



**DALGA FORMLU PARMAK FREZELERİN İŞLEME
PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI**

Kutay AYDIN

**DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kutay AYDIN

23/09/2021

DALGA FORMLU PARMAK FREZELERİN İŞLEME PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Kutay AYDIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Bu tez kapsamında, helisel kesici kenar üzerinde -6 ila +22 derece arasında değişen talaş açısına ve 36 ila 50 derece arasında değişen helis açısına sahip dalga formlu parmak frezelerin işleme performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı dalga geometrisine sahip parmak frezelerin işleme performansları; farklı işlenebilirlik özellikleri sergileyen malzemeler üzerinde, deneysel, nümerik ve istatistiksel yaklaşımlardan oluşan dört aşamalı bir çalışma planı çerçevesinde; kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım ömrü kriterleri dikkate alınarak, standart parmak frezelerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlk aşama olan pilot çalışmalarda, C45 ıslah çeliği, GG25 gri dökme demir ve AISI 304 paslanmaz çelik malzemeler üzerinde deneysel ve FEM (sonlu elemanlar metodu) ile doğrulanmıştır. İkinci aşamada, farklı dalga formuna sahip takımların tamamı için FEM analizi yapılarak yüksek ve düşük performans sergileyen dalga formları belirlenmiştir. Üçüncü aşamada, işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan AISI 316L paslanmaz çelik ve Ti 6Al 4V malzemeler kullanılarak yapılan işleme deneyleri ile dalga formlu takımların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiş ve son aşamada ise ömür testlerine bağlı olarak farklı dalga formlu takımların aşınma davranışları araştırılmıştır. Sonuç olarak, standart takıma göre en yüksek işleme performansı, dalga boyu 8 mm ve dalga genliği 250 µm olan ve 8-250 olarak tanımlanmış olan dalga formlu takımdan elde edilmiştir. Ti 6Al 4V malzeme için 8-250 takımında, standart takıma göre %26,5 daha düşük kesme kuvvetleri, %17,6 daha iyi yüzey kalitesi ve %73 oranında daha düşük takım aşınma miktarı gözlenmiştir. AISI 316L malzeme için ise %17,2 daha düşük takım aşınma miktarı görülmüştür. Talaşlı imalat alanında giderek yaygınlaşmaya başlayan ve ülkemizde henüz seri imalatı yapılmayan dalga formlu parmak frezeler, farklı imalat sektörleri için önemli imalat avantajları sunarken ülkemizde kesici takım üretimi yapan firmalar için de katma değeri yüksek bir ürün üretilebilme potansiyeli oluşturmıştır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Talaşlı imalat, frezeleme, dalga formlu parmak freze, değişken talaş açısı, değişken helis açısı
Sayfa Adedi : 116
Danışman : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
İkinci Danışman : Prof. Dr. Arif GÖK

INVESTIGATION OF MACHINING PERFORMANCES OF THE WAVE FORM END MILLS

(Ph. D. Thesis)

Kutay AYDIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2021

ABSTRACT

In this study, the machining performance of wave form end mills with rake angle variable from -6 to +22 degrees and helix angle variable from 36 to 50 degrees on the helical cutting edge were evaluated. In this context, the machining performance of end mills with different wave geometries; within the framework of a four-stage work plan consisting of experimental, numerical, and statistical approaches on materials exhibiting different machinability properties; were evaluated in comparison with standard end mills, taking into account the criteria of cutting forces, surface quality and tool life. In the first stage, which consists of pilot studies, experimental works on C45 tempered steel, GG25 gray cast iron and AISI 304 stainless steel materials were validated with FEM (finite element method). In the second stage, FEM analysis was performed for all of the tools with different wave forms, high and low performance wave forms were determined. In the third stage, the effects of wave form tools on cutting forces and surface roughness on AISI 316L stainless steel and Ti 6Al 4V alloy which are difficult-to-cut materials were examined. In the last stage, the wear behavior of different wave form tools was investigated depending on the tool life experiments. As a result, the highest machining performance was obtained from the wave form tool defined as 8-250 with a wavelength of 8 mm and a wave amplitude of 250 μm compared to the standard tool. In the Ti 6Al 4V material, 26.5% lower cutting forces, 17.6% better surface quality and 73% lower tool wear were observed in the 8-250 tool compared to the standard tool. In the AISI 316L material, 17.2% lower tool wear was observed. Wave form end mills, which have become widespread in the field of machining and have not yet been mass-produced in our country, offer important manufacturing advantages for different manufacturing sectors and have created a high value-added product manufacture potential for companies producing cutting tools in our country.

Science Code	: 91438
Key Words	: Machining, milling, wave form end mill, variable rake angle, variable helix angle
Page Number	: 116
Supervisor	: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Co-Supervisor	: Prof. Dr. Arif GÖK

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince her türlü destek ve katkılarıyla çalışmamı yönlendiren çok değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Ulvi ŞEKER ve Prof. Dr. Arif GÖK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Değerli görüş ve katkılarını esirgemeyen Dr. Şükran KATMER'e teşekkür ederim. Çalışmalar süresince her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ali AKGÜN'e, Arş. Gör. Bahattin YILMAZ'a, Dr. Öğr. Üyesi Funda KUTLU ONAY'a ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan kıymetli aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, 119M657 No'lu TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Projesi ve FMB-BAP 19-0389 No'lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiş olup, bu desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve Amasya Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na ve dalga formulu takımların üretimi ve temini için katkı sağlayan Karcan Kesici Takım Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ VE ARAŞTIRMANIN ÖNEMİ.....	5
3. KURAMSAL TEMELLER.....	15
3.1. Frezeleme Mekaniği ve Kesme Kuvvetleri.....	15
3.2. Yığıntı Talaş Oluşumu	17
3.3. Yüzey Pürüzlülüğü.....	18
3.4. Takım Aşınma Mekaniği.....	19
3.5. Sonlu Elemanlar Metodu.....	23
4. GEREÇ VE YÖNTEM	25
4.1. Tasarım, Malzemeler ve Takip Edilecek Standartlar	25
4.2. Deneysel Kurulum.....	27
4.3. Sonlu Eleman Analizleri (FEM analizleri).....	29
4.4. Varyans ve Regresyon Analizleri.....	32
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	35
5.1. Birinci Aşama Çalışmaları	35

	Sayfa
5.1.1. Kesme kuvvetleri	35
5.1.2. Yüzey pürüzlülük değerleri	38
5.1.3. FEM analizleri	40
5.2. İkinci Aşama Çalışmaları	42
5.3. Üçüncü Aşama Çalışmaları	47
5.3.1. Kesme kuvvetleri	49
5.3.2. Yüzey pürüzlülük değerleri	53
5.3.3. Varyans ve regresyon analizleri	59
5.4. Dördüncü Aşama Çalışmaları	64
5.5. Bulguların genel değerlendirmesi	98
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Dalga formulu takımlar ile ilgili literatür özeti.....	8
Çizelge 2.2. Talaşlı imalat, sonlu elemanlar metodu ve istatistiksel metotlar ile ilgili literatür özeti	12
Çizelge 4.1. İş malzemelerinin kimyasal bileşimleri	25
Çizelge 4.2. GG25 dökme demirin kimyasal bileşimi	25
Çizelge 4.3. Kesici takımların tasarım parametreleri.....	26
Çizelge 4.4. Farklı geometrilerdeki dalga formulu freze tasarım parametreleri.....	26
Çizelge 4.5. İş malzemelerinin işleme parametreleri.....	28
Çizelge 4.6. GG25 için Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri	30
Çizelge 4.7. GG25 malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	30
Çizelge 4.8. Ağ yapısı parametreleri.....	31
Çizelge 4.9. Veri analizlerinde kullanılan kontrol faktörleri, seviyeler ve çıktılar.....	33
Çizelge 5.1. Birinci aşama tam faktöriyel deney tasarımı	35
Çizelge 5.2. Ortalama bileşke kuvvetleri ve takım bazındaki değişimleri	36
Çizelge 5.3. Yüzey pürüzlülük değerleri ve takım bazındaki değişimleri.....	38
Çizelge 5.4. C45 9. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları	41
Çizelge 5.5. GG25 9. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları	41
Çizelge 5.6. GG25 3. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları	41
Çizelge 5.7. AISI 304 9. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları	42
Çizelge 5.8. Üçüncü aşama için seçilen dalga formulu takımlar	46
Çizelge 5.9. Üçüncü aşama tam faktöriyel deney tasarımı	48
Çizelge 5.10. AISI 316L malzeme için ortalama bileşke kuvvetler ve takım bazındaki değişimleri.....	49

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.11. Ti 6Al 4V malzeme için ortalama bileşke kuvvetler ve takım bazındaki değişimleri	50
Çizelge 5.12. AISI 316L malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve takım bazındaki değişimleri.....	54
Çizelge 5.13. Ti 6Al 4V malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve takım bazındaki değişimleri.....	55
Çizelge 5.14. AISI 316L malzeme için varyans analizleri	61
Çizelge 5.15. Ti 6Al 4V malzeme için varyans analizleri	62
Çizelge 5.16. Model özetleri.....	63
Çizelge 5.17. Dördüncü aşama takım aşınmaları deney tasarımı	65
Çizelge 5.18. AISI 316L malzeme için standart takımın aşınma miktarları.....	66
Çizelge 5.19. AISI 316L malzeme için 6-550 dalga formlu takımın aşınma miktarları	68
Çizelge 5.20. AISI 316L malzeme için 8-250 dalga formlu takımın aşınma miktarları	71
Çizelge 5.21. AISI 316L malzeme için 4-450 dalga formlu takımın aşınma miktarları	74
Çizelge 5.22. AISI 316L malzeme için 8-650 dalga formlu takımın aşınma miktarları	77
Çizelge 5.23. AISI 316L malzeme için aşınma miktarları ve takım bazındaki değişimleri	82
Çizelge 5.24. Ti 6Al 4V malzeme için standart takımın aşınma miktarları	83
Çizelge 5.25. Ti 6Al 4V malzeme için 6-550 dalga formlu takımın aşınma miktarları	85
Çizelge 5.26. Ti 6Al 4V malzeme için 8-250 dalga formlu takımın aşınma miktarları	87
Çizelge 5.27. Ti 6Al 4V malzeme için 4-450 dalga formlu takımın aşınma miktarları	90
Çizelge 5.28. Ti 6Al 4V malzeme için 8-650 dalga formlu takımın aşınma miktarları	93
Çizelge 5.29. Ti 6Al 4V malzeme için aşınma miktarları ve takım bazındaki değişimleri	97

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.30. Genel bağlamda ortalama takım performansı.....	99
Çizelge 5.31. İş malzemeleri için kesici takım kullanım önerileri ve işleme koşulları.....	100



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Talaş oluşum şeması ve kart modeli	15
Şekil 3.2. Frezeleme işleminde temel kuvvetler	16
Şekil 3.3. Frezeleme işlemindeki ana kesme kuvvetleri	16
Şekil 3.4. Yığıntı talaş oluşumu	17
Şekil 3.5. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi.....	18
Şekil 3.6. Parmak frezeler üstündeki aşınma	19
Şekil 3.7. Yüz aşınması a) Krater aşınması (KT 1), b) Basamaklı yüz aşınması (KT 2)	20
Şekil 3.8. Çentiklenme aşınması a) Düzenli çentiklenme (CH 1), b) Düzensiz çentiklenme (CH 2), c) Bölgesel çentiklenme (CH 3).....	21
Şekil 3.9. Pullanma aşınması	21
Şekil 3.10. Çatlak aşınmaları a) Tarak dişi şeklinde çatlaklar (CR 1), b) Paralel çatlaklar (CR 2), Düzensiz çatlaklar (CR 3)	22
Şekil 3.11. Tam bozulma aşınması	22
Şekil 3.12. Temel sonlu eleman türleri	23
Şekil 3.13. Temel üç boyutlu eleman yapıları	24
Şekil 4.1. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için deney düzeneği	27
Şekil 4.2. ISO 8688-2’de tavsiye edilen işleme şartları	28
Şekil 4.3. a) Aşınmanın belirlenmesi için oluşturulan sistem b) Zıgzag takım yolu	29
Şekil 5.1. C45 malzeme için bileşke kesme kuvvetleri	37
Şekil 5.2. GG25 malzeme için bileşke kesme kuvvetleri	37
Şekil 5.3. AISI 304 malzeme için bileşke kesme kuvvetleri	37
Şekil 5.4. C45 malzeme için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri	39
Şekil 5.5. GG25 malzeme için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri	39
Şekil 5.6. AISI 304 malzeme için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri	39

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Farklı geometrik formdaki dalga formlu takımların kesme kuvvetleri açısından kıyaslamaları a) C45 9. deney, b) GG25 9. deney, c) GG25 3. deney, d) AISI 304 9. deney	43
Şekil 5.8. Bütün iş malzemeleri için farklı geometrik formdaki dalga formlu takımların kesme kuvvetleri açısından kıyaslamaları.....	45
Şekil 5.9. AISI 316L malzeme için bileşke kesme kuvvetleri.....	50
Şekil 5.10. Ti 6Al 4V malzeme için bileşke kesme kuvvetleri.....	50
Şekil 5.11. AISI 316L malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.....	54
Şekil 5.12. Ti 6Al 4V malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri	55
Şekil 5.13. Ti 6Al 4V malzeme için bileşke kuvvet genlikleri değişimi	59
Şekil 5.14. Ti 6Al 4V malzeme için bileşke kuvvet frekansları değişimi	59
Şekil 5.15. AISI 316L malzeme için etki grafikleri a) Kesme kuvvetleri, b) Yüzey pürüzlülükleri.....	61
Şekil 5.16. Ti 6Al 4V malzeme için etki grafikleri a) Kesme kuvvetleri, b) Yüzey pürüzlülükleri	63
Şekil 5.17. AISI 316L malzeme için standart takımın aşınma davranışı.....	66
Şekil 5.18. AISI 316L malzeme için 6-550 dalga formlu takımın aşınma davranışı.....	69
Şekil 5.19. AISI 316L malzeme için 8-250 dalga formlu takımın aşınma davranışı.....	72
Şekil 5.20. AISI 316L malzeme için 4-450 dalga formlu takımın aşınma davranışı.....	75
Şekil 5.21. AISI 316L malzeme için 8-650 dalga formlu takımın aşınma davranışı.....	78
Şekil 5.22. Ti 6Al 4V malzeme için standart takımın aşınma davranışı.....	83
Şekil 5.23. Ti 6Al 4V malzeme için 6-550 dalga formlu takımın aşınma davranışı	85
Şekil 5.24. Ti 6Al 4V malzeme için 8-250 dalga formlu takımın aşınma davranışı	88
Şekil 5.25. Ti 6Al 4V malzeme için 4-450 dalga formlu takımın aşınma davranışı	91
Şekil 5.26. Ti 6Al 4V malzeme için 8-650 dalga formlu takımın aşınma davranışı	94
Şekil 5.27. İş malzemeleri açısından takım aşınma değişimleri	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Parmak frezelerde talaş açısı (α) ve ölçme derinliği (l).....	1
Resim 1.2. Helisel kesici kenar üzerinde dalgalı forma sahip parmak freze	2
Resim 2.1. Dalgalı forma sahip frezeler a) değişken helis açılı, b) kaba talaş, c) değişken aahelis ve talaş açılı	7
Resim 4.1. FEM modelleri a) Standard takım b) Dalga formulu takım c) Ağ yapısı	32
Resim 5.1. GG25 malzemesi ve 3. deney şartları için Von-Mises gerilim dağılımları a) standart, b) 6-550, c) 8-250, d) 4-450, e) 8-650.....	46
Resim 5.2. 9. deney şartları için Von-Mises gerilim dağılımları a) AISI 304 malzemesi 4-450, b) C45 malzemesi 8-650.....	47
Resim 5.3. Üçüncü aşamada kullanılan dalga formulu kesici takımlar a) 6-550, b) 8-250, c) 4-450, d) 8-650.....	48
Resim 5.4. 6-550 dalga formulu takım için yığıntı talaş görüntüleri, a) yan yüzey/pozitif talaş aaçısı, b) yan yüzey/negatif talaş açısı, c)talaş yüzeyi/pozitif talaş açısı, d) talaş ayüzeyi/negatif talaş açısı.....	53
Resim 5.5. Kistler® 9272 dinamometre ham kesme kuvveti salınımları	58
Resim 5.6. Takım aşınma yüzeyleri ve ölçüm düzeneği	65
Resim 5.7. AISI 316L malzemeden 288 cm ³ talaş kaldırma oranı için standart takımda gözlenen aşınmalar (X10)	67
Resim 5.8. AISI 316L malzemeden 224 cm ³ talaş kaldırma oranı için standart takımda gözlenen yan yüzey/uç kısmı bölgesel aşınma (X10).....	67
Resim 5.9. AISI 316L malzemeden 320 cm ³ talaş kaldırma oranı için 6-550 dalga formulu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	70
Resim 5.10. AISI 316L malzemeden 256 cm ³ talaş kaldırma oranı için 6-550 dalga formulu takımda gözlenen yan yüzey/son kısmı bölgesel aşınma (X10).....	71
Resim 5.11. AISI 316L malzemeden 320 cm ³ talaş kaldırma oranı için 8-250 dalga formulu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	73
Resim 5.12. AISI 316L malzemeden 288 cm ³ talaş kaldırma oranı için 4-450 dalga formulu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	76
Resim 5.13. AISI 316L malzemeden 320 cm ³ talaş kaldırma oranı için 8-650 dalga formulu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	79

Resim	Sayfa
Resim 5.14. AISI 316L malzemeden 128 cm ³ talaş kaldırma oranı için 8-650 dalga formlu takımda gözlenen talaş yüzeyi/orta/pozitif talaş açılı kısmı bölgesel aşınma aaıgörüntüsü (X10)	80
Resim 5.15. Ti 6Al 4V malzemeden 200 cm ³ talaş kaldırma oranı için standart takımda gözlenen aşınmalar (X10).....	84
Resim 5.16. Ti 6Al 4V malzemeden 200 cm ³ talaş kaldırma oranı için 6-550 dalga formlu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	86
Resim 5.17. Ti 6Al 4V malzemeden 200 cm ³ talaş kaldırma oranı için 8-250 dalga formlu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	89
Resim 5.18. Ti 6Al 4V malzemeden 160 cm ³ talaş kaldırma oranı için 4-450 dalga formlu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	92
Resim 5.19. Ti 6Al 4V malzemeden 200 cm ³ talaş kaldırma oranı için 8-650 dalga formlu takımda gözlenen aşınmalar (X10)	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Başlangıç akma dayanımı (MPa)
Ar	Eksenel boşluk açısı (°)
a	Talaş açısı (°)
a_a	Eksenel kesme derinliği (mm)
a_r	Radyal kesme derinliği (mm)
B	Pekleşme katsayısı (pekleşme modülü) (MPa)
b	Radyal boşluk açısı (°)
C	Gerinim oranı bağımlılık katsayısı
c	Helis açısı (°)
Di	Çekirdek çapı (mm)
Do	Dış çap (mm)
F_f	Sürtünme kuvveti (N)
F_n	Sürtünen yüzeyler arasındaki normal kuvvet (N)
F_x	İlerleme kuvveti (N)
F_y	Radyal kuvvet (N)
F_z	Eksenel kuvvet (N)
f	İlerleme miktarı (mm/diş)
L_t	Yanal uzunluk (mm)
m	Termal yumuşama katsayısı
n	Örnekleme sayısı
n	Pekleşme üsteli
R	Bileşke kesme kuvveti (N)
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)
Rc	Köşe pahı (mm)
Rt	Profilin maksimum yüksekliği (μm)
Rp	Maksimum profil tepe yüksekliği (μm)
Rz	Düzensizliklerin 10 nokta yüksekliği (μm)
r	Kenar yarıçapı (mm)

Simgeler**Açıklamalar**

T	Sıcaklık (K)
T_{erime}	Erime sıcaklığı (K)
T_{oda}	Oda sıcaklığı (K)
tl	Kesici ağız boyu (mm)
wol	Kesici ağız genişliği (mm)
v	Kesme hızı (m/dk)
λ_c	Kesim uzunluğu (mm)
σ	Akış gerilimi (MPa)
ε	Plastik gerinim
$\dot{\varepsilon}$	Gerinim oranı
$\dot{\varepsilon}_0$	Referans gerinim oranı (s ⁻¹)
μ	Sürtünme katsayısı

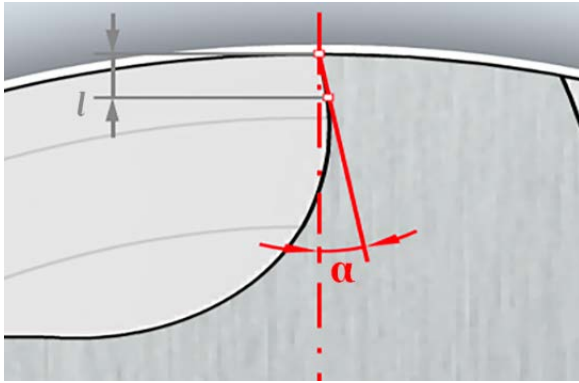
Kısaltmalar**Açıklama**

AISI	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir Çelik Enstitüsü)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
ISO	International Organization For Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
US	United States Standard System (Birleşik Devletler Standartlar Sistemi)

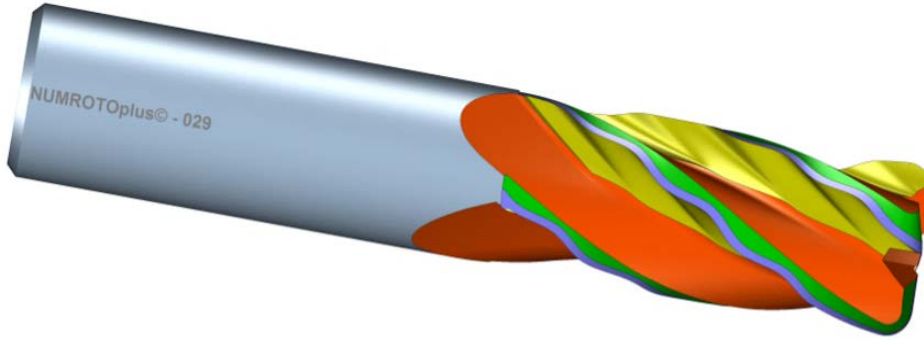
1. GİRİŞ

Konu, kapsam ve amaç

Frezeleme, yüksek üretim hızları ve çeşitli şekilleri oluşturabilme özellikleri sayesinde talaşlı imalat operasyonları arasında oldukça geniş ve yoğun kullanım alanına sahip bir üretim yöntemidir. Frezeleme takımlarından biri olan parmak frezelerde her bir helisel kesici kenar, diş olarak ifade edilir. Parmak frezenin izlediği yol veya frezenin formuna bağlı olarak iş parçası üzerindeki farklı geometrik unsurların oluşturulması mümkündür. Frezeleme, kesintili bir işleme yöntemidir. Parmak frezenin her bir devrinde kesici ağzı oluşturan dişler iş parçasına girer, bir miktar talaş kaldırır ve iş parçasını terk eder. Bu kesintili kesme işlemi sürecinde, takımın her bir devrinde, bir çarpma kuvveti ve ısı şok çevrimi meydana getirir. Takım geometrisi bu koşullara dayanacak tarzda tasarlanmalı ve takım malzemesi buna uygun olarak seçilmelidir [1-5]. Parmak freze üzerinde, talaş kaldırma mekanizmasına ve kesme performansına etki eden geometrik parametreler mevcuttur. Bu geometrik parametrelerden talaş açısının önemi oldukça büyüktür [4, 6]. Talaş açısı, takım talaş yüzeyi üzerinde talaşın şekillenmesini ve yönlendirilmesini sağlayan kesici kenar arkasındaki açıya verilen isimdir. Diğer bir tanımlama ile iş parçasının yüzey normali ile talaş yüzeyi arasındaki açıdır (Resim 1.1). Bu açı pozitif, negatif ve yeni yaygınlaşmaya başlayan takımlarda olduğu gibi değişken olabilir. Değişken talaş açısı, değişken helis açısını da beraberinde getirmektedir. Değişken talaş ve helis açılı bu takımlara dalga formu parmak frezeler de denebilir (Resim 1.2) [7].



Resim 1.1. Parmak frezelerde talaş açısı (α) ve ölçme derinliği (l)



Resim 1.2. Helisel kesici kenar üzerinde dalgalı forma sahip parmak freze

Bu tez çalışmasında; talaş açısının işleme performansı üzerindeki büyük etkisi dikkate alınarak, helisel kesici kenar boyunca değişken talaş ve helis açılarının birlikte diğer bir deyişle dalgalı bir formda uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla; standart parmak frezelerdeki kesici kenar üzerinde sabit talaş ve helis açılı bir tasarımın yerine -6 ila +22 derece arasında değişen talaş açısına ve 36 ila 50 derece arasında değişen helis açısına sahip dalga formlu parmak frezelerin farklı malzemeler üzerindeki işleme performansları, standart formda parmak freze ile kıyaslanmıştır. Dalga formu ve bu formla elde edilen değişken talaş ve helis açısı ile kesme kuvvetlerinin azaltılması, yüzey kalitesinin artırılması, kesici kenar mukavemetinin ve takım ömrünün artırılması amaçlanmış, takımın kesintili işlemlerde darbe dayanımının, kesme kararlılığının artırılması ve kısa talaş oluşumu sağlanarak talaşın daha kolay bir şekilde tahliye edilmesi öngörülmüştür.

Çalışma planı

Bu tez kapsamında; dört aşamadan oluşan bir çalışma süreci planlanmıştır.

Birinci aşamada; standart ve referans olarak belirlenen dalga formlu parmak frezeler ile yapılmış deneysel bir çalışmadan [7] alınan kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük ve takım aşınma verileri ışığında, aynı kesici takımların FEM (Finite Element Method) ile simülasyonları yapılmıştır. Yapılan bu nümerik ön çalışma sayesinde hem takımların kesme kuvvetleri açısından işleme performansları kıyaslanmış hem de doğrulanmış bir FEM çözüm sistemi oluşturulmuştur. Önceki çalışmada iş malzemesi olarak, ISO 8688-2 standardının [8] tavsiye ettiği C45 alaşımsız ıslah çeliği ve GG25 dökme demir malzemeleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın bu aşamasında, önceki çalışmada kullanılmış aynı kesici takımların, işlenebilirliği daha zor olan AISI 304 paslanmaz çelik malzeme ile kesme

kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. FEM analizleri yapılarak AISI 304 malzemesi için de doğrulanmış bir FEM çözüm sistemi oluşturulmuştur.

İkinci aşamada; dalga formunun farklı geometrik varyasyonları, birinci aşamada oluşturulan doğrulanmış FEM çözüm sistemi ile kesme kuvvetleri açısından kıyaslanıp en iyi ve en kötü dalga formlu kesici takımlar belirlenmiştir. FEM analizlerinde C45, GG25 ve AISI 304 malzemeleri kullanılmıştır. Bu aşamada, FEM analizleri sayesinde kesici takım, malzeme maliyetlerinden ve zamandan tasarruf edilmiştir.

Üçüncü aşamada; standart kesici takım ve ikinci aşamada belirlenen en iyi iki ve en kötü iki dalga formlu takımların, AISI 316L ve Ti 6Al 4V (Titanyum Grade 5) malzemeleri üzerinde farklı kesme parametreleri ile kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi açısından işleme performansları deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları ile varyans ve regresyon analizleri yapılarak takım aşınma deneylerinin yapılacağı en uygun kesme parametreleri hem deneysel hem de istatistiksel olarak belirlenmiştir.

Dördüncü aşamada; üçüncü aşamada deneysel ve istatistiksel olarak belirlenen en uygun kesme parametreleriyle, standart ve dalga formlu takımlar kullanılarak AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri üzerinde takım aşınma deneyleri yapılmıştır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ VE ARAŞTIRMANIN ÖNEMİ

Dalga formlu parmak frezeler

Literatürde, dalga formlu parmak frezeler hakkında sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Takım geometrisi ile ilgili olarak, farklı helis açılı takım tasarımlarının ve farklı geometrilere sahip kaba talaş takımlarının işleme performansları, kesme kararlılıkları ve matematiksel modeli oluşturulan takımların nümerik çözüm sistemlerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur.

Gowthaman ve Jagadeesha yaptıkları çalışmada, pozitif, sıfır ve negatif talaş açılı parmak frezelerin Nimonic 263 nikel alaşımı üzerindeki kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü bakımından işleme performanslarını deneysel ve varyans analizi ile incelemişlerdir. Kuvvetler ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili işleme parametresinin kesme hızı olduğunu tespit etmişlerdir. Negatif radyal talaş açılı parmak frezeden daha yüksek kesme kuvvetleri beklenirken takımdaki pozitif eksenel talaş açısı sebebiyle daha düşük kesme kuvvetleri elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Buna ek olarak negatif talaş açılı parmak frezelerden daha düşük yüzey pürüzlülükleri gözlemlemişlerdir [9].

Aslantas ve Alatrushi yaptıkları çalışmada, farklı talaş, helis açılara ve farklı kesici ağız sayılarına sahip parmak frezelerin işlenmesi zor Inconel 718 malzeme üzerindeki kesme kuvveti ve takım aşınması davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, helis açısı artışının kesme kuvvetlerini azalttığı ve takım aşınmasının arttığını, kesici ağız sayısının artışı ile kesme kuvvetleri ve takım aşınmasının azaldığını, pozitif eksenel talaş açısının kesme kuvvetlerini düşürdüğü, yan yüzey aşınmasını artırdığı ve takım çapını küçülttüğünü, negatif eksenel talaş açısının takım aşınması üzerinde pozitif etkilerinin olduğunu ifade etmişlerdir [10].

Okafor ve Sultan yaptıkları çalışmalarda, değişken helis açısına ve altı kesici ağza sahip dalga formlu bir parmak frezenin dalga boyu, dalga genliği, helis açısı vb. geometrik parametrelerini kapsayan bir matematiksel model kurmuşlardır. Kurdukları model üzerinden, nümerik çözüm yöntemiyle kesme kuvvetini elde etmişlerdir. Sonrasında, MQL (Minimum Quantity Lubrication) uygulamaları ve standart emülsiyon kesme sıvıları ile

farklı kesme hızları altında deneysel çalışmalar yaparak elde ettikleri sonuçlar ile nümerik analiz sonuçlarını doğrulamışlardır. Sonuç olarak, helis açısı, dalga boyu, dalga genliği ve kesici uç düz başlangıç uzunluğu parametrelerinin, kesme kuvvetine olan etkisini deneysel ve nümerik çözümler ile belirlemişlerdir. Çalışmalarında işlemesi zor bir malzeme olan Inconel 718 alaşımını kullanmışlardır [11, 12]

Dombovari ve Stepan yaptıkları çalışmalarda, değişken helis açısına ve dört kesici ağıza sahip dalga formlu bir parmak frezenin genel bir matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Kurulan matematiksel model ile kesici takımların düşük ve yüksek kesme hızları altındaki kararlılık davranışlarını tahmin etmişlerdir [13, 14]

Korovin ve diğerleri yaptıkları çalışmada, Ti 10V 2Fe 3Al alaşımını değişken helis açılı ve dört kesici ağızlı dalga formlu takım ve standart takımlar ile işleyerek kesme enerjisini, yüzey sertleşme davranışını ve aşınma direncini incelemişlerdir. Sonuç olarak dalga formlu takımların standart takımlara göre daha düşük kesme enerjisi ile işlenerek aşınma direncinin arttığı ve işlenen yüzeylerde daha az pekleşme meydana geldiğini belirtmişlerdir [15].

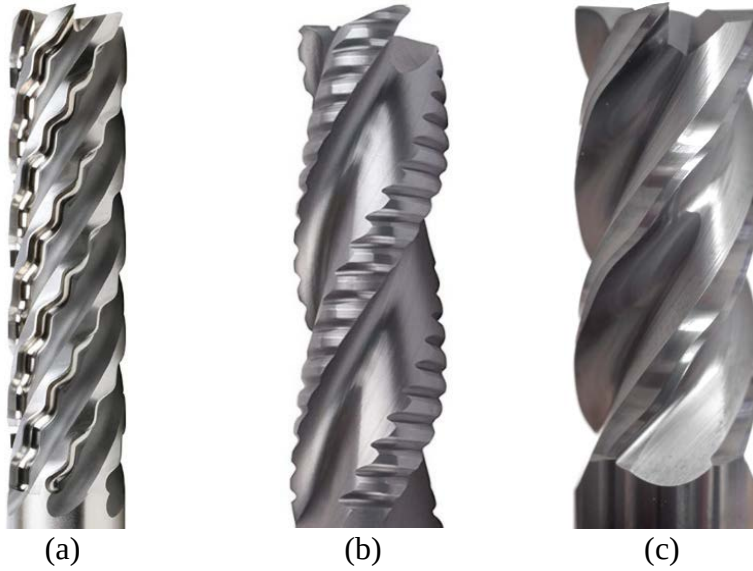
Song ve diğerleri farklı kesici ağız açlarına ve farklı helis açlarına sahip parmak frezelerin, kesme kuvvetlerine ve kesme kararlılığına etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Helis açısı artışının, frezeleme performansını iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte farklı kesici ağızlarda kullanılan farklı helis açıları sayesinde kesici takımın işleme kararlılığının artabildiğini göstermişlerdir [16].

Wan ve diğerleri yaptıkları çalışmada farklı helis açılarında parmak frezeleri modellemişler ve helis açısının değişiminin kesme kuvvetlerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Frezeleme işleminde belirlenen kesme derinliği, kesici ağız sayısı ve takım çapı parametrelerine bağlı olarak, minimum kesme kuvveti elde etmek için gerekli helis açısının hesaplanabileceğini ifade etmişler ve bu parametreleri kullanarak optimum helis açısının belirlenebildiği bir matematiksel model türetmişlerdir [17].

Burek ve diğerleri yaptıkları çalışmada farklı dalgalı forma sahip kaba talaş takımları kullanarak kesme kuvvetleri, titreşim genlikleri ve talaş formları açısından işleme davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. İş malzemesi olarak havacılık uygulamalarında tercih edilen AlZn5.5CuMg alüminyum alaşımını kullanmışlardır. Sonuç

olarak helisel kesici kenar üzerinde farklı dalgalı forma sahip kaba talaş takımlarda standart takımlara göre düşük kesme kuvvetleri, kısa ve kopuk talaş oluşumu ve yüksek titreşim elde etmişlerdir [18].

Literatürdeki çalışmalardan anlaşıldığı gibi, “dalgalı form” veya “dalgalı kesim” olarak adlandırılan kesici takımlar farklı biçimlerde olabilmektedir. Bu dalgalı kesim özelliğine sahip takımlarda genellikle değişken helis açısı uygulamaları (Resim 2.1a) ve dalgalı kaba talaş takımları (Resim 2.1b) öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen takımlardaki dalgalı formun, helisel kesici kenar boyunca değişken helis açısıyla birlikte değişken talaş açısı ile sağlanmış olması araştırmanın özgün yönünü ortaya koymaktadır (Resim 2.1c). Ayrıca bu takım geometrisi ile talaşlı imalatta uzun kesme boyu/düşük kesit alanı çerçevesinde karşılaşılan zorluklardan biri olan titreşim ve buna bağlı işlenen malzemede düşük yüzey kalitesi sorununa da çözüm bulunması hedeflenmiştir. Bunlara ek olarak kesme sırasında iş parçasıyla temas halinde olan kesici kenar yüzeyinin farklı bölgelerindeki farklı talaş açıları ile kısa talaş oluşumu sağlanarak kolay talaş tahliyesi ve düşük kesme kuvvetleri elde edilerek takım ömründe artış sağlanması öngörülmüştür. Dalga formu kesici takımlar ile ilgili literatür çalışmaları Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.



Resim 2.1. Dalgalı forma sahip frezeler a) değişken helis açılı, b) kaba talaş, c) değişken helis ve talaş açılı

Çizelge 2.1. Dalga formlu takımlar ile ilgili literatür özeti

Kaynak	İşlem	Faktörler	İş malzemesi	Kesici takım	Yöntem	İnceleme
[9]	Frezeleme	Kesme hızı İlerleme miktarı	Nimonic 263	Farklı talaş açıları	Deneyssel Varyans analizi	Kesme kuvvetleri Yüzey pürüzlülüğü
[10]	Frezeleme	Takım geometrisi	Inconel 718	Farklı talaş, helis açısı ve kesici kenar sayısı	Deneyssel	Kesme kuvvetleri Takım aşınması
[11, 12]	Frezeleme	Kesme hızı Kesme sıvıları Takım geometrisi	Inconel 718	Değişken helis açısı	Deneyssel	Kesme kuvvetleri
[13, 19]	Frezeleme	Takım geometrisi	-	Değişken helis açısı	Analitik	Kararlılık
[15]	Frezeleme	Takım geometrisi	Titanyum alaşımı	Değişken helis açısı	Deneyssel	Kesme kuvvetleri
[16]	Frezeleme	Takım geometrisi Kesme hızı	Alüminyum alaşımı 7050	Değişken helis açısı	Deneyssel	Kesme kuvvetleri Kararlılık
[17]	Frezeleme	Kesme derinliği İlerleme miktarı Helis açısı	Al7050-T7451	Farklı helis açıları	Analitik Deneyssel	Kesme kuvvetleri
[18]	Frezeleme	Kesme derinliği İlerleme miktarı Takım geometrisi	AlZn5.5CuMg	Dalga formlu kaba talaş	Deneyssel	Kesme kuvvetleri Titreşim genliği Talaş formları

Endüstride, dalgalı formda parmak freze üreten firmalar incelendiğinde bu formlarda kesici takımların üretiminin henüz çok az sayıda firma tarafından üretildiği ve bu firmaların da kataloglarında sınırlı sayıda dalgalı formda parmak freze modellerinin olduğu görülmektedir. Bu firmalar; *Karcan Cutting Tool*, *WNT Ceratizit Group*, *Melin Tool Company*, *WIDIA Products Group*, *Minicut International Inc.*, *Niagara Cutter*, *Minicut International Inc.* ve *TaeguTec Ltd.* olarak örneklenebilir. 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 belirtmektedirler [20-25]. 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.

Talaşlı imalat, sonlu elemanlar metodu ve istatistiksel metotlar

Literatürde talaşlı imalat ile ilgili yapılmış birçok karşılaştırmalı deneysel, FEM simülasyonları, istatistiksel ve YSA analiz çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, yüksek kesme kuvvetleri, düşük yüzey kalitesi, kısa takım ömrü ve titreşim gibi talaşlı imalat işlemlerinde karşılaşılan zorluklara çözüm aranmaktadır. Karşılaşılan bu zorluklara sebep olan takım geometrisi, takım kaplaması, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinlikleri gibi işleme parametrelerine odaklanıldığı gözlenmiştir.

Maurel-Pantel ve diğerleri Johnson-Cook malzeme modeliyle modelledikleri AISI 304L malzemesi ile deneysel ve nümerik olarak köşe frezeleme operasyonu çalışmışlardır. FEM simülasyon çözüm süresini azaltmak ve doğruluk oranını artırmak amacıyla geometri, mesh yapısı, sürtünme vb. parametrelerde geliştirme ve basitleştirme girişimlerinde bulunmuşlardır [26].

Wu ve Zhang Ti 6Al 4V malzemesinin frezeleme işlemi ile stress dağılımları, kesme kuvvetleri, sıcaklıklar ve talaş formları bakımından işlenebilirlik performansını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Simülasyonlarda iş parçasını tanımlamak için Johnson-Cook malzeme modelini kurmuşlardır [27].

Rao ve diğerleri yaptıkları çalışmada Ti 6Al 4V malzemesini kaplamasız karbür parmak frezelerle işleyerek kesme enerjisi, yüzey bütünlüğü ve takım performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları FEM simülasyonlarıyla doğrulayarak ve destekleyerek takım talaş temas yüzeyi sıcaklıkları, temas gerilimleri ve talaş hızlarına bağlı parametrik bir takım aşınma modeli kurmuşlardır [28].

Hanson ve diğerleri polikarbonatların frezeleme işleminde meydana gelen çapak oluşumlarının nedenlerini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. İşleme parametrelerinin, takım aşınmasının ve takım kaplamalarının çapak oluşumu üzerindeki etkilerini tespit etmişlerdir. Çapak oluşumlarını, FEM simülasyonları ile de doğrulamayı ve deneysel çalışmaları desteklemeyi başarmışlardır [29].

Chagas ve Machado yaptıkları çalışmada, östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğini kolaylaştırmak amacıyla MnS eklenmesinin mikro yapı ve işlenebilirlik üzerindeki etkilerini FEM simülasyonları ile incelemişlerdir [30]. Zhou ve diğerleri ise çalışmalarında, NAK 80 çeliğini Johnson-Cook malzeme modeli ile modellemişler ve micro frezeleme işlemindeki kesme kuvvetlerini deneysel ve FEM simülasyonları ile incelemişlerdir [31].

Mohammed ve diğerleri CGI (compact graphite iron) malzemesinin işleme optimizasyonuna temel oluşturabilmesi için talaş kaldırma sırasındaki davranışlarını nümerik olarak incelemişlerdir. Malzeme mikroyapısı içerisinde kompakt grafit parçacıkları bulunan bir mesh dokusu modelleyip yapılan FEM simülasyonları sonucunda segmentli talaş yapısını deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [32].

Chagas ve diğerleri AISI 304 malzemesi ile içerisinde micro çatlaklar bulunan bir mesh yapısı modelleyip talaş kaldırma sırasındaki çatlak oluşumu, ilerlemesi ve stress dağılımlarını FEM simülasyonları ile incelemişlerdir [33]. Bosetti ve diğerleri ise AISI 304 paslanmaz çelik iş parçasının Johnson-Cook malzeme modelini ve Tresca's parametrelerini termomekanik bir model oluşturup FEM simülasyonları ile belirlemişlerdir [34].

Çiftçi ve Gökçe farklı molibden alaşımlarının frezelemesi işleminde, kesici takım ve kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve yüzey kalitesine üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Varyans ve regresyon analizleri ile uygun kesici takım ve optimum kesme parametrelerini belirlemişlerdir [35].

Hazir ve diğerleri *Abies nordmanniana* türü doğal ahşap malzemesinin frezeleme işlemi için kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme derinliği, takım çapı ve kesme yönü parametrelerinden oluşan beş faktör-iki seviyeli tam faktöriyel deney tasarımı kurarak kesme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri deneysel verileri varyans ve regresyon analizi ile değerlendirerek yüzey kalitesine etki eden optimum işleme parametrelerini tespit etmişlerdir [36].

Ghalme ve diğerleri cam elyaf takviyeli polyester (GFRP) malzemesinin frezeleme işleminde, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği parametrelerinin yüzey kalitesine etkisini varyans ve regresyon analizleri belirlemişlerdir [37]. Muthukrishnan ve Davim Al-SiC metal matrix kompozit malzemesinin PCD (polycrystalline diamond) takımla tornalama

işleminde, farklı işleme parametreleri ile yüzey pürüzlülük değerlerini deneysel olarak elde etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular ile YSA ve Varyans analizleri yaparak hem deneysel sonuçları tahmin edip hem de en yüksek yüzey kalitesi için optimum işleme parametrelerini tespit etmişlerdir [38].

Sangwan ve diğerleri Ti 6Al 4V malzemesinin tornalama işleminde, farklı kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği parametreleri ile işleyerek yüzey kalitesini incelemişlerdir. Deneysel sonuçları, YSA ve GA (genetik algoritma) analizleri ile kıyaslayıp hem bu iki yöntemin tahmin yeteneklerini karşılaştırmış hem de maksimum yüzey kalitesi için gerekli işleme parametrelerini belirlemişlerdir [39].

Khorasani ve Yazdi Al 7075 ve St 52 malzemelerinin frezeleme işleminde, farklı işleme parametreleri ile deneysel olarak elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini YSA analizi yaparak tahmin etmişlerdir. YSA metodu ile deneysel ve tahmin değerleri arasında %99'un üzerinde oranla uyuşma elde etmişlerdir [40].

Zain ve diğerleri Ti 6Al 4V malzemesini kaplamasız ve kaplamalı karbür kesici takımlarla frezeleme işleminde, üç faktör-beş seviyeli deney tasarımı ile yüzey kalitesini araştırmışlardır. Deneysel veriler ile varyans ve regresyon analizi ve YSA analizi yaparak bu metotların yüzey kalitesi tahmin oranlarını kıyaslamışlardır [41].

Yapılan çalışmalardan görüleceği gibi, deneysel yöntemlerin yanında, nümerik ve istatistiksel metotların kullanımı oldukça yaygındır. Bu yöntemlerin sayesinde, işleme parametrelerinin doğru seçilmesi, etki oranlarının ve olumsuz etkilerinin tespit edilmesi ile çözüm hassasiyetinin ve güvenilirliğinin artırıldığı gözlenmiştir [42, 43]. Çalışmalarda genel olarak; Varyans analizi, Taguchi, Tepki Yüzey Metodu (RSM), lineer, çoklu, ikinci derece ve üstel regresyon modelleme, YSA vb. yöntemlerin kullanılmıştır [35-37, 44-47]. Dolayısıyla bu metotlar, talaşlı imalat çalışmalarında deneysel çalışmaları destekleyici ve doğrulayıcı amaçlarla verimli bir şekilde kullanılabilir. Talaşlı imalat, sonlu elemanlar metodu ve istatistiksel metotlar ile ilgili literatür çalışmaları Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Talaşlı imalat, sonlu elemanlar metodu ve istatistiksel metotlar ile ilgili literatür özeti

Kaynak	İşlem	Faktörler	İş malzemesi	Yazılım	Yöntem	İnceleme
[26]	Frezeleme	FEM parametreleri	AISI 304L	LS-DYNA v970	Deneysel FEM	Kesme kuvvetleri Yüzey pürüzlülüğü
[27]	Frezeleme	İlerleme miktarı Kesme süresi	Ti 6Al 4V	ABAQUS	Deneysel FEM	Kesme kuvvetleri Sıcaklık dağılımı Talaş formları
[28]	Frezeleme	Kesme hızı	Ti 6Al 4V	AdvantEdge	Deneysel FEM	Kesme enerjisi Yüzey bütünlüğü
[29]	Frezeleme	İlerleme miktarı Kesme derinliği Takım kaplaması	Polikarbonat	AdvantEdge	Deneysel FEM	Takım aşınması Çapak oluşumu
[30]	Tornalama	Kesme hızı Malzeme	AISI 303 AISI 304	ABAQUS	Deneysel FEM	Kesme kuvvetleri Sıcaklık
[31]	Frezeleme	Kesme hızı İlerleme miktarı	NAK 80	AdvantEdge	Deneysel FEM	Kesme kuvvetleri
[32]	Tornalama	Kesme hızı İlerleme miktarı	Perlitik ve Ferritik dökme demir	ABAQUS	Deneysel FEM	Kesme kuvvetleri Talaş morfolojisi
[33]	Tornalama	FEM yazılımı	AISI 304	Deform ABAQUS	Deneysel FEM	Kesme kuvvetleri Talaş morfolojisi
[34]	Tornalama	Kesme hızı İlerleme miktarı FEM model	AISI 304	Deform	Deneysel FEM	Kesme kuvvetleri Talaş morfolojisi
[35]	Frezeleme	Kesme hızı İlerleme miktarı Kesici takım	Saf molibden TZM MHC	Minitab	Deneysel Varyans Regresyon	Kesme kuvvetleri Yüzey pürüzlülüğü
[36]	Frezeleme	Kesme hızı İlerleme miktarı Kesme derinliği Takım çapı Kesme yönü	Doğal ahşap	Minitab	Deneysel Varyans Regresyon	Yüzey pürüzlülüğü
[37]	Frezeleme	Kesme hızı İlerleme miktarı Kesme derinliği	GFRP	Minitab	Deneysel Varyans Regresyon	Yüzey pürüzlülüğü
[38]	Tornalama	Kesme hızı İlerleme miktarı Kesme derinliği	Al-SiC	Minitab MATLAB	Deneysel Varyans Regresyon YSA	Yüzey pürüzlülüğü İşleme parametreleri
[39]	Tornalama	Kesme hızı İlerleme miktarı Kesme derinliği	Ti 6Al 4V	MATLAB	Deneysel YSA Genetik algoritma	Yüzey pürüzlülüğü İşleme parametreleri
[40]	Frezeleme	Kesme hızı İlerleme miktarı Kesme derinliği	AL 7075 St 52	C sharp	Deneysel YSA	Yüzey pürüzlülüğü Titreşim
[41]	Frezeleme	Kesme hızı İlerleme miktarı Talaş açısı Takım kaplaması	Ti 6Al 4V	SPSS MATLAB	Deneysel Varyans Regresyon YSA	Yüzey pürüzlülüğü

İşlenmesi zor malzemeler

Bu tez çalışmasında, ana iş malzemeleri olarak işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan Krom-Nikel grubu östenitik paslanmaz çelik sınıfından AISI 316L ve titanyum alaşımlarından Ti 6Al 4V malzemeleri kullanılmıştır [4, 48-50].

Paslanmaz çelikler, yüksek mekanik dayanım, yüksek korozyon direnci ve düşük ısı iletkenlik özellikleri ile kimya, sağlık, nükleer, elektronik vb. birçok endüstride tercih edilen mühendislik malzemeleridir [51]. 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 ısı iletkenlik özellikleri ile AISI 316L, işlenebilirliği zor bir malzemedir [52-54]. Bu işleme zorlukları, yüksek kesme kuvvetleri, yüksek sıcaklık, kalıntı gerilmeler, düşük yüzey kalitesi ve hızlı takım aşınması gibi sorunlara yol açmaktadır [55, 56].

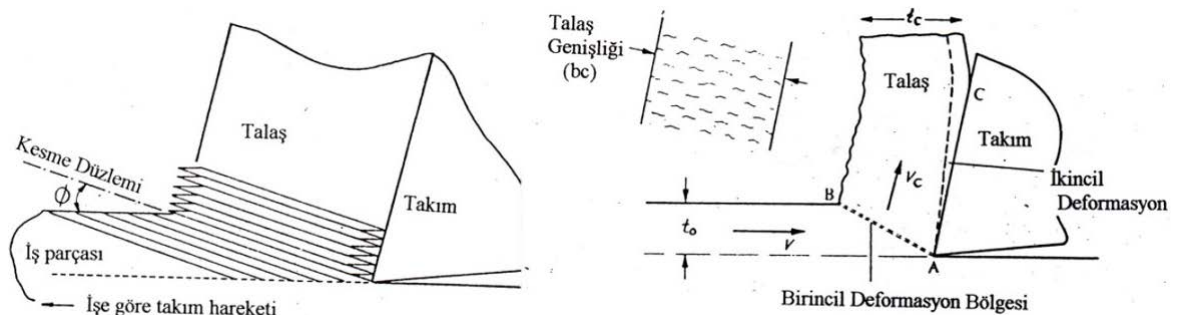
Titanyum ve alaşımları, mükemmel korozyon direnci, yüksek mekanik dayanım ve düşük yoğunluk özellikleri ile uzay, kimya, biyomedikal vb. endüstrilerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [57]. Ti 6Al 4V alaşımı, düşük termal iletkenliği, yüksek kimyasal reaktivitesi ve düşük elastiklik modülü özelliklere sahiptir [58, 59]. Bu özellikler talaşlı imalat sürecinde, takım-talaş temas yüzeyinin küçük olma eğilimi, yüksek kesme sıcaklığı, termal plastik kararsızlık, dilimli (segmentli) talaş yapısı ve ısıyı talaş ile uzaklaştıramama gibi işleme zorlukları yaratmaktadır [50, 60, 61]. Bu işleme zorlukları, yüksek kesme kuvvetleri, hızlı kesici kenar aşınması, adhesyon (yapışma aşınması), yığıntı talaş, kaynaklanma aşınması ve düşük yüzey kalitesi gibi sorunlara yol açmaktadır [50, 58, 59]. Bu tez çalışmasında, dalga formlu takımlarda bulunan pozitif ve negatif değişken talaş açısı ve değişken helis açısının kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım aşınması değişimlerine etkisinin belirlenmesi ve AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemelerin işleme sorunlarına çözüm bulunması amaçlanmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Frezeleme Mekanikliği ve Kesme Kuvvetleri

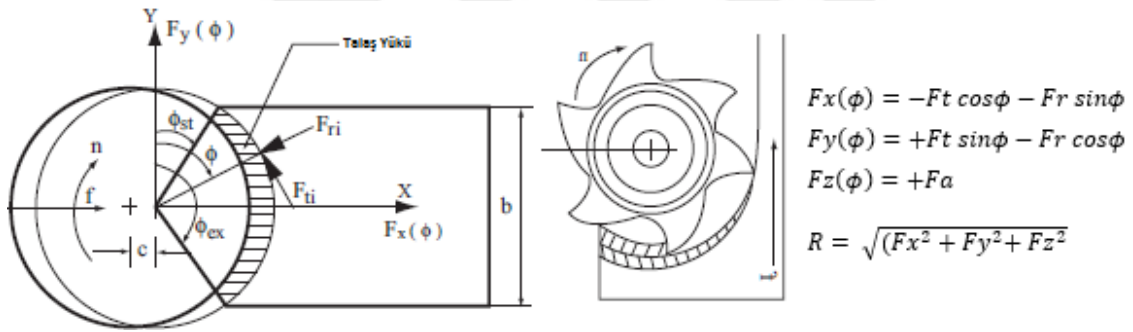
Talaşlı imalat; en sade açıklamayla metal, polimer, kompozit ve doğal ahşap gibi malzemelerin iç veya dış hacimlerinden malzeme eksilterek şekil verme metodudur. Talaşlı imalat süreci; uygun takım tezgahlarında, belirli kesici takımlar kullanılarak şekil verilmek istenilen bir mühendislik malzemesinden talaş kaldırarak gerçekleştirilir. Talaşlı imalat, otomotiv, uzay, havacılık, ev aletleri vb. büyük endüstrilerde, metallerin, alaşımların ve diğer mühendislik malzemelerinin işlenmesi sürecinde; dövme, döküm ve haddeleme gibi şekil verme yöntemleri ile üretilmiş ara mamullerin istenilen son geometriye ulaşılmasından, son derece önemli bileşenlerin ultra hassas işlenmesine kadar birçok üretim faaliyetinde çok önemli bir rol oynar [4]. Tornalama frezeleme, delme ve vargelleme operasyonları talaşlı imalat metotlarına örnek olarak verilebilir.

Talaş kaldırma sürecinde talaş oluşumu, “kart modeli” teorisine göre birincil deformasyon bölgesindeki kesme düzlemi boyunca meydana gelir. Takım, kesme düzlemine ulaşana kadar malzeme, elastik şekil değiştirir. Plastik deformasyon ise bu düzlem üzerinde başlar ve kesme düzlemleri boyunca devam eder. Bu şekilde kaldırılan malzeme parçasına “talaş” denir. Kesme yönü (takım hareketi) ile kesme düzlemi arasındaki açığa “kesme düzlem açısı” denir. İş parçasından ayrılan talaşın genişliği (t_c), henüz kesilmemiş talaşın genişliğinden (t_o) büyüktür. Takım, kesme yönünde kesme hızı (V) ile ilerler ve talaş, “ V_c ” hızı ile uzaklaşır. Takım yüzeyi boyunca yapışma ve sürtünme etkisiyle oluşan bölgeye ikincil deformasyon bölgesi denir (Şekil 3.1).

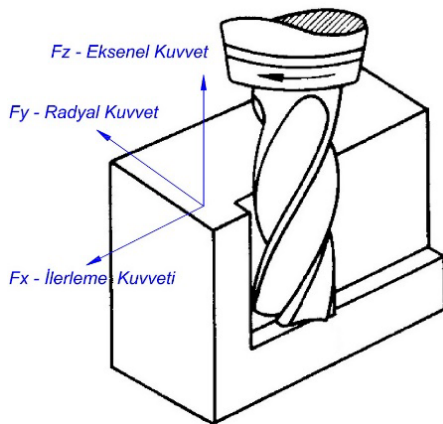


Şekil 3.1. Talaş oluşum şeması ve kart modeli

Önemli talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan frezeleme metodunda; tablaya sabitlenen iş parçasına doğru, dönen bir iş miline tutturulan kesici takım, doğrusal ve/veya dairesel hareketlerle yaklaştırılarak talaş kaldırılır. Frezeleme işlemlerinin önemli bir özelliği, bir veya birden fazla kesici kenara sahip olan kesici takımın hareketlerinin aralıklı olmasıdır. Her bir kesici kenar, takımın bir devrinin yarısından daha az bir sürede kesme işlemi yapar. İşlem sürecinde kesici kenarlar, periyodik darbelere maruz kalarak yüksek miktarda gerilim ve ısı meydana gelir [4]. Frezeleme işleminin mekaniğini anlamak için Şekil 3.2’de gösterilen basit bir frezeleme işleminden yola çıkılabilir. Talaş kaldırma işlemini gerçekleştirmek için kesme düzleminde meydana gelen dirençlere karşı, kesici takıma talaş kaldırma kuvveti uygulanır. Frezelemede kesici kenara etki eden kesme kuvvetleri, ilerleme kuvveti (F_x), radyal kuvvet (F_y) ve eksenel kuvvet (F_z) olarak üç ana kuvvetten oluşmaktadır (Şekil 3.2). Bu kuvvetlerin bileşenleri ile bileşke kesme kuvveti (R) hesaplanır [3, 4, 7].



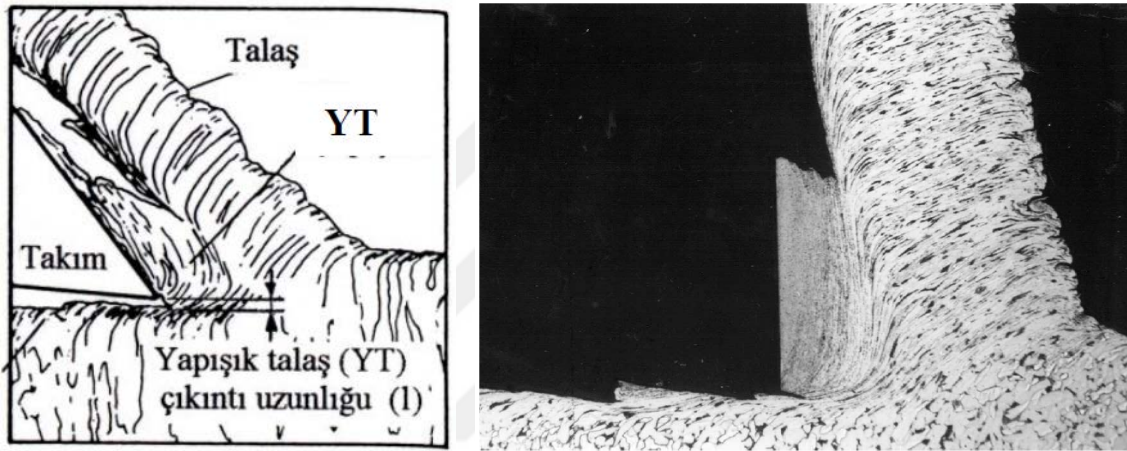
Şekil 3.2. Frezeleme işleminde temel kuvvetler



Şekil 3.3. Frezeleme işlemindeki ana kesme kuvvetleri

3.2. Yığıntı Talaş Oluşumu

Takım talaş temas alanında düşük sıcaklıkların görüldüğü kesme hızlarında talaşta kopma eğilimi artar. Kopan talaş parçalarının, takım yüzeyine sinterlenerek yapışması sonucu oluşan talaş birikmelerine yığıntı talaş (yapışık talaş, sıvanma) adı verilir (Şekil 3.4). Kesici kenar üzerinde biriken yığıntı talaş, kritik bir boyuta ulaştığında talaşla birlikte uzaklaşır. Kesme hızının artışı, kesme sıcaklığını artırır. Sıcaklık artışı ile malzemenin akma dayanımı düştüğü için yığıntı talaş oluşma eğilimini azaltır.



Şekil 3.4. Yığıntı talaş oluşumu [4]

Yığıntı talaş oluşumu, etkin talaş açısını artırır. Bununla birlikte talaş açısının artırılması ve büyük pozitif talaş açıları, yığıntı talaş eğilimini azaltır. Kesici kenarın uç yarıçapının artırılması yığıntı talaş oluşma eğiliminin artırır. Yığıntı talaş takım üzerinden uzaklaşmaz ve kalıcı hale gelirse kesici kenarı aşınmaya karşı korur. Bununla birlikte, giderek sertleşen bu tabakadan kopan talaş parçaları talaş akışına dahil olup takımın aşınmasına neden olur. Kesme sırasında yığıntı talaşla birlikte çıkıntı uzunluğu oluşması durumunda yüzey kalitesi düşer. Birçok olumsuz özelliklerinden dolayı yığıntı talaş, talaşlı imalat sürecinde istenmeyen bir durumdur.

Yığıntı talaş oluşumunu azaltmak için şu işleme şartlarında değişiklik yapılabilir:

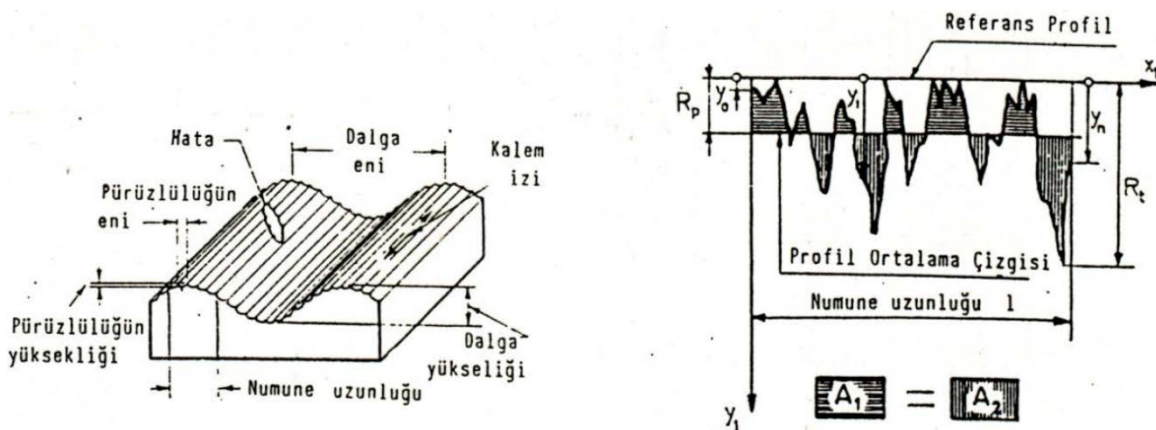
- Talaş derinliği azaltılarak kesme basıncı düşürülür,
- Talaş açısı artırılarak, takım talaş temas alanı ve sürtünme azaltılır,
- Takımın keskinlik derecesi artırılarak malzemenin kesilmeye karşı direnci azaltılır,
- Kesme hızı artırılarak yapışma bölgesi küçültülür,

- Klorlu ve sülfürlü kesme sıvıları kullanılır,
- Seramik uçlu kesici takımlar kullanılarak kimyasal kararlılık artırılır,
- Çeşitli takım kaplamalarıyla sürtünme katsayısı azaltılır.

3.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, yüzey kalitesini belirleyen bir parametredir. Yüzey pürüzlülüğü; işleme sırasında seçilen kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği vb. işleme parametrelerine bağlıdır. İşlenen yüzeylerde, pürüzlülük ve dalga olarak tanımlanan iki türlü deneysel sapma oluşmaktadır. Dalga, geometrik sapma grubuna girer ve yüzey kalitesini tayin etme açısından önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü standart olarak, yüzeye dik bir kesitteki belirli bir numune uzunluğu boyunca, belirli bir referans profili ve bu profilin ortalama çizgisi kriterlerine göre değerlendirilir ve belirlenir (Şekil 3.5) [7].

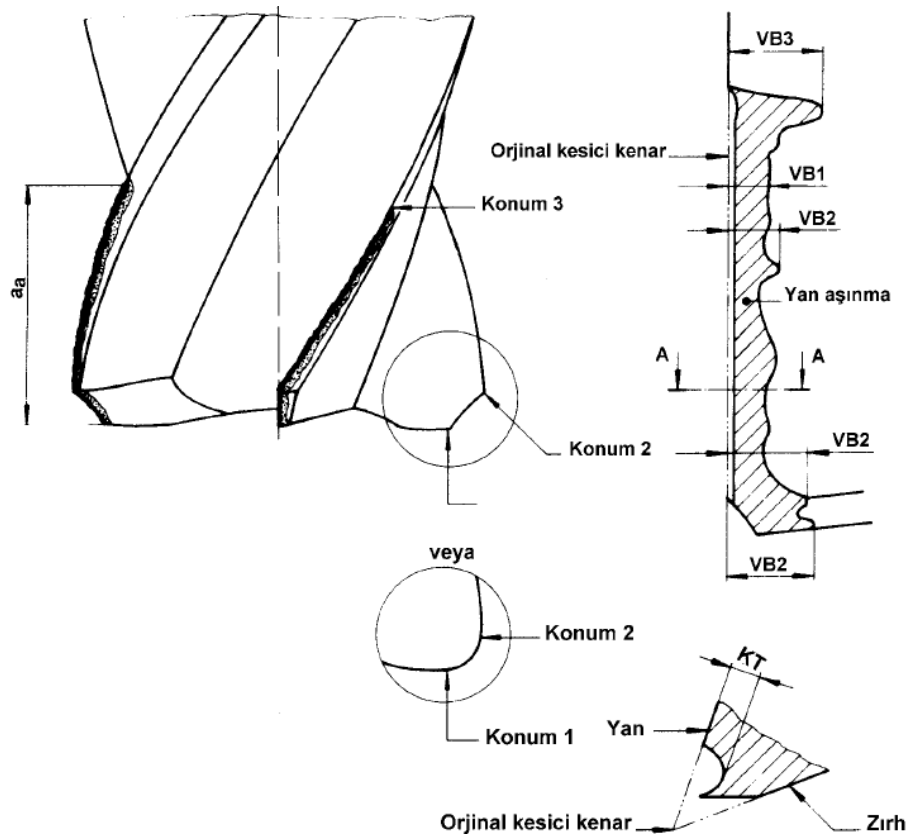
- Profilin maksimum tepe yüksekliği (R_p): Seçilmiş örnek uzunluk sınırlarında, ortalama çizgi ile profilin en yüksek noktaları arasındaki mesafe olarak tanımlanır.
- Profilin maksimum yüksekliği (R_t): Seçilmiş örnek uzunluk sınırlarında, profil çukurları çizgisi ile profil tepeleri arasındaki mesafe olarak tanımlanır.
- Düzensizliklerin 10 nokta yüksekliği (R_z): Seçilmiş örnek uzunluk sınırlarında beş adet en yüksek profil tepe yükseklikleri ile beş adet en derin profil çukur derinliklerinin mutlak değerlerinin ortalaması olarak tanımlanır.
- Profil sapmalarının aritmetik ortalaması (R_a): Seçilmiş örnek uzunluktaki profil sapmalarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır.



Şekil 3.5. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

3.4. Takım Aşınma Mekanizması

Takım aşınması basitçe, kesme esnasında takım malzemesinin sürekli kaybindan dolayı bir takımın kesici kısmının şeklinin orijinal şeklinden farklı hale gelmesi şeklinde tanımlanabilir. Talaş kaldırma esnasında kesici takımların farklı bölgeleri, birçok aşınma mekanizmasına maruz kalır ve bunun sonucu olarak kesici takımın kesici kenarı kesme özelliğini kaybederek ömrü kısalır. ISO 8688-2'ye göre parmak frezeler üzerindeki aşınma tipleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Parmak frezeler üstündeki aşınma [8]

Aşınma mekanizmalarının biri veya birden fazlasının bir araya gelmesiyle kesici takımda meydana gelen aşınma tipleri ve hasarlar [8]:

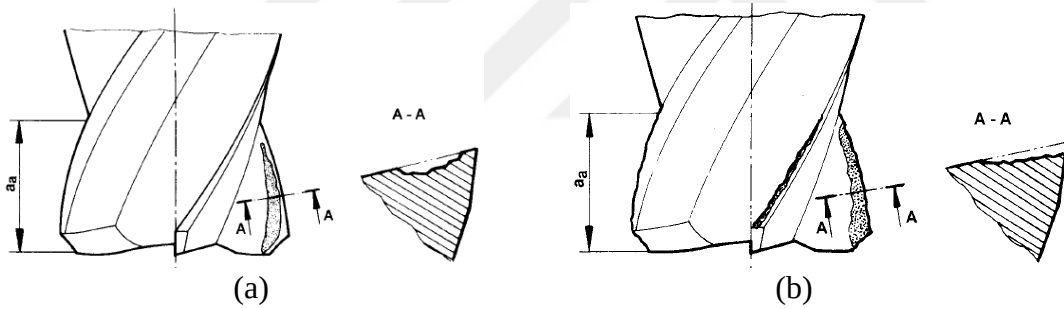
Yanak aşınması (VB)

Kesme esnasında takımın yanaklarından, yanak aşınma zırhının sürekli ilerlemesiyle sonuçlanan takım malzemesi kaybıdır. Düzenli yanak aşınması (VB 1), normal olarak sabit

bir genişlikte olan ve etkin kesici kenarın bütün uzunluğunu birleştiren takım yanak kısımlarına uzanan aşınma zırhtır. Düzensiz yanak aşınması (VB 2), normal olarak şekilsiz bir genişlikte olan ve aşınma zırhı ve orijinal yanağın kesişmesiyle oluşan profilinin her ölçme konumunda değiştiği aşınma zırhıdır. Bölgesel yan aşınma (VB 3), yanlar üzerindeki belirli bölgelerde yoğunlaşmış şekilde oluşan abartılı yan aşınma biçimidir.

Krater aşınması (KT)

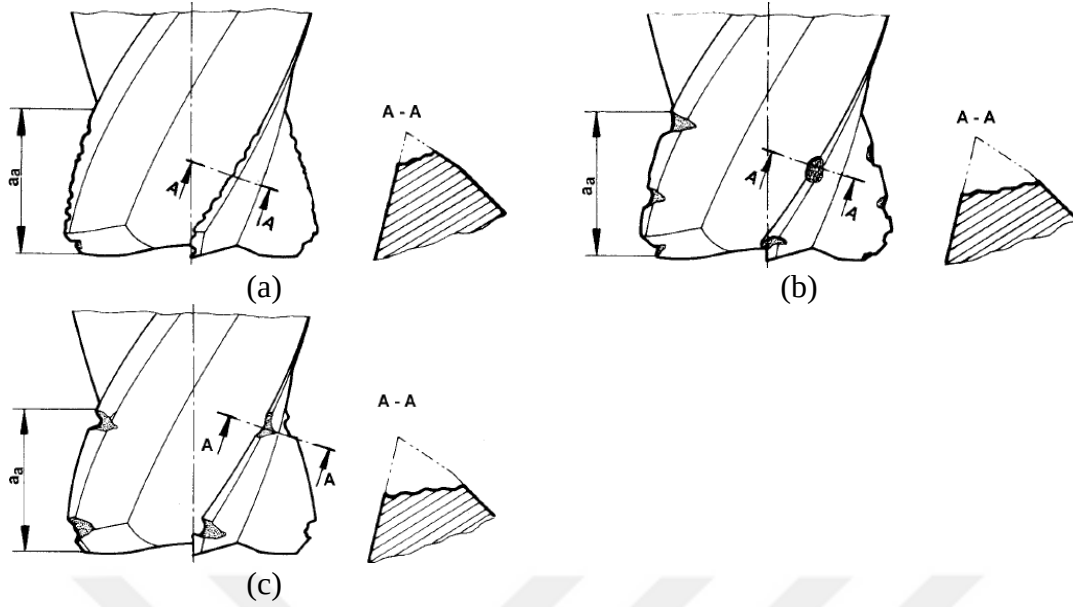
Kesme esnasında takım malzemesinin takım yüzünden sürekli kaybedilmesidir. Krater aşınması (KT 1), yaklaşık olarak ana kesici kenara paralel olarak yönelmiş ve ana kesici kenardan bir miktar uzakta en büyük derinliğine ulaşan kraterin ilerleyici gelişimidir (Şekil 3.7a). Basamaklı yüz aşınması (KT 2), takım yüzüne dik ölçülmüş en büyük aşınma izi derinliğinin aşınma iziyle takımın ana yanağının kesişme noktasında olduğu yüz aşınma biçimidir (Şekil 3.7b).



Şekil 3.7. Yüz aşınması a) Krater aşınması (KT 1), b) Basamaklı yüz aşınması (KT 2)

Çentiklenme (CH)

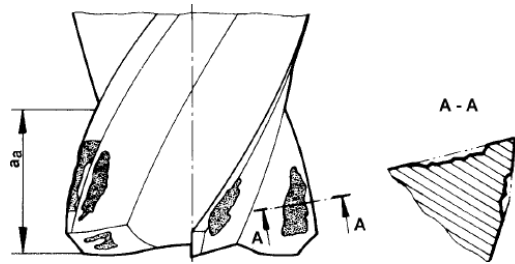
Kenarın parçalarının kırılıp koptuğu kenar bozulmasıdır. Düzenli çentiklenme (CH 1), yaklaşık olarak eşit boydaki takım parçalarının kesici kenarlar boyunca, yanak aşınma zırhının düzgünlüğünü belirgin şekilde etkileyen kayıbdır (Şekil 3.8a). Düzensiz çentiklenme (CH 2), genellikle aktif kesici kenarlar boyunca az sayıdaki konumda çatlaklarla bağlantılı oluşan, fakat diğer kesici kenarlarda tutarlılığı olmayan çentiklenmedir (Şekil 3.8b). Bölgesel çentiklenme (CH 3), etkin kesici kenar boyunca tutarlı bir şekilde belirli konumlarda oluşan çentiklenmedir (Şekil 3.8c).



Şekil 3.8. Çentiklenme aşınması a) Düzenli çentiklenme (CH 1), b) Düzensiz çentiklenme (CH 2), c) Bölgesel çentiklenme (CH 3)

Pullanma (FL)

Takım yüzeylerinden pulcuk biçiminde malzeme kaybıdır. Bu aşınma tipi, kaplanmış takım uçları kullanıldığında sıklıkla gözlenir ancak diğer takım malzemeleri kullanıldığında da gözlenebilmektedir (Şekil 3.9).

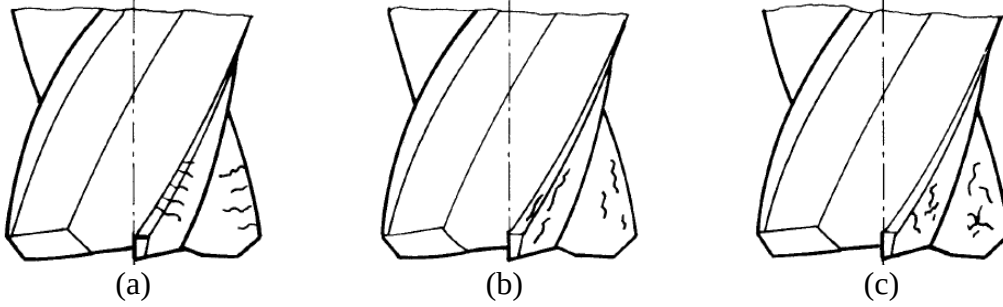


Şekil 3.9. Pullanma aşınması

Çatlaklar (CR)

Anında takım malzemesi kaybına yol açmayan, kesici takım malzemesinin kırılmasıdır. Tarak dişi şeklinde çatlaklar (CR 1), takım yüzünün ve takım yanağının her ikisinde de oluşan ve ana kesici kenara yaklaşık olarak dik olan çatlaklardır (Şekil 3.10a). Paralel çatlaklar (CR 2), takım yüzünde veya takım yanağında oluşan ve ana kesici kenara yaklaşık

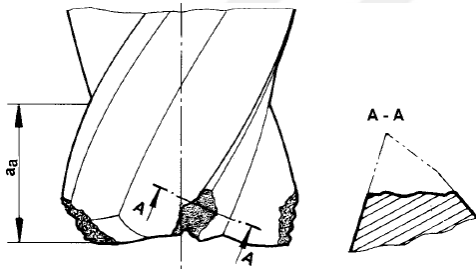
olarak paralel olan çatlaklardır (Şekil 3.10b). Düzensiz çatlaklar (CR 3), ara sıra takım yüzünde ve takım yanağında oluşan ve düzensiz yönlenmiş çatlaklardır (Şekil 3.10c).



Şekil 3.10. Çatlak aşınmaları a) Tarak dişi şeklinde çatlaklar (CR 1), b) Paralel çatlaklar (CR 2), Düzensiz çatlaklar (CR 3)

Tam bozulma (CF)

Kesici kısmın hızlı şekil değiştirmesiyle tam bozulması durumudur (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Tam bozulma aşınması

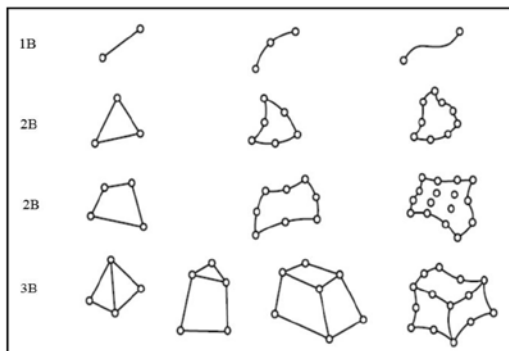
Takım ömrünü belirleyebilmek ve farklı deney parametrelerinin etkisini karşılaştırmak için, kesici kısmın tanımlanmış bozulma tiplerinden birinin seçilmesi gereklidir. Takım ömrü kriteri, ölçülebilen herhangi bir takım bozulma tipinin önceden belirlenmiş sayısal değeri olabilir. Birden fazla bozulma biçimi meydana gelmişse, her biri kaydedilmelidir. Herhangi bir bozulma biçiminin sınırına gelinmişse takım ömrüne ulaşılmış olunur. Belirli bir deney serisinde kullanışlı takım ömrünün son bulmasına en çok katkı yaptığına inanılan bozulma tipi, belirtilen takım ömrü kriterlerinin seçilmesinde bir kılavuz olarak kullanılmalıdır [8].

3.5. Sonlu Elemanlar Metodu

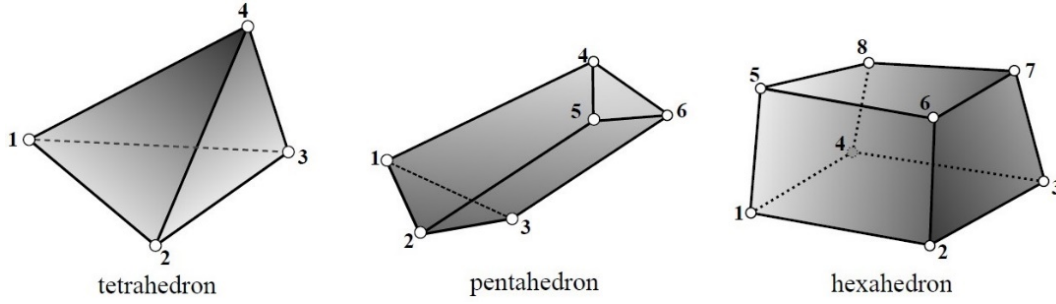
Sonlu elemanlar metodu (FEM), mühendislik ve matematiksel problemlerde hesaplanması gereken mekanik gerilim-gerinim, statik ve dinamik yüklemeler, ısı ve kütle transferi, titreşim vb. temel fiziksel faktörlerin bilgisayar ortamında modellenmesi esasına dayanan bir nümerik çözüm yöntemidir [62].

FEM ile en basit tabirle problem uzayı, sonlu eleman adı verilen küçük bileşenlere bölünür. Bu sonlu elemanlar, düğüm noktaları ile birlerine bağlanarak toplam eleman sayısı bilinen ve hesaplamaya hazır problem uzayı oluşturulur. Her bir düğüm noktasında hesaplanmak istenen fiziksel faktörlerin matematiksel modelleri kurulur. Bu denklem sistemi, Galerkin, Rayleigh–Ritz vb. yakınsama metotları kullanılarak çözülür [63]. Mühendislik problemlerinde matematiksel modeller, birçok fiziksel faktörün bir arada bulunduğu doğrusal olmayan diferansiyel denklem kümelerinden oluşan karmaşık bir yapıdadır. Bu denklem kümelerinin analitik olarak çözülmesinin imkansız olması sebebiyle başlangıç ve sınır şartları tanımlanan ve sonlu eleman kümelerine dönüştürülmüş problem uzayı oluşturularak nümerik bir şekilde çözüm aranır [63, 64].

FEM analizlerinde ağ (mesh) yapısı, boyutu ve sayısı, çözüm doğruluğu ve süresi açısından oldukça önemlidir. Sonlu eleman tipi, problem uzayının geometrisine uygun olarak seçilmelidir. Sonlu elemanlar, temel olarak tek, iki ve üç boyutlu olmak üzere üç gruptan oluşur (Şekil 3.12). İki boyutlu elemanlar, standart olarak üçgen ve dörtgen yapıda olup özel koşullarda çokgen yapıda da olabilirler. Üç boyutlu elemanlar ise dört (tetrahedron), beş (pentahedron) ve altı yüzlü (hexahedron) olarak üç temel geometrik yapıdadırlar (Şekil 3.13). Yapıların köşelerinde, birbirleri ile bağlantı kurulan düğüm noktaları yer almaktadır.



Şekil 3.12. Temel sonlu eleman türleri [65]



Şekil 3.13. Temel üç boyutlu eleman yapıları [66]

FEM analizlerinde çözüm doğruluğuna etki eden bir diğer faktör de yapısal denklemlerdir. Yapısal denklemler, iş malzemesinin statik ve dinamik yükler, ısı ve titreşim gibi fiziksel etkenlere karşı gösterdiği gerilim, gerinim, sıcak değişimi vb. davranışları tanımlamak için kurulan matematiksel malzeme modelleridir. Mühendislik problemlerinde yaygın olarak *Von Mises*, *Oxley*, *Reiff*, *Cowper-Symond*, *Zerilli-Armstrong*, *Johnson-Cook* vb. malzeme modelleri kullanılmaktadır. *Johnson-Cook* malzeme modeli, yüksek deformasyon hızının hakim olduğu problemler için uygunluğu nedeniyle metal kesme uygulamaları için yaygın tercih edilen bir yapısal denklemdir [62, 65]. *Johnson-Cook* malzeme modeli Eş. 3.1'de görüldüğü gibi ifade edilmektedir:

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_{\text{Elasto-Plastik}} \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]}_{\text{Viskozite}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{oda}}{T_{erime} - T_{oda}} \right)^m \right]}_{\text{Termal Yumuşama}} \quad (3.1)$$

Burada σ akış gerilimi, ε , $\dot{\varepsilon}$ ve $\dot{\varepsilon}_0$ sırasıyla plastik gerinim, gerinim oranı ve referans gerinim oranıdır. T sıcaklık, T_{erime} erime sıcaklığı ve T_{oda} oda sıcaklığıdır. Malzeme ampirik sabitleri: A başlangıç akma dayanımı, B pekleşme katsayısı (pekleşme modülü), C gerinim oranı bağımlılık katsayısı, n pekleşme üsteli, m termal yumuşama katsayısıdır.

4. GEREÇ VE YÖNTEM

4.1. Tasarım, Malzemeler ve Takip Edilecek Standartlar

Literatürden ve kesici takım üreticilerinden elde edilen bilgiler ışığında bu tezde, dalga formlu takımların işleme performansı kıyaslanırken takım ömrü parametresine odaklanılmıştır. Takım ömrüne odaklanma amacının bir diğer sebebi ise imalat endüstrisinde bu parametrenin son derece önemli ve öncelikli olmasıdır. Bu sebeple yürütülen deneysel ve nümerik çalışmalar ISO 8688-2 Frezelemede Takım Ömrü Deneyi standardına göre yapılmıştır. ISO 8688-2'e göre iş parçası olarak istenilen malzeme seçilebilir. Ancak, deney yapan kuruluşların sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini artırmak için C45 (Europe) (US: AISI 1045) çelik veya GG25 dökme demir referans malzemelerinden birinin kullanılması tavsiye edilmektedir. C45 orta karbonlu çelik malzeme, ISO/R 683-3'e uygun olarak Çizelge 4.1'de gösterilen kimyasal bileşime sahip ve sıcak haddelenmiş olarak üretilmiş olmalıdır. GG25 dökme demiri ISO/185 kalite standartlarında, Çizelge 4.2'deki içyapıda ve %100 perlit matriks olacak şekilde pul grafitten oluşmalıdır [7, 8]. Birinci aşamadaki deneysel ve FEM analizlerinde kullanılan AISI 304 malzemesinin ve üçüncü ve dördüncü aşamalarda kullanılan AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemelerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan malzemelerinin kimyasal bileşimleri [8, 67, 68]

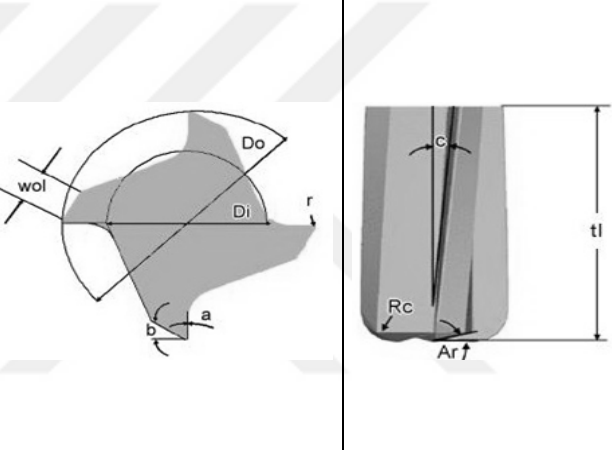
% ağırlık		Ana	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	Al	V	Fe	O
C45 (AISI 1045)	min	Fe	0,42	0,15	0,50	0,02	-							
	max		0,50	0,40	0,80	0,035	0,035							
AISI 304	min		-	-	-	-	-	18		8				
	max		0,08	1	2	0,030	0,045	20		10,5				
AISI 316L	min	Fe	-	-	-	-	-	16	2	10				
	max		0,30	1	2	0,030	0,050	18	3	14				
Ti-6Al-4V (Grade 5)	min	Ti									-	-	0,20	-
	max										6	4	0,30	0,20

Çizelge 4.2. GG25 dökme demirin kimyasal bileşimi [8]

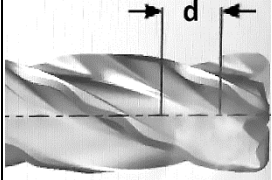
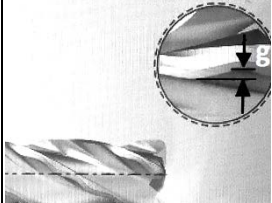
GG25	İç yapı	Oran
	Serbest demir karbür	%0
	Serbest ferrit	En fazla %5
	Stedit (demir-demir fosfat ötektiği)	En fazla %5
	Grafit	Sadece pul grafit
	Perlit	Geri kalan

Standart ve dalga formlu kesici takımlar *Karcan Kesici Takım* firması tarafından bilgisayar ortamında *Numroto® Plus* yazılımı ile üç boyutlu olarak modellenmiştir. Kesici takım malzemesi, *Creatizit® Grade P-Line* karbür olarak seçilmiştir. 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^3 yoğunluğunda ve 4000 MPa enine kopma dayanımındadır [69]. Bu özellikleri sebebiyle işlenebilirliği zor malzemeler için uygundur. Standart ve dalga formlu kesici takımların tasarım parametreleri Çizelge 4.3'te, farklı geometrilere sahip dalga formu parametreleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Kesici takımların tasarım parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	
Dış çap	Do	12 mm	
Çekirdek çapı	Di	6,960 mm	
Kesici ağız boyu	t1	28 mm	
Kesici ağız sayısı		4	
Talaş açısı	a	-6° / +22°	
Helis açısı	c	36° / 50°	
Radyal boşluk açısı	b	24°	
Eksenel boşluk açısı	Ar	8°	
Kenar yarıçapı	r	0,01°	
Kesici ağız genişliği	wol	2,5 mm	
Köşe pahı	Rc	0,25 mm 45°	

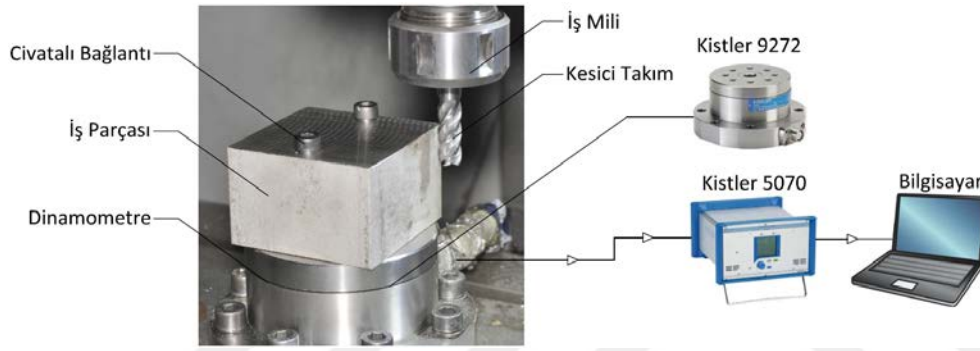
Çizelge 4.4. Farklı geometrilerdeki dalga formlu freze tasarım parametreleri

Takım	Faktörler	Seviyeler
	Dalga boyu (mm) 	4 6 8
	Dalga genliği (µm) 	150 250 350 450 550 650

4.2. Deneysel Kurulum

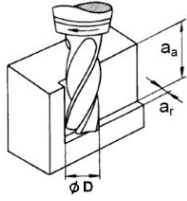
İşleme şartları ve kesme kuvvetleri ölçümleri

Deneyisel çalışmalar, *Johnford*[®] VMC-550 CNC freze tezgâhı ile yapılmıştır. Deneylerde kesme kuvvetleri, *Kistler*[®] 9272 dinamometre ve *Kistler*[®] 5070 amplifikatörü kullanılarak ölçülmüştür. İş parçası, işleme sırasında maksimum seviyede rijit ve kararlı olması için, doğrudan dinamometreye bağlanmıştır. Deney düzeneği, Şekil 4.1’te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için deney düzeneği

Tezin tüm aşamalarındaki deneyisel ve nümerik çalışmalar için işleme şartları, ISO 8688-2’e belirtildiği gibi, eksenel kesme derinliğinin radyal kesme derinliğinden büyük olduğu ($a_a > a_r$) köşe ve aynı yönlü frezeleme olarak belirlenmiştir. Şekil 4.2’de ISO 8688-2’de tavsiye edilen işleme şartları gösterilmiştir. Çalışmalar, farklı malzemeler ile yapıldığı için her malzemenin kesme hızları ve ilerleme miktarları farklılık göstermektedir. Önceki çalışmada [7], standardın iş parçası olarak önerdiği GG25 ve C45 malzemelerinin ilerleme miktarları için standardın tavsiye ettiği değerlerin seçildiği görülmüştür. Standart, bu malzemeler için kesme hızları değerlerini HSS kesici takımlar için belirtmiştir. Önceki çalışmada da bu çalışmada da karbür takımlar kullanıldığı için bu malzemelerde kesme hızı seçiminde standarta bağlı kalınmamıştır. AISI 304, AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri için kesme hızları ve ilerleme miktarları, üç farklı kesici takım üreticisinin önerdiği kesme parametrelerinden referans alınarak belirlenmiştir [70-72]. Tüm aşamalar için malzemelerin işleme parametreleri Çizelge 4.5’te gösterilmiştir. Kesme parametreleri seçilirken, tüm malzemeler için üç kesme hızı ve üç ilerleme miktarı belirlenerek tam faktöriyel deney tasarımı kurulmuştur.



Kesme şartı		I	II	III	IV
Eksenel kesme derinliği a_a	mm	20	20	12,5	12,5
Radyal kesme derinliği a_r	mm	2,5	2,5	20	20
İlerleme f_z	mm/diş	0,08	0,125	0,08	0,125

Şekil 4.2. ISO 8688-2’de tavsiye edilen işleme şartları [8]

Çizelge 4.5. İş malzemelerinin işleme parametreleri

Çalışma Aşamaları	Malzemeler	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)	Eksenel Kesme Derinliği (mm)	Radyal Kesme Derinliği (mm)
1. Aşama	AISI 304	50	0,08	20	2.5
		60	0,10		
		70	0,125		
2. Aşama	C45	125	0,125		
	GG25	140			
	AISI 304	70			
3. Aşama	AISI 316L	50	0,030		
		75	0,045		
		100	0,060		
	Ti 6Al 4V	40	0,025		
		60	0,0375		
		80	0,05		
4. Aşama	AISI 316L Ti 6Al 4V	(Bkz. Çizelge 5.17.)			

Yüzey pürüzlülük ölçümleri

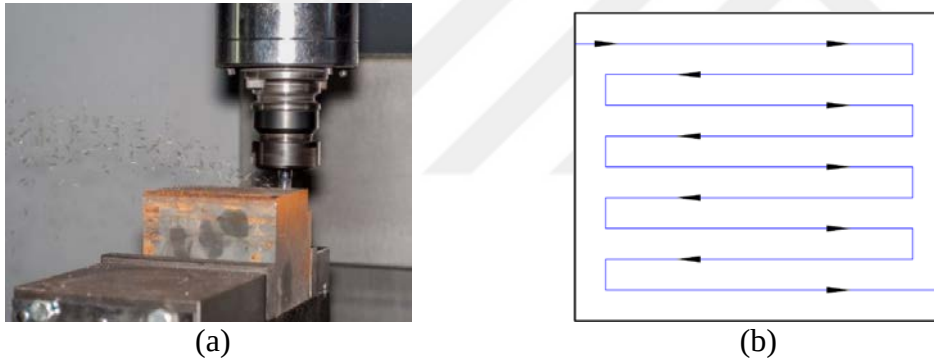
Yüzey pürüzlülük ölçümleri *Mahr® Perthometer M1* cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler ISO 4288 standardına göre ve kesim uzunluğu (λ_c) 0.8 mm, örnekleme sayısı (n) 5 ve yanıl uzunluk (L_t) 5.6 mm parametreleri kullanılarak yapılmıştır. İşlenen yüzeyde rastgele seçilen beş farklı noktada ölçüm yapıp, en büyük ve en küçük pürüzlülük değerleri değerlendirme dışı bırakılarak, kalan üç ölçüm değerinin (R_a) aritmetik ortalaması alınmış ve kesici takımların yüzey kalitesi açısından performansı, bu ortalama dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Takım aşınması ölçümleri

Takım ömrü olarak ISO 8688-2’e göre, belirli takım aşınma tiplerinin önceden belirlenmiş bir sayısal değer olarak tanımlanabilen bir kriterin kullanılması tavsiye edilir. Belirli bir yan

aşınma genişliği en yaygın kullanılan kriterdir. Yan aşınmanın yeterli veya belirgin olmadığı durumlarda diğer yüz, çentiklenme ve pullanma aşınma miktarları ile takım ömrü belirlenir. ISO 8688-2'e göre tavsiye edilen takım ömrü sonu, düzenli aşınma için bütün ağızlarda ortalama 0,3 mm, bölgesel aşınma için ise herhangi bir münferit ağızda en fazla 0,5 mm aşınma miktarıdır [8].

Aşınma deneylerinde AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri, kesme sıvısı kullanılarak işlenmiştir. Kesme sıvısı olarak; %95 su ve %5 *Adrana® D 208* metal işleme yağı emülsiyonu kullanılmıştır. İşleme sırasında kesme sıvısı, 10 mm çapında tek nozul ile uygulanmış ve 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 “zigzag” takım yolu uygulaması seçilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. a) Aşınmanın belirlenmesi için oluşturulan sistem b) Zigzag takım yolu

4.3. Sonlu Eleman Analizleri (FEM analizleri)

Sonlu eleman analizleri, sadece talaş kaldırma modellemelerine odaklanmış bir FEM yazılımı olan *Third Wave AdvantEdge®* programı ile yapılmıştır. Yazılım, çözüm yaparken updated-Lagrangian sonlu eleman metodunu ve adaptif yeniden ağ örme tekniklerini (adaptive remeshing techniques) kullanmaktadır. Yazılım, iş parçası ve kesici takım ağ dokusunu, 4 nokta ve 12 serbestlik dereceli (4 node 12 dof degree-of-freedom) sonlu elemanlar ile oluşturmaktadır.

Metal kesme simülasyonlarında, iş parçaları üzerinde çok yüksek seviyede plastik gerinim, gerinim oranı ve ani sıcaklık değişimlerine bağlı olarak gerçekleşen deformasyon meydana

gelmektedir. Bu sebeple iş parçalarının gerilme-gerinim davranışları tanımlanırken genel olarak, gerinim oranı, pekleşme ve sıcaklığa bağlı malzeme modelleri kullanılır [28, 73]. *AdvantEdge*[®] yazılımının malzeme kütüphanesi kullanılarak bu gereksinimleri doğrultusunda yüksek doğrulukta simülasyonlar yapılabilmektedir. C45 ve AISI 304 malzemeleri, yazılımın kütüphanesinde bulunmaktadır ve sonuçların deneylerle örtüşmesi açısından verimli bir şekilde kullanılabilir. Ancak GG25 malzemesinin yazılımın kütüphanesinde bulunmamasından dolayı kullanıcı tanımlı malzeme model oluşturulmuştur. GG25 malzemesinin mekanik davranışını tanımlamak için, Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. GG25 için bu katsayılar Çizelge 4.6’da gösterilmiştir. GG25’in mekanik ve fiziksel özellikleri ise Çizelge 4.7’de verilmiştir. FEM analizlerinde takım ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısının, sonuçların doğruluğu açısından önemli etkisi vardır [67]. *AdvantEdge*[®] yazılımı sürtünme katsayısı olarak Coulomb sürtünme modelini kullanmaktadır. Sürtünme modeli;

$$F_f = \mu F_n \quad (4.1)$$

Eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada F_n sürtünen yüzeyler arasındaki normal kuvvet, μ sürtünme katsayısı ve F_f ise sürtünme kuvvetidir. Simülasyonlarda, GG25 ile karbür malzeme arasındaki sürtünme katsayısı, literatürdeki benzer çalışmalara göre ortalama 0,5 olarak belirlenmiştir [74-77].

Çizelge 4.6. GG25 için Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri [78]

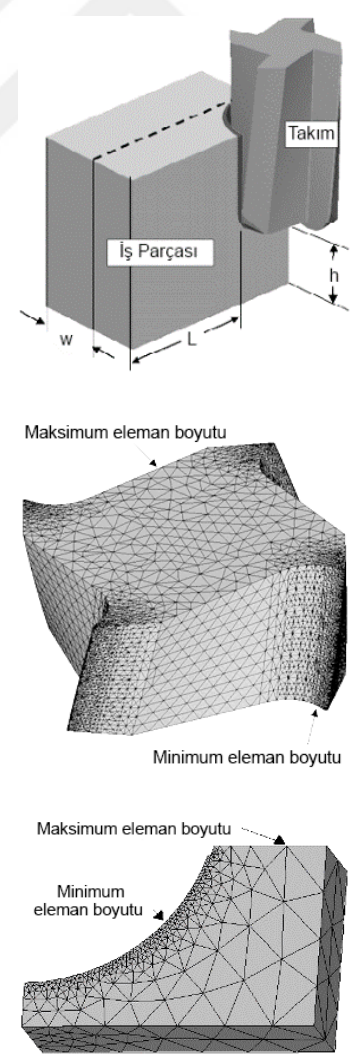
Parameter	A (MPa)	B (MPa)	n	T_{erime} (K)	T_{oda} (K)	m	C	$\dot{\epsilon}_0$ (1/s)
GG25	470	250	0,1	1473	293	1,1	0,004	1,0

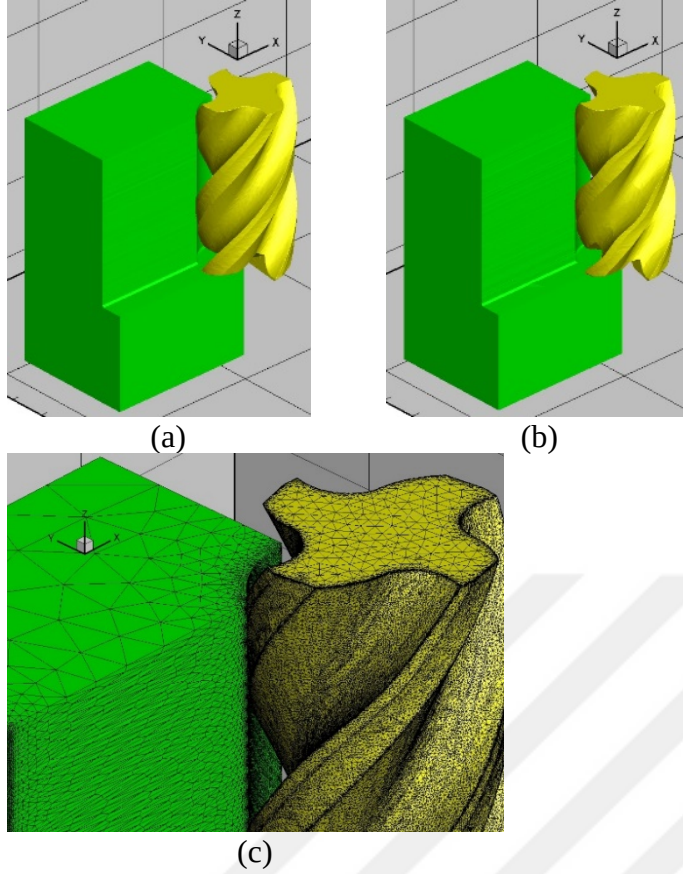
Çizelge 4.7. GG25 malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Termal iletkenlik (W/mK)	46
Özgül ısı (J/kgK)	490
Yoğunluk (kg/m ³)	7500
Termal genleşme katsayısı (1/°C)	11x10 ⁻⁶
Elastisite modülü (MPa)	180
Poisson oranı	0,29

Malzeme tanımı veya malzeme modeli ve sürtünme modeli gibi FEM analizlerinin doğruluğunu etkileyen bir diğer faktör de ağ (mesh) yapısıdır. Ağ yapısının çok sıkı kurulması çözüm süresini çok uzatırken, çok seyrek kurulması ise çözümü doğruluktan uzaklaştırmaktadır. Ağ yapısında önemli parametrelerden biri minimum ağ elemanı boyutudur. Bu parametre boyutu takım ilerleme miktarının en az yarısı kadar olmalıdır. Örnek olarak takım ilerleme miktarı 0.08 mm/diş olduğu zaman, iş parçasının minimum ağ elemanı boyutu en fazla 0.035 mm olmalıdır. Böylece, analiz sonucunda talaş yapısı ve kuvvetler doğru bir şekilde elde edilebilir. Bununla birlikte minimum mesh elemanı boyutu ne kadar küçük olursa problemin çözüm süresi de o kadar uzun olmaktadır [67]. İş parçası, kesici takım ve diğer ağ yapısı parametreleri Çizelge 4.8’de, standart ve dalga formu kesici takım FEM modelleri ve ağ yapısı ise Resim 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Ağ yapısı parametreleri

Kesici takım başlangıç ağ yapısı	Değer	
Maksimum eleman boyutu	2 mm	
Minimum eleman boyutu	0,1 mm	
Mesh grading	0,3	
Curvature safety	5	
Segments per edge	5	
İş parçası takım başlangıç ağ yapısı		
İş parçası boyutu	11×13×15 mm ³	
Maksimum eleman boyutu	5 mm	
Minimum eleman boyutu	0,03 mm	
Mesh grading	0,3	
Curvature safety	3	
Segments per edge	3	
Min. element edge length		
Chip bulk	0,04597 mm	
Cutter edge	0,03515 mm	
Radius of refined region	0,017382 mm	
Adaptif yeniden ağ oluşturma		
Mesh refinement factor	1	
Mesh coarsening factor	15	
Chip refinement factor	1	
Grading near cutting edge	6	
Grading radius factor	1	



Resim 4.1. FEM modelleri a) Standard takım b) Dalga formu takım c) Ağ yapısı

4.4. Varyans ve Regresyon Analizleri

Varyans analizi, araştırma kapsamında elde edilen verileri ayrıştırarak bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerinin incelendiği istatistiksel metottur. Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirleri arasındaki ilişkiyi inceleyen ve modelleyen analiz yöntemidir. Bağımsız değişkenler, araştırma için seçilen faktörlerden oluşur. Faktörlerin her bir alt değerine ise seviye denir. Bu faktör ve seviyeler ile elde edilen değerlere de bağımlı değişkenler veya çıktılar denir. Bu çalışmada bağımsız değişkenler: kesici takım, kesme hızı ve ilerleme miktarı olarak tanımlanmıştır. Bağımlı değişkenler için deneysel çıktı olarak elde edilen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü verileri kullanılmıştır. Varyans analizi ile kontrol faktörleri ve seviyelerinin, çıktılar üzerindeki anlamlılık değerleri ve etki oranları belirlenmiştir. Regresyon analizleri ile istatistiksel olarak kurulan modelin, deneysel veriler ile uygunluğu incelenerek ve ampirik bir matematiksel model elde edilmiştir.

Üçüncü aşama deneylerinde elde edilen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü verileri ile dördüncü aşamadaki takım aşınması deneylerinin yapılacağı işleme parametrelerini belirlemek büyük oranda mümkündür. Ancak daha net bir bilgi elde etmek için varyans ve regresyon analizleri yapılmıştır. Bu istatistiksel veri analizleri için *Minitab® R19* yazılımı kullanılmıştır. Veri analizlerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri için, deneysel çalışmalarda tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır (Çizelge 4.9). Veri analizleri, AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri için 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.

Çizelge 4.9. Veri analizlerinde kullanılan kontrol faktörleri, seviyeler ve çıktılar

Malzeme	AISI 316L			Ti 6Al 4V		
Faktörler	Kesici takım	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/diş)	Kesici takım	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/diş)
Seviye 1	standart	50	0,030	standart	40	0,025
Seviye 2	6-550	75	0,045	6-550	60	0,0375
Seviye 3	8-250	100	0,060	8-250	80	0,05
Seviye 4	4-450	-	-	4-450	-	-
Seviye 5	8-650	-	-	8-650	-	-
Çıktılar	Kesme kuvvetleri (N)					
	Yüzey pürüzlülüğü (μm)					



5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

5.1. Birinci Aşama Çalışmaları

Tezin birinci aşamasında, doğrulanmış FEM çözüm sistemi oluşturulmak amacıyla önceki çalışma [7] ve bu çalışma verileri kullanılarak standart takım ve referans dalga formlu takımın kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından işleme performansları kıyaslanmıştır. Referans dalga formlu takım olarak 6 mm dalga boyu ve 450 µm dalga genliği (6-450) olan dalga formlu kesici takım seçilmiştir (Bkz. Çizelge 4.4) [7]. 6-450 dalga formunun seçilmesinin sebebi, dalga boyu ve dalga genliği parametrelerinin ortalama değerlerine en yakın kesici takım olmasıdır. İş parçası olarak AISI 304 malzemesi ile kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü deneyleri yapılmıştır. C45 ve GG25 malzemelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü verileri, Akgün (2020) çalışmasından referans alınarak değerlendirmeye katılmıştır. Ölçümler, üç ilerleme miktarı ve üç kesme hızı seçilerek tam faktöriyel deney tasarımı her iki kesici takım için yapılmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Birinci aşama tam faktöriyel deney tasarımı

Deney no	C45 – GG25 [7]		AISI 304	
	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)
1	125	0,08	50	0,08
2		0,10		0,10
3		0,125		0,125
4	130	0,08	60	0,08
5		0,10		0,10
6		0,125		0,125
7	140	0,08	70	0,08
8		0,10		0,10
9		0,125		0,125

5.1.1. Kesme kuvvetleri

Standart ve 6-450 dalga formlu takım için ortalama bileşke kesme kuvvetleri (R) ve takım bazındaki değişimleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. “Değişim” sütunu altında, 6-450 dalga formlu takımdan elde edilen kesme kuvvetlerinin standart takıma göre düşme eğilimleri Eş 5.1’de gösterildiği gibi hesaplanarak “%” olarak ifade edilmiştir. Yeşil tonlamalı kısımlar,

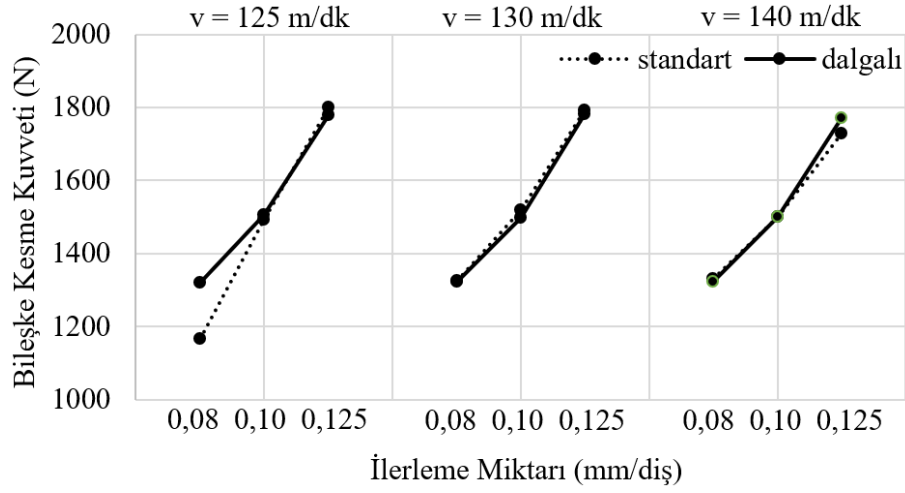
dalgalı takımdan elde edilen kuvvetlerin standart takıma göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Sarı tonlamalı kısımlar ise aksi durumu göstermektedir. C45, GG25 ve AISI 304 malzemelerinin bileşke kesme kuvvetleri sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'teki grafiklerde gösterilmiştir.

$$\text{Değişim (\%)} = \left(\frac{F_{\text{standart}} - F_{\text{dalga formlu}}}{F_{\text{standart}}} \right) \times 100 \quad (5.1)$$

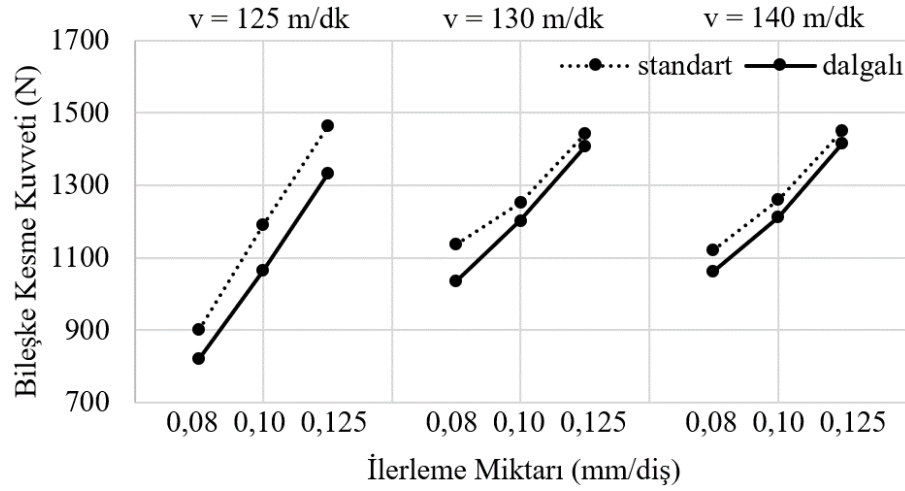
Kesme kuvvetleri bulguları incelendiğinde, C45 malzemesi için kesici takımlar arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. GG25 malzemesi için tüm deney şartlarında dalga formlu takımda standart takıma göre daha düşük kesme kuvvetleri elde edilmiştir. İlk dört deney şartlarında dalga formlu takım için kuvvetlerde ortalama %9,4 oranında belirgin azalma görülmektedir. AISI 304 malzemesi için ise genel olarak dalga formlu takımda daha düşük kesme kuvvetleri görülmüştür. Tüm deney şartlarında dalga formlu takım için ortalama kesme kuvveti değişimleri, C45 için ortalama %-1,4, GG25 için ortalama %6,2 ve AISI 304 için ise ortalama %-3,6 oranlarında elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. Ortalama bileşke kuvvetleri ve takım bazındaki değişimleri

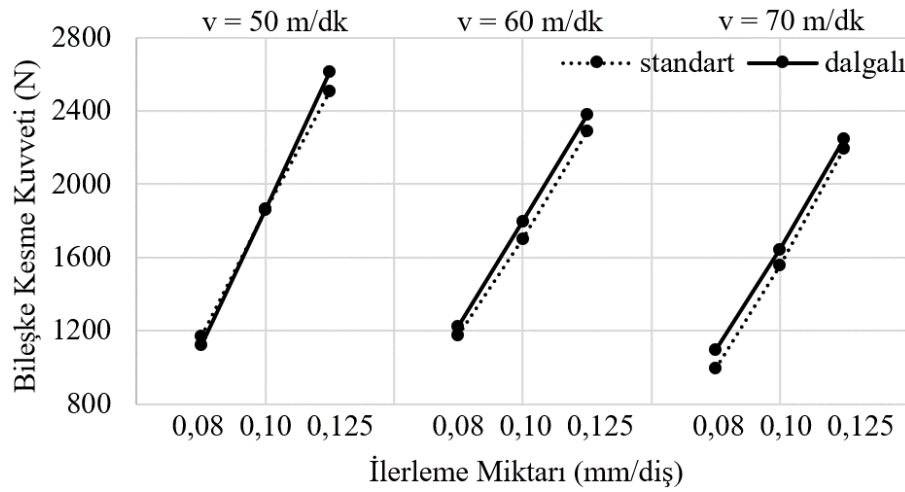
Deney No	C45 [7]			GG25 [7]			AISI 304		
	R (N) (standart)	R (N) (6-450)	Değişim (%)	R (N) (standart)	R (N) (6-450)	Değişim (%)	R (N) (standart)	R (N) (6-450)	Değişim (%)
1	1166	1321	-13,3	901	819	9,0	1168	1121	4,0
2	1493	1505	-0,8	1191	1065	10,5	1857	1866	-0,5
3	1799	1778	1,1	1465	1332	9,1	2507	2613	-4,2
4	1326	1324	0,1	1136	1034	9,0	1173	1225	-4,5
5	1518	1498	1,3	1253	1203	4,0	1702	1794	-5,4
6	1792	1780	0,7	1442	1407	2,4	2290	2381	-4,0
7	1331	1322	0,7	1122	1061	5,4	993	1093	-10,2
8	1500	1500	0,0	1261	1212	3,8	1555	1644	-5,8
9	1728	1771	-2,5	1451	1415	2,5	2195	2245	-2,3
ORT.	1517	1533	-1,4	1247	1172	6,2	1715	1776	-3,6



Şekil 5.1. C45 malzeme için bileşke kesme kuvvetleri



Şekil 5.2. GG25 malzeme için bileşke kesme kuvvetleri



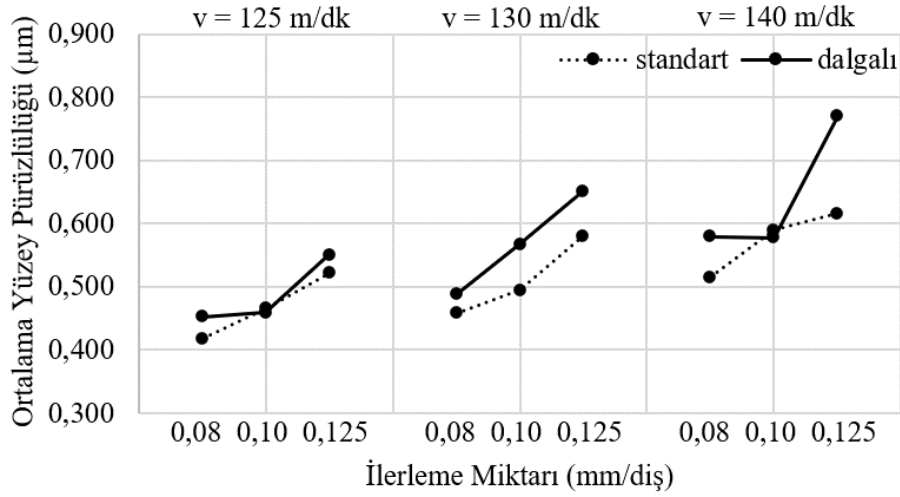
Şekil 5.3. AISI 304 malzeme için bileşke kesme kuvvetleri

5.1.2. Yüzey pürüzlülük değerleri

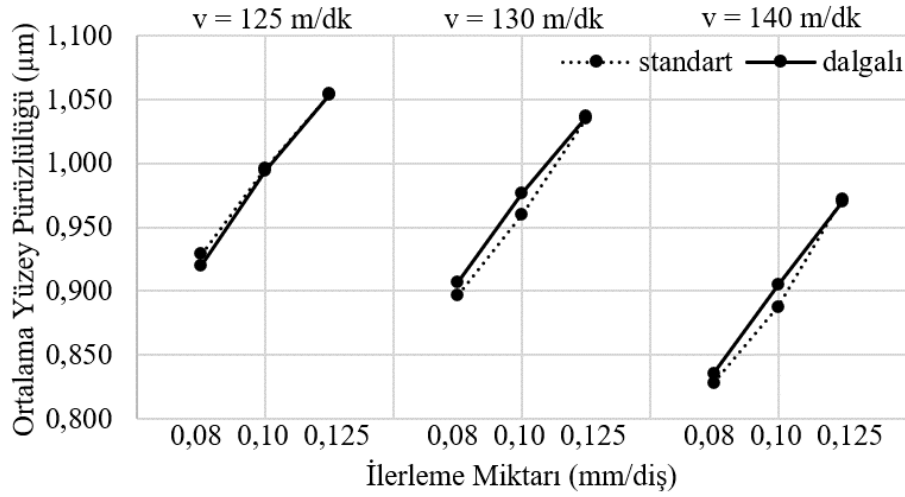
Yüzey pürüzlülük ölçümleri her bir kuvvet ölçümünü takiben yapılmıştır. Kesme yüzeyinden beşer adet ölçüm yapılmış, en küçük ve en büyük değer atılarak kalan üç değer ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Çizelge 5.3’de her malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. “Değişim” sütunu altında, 6-450 dalga formu takımından elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin standart takıma göre düşme eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir. Yeşil tonlamalı kısımlar, dalgalı takımından elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin standart takıma göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Sarı tonlamalı kısımlar ise aksi durumu göstermektedir. C45, GG25 ve AISI 304 malzemelerinin ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’daki grafiklerde gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülük bulguları incelendiğinde, C45 malzemesi için dalga formu takımında standart takıma göre genel olarak daha kötü yüzey kalitesi elde edilmiştir. GG25 malzemesi için kesici takımlar arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. AISI 304 malzemesi için ise dalga formu takımında, 4., 5. ve 8. deney şartlarında ortalama %4,6 daha iyi, 1., 2. ve 3. deney şartlarında ortalama %5,0 oranında daha kötü yüzey kalitesi elde edilmiştir. Tüm deney şartlarında dalga formu takım için yüzey pürüzlülük değişimleri, C45 için ortalama %-9,0, GG25 ve AISI 304 malzemelerinde ise ortalama %-0,5 oranlarında elde edilmiştir.

Çizelge 5.3. Yüzey pürüzlülük değerleri ve takım bazındaki değişimleri

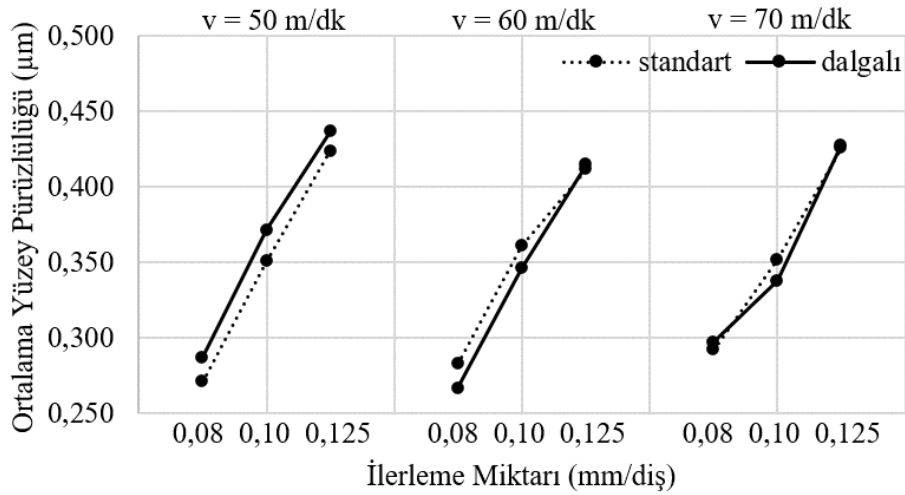
Deney No	C45 [7]			GG25 [7]			AISI 304		
	Ortalama Ra (µm) (standart)	Ortalama Ra (µm) (6-450)	Değişim (%)	Ortalama Ra (µm) (standart)	Ortalama Ra (µm) (6-450)	Değişim (%)	Ortalama Ra (µm) (standart)	Ortalama Ra (µm) (6-450)	Değişim (%)
1	0,418	0,453	-8,4	0,929	0,920	0,9	0,271	0,287	-6,0
2	0,466	0,459	1,5	0,996	0,994	0,2	0,351	0,372	-6,0
3	0,522	0,551	-5,6	1,054	1,054	0,0	0,424	0,437	-3,1
4	0,458	0,489	-6,6	0,897	0,907	-1,1	0,283	0,267	5,8
5	0,495	0,568	-14,7	0,960	0,977	-1,7	0,361	0,346	4,2
6	0,581	0,651	-12,1	1,035	1,037	-0,1	0,412	0,415	-0,7
7	0,515	0,580	-12,6	0,828	0,836	-0,9	0,292	0,297	-1,7
8	0,590	0,578	2,0	0,888	0,905	-1,9	0,352	0,338	4,0
9	0,616	0,770	-24,9	0,972	0,970	0,2	0,426	0,428	-0,5
ORT.	0,518	0,567	-9,0	0,951	0,956	-0,5	0,352	0,354	-0,5



Şekil 5.4. C45 malzeme için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri



Şekil 5.5. GG25 malzeme için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri



Şekil 5.6. AISI 304 malzeme için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

5.1.3. FEM analizleri

FEM analizlerinin yapıldığı işleme parametreleri, C45, GG25 ve AISI 304 malzemelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük verilerinden yola çıkılarak belirlenmiştir. Tüm malzemeler için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin takım bazındaki değişim oranlarının genel olarak birbirine en yakın olduğu 9. deney şartları FEM analizleri için seçilmiştir. Bir diğer neden ise FEM analizlerinin çözüm hızını büyük oranda etkileyen ağ yapısı parametrelerinden minimum ağ elemanı boyutunun uygun seçilmesi gerekliliğidir. Minimum ağ elemanı boyutu da ilerleme oranı parametresine bağlıdır. 0,125 mm/diş ilerleme oranı çözüm hızı için en uygun parametredir. Bu sebeple 9. deney şartları FEM analizleri için uygun görülmüştür. Bunlara ek olarak kesme kuvvetleri açısından dalga formu takımında belirgin bir avantaj elde edilen GG25 malzemesi için FEM analizlerinde ek bir deney şartı daha belirlenmiştir. Bunun için, dalga formu takımında düşük kesme kuvvetinin elde edildiği işleme parametrelerinden biri olan 3. deney şartı olarak seçilmiştir. Dolayısıyla FEM analizleri, C45 ve AISI 304 malzemeleri için 9. deney şartlarında, GG25 malzemesi için ise 3. ve 9. deney şartlarında yapılmıştır. FEM analizi sonuçları *MATLAB*® yazılımı ile işlenerek deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. C45 9. deney, GG25 9. deney, GG25 3. deney ve AISI 304 9. deney şartları için FEM analiz karşılaştırmaları sırasıyla Çizelge 5.4, Çizelge 5.5, Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Karşılaştırma tablolarında, “Ortalama kesme kuvvetleri” ve “Benzerlik oranları” olarak iki ana sütun görülmektedir. “Benzerlik oranları” sütununda, deneysel ve FEM olarak elde edilen verilerin uyuşma miktarları “%” olarak ifade edilmiştir. “Kuvvetlerdeki düşme eğilimi” satırındaki verilerde ise kesici takımların kesme kuvvetleri açısından karşılaştırmaları “%” olarak verilmiştir. Hemen yanındaki “benzerlik oranları” sütununda ise bu karşılaştırmaların uyuşma oranları “%” olarak ifade edilmiştir.

Karşılaştırma tabloları incelendiğinde, C45 malzemesi için FEM analizleri ve deneysel veriler arasında en az %86 oranında uyuşma elde edilmiştir. GG25 malzemesi için 9. deney şartlarında en az %73 ve 3. deney şartlarında ise %77 oranında kesme kuvvetleri birbirleri ile örtüşmektedir. AISI 304 malzemesinde için ise, FEM analizleri en az %97 oranında deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Deneysel ve FEM simülasyon sonuçlarından elde edilen bu uyuşma oranları kabul edilebilirdir ve önceki çalışmalarla uyumludur [28, 29, 79-83]. Bu uyuşma oranları ile ikinci aşama için doğrulanmış FEM çözüm sistemi oluşturulmuştur.

Çizelge 5.4. C45 9. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları

C45 Deney 9		Ortalama Kesme Kuvvetleri (N)				Benzerlik Oranı (%)			
		Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet	Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet
Standart Takım	Deney	862,8	1426,1	455,9	1728,0	96,00	86,89	63,34	86,19
	FEM	898,7	1641,3	719,7	2004,9				
Dalga Formlu (6-450) (mm-µm)	Deney	865,9	1468,1	480,7	1770,9	95,83	86,99	66,28	86,51
	FEM	903,6	1687,6	725,2	2047,1				
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): Deneysel		-0,36	-2,95	-5,44	-2,48	66,25	95,92	14,09	84,82
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): FEM		-0,54	-2,82	-0,77	-2,11				

Çizelge 5.5. GG25 9. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları

GG25 Deney 9		Ortalama Kesme Kuvvetleri (N)				Benzerlik Oranı (%)			
		Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet	Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet
Standart Takım	Deney	696,8	1183,1	470,6	1451,5	93,05	74,63	71,80	77,54
	FEM	748,9	1585,3	655,5	1871,8				
Dalga Formlu (6-450) (mm-µm)	Deney	711,7	1119,1	495,1	1415,6	94,91	68,36	75,32	73,85
	FEM	749,9	1637,0	657,4	1916,8				
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): Deneysel		-2,14	5,41	-5,21	2,47	6,22	60,24	5,62	97,43
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): FEM		-0,13	-3,26	-0,29	-2,40				

Çizelge 5.6. GG25 3. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları

GG25 Deney 3		Ortalama Kesme Kuvvetleri (N)				Benzerlik Oranı (%)			
		Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet	Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet
Standart Takım	Deney	687,7	1202,1	477,5	1464,9	91,51	76,41	75,27	78,96
	FEM	751,5	1573,3	634,4	1855,4				
Dalga Formlu (6-450) (mm-µm)	Deney	632,7	1081,1	453,6	1332,2	93,29	73,74	78,43	77,65
	FEM	678,2	1466,0	578,3	1715,7				
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): Deneysel		8,00	10,07	5,01	9,06	82,01	67,75	56,68	83,12
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): FEM		9,75	6,82	8,83	7,53				

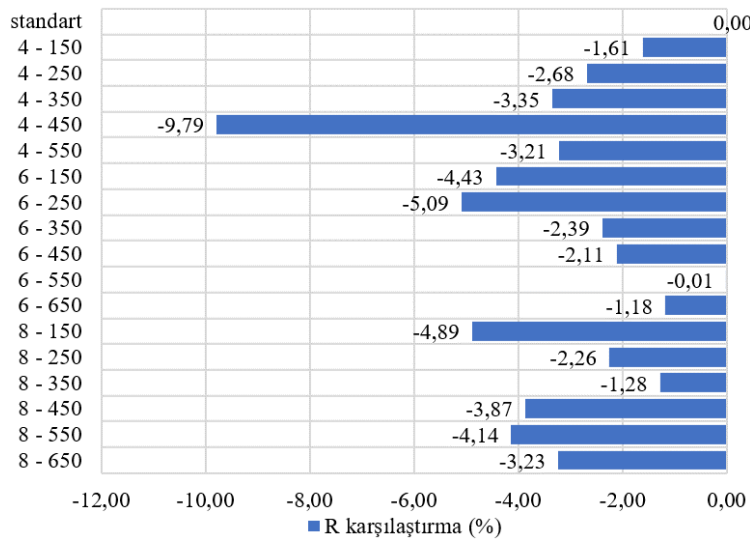
Çizelge 5.7. AISI 304 9. deney için deneysel ve FEM analiz sonuçlarının benzerlik oranları

AISI 304 Deney 9		Ortalama Kesme Kuvvetleri (N)				Benzerlik Oranı (%)			
		Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet	Fx İlerleme Kuvveti	Fy Radyal Kuvvet	Fz Eksenel Kuvvet	R Bileşke Kuvvet
Standart Takım	Deney	811,8	1986,1	465,2	2195,5	76,95	91,24	54,87	97,07
	FEM	1055,0	1812,1	847,8	2261,8				
Dalga Formlu (6-450) (mm-µm)	Deney	823,2	2036,1	467,5	2245,4	77,18	91,77	55,29	97,13
	FEM	1066,6	1868,6	845,5	2311,8				
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): Deneysel		-1,40	-2,52	-0,49	-2,28	78,77	80,78	54,53	97,17
Kuvvetlerdeki düşme eğilimi (%): FEM		-1,11	-3,12	0,27	-2,21				

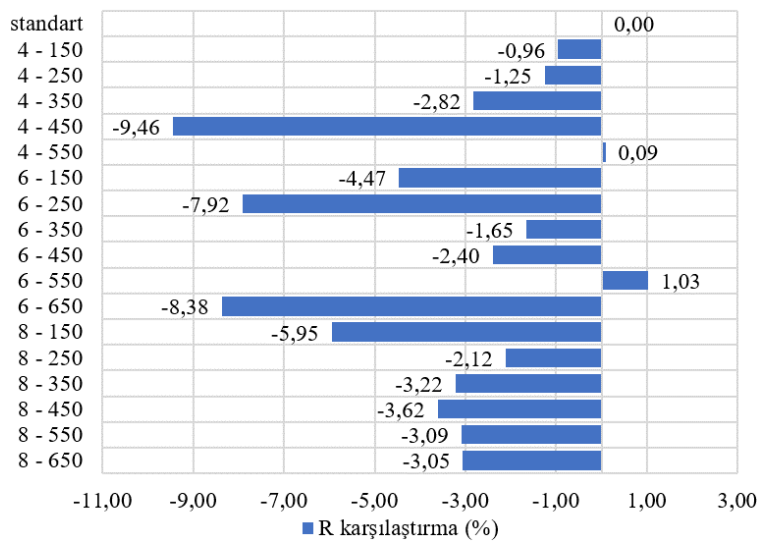
5.2. İkinci Aşama Çalışmaları

FEM analizleri ile farklı geometrilerdeki dalgalı formların (Bkz. Çizelge 4.4), takım bazındaki kesme kuvveti değişimleri tüm birinci aşama iş malzemeleri için yapılmıştır. Şekil 5.7a’da C45 malzemesi 9. deney, Şekil 5.7b ve Şekil 5.7c’de GG25 malzemesi 9. ve 3. deney ve Şekil 5.7d’de ise AISI 304 malzemesi 9. deney şartları için grafikler verilmiştir. Grafiklerde dalga formlu takımların, standart takıma göre bileşke kesme kuvveti (R) değişimleri “%” olarak ifade edilmiştir. Standart takım %0 olarak ifade edilirken diğer takımların kesme kuvveti açısından değişim oranları grafikteki pozitif ve negatif “%” ifadelerden anlaşılabilir. Yorumlarda, standart takıma göre daha düşük kesme kuvveti elde edilen ve pozitif “%” oranları ile gösterilen dalga formlu takımlar için “iyi” ifadesi, daha yüksek kesme kuvveti elde edilen ve negatif “%” oranları ile gösterilen takımlar için ise “kötü” ifadesi kullanılmıştır. Şekil 5.8’de, karşılaştırmanın daha net yapılabilmesi için Şekil 5.7’deki grafiklerin birleştirilmiş hali görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, tüm malzemeler için 9. deney şartlarında yapılan analizlerde tüm dalga formlu takımların kesme kuvvetleri, standart takıma göre yüksek çıkmıştır. GG25 malzemesi için deneysel çalışmalarda 6-450 dalga formlu takımdan düşük kesme kuvvetleri elde edildiği 3. deney şartlarından (Bkz. Çizelge 5.2) yola çıkarak yapılan analizlerde, referans dalga formlu takıma (6-450) yakın ve daha iyi davranış sergileyen farklı geometride dalga formlu takımlar olduğu anlaşılmıştır (Şekil 5.7c). İyi davranış sergileyen takımları seçebilmek için GG25 3. deney sonuçlarını incelemek gerekmektedir. Bu sebeple grafiklerde görüldüğü gibi 8-250 dalga formlu takım, belirgin bir şekilde düşük kesme kuvveti sergilediği için en iyi takım

olarak seçilmiştir. İkinci iyi takım için, 9. deney şartlarında dalga formlu takımlar arasında en düşük kesme kuvvetlerinin elde edildiği 6-550 takımı seçilmiştir. 4-450 dalga formu, 9. deney şartlarında belirgin bir şekilde yüksek kesme kuvvetleri elde edilmesi sebebiyle en kötü takım olarak seçilmiştir. İkinci kötü takım seçimi için, 8-150, 6-650, 4-350 ve 8-650 formları olmak üzere birbirine yakın adaylar mevcuttur. Burada, geometrik olarak diğer seçilen takımlardan daha farklı ve standart takım formuna yakın olmayan bir dalgalı formun seçilmesi daha makul olacağı düşünülerek ikinci kötü takım olarak 8-650 formu kötü takım olarak seçilmiştir (Çizelge 5.8).

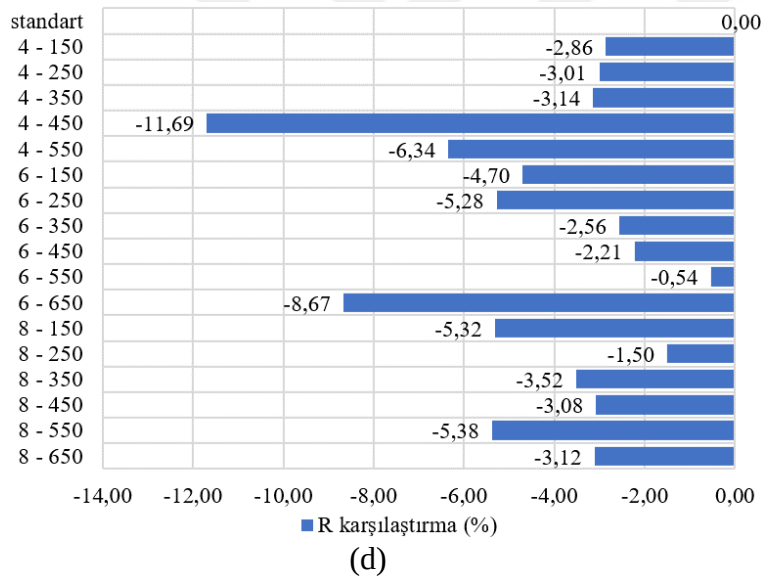
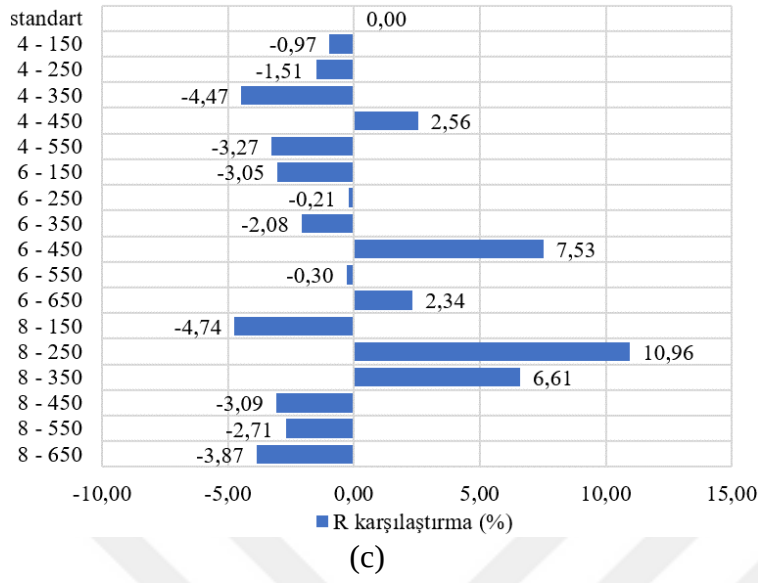


(a)

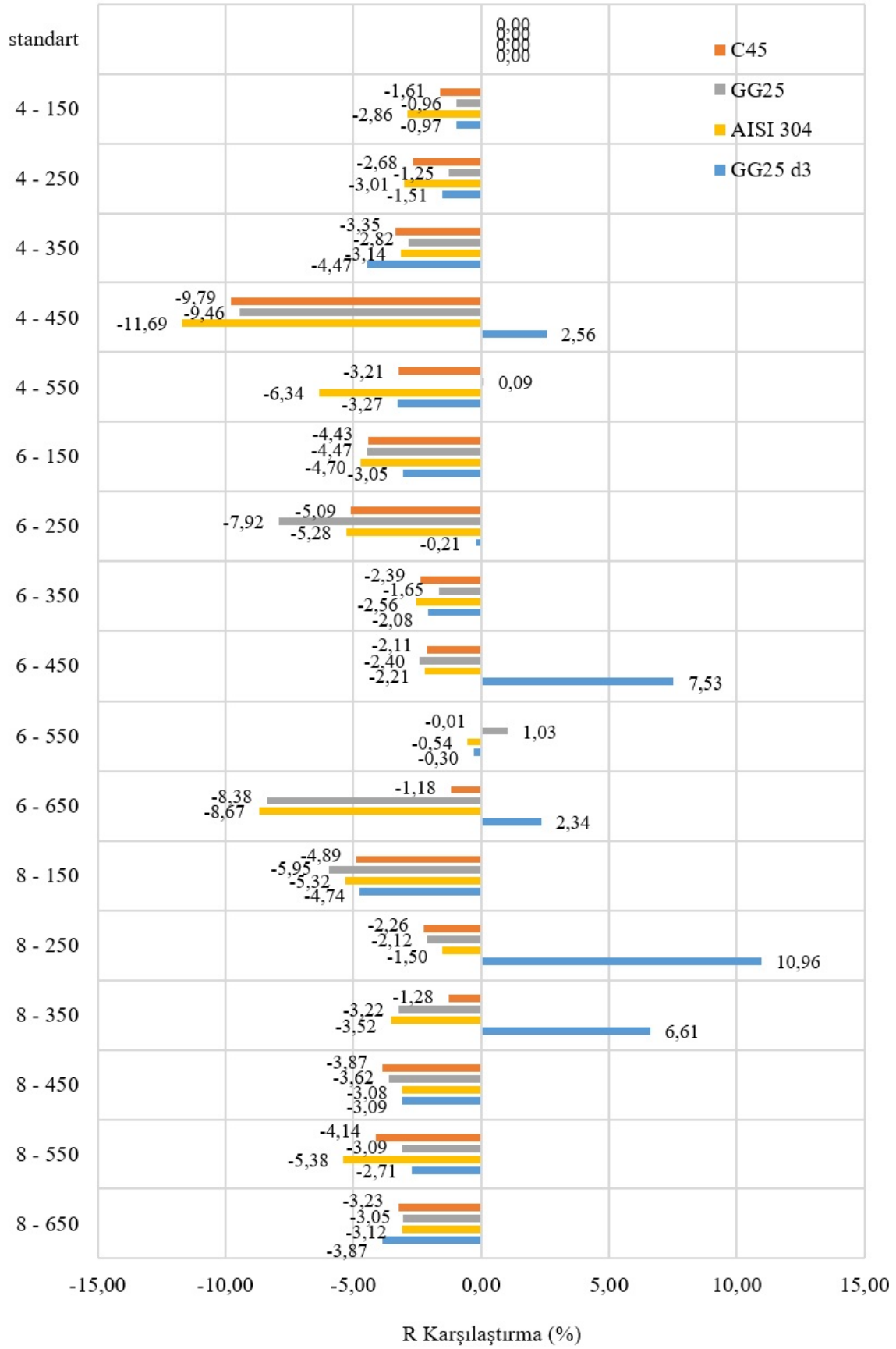


(b)

Şekil 5.7. Farklı geometrik formdaki dalga formlu takımların kesme kuvvetleri açısından kıyaslamaları a) C45 9. deney, b) GG25 9. deney, c) GG25 3. deney, d) AISI 304 9. deney



Şekil 5.7. (devam) Farklı geometrik formdaki dalga formu takımların kesme kuvvetleri açısından kıyaslamaları a) C45 9. deney, b) GG25 9. Deney, c) GG25 3. Deney, d) AISI 304 9. deney

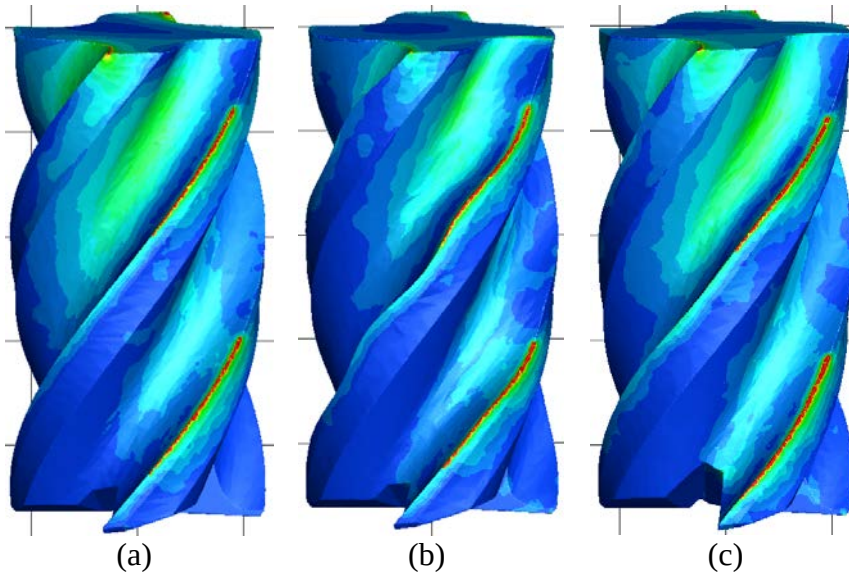


Şekil 5.8. Bütün iş malzemeleri için farklı geometrik formdaki dalga formulu takımların kesme kuvvetleri açısından kıyaslamaları

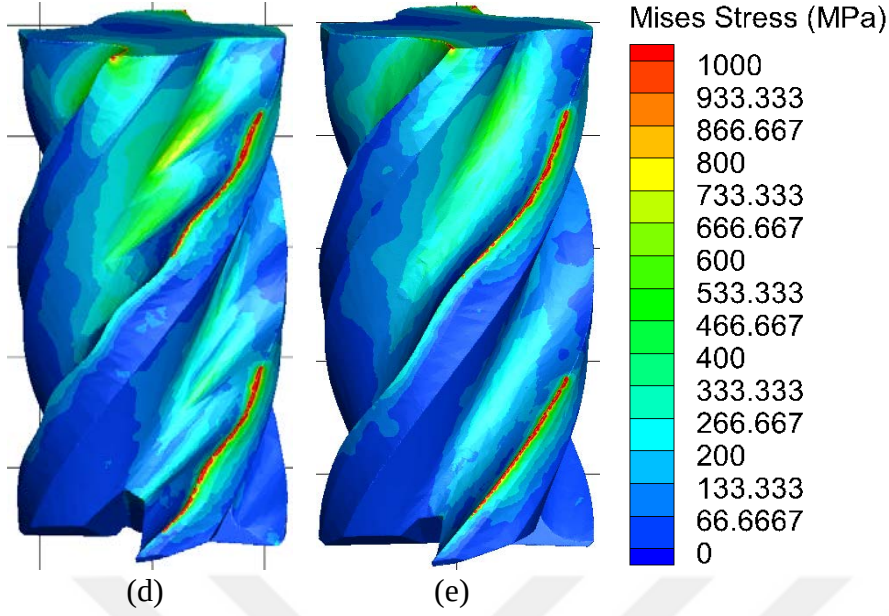
Çizelge 5.8. Üçüncü aşama için seçilen dalga formlu takımlar

	İyi performans (mm)-(μm)		Kötü performans (mm)-(μm)	
Takım dalga boyu ve genliği	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

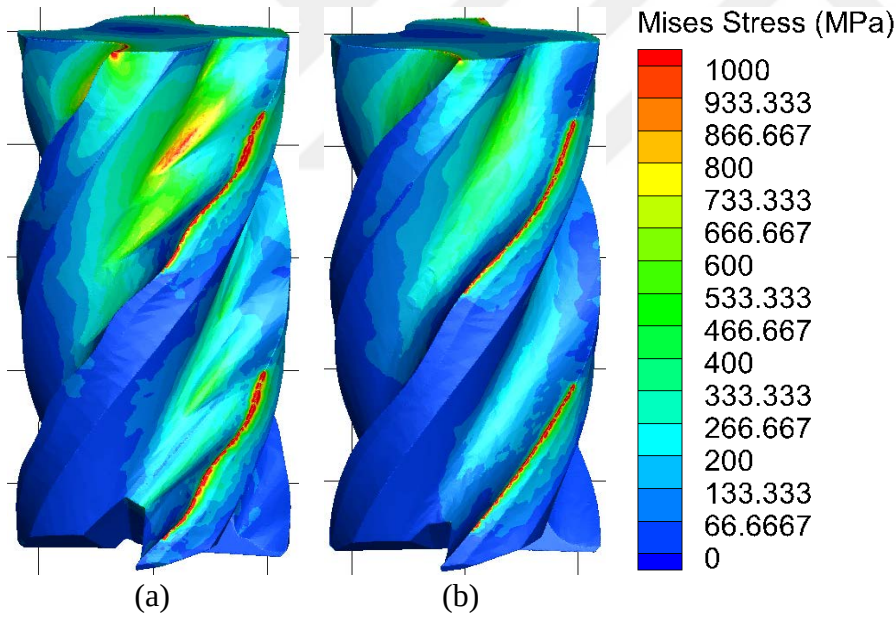
FEM analizlerinde, kesme kuvvetleri karşılaştırmalarının yanı sıra kesici takımlardaki Von-Mises gerilmeleri de incelenmiştir. En iyi performansa sahip 8-250 dalga formlu takımın seçildiği GG25 malzemesi ve 3. deney şartlarındaki gerilmeler incelendiğinde (Resim 5.1), gerilme dağılımları ve bölgesel yoğunluğu açılarından benzer bir davranış gözlenmiştir. Ancak 4-450 dalga formlu takımda yüksek gerilme bölgelerini belirten kırmızı tonlamalı kısımların takım kenarlarında daha yaygın olduğu görülmektedir (Resim 5.1d). Bunlara ek olarak, 4-450 dalga formlu takımın daha kötü performans sergilediği işleme şartlarındaki bir gerilme davranışı incelendiğinde ise kırmızı tonlamalı yüksek gerilme bölgelerin yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir (Resim 5.2a). Von-Mises gerilme davranışları genel olarak incelendiğinde, ikinci aşama hedefi olan iyi ve kötü işleme performanslı takımların kıyaslanması açısından yeteri kadar ayırt edici olmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle, tezin üçüncü aşaması kapsamındaki deneylerde kullanılacak ikişer adet iyi ve kötü performansa sahip dalga formlu takım geometrileri bu FEM analizlerinden elde edilen kesme kuvveti verileri ile belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 5.8).



Resim 5.1. GG25 malzemesi ve 3. deney şartları için Von-Mises gerilim dağılımları
a) standart, b) 6-550, c) 8-250, d) 4-450, e) 8-650



Resim 5.1. (devam) GG25 malzemesi ve 3. deney şartları için Von-Mises gerilim dağılımları
a) standart, b) 6-550, c) 8-250, d) 4-450, e) 8-650

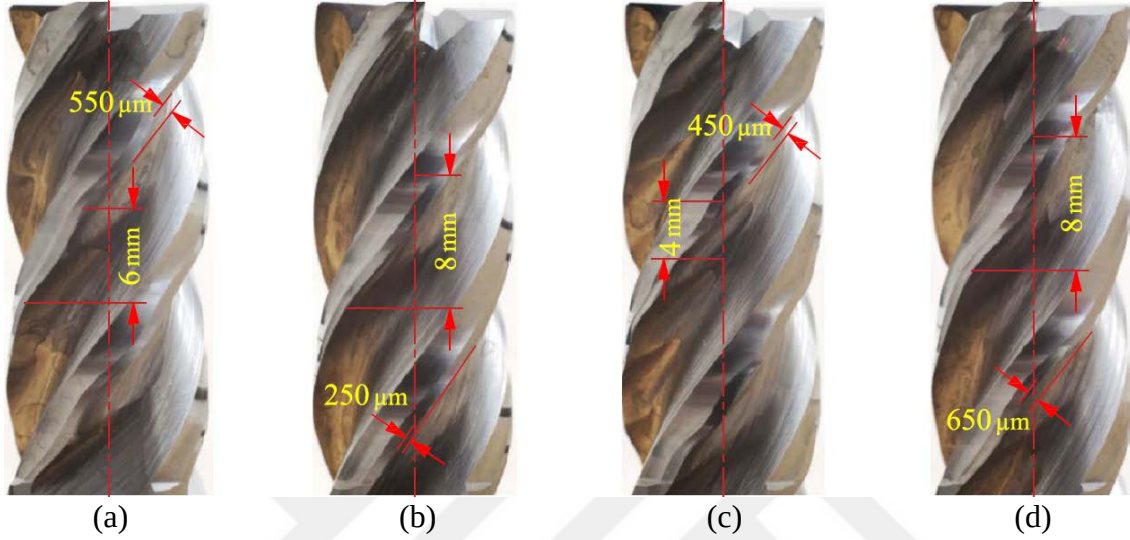


Resim 5.2. 9. deney şartları için Von-Mises gerilim dağılımları a) AISI 304 malzemesi 4-450, b) C45 malzemesi 8-650

5.3. Üçüncü Aşama Çalışmaları

Tezin üçüncü aşamasında, standart takım ve ikinci aşamada belirlenen iyi ve kötü dalga formu takımların (Bkz. Çizelge 5.8) kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Dalga formu kesici takımların görselleri Resim 5.3'te verilmiştir. İş parçası olarak AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri kullanılmıştır. Ölçümler, üç ilerleme oranı ve

üç kesme hızı seçilerek her malzeme için tam faktöriyel deney tasarımında 45'er deney yapılmıştır (Çizelge 5.9). Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük verileri ile varyans ve regresyon analizleri yapılmıştır. Deneyler ve istatistiksel analizler sonucunda dördüncü aşama yapılan takım ömrü deneyleri için en uygun işleme parametreleri belirlenmiştir.



Resim 5.3. Üçüncü aşamada kullanılan dalga formu kesici takımlar a) 6-550, b) 8-250, c) 4-450, d) 8-650

Çizelge 5.9. Üçüncü aşama tam faktöriyel deney tasarımı

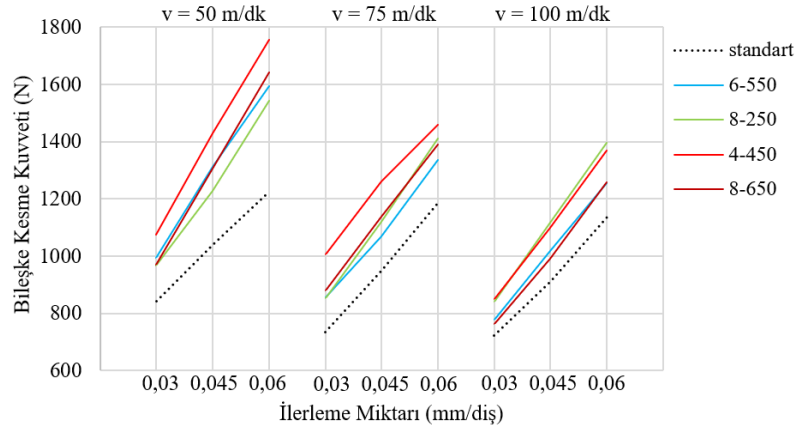
Deney no	AISI 316L		Ti 6Al 4V	
	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)
1	50	0,030	40	0,025
2		0,045		0,0375
3		0,060		0,05
4	75	0,030	60	0,025
5		0,045		0,0375
6		0,060		0,05
7	100	0,030	80	0,025
8		0,045		0,0375
9		0,060		0,05

5.3.1. Kesme kuvvetleri

Kesme kuvvetleri deneylerinde AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri için standart takım ile 6-550, 8-250, 4-450 ve 8-650 dalga formlu kesici takımların kesme kuvvetleri ve kuvvetlerin takım bazındaki değişimleri kıyaslanmıştır. Ortalama bileşke kuvvetler (R) ve değişim oranları, AISI 316L malzeme için Çizelge 5.10’de, Ti 6Al 4V malzeme için ise Çizelge 5.11’te verilmiştir. Her bir dalga formlu takım için tanımlanan “Değişim” sütununda, dalga formlu takımlardan elde edilen kesme kuvvetlerinin standart takıma göre düşme (pozitif) ve yükselme (negatif) eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir. Yeşil tonlamalı kısımlar, dalgalı takımlardan elde edilen kuvvetlerin standart takıma göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Sarı tonlamalı kısımlar ise aksi durumu göstermektedir. “Ortalama Değişim” sütununda ise “Değişim” sütunundaki verilerin ortalaması verilmiştir. Ortalama bileşke kesme kuvvetleri (R), AISI 316L malzeme için Şekil 5.9’da ve Ti 6Al 4V malzeme için Şekil 5.10’daki grafiklerle gösterilmiştir.

Çizelge 5.10. AISI 316L malzeme için ortalama bileşke kuvvetler ve takım bazındaki değişimleri

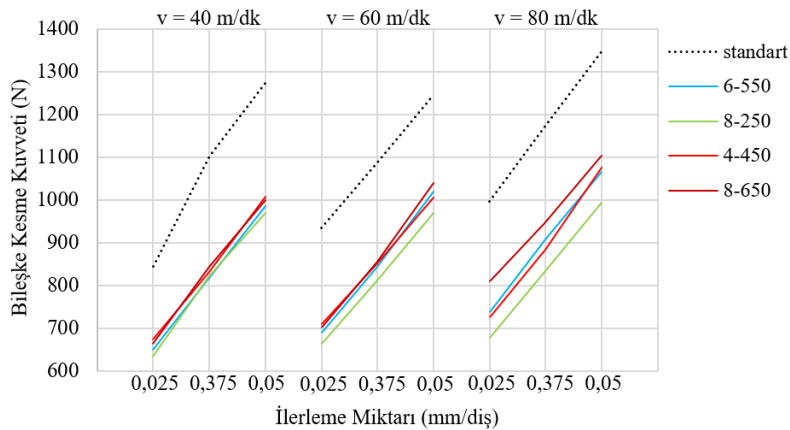
Deney No	R (N) (standart)	6-550		8-250		4-450		8-650		Ortalama Değişim (%)
		R (N)	Değişim (%)	R (N)	Değişim (%)	R (N)	Değişim (%)	R (N)	Değişim (%)	
1	842	996	-18,2	968	-14,9	1074	-27,5	971	-15,2	-19,0
2	1042	1312	-26,0	1228	-17,9	1428	-37,1	1307	-25,5	-26,6
3	1224	1595	-30,3	1544	-26,2	1755	-43,4	1642	-34,2	-33,5
4	734	856	-16,5	853	-16,1	1006	-37,1	880	-19,8	-22,4
5	949	1069	-12,7	1121	-18,1	1262	-32,9	1138	-19,8	-20,9
6	1187	1335	-12,5	1411	-18,9	1459	-22,9	1391	-17,2	-17,9
7	723	777	-7,5	841	-16,3	849	-17,4	764	-5,7	-11,7
8	913	1018	-11,5	1119	-22,5	1100	-20,5	991	-8,6	-15,7
9	1136	1254	-10,4	1397	-22,9	1370	-20,6	1258	-10,7	-16,2
ORTALAMA		-16,2		-19,3		-28,8		-17,4		-20,4



Şekil 5.9. AISI 316L malzeme için bileşke kesme kuvvetleri

Çizelge 5.11. Ti 6Al 4V malzeme için ortalama bileşke kuvvetler ve takım bazındaki değişimleri

Deney No	R (N) (standart)	6-550		8-250		4-450		8-650		Ortalama Değişim (%)
		R (N)	Değişim (%)	R (N)	Değişim (%)	R (N)	Değişim (%)	R (N)	Değişim (%)	
1	845	649	23,2	634	25,0	673	20,3	664	21,4	22,5
2	1103	817	25,9	821	25,6	832	24,6	844	23,4	24,9
3	1272	985	22,5	969	23,8	1007	20,8	999	21,4	22,1
4	935	689	26,2	664	28,9	710	24,0	701	25,0	26,0
5	1088	844	22,4	811	25,5	851	21,8	855	21,4	22,8
6	1245	1020	18,0	969	22,2	1005	19,3	1040	16,5	19,0
7	996	738	25,9	678	32,0	726	27,1	810	18,7	25,9
8	1175	907	22,8	833	29,1	883	24,8	948	19,3	24,0
9	1348	1066	20,9	993	26,3	1075	20,2	1104	18,1	21,4
ORTALAMA		23,1		26,5		22,6		20,6		23,2



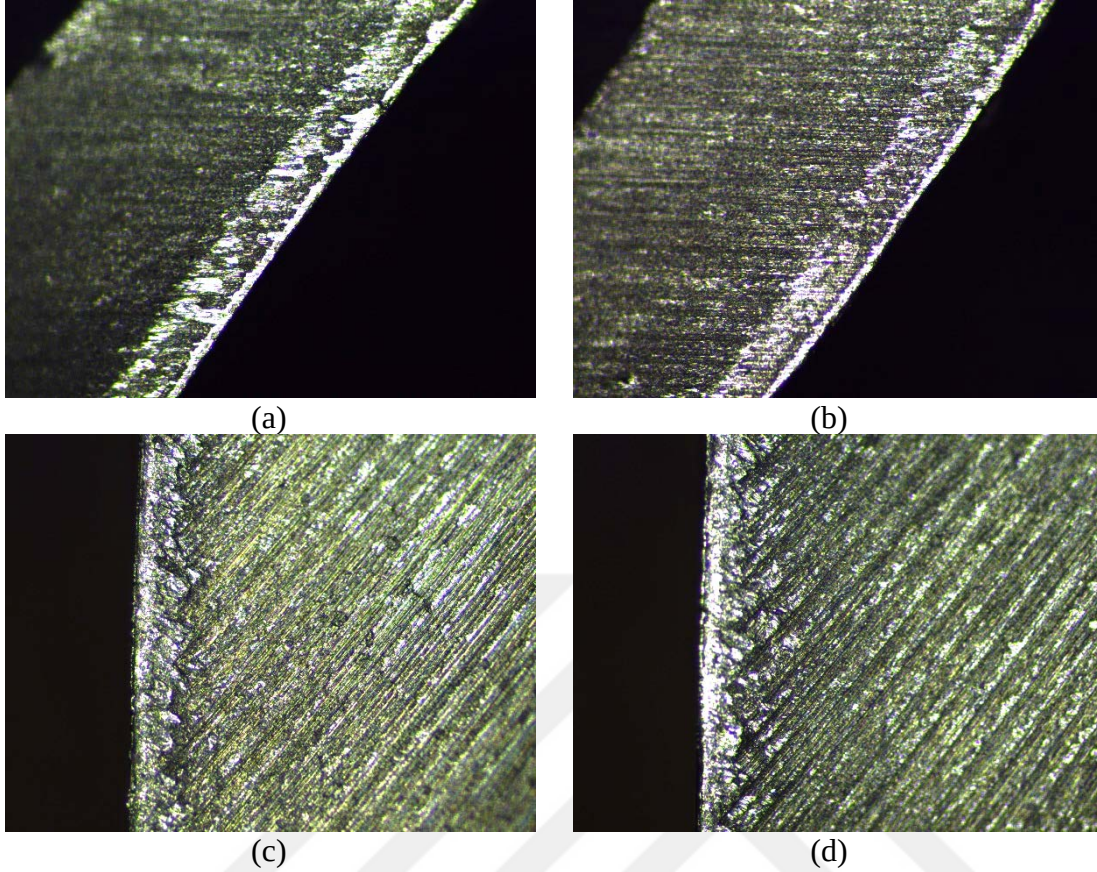
Şekil 5.10. Ti 6Al 4V malzeme için bileşke kesme kuvvetleri

AISI 316L malzemesi için kesme kuvvetleri bulguları incelendiğinde, tüm deney şartlarında standart ve dalga formlu kesici takımlar arasında belirgin kuvvet farklılıkları gözlenmiştir. Tüm dalga formlu takımlarda, standart takıma göre daha yüksek kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Dalga formlu takımların standart takıma göre kesme kuvvetleri tüm işleme şartlarında ortalama, 6-550 takımı için %-16,2, 8-250 için %-19,3, 4-450 için %-28,8 ve 8-650 için %-17,4 oranlarında yükselme eğilimi göstermiştir. Bulgular işleme şartları açısından değerlendirildiğinde, kesme hızının artması ve ilerleme miktarının azalması ile dalga formlu takımların standart takıma göre kesme kuvvetleri değişimi genel olarak azalmıştır. Diğer bir deyişle kesme hızının en yüksek ve ilerleme miktarının en düşük olduğu 7. deney şartlarında, dalga formlu takımlardan ölçülen kesme kuvvetlerinin standart takıma yaklaştığı gözlenmiştir. Tüm kesici takımlar için kesme hızı artışı ve ilerleme miktarının azalması ile kesme kuvvetlerinin düştüğü görülmektedir (Şekil 5.9). Kesme hızı artışı, kesme bölgesinin sıcaklığını artırır. Bu durum, takım-talaş temas alanının küçülmesine ve kısmen de ikinci deformasyon bölgesindeki kayma dayanımının düşmesine neden olur. Bu nedenlerle kesme kuvvetleri düşer [4, 23, 54]. Ayrıca, takım-talaş temas alanındaki sıcaklık artışıyla sürtünme katsayısı azalır ve bu durum da kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olur [84]. İlerleme miktarının azalması, talaş yükünü ve kesme bölgesi basıncını azaltır. Bu nedenle kesme kuvvetleri düşer [35]. Tüm işleme şartlarında en düşük kesme kuvvetleri standart takımdan ve en yüksek kesme kuvvetleri 4-450 dalga formlu takımdan elde edilmiştir. 4-450 dalga formlu takımın talaş açısı, -6° ile $+22^{\circ}$ arasında değişmektedir. Talaş açısının artması ve $+22^{\circ}$ gibi büyük pozitif talaş açılı bölgeler, kesme düzlemi açısının artırır. Bu durum, takım-talaş temas alanını ve buradaki sürtünme kuvvetini azaltır. Bu nedenlerle kesme kuvvetlerinin düşmesi gerektiği düşünürebilir [85-88]. Ancak, talaş açısının küçülmesi ve -6° gibi büyük negatif talaş açılı bölgelerin bu duruma daha baskın bir ters etki yaratması sebebiyle kesme kuvvetlerinin yükselmesi açıklanabilir.

Ti 6Al 4V malzemesi için kesme kuvvetleri bulguları incelendiğinde, tüm deney şartlarında standart ve dalga formlu kesici takımlar arasında AISI 316L malzemesindeki gibi belirgin kuvvet farklılıkları gözlenmiştir. Tüm dalga formlu takımlarda, standart takıma göre daha düşük kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Dalga formlu takımların standart takıma göre kesme kuvvetleri tüm işleme şartlarında ortalama, 6-550 takımı için %23,1, 8-250 için %26,5, 4-450 için %22,6 ve 8-650 için %20,6 oranlarında azalma eğilimi göstermiştir. Bulgular işleme şartları açısından değerlendirildiğinde, tüm kesici takımlar için kesme hızı artışı ile kuvvetlerin arttığı, ilerleme miktarının azalması ile kesme kuvvetlerinin düştüğü

görülmektedir. Talaş kaldırma işlemlerinin genelinde, kesme hızı artışı ile kesme bölgesinin sıcaklığının artması, takım-talaş temas alanının küçülmesi ve kısmen de ikinci deformasyon bölgesindeki kayma dayanımının düşmesi sebepleri ile kesme kuvvetlerinin düşmesi beklenir [4, 23, 54]. Ancak, kesme sırasında yığıntı talaş oluşumu gözlenirse, kesme hızı artışı ile kesme kuvvetlerinde artış görülebilir. Yığıntı talaş, kesme düzlem açısını büyütür ve takım-talaş temas alanını küçültür. Bu nedenle kesme kuvvetleri düşer. Diğer yandan kesme hızının artışı da yığıntı talaş oluşma eğilimini azaltır. Bu nedenlerden dolayı düşük kesme hızlarında yoğun yığıntı talaş eğilimi ve düşük kesme kuvvetleri, yüksek kesme hızlarında seyrek yığıntı talaş ve yüksek kesme kuvvetleri görülür [4, 89]. İlerleme miktarının azalması ile talaş yükünün ve kesme bölgesi basıncının azalması sebebiyle kesme kuvvetleri düşer [35]. Ayrıca titanyum alaşımlarının düşük ısı iletkenliğine bağlı olarak kesme bölgesindeki sıcaklık artışının da kesme kuvvetlerinde dalgalanmalara sebep olduğu düşünülebilir. Tüm işleme şartlarında en yüksek kesme kuvvetleri standart takımdan ve en düşük kesme kuvvetleri 8-250 dalga formlu takımdan elde edilmiştir.

Ti 6Al 4V malzemesi için talaş açıları değişiminin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi, AISI 316L malzemesindeki gibi gerçekleşmemiştir. Ti 6Al 4V malzemesinde, tüm kesici takımlarda yığıntı talaş oluşumları gözlenmiştir. Örnek olarak, Resim 5.4'te 6-550 takımı için yığıntı talaş görüntüleri verilmiştir. Takımların pozitif talaş açılı bölgelerinde kesme düzlem açısının büyük olması ve bu durumun takım-talaş temas alanını ve sürtünme kuvvetini azaltması sebepleri ile kesme kuvvetlerinin düştüğü bilinmektedir [85-88]. Bu nedenle, pozitif talaş açılı bölgelerde oluşan yığıntı talaş (Resim 5.4a, c), kuvvetlerin düşmesi açısından destekleyici bir etki göstermiştir. Takımların negatif talaş açılı bölgelerinde (Resim 5.4b, d) ise AISI 316L malzemesinde görülen negatif talaş açılarının kesme kuvvetleri üzerinde yarattığı ters etkinin, yığıntı talaş sebebiyle pozitif bir etkiye dönüştüğü düşünülebilir. Bu bulgulardan yola çıkarak, Ti 6Al 4V malzemesi için yığıntı talaş oluşumunun, kesme kuvvetlerini düşürdüğü ve dalga formlu takımları standart takımlara göre avantajlı duruma soktuğu düşünülmektedir.



Resim 5.4. 6-550 dalga formlu takım için yığıntı talaş görüntüleri, a) yan yüzey/pozitif talaş açısı, b) yan yüzey/negatif talaş açısı, c) talaş yüzeyi/pozitif talaş açısı, d) talaş yüzeyi/negatif talaş açısı

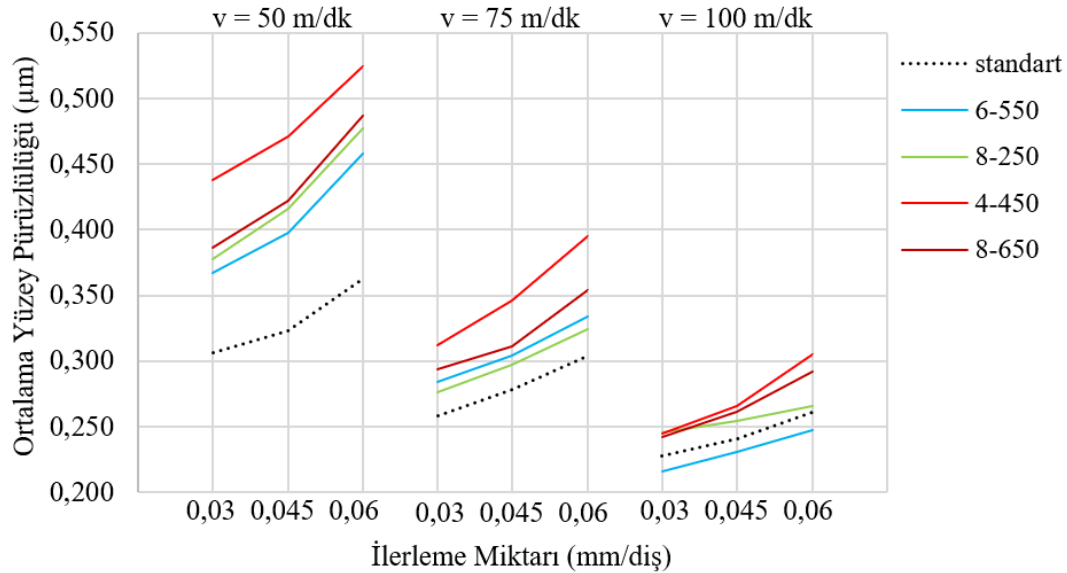
5.3.2. Yüzey pürüzlülük değerleri

Yüzey pürüzlülük ölçümleri her bir kuvvet ölçümünü takiben yapılmıştır. Kesme yüzeyinden beşer adet ölçüm yapılmış, en küçük ve en büyük değer atılarak kalan üç değerın ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Deneylerde, AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri için standart takım ile 6-550, 8-250, 4-450 ve 8-650 dalga formlu kesici takımların yüzey pürüzlülük değerleri ve takım bazındaki değişimleri kıyaslanmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ve değişim oranları, AISI 316L malzemesi için Çizelge 5.12’de, Ti 6Al 4V malzemesi için ise Çizelge 5.13’te verilmiştir. Her bir dalga formlu takım için tanımlanan “Değişim” sütununda, dalga formlu takımlardan elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin standart takıma göre düşme (pozitif) ve yükselme (negatif) eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir. Yeşil tonlamalı kısımlar, dalgalı takımlardan elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin standart takıma göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Sarı tonlamalı kısımlar ise aksi durumu göstermektedir. “Ortalama Değişim” sütununda ise

“Değişim” sütunundaki verilerin ortalaması verilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra), AISI 316L malzemesi için Şekil 5.11’de ve Ti 6Al 4V malzemesi için Şekil 5.12’deki grafiklerle gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. AISI 316L malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve takım bazındaki değişimleri

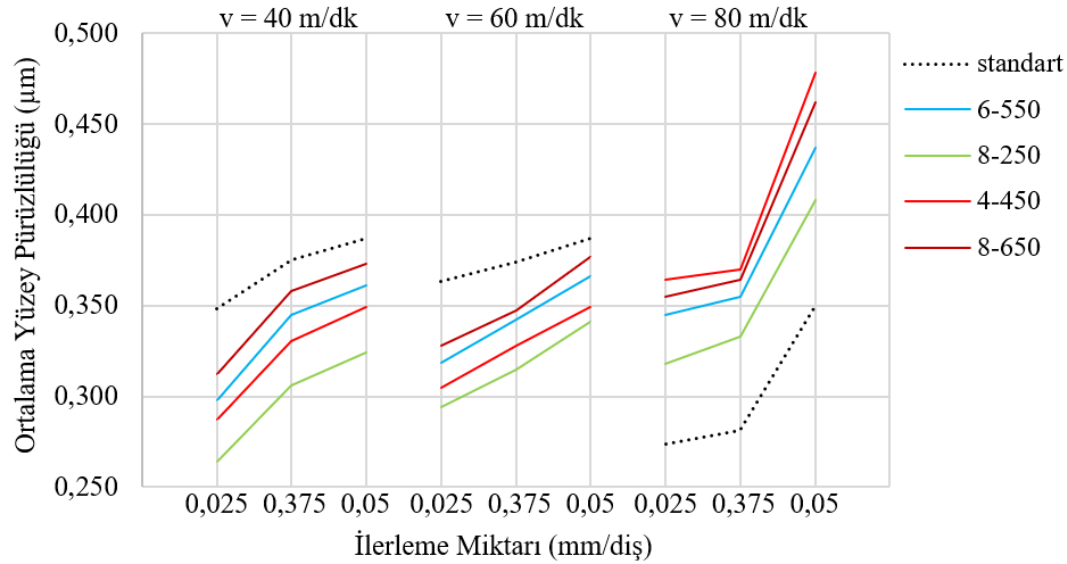
Deney No	Ra (μm) (standart)	6-550		8-250		4-450		8-650		Ortalama Değişim (%)
		Ra (μm)	Değişim (%)	Ra (μm)	Değişim (%)	Ra (μm)	Değişim (%)	Ra (μm)	Değişim (%)	
1	0,307	0,367	-19,7	0,378	-23,3	0,438	-42,8	0,386	-25,9	-27,9
2	0,323	0,398	-23,2	0,416	-28,8	0,471	-45,8	0,422	-30,7	-32,1
3	0,362	0,458	-26,5	0,477	-31,8	0,524	-44,8	0,487	-34,5	-34,4
4	0,258	0,284	-10,1	0,276	-7,0	0,312	-20,9	0,294	-14,0	-13,0
5	0,278	0,304	-9,4	0,297	-6,8	0,346	-24,5	0,311	-11,9	-13,1
6	0,304	0,334	-10,0	0,324	-6,7	0,395	-30,1	0,354	-16,6	-15,8
7	0,228	0,216	5,4	0,246	-7,7	0,245	-7,5	0,242	-6,1	-4,0
8	0,241	0,231	4,1	0,254	-5,4	0,266	-10,4	0,262	-8,6	-5,0
9	0,261	0,247	5,4	0,266	-1,8	0,305	-16,7	0,292	-11,7	-6,2
ORTALAMA		-9,3		-13,3		-27,1		-17,8		-16,8



Şekil 5.11. AISI 316L malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Çizelge 5.13. Ti 6Al 4V malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve takım bazındaki değişimleri

Deney No	Ra (μm) (standart)	6-550		8-250		4-450		8-650		Ortalama Değişim (%)
		Ra (μm)	Değişim (%)	Ra (μm)	Değişim (%)	Ra (μm)	Değişim (%)	Ra (μm)	Değişim (%)	
1	0,348	0,298	14,4	0,264	24,1	0,287	17,5	0,312	10,3	16,6
2	0,375	0,345	8,0	0,306	18,4	0,330	11,9	0,358	4,5	10,7
3	0,387	0,361	6,7	0,324	16,3	0,349	9,8	0,373	3,6	9,1
4	0,363	0,318	12,3	0,294	19,0	0,305	16,0	0,328	9,6	14,2
5	0,374	0,342	8,6	0,315	15,8	0,328	12,3	0,347	7,2	11,0
6	0,387	0,366	5,4	0,341	11,9	0,349	9,8	0,377	2,6	7,4
7	0,274	0,345	-25,9	0,318	-16,1	0,364	-32,8	0,355	-29,6	-26,1
8	0,281	0,355	-26,3	0,333	-18,5	0,370	-31,7	0,364	-29,5	-26,5
9	0,349	0,437	-25,1	0,408	-16,8	0,478	-36,8	0,462	-32,3	-27,7
İlk 6 deney		9,2		17,6		12,9		6,3		11,5
Son 3 deney		-25,8		-17,1		-33,8		-30,5		-26,8
ORTALAMA		-2,4		6,0		-2,7		-5,9		-1,3



Şekil 5.12. Ti 6Al 4V malzeme için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

AISI 316L malzemesi için yüzey pürüzlülük bulguları incelendiğinde, tüm deney şartlarında standart ve dalga formlu kesici takımlar arasında belirgin bir farklılık gözlenmiştir. Tüm dalga formlu takımlarda, standart takıma göre genel olarak daha yüksek yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiş olup tüm işleme şartlarında ortalama, 6-550 takımı için %-9,3, 8-250 için %-13,3, 4-450 için %-27,1 ve 8-650 için %-17,8 oranlarında yükselme eğilimi

gözlenmiştir. Bulgular işleme şartları açısından değerlendirildiğinde, kesme hızının artması ve ilerleme miktarının azalması ile dalga formlu takımların standart takıma göre yüzey pürüzlülük değişimi genel olarak azalmıştır. Diğer bir deyişle kesme hızının en yüksek ve ilerleme miktarının en düşük olduğu 7. deney şartlarında, dalga formlu takımlardan ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin standart takıma yaklaştığı gözlenmiştir. Tüm kesici takımlar için kesme hızı artışı ve ilerleme miktarının azalması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin düştüğü görülmektedir (Şekil 5.11). Kesme hızı artışı ile yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesi beklenen bir durumdur [3, 54, 90, 91]. Kesme hızı artışıyla kesme bölgesinin sıcaklıkları yükselir ve bu nedenle talaş akışı ve talaş deformasyonu kolaylaştırır. Ayrıca, sıcaklık artışı ile mikro çatlak oluşumu ve yırtılma eğilimini de azaltır. Dolayısıyla yüzey pürüzlülük değerleri düşer [92]. İlerleme miktarı ile yüzey pürüzlülük değişimi doğru orantılıdır. İlerleme miktarı artışının yüzey pürüzlülük değerlerini artırması beklenen bir sonuçtur [22, 55].

“Ortalama Değişim” sütunu incelendiğinde yüzey pürüzlülüklerinin değişim oranları, 50 m/dk kesme hızında gerçekleşen deneylerde ortalama %-31,5 iken 75 m/dk kesme hızında ortalama %-14’e ve 100 m/dk kesme hızında ise ortalama %-5,1 olarak görülmektedir. Buna ek olarak 6-550 dalga formlu takım, son üç deney şartında standart takıma göre ortalama %4,9 oranında daha iyi yüzey kalitesi göstermiştir (Çizelge 5.12). Şekil 5.11 incelendiğinde, kesme hızı ve ilerleme miktarı değişiminin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri daha iyi görülmektedir. Tüm işleme şartlarında en düşük yüzey pürüzlülük değerleri genel olarak standart takımda görülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri 4-450 dalga formlu takımında görülmüştür.

Talaş açısı artışı ile yığıntı talaş oluşma eğiliminin azalır ve takım-talaş temas alanının sürtünme katsayısı düşer. Bu nedenlerle yüzey kalitesinin iyileşmesi beklenen bir sonuçtur [4, 93, 94]. Dolayısıyla dalga formlu takımlardaki büyük pozitif talaş açılı bölgeler nedeniyle yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesi gerektiği düşünülebilir. Ancak, kesme kuvvetleri sonuçlarındaki gibi talaş açısının küçülmesi ve büyük negatif talaş açılı bölgelerin bu duruma baskın bir ters etki yaratmış olması, yüzey pürüzlülük değerlerinin yükselmesini açıklayabilir. Yüksek kesme hızında (100 m/dk), 6-550 dalga formlu 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 formlu takımında daha küçük negatif talaş açısı (-4°) olması nedeni ile yüzey pürüzlülüğü iyileşme eğilimi göstermiştir.

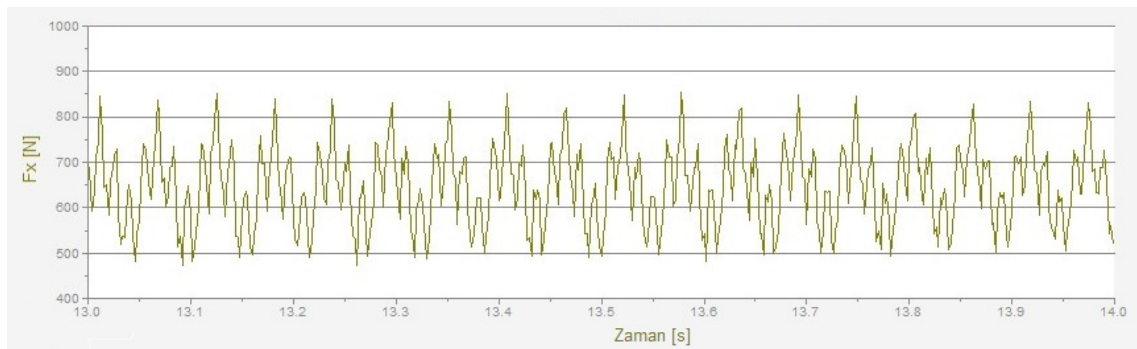
Dolayısıyla yüzey kalitesi üzerinde, negatif talaş açısının pozitif talaş açısına göre daha etkin bir parametre olduğu çıkarımı yapılabilir.

Ti 6Al 4V malzemesi için yüzey pürüzlülük bulguları incelendiğinde, tüm deney şartlarında standart ve dalga formlu kesici takımlar arasında AISI 316L malzemesindeki gibi belirgin yüzey pürüzlülük farklılıkları gözlenmiştir. İlk altı deney şartında tüm dalga formlu takımlarda standart takıma göre daha düşük, son üç deney şartında ise yüksek yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Dalga formlu takımların standart takıma göre işlenen yüzey kalitesi, ilk altı deney şartlarında ortalama, 6-550 takımı için %9,2, 8-250 için %17,6, 4-450 için %12,9 ve 8-650 için %6,3 oranlarında artış eğilimi göstermiştir. Son üç deney şartlarında ise ortalama, 6-550 takımı için %-25,8, 8-250 için %-17,1, 4-450 için %33,8 ve 8-650 için %30,5 oranlarında azalma eğilimi görülmüştür Çizelge 5.13. Bulgular işleme şartları açısından değerlendirildiğinde, tüm kesici takımlar için 40-60 m/dk kesme hızı aralığında yüzey pürüzlülük değerlerinin genel olarak birbirine yakın seyrettiği ve yer yer arttığı görülmektedir (Şekil 5.12). Yüzey kalitesi açısından, kesme hızı artışının yarattığı pozitif etki ile yığıntı talaş ve çıkıntı uzunluğunun yarattığı negatif etkinin birbirlerini sönmülmesinin bu duruma neden olduğu düşünülebilir. 60-80 m/dk kesme hızı aralığında ise kesici takımların yüksek oranda titreşimli çalıştıkları (Şekil 5.13, Şekil 5.14) için yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. İlerleme miktarı ile yüzey pürüzlülük değişimi doğru orantılıdır. İlerleme miktarı artışının yüzey pürüzlülük değerlerini artırması beklenen bir sonuçtur [22, 55]. İlk altı deney şartlarında en iyi yüzey kalitesi %17,6 oranla 8-250, en kötü yüzey kalitesi ise %6,3 oranla 8-650 dalga formlu takımlardan elde edilmiştir. Ti 6Al 4V malzemesi için talaş açıları değişiminin yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkisi, AISI 316L malzemesindeki gibi gerçekleşmemiştir. Ti 6Al 4V malzemesinde, tüm kesici takımlarda yığıntı talaş oluşumları gözlenmiştir. Talaş açısı etkileri ilk altı deney ve son üç deney şartları için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

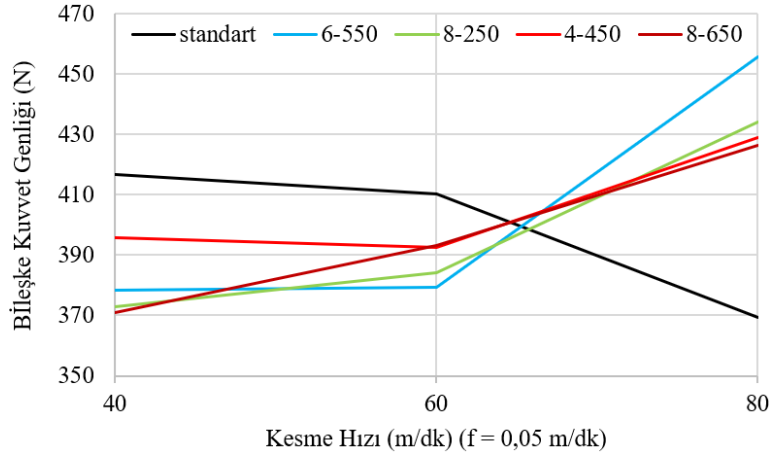
İlk altı deney şartında; takımların pozitif talaş açılı bölgelerinde yığıntı talaş oluşma eğiliminin azalması ve takım-talaş temas alanının sürtünme katsayısı düşmesi nedenleriyle yüzey kalitesinin iyileşmesi beklenen bir sonuçtur [4, 93, 94]. Takımlarda yığıntı talaş gözlenmesine rağmen pozitif talaş açısının yüzey kalitesi üzerindeki olumlu etkisi ilk altı deney şartlarında dalga formlu takımlarda görülebilmektedir. Takımların negatif talaş açılı bölgelerinde ise AISI 316L malzemesinde görülen negatif talaş açılarının yüzey kalitesi üzerinde yarattığı ters etkinin, yığıntı talaş sebebiyle pozitif bir etkiye dönüştüğü

düşünülebilir. Buradan yola çıkarak, Ti 6Al 4V malzemesi için yığıntı talaş oluşumunun, yüzey pürüzlülük değerlerini düşürdüğü ve dalga formlu takımları standart takımlara göre avantajlı duruma soktuğu çıkarımı yapılabilir.

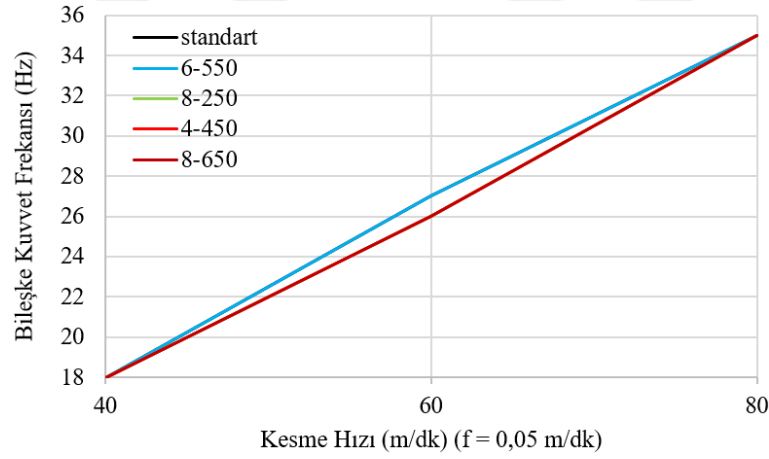
Son üç deney şartında; dalga formlu takımlarda görülen düşük yüzey kalitesini açıklamak için takımların kuvvet salınımları incelenmiştir. Kesme kuvveti deneylerindeki ham dinamometre verilerinden, bir saniyelik kuvvet salınımları elde edilmiştir (Resim 5.5). Tüm kesme hızları ve sabit ilerleme miktarına sahip deney şartlarındaki (3. 6. ve 9. deneyler) kuvvet salınımlarının, maksimum ve minimum değerlerinin farkından kuvvet genlikleri ve üç kuvvet bileşeninin genliğinden de bileşke kuvvet genliği elde edilmiştir (Şekil 5.13). Buna ek olarak kesme kuvvetinin bir saniye süre içindeki maksimum veya minimum noktalara ulaşma sayısından da bileşke kuvvet frekansları elde edilmiştir (Şekil 5.14). Elde edilen kuvvet genlikleri ve frekansları sayesinde kesici takımların titreşim davranışları hakkında bilgi edinilmiştir. Şekil 5.13 incelendiğinde, kesme hızı arttıkça kuvvet genliklerinin standart takım için azaldığı ve dalga formlu takımlar için arttığı görülmektedir. 80 m/dk kesme hızı seviyesinde dalga formlu takımlar için en yüksek genliklere ulaşılmıştır. Şekil 5.14 incelendiğinde, kuvvet frekanslarının kesme hızı artışı ile sürekli arttığı görülmektedir. 80 m/dk kesme hızında tüm takımlar için en yüksek frekans değerlerine ulaşılmıştır. Bu bulgulardan yola çıkarak, 80 m/dk kesme hızında kesici takımlar, yüksek oranda titreşimli bir davranış sergilemiştir. Bu nedenle, son üç deney şartında dalga formlu takımlarda titreşim sebebiyle yüzey kalitesinin kötü çıktığı düşünülmektedir.



Resim 5.5. Kistler® 9272 dinamometre ham kesme kuvveti salınımları



Şekil 5.13. Ti 6Al 4V malzeme için bileşke kuvvet genlikleri değişimi



Şekil 5.14. Ti 6Al 4V malzeme için bileşke kuvvet frekansları değişimi

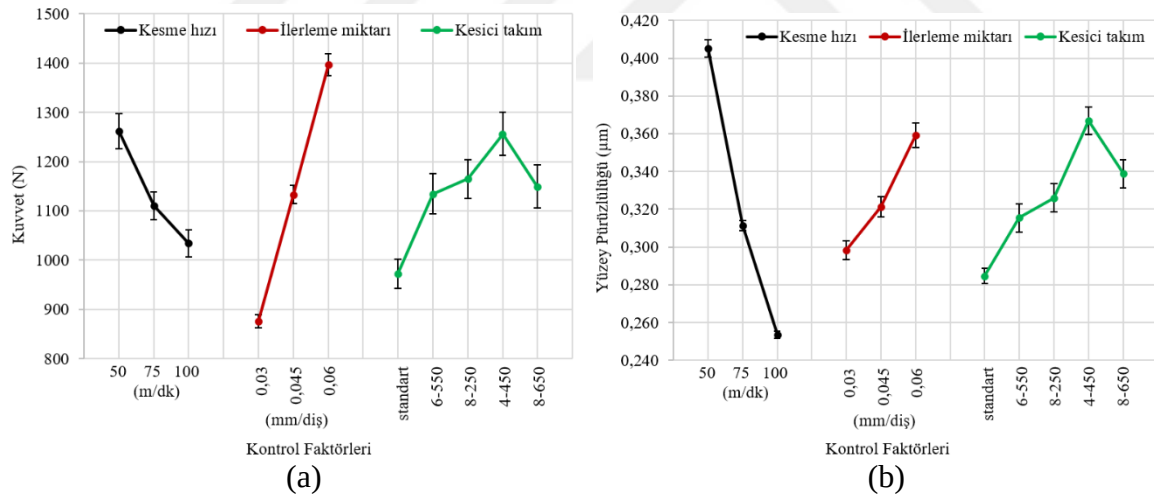
5.3.3. Varyans ve regresyon analizleri

AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemelerden deneysel olarak elde edilen kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülük değerlerinin, kesici takım, kesme hızı ve ilerleme miktarı kontrol faktörlerine göre değiştiği kabul edilerek varyans ve regresyon analizleri yapılmıştır. Analizler, tüm işleme şartları ile tam faktöriyel olarak yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları, AISI 316L için Çizelge 5.14'te, Ti 6Al 4V için Çizelge 5.15'te gösterilmiştir. Analizlerde, P değerlerinin tümünün %5 ($P < 0,05$) oranından küçük çıktığı görülmektedir. Bu durum, önceki çalışmalarda da olduğu gibi seçilen kontrol faktörlerinin ve seviyelerinin, sonuçlar üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir [35, 95-98]. Her iki malzeme için %95 güven aralığındaki kritik F değerleri; $F(.05,2,44)$ 3,209, $F(.05,4,44)$ 2,584, $F(.05,2,134)$ 3,064 ve $F(.05,4,134)$ 2,439 şeklindedir.

AISI 316L malzemenin analiz sonuçlarına göre, kesme kuvvetleri üzerinde en etkin parametrenin %69,35 oranla ilerleme miktarı, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkin parametrenin ise %69,53 oranla kesme hızı olduğu anlaşılmaktadır (Çizelge 5.14). Buna ek olarak hem kesme kuvvetleri hem de yüzey pürüzlülüğü için faktörlerin F değerleri, kritik F değerlerinden büyüktür. Bu durum, etkin parametrenin anlamlı seviyede olduğunu göstermektedir. Etkin parametre davranışlarının daha belirgin görülmesi için etki grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 5.15). 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 5.15a), kesme hızının artması ve ilerleme miktarının azalması ile kesme kuvvetlerinin düştüğü, deneysel sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Kesici takım faktörünün etkisine bakıldığında; deneysel sonuçlara benzer şekilde (Bkz. Çizelge 5.10), 4-450 takımında en yüksek, standart takımında en düşük ve 6-550, 8-250 ve 8-650 takımlarda ise birbirlerine yakın kesme kuvvetleri görülmektedir. Faktörlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 5.15b), analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Bkz. Çizelge 5.12) uyum sağladığı görülmektedir. Kesme hızının artması ve ilerleme miktarının azalması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Kesici takım faktörünün etkisi incelendiğinde; 4-450 takımında en yüksek, 8-650 takımında ikinci yüksek, standart takımında en düşük ve 6-550 ve 8-250 takımlarda ise birbirine yakın yüzey pürüzlülük değerleri görülmektedir. Etki grafiklerindeki standart hatalar (sonuçlardaki hata payları) incelendiğine (Şekil 5.15), her iki grafikte de kesme hızı ve ilerleme miktarlarının her bir seviyesinde birbirinden bağımsız etki alanlarının olduğu görülmektedir. Kesici takım faktörü için her iki grafikte, standart takım ile 4-450 takım bağımsız etki alanlarına sahiptir. 6-550, 8-250 ve 8-650 takımları için her iki grafikte de hem bağımsız hem de çakışan etki alanlarının olduğu 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 (Bkz. Çizelge 5.10, Çizelge 5.12) uyushmaktadır.

Çizelge 5.14. AISI 316L malzeme için varyans analizleri

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (Adj SS)	Kareler ortalaması (Adj MS)	F değeri	P değeri	Etki (%) (Contribution)
Ortalama Kesme Kuvveti (N)						
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
Toplam	44	2943242				100,00
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)						
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
Toplam	134	0,85869				100,00



Şekil 5.15. AISI 316L malzeme için etki grafikleri a) Kesme kuvvetleri, b) Yüzey pürüzlülükleri

Ti 6Al 4V malzemenin analiz sonuçlarına göre, kesme kuvvetleri üzerinde en etkin parametrenin %59,76 oranla ilerleme miktarı, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkin parametrenin ise %35,35 oranla ilerleme miktarı olduğu anlaşılmaktadır (Çizelge 5.15). Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri için faktörlerin F değerleri, kritik F değerlerinden büyüktür. Buradan etkin parametrenin anlamlı seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Etki grafikleri incelendiğinde (Şekil 5.16), her bağımsız faktörün her bir

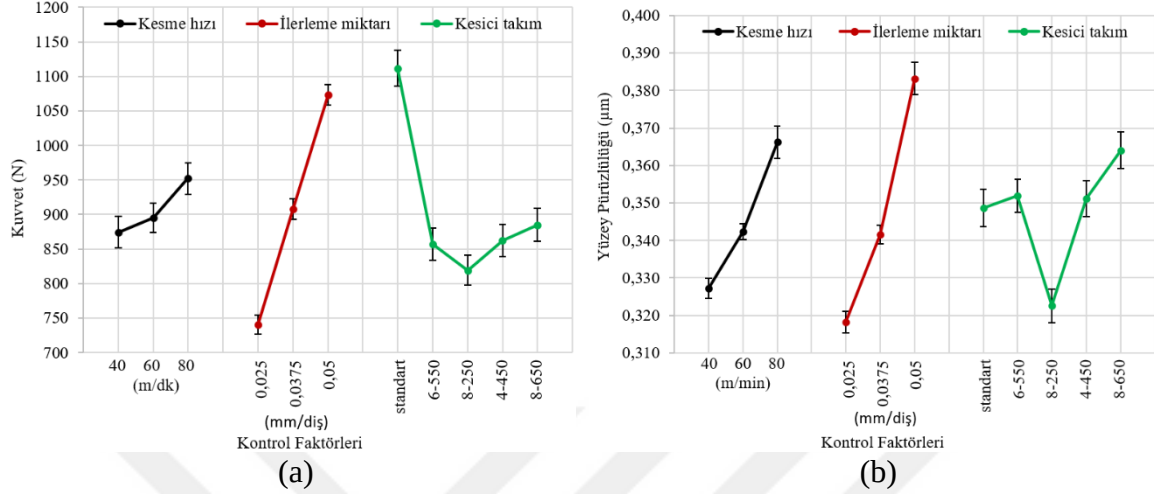
seviyesinde elde edilen kesme kuvveti, yüzey pürüzlülük değerleri ve bunların standart hataları verilmiştir. Faktörlerin kesme kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 5.16a), kesme hızının ve ilerleme miktarının azalması ile kesme kuvvetlerinin düştüğü, deneysel sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Kesici takım faktörünün etkisine bakıldığında; deneysel sonuçlara benzer şekilde (Bkz. Çizelge 5.11), standart takımında en yüksek, 8-250 takımında en düşük ve 6-550, 4-450 ve 8-650 takımlarda ise birbirlerine yakın kesme kuvvetleri görülmektedir. Faktörlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 5.16b), analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Bkz. Çizelge 5.13) uyum sağladığı görülmektedir. Kesme hızının ve ilerleme miktarının azalması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Kesici takım faktörünün etkisi incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerleri, en yüksekten en düşüğe doğru sırasıyla standart, 8-650, 6-550, 4-450 ve 8-250 takımlarda görülmüştür.

Çizelge 5.15. Ti 6Al 4V malzeme için varyans analizleri

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (Adj SS)	Kareler ortalaması (Adj MS)	F değeri	P değeri	Etki (%) (Contribution)
Ortalama Kesme Kuvveti (N)						
Model	8	1368945	171118	334,62	0,000	98,67
Lineer	8	1368945	171118	334,62	0,000	98,67
Kesici takım, t	4	491323	122831	240,19	0,000	35,41
Kesme hızı, v	2	48587	24294	47,51	0,000	3,50
İlerleme miktarı, f	2	829034	414517	810,58	0,000	59,76
Hata	36	18410	511			1,33
Toplam	44	1387355				100,00
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)						
Model	8	0,14727	0,018408	18,01	0,000	53,35
Lineer	8	0,14727	0,018408	18,01	0,000	53,35
Kesici takım, t	4	0,02507	0,006269	6,13	0,000	9,08
Kesme hızı, v	2	0,02461	0,012305	12,04	0,000	8,91
İlerleme miktarı, f	2	0,09758	0,048792	47,73	0,000	35,35
Hata	126	0,1288	0,001022			46,65
Toplam	134	0,27607				100,00

Etki grafiklerindeki standart hatalar incelendiğine (Şekil 5.16), her iki grafikte de kesme hızı ve ilerleme miktarlarının tüm seviyeleri birbirinden bağımsız etki alanlarına sahiptir. Kesici takım faktörü açısından; kesme kuvvetleri için 6-550, 4-450 ve 8-650 takımlarının ve yüzey pürüzlülüğü için standart, 6-550 ve 4-450 takımlarının etki alanlarının çakıştığı

görülmektedir. Bu durum, bu takımların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirlerine yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.16. Ti 6Al 4V malzeme için etki grafikleri a) Kesme kuvvetleri, b) Yüzey pürüzlülükleri

Regresyon analizleri sonucunda elde edilen model özetleri Çizelge 5.16'da gösterilmiştir. AISI 316L malzeme için geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayıları (R^2), kesme kuvvetleri açısından %95,97 ve yüzey pürüzlülükleri açısından ise %91 oranlarında elde edilmiştir. Ti 6Al 4V malzeme için belirlilik katsayıları, kesme kuvvetleri açısından %98,67 ve yüzey pürüzlülükleri açısından ise %53,34 oranlarında olduğu görülmektedir. Bu oranlar, kurulan istatistiksel modellerin deneysel verilere uygunluğunun kabul edilebilir ve sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğunu göstermektedir. AISI 316L malzemesinin regresyon eşitlikleri, kesme kuvvetleri modeli için Eş. 5.2'de ve yüzey pürüzlülük modeli için ise Eş. 5.3'te verilmiştir. Ti 6Al 4V malzemesinin regresyon eşitlikleri, kesme kuvvetleri modeli için Eş. 5.4'te ve yüzey pürüzlülük modeli için ise Eş. 5.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.16. Model özetleri

AISI 316L				Ti 6Al 4V			
S	R-sq (R^2)	R-sq (adj)	R-sq (pred)	S	R-sq (R^2)	R-sq (adj)	R-sq (pred)
Ortalama Kesme Kuvveti				Ortalama Kesme Kuvveti			
57,4058	%95,97	%95,07	%93,70	22,6137	98,67%	98,38%	97,93%
Yüzey Pürüzlülüğü				Yüzey Pürüzlülüğü			
0,024773	%91,00	%90,42	%89,66	0,0319723	53,34%	50,38%	46,44%

$$\begin{aligned} \text{Kesme Kuvveti} = & 1135,38 - (163,0 \times t_1) - (0,7 \times t_2) + (29,3 \times t_3) + (120,6 \times t_4) \\ & + (13,8 \times t_5) + (126,6 \times v_1) - (25,3 \times v_2) - (101,3 \times v_3) - (259,8 \times f_1) \\ & - (2,2 \times f_2) + (261,9 \times f_3) \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Yüzey Pürüzlülüğü} = & 0,32636 - (0,04173 \times t_1) - (0,01092 \times t_2) - (0,00040 \times t_3) \\ & + (0,04057 \times t_4) + (0,01249 \times t_5) + (0,08790 \times v_1) - (0,01498 \times v_2) \\ & - (0,07292 \times v_3) - (0,02796 \times f_1) - (0,00505 \times f_2) + (0,03301 \times f_3) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Kesme Kuvveti} = & 907,10 + (204,6 \times t_1) - (49,7 \times t_2) - (88,1 \times t_3) - (44,7 \times t_4) \\ & - (22,1 \times t_5) - (32,9 \times v_1) - (11,9 \times v_2) + (44,9 \times v_3) - (166,4 \times f_1) \\ & + (0,4 \times f_2) + (166,0 \times f_3) \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Yüzey Pürüzlülüğü} = & 0,34767 + (0,00104 \times t_1) + (0,00426 \times t_2) - (0,02511 \times t_3) \\ & + (0,00348 \times t_4) + (0,01633 \times t_5) - (0,01318 \times v_1) - (0,00538 \times v_2) \\ & + (0,01856 \times v_3) - (0,02944 \times f_1) - (0,00611 \times f_2) + (0,03556 \times f_3) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Üçüncü aşama deneysel ve istatistiksel çalışma bulgularından yola çıkarak, dördüncü aşamadaki takım aşınması deneyleri için en uygun işleme parametreleri belirlenmiştir. AISI 316L malzeme için hem deneyler hem de veri analizleri sonucunda, en düşük kesme kuvvetleri ve en iyi yüzey kalitesinin elde edildiği işleme şartları, en yüksek kesme hızı (100 m/dk) ve en düşük ilerleme miktarı (0,030 mm/diş) parametrelerinin kullanıldığı 7. deney şartı olarak belirlenmiştir. Ti 6Al 4V malzeme için deneyler ve veri analizleri sonucunda, kesme kuvvetleri açısından en uygun işleme parametreleri, en düşük ilerleme miktarına (0,025 mm/diş) sahip 1. 4. ve 7. deney şartları olarak belirlenmiştir. Yüzey kalitesi açısından ise 1.ve 4. deney şartlarının en uygun işleme parametreleri olduğu anlaşılmıştır.

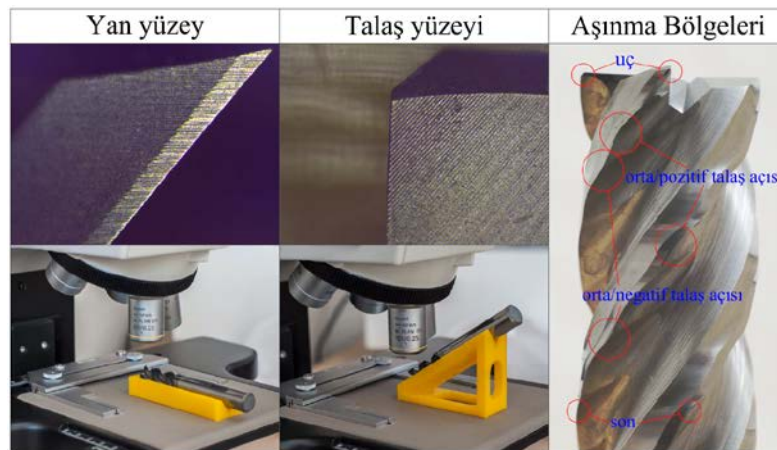
5.4. Dördüncü Aşama Çalışmaları

Tezin dördüncü aşamasında, standart takım ve ikinci aşamada belirlenen iyi ve kötü dalga formulu takımların (Bkz. Çizelge 5.8) takım aşınma miktarları incelenmiştir. İş parçası olarak AISI 316L ve Ti 6Al 4V malzemeleri kullanılmıştır. Aşınma deneyleri, AISI 316L için toplamda 320 cm³ ve Ti 6Al 4V için ise 200 cm³ talaş kaldırılarak ve kesme sıvısı kullanılarak yapılmıştır. İşleme parametreleri, üçüncü aşamada yapılan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük incelemelerindeki sonuçlar referans alınarak belirlenmiştir. Aşınma deney tasarımı Çizelge 5.17’de verilmiştir. AISI 316L malzeme, 32 cm³ talaş hacmi periyotları ile 320 cm³ talaş hacmine kadar 7. deney şartlarında işlenmiştir. Ti 6Al 4V malzeme, 40 cm³ talaş hacmi periyotları ile 1. deney şartlarında (40 m/dk ve 0.025 mm/diş) aşınma deneylerine başlanmıştır. 1. deney şartında 80 cm³ talaş hacmine kadar işleme yapılmıştır.

Ancak bu iki periyotluk işleme sürecinde aşınma miktarları tüm takımlar için belirgin şekilde ölçülememiştir. Bu sebeple işleme parametreleri diğer bir iyi işleme şartı olan 7. deney şartlarında 120 cm^3 talaş hacmine kadar devam etmiştir. Ancak bazı kesici takımlardan yine verimli bir şekilde aşınma ölçümü alınamamıştır. Deneyler, 200 cm^3 talaş hacmine kadar 8. deney şartlarında sürdürülmüştür. Her iki malzeme için de aşınma deneyleri, ISO 8688-2 standardının takım ömrü olarak belirlediği aşınma değerlerine ulaşana kadar sürdürülmüştür. Bazı kesici takımlar bu değere ulaşmadan kırıldığı için kırılma ile deney sonlandırılmıştır. Aşınma deneylerinde, her işleme periyodu sonunda takımların aşınma miktarları görüntülenip incelenmiştir. Aşınma ölçümleri, takımların yan yüzey ve talaş yüzeylerinin uç, orta/pozitif talaş açısı, orta/negatif talaş açısı ve son kısımlarından olmak üzere sekiz bölgeden ve 10x büyütme oranlarında fotoğraflanmıştır (Resim 5.6).

Çizelge 5.17. Dördüncü aşama takım aşınmaları deney tasarımı

AISI 316L			Ti 6Al 4V		
Talaş Miktarı (cm^3)	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)	Talaş Miktarı (cm^3)	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/diş)
32 - 320	100	0,030	40 – 80	40	0,025
			120	80	0,025
			160 - 200	80	0,0375



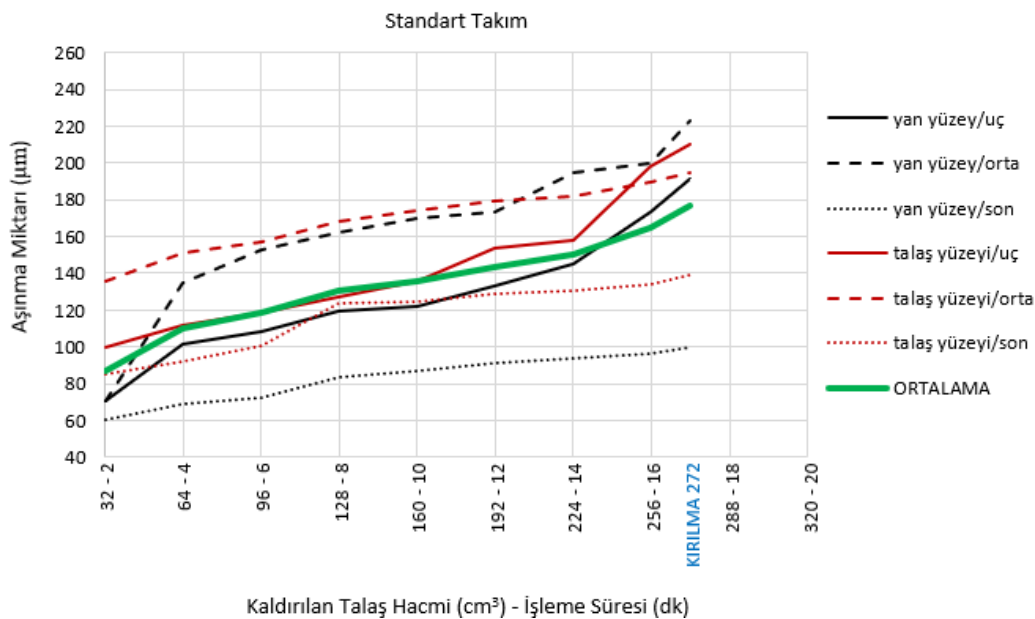
Resim 5.6. Takım aşınma yüzeyleri ve ölçüm düzeneği

AISI 316L malzeme için standart takımın aşınma miktarları Çizelge 5.18’de, aşınma miktarı grafikleri Şekil 5.17’de ve aşınma görüntüleri Resim 5.7’de gösterilmiştir. Aşınma tipi olarak tüm ölçüm bölgelerinde düzenli çentik aşınması gözlenmiştir. Takımda, 224 cm^3 talaş hacmine ulaştığında yan yüzey/uç kısımda $737,875 \text{ }\mu\text{m}$ bölgesel bir aşınma meydana

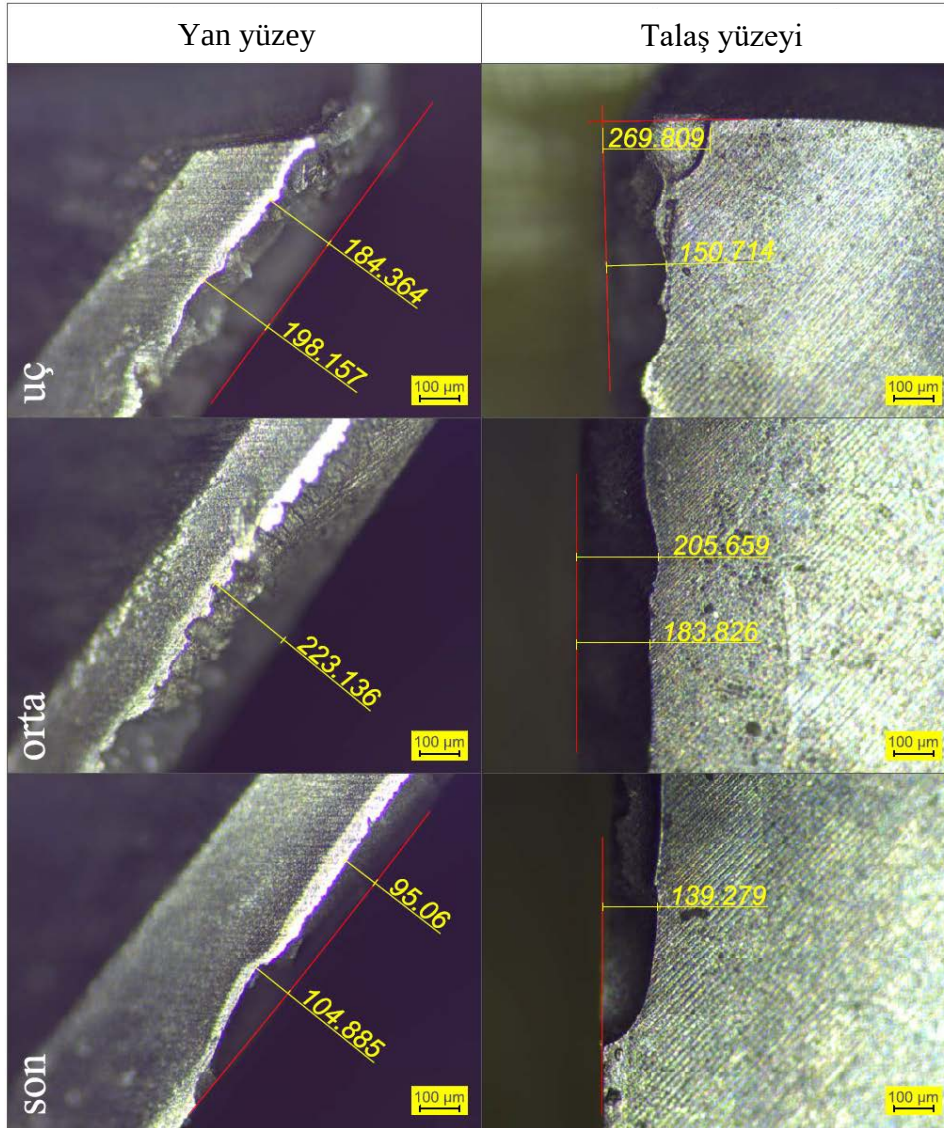
gelmiştir (Resim 5.8). ISO 8688-2'ye göre 500 μm 'yi aşan bir bölgesel aşınma, takım ömrü sonu olarak kabul edilmektedir. 224 cm^3 talaş hacmi seviyesi, standart takım için takım ömrü olmasına rağmen aşınma deneyleri sürdürülmüştür. 272 cm^3 talaş hacmi seviyesinde ise takım kırılarak tamamen deforme 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 272 cm^3 talaş hacmi işlenmesi ile bölgesel aşınma yüzeyi haricinde 176,442 μm ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.18. AISI 316L malzeme için standart takımın aşınma miktarları

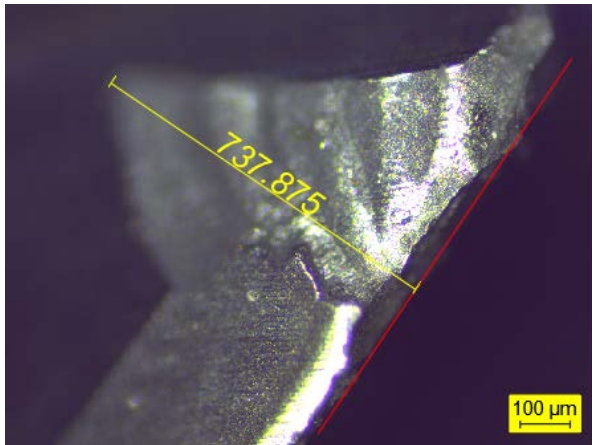
Talaş Miktarı (cm^3)	İşleme Süresi (dk)	Standart Takım						
		Yan Yüzey (μm)			Talaş Yüzeyi (μm)			Ortalama Aşınma
		Uç	Orta	Son	Uç	Orta	Son	
32	2	70,502	70,704	60,716	99,630	135,561	85,081	87,032
64	4	101,281	135,174	68,496	111,330	151,205	92,429	109,986
96	6	108,530	152,389	72,192	118,697	156,799	100,929	118,256
128	8	119,751	162,014	83,728	127,124	168,527	123,817	130,827
160	10	122,016	170,054	87,064	135,517	174,608	124,205	135,577
192	12	132,734	173,440	90,926	153,802	179,330	128,565	143,133
224	14	144,889	194,821	93,433	158,079	182,126	130,274	150,604
256	16	172,966	199,747	96,569	198,177	189,314	133,721	165,082
272	17	191,261	223,136	99,972	210,261	194,742	139,279	176,442
Aşınma tipi		düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	



Şekil 5.17. AISI 316L malzeme için standart takımın aşınma davranışı



Resim 5.7. AISI 316L malzemeden 288 cm³ talaş kaldırma oranı için standart takımda gözlenen aşınmalar (X10)

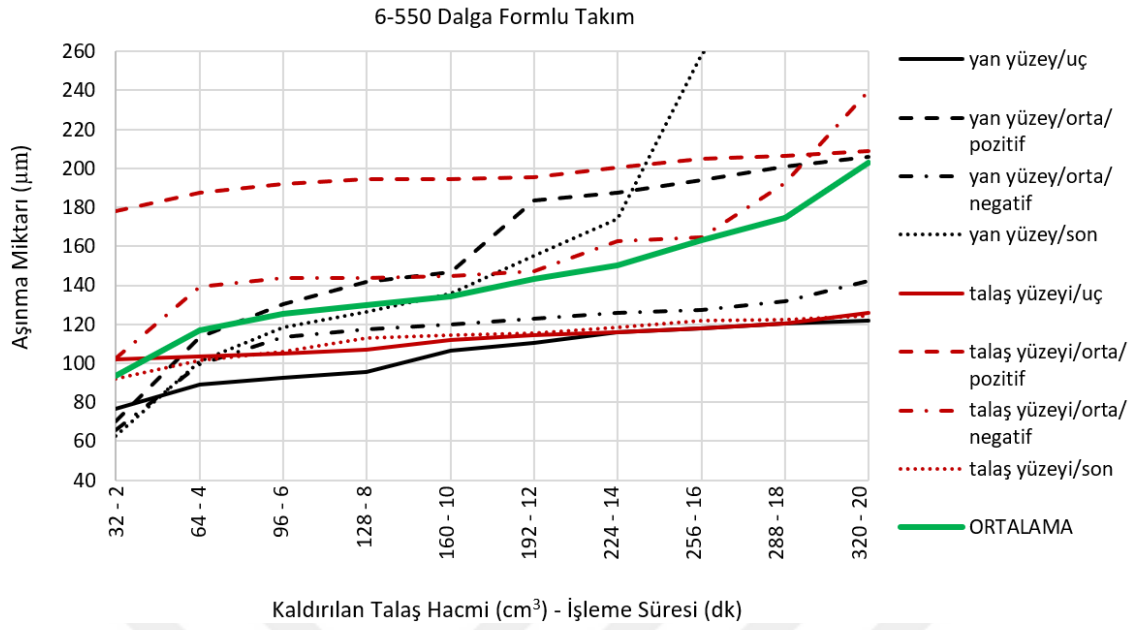


Resim 5.8. AISI 316L malzemeden 224 cm³ talaş kaldırma oranı için standart takımda gözlenen yan yüzey/uç kısmı bölgesel aşınma (X10)

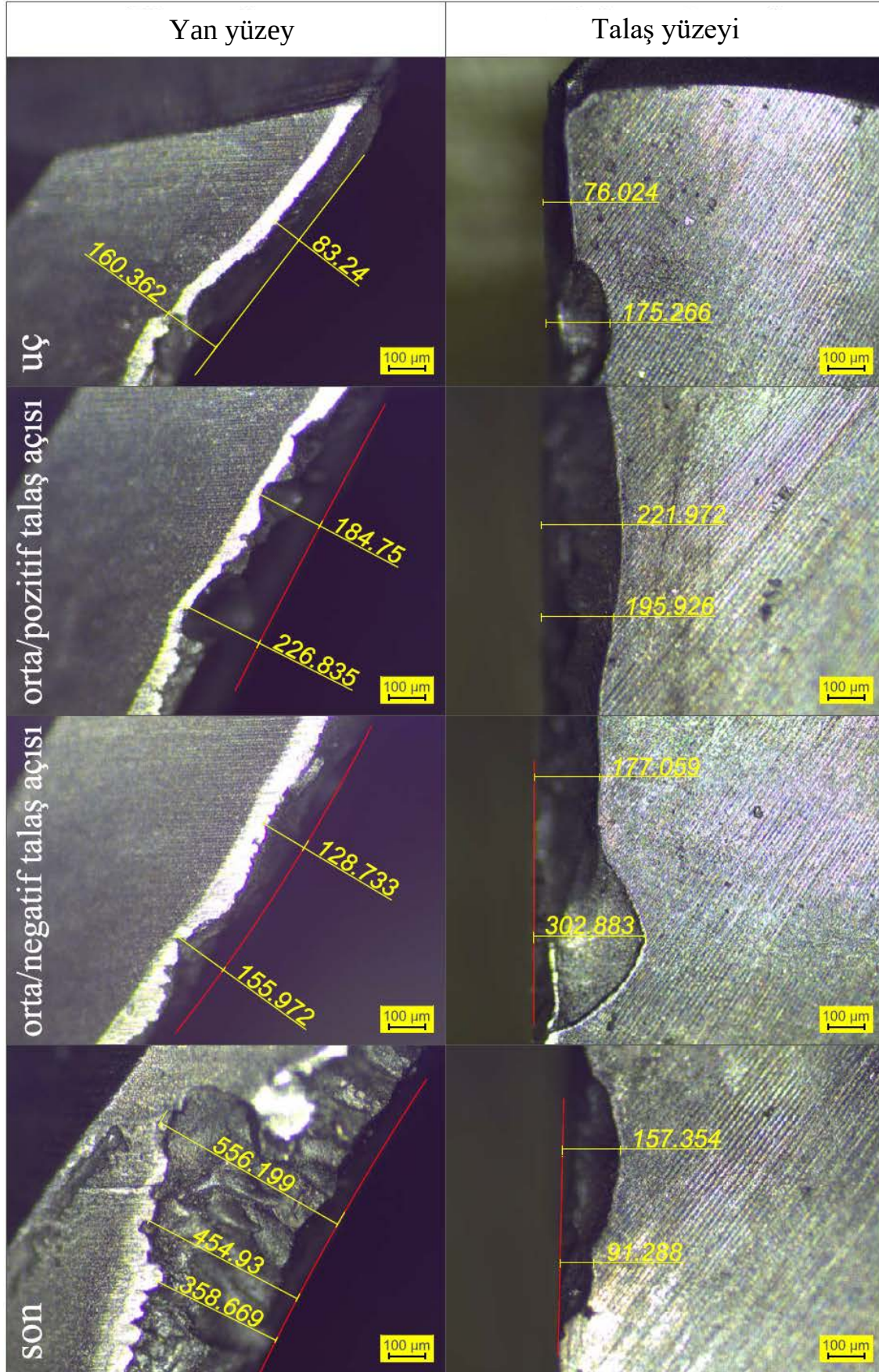
AISI 316L malzeme için 6-550 dalga formlu takım aşınma miktarları Çizelge 5.19'da, aşınma miktarı grafikleri Şekil 5.18'de ve aşınma görüntüleri Resim 5.9'de gösterilmiştir. Aşınma tipi olarak tüm ölçüm bölgelerinde düzenli çentik aşınması gözlenmiştir. Takımda, 256 cm³ talaş hacmine ulaştığında yan yüzey/son kısımda 546.394 µm bölgesel bir aşınma meydana gelmiştir (Resim 5.10). 256 cm³ talaş hacmi seviyesi ISO 8688-2'ye göre 6-550 dalga formlu takım için takım ömrü olmasına rağmen aşınma deneyleri 320 cm³ 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. Orta kısımlar incelendiğinde ise pozitif talaş açılı kısımların negatif talaş açılı kısımlardan genel olarak daha fazla aşındığı görülmektedir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 6-550 dalga formlu takımda 320 cm³ talaş hacmi işlenmesi ile 203.179 µm aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.19. AISI 316L malzeme için 6-550 dalga formlu takımın aşınma miktarları

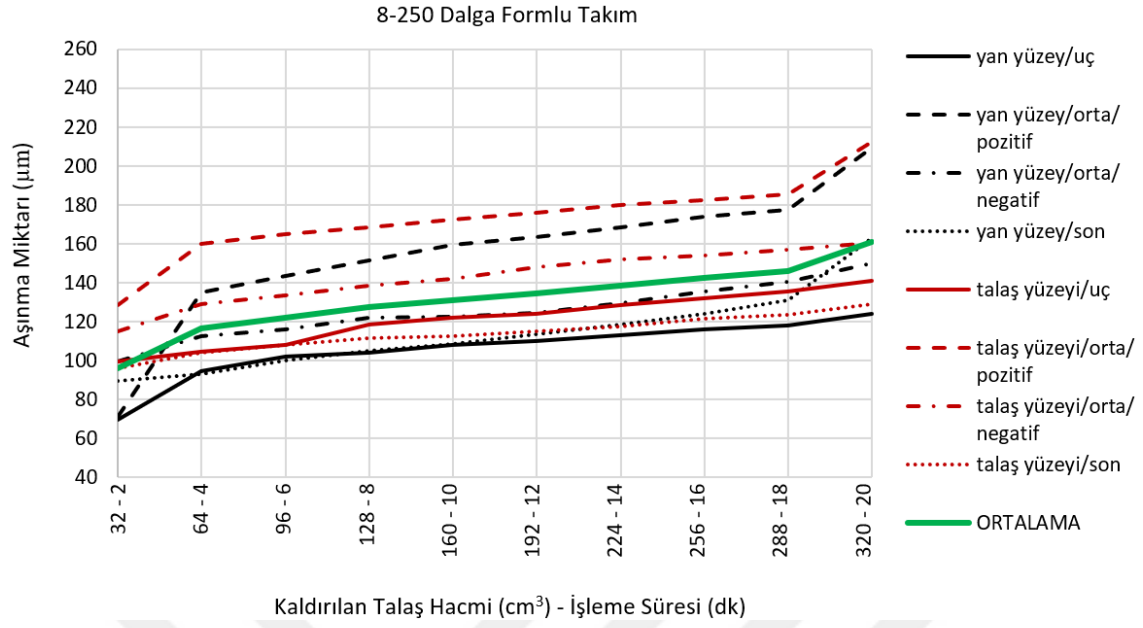
[illegible]



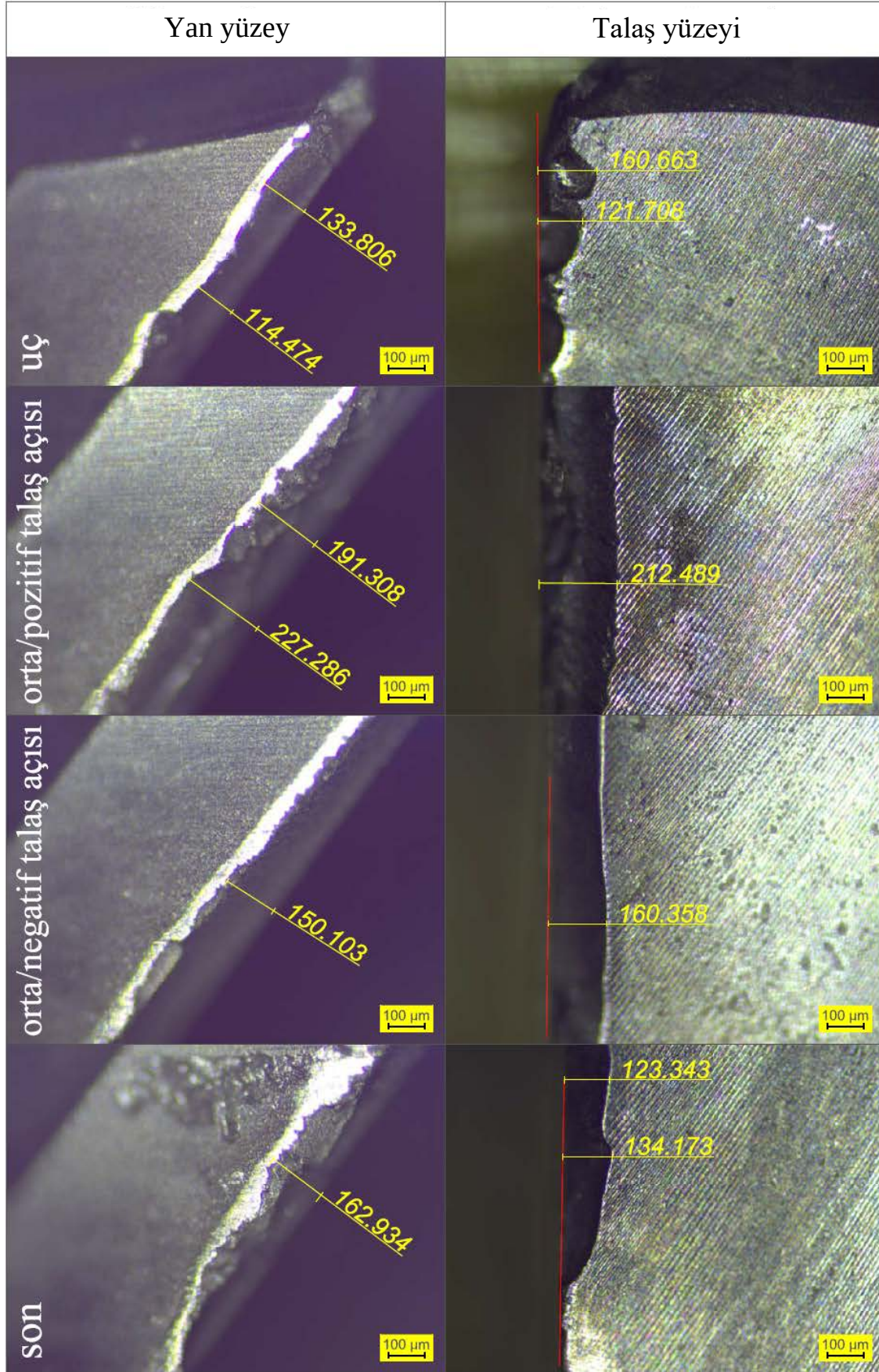
Şekil 5.18. AISI 316L malzeme için 6-550 dalga formu takımın aşınma davranışı



Resim 5.9. AISI 316L malzemeden 320 cm³ talaş kaldırma oranı için 6-550 dalga formu takımında gözlenen aşınmalar (X10)



Şekil 5.19. AISI 316L malzeme için 8-250 dalga formu takımın aşınma davranışı

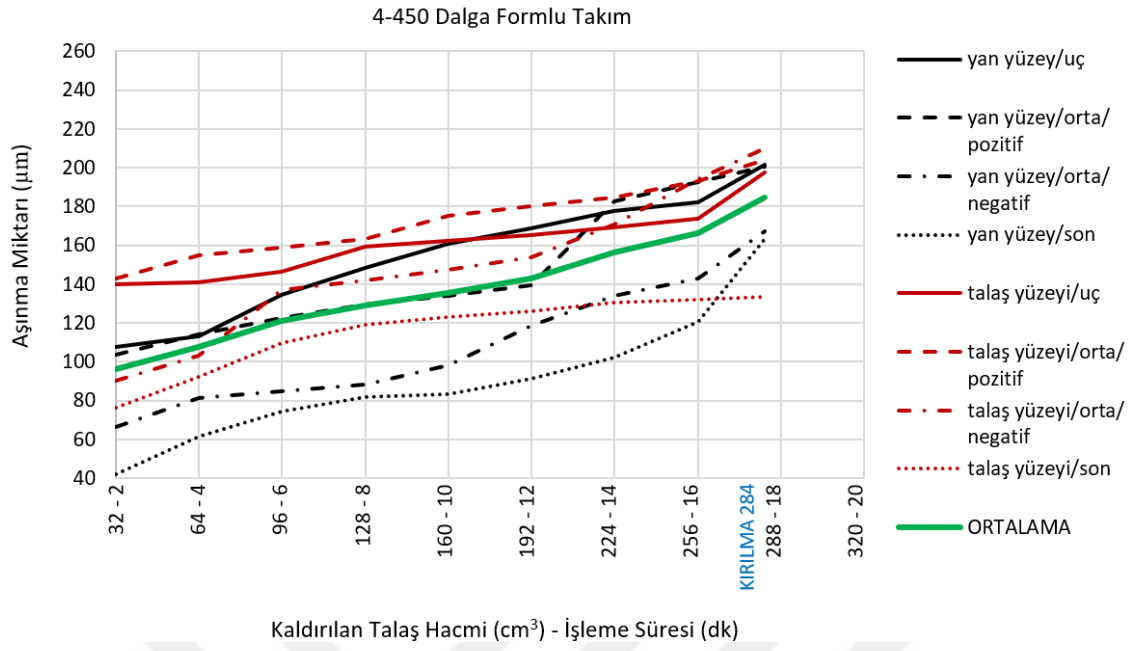


Resim 5.11. AISI 316L malzemeden 320 cm³ talaş kaldırma oranı için 8-250 dalga formu takımında gözlenen aşınmalar (X10)

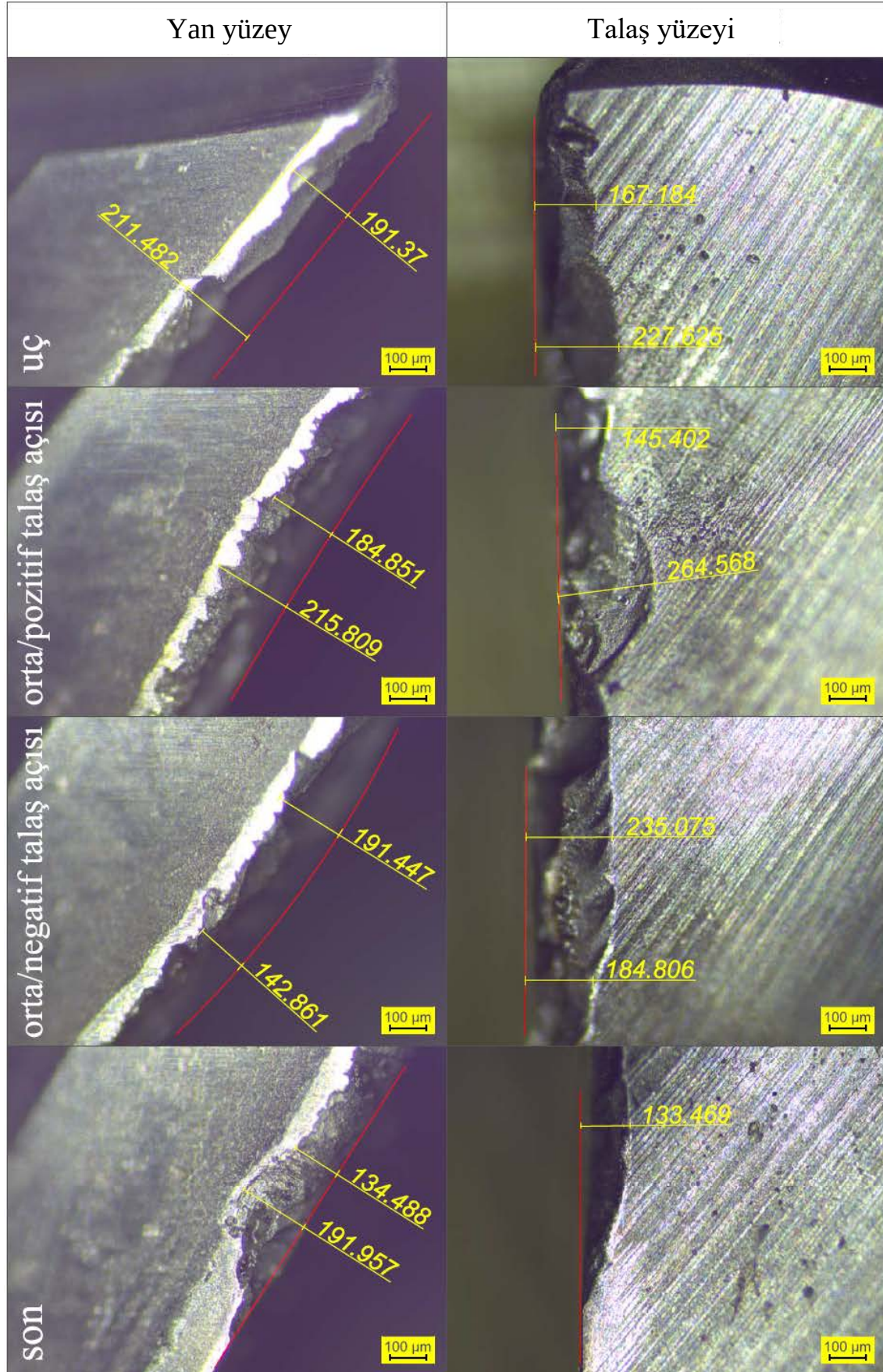
AISI 316L malzeme için 4-450 dalga formlu takım aşınma miktarları Çizelge 5.21’de, aşınma miktarları grafiği Şekil 5.20’de ve aşınma görüntüleri Resim 5.12’de gösterilmiştir. Aşınma tipi olarak tüm ölçüm bölgelerinde düzenli çentik aşınması gözlenmiştir. 284 cm³ talaş hacmi seviyesinde ise takım kırılarak tamamen deforme olmuştur. Aşınma bölgeleri incelendiğinde en düşük aşınma miktarı, yan yüzey/orta/negatif talaş açılı ve her iki yüzeyin son kısımlarda görülmüştür. Diğer aşınma bölgelerinde birbirlerine yakın aşınma değerleri gözlenmiştir. Orta kısımlar incelendiğinde ise pozitif talaş açılı kısımların negatif talaş açılı kısımlardan genel olarak daha fazla aşındığı görülmektedir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 4-450 dalga formlu takımında 284 cm³ talaş hacmi işlenmesi ile 184.639 µm ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.21. AISI 316L malzeme için 4-450 dalga formlu takımın aşınma miktarları

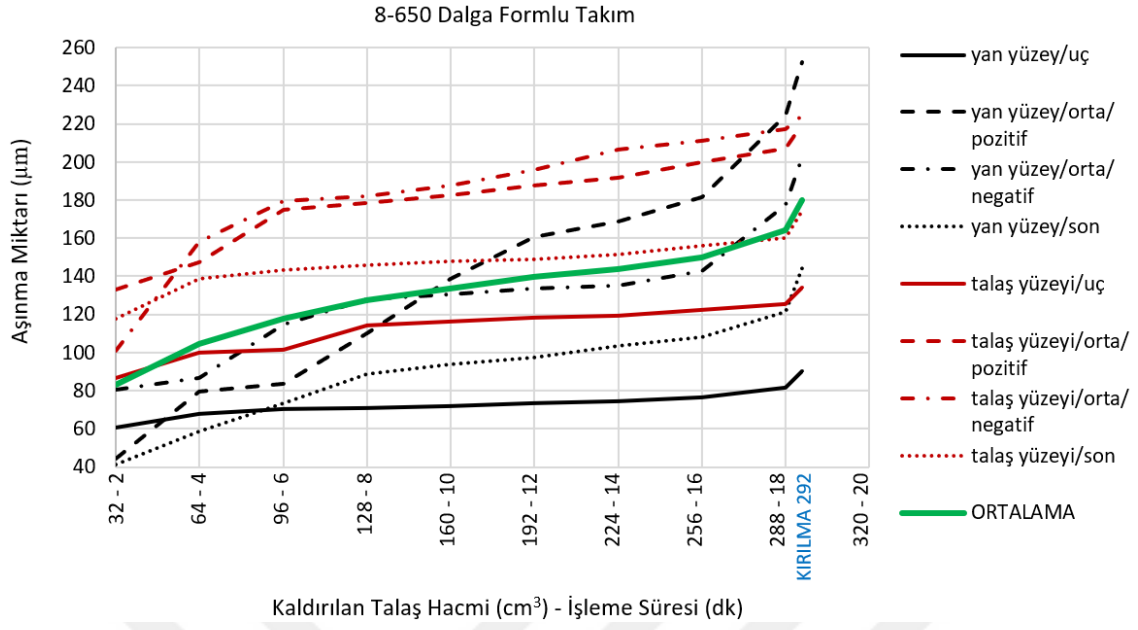
[illegible]



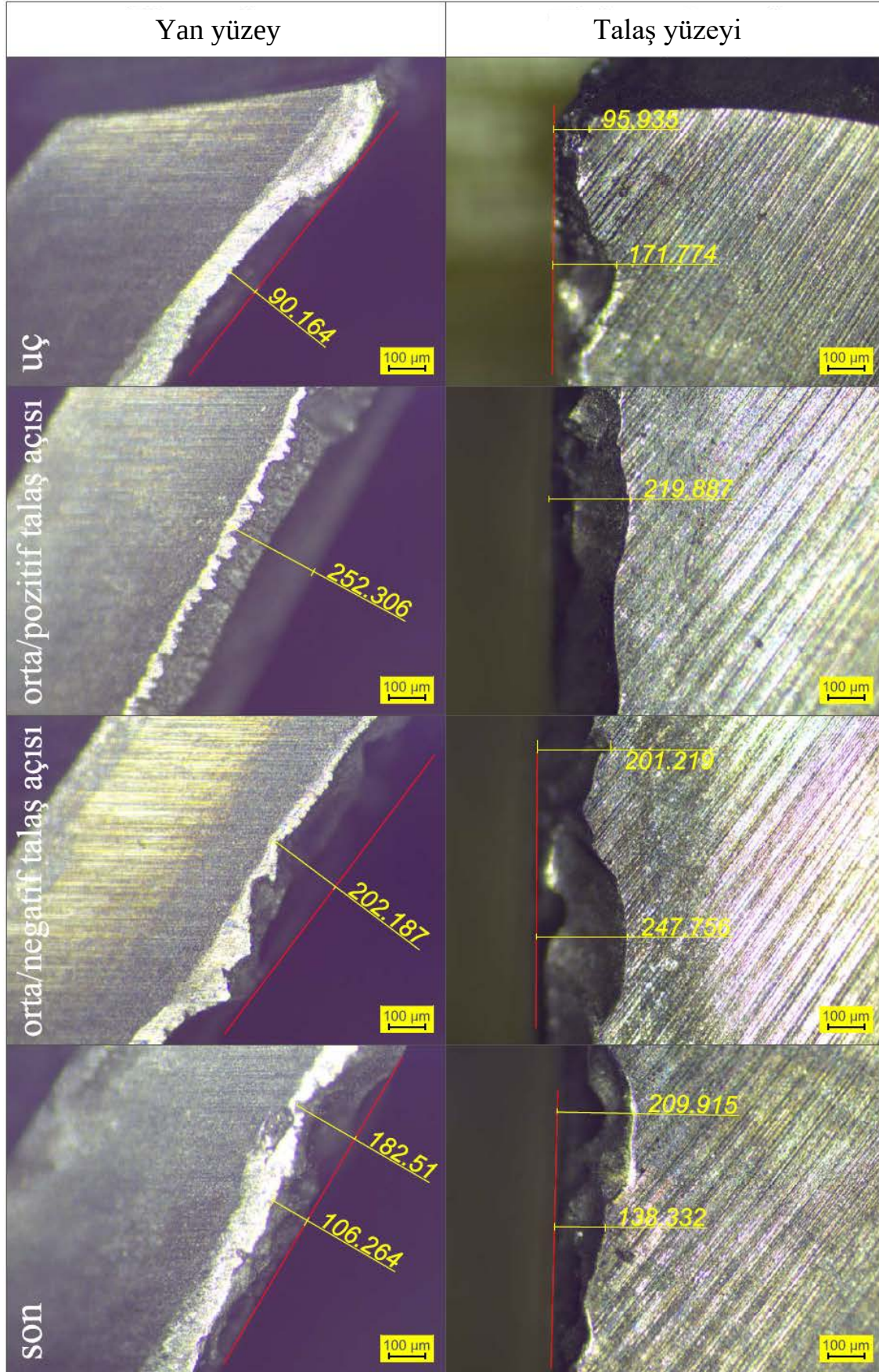
Şekil 5.20. AISI 316L malzeme için 4-450 dalga formu takımın aşınma davranışı



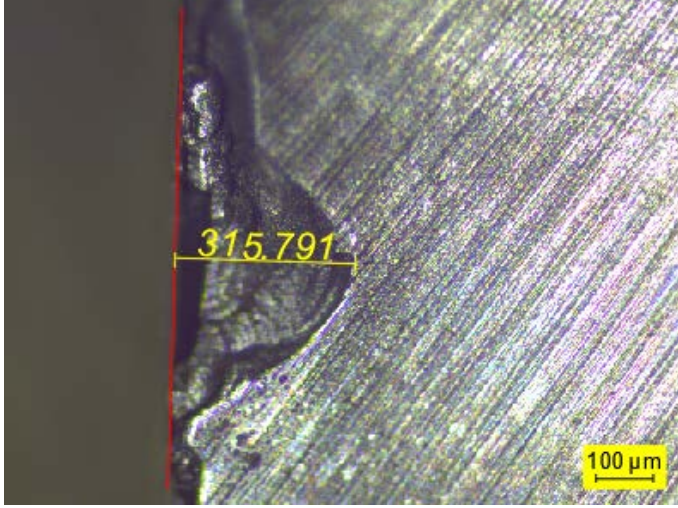
Resim 5.12. AISI 316L malzemeden 288 cm³ talaş kaldırma oranı için 4-450 dalga formu takımında gözlenen aşınmalar (X10)



Şekil 5.21. AISI 316L malzeme için 8-650 dalga formu takımın aşınma davranışı



Resim 5.13. AISI 316L malzemedan 320 cm³ talaş kaldırma oranı için 8-650 dalga formu takımında gözlenen aşınmalar (X10)



Resim 5.14. AISI 316L malzemeden 128 cm³ talaş kaldırma oranı için 8-650 dalga formu takımında gözlenen talaş yüzeyi/orta/pozitif talaş açılı kısmı bölgesel aşınma görüntüsü (X10)

AISI 316L malzeme için standart ve dalga formu takımların aşınma miktarları ve takım bazındaki değişimleri Çizelge 5.23’de verilmiştir. Değerlendirmeler, bazı takımların 320 cm³ seviyesinden önce kırılması nedeniyle 288 cm³ seviyesinde yapılmıştır. Standart takım için 272 cm³ ve 4-450 dalga formu takım için 284 cm³ talaş hacimlerinde kırılma gerçekleşmesi nedeniyle, bu takımlar için bu talaş hacimlerindeki aşınma miktarları değerlendirmeye dahil edilmiştir. Çizelge 5.23’de “Değişim” sütunları altında, dalga formu takımlardan elde edilen aşınma miktarlarının standart takıma göre düşme eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir. Yeşil tonlamalı kısımlar, dalga formu takımlardan elde edilen aşınma miktarlarının standart takıma göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Sarı tonlamalı kısımlar ise aksi durumu göstermektedir. Değişim oranları, 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 bölgesinde görülmüştür. Bu durum, dalga formu takımlarda ortalama takım aşınması açısından bir dezavantaj yaratsa da diğer aşınma bölgelerindeki düşük aşınma miktarları sayesinde standart takıma göre avantaj sağlamıştır. En düşük aşınma miktarları ise genel olarak yan yüzey ve talaş yüzeyinin uç kısımları ve yan yüzey/orta/negatif talaş açılı kısımlardan elde edilmiştir. Ortalama takım aşınma miktarları incelendiğinde, dalga formu takımlarda standart takımlara göre aşınma miktarları, 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 formlu takımlarda orta 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, 99, 100]. Keskinlik derecesinin artmasıyla kesme düzlem açısı artar ve takım-talaş temas alanı küçülür. Bu durum, kesme kuvvetlerinin düşmesine neden olur [99]. Kesme kuvvetlerinin düşmesi, ilk başta pozitif talaşlı bölgelerin daha az aşınması gerektiğini düşündürülebilir. Ancak, keskinlik derecesinin artmasıyla kesici kenar mukavemetini düşeceği için kesici kenar daha çok aşınma eğilimi gösterir [99, 101]. Negatif talaş açısı ise bu durumun aksine kesici kenar mukavemetini artıracak için daha az aşınma eğilimi gösterir [99]. Bu nedenle orta/pozitif talaş açılı bölgeler, orta/negatif talaş açılı bölgelerden daha çok aşınmıştır. Bu durum, dalga formlu takımlar üzerinden yorumlandığında, büyük pozitif talaş açılına 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 sergilemiştir. Böylece büyük pozitif talaş açılarının bu takımlar üzerinde takım aşınması açısından dezavantaj yarattığı anlaşılmıştır. Bu takımlardan daha küçük ve aynı pozitif talaş açılına (+4°) sahip diğer dalga formlu takımlar negatif talaş açısı açısından değerlendirildiğinde, 8-250 (-2°) takımının 8-650 (-3°) takımına göre daha iyi bir aşınma davranışı sergilediği görülmüştür. Böylece negatif talaş açısının küçülmesi veya daha küçük negatif talaş açılarında, takım aşınmasının azalma eğilimi gösterdiği anlaşılabılır. 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.

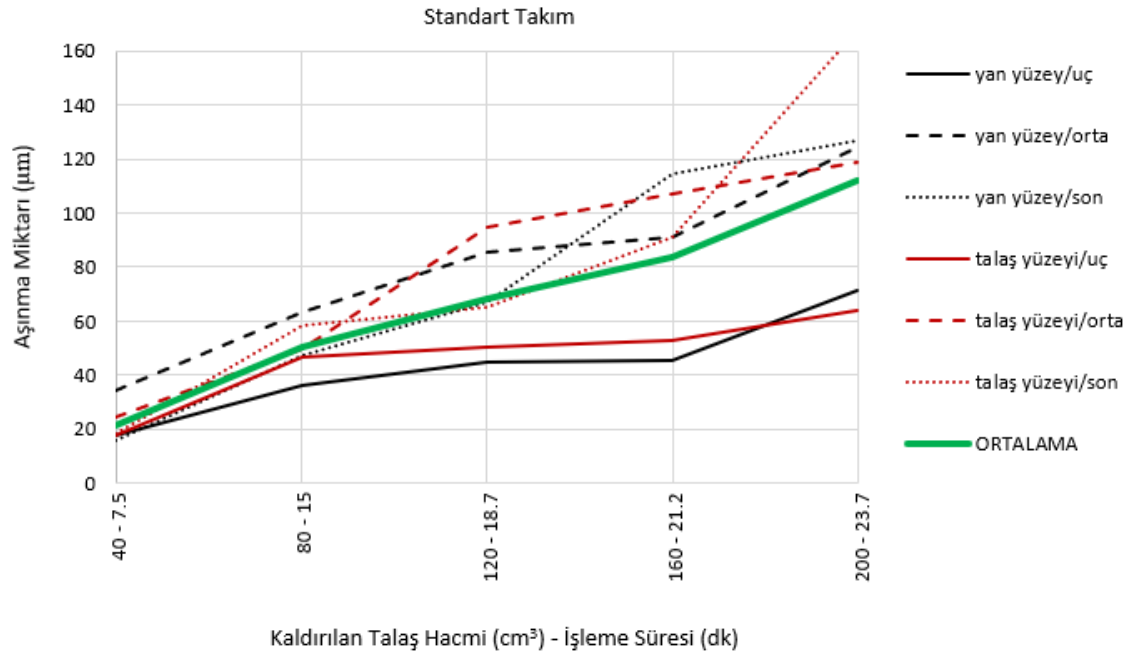
Çizelge 5.23. AISI 316L malzeme için aşınma miktarları ve takım bazındaki değişimleri

Talaş Hacmi / İşleme Süresi	288 cm ³ / 18 dk								
Kesici Takım	Standart	6-550		8-250		4-450		8-650	
Aşınma Bölgesi	Aşınma miktarı (µm)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)
Yan yüzey uç	191,261	120,411	37,0	118,146	38,2	201,426	-5,3	81,544	57,4
Yan yüzey orta/pozitif	223,136	200,911	10,0	177,558	20,4	200,331	10,2	224,196	-0,5
Yan yüzey orta/negatif	223,136	131,635	41,0	140,353	37,1	167,154	25,1	177,492	20,5
Yan yüzey 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
Talaş yüzeyi orta/pozitif	194,742	206,576	-6,1	185,263	4,9	204,163	-4,8	207,046	-6,3
Talaş yüzeyi orta/negatif	194,742	192,289	1,3	156,961	19,4	209,941	-7,8	217,013	-11,4
Talaş yüzeyi son	139,279	122,209	12,3	123,407	11,4	133,469	4,2	160,214	-15,0
Ortalama takım aşınması	176,442	174,563	1,1	146,009	17,2	184,639	-4,6	164,281	6,9

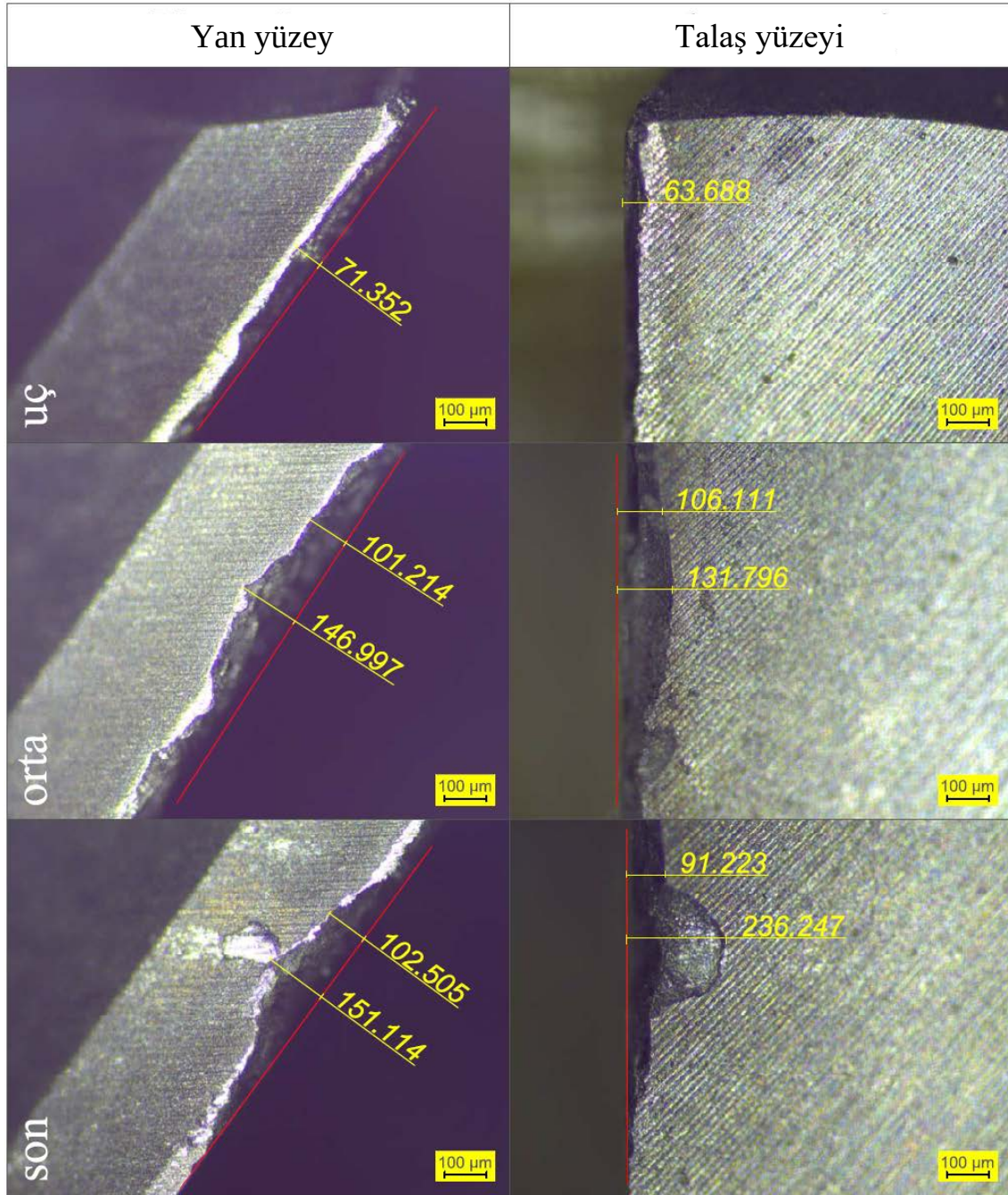
Ti 6Al 4V malzeme için standart takımın aşınma miktarları Çizelge 5.24'te, aşınma miktarları grafiği Şekil 5.22'de ve aşınma görüntüleri Resim 5.15'te gösterilmiştir. Aşınma tipi olarak tüm ölçüm bölgelerinde düzenli çentik aşınması gözlenmiştir. Buna ek olarak hem yan yüzey hem de talaş yüzeyinin son kısımlarında oksidasyon aşınmasının sebep olduğu bölgesel çentik aşınmaları da gözlenmiştir. Aşınma bölgeleri incelendiğinde hem yan yüzey ve hem de talaş yüzeyinde uç kısımlar en az miktarda aşınma değerleri göstermiş, diğer kısımlar ise yaklaşık aynı seviyede aşınmıştır. Sonuç olarak standart takımında 200 cm³ talaş hacmi işlenmesi ile 112.107 µm ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.24. Ti 6Al 4V malzeme için standart takımın aşınma miktarları

Talaş Miktarı (cm ³)	İşleme Süresi (dk)	Standart Takım						
		Yan Yüzey (μm)			Talaş Yüzeyi (μm)			Ortalama Aşınma
		Uç	Orta	Son	Uç	Orta	Son	
40	7,5	17,835	34,391	15,626	17,457	24,246	18,426	21,330
80	15	36,316	63,471	47,071	46,548	49,511	58,587	50,251
120	18,7	44,569	85,722	67,045	50,245	94,518	65,433	67,922
160	21,2	45,516	90,881	114,505	52,924	107,139	91,335	83,717
200	23,7	71,352	124,105	126,809	63,688	118,953	167,735	112,107
Aşınma tipi		düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli ve bölgesel çentik	



Şekil 5.22. Ti 6Al 4V malzeme için standart takımın aşınma davranışı



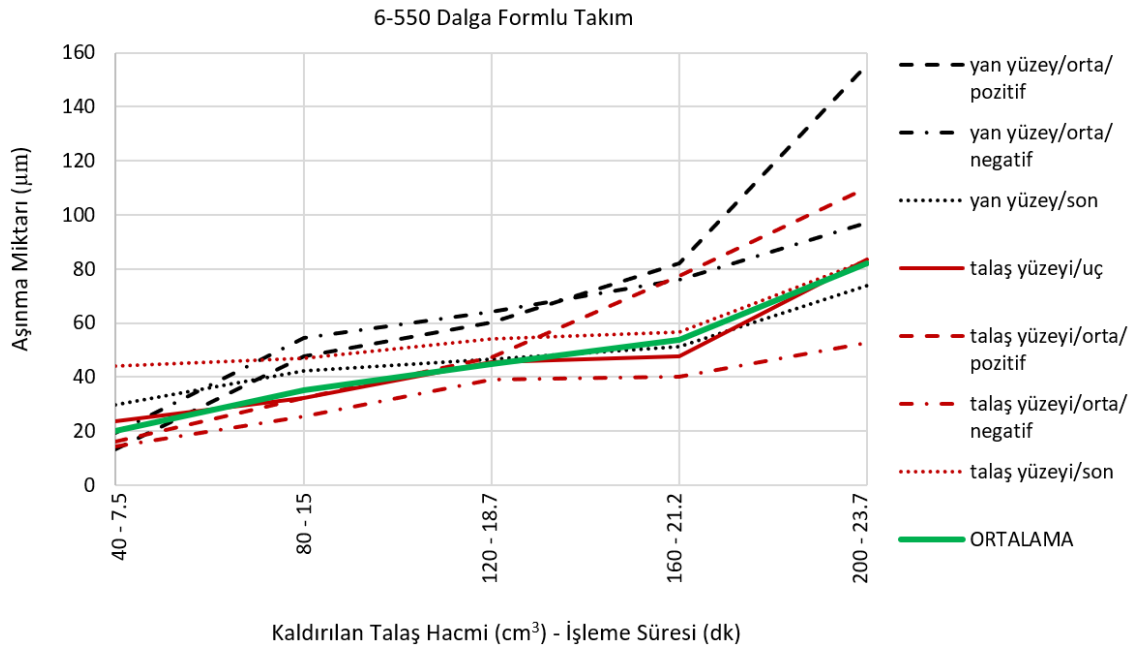
Resim 5.15. Ti 6Al 4V malzemedan 200 cm³ talaş kaldırma oranı için standart takımda gözlenen aşınmalar (X10)

Ti 6Al 4V malzeme için 6-550 dalga formlu takım aşınma miktarları Çizelge 5.25'te, aşınma miktarlarının grafiği Şekil 5.23'te ve aşınma görüntüleri Resim 5.16'da gösterilmiştir. Aşınma tipi olarak, yan yüzey/uç kısımda belirgin olmayan bir yanak aşınması gözlenmiştir. Orta kısımlarda düzenli çentik aşınması ve bu çentikleri dolduran talaş yığılmaları gözlenmiştir. En yüksek aşınma değerleri elde edilen bölgeler orta/pozitif talaş açılı kısımlar olup ve orta/negatif talaş açılı kısımlardan genel olarak daha fazla aşınmıştır. Aşınma

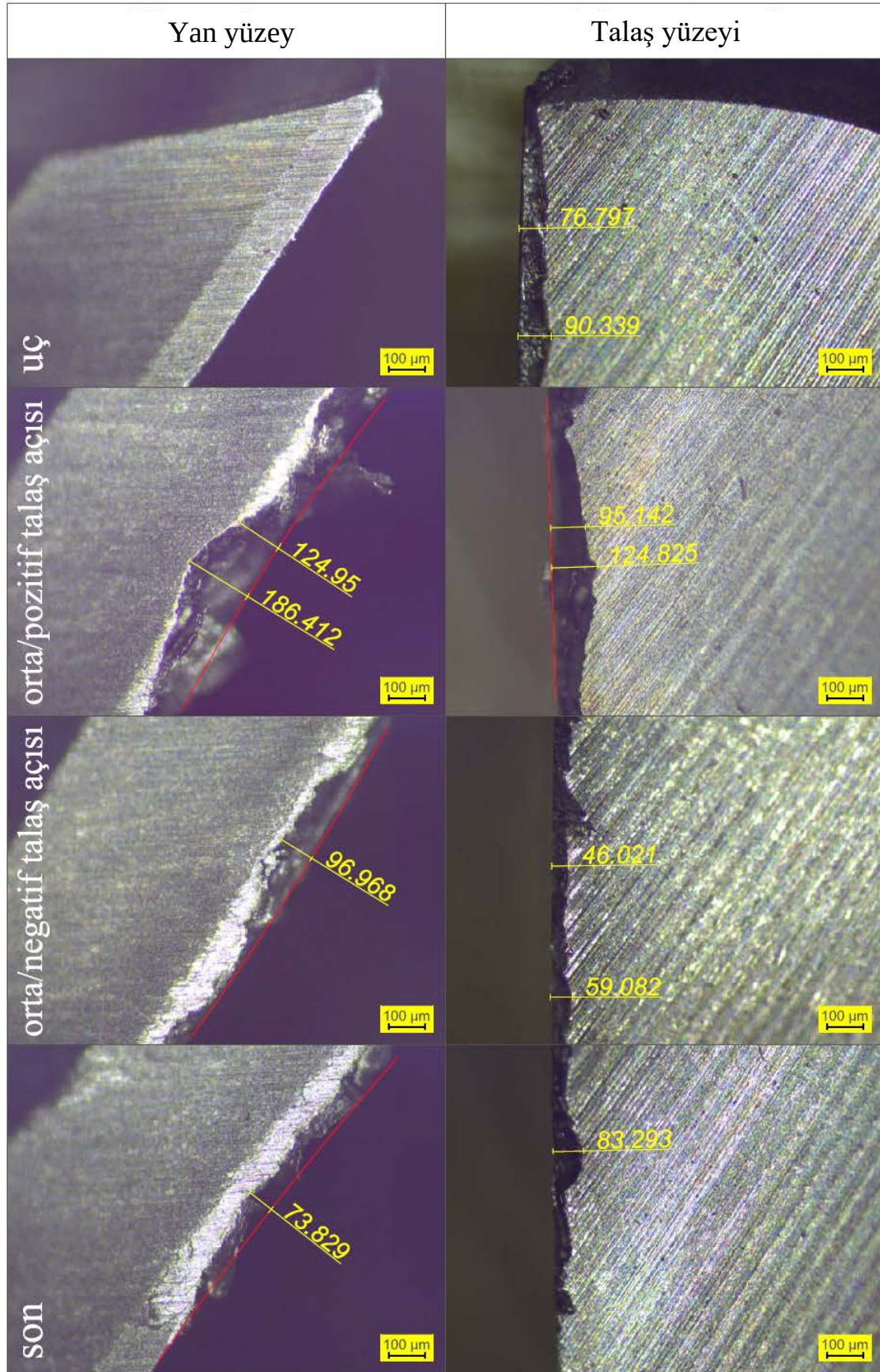
bölgelerinin son kısımlarında ise düzenli çentik aşınmaları ile birlikte çentikleri dolduran yığıntı talaşlar gözlenmiştir. Buna ek olarak son kısımlarda oksidasyon aşınmaları gözlenmemiştir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 6-550 dalga formu takımında 200 cm³ talaş hacmi işlenmesi ile 81.984 µm ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.25. Ti 6Al 4V malzeme için 6-550 dalga formu takımın aşınma miktarları

Talaş Miktarı (cm³)	İşleme Süresi (dk)	6-550 Dalga Formlu Takım								
		Yan Yüzey (µm)				Talaş Yüzeyi (µm)				Ortalama Aşınma
		Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	
40	7,5	0	13,144	19,402	29,612	23,667	16,214	14,265	43,911	20,027
80	15	0	47,722	54,398	42,414	32,147	32,176	25,404	46,899	35,145
120	18,7	0	60,366	64,151	46,411	45,674	47,223	39,147	54,171	44,643
160	21,2	0	82,036	76,069	51,122	47,544	77,488	40,089	56,698	53,881
200	23,7	0	155,681	96,968	73,829	83,568	109,983	52,551	83,293	81,984
Aşınma tipi		yanak	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik ve yığıntı talaş	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	



Şekil 5.23. Ti 6Al 4V malzeme için 6-550 dalga formu takımın aşınma davranışı

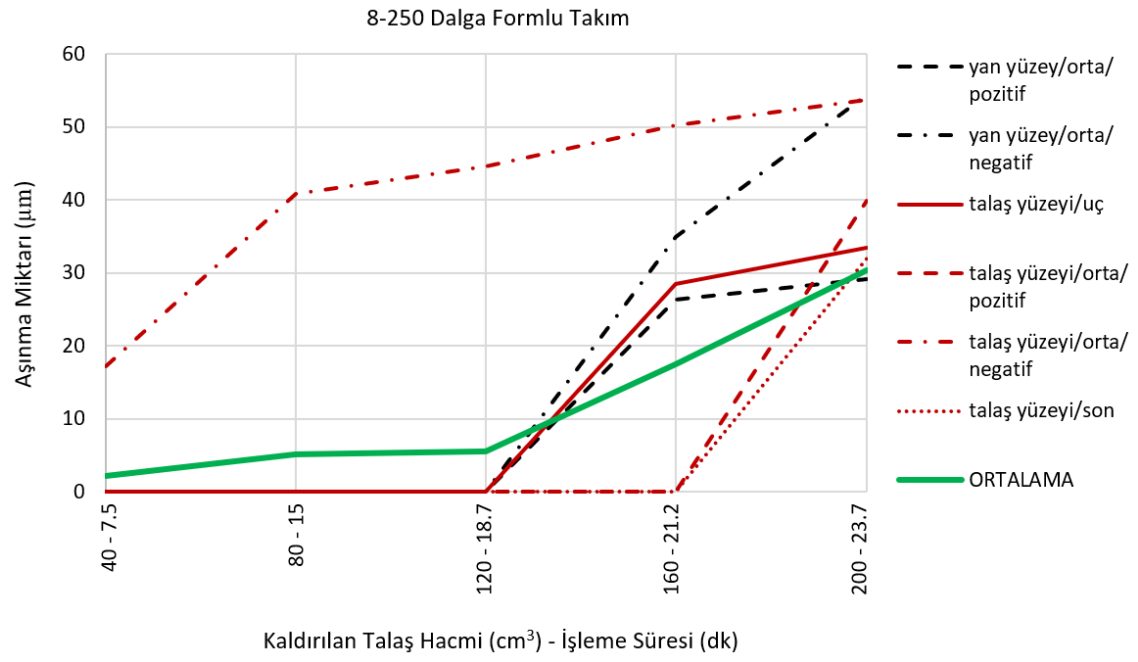


Resim 5.16. Ti 6Al 4V malzemedan 200 cm³ talaş kaldırma oranı için 6-550 dalga formu takımında gözlenen aşınmalar (X10)

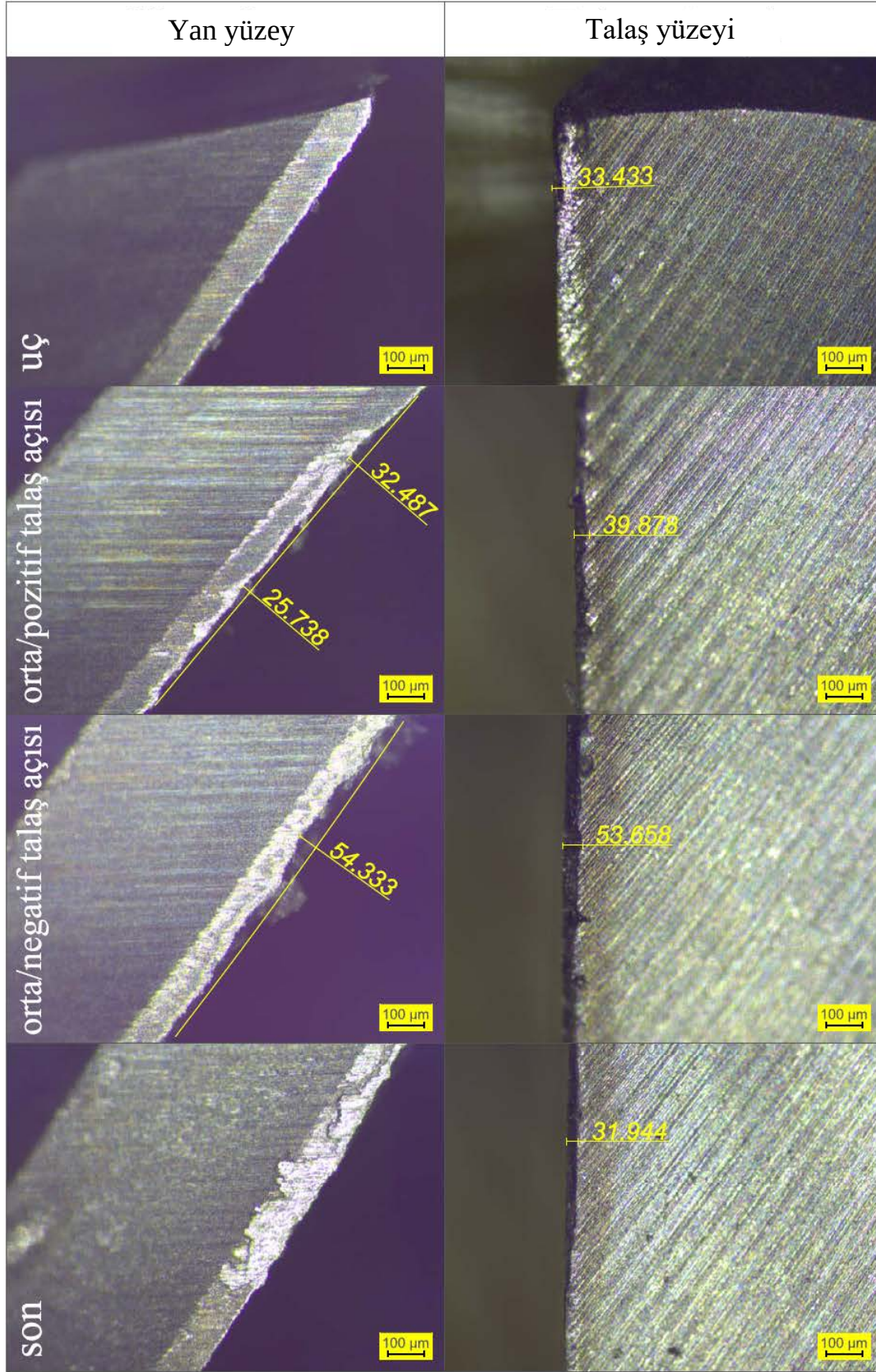
Ti 6Al 4V malzeme için 8-250 dalga formu takım aşınma miktarları Çizelge 5.26’da, aşınma miktarı grafikleri Şekil 5.24’te ve aşınma görüntüleri Resim 5.17’de gösterilmiştir. 8-250 dalga formu takımında genel olarak belirgin olmayan ve diğer takımlara göre az miktarda bir aşınma seyri izlenmiştir. Aşınma tipi olarak, yan yüzey/uç kısımda belirgin olmayan ve ölçüm yapılamayacak seviyede bir yanak aşınması gözlenmiştir. Yan yüzey/son kısımda yine belirgin olmayan bir yanak aşınması ve buna ek olarak talaş yığılmaları gözlenmiştir. Diğer aşınma bölgeleri incelendiğinde; yan yüzey orta kısımlarda belirgin olmayan yanak aşınması ve düzenli çentik aşınması ve talaş yüzeyi/uç kısımda yüz ve düzenli çentik aşınması, orta ve son kısımlarda ise düzenli çentik aşınmaları gözlenmiştir. Orta kısımlar karşılaştırıldığında, takım genel olarak az miktarda aşındığı için pozitif-negatif talaş açılarının sebep olduğu aşınma farklılığı gözlenmemiştir. Son kısımlarda oksidasyon aşınması gözlenmemiştir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 8-250 dalga formu takımında 200 cm^3 talaş hacmi işlenmesi ile $30.295 \mu\text{m}$ ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.26. Ti 6Al 4V malzeme için 8-250 dalga formu takımın aşınma miktarları

Talaş Miktarı (cm ³)	İşleme Süresi (dk)	8-250 Dalga Formlu Takım								
		Yan Yüzey (µm)				Talaş Yüzeyi (µm)				Ortalama Aşınma
		Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	
40	7,5	0	0	0	0	0	0	17,149	0	2,144
80	15	0	0	0	0	0	0	40,748	0	5,094
120	18,7	0	0	0	0	0	0	44,561	0	5,570
160	21,2	0	26,331	34,886	0	28,509	0	50,263	0	17,499
200	23,7	0	29,112	54,333	0	33,433	39,878	53,658	31,944	30,295
Aşınma tipi		yanak	yanak ve düzenli çentik	yanak ve düzenli çentik	yanak ve yığıntı talaş	yüz ve düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	



Şekil 5.24. Ti 6Al 4V malzeme için 8-250 dalga formlu takımın aşınma davranışı

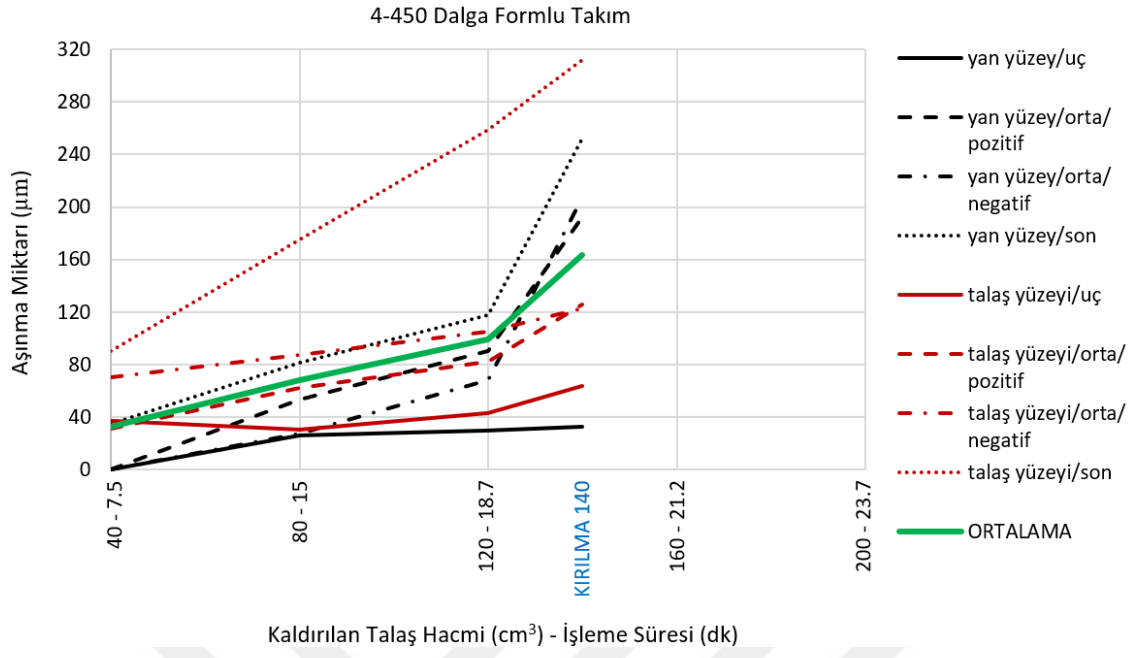


Resim 5.17. Ti 6Al 4V malzemedan 200 cm³ talaş kaldırma oranı için 8-250 dalga formu takımında gözlenen aşınmalar (X10)

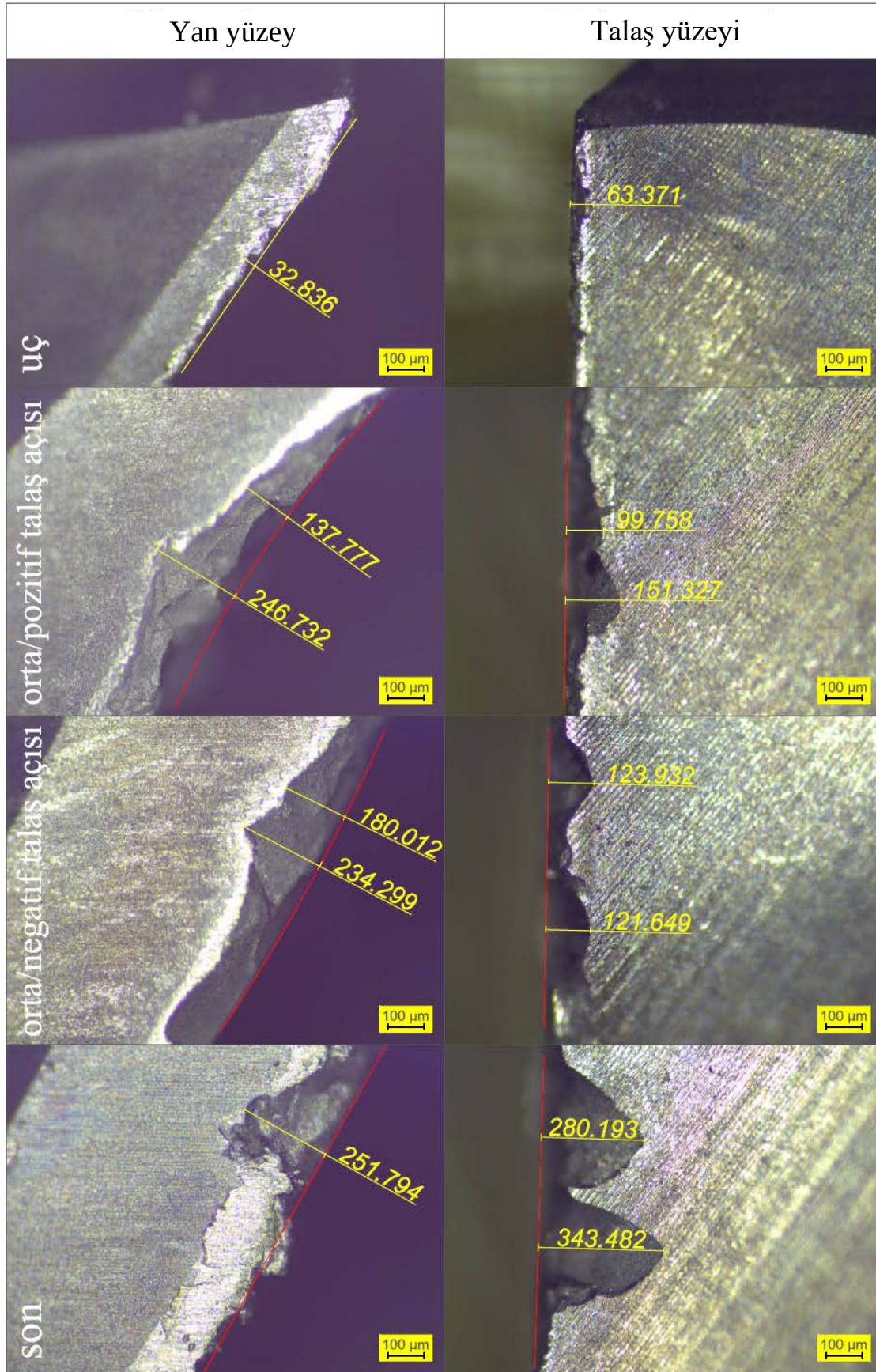
Ti 6Al 4V malzeme için 4-450 dalga formu takım aşınma miktarları Çizelge 5.27’de, aşınma miktarı grafikleri Şekil 5.25’te ve aşınma görüntüleri Resim 5.18’de gösterilmiştir. Aşınma tipi olarak, yan yüzey/uç kısımda düzenli çentik, yan yüzey orta ve son kısımlarda düzenli ve bölgesel çentik aşınma davranışları gözlenmiştir. Talaş yüzeyinin uç ve orta kısımlarında düzenli çentik aşınmaları gözlenmiştir. Yan yüzey/son kısımda oksidasyon aşınmasının yarattığı bölgesel çentik ve bu çentiklerde biriken talaş yığılmaları gözlenmiştir. Talaş yüzeyi/son kısımda da şiddetli oksidasyon aşınmalarının sebep olduğu bölgesel çentikler gözlenmiştir. Orta kısımlar karşılaştırıldığında, birbirine yakın aşınma miktarları elde edilmiş ve pozitif-negatif talaş açılarının sebep olduğu aşınma farklılığı gözlenmemiştir. Bunlara ek olarak, 140 cm³ talaş hacmi seviyesinde takım kırılarak tamamen deforme olmuştur. Aşınma bölgeleri incelendiğinde en düşük aşınma değerleri uç kısımlarda, en büyük aşınma değerleri ise oksidasyon aşınmalarının gerçekleştiği son kısımlarda görülmüştür. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 4-550 dalga formu takımında 140 cm³ talaş hacmi işlenmesi ile 163.448 µm ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.27. Ti 6Al 4V malzeme için 4-450 dalga formu takımın aşınma miktarları

Talaş Miktarı (cm³)	İşleme Süresi (dk)	4-450 Dalga Formlu Takım								
		Yan Yüzey (µm)				Talaş Yüzeyi (µm)				Ortalama Aşınma
		Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	
40	7,5	0	0	0	34,65	36,801	31,421	70,056	90,477	32,926
80	15	25,827	53,698	27,307	81,181	30,153	62,401	87,171	175,487	67,903
120	18,7	29,841	90,148	68,341	117,312	43,381	82,508	105,089	258,642	99,408
140	20	32,836	192,254	207,155	251,794	63,371	125,542	122,791	311,837	163,448
Aşınma tipi		düzenli çentik	düzenli ve bölgesel çentik	düzenli ve bölgesel çentik	düzenli, bölgesel çentik ve yığıntı talaş	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	bölgesel çentik	



Şekil 5.25. Ti 6Al 4V malzeme için 4-450 dalga formu takımın aşınma davranışı

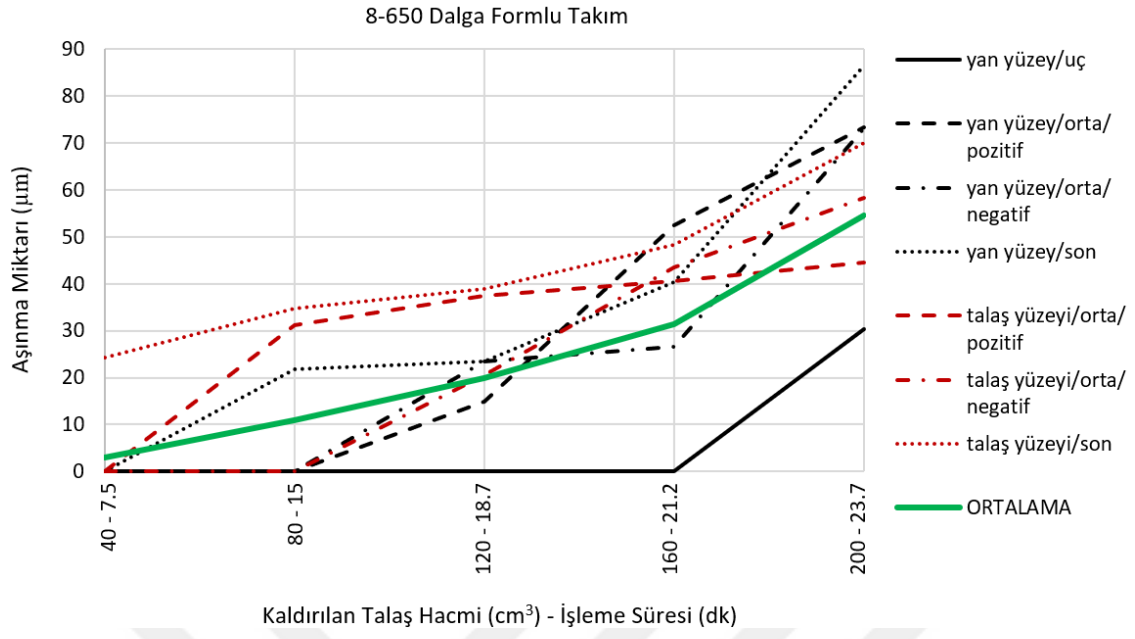


Resim 5.18. Ti 6Al 4V malzemedan 160 cm³ talaş kaldırma oranı için 4-450 dalga formu takımda gözlenen aşınmalar (X10)

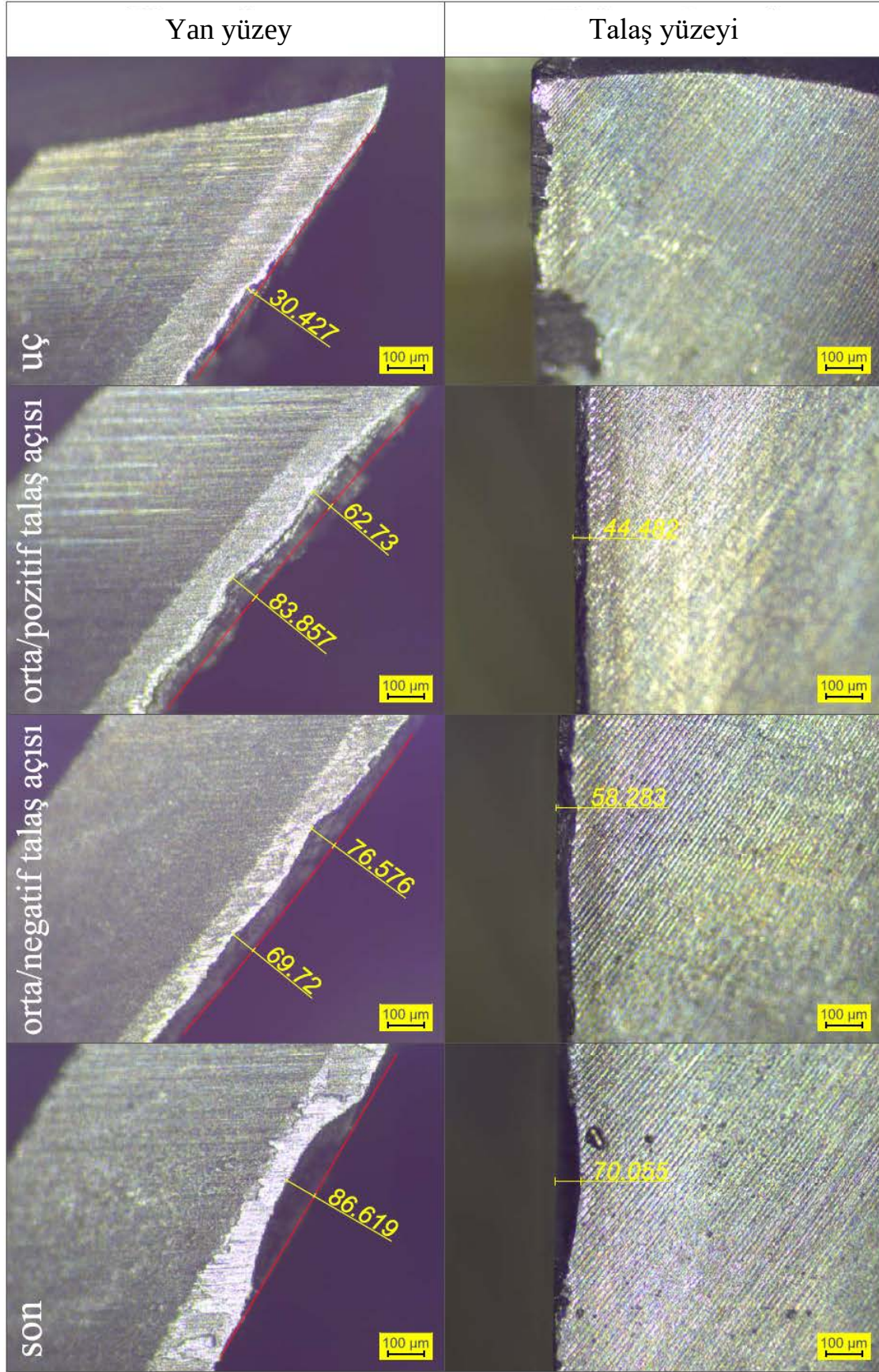
Ti 6Al 4V malzeme için 8-650 dalga formu takım aşınma miktarları Çizelge 5.28’de, aşınma miktarı grafikleri Şekil 5.26’da ve aşınma görüntüleri Resim 5.19’da gösterilmiştir. Aşınma tipi olarak, yan yüzey/uç kısımda 160 cm³ talaş hacmine kadar ölçüm yapılamayacak seviyede belirsiz bir aşınma ve 200 cm³ talaş seviyesinde ise yanak aşınması ile birlikte düzenli çentik aşınması gözlenmiştir. Yan yüzey/orta/pozitif talaş açılı kısımda düzenli çentik aşınması ve bu çentiklerde biriken talaş yığılmaları gözlenmiştir. Yan yüzey/son kısımda bölgesel çentik aşınması ve talaş yığılmaları görülmektedir. Talaş yüzeyi/uç kısımda yüz aşınması ve yer yer talaş yapışmaları gözlenmiştir. Diğer aşınma bölgelerinde ise düzenli çentik aşınmaları görülmüştür. Orta kısımlar karşılaştırıldığında 8-250 dalga formu takıma benzer olarak, takım genel olarak az miktarda aşındığı için pozitif-negatif talaş açılarının sebep olduğu aşınma farklılığı gözlenmemiştir. Son kısımlarda oksidasyon aşınmaları henüz başlamamıştır. En yüksek aşınma değerleri, yan yüzey son ve orta kısımlarda elde edilmiştir. Ortalama aşınma değerleri incelendiğinde, 8-650 dalga formu takımında 200 cm³ talaş hacmi işlenmesi ile 54.538 µm ortalama aşınma değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5.28. Ti 6Al 4V malzeme için 8-650 dalga formu takımın aşınma miktarları

Talaş Miktarı (cm³)	İşleme Süresi (dk)	8-650 Dalga Formlu Takım								
		Yan Yüzey (µm)				Talaş Yüzeyi (µm)				Ortalama Aşınma
		Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	Uç	Orta Pozitif	Orta Negatif	Son	
40	7,5	0	0	0	0	0	0	0	24,288	3,036
80	15	0	0	0	21,735	0	31,213	0	34,654	10,950
120	18,7	0	14,862	23,445	23,445	0	37,378	20,535	38,924	19,824
160	21,2	0	52,517	26,571	40,283	0	40,636	43,592	48,287	31,486
200	23,7	30,427	73,293	73,148	86,619	0	44,482	58,283	70,055	54,538
Aşınma tipi		yanak ve düzenli çentik	düzenli çentik ve yığıntı talaş	düzenli çentik	bölgesel çentik ve yığıntı talaş	yüz ve yığıntı talaş	düzenli çentik	düzenli çentik	düzenli çentik	



Şekil 5.26. Ti 6Al 4V malzeme için 8-650 dalga formu takımın aşınma davranışı



Resim 5.19. Ti 6Al 4V malzemedan 200 cm³ talaş kaldırma oranı için 8-650 dalga formu takımında gözlenen aşınmalar (X10)

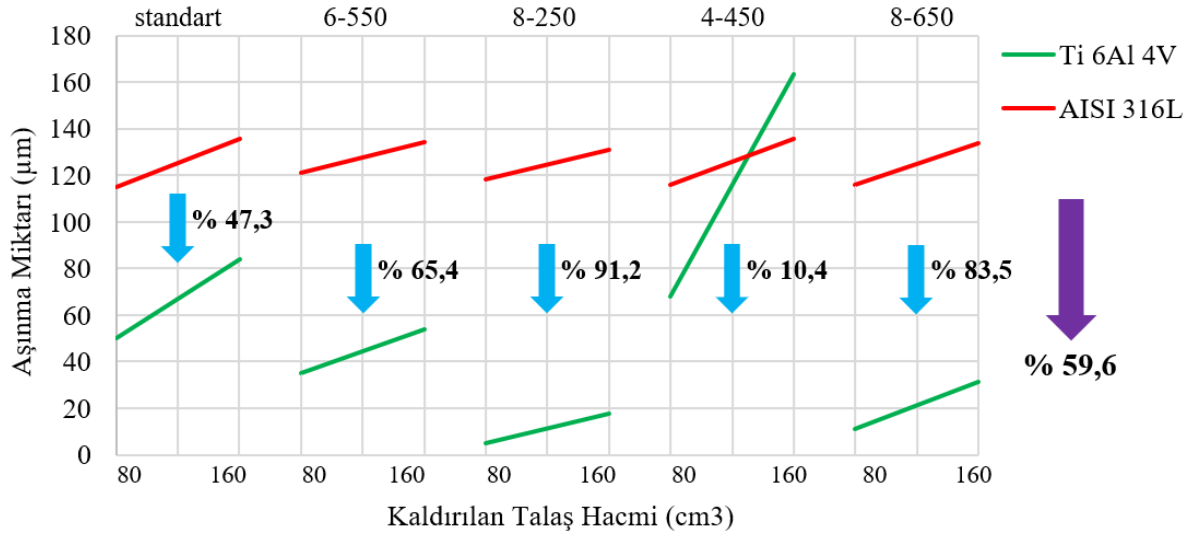
Ti 6Al 4V malzeme için standart ve dalga formu takımların aşınma miktarları ve takım bazındaki değişimleri Çizelge 5.29’de verilmiştir. Değerlendirmeler, 4-450 dalga formu takım için takımın kırılması sebebiyle 160 cm³ talaş hacmi seviyesinde, diğer takımlar için 200 cm³ seviyesinde yapılmıştır. Çizelge 5.29’de “Değişim” sütunu altında, dalga formu takımlardan elde edilen aşınma miktarlarının standart takıma göre düşme eğilimleri “%” olarak ifade edilmiştir. Yeşil tonlamalı kısımlar, dalga formu takımlardan elde edilen aşınma miktarlarının standart takıma göre daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Sarı tonlamalı kısımlar ise aksi durumu göstermektedir. Değişim oranları, takımların tüm aşınma bölgeleri için hesaplanmıştır. En düşük aşınma miktarları genel olarak yan yüzey ve talaş yüzeyinin uç kısımlardan elde edilmiştir. Ortalama takım aşınma miktarları incelendiğinde, dalga formu takımlarda standart takımlara göre aşınma miktarları, 6-550 takımı için %26,9; 8-250 takımı için %73,0 ve 8-650 takımı için %51,4 oranlarında düşme eğilimi, 4-450 takımı için ise %-95,2 oranında yükselme eğilimi göstermiştir. Tüm dalga formu takımlarda orta kısımlar incelendiğinde, takımlar genel olarak az miktarda aşındığı için pozitif-negatif talaş açılarının sebep olduğu aşınma farklılığı belirgin olarak gözlenmemiştir.

Talaş açısı değişiminin ortalama takım aşınması üzerindeki etkileri incelendiğinde, AISI 316L malzemede görülen aşınma davranışı Ti 6Al 4V malzeme için de geçerlidir. Büyük pozitif talaş açılara sahip olan 4-450 (+22°) takımında kesici kenar mukavemetinin düşmesi nedeniyle standart takıma göre daha yüksek ortalama aşınma miktarları görülmüştür. İkinci büyük pozitif talaş açısına sahip 6-550 (+12°) takımında; dalga formu takımlarda, yığıntı talaş oluşumu sebebiyle görülen düşük kesme kuvvetlerinin (Bkz. Çizelge 5.11) takım aşınması açısından yarattığı avantaj sayesinde, standart takıma göre daha düşük ortalama takım aşınmaları elde edilmiştir. Düşük kesme kuvvetlerinin aşınma davranışı üzerinde yarattığı pozitif etki, küçük pozitif ve negatif talaş açılara sahip 8-250 (+4°/-2°) ve 8-650 (+4°/-3°) dalga formu takımlarda daha etkili bir şekilde görülmektedir. Böylece Ti 6Al 4V malzeme için AISI 316L malzemede görülen aşınma davranışına benzer şekilde, küçük pozitif ve negatif talaş açılarının aşınma açısından avantaj, büyük pozitif ve negatif talaş açılarının ise dezavantaj yarattığı söylenebilir. Buna ek olarak, küçük pozitif ve negatif talaş açısı ile düşük kesme kuvvetlerinin yarattığı avantajlar birleştiğinde 8-250 takımında görüldüğü gibi %73 oranında daha iyi bir aşınma davranışının elde edilebildiği anlaşılmıştır.

Çizelge 5.29. Ti 6Al 4V malzeme için aşınma miktarları ve takım bazındaki değişimleri

Talaş Hacmi / İşleme Süresi	200 cm ³ / 23.7 dk							160 cm ³ / 21.2 dk		
Kesici Takım	Standart	6-550		8-250		8-650		Standart	4-450	
Aşınma Bölgesi	Aşınma miktarı (µm)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)	Aşınma miktarı (µm)	Aşınma miktarı (µm)	Değişim (%)
Yan yüzey uç	71,352	0,000	100,0	0,000	100,0	30,427	57,4	45,516	32,836	27,9
Yan yüzey orta/pozitif	124,105	155,681	-25,4	29,112	76,5	73,293	40,9	90,881	192,254	-111,5
Yan yüzey orta/negatif	124,105	96,968	21,9	54,333	56,2	73,148	41,1	90,881	207,155	-127,9
Yan yüzey son	126,809	73,829	41,8	0,000	100,0	86,619	31,7	114,505	251,794	-119,9
Talaş yüzeyi uç	63,688	83,568	-31,2	33,433	47,5	0,000	100,0	52,924	63,371	-19,7
Talaş yüzeyi orta/pozitif	118,953	109,983	7,5	39,878	66,5	44,482	62,6	107,139	125,542	-17,2
Talaş yüzeyi orta/negatif	118,953	52,551	55,8	53,658	54,9	58,283	51,0	107,139	122,791	-14,6
Talaş yüzeyi son	167,735	83,293	50,3	31,944	81,0	70,055	58,2	91,335	311,837	-241,4
Ortalama takım aşınması	112,107	81,984	26,9	30,295	73,0	54,538	51,4	83,717	163,448	-95,2

İş malzemeleri açısından takım aşınma miktarları incelendiğinde (Şekil 5.27), aşınma miktarları en düşük 8-250 takımdan ve en yüksek 4-450 takımdan elde edilmiştir. Her iki malzemede de ikinci ve üçüncü iyi aşınma davranışı, 8-650 ve 6-550 dalga formu takımdan elde edilmiştir. Şekil 5.27’de gösterilen grafikte, işlenen talaş hacimleri olarak ortak seviyeler olan 80 cm³ ve 160 cm³ seviyelerindeki aşınma miktarları kıyaslanmıştır. Grafikteki mavi oklar, aynı talaş kaldırma seviyesinde Ti 6Al 4V malzemesinden elde edilen aşınma miktarının AISI 316L malzemesine göre düşme eğilimlerini her bir takım için “%” olarak ifade etmektedir. Mor ok ise ortalama düşme oranını göstermektedir. Ti 6Al 4V malzemesinde tüm kesici takımlar, AISI 316L malzemesine göre daha az miktarda aşınmışlardır. 8-250 dalga formu takımında, %91,2 oranla en yüksek aşınma düşüşü meydana gelmiştir. 8-250 dalga formu takımı takiben sırasıyla, %83,5 oranla 8-650, %65,4 oranla 6-550, %47,3 oranla standart ve %10,4 oranla 4-450 dalga formu takımlar Ti 6Al 4V malzemesinde daha az aşınma eğilimi göstermiştir. Tüm kesici takımlar ortalama %59,6 oranında Ti 6Al 4V malzemesinde daha az aşınmıştır.



Şekil 5.27. İş malzemeleri açısından takım aşınma değişimleri

5.5. Bulguların genel değerlendirmesi

Bulguların genel olarak değerlendirilmesi açısından, dalga formlu takımların genel işleme performansları Çizelge 5.30'da gösterilmiştir. Çizelgede tüm dalga formlu takımların; kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım aşınması açısından ortalama işleme performansları verilmiştir. AISI 316L malzeme için tüm dalga formlu takımlar, standart takıma göre düşük işleme performansı sergilemiştir. Ti 6Al 4V malzeme için 4-450 dışındaki tüm dalga formlu takımlarda, standart takıma göre yüksek işleme performansı elde edilmiştir. Ortalama takım performansı değerlendirildiğinde, 4-450 takım harici tüm dalga formlu takımlarda yüksek işleme performansı görülmektedir. En iyi işleme performansı, %17,0 oranla 8-250 takımdan ve en kötü işleme performansı ise %-20,1 oranla 4-450 takımdan elde edilmiştir.

Dalga formunun, takımların genel işleme performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde, 8-250 dalga formlu takımda olduğu gibi dalga boyunun büyümesi ve dalga genliğinin küçülmesi ile takım işleme performansının genel olarak artma eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durumun aksi koşullarında ise 4-450 takımda görüldüğü gibi küçük dalga boyu ve büyük dalga genliklerinde takım işleme performansı düşmektedir. 4-450 (+22°/-6°) ve 6-550 (+12°/-4°) takımlarda olduğu gibi büyük pozitif ve negatif talaş açlarına sahip dalga formlu takımlarda işleme performansı standart takıma göre düşük çıkmaktadır. Aksi durumda ise 8-250 (+4°/-2°) ve 8-650 (+4°/-3°) takımlarda görüldüğü gibi yüksek işleme performansı elde edilmiştir. İşleme performansı üzerinde helis açılarının değişiminin etkisi belirgin olarak görülememiştir. Ancak, birbirine en yakın talaş açıları olan 8-250 ve

8-650 takımları incelendiğinde helis açılarının artışının işleme performansını artırdığı düşünülebilir [102]. Bunun yanı sıra en yüksek helis açılara sahip 4-450 takımı incelendiğinde, büyük pozitif ve negatif talaş açısının yarattığı negatif etkinin baskın gelerek takımın işleme performansını düşürdüğü görülmüştür. Böylece, talaş açısı değişiminin işleme performansı üzerinde büyük bir etkisinin olduğunu çıkarımı yapılabilir.

Çizelge 5.30. Genel bağlamda ortalama takım performansı

Malzeme	Deney	Standart takıma göre değişim (%)			
Takım dalga boyu ve genliği		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
AISI 316L	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
	Ortalama	-8,1	-5,1	-20,2	-9,4
Ti 6Al 4V	Kesme kuvveti	23,1	26,5	22,6	20,6
	Yüzey kalitesi	9,2	17,6	12,9	6,3
	Takım aşınması	26,9	73,0	-95,2	51,4
	Ortalama	19,7	39,0	-19,9	26,1
Ortalama Takım Performansı		5,8	17,0	-20,1	8,3

Bulguların genel olarak özetlenmesi açısından; tüm iş malzemeleri için, uygun kesici takım ve işleme koşulları tavsiyeleri Çizelge 5.31’de gösterilmiştir. Burada, kaba talaş (rough) işleme uygunluğu, takımların kesme kuvvetleri ve takım aşınma verileri referans alınarak belirlenmiştir. Son yüzey (finish) işleme uygunluğu ise takımların yüzey pürüzlülük değerleri referans alınarak belirlenmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; helisel kesici kenar üzerinde değişken talaş ve helis açılısına sahip dalga formlu parmak frezelerin standart parmak frezelere göre kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım aşınmaları açılarından farklı malzemeler üzerindeki işleme performansları karşılaştırılmıştır. Dalga formlu parmak frezeler, standart takımlara kıyasla daha uzun sürede üretildiği için bu takımların üretim maliyeti yaklaşık %13 oranında daha yüksektir. Dalga formlu 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 iş malzemeleriyle ve farklı işleme parametreleriyle deneysel, nümerik ve istatistiksel aşamalardan oluşan bir çalışma planında araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında ulaşılan sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

Birinci aşama bulgularından elde edilen sonuçlar

Kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi açısından:

- C45 malzeme için 6-450 takım, standart takıma göre genel olarak birbirine yakın kesme kuvvetleri ve genel olarak kötü yüzey kalitesi sergilemiştir.
- GG25 malzeme için 6-450 takım, ilk dört deney şartlarında standart takıma göre daha düşük, diğer işleme şartlarında ise birbirine yakın kesme kuvvetleri göstermiştir. Takımlarda, birbirlerine çok yakın yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.
- AISI 304 malzeme için 6-450 takım, standart takıma göre yüksek kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Yüzey kalitesi açısından, 4. 5. ve 8. deney şartlarında iyi, diğer işleme şartlarında ise kötü yüzey kalitesi görülmüştür.

FEM analizleri açısından:

Birinci aşama sürecinde yapılan FEM analizlerinin, tezin diğer aşamaları üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. FEM analizleri sayesinde, birinci aşama deneyleri doğrulanarak bir FEM çözüm yaklaşımı oluşturulmuştur. Bununla birlikte farklı dalga formlarına sahip kesici takımların kesme kuvvetleri açısından nasıl bir davranış sergiledikleri anlaşılabilmektedir. Bu takımlar hiç üretilmediği için hem zamandan hem de diğer maliyetlerden tasarruf edilmiştir.

Bunlara ek olarak *AdvantEdge™* sonlu eleman yazılımının çalışma performansı ve sonuç doğruluğu konusunda önemli bilgi birikimi yapılmıştır.

- 9. deney şartlarında yapılan FEM analizleri ve deneysel sonuçlar arasında C45 malzeme için en az %86 ve AISI 304 malzeme için en az %97 oranlarında bir uyuşma elde edilmiştir.
- GG25 malzeme için sonuçlar, 9. deney şartlarında en az %73 oranında ve 3. deney şartlarında ise en az %77 oranında birbirleriyle uyushmaktadır.

İkinci aşama bulgularından elde edilen sonuçlar

Farklı dalga form geometrisine sahip 17 kesici takımın, C45 ve AISI 304 malzemeler için 9. deney şartları ve GG25 için 9. ve 3. deney şartlarında FEM analizleri yapılmıştır. 9. deney şartlarında elde edilen sonuçlarda takımlar, kesme kuvvetleri açısından birbirlerine yakın bir davranış göstermişlerdir. Ancak GG25 için 3. deney şartında takımların kesme kuvveti davranışları, 9. deney şartındaki sonuçlara genel olarak benzer gözükse de bazı dalga formlu takımlardan farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, dalga formlu takımlarda farklı işleme şartlarında farklı kesme kuvveti davranışları elde edilebileceğini göstermiştir. İkinci aşama FEM analizleri sonucunda standart takıma kıyasla, 6-550 ve 8-250 takımlar iyi, 4-450 ve 8-650 takımlar ise kötü olarak seçilmişlerdir.

Üçüncü aşama bulgularından elde edilen sonuçlar

Kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi açısından:

- AISI 316L malzeme için dalga formlu takımlarda, 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 edilmiştir. Bu nedenle kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi üzerinde, negatif talaş açısının pozitif talaş açısına göre daha etkin bir parametre olduğunu çıkarımı yapılmıştır. Tüm işleme şartlarında en düşük kesme kuvvetleri ve en iyi yüzey kalitesi standart takımdan, en yüksek kesme kuvvetleri ve en kötü yüzey kalitesi ise 4-450 dalga formlu takımdan elde edilmiştir. 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.

- Ti 6Al 4V malzeme için tüm kesici takımlarda yığıntı talaş oluşumları gözlenmiştir. Dalga formlu takımlarda, negatif talaş açılı bölgelerin yarattığı kötü etkinin, yığıntı talaş sebebiyle yok edilip pozitif etkiye dönüşmesi ve pozitif talaş açılı bölgelerin avantajları ile birleşmesiyle dalga formlu takımlarda daha düşük kesme kuvvetleri ve daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Talaşlı imalat sürecinde yığıntı talaş oluşumu istenmeyen bir durumdur. Ancak elde edilen bulgulardan yola çıkarak yığıntı talaş oluşumunun, dalga formlu takımları standart takımlara göre avantajlı duruma soktuğu düşünülmektedir. Kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi üzerinde, negatif talaş açısının pozitif talaş açısına göre daha etkin bir parametre olduğunu, AISI 316L’de görüldüğü gibi Ti 6Al 4V malzeme için de geçerlidir. Tüm işleme şartlarında en düşük kesme kuvvetleri ve en iyi yüzey kalitesi 8-250 dalga formlu takımdan, en yüksek kesme kuvvetleri ve en kötü yüzey kalitesi ise standart takımdan elde edilmiştir. Tüm dalga formlu takımlar standart takım ile karşılaştırıldığında, dalga formlu takımlardan ortalama %23,2 oranında düşük kesme kuvvetleri ve ilk altı deney şartı için ortalama %11,5 iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.

Varyans ve regresyon analizleri açısından:

- Varyans ve regresyon analizleri ile kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük üzerinde en etkili olan işleme faktörleri tespit edilmiştir. Geliştirilen istatistiksel modeller sayesinde seçilen faktör ve seviyelerin anlamlı ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.
- AISI 316L malzeme için 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.
- Ti 6Al 4V malzeme için analiz sonuçlarına göre, kesme kuvvetlerinin %59,76 etki oranı ile en çok ilerleme miktarından, yüzey pürüzlülüğünün ise %35,35 etki oranı ile en çok ilerleme miktarından etkilendiği anlaşılmıştır. İstatistiksel modelin belirlilik katsayıları (R^2), kesme kuvvetleri açısından %98,67 ve yüzey pürüzlülükleri açısından ise %53,34 olarak elde edilmiştir.

Dördüncü aşama bulgularından elde edilen sonuçlar

Takım aşınmaları açısından:

- AISI 316L malzeme için, 4-450 takımı dışındaki tüm dalga formlu takımlarda standart takıma göre daha düşük aşınma değerleri elde edilmiştir. Talaş açısı artışı ile kesici kenar mukavemetinin düşmesi nedeniyle dalga formlu takımlarda, pozitif talaş açılı bölgelerin negatif talaş açılı bölgelere göre daha çok aşındığı görülmüştür. Pozitif ve negatif talaş açıları 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 açılarına sahip olan 8-250 (-2°, +4°) ve 8-650 (-3°, +4°) dalga formlu 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.
- Ti 6Al 4V malzeme için, 4-450 takımı dışındaki tüm dalga formlu takımlarda standart takıma göre daha düşük aşınma değerleri elde edilmiştir. Negatif talaş açılı bölgelerde, yığıntı talaş nedeniyle daha düşük kesme kuvvetleri elde edilmesinin, aşınma davranışı üzerinde yarattığı pozitif etki sayesinde dalga formlu takımlar için büyük avantaj sağlanmıştır. Pozitif ve negatif talaş açıları 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 açılarına sahip olan 8-250 (-2°, +4°) ve 8-650 (-3°, +4°) dalga formlu takımlar ise daha iyi aşınma davranışı sergilemişlerdir. Ayrıca, negatif talaş açısının pozitif talaş açısına göre daha etkin bir parametre olduğunu, AISI 316L’de görüldüğü gibi Ti 6Al 4V malzeme için de geçerlidir.

Tüm aşamalar değerlendirilerek elde edilen sonuçlar

- Alaşımsız ıslah çelik sınıfından olan C45 (AISI 1045) malzemesi için dalga formlu takımlardan düşük işleme performansı elde edilmiştir. C45 ve benzer sınıf ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin, standart takımlar ile işlenmesi daha uygundur.
- Gri dökme demir sınıfından olan GG25 ve benzeri gevrek malzemeler için özellikle 8-250 ve 6-450 dalga formlu takımların, düşük kesme kuvvetleri göstermesi nedeniyle kaba talaş işlemlerinde kullanılması tavsiye edilmektedir.

- Krom-Nikel grubu östenitik paslanmaz çelik malzeme grubunda yer alan AISI 316L ve benzer mekanik özellikteki (AISI 304 vb.) malzemelerin işlenmesindeki yüksek takım aşınması problemine çözüm olması açısından, %17,2 oranda daha düşük aşınma miktarı sergileyen 8-250 dalga formlu takımın kaba talaş işleme için uygun olduğu düşünülmektedir. Dalga formlu takımların bu malzemeler üzerinde düşük yüzey kalitesi göstermesi nedeniyle ince talaş işleme için standart takımların kullanılması daha uygundur.
- Titanyum alaşımları sınıfından olan Ti 6Al 4V (grade 5) ve benzer malzemelerin işlenmesinde karşılaşılan yüksek kesme kuvvetleri ve hızlı takım aşınması problemlerine çözüm olması açısından, %26,5 oranla kesme kuvveti ve %73,0 oranla takım aşınması avantajıyla 8-250 ve %20,6 oranla kesme kuvveti ve %51,4 oranla takım aşınması avantajıyla 8-650 dalga formlu takımların kaba talaş işleme için kullanılmaları uygun görülmektedir. Buna ek olarak, %17,6 oranla yüksek yüzey kalitesi sergileyen 8-250 takımının ince talaş işlemeye uygun olduğu düşünülmektedir.
- AISI 316L, Ti 6Al 4V, GG25 ve benzer mekanik özellikteki mühendislik malzemeleri için 8-250 dalga formlu takımın, sergilediği yüksek işleme performansı nedeniyle talaşlı imalat uygulamalarında kullanmasının maliyet/performans açısından standart takımlara göre daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen veriler ışığında dalga formlu kesici takımlar ile ileriye dönük olarak;

- Çalışmadan elde edilen doğrulanmış FEM analizleri kullanılarak farklı çaplardaki dalga formlu takımların farklı işleme parametreleri altındaki işleme performansları,
- Karbür takım malzemesine alternatif olabilecek HSS, M42 vb. takım çeliklerden üretilmiş dalga formlu takımların ve çeşitli kesici takım kaplamalarının işleme davranışları üzerindeki etkileri,
- Dalga formlu takımlardan bir diğer beklenti olarak talaş kaldırma sırasında oluşan titreşim davranışları,
- Dalga formlu takımların; işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan diğer malzemeler (Al alaşımları, süper alaşımlar, molibden alaşımları, karbür esaslı malzemeler vb.) üzerindeki işleme performansları,

- Cep işleme operasyonları gibi, kesici takımlarda yüksek sehimin meydana geldiği, takım üzerinde yüksek kesme basıncı ve yüksek kesme kuvvetleri oluşan işleme operasyonları için de kullanılabilecek dalga formları optimizasyonu,
- Bu çalışmada uygulanan çevre frezeleme işleminde takımın tek yönlü zorlanmasına alternatif olarak takımda yanıl sehim oluşturmayan kanal açma operasyonlarındaki performansı

için benzer araştırmalar yapılması önerilir.



KAYNAKLAR

1. Abukhshim, N., Mativenga, P., and Sheikh, M.A. (2006). 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.
2. Altıntaş, Y. (2012). *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. New York: Cambridge University Press, 286.
3. Shaw, M.C. and Cookson, J. (2005). *Metal cutting principles*. New York: Oxford University Press, 759.
4. Trent, E.M. and Wright, P.K. (2000). *Metal cutting*. New Delhi: Butterworth-Heinemann, 445.
5. Black, J.T. and Kohser, R.A. (2020). *DeGarmo's materials and processes in manufacturing*. Hoboken: John Wiley and Sons, 1033.
6. Daoud, M., Chatelain, J., and Bouzid, A. (2017). Effect of rake angle-based Johnson-Cook material constants on the prediction of residual stresses and temperatures induced in Al2024-T3 machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 122, 392-404.
7. Akgün, A. (2020). *Dalgali kesim özelliğine sahip değişken talaş açılı parmak freze tasarımı ve performansının değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 87.
8. ISO, (2006). *ISO 8688-2: Tool Life Testing in Milling - Part 2: End Milling*, International Organization for Standardization.
9. Gowthaman, S. and Jagadeesha, T. (2020). Comparative studies of variation in end mill radial rake angle and cutting conditions on cutting force and surface integrity during machining of nimonic 263. *Materials Research Express*, 7(3), 036503.
10. Aslantas, K. and Alatrushi, L. (2021). Experimental study on the effect of cutting tool geometry in micro-milling of Inconel 718. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(3), 2327-2342.
11. Okafor, A.C. and Sultan, A.A. (2016). 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.
12. Sultan, A.A. and Okafor, A.C. (2016). 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.
13. Dombovari, Z. and Stepan, G. (2011, January). *The effect of harmonic helix angle variation on milling stability*. Paper presented at ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Washington, DC, USA, 467-473.

14. Dombovari, Z. and Stepan, G. (2012). The effect of helix angle variation on milling stability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134(5), 051015:1-6.
15. Korovin, G., Petrushin, S., and Gubaidulina, R. (2018, July). *Machining of titanium alloys with wave milling cutters*. Paper presented at Materials Science Forum. Switzerland, 79-85.
16. Song, Q., Ai, X., and Zhao, J. (2011). Design for variable pitch end mills with high milling stability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9-12), 891-903.
17. Wan, M., Feng, J., Zhang, W.-H., Yang, Y., and Ma, Y.-C. (2017). 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.
18. Burek, J., Zylka, L., Plodzien, M., Gdula, M., and Sulkowicz, P. (2018). The influence of the cutting edge shape on high performance cutting. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 90(1), 134-145.
19. Dombovari, Z. and Stepan, G. (2012). The effect of helix angle variation on milling stability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134(5), 051015.
20. İnternet: Minicut International Inc. URL: <http://minicut.com/hss-pm-super-cobalt-end-mills-minicut/>, Son erişim tarihi: 05.01.2020.
21. İnternet: WNT Ceratizit Group. URL: <https://www.wnt.com/uk/news-about/hss-milling-gets-a-complete-overhaul-by-wnt-817.html>, Son erişim tarihi: 14.01.2020.
22. Hagiwara, M., Chen, S., and Jawahir, I. (2009). Contour finish turning operations with coated grooved tools: optimization of machining performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(1), 332-342.
23. Ciftci, I. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 39(6), 565-569.
24. İnternet: WIDIA Product Group. URL: <https://www.widia.com/us/en/products/solid-end-mills/high-performance-high-speed-steel-hss-epm-end-mills/hp-hss-e--pm--roughing.html>, Son erişim tarihi: 10.02.2020.
25. İnternet: TaeguTec LTD. URL: <https://www.imc-companies.com/taegutec/ttkCatalog/Family.aspx?fnum=473&mapp=ML&GFSTYP=M>, Son erişim tarihi: 16.02.2020.
26. Maurel-Pantel, A., Fontaine, M., Thibaud, S., and Gelin, J.-C. (2012). 3D FEM simulations of shoulder milling operations on a 304L stainless steel. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 22, 13-27.
27. Wu, H. and Zhang, S. (2014). 3D FEM simulation of milling process for titanium alloy Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8), 1319-1326.

28. Rao, B., Dandekar, C.R., and Shin, Y.C. (2011). An experimental and numerical study on the face milling of Ti–6Al–4V alloy: Tool performance and surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 294-304.
29. Hanson, C., Hiwase, P., Chen, X., Jahan, M., Ma, J., and Arbuckle, G. (2019). Experimental investigation and numerical simulation of burr formation in micro-milling of polycarbonates. *Procedia Manufacturing*, 34, 293-304.
30. Chagas, G. and Machado, I. (2015). Numerical model of machining considering the effect of MnS inclusions in an austenitic stainless steel. *Procedia CIRP*, 31, 533-538.
31. Zhou, L., Peng, F., Yan, R., Dong, Q., and Yang, C. (2015). *Prediction and experimental validation of micro end-milling forces with finite element method*. Paper presented at International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Switzerland, 664-675.
32. Mohammed, W.M., Ng, E., and Elbestawi, M. (2011). Modeling the effect of the microstructure of compacted graphite iron on chip formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(10-11), 753-765.
33. Chagas, G.M.P., Seriacopi, V., and Machado, I.F. (2013, November). *Numerical machining simulation for an Aisi 304 stainless steel considering microfracture mechanics aspects*. Paper presented at 22nd International Congress of Mechanical Engineering. Ribeirao Preto, SP, Brazil, 3216-3224.
34. Bosetti, P., Maximiliano Giorgio Bort, C., and Bruschi, S. (2013). Identification of Johnson–Cook and Tresca's Parameters for Numerical Modeling of AISI-304 Machining Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(5).
35. Çiftçi, İ. ve Gökçe, H. (2019). Molibden alaşımlarının işlenmesinde kesici takım ve kesme parametrelerinin Taguchi Metodu ile optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1).
36. Hazir, E., Erdinler, E.S., and Koc, K.H. (2018). Optimization of CNC cutting parameters using design of experiment (DOE) and desirability function. *Journal of Forestry Research*, 29(5), 1423-1434.
37. Ghalme, S., Mankar, A., and Bhalerao, Y. (2016). Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method. *SpringerPlus*, 5(1), 1376.
38. Muthukrishnan, N. and Davim, J.P. (2009). Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis. *Journal of materials processing technology*, 209(1), 225-232.
39. Sangwan, K.S., Saxena, S., and Kant, G. (2015). Optimization of machining parameters to minimize surface roughness using integrated ANN-GA approach. *Procedia Cirp*, 29, 305-310.
40. Khorasani, A. and Yazdi, M.R.S. (2017). Development of a dynamic surface roughness monitoring system based on artificial neural networks (ANN) in milling operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1), 141-151.

41. Zain, A.M., Haron, H., Qasem, S.N., and Sharif, S. (2012). Regression and ANN models for estimating minimum value of machining performance. *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1477-1492.
42. Bolar, G., Das, A., and Joshi, S.N. (2018). Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. *Measurement*, 121, 190-204.
43. Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C.Y., ve Özdemir, M. (2014). Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 30(4), 220-226.
44. Kaçal, A. and Gülesin, M. (2009). 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.
45. Masooth, P.H.S., Jayakumar, V., and Bharathiraja, G. (2020). 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.
46. Kumar, S.L. (2018). Experimental investigations and empirical modeling for optimization of surface roughness and machining time parameters in micro end milling using Genetic Algorithm. *Measurement*, 124, 386-394.
47. Touggui, Y., Belhadi, S., Uysal, A., Temmar, M., and Yallese, M.A. (2020). A comparative study on performance of cermet and coated carbide inserts in straight turning AISI 316L austenitic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 241-260.
48. M'saoubi, R., Outeiro, J., Changeux, B., Lebrun, J., and Dias, A.M. (1999). Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. *Journal of materials processing technology*, 96(1-3), 225-233.
49. Kıvak, T. ve Şeker, U. (2016, November). *Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde M42 HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlemin delik kalitesi üzerindeki etkileri*. Paper presented at 7th International Symposium On Machining. İstanbul, 241-251.
50. Ezugwu, E. and Wang, Z. (1997). Titanium alloys and their machinability-a review. *Journal of materials processing technology*, 68(3), 262-274.
51. Tetel, K. (1989). *Machining of stainless steels handbook*. ASM International: Materials Park, 681.
52. Outeiro, J., Umbrello, D., and M'saoubi, R. (2006). 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.
53. Darwin, J., Lal, D.M., and Nagarajan, G. (2008). 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.

54. Gürbüz, H., Şeker, U., ve Kafkas, F. (2020). AISI 316L çeliğinin tornalanmasında kesici takım formlarının yüzey bütünlüğü üzerine etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1).
55. Gürbüz, H., Kafkas, F., ve Şeker, U. (2012). 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.
56. Günay, M. (2013). AISI 316L çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(3), 437-444.
57. Wang, S., Ma, Z., Liao, Z., Song, J., Yang, K., and Liu, W. (2015). Study on improved tribological properties by alloying copper to CP-Ti and Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: C*, 57, 123-132.
58. Bayraktar, Ş. ve Demir, O. (2017, October). *Titanyum alaşımlarının işlenebilirliği üzerine yeni gelişmeler*. Paper presented at 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17). Elazığ, 1-11.
59. Rahman, M., San Wong, Y., and Zareena, A.R. (2003). Machinability of titanium alloys. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(1), 107-115.
60. Kıvak, T. ve Şeker, U. (2016, Temmuz). *Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde tungsten karbür takımlara uygulanan kriyojenik işlemin eksenel kuvvet ve moment üzerindeki etkileri*. Paper presented at 17. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi. Bursa, 1-11.
61. Luo, J., Ye, P., Li, M., and Liu, L. (2015). Effect of the alpha grain size on the deformation behavior during isothermal compression of Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*, 88, 32-40.
62. Akgün, M. (2021). *Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Inconel 625 nikel esaslı süper alaşımın işlenebilirliğine etkisinin deneysel nümerik ve istatistiksel araştırılması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 121.
63. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., and Zhu, J.Z. (2013). *The finite element method: its basis and fundamentals*. Oxford: Elsevier, 737.
64. Brenner, S.C., Scott, L.R., and Scott, L.R. (2008). *The mathematical theory of finite element methods*. New York: Springer, 294.
65. Korkmaz, M.E. (2018). *Nikel esaslı süper alaşımın (Nimonic 80A) malzeme yapısal denklem parametrelerinin belirlenmesi ve uygulanabilirliğinin araştırılması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 97.
66. İnternet: Charles University URL: <https://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/AFEM.d>, Son erişim tarihi: 12.05.2020.

67. AdvantEdge (2015). *AdvantEdge 7.1 User's Manual*. Minneapolis: Third Wave Systems.
68. İnternet: *MatWeb*. URL: <http://www.matweb.com/index.aspx>, Son erişim tarihi: 14.04.2019.
69. İnternet: *Ceratizit Group*. URL: <https://www.ceratizit.com/en/products/rods-preforms/carbide-grades/>, Son erişim tarihi: 27.04.2019.
70. İnternet: *Karcan Cutting Tools*. URL: <http://www.karcan.com/en/product/100-series>, Son erişim tarihi: 05.02.2020.
71. İnternet: *Sandvik Coromant Tool Guide*. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/products/pages/toolguide.aspx>, Son erişim tarihi: 05.02.2020.
72. İnternet: *ISCAR Tool Advisor*. URL: <http://www.iscar.com/ita/>, Son erişim tarihi: 05.02.2020.
73. Shrot, A. and Bäker, M. (2012). Determination of Johnson–Cook parameters from machining simulations. *Computational Materials Science*, 52(1), 298-304.
74. Chen, M., Jiang, L., Guo, G., and An, Q. (2011). Experimental and FEM study of coated and uncoated tools used for dry milling of compacted graphite cast iron. *Transactions of Tianjin University*, 17(4), 235-241.
75. Yanda, H., Ghani, J., Rizal, M., and Che Haron, C. (2015). Performance of uncoated and coated carbide tools in turning FCD700 using FEM simulation. *International Journal of Simulation Modelling*, 14, 416-425.
76. Grzesik, W., Rech, J., Žak, K., and Claudin, C. (2009). Machining performance of pearlitic–ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(2), 125-133.
77. Grzesik, W. and Žak, K. (2009). Mechanical, thermal and tribological aspect of the machining process of nodular iron with coated carbide and ceramic tools. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 33(1), 31-43.
78. Malakizadi, A., Sadik, I., and Nyborg, L. (2013). Wear mechanism of CBN inserts during machining of bimetal aluminum-grey cast iron engine block. *Procedia CIRP*, 8, 188-193.
79. Dandekar, C.R., Shin, Y.C., and Barnes, J. (2010). Machinability improvement of titanium alloy (Ti–6Al–4V) via LAM and hybrid machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(2), 174-182.
80. Altintas, Y., Kersting, P., Biermann, D., Budak, E., Denkena, B., and Lazoglu, I. (2014). Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 63(2), 585-605.
81. Budak, E., Lazoglu, I., and Guzel, B. (2004). Improving cycle time in sculptured surface machining through force modeling. *CIRP Annals*, 53(1), 103-106.

82. Gao, G., Wu, B., Zhang, D., and Luo, M. (2013). Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(3), 823-830.
83. Mamedov, A. and Lazoglu, I. (2013). Machining forces and tool deflections in micro milling. *Procedia Cirp*, 8, 147-151.
84. Zhao, J., Ai, X., and Li, Z.L. (2006). *Finite element analysis of cutting forces in high speed machining*. Paper presented at Materials Science Forum. Switzerland, 753-756.
85. Saglam, H., Unsacar, F., and Yaldiz, S. (2006). 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.
86. Günay, M., Aslan, E., Korkut, I., and Şeker, U. (2004). Investigation of the effect of rake angle on main cutting force. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), 953-959.
87. Günay, M., Korkut, I., Aslan, E., and Şeker, U. (2005). Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force. *Journal of materials processing technology*, 166(1), 44-49.
88. Günay, M. and Şeker, U. (2005). Kesici takım talaş açısının ilerleme kuvveti üzerindeki etkisinin araştırılması. *Politeknik dergisi*, 8(4), 323-328.
89. Williams, J., Smart, E., and Milner, D. (1970). Metallurgy of machining. Pt. 1. Basic considerations and the cutting of pure metals. *Metallurgia*, 81(483), 3-10.
90. Kaçal, A. ve Yıldırım, F. (2016). PDM23 çeliğinin tornalanmasında CBN kesici uçların kesme performansının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin belirlenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(1).
91. Baday, Ş., Başak, H., and Güral, A. (2016). Analysis of spheroidized AISI 1050 steel in terms of cutting forces and surface quality. *Kovove Mater*, 54, 315-320.
92. Gökkaya, H., Sur, G., ve Dilipak, H. (2004). PVD ve CVD kaplamalı sementit karbür kesici takımların işleme parameterlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Teknoloji*, 7(3).
93. Gunay, M. (2008). 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.
94. Sekmen, M., Günay, M., ve Şeker, U. (2015). Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi. *Politeknik dergisi*, 18(3), 141-148.
95. Günay, M. ve Meral, T. (2019). Kaplamalı ve kaplamasız karbür matkap ile ferritik paslanmaz çeliğin delinebilirlik analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 5(2), 159-166.

96. Yagmur, S., Kurt, A., and Seker, U. (2020). Evaluation and mathematical modeling of delamination and cutting forces in milling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 457-465.
97. Dilipak, H. ve Yilmaz, V. (2012). AISI 1050 çeliğinin karbür takımlarla frezelenmesinde oluşan titreşimlerin incelenmesi ve istatistiksel analizi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2).
98. Kaçal, A. ve Gülesin, M. (2009). Azdırma Freze Çakılarında Kesme Kuvveti Bileşenlerinin Deneysel ve İstatistiksel Olarak İncelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24(3).
99. Astakhov, V.P. and Davim, J.P. (2008), Tools (geometry and material) and tool wear, *Machining*, London: Springer, 29-57.
100. Attanasio, A., Ceretti, E., Fiorentino, A., Cappellini, C., and Giardini, C. (2010). Investigation and FEM-based simulation of tool wear in turning operations with uncoated carbide tools. *Wear*, 269(5-6), 344-350.
101. Astakhov, V.P. (2006). *Tribology of metal cutting*. Great Britain: Elsevier, 426.
102. Ema, S. and Davies, R. (1989). Cutting performance of end mills with different helix angles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 29(2), 217-227.







GAZİ GELECEKTİR..