



# **İnce Cidarlı Parçaların Mikro Frezelenmesinde Talaş Kaldırma Yolunun Takım Aşınması, Kuvvetler ve Parça Kalitesi Üzerindeki Etkisi**

Emel KURAM<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>*Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli/TÜRKİYE*

*Başvuru: 13/08/2016*

*Kabul: 09/10/2016*

## **ÖZ**

Bu çalışmada, ince cidarlı parçaların mikro frezelenmesinde talaş kaldırma yolunun takım aşınması ve kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, ince cidarların kalınlığındaki hata ve çapak oluşumu da dikkate alınmıştır. Talaş kaldırma işleminde iki farklı yol seçilmiştir: su yolu ve adım destekli takım yolu. Deneylerde iş parçası malzemesi olarak Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır ve bu malzeme üzerinde 1 mm yüksekliğinde ve 100 µm kalınlığında ince cidarlar işlenmiştir. Sonuç olarak, adım destekli takım yolunun; ince cidarların işlenmesinde daha az kuvvete, çapak oluşumuna, kalınlık hatasına ve daha yüksek takım aşınmasına neden olduğu bulunmuştur.

*Anahtar kelimeler: İnce cidarlı parça, Mikro frezeleme, Takım aşınması, Kuvvet.*

## **The Effect of Material Removal Way on Tool Wear, Forces and Part Quality by Micro-Milling of Thin-Walled Parts**

### **ABSTRACT**

In this study, the effect of material removal way in micro-milling of thin-walled parts on tool wear and forces was investigated. In addition, the thickness error of thin walls and burr formation were also taken into consideration. Two different ways were selected at material removal: waterline and step support tool path. In the experiments, Ti6Al4V titanium alloy was employed as a workpiece material and thin walls at the height of 1 mm and at the thickness of 100 µm were machined on this material. As a result, it was found that step support tool path resulted in lower force, burr and thickness error, however resulted in higher tool wear during machining of thin walls.

*Keywords: Thin-walled part, micro-milling, tool wear, force.*

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnce cidarlı parçalar otomotiv ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlarda kullanılacak mikro parçaların hassas bir şekilde imal edilmesi son derece önemlidir. İnce cidarların mikro frezelenmesinde performansı etkileyen faktörler iş parçası malzemesi, ince cidarların ölçüleri ve geometrisi, kesici takım, işleme parametreleri ve takım yolları olarak sayılabilir [1]. Takım yollarının doğru seçimi üretim zamanını, işlenen yüzeyin kalitesini ve maliyeti etkilemektedir [2, 3].

İnce cidarlı parçalar işleme esnasında kesme kuvvetleri altında kolaylıkla deforme olabilirler [4, 5]. Kesme kuvvetleri altında oluşan esnemeler iş parçasında göz ardı edilemeyecek şekil hatalarına neden olmaktadır [6]. İnce cidarlı parçaların talaşlı imalatında çarpılmalar en sık görülen şekil hataları arasındadır. Bu nedenle ince cidarların işlenmesi üzerine yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur. Li ve arkadaşları [1] 15 µm kalınlığında ince cidarları mikro frezeleme yöntemi ile başarılı bir şekilde işlemişlerdir. Friedrich ve arkadaşları [7] iş parçası malzemesi olarak polimetil metakrilat (PMMA) kullanmışlardır ve yükseklik-kalınlık oranı (aspect ratio) yaklaşık 8 olan ince cidarları frezeleme yöntemi ile işlemişlerdir. Bu araştırmacılar, ince cidarları işleme esnasında meydana gelen kuvvetleri ve kesici takımda meydana gelen değişimleri dikkate almamışlardır, sadece ince cidarları başarılı bir şekilde işlemeye ve yüksek yükseklik-kalınlık oranına ulaşmaya çalışmışlardır. Bang ve arkadaşları [8] pirinç malzemede 25 µm kalınlığında ve 650 µm yüksekliğinde ince cidarları işlemişlerdir. Bu araştırmacılar ince cidarların işlenmesinde iş parçası kalitesini, kesme kuvvetlerini ve takım aşınmasını dikkate almamışlardır. Arnaud ve arkadaşları [9] 6082 alüminyum alaşımında ince cidarların işlenmesi esnasında meydana gelen titreşimleri incelemiştir. Baranek ve arkadaşları [10] 6082 alüminyum alaşımı üzerine 1 mm kalınlığında ve 40 mm yüksekliğinde ince cidarları frezeleme yöntemi ile işlemiştir. İşlenmiş cidarların yüzey kalitesi incelenmiştir. Annoni ve arkadaşları [11, 12] iş parçası malzemesi olarak C40 karbon çeliğini kullanmışlardır ve ince cidarların işlenmesi esnasında cidar kalınlığının ve frezeleme stratejisinin (aynı ve zıt yönlü frezeleme) iş mili frekansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Thepsonthi ve Özel [13] Ti6Al4V malzemesinde dairesel ince cidarları mikro frezeleme ile işlemişlerdir. İşlenen ince cidarın kalınlığı 75 µm ve yüksekliği 500 µm olarak belirlenmiştir. İnce cidarlar farklı devir sayısı (16000, 32000, 48000 dev/dak), ilerleme hızı (25, 50, 75 m/dak) ve talaş derinliklerinde (40, 70, 100 µm) işlenmiştir. İnce cidarların işlenmesi sonrasında yüzey pürüzlülüğü ve üst çapak genişliği ölçülmüştür. İşlenen ince cidarlarda aşırı çapak oluşumu gözlenmiştir. Llanos ve arkadaşları [14] iş parçası malzemeleri olarak alüminyum ve pirinç kullanmışlar ve bu malzemeler üzerine ince cidarları işlemişlerdir. İnce cidarların yüzey kalitesi ve çapak oluşumu dikkate alınmıştır. Pirinç malzemesindeki ince cidarın yüzey kalitesinin alüminyum malzemesine göre daha iyi olduğu bulunmuş fakat, çapak oluşumunun alüminyum malzemesinde daha düşük olduğu görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalarda genellikle işlenen ince cidarların yüzey kalitesi nitel olarak incelenmiştir. İnce cidarların işlenmesi esnasında meydana gelen kuvvetlerin ölçüldüğü çalışmalar ise sınırlıdır. Ayrıca ince cidarların

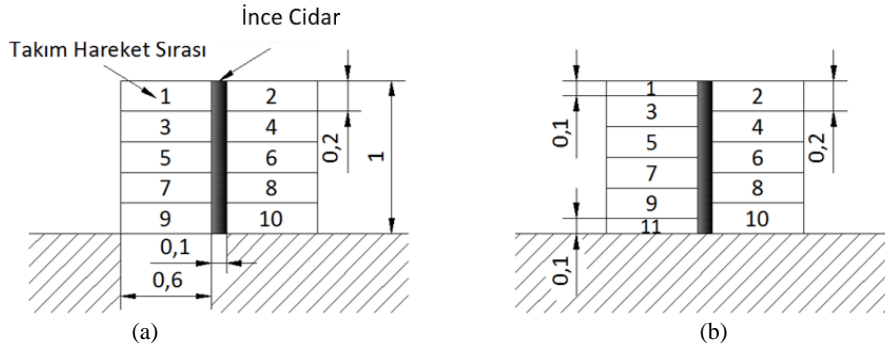
işlendiği kesici takımda işleme sonrası meydana gelen değişimlerin nicel olarak incelendiği çalışmalara yapılan literatür taramasında rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışma, talaş kaldırma yolunun ince cidarların işlenmesinde takım aşınması ve kuvvetler üzerindeki etkisini kantitatif olarak incelemeye odaklanmıştır. Ayrıca işlenen ince cidarların kalınlığındaki hata ve çapak oluşumu da dikkate alınmıştır.

## 2. DENEYSEL AYRINTI (EXPERIMENTAL DETAIL)

Mikro frezeleme deneyleri maksimum 12000 dev/dak değerinde dönebilen DECKEL MAHO DMU 60 P beş eksen işleme merkezinde yapılmıştır. Yüksek devir sayısına ulaşabilmek için işleme merkezinin ana miline yüksek hız kafası (Pibomulti X9810) adı verilen bir donanım takılmıştır. İş parçası malzemesi olarak 35 HRC sertliğine sahip Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır. Ti6Al4V alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de sunulmuştur. Deneylerde Union Tool marka C-CES2006-0120 kodlu 600 µm çapında iki ağızlı mikro parmak freze kullanılmıştır. Mikro parmak frezenin helis açısı 30°'dir. Takım imalatçısına göre mikro parmak frezenin sertliği 3000~3500 HV değerindedir. Bütün deneylerde mikro kesici takımlar 15 mm yüksekliğinde bağlanmıştır. Deneylere başlamadan önce mikro parmak frezenin statik salgısı hassas komparatör (hassasiyeti 1 µm) ile kesici takımın şaft kısmından ölçülmüştür. Kesici takım salgısının 4 µm'den daha düşük olduğu belirlenmiştir. Mikro frezeleme deneyleri sabit şartlarda yapılmıştır ve deneylerde kullanılan mikro frezeleme koşulları Tablo 2'de verilmiştir. Deneyler kuru işleme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yüksekliği 1 mm, kalınlığı 100 µm, yükseklik-kalınlık oranı 10 olan ince cidarlar işlenmiştir. İnce cidarların işlenmesinde iki farklı talaş kaldırma yolu seçilmiştir (Şekil 1). 1. takım yolu su yolu (waterline), 2. takım yolu adım destekli (step support) olarak isimlendirilmektedir. 1. takım yolunda (Şekil 1 (a)), mikro parmak freze "1" olarak adlandırılan kısımdan sabit derinlikte (0,2 mm) talaş kaldırmıştır. Daha sonra "2" olarak adlandırılan kısımdan yine 0,2 mm derinliğinde talaş kaldırılmıştır. Mikro parmak freze takım hareket sırasına göre hareket ederek bütün malzemeleri kaldırmış ve ince cidar istenen boyutlarda işlenmiştir. Bu takım yolunda takımın tek numaralı hareket sıralarında ince cidar, iş parçasının diğer tarafındaki malzeme tarafından desteklenmektedir. Fakat çift hareket sıralarında diğer taraftan destek olmadığı için kesme kuvvetleri altında ince cidarın eğilmesi ile sonuçlanmaktadır. Bu problemi azaltmak için adım destekli (step support) talaş kaldırma yolu önerilmiştir [1]. 2. takım yolunda (Şekil 1 (b)), yine mikro parmak freze "1" olarak adlandırılan kısımdan sabit derinlikte talaş kaldırmıştır. Fakat bu sefer başlangıçtaki talaş derinliğinin bir kısmı kaldırılmıştır. Bu çalışmada talaş derinliği başlangıçtaki değer %50'si (0,1 mm) olarak alınmıştır. Daha sonra takım diğer hareket sıralarına göre hareket ederek başlangıçtaki talaş derinliğinin tamamını (0,2 mm) kaldırmıştır. Takımın "11." hareket sırasında geriye kalan 0,1 mm'lik malzeme kaldırılarak ince cidar işlenmiştir. Bu takım yolunda ince cidar, işleme esnasında her zaman diğer taraftaki kısmi malzeme ile desteklenmektedir.

İşleme sonrası mikro parmak frezelerde meydana gelen aşınmalar ve işlenen ince cidarların kalitesi taramalı

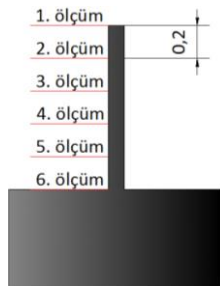
elektron mikroskobu (SEM, Philips XL30) ile incelenmiştir. İşleme esnasında meydana gelen kuvvetler tabla tipi dinamometre kullanılarak eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Bu çalışmada X ve Y yönlerindeki kuvvetler (Fx ve Fy) dikkate alınmıştır. Cidar yüksekliği boyunca Şekil 2’de gösterildiği gibi 6 farklı yerden kalınlık ölçümü yapılmıştır ve en büyük kalınlık analizlerde kullanılmıştır.



**Şekil 1.** İnce cidarların işlenmesinde talaş kaldırma yolları (a) suyu, (b) adım destekli, tüm ölçüler mm cinsindedir (Material removal way during machining of thin walls (a) waterline, (b) step support, all units are in mm)

**Tablo 2.** Mikro frezeleme koşulları (Micro-milling conditions)

Koşul	Birim	Değer
Devir Sayısı	dev/dak	20000
İlerleme Hızı	mm/dak	50
Cidar Yüksekliği	mm	1
Cidar Kalınlığı	$\mu\text{m}$	100
Cidar Uzunluğu	mm	15



**Şekil 2.** İnce cidarların kalınlığını ölçme noktaları, ölçümler arası mesafe 0,2 mm'dir (Measurement points of thin walls thickness, distance between measurements is 0.2 mm)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

İnce cidarların işlenmesi sonrasında mikro parmak frezelerde meydana gelen aşınmalar Şekil 3'te gösterilmiştir. Her iki talaş kaldırma yolunda da mikro parmak frezelerle iş parçası malzemesi yapışmıştır. Suyolunda kullanılan mikro parmak frezede meydana gelen yapışmanın adım destekli takım yolunda kullanılanlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Fakat adım

**Tablo 1.** Ti6Al4V titanyum alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlık) (Chemical composition of Ti6Al4V titanium alloy (weight %))

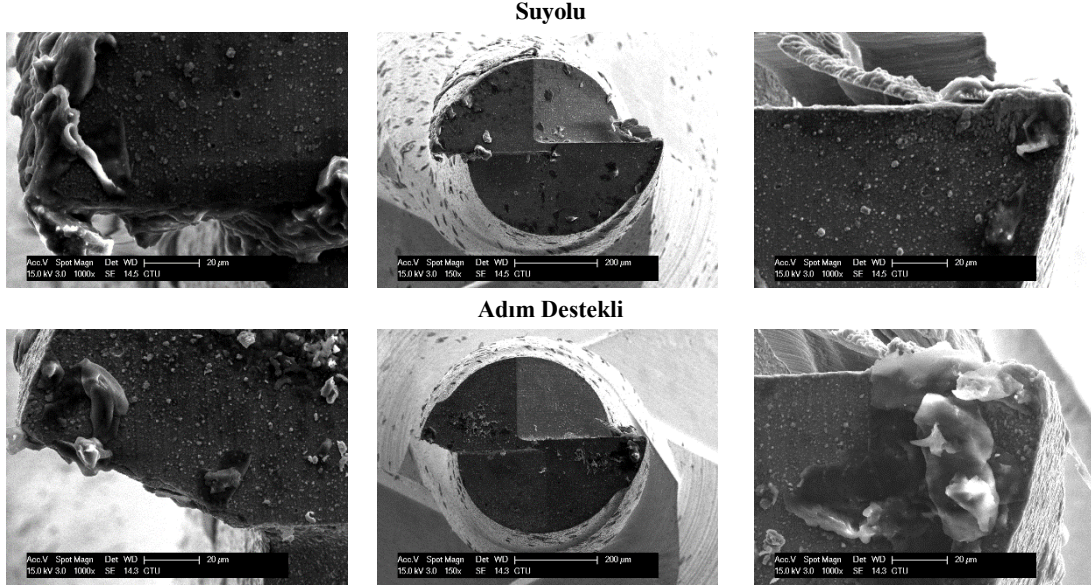
Elementler	Ti	Al	V	C
% Ağırlık	88,00	5,75	4,00	0,08

destekli talaş kaldırma yolunda kullanılan mikro parmak frezede kırılma meydana gelmiştir. Bu kırılmanın nedeni, adım destekli takım yolunda işleme uzunluğunun daha fazla olması ve değişken talaş derinliği nedeniyle kuvvetlerdeki değişimin daha fazla olmasıdır. Suyolu takım yolunda toplam işleme uzunluğu 150 mm ve adım destekli takım yolunda toplam işleme uzunluğu 165 mm'dir. Her iki takım yolunda kullanılan mikro parmak frezelerde ayrıca kesici kenarın yuvarlanmasına neden olan abrasif aşınma da görülmüştür. Bu çalışmada mikro parmak frezelerin serbest yüzeyleri üzerindeki en büyük aşınma ölçülmüştür ve en büyük aşınma suyu stratejisinde kullanılan takımında 14,23  $\mu\text{m}$ , adım destekli takım yolunda kullanılan takımında 36,07  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur (Tablo 3).

İnce cidarların işlenmesi esnasında ölçülen X ve Y yönlerindeki kuvvetler (Fx ve Fy) sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’de sunulmuştur. Suyolu takım stratejisinde artan takım hareket sırası ile Fx kuvveti arasında lineer ilişkinin olduğu, fakat adım destekli takım yolunda takım hareket sırası ile Fx kuvveti arasında 2. dereceden bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Adım destekli takım yolunda takım hareket sırası yani işleme uzunluğu ile Fx kuvveti arasında lineer olmayan ilişkinin sebebi talaş derinliğinin değişken olmasıdır. Her iki takım yolunda genellikle artan takım hareket sırası ile yani artan işleme uzunluğu ile Fx kuvvetinin arttığı bulunmuştur (Şekil 4 (a) ve (b)). Fakat adım destekli takım yolunda 11. hareket sırasında Fx kuvveti azalmıştır (Şekil 4 (b)). Bunun nedeni talaş derinliğinin daha düşük olmasıdır. Genellikle suyu takım stratejisi ile daha yüksek Fx kuvveti ölçülmüştür. En yüksek Fx kuvveti suyu stratejisinde 29,15 N, adım destekli takım yolunda 27,90 N olarak ölçülmüştür. Suyolu stratejisinde Fx kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 13,36-29,15 N arasında değişmiştir, adım destekli takım yolunda Fx kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 12,56-27,90 N arasında değişmiştir.

Suyolu takım stratejisinde artan takım hareket sırası ile  $F_y$  kuvveti arasında lineer ilişkinin olduğu, fakat adım destekli takım yolunda takım hareket sırası ile  $F_y$  kuvveti arasında 2. dereceden bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Adım destekli takım yolunda takım hareket sırası yani işleme uzunluğu ile  $F_y$  kuvveti arasında lineer olmayan ilişkinin sebebi talaş derinliğinin değişken olmasıdır. Her iki takım yolunda genellikle artan takım hareket sırası ile yani artan işleme uzunluğu ile  $F_y$  kuvvetinin arttığı bulunmuştur (Şekil 5 (a) ve (b)). Fakat adım destekli

takım yolunda 11. hareket sırasında  $F_y$  kuvveti azalmıştır (Şekil 5 (b)), bunun nedeni talaş derinliğinin daha düşük olmasıdır. Genellikle suyolu takım stratejisi ile daha yüksek  $F_y$  kuvveti ölçülmüştür. En yüksek  $F_y$  kuvveti suyolu stratejisinde 31,42 N, adım destekli takım yolunda 28,15 N olarak ölçülmüştür. Suyolu stratejisinde  $F_y$  kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 11,27-31,42 N arasında değişmiştir, adım destekli takım yolunda  $F_y$  kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 8,17-28,15 N arasında değişmiştir.



Şekil 3. İnce cidarların mikro frezelenmesi sonrası mikro parmak frezelerde meydana gelen aşınmalar (Wear occurred on micro end mills after micro-milling of thin walls)

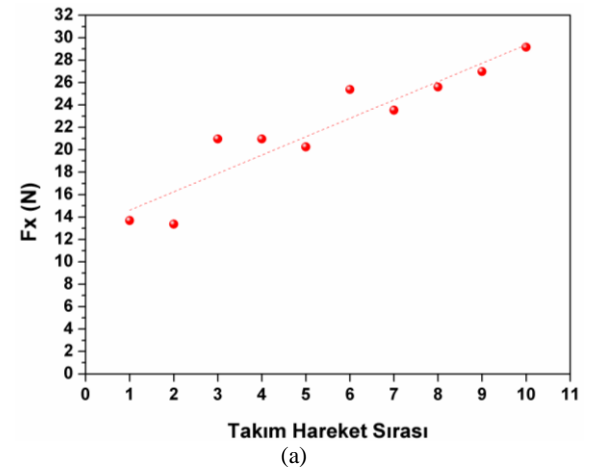
**Tablo 3.** İnce cidarların mikro frezelenmesi sonrası ölçülen maksimum takım aşınması ve kalınlık hatası (Maximum tool wear and thickness error measured after micro-milling of thin walls)

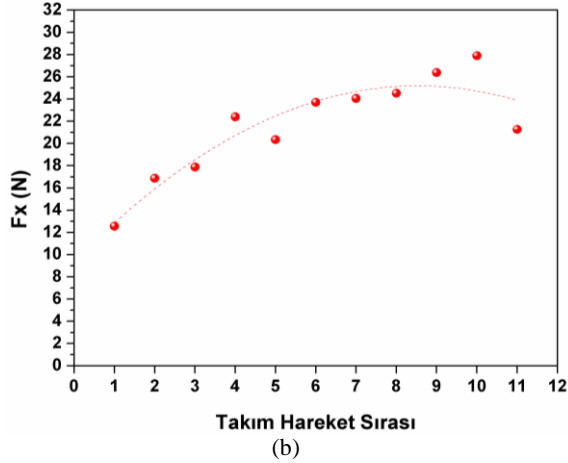
Takım Yolları	Maksimum Takım Aşınması (µm)	Kalınlık Hatası (%)
Suyolu	14,23	19,69
Adım Destekli	36,07	9,02

Bu çalışmada ayrıca işlenen ince cidarların kalınlığı da ölçülmüştür ve kalınlık hatası Tablo 3'te sunulmuştur. Cidar yüksekliği boyunca 6 farklı yerden ölçüm yapılmıştır ve en büyük kalınlık analizlerde kullanılmıştır. Cidar kalınlığının cidar yüksekliği boyunca değişken olduğu görülmüştür ve benzer bir sonuç literatürde de rapor edilmiştir [14]. Cidar kalınlığının cidar yüksekliği ile değişiminin nedeni olarak mikro frezeleme işlemi esnasında cidarın kuvvet altında eğilmesi gösterilebilir. Hedeflenen ince cidarların kalınlığı deneysel kısımda belirtildiği gibi 100 µm'dir. Suyolu takım stratejisi kullanılarak işlenen ince cidarın kalınlığı 80,31 µm, adım destekli takım yolu kullanılarak işlenen ince cidarın kalınlığı 90,98 µm olarak ölçülmüştür. Tablo 3'te verildiği gibi kalınlık hatası suyolu için %19,69, adım destekli için %9,02 olarak bulunmuştur. Llanos ve arkadaşları [14] kalınlıktaki hatayı cidar kalınlığına bağlı olarak pirinç malzemesinde

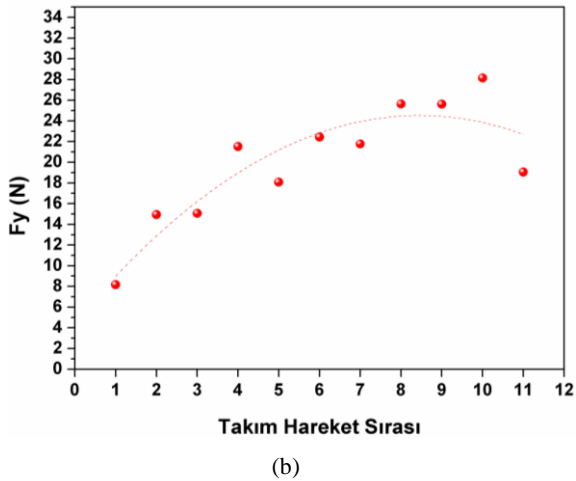
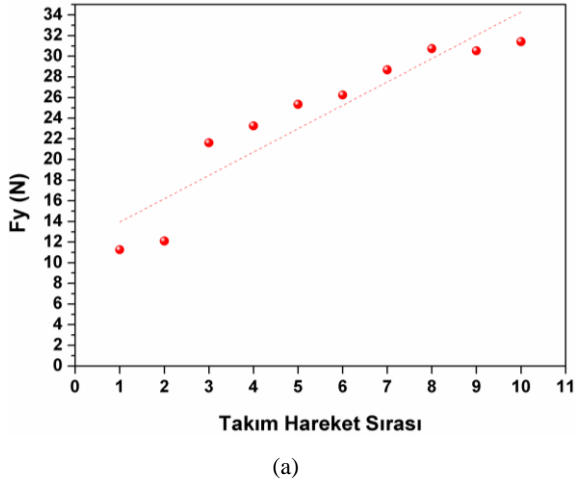
%1,00-66,33 arasında, alüminyum malzemesinde %0,33-44,67 aralığında olduğunu ifade etmiştir.

Bu çalışmada son olarak ince cidarlardaki çapak oluşumu nicelik olarak da incelenmiştir. Adım destekli takım yolunun ince cidarlarda suyolu stratejisinden daha düşük çapağa neden olduğu görülmüştür.





**Şekil 4.** İnce cidarların mikro frezelenmesi esnasında (a) su yolu, (b) adım destekli takım yollarında ölçülen Fx kuvveti (Measured Fx force in (a) waterline, (b) step support tool paths during micro-milling of thin walls)



**Şekil 5.** İnce cidarların mikro frezelenmesi esnasında (a) su yolu, (b) adım destekli takım yollarında ölçülen Fy kuvveti (Measured Fy force in (a) waterline, (b) step support tool paths during micro-milling of thin walls)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada iş parçası malzemesi olarak Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır ve bu malzeme üzerinde 1 mm yüksekliğinde ve 100 µm kalınlığında ince cidarlar işlenmiştir. Talaş kaldırma işleminde iki farklı yol seçilmiştir: su yolu ve adım destekli takım yolu. Bu talaş kaldırma yollarının ince cidarların işlenmesi sonrasında takım aşınması, kuvvetler, cidar kalınlığı ve çapak oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

- Her iki talaş kaldırma yolunda da mikro parmak frezeler iş parçası malzemesi yapışmıştır ve kesici kenarın yuvarlanmasına neden olan abrasif aşınma görülmüştür. Ayrıca adım destekli talaş kaldırma yolunda kullanılan mikro parmak frezede kırılma meydana gelmiştir.
- Serbest yüzey üzerindeki en büyük aşınma su yolu stratejisinde kullanılan mikro parmak frezede 14,23 µm, adım destekli takım yolunda kullanılan mikro parmak frezede 36,07 µm olarak ölçülmüştür.
- Her iki takım yolunda genellikle artan takım hareket sırası ile yani artan işleme uzunluğu ile Fx ve Fy kuvvetlerinin arttığı bulunmuştur. Fakat adım destekli takım yolunda 11. hareket sırasında Fx ve Fy kuvvetleri azalmıştır. Genellikle su yolu takım stratejisi ile daha yüksek Fx ve Fy kuvvetleri elde edilmiştir.
- Su yolu stratejisinde Fx kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 13,36-29,15 N aralığında değişmiştir, adım destekli takım yolunda Fx kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 12,56-27,90 N aralığında değişmiştir. Su yolu stratejisinde Fy kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 11,27-31,42 N aralığında bulunmuştur, adım destekli takım yolunda Fy kuvveti takım hareket sırasına bağlı olarak 8,17-28,15 N aralığında bulunmuştur.
- İşlenen cidarların kalınlığının cidar yüksekliği boyunca değişken olduğu görülmüştür. Kalınlık hatası su yolu için %19,69, adım destekli için %9,02 olarak hesaplanmıştır.
- Adım destekli takım yolunun ince cidarlarda su yolu stratejisinden daha az çapak oluşturduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, adım destekli takım yolunun ince cidarların işlenmesinde daha az kuvvet, çapak ve kalınlık hatası verdiği, fakat daha yüksek takım aşınmasına neden olduğu bulunmuştur.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Yazar, bu çalışmanın yapıldığı Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Destekli İmalat Laboratuvarının tüm olanaklarını sunan Prof. Dr. Babür Özçelik'e, mikro frezeleme işlemindeki yardımından dolayı Tekniker Önder Gedik'e ve SEM görüntülerinin alınmasındaki yardımından dolayı Uzman Ahmet Nazım'a teşekkür eder.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Li, P., Zdebski, D., Langen, H. H., Hoogstrate, A. M., Oosterling, J. A. J., Schmidt, R. H. M. & Allen, D. M. (2010). Micromilling of thin ribs with high aspect ratios. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20, 1-10.
- [2] Gök, A., Göloğlu, C. & Demirci, H. İ. (2013). Cutting parameter and tool path style effects on cutting force and tool deflection in machining of convex and concave inclined surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 1063-1078.
- [3] Gök, A., Demirci, H. İ. & Gök, K. (2016). Determination of experimental, analytical, and numerical values of tool deflection at ball end milling of inclined surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 230, 111-119.
- [4] Aijun, T. & Zhanqiang, L. (2008). Deformations of thin-walled plate due to static end milling force. *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 345-351.
- [5] Gang, L. (2009). Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2788-2793.
- [6] Gök, A., Göloğlu, C. & Demirci, H. İ. (2014). Determination of form defects depending on tool deflection in ball end milling of convex and concave surfaces. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29, 365-374.
- [7] Friedrich, C. R. & Vasile, M. J. (1996). Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 5, 33-38.
- [8] Bang, Y.-B., Lee, K.-M. & Oh, S. (2005). 5-Axis micro milling machine for machining micro parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 888-894.
- [9] Arnaud, L., Gonzalo, O., Seguy, S., Jauregi, H. & Peigne, G. (2011). Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54, 479-488.
- [10] Baranek, I., Buransky, I. & Peterka, J. (2013). Influence of material removal way on thin-walled part quality by milling. *MM Science Journal*, 2, 414-417.
- [11] Annoni, M., Petro, S., Rebaioli, L., Semeraro, Q. & Solito, R. (2013). Process parameters effect on cutting forces and geometrical quality in thin wall micromilling. *Proceedings of NAMRI/SME*, 41, 1-10.
- [12] Annoni, M., Rebaioli, L. & Semeraro, Q. (2015). Thin wall geometrical quality improvement in micromilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79, 881-895.
- [13] Thepsonthi, T. & Özel, T. (2014). An integrated toolpath and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 57-75.
- [14] Llanos, I., Agirre, A., Urreta, H., Thepsonthi, T. & Özel, T. (2014). Micromilling high aspect ratio features using tungsten carbide tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228, 1350-1358.