



## Experimental and statistical investigation of the machining performance of wave form end mills on AISI 316L stainless steel

Kutay Aydın<sup>1\*</sup>, Şükran Katmer<sup>2</sup>, Arif Gök<sup>3</sup>, Ulvi Şeker<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Amasya University, 05100, Amasya, Turkey

<sup>2</sup>Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, 06560, Ankara, Turkey

<sup>3</sup>Department of Industrial Design, Faculty of Architecture, Kütahya Dumlupınar University, 43000, Kütahya, Turkey

<sup>4</sup>Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, 06560, Ankara, Turkey

### Highlights:

- Variable rake and helix angle end mills
- Machining performance of wave form cutting tools
- Relationship of cutting edge geometry to machining performance

### Keywords:

- Machining
- Milling
- Wave form end mill
- Variable rake angle
- Variable helix angle

### Article Info:

Research Article  
Received: 16.02.2021  
Accepted: 18.04.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.881590

### Acknowledgement:


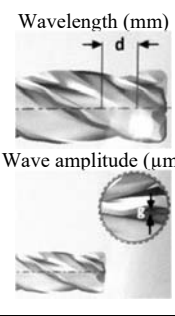
The authors wish to gratefully acknowledge; TÜBİTAK with 119M657 numbered 1002 - Short Term R&D Funding Program for funding the study, and *Karcan Cutting Tools* for supporting the study.

### Correspondence:

Author: Kutay Aydın  
e-mail: kutay.aydin@amasya.edu.tr  
phone: +90 358 211 5053

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the machining performance of wave form end mills with variable rake and helix angles on the helical cutting edge just started to take place in the field of machining on AISI 316L stainless steel which is difficult-to-cut material was investigated (Table A).

Tool	Wave Form	Workpiece	Cutting Tool		Process parameters (min/max)		Cutting type	
			Standard	Wave Form	Cutting speed (m/dk)	Feed rate (mm/tooth)	Roughing	Finishing
		AISI 316L	6-550	8-250	50 100	0,030 0,060	✓	✗
			4-450	8-650				
			6-550	8-250	50	0,030	✗	✓
			4-450	8-650	75	0,060	✗	✓

●● Recommended ●○ Acceptable ○○ Not recommended

Table A. Wave form end mill design, cutting tool recommendations, and machining conditions

**Purpose:** In this study, it is aimed to solve the problems which are work hardening, BUE, high cutting forces, low surface quality, and high tool wear, etc. encountered in machining owing to such properties of AISI 316L austenitic stainless steel such as high mechanical strength, ductility, and low thermal conductivity, using wave form end mills with variable rake and helix angle.

### Theory and Methods:

First of all, cutting forces and surface roughness values were obtained with independent factor which are different processing parameters and different cutting tools. Secondly, these experimental findings were compared with variance and regression analyzes. Then, the optimum processing parameters for tool wear experiments were determined. Finally, the wear performance of the cutting tools was evaluated.

### Results:

It is observed that higher cutting forces and lower surface quality compared to standard tools in wave form tools. The reason behind that could be the higher effects of disadvantages of the negative rake angle regions over the advantages of positive rake angle regions. In terms of tool wears, 6-550 (-4°, +12°) and 4-450 (-6°, +22°) tools with large positive and negative rake angles were shown higher tool wear behavior compared to the standard tool. However, 8-250 (-2°, +4°) and 8-650 (-3°, +4°) tools with smaller positive and negative rake angles were exhibited better wear behavior compared to the standard tool.

### Conclusion:

As a result, in terms of the solution of high tool wear problem of AISI 316L stainless steel; it has been understood that it is suitable for rough machining especially since the 8-250 tool shows a lower wear rate of 17.2% compared to the standard tool. Also, this case will put the 8-250 tool in an advantages position in terms of cost/performance. Therefore, it has been determined that it is more appropriate to use standard tools in finishing (Table A).



## Dalga formlu parmak frezelerin AISI 316L paslanmaz çelik üzerindeki işleme performansının deneysel ve istatistiksel olarak araştırılması

Kutay Aydın<sup>1\*</sup>, Şükran Katmer<sup>2</sup>, Arif Gök<sup>3</sup>, Ulvi Şeker<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Amasya Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 05100, Amasya, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06560, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, 43000, Kütahya, Türkiye

<sup>4</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Değişken talaş ve helis açılı parmak frezeler
- Dalga formlu kesici takımların işleme performansı
- Kesici kenar geometrisinin işleme performansı ile ilişkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.02.2021

Kabul: 08.04.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.881590

### Anahtar Kelimeler:

Talaşlı imalat,  
frezeleme,  
dalga formlu parmak freze,  
değişken talaş açısı,  
değişken helis açısı

### ÖZ

Değişken talaş ve helis açılına sahip dalga formlu parmak frezeler, talaşlı imalat alanında henüz çok yeni ve performansları hakkında çok az bilgi sahibi olunan kesici takımlardır. Bu çalışmada, helisel kesici kenar üzerinde değişken talaş ve helis açılı bulunan dalga formlu parmak frezelerin; çalışma sertleşmesi, yüksek takım aşınması ve yıgıntı talaş (BUE) oluşturma eğilimi sebepleriyle işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan, AISI 316L östenitik paslanmaz çelik üzerindeki işleme performansları araştırılmıştır. Bu kapsamda, farklı dalga boylarına (mm) ve dalga genliklerine ( $\mu\text{m}$ ) (6-550, 8-250, 4-450 ve 8-650) sahip dalga formlu ve standart form olmak üzere beş farklı yeckpare karbür kesici takım, deneysel ve istatistiksel yaklaşımlardan oluşan bir çalışma planı çerçevesinde; kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım ömrü kriterleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Dalga formlu takımlar; kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi açısından, pozitif talaş açılı bölgelerin sağladığı avantajlara rağmen negatif talaş açılı bölgelerdeki işleme olumsuzluklarının baskın gelmesi nedeniyle, bütün işleme şartlarında, standart takıma göre daha yüksek kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri sergilemiştir. Diğer taraftan, daha küçük pozitif ve negatif talaş açılına (+4°, -2°, -3°) sahip 8-250 ve 8-650 dalga formlu takımlarda, standart takıma göre sırasıyla %17,2 ve %6,9 oranlarında daha düşük takım aşınma değerleri görülmüştür. Sonuç olarak, AISI 316L malzemesinin işlenebilirliğini zorlaştıran yüksek mekanik dayanım ve yüksek çalışma sertleşmesi (pekleşme) özelliklerinin neden olduğu düşük takım ömrü problemi için 8-250 ve 8-650 dalga formlu takımların, kaba talaş (rough) frezeleme işlemlerinde çözüm olabileceği düşünülmüştür.

## Experimental and statistical investigation of the machining performance of wave form end mills on AISI 316L stainless steel

### H I G H L I G H T S

- Variable rake and helix angle end mills
- Machining performance of wave form cutting tools
- Relationship of cutting-edge geometry to machining performance

### Article Info

Research Article

Received: 16.02.2021

Accepted: 18.04.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.881590

### Keywords:

Machining,  
milling,  
wave form end mill,  
variable rake angle,  
variable helix angle

### ABSTRACT

Wave form end mills with variable rake and helix angles are new in the machining industry, and limited information is available on their machining performance. In this study, the machining performance of wave form end mills with variable rake and helix angles on the helical cutting edge on AISI 316L austenitic stainless steel which is in the difficult-to-cut materials due to work hardening, high tool wear and build-up edge (BUE) was investigated. In this context, five different carbide cutting tools, which are wave form tools with different wavelengths (mm) and wave amplitudes ( $\mu\text{m}$ ) (6-550, 8-250, 4-450, and 8-650) and the standard tool, were evaluated through both experimental and statistical approaches in consideration of cutting forces, surface quality, tool life criteria. In terms of cutting forces and surface quality; wave form tools exhibited higher cutting forces and surface roughness values than the standard tool in all machining conditions, due to the predominance of machining negativity in negative rake angle regions despite the advantages provided by the positive rake angle regions. On the other hand, in 8-250 and 8-650 waveform tools with smaller positive and negative rake angles (+4°, -2°, -3°) were observed low tool wear values 17.2% and 6.9%, respectively compared to the standard tool. As a result, it is thought that 8-250 and 8-650 wave form tools can be a solution in rough milling processes for the low tool life problem caused by high mechanical strength and high work hardening properties that make difficult-to-cut AISI 316L material.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

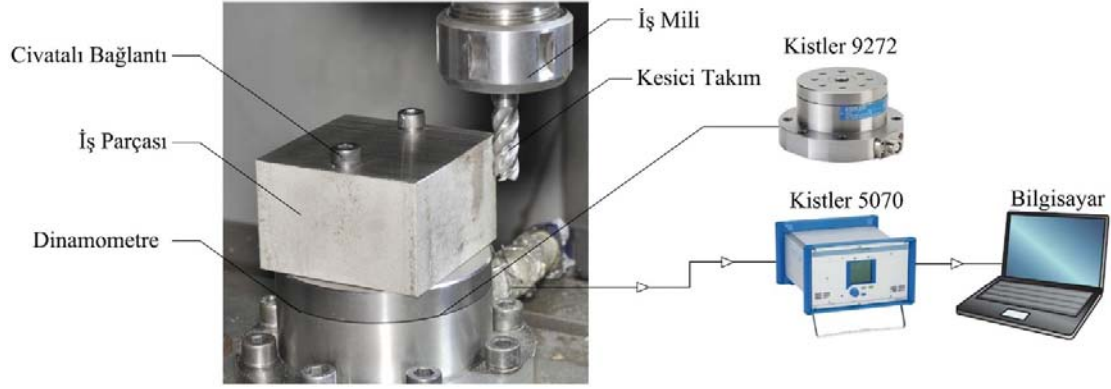
Talaşlı imalat endüstrisinin en önemli üretim yöntemlerinden biri olan frezeleme yönteminde, işleme performansını en çok etkileyen parametrelerden biri kesici takım tasarımıdır. Frezeleme takımlarının önemli bir bölümünü oluşturan parmak frezelerin çalışma performansını ve ömrünü belirleyen başlıca etkenler; takım malzemesi ve takım geometrisidir [1-3]. Bu geometrik unsurların en önemlilerinden biri olan talaş açısının, talaş kaldırma mekaniği üzerindeki etkisi oldukça büyüktür [4]. Talaş açısı, pozitif, negatif ve yeni yaygınlaşmaya başlayan takımlarda olduğu gibi değişken de olabilir. Değişken talaş açısı, değişken helis açısını da beraberinde getirmektedir. Değişken talaş ve helis açılı bu takımlara dalga formlu parmak frezeler de denebilir [5]. Literatürde takım geometrisi açısından, değişken helis açılı takımların, helisel yan yüzeyinin dalgalı formda tasarlandığı kaba talaş takımlarının ve farklı helis açılı takımların işleme performanslarının araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda; helis açısı değişiminin kesme kuvvetlerine, yüzey kalitesine, takım aşınmasına ve talaş formlarına etkileri [6-8], kesme kararlılığına etkileri [9, 10], matematiksel modeli oluşturulan takımların nümerik çözüm sistemleri [11, 12] ve titreşime etkileri [13] araştırılmıştır. Çalışmalar arasında değişken talaş ve helis açılına sahip dalga formlu kesici takımlar ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde, talaş kaldırma ile ilgili yapılmış birçok karşılaştırmalı deneysel ve istatistiksel yöntemlerle güçlendirilmiş çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların genelinde, yüksek kesme kuvvetleri, kötü yüzey kalitesi, kısa takım ömrü ve titreşim gibi talaşlı imalat işlemlerinde karşılaşılan zorluklara çözüm aranmıştır. Karşılaşılan bu zorluklara sebep olan takım geometrisi, takım kaplaması, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinlikleri gibi işleme parametrelerine odaklanıldığı gözlenmiştir [14, 15]. Çalışmalarda, deneysel yöntemlerin yanında, istatistiksel metotların kullanımı oldukça yaygındır. İstatistiksel yöntemlerin sayesinde, işleme parametrelerinin doğru seçilmesi, etki oranlarının ve olumsuz etkilerinin tespit edilmesi ile çözüm hassasiyetinin ve güvenilirliğinin artırıldığı gözlenmiştir [16, 17]. Çalışmalarda genel olarak; Varyans analizi (ANOVA), Taguchi, Tepki Yüzey Metodu (RSM), lineer, çoklu, ikinci derece ve üstel regresyon modelleme, yapay sinir ağları (ANN) vb. yöntemlerin kullanılmıştır [18-20]. Dolayısıyla istatistiksel metotlar, talaşlı imalat çalışmalarında deneysel çalışmaları destekleyici ve doğrulayıcı amaçlarla verimli bir şekilde kullanılabilirler.

Endüstride, dalga formlu parmak freze üretiminin henüz çok az sayıda firma tarafından yapıldığı ve ürün kataloglarında sınırlı sayıda dalgalı formda parmak freze modelleri yer almaktadır. Üreticiler, dalgalı forma sahip parmak frezelerin, titreşimi azaltılıp yüzey kalitesini artırdığı, daha iyi talaş tahliyesi sağlayarak kesme kuvvetlerini azalttığını ifade etmektedirler. Ayrıca demir dışı metal, titanyum alaşımları ve paslanmaz çelik gruplarının işlenmesinde dalga formlu

takımların standart parmak frezelere göre daha iyi performansa sahip olduğunu vurgulamaktadırlar. Literatürden ve endüstri uygulamalarından da anlaşılacağı gibi değişken talaş ve helis açılı dalgalı forma sahip parmak frezeler, talaşlı imalat alanında henüz çok yeni ve performansları hakkında çok az bilgi sahibi olunan kesici takımlardır. Bu çalışma kapsamında, parmak frezelerin geometrik tasarımlarının işleme performansına olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, parmak frezelerin en önemli geometrik parametrelerinden olan talaş ve helis açılarının değişken olduğu dalga formlu takımlar tasarlanmıştır. Yazarların yayımlanmış bir çalışmalarında [21], C45 ve GG25 malzemeleri üzerinde standart ve dalga formlu kesici takımların işleme performansları deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonları ile kıyaslanmıştır. İlgili çalışmada, kesme kuvvetleri ve takım aşınmaları sonuçlarında dalga formlu takımlarda standart takımlara oranla bazı işleme şartlarında daha iyi performans elde edildiği, işleme şartları ağırlaştıkça dalga formlu takımların avantajlarının arttığını belirtmişlerdir. Bu sonuçlar, dalga formlu takımların işlenebilirliği zor malzemeler (paslanmaz çelik, alüminyum, titanyum vb.) üzerindeki davranışlarının da araştırılması konusunda motivasyon oluşturmuştur. Bu nedenle bu çalışmada, geçmiş çalışmadan [21] elde edilen verilerden yola çıkarak, işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan Krom-Nikel grubu östenitik paslanmaz çelik sınıfından AISI 316L alaşımı kullanılmıştır [4, 22]. Paslanmaz çelikler, yüksek mekanik dayanım, yüksek korozyon direnci ve düşük ısıletkenlik özellikleri ile kimya, sağlık, nükleer, elektronik vb. birçok endüstride tercih edilen mühendislik malzemeleridir [23]. Öte yandan AISI 316L'in yapısında bulunan %10-14 oranındaki Nikel, yüksek çalışma sertleşmesine (pekleşme) ve yığıntı talaş (BUE) oluşumuna neden olmaktadır. Buna ek olarak yüksek mekanik dayanım, süneklik ve düşük ısıletkenlik özellikleri ile AISI 316L, işlenebilirliği zor bir malzemedir [24, 25]. Bu işleme zorlukları, yüksek kesme kuvvetleri, yüksek sıcaklık, kalıntı gerilmeler, düşük yüzey kalitesi ve hızlı takım aşınması gibi sorunlara yol açmaktadır [26, 27]. Bu nedenle, dalga formlu takımlarda bulunan değişken talaş ve helis açıları ile bu işleme sorunlarına çözüm bulunması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, farklı geometrilere sahip dalga formlu ve standart parmak frezelerin, AISI 316L malzemesi için kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve takım aşınmaları üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Deneysel çalışmalar, *Johnford VMC-550* CNC freze tezgahında yapılmıştır. Deneylerde kesme kuvvetleri, *Kistler® 9272* tipi dinamometre ve *Kistler® 5070* tipi amplifikatör ile ölçülmüştür. İş parçası, 80×80×50 mm boyutlarında hazırlanmış ve işleme sırasında maksimum seviyede rijit ve kararlı olması için, doğrudan dinamometreye bağlanmıştır. Deney düzeneği Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. İş parçası olarak AISI 316L malzemesi kullanılmış ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de

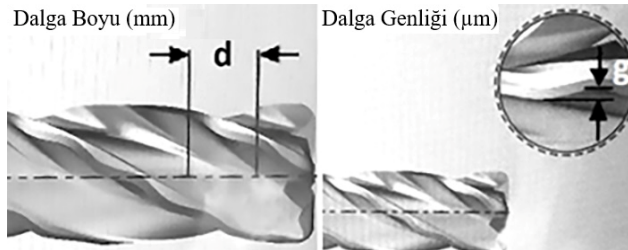


Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental scheme)

Tablo 1. AISI 316L malzemesinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI 316L material)

% ağırlık	Ana	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	
AISI 316L	min maks	Fe	- 0.30	- 1	- 2	- 0.030	- 0.050	16 18	2 3	10 14

gösterilmiştir [28]. Kesici takımlar; dört kesici ağız, 12 mm kesici ağız çapına ve 28 mm kesici kenar uzunluğuna sahiptir. Standart ve dalga formulu kesici takımların talaş ve helis açıları Tablo 2’de verilmiştir. Kesici takım malzemesi, Creatizil® Grade P-Line karbür olarak seçilmiştir [29]. Grade P karbür, geniş kullanım alanı sunan yüksek performanslı bir karbür türüdür. Karbür malzeme; K20-K40 (ISO) kalitesinde, %10 bağlayıcı oranına sahip, 14.38 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda, 1600 HV sertlik değerinde ve 4000 MPa enine kopma dayanımındadır. İşleme parametreleri, üç farklı kesici takım üreticisinin AISI 316L için önerdiği kesme parametrelerinden referans alınarak belirlenmiştir [30-32] (Tablo 2). Kesici takım olarak, standart parmak freze ve dört farklı geometriye sahip dalga formulu parmak frezeler kullanılmıştır. Dalga formulu takımlar, 6-550 (dalga boyu - dalga genliği), 8-250, 4-450 ve 8-650 geometrik parametrelerine sahiptir (Şekil 2). Kesme kuvveti deneyleri, beş adet kesici takım, üç kesme hızı ve üç ilerleme miktarı belirlenerek tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde, eksenel ve radyal kesme derinlikleri sabit tutulmuş, frezeleme tipi olarak aynı yönlü frezeleme tipi seçilmiş ve kesme sıvısı kullanılmamıştır.



Şekil 2. Dalga formulu takım tasarımı (Wave form end mill design)

Yüzey pürüzlülük ölçümleri, her bir kesme kuvveti ölçümünü takiben Mahr® Perthometer M1 cihazı ile yapılmış olup, ISO 4288 standardına göre ve kesim uzunluğu

( $\lambda_c$ ) 0,8 mm, örnekleme sayısı (n) 5 ve yanal uzunluk ( $L_t$ ) 5,6 mm parametreleri kullanılmıştır. İşlenen yüzeyde rastgele seçilen beş farklı noktada ölçüm yapıлып, en büyük ve en küçük pürüzlülük değerleri değerlendirme dışı bırakılarak, kalan üç pürüzlülük değerinin ( $R_a$ ) aritmetik ortalaması alınmış ve kesici takımların yüzey kalitesi, bu ortalama dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Deneysel kurulum (Experimental setup)

## Kesici Takım Tasarımı

Standart parmak freze

Talaş açısı 5°

Helis açısı 38°

Dalga formulu parmak freze

Talaş | Helis açısı

6-550 -4° / +12° | 38° / 48°

8-250 -2° / +4° | 39° / 49°

4-450 -6° / +22° | 40° / 50°

8-650 -3° / +4° | 36° / 47°

## İşleme parametreleri

Kesme hızı, v (m/dk) 50 - 75 - 100

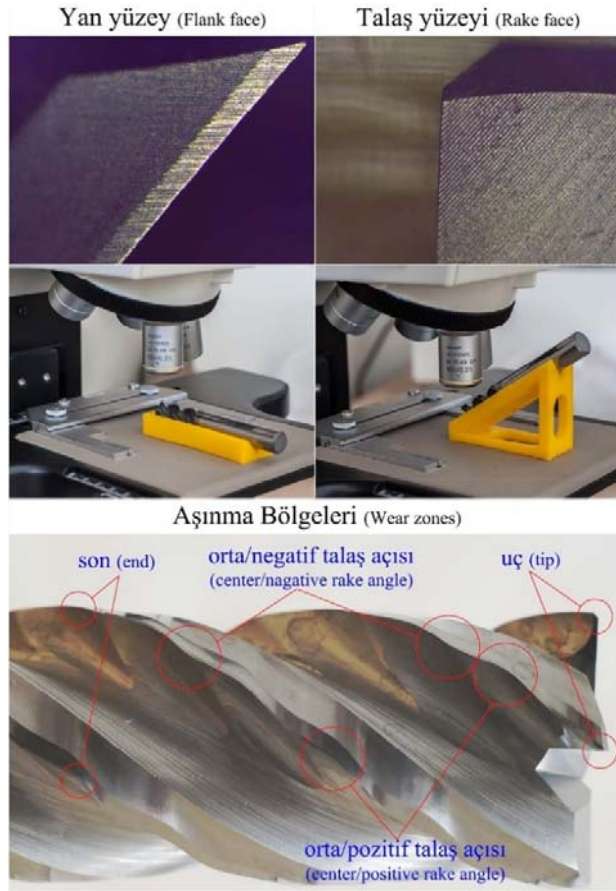
İlerleme miktarı, f (mm/diş) 0,030 - 0,045 - 0,060

Eksenel kesme derinliği (mm) 20

Radyal kesme derinliği (mm) 2,5

Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri ve bu veriler ile yapılan kesici takım karşılaştırmaları ile en iyi işleme şartlarının (en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerleri) elde edildiği kesme parametrelerini görmek büyük oranda mümkündür. Ancak daha ayrıntılı bir bilgi elde etmek için varyans ve regresyon analizleri yapılmıştır. İstatistiksel analizler için Minitab® R19 yazılımı kullanılmıştır. Veri analizlerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri için, deneysel çalışmalarda tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Varyans analizi, her bir kesici takımın ve işleme parametresinin, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülükleri üzerindeki etkisini ortaya

koymaktadır. Bu sayede aşınma deneyleri için seçilen işleme parametreleri de daha doğru bir şekilde belirlenmiştir. Deneysel verilerin istatistiksel analiz sonuçları değerlendirilerek en iyi işleme koşullarının elde edildiği parametreler ile aşınma deneyleri yapılmıştır. Kesme sıvısı olarak; %95 su ve %5 *Adrana D 208* metal işleme yağı emülsiyonu kullanılmıştır. İşleme sırasında kesme sıvısı debisi, 0.27 lt/s olarak sabit tutulmuştur. Takım yolu için, endüstri uygulamalarındaki farklı şartlara uygun olması düşünülerek, zıt ve aynı yönlü (yukarı ve aşağı yönlü) frezelemenin her ikisinin de gözlenebildiği “zikzak” takım yolu uygulaması seçilmiştir. Aşınma miktarları, takımların yan yüzeyi ve talaş yüzeyinin uç, orta ve son kısımlarından ölçülerek (Şekil 3) aritmetik ortalaması alınmış, bu ortalama dikkate alınarak değerlendirilmiştir.



**Şekil 3.** Takım aşınma yüzeyleri ve görüntü alma düzeneği  
(Tool wear surfaces and image acquisition setup)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Kesme Kuvvetleri (Cutting Forces)

Ortalama bileşke kesme kuvvetleri bulguları incelendiğinde; tüm deney şartlarında standart ve dalga formlu kesici takımlar arasında belirgin bir farklılık gözlenmiştir. “Değişim” sütunu altında, dalga formlu takımlardan ölçülen kesme kuvvetlerinin standart takıma göre düşme (pozitif) ve

yükselme (negatif) eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir (Tablo 3). Dalga formlu tüm takımlarda, standart takıma göre daha yüksek kesme kuvvetleri elde edilmiş olup 6-550 takımı için ortalama %-16,2; 8-250 için ortalama %-19,3; 4-450 için ortalama %-28,8 ve 8-650 takımı için ise ortalama %-17,4 oranlarında yükselme eğilimi görülmüştür. Kesme kuvveti verileri, işleme şartları açısından değerlendirildiğinde ise kesme hızı arttığında ve ilerleme miktarı azaldığında, dalga formlu takımların standart takımlara göre kesme kuvvetlerinin yükselme eğilimi genel olarak azalmıştır. Diğer bir deyişle en yüksek kesme hızı ve en düşük ilerleme miktarına sahip 7. deney şartlarında, dalga formlu takımlardan ölçülen kesme kuvvetlerinin standart takıma yaklaştığı göze çarpmaktadır. Şekil 4 incelendiğinde, tüm kesici takımlar için kesme hızı artışının ve ilerleme miktarı azalmasının kesme kuvvetlerini düşürdüğü görülmektedir. Kesme hızı artışı ile kesme bölgesindeki sıcaklık artar ve bu durum, takım-talaş temas alanının küçülmesine ve kısmen de ikinci deformasyon bölgesindeki kayma dayanımı düşmesine neden olduğu için kesme kuvvetleri düşer [14, 33]. Bununla birlikte takım-talaş temas alanındaki sıcaklık artışı, sürtünme katsayısını azaltacağı için bu da kesme kuvvetlerinin düşmesini açıklar [34]. İlerleme miktarının azalması ile talaş yükü ve kesme bölgesinin basıncı azalacağı için kesme kuvvetleri düşer [26]. Tüm kesme şartlarında en düşük kesme kuvvetleri standart takımda görülmüştür. En yüksek kesme kuvvetleri 4-450 dalga formlu takımda görülmüştür. 4-450 dalga formlu takımda talaş açısı,  $-6^{\circ}$  ile  $+22^{\circ}$  arasında değişmektedir. Talaş açısının artışı ve  $+22^{\circ}$  gibi büyük pozitif talaş açılı bölgeler, talaş kaldırma sırasında kesme düzlemi açısının artışı ve bununla birlikte takım-talaş temas alanının ve buradaki sürtünme kuvvetinin azalması nedeniyle kesme kuvvetlerinin düşmesi gerektiğini düşündürülebilir [35-37]. Ancak, talaş açısının küçülmesi ve  $-6^{\circ}$  gibi büyük negatif talaş açılı bölgelerin bu duruma daha baskın bir ters etki yaratmış olması kesme kuvvetlerinin yükselmesini açıklayabilir.

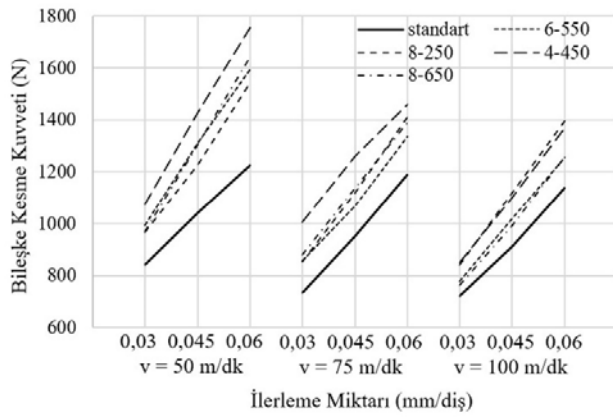
#### 3.2. Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Surface Roughness Values)

Ortalama yüzey pürüzlülüğü bulguları incelendiğinde; tüm deney şartlarında standart ve dalga formlu kesici takımlar arasında belirgin bir farklılık gözlenmiştir. “Değişim” sütunu altında, dalga formlu takımlardan ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin standart takıma göre düşme (pozitif) ve yükselme (negatif) eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir (Tablo 4). Dalga formlu tüm takımlarda, standart takıma göre genel olarak daha yüksek yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiş olup 6-550 takımı için ortalama %-9,3; 8-250 için ortalama %-13,3; 4-450 için ortalama %-27,1 ve 8-650 takımı için ise ortalama %-17,8 oranlarında yükselme eğilimi görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü verileri işleme şartları açısından değerlendirildiğinde ise kesme hızı arttığında ve ilerleme miktarı azaldığında, dalga formlu takımların standart takımlara göre yüzey pürüzlülüğünün yükselme eğilimi genel olarak azalmıştır. Diğer bir deyişle en yüksek kesme hızı ve en düşük ilerleme miktarına sahip 7. deney şartlarında, dalga formlu takımlardan ölçülen yüzey

**Tablo 3.** Ortalama bileşke kuvvetleri ( $Fr = \sqrt{Fx^2 + Fy^2 + Fz^2}$ ) ve takım bazındaki değişimleri  
(Average resultant forces and variations in terms of cutting tools)

Deneç No	Kesme Hızı v (m/dk)	İlerleme Miktarı f (mm/diş)	Fr (N) (standart)	6-550		8-250		4-450		8-650		Ortalama Değişim (%)
				Fr (N)	Değişim (%)	Fr (N)	Değişim (%)	Fr (N)	Değişim (%)	Fr (N)	Değişim (%)	
1	50	0,030	842	996	-18,2	968	-14,9	1074	-27,5	971	-15,2	-19,0
2		0,045	1042	1312	-26,0	1228	-17,9	1428	-37,1	1307	-25,5	-26,6
3		0,060	1224	1595	-30,3	1544	-26,2	1755	-43,4	1642	-34,2	-33,5
4	75	0,030	734	856	-16,5	853	-16,1	1006	-37,1	880	-19,8	-22,4
5		0,045	949	1069	-12,7	1121	-18,1	1262	-32,9	1138	-19,8	-20,9
6		0,060	1187	1335	-12,5	1411	-18,9	1459	-22,9	1391	-17,2	-17,9
7	100	0,030	723	777	-7,5	841	-16,3	849	-17,4	764	-5,7	-11,7
8		0,045	913	1018	-11,5	1119	-22,5	1100	-20,5	991	-8,6	-15,7
9		0,060	1136	1254	-10,4	1397	-22,9	1370	-20,6	1258	-10,7	-16,2
ORTALAMA			972	1135	-16,2	1165	-19,3	1256	-28,8	1149	-17,4	-20,4

pürüzlülüğü standart takıma yaklaştığı görülmektedir. Kesme hızı artışının yüzey kalitesini iyileştirmesi yaygın görülen bir sonuçtur [14, 18]. Kesme hızının artması ile kesme bölgesinin sıcaklıkları yükselir ve bu da talaş akışını ve deformasyonu kolaylaştırır. Buna ek olarak sıcaklık artışı, mikro çatlak oluşma ve yırtılma eğilimini de azaltır. Bu nedenlerle daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde edilir [39]. İlerleme miktarı ile yüzey pürüzlülüğü değişiminin doğru orantılı olması nedeni ile ilerleme miktarı artışının yüzey kalitesini kötü yönde etkilemesi, talaş kaldırma işlemlerinde beklenen bir sonuçtur [26].



**Şekil 4.** İlerleme miktarına bağlı olarak, farklı kesme hızlarında ortalama bileşke kesme kuvvetlerindeki değişim  
(Variations in average resultant cutting forces at different cutting speeds depending on the feed rate)

“Ortalama Değişim” sütununda, yüzey pürüzlülüklerinin değişim oranları; 50 m/dk kesme hızında gerçekleşen deneylerde ortalama %-31,5 iken 75 m/dk kesme hızında gerçekleşen deneylerde ortalama %-14’e ve 100 m/dk kesme hızında gerçekleşen deneylerde ise ortalama %-5,1 olarak gerçekleşmiştir. Buna ek olarak 6-550 dalga formulu takım,

son üç deney şartında standart takıma göre ortalama %4,9 oranında daha iyi yüzey kalitesini göstermiştir (Tablo 4). Şekil 5 incelendiğinde, kesme hızı ve ilerleme miktarı değişiminin yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkileri daha iyi görülmektedir. Tüm kesme şartlarında en düşük yüzey pürüzlülük değerleri genel olarak standart takımda görülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri 4-450 dalga formulu takımında görülmüştür. Talaş açısı artışı ile yığıntı talaş oluşma eğiliminin azaldığı ve bu nedenle takım-talaş temas alanının sürtünme katsayısı düşeceği için yüzey kalitesinin iyileşmesi beklenen bir sonuçtur [4, 40]. 4-450 dalga formulu takımındaki +22° büyük pozitif talaş açılı bölgelerin nedeniyle yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesi gerektiği düşünülebilir. Ancak, kesme kuvvetleri sonuçlarındaki gibi talaş açısının küçülmesi ve -6° gibi büyük negatif talaş açılı bölgelerin bu duruma baskın bir etki yaratmış olması, yüzey pürüzlülük değerlerinin yükselmesini açıklayabilir. Yüksek kesme hızında (100 m/dk), 6-550 dalga formulu takımın artan pozitif talaş açısı etkili olmaya başlayarak negatif talaş açısının, yüzey kalitesi üzerinde baskın olan olumsuz etkisini azaltmıştır. Buna ek olarak da 6-550 dalga formulu takımında daha küçük negatif talaş açısı (-4°) olması nedeni ile yüzey pürüzlülüğü iyileşme eğilimi göstermiştir. Sonuç olarak yüzey kalitesi üzerinde, negatif talaş açısının pozitif talaş açısına göre daha etkin bir parametre olduğu çıkarımı yapılabilir.

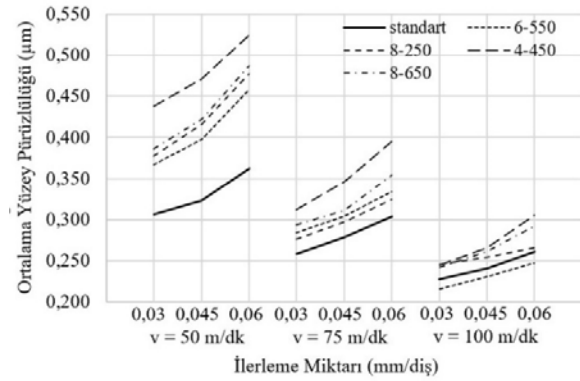
### 3.3. Varyans Analizleri (Analyses of Variance)

Varyans ve regresyon analizleri; deneysel olarak elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük bulgularının, kesici takım, kesme hızı ve ilerleme miktarı kontrol faktörlerine göre değiştiği kabul edilerek yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları Tablo 5’te gösterilmiştir. Analizlerdeki P değerlerinin tümü %5 (P<0,05) oranından küçük çıkmıştır. Bu durum, seçilen kontrol faktörlerinin ve seviyelerinin sonuçlar üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı

**Tablo 4.** Ortalama yüzey pürüzlülükleri ve takım bazındaki değişimleri  
(Average surface roughness and variations in terms of cutting tools)

Deneç No	Kesme Hızı v (m/dk)	İlerleme Miktarı f (mm/diş)	Ra (N) (standart)	6-550		8-250		4-450		8-650		Ortalama Değişim (%)
				Ra (µm)	Değişim (%)	Ra (µm)	Değişim (%)	Ra (µm)	Değişim (%)	Ra (µm)	Değişim (%)	
1	50	0,030	0,307	0,367	-19,7	0,378	-23,3	0,438	-42,8	0,386	-25,9	-27,9
2		0,045	0,323	0,398	-23,2	0,416	-28,8	0,471	-45,8	0,422	-30,7	-32,1
3		0,060	0,362	0,458	-26,5	0,477	-31,8	0,524	-44,8	0,487	-34,5	-34,4
4	75	0,030	0,258	0,284	-10,1	0,276	-7,0	0,312	-20,9	0,294	-14,0	-13,0
5		0,045	0,278	0,304	-9,4	0,297	-6,8	0,346	-24,5	0,311	-11,9	-13,1
6		0,060	0,304	0,334	-10,0	0,324	-6,7	0,395	-30,1	0,354	-16,6	-15,8
7	100	0,030	0,228	0,216	5,4	0,246	-7,7	0,245	-7,5	0,242	-6,1	-4,0
8		0,045	0,241	0,231	4,1	0,254	-5,4	0,266	-10,4	0,262	-8,6	-5,0
9		0,060	0,261	0,247	5,4	0,266	-1,8	0,305	-16,7	0,292	-11,7	-6,2
ORTALAMA			0,285	0,315	-9,3	0,326	-13,3	0,367	-27,1	0,339	-17,8	-16,8

olduğunu göstermektedir [16, 17]. Analiz sonuçlarına göre, kesme kuvvetlerinin %69,35 etki oranı ile en çok ilerleme miktarından etkilendiği ve yüzey pürüzlülüğünün ise %69,53 etki oranı ile en çok kesme hızından etkilendiği anlaşılmıştır. Bunlara ek olarak, etkin parametre davranışlarının daha belirgin görülmesi için etki grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 6). Grafiklerde, her bağımsız faktörün her bir seviyesinde elde edilen kesme kuvveti, yüzey pürüzlülük değerleri ve bunların standart hataları verilmiştir. Faktörlerin kesme kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 6a), kesme hızının artması ve ilerleme miktarının azalması ile kesme kuvvetlerinin düştüğü, deneysel sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Kesici takım faktörünün etkisine bakıldığında; Tablo 3'teki oranlara benzer şekilde, 4-450 takımında en yüksek kesme kuvveti, standart takımında en düşük kesme kuvveti ve 6-550, 8-250 ve 8-650 takımlarında ise birbirlerine yakın kesme kuvvetleri görülmektedir. Faktörlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 6b), analiz sonuçlarının kesme kuvveti etki grafiğindeki (Şekil 6a) gibi deneysel sonuçlarla uyum sağladığı görülmektedir. Deneysel sonuçlara benzer şekilde, kesme hızının artması ve ilerleme miktarının azalması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı ve kesici takım faktörünün de Tablo 4'teki oranlarla yüzey pürüzlülükleri açısından uyum sağladığı görülmektedir. Etki grafiklerindeki standart hatalar incelendiğine (Şekil 6), diğer bir deyişle sonuçlardaki hata payları göz önüne alındığında; her iki grafikte de kesme hızı ve ilerleme miktarlarının bağımsız etki alanlarının mevcut olduğu görülmektedir. Kesici takım faktöründe ise her iki grafikte de standart takım ile 4-450 dalga formulu takımın bağımsız etki alanlarının olduğu anlaşılmaktadır. Ancak 6-550, 8-250 ve 8-650 takımlarının etki alanlarının, her iki grafikte de birbirleri çakıştığı göze çarpmaktadır. Bu durum, bu üç dalga formulu takımın kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirleri ile yakın olduğunu göstermektedir. Bu yakınlık, deneysel sonuçlarla da (Tablo 3, Tablo 4) uyum sağlamaktadır.

**Şekil 5** İlerleme miktarına bağlı olarak, farklı kesme hızlarında ortalama yüzey pürüzlülüklerindeki değişim  
(Variations in average surface roughness at different cutting speeds depending on the feed rate)

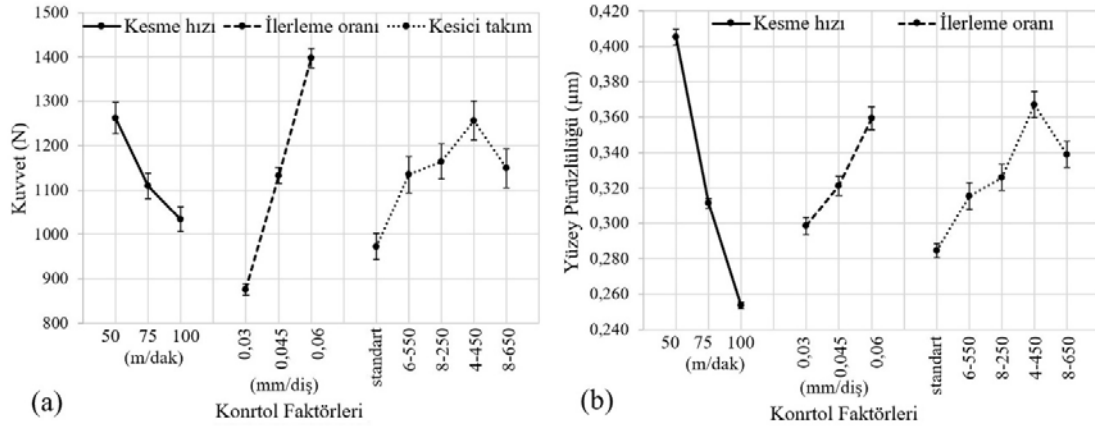
Regresyon analizleri sonucunda elde edilen model özeti Tablo 6'da gösterilmiştir. Geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayıları ( $R^2$ ), kesme kuvvetleri açısından %95,97 ve yüzey pürüzlülükleri açısından ise %91 oranlarında elde edilmiştir. Bu oranlar, istatistiksel modelin deneysel verilere uygunluğunun yüksek ve sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğunu göstermektedir. Regresyon eşitlikleri, kesme kuvvetleri modeli için Eş. 1'de ve yüzey pürüzlülük modeli için ise Eş. 2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Kesme Kuvveti} = & 1135,38 - (163,0 \times t_1) - (0,7 \times t_2) \\ & + (29,3 \times t_3) + (120,6 \times t_4) + (13,8 \times t_5) + (126,6 \times v_1) \\ & - (25,3 \times v_2) - (101,3 \times v_3) - (259,8 \times f_1) - (2,2 \times f_2) \\ & + (261,9 \times f_3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Yüzey Pürüzlülüğü} = & 0,32636 - (0,04173 \times t_1) \\ & - (0,01092 \times t_2) - (0,00040 \times t_3) + (0,04057 \times t_4) \\ & + (0,01249 \times t_5) + (0,08790 \times v_1) - (0,01498 \times v_2) \\ & - (0,07292 \times v_3) - (0,02796 \times f_1) - (0,00505 \times f_2) \\ & + (0,03301 \times f_3) \end{aligned} \quad (2)$$

**Tablo 5.** Varyans analizleri (Analysis of Variance)

Kaynak (Source)	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı (Adj SS)	Kareler ortalaması (Adj MS)	F değeri	P değeri	Etki (%) (Contribution)
<b>Ortalama Kesme Kuvveti (N)</b>						
Model	8	2824607	353076	107,14	0,000	95,97
Lineer	8	2824607	353076	107,14	0,000	95,97
Kesici takım, t	4	379613	94903	28,8	0,000	12,90
Kesme hızı, v	2	403780	201890	61,26	0,000	13,72
İlerleme miktarı, f	2	2041215	1020607	309,7	0,000	69,35
Hata	36	118635	3295			4,03
<b>Toplam</b>	<b>44</b>	<b>2943242</b>				<b>100,00</b>
<b>Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)</b>						
Model	8	0,78137	0,097671	159,16	0,000	91,00
Lineer	8	0,78137	0,097671	159,16	0,000	91,00
Kesici takım, t	4	0,09889	0,024723	40,29	0,000	11,52
Kesme hızı, v	2	0,59709	0,298545	486,49	0,000	69,53
İlerleme miktarı, f	2	0,08538	0,042692	69,57	0,000	9,94
Hata	126	0,07732	0,000614			9,00
<b>Toplam</b>	<b>134</b>	<b>0,85869</b>				<b>100,00</b>

**Şekil 6.** Etki grafikleri (Impact graphs), a) Kesme kuvvetleri (Cutting forces), b) Yüzey pürüzlülükleri (Surface roughness)

### 3.4. Takım Aşınmaları (Tool Wear)

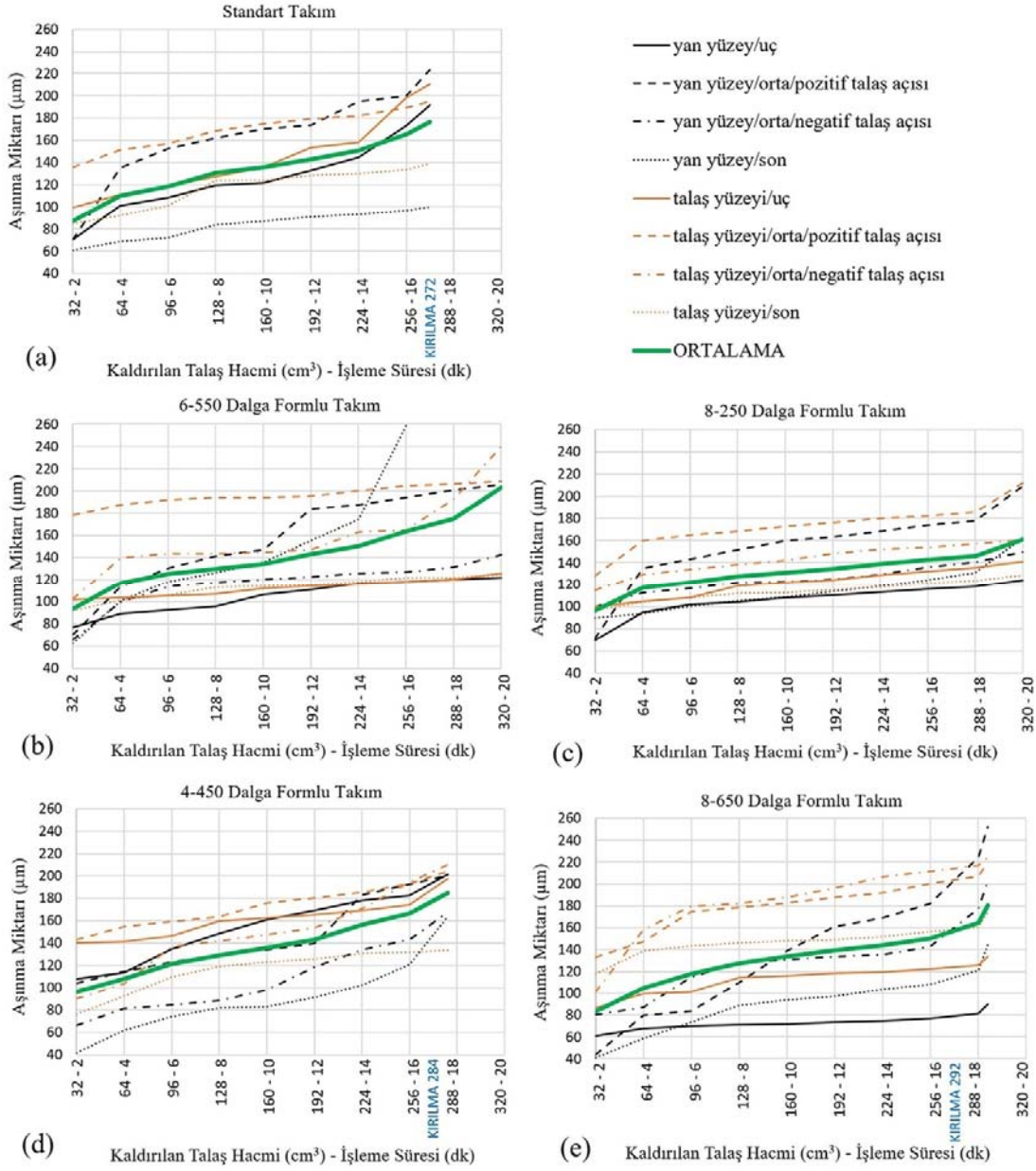
Aşınma deneylerinde takım ömrü kriteri için ISO 8688-2 standardının belirlediği aşınma değerleri referans alınmıştır. ISO 8688-2'ye göre tüm kesici ağızlarında ortalama 300  $\mu\text{m}$  veya herhangi bir kesici ağızda meydana gelen 500  $\mu\text{m}$  bölgesel aşınma değerleri maksimum takım ömrü olarak belirtilmektedir [41]. Bazı kesici takımlar bu seviyelere ulaşmadan kırıldığı için deneyler sonlandırılmıştır. Deneyler, 32  $\text{cm}^3$  talaş hacmi veya 2 dk işleme süresi periyotları ile 320  $\text{cm}^3$  veya 20 dk işleme süresi seviyesine kadar sürdürülmüştür. Her işleme periyodu sonunda takımların aşınma miktarları 10x büyütme oranında görüntülenip incelenmiştir. Aşınma miktarları takımların, yan yüzey ve talaş yüzeylerinin uç kısımları, orta/pozitif talaş açılı kısım, orta/negatif talaş açılı kısım ve son kısımlarından ölçülmüştür. İşleme parametreleri, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük bulguları referans alınarak seçilmiştir. Deneysel ve veri analizi sonuçlarına göre en iyi işleme şartları olan 7. deney şartları (100 m/dk kesme hızı ve 0,030 mm/diş ilerleme miktarı) kullanılarak aşınma deneyleri yapılmıştır.

**Tablo 6.** Model özeti (Model Summary)

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
<b>Ortalama Kesme Kuvveti</b>			
57,4058	%95,97	%95,07	%93,70
<b>Yüzey Pürüzlülüğü</b>			
0,024773	%91,00	%90,42	%89,66

Aşınma miktarı grafikleri Şekil 7'de ve aşınma görüntüleri, standart takım için Şekil 8'de ve dalga formulu takımlar için Şekil 9'da gösterilmiştir. Tüm kesici takımlarda, aşınma tipi olarak tüm ölçüm bölgelerinde düzenli çentik aşınması gözlenmiştir. Standart takımında, 224  $\text{cm}^3$  talaş hacmine ulaştığında yan yüzey/uç kısımda 737,875  $\mu\text{m}$  boyutunda bölgesel bir aşınma meydana gelmiştir. 224  $\text{cm}^3$  talaş hacmi seviyesi, standart takım için 500  $\mu\text{m}$ 'yi aşması sebebiyle takım ömrü olmasına rağmen aşınma deneyleri sürdürülmüştür. 272  $\text{cm}^3$  talaş hacmi seviyesinde ise takım kırılarak tamamen deforme olmuştur. Aşınma bölgeleri incelendiğinde hem yan yüzey ve hem de talaş yüzeyinde uç ve orta kısımlar aynı seviyede ve son kısımlara göre daha belirgin şekilde aşınmıştır. Sonuç olarak standart takımında



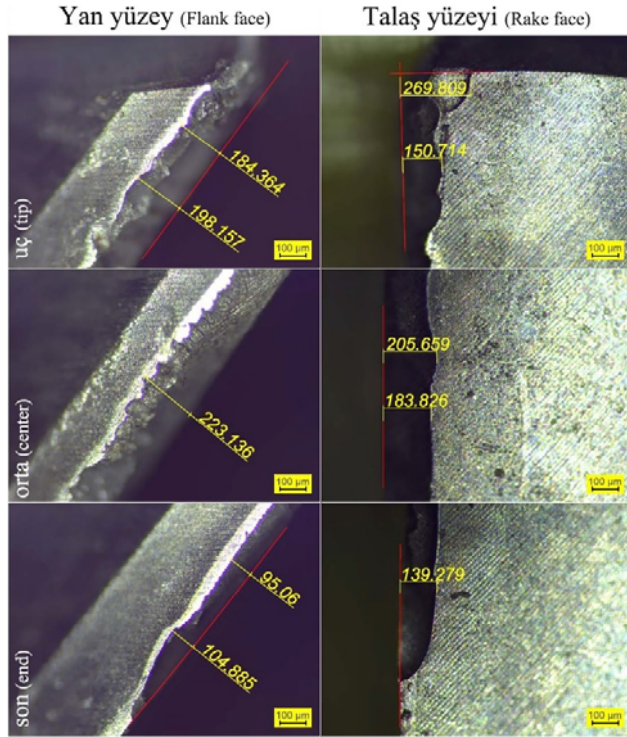


Şekil 7. Kaldırılan talaş hacmine bağlı olarak takım aşınma miktarları (Tool wear amounts depending on the chip volume removed), a) Standart, b) 6-550, c) 8-250, d) 4-450, e) 8-650

272 cm<sup>3</sup> talaş hacmi işlenmesi ile bölgesel aşınma yüzeyi haricinde 176,442 µm boyutunda ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır. 6-550 dalga formlu takımında, 256 cm<sup>3</sup> talaş hacmine ulaştığında yan yüzey/son kısımda 546,394 µm boyutunda bölgesel bir aşınma meydana gelmiştir. 256 cm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyesi, 6-550 dalga formlu takım için 500 µm'yi aşması sebebiyle takım ömrü olmasına rağmen aşınma deneyleri 320 cm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyesine kadar sürdürülmüştür. Aşınma bölgeleri incelendiğinde en yüksek aşınma değeri, bölgesel aşınma sebebiyle yan yüzey/uç kısımda görülmüştür. Yan yüzey/uç ve talaş yüzeyi/uç ve son kısımları birbirlerine yakın aşınma değerlerinde seyretmiştir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 6-550 dalga formlu takımında 320 cm<sup>3</sup> talaş hacmi işlenmesi ile 203,179

µm boyutunda aşınma değerine ulaşılmıştır. 8-250 dalga formlu takımında, aşınma bölgeleri incelendiğinde en yüksek aşınma değeri, orta/pozitif talaş açılı kısımlarda görülmüştür. Diğer aşınma bölgelerinde birbirlerine yakın aşınma değerleri gözlenmiştir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 8-250 dalga formlu takımında 320 cm<sup>3</sup> talaş hacmi işlenmesi ile 161,148 µm boyutunda ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır. 4-450 dalga formlu takımında, 284 cm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyesinde takım kırılarak tamamen deforme olmuştur. Aşınma bölgeleri incelendiğinde en düşük aşınma değeri, yan yüzey/orta/negatif talaş açılı ve her iki yüzeyin son kısımlarda görülmüştür. Diğer aşınma bölgelerinde birbirlerine yakın aşınma değerleri gözlenmiştir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 4-450 dalga formlu takımında

284 cm<sup>3</sup> talaş hacmi işlenmesi ile 184,639 µm boyutunda ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır. 8-650 dalga formu takımında, 128 cm<sup>3</sup> talaş hacmine ulaştığında talaş yüzeyi/orta/pozitif talaş açılı kısmında 315,791 µm boyutunda bölgesel bir aşınma meydana gelmiştir. Aşınma deneyleri, 292 cm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyesine kadar sürdürülmüştür. 292 cm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyesinde ise takım kırılarak tamamen deforme olmuştur. Aşınma bölgeleri incelendiğinde en yüksek aşınma değeri, yan yüzey/orta/pozitif talaş açılı kısmında, en düşük aşınma değerleri ise her iki yüzeyin uç kısımları ve yan yüzey/son kısımlarında görülmüştür. Diğer aşınma bölgelerinde birbirlerine yakın aşınma değerleri gözlenmiştir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 8-650 dalga formu takımında 292 cm<sup>3</sup> talaş hacmi işlenmesi ile 180,174 µm boyutunda ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

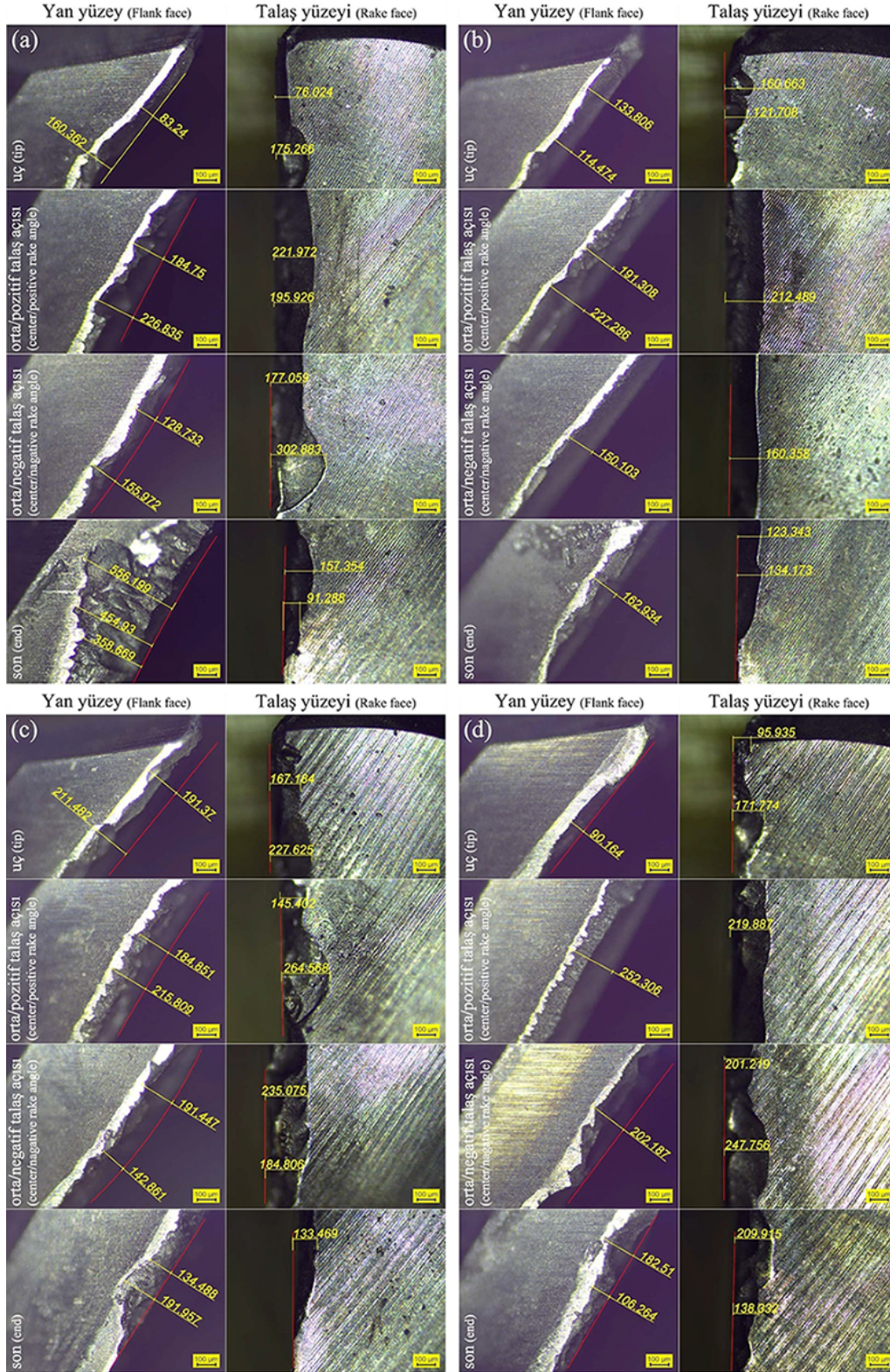


**Şekil 8.** Standart takımın aşınma görüntüleri (272 cm<sup>3</sup>)  
(Tool wear images of standard tool)

Dalga formu takımların, standart takıma göre aşınma miktarlarındaki değişimler Tablo 7’de verilmiştir. Değerlendirmeler, bazı takımların 320 cm<sup>3</sup> seviyesinden önce kırılması nedeniyle 288 cm<sup>3</sup> talaş hacmi seviyesinde yapılmıştır. Standart takım için 272 cm<sup>3</sup> ve 4-450 dalga formu takım için 284 cm<sup>3</sup> talaş hacimlerinde kırılma gerçekleşmesi nedeniyle, bu takımlar için bu talaş hacimlerdeki aşınma miktarları değerlendirmeye dahil edilmiştir. Tablo 7’de “Değişim” sütunu altında, dalga formu takımlardan elde edilen aşınma miktarlarının standart takıma göre düşme eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir. Aşınma değişimleri, takımların tüm aşınma bölgeleri için hesaplanmıştır. Dalga formu takımların standart takıma göre en büyük negatif değişim oranları, genel olarak yüksek

aşınma miktarları görülen yan yüzey/son bölgesinden gerçekleşmiştir. Bu durum, dalga formu takımların ortalama aşınma değişimleri açısından bir dezavantaj yaratmasına rağmen diğer aşınma bölgelerindeki düşük aşınma miktarları sayesinde standart takıma göre avantaj elde edilmiştir. En düşük aşınma miktarları, genel olarak yan yüzey ve talaş yüzeyinin uç kısımları ve yan yüzey/orta/negatif talaş açılı kısımlardan ölçülmüştür. Dalga formu takımlardan ölçülen ortalama takım aşınma miktarları standart takıma göre, 6-550 takımı için %1,1; 8-250 takımı için %17,2 ve 8-650 takımı için %6,9 oranlarında düşme eğilimi, 4-450 takımı için ise %-4,6 oranında yükselme eğilimi göstermiştir. Tüm dalga formu takımlarda orta/pozitif talaş açılı ve orta/negatif talaş açılı kısımlar incelendiğinde, pozitif talaş kısımların negatif talaş açılı kısımlardan genel olarak daha fazla aşındığı görülmektedir. Talaş açısının artırılması ve büyük pozitif talaş açısı, kesici kenarın keskinlik derecesini artırır [4, 42]. Keskinlik derecesinin artması ile talaş kaldırma sırasında kesme düzlem açısı artar ve bu da takım-talaş temas alanının küçülmesine ve kesme kuvvetlerinin düşmesine neden olur [42]. Kesme kuvvetlerinin düşmesi, ilk başta pozitif talaşlı bölgelerin daha az aşınacağını düşündürse de keskinlik derecesinin artması, kesici kenar mukavemetini düşüreceği için kesici kenar daha çok aşınma eğilimi gösterir [42, 43]. Negatif talaş açısı ise bu durumun aksine kesici kenar mukavemetini artıracak için daha az aşınma eğilimi gösterir [42]. Bu nedenle orta/pozitif talaş açılı bölgeler, orta/negatif talaş açılı bölgelerden daha çok aşınmıştır. Bu durum, dalga formu takımlar üzerinden yorumlandığında, büyük pozitif talaş açılı bölgelere sahip olan 4-450 (+22°) ve 6-550 (+12°) takımlarda standart takıma göre, ortalama takım aşınması açısından, 4-450 için daha kötü ve 6-550 için ise standart takıma yakın bir davranış sergilemiş olup bu durum büyük pozitif talaş açılarının bu takımlar üzerinde takım aşınması açısından dezavantaj yaratmasına atfedilmiştir. Bu takımlara göre daha küçük ve aynı pozitif talaş açılı bölgelere sahip diğer dalga formu takımların aşınma davranışları, negatif talaş açısı açısından yorumlandığında, 8-250 (-2°) takımının 8-650 (-3°) takımına göre daha iyi bir aşınma davranışı sergilediği görülmüş ve bu durumun da negatif talaş açısının küçülmesine bağlı takım aşınmasının azalma eğilimiyle açıklanabilir. Buradan, talaş açısının negatif yöndeki artışına (-4°, -6° vb.) bağlı olarak, kesme düzlemi açısının azalması, takım-talaş temas alanının artması ve bunun kesme kuvvetlerini artırması ile takım aşınmasını artıracak çıkarımı yapılabilir.

Bulguların genel olarak değerlendirilmesi açısından, dalga formu takımlarda talaş ve helis açıları değişiminin, takımın genel işleme performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde (Tablo 8); 8-250 dalga formu takımında görüldüğü gibi dalga boyunun büyümesi ve dalga genişliğinin küçülmesi ile takım işleme performansı genel olarak artma eğilimi göstermiştir. Aksi durum için 4-450 takımında olduğu gibi takım işleme performansı düşmektedir. Diğer bir deyişle pozitif ve negatif talaş açıları büyümeleri (+12°, +22°, -4°, -6° vb.) sonucu dalga formu takımlarda işleme performansı standart takıma göre düşük çıkmaktadır. Helis açılarındaki değişiminin işleme performansı üzerindeki etkisi belirgin olarak



Şekil 9. Dalga formulu takımların aşınma görüntüleri (Tool wear images of wave form tools),

a) 6-550/320 cm<sup>3</sup>, b) 8-250/320 cm<sup>3</sup>, c) 4-450/284 cm<sup>3</sup>, d) 8-650/292 cm<sup>3</sup>

görülememiştir. Ancak, talaş açıları değişimleri birbirine yakın olan 8-250 ve 8-650 takımları incelendiğinde helis açılarının artışının işleme performansını artırdığı

düşünülebilir [44]. Bunun yanı sıra en yüksek helis açıları değişimine sahip 4-450 takımı incelendiğinde ise büyük pozitif ve negatif talaş açısının getirdiği kötü performans

**Tablo 7.** Ortalama takım aşınma miktarları ve takım bazındaki değişimleri (Average tool wear and variations in terms of cutting tools)

Talaş Hacmi / İşleme Süresi		288 cm <sup>3</sup> / 18 dk								
Kesici Takım	Aşınma Bölgesi	Standart	6-550		8-250		4-450		8-650	
			Değişim (%)	Değişim (%)	Değişim (%)	Değişim (%)	Değişim (%)	Değişim (%)		
Yan yüzey	Uç	191,261	120,411	37,0	118,146	38,2	201,426	-5,3	81,544	57,4
	Orta/Pozitif t.a.	223,136	200,911	10,0	177,558	20,4	200,331	10,2	224,196	-0,5
	Orta/Negatif t.a.	223,136	131,635	41,0	140,353	37,1	167,154	25,1	177,492	20,5
	Son	99,972	302,203	-202,3	130,816	-30,9	163,222	-63,3	121,269	-21,3
Talaş yüzeyi	Uç	210,261	120,273	42,8	135,567	35,5	197,404	6,1	125,475	40,3
	Orta/Pozitif t.a.	194,742	206,576	-6,1	185,263	4,9	204,163	-4,8	207,046	-6,3
	Orta/Negatif t.a.	194,742	192,289	1,3	156,961	19,4	209,941	-7,8	217,013	-11,4
	Son	139,279	122,209	12,3	123,407	11,4	133,469	4,2	160,214	-15,0
Ortalama		176,442	174,563	1,1	146,009	17,2	184,639	-4,6	164,281	6,9

**Tablo 8.** Genel bağlamda kesici takım performansları (Overall cutting tool performances)

Deney	Standart takıma göre performans (%)			
Takım	6-550	8-250	4-450	8-650
Helis açısı	38 / 48	39 / 49	40 / 50	36 / 47
Talaş açısı	-4 / +12	-2 / +4	-6 / +22	-3 / +4
Kesme kuvveti	-16,2	-19,3	-28,8	-17,4
Yüzey kalitesi	-9,3	-13,3	-27,1	-17,8
Takım aşınması	1,1	17,2	-4,6	6,9

**Tablo 9.** AISI 316L için kesici takım ve işleme koşulları önerileri (Cutting tool and machining conditions recommendations for AISI 316L)

Kesici Takım	İşleme Şartları (min/max)				İşleme Türü			
	Standart	6-550	8-250	4-450	8-650	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)	Kaba Talaş (Rough)
○ ○	○ ○	● ●	○ ○	● ○	50	0,030	✓	×
● ●	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	100	0,060	✓	×
					50	0,030	×	✓
					75	0,060	×	✓

● ● Önerilir ● ○ Kabul Edilebilir ○ ○ Önerilmez

etkisinin takımın işleme performansını düşürdüğü görülmüştür. Bu veriler, talaş açısı değişiminin kesici takım işleme performansı üzerinde büyük bir etkisinin olduğunu göstermektedir.

Dalga formulu takımların işleme performansları, iş malzemesi açısından değerlendirildiğinde; AISI 316L malzemesinin işlenebilirliğini zorlaştıran yüksek mekanik dayanım ve yüksek çalışma sertleşmesi (pekleşme) özelliklerinin neden olduğu düşük takım ömrü problemi için 8-250 ve 8-650 dalga formulu takımların çözüm olabileceği düşünülmektedir. Bu veriler ışığında dalga formulu takımlar için kaba ve ince işleme türleri açısından uygun kesici takım ve işleme koşulları tavsiyeleri oluşturulabilir (Tablo 9). Buradaki kaba talaş (rough) işleme şartları takımların aşınma miktarları referans alınarak belirlenmiştir. İnce talaş (finish) işleme

şartları ise takımlara etki eden kesme kuvvetleri ve işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitesi referans alınarak belirlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; helisel kesici kenar üzerinde değişken talaş ve helis açılına sahip dalga formulu parmak frezelerin standart parmak frezelere göre kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım aşınmaları açılarından işleme performansları kıyaslanmıştır. Dalga formulu parmak frezeler, standart takımlara kıyasla daha uzun sürede üretildiği için bu takımların üretim maliyeti yaklaşık %13 oranında daha yüksektir. Dalga formulu takımların üretim maliyetleri daha yüksek olsa da genel işleme performansı açısından yaratacağı avantajların bu maliyetlere değer olup olmadığı araştırılmıştır. Bunun için farklı geometrilere sahip dalga

formlu parmak frezeler, farklı işleme parametreleriyle deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri açısından; dalga formlu takımlardaki negatif talaş açılı bölgelerin yarattığı kötü etkilerin, pozitif talaş açılı bölgelerin sağladığı avantajlara baskın gelerek standart takımlara göre yüksek kesme kuvvetleri ve düşük yüzey kalitesi elde edilmesine neden olmuştur. Buradan, kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi üzerinde, negatif talaş açısının pozitif talaş açısına göre daha etkin bir parametre olduğunu çıkarımı yapılmıştır. Buna ek olarak, tüm dalga formlu takımlar standart takım ile karşılaştırıldığında, dalga formlu takımlardan ortalama %-20,4 oranında yüksek kesme kuvvetleri ve ortalama %-16,8 düşük yüzey kalitesi elde edilmiştir. Varyans ve regresyon analizleri ile kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük üzerinde etkili olan işleme faktörleri tespit edilmiştir. Geliştirilen istatistiksel model sayesinde seçilen faktör ve seviyelerin anlamlı ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, kesme kuvvetlerinin %69,35 etki oranı ile en çok ilerleme miktarından, yüzey pürüzlülüğünün ise %69,53 etki oranı ile en çok kesme hızından etkilendiği anlaşılmıştır. İstatistiksel modelin belirlilik katsayıları ( $R^2$ ), kesme kuvvetleri açısından %95,97 ve yüzey pürüzlülükleri açısından ise %91 olarak elde edilmiştir.

Takım aşınması değerlendirildiğinde; dalga formlu takımlardaki pozitif talaş açılı bölgelerin negatif talaş açılı bölgelere göre daha çok aşındığı görülmüştür. Pozitif ve negatif talaş açıları diğerlerinden büyük olan, 6-550 (-4°, +12°) ve 4-450 (-6°, +22°), takımlar standart takıma göre kötü takım aşınma davranışı gösterirken, daha küçük pozitif ve negatif talaş açılı takımlar ise daha iyi aşınma davranışı sergilemişlerdir. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarında olduğu gibi, aşınma davranışı üzerinde de negatif talaş açısı değişiminin pozitif talaş açısı değişimine göre daha etkili olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, özellikle standart takıma göre %17,2 oranda daha düşük aşınma miktarı sergileyen 8-250 dalga formlu takımın, krom-nikel grubu östenitik paslanmaz çelik malzeme grubunda yer alan AISI 316L malzemelerin işlenmesindeki yüksek takım aşınması problemine çözüm olabileceği görülmüştür. Maliyet/performans açısından bakıldığında, 8-250 takım, AISI 316L malzemelerin kaba talaş işlemleri için önerilir. Bu malzemenin ince talaş işlemleri için, daha düşük kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü sergileyen standart takımların kullanılmasının, maliyet/performans açısından da daha uygun olacağı düşünülmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Projesi kapsamında 119M657 numaralı proje ile desteklenmiş olup,

yazarlar bu destek için TÜBİTAK'a ve kesici takımların üretimi ve temini için katkı sağlayan Karcan Kesici Takım Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür eder.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Abukhshim, N., Mativenga, P., ve Sheikh, M.A., Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (7-8), 782-800, 2006.
2. Shaw, M.C. ve Cookson, J., *Metal cutting principles*, Oxford university press, New York, 2005.
3. Black, J.T. ve Kohser, R.A., *DeGarmo's materials and processes in manufacturing*, John Wiley & Sons, 2020.
4. Trent, E.M. ve Wright, P.K., *Metal cutting*, Butterworth-Heinemann, 2000.
5. Akgün, A., The design of wave-cut endmills with variable rake angle through helix and evaluation of tool performance, Master Thesis, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2020.
6. Korovin, G., Petrushin, S., ve Gubaidulina, R., Machining of titanium alloys with wave milling cutters. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications, 79-85, July, 2018.
7. Wan, M., Feng, J., Zhang, W.-H., Yang, Y., ve Ma, Y.-C., Working mechanism of helix angle on peak cutting forces together with its design theory for peripheral milling tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 570-580, 2017.
8. Burek, J., Zylka, L., Plodzien, M., Gdula, M., ve Sulkowicz, P., The influence of the cutting edge shape on high performance cutting, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 134-145, 2018.
9. Dombovari, Z. ve Stepan, G., The effect of harmonic helix angle variation on milling stability. *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 467-473, 2011.
10. Dombovari, Z. ve Stepan, G., The effect of helix angle variation on milling stability, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134 (5), 051015:1-6, 2012.
11. Okafor, A.C. ve Sultan, A.A., Development of a mechanistic cutting force model for wavy-edge bull-nose helical end-milling of inconel 718 under emulsion cooling strategy, *Applied Mathematical Modelling*, 40 (4), 2637-2660, 2016.
12. Sultan, A.A. ve Okafor, A.C., Effects of geometric parameters of wavy-edge bull-nose helical end-mill on cutting force prediction in end-milling of Inconel 718 under MQL cooling strategy, *Journal of Manufacturing Processes*, 23, 102-114, 2016.
13. Comak, A. ve Budak, E., Modeling dynamics and stability of variable pitch and helix milling tools for development of a design method to maximize chatter stability, *Precision Engineering*, 47, 459-468, 2017.
14. Gürbüz H., Şeker U., Kafkas F., Effects of cutting tool forms on the surface integrity in turning of AISI 316L

- stainless steel, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 225-240, 2020.
15. Çiftçi İ., The influence of cutting tool coating and cutting speed on cutting forces and surface roughness in machining of austenitic stainless steels, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 20 (2), 205-209, 2005.
  16. Bolar, G., Das, A., ve Joshi, S.N., Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components, Measurement, 121, 190-204, 2018.
  17. Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C.Y., ve Özdemir, M., Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 30 (4), 220-226, 2014.
  18. Hazir, E., Erdinler, E.S., ve Koc, K.H., Optimization of CNC cutting parameters using design of experiment (DOE) and desirability function, Journal of Forestry Research, 29 (5), 1423-1434, 2018.
  19. Kaçal A., Gülesin M., Investigation of the cutting forces components as experimentally and statistically on hobs, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 24 (3), 453-460, 2009.
  20. Masooth, P.H.S., Jayakumar, V., ve Bharathiraja, G., Experimental investigation on surface roughness in CNC end milling process by uncoated and TiAlN coated carbide end mill under dry conditions, Materials Today: Proceedings, 22, 726-736, 2020.
  21. Aydın, K., Akgün, A., Yılmaz, B., Yavaş, Ç., ve Şeker, U., Investigation of the machining performance of the wavy form end mill with variable rake angle. 10th International Congress on Machining, Antalya/Turkey, 102-109, 2019.
  22. M'saoubi, R., Outeiro, J., Changeux, B., Lebrun, J., ve Dias, A.M., Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels, Journal of materials processing technology, 96 (1-3), 225-233, 1999.
  23. Tetal, K., Machining of stainless steels handbook, ASM International, 1989.
  24. Outeiro, J., Umbrello, D., ve M'saoubi, R., Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46 (14), 1786-1794, 2006.
  25. Darwin, J., Lal, D.M., ve Nagarajan, G., Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method, Journal of materials processing technology, 195 (1-3), 241-247, 2008.
  26. Gürbüz, H., Kafkas, F., ve Şeker, U., AISI 316L eçeliğinin işlenmesinde kesici takım kesici kenar formu ve talaş kırıcı formlarının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 1 (2), 173-184, 2012.
  27. Günay M., Optimization with taguchi method of cutting parameters and tool nose radius in machining of AISI 316L steel, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (3), 437-444, 2013.
  28. MatWeb, <http://www.matweb.com/index.aspx> Erişim tarihi: 14.04.2019.
  29. Ceratizit Group, <https://www.ceratizit.com/en/products/rods-preforms/carbide-grades/> Erişim tarihi: 27.04.2019.
  30. Karcan Cutting Tools, <http://www.karcan.com/en/product/100-series-endmill> Erişim tarihi: 27.02.2021.
  31. Sandvik Coromant Tool Guide, <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/products/pages/toolguide.aspx> Erişim tarihi: 05.02.2020.
  32. ISCAR Tool Advisor, <http://www.iscar.com/ita/> Erişim tarihi: 05.02.2020.
  33. Ciftci, I., Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, Tribology International, 39 (6), 565-569, 2006.
  34. Zhao, J., Ai, X., ve Li, Z.L., Finite element analysis of cutting forces in high speed machining. Materials Science Forum, Trans Tech Publ, 753-756, 2006.
  35. Sağlam, H., Unsacar, F., ve Yaldiz, S., Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature, International Journal of machine tools and manufacture, 46 (2), 132-141, 2006.
  36. Günay, M., Aslan, E., Korkut, I., ve Şeker, U., Investigation of the effect of rake angle on main cutting force, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44 (9), 953-959, 2004.
  37. Günay, M., Korkut, I., Aslan, E., ve Şeker, U., Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force, Journal of materials processing technology, 166 (1), 44-49, 2005.
  38. Shaw, M.C. ve Cookson, J., Metal cutting principles, Oxford university press New York, 2005.
  39. Gökkaya, H., Sur, G., ve Dilipak, H., Experimental investigating of the effect of cemented carbide cutting tools coated by PVD and CVD on surface roughness according to machining parameters, Technology, 7 (3-4), 473-478, 2004.
  40. Gunay, M., Investigation of the interaction between the surface quality and rake angle in machining of AISI 1040 steel, Sigma-Journal of Engineering and Natural Sciences, 26 (2), 105-111, 2008.
  41. ISO 8688-2: Tool Life Testing in Milling - Part 2: End Milling. 2006, International Standards Institution.
  42. Astakhov, V.P. ve Davim, J.P., Tools (geometry and material) and tool wear, Springer, 2008.
  43. Astakhov, V.P., Tribology of metal cutting, Elsevier, 2006.
  44. Ema, S. ve Davies, R., Cutting performance of end mills with different helix angles, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 29 (2), 217-227, 1989.