

Kesici Takım Bağlama Uzunluğunun Mikro Frezelemede Takım Aşınması, Kuvvetler ve Çapak Boyutu Üzerindeki Etkileri

Emel KURAM*¹

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
41400, Kocaeli

(Alınış / Received: 08.06.2016, Kabul / Accepted: 09.11.2016,
Online Yayınlanma / Published Online: 09.01.2017)

Anahtar Kelimeler
Mikro Frezeleme,
Kesici Bağlama
Uzunluğu,
Takım Aşınması,
Kuvvet,
Çapak Genişliği

Özet: Bu çalışmada Inconel 718 süperalaşımının mikro frezelenmesinde kesici takım bağlama uzunluğunun takım aşınması, kesme kuvvetleri ve çapak oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kanal işleme deneyleri sabit devir sayısı, ilerleme ve talaş derinliği değerlerinde yapılmıştır. Kesici takım bağlama uzunluğu ise 10, 15 ve 20 mm olarak üç farklı değerde seçilmiştir. Takım aşınması olarak kesici takımdaki çap azalması dikkate alınmıştır. Kuvvet olarak x ve y yönlerindeki ortalama kuvvetler kaydedilmiştir. İşleme sonrasında kanal üst yüzeyinde meydana gelen çapakların genişliği hem aynı yönlü frezeleme hem de zıt yönlü frezeleme tarafında ölçülmüştür. Deneysel sonuçlardan takım çapındaki azalmanın artan bağlama uzunluğu ile arttığı bulunmuştur. Kuvvet ve çapak genişliği değerleri bağlama uzunluğundaki artış ile artmıştır.

Effects of the Cutting Tool Overhang Length on the Tool Wear, Forces and Burr Dimension in Micro-Milling

Keywords
Micro-Milling,
Cutting Tool
Overhang Length,
Tool Wear,
Force,
Burr Width

Abstract: In this study, the effect of cutting tool overhang length on the tool wear, cutting forces and burr formation was investigated during micro-milling of Inconel 718 superalloy. Slot machining experiments were conducted at constant values of spindle speed, feed and depth of cut values. Three different values of cutting tool overhang length were selected, namely 10, 15 and 20 mm. Reduction in the diameter of cutting tool was chosen as a measure of tool wear. Average forces at x and y directions were recorded as force. Burr width occurred on the top of slot after machining was measured at both down and up milling side. From experimental results, it was found that the reduction in tool diameter increased with increasing overhang length. Force and burr width values increased with the increase in overhang length.

*Sorumlu yazar: kuram@gtu.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde elektronik, optik, uzay ve biyoteknoloji gibi pek çok endüstride mikro boyutlu ürünlere olan ilgi ve talep artmaktadır. Mikro boyutlu parçaları imal etmede lazer işleme, odaklanmış iyon ışını ile işleme ve elektrokimyasal işleme gibi geleneksel olmayan işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu işleme yöntemlerinin sınırlı iş parçası malzemesine uygulanabilmesi, düşük verimlilik ve yüksek maliyet gibi sınırlılıkları vardır. Bu nedenle günümüzde mikro mekanik işleme yöntemleri (mikro frezeleme, mikro tornalama, mikro delme ve mikro taşlama) yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Mikro mekanik işleme yöntemleri ile pek çok mühendislik malzemeleri ve üç boyutlu mikro parçalar başarılı bir şekilde işlenebilmektedir. Mikro mekanik işleme yöntemlerinden biri de mikro frezelemedir. Mikro frezeleme işlemi makro takımlardan uyarlanan minyatür kesici takımları kullanılmaktadır [1-4].

Mikro frezeleme operasyonunda genellikle 100-999 µm çapında mikro parmak frezeler kullanılmaktadır. Mikro parmak frezelerin küçük shaftları üzerinde stres değişimleri yüksektir ve bu durum takım ömrünü azaltmaktadır. İşleme şartları düzgün seçilmez ise, mikro parmak frezeler kısa bir süre sonra kırılacaktır. Takım ömrünün kısa olması işleme esnasında daha fazla takım değiştirmeyi gerektirmektedir. İşlemeyi durdurarak takımı değiştirmek hem işleme zamanını hem de işlenen yüzeyin kalitesini olumsuz etkiler. Bu sebeplerden ötürü mikro frezelemede kesici takımın işleme sonuna kadar dayanması istenmektedir [5]. Bu nedenle mikro frezelemede devir sayısı, ilerleme hızı, talaş derinliği, kesici takım özellikleri (helis açısı, helis boyu, kaplama tipi vb.), kesici takım bağlama uzunluğu gibi işleme şartları doğru seçilmelidir. İşleme şartları uygun

seçilmediğinde takım kırılması kolaylıkla meydana gelebilir. Literatürde mikro frezeleme üzerine yapılan çalışmalarda işleme şartlarının etkisi farklı iş parçası malzemeleri için incelenmiştir. Wu ve Cheng [6] alüminyum 6061-T6 malzemesinin mikro frezelenmesinde mikro parmak frezeleme uygulanan nano kristal elmas kaplamanın kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Wu ve arkadaşları [7] mikro frezelemede helis açısının, talaş açısının ve kesici köşe radyüsünün kesme kuvvetleri ve sıcaklık üzerindeki etkisini simülasyon yolu ile incelemişlerdir. Foy ve arkadaşları [8] mikro frezelemede kesici takım yatma açısının ve ilerleme değerlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Rahman ve arkadaşları [9] bakır iş parçası malzemesinin mikro frezelenmesinde kesme hızının, talaş derinliğinin ve helis açısının takım aşınmasına etkilerini belirlemişlerdir.

Inconel 718 malzemesi yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek korozyon ve oksidasyon direnci ve iyi yorulma ömrü nedeniyle gaz türbinleri, roketler ve nükleer reaktörler gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat, bu süperalaşımın işlenebilirliği yüksek tokluğu ve düşük termal iletkenliği nedeniyle kötüdür [10]. Bu nedenle Inconel 718 malzemesinin mikro işlenebilirliği literatürde incelenmiştir [11, 12].

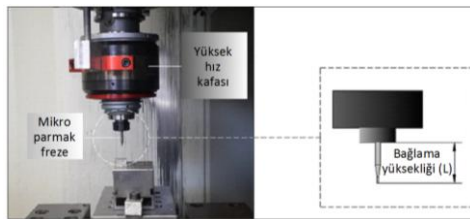
Kesme kuvvetleri etkisi ile meydana gelen esnemeler parça üzerinde hatalara [13] ve kesici takımın kırılmasına [14] neden olmaktadır. Ayrıca takımdaki esneme işlenen mikro boyutlu parçaların kalitesini de etkilemektedir [15-18]. Sehim değerlerinin bilinmesi üretim için toleranslar içinde kalınması ve maliyetlerin azaltılması açısından önemlidir. Kesme koşullarının sehimi

etkilediği de bilinmektedir. Frezelemede ilerleme değerlerinin artması ile takım sehiminin arttığı literatürde ifade edilmiştir [13].

Bu çalışmada Inconel 718 malzemesinin mikro frezelenmesinde kesici takım bağlama uzunluğunun takım aşınması, kuvvetler ve üst çapak genişliği üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Takım aşınması olarak işleme sonrasında kesici takım çapında meydana gelen azalma, kuvvetler olarak x ve y yönlerinde ölçülen değerler ve üst çapak genişliği olarak kanalın aynı ve zıt yönlü tarafındaki en büyük 3 çapak genişliğinin ortalaması dikkate alınmıştır.

2. Deneysel Çalışma

Mikro frezeleme deneyleri yüksek devir sayısına ulaşabilmek amacı ile yüksek hız kafası (maksimum 40000 dev/dak değerine ulaşabilen) takılan bir dik işleme merkezinde yapılmıştır (Şekil 1). Deneylerde iş parçası malzemesi olarak kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilen Inconel 718 süperalaşımı seçilmiştir. Inconel 718 malzemesinin sertliği 43 HRC olarak ölçülmüştür. İş parçası numunelerinin boyutları 15 mm × 10 mm × 20 mm olarak belirlenmiştir. Mikro frezeleme deneylerine başlamadan önce numune yüzeyleri frezelenerek düzlemsellik sağlanmıştır.



Şekil 1. Deney kurulumu

Deneylerde kesici takım olarak 600 µm çapında iki ağızlı ve 30° helis açısına sahip düz parmak freze kullanılmıştır. Takım imalatçısına göre mikro parmak frezenin sertliği 3000~3500 HV'dir.

Tablo 1. Inconel 718 malzemesinin kimyasal kompozisyonu

% element (ağırlıkça)				
Ni	Cr	Fe	Mo	Nb
51,89	20,81	17,71	4,40	3,00
Ti	Al	Mn	Si	
1,30	0,455	0,152	0,086	

Testler kuru işleme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Mikro frezeleme deneylerinde her bir bağlama uzunluğu için 15 mm uzunluğunda kanal işlenmiştir. İşleme esnasında frezeleme şartları sabit alınmıştır. Devir sayısı 20000 dev/dak, dış başına ilerleme 2,5 µm ve talaş derinliği 100 µm olarak seçilmiştir. Kesici takım bağlama uzunluğu (L) ise 10, 15 ve 20 mm olarak ayarlanmıştır.

İşleme sonrasında kesici takımların durumu taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir ve takım çapı ölçülerek takım çapındaki azalma % olarak hesaplanmıştır. Takımların işleme sonrasında durumlarını belirlemek için SEM görüntüleri 180× ve 1000× büyütmelerde alınmıştır. Mikro frezeleme esnasında meydana gelen kuvvetler tabla tipi dinamometre (hassasiyet : ≈-7,5 pC/N) ile ölçülmüştür. Çapak boyutu olarak üst çapak genişliği SEM ile ölçülmüştür. Çapak boyutunu belirlemek için SEM görüntüleri 100× büyütmelerde alınmıştır. Kanal işlemede kanalın bir tarafı aynı yönlü diğer tarafı zıt yönlü olmaktadır. Bu çalışmada aynı ve zıt yönlü taraftaki üst çapak genişliği ayrı ayrı ölçülerek değerlendirilmiştir. Her bir kanal için en yüksek 3 adet çapak genişliği ölçülmüştür ve sonuç değer olarak bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Takım aşınması

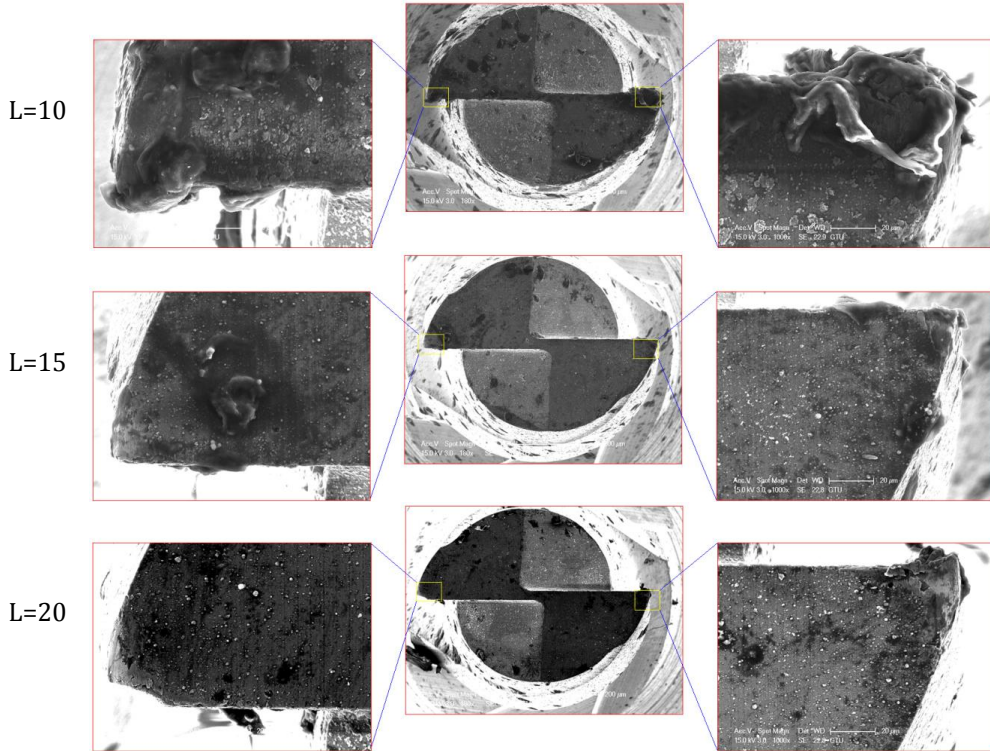
Deneysel çalışma sonucunda mikro parmak frezelerde meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir. SEM analizi sonucunda mikro parmak frezelerde aşınmaya bağlı olarak

takım çapında azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca yanak aşınması da meydana gelmiştir. Bağlama uzunluğunun 10 mm olduğu şartlarda mikro parmak frezede en fazla talaş yapışması oluşmuştur. 20 mm bağlama uzunluğunda ise kesici takımında kırılma görülmüştür. Mikro parmak frezenin her iki kesici kenarının farklı aşınma büyüklüğüne sahip olduğu görülmüştür ve bu durum en büyük bağlama uzunluğu olan 20 mm'de daha bariz bir şekilde meydana gelmiştir.

Bu çalışmada takım aşınması olarak kesici takım çapındaki azalma dikkate alınmıştır. Takım çapı SEM yardımı ile ölçülmüştür. Çapdaki azalma aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$d_r = \frac{d_{yeni} - d_{aşınmış}}{d_{yeni}} \quad (1)$$

Bu formülde d_{yeni} kullanılmamış yeni mikro parmak frezenin çapını ve $d_{aşınmış}$ kullanılmış (aşınmış) mikro parmak frezenin çapını ifade etmektedir. İşleme sonrasında ölçülen aşınmış kesici takımın çapı ve takım çapındaki azalma Tablo 2'de sunulmuştur. Inconel 718 malzemesinin mikro frezelenmesinde artan kesici takım bağlama uzunluğu ile takım çapındaki azalmanın arttığı bulunmuştur. Takım çapındaki azalma 10, 15 ve 20 mm bağlama uzunlukları için sırasıyla %3,74, %4,14 ve % 7,15 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç takım bağlama uzunluğundaki artış ile takım aşınmasının arttığı anlamına gelmektedir. Kesici takım bağlama uzunluğundaki artış ile takım aşınmasının artmasının nedeni artan sehim ve titreşim ile açıklanabilir.



Şekil 2. Kesici takım bağlama uzunluğunun takım durumu üzerindeki etkisi

Tablo 2. Kesici takım bağlama uzunluğunun takım çapındaki azalma üzerindeki etkisi

Bağlama Uzunluğu (mm)	Orjinal Takımın Çapı (µm)	Aşınmış Takımın Çapı (µm)	Takım Çapındaki Azalma (%)
10	600	577,59	3,74
15	600	575,16	4,14
20	600	557,12	7,15

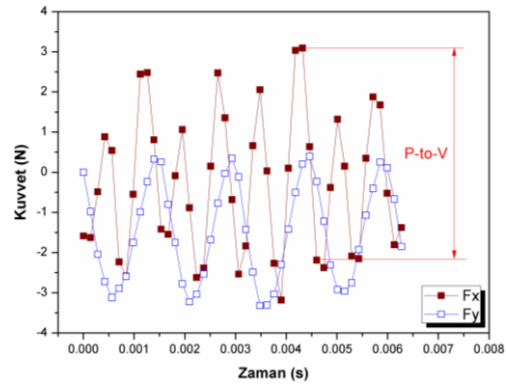
3.2. Kesme kuvvetleri

İşleme esnasında ölçülen kuvvet sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Bu çalışmada maksimum tepe-çukur (Peak-to-valley, P-to-V) değeri kuvvet olarak dikkate alınmıştır. P-to-V değeri iş milinin bir devirinde maksimum ve minimum değerler arasındaki genlik olarak ifade edilmektedir [19] (Şekil 3a). Maksimum P-to-V Fx ve Fy kuvvetleri bağlama uzunluğunun fonksiyonu olarak Şekil 3b'de sunulmuştur. Kesici takım bağlama uzunluğunun kuvvetler üzerindeki etkisi Tablo 3'te özetlenmiştir. Fx kuvvetinin tüm kesici takım bağlama yüksekliklerinde Fy kuvvetinden daha büyük olduğu bulunmuştur. Hem Fx hem de Fy kuvveti artan kesici takım bağlama uzunluğu ile artmıştır. Kesici takım bağlama uzunluğu 10 mm'den 15 mm'ye yükseltildiğinde Fx kuvvetindeki artış %30,24, 20 mm'ye yükseltildiğinde ise Fx kuvvetindeki artış %56,85 olmuştur. Bağlama uzunluğu 10 mm'den 15 mm'ye yükseltildiğinde Fy kuvvetindeki artış %30,76, 20 mm'ye yükseltildiğinde ise Fy kuvvetindeki artış %99,88 olarak elde edilmiştir. Kuvvetlerde kesici takım bağlama uzunluğundaki artış ile artmanın nedeni daha yüksek sehime ve titreşime atfedilebilir.

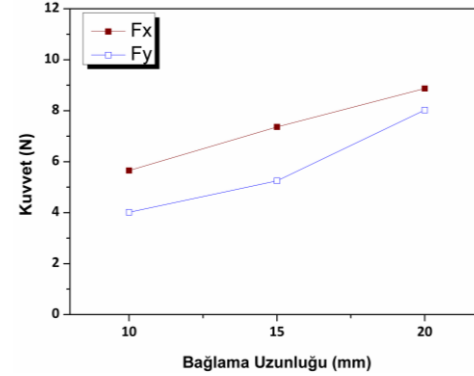
3.3. Çapak oluşumu

Mikro kanal frezelemede kanalın bir tarafı aynı yönlü frezeleme diğer tarafı zıt yönlü frezeleme olmaktadır. İşlenen kanalların görüntüsü SEM yardımı ile incelenmiştir ve görüntüler Şekil 4'te verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi en düşük çapak takım bağlama uzunluğu 10 mm olduğu zaman elde edilmiştir. Ayrıca artan bağlama uzunluğu ile daha büyük

ve sürekli üst çapak meydana geldiği görülmüştür.



a)



b)

Şekil 3. a) Örnek kuvvet-zaman grafiği, b) maksimum P-to-V kuvvet sonuçları

Bu çalışmada kanalın her iki tarafında üst çapak genişliğinin en büyük olduğu 3 farklı yerden ölçüm yapılarak ortalama değer alınmıştır. Üst çapak genişliği sonuçları Şekil 5'de sunulmuştur. Kesici takım bağlama uzunluğunun çapak genişliği üzerindeki etkisi Tablo 4'te özetlenmiştir. Bütün kesici takım bağlama uzunluğunda aynı yönlü frezeleme tarafındaki üst çapak genişliğinin daha fazla olduğu görülmüştür. Mikro kanal frezeleme

işleminde aynı yönlü işleme tarafındaki çapak boyutunun zıt yönlü işleme tarafındaki çapak boyutundan daha fazla olduğu diğer çalışmalarda da ifade edilmiştir [11, 20-24]. Kesici takım bağlama uzunluğu arttıkça çapak genişliği hem aynı yönlü hem de zıt yönlü frezeleme tarafında artmıştır. Kesici takım bağlama uzunluğu 10 mm'den 15 mm'ye arttırıldığında çapak genişliği aynı yönlü frezeleme tarafında %168,14 ve zıt yönlü frezeleme tarafında %238,52 artmıştır. Bağlama uzunluğu 10 mm'den 20 mm'ye arttırıldığında ise çapak genişliği aynı yönlü frezeleme tarafında %186,89 ve zıt yönlü frezeleme tarafında %321,10 artmıştır. Çapak genişliğinin kesici takım bağlama uzunluğu ile artmasına neden olarak artan sehim ve titreşim gösterilebilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada mikro parmak frezelerin bağlama uzunluğunun Inconel 718 malzemesinin frezelenmesinde takım aşınması, kuvvetler ve çapak genişliği üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Mikro parmak frezelerde aşınmaya bağlı olarak takım çapında azalmalar görülmüştür. Ayrıca serbest yüzey aşınması, talaş yapışması ve bağlama uzunluğunun 20 mm olduğu şartta kesici takım kenarında kırılma meydana gelmiştir.

- Kesici takım bağlama uzunluğundaki artış ile takım çapındaki azalmanın arttığı bulunmuştur. Takım çapındaki azalma takım aşınmasının arttığı anlamına gelmektedir. Takım çapındaki azalma 10, 15 ve 20 mm bağlama

uzunlukları için sırasıyla %3,74, %4,14 ve % 7,15 olarak hesaplanmıştır.

- Mikro frezeleme esnasında ölçülen Fx ve Fy kuvvetlerinin artan kesici takım bağlama uzunluğu ile arttığı bulunmuştur. En düşük Fx ve Fy kuvvetlerinin ölçüldüğü 10 mm bağlama uzunluğu ile kıyaslandığında 15 mm bağlama uzunluğu Fx kuvvetinde %30,24, Fy kuvvetinde ise %30,76 artmaya neden olmuştur. 20 mm bağlama uzunluğu ise 10 mm bağlama uzunluğuna göre Fx kuvvetinde %56,85, Fy kuvvetinde %99,88 artışa sebep olmuştur.

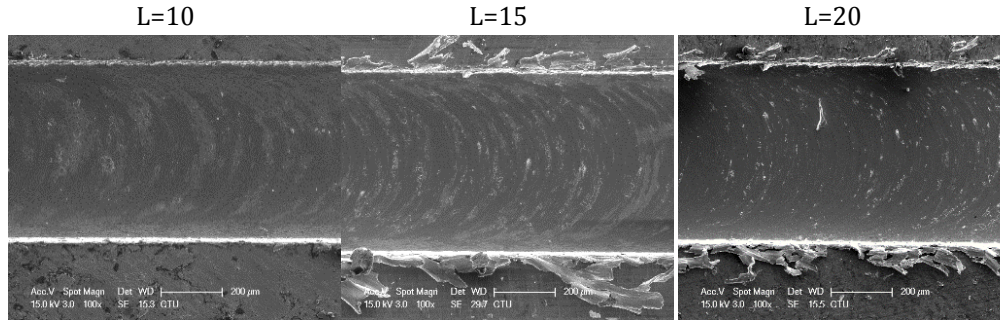
- En düşük çapak genişliği kesici takım bağlama uzunluğunun 10 mm olduğu şartta görülmüştür. Artan kesici takım bağlama uzunluğu ile daha büyük ve sürekli üst çapak oluşmuştur.

- Tüm kesici takım bağlama uzunluklarında aynı yönlü frezeleme tarafındaki üst çapak genişliğinin zıt yönlü frezeleme tarafına göre daha fazla olduğu görülmüştür.

- Kesici takım bağlama uzunluğundaki artış ile hem aynı hem de zıt yönlü frezeleme tarafında çapak genişliğinin arttığı görülmüştür. Kesici takım bağlama uzunluğu 10 mm'den 15 mm'ye yükseltildiğinde çapak genişliği aynı yönlü frezeleme tarafında %168,14 ve zıt yönlü frezeleme tarafında %238,52 artmıştır. Bağlama uzunluğu 10 mm'den 20 mm'ye yükseltildiğinde ise çapak genişliği aynı yönlü frezeleme tarafında %186,89 ve zıt yönlü frezeleme tarafında %321,10 artmıştır.

Tablo 3. Kesici takım bağlama uzunluğunun kuvvetler üzerindeki etkisi

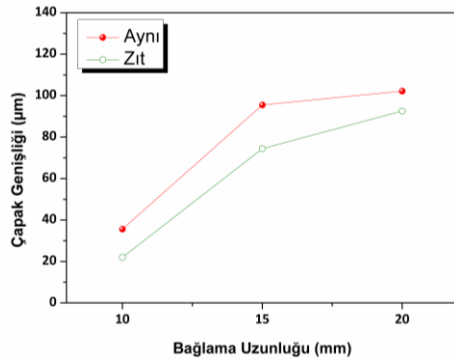
Bağlama Uzunluğu (mm)	Fx (N)	Fx Kuvvetinde Artış (%)	Fy (N)	Fy Kuvvetinde Artış (%)
10	5,655	-	4,015	-
15	7,365	30,24	5,250	30,76
20	8,870	56,85	8,025	99,88



Şekil 4. Kanalların SEM görüntüsü

Tablo 4. Kesici takım bağlama uzunluğunun çapak genişliği üzerindeki etkisi

Bağlama Uzunluğu (mm)	Aynı Yönlü Tarafta Çapak Genişliği (µm)	Aynı Yönlü Taraftaki Artış (%)	Zıt Yönlü Tarafta Çapak Genişliği (µm)	Zıt Yönlü Taraftaki Artış (%)
10	36,312	-	22,573	-
15	97,367	168,14	76,414	238,52
20	104,175	186,89	95,055	321,10



Şekil 5. Üst çapak genişliği sonuçları

Teşekkür

Yazar, bu çalışmanın yapıldığı laboratuvarın tüm imkanlarını sunan Prof. Dr. Babür Özçelik'e, mikro frezeleme esnasındaki yardımlarından dolayı Tekniker Önder Gedik'e ve SEM görüntülerinin alınmasındaki yardımlarından dolayı Uzman Ahmet Nazım'a teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Kuram, E., Ozcelik, B. 2013. Multi-Objective Optimization Using Taguchi Based Grey Relational Analysis for Micro-Milling of Al 7075 Material with Ball Nose End Mill, *Measurement*, Cilt. 46, s. 1849-1864.
- [2] Kuram, E., Ozcelik, B. 2016. Effects of Tool Paths and Machining Parameters on the Performance in Micro-Milling of Ti6Al4V Titanium with High-Speed Spindle Attachment, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 84, s. 691-703.
- [3] Kuram, E., Ozcelik, B. 2016. Micro-Milling Performance of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi Method and Fuzzy Logic Modelling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Cilt. 27, s. 817-830.
- [4] Kuram, E., Ozcelik, B. Optimization of Machining Parameters during Micro-Milling of Ti6Al4V Titanium Alloy and Inconel 718 Materials Using Taguchi Method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, article in press.
- [5] Kuram, E. 2015. Yumuşak ve Sert Malzemelerin Mikro Frezelenmesinde İşleme Şartlarının Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli: Gebze

- Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- [6] Wu, T., Cheng, K. 2012. An Investigation on the Cutting Performance of Nano-Crystalline Diamond Coatings on a Micro-End Mill, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Cilt. 226, s. 1421-1424.
- [7] Wu, T., Cheng, K., Rakowski, R. 2012. Investigation on Tooling Geometrical Effects of Micro Tools and the Associated Micro Milling Performance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Cilt. 226, s. 1442-1453.
- [8] Foy, K., Wei, Z., Matsumura, T., Huang, Y. 2009. Effect of Tilt Angle on Cutting Regime Transition in Glass Micromilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Cilt. 49, s. 315-324.
- [9] Rahman, M., Kumar, A.S., Prakash, J.R.S. 2001. Micro Milling of Pure Copper, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt. 116, s. 39-43.
- [10] Li, H.Z., Wang, J. 2013. A Cutting Forces Model for Milling Inconel 718 Alloy Based on a Material Constitutive Law, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Cilt. 227, s. 1761-1775.
- [11] Mian, A.J., Driver, N., Mativenga, P.T. 2011. Identification of Factors that Dominate Size Effect in Micro-Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Cilt. 51, s. 383-394.
- [12] Lu, X., Jia, Z., Wang, H., Si, L., Liu, Y., Wu, W. 2016. Tool Wear Appearance and Failure Mechanism of Coated Carbide Tools in Micro-Milling of Inconel 718 Super Alloy, *Industrial Lubrication and Tribology*, Cilt. 68, s. 267-277.
- [13] Gök, A., Göloğlu, C., Demirci, H.İ. 2014. Dışbükey ve İçbükey Yüzeylerin Küresel Parmak Frezelenmesinde Takım Sehimine Bağlı Form Hatalarının Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt. 29, s. 365-374.
- [14] Mamedov, A., Lazoğlu, İ. 2014. CNC ile Talaşlı İşlemede Kuvvet ve Titreşim Ölçümü, *Mühendis ve Makina*, Cilt. 55, s. 25-28.
- [15] Oliaei, S.N.B., Karpat, Y. 2016. Influence of Tool Wear on Machining Forces and Tool Deflections during Micro Milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 84, s. 1963-1980.
- [16] Uriarte, L., Herrero, A., Zatarain, M., Santiso, G., Lopez de Lacelle, L.N., Lamikiz, A., Albizuri, J. 2007. Error Budget and Stiffness Chain Assessment in a Micromilling Machine Equipped with Tools Less than 0.3 mm in Diameter, *Precision Engineering*, Cilt. 31, s. 1-12.
- [17] Rodrigues, P., Labarga, J.E. 2015. Tool Deflection Model for Micromilling Process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 76, s. 199-207.
- [18] Mijuskovic, G., Krajnik, P., Kopac, L. 2015. Analysis of Tool Deflection in Micro Milling of Graphite Electrodes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 76, s. 209-217.
- [19] Fard, M.J.B., Bordatchev, E.V. 2013. Experimental Study of the Effect of Tool Orientation in Five-Axis Micro-Milling of Brass Using Ball-End Mills, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 67, s. 1079-1089.
- [20] Mian, A.J., Driver, N., Mativenga, P.T. 2010. A Comparative Study of

- Material Phase Effects on Micro-Machinability of Multiphase Materials, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 50, s. 163-174.
- [21] Aramcharoen, A., Mativenga, P.T. 2009. Size Effect and Tool Geometry in Micromilling of Tool Steel, *Precision Engineering*, Cilt. 33, s. 402-407.
- [22] Chen, M.J., Ni, H.B., Wang, Z.J., Jiang, Y. 2012. Research on the Modeling of Burr Formation Process in Micro-Ball End Milling Operation on Ti-6Al-4V, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 62, s. 901-912.
- [23] Aurich, J.C., Reichenbach, I.G., Schöler, G.M. 2012. Manufacture and Application of Ultra-Small Micro End Mills, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Cilt. 61, s. 83-86.
- [24] Li, K.-M., Chou, S.-Y. 2010. Experimental Evaluation of Minimum Quantity Lubrication in Near Micro-Milling, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt. 210, s. 2163-2170.