut etkisinden dolayı bu kural her zaman geçerli değildir. Şekil 9'da dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak alansal ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) ve maksimum yüzey pürüzlülük ( $S_z$ ) değerlerinin değişimi verilmiştir. Bu değerler, işlenen kanal genişliği boyunca elde edilen  $0,5 \times 0,5 \text{ mm}$  lik bir alanın ortalama  $S_a$  ve  $S_z$  değerlerini ifade etmektedir.  $R_a$  ve  $R_z$  değerleri bir yüzeyin çizgisel pürüzlülük değerlerini ifade ederken,  $S_a$  ve  $S_z$  taranan tüm alanın pürüzlülük değerini ifade etmektedir.

Şekil 9'da görüldüğü üzere geleneksel frezeleme işleminde olduğu gibi artan ilerleme değeri ile artan bir yüzey pürüzlülüğü elde edilmemektedir.  $f_z = 0,5 \mu\text{m}/\text{diş}$  den daha küçük değerlerde  $S_a$  ve  $S_z$  değerleri artmaktadır. Bir anlamda işlenen yüzey kalitesi bozulmaktadır. Bu nedenle  $f_z = 0,5 \mu\text{m}$  nin kritik ilerleme değeri olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.  $f_z > 0,5 \mu\text{m}$  için artan ilerleme değeriyle birlikte  $S_a$  ve  $S_z$  artmaktadır. Bunun da nedeni  $f_z < 0,5 \mu\text{m}$  için kesme işlemi, kayma mekanizmasının bir sonucu olarak değil de daha çok kazınma ağırlıklı olarak bir kesme

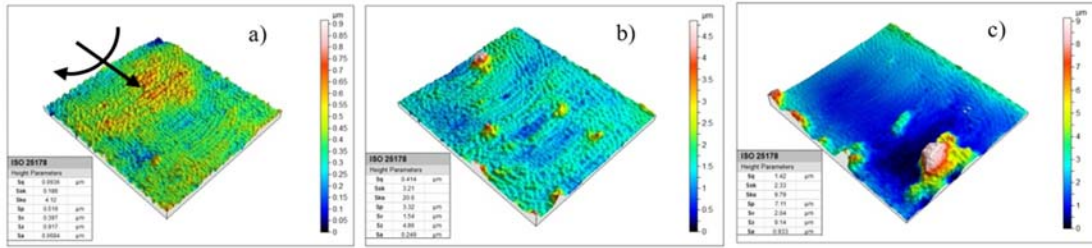


işleminin meydana gelmesidir. Aslında bu kritik olan ilerleme değerinden daha yüksek olan ilerleme değerlerinde geleneksel frezelemedeki davranış gözlemlenmektedir. Yani artan ilerleme değeri ile yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Şekil hafızalı NiTi alaşım malzemesinin mikro frezelenmesinde kritik ilerleme değerinin  $f_z = 0,5 \mu\text{m}$  olduğunu söylemek mümkün. Şekil 6 ve Şekil 9'da  $f_z < 0,5 \mu\text{m}$  için hem kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değeri artmaktadır. Kullanılan mikro kesici takımların ortalama kenar radyüsünün  $1,5 \mu\text{m}$  olduğu dikkate alınacak olursa, NiTi alaşımı için  $f_{z(\text{min})} \cong 0,3R_i$  dir. Bu ifadeyi hem Şekil 6'da verilen kesme kuvveti değerleri hem de Şekil 9'da verilen  $S_a$  ve  $S_z$  değerleri desteklemektedir. Şekil 9'da ayrıca talaş derinliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi verilmiştir. Talaş derinliğinin özellikle  $20 \mu\text{m}$  nun üzerinde olması hem ortalama yüzey pürüzlülüğünü hem de maksimum yüzey pürüzlülüğünün önemli oranda artmasına

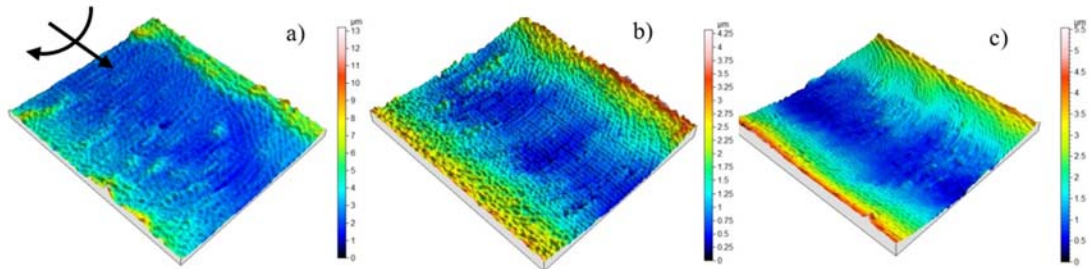
neden olmaktadır.  $S_z$  değerlerinin artmasına neden teşkil eden unsur ise işlenen yüzeyde meydana gelen talaş sıvanmalarıdır. Özellikle  $40 \mu\text{m}$  ve üzerindeki talaş derinliklerinde işlene yüzeyde talaş sıvanmalarına rastlanmıştır (Şekil 10). Kesme bölgesinde meydana gelen yüksek gerilmeler NiTi alaşımının faz dönüşümüne neden olduğu daha önceki bölümde ifade edilmişti. Bu faz dönüşümü östenitten martenzite olduğundan, hem kesilen bölgede he de kesilmeye çalışılan talaşa sertleşmenin meydana gelmesi kaçınılmazdır. Kesilme bölgesinde faz dönüşümüne uğrayan talaş yüzeye sıvanmaya zorlandığında hem işlenen yüzeyi bozmakta hem de yüzeye adeta kaynak olmaktadır. Bu durum artan talaş derinliği ile de artmaktadır. Şekil 11'de ise üç farklı ilerleme değerine bağlı olarak işlenen kanal yüzeylerinden alınan görüntülere yer verilmiştir. İlerleme değerinin  $0,1 \mu\text{m}$  olduğu durumda  $S_a$  ve  $S_z$  değerlerinin daha büyük olduğu şekilden de



Şekil 9. Diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak ortalama ve maksimum yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Variation of average and maximum surface roughness depending on feed per tooth.)



Şekil 10. Farklı talaş derinliği değerleri için işlenen yüzeylerden alınan 3 boyutlu görüntüleri a)  $a_p = 5 \mu\text{m}$ , b)  $a_p = 40 \mu\text{m}$ , c)  $a_p = 80 \mu\text{m}$  (3D images taken from machined surfaces for different depth of cut values a)  $a_p = 5 \mu\text{m}$ , b)  $a_p = 40 \mu\text{m}$ , c)  $a_p = 80 \mu\text{m}$ ).



Şekil 11. Farklı ilerleme değerleri için işlenen yüzeylerden alınan 3 boyutlu yüzey görüntüleri a)  $f_z = 0,1 \mu\text{m}$ , b)  $f_z = 0,5 \mu\text{m}$ , c)  $f_z = 4 \mu\text{m}$  (3D images taken from machined surfaces for different feed rate values a)  $f_z = 0,1 \mu\text{m}$ , b)  $f_z = 0,5 \mu\text{m}$ , c)  $f_z = 4 \mu\text{m}$ )

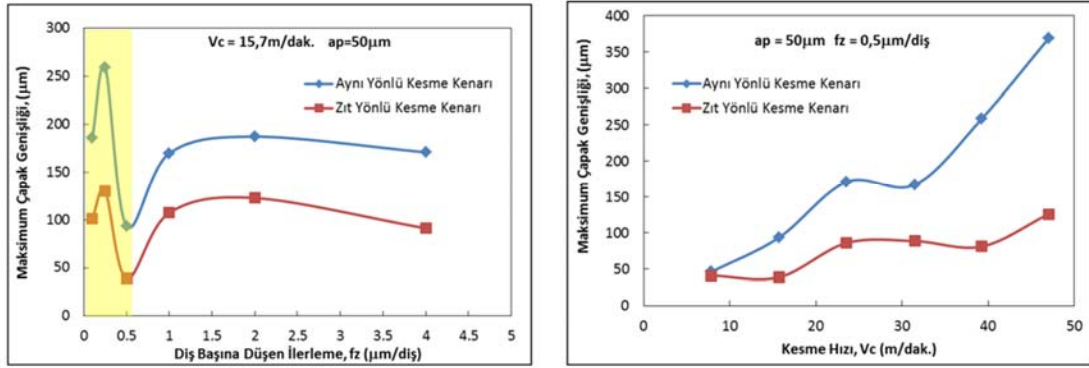


görülmektedir. Artan ilerleme değeri ile Sa ve Sz azalmıştır. Fakat artan ilerleme değeri ile de kanal kenarları ile kanal ortası arasındaki yükseklik farkının arttığı gözlemlenmiştir.

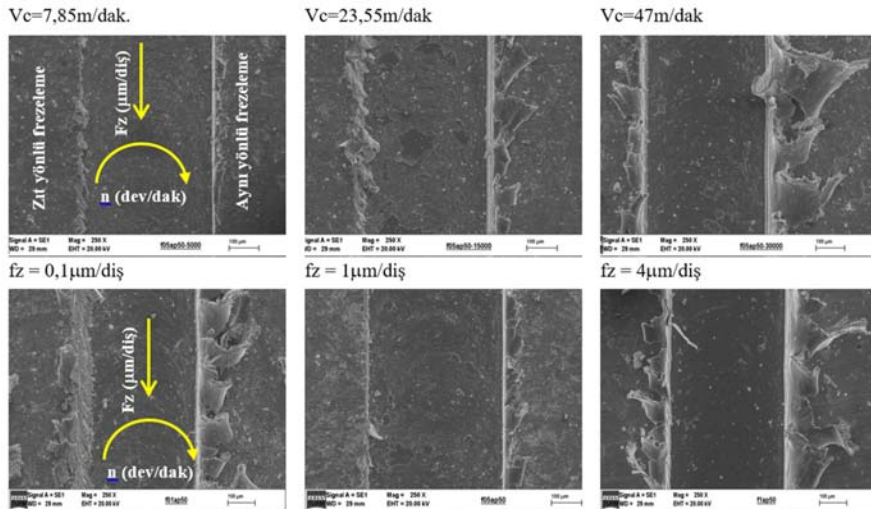
#### 4. MİKRO ÇAPAK OLUŞUMU (MICRO BURR FORMATION)

Mikro frezeleme de yüzey pürüzlülüğü kadar önemli bir diğer konu çapak oluşumudur. Özellikle mikro frezeleme gibi çok küçük boyutlarda gerçekleştirilen imalat işlemlerinde, işlem sonrası oluşan çapakların temizlenmesi oldukça güç ve maliyetlidir. Bu yüzden mikro mekanik işlemede çapaksız üretim bir kat daha önem kazanmaktadır [19]. Elde edilen sonuçlarda, her bir kesme parametresi kesme deneyleri yapılarak, kanal kenarlarında meydana gelen çapak genişlikleri SEM görüntülerinden ölçülmüştür. Şekil 12’de farklı fz, ve Vc değerleri için çapak genişliğinin değişimi verilmektedir. Şekil 12’de dikkati çeken ilk unsur; aynı yönlü kesme bölgesinde meydana gelen çapak genişliğinin daha büyük olduğudur. Bu durum daha önce yapılan bazı çalışmalarda [8, 9] da gözlemlenmiş ve nedenlerine geniş şekilde yer verilmiştir [11, 18]. 0,5 µm dan daha düşük ilerleme değerlerinde çapak genişliği genel

olarak düzensiz bir seyir izlemektedir. Kenar radyüsünün de yaklaşık 1,5µm olduğu göz önüne alınacak olursa, kenar radyüsünden %30 ve daha düşük olan ilerleme değerlerinde kesme işlemi kararsız bir hal almakta ve bu da çapak boyutuna yansımaktadır. fz = 0,5µm/diş ten daha büyük ilerleme değerlerinde her iki yöndeki çapak genişliği de artmaktadır. Bir anlamda 0,5µm/diş ten daha büyük ilerleme değerlerinde kesme işleminin mikro kesme işleminden çok geleneksel frezeleme işlemine benzemektedir. Şekil 9’da verilen Sa değerlerinin değişimi de dikkate alındığında, 0,5µm/diş ten daha düşük ilerleme değerleri, hem yüzey kalitesi hem de çapak oluşumu açısından önerilmeyen bir aralıktır. Şekil 12’de ilginç olan bir diğer sonuçta, kesme hızına bağlı olarak çapak genişliğinin önemli oranda artmasıdır. Yüksek kesme hızı, yüksek şekil değiştirme hızı anlamına gelir. Bu da kesme bölgesinde fazın östenitten martenzite dönüşmesine neden olur. Fakat kesme bölgesindeki artan sıcaklık ta malzemenin martenzite dönüşümünü engeller ve daha sünek bir yapı oluşmasına neden olur. Bunun sonucunda da çapak genişliği (özellikle de aynı yönlü kesme kenarında) artacaktır. Şekil 13’te bazı kesme parametreleri için çapak genişliği ölçümlerinde kullanılan SEM fotoğraflarından örnekler verilmiştir. Artan



Şekil 12. Maksimum çapak genişliğinin kesme parametrelerine bağlı değişimi  
(Variation of maximum burr width depending on cutting parameters).



Şekil 13. Farklı ilerleme ve kesme hızları için kanal kenarlarında meydana gelen çapak genişlikleri  
(Burr widths at the edge of the slot for different feed rate and cutting speeds)

kesme hızına bağlı olarak çapak genişliğinin bariz bir şekilde arttığı görülmektedir. Özellikle de aynı yönlü frezeleme kenarındaki çapak genişliği çok daha büyüktür. Aynı yönlü frezeleme; takımın kesici kenarının iş parçasını terk ettiği yöndür. Takımın dönme hareketiyle birlikte, talaş kalınlığı da azaldığı için takım kenar radyüsü negatif talaş açısı gibi davranmaktadır. Bunun neticesinde takım, talaşı koparmak yerine kazıyarak uzaklaştırmaya zorlanmaktadır. Bu da kenarda çapak yığılmasının artmasına neden olmaktadır. Şekil 13'te verilen SEM görüntülerinde dikkati çeken bir nokta da, düşük kesme hızı ve ilerleme değerlerinde, zıt yönlü kesme kenarında meydana gelen kazınma/yırtılma benzeri durumdur. Özellikle  $V_c \leq 23,55\text{m/dak.}$  ve  $f_z \leq 0,25\mu\text{m/diş}$  aralıklarında, kanal kenarda çapak oluşumundan ziyade tırtıklama şeklinde bir kesme meydana geldiğine dair izlenim edinilmiştir. Kesici kenarın iş parçasına ilk daldığı nokta olarak ele alındığında, kenar radyüsünün talaş kalınlığından çok büyük olması farklı bir kazınma oluşumuna neden olmuştur. Literatürde geleneksel mühendislik malzemeleri kullanılarak yapılan çalışmalarda benzeri bir duruma rastlanılmadığından, bu durumun NiTi ŞHA' na has bir özellik olabileceği sonucuna varılmıştır.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada biyomedikal sektöründe çokça kullanılan şekil hafızalı NiTi alaşımının mikro şartlarda frezelenmesinde minimum talaş kalınlığı deneysel olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla farklı kesme parametrelerinde mikro frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Minimum talaş kalınlığı hem kesme kuvvetlerinin değişimi hem de yüzey pürüzlülüğünün değişimine bağlı olarak elde edilmiş ve çapak ölçümleri ile de bu durum desteklenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen ve öne çıkan sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkün.

Şekil hafızalı NiTi alaşım için minimum talaş kalınlığının  $0,5\ \mu\text{m}$  olduğu ve takım kenar yarıçapı ile oranlandığında kenar yarıçapının yaklaşık %30 una kabul etmektedir. Yani sağlıklı bir kesme işlemi ve iyi bir yüzey kalitesi elde etmek adına deforme olmamış talaş kalınlığı takım kenar yarıçapının %30 undan küçük olmamalı.

Artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvvetleri de artmaktadır. Bunun da nedeni; şekil hafızalı alaşımın faz değişikliğine uğramasıdır ki burada malzeme östenit fazdan martenzit faza dönüşmektedir. Artan kesme hızı ile kesme bölgesindeki şekil değiştirme hızı ve gerilmeler de artmaktadır. Bu da fazın martenzite dönüşme sürecini etkilediğinden kesme kuvvetleri artmaktadır.

Beklenildiği üzere artan talaş derinliği ile kesme kuvvetleri de artmaktadır. Bu noktadan hareketle minimum kesme kuvveti için talaş derinliğinin ve kesme hızının düşük alınması önerilebilir. Yüzey pürüzlülüğü açısından da  $S_a$  ve  $S_z$  değerlerinin minimum olduğu ilerleme değeri  $0,5\ \mu\text{m}$  dir. Şekil hafızalı NiTi alaşımın işlenmesi sırasında daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmek adına  $f_z=0,5\ \mu\text{m/diş}$ ,  $a_p=25\ \mu\text{m}$  ve mümkün olan en düşük kesme hızının alınması uygun

olacaktır. Aynı yönlü kesme kenarında meydana çapak genişliğinin daha büyük olduğu ve artan kesme hızıyla arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü için elde edilen kritik talaş kalınlığının çapak oluşumu için de geçerli olduğu söylenebilir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Kubilay Aslantaş, bu çalışmaya AKU-BAP 16.Kariyer.123 ve 16.Teknoloji.ALTY.01 projeleriyle katkıda bulunan Afyon Kocatepe Üniversitesi'ne teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Biermann, D., F. Kahleyss, E. Krebs, and T. Upmeyer., A Study on Micro-Machining Technology for the Machining of NiTi: Five-Axis Micro-Milling and Micro Deep-Hole Drilling, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20, 745–751, 2011.
2. Kaynak, Y., H. E. Karaca, R. D. Noebe, and I. S. Jawahir., Analysis of Tool-Wear and Cutting Force Components in Dry, Preheated, and Cryogenic Machining of NiTi Shape Memory Alloys, *Procedia CIRP*, 8,498–503, 2013.
3. Yung, K. C., H. H. Zhu, and T. M. Yue., Theoretical and Experimental Study on the Kerf Profile of the Laser Micro-Cutting NiTi Shape Memory Alloy Using 355 Nm Nd:YAG, *Smart Materials and Structures* 14 (2), 337-342, 2005.
4. Theisen, W., and A. Schuermann. Electro Discharge Machining of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys, *Materials Science and Engineering A* 378 (1–2), 200–204, 2004.
5. Kong, M. C., D. Axinte, and W. Voice. Challenges in Using Waterjet Machining of NiTi Shape Memory Alloys: An Analysis of Controlled-Depth Milling, *Journal of Materials Processing Technology*, 211 (6), 959–71, 2011
6. Kaynak, Y., Karaca, H.E., Jawahir, I.S., Cutting Speed Dependent Microstructure and Transformation Behavior of NiTi Alloy in Dry and Cryogenic Machining, *Journal of Materials Engineering and Performance* 24 (1), 452–456, 2015.
7. Weinert, K., Petzoldt, V., Machining of NiTi Based Shape Memory Alloys, *Materials Science and Engineering A*, 378 (1–2), 180–184, 2004.
8. Ucu, İ., Aslantaş, K., Gökçe, B., Bedir, F., Effect of Tool Coating Materials on Surface Roughness in Micromachining of Inconel 718 Super Alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228, (12), 1550–1562, 2014.
9. Aslantaş, K., Hopa, H. E., Percin, M. Ucu, I., Çicek, A., Cutting Performance of Nano-Crystalline Diamond (NCD) Coating in Micro-Milling of Ti6Al4V Alloy, *Precision Engineering*, 45, 55-66, 2016.
10. Weinert, K., and Petzoldt, V., Machining NiTi Micro-Parts by Micro-Milling, *Materials Science and Engineering A*, 481–482, (1-2), 672–675, 2008.

11. Uçun, İ., Aslantaş, K., Bedir, F., The Effect of Minimum Quantity Lubrication and Cryogenic Pre-Cooling on Cutting Performance in the Micro Milling of Inconel 718, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 229 (12), 2134–2143, 2015.
12. Uçun, İ., Aslantaş, K., and Bedir, F., The Performance Of DLC-Coated and Uncoated Ultra-Fine Carbide Tools in Micromilling of Inconel 718, Precision Engineering, 41, 135–144, 2015.
13. Chae, J., Park, S. S., Freiheit, T., Investigation of Micro-Cutting Operations, International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (3-4), 313–332, 2006.
14. Uçun, İ., Aslantaş, K., Bedir, B., Finite Element Modeling of Micro-Milling: Numerical Simulation and Experimental Validation, Machining Science and Technology, 20 (1), 148-172, 2016.
15. Kaynak, Y., Karaca, H.E., Noebe, R.D., Jawahir, I.S., Tool-Wear Analysis in Cryogenic Machining of NiTi Shape Memory Alloys: A Comparison of Tool-Wear Performance with Dry and MQL Machining, Wear, 306 (1-2), 51–63, 2013.
16. Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P., Dudzinski, D., Micro-End Milling of NiTi Biomedical Alloys, Burr Formation and Phase Transformation, Precision Engineering, 38 (2), 356–364, 2104.
17. Sinan, F., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Ozdoganlar, O.B., An Experimental Investigation of Micro-Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro-Endmills, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47 (7–8), 1088–1100, 2007.
18. Aslantaş K., Çiçek A., Çelik S.G., An experimental study on relationship between tool wear - slot geometry in micromachining, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1285-1298, 2018.

