

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YUMUŞAK VE SERT MALZEMELERİN MİKRO
FREZELENMESİNDE İŞLEME ŞARTLARININ
OPTİMİZASYONU**

**EMEL KURAM
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2015**

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YUMUŞAK VE SERT MALZEMELERİN
MİKRO FREZELENMESİNDE İŞLEME
ŞARTLARININ OPTİMİZASYONU**

**EMEL KURAM
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI
PROF. DR. BABÜR ÖZÇELİK**

**GEBZE
2015**

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**OPTIMIZATION OF MACHINING
CONDITIONS IN MICRO MILLING OF
MILD AND HARD MATERIALS**

EMEL KURAM
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY**
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. BABÜR ÖZÇELİK

GEBZE
2015

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/06/2015 tarih ve 2015/38 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 10/07/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emel KURAM'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Babür ÖZÇELİK

ÜYE

: Doç. Dr. Mehmet Ali ARSLAN

ÜYE

: Doç. Dr. Ahmet Zafer ŞENALP

ÜYE

: Doç. Dr. Eyup BAĞCI

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Murat KIYAK

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tezde, işleme şartlarının mikro yüzey veya kanal frezelemede takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve çapak oluşumu üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler Taguchi ortogonal dizini esas alınarak yürütülmüştür. Deney setlerinde devir sayısı, ilerleme ve talaş derinliği işleme şartları olarak alınmıştır. İşleme şartlarının etkisini analiz etmek için işaret/gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Taguchi'nin S/N oranı kullanılarak her bir çıktı için optimum işleme şartları belirlenmiştir. ANOVA ile ölçülen çıktılar üzerinde hangi parametrelerin etkili olduğu bulunmuştur. Ölçülen çıktılarının tek tek optimizasyonunun yanı sıra eş zamanlı optimizasyonu da yapılmıştır. Eş zamanlı optimizasyon için gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Deneylerde farklı mühendislik malzemeleri (Al 7075, AISI 304, Ti6Al4V ve Inconel 718) kullanılmıştır ve bu malzemeler için optimum işleme şartları belirlenmiştir.

Ölçülen çıktıları deney yapmadan tahmin edebilmek için regresyon analizi ve bulanık mantık ile modelleme çalışmaları yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre oluşturulan tahmin modellerinin mikro frezelemede takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü, kesme kuvvetlerini ve çapak genişliğini tahmin etmede kullanılabileceği görülmüştür.

Mikro frezelemede kesici takım çapının, takım yollarının ve yüksek hız kafası kullanmanın çıktı performansları üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Mikro frezeleme operasyonları maliyeti yüksek olan yüksek hızlı tezgahlara ihtiyaç duymaktadır. Yüksek hız kafası kullanıldığında ise maliyet düşmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada standart tezgaha takılan yüksek hız kafasının performansı nasıl etkilendiği de incelenmiştir.

Ayrıca bu çalışmada konvansiyonel (makro) frezelemede kullanılan mekanistik kuvvet modelleme yaklaşımları mikro frezeleme prosesine uyarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda mekanistik kuvvet modelinin işleme şartları doğru seçildiği zaman mikro frezelemede kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Mikro Frezeleme, Takım Aşınması, Kesme Kuvvetleri, Yüzey Pürüzlülüğü, Modelleme, Optimizasyon.

SUMMARY

In this thesis, the effects of the machining conditions on the tool wear, surface roughness, cutting forces and burr formation in the micro surface or slot milling were experimentally investigated. Experiments were carried out by using Taguchi orthogonal array. Spindle speed, feed rate and depth of cut were taken as machining conditions at the experiment sets. The signal-to-noise (S/N) ratio, and the analysis of variance (ANOVA) are employed to analyze the effect of the machining conditions. By using Taguchi's S/N ratio, optimum machining conditions were determined for each output. It was found that which parameters were efficient on measured outputs with ANOVA. Not only single optimization of measured outputs but also simultaneous optimization of measured outputs were done. Grey relational analysis method was used for simultaneous optimization. Various engineering materials (Al 7075, AISI 304, Ti6Al4V and Inconel 718) were used at the experiments and optimum machining conditions were determined for these materials.

Modelling studies were made with regression analysis and fuzzy logic to predict the measured outputs without conducting experiment. It was seen that prediction models establishing according to experimental results could be used for predicting tool wear, surface roughness, cutting forces and burr width in the micro milling.

The effects of the cutting tool diameter, tool paths and use of high speed spindle attachment in micro milling on output performances were also investigated. Micro milling operations need high speed machines, which have high cost. When high speed spindle attachment is used, the cost decreases. Therefore, in this study, it was also investigated that how high speed spindle attachment fitted to standard machine affected the performance.

Furthermore, in this study, mechanistic force modelling approaches used at conventional (macro) milling were adapted to micro milling process. From results, it was seen that mechanistic force model could be used in micro milling when machining conditions were selected properly.

Key Words: Micro Milling, Tool Wear, Cutting Forces, Surface Roughness, Modelling, Optimization.

TEŞEKKÜR

Her konuda yanımda olup beni destekleyen; maddi ve manevi yardımlarını benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim. Doktora tezimi aileme ithaf ediyorum.

Doktora eğitimim ve akademik çalışmalarım boyunca bilgisini, tecrübesini, yardımlarını, hoşgörüsünü ve her konuda desteğini benden esirgemeyen; deneysel çalışmalarda gerekli olan donanımları temin etmemde yardımcı olan; bilim insanı olarak model aldığım, öğrencisi ve asistanı olmaktan daima gurur duyduğum tez danışmanım Prof. Dr. Babür ÖZÇELİK'e teőekkürlerimi sunmayı borç bilirim. Yurt içi doktora bursiyeri olduğum TÜBİTAK-BİDEB'e doktora eğitimim sırasında verdiği destekten dolayı teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı ve laboratuarda geçirdiğim anları güzel arkadaşlıkları ile eğlenceli kılan değerli büyüklerim tekniker Önder Gedik'e, teknisyen Hamit Ayvaz'a ve Murat Dal'a; SEM analizlerini sabırla yapan ve yararlı sohbetleriyle bana destek olan uzman Ahmet Nazım'a; doktora tez izleme komitesi'ndeki öğretim üyeleri Doç. Dr. Mehmet Ali Arslan'a ve yararlı sohbetleriyle bana destek olan ve bana inanan Yrd. Doç. Dr. Murat Kıyak'a değerli zamanlarını ayırdıkları için teşekkür ederim.

Bu tez BAP 2012-A19 ve BAP 2013-A22 no'lu Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında gerçekleştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
TABLolar DİZİNİ	xxvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. MİKRO FREZELEME	6
2.1. Tezgah	9
2.2. Kesici Takımlar	9
2.2.1. Takım Malzemeleri	10
2.2.2. Takım Kaplamaları	11
2.2.3. Takım Geometrisi	12
2.3. İş Parçası Malzemesi ve Mikro Yapı	13
2.4. Mikro Frezeleme Mekaniği	14
2.4.1. Mikro Kesme Mekanizması	14
2.4.2. Boyut Etkisi (Size Effect)	14
2.4.3. Talaş Oluşumu ve Minimum Talaş Kalınlığı	15
2.4.4. Kesici Kenar Radyüsünün Etkisi	22
2.4.5. İş Parçası Mikro Yapısının Etkisi	23
2.5. Modelleme	23
2.5.1. Sonlu Elemanlar Analizi	24
2.5.2. Mekanistik Modelleme	24
2.5.3. Analitik Modelleme	26
2.6. Performans Ölçümleri	27
2.6.1. Takım Aşınması ve Takım Ömrü	27
2.6.2. Yüzey Pürüzlülüğü	30

2.6.3. Çapak	33
2.6.4. Kesme Kuvvetleri	39
2.7. Deney Tasarımı ve Optimizasyon	40
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
3.1. Takım Tezgahı	43
3.2. İş Parçaları	43
3.3. Mikro Kesici Takımlar	44
3.4. Ölçümler	47
3.4.1. Takım Aşınması	47
3.4.2. Yüzey Pürüzlülüğü	48
3.4.3. Kesme Kuvvetleri	49
3.4.4. Çapak Genişliği	50
3.5. Deney Tasarımları	50
3.5.1. Taguchi Deney Tasarımı	50
3.5.2. Kesici Takım Çapının Etkisi Deneyleri	51
3.5.3. Takım Yollarının ve Yüksek Hız Kafasının Etkisi Deneyleri	52
3.5.4. Devir Sayısının Etkisi Deneyleri	54
3.5.5. Mekanistik Kuvvet Modelleme Deneyleri	55
4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	56
4.1. Taguchi Deney Tasarımı	56
4.1.1. Al 7075 Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelemesi	56
4.1.1.1. Regresyon Analizi	59
4.1.1.2. Bulanık Mantık	61
4.1.1.3. S/N Analizi	68
4.1.1.4. İşleme Şartlarının Etkisi	71
4.1.1.5. Varyans Analizi (ANOVA)	77
4.1.1.6. Çoklu Optimizasyon	79
4.1.1.7. Doğrulama Deneyleri	82
4.1.2. AISI 304 Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelemesi	83
4.1.2.1. Regresyon Analizi	86
4.1.2.2. Bulanık Mantık	87
4.1.2.3. S/N Analizi	91
4.1.2.4. İşleme Şartlarının Etkisi	94

4.1.2.5. Varyans Analizi (ANOVA)	99
4.1.2.6. Çoklu Optimizasyon	101
4.1.2.7. Doğrulama Deneyleri	102
4.1.3. Ti6Al4V Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelemesi	103
4.1.3.1. Regresyon Analizi	105
4.1.3.2. Bulanık Mantık	106
4.1.3.3. S/N Analizi	111
4.1.3.4. İşleme Şartlarının Etkisi	113
4.1.3.5. Varyans Analizi (ANOVA)	119
4.1.3.6. Çoklu Optimizasyon	121
4.1.3.7. Doğrulama Deneyleri	122
4.1.4. Inconel 718 Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelemesi	123
4.1.4.1. Regresyon Analizi	125
4.1.4.2. Bulanık Mantık	126
4.1.4.3. S/N Analizi	131
4.1.4.4. İşleme Şartlarının Etkisi	133
4.1.4.5. Varyans Analizi (ANOVA)	138
4.1.4.6. Çoklu Optimizasyon	140
4.1.4.7. Doğrulama Deneyleri	141
4.2. Kesici Takım Çapının Etkisi Deneyleri	142
4.3. Takım Yollarının ve Yüksek Hız Kafasının Etkisi Deneyleri	146
4.4. Devir Sayısının Etkisi Deneyleri	172
4.5. Mekanistik Kuvvet Modeli	174
4.5.1. Ekspansiyel (Üstel) Kuvvet Katsayı Modeli	175
4.5.2. Lineer Kenar Kuvvet Modeli	176
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	202
5.1. Sonuçlar	202
5.2. Öneriler	212
KAYNAKLAR	213
ÖZGEÇMİŞ	226
EKLER	227

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
α	: Talaş açısı
α_i	: Gri ilişkisel derece
β	: Sürtünme açısı
$\beta_{0,1,2,3}$: Regresyon katsayıları
γ_e	: Etkili talaş açısı
δ	: Elastik sehim
Δ_{max}	: Δ_{0i} nin maksimum değeri
Δ_{min}	: Δ_{0i} nin minimum değeri
$\Delta_{0i}(k)$: Sapma serisi
ϵ	: Hata
ε	: Eşdeğer plastik gerinimi
$\dot{\varepsilon}$: Gerinim hızı
$\dot{\varepsilon}_0$: Referans gerinim hızı
ζ	: Ayırt edici katsayı
θ	: Takımın anlık açısal pozisyonu (takımın dönme açısı)
θ_b	: Boyun açısı
θ_e	: Takımın malzemeden çıkış açısı
θ_s	: Takımın malzemeye giriş açısı
μ	: Üyelik fonksiyonun derecesi
μ_s	: Sürtünme katsayısı
μm	: Mikrometre
$\xi_i(k)$: Gri ilişkisel katsayı
σ	: Standart sapma
σ_e	: Eğilme gerilmesi
A	: Akma dayanımı
AE	: Akustik emisyon
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al	: Alüminyum

AlCrTiN	: Alüminyum krom titanyum nitrür
ANOVA	: Varyans Analizi
a_e	: Yana kayma mesafesi
a_p	: Talaş derinliği
B	: Sertleşme modülü
BUE	: Built up edge (Talaş yığılması)
c	: Ortalama değer
C	: Karbon
C_g	: Gerinim hızı sabiti
CAM	: Bilgisayar destekli imalat
CBN	: Kübik bor nitrür
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cr-C-N	: Krom karbo-nitrür
CrN	: Krom nitrür
CrTiAlN	: Krom titanyum alüminyum nitrür
Cu	: Bakır
d	: Takım çapı
D	: Ortalama tane çapı
$d_{aşınma}$: Takım aşınması olduğundaki çap
dB	: Desibel
d_c	: Kesme çapı
dev/dak	: Devir/dakika
dF_r	: Radyal kuvvet
dF_t	: Teğetsel kuvvet
d_s	: Şaft çapı
d_0	: Yeni takımın çapı
dz	: Eksenel disklerin kalınlığı
E	: Elastisite modülü
EDM	: Elektriksel aşındırma ile işleme
f	: İlerleme hızı (mm/dak)
F	: Kuvvet
Fe	: Demir

FEM	:	Sonlu elemanlar analizi
FIB	:	Odaklanmış iyon ışını
f_t	:	Diş başına ilerleme
F_t	:	Teğetsel yöndeki kuvvet
F_u	:	Sürtünme kuvveti
F_v	:	Normal kuvvet
F_x	:	x yönündeki kuvvet
$\overline{F_{xc}}, \overline{F_{xe}}$:	x yönündeki ortalama kuvvetler
F_y	:	y yönündeki kuvvet
$\overline{F_{yc}}, \overline{F_{ye}}$:	y yönündeki ortalama kuvvetler
h	:	Deforme olmamış talaş kalınlığı
h_a	:	Ortalama talaş kalınlığı
h_{min}	:	Minimum talaş kalınlığı
HRC	:	Rockwell C sertliği
HV	:	Vickers sertliği
I	:	Atalet momenti
ISO	:	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
j	:	Deney sayısı
JC	:	Johnson-Cook modeli
k	:	Bağımsız değişkenlerin sayısı
k_t	:	Takımın direngenliği (stiffness)
K_t, K_r	:	Kuvvet katsayıları
K_T, K_R, K_A	:	Denklem sabitleri
K_{tc}, K_{rc}	:	Kesme kuvveti katsayıları
K_{te}, K_{re}	:	Kenar kuvveti katsayıları
L	:	Kesici takımın boyu
L_c	:	Kesme uzunluğu
LIGA	:	Lithographie (Litografi) Galvanoformung (Elektro-kaplama) : Abformung (Presle kalıplama)
L_n	:	Boyun uzunluğu
L_s	:	Şaft uzunluğu
m	:	Termal yumuşama katsayısı
$\max(x_i^0(k))$:	k. tepkideki $x_i^0(k)$ nın en büyük değeri

Mg	: Magnezyum
$\min(x_i^0(k))$: k. tepkideki $x_i^0(k)$ nın en küçük değeri
mm	: milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MRR	: Talaş kaldırma oranı (mm^3/dak)
n	: Devir sayısı (dev/dak)
n	: Sertleşme katsayısı
N	: Azot
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
nm	: Nanometre
O	: Oksijen
OFHC	: Oksijen serbest yüksek iletkenlikli
p, q, s	: Denklem sabitleri
PMMA	: Polimetilmetakrilat
PCD	: Çok kristalli elmas
P-to-V	: Peak-to-Valley
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
r	: Takım yarıçapı
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
r_e	: Kesici takım kenar radyüsü
Rz	: Tepe çukur yüzey pürüzlülüğü
R^2	: Regresyon katsayısı
R^2 (adj)	: Düzeltilmiş (adjusted) regresyon katsayısı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Si	: Silisyum
S/N	: Sinyal/gürültü oranı
T	: İş parçası sıcaklığı
Ti	: Titanyum
TiAlN	: Titanyum alüminyum nitrür
TiCN	: Titanyum karbo-nitrür
TiN	: Titanyum nitrür

T_m	:	Erime sıcaklığı
T_r	:	Oda sıcaklığı
V	:	Vanadyum
VB	:	Serbest yüzey aşınması
w	:	Üst çapak genişliği
W	:	Tungsten
WC	:	Tungsten karbür
WEDG	:	Tel elektro erozyon ile taşlama
w_{ort}	:	Takım yarıçapındaki ortalama azalma
$x_i^*(k)$:	Normalize edilmiş değer
$x_i^0(k)$:	Orjinal değer
$x_0^*(k)$:	Referans serisi
y	:	Performans karakteristiklerinin değerleri
\bar{y}	:	Deney değerlerinin ortalaması
Z	:	Kesici ağız sayısı
Zn	:	Çinko
3D	:	3 boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Mikro kesici örnekleri.	6
2.2: Salgının kanal genişliği üzerindeki etkisi.	8
2.3: Mikro frezelemede işleme performansını etkileyen parametreler.	8
2.4: Elastik sehimin hesaplanması için giriş modeli.	10
2.5: Takım geometrisi.	13
2.6: Mikro ölçekli işlemede talaş oluşumu.	16
2.7: Kesme geometrisi.	16
2.8: Perlit için talaş yükü ve kuvvet ilişkisi.	19
2.9: Deforme olmamış talaş kalınlığı - kesme kuvveti grafiği.	19
2.10: Mikro frezelemede tane boyutu.	23
2.11: Sonlu elemanlar kesme modelinin sınır şartları.	24
2.12: Takım aşınmasının tanımı.	28
2.13: Takım aşınması tanımı.	28
2.14: Frezelemede oluşan çapaklar.	35
3.1: DECKEL MAHO DMU 60 P beş eksen işleme merkezi.	43
3.2: İş parçaları.	44
3.3: Mikro kesici takımların ölçüleri.	46
3.4: Helis açısı.	46
3.5: Mikro kesici takımın salgısını ölçmek için komparatörün kurulumu.	47
3.6: SEM cihazının görüntüsü.	48
3.7: Aşınma ölçümleri için hazırlanan eğimli parça.	48
3.8: Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.	48
3.9: Dinamometre.	49
3.10: Deney kurulumu.	49
3.11: Takım yolları.	53
3.12: Tek yönlü frezeleme.	53
3.13: Yüksek hız kafası.	54
3.14: Mikro kanal frezeleme.	55
4.1: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede takım aşınması	57

	görüntüleri.	
4.2:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede iş parçası yüzeylerinin görüntüleri.	57
4.3:	Örnek kuvvet grafiği.	58
4.4:	2 farklı kesici kenar için Fx kuvveti-zaman grafiği.	59
4.5:	Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin tahmini için bulanık mantık sistemi.	62
4.6:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.	63
4.7:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede dış başına ilerleme için üyelik fonksiyonu grafiği.	63
4.8:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.	63
4.9:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede bulanık mantık ile çıktı değerlerinin tahmini.	64
4.10:	Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	65
4.11:	Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması.	66
4.12:	Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.	69
4.13:	Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.	70
4.14:	Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.	70
4.15:	Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.	71
4.16:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve dış başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Dış başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	72

4.17:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve diş başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Diş başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	74
4.18:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve diş başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Diş başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	75
4.19:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve diş başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Diş başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	76
4.20:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler.	82
4.21:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için doğrulama deneylerinin sonuçları.	83
4.22:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede takım aşınması görüntüleri.	84
4.23:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede iş parçası yüzeylerinin görüntüleri.	85
4.24:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.	87
4.25:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede ilerleme hızı için üyelik fonksiyonu grafiği.	87
4.26:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.	88
4.27:	AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	88
4.28:	AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması.	90
4.29:	AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.	92

4.30:	AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.	93
4.31:	AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.	93
4.32:	AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.	93
4.33:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	95
4.34:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	96
4.35:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	97
4.36:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	98
4.37:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler	102
4.38:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için doğrulama deneylerinin sonuçları.	103
4.39:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede takım aşınması görüntüleri.	104
4.40:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede iş parçası yüzeylerinin görüntüleri.	104
4.41:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.	106
4.42:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede ilerleme hızı için	107

	üyelik fonksiyonu grafiği.	
4.43:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.	107
4.44:	Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	108
4.45:	Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması.	109
4.46:	Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.	112
4.47:	Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.	112
4.48:	Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.	113
4.49:	Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.	113
4.50:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	115
4.51:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	116
4.52:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	117
4.53:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	118
4.54:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel	122

	dereceler.	
4.55:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için doğrulama deneyinin sonuçları.	123
4.56:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde takım aşınması görüntüleri.	124
4.57:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde iş parçası yüzeylerinin görüntüleri.	124
4.58:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.	127
4.59:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde ilerleme hızı için üyelik fonksiyonu grafiği.	127
4.60:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.	127
4.61:	Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	128
4.62:	Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması.	129
4.63:	Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.	132
4.64:	Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.	132
4.65:	Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.	132
4.66:	Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.	133
4.67:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.	134
4.68:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki	135

- etkisi için 3D yüzey grafikleri.
- 4.69: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısı ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri. 136
- 4.70: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri. 137
- 4.71: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler. 141
- 4.72: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için doğrulama deneyinin sonuçları. 142
- 4.73: Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelemede farklı kesici takım çaplarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi. 144
- 4.74: Mikro yüzey frezelemede kesici takım çapının a) Al 7075 malzemesi için takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, b) Ti6Al4V malzemesi için takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, c) Al 7075 malzemesi için kuvvetler, d) Ti6Al4V malzemesi için kuvvetler üzerindeki etkisi. 144
- 4.75: Al 7075 malzemesinin mikro frezelemede takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi. 146
- 4.76: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında tezgahın 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelemede takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi. 147
- 4.77: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında tezgahın 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelemede takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi. 147
- 4.78: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında tezgahın 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede meydana gelen aşınma tipleri. 148
- 4.79: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelemede 149

	takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi.	
4.80:	Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde meydana gelen aşınma tipleri.	150
4.81:	Yeni mikro kesici takımın EDX analizi.	150
4.82:	Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde kullanılan kesici takımların EDX analizi.	152
4.83:	Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelemesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi.	155
4.84:	Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde meydana gelen aşınma tipleri.	155
4.85:	Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde kullanılan kesici takımların EDX analizi.	156
4.86:	Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelemesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi.	159
4.87:	Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde meydana gelen aşınma tipleri.	160
4.88:	Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde kullanılan kesici takımların EDX analizi.	161
4.89:	Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelemesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi.	163
4.90:	Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde meydana gelen aşınma tipleri.	164
4.91:	Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız	165

	kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede kullanılan kesici takımların EDX analizi.	
4.92:	Mikro yüzey frezelemede takım yollarının ve yüksek hız kafasının a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx kuvveti, d) P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi.	168
4.93:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede farklı devir sayılarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi.	173
4.94:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede devir sayısının a) Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, b) Kuvvetler üzerindeki etkisi.	174
4.95:	Mikro kesici takımın şematik görüntüsü.	177
4.96:	Kuvvet modeli için koordinat sistemi.	177
4.97:	Aynı ve zıt yönlü frezelemede talaş kalınlığının değişimi.	179
4.98:	Aynı ve zıt yönlü frezelemede çıkış ve başlangıç açıları.	179
4.99:	Talaş kalınlığı için Martelloti ve Bao ve Tansel modellerinin karşılaştırılması.	180
4.100:	Ortalama a) Fx, b) Fy kuvvetleri - dış başına ilerleme grafiği.	182
4.101:	Deney ve mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması.	183
4.102:	Mikro kanal frezelemede aynı ve zıt yönlü frezeleme.	184
4.103:	İşlenmiş kanalın taban yüzeyindeki takım yörüngesi.	184
4.104:	Takım çapındaki azalma - dış başına ilerleme grafiği.	185
4.105:	Üst çapak genişliği.	186
4.106:	Maksimum çapak genişliği - dış başına ilerleme ilişkisi.	187
4.107:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.	190
4.108:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede ölçülen Fx kuvvetinin S/N oranları.	190
4.109:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede ölçülen Fy kuvvetinin S/N oranları.	191
4.110:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede aynı yönlü frezeleme tarafında ölçülen çapak genişliğinin S/N oranları.	192
4.111:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede zıt yönlü frezeleme tarafında ölçülen çapak genişliğinin S/N oranları.	192

- 4.112: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemedesinde a) Devir 194 sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.
- 4.113: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemedesinde a) Devir 195 sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.
- 4.114: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemedesinde a) Devir 196 sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.
- 4.115: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemedesinde a) Devir 197 sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin aynı yönlü frezeleme tarafında çapak genişliği üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.
- 4.116: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemedesinde a) Devir 198 sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin zıt yönlü frezeleme tarafında çapak genişliği üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Tipik takım malzemelerinin karşılaştırılması.	11
2.2: Tipik takım malzemeleri ve kullanılacakları iş parçası malzemeleri.	11
2.3: AE sinyallerinden hesaplanan minimum talaş kalınlıkları.	21
2.4: Literatürde bulunan minimum talaş kalınlığı değerleri.	22
2.5: Serbest yüzey aşınması (VB) kriteri, kesme zamanları ve işlenen hacim.	29
3.1: İş parçası malzemelerinin kimyasal kompozisyonları (% Ağırlık).	44
3.2: DeneYlerde kullanılan mikro kesici takımlar.	45
3.3: DeneYlerde kullanılan faktörler ve seviyeleri.	51
3.4: Taguchi L9 deney tasarımı.	51
3.5: Takım yollarının ve yüksek hız kafasının etkisi deneYlerinde kullanılan kesme şartları.	54
3.6: Mekanistik kuvvet modeli doğrulama deneYlerinde kullanılan faktörler ve seviyeleri.	55
4.1: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneYleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.	59
4.2: Al 7075 malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneYleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.	69
4.3: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneYleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.	77
4.4: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneYleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.	78
4.5: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneYleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.	78
4.6: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneYleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.	79
4.7: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.	80

4.8:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.	81
4.9:	Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.	81
4.10:	AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.	85
4.11:	AISI 304 malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.	92
4.12:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.	99
4.13:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.	100
4.14:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.	100
4.15:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.	100
4.16:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.	101
4.17:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.	101
4.18:	AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.	102
4.19:	Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.	105
4.20:	Ti6Al4V malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.	111
4.21:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.	119
4.22:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri	120

	sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.	
4.23:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.	120
4.24:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.	120
4.25:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.	121
4.26:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.	121
4.27:	Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.	122
4.28:	Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.	125
4.29:	Inconel 718 malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.	131
4.30:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.	138
4.31:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.	139
4.32:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.	139
4.33:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.	139
4.34:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.	140
4.35:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.	140
4.36:	Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.	141

4.37:	Ti6Al4V malzemesi ve 400 µm çapındaki düz kesici takım için hesaplanan kesme kuvveti katsayıları.	182
4.38:	Ti6Al4V malzemesi için kanal işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği değerleri.	188
4.39:	Ti6Al4V malzemesi için kanal işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği değerlerinin S/N oranları.	189
4.40:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması için ANOVA tablosu.	199
4.41:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen Fx kuvvet değerleri için ANOVA tablosu.	199
4.42:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen Fy kuvvet değerleri için ANOVA tablosu.	200
4.43:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen çapak genişliği değerleri için ANOVA tablosu (aynı yönlü frezeleme).	200
4.44:	Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen çapak genişliği değerleri için ANOVA tablosu (zıt yönlü frezeleme).	201

1. GİRİŞ

Mikro mühendislik ölçüleri mikrometre (μm) boyutlarında olan ürünleri tasarlama, geliştirme ve imal etme ile ilgilenmektedir. İmalat alanında yüksek hassasiyette parça ihtiyacı mikro işleme yönteminin ortaya çıkmasına ve gelişmesine neden olmuştur. Kelime olarak mikro işleme, 1 μm ila 999 μm arasındaki işleme anlamına gelmektedir.

Mikro işleme nano teknoloji ile makro dünya arasında bir köprüdür. Fakat makro ve mikro ölçekli işleme arasındaki ayırım evrensel görüş birliğinin olmadığı bir alandır. Literatürde mikro işlemeyi tanımlamak için bazı girişimler görülmektedir. Masuzawa ve Tönshoff [1] mikro işlemeyi deforme olmamış talaş kalınlığının 0.1 ila 200 μm arasında değişen değerlerde kullanıldığı işleme olarak ifade etmiştir. Daha sonra Masuzawa [2] mikro işleme sınırının döneme, insana, işleme metoduna, ürün veya malzeme tipine göre değiştiğini açıklamıştır. Liu ve arkadaşları [3] mikro işlemede deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radyüsü ile karşılaştırılabilir boyutta olduğunu ifade etmiştir. Chae ve arkadaşları [4] mikro işlemeyi boyutları onlarca mikrometre ile birkaç milimetre arasında olan minyatür araçları ve bileşenleri oluşturmak için mikro mekanik işleme olarak tanımlamıştır. Dornfeld ve arkadaşları [5] mikro işlemeyi 1 mm'den küçük takımları kullanarak geometrik olarak tanımlanmış kesici kenarlar ile mekanik kesme işlemi olarak tanımlamıştır. Ng ve arkadaşları [6] nano/mikro ölçekli kesmeyi birkaç nanometre ile birkaç mikrometre arasında deforme olmamış talaş kalınlığının kaldırılması olarak tanımlamıştır. Aramcharoen ve arkadaşları [7] eğer kesici takım çapı 1-999 μm aralığında ise veya deforme olmamış talaş kalınlığı kesici kenar radyüsü veya malzeme tane boyutu ile karşılaştırılabilir boyutta ise bu işlemin mikro işleme olarak düşünülebileceğini ifade etmiştir.

Her geçen gün medikal, biyoteknoloji, elektronik, havacılık-uzay sanayi gibi pek çok alanda mikro parçalara olan ilgi ve talep artmaktadır. İnsanların üretilen ürünlerin daha az yer kaplamasını ve taşınabilmesini istemesi gelecekte mikro işleminin daha önemli hale gelmesine neden olacaktır. Mikrometre boyutlarındaki minyatür parçaların üretilmesi mikro elektriksel aşındırma ile işleme (mikro-EDM), mikro mekanik işleme (mikro frezeleme, mikro delme, mikro tornalama, mikro taşlama), lazer mikro üretimi ve mikro-enjeksiyon-kalıplama gibi özel imalat

yöntemleri ve stratejileri gerektirmektedir. Mikro-EDM ve mikro-kalıplama yöntemlerinin her ikisi de diğer metotlar ile imal edilmiş karmaşık elektrotlara ve kalıplara ihtiyaç duymaktadır. Litografi, LIGA, plazma aşındırma gibi günümüz mikro işleme proseslerinin yüksek en boy oranlı (aspect ratio) 3 boyutlu (3D) şekilleri üretme kabiliyetleri eksiktir ve genellikle silikon malzemelerle sınırlıdır. Bu yöntemlerin sınırlılıklarından dolayı mikro mekanik işleme yöntemleri son zamanlarda daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Mikro mekanik yöntemlerde pek çok mühendislik malzemeleri işlenebilmektedir. Ayrıca mikro mekanik yöntemler ile karmaşık geometrilerin işlenmesi mümkündür. Litografik metotlarda olduğu gibi pahalı kurulumlara da gerek yoktur. Mikro mekanik işleme litografik metotlarda kullanılan kimyasallara gerek duymadığı için çevreye olan olumsuz etkisi çok daha azdır.

Mikro mekanik işlemede ürünlerin elektriksel özelliklerinin prosesi etkilememesi ve işleme zamanının kolayca kontrol edilebilmesi bu yöntemlerin diğer yöntemlere göre avantajlarıdır [2], [8]. İş parçasının elektriksel özelliklerinin prosesi etkilememesi nedeniyle pek çok metal, plastik ve kompozitler işlenebilmektedir [2]. Fakat sert ve/veya kırılgan malzemelerin mikro mekanik yöntemlerle işlenmesi zordur [8].

Mikro mekanik işleme yöntemlerinden birisi de mikro frezelemedir. Mikro frezeleme operasyonlarının çoğunda 100-999 µm çapında kesici takım kullanılmaktadır. Mikro kesici takımların küçük shaftları üzerinde stres değişimi konvansiyonel ölçekli takıma göre daha yüksektir ve bu durum takım ömrünü kısaltmaktadır. Kesme şartları doğru seçilmezse, mikro kesici takımlar kısa bir süre sonra kırılacaktır. Bu nedenle kesme şartlarını doğru seçebilmek için optimizasyon yapılması şarttır. Kesme şartlarının doğru seçilmesi mümkün olan en uzun takım ömrünü sağlamaktadır ve işleme operasyonunu ekonomik olarak verimli yapmaktadır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Mikro frezeleme prosesi ile ilgili çok fazla araştırma yapılmasına rağmen farklı kesme şartlarında ve malzemelerde mikro frezeleme prosesini anlamada hala önemli bir boşluk vardır. Bu tezin ana amacı farklı kesici takımların, kesme parametrelerinin

ve takım yollarının farklı mühendislik malzemelerinin mikro frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve çapak boyutu üzerindeki etkisini incelemektir. Böylece bu tezden elde edilen sonuçların mikro frezeleme prosesini anlamada önemli bir boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

Ayrıca bu tezde mikro frezelemede ölçülen takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü, kesme kuvvetlerini ve çapak boyutunu deney yapmadan tahmin edebilmek için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Kesme kuvvetlerini tahmin etmek için mekanistik kuvvet modeli de oluşturulmuştur.

Mikro frezeleme prosesi yüksek hızlı tezgahlara ihtiyaç duymaktadır. Yüksek hızlı tezgahların maliyetinin ise çok fazla olduğu bilinmektedir. Bu nedenle günümüzde endüstriyel kuruluşlar maliyeti düşürebilmek için yüksek hız kafası adı verilen bir ekipmanı tezgah ana miline bağlayarak yüksek devir sayılarına ulaşabilmektedir. Yüksek hız kafaları endüstride kullanılmasına rağmen, bu ekipmanların kullanılması durumunda işleme performansının nasıl etkileneceği bilimsel olarak incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında, aynı devir sayısı hem tezgah ana miline yüksek hız kafası takılarak hem de yüksek hız kafası takılmadan (standart tezgah) elde edilerek performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

Mikro kesicilerde en önemli problem takım ömrünün kısalığıdır. Takım ömrünün kısa olması işleme esnasında daha fazla takım değiştirme ile sonuçlanmaktadır. İşlemeyi durdurup kesici takımı değiştirmek, sadece işleme zamanını artırmaz aynı zamanda işlenen yüzey kalitesini de olumsuz etkilemektedir. Mikro kesici takım değiştirildiği zaman kesicinin hassas sıfırlanamaması da ciddi bir problemdir. Bu nedenle mikro kesici takımın işleme sonuna kadar dayanması istenir. Bu nedenle mikro frezelemede kesme şartları dikkatlice seçilmelidir. Kesme şartları uygun olmadığında takım kırılması kolayca meydana gelebilir. Bu tezde kesme şartlarının uygun seçilebilmesi için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Kesme şartlarının optimize edilmesi takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü, kesme kuvvetlerini ve çapak boyutunu azaltarak işleme operasyonunu ekonomik olarak verimli yapmaktadır.

Mikro parçaların yüzey kalitesinin imalat sonrasında iyileştirilmesinin mümkün olmaması veya çok zor olması nedeniyle parçaların kabul edilebilir yüzey kalitesini işleme esnasında sağlaması gerekmektedir. Bu da ancak işleme şartlarının optimizasyonu ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yüzey

pürüzlülüğünün minimize edilerek yüzey kalitesinin artırılması bu tezin önemini arttırmaktadır.

Bu tezin 2. bölümünde mikro frezeleme prosesi hakkında genel bilgiler ve literatürde yapılan çalışmalar verilmiştir. 3. bölümde deneylerde kullanılan cihazlar ve deney tasarımları sunulmuştur. Deney tasarımları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Al 7075, AISI 304, Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının, ilerlemenin ve talaş derinliğinin takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisini inceleyebilmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini minimize etmek için tekli optimizasyon yapılmıştır. Ölçülen tepkilerin eş zamanlı optimizasyonu için gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Ölçülen tepkileri deney yapmadan tahmin edebilmek için regresyon ve bulanık mantık modelleri geliştirilmiştir.
- Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde küresel uçlu kesici takım çapının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir.
- Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının (aynı yönlü, zıt yönlü ve zigzag frezeleme) takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir.
- Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde standart tezgah kullanılması ve tezgaha yüksek hız kafası takılması durumunda takım yollarının (aynı yönlü, zıt yönlü ve zigzag frezeleme) takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Böylece standart tezgah ile tezgaha yüksek hız kafası takılması arasında performans karşılaştırması yapılmıştır.
- Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde tezgaha yüksek hız kafası takılması durumunda devir sayısının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir.
- Ti6Al4V malzemesinin mikro frezelenmesinde mekanistik kuvvet modeli oluşturulmuştur. Mekanistik kuvvet modeli geliştirmek için deneyler 2 aşamada gerçekleştirilmiştir: Mekanistik kalibrasyon deneyleri ve doğrulama deneyleri. Mekanistik kalibrasyon deneylerinde devir sayısı ve talaş derinliği sabit tutularak

farklı ilerlemelerde mikro kanal frezelemede kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Mekanistik kuvvet modeli için yürütülen kalibrasyon deneylerinde ayrıca kanalların genişliği ve çapak genişliği ölçülerek dış başına ilerlemenin etkisi de incelenmiştir. Doğrulama deneylerinin tasarımında Taguchi metodu kullanılmıştır ve böylece hem kesme kuvveti modellerinin deneysel sonuçlar ile uyumu hem de işleme parametrelerinin kuvvetler, takım aşınması ve çapak genişliği üzerindeki etkisi de incelenebilmiştir.

4. bölümde deneysel sonuçlar sunularak modelleme ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. 5. bölümde ise çalışmanın genel sonuçları özetlenmiştir ve benzer çalışmalara ışık tutmak amacıyla, bu konuda çalışacak araştırmacılara çeşitli öneriler sunulmuştur.

2. MİKRO FREZELEME

Son zamanlarda mikro parçaların üretiminde mikro frezeleme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır, bunun nedenleri çok çeşitli malzemeleri ve karmaşık şekilli parçaları işlemeyi mümkün kılmasıdır. Mikro frezelemede iş parçası malzemesi olarak polimerler [9], alüminyum [10]-[12], bakır [13], pirinç [14], [15], kompozitler [16], NiTi [17] ve çelik [18], [19] gibi pek çok malzeme başarılı bir şekilde işlenebilmiştir. Fakat tahmin edilemeyen takım ömrü nedeniyle sertleştirilmiş çeliklerin mikro frezelenmesi zor bir iştir.

Mikro frezeleme genel olarak makro frezelemenin (geleneksel veya konvansiyonel frezeleme) minyatürleştirilmiş şeklidir, fakat aralarında bazı temel farklar mevcuttur. Mikro ile makro frezeleme arasındaki farklar nedeniyle makro işlemede elde edilmiş bilgi ve deneyimler mikro işlemeye doğrudan uygulanamaz.

Mikro frezelemede kullanılan kesici takımlar konvansiyonel frezelemeye göre minyatürleştirilmiştir (Şekil 2.1). Literatürde 1 mm veya daha küçük çaplı kesiciler mikro kesiciler olarak kabul edilmiştir [5]. Makro kesicilerle karşılaştırıldığında mikro kesiciler daha kolay kırılabilir. Mikro frezeleme prosesinde takımın kesici kenar radyüsünün etkisi dikkate alınmalıdır. Mikro frezelemede diş başına ilerlemenin kesici takım radyüsüne oranı makro frezelemeden daha büyüktür.



Şekil 2.1: Mikro kesici örnekleri.

Mikro frezeleme işlemi yüksek maliyetli ve düşük verimli bir prosesdir. Mikro frezeleme prosesinin yüksek maliyetli olmasının nedeni takım ömrünün kısa olması ve işleme merkezleri ve kullanılan kesici takımların maliyetinin yüksek olmasıdır. Mikro frezelemede düşük verimliliğin nedeni ise düşük talaş kaldırma oranıdır

(MRR) [20]. MRR (mm^3/dak) ilerleme hızının (f , mm/dak), yana kayma mesafesinin (a_e , mm) ve talaş derinliğinin (a_p , mm) oranıdır (eşitlik (2.1)).

$$MRR = f \cdot a_e \cdot a_p \quad (2.1)$$

Mikro frezelemede verimliliği arttırmak için işlem parametreleri optimize edilmeli, kesme kararsızlığı minimize edilmeli, doğru ve verimli takım yolları seçilmelidir [20]. Mikro frezelemede makro frezelemenin aksine işleme parametrelerinin belirlenmesi zor bir iştir ve işleme şartlarını belirlemek için takım üreticilerinin tavsiye ettiği değerler mikro frezelemeye doğrudan uygulanamaz. Eğer alüminyum malzemesinin makro frezelenmesinde tavsiye edilen kesme hızı mikro frezelemeye uygulanırsa, $100 \mu\text{m}$ çapındaki kesici takım için devir sayısı yaklaşık $350000 \text{ dev}/\text{dak}$ olacaktır ve bu deviri elde etmek zordur [15]. Bu nedenle, mikro frezelemede mümkün olan en büyük devir sayısının seçilmesi gerekmektedir [21].

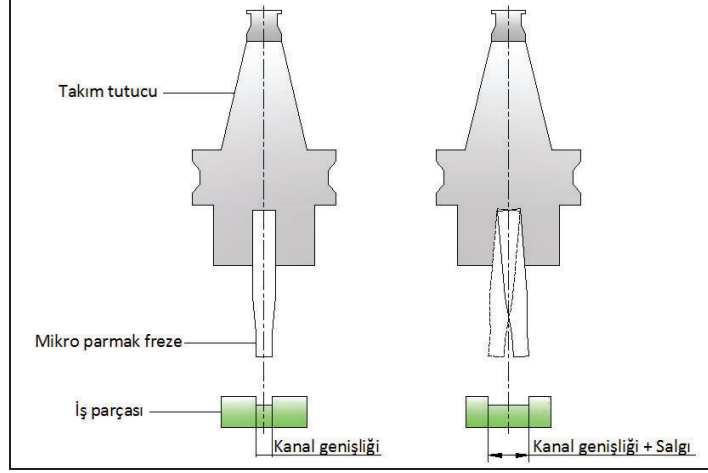
Makro frezelemede operatörler işleme prosesini göz ile izleyebilmektedir, fakat mikro frezelemede küçük ölçüler nedeniyle işlemenin operatörler tarafından izlenmesi mümkün değildir.

Konvansiyonel makro ölçekli işleme ile karşılaştırıldığında mikro işlemede tek bir tane kesilir. Konvansiyonel makro ölçekli işlemede ise pek çok tane kesilir. Mikro işlemede malzeme tane boyutu proses ölçüleri ile küçülmez. Mikro işleme ile makro işleme arasındaki bu belirgin fark nedeniyle makro boyutta iş parçasının homojen olduğu varsayımı mikro boyutta geçerli değildir. Mikro işlemede tane boyutu talaş derinliği/kesici kenar radyüsü ile aynı boyuttadır. Konvansiyonel işlemede iş parçasının homojen ve izotropik olduğu düşünülmektedir. Mikro frezelemede ise iş parçasının heterojen ve anizotropik olduğu düşünülmektedir.

Kesici takım salgısı (run-out) da mikro frezelemede önemli bir sorundur. Konvansiyonel makro ölçekli frezelemede mikrometre boyutlarındaki takım salgısı küçük bir etkiye sahiptir ve çoğu kez ihmal edilir. Mikro frezelemede ise takım salgısının takım çapına oranı konvansiyonel frezelemeden daha büyüktür ve ihmal edilemez. Kesici takım salgısı işlenen parçaların ölçüsünün takım çapından daha fazla olmasına neden olmaktadır (Şekil 2.2).

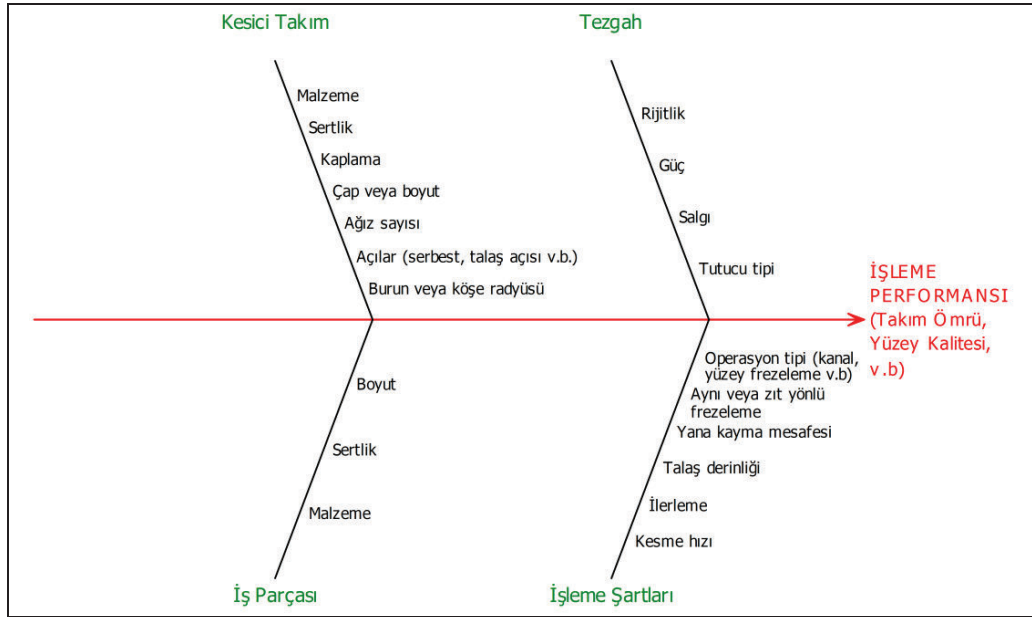
Mikro frezelemede takım ve iş parçası arasında sürtünme meydana gelmektedir. Literatürde küçük talaş derinliğinin ve kesici kenar radyüsünün kesici

takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi arttırdığı ifade edilmiştir [22]. Mikro frezelemede sürtünmeyi azaltmanın yolu kaplamalı takımlar kullanmaktır.



Şekil 2.2: Salgının kanal genişliği üzerindeki etkisi.

Mikro frezelemede işleme performansını etkileyen parametreler Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bu çalışmada mikro frezeleme prosesinde işleme performansını etkileyen parametrelerden kesici takım çapı, iş parçası malzemesi tipi ve işleme şartları (devir sayısı, ilerleme, talaş derinliği, operasyon tipi ve takım yolları) incelenmiştir.



Şekil 2.3: Mikro frezelemede işleme performansını etkileyen parametreler.

2.1. Tezgah

Mikro frezeleme operasyonlarında, takımın kırılğan olması nedeniyle ilerleme çok düşüktür. İlerlemeyi telafi etmek ve işleme zamanını ekonomik olarak verimli yapmak için, mikro frezeleme operasyonları çok yüksek iş mili hızlarını kullanmaktadır. Bu nedenle, mikro frezeleme işlemleri pahalı, yüksek hassasiyetli ve yüksek hızlı tezgahlara ihtiyaç duymaktadır. Yüksek hızlı tezgahların maliyetinin fazla olması nedeniyle konvansiyonel tezgahlara yüksek hız kafası adı verilen tutucular bağlanarak da yüksek devir sayıları elde edilmektedir. Bu hız kafaları maliyeti önemli derecede düşürmektedir, fakat hız kafalarının taşın kısmının uzunluğu fazla olduğu için titreşim yüksek hızlı tezgahlara göre daha yüksek olabilmektedir. Bu nedenle yüksek hız kafaları kullanıldığı zaman, düşük yüzey kalitesi elde edilebilir.

2.2. Kesici Takımlar

Mikro frezeleme prosesinde makro frezelemede olduğu gibi parmak frezeler kullanılmaktadır. Bu parmak frezeler genellikle düz veya küresel uçludur. Küresel uçlu parmak frezeler düz parmak frezelere göre kesici köşe dayanımını arttırmaktadır. Fakat eğik kanalların işlenmesinde, küresel uçlu parmak frezeler yüksek sehime maruz kalmaktadır ve bu da takım ömrünü etkilemektedir [23].

Ticari mikro parmak frezelerin geometrisi makro parmak frezelerden uyarlanmıştır, fakat talaş açısı, boşluk açısı gibi takım geometrisine ait değerler takım imalatı yöntemlerindeki sınırlılıklar nedeniyle doğru şekilde elde edilemez. Mikro kesici takımlar odaklanmış iyon ışını (FIB), tel elektro erozyon ile taşlama (wire electrical discharge grinding, WEDG) ve taşlama gibi yöntemler ile imal edilmektedir. Bütün imalat proseslerinin bazı dezavantajları mevcuttur. Örneğin, taşlama ile imal edilen mikro kesici takımlarda kesici kenar radyüsü ve kesici takımların kalitesi taş tanesi, taşın aşınması ve karbür tane boyutu gibi taşlama taşının özelliklerine bağlıdır. Son dönemlerdeki çalışmalar takım imalat teknolojisini, takım geometrisini, takım malzemesini ve kaplamaları geliştirme ve iyileştirme üzerine odaklanmaktadır.

Mikro parmak freze ankastre kiriş olarak düşünülürse, takımın direngenliği (stiffness) eşitlik (2.2) ile bulunabilir.

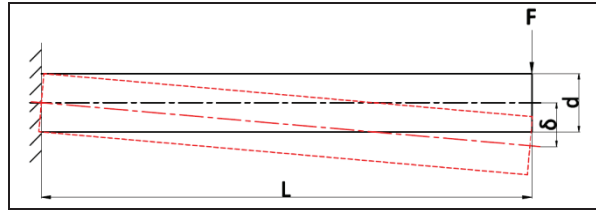
$$k_t = \frac{3EI}{L^3} = \frac{3\pi E d^4}{64 L^3} \quad (2.2)$$

Burada I takımın atalet momenti, E takım malzemesinin elastisite modülü, d takım çapı ve L kesici takımın boyu anlamındadır. Takım çapı yarıya indiğinde parmak frezenin direngenliği 16 kat azalmaktadır.

Mikro kesici takım ankastre bir kiriş [4] olarak düşünülerek (Şekil 2.4) eşitlik (2.3) yardımıyla sehim hesaplanabilir.

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte δ elastik sehimi, F kuvveti, L kesici takımın boyunu ve E kesici takım malzemesinin elastisite modülünü ifade etmektedir.



Şekil 2.4: Elastik sehimin hesaplanması için kiriş modeli.

Eğilme gerilmesi de eşitlik (2.4) ile hesaplanmaktadır [4].

$$\sigma_e = \frac{32FL}{\pi d^3} \quad (2.4)$$

2.2.1. Takım Malzemeleri

Takım malzemeleri takım performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir. En iyi takım malzemesi yüksek sertliği yeterli tokluk ve yüksek sıcaklıkta yeterli kimyasal stabilite ile birleştirme özelliğine sahip malzemedir. Fakat tüm

özellikleri aynı anda sağlayan takım malzemesi yoktur. Mikro takımları imal etmede yüksek hız çeliği, karbür, seramikler, kübik bor nitrür (CBN) ve elmas kullanılabilir. Takım malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırılması ve kullanılabilirdikleri iş parçası malzemeleri sırasıyla Tablo 2.1’de ve Tablo 2.2’de özetlenmiştir [19]. Bu takım malzemeleri arasında elmas takımlar iyi mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Fakat yüksek fiyatı, kırılma eğilimi ve demir türü malzemeler ile kimyasal afiniteye girmesi elmas malzemelerin kullanımını kısıtlamaktadır.

Tablo 2.1: Tipik takım malzemelerinin karşılaştırılması (D: düşük, Y: yüksek).

	Kızıl Sertlik	Tokluk	Aşınma Direnci	Isıl Şok Direnci	Kesme Hızı	Malzeme Fiyatı
Yüksek Hız Çeliği	D	Y	D	Y	D	D
Karbür	↓	↑	↓	↑	↓	↓
Seramikler	↓	↑	↓	↑	↓	↓
CBN	↓	↑	↓	↑	↓	↓
Elmas	Y	D	Y	D	Y	Y

Tablo 2.2: Tipik takım malzemeleri ve kullanılacakları iş parçası malzemeleri.

	Yumuşak Demir Dışı	Dökme Demir	Karbon ve Düşük Alaşımli Çelikler	Sertleştirilmiş Çelikler	Nikel Alaşımli	Titanyum Alaşımli
Yüksek Hız Çeliği	√	×	+	×	×	×
Karbür	√	√	√	+	√	+
Seramikler	×	√	√	+	√	×
CBN	×	+	×	√	+	+
Elmas	√	×	×	×	×	√

(√: İyi, +: Uygun, ×: Kullanılmamalı)

Tungsten karbür-kobalt (WC-Co) malzemesi uygun mekanik özellikleri nedeniyle mikro parmak frezelerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2.2. Takım Kaplamaları

Makro ölçekli frezelemede uygun fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle kaplanmış kaplamalı takımlar işleme performansını arttırmaktadır. Mikro takımlara kaplama yapmak ise zordur, fakat mikro takımlara yapılan kaplamalar takım ömrünü arttırabilir ve kesme performansını geliştirebilir. Mikro parmak frezelerde elmas

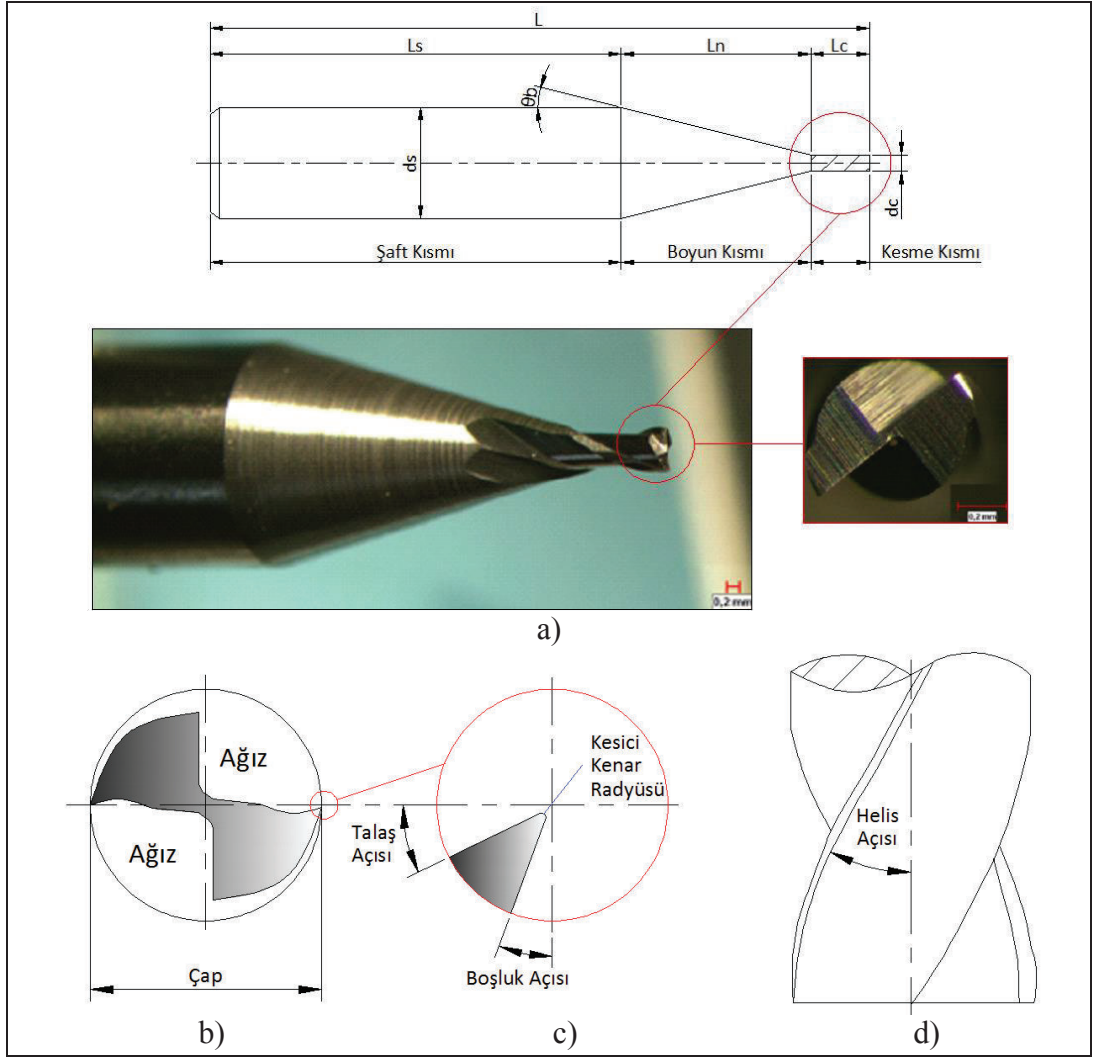
kaplamalar iş parçası malzemesinin takım yüzeyine yapışmasını elimine ederek kanal tıkanmasını azaltır, yüksek sertliğinden dolayı takım aşınma hızını azaltır ve pek çok malzemeye karşı düşük sürtünme katsayısı nedeni ile kesme kuvvetlerinin büyüklüğünü azaltır. Makro ölçekli kesici takımlarda halihazırda kullanılan konvansiyonel çok kristalli elmas kaplamalar kesici kenar radyüsünü arttırdığı için mikro takımlar için çok kalındır (2-100 μm). Kaplamasız takımlar için var olan kesici kenar radyüsü arzu edilenden daha geniş olduğundan ince kaplamalara ihtiyaç vardır ve kesici kenar radyüsünde ileri bir artış takım performansını negatif olarak etkileyecektir [24], [25]. Literatürde elmas kaplanmış mikro kesici takımların performansının incelendiği çalışmalar mevcuttur [26]-[29].

Genellikle literatürde kesme testlerinde TiAlN kaplamalı mikro parmak frezeler kullanılmıştır [7], [30]. Ayrıca mikro frezeleme ile ilgili çalışmalarda TiN [7], TiCN [7], CrN [7], [31], Cr-Si-N [31], [32], Cr-C-N [32], Cr-Si-C-N [32], CrTiAlN [7], [33], AlCrTiN [34], CrN/TiN [35], AlTiN/TiN [35] kaplamalı kesici takımlar da kullanılmıştır.

2.2.3. Takım Geometrisi

Mikro kesici takımların geometrisi genellikle makro kesici takımlardan adapte edilmiştir ve mikro kesiciler makro kesicilerinin boyutlarının küçültülmüş versiyonudur. Tipik bir mikro parmak freze geometrisinin şematik gösterimi Şekil 2.5'de verilmiştir [36]. Tipik bir ticari mikro parmak freze 3 ana kısımdan oluşmaktadır: shaft kısmı, boyun kısmı ve kesme kısmı. Shaft kısmı kesici takımı takım tutucuya bağlamaktadır. Kesme kısmı kesici kenarları içermektedir. Boyun kısmının rolü kesme kısmını shaft kısmı ile bağlamaktır.

Günümüz imalat teknolojisi ile keskin kenarlı mikro parmak frezeler üretilmemektedir. Mevcut mikro kesici takımlar 1 ila 5 μm arasında kenar radyüsüne sahiptir. Mikro kesici takımların talaş açısı 0° veya 0° 'den küçüktür. Helis açısı takım direngenliğini ve talaş tahliyesini etkilediği için, uygun helis açısının seçimi mikro kesici takımların tasarımında önemli bir parametredir.



Şekil 2.5: Takım geometrisi. a) Mikro kesici takım geometrisinin (L : Takım uzunluğu, L_s : Şaft uzunluğu, L_n : Boyun uzunluğu, L_c : Kesme uzunluğu, d_s : Şaft çapı, d_c : Kesme çapı, θ_b : Boyun açısı), b) İki ağızlı parmak frezenin kesit alanının, c) Kesme kenarının büyütülmüş görüntüsünün, d) Parmak frezenin yan görüntüsünün şematik gösterimi.

2.3. İş Parçası Malzemesi ve Mikro Yapı

Mikro frezelemede geleneksel frezeleme ile karşılaştırıldığında talaş kaldırma geometrisi değişmektedir ve özellikle sert iş parçası malzemelerinde daha yüksek takım sehim, yüksek takım aşınması ve yüksek takım kırılma riski gözlenmektedir.

Mikro ölçekli işlemede bir diğer önemli faktör de iş parçası mikro yapısıdır. Makro işlemede iş parçasının homojen olduğu varsayımı mikro işleme için geçerli değildir.

2.4. Mikro Frezeleme Mekaniki

Talaş kaldırma işleminin makro ölçekten mikro ölçeye küçültüldüğü zaman, prosesin geometrisi ve dinamiği değişmektedir. Bu nedenle bu bölümde mikro frezeleme prosesinin mekaniki incelenmiştir.

2.4.1. Mikro Kesme Mekanizması

Mikro frezeleme konvansiyonel makro frezelemenin yalnızca küçültülmüş versiyonu değildir, aynı zamanda boyut etkisi, talaş oluşumu, minimum talaş kalınlığı, kesici kenar radyüsünün etkisi ve iş parçası mikro yapısının etkisi gibi bazı ayırt edici özelliklere sahiptir. Makro frezelemede ihmal edilen bazı faktörler (sehim, iş parçası mikro yapısı, kesici takım kenar radyüsü v.b.) mikro frezelemede önemli hale gelmektedir.

Makro frezelemede, diş başına ilerleme kesici takım kenar radyüsünden daha büyüktür ve keskin takımın elastik toparlanma veya kazıma olmadan talaş kaldırdığı yaklaşımı geçerlidir. Fakat mikro frezelemede, çok küçük kesici takım kenar radyüsü ve ilerleme nedeniyle bu yaklaşım geçerli değildir. Mikro frezelemede kesici takım kenar radyüsünün talaş kalınlığı ile karşılaştırılabilir boyutta olması nedeniyle daha büyük negatif talaş açısı meydana gelmektedir. Bu negatif talaş açısı elastik toparlanmaya ve kazımaya neden olmaktadır.

2.4.2. Boyut Etkisi (Size Effect)

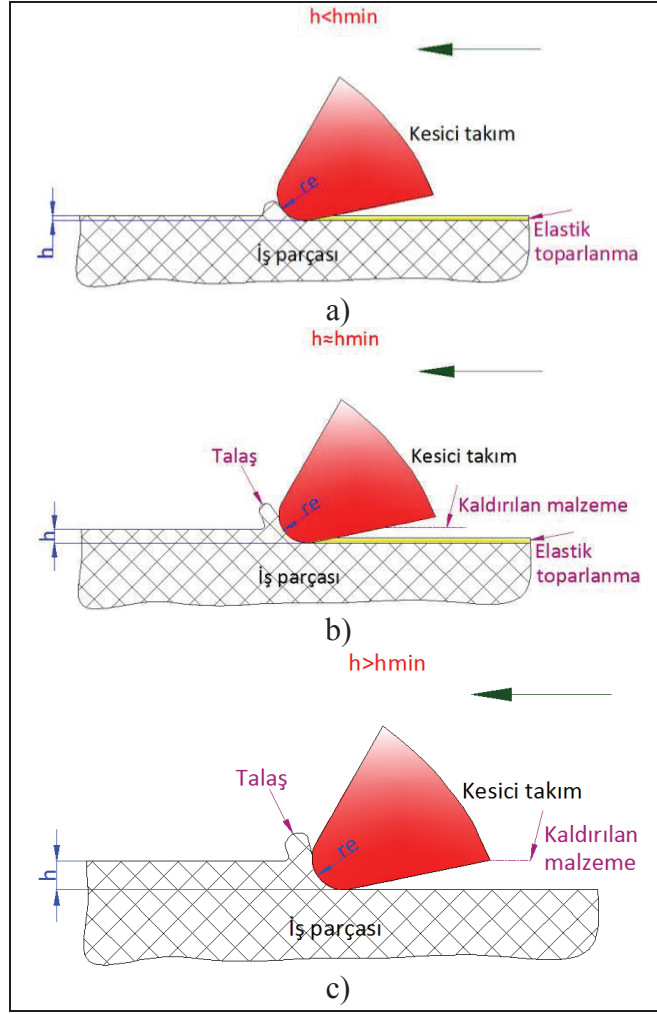
Spesifik enerjinin azalan teorik talaş kalınlığı (deforme olmamış talaş kalınlığı) ile artması, mikro frezelemede “boyut etkisi” olarak bilinmektedir. Boyut etkisi spesifik kesme enerjisinin (veya spesifik kesme kuvvetinin) azalan deforme olmamış talaş kalınlığı ile lineer olmayan artışıdır. Spesifik kesme enerjisi birim miktarda malzemeyi kaldırmak için ihtiyaç duyulan çaba miktarını ölçmek için kullanılmaktadır. Daha yüksek spesifik kesme enerjisi tüketimi küçük miktarda malzemeyi kaldırmada malzemenin işlenebilirliğinin beklenenden daha zor olduğu anlamına gelmektedir [18].

Boyut etkisi deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranı birden (unity) daha az olduğu zaman önemli olmaktadır [37].

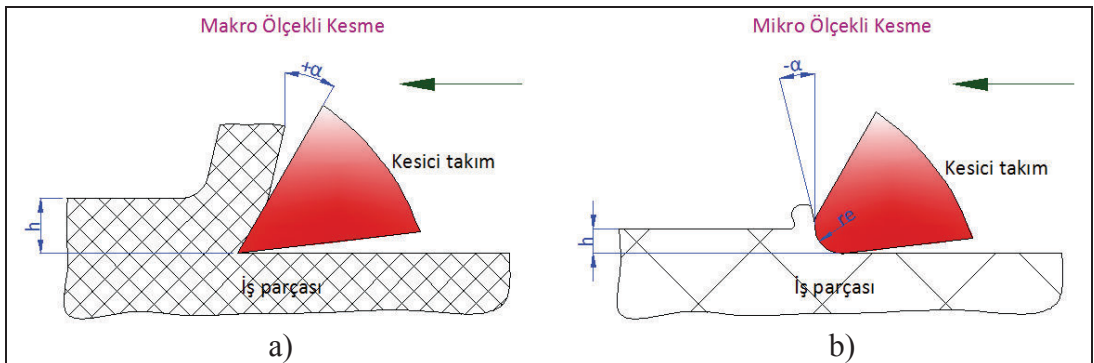
2.4.3. Talaş Oluşumu ve Minimum Talaş Kalınlığı

Mikro işleme pek çok bakımdan makro işlemeden farklıdır. Makro işlemede, diş başına ilerleme genellikle takım kenar radyüsünden daha büyüktür ve kesme modelleri keskin takımın parça yüzeyini herhangi bir elastik toparlanma veya kazıma (ploughing) olmadan tamamen kaldırması yaklaşımına dayanmaktadır. Mikro işlemede, takımın küçük kenar radyüsü ve çok düşük ilerlemeler nedeniyle bu yaklaşım geçerli değildir [38]. Mikro frezelemede, parmak frezenin kesici kenar radyüsü talaş kalınlığı ile karşılaştırılabilir boyuttadır. Deforme olmamış talaş kalınlığı “minimum talaş kalınlığı” olarak adlandırılan kritik bir değer altında olduğu zaman talaş oluşmaz [39]. Mikro frezelemede talaş oluşumu minimum talaş kalınlığı tarafından kontrol edilmektedir. Kim ve arkadaşları [40] diş başına ilerleme kesici kenar radyüsünden küçük olduğunda talaş oluşmayacağını bildirmiştir. Bu bağlamda Chae ve arkadaşları [4] Şekil 2.6’da [37] gösterildiği gibi mikro işlemin temel mekanizmasını önermiştir. Şekil 2.6.a’da gösterildiği gibi deforme olmamış talaş kalınlığı (h) minimum talaş kalınlığından (h_{min}) daha küçük olduğunda malzeme kesici takım tarafından bastırılacaktır. Malzeme takımın altında bir kuvvetle karşılamak ve daha sonra takım geçtikten sonra yeniden toparlanacaktır (elastik deformasyon). Deforme olmamış talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığına eşit olduğunda (Şekil 2.6.b) talaş oluşmaya başlar. Ancak kaldırılan malzeme arzu edilen değerden (deforme olmamış talaş kalınlığı) daha küçüktür. Talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından daha büyük ise (Şekil 2.6.c), malzeme kaldırılır ve talaş oluşur [37].

Mikro kesmede makro kesmenin aksine (Şekil 2.7.a) deforme olmamış talaş kalınlığı kesici kenar radyüsü [3], [7], [41] ve iş parçası tane boyutu (Şekil 2.7.b) ile karşılaştırılabilir boyuttadır. Deforme olmamış talaş kalınlığı (h) kesici kenar radyüsünden (r_e) daha küçük olduğunda, negatif talaş açısı ($-\alpha$) kazıma etkisini arttırmaktadır [3], [7]. Kesme esnasındaki kuvvet dağılımı ve enerji değişmektedir. Böylelikle mikro işlemede deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranının en önemli kontrol parametresi olduğu söylenebilir [3], [7].



Şekil 2.6: Mikro ölçekli işlemede talaş oluşumu. a) $h < h_{min}$, b) $h \sim h_{min}$, c) $h > h_{min}$ (re: Kesici takım radyüsü, h: Deforme olmamış talaş kalınlığı, h_{min} : Minimum talaş kalınlığı).



Şekil 2.7: Kesme geometrisi. a) Makro ölçekli, b) Mikro ölçekli kesmede geometri (re: Kesici takım radyüsü, h: Deforme olmamış talaş kalınlığı, α: Talaş açısı).

Deforme olmamış talaş kalınlığı azaldığı zaman, takımın etkili talaş açısı daha çok negatif olmaktadır. Etkili talaş açısı eşitlik (2.5) ile hesaplanabilir.

$$\gamma_e = -\sin^{-1}\left(\frac{2r_e - h}{2r_e}\right) \quad (2.5)$$

Bu formülde r_e takımın kenar radyüsünü ve h deforme olmamış talaş kalınlığını ifade etmektedir. Çok düşük diş başına ilerlemelerde negatif talaş açısı çok daha yüksek olabilir (yaklaşık -90°) ve bu durumda talaş oluşmayabilir.

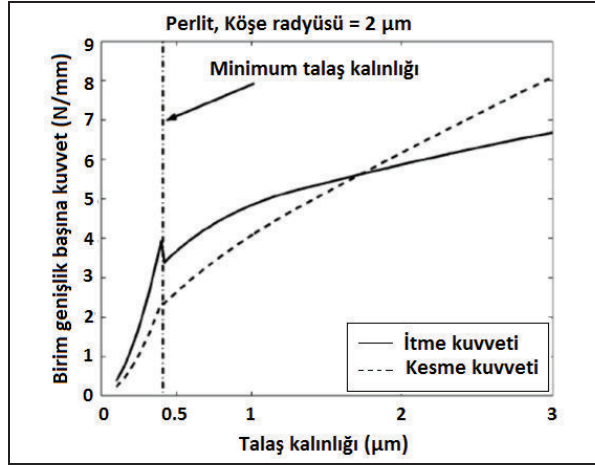
Mikro frezelemede talaş kalınlığı kesici kenar radyüsü oranının düşüklüğü nedeniyle yüksek takım sehimleri, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve yüksek çapak (burr) gözlenmektedir. Proses performansında iyileşme elde edebilmek için bu oranın artırılması gerekmektedir. Bunun en iyi yolu kesici kenar radyüsünü azaltmaktır, fakat günümüzdeki imalat metotları ile kesici malzemelerinde kesici kenar radyüsünü azaltmak pek mümkün değildir. Bunun yerine diş başına ilerlemeyi arttırarak talaş kalınlığını arttırmak mümkündür. Bu çözüm daha büyük talaş kesit alanı anlamına gelmektedir. Bu yöntemin çapak oluşumunu azaltmada ve yüzey kalitesini arttırmada faydalı olduğu açıkça belirtilmişken, kesme kuvvetleri ve böylece takım sehimleri üzerindeki etkisinin açık olmadığı belirtilmiştir [42].

Mikro frezeleme işleminde takım kenar radyüsü ve diş başına ilerleme benzer ölçekte olmaktadır. Bu yüzden mikro işlemede kazıma kolaylıkla meydana gelebilir ve önemli bir konu haline gelmektedir. Kazıma meydana geldiğinde malzeme elastik veya plastik olarak deforme olur, fakat talaş oluşmaz. Bu nedenle kazıma düşük yüzey kalitesi [43] ve takım ömründe azalma [44] ile sonuçlanmaktadır. Bu negatif sonuçlarından dolayı mikro frezelemede kazıma etkisinden kaçınılmalıdır. Kazıma minimum talaş kalınlığı ile belirlenebilir. Deforme olmamış talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından daha az olduğu zaman kazımanın meydana geldiği söylenebilir. Deforme olmamış talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından daha büyük olduğu zaman kayma etkisiyle talaş oluşumu başlamaktadır. Bu nedenle kazımadan kaçınmak için diş başına ilerleme minimum talaş kalınlığından daha yüksek olmak zorundadır. Mikro işlemede kazıma etkisinden kaçınmak veya etkisini minimize etmek için minimum talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranının belirlenmesi gereklidir. Bu oran talaş açısını, talaş kalınlığını ve spesifik kesme enerjisini etkilemektedir ve bu oran 1'e eşit veya 1'den büyük olduğunda etkili talaş açısı negatif olur. Literatürde kazımayı tespit edebilmek için bazı girişimlerde bulunulduğu görülmüştür. Yun ve arkadaşları [45] mikro frezelemede kesme kuvvetleri sinyallerine dayanan kazıma belirleme metodu geliştirmişlerdir. Bu metot

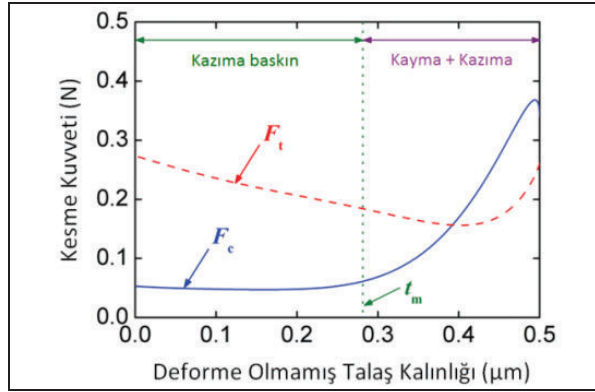
kesme kuvveti pik değerlerindeki değişimi kullanmaktadır. Diş başına ilerleme arttıkça, pik değişiminin azaldığı görülmüştür. Bakır malzemesinin mikro frezelenmesinde diş başına ilerlemenin 0.8 μm 'den daha küçük olduğu değerlerde kazımanın meydana geldiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca kazımanın ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Diş başına ilerleme 4 μm 'den 0.8 μm 'ye azaldığında, Ra değeri 26 nm'den 13 nm'ye azalmıştır. Fakat diş başına ilerleme değeri 0.8 μm 'den daha küçük olduğu zaman Ra değeri tekrar artmıştır.

Talaş derinliği minimum talaş kalınlığından daha az olduğunda talaş oluşmayacağı için minimum talaş kalınlığını bulmak gerekmektedir. Mikro frezelemede talaş oluşumu minimum talaş kalınlığına bağlı olduğu için minimum talaş kalınlığının belirlenmesi gerekmektedir ve yapılan literatür taraması sonucunda minimum talaş kalınlığının özellikle kesici takım kenar radyüsüne ve iş parçası malzemesine bağlı olduğu bulunmuştur. Literatürde minimum talaş kalınlığı deneysel olarak, analitik model ve simülasyon teknikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Liu ve arkadaşları [3] itme kuvvetindeki ani değişimin minimum talaş kalınlığını belirlemede kullanılabileceğini göstermiştir (Şekil 2.8).

Kang ve arkadaşları [46] AISI 1045 çeliğinin 1 mm çapındaki kesici takım kullanılarak mikro frezelenmesinde kesme kuvveti davranışını incelemiştir. Normal yöndeki kesme kuvvetlerinin ilerleme yönündeki kesme kuvvetlerinden daha büyük olduğu bulunmuştur. Düşük diş başına ilerlemelerde, normal ve ilerleme yönündeki kesme kuvvetleri arasındaki farkın küçük olduğu görülmüştür. Diş başına ilerleme arttıkça kesme kuvvetleri artmıştır, fakat eksenel talaş derinliğinin kesme kuvveti üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu bulunmuştur. Minimum talaş kalınlığı kesme kuvveti davranışı incelenerek deneysel olarak belirlenmiştir. Minimum talaş kalınlığı ana kesme kuvvetinin sabit kaldığı deforme olmamış talaş kalınlığının altındaki değer olarak alınmıştır (Şekil 2.9). Buna göre minimum talaş kalınlığı $0.3 \times$ kenar radyüsü (0.28 μm) olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada spesifik enerjinin artan diş başına ilerleme ile azaldığı bulunmuştur.



Şekil 2.8: Perlit için talaş yükü ve kuvvet ilişkisi.



Şekil 2.9: Deforme olmamış talaş kalınlığı - kesme kuvveti grafiği.

Weule ve arkadaşları [39] minimum talaş kalınlığı üzerindeki baskın faktörün kesici takımın keskinliği olduğunu belirtmişlerdir ve bu oran 0.293 olarak hesaplanmıştır. Kim ve arkadaşları [40] minimum talaş kalınlığının kesici kenar radyüsünün %30'u olmasını önermiştir. Liu ve arkadaşları [47] minimum talaş kalınlığını hesaplamak için analitik bir model tanımlamıştır. Bu çalışma minimum talaş kalınlığının sadece diş başına ilerleme ve kenar radyüsü ile ilişkili olduğunu değil, malzeme özellikleri ve kesme hızı ile de ilişkili olduğunu göstermiştir. Al6082-T6 alüminyumun mikro frezelenmesinde minimum talaş kalınlığının kenar radyüsüne oranı %35-40, AISI 1018 çeliği için %20-30 olarak bulunmuştur [47]. Lai ve arkadaşları [48] bakır iş parçasının minimum talaş kalınlığını takım kenar şeklini, iş parçası sertleşmesini ve iş parçası kırılmasını dikkate alarak sonlu elemanlar analizi kullanarak hesaplamıştır. Sonuçlar minimum talaş kalınlığının takım kenar radyüsünün dörtte birine eşit olduğunu göstermiştir ve spesifik kayma enerjisi

kazıma boyunca artmıştır [48]. Son ve arkadaşları [49] bakır, alüminyum ve pirinç için minimum talaş kalınlığını sırasıyla 0.1, 0.12 ve 0.09 μm olarak hesaplamıştır. Bu araştırmacılar minimum talaş kalınlığını analitik olarak formüle etmiştir (eşitlik (2.6)) ve minimum talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne ve iş parçası ile takım arasındaki sürtünme katsayısına bağlı olduğunu belirlemiştir. Bazı araştırmacılar mikroyapı, sertlik ve faz gibi iş parçası malzemesi tipinin minimum talaş kalınlığı üzerinde etkisi olduğunu ifade etmişlerdir [39], [40], [43], [49].

$$h_{min} = r_e \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \right) \quad (2.6)$$

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_s^2}} \quad (2.7)$$

Bu eşitliklerde r_e kesici takımın kenar radyüsüdür, μ_s sürtünme katsayısıdır ve β kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünme açısıdır (*Sürtünme kuvveti/Normal kuvvet*= F_u/F_v).

Wang ve arkadaşları [50] Al6061-T6 alaşımının mikro frezelenmesinde talaş oluşum mekanizmasını incelemek için sonlu elemanlar modelini kurmuşlardır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda talaşın kesikli tip talaş olduğu bulunmuştur ve bu durum deneysel olarak da doğrulanmıştır. Ayrıca bu araştırmacılar sonlu elemanlar analizi ile minimum talaş kalınlığını yaklaşık 0.268 μm olarak bulmuşlardır [50].

Ku ve arkadaşları [51] AISI 1045 çeliğinin 1 μm kesici kenar radyüsüne sahip 200 μm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde talaşın oluştuğu dış başına ilerlemeyi belirlemek için sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Minimum dış başına ilerleme oluşan talaşın şeklini, kesme kuvvetleri davranışını ve gerilme dağılımını analiz ederek belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarından, 0.8 μm dış başına ilerlemede talaşın oluştuğu, 0.2 μm dış başına ilerlemede talaşın oluşmadığı görülmüştür. Simülasyon sonuçları kesme kuvveti sinyallerini ve işlenen yüzeyin durumunu gözlemleyerek deneysel olarak doğrulanmıştır. 0.8 μm dış başına ilerlemede, kesme kuvveti sinyallerinin şeklinin konvansiyonel frezeleme prosesindeki durum ile benzer olduğu ve sinyallerin periyodik ve stabil olduğu bulunmuştur. 0.2 μm dış başına ilerlemede, kesme kuvveti sinyallerinin şekli düzenli olarak değişmemiştir. 0.8 μm dış başına ilerlemede, işlenen yüzeyin düzgün olduğu

görülmüştür. Fakat 0.2 μm diş başına ilerlemede, işlenen yüzeyin kötü durumda olduğu ve çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, stabil işlemenin olduğu minimum diş başına ilerleme değeri kesici kenar radyüsünün %80'i olarak bulunmuştur [51]. Mian ve arkadaşları [52] bakır (OFHC), Al 6082, AISI 1005 çeliği, AISI 1045 çeliği, Inconel 718 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro frezelenmesinde minimum talaş kalınlığını akustik emisyon (AE) sinyallerini kullanarak belirlemişlerdir. Hesaplanan minimum talaş kalınlıkları Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3: AE sinyallerinden hesaplanan minimum talaş kalınlıkları.

	Bakır	Al 6082	AISI 1005 çeliği	AISI 1045 çeliği	Ti6Al4V	Inconel 718
Hesaplanan h_{\min} (μm)	0.06-0.1	0.1-0.16	0.2-0.23	0.07-0.13	0.08-0.1	0.1-0.17
h_{\min}/r_e (%)	11.2-18	23-38.9	31.3-42	19.7-35.5	19-27.5	18.5-25.5

Al6082-T6 malzemesinin mikro frezelenmesinde minimum talaş kalınlığı kenar radyüsünün yaklaşık 0.23'ü olarak belirlenmiştir [53]. Mian ve arkadaşları [54] mikro frezelemede deforme olmamış talaş kalınlığının, takım kenar radyüsünün ve iş parçası tane boyutunun spesifik kesme kuvveti, çapak boyutu, yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneyleerde 800 μm çapında kesici takım kullanılmıştır. İş parçası malzemesi olarak ortalama tane boyutu 10 μm olan AISI 1045 çeliği kullanılmıştır. Deneyleer sonucunda yüzey pürüzlülüğünün tane boyutundan önemli derecede düşük olduğu görülmüştür. Deforme olmamış talaş kalınlığının en düşük değerinde (≤ 0.2 $\mu\text{m}/\text{diş}$) yüksek yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Hem aynı yönlü hem de zıt yönlü frezelemede talaş yükü azaldıkça çapak boyutu artmıştır. Yüksek talaş yüklerinde çapak boyutu hemen hemen sabit kalmıştır. Boyut etkisi nedeniyle düşük deforme olmamış talaş kalınlıklarında spesifik kesme kuvvetinin önemli derecede arttığı bulunmuştur. Kenar radyüsünden daha düşük deforme olmamış talaş kalınlıklarında aşırı kaplama ayrılması (delamination) gözlemlenmiştir. Ayrıca en düşük deforme olmamış talaş kalınlığında sürtünme (attrition) tipi takım aşınması ve yerel dökülme (çentiklenme, chipping) gözlemlenmiştir. Serbest yüzey aşınması artan deforme olmamış talaş kalınlığı ile azalmıştır.

AISI 1045 çeliğinin mikro frezelenmesinde minimum talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranının %25 ve %40 arasında olduğu bulunmuştur [55]. Literatürde bulunan minimum talaş kalınlığı değerlerinin özeti Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Tablo 2.4: Literatürde bulunan minimum talaş kalınlığı değerleri.

Araştırmacılar	İş Parçası Malzemesi	Kesici Takım Malzemesi ve Geometrik Özellikleri	Kesici Takım Çapı (μm)	Kesici Takım Kenar Radyüsü, r_c (μm)	Hesaplanmış Minimum Talaş Kalınlığı, h_{\min} (r_c 'nin %si olarak)
Kim ve arkadaşları [40]	Pirinç	Karbür, Helis Açısı: 30° , Talaş Açısı: 13°	635	3	%22-25
Vogler ve arkadaşları [43]	Ferit	Bilgi yok.	508	2-5	%29-43
	Perlit				%14-25
Kang ve arkadaşları [46]	AISI 1045 çeliği	Karbür, geometrik özellikler hakkında bilgi yok.	200	0.93	%30
Liu ve arkadaşları [47]	Al 6082-T6	Takım malzemesi hakkında bilgi yok, Helis Açısı: 10° , Boşluk Açısı: 10°	508	1-4	%38-40
	1040 karbon çeliği				%24-35
Lai ve arkadaşları [48]	Bakır (OFCH)	Karbür, Talaş Açısı: 10°	100	2	%25
Mian ve arkadaşları [52]	Bakır (OFCH)	Takım malzemesi hakkında bilgi yok, Helis Açısı: 0°	2000	0.40	%11.2-18
	Al 6082			0.44	%23-38.9
	AISI 1005 çeliği			0.67	%31.3-42
	AISI 1045 çeliği			0.84	%19.7-35.5
	Ti6Al4V			0.33	%19-27.5
	Inconel 718			0.55	%18.5-25.5

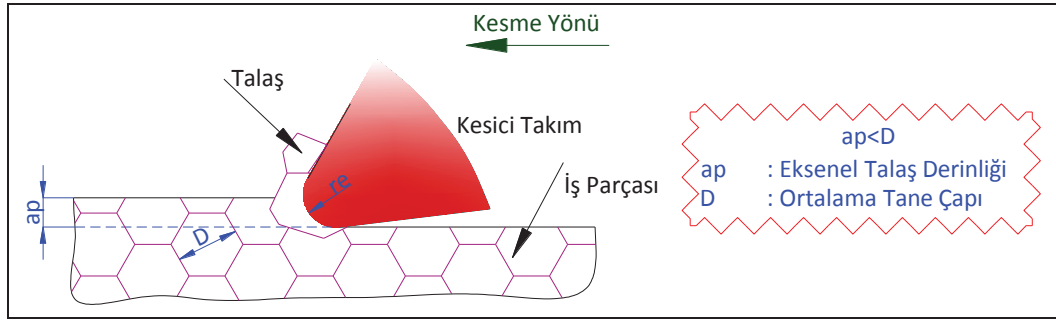
2.4.4. Kesici Kenar Radyüsünün Etkisi

Makro frezelemede deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranı yüksek olduğu için kesici kenar radyüsü ihmal edilebilir ve kesici takımın keskin olduğu varsayılabilir. Ayrıca makro frezelemede etkili talaş açısı pozitif olmaktadır. Mikro frezeleme işleminde takım çapı çok küçük olduğu için elastik deformasyon meydana gelmektedir. Takım çapı azaldıkça takımın dayanımı da

azalmaktadır. Bu nedenle diş başına ilerleme takım sehiminden veya kırılmasından kaçınmak için yeterince küçük olmalıdır. Fakat takım kenar radyüsü takım çapı ile aynı oranda azalmaz ve takım kenar radyüsü ve diş başına ilerleme benzer ölçekte olmaktadır. Bu yüzden mikro işlemede kazıma kolaylıkla meydana gelebilir ve önemli bir konu haline gelmektedir. Mikro frezelemede kesici kenar radyüsü ihmal edilemez ve kesici takımın keskin olduğu varsayılmaz. Ayrıca mikro frezelemede etkili talaş açısı negatif olmaktadır. Mikro frezelemede kesici takımın yüksek negatif talaş açısı ve keskin olmaması spesifik kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır.

2.4.5. İş Parçası Mikro Yapısının Etkisi

Mikro işlemede makro işlemin aksine talaş oluşumu iş parçası malzemesinin birkaç veya tek tanesinde meydana gelmektedir (Şekil 2.10). Mikro işlemede iş parçası malzemesi mikro yapısının homojen olduğu yaklaşımı geçerli değildir. Mikro frezelemede kesme performansı iş parçası mikro yapısına makro frezelemeden daha fazla bağlıdır.



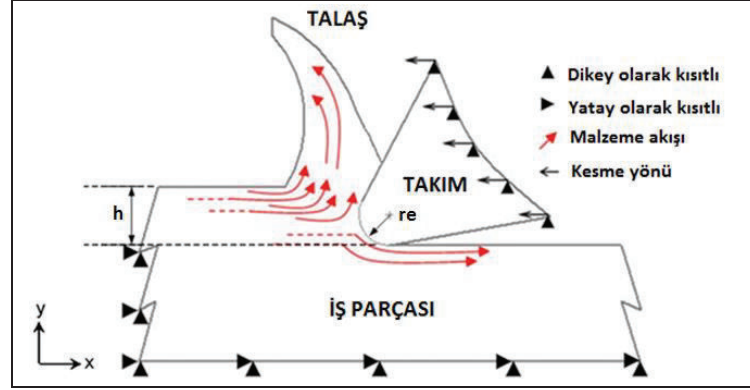
Şekil 2.10: Mikro frezelemede tane boyutu.

2.5. Modelleme

Mikro frezeleme operasyonunun modellenmesi sonlu elemanlar metodu (finite element method, FEM), analitik ve mekanistik metotlar kullanılarak yapılmıştır.

2.5.1. Sonlu Elemanlar Analizi

Literatürde mikro işlemede talaş oluşum mekanizması (Şekil 2.11) ve ilgili gerilme durumları sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. İş parçası malzemesi homojen olarak farz edilmiştir ve akış davranışı Johnson-Cook (JC) modeli ile incelenmiştir [56].



Şekil 2.11: Sonlu elemanlar kesme modelinin sınır şartları (h: Deforme olmamış talaş kalınlığı, re: kesici kenar radyüsü).

JC modelinin matematiksel gösterimi eşitlik (2.8)'de verildiği gibidir:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C_g \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left(1 - \left[\frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)} \right]^m \right) \quad (2.8)$$

Burada ε eşdeğer plastik gerinimi, $\dot{\varepsilon}$ gerinim hızını, $\dot{\varepsilon}_0$ referans gerinim hızını, A akma dayanımını, B sertleşme modülünü, n sertleşme katsayısını, C_g gerinim hızı sabitini, T iş parçası sıcaklığını, T_m erime sıcaklığını, T_r oda sıcaklığını ve m termal yumuşama katsayısını göstermektedir.

2.5.2. Mekanistik Modelleme

Mikro frezelemede kesme kuvvetlerini önceden tespit edebilmek için, bazı matematiksel modeller (mekanistik veya analitik) geliştirilmiştir [41], [57]-[79]. Vogler ve arkadaşları [41] heterojen malzemeler için mekanistik kuvvet modelini sunmuştur. Ayrıca Vogler ve arkadaşları [57] mikro frezeleme kuvvet modelinde

minimum talaş kalınlığının etkisini inceleyen ilk araştırmacılarıdır. Kang ve arkadaşları [60] serbest yüzeyde takım-iş parçası temasını dikkate alan kesme kuvvetlerini tahmin etmek için mikro frezelemenin analitik mekanik modelini geliştirmiştir. Malekian ve arkadaşları [64] kazımayı, elastik toparlanmayı, salgıyı ve dinamiği dikkate alan mikro frezeleme kuvvetlerinin mekanik modellemesini araştırmıştır. Piotrowska-Kurczewski ve Vehmeyer [65] kesme kuvvetini tahmin etmek için dinamik bir model sunmuştur. Geliştirilen model adi diferansiyel denklem sistemleri ile tanımlanmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda yüzey oluşum modeli kurulmuştur ve bu model tatmin edici sonuçlar vermiştir. Wang ve arkadaşları [66] mikro frezelemede minimum talaş kalınlığını ve talaş açısını dikkate alan kesme kuvveti modeli geliştirmiştir. Takım kenar radyüsünün kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir [67], [68]. Bissacco ve arkadaşları [67] kesici kenar radyüsünün boyut etkisini, takım salgısını ve talaş akış açısının eğim açısından sapmasını dikkate alan kesme kuvveti modelleri geliştirmiştir.

Lee ve arkadaşları [63] Al6061-T6 malzemesinin 508 µm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde kuvvetleri tahmin edebilmek için kısmi (partial) talaş açısının etkisini dikkate alan mekanistik kuvvet modelini sunmuşlardır. Tahmin edilen kuvvet değerlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Uriarte ve arkadaşları [69] konvansiyonel mekanistik kuvvet modelinin H13 sertleştirilmiş çeliğin (60 HRC) mikro frezelenmesinde uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Deney ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Ko ve Heisel [71] bakır malzemesinin 0.6 mm çapındaki küresel kesici takım ile mikro frezelenmesinde ve Araujo ve arkadaşları [72] Al 6351 T6 malzemesinin mikro frezelenmesinde kuvvetleri tahmin etmek için mekanistik kuvvet modelini kullanmışlardır. Kang ve Zheng [73] 500 µm çapındaki kesici takım ile Al6061-T6 malzemesinin mikro frezeleme prosesi için kayma ve kazıma mekanizmasını içeren Fourier kuvvet modelini sunmuşlardır. Mikro frezelemede talaş kalınlığı için yeni bir model geliştirmişlerdir. Srinivasa ve Shunmugam [74] yumuşak çeliğin 0.5 mm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde mekanistik kuvvet modelini kullanmışlardır. Bu araştırmacılar kesme katsayılarını tahmin etmek için kenar radyüsü ve malzeme güçlendirici (strengthening) etkilerini dikkate alan yeni bir metodoloji sunmuşlardır.

2.5.3. Analitik Modelleme

Analitik kuvvet modelleri bazı geometrik özellikler ve ampirik olarak elde edilmiş veriler ile kesme kuvvetleri arasında bağlantı kurmaya çalışmaktadır. Mikro frezelemede ilk analitik model 2000 yılında Bao ve Tansel [75] tarafından önerilmiştir. Bu araştırmacılar takım ucunun yörüngesi için yeni bir ifade sunmuşlardır. Geliştirilen modelin eksikliği 2 boyutlu olmasıdır ve sabit spesifik kesme enerjisinin kullanılmasıdır [75]. Mikro frezelemede makro frezelemenin aksine spesifik kesme enerjisinin sabit olmadığı bilinmektedir [80]. Bu nedenle, bu model yüksek ilerlemelerde iyi sonuçlar vermiştir, fakat tahmin edilen kuvvetlerin doğruluğu düşük ilerlemelerde çok düşüktür [75]. Mikro frezelemede ilk 3 boyutlu model (radyal, teğetsel ve aksenal kuvvet) Zaman ve arkadaşları [59] tarafından önerilmiştir. Bu model deforme olmamış talaş kalınlığı yerine deforme olmamış talaş alanını kullanmıştır ve teğetsel kesme kuvveti bileşeninin kesme kenarına dik olduğu düşünülmüştür. Fakat bu modelde teorik talaş alanının gerçekçi olmayan hesabının kullanılması modelden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara uymamasına neden olmuştur [59]. Mikro frezelemede bir diğer 3 boyutlu kesme kuvveti modeli 2007 yılında Li ve arkadaşları [62] tarafından önerilmiştir. Bu model kesme kuvvetlerinin tahmininde daha doğru sonuç vermiştir ve hata yaklaşık %10 civarındadır. Jin ve arkadaşları [76] spesifik kesme enerjisi ve kuvvet oranını 2D sonlu elemanlar simülasyonu ile elde etmiştir. Daha sonra elde edilen bu verileri kullanarak mikro frezelemede kuvvetleri tahmin etmek için analitik kuvvet modelini kullanmışlardır. Rao ve Shunmugam [77] malzeme güçlendirici (strengthening) ve kenar radyüsü etkilerini dikkate alan analitik kuvvet modeli geliştirmiştir. İsmail ve arkadaşları [78] Ti6Al4V titanyum alaşımının 1 mm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde sürtünme etkisini analitik kuvvet modeli ile incelemişlerdir. Deneysel farklı devir sayılarında yürütülmüştür. Sonuçlar F_x ve F_y kuvvetlerinin artan devir sayısı ile azaldığını göstermiştir. Rodríguez ve Labarga [79] mikro frezelemede analitik kuvvet modeli geliştirmiştir. Modellerde salgı ve takım sehimi dikkate alınmıştır. Model aynı ve zıt yönlü frezeleme için geliştirilmiştir. 0.6 mm çapında takım kullanılarak AISI 1015 çeliği ve alüminyum 7075 malzemelerinde yürütülen deneysel çalışmalar model ile uyumlu sonuçlar vermiştir.

2.6. Performans Ölçümleri

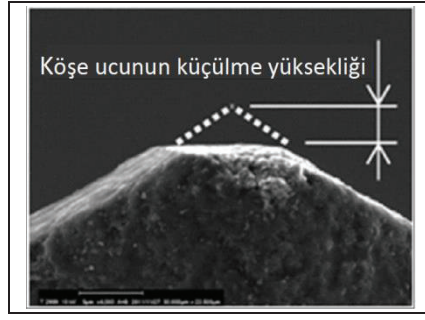
2.6.1. Takım Aşınması ve Takım Ömrü

Mikro freze takımları titreşim ve kuvvetlerden çok etkilenirler. Bu titreşim ve kuvvetler de takım ömrünü ve yüzey kalitesini olumsuz etkiler. Bu etkiler sonucunda mikro kesici takımlarda takım aşınması hatta takım kırılması meydana gelebilir, ancak konvansiyonel işleme ile karşılaştırıldığında mikro takımlarda takım kırılmasını algılamak zordur.

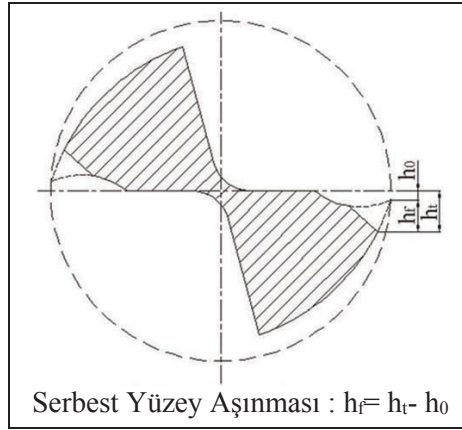
Mikro frezelemede aşınma tanımı farklılık göstermektedir ve mikro takımların durumunu izleme için literatürde tek bir yaklaşım yoktur. Mikro işlemede Tansel ve arkadaşları [81], [82] ve Rahman ve arkadaşları [83] kesici köşesindeki herhangi bir değişimi aşınma olarak tanımlamıştır. Örneğin, kesici köşesindeki boş kısımların küçük parçacıklarla dolması da aşınma olarak düşünülmüştür [81]. Takım çapındaki değişim [84], takım köşesi ucundaki küçülme yüksekliği (Şekil 2.12) [85], köşe radyüs yuvarlaklığı [44] ve parmak frezelerin alt görüntüsünden (bottom face) serbest yüzey aşınması ölçümü (Şekil 2.13) [7], [27] mikro domende takım aşınmasını değerlendirme için araştırmacıların tanımladığı kriterlerdir. De Cristofaro ve arkadaşları [86] serbest yüzey aşınmasını, orjinal imalat prosesi izlerinin görülmediği yerdeki soyulmuş kısmın genişliği olarak düşünmüştür. Li ve arkadaşları [84] takım aşınması olarak takım yarıçapındaki ortalama azalmayı dikkate almıştır. Takım yarıçapındaki ortalama azalma (w_{ort}) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$w_{ort} = \frac{d_0 - d_{aşınma}}{2} \quad (2.9)$$

Burada d_0 yeni takımın çapı ve $d_{aşınma}$ takım aşınması olduğundaki çaptır. Takımın çapını ölçmek çok zor olduğundan, takım aşınmasını ölçmek için işlenen kanalların genişliği kullanılmıştır. Bu nedenle, d_0 deneyin başındaki kanal genişliği olarak ve $d_{aşınma}$ takım aşınması meydana geldiği zaman ki kanal genişliği olarak düşünülmüştür.



Şekil 2.12: Takım aşınmasının tanımı (Köşe ucunun yan kenarının görüntüsü).



Şekil 2.13: Takım aşınması tanımı.

ISO 8688'e göre, konvansiyonel işlemede takım ömrünü belirleme eşiği serbest yüzey aşınmasının 0.3 mm olmasıdır [87]. Mikro işlemede bu değer yeniden tanımlanmalıdır ve literatürde mikro frezeleme için takım ömrü kriterini belirleyen çalışmalar yok denecek kadar azdır. 1.016 mm çapında kesici takım için takım ömrü kriteri olarak serbest yüzey aşınmasının 50 μm olması, kesici köşesinde dökülme olması veya takım kaplamasında ayrılma (delamination) seçilmiştir [88]. Pirinç malzemesinin 200 μm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde takım ömrü kriteri 15 μm alınmıştır [32]. Baharudin ve arkadaşları [89] H13 takım çeliği ve titanyum alaşımı Ti6Al4V malzemelerinin işlenmesinde mikro takımlar için takım ömrü kriterini değerlendirmişlerdir. Ayrıca takım aşınması ve kesme kuvvetleri arasındaki korelasyon çalışılmıştır. Kesici takım kenarı kırılırsa veya kesici takım ömrünü tamamlarsa kesme kuvveti ve titreşim artar. Aşınmış kesici takımın serbest yüzeyi takım ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını arttıracaktır. Titreşim ve sürtünme katsayısının artmasının kombinasyonu yüzey pürüzlülüğünü arttırarak zayıf yüzey kalitesine neden olacaktır. Serbest yüzey aşınması arttıkça, takım-iş parçası

temas alanı daha geniş hale gelmektedir ve böylece iş parçası yüzeyi üzerindeki sürtünme daha güçlü hale gelmektedir. Serbest yüzey aşınması arttıkça, kesme kuvvetleri artmıştır. Bu araştırmacıların takım ömrü kriterleri Tablo 2.5’de verilmiştir. Klocke ve arkadaşları [90] takım ömrü kriterini 0.5 mm çaplı kesici takım için maksimum takım aşınmasının 25 µm olduğu işleme mesafesi olarak tanımlamıştır.

Tablo 2.5: Serbest yüzey aşınması (VB) kriteri, kesme zamanları ve işlenen hacim.

Çap (mm)	Malzeme	VB Kriteri (mm)	VB/Çap	VB Kriterinde Kesme Zamanı (dak)	Toplam Kesme Zamanı (dak)	Toplam İşlenen Hacim (mm ³)	Bozukluk Modu
0.5	H13	0.11	0.220	6.46	7.85	5.10	Aşınmış takım
0.5	Titanyum	0.14	0.280	6.00	7.85	5.10	Aşınmış takım
1.0	H13	0.16	0.160	12.00	13.85	90.00	Kırılmış takım
1.0	Titanyum	0.14	0.140	11.08	12.00	78.00	Kırılmış takım
1.5	H13	0.17	0.113	12.00	14.77	216.00	Kırılmış takım
1.5	Titanyum	0.18	0.120	11.08	14.77	216.00	Aşınmış takım

Mikro işlemede tahmin edilemeyen takım ömrü en önemli eksikliklerden biridir ve literatürde takım bozukluk mekanizmaları farklı kesme şartları altında ve farklı malzemeler için araştırılmıştır. Yumuşak ve sert malzemelerin mikro frezelenmesinde farklı takım bozukluk tipleri gözlemlenmiştir. Yumuşak malzemeler (alüminyum, bakır v.b) işlendiği zaman mikro parmak frezelerin bozukluğunun nedeni genellikle kenar aşınmasıdır [38], [83], [91], parmak freze nadiren kırılmıştır ve aşınma hızı oldukça yavaştır [81]. Sert malzemeler (sertleştirilmiş çelik v.b) işlendiği zaman mikro parmak frezelerde abrasiv aşınma, kenarda dökülme, kırılma [37] ve (erken) kırılma [81], [92], [93] görülmüştür. Sonuç olarak takım ömrü çabuk sonlanmıştır [94]. Takım kırılmasının nedenleri talaş tıkaması, yorulma, aşırı gerilme [81], ve parametrelerin (talaş derinliği v.b) kurulumunda hatalar [95] olabilir. Ayrıca mikro parmak frezelerin kesici kenarlarının salgı nedeniyle farklı aşınma büyüklüğü gösterdiği gözlemlenmiştir [92], [96], [97]. Kesici kenarların eşit olmayan aşınma

göstermesinin nedeni iki kesici kenarın işleme esnasında farklı talaş yüküne sahip olmasıdır [97].

Mikro frezelemede kesici takım aşınması işleme şartları tarafından etkilenmektedir. Literatürde kesme hızı arttıkça takım aşınmasının arttığı bulunmuştur [83], [84], [98]. Bazı çalışmalarda ise yüksek kesme hızlarında serbest yüzey aşınmasının azaldığı bulunmuştur [86].

Talaş derinliği arttıkça takım aşınmasının azaldığı bulunmuştur [83]. Literatürde aksel talaş derinliğinin ve yana kayma mesafesinin takım aşınması üzerinde kesme hızı ve diş başına ilerleme ile karşılaştırıldığında çok az etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir [86]. Bir diğer çalışmada talaş derinliği ve diş başına ilerlemenin takım aşınması değişimi üzerinde çok az etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kesme hızının ve malzeme kaldırma hacminin takım aşınması üzerinde önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur [84]. Ayrıca literatürde yüksek yana kayma mesafesi ve düşük kesme derinliği kombinasyonunun makul takım aşınması için en iyi şart olduğu ifade edilmiştir [99].

2.6.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Makro ölçekli imalatta yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli işleme parametresinin ilerleme olduğu bilinmektedir. Fakat mikro frezeleme durumu geleneksel duruma göre çok daha karmaşıktır. Takımın küçük çapta ve uzun olması tırlama titreşimi oluşumunu arttırmaktadır. Ayrıca yüksek devirler de titreşime sebep olabilir. Bu nedenle mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreler deneysel olarak araştırılmıştır [100]. Deney tasarımı olarak cevap yüzeyi metotlarından biri olan tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Takım çapı, talaş derinliği, iş mili hızı ve ilerleme deney parametreleri olarak seçilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) sonucundan pirinç malzemesinin mikro frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün takım çapı olduğu bulunmuştur [100].

Vogler ve arkadaşları [43] mikro frezelemede minimum talaş kalınlığının işlenen yüzeyin pürüzlülüğü üzerindeki etkisini kesici kenar radyüsü, iş parçası mikroyapısı/fazı ve diş başına ilerleme etkilerinin kombinasyonuna atfetmiştir. Liu ve arkadaşları [3] yüzey pürüzlülüğünün minimum talaş kalınlığı etkisi ve ilerlemenin geleneksel etkisi arasında bir ödünün (trade off) olduğunu eklemiştir.

Daha yüksek diş başına ilerlemelerde, yzey pürzölölüğü artan diş başına ilerleme ile artmaktadır. Daha düşük diş başına ilerlemelerde, elastik toparlanma ve minimum talaş kalınlığı nedeniyle pürzölölük artmaktadır. Eğer diş başına ilerleme çok düşük olursa, talaş oluşmayacaktır [92]. Bu durumda, kazıma mekanizması pürzölölüğü etkileyecektir. İşlenen yzeylerde kuvvet, titreşim ve plastik deformasyon ve apak oluşumu yzünden oluşan yzeyin düzensizliğı (unevenness) nedenleriyle hasar oluşmaktadır. Buna ilaveten, talaş kalınlığı kesici köşe radyüsünden daha az olduğunda elastik toparlanma nedeniyle yzey pürzölölüğü artmaktadır [39], [101].

Mikro frezelemede işlenen yzeylerin pürzölölüğü işleme parametrelerine (diş başına ilerleme, kesme hızı, talaş derinliğı) [91], [92], [100], [102-106] ve bunların etkileşimine [100], takım kesici kenar radyüsüne [43], [92], takım aşınmasına [107], [37], [92], [102], [108], takım çapına [100], takım yollarına [103], iş parçası malzemesinin özelliklerine [43], [102] ve takım titreşimlerine [109] bağlıdır. Kesici kenar radyüsünün keskinliğı de yzey pürzölölüğünü etkilemektedir. Daha geniş kenar radyüsü kazıma mekanizmasını arttırdığı için kesici kenar ne kadar keskin olursa yzey kalitesi o kadar iyi olacaktır [37].

Mikro frezelemede yzey topografyasının diş başına ilerleme tarafından belirlendiğı ifade edilmiştir [110]. Jin ve arkadaşları [111] AISI D2 eliğinin 200 µm çapındaki parmak freze ile mikro frezelenmesinde yzey topografyasını incelemişlerdir. Sonuçlar diş başına ilerlemenin yzey topografyası üzerinde en baskın etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu araştırmacılar diş başına ilerlemenin kesici kenar radyüsüne oranının düşük olması nedeniyle, mikro frezelemede yüksek yzey pürzölölüğü ve yüksek apak oluştuğunu ifade etmişlerdir [111].

Diş başına ilerleme minimum talaş kalınlığından daha büyük olduğu zaman, yzey pürzölölüğü artan diş başına ilerleme ile artmaktadır [37], [43], [90], [92], [100], [102], [103], [105], [106], [112], [113], elde edilen bu sonuç makro ölçekli işlemede gözlemlenen ile tutarlıdır. İlerleme arttıca yzey pürzölölüğünün artmasının nedeni yüksek ilerlemelerde her bir dişten geri kalan işaretlerin daha büyük olması ile açıklanmıştır [112]. Diş başına ilerleme minimum talaş kalınlığından daha küçük olduğu zaman, yzey pürzölölüğü azalan diş başına ilerleme ile artmaktadır [37], [43], [92] fakat bu trend Wang ve arkadaşları [100] tarafından yapılan çalışmada gözlemlenmemiştir. İlerleme arttıca yzey

pürüzlülüğü azalmıştır [114], elde edilen bu sonuç literatürdeki çalışmalar ile uyumsuzdur. Ayrıca Litwinski ve arkadaşları [103] zıt yönlü frezelemede ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok etkisi olduğunu, aynı yönlü frezelemede hemen hemen hiç etkisi olmadığını ifade etmişlerdir. Fakat Min ve arkadaşları [115] aynı yönlü frezelemede yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerlemenin önemli bir etkisi olduğunu gözlemlemiştir.

Mikro frezelemede kesme hızı arttıkça daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir [39], [90], [91], [105]. Fakat bazı çalışmalarda bunun tam tersi sonuç görülmüştür [84], [100]. Daha yüksek kesme hızı hızlı takım aşınmasına neden olmuştur ve bu artışın yüzey pürüzlülüğünü daha çabuk arttırdığı görülmüştür [84]. Wang [113] devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığını bulmuştur. Fakat devir sayısının 40000 dev/dak değerinden fazla olduğunda yüzey kalitesinin azalmasının nedeni artan titreşim ile açıklanmıştır [113]. Bajpai ve arkadaşları [114] tarafından yapılan çalışmada devir sayısı 10000 dev/dak'dan 50000 dev/dak'a çıktığı zaman, yüzey pürüzlülüğü az da olsa artmıştır. Fakat devir sayısı 50000 dev/dak'dan 90000 dev/dak'a çıktığında ise, yüzey pürüzlülüğü azalmıştır [114].

Literatürde talaş derinliğinin iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi olmadığı konusunda görüş birliği vardır [29], [43], [84], [100], [103]. Talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi olmadığı için daha büyük talaş derinliği kullanmanın işleme verimliliğini artırmada etkili bir yol olduğu ifade edilmiştir [29]. Fakat Kakinuma ve arkadaşları [105], Wang ve arkadaşları [106], Dimov ve arkadaşları [112] ve Wang [113] talaş derinliği arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını ifade etmişlerdir. Talaş derinliğindeki artışın yüzey kalitesini kötüleştirmesinin nedeni yüksek talaş derinliğinde kesme kuvvetleri ve titreşimin artması ile açıklanmıştır [112]. Bazı çalışmalarda talaş derinliği arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür [114]. Ayrıca Wang ve arkadaşları [106] konvansiyonel frezelemede talaş derinliğinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisi az iken mikro frezelemede etkisinin yüksek olduğunu ifade etmiştir.

Serbest yüzey aşınması arttıkça, kesici takım-iş parçası temas alanı daha geniş hale gelmektedir ve böylece iş parçası yüzeyi üzerindeki sürtünme (rubbing) daha güçlü hale gelmektedir. Bu da yüksek sürtünme kuvvetlerinin ve sıcaklıklarının yanı sıra zayıf bitirme yüzeyi ile sonuçlanmaktadır [89]. Fang ve arkadaşları [107] mikro parmak freze aşındığı zaman yüzey pürüzlülüğünün daha kötü olduğunu belirtmiştir,

bu nedenle Uhlmann ve Schauer [108] mikro frezeleme testlerinde takım ömrü kriteri olarak pürüzlülük değerini (Rz) kullanmıştır. Fakat bu trend Nakamoto ve arkadaşları [85] ve Schmidt ve Tritschler [102] tarafından yapılan araştırmalarda gözlenmemiştir. Nakamoto ve arkadaşları [85] çok kristalli elmas (PCD) mikro parmak frezeler ile tungsten karbür iş parçasının mikro frezelemede aşınmanın yüzey kalitesini (tepe çukur yüzey pürüzlülüğü, Rz ve ortalama yüzey pürüzlülüğü, Ra ölçülmüştür.) etkilemediğini ifade etmişlerdir. Min ve arkadaşları [115] ve Denkena ve arkadaşları [116] da yüzey pürüzlülüğünün takım aşınmasından etkilenmediğini bulmuştur.

Literatürde mikro frezelemede takım yollarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Litwinski ve arkadaşları [103] zıt yönlü frezelemenin aynı yönlü frezeleme ile karşılaştırıldığında daha iyi yüzey kalitesi ürettiğini bulmuştur, “raster” ve “offset” takım yolu arasında farkın olmadığını ifade etmiştir. Fakat Min ve arkadaşları [115] ve Takács ve arkadaşları [92] zıt yönlü frezelemenin aynı yönlü frezelemeden daha kötü yüzey verdiğini rapor etmiştir. Zıt yönlü frezelemede kaba yüzeylerin oluşmasının nedeni elastik deformasyon ve toparlanma ile açıklanmıştır [115].

Wang ve arkadaşları [100] takım çapının azalması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını bulmuştur [100], bunun nedeni kesme kuvvetleri altında mikro takımların daha çok eğilmesidir [97]. Bir diğer çalışmada ise takım çapı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur [114].

2.6.3. Çapak

Takım aşınması temas eden yüzeyler arasında daha fazla sürtünmeye neden olur ve böylelikle işlenen yüzeylerde yüzey kalitesini azaltır. Mikro işlemede yüzey kalitesinin yanı sıra çapak oluşumu da önemli kontrol parametresidir. Çapak metal kesme operasyonlarının çoğunda meydana gelmektedir. Çapak, işleme sonrasında iş parçası köşeleri üzerinde kalan plastik olarak deforme olmuş malzemedir. İş parçası üzerinde çapak olması montaj hatası, ölçüsel hata, kötü yüzey kalitesi gibi pek çok probleme neden olmaktadır. Bu nedenlerle çapak oluşumu istenmeyen bir durumdur ve çapaklar iş parçası üzerinden giderilmelidir. Çapak giderimi için ek işlemler gereklidir [117] ve bu ek işlemler maliyeti ve harcanan zamanı arttırmaktadır. Fakat

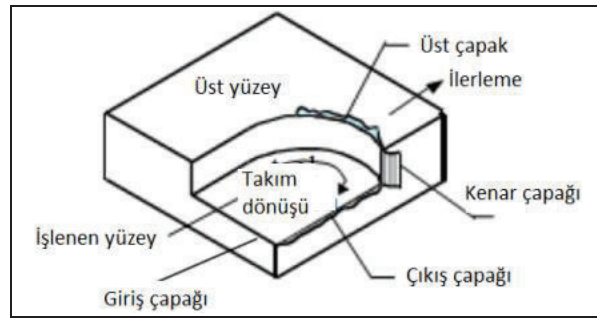
mikro frezeleme prosesinde iş parçası boyutlarının küçük olması nedeniyle çapak giderimi zordur ve çapak giderimi ölçüsel hatalara ve iş parçasında kalıntı gerilmelere neden olmaktadır. Bu nedenle, mikro frezelemede çapak oluşumunu minimize etmek veya önlemek için en iyi yol çapak oluşum mekanizmasını anlamak ve kesme parametrelerini optimize etmektir. Gillespie [118] konvansiyonel çapak giderme prosesinin minyatür parçalarda ölçüsel kusurlara ve kalıntı gerilmelere neden olduğunu ve çapak giderme işleminin parça üretim maliyetini %30 arttırdığını ifade etmiştir. Bu nedenle işleme şartları optimize edilerek çapak oluşumu azaltılabilir veya engellenebilir. Çapak oluşumunu azaltmak için etkin yöntemlerden biri çok küçük kenar radyüslü kesici takım kullanmaktır. Literatürde ek işlemler yapmadan çapak boyutunu minimize etmek için bazı girişimlerde bulunulmuştur. Yunming ve arkadaşları [119] ve Zhu ve arkadaşları [120] mikro frezelemede çapak oluşumunu tahmin ve kontrol etmek için yapay sinir ağlarını kullanmıştır.

Mikro frezelemede çapak şeklini ölçmede ve çapak oluşumunu değerlendirmede standart bir yaklaşım yoktur. Literatürde çapak şekilleri kalitatif olarak karşılaştırılmıştır [121] ya da çapak genişliği [7], [37], çapak yüksekliği [29], [98] ve çapak kalınlığı [122] aracılığıyla kantitatif olarak ölçülmüştür.

Mikro frezelemede çapak tipleri (Şekil 2.14) [119] giriş, çıkış ve üst çapak olarak tanımlanmıştır [44], [121]. Liang ve arkadaşları [123] Al2024-T6 malzemesinin mikro frezelenmesinde takım kenar radyüsünü ve kesici uç kırılmasını dikkate alan 3D mikro çapak oluşum modelini simülasyon metodunu kullanarak kurmuşlardır. Kullanılan kesici takım 0.5 mm çapındadır ve kesici kenar radyüsü 3 ila 8 µm arasında değiştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarından, mikro frezelemede olduğu pozisyona göre 3 tip çapak meydana geldiği ifade edilmiştir: Giriş çapağı, üst çapak ve çıkış çapağı. Giriş çapağının boyutlarının çok küçük olduğu ve morfolojilerinin üçgen ve elips şeklinde olduğu bulunmuştur. Giriş çapağının oluşma nedeni başlangıçtaki negatif kayma açısının varlığı ve kalıcı plastik deformasyon meydana gelene kadar iş parçası malzemesinin bastırılması ve giriş tarafında çıkıntı yapması ile ifade edilmiştir. Üst çapak boyutlarının diğer çapak tiplerinden daha geniş olduğu ve morfolojilerinin dalgalı, tırtıklı, eğilmiş ve yuvarlanmış olduğu bulunmuştur. Kesici takımın kenarı iş parçasının sonuna yaklaştığı zaman, talaş oluşumu durmaktadır. Talaş oluşturmak için kullanılan malzeme ezilir ve kazınır ve böylece köşe boyunca üst çapak oluşur. Çıkış çapağının morfolojisi yuvarlanmış ve

şerit şeklindedir. Kesici takım iş parçası köşesinden çıktığı zaman, iş parçası malzemesi plastik olarak dışarı itilir ve çıkış çapağı oluşur.

Literatürde Ti6Al4V malzemesinde çapak oluşum prosesini daha iyi tanımlayabilmek için 3D mikro küresel parmak freze FEM modeli oluşturulmuştur. Simülasyon sonucunda çapaklar 4 tipte sınıflandırılmıştır: Giriş çapağı, çıkış çapağı, üst çapak ve kanal tabanı çapağı. Ayrıca bu çalışmada kesme parametreleri ile üst çapak arasındaki korelasyon da incelenmiştir. Eksenel talaş derinliğinin kesici radyüsüne oranının küçük olmasının üst çapak oluşumunu azaltmada önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Üst çapağın yüksekliği artan talaş derinliği ile artmıştır. Aynı yönlü frezelemedeki üst çapağın zıt yönlü frezelemeden daha fazla olduğu bulunmuştur. Daha büyük talaş derinliği kullanıldığında bu durumun daha açık hale geldiği ifade edilmiştir. Düşük ilerlemelerde, $f/re < 1$ (re: takımın kesici kenar radyüsü) olduğunda, talaş açısı negatif olmaktadır ve böylece kazıma (plowing) etkisi baskın hale gelmektedir. $f/re > 1$ olduğu zaman, kesme prosesi baskın hale gelir ve talaş kalınlığı ilerlemenin artması ile artmaktadır ki bu da üst çapak yüksekliğinin artmasına sebep olmuştur. Devir sayısının üst çapak boyutu üzerindeki etkisinin eksenel talaş derinliğinin etkisinden daha az olduğu bulunmuştur. 30000 dev/dak'dan daha büyük devir sayılarında, çapak boyutu artan devir sayısı ile artmaktadır. Bu çalışmada elde edilen çapak boyutu literatürde düz parmak frezelerin kullanıldığı çalışmalarda elde edilen değerlerden daha düşüktür. Literatürde üst çapak boyutu 10 µm değerini aşmaktadır. Bu nedenle bu yazarlar mikro frezeleme prosesinde üst çapak boyutunu azaltmak için küresel uçlu kesici takımın kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre üst çapak boyutu üzerindeki en etkili faktörün eksenel talaş derinliği olduğu bulunmuştur [124].



Şekil 2.14: Frezelemede oluşan çapaklar.

Yunming ve arkadaşları [119] pirinç malzemesinin işleme testlerinde çıkış çapaklarının diğer çapak tiplerinden daha büyük olduğunu ve çıkış çapaklarının parça kalitesi üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Fakat Bissacco ve arkadaşları [42] boyut etkisi nedeniyle mikro frezelemede üst çapakların daha büyük olduğunu bulmuşlardır. Talaş derinliğinin kesici kenar radyüsüne oranı küçük olduğu zaman, yüksek iki eksenli baskı gerilmesi malzemeyi serbest yüzeye doğru iter ve büyük üst çapak meydana getirir.

Lee ve arkadaşları [125] alüminyum 6061-T6, 304 paslanmaz çeliği ve bakır 110 malzemeleri için kesme parametrelerinin çapak boyutu ve çapak tipi üzerindeki etkilerini gözlemlemişlerdir. Bütün malzemeler için giriş çapaklarında artan ilerleme ile çapak boyutunun arttığı bulunmuştur. Alüminyum ve bakır malzemeleri için talaş derinliğindeki artış çapak uzunluğunda açık bir artış ile sonuçlanmıştır. Paslanmaz çelik için benzer sonuç gözlenmemiştir. Daha uzun çapak diğer iki malzeme ile karşılaştırıldığında paslanmaz çelik malzemesinde oluşmuştur. Bunun nedeni bakır ve alüminyum malzemelerinin düşük dayanımı ile açıklanmıştır. Üst çaplarda artan ilerleme ile çapak boyutunun arttığı ve talaş derinliğinin alüminyum malzemesinin çapak oluşumunda önemsiz bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Çıkış çapaklarının alüminyum malzemesinin frezelenmesinde talaş derinliğine ve ilerlemeye bakılmaksızın her zaman oluştuğu ifade edilmiştir.

Çapak boyutu; işleme parametreleri [44], [97], [102], [121], [126], takım aşınması [44], [97], [127], takım yolları [97], [102], [121], salgı [121] ve iş parçası sertliği [97], [127] tarafından etkilenmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından çapak oluşumunun değişen kesme parametrelerinden etkilenmediği de bulunmuştur [127]. Literatürde çapak oluşumunu etkileyen faktörlerin kesme hızı, deforme olmamış talaş kalınlığı, kesici keskinliği, ilerleme ve iş parçası malzemeleri olduğu belirtilmiştir [128].

Literatürde ilerlemenin çapak yüksekliği üzerinde önemli etkisi olduğu bulunmuştur [29]. Çapak boyutunun (yükseklik) artan diş başına ilerleme ile arttığı bulunmuştur [44], [125], [126], [129]. Bu artışın sebebi artan ilerlemede tek bir kesmede daha yüksek malzeme hacminin kesme bölgesinden sürekli olarak uzaklaştırılmaması ile açıklanmıştır [129]. Fakat bazı çalışmalarda çapak yüksekliğinin artan diş başına ilerleme ile azaldığı bulunmuş [92], [98], [102], [103], [122] ve işleme parametreleri ve çapak boyutu arasında açık bir ilişki bulunamamıştır

[127]. Bajpai ve arkadaşları [114] ilerleme arttıkça çapak yüksekliğinin ve genişliğinin azaldığını, fakat çapak genişliğindeki değişimin çok az olduğunu ifade etmiştir. Kesici kenar radyüsü dış başına ilerlemeden daha yüksek olduğu zaman çapak boyutu önemli derecede azalmaktadır. Düşük dış başına ilerlemelerde, malzemede kesme yerine sürtme ve baskı (kazıma mekanizması) meydana gelmektedir ve bu da daha fazla çapak oluşturmaktadır [37], [102]. Mian ve arkadaşları [23] kesici kenar radyüsünden daha düşük deforme olmamış talaş kalınlıklarında, azalan ilerleme ile çapak boyutunun arttığını ifade etmiştir.

Literatürde çapak boyutunun artan talaş derinliği ile arttığı rapor edilmiştir [126], [114], [121]. Fakat Litwinski ve arkadaşları [103] tarafından yapılan çalışmada daha küçük çapak daha büyük talaş derinliğinde elde edilmiştir. Özellikle aynı yönlü frezelemede, çapak boyutu azalan talaş derinliği ile artmıştır [103].

Schmidt ve Tritschler [102] zıt yönlü frezelemede artan kesme hızı ile çapak boyutunun arttığını fakat aynı yönlü frezelemede azaldığını bulmuştur. Kesme hızının artması ile malzemenin daha yüksek gerinim hızı sertleşmesi nedeniyle üst çapak yüksekliği artmıştır [129]. Bazı çalışmalarda devir sayısı arttıkça çapak yüksekliğinin ve genişliğinin azaldığı görülmüştür [114]. Huo ve Cheng [29] ve Litwinski ve arkadaşları [103] kesme hızının çapak oluşumu üzerine önemli bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Literatürde aşınmış takımların daha büyük çapak oluşturduğu konusunda görüş birliği vardır [42], [44], [81], [97], [102], [127]. Bunun nedeni deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranının takım aşındıkça kesici kenar radyüsünün genişlemesi nedeniyle azalmasıdır [37]. Bunun anlamı etkili talaş açısının daha fazla negatif olmasıdır. Takımın ilerisindeki malzeme itilir/bastırılır ve plastik şekilde deforme olarak çapak oluşur [23].

Çapak boyutunun zıt yönlü frezelemede aynı yönlü frezelemeye göre daha küçük olduğu belirtilmiştir [37], [92], [97], [102], [114], [121], [129], [130], [131]. Ancak bu trend Litwinski ve arkadaşları [103] tarafından yürütülen çalışmada görülmemiştir, bazı işleme parametreleri kombinasyonunda zıt yönlü frezeleme aynı yönlü frezelemeden daha büyük çapak üretmiştir. Pirinç gibi sünek malzemelerin mikro işlenmesinde aynı yönlü frezeleme kullanıldığında ve dış başına ilerleme düşük olduğunda daha fazla çapak oluşumu gözlenmiştir [37], [92].

Malzeme özellikleri de çapak oluşumunu etkilemektedir. Schmidt ve Tritschler [102] daha yumuşak malzemelerin daha küçük çapak boyutu gösterdiğini gözlemlemiştir. Bunun nedeni daha yüksek iş parçası sertliğinde kesici takımların aşınma hızının yüksek olmasıdır. Lekkala ve arkadaşları [122] Al2124 ve SS-304 malzemelerinin mikro frezelemede çapak oluşumunu incelemiştir. Bu çalışmada araştırılan şartlar altında paslanmaz çelik malzemesinin alüminyum malzemeye göre daha büyük boyutlarda çapak oluşturduğu gözlenmiştir. Weule ve arkadaşları [39] da sert malzemelerde yüzey kalitesinin aksine çapak oluşumunun daha sık meydana geldiğini ifade etmiştir. Literatürde bazı çalışmalarda daha sünek iş parçası malzemelerinin daha geniş çapak boyutu meydana getirdiği bulunmuştur [127], [128]. Fakat daha sert malzemeler aşınma hızı nedeniyle çapak oluşumunu destekleyebilir [37].

Lee ve Dornfeld [121] salgi ne kadar büyük olursa çapak boyutunun o kadar büyük olacağını iddia etmiştir.

Pirinç malzemesinin keskin elmas kesiciler ile frezelenmesinde çapak oluşmamıştır, fakat sert metal kesiciler kullanıldığında çapak oluşumu gözlenmiştir [127].

Aurich ve arkadaşları [130] çapak yüksekliğinin helis açısından etkilendiğini bulmuşlardır. Pozitif helis açısının çapak yüksekliğini önemli derecede azalttığı görülmüştür. Negatif helis açısının güçlü plastik deformasyona, zayıf talaş oluşumuna ve geniş çapağa neden olduğu ifade edilmiştir.

Literatürde Ti6Al4V malzemesinin mikro frezelenmesinde kesici ağız sayısı 2'den 4'e çıktığı zaman çapak boyutunun azaldığı görülmüştür ve takım çapının çapak boyutu üzerinde ihmal edilebilir etkiye sahip olduğu bulunmuştur [114]. Bir diğer çalışmada ise artan takım çapı ve kesici takım ağız sayısı ile çapak yüksekliğinin azaldığı bulunmuştur [122].

Mikro takımların kesici kenar radyüsü çapak boyutunu etkilemektedir [42], [44], [127], [128]. Kesici kenar radyüsü arttıkça, çapak boyutunun arttığı bulunmuştur [121], [123], [127]. Kesici kenar radyüsü arttıkça, ilerleme yönündeki ortalama kesme kuvvetinin arttığı bulunmuştur. Bu nedenle, geniş kesici kenar radyüsü kesme esnasında kazıma etkisi nedeniyle daha fazla plastik deformasyon üretmektedir ve sonuç olarak daha geniş üst çapak meydana getirmektedir [123].

2.6.4. Kesme Kuvvetleri

Mikro işlemede kesme kuvvetlerinin doğru ölçülmesi önemlidir. Mikro frezelemede çok yüksek devir sayılarının kullanılmasından dolayı kesme kuvvetlerinin doğru ölçümü zordur. 3 eksenli dinamometre kullanılarak mikro kesme kuvvetleri ölçülebilmektedir. Chae ve Park [132] alüminyum malzemesinin 200 µm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde kesme kuvvetlerini doğru ölçebilmek için çoklu sensörler (piezoelektrik kuvvet sensörü ve ivmelenme sensörü) kullanmıştır. Jin ve arkadaşları [111] AISI D2 çeliğinin 200 µm çapındaki parmak freze ile mikro frezelenmesinde kesme kuvvetlerini incelemiştir. Mikro frezelemede oluşan kuvvetlerin makro frezelemeye göre çok düşük olduğu bulunmuştur. Mikro frezelemede makro işlemede olduğu gibi normal yöndeki kesme kuvvetlerinin ilerleme yönündeki kesme kuvvetlerinden daha büyük olduğu bulunmuştur [46], [133]. Düşük diş başına ilerlemelerde, normal ve ilerleme yönündeki kesme kuvvetleri arasındaki farkın küçük olduğu görülmüştür [46]. Bir diğer çalışmada ise radyal kuvvetin daima teğetsel kuvvetten daha düşük olduğu gözlenmiştir [134]. Lai ve arkadaşları [48] y yönündeki kuvvetin x yönündeki kuvvetten çok az yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Mikro frezelemede kesme kuvvetleri modelleme çalışmalarının yanı sıra işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Mikro frezelemede kesme hızı arttıkça kesme kuvvetinin arttığı belirtilmiştir [91].

Kesme kuvvetlerinin diş başına ilerleme ile arttığı görülmüştür [46], [48], [91], [98], [111], [134]-[136]. Bunun nedeni artan diş başına ilerleme ile talaş kesit alanının artmasıyla açıklanmaktadır [98].

Eksenel talaş derinliğinin kesme kuvveti üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu ifade edilmiştir [46]. Bir diğer çalışmada ise kesme kuvvetlerinin talaş derinliği ile arttığı görülmüştür [111].

Aynı yönlü frezelemede ortalama kuvvet bütün ilerlemelerde, talaş derinliklerinde ve yana kayma mesafelerinde zıt yönlü frezelemeden daha yüksek olduğu ve bu nedenle ince parçaların mikro frezelenmesinde zıt yönlü frezelemenin tercih edilmesi gereken strateji olduğu belirtilmiştir. Zıt yönlü frezeleme için kuvvet büyüklüğünün artan yana kayma mesafesi ve diş başına ilerleme ile arttığı gözlemlenmiştir ve yana kayma mesafesinin etkisinin ilerlemeden daha önemli

olduğu bulunmuştur. Talaş derinliğindeki artış ortalama kuvveti önemli bir şekilde arttırmamıştır. Bu nedenle bu araştırmacılar daha büyük talaş derinliği değerlerinin iş parçası kalitesini etkilemeden verimliliği arttırmak için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Aynı yönlü frezeleme için kuvvet büyüklüğünün artan diş başına ilerleme, yana kayma mesafesi ve talaş derinliği ile arttığı gözlemlenmiştir ve yana kayma mesafesinin en önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Araştırmacılar ayrıca hem aynı hem de zıt yönlü frezelemede küçük yana kayma değerlerinin daha düşük kuvvet değerleri vermesine rağmen yana kayma değerinin çok küçük seçilemeyeceğini ifade etmişlerdir. Aksi takdirde arzu edilmeyen minimum talaş kalınlığının etkisi baskın olacaktır. Bu araştırmacılar ayrıca makro ölçekli frezelemede kullanılan kuvvet modelini kullanarak ortalama kuvveti tahmin etmişlerdir ve olumlu sonuçlar almışlardır. Bunun nedeni çalışmada kullanılan deneysel şartlar altında mikro frezeleme prosesinde kayma mekanizmasının baskın olması ile açıklanmıştır [137].

2.7. Deney Tasarımı ve Optimizasyon

Literatürde mikro frezeleme çalışmalarında deneyler yarım faktöriyel [138], tam faktöriyel [139], [140] ve Taguchi [106], [141]-[143] deney tasarımı metotları ile tasarlanmıştır. Monroy-Vázquez ve arkadaşları [138] alüminyum, AISI 316L paslanmaz elik ve Ti6Al4V malzemeleri ile mikro kanal işlemede yüzey kalitesi ve ölçüsel özellikleri yarım faktöriyel deney tasarımı kullanarak incelemişlerdir. Mikro kanalların genişliği takım çapı (200 μm) kadardır. Kanalların uzunluğu 8 mm'dir ve iki farklı derinlik (50 ve 100 μm) kullanılmıştır. Devir sayısı, bir pasodaki talaş derinliği, kanal derinliği, diş başına ilerleme ve kuru kesme veya kesme sıvısı kullanımı değişken parametreler olarak seçilmiştir. Kanal tabanındaki yüzey pürüzlülüğu, kanal genişliği, kanal derinliği ve mikro kanal profilinin şekli çıktı parametreleri olarak değerlendirilmiştir. Alüminyum malzemesi için soğutucu durumunun yüzey pürüzlülüğu üzerinde en önemli faktör olduğu ve soğutucu kullanımının yüzey pürüzlülüğünü azalttığı bulunmuştur. AISI 316L malzemesi için ise üst apak oluşumunu minimize etmede en etkili faktörün bir pasodaki talaş derinliği olduğu ve soğutucu kullanımının yüzey pürüzlülüğünü azalttığı bulunmuştur. Titanyum alaşımı için düşük talaş derinliği ve yüksek diş başına

ilerleme kombinasyonunda en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Her 3 malzeme için de üst çapak oluşumunu etkileyen en önemli faktörün bir pasodaki talaş derinliği olduğu sonucu çıkarılmıştır. Çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü birlikte düşünüldüğünde en iyi yüzey kalitesi genellikle AISI 316L malzemesi ile elde edilmiştir. Vázquez ve arkadaşları [140] çalışmalarında tam faktöriyel deney tasarımını kullanmıştır. Parametreler olarak devir sayısı, aksel talaş derinliği, final aksel derinlik ve diş başına ilerleme seçilmiştir. Parametreler 2 seviyelidir ve deneyler kuru ve kesme sıvılı yürütülmüştür ($16 \times 2 = 32$ deney). İş parçası malzemeleri olarak alüminyum ve bakır kullanılmıştır. Mikro kanalların ölçüleri, şekli, bitirme yüzeyi ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Alüminyum iş parçasında mikro kanal işlemede diş başına ilerleme arttıkça mikro kanalların dikdörtgen şeklini kaybettiği görülmüştür. Kesme sıvısı kullanımının daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri verdiği bulunmuştur. ANOVA analizi sonucunda mikro kanal ortalama genişliğini etkileyen en önemli parametrenin diş başına ilerleme olduğu bulunmuştur. Bu ilişkinin nedeni takım sehimi ile açıklanmıştır. Diş başına ilerleme arttıkça, kesici takım eğilir. Bakır iş parçasında mikro kanal işlemede mikro kanalların dikdörtgen şeklini kaybettiği görülmüştür. Ali ve arkadaşları [142] polimetilmetakrilat (PMMA) malzemesinin mikro frezelenmesinde minimum talaş kalınlığını Taguchi L18 deney tasarımını kullanarak incelemiştir. Deney tasarımında parametreler kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği olarak seçilmiştir. Minimum talaş kalınlığını etkileyen en önemli parametrenin talaş derinliği olduğu bulunmuştur. Wang ve arkadaşları [106] Al 6061-T6 alüminyum malzemesinin mikro frezelenmesinde devir sayısı, ilerleme, talaş derinliği ve bu parametrelerin etkileşimlerini dikkate almıştır ve deney tasarımı olarak Taguchi metodunu kullanmıştır. Deneysel yüzey pürüzlülüğü sonuçları için yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir.

Mikro frezeleme prosesinde optimizasyon çalışmaları yok denecek kadar azdır. Cardoso ve Davim [144] Al 2011 alüminyum iş parçası malzemesinin mikro frezelenmesinde işleme stratejilerinin (constant overlap spiral, parallel spiral ve parallel zigzag) ve diş başına ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca yüzey pürüzlülüğünü ve işleme zamanını optimize etmişlerdir. En iyi sonuç constant overlap spiral stratejisi ile elde edilmiştir. Mian ve arkadaşları [141] Inconel 718 malzemesinin mikro frezelenmesinde Taguchi L9 deney tasarımını kullanmıştır ve AE sinyallerini, yüzey pürüzlülüğünü ve çapak

boyutunu incelemiştir. Kesme hızı, deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranı, aksenal talaş derinliği ve takım kaplama durumu (TiAlN ve kaplamasız) kontrol faktörleri olarak seçilmiştir. Taguchi sinyal/gürültü (S/N) oranı kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Kesme hızını kontrol ederek çapak kalınlığının azalabildiği ve bitirme yüzeyinin optimize edilebileceği bulunmuştur. ANOVA ile hangi faktörün baskın olduğu bulunmuştur. Spesifik akustik emisyon enerjisini en çok etkileyen faktörlerin sırasıyla kesme hızı ve sürtünme durumu (takımın kaplamalı olup olmaması) olduğu ifade edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü ve çapak kalınlığını en çok etkileyenlerin sırasıyla kesme hızı ve deforme olmamış talaş kalınlığının kesici kenar radyüsüne oranı olduğu bulunmuştur. Natarajan ve arkadaşları [145] alüminyum malzemesinin 1 mm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde maksimum MRR'yi ve minimum yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için cevap yüzeyi metodunu kullanarak çoklu optimizasyon yapmıştır. MRR ve yüzey pürüzlülüğü için 2. dereceden modeller geliştirilmiştir. Makul kesme hızlarında ve 20 µm'den büyük talaş derinliklerinde MRR'nin iyileştiği sonucu bulunmuştur. Ayrıca ilerleme düşük olduğunda yüzey kalitesinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi olmadığı bulunmuştur. Chi-Hsiang ve arkadaşları [143] SKD61 takım çeliğinin 200 µm çapındaki kesici takım ile mikro frezelenmesinde sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Simülasyon analizi Taguchi metodu kullanılarak yürütülmüştür. Etkili talaş açısı, boşluk açısı, kesme hızı ve kesme derinliği parametreler olarak seçilmiştir. Kesme kuvveti, takım maksimum sıcaklığı, takım maksimum sıcaklık noktası ile takım uç noktası arasındaki mesafe ve takım-talaş temas uzunluğu çıktı parametreleri olarak değerlendirilmiştir. Etkili talaş açısının en büyük etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Etkili talaş açısını sırasıyla kesme hızı, kesme derinliği ve boşluk açısı takip etmiştir. Mikro parmak freze tasarımında optimum parametrelerin etkili talaş açısının 20°, boşluk açısının 7°, kesme hızının 188.50 mm/s ve kesme derinliğinin 0.01 mm olduğu ifade edilmiştir [143].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Takım Tezgahı

Mikro frezeleme deneyleri Gebze Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği CAM (Bilgisayar Destekli İmalat) laboratuvarında bulunan DECKEL MAHO DMU 60 P beş eksen işleme merkezinde yapılmıştır (Şekil 3.1). Tezgahın ulaşabileceği maksimum devir 12000 dev/dak olduğu için yüksek devir sayısının kullanıldığı bazı deneylerde tezgah ana miline yüksek hız kafası adı verilen bir ekipman takılmıştır.

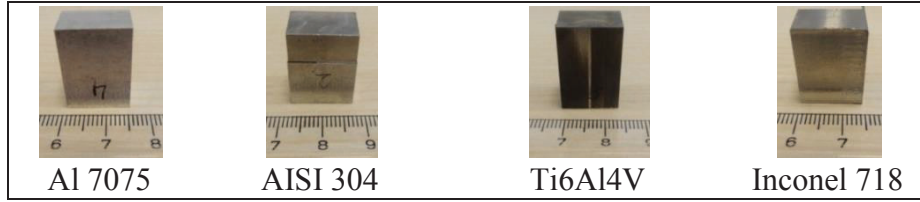


Şekil 3.1: DECKEL MAHO DMU 60 P beş eksen işleme merkezi.

3.2. İş Parçaları

Bu tezde yapılan deneylerde 4 farklı iş parçası malzemesi kullanılmıştır. İş parçası malzemeleri olarak Al 7075 alüminyum alaşımı, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, Ti6Al4V titanyum alaşımı ve Inconel 718 seçilmiştir (Şekil 3.2). Alüminyum alaşımları uzay endüstrisinde sıklıkla, AISI 304 paslanmaz çelik malzeme mikro enjeksiyon kalıplarında yaygın olarak, Ti6Al4V titanyum alaşımları iyi dayanım, korozyon direnci ve biyoyumluluk gibi özellikleri nedeniyle uçak sanayisinde, medikal araçlar ve implantlarda yaygın olarak ve Inconel 718 malzemesi de mekanik özelliklerini yüksek sıcaklıklarda dahi koruması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda çalışması gereken uygulamalarda (gaz türbinleri, nükleer reaktörler) yaygın olarak kullanıldığı için bu çalışmada iş parçası malzemeleri olarak seçilmiştir. Malzemelerin kimyasal analizi Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde yapılmış ve analiz değerleri Tablo 3.1'de

verilmiştir. Al 7075 malzemesinin sertliği 139 HV, AISI 304 malzemesinin sertliği 300 HV, Ti6Al4V malzemesinin sertliği 35 HRC (345 HV) ve Inconel 718 malzemesinin sertliği 43 HRC (423 HV) olarak ölçülmüştür. İş parçalarının boyutları 10×20×15 mm (Genişlik×Yükseklik×Uzunluk) olarak belirlenmiştir. Mikro frezeleme deneylerine başlamadan önce iş parçası yüzeyleri frezelenerek düzlemsellik sağlanmıştır.



Şekil 3.2: İş parçaları.

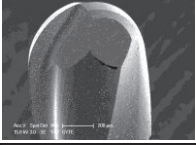
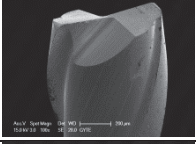
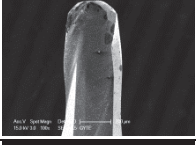

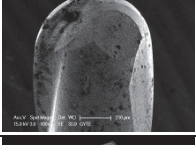
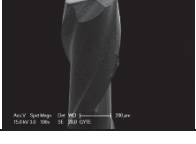
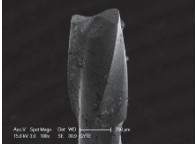

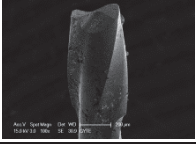
Tablo 3.1: İş parçası malzemelerinin kimyasal kompozisyonları (% Ağırlık).

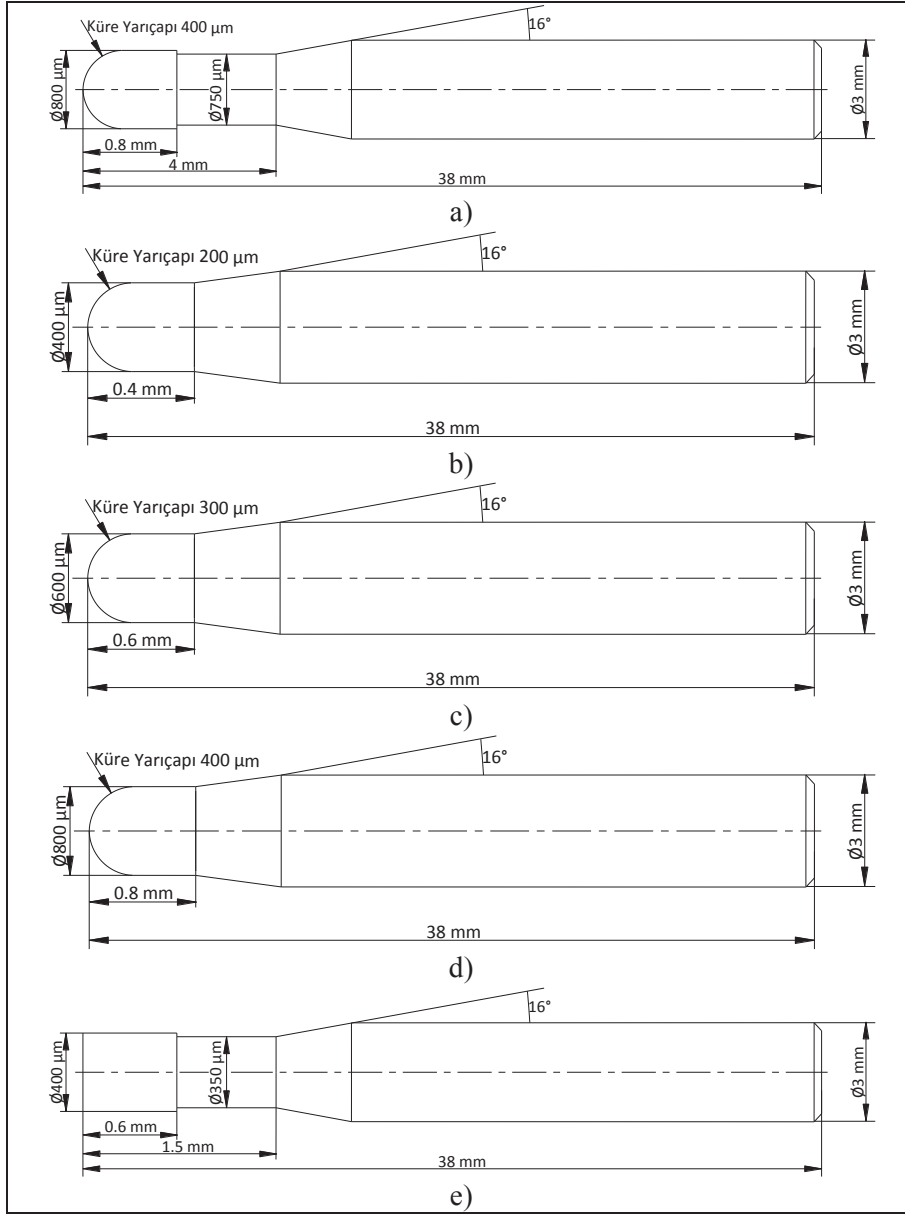
Al 7075								
Al	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Cr	Ni
89.0	5.22	2.00	1.71	0.92	0.55	0.348	0.093	0.057
AISI 304								
Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	Si	Mo	Co	V
69.0	18.75	8.23	1.89	0.69	0.64	0.398	0.105	0.071
Ti6Al4V								
Ti	Al	V	C					
88.00	5.75	4.00	0.08					
Inconel 718								
Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Ti	Al	Mn	Si
51.89	20.81	17.71	4.40	3.00	1.30	0.455	0.152	0.086

3.3. Mikro Kesici Takımlar

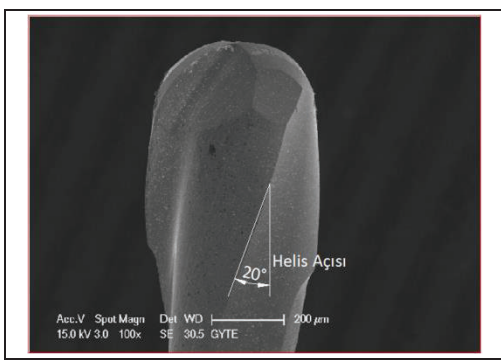
Mikro frezeleme deneylerinde Union Tool marka kesici takımlar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan mikro kesici takımların tamamı 2 ağızlıdır. Tüm deneylerde mikro kesiciler yaklaşık 20 mm yüksekliğinde bağlanmıştır ve bu değer deneylerde kesme dinamiğinin değişmemesi için sabit alınmıştır. Kullanılan mikro takımlar Tablo 3.2’de verilmiştir. Kesici takımların ölçüleri Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Kesici takımların helis açısı kontrol amaçlı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ölçülmüştür (Şekil 3.4). Helis açısının 20° olduğu doğrulanmıştır.

Tablo 3.2: Deneylerde kullanılan mikro kesici takımlar.

Deney Tasarımları ve İş Parçası Malzemeleri	Mikro Kesici Takım Tipi ve Kodu	Mikro Kesicilerin SEM Görüntüsü
Taguchi Deney Tasarımı Yüzey İşleme Al 7075 ve AISI 304	800 µm çapında TiAlN kaplanmış küresel parmak freze, helis açısı 20° CB3A 20080-040	
Taguchi Deney Tasarımı Yüzey İşleme Ti6Al4V ve Inconel 718	800 µm çapında köşe radyüsü 0.05 µm olan düz parmak freze CER SP C/R 2008-005	
Takım Çapının Etkisi Yüzey İşleme Al 7075 ve Ti6Al4V	400 µm çapında TiAlN kaplanmış küresel parmak freze, helis açısı 20° CB3A 20040	
	600 µm çapında TiAlN kaplanmış küresel parmak freze, helis açısı 20° CB3A 20060	
	800 µm çapında TiAlN kaplanmış küresel parmak freze, helis açısı 20° CB3A 20080	
İşleme Yönlerinin Etkisi Yüzey İşleme Al 7075	400 µm çapında düz parmak freze LS 2004-050	
İşleme Yönlerinin Etkisi Yüzey İşleme, Ti6Al4V Tezgah 12000 Devir, 75 ve 150 mm/dak İlerleme	400 µm çapında TiAlN kaplanmış düz parmak freze, helis açısı 20° CES3A20040-015	
Hız Kafası 12000 Devir, 75 mm/dak İlerleme		
Hız Kafası 20000 Devir, 150 mm/dak İlerleme		
Hız Kafası 28000 Devir, 75 ve 150 mm/dak İlerleme		
Devir Sayısının Etkisi Yüzey İşleme Ti6Al4V	800 µm çapında TiAlN kaplanmış küresel parmak freze, helis açısı 20° CB3A 20080	
Mekanistik Kuvvet Modeli Kanal İşleme Ti6Al4V	400 µm çapında TiAlN kaplanmış düz parmak freze, helis açısı 20° CES3A20040-015	



Şekil 3.3: Mikro kesici takımların ölçüleri. a) CB3A 20080-040, b) CB3A 20040, c) CB3A 20060, d) CB3A 20080, e) CES3A20040-015.



Şekil 3.4: Helis açısı.

3.4. Ölçümler

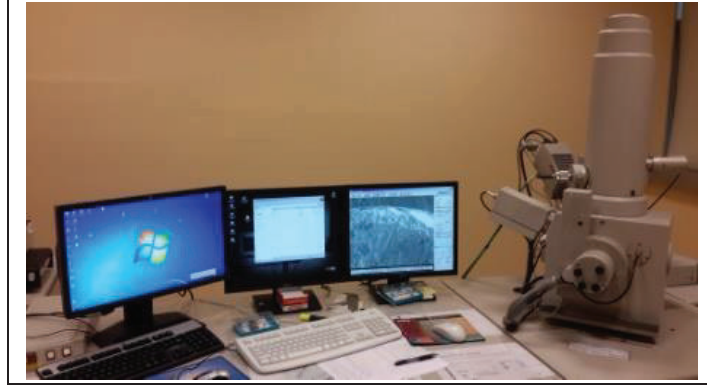
Mikro frezelemede kesici takım salgısı makro frezeleme ile karşılaştırıldığında proses performansını daha fazla etkileyeceği için bu değerin mümkün olduğu kadar düşük olması gerekmektedir. Bu nedenle deneylere başlamadan önce mikro kesici takımların statik salgısı hassas komparatör yardımıyla ölçülmüştür. Takım salgısı kesici takımın shaft kısmından ölçülmüştür. Mikro kesici takımların salgısını ölçmek için kurulan düzenek Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



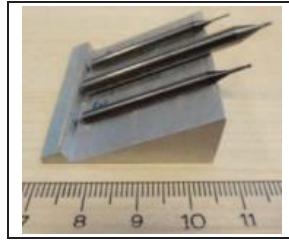
Şekil 3.5: Mikro kesici takımın salgısını ölçmek için komparatörün kurulumu.

3.4.1. Takım Aşınması

Mikro işlemede kesici kenarındaki herhangi bir değişim aşınma olarak tanımlanmıştır [81]-[83]. Bu çalışmada da kesicideki herhangi bir değişim aşınma olarak değerlendirilmiştir ve analizlerde maksimum aşınma dikkate alınmıştır. Deneylerde kullanılan kesicilerin aşınma ölçümleri Philips XL30 SEM ile yapılmıştır (Şekil 3.6). Aşınma ölçümleri 500× büyütmede yürütülmüştür. Aşınma ölçümlerinin SEM’de yapılabilmesi için Şekil 3.7’de gösterildiği gibi eğimli bir parça hazırlanmıştır. Aşınmış takımların elemental analizi enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile yapılmıştır.



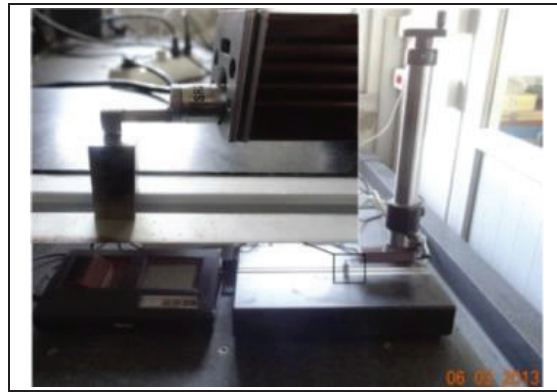
Şekil 3.6: SEM cihazının görüntüsü.



Şekil 3.7: Aşınma ölçümleri için hazırlanan eğimli parça.

3.4.2. Yüzey Pürüzlülüğü

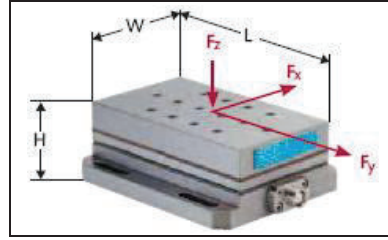
İşlenen yüzeylerin pürüzlülüğü, Mitutoyo SurfTest SJ 301 tipi cihaz ile ölçülmüştür (Şekil 3.8). Ölçümlerde örnekleme sayısı 1 ve örnekleme uzunluğu (cut-off) 0.25 mm olarak alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ilerleme yönünde yapılmıştır. İşlenmiş yüzeylerde 10 farklı yerden ortalama yüzey pürüzlük değeri (R_a) ölçülmüştür. Daha sonra pürüzlülük değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır.



Şekil 3.8: Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

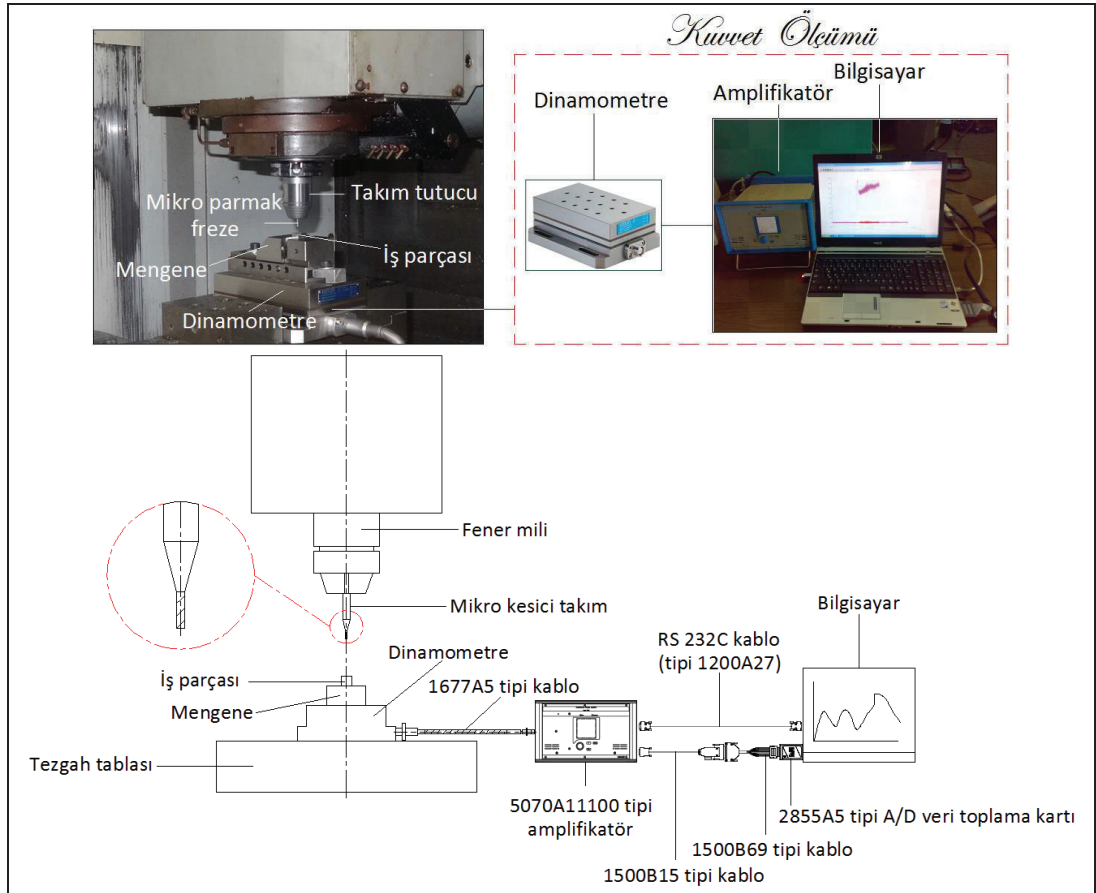
3.4.3. Kesme Kuvvetleri

Kesme kuvvetleri KISTLER marka 9257B tabla tipi dinamometre kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.9). DynoWare yazılımı kullanılarak ölçülen kuvvet değerleri grafiksel olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.9: Dinamometre.

Şekil 3.10'da deney kurulumu gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Deney kurulumu.

3.4.4. apak Genişliği

Bu tezde mikro kanalların işlendiği deneylerde kanalın st kısmındaki çapakların genişliği SEM ile ölçülmüştür. Analizlerde maksimum apak genişliği dikkate alınmıştır.

3.5. Deney Tasarımları

Bu çalışmada 5 farklı deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Taguchi Deney Tasarımı

Taguchi deney tasarımının kullanıldığı mikro frezeleme deneylerinde devir sayısı, ilerleme ve talaş derinliği kontrol faktörleri olarak seçilmiştir. Her bir kontrol faktörü 3 seviye olarak kullanılmıştır. Kesme parametreleri ve seviyeleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Kullanılan üç farklı parametre ve üç farklı seviye için Taguchi'nin $L_9 (3^3)$ standart ortogonal dizisi seçilmiştir (Tablo 3.4). Deneylerde yüzey işlenmiştir. Literatürde yana kayma mesafesinin takım aşınması üzerindeki etkisinin çok az olduğu [86] belirtildiği için bu çalışmada yüzey işlemenin yapıldığı mikro frezeleme deneylerinde yana kayma mesafesi sabit alınmıştır. Yana kayma mesafesi Al 7075 ve AISI 304 malzemeleri için 200 μm , Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemeleri için 100 μm olarak seçilmiştir. Yüzey işlemenin yapıldığı deneylerde $15 \times 10 \text{ mm}^2$ 'lik yüzey 2 defa işlenmiştir. Yüzeyler aynı yönlü frezeleme stratejisi ile işlenmiştir. Yüzey frezeleme deneylerinde her bir deney için yeni mikro kesici takım kullanılmıştır. Yani 9'lu Taguchi deney seti için her bir malzeme için toplamda 9 kesici takım kullanılmıştır. Tüm deneylerde mikro kesici takımlar yaklaşık 20 mm yüksekliğinde ve iş parçası 5 mm yüksekliğinde (mengene yüzeyinden taşan yükseklik) bağlanmıştır.

Tablo 3.3: Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeleri.

Malzeme	Kod	Kontrol Faktörü	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Al 7075 (Yüzey İşleme)	A	Devir sayısı (dev/dak)	10000	11000	12000
	B	İlerleme ($\mu\text{m}/\text{diş}$)	0.5	1.0	1.5
	C	Talaş derinliği (μm)	50	75	100
AISI 304 (Yüzey İşleme)	A	Devir sayısı (dev/dak)	8000	10000	12000
	B	İlerleme hızı (mm/dak)	50	75	100
	C	Talaş derinliği (μm)	50	100	150
Ti6Al4V ve Inconel 718 (Yüzey İşleme)	A	Devir sayısı (dev/dak)	10000	11000	12000
	B	İlerleme hızı (mm/dak)	50	75	100
	C	Talaş derinliği (μm)	50	75	100

Tablo 3.4: Taguchi L₉ deney tasarımı.

Deney No	Devir Sayısı	İlerleme	Talaş Derinliği
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

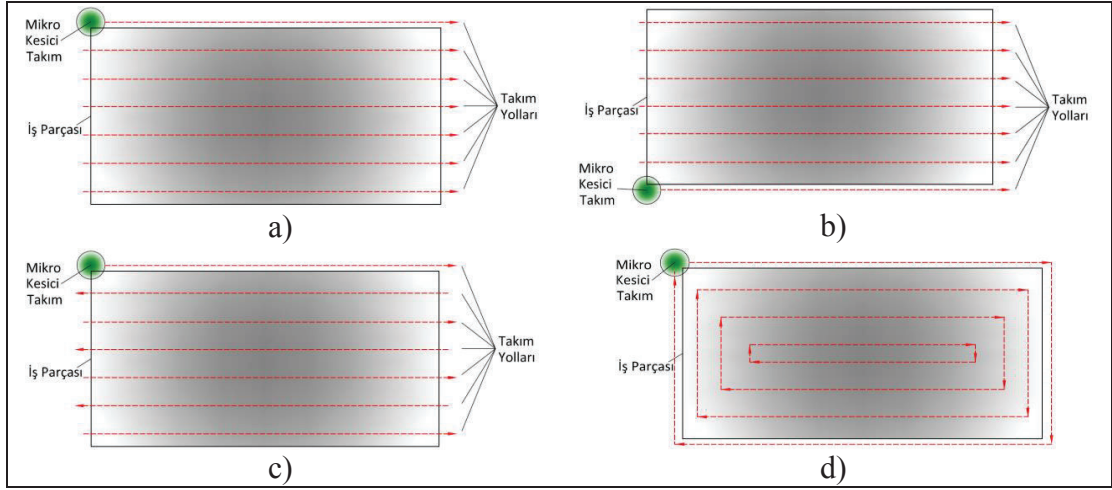
3.5.2. Kesici Takım Çapının Etkisi Deneyleri

Kesici takım çapının etkisi deneylerinde iş parçası malzemeleri olarak Al 7075 ve Ti6Al4V kullanılmıştır. Deneylerde $15 \times 10 \text{ mm}^2$ 'lik yüzey 1 defa ve aynı yönlü frezeleme stratejisi ile işlenmiştir. 400, 600 ve 800 μm çaplarında küresel uçlu parmak frezeler kesici takım olarak seçilmiştir. Al 7075 malzemesi için devir sayısı 12000 dev/dak, ilerleme hızı 60 mm/dak, talaş derinliği 60 μm ve yana kayma mesafesi 50 μm olarak alınmıştır. Ti6Al4V malzemesi için devir sayısı 12000 dev/dak, ilerleme hızı 75 mm/dak, talaş derinliği 60 μm ve yana kayma mesafesi 50 μm olarak seçilmiştir. Tüm deneylerde mikro kesici takımlar yaklaşık 20 mm yüksekliğinde ve iş parçası 5 mm yüksekliğinde (mengene yüzeyinden taşan yükseklik) bağlanmıştır.

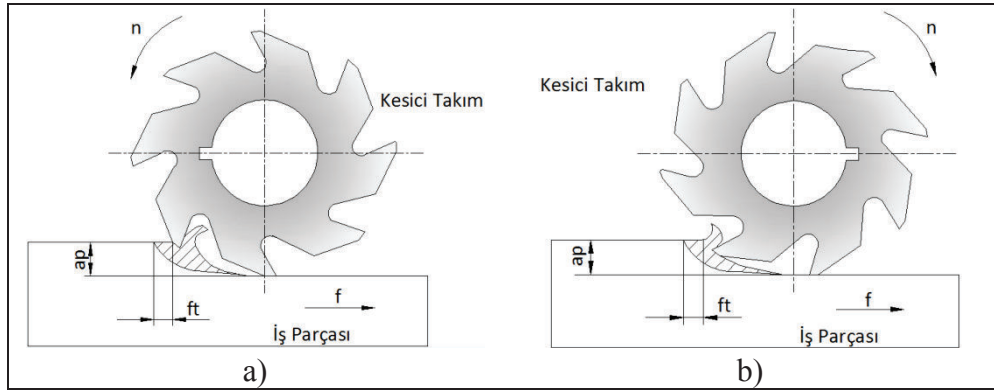
3.5.3. Takım Yollarının ve Yüksek Hız Kafasının Etkisi Deneyleri

Frezeleme operasyonlarında ürünün ekonomik ve kısa sürede imal edilebilmesi için çeşitli takım yolları geliştirilmiştir. Frezelemede takım yolları genellikle 3 ana tipte sınıflandırılmaktadır. Bunlar offset, zigzag (aynı ve zıt yönlü frezeleme) ve tek yönlü frezeleme (aynı veya zıt yönlü frezeleme) olarak isimlendirilmektedir. Tek yönlü frezeleme stratejisinde mikro kesici takım iş parçasının bir kenarından başlamaktadır ve yüzey boyunca paralel hareket etmektedir. İşleme süresince kesici takımın yönü değişmemektedir. Kesici takımın yana kayma değeri sabittir. Kesici takım bir pasoyu işledikten sonra o pasonun başlangıç noktasına iş parçasına temas etmeden geri dönmekte ve diğer paso için ilerlemektedir (Şekil 3.11.a ve Şekil 3.11.b). Aynı yönlü frezelemede tabla ilerlemesi kesici takım dönüşü ile aynı yöndedir (Şekil 3.12.a). Kesici takım iş parçası ile temas ettiğinde, talaş kalınlığı maksimum değerden kesme işleminin sonunda sıfır olacak şekilde azalmaktadır. Aynı yönlü frezelemede kesme kuvvetlerinin başlangıçta maksimum olması bu yöntemin dezavantajlı yanıdır. Fakat iş parçasını tezgah tablasına bastırmaya çalışması bu yöntemin avantajlı tarafıdır. Bu yöntemin iş parçasını tezgah tablasına bastırması iş parçası tutturma tertibatındaki boşlukları kapatabilmekte ve böylece titreşimleri azaltmaktadır. Titreşimin azalması da yüzey kalitesinde iyileşme sağlamaktadır. Aynı yönlü frezelemede kesici takımın iş parçasına giriş açısı sıfırdan farklı, iş parçasından çıkış açısı ise sıfır olmaktadır. Zıt yönlü frezelemede tabla ilerlemesi kesici takım dönüşü ile zıt yöndedir (Şekil 3.12.b). Zıt yönlü işlemede talaş kalınlığı sıfırdan maksimum değere artmaktadır. Zıt yönlü frezelemede kesme kuvvetlerinin başlangıçta sıfır olması ve giderek artması bu yöntemin avantajlı yanıdır. Fakat iş parçasını tezgah tablasından kaldırmaya çalışması bu yöntemin dezavantajlı tarafıdır. Zıt yönlü frezelemede kesici takımın iş parçasına giriş açısı sıfır, iş parçasından çıkış açısı ise sıfırdan farklı olmaktadır.

Zigzag takım yolunda kesici takım iş parçası yüzeyi ile sürekli temas halindedir (Şekil 3.11.c). Kesici takım bir pasoyu işledikten sonra o pasonun başlangıç noktasına gelirken (geri dönüşte) de kesme işlemi yapmaktadır. Bu nedenle bu takım yolunun işleme zamanını azalttığı söylenebilir. Offset takım yolunda kesme işlemi ya iş parçasının dışından içeriye doğru ya da içeriden dışarıya doğru olmaktadır (Şekil 3.11.d).



Şekil 3.11: Takım yolları. a) Aynı yönlü, b) Zıt yönlü, c) Zigzag, d) Offset.



Şekil 3.12: Tek yönlü frezeleme. a) Aynı yönlü, b) Zıt yönlü frezeleme.

Mikro frezelemede takım yollarının işleme performansı üzerindeki etkisini inceleyebilmek için deneyler tasarlanmıştır. Takım yollarının etkisi deneylerinde iş parçası malzemeleri olarak Al 7075 ve Ti6Al4V kullanılmıştır. Deneylerde $15 \times 10 \text{ mm}^2$ 'lik yüzey 1 defa işlenmiştir. Yüzeyler aynı yönlü, zıt yönlü ve zigzag frezeleme stratejileri ile işlenmiştir. $400 \text{ }\mu\text{m}$ çapında düz parmak freze kesici takım olarak seçilmiştir. Al 7075 malzemesi için devir sayısı 12000 dev/dak , ilerleme hızı 60 mm/dak , talaş derinliği $60 \text{ }\mu\text{m}$ ve yana kayma mesafesi $50 \text{ }\mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Ti6Al4V malzemesi için devir sayısı 12000 dev/dak , ilerleme hızı 75 mm/dak , talaş derinliği $60 \text{ }\mu\text{m}$ ve yana kayma mesafesi $50 \text{ }\mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Tüm deneylerde mikro kesici takımlar yaklaşık 20 mm yüksekliğinde ve iş parçası 5 mm yüksekliğinde (mengene yüzeyinden taşan yükseklik) bağlanmıştır. Ayrıca Ti6Al4V malzemesi için takım yollarının etkisi tezgaha yüksek hız kafası (Şekil 3.13) takılarak da incelenmiştir. Deneylerde maksimum 40000 dev/dak devir sayısına

ulaşabilen Pibomulti marka X9810 tipinde yüksek hız kafası kullanılmıştır. Takım yollarının etkisi deneylerinde kullanılan kesme şartları Tablo 3.5’de özetlenmiştir.



şekil 3.13: Yüksek hız kafası.

Tablo 3.5: Takım yollarının ve yüksek hız kafasının etkisi deneylerinde kullanılan kesme şartları.

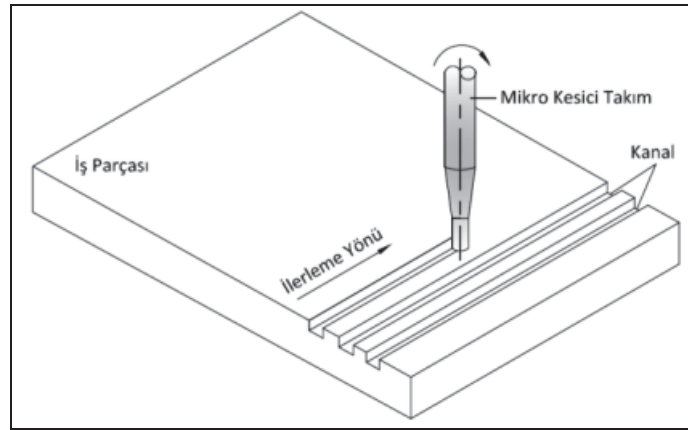
Deneyleer	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Talaş Derinliği (µm)	Yana Kayma Mesafesi (µm)
Al 7075 - Tezgah	12000	60	60	50
Ti6Al4V - Tezgah	12000	75	60	50
Ti6Al4V - Tezgah	12000	150	60	50
Ti6Al4V - Yüksek Hız Kafası	12000	75	60	50
Ti6Al4V - Yüksek Hız Kafası	28000	75	60	50
Ti6Al4V - Yüksek Hız Kafası	20000	150	60	50
Ti6Al4V - Yüksek Hız Kafası	28000	150	60	50

3.5.4. Devir Sayısının Etkisi Deneyleri

Devir sayısının etkisi deneylerinde iş parçası olarak Ti6Al4V kullanılmıştır. Deneylerde 15×10 mm²’lik yüzey 1 defa ve aynı yönlü frezeleme ile işlenmiştir. 800 µm çapında küresel uçlu parmak freze kesici takım olarak seçilmiştir. Deneyler CNC tezgahına yüksek hız kafası takılarak 3 farklı devir sayısında yürütölmüştür. Devir sayıları 12000, 20000 ve 28000 dev/dak olarak alınmıştır. İlerleme hızı 75 mm/dak, talaş derinliği 60 µm ve yana kayma mesafesi 50 µm olarak seçilmiştir. Tüm deneylerde mikro kesiciler yaklaşık 20 mm yüksekliğinde ve iş parçası 5 mm yüksekliğinde (mengeneden taşan yükseklik) bağlanmıştır.

3.5.5. Mekanistik Kuvvet Modelleme Deneyleri

Mikro frezelemede kesme kuvvetlerinin modellenmesi için mekanistik yaklaşım kullanılmıştır. Mekanistik kuvvet modelleme deneyleri 2 aşamadan meydana gelmektedir: Mekanistik kalibrasyon ve doğrulama deneyleri. Önce kuvvet modellerindeki kesme kuvveti katsayılarını belirlemek için mekanistik kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. Mekanistik kalibrasyon deneylerinde kesme hızı ve talaş derinliği sabit alınarak farklı ilerlemelerde kuvvetler ölçülmüştür. Bu çalışmada mekanistik kalibrasyon deneyleri 12000 dev/dak iş mili hızında, 50 µm talaş derinliğinde ve farklı ilerleme değerlerinde kanal işlenerek yapılmıştır (Şekil 3.14). İşlenen kanalların uzunluğu 15 mm olarak belirlenmiştir. Mekanistik kalibrasyon deneyleri sonucunda hesaplanan kesme kuvvetleri modele dahil edildikten sonra doğrulama deneyleri yapılmıştır. Doğrulama deneylerinin tasarımında Taguchi yöntemi kullanılmıştır ve deneylerde dikkate alınan faktörler ve seviyeleri Tablo 3.6'da sunulmuştur. Böylece hem kesme kuvveti modellerinin deneysel sonuçlar ile uyumu hem de işleme parametrelerinin kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.14: Mikro kanal frezeleme.

Tablo 3.6: Mekanistik kuvvet modeli doğrulama deneylerinde kullanılan faktörler ve seviyeleri.

Malzeme	Kod	Kontrol Faktörü	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Ti6Al4V (Kanal İşleme)	A	Devir sayısı (dev/dak)	10000	11000	12000
	B	İlerleme hızı (mm/dak)	24	48	72
	C	Talaş derinliği (µm)	50	100	150

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

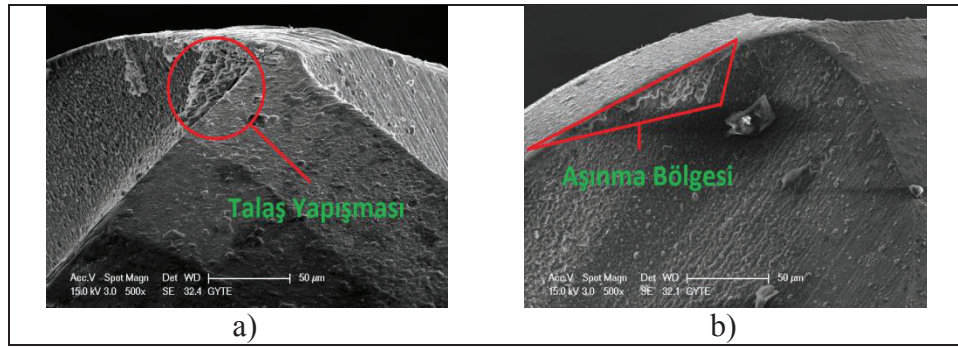
Deneylere başlamadan önce kesici takımların salgısı ölçülmüştür ve kesici takımların salgısının 2-6 µm aralığında değiştiği görülmüştür.

4.1. Taguchi Deney Tasarımı

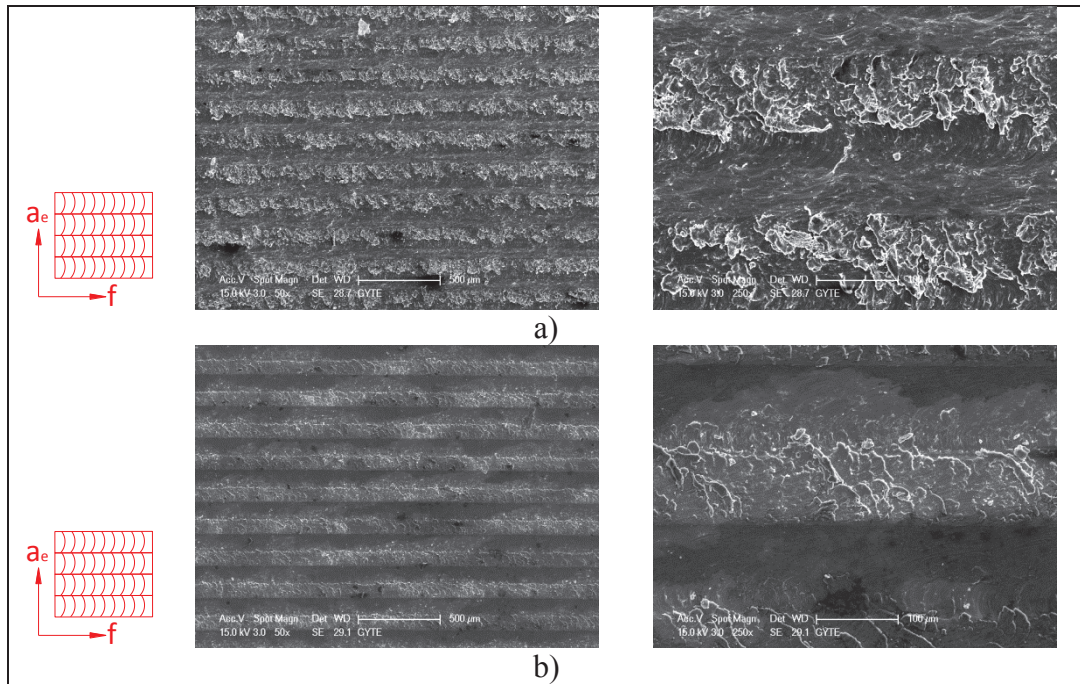
4.1.1. Al 7075 Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelemesi

Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri sonuçları hem kalitatif hem de kantitatif olarak incelenmiştir. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesi sonucu mikro kesici takımlarda meydana gelen aşınma için örnek görüntüler Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi kesici takıma iş parçası malzemesi yapışmıştır ve bu yapışmanın nedeninin Al 7075 alüminyum malzemesinin sünek yapısı olduğu düşünülmektedir. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi sonucunda iş parçası yüzeylerinin durumu Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu şekillerde iş parçası yüzeylerinin görüntüleri 50× ve 250× büyütme ile alınmıştır. Yüzey şekillerinde yana kayma izleri açık bir şekilde görülmüştür. İş parçası yüzeyleri büyütülerek incelendiğinde yüzeylerde plastik olarak deforme olmuş iş parçası malzemesinin yığınlar oluşturduğu görülmüştür. Bu malzeme yığınının nedeni Al 7075 malzemesinin sünek yapıda olmasıdır. Mikro frezelemede küresel uçlu parmak frezelerin kullanıldığı diğer çalışmalarda da iş parçası yüzeyinde malzeme yığınları görülmüştür [101]. Şekil 4.3.a'da mikro yüzey frezeleme esnasında ölçülen örnek bir kesme kuvveti-zaman grafiği gösterilmiştir. Bu çalışmada F_x ve F_y kuvvetleri dikkate alınmıştır. Genellikle, kesme kuvvetinin 3 bileşeni -statik, yarı-dinamik ve dinamik- analiz edilebilir. Statik bileşen kesici takım sehimi ile ilişkilidir ve her bir dönüşteki kesme kuvvetinin ortalama değeri olarak hesaplanabilir. Yarı-dinamik bileşen her bir iş mili dönüşünde kesme kuvvetinin değişimi ile temsil edilmektedir. Dinamik bileşen kesme prosesi dinamiği nedeniyle ve göreceli kesici takım-iş parçası yer değiştirmeleri üzerine bir reaksiyon olarak düşünülebilir [146]. Peak-to-valley (P-to-V) değeri kesme kuvvetinin yarı-dinamik bileşenini hesaplamak için

yaygın olarak kullanılan bir parametredir. P-to-V değeri iş milinin bir dönüşünde maksimum ve minimum değerler arasındaki genlik olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada kuvvet analizlerinde P-to-V değeri dikkate alınmıştır (Şekil 4.3.b). Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet sonuçları kantitatif olarak Tablo 4.1’de verilmiştir.



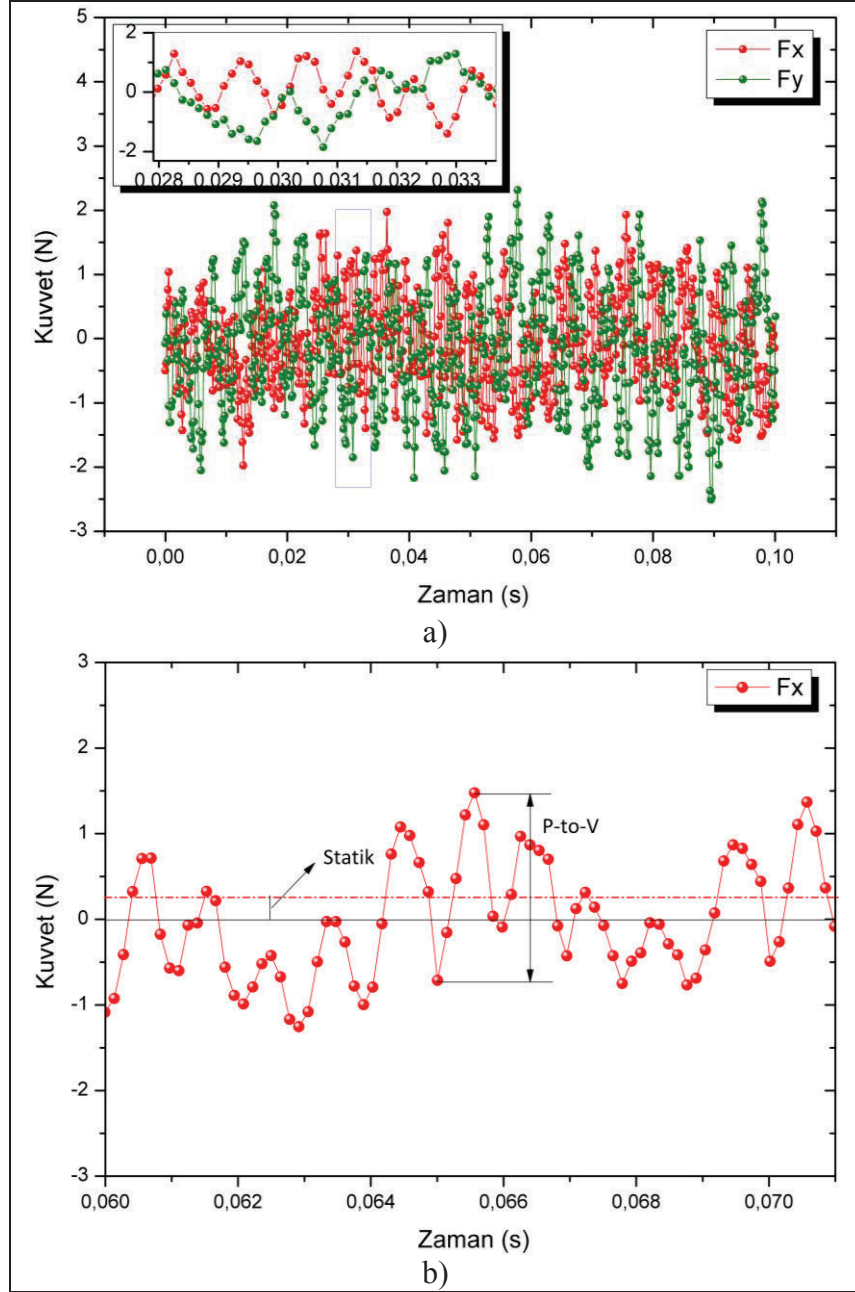
Şekil 4.1: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması görüntüleri. a) Deneş 5 (Devir sayısı: 11000 dev/dak, diş başına ilerleme: 1 µm/diş ve talaş derinliği: 100 µm), b) Deneş 8 (Devir sayısı: 12000 dev/dak, diş başına ilerleme: 1 µm/diş ve talaş derinliği: 50 µm).



Şekil 4.2: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde iş parçası yüzeylerinin görüntüleri. a) Deneş 5, b) Deneş 8.

Şekil 4.3.a’da verilen kesme kuvveti-zaman grafiği 2 farklı kesici kenardaki kuvvetin nasıl değiştirdini anlayabilmek için yeniden çizilmiştir ve örnek bir grafik Fx

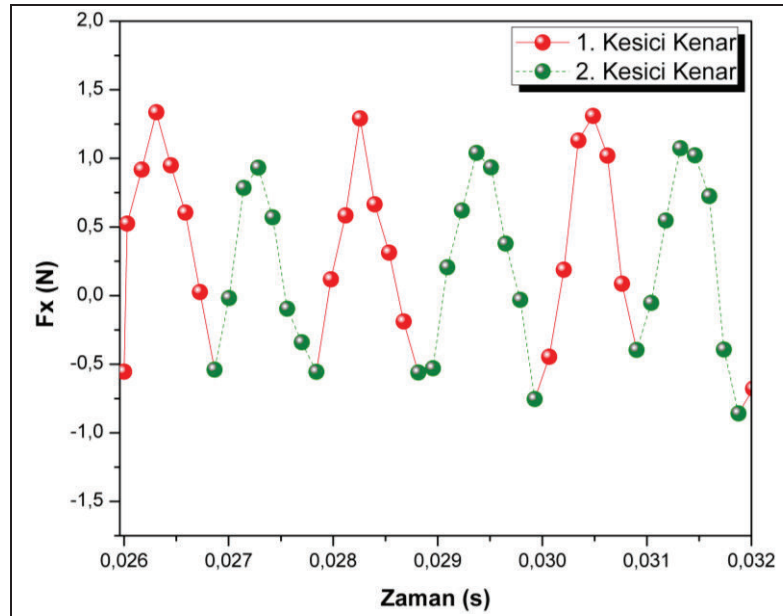
kuvveti için Şekil 4.4'te sunulmuştur. Bu grafik sayesinde her bir kesici kenara etkiyen kuvveti ayrı ayrı inceleyebilmek mümkün olmaktadır. Bu grafikte görüldüğü gibi kesici kenarların maksimum F_x kuvvetleri arasında az da olsa bir fark olmuştur. Kuvvetler arasındaki bu farkın nedeninin kesici takım salgısı olduğu düşünülmektedir. Literatürde de benzer sonuç bulunmuştur [147].



Şekil 4.3: Örnek kuvvet grafiği. a) Kesme kuvveti-zaman grafiği, b) Statik ve P-to-V kuvvet değerleri.

Tablo 4.1: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.

Deney No	Takım Aşınması (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	P-to-V Fx (N)	P-to-V Fy (N)
1	5.41	0.33	1.33	0.71
2	13.51	0.47	1.63	0.86
3	16.22	0.71	2.02	1.02
4	27.02	0.32	1.62	1.08
5	32.43	0.59	2.03	1.49
6	14.86	0.58	2.65	1.52
7	45.95	0.27	2.10	1.36
8	27.03	0.35	2.99	1.66
9	32.43	0.58	3.55	1.81



Şekil 4.4: 2 farklı kesici kenar için Fx kuvveti-zaman grafiği.

4.1.1.1. Regresyon Analizi

Bu çalışmada ölçülen çıktı değerlerini deney yapmadan tahmin edebilmek için modeller geliştirilmiştir. Modeller regresyon analizi ve bulanık mantık yöntemleri ile kurulmuştur. Regresyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkiyi, matematiksel model ile ifade eden bir istatistik analiz yöntemidir. Noktaları temsil eden en iyi eğriyi bulmak için kullanılan en yaygın yöntem en küçük kareler yöntemidir. En küçük kareler yöntemi, hataların kareleri toplamını minimum yapan bir eğri denklemini kurma temeline dayanmaktadır.

Bu çalışmada, bütün takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet denklemlerinin geliştirilmesinde işleme parametrelerinin etkilerini içeren birinci dereceden denklemler kurulmuştur. Birinci dereceden denklemlerin genel yapısı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (4.1)$$

Burada β her bir terimin katsayısıdır, k değişkenlerin sayısıdır ve ϵ hatadır.

Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet; devir sayısının, ilerlemenin ve talaş derinliğinin lineer bir kombinasyonu olarak dikkate alınır, takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kuvveti veren denklemler aşağıdaki gibi olacaktır:

$$VB = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 f_t + \beta_3 a_p + \epsilon \quad (4.2)$$

$$Ra = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 f_t + \beta_3 a_p + \epsilon \quad (4.3)$$

$$F_{x,y} = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 f_t + \beta_3 a_p + \epsilon \quad (4.4)$$

Bu denklemlerde β_0 , β_1 , β_2 ve β_3 katsayılarıdır, VB takım aşınması, Ra yüzey pürüzlülüğü, F kuvvet, n devir sayısı, f_t diş başına ilerleme, a_p talaş derinliği, ϵ ise hatadır.

Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede takım aşınması değerini veren denklem:

$$VB = -124 + 0.0117n - 4.96f_t + 0.315a_p \quad (4.5)$$

$$R^2 = \%99.3 \quad R^2(\text{adj}) = \%98.8$$

Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede yüzey pürüzlülüğü değerini veren denklem:

$$Ra = 0.563 - 0.000052n + 0.317f_t + 0.00207a_p \quad (4.6)$$

$$R^2 = \%94.7 \quad R^2 (\text{adj}) = \%91.6$$

Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede kuvvetleri veren denklemler:

$$Fx = -5.14 + 0.00061n + 1.06f_t - 0.00547a_p \quad (4.7)$$

$$R^2 = \%97.2 \quad R^2 (\text{adj}) = \%95.5$$

$$Fy = -3.22 + 0.000373n + 0.4f_t - 0.00013a_p \quad (4.8)$$

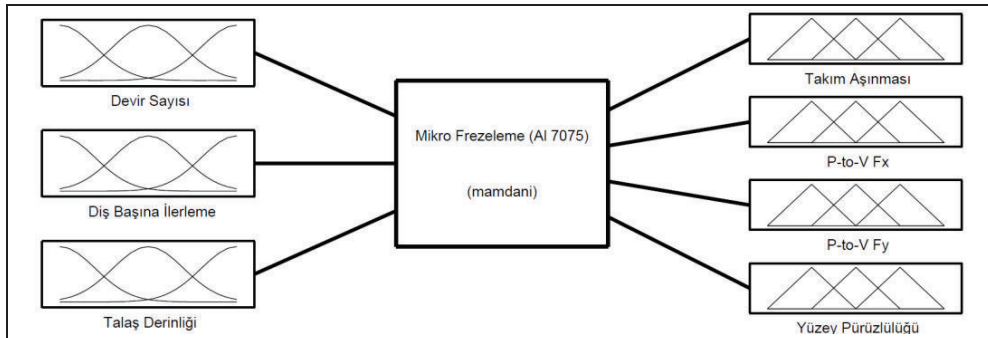
$$R^2 = \%94.2 \quad R^2 (\text{adj}) = \%90.8$$

Çoklu regresyon analizinde, regresyon katsayısı R^2 'nin %80'den büyük olması modelin yeterli olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada geliştirilen matematiksel modellerin tamamının tatmin edici olduğu ve Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini açıklamada yeterli olduğu bulunmuştur.

4.1.1.2. Bulanık Mantık

Günümüzde teknolojik gelişmeler ve insan taleplerinin daha mükemmeli araması nedeniyle karmaşık hale gelen mühendislik problemlerinin geleneksel yöntemlerle çözümü çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle uzman bilgisini öğrenebilen ve non-linear problemleri daha hızlı, hassas ve yüksek doğrulukta çözebilen modern akıllı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Normal insan zekası ile çözümü zor mühendislik problemlerinde yapay zeka yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar, tavlama algoritması, karınca kolonileri ve bunların hibrid kullanımı yapay zeka yöntemlerinin başlıcalarıdır. Bu çalışmada mikro frezelemede ölçülen tepkilerin modellenmesi için yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık kullanılmıştır. Bulanık mantık ilk defa Prof. Lotfi A. Zadeh tarafından yazılan makale ile

duyulmuştur [148]. Bulanık mantık yaklaşımı bulanık kümelere dayalıdır ve belirsiz, kesin olmayan verileri modellemede etkili bir metottur. Bulanık mantık matematiğin gerçek dünyaya uygulanmasıdır. Klasik Aristo mantığına göre, bir önerme ya doğru ya da yanlıştır. Fakat gerçek dünyadaki olaylar ne tamamen doğru ne de tamamen yanlıştır. Örnek vermek gerekirse, makro işlemede takım ömrü kriteri takım aşınmasının maksimum 0.3 mm olmasıdır. Takım aşınmasının 0.3 mm olması halinde takım aşınmış kabul edilirse, bu değer 0.29 mm olduğunda takımı aşınmamış olarak değerlendirmek klasik mantığa göre doğrudur, fakat bu takımı tamamen aşınmamış kabul etmek yanlıştır. Örneğin, havanın 30°C olması sıcak olarak kabul edilirse, 29°C sıcaklık için sıcak değildir demek doğru olmadığı gibi yanlıştadır. Bu nedenle, önermelerin doğru ve yanlış değerleri arasındaki değerler sıcak, ılık, soğuk gibi değerler kullanılarak alt kategorilere ayrılmalıdır. Bulanık mantık üyelik fonksiyonu, bulanık mantık operatörleri ve eğer-o halde (if-then) kurallarından meydana gelmektedir. Bu tezde, Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı, diş başına ilerleme ve talaş derinliği sistemin girdisi olarak kullanılırken, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy çıktıları olarak kullanılmıştır. Oluşturulan çok girişli-çok çıkışlı bulanık uzman sistem modeli Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



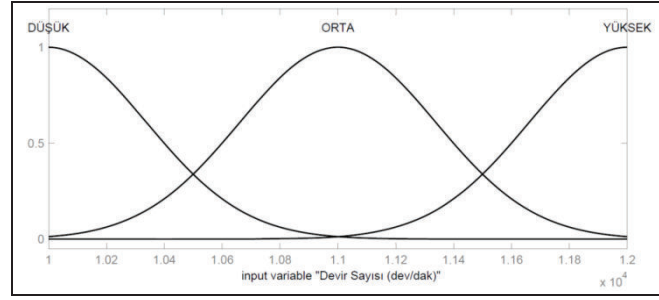
Şekil 4.5: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin tahmini için bulanık mantık sistemi.

Üyelik işlevi bir kümeyi oluşturan elemanların kümeye hangi üyelik derecesi ile ait olduğunu belirten bir işlemdir ve “0” ile “1” arasında olabilir. Üyelik işlevi vasıtasıyla girdilerin üyelik derecesi belirlenmiştir. Bu çalışmada girdilerin (sayısal değerlerin) sözel olarak ifade edilebilmesi için Gaussian üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Gaussian üyelik fonksiyonu eşitlik (4.9) ile ifade edilmektedir.

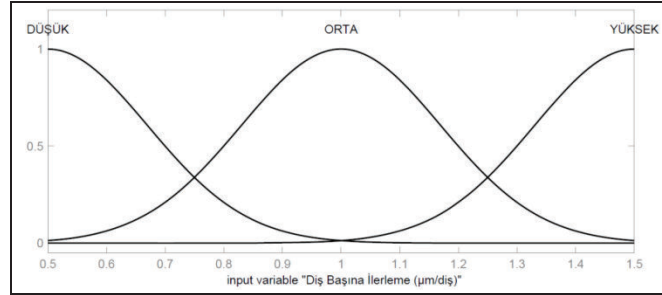
$$\mu(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.9)$$

Burada c ortalama değerdir ve σ standart sapmadır.

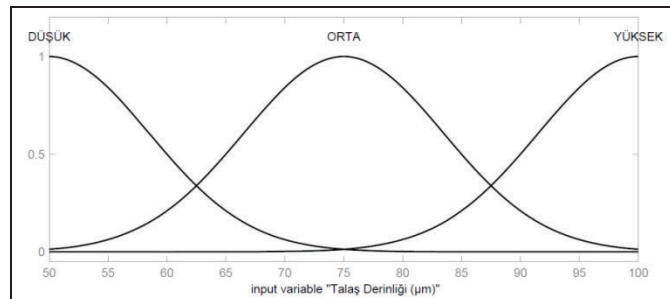
Girdilerin üyelik fonksiyonu düşük, orta ve yüksek olarak üç kategoride düşünülmüştür (Şekil 4.6-4.8). Üyelik fonksiyonu grafiğinde devir sayısı, diş başına ilerleme ve talaş derinliği için “y” değeri maksimum “ $\mu=1$ ” ve minimum “ $\mu=0$ ”dır (μ =Üyelik fonksiyonun derecesi).



Şekil 4.6: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.



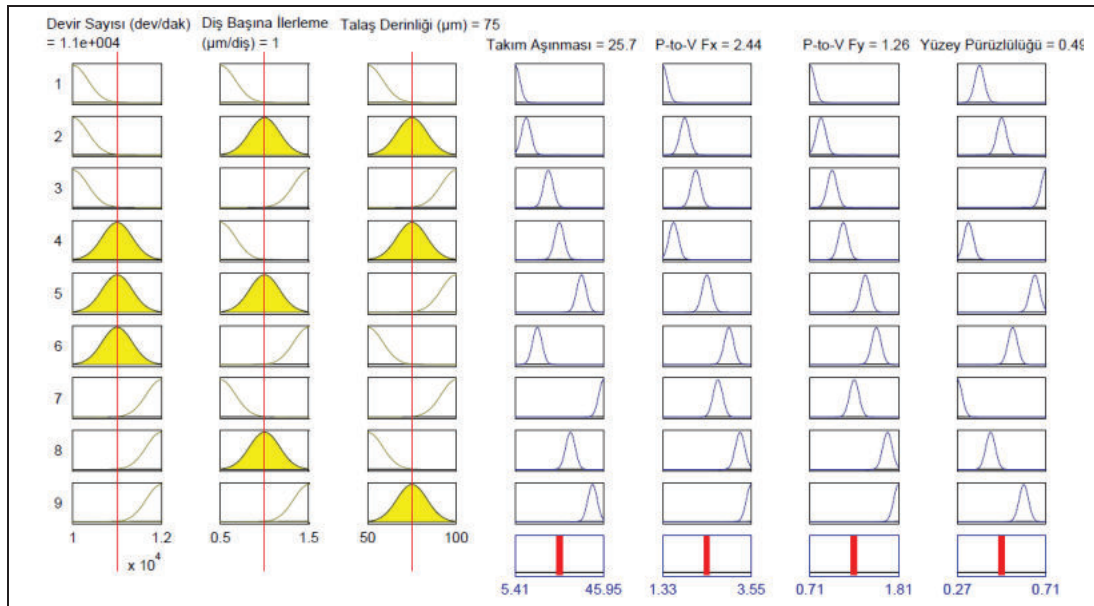
Şekil 4.7: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde diş başına ilerleme için üyelik fonksiyonu grafiği.



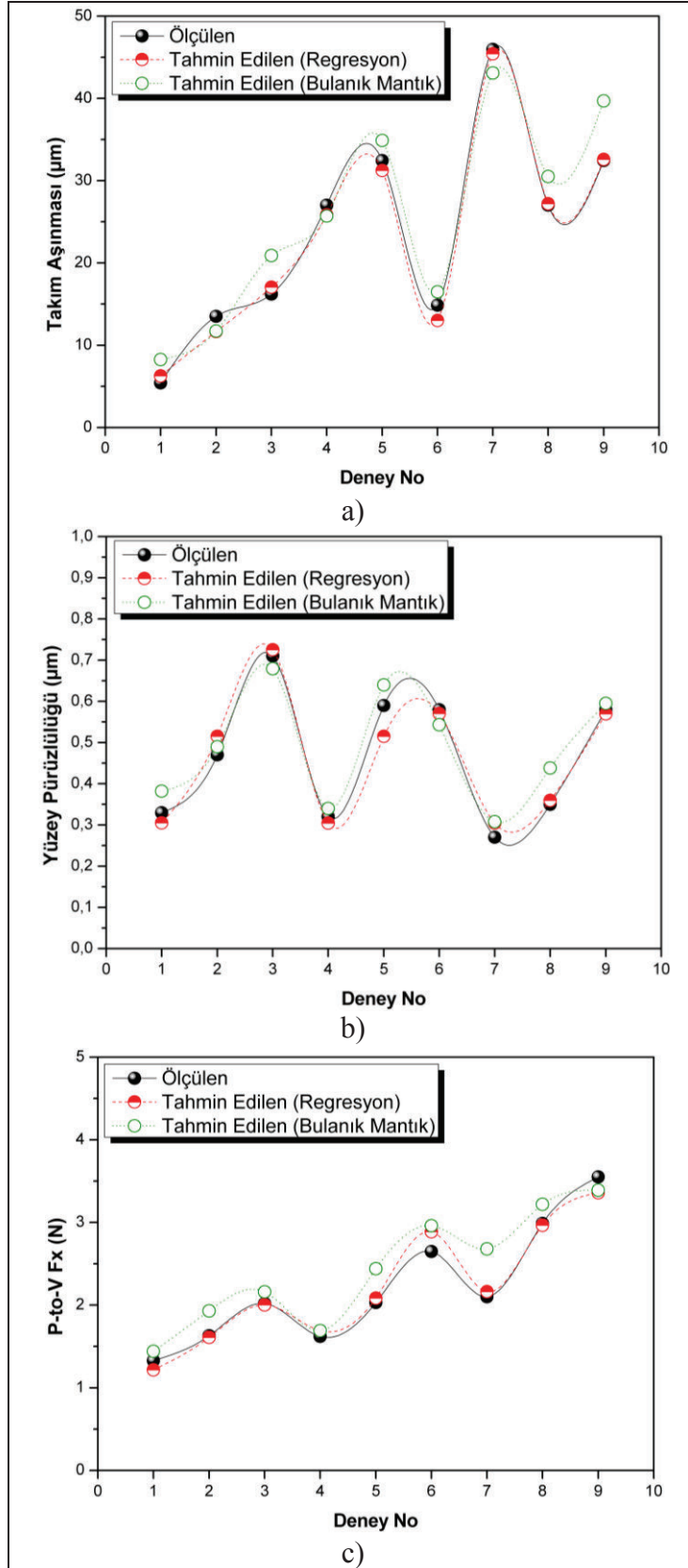
Şekil 4.8: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.

Bulanık mantık sisteminde, eğer-o halde kuralları bulanık mantığı meydana getiren şartları formüle edebilmek amacı ile kullanılmaktadır. Takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini modellemek için bu çalışmada 9 adet kural yazılmıştır. Burada, devir sayısı, diş başına ilerleme ve talaş derinliği; sayısal değerlerle tanımlanmış düşük, orta ve yüksek şeklinde gruplandırılmış sözel ifadelerdir. Oluşturulan kuralların “eğer” kısmı girdi olarak “o halde” kısmından sonraki kısımlar ise sonuç olarak adlandırılmaktadır. Bulanık mantıkta kurallar deneysel sonuçlara, istatistiksel analize ve uzman tecrübesine göre yazılmaktadır. Bulanık mantık sisteminde herhangi bir işleme şartında takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler sayısal değer olarak belirlenebilmektedir. Bu durum Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

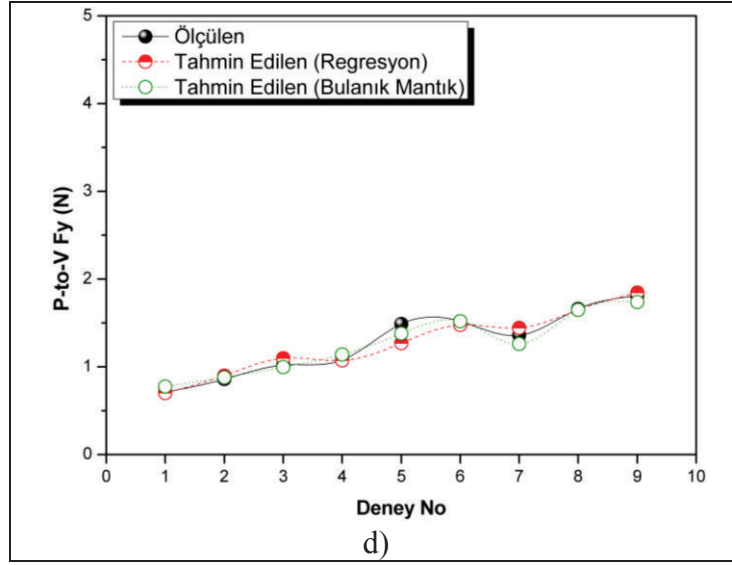
Kurallara göre çalıştırılan bulanık mantık sistemiyle çıktılar sayısal olarak tahmin edilebilmektedir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy için ölçülen ve hem regresyon hem de bulanık mantık yöntemleri ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırması Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modellerinin tamamının tatmin edici olduğu ve takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini açıklamada yeterli olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.9: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede bulanık mantık ile çıktı değerlerinin tahmini.

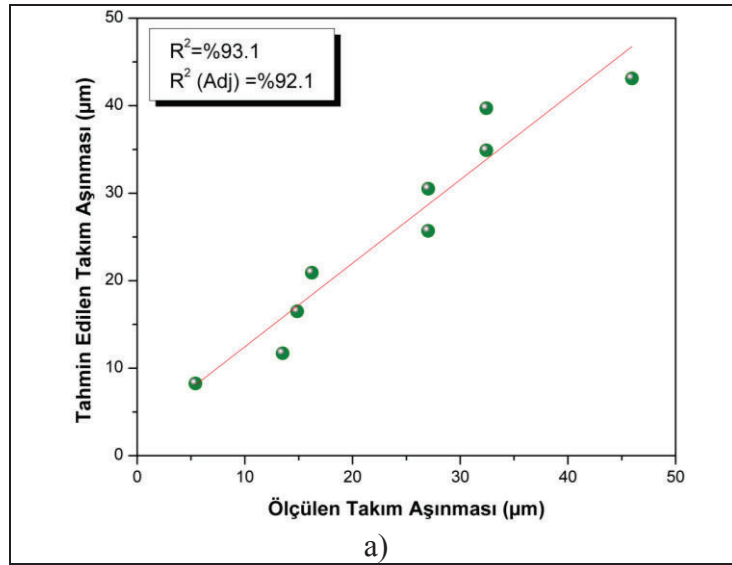


Şekil 4.10: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

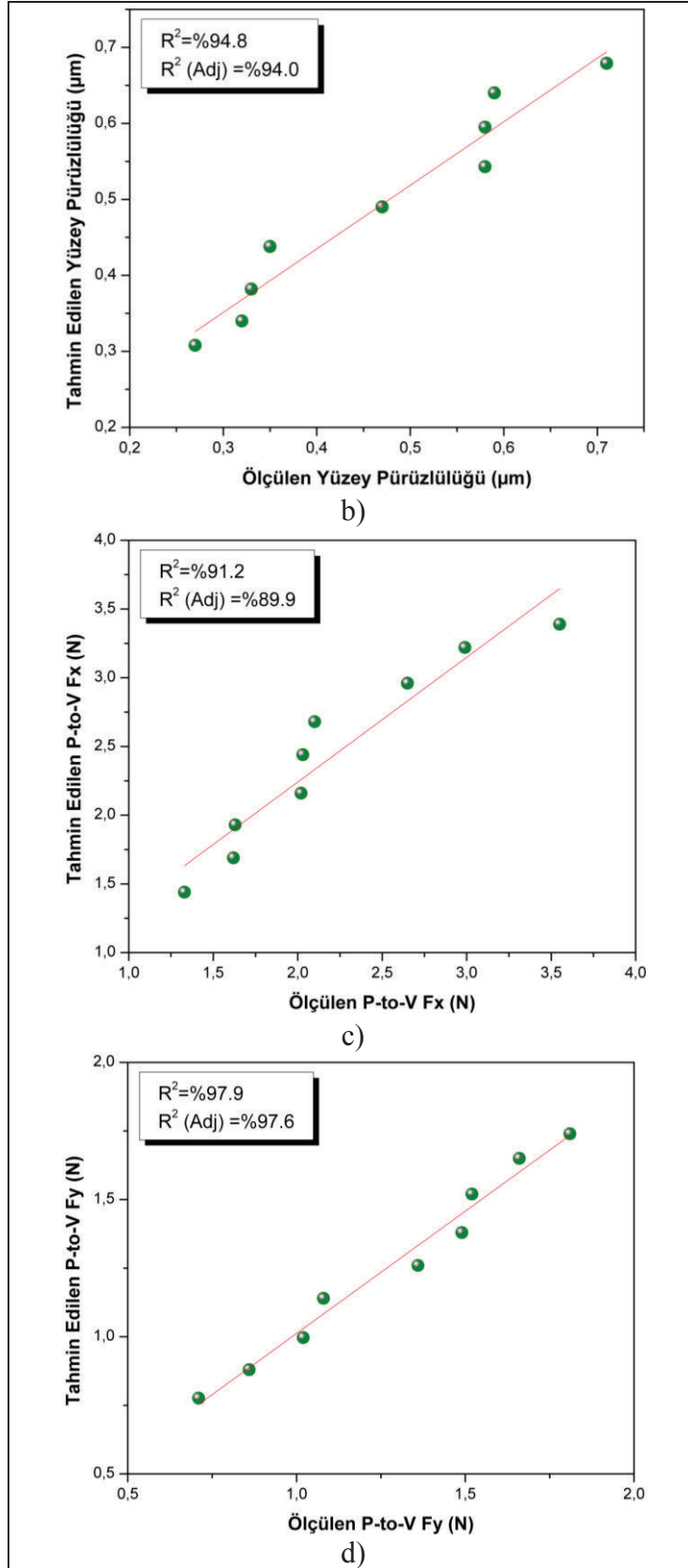


Şekil 4.10: Devam.

Bulanık mantık ile geliştirilmiş modellerin etkinliğini belirleyebilmek için Şekil 4.11’de verildiği gibi grafikler çizilmiştir. Bulanık mantık modellerinin tümü için R^2 değerlerinin yaklaşık %90 ve üzerinde olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.11: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin öölçülen değerlerle karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.



Şekil 4.11: Devam.

4.1.1.3. S/N Analizi

Taguchi deney tasarım yönteminde sinyal, sistemde ölçülmek istenen değer olarak ifade edilmektedir. Gürültü ise ölçüm içindeki istenmeyen faktörlerdir. 3 tip sinyal/gürültü (S/N) oranı yaygın olarak kullanılmaktadır [149].

- Hedef değer en iyi.

$$S/N = 10 \cdot \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.10)$$

- En küçük en iyi.

$$S/N = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{j} \cdot \sum_{i=1}^j y_i^2 \right) \quad (4.11)$$

- En büyük en iyi.

$$S/N = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{j} \cdot \sum_{i=1}^j \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.12)$$

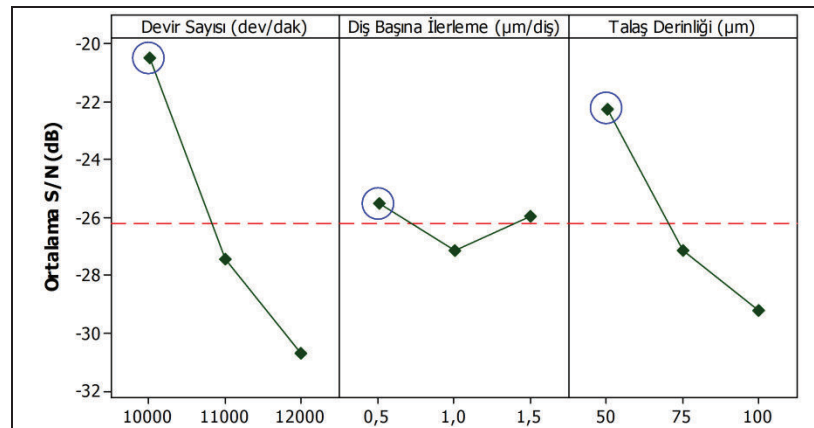
Burada y performans karakteristiklerinin değerlerini (takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ya da kuvvetler), j deney sayısını, \bar{y} deney değerlerinin ortalamasını, σ standart sapmayı ifade etmektedir.

Her üç formülde de hedef S/N oranını maksimum yapmaktır. Bu tezde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler ölçüldüğü için, analizlerde en küçük en iyi formülü dikkate alınarak S/N oranı hesaplanmıştır. Tablo 4.2'de takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet sonuçları için S/N oranları sunulmuştur.

Tablo 4.2: Al 7075 malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.

Deney No	S/N Oranları (dB)			
	Takım Aşınması	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	-14.664	9.630	-2.477	2.975
2	-22.613	6.558	-4.244	1.310
3	-24.201	2.975	-6.107	-0.172
4	-28.634	9.897	-4.190	-0.668
5	-30.219	4.583	-6.150	-3.464
6	-23.440	4.731	-8.465	-3.637
7	-33.246	11.373	-6.444	-2.671
8	-28.637	9.119	-9.513	-4.402
9	-30.219	4.731	-11.005	-5.154

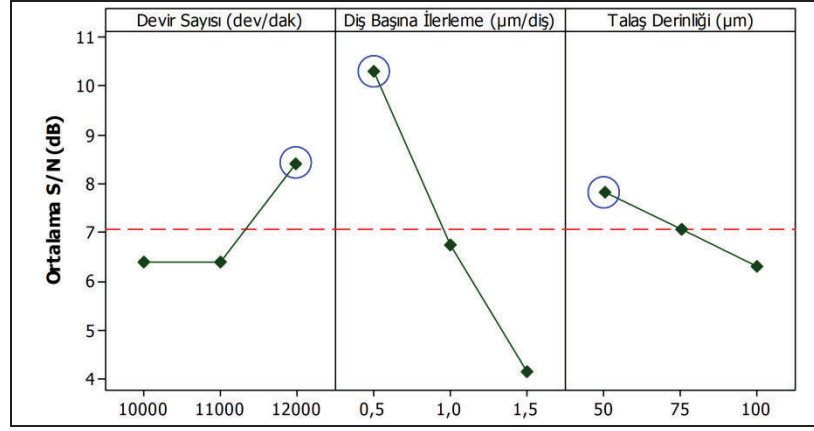
Şekil 4.12-4.15 kesme parametrelerinin takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet üzerindeki etkilerini göstermektedir. Her bir faktör için bulunan S/N oranının en büyük değeri, en iyi sonucu (takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve kuvvetin en küçük olduğu deneyin sonucunu) ifade etmektedir. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması için optimum işleme şartları seti A1B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.12). Yani, takım aşınmasını minimize etmek için en iyi kombinasyon devir sayısının 10000 dev/dak, diş başına ilerleme 0,5 µm/diş ve talaş derinliği 50 µm olduğu şartlar olarak bulunmuştur.



Şekil 4.12: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelenmede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.

Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek için optimum işleme şartları A3B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.13).

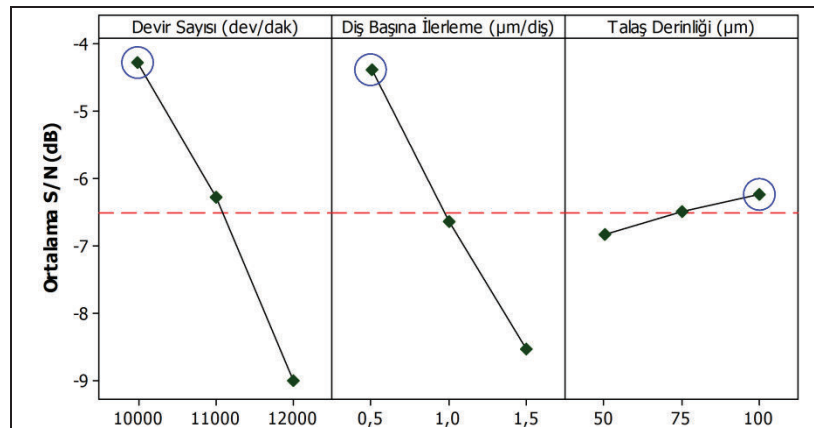
Düşük yüzey pürüzlülüğü için optimum parametreler şöyle bulunmuştur: devir sayısı 12000 dev/dak, diş başına ilerleme 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliği 50 μm .



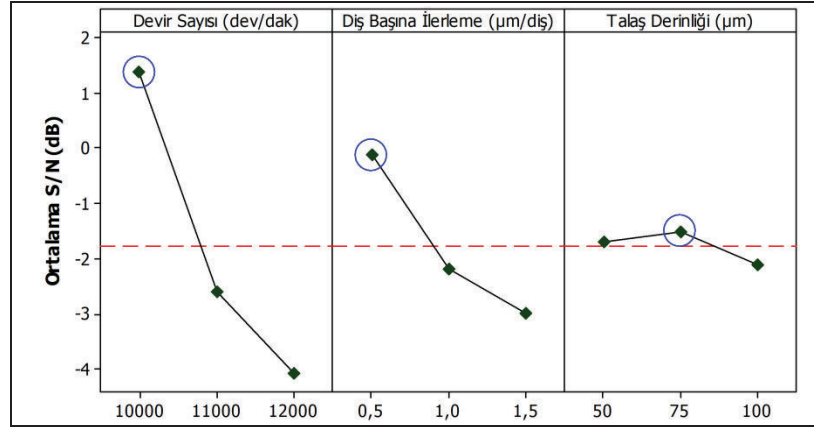
Şekil 4.13: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.

S/N analizi sonucunda Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvveti için optimum şartlar A1B1C3 olarak bulunmuştur (Şekil 4.14). P-to-V Fx kuvvetinin minimum olduğu durum devir sayısının 10000 dev/dak, diş başına ilerlemenin 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliğinin 100 μm olduğu şartlar olmuştur.

Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fy kuvveti için optimum işleme şartları A1B1C2 olarak bulunmuştur (Şekil 4.15). Devir sayısının 10000 dev/dak, diş başına ilerlemenin 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliğinin 75 μm olduğu kesme şartlarında minimum P-to-V Fy kuvveti elde edilmiştir.



Şekil 4.14: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.

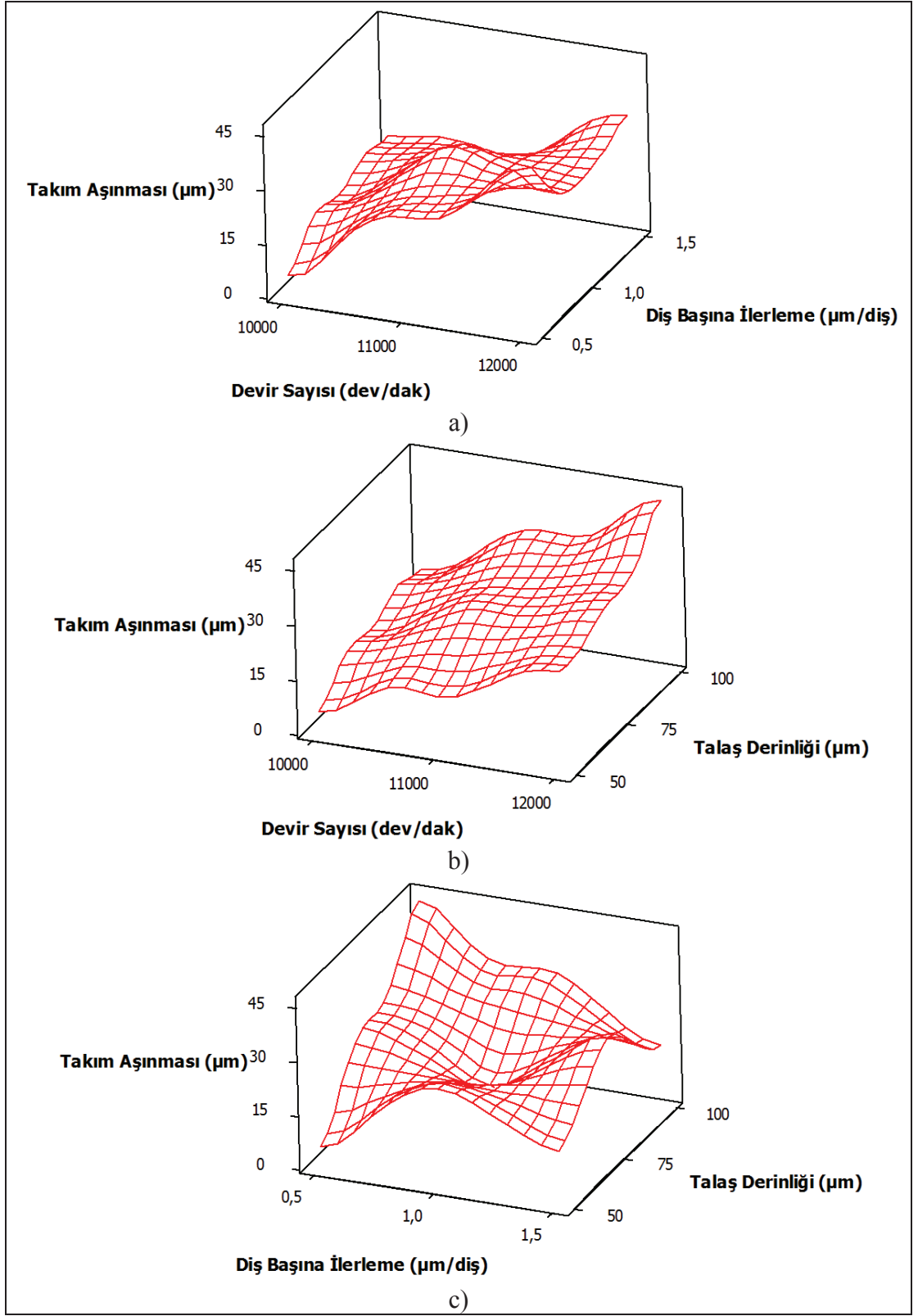


Şekil 4.15: Al 7075 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.

Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde S/N analizi sonucunda yüzey pürüzlülüğü hariç bütün ölçülen çıktılarda devir sayısının en etkili faktör olduğu bulunmuştur. Bu sonuca ana etkiler grafiğindeki (Şekil 4.12-4.15) her bir faktörün eğim değişim derecesi ile karar verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ise en etkili faktör diş başına ilerleme olarak bulunmuştur.

4.1.1.4. İşleme Şartlarının Etkisi

Mikro frezelemede işleme parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkisini inceleyebilmek için 3D yüzey grafikleri çizilmiştir. 3D yüzey grafiklerinde bir parametre sabit tutulup diğer iki parametre değiştirilmiştir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy için 3D yüzey grafikleri Şekil 4.16-4.19'da gösterilmiştir. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.16.a ve Şekil 4.16.b) ve talaş derinliği (Şekil 4.16.b) arttıkça takım aşınması artmıştır. Takım aşınmasının devir sayısı ile artışı literatürde de gözlemlenmiştir [99]. Devir sayısı arttığında, takım-iş parçası temas alanındaki sıcaklık artmaktadır ve sıcaklıktaki bu artış takım aşınmasında artışa neden olmaktadır. Diş başına ilerlemenin arttırılması başlangıçta takım aşınmasının artmasına neden olmuştur, fakat bu parametrenin daha fazla arttırılması aşınmayı azaltmıştır (Şekil 4.16.c). Düşük diş başına ilerlemelerde mikro kesicilerdeki aşınmanın düşük olduğu literatürde de rapor edilmiştir [46].

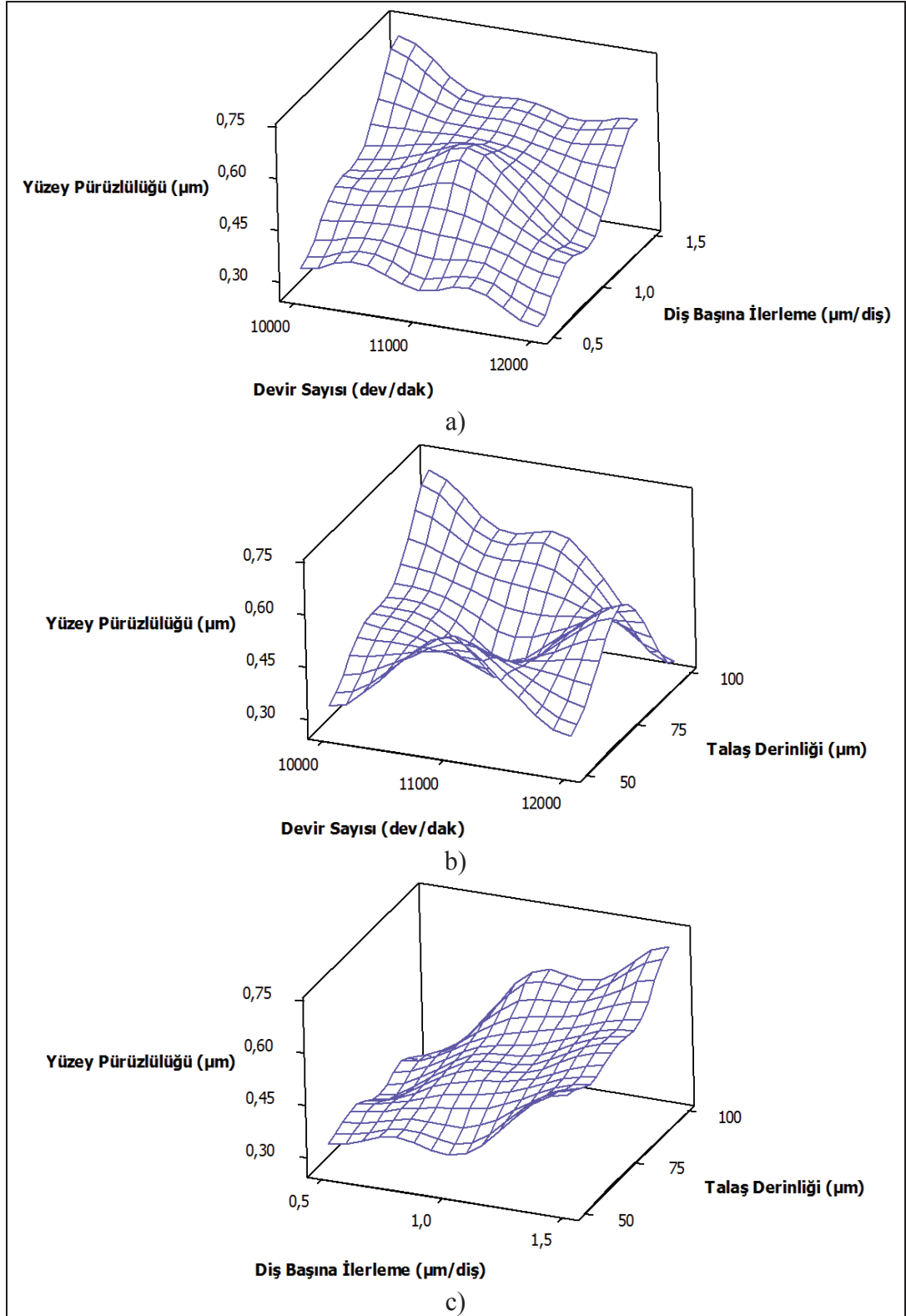


Şekil 4.16: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve diş başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Diş başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

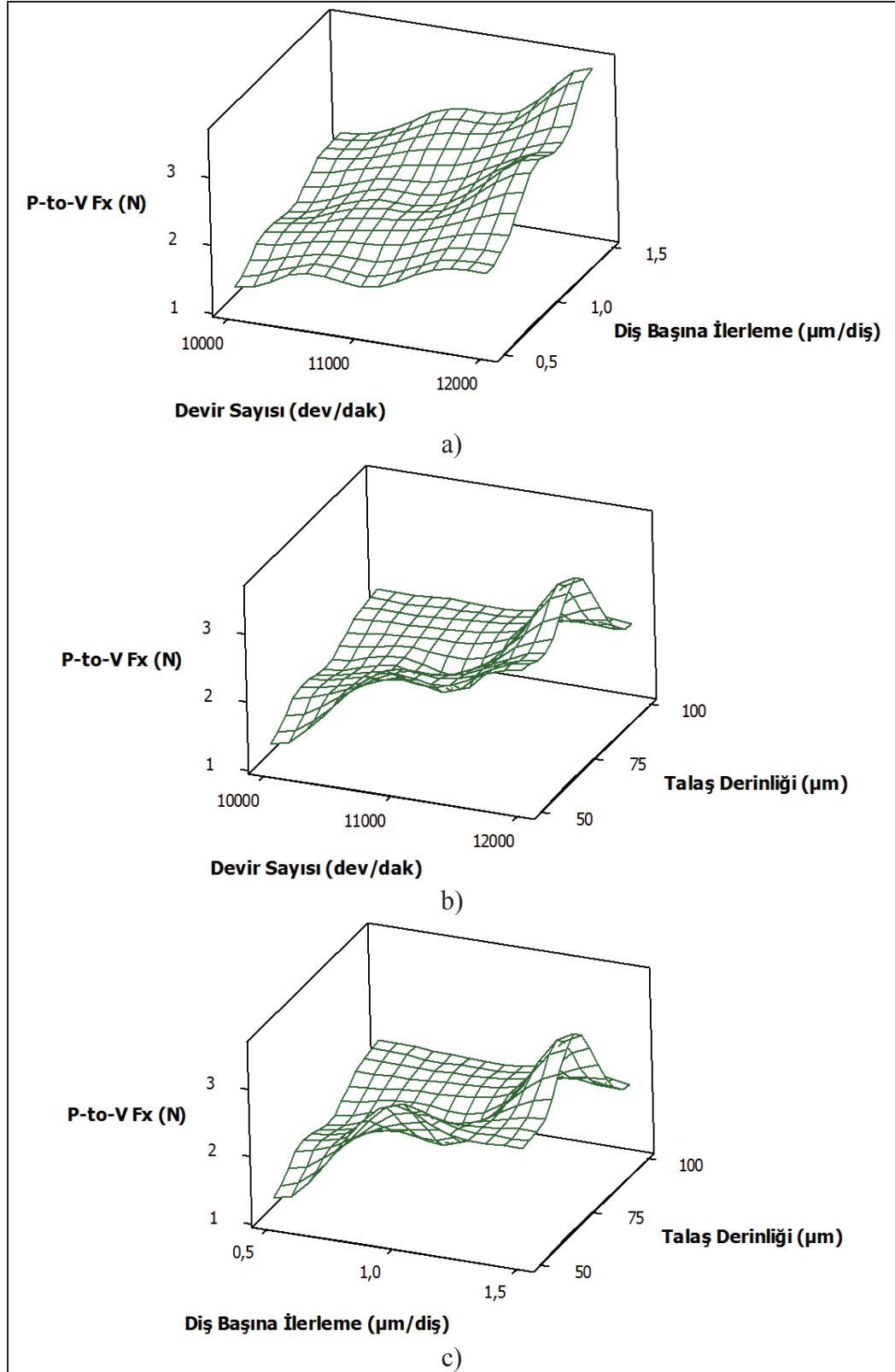
Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının artması yüzey pürüzlülüğünü azaltmıştır (Şekil 4.17.a) ve bu sonuç literatür ile uyumludur [39], [105]. Uhlmann ve arkadaşları [91] da çalışmalarında benzer bir sonuç bulmuştur ve artan devir sayısı ile yüzey pürüzlülüğünün azalması serbest yüzey üzerindeki talaş yığılması (built-up edge, BUE) ile açıklanmıştır. Ayrıca devir sayısı arttıkça sıcaklık daha fazla olacak ve bu da iş parçasının yumuşamasına neden olacaktır. Bu durum yüksek devir sayılarında yüzey kalitesinin iyileşmesinin nedenidir. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde artan dış başına ilerleme (Şekil 4.17.a) ve talaş derinliği (Şekil 4.17.c) ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur. Artan ilerleme ile yüzey pürüzlülüğünün artması makro frezelemede de gözlemlenen bir sonuçtur ve bu sonuç mikro frezeleme ile ilgili yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [37], [43], [92], [100], [102], [103], [105]. Yüzey pürüzlülüğünün artan talaş derinliği ile artması da literatürde gözlenmiştir [29].

Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.18.a ve Şekil 4.18.b) ve dış başına ilerleme (Şekil 4.18.a) arttıkça P-to-V Fx kuvvetinin arttığı bulunmuştur. P-to-V Fx kuvvetinin dış başına ilerleme ile artması makro frezeleme ile uyumludur. Ayrıca talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisinin değişken olduğu bulunmuştur (Şekil 4.18.c).

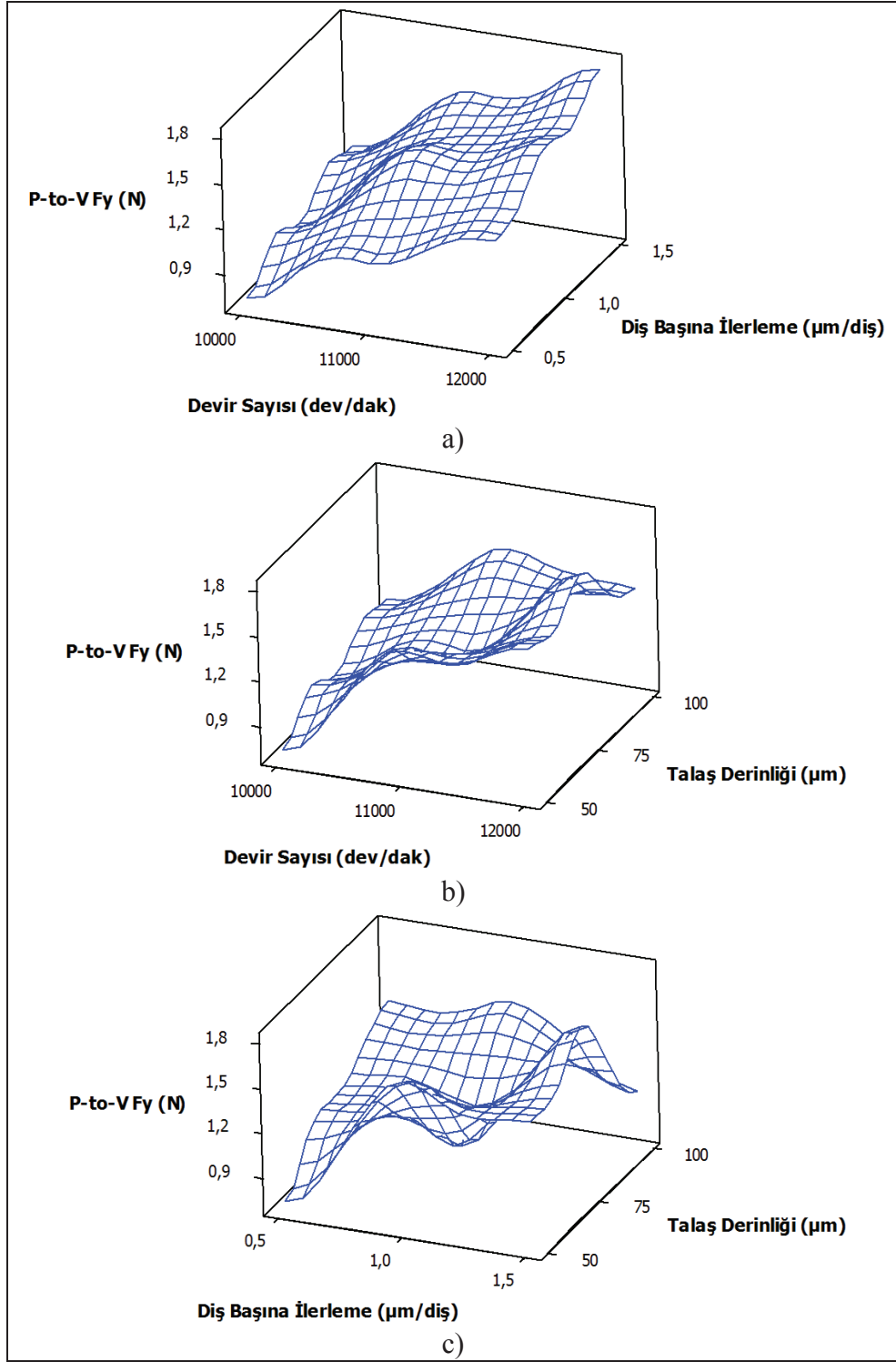
P-to-V Fx kuvvetinde olduğu gibi devir sayısı (Şekil 4.19.a ve Şekil 4.19.b) ve dış başına ilerleme (Şekil 4.19.a) arttıkça P-to-V Fy kuvveti artmıştır. Literatürde kesme kuvvetlerinin (Fx ve Fy) devir sayısı [91], dış başına ilerleme [46], [48], [91], [98], [105] ve talaş derinliği [48] ile arttığı ifade edilmiştir. Kuvvetlerin ilerleme ile artması artan ilerlemede talaş kesit alanının artması ile açıklanmıştır [98].



Şekil 4.17: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve diş başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Diş başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.18: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve diş başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Diş başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.19: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde a) Devir sayısının ve diş başına ilerlemenin, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) Diş başına ilerlemenin ve talaş derinliğinin P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

4.1.1.5. Varyans Analizi (ANOVA)

ANOVA ile çıktı üzerinde hangi faktörlerin ne kadar etkin oldukları istatistikî olarak belirlenir. Hedef, faktörlerin çıktıları ne oranda etkilediklerini ortaya koyabilmek ve bulunan sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliğini test etmektir. Al 7075 malzemesi için ölçülen çıktılar için ANOVA tablosu hazırlanmıştır ve Tablo 4.3'ten Tablo 4.6'ya kadar bu sonuçlar sunulmuştur. Tablolarda katkı (%) değeri, o faktörün sonuçlara katkısının tüm faktörler içerisindeki oranını yüzde olarak vermektedir. %95 güvenilirlik seviyesinde, serbestlik derecesi (gruplar arası) 2 ve serbestlik derecesi (grup içi) 2 için $F_{0,05;2;2}=19$ değeri standart F tablolarından alınmıştır. Hesaplanan F ile tablodan alınan F karşılaştırılarak faktörlerin o çıktı üzerinde önemli olup olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.3'te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme ve talaş derinliği; Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını sırasıyla %66.565, %3.041 ve %30.100 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı ve talaş derinliği için hesaplanan F değeri (Tablo 4.3), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Mikro frezelemede takım aşınmasının en fazla devir sayısı tarafından etkilendiği diğer çalışmalarda da belirtilmiştir [11], [150].

Tablo 4.3: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	826.60	413.30	226.78	0.004	66.565
İlerleme	2	37.76	18.88	10.36	0.088	3.041
Talaş Derinliği	2	373.78	186.89	102.55	0.010	30.100
Hata	2	3.65	1.82			0.294
Toplam	8	1241.79				100

Tablo 4.4'te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme ve talaş derinliği; Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla %10.419, %78.124 ve %8.550 etkilemektedir. Mikro frezelemede ilerleme için hesaplanan F değeri (Tablo 4.4), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Mikro

frezelemede yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin ilerleme olduğu diğer çalışmalarda da ifade edilmiştir [29], [140]. Talaş derinliğinin Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü fazla etkilemediği ve bu sonucun da literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür [29], [100], [141].

Tablo 4.5’de görüldüğü gibi devir sayısı, ilerleme ve talaş derinliği; Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvvetini sırasıyla %55.364, %40.485 ve %3.018 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı ve ilerleme için hesaplanan F değeri (Tablo 4.5), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının ve ilerlemenin P-to-V Fx kuvveti üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.6’da verildiği gibi devir sayısı, ilerleme ve talaş derinliği; Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fy kuvvetini sırasıyla %76.020, %22.325 ve %0.334 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.6), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının P-to-V Fy kuvveti üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Talaş derinliğinin kuvvetler (Fx ve Fy) üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu literatürde de belirtilmiştir [46].

Tablo 4.4: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.020067	0.010033	3.58	0.218	10.419
İlerleme	2	0.150467	0.075233	26.87	0.036	78.124
Talaş Derinliği	2	0.016467	0.008233	2.94	0.254	8.550
Hata	2	0.005600	0.002800			2.907
Toplam	8	0.192600				100

Tablo 4.5: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	2.29040	1.1452	48.87	0.020	55.364
İlerleme	2	1.67487	0.8374	35.74	0.027	40.485
Talaş Derinliği	2	0.12487	0.0624	2.66	0.273	3.018
Hata	2	0.04687	0.0234			1.133
Toplam	8	4.13700				100

Tablo 4.6: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.86836	0.43418	57.55	0.017	76.020
İlerleme	2	0.25502	0.12751	16.90	0.056	22.325
Talaş Derinliği	2	0.00382	0.00191	0.25	0.798	0.334
Hata	2	0.01509	0.00754			1.321
Toplam	8	1.14229				100

4.1.1.6. Çoklu Optimizasyon

Bu çalışmada ölçülen tepkilerin çoklu optimizasyonu için gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem 1982 yılında Prof. Julong Deng tarafından ortaya atılmıştır. Gri teori, belirsizliğin sayısallaştırılmasında kullanılan bir metottur. Gri sistem teorisinde, belirsizliğin olmadığı bilgiye sahip olan bir sistem beyaz renk ile, belirsizliğin olduğu bir sistem siyah renk ile sembolize edilmiştir. Kısmi bilgiye veya kısmi belirsizliğe sahip olan sistemler gri sistemler olarak isimlendirilmiştir [151].

Ölçülen tepkiler farklı kaynaklardan geldiği ve farklı birimlerde olduğu için gri ilişkisel analiz yönteminin ilk aşaması değerlerin aynı birime çevrilmesidir. Gri teoride bu normalizasyon işlemine gri ilişkisel oluşum denilmektedir [151]. Bu çalışmada daha düşük daha iyi durumundaki normalizasyon formülü kullanılmıştır (eşitlik (4.13)).

$$x_i^*(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (4.13)$$

Burada $x_i^*(k)$ normalize edilmiş değer, $\max(x_i^0(k))$ ve $\min(x_i^0(k))$ sırasıyla k. tepkideki $x_i^0(k)$ nın en büyük ve en küçük değerleridir. Bu çalışmada dört tepki ölçüldüğünden k değeri 1, 2, 3 ve 4 olmaktadır. Normalizasyon işlemi sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.

Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	1.000	0.864	1.000	1.000
2	0.800	0.545	0.865	0.864
3	0.733	0.000	0.689	0.718
4	0.467	0.886	0.869	0.664
5	0.333	0.273	0.685	0.291
6	0.767	0.295	0.405	0.264
7	0.000	1.000	0.653	0.409
8	0.467	0.818	0.252	0.136
9	0.333	0.295	0.000	0.000

Normalize edilen değerler referans serisinden çıkartılarak uzaklık matrisi hesaplanmıştır (eşitlik (4.14)).

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0^*(k) - x_i^*(k)\| \quad (4.14)$$

Daha sonra gri ilişkisel katsayı hesaplanmıştır (eşitlik (4.15)).

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta\Delta_{max}} \quad 0 < \xi_i(k) \leq 1$$

$$\Delta_{min} = \min_{\forall j \in I} \min_{\forall k} \|x_0^*(k) - x_j^*(k)\| \quad (4.15)$$

$$\Delta_{max} = \max_{\forall j \in I} \max_{\forall k} \|x_0^*(k) - x_j^*(k)\|$$

ζ , 0 ile 1 arasında bir katsayıdır ve yapılan çalışmalar sonucunda bu değer gri ilişkisel sırayı değiştirmedeği bilindiğinden bu çalışmada 0.5 değeri alınmıştır. Gri ilişkisel katsayı değerleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.

Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	1.000	0.786	1.000	1.000
2	0.714	0.524	0.787	0.786
3	0.652	0.333	0.617	0.640
4	0.484	0.815	0.793	0.598
5	0.429	0.407	0.613	0.414
6	0.682	0.415	0.457	0.404
7	0.333	1.000	0.590	0.458
8	0.484	0.733	0.401	0.367
9	0.429	0.415	0.333	0.333

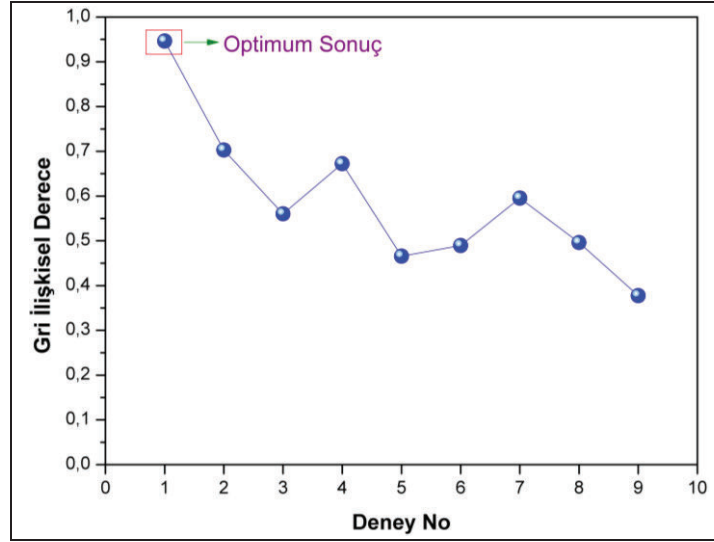
Katsayılar hesaplandıktan sonra gri ilişkisel dereceler bulunur (eşitlik (4.16)).

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (4.16)$$

Tablo 4.9’da ve Şekil 4.20’de gri ilişkisel dereceler verilmiştir. En yüksek (optimum) değeri 1 numaralı deney vermiştir. Yani minimum takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet 1 numaralı deneyde kullanılan işleme şartlarında elde edilmiştir.

Tablo 4.9: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.

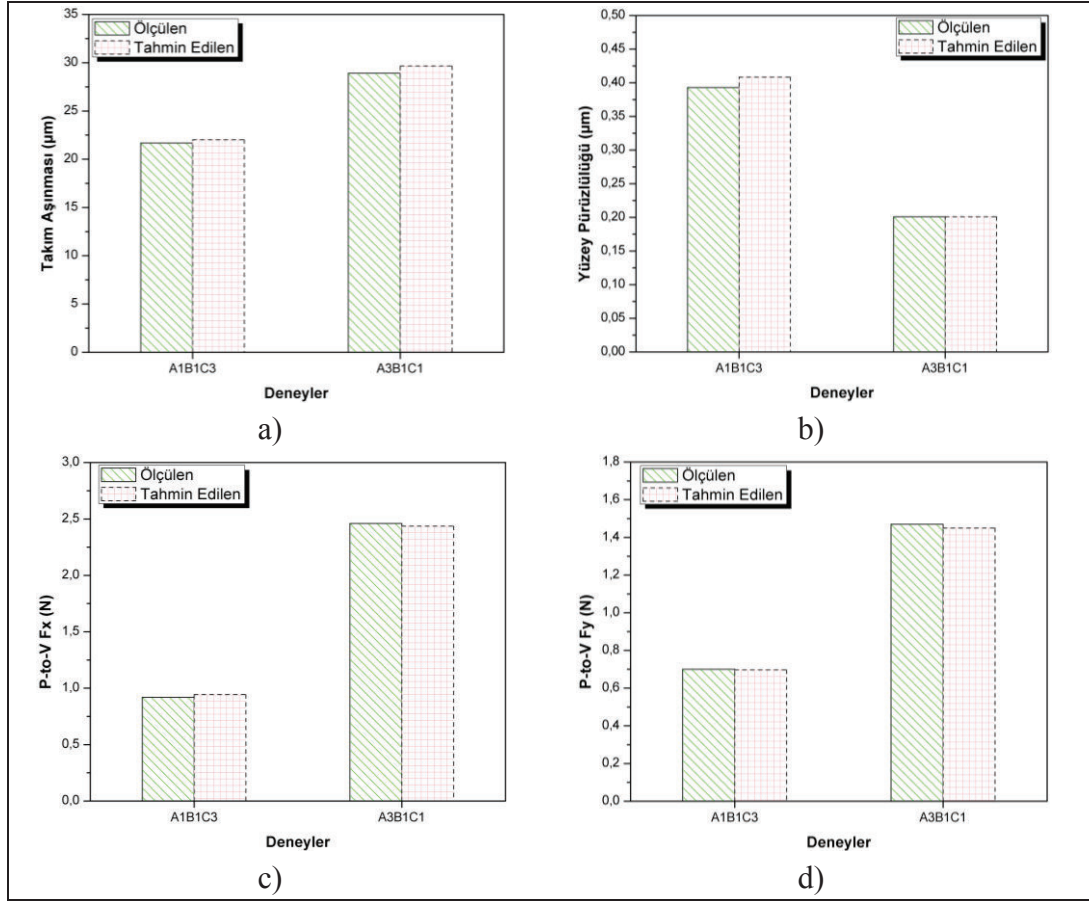
Deney No	Devir Sayısı (dev/dak)	Diş Başına İlerleme (µm/diş)	Talaş Derinliği (µm)	Gri Derece	Sıralama
1	10000	0.5	50	0.946	1
2	10000	1.0	75	0.703	2
3	10000	1.5	100	0.560	5
4	11000	0.5	75	0.672	3
5	11000	1.0	100	0.466	8
6	11000	1.5	50	0.490	7
7	12000	0.5	100	0.596	4
8	12000	1.0	50	0.496	6
9	12000	1.5	75	0.378	9



Şekil 4.20: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler.

4.1.1.7. Doğrulama Deneyleri

Taguchi deney tasarımının son adımı doğrulama deneylerinin yapılmasıdır. Bu nedenle bu çalışmada 2 adet doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyleri P-to-V Fx kuvvetinin ve yüzey pürüzlülüğünün optimum olduğu şartlarda yürütülmüştür. Yani 1. deney A1B1C3, 2. deney A3B1C1 kombinasyonunda yapılmıştır. 1. deneyde devir sayısı 10000 dev/dak, diş başına ilerleme 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliği 100 μm , 2. deneyde devir sayısı 12000 dev/dak, diş başına ilerleme 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliği 50 μm olarak seçilmiştir. Optimum şartlarda yürütülen deneylerin sonuçları ve tahmin edilen değerler Şekil 4.21’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi doğrulama deneylerinin sonuçları ile tahmin edilen sonuçlar arasındaki farkın çok az olduğu bulunmuştur.

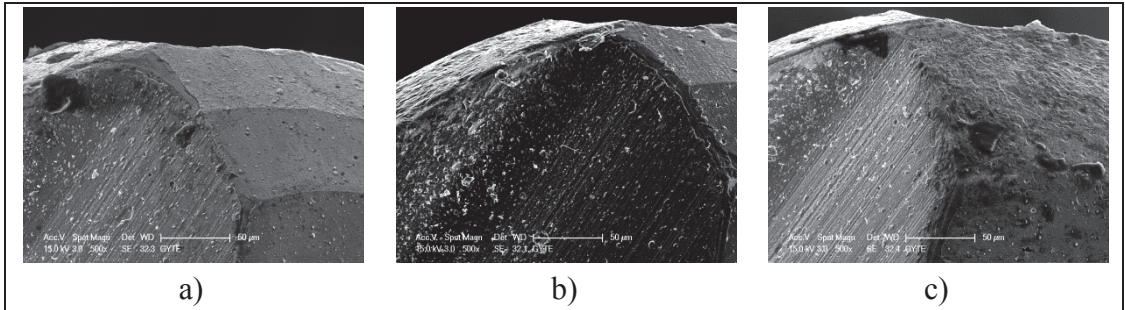


Şekil 4.21: Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için doğrulama deneylerinin sonuçları. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

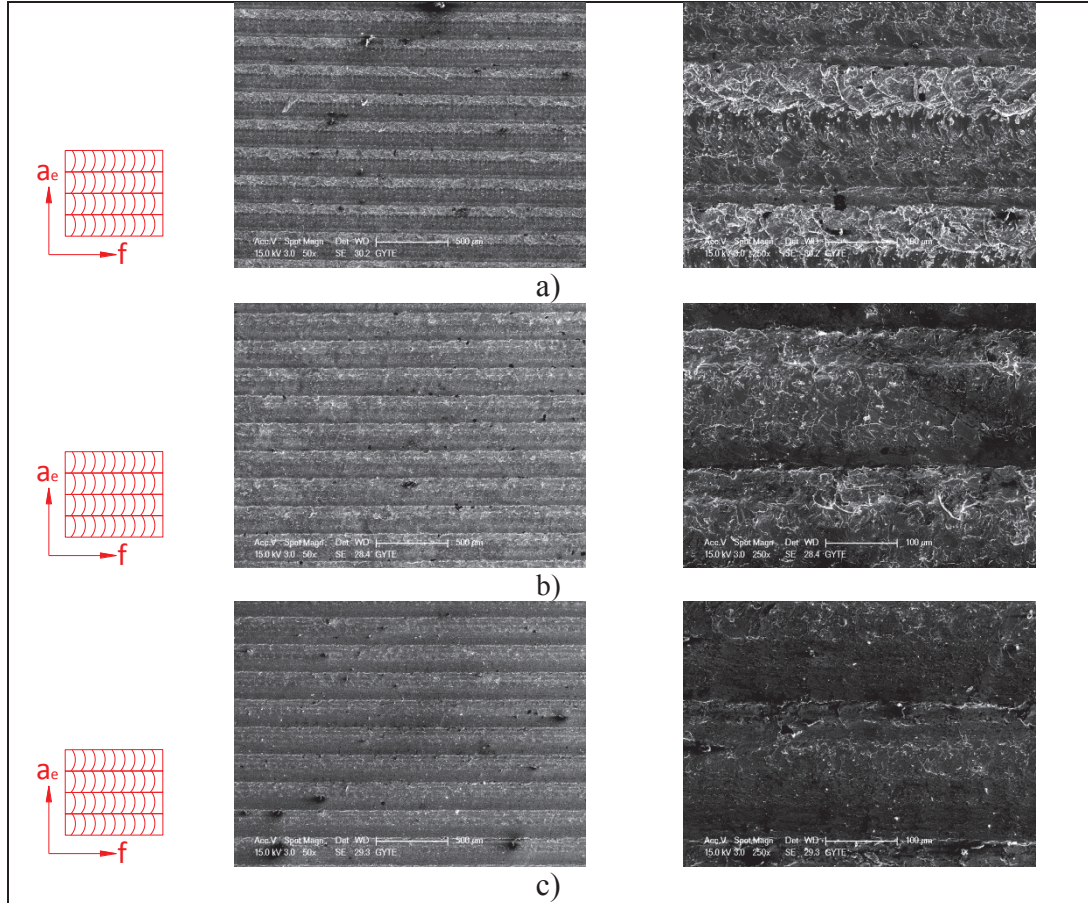
4.1.2. AISI 304 Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelemesi

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesi sonucu mikro kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar için örnek görüntüler Şekil 4.22’de gösterilmiştir. AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kullanılan mikro kesici takımlarda bazı işleme şartlarında kaplama ayrılması (delamination) gözlemlenmiştir. Literatürde TiAlN kaplamalı takımlarda kaplama ayrılmasının yaygın olarak görüldüğü ifade edilmiştir [99]. Kaplama ayrılmasının nedenleri mekanik darbe, kimyasal reaksiyonlar ve termo-mekanik gerilmeler olabilir. Ayrıca şekillerden görüldüğü gibi kesici takıma iş parçası malzemesi yapışmıştır ve bu yapışmanın nedeni AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinin sünek yapısına atfedilebilir. AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinin mikro frezelenmesinde yüksek aşınma değerleri bulunmuştur. Yüksek aşınma değerleri bu malzemenin mikro

frezelenmesinde deformasyon sertleşmesi etkisi nedeniyledir. Özellikle, yüksek devir sayısı ve ilerleme kombinasyonu (deney 9) yüksek takım aşınmasına ve dökülmeye (çentiklenme, chipping) neden olmuştur. Dökülmenin frezeleme gibi kesikli operasyonlarda olduğu bilinmektedir ve oluşumu darbe ve gerilme nedeniyledir. Özellikle işlemin ilk aşamasında kenar dökülmesi riski yüksektir. Bunun nedeni yüksek gerilmeye öncülük eden kesici kenar ile iş parçası arasındaki küçük temas alanıdır. Li [97] oldukça düşük kesme hızı kullanımının da dökülmeye neden olduğunu ifade etmiştir. AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde işlenen yüzeylerinin durumu Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Bu şekillerde iş parçası yüzeylerinin görüntüleri 50× ve 250× büyütme ile alınmıştır. Yüzey şekillerinde yana kayma izleri açık bir şekilde görülmektedir. İş parçası yüzeyleri büyütülerek incelendiğinde yüzeylerde plastik olarak deforme olmuş iş parçası malzemesinin yığınlar oluşturduğu görülmüştür. Bu malzeme yığınının nedeni AISI 304 malzemesinin sünek yapıda olmasıdır. AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet sonuçları kantitatif olarak Tablo 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.22: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede takım aşınması görüntüleri. a) Deney 1 (Devir sayısı: 8000 dev/dak, ilerleme hızı: 50 mm/dak ve talaş derinliği: 50 µm), b) Deney 6 (Devir sayısı: 10000 dev/dak, ilerleme hızı: 100 mm/dak ve talaş derinliği: 50 µm), c) Deney 9 (Devir sayısı: 12000 dev/dak, ilerleme hızı: 100 mm/dak ve talaş derinliği: 100 µm).



Şekil 4.23: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede iş parçası yüzeylerinin görüntüleri. a) Deney 1, b) Deney 6, b) Deney 9.

Tablo 4.10: AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.

Deney No	Takım Aşınması (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	P-to-V Fx (N)	P-to-V Fy (N)
1	14.31	0.31	11.24	10.61
2	50.69	0.38	16.61	15.96
3	74.92	0.43	19.83	18.72
4	28.17	0.24	11.63	10.76
5	69.63	0.33	17.44	15.29
6	49.12	0.41	20.66	18.44
7	64.96	0.19	12.63	12.19
8	48.71	0.29	16.06	15.05
9	92.53	0.38	18.66	18.02

4.1.2.1. Regresyon Analizi

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen çıktı değerlerini deney yapmadan tahmin edebilmek için regresyon modelleri geliştirilmiştir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet denklemlerinin geliştirilmesinde işleme parametrelerinin etkilerini içeren birinci dereceden denklemler oluşturulmuştur.

AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede takım aşınması değerini veren denklem:

$$VB = -87.5 + 0.00552n + 0.728f + 0.325a_p \quad (4.17)$$

$$R^2 = \%93.7 \quad R^2(\text{adj}) = \%89.9$$

AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede yüzey pürüzlülüğü değerini veren denklem:

$$Ra = 0.326 - 0.000022n + 0.00320f - 0.000200a_p \quad (4.18)$$

$$R^2 = \%98.4 \quad R^2(\text{adj}) = \%97.4$$

AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede kuvvet değerlerini veren denklemler:

$$Fx = 3.89 - 0.000028n + 0.158f + 0.00647a_p \quad (4.19)$$

$$R^2 = \%94.9 \quad R^2(\text{adj}) = \%91.8$$

$$Fy = 3.52 - 0.000003n + 0.144f + 0.00700a_p \quad (4.20)$$

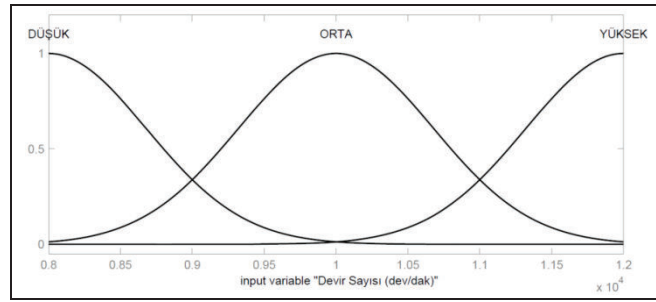
$$R^2 = \%97.1 \quad R^2(\text{adj}) = \%95.4$$

Geliştirilen modellerde regresyon katsayısı R^2 %80'den büyük olduğu için matematiksel modellerin tamamının tatmin edici olduğu ve AISI 304 malzemesinin

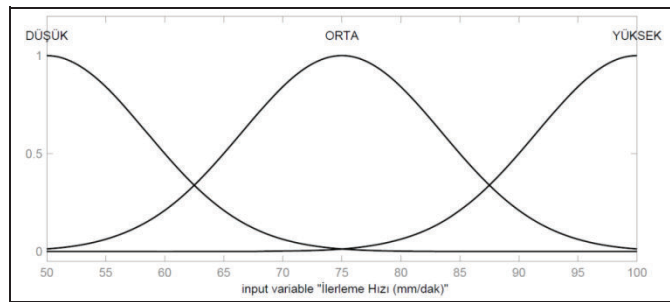
mikro yüzey frezelemede takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini açıklamada yeterli olduğu bulunmuştur.

4.1.2.2. Bulanık Mantık

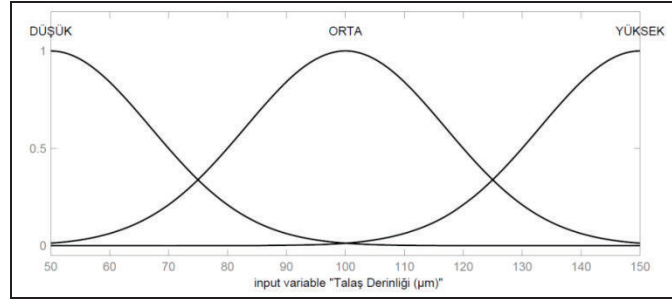
Çıktıları deney yapmadan tahmin etmek için regresyon modellerinin yanı sıra bulanık mantık modelleri de kurulmuştur. Devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği sistemin girdisi olarak kullanılırken, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy çıktılar olarak kullanılmıştır. Sayısal verilerin sözel olarak ifade edilebilmesi için Gaussian üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Girdilerin üyelik fonksiyonu düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç kategoride ifade edilmiştir (Şekil 4.24-4.26).



Şekil 4.24: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.

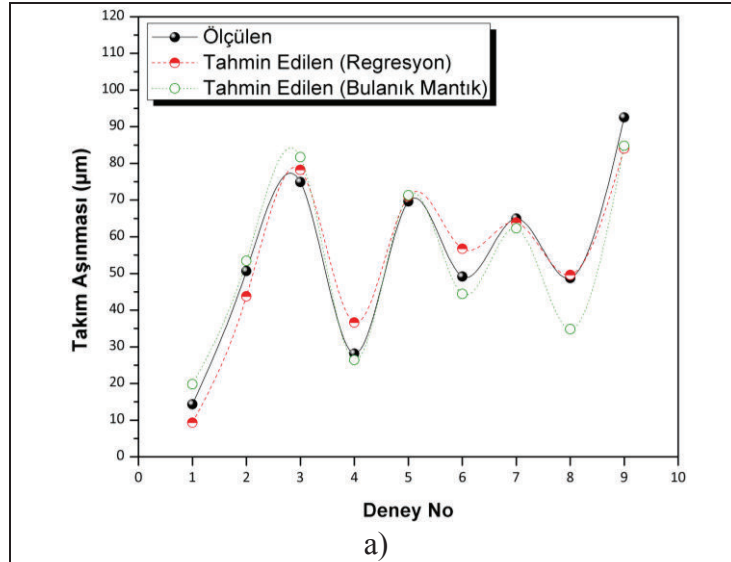


Şekil 4.25: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede ilerleme hızı için üyelik fonksiyonu grafiği.

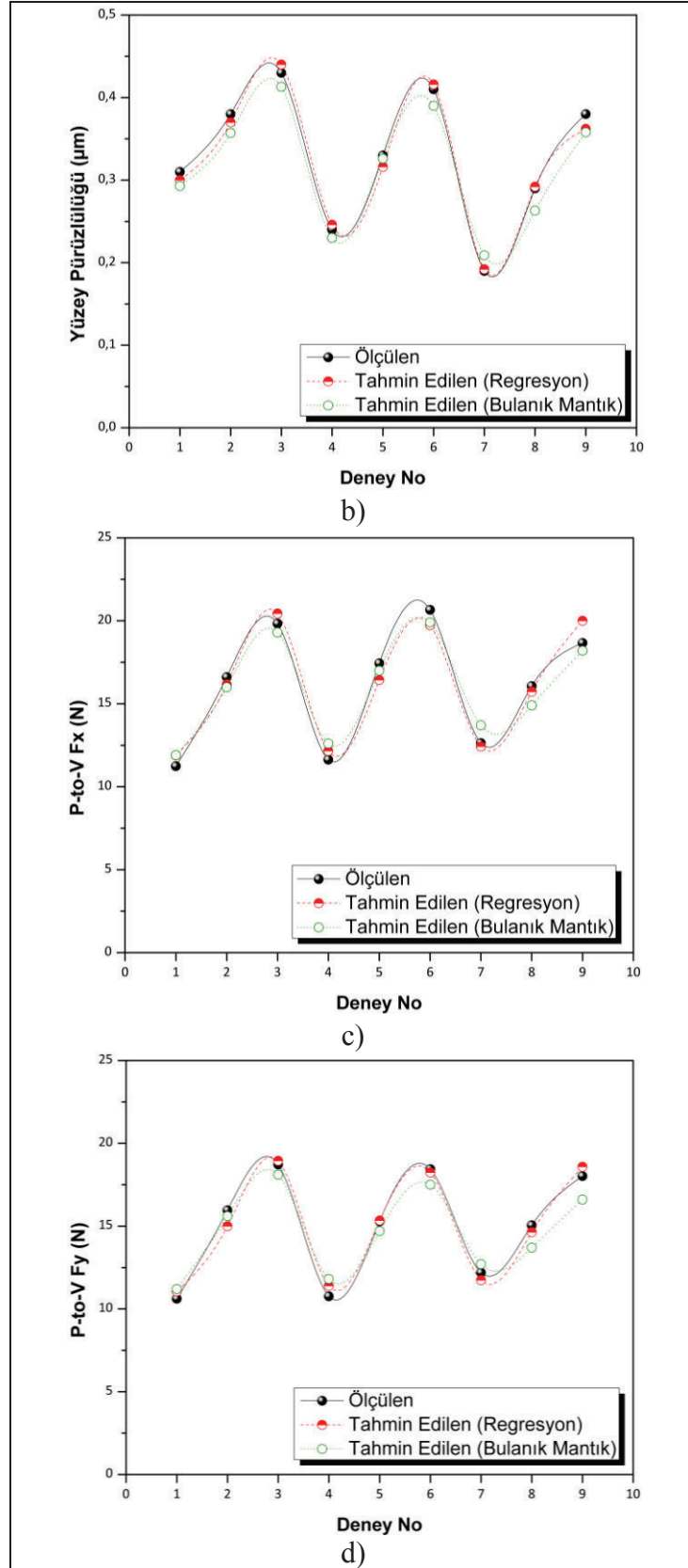


Şekil 4.26: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.

Takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini modellemek için bu çalışmada 9 adet kural yazılmıştır. Kurallara göre çalıştırılan bulanık mantık sistemiyle çıktılar sayısal olarak tahmin edilmiştir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy için ölçülen ve hem regresyon hem de bulanık mantık yöntemleri ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırması Şekil 4.27’de verilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modellerinin tamamının tatmin edici olduğu ve AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini açıklamada yeterli olduğu bulunmuştur.

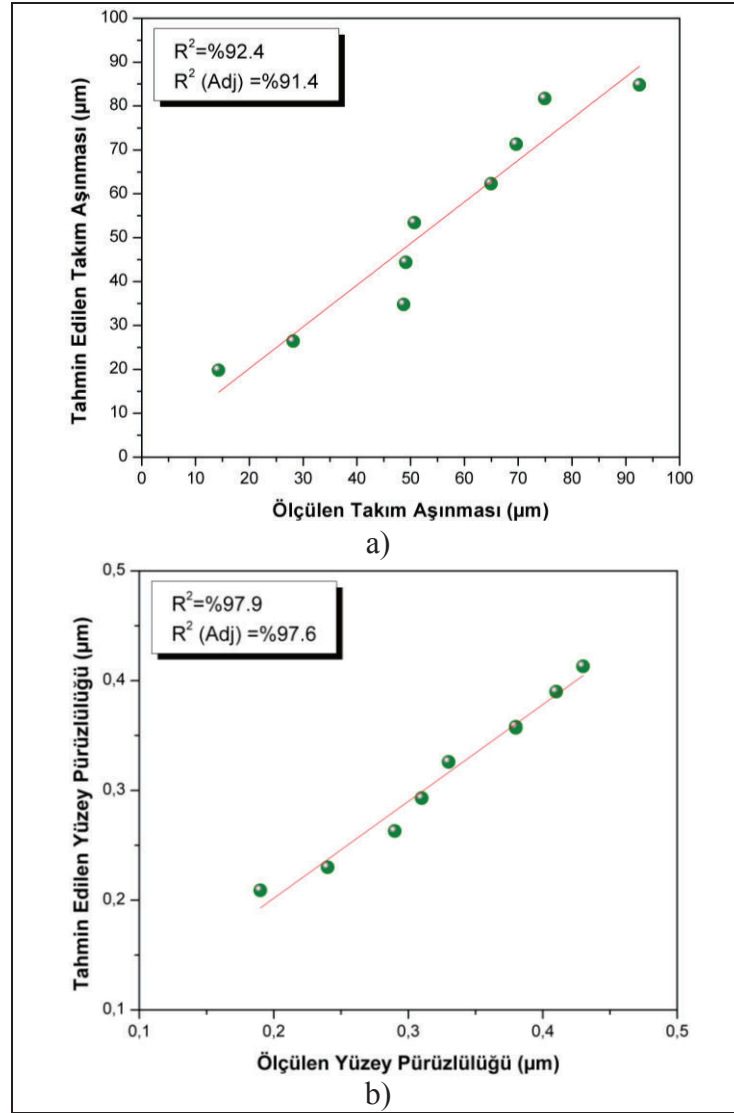


Şekil 4.27: AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

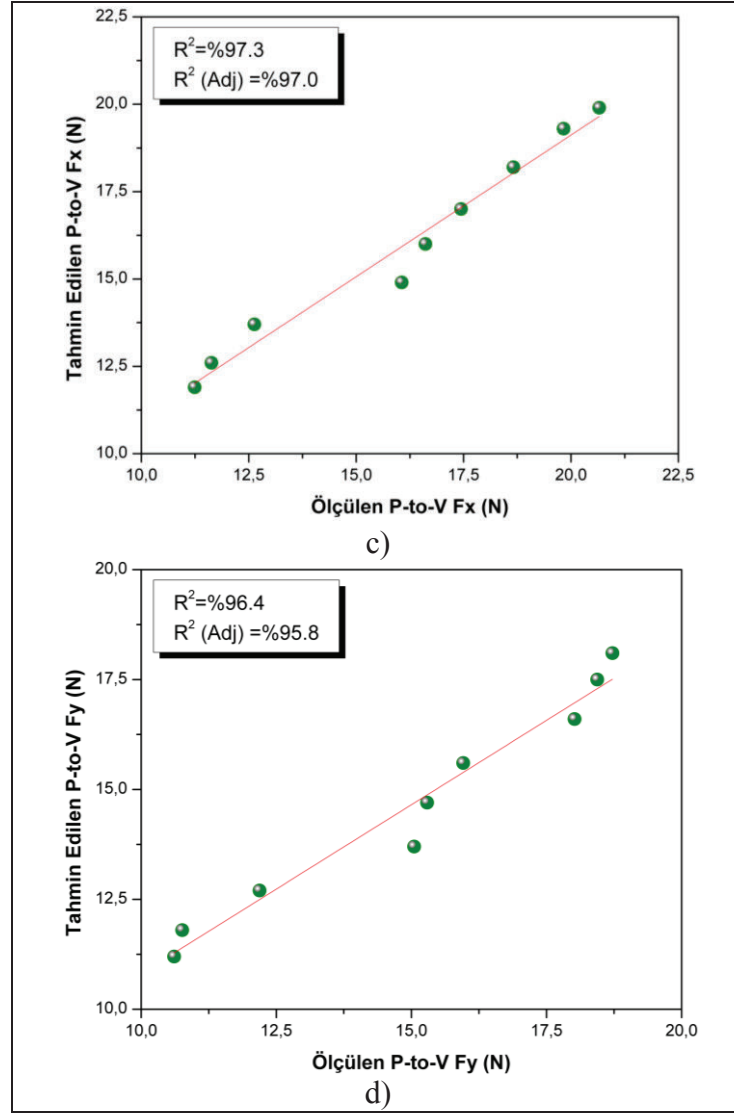


Şekil 4.27: Devam.

Bulanık mantık modellerinin tümü için R^2 değerlerinin %90'ın üzerinde olduğu bulunmuştur (Şekil 4.28). Bu nedenle AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini tahmin etmede bulanık mantık ile modellemenin olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 4.28: AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.



Şekil 4.28: Devam.

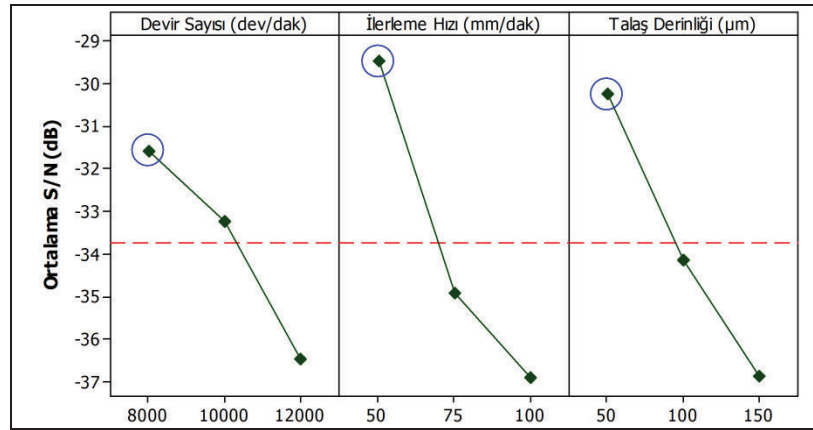
4.1.2.3. S/N Analizi

Bu çalışmada AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler ölçüldüğü için, analizlerde en küçük en iyi formülüne göre S/N oranı hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 4.11’de verilmiştir.

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen tepkiler için S/N grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.29-4.32). AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması için optimum işleme şartları seti A1B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.29). Yani, takım aşınmasını minimize etmek için en iyi kombinasyon devir sayısının 8000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olduğu kesme şartları olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.11: AISI 304 malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.

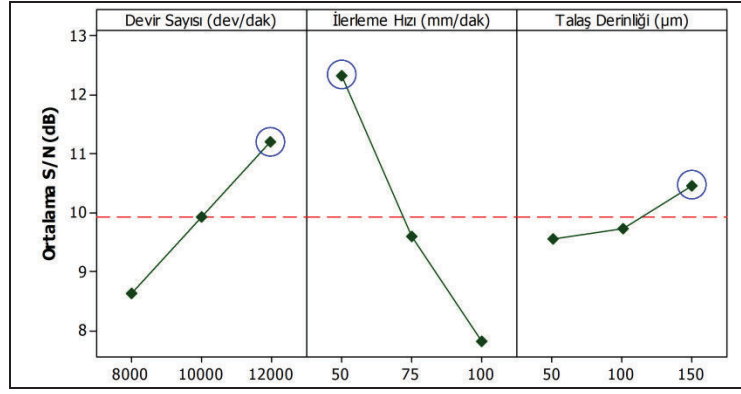
Deney No	S/N Oranları (dB)			
	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	-23.1128	10.1728	-21.0153	-20.5143
2	-34.0984	8.4043	-24.4074	-24.0607
3	-37.4920	7.3306	-25.9465	-25.4461
4	-28.9957	12.3958	-21.3116	-20.6362
5	-36.8559	9.6297	-24.8309	-23.6881
6	-33.8252	7.7443	-26.3026	-25.3152
7	-36.2529	14.4249	-22.0281	-21.7201
8	-33.7524	10.7520	-24.1149	-23.5507
9	-39.3257	8.4043	-25.4182	-25.1151



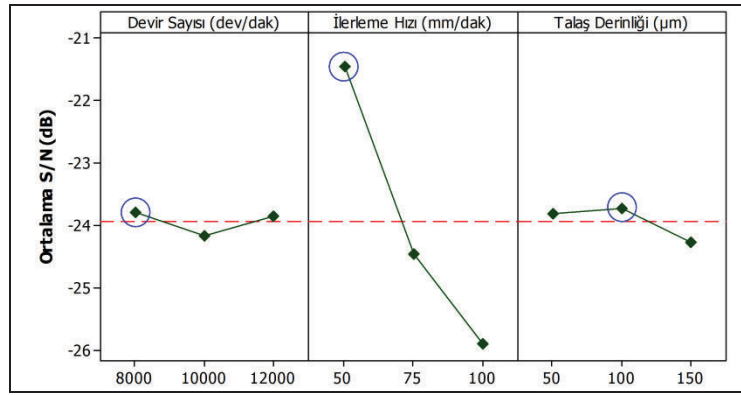
Şekil 4.29: AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek için optimum işleme şartları seti devir sayısı 12000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 150 µm olarak bulunmuştur (Şekil 4.30).

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvveti için optimum işleme şartları seti devir sayısının 8000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 100 µm olduğu kesme şartları olarak elde edilmiştir (Şekil 4.31).

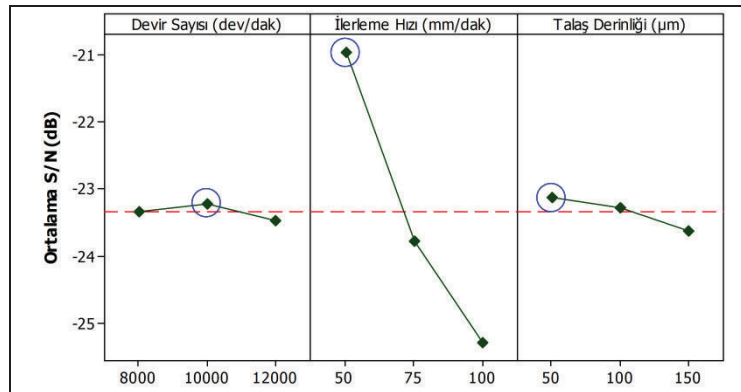


Şekil 4.30: AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.



Şekil 4.31: AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fy kuvveti için optimum işleme şartları devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olduğu değerler olarak bulunmuştur (Şekil 4.32).



Şekil 4.32: AISI 304 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde S/N analizi sonucunda bütün ölçülen çıktılarda ilerleme hızının en etkili faktör olduğu bulunmuştur.

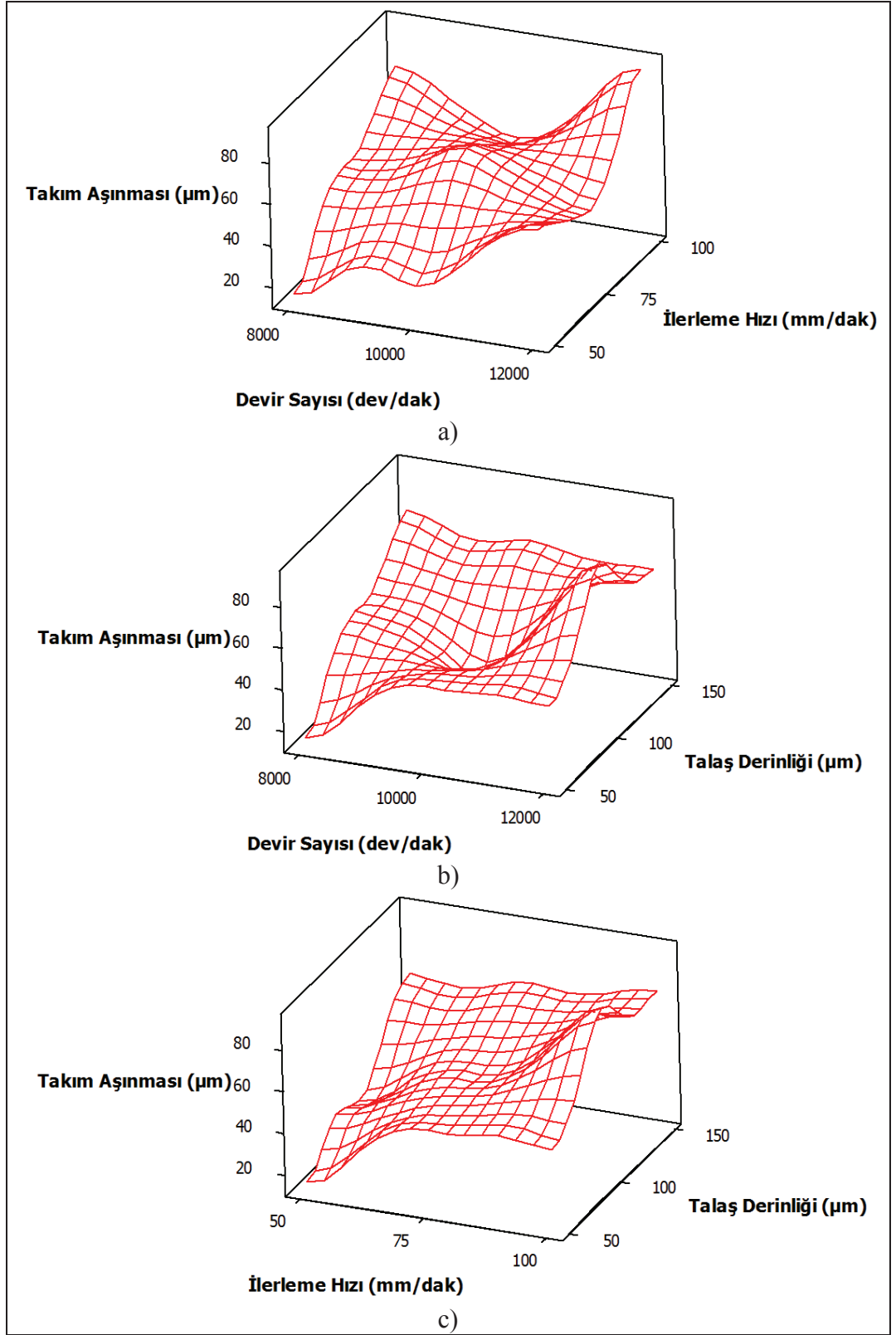
4.1.2.4. İşleme Şartlarının Etkisi

Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy için 3D yüzey grafikleri Şekil 4.33-4.36'da gösterilmiştir. AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.33.a ve Şekil 4.33.b), ilerleme hızı (Şekil 4.33.a ve Şekil 4.33.c) ve talaş derinliği (Şekil 4.33.b ve Şekil 4.33.c) arttıkça takım aşınması artmıştır. Mikro frezelemede takım aşınmasının artan devir sayısı [99] ve ilerleme [97] ile artışı literatürde de gözlemlenmiştir.

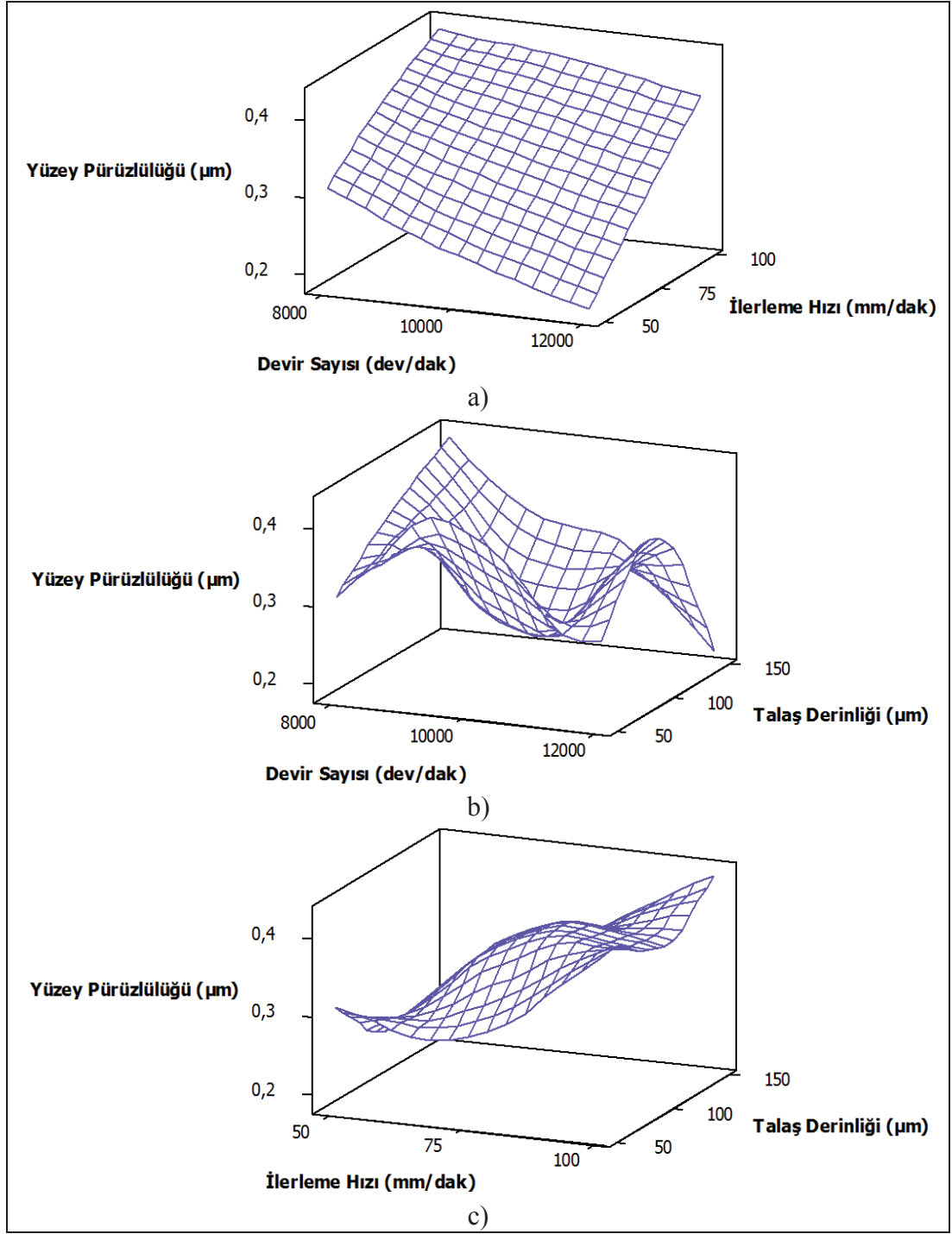
AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının artması yüzey pürüzlülüğünü azaltmıştır (Şekil 4.34.a ve Şekil 4.34.b). Literatürdeki diğer çalışmalarda da benzer sonuç bulunmuştur [39], [91], [105]. AISI 304 malzemesinin mikro frezelenmesinde artan ilerleme hızı (Şekil 4.34.a ve Şekil 4.34.c) ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur. Bu sonuç mikro frezeleme ile ilgili yapılan diğer çalışmalarda da belirtilmiştir [37], [43], [92], [100], [102], [103], [105]. Makro frezelemede, talaş derinliğinin azalması daha az tırlama veya takım sehimi nedeniyle daha iyi yüzey kalitesi vermektedir. Fakat mikro frezelemede talaş derinliğinin azaltılması yüzey kalitesini iyileştirmede her zaman etkili metot değildir.

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.35.a ve Şekil 4.35.b) ve ilerleme hızı (Şekil 4.35.a ve Şekil 4.35.c) arttıkça P-to-V Fx kuvvetinin arttığı bulunmuştur. Fx kuvvetinin devir sayısı [91] ve ilerleme [46], [48], [91], [98], [105] ile arttığı diğer çalışmalarda da ifade edilmiştir. Başlangıçta P-to-V Fx kuvvetinin artan talaş derinliği ile azaldığı daha sonra artan talaş derinliği ile arttığı bulunmuştur (Şekil 4.35.c).

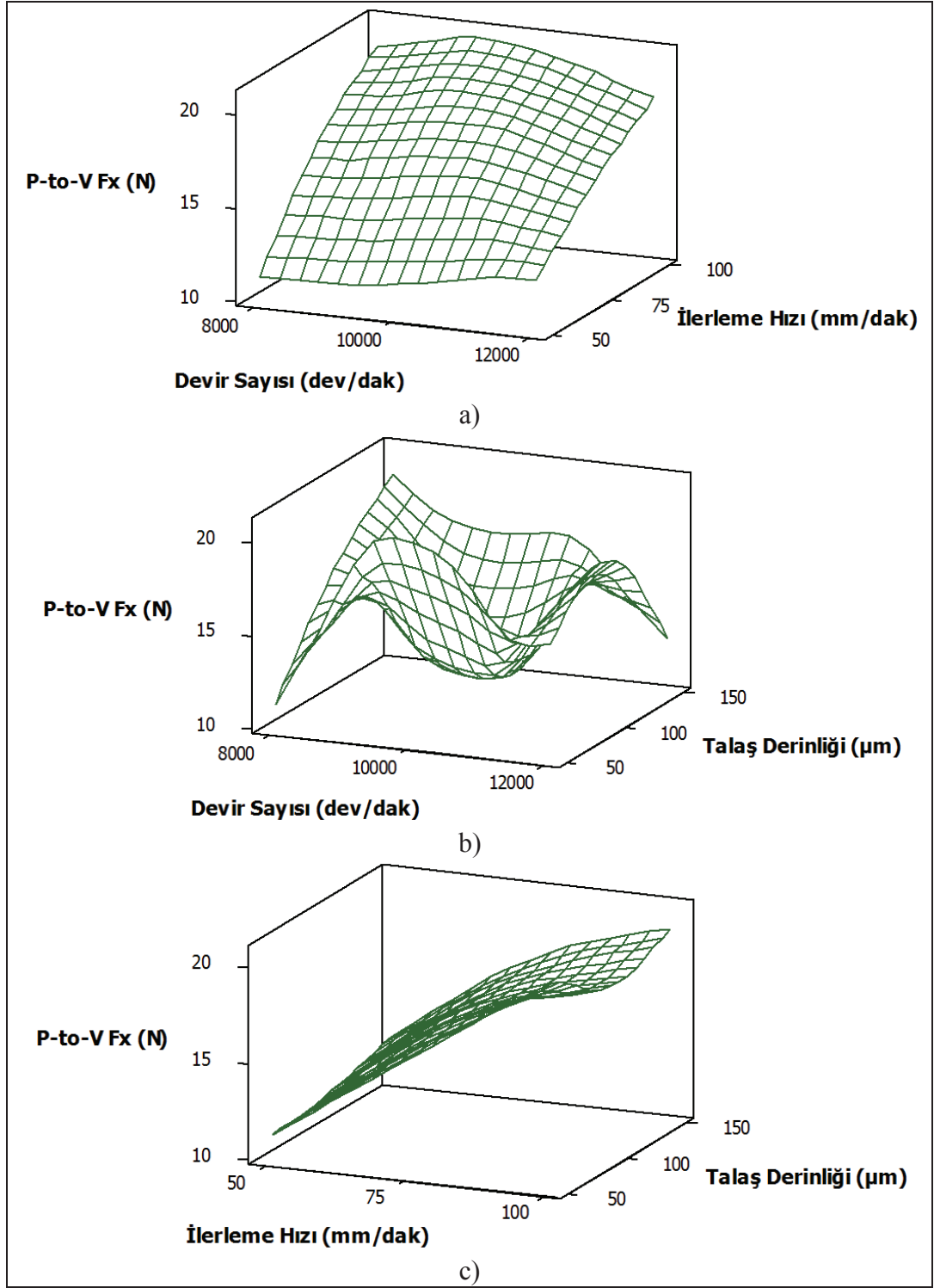
AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ilerleme hızı (Şekil 4.36.a ve Şekil 4.36.c) ve talaş derinliği (Şekil 4.36.c) arttıkça P-to-V Fy kuvveti artmıştır. Fy kuvvetinin artan ilerleme [46], [48], [91], [98], [105] ve talaş derinliği [48] ile arttığı literatürde de belirtilmiştir. Talaş derinliğinin artması talaş kesit alanını arttırarak daha yüksek kuvvet değeri vermektedir.



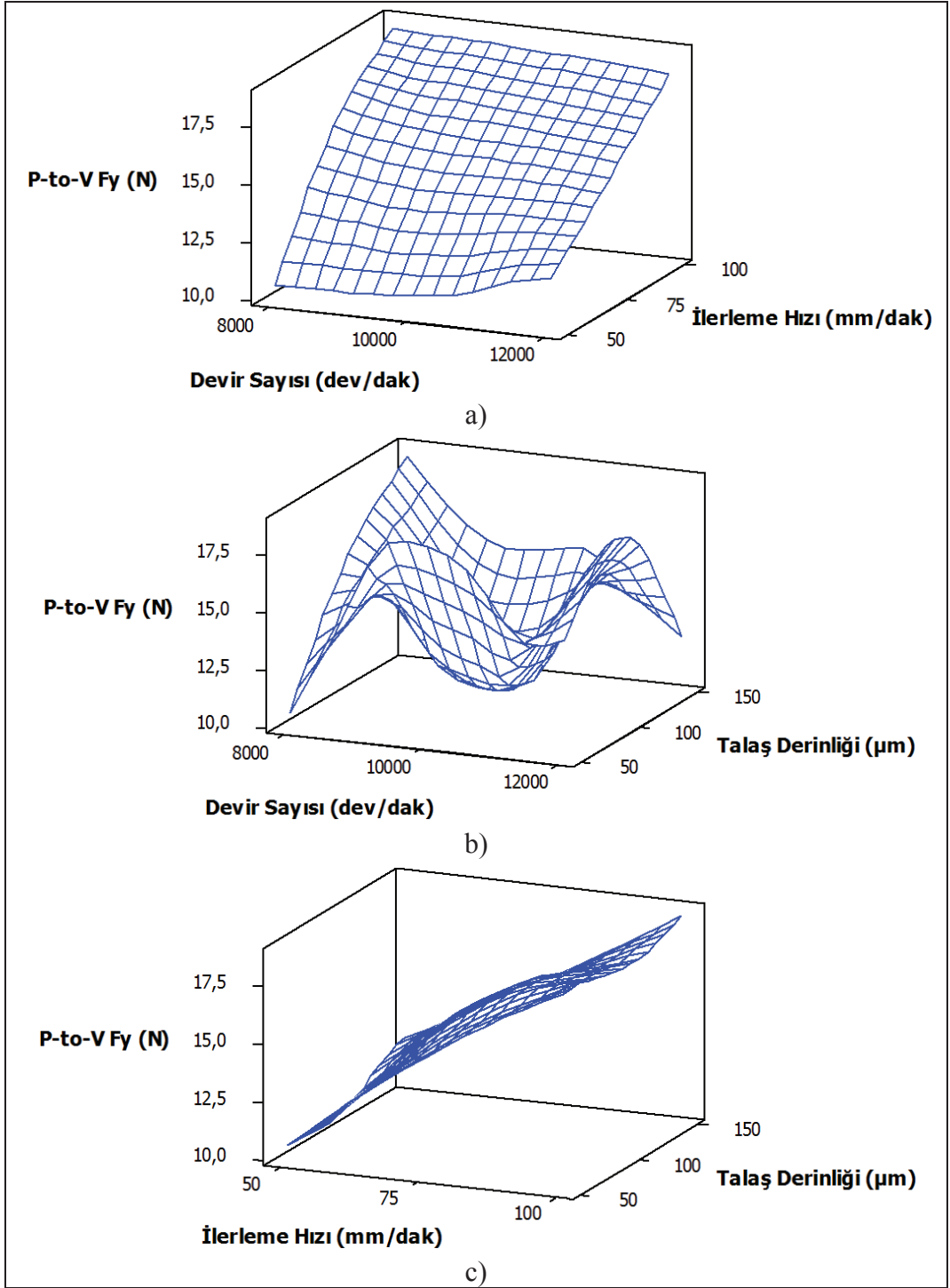
Şekil 4.33: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.34: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.35: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.36: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

4.1.2.5. Varyans Analizi (ANOVA)

AISI 304 malzemesi için ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri için ANOVA tablosu hazırlanmıştır (Tablo 4.12-4.15).

Tablo 4.12’de verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde aşınmayı sırasıyla %19.275, %43.517 ve %34.994 etkilemektedir. Mikro frezelemede ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.12), tablodaki F değerinden büyük olduğu için ilerleme hızının aşınma üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.12: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	884.02	442.01	8.71	0.103	19.275
İlerleme Hızı	2	1995.86	997.93	19.66	0.048	43.517
Talaş Derinliği	2	1604.96	802.48	15.81	0.059	34.994
Hata	2	101.52	50.76			2.214
Toplam	8	4586.36				100

Tablo 4.13’te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla %22.097, %75.337 ve %1.348 etkilemektedir. Mikro frezelemede ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.13), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğünün en fazla ilerlemeden etkilendiği diğer çalışmalarda da ifade edilmiştir [29], [140]. Mikro frezelemede talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin az olduğu literatürde de belirtilmiştir [29], [100], [141].

Tablo 4.14’te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvvetini sırasıyla %1.120, %95.945 ve %1.559 etkilemektedir. Mikro frezelemede ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.14), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için sadece ilerleme hızının P-to-V Fx kuvveti üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.13: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.0112889	0.0056444	18.14	0.052	22.097
İlerleme Hızı	2	0.0384889	0.0192444	61.86	0.016	75.337
Talaş Derinliği	2	0.0006889	0.0003444	1.11	0.475	1.348
Hata	2	0.0006222	0.0003111			1.218
Toplam	8	0.0510889				100

Tablo 4.14: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	1.108	0.554	0.81	0.551	1.120
İlerleme Hızı	2	94.944	47.472	69.75	0.014	95.945
Talaş Derinliği	2	1.543	0.772	1.13	0.469	1.559
Hata	2	1.361	0.681			1.376
Toplam	8	98.957				100

Tablo 4.15’de verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede P-to-V Fy kuvvetini sırasıyla %0.169, %97.265 ve %0.954 etkilemektedir. Mikro frezelemede ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.15), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için ilerleme hızının P-to-V Fy kuvveti üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Talaş derinliğinin kuvvetler (Fx ve Fy) üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu literatürde de ifade edilmiştir [46].

Tablo 4.15: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.137	0.069	0.11	0.905	0.169
İlerleme Hızı	2	78.732	39.366	60.33	0.016	97.265
Talaş Derinliği	2	0.772	0.386	0.59	0.628	0.954
Hata	2	1.305	0.652			1.612
Toplam	8	80.946				100

4.1.2.6. Çoklu Optimizasyon

Bu çalışmada AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen tepkilerin çoklu optimizasyonu için gri ilişkisel analiz kullanılmıştır. Normalizasyon işlemi sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.16’da ve gri ilişkisel katsayı değerleri ise Tablo 4.17’de verilmiştir. Tablo 4.18’de ve Şekil 4.37’de gri ilişkisel dereceler verilmiştir. En yüksek (optimum) sonuç 1 numaralı deney ile elde edilmiştir. Yani AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde minimum takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet 1 numaralı deneyde kullanılan şartlarda elde edilmiştir.

Tablo 4.16: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.

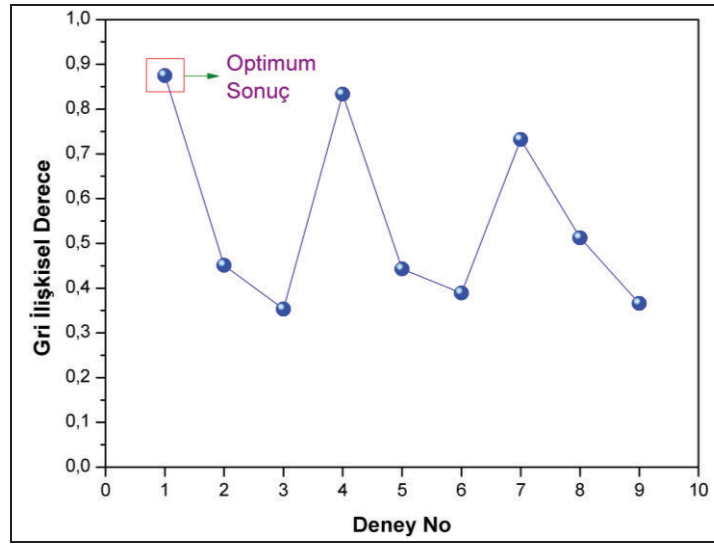
Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	1.000	0.500	1.000	1.000
2	0.535	0.208	0.430	0.340
3	0.225	0.000	0.088	0.000
4	0.823	0.792	0.959	0.982
5	0.293	0.417	0.342	0.423
6	0.555	0.083	0.000	0.035
7	0.352	1.000	0.852	0.805
8	0.560	0.583	0.488	0.453
9	0.000	0.208	0.212	0.086

Tablo 4.17: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.

Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	1.000	0.500	1.000	1.000
2	0.518	0.387	0.467	0.431
3	0.392	0.333	0.354	0.333
4	0.738	0.706	0.924	0.964
5	0.414	0.462	0.432	0.464
6	0.529	0.353	0.333	0.341
7	0.436	1.000	0.772	0.720
8	0.532	0.545	0.494	0.477
9	0.333	0.387	0.388	0.354

Tablo 4.18: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.

Deney No	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Talaş Derinliği (μm)	Gri Derece	Sıralama
1	8000	50	50	0.875	1
2	8000	75	100	0.451	5
3	8000	100	150	0.353	9
4	10000	50	100	0.833	2
5	10000	75	150	0.443	6
6	10000	100	50	0.389	7
7	12000	50	150	0.732	3
8	12000	75	50	0.512	4
9	12000	100	100	0.366	8

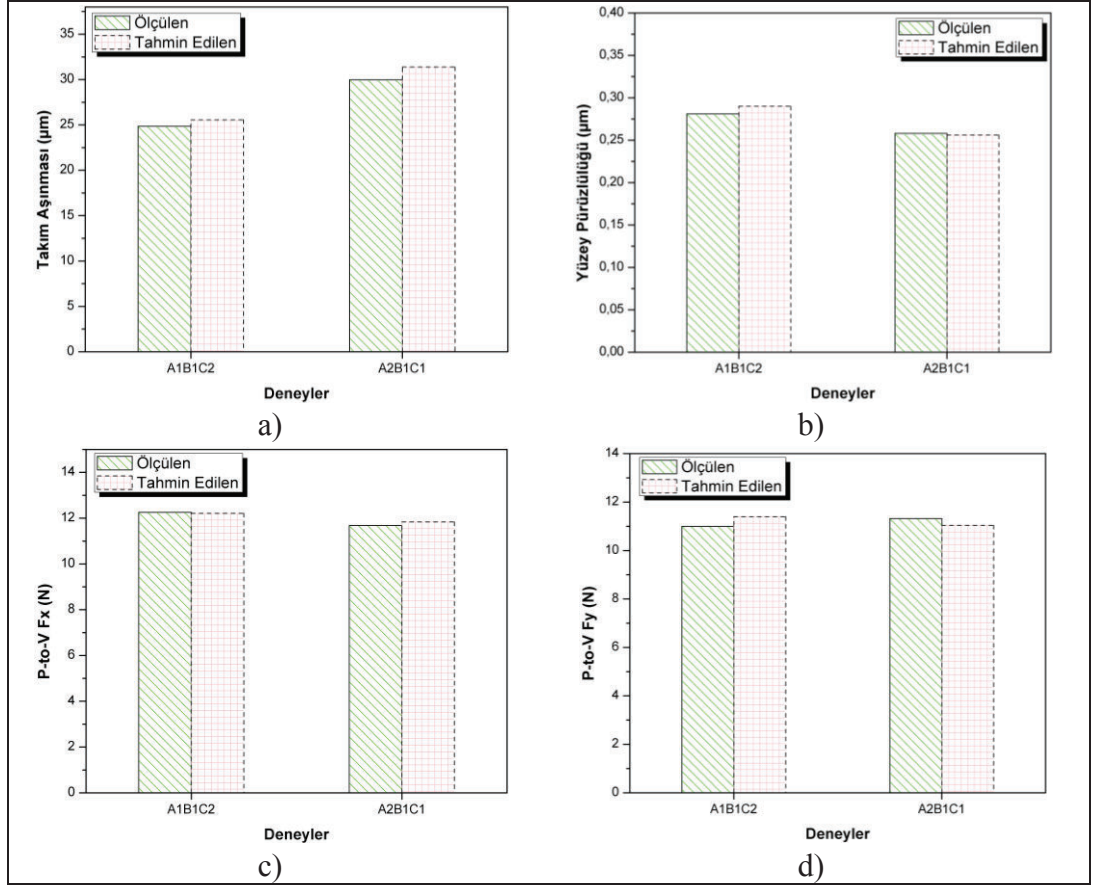


Şekil 4.37: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler.

4.1.2.7. Doğrulama Deneyleri

AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde Taguchi planına göre yürütülen deney sonuçlarını doğrulamak için 2 adet deney yapılmıştır. Doğrulama deneyleri P-to-V F_x ve P-to-V F_y kuvvetlerinin optimum olduğu şartlarda yürütülmüştür. Yani 1. deney A1B1C2, 2. deney A2B1C1 kombinasyonunda yapılmıştır. 1. deneyde devir sayısı 8000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 100 μm , 2. deneyde devir sayısı 12000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 50 μm değerlerindedir. Optimum şartlarda yürütülen deneylerin

sonuçları ve tahmin edilen değerler Şekil 4.38’de verilmiştir. Doğrulama sonuçları ile tahmin edilen sonuçlar arasındaki farkın çok az olduğu görülmüştür.

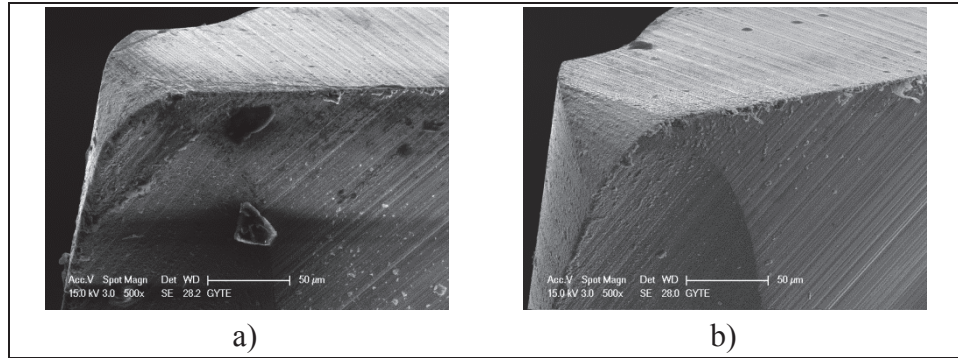


Şekil 4.38: AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için doğrulama deneylerinin sonuçları. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

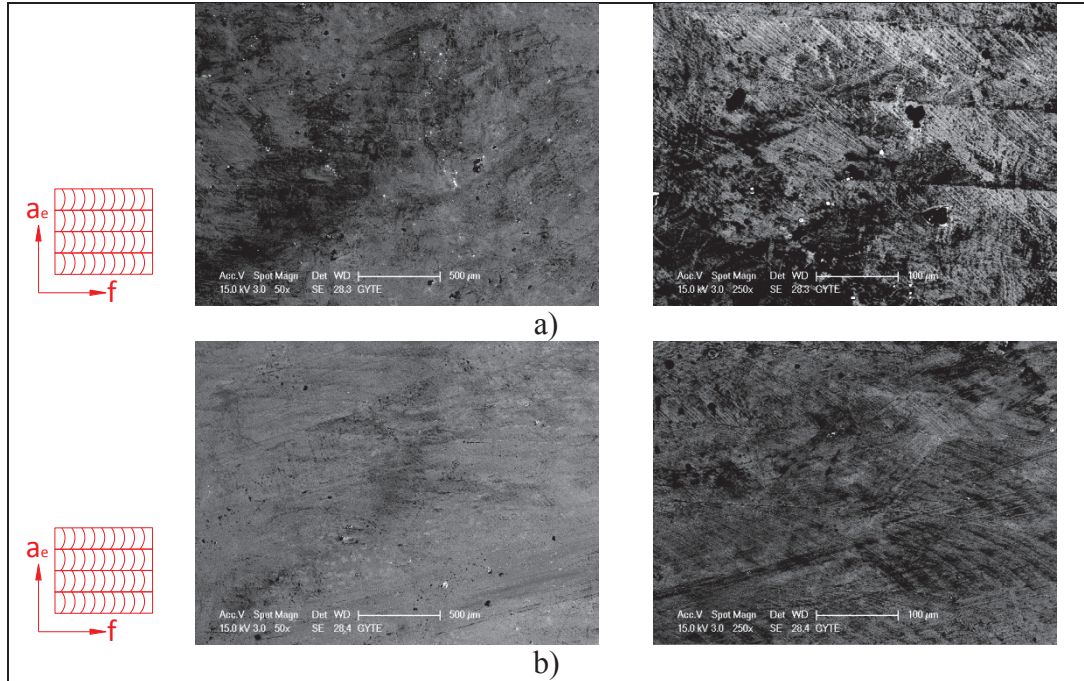
4.1.3. Ti6Al4V Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelemesi

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesi sonucu mikro kesici takımlarda meydana gelen takım aşınmalarının örnek görüntüleri Şekil 4.39’da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi takım aşınması kesici takımların kenarına yakın kısımlarda meydana gelmiştir. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımlarda dökülme görülmemiştir. Dökülme görülmediği için kesici takım kaplama malzemesinin (TiAlN) kesici takıma yeterli tokluğu sağladığı söylenebilir. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde işlenen yüzeylerinin durumu Şekil 4.40’ta gösterilmiştir. Bu şekillerde iş parçası yüzeylerinin görüntüleri 50× ve 250× büyütme ile alınmıştır. Yüzey şekillerinde

yana kayma izleri açık bir şekilde görülmektedir. İş parçası yüzeyleri büyütülerek incelendiğinde yüzeylerde herhangi bir yapışma olmadığı görülmüştür. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde iş parçası yüzeylerinde yapışmanın olmamasının nedenleri Ti6Al4V malzemesinin sertliğinin talaş oluşumunu kolaylaştırması ve düz kesici takımın kullanılması olarak ifade edilebilir. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet sonuçları kantitatif olarak Tablo 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.39: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede takım aşınması görüntüleri. a) Deney 2 (Devir sayısı: 10000 dev/dak, ilerleme hızı: 75 mm/dak ve talaş derinliği: 75 μ m), b) Deney 4 (Devir sayısı: 11000 dev/dak, ilerleme hızı: 50 mm/dak ve talaş derinliği: 75 μ m).



Şekil 4.40: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede iş parçası yüzeylerinin görüntüleri. a) Deney 2, b) Deney 4.

Tablo 4.19: Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.

Deney No	Takım Aşınması (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	P-to-V Fx (N)	P-to-V Fy (N)
1	22.21	0.09	8.35	1.82
2	54.45	0.12	11.09	3.82
3	71.16	0.16	12.58	5.41
4	19.32	0.07	9.56	4.21
5	49.60	0.09	11.50	8.09
6	18.53	0.11	15.87	6.38
7	27.78	0.06	13.44	7.53
8	12.43	0.07	15.73	6.07
9	21.33	0.09	19.65	8.05

4.1.3.1. Regresyon Analizi

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen çıktıları deney yapmadan bulabilmek için regresyon modelleri oluşturulmuştur. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet denklemlerinin geliştirilmesinde işleme parametrelerinin etkilerini içeren birinci dereceden denklemler geliştirilmiştir.

Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede takım aşınması değerini veren denklem:

$$VB = 123 - 0.0144n + 0.278f + 0.636a_p \quad (4.21)$$

$$R^2 = \%92.6 \quad R^2(\text{adj}) = \%88.1$$

Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede yüzey pürüzlülüğü değerini veren denklem:

$$Ra = 0.281 - 0.000025n + 0.000933f + 0.000267a_p \quad (4.22)$$

$$R^2 = \%95.6 \quad R^2(\text{adj}) = \%92.9$$

Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede kuvvet değerlerini veren denklemler:

$$F_x = -23.5 + 0.00270n + 0.108f - 0.0162a_p \quad (4.23)$$

$$R^2 = \%95.8 \quad R^2 (\text{adj}) = \%93.4$$

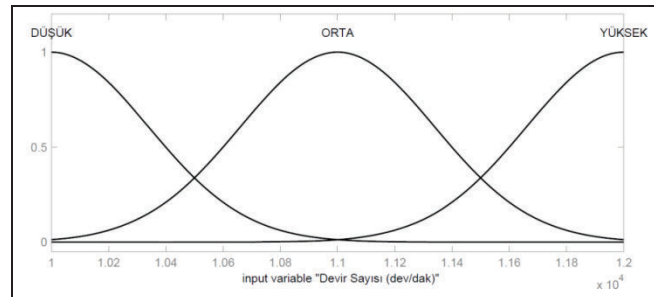
$$F_y = -20.2 + 0.00177n + 0.0419f + 0.0451a_p \quad (4.24)$$

$$R^2 = \%91.2 \quad R^2 (\text{adj}) = \%86.0$$

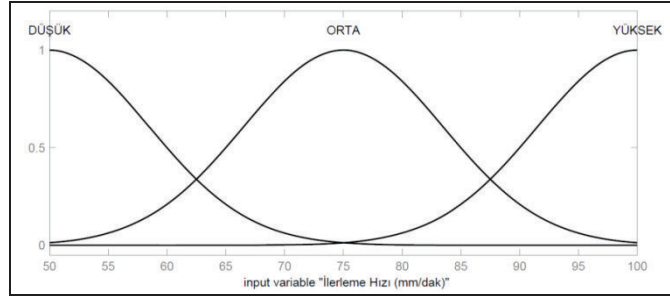
Bu çalışmada Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde çıktı performanslarını tahmin edebilmek için geliştirilen matematiksel modellerin tamamının tatmin edici olduğu ve takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini tahmin etmede yeterli olduğu sonucu çıkarılmıştır. Regresyon katsayısı R^2 'nin %80'in üzerinde olması nedeniyle bu sonuca varılmıştır.

4.1.3.2. Bulanık Mantık

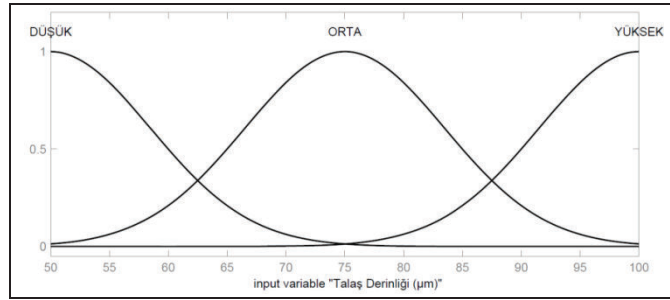
Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde ölçülen çıktıları deney yapmadan tahmin edebilmek için regresyon modellerinin yanı sıra bulanık mantık modelleri de geliştirilmiştir. Devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği girdi olarak, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V F_x ve P-to-V F_y çıktılar olarak düşünülmüştür. Sayısal değerlerin sözel ifadelerle dönüştürülebilmesi için Gaussian üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Girdilerin üyelik fonksiyonu düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç kategoride hazırlanmıştır (Şekil 4.41-4.43).



Şekil 4.41: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.

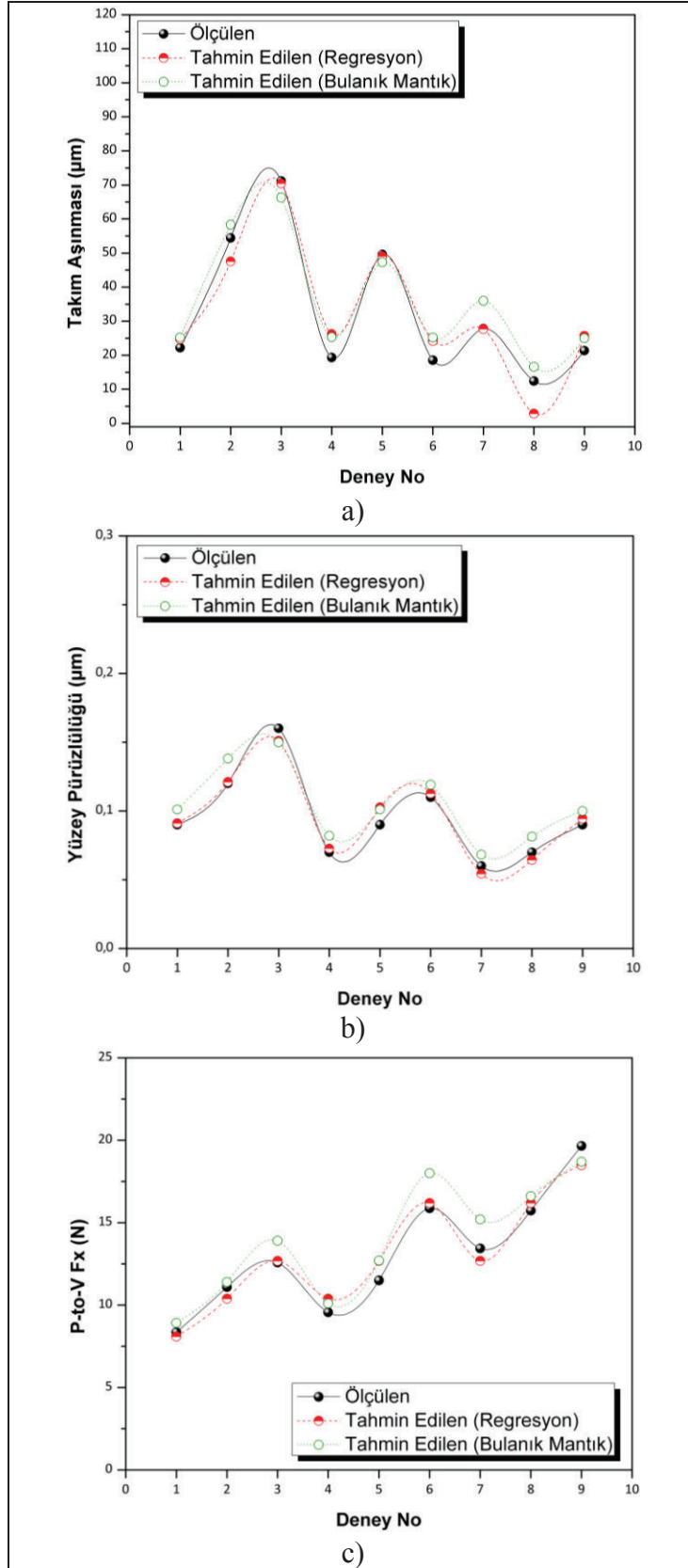


Şekil 4.42: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede ilerleme hızı için üyelik fonksiyonu grafiği.

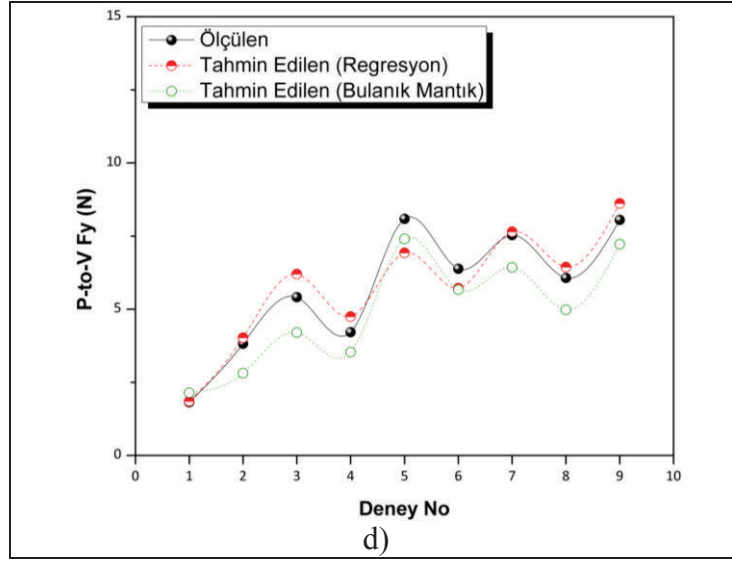


Şekil 4.43: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini modellemek için bu çalışmada 9 adet kural oluşturulmuştur. Kurallara göre çalıştırılan bulanık mantık sistemiyle çıktılar sayısal olarak tahmin edilmiştir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V F_x ve P-to-V F_y için ölçülen ve hem regresyon hem de bulanık mantık yöntemleri ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırması Şekil 4.44'te verilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modellerinin tamamının Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini tahmin etmede yeterli olduğu bulunmuştur.

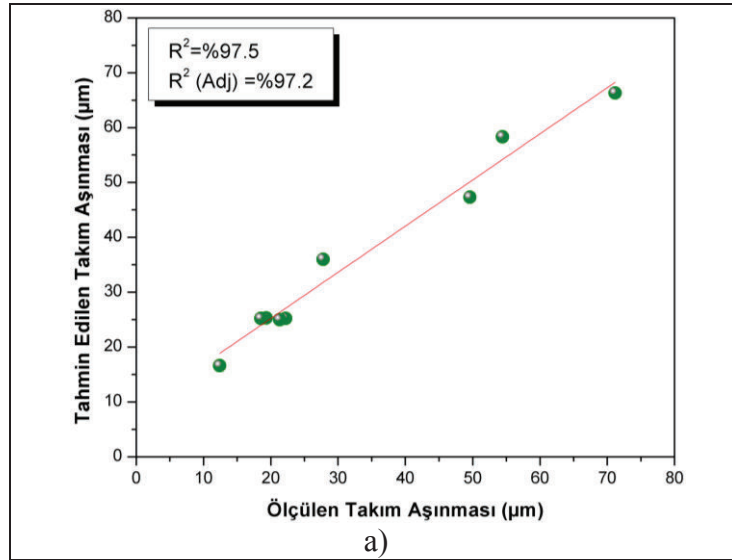


Şekil 4.44: Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

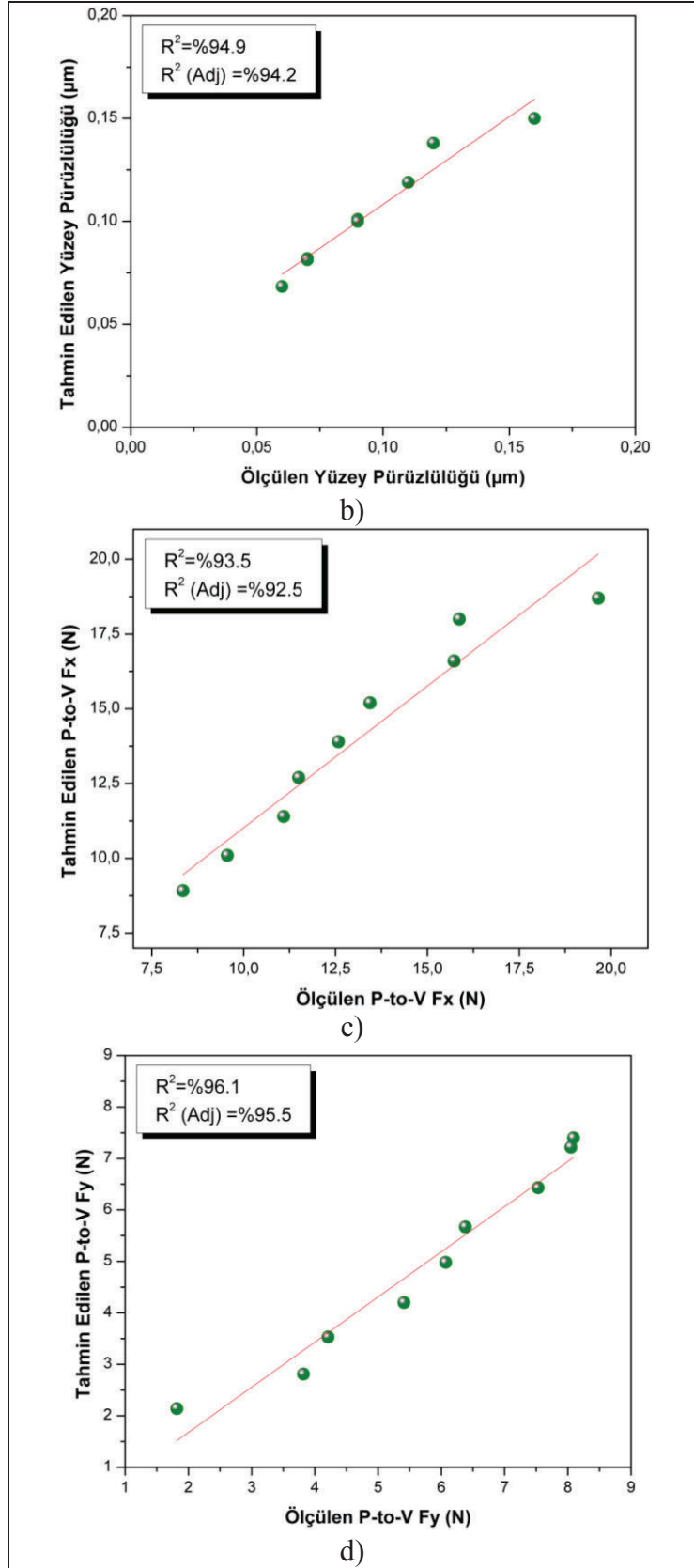


Şekil 4.44: Devam.

Bulanık mantık modellerinin tümü için R^2 değerleri %90'ın üzerinde olduğu (Şekil 4.45) için Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini tahmin etmede bulanık mantık ile modellemenin olumlu sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.45: Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.



Şekil 4.45: Devam.

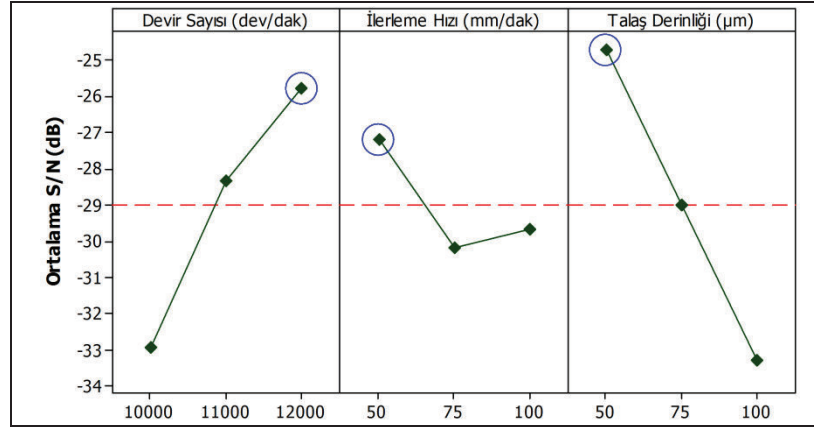
4.1.3.3. S/N Analizi

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler dikkate alındığı için, analizlerde en küçük en iyi formülüne göre S/N oranı hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 4.20’de sunulmuştur.

Tablo 4.20: Ti6Al4V malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.

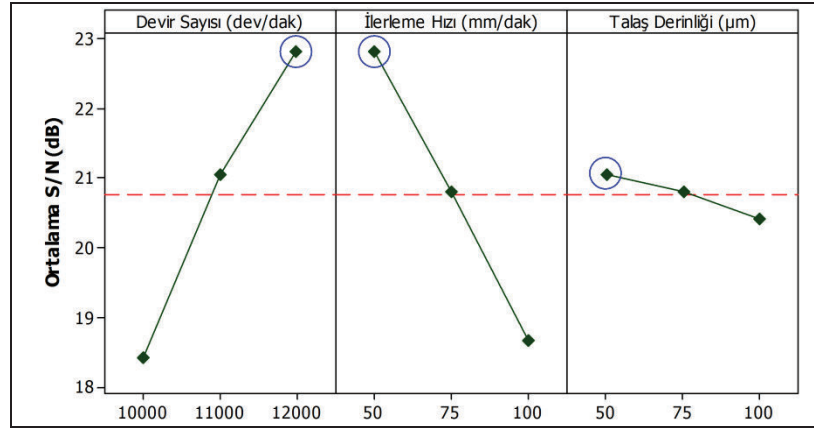
Deney No	S/N Oranları (dB)			
	Takım Aşınması	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	-26.9310	20.9151	-18.4337	-5.2014
2	-34.7200	18.4164	-20.8986	-11.6413
3	-37.0447	15.9176	-21.9936	-14.6639
4	-25.7201	23.0980	-19.6092	-12.4856
5	-33.9096	20.9151	-21.2140	-18.1590
6	-25.3575	19.1721	-24.0115	-16.0964
7	-28.8746	24.4370	-22.5680	-17.5359
8	-21.8894	23.0980	-23.9346	-15.6638
9	-26.5798	20.9151	-25.8673	-18.1159

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen çıktılar için hesaplanan S/N oranları grafiksel olarak Şekil 4.46-4.49’da verilmiştir. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde incelenen şartlar altında takım aşınmasının minimum olduğu şartlar; devir sayısının en yüksek değeri, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin en düşük değerleri olarak bulunmuştur (Şekil 4.46). Yani, takım aşınmasını minimize etmek için devir sayısının 12000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olarak seçilmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 4.46: Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.

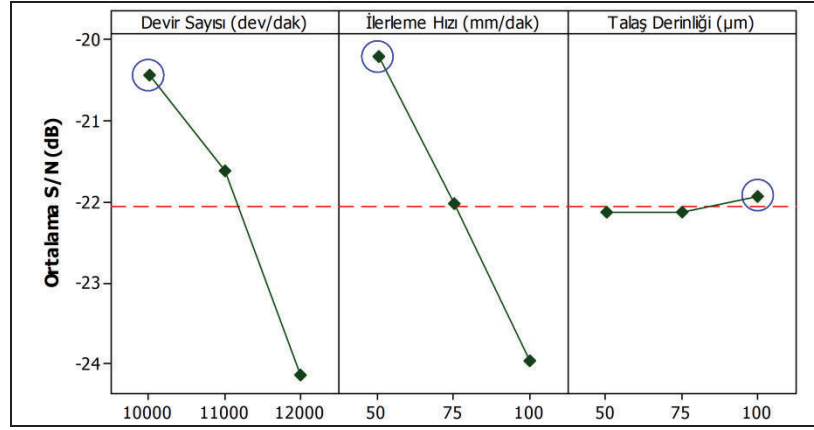
Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde minimum yüzey pürüzlülüğü değeri 12000 dev/dak devir sayısında, 50 mm/dak ilerleme hızında ve 50 µm talaş derinliğinde elde edilmiştir (Şekil 4.47).



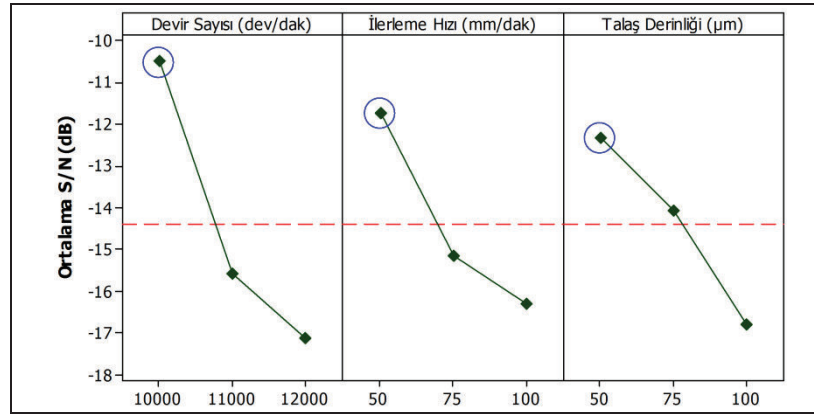
Şekil 4.47: Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvveti için optimum işleme şartları seti devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 100 µm olduğu değerler olarak bulunmuştur (Şekil 4.48).

P-to-V Fy için optimum şartlar devirin 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olduğu değerlerde elde edilmiştir (Şekil 4.49).



Şekil 4.48: Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.



Şekil 4.49: Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.

4.1.3.4. İşleme Şartlarının Etkisi

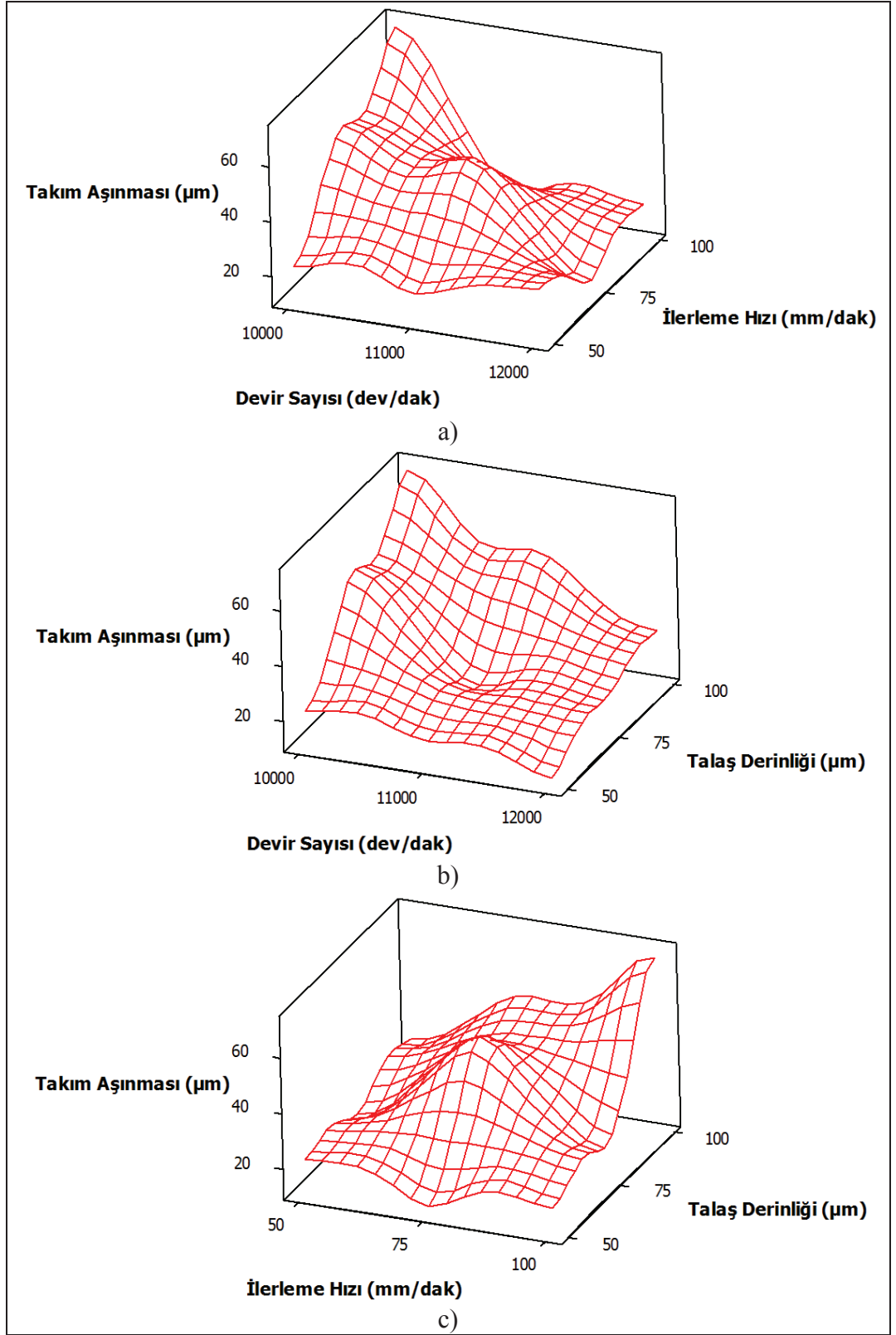
Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kesme parametrelerinin takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy üzerindeki etkisini inceleyebilmek için 3D yüzey grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.50-4.53). Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde talaş derinliği (Şekil 4.50.b ve Şekil 4.50.c) arttıkça takım aşınması artmıştır. Devir sayısının (Şekil 4.50.a ve Şekil 4.50.b) ve ilerleme hızının (Şekil 4.50.a ve Şekil 4.50.c) takım aşınması üzerindeki etkisinin ise değişken olduğu ve talaş derinliğine göre etkilerinin daha az olduğu bulunmuştur.

İlerleme hızı arttıkça Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü artmıştır (Şekil 4.51.a ve Şekil 4.51.c). Artan ilerleme hızı ile

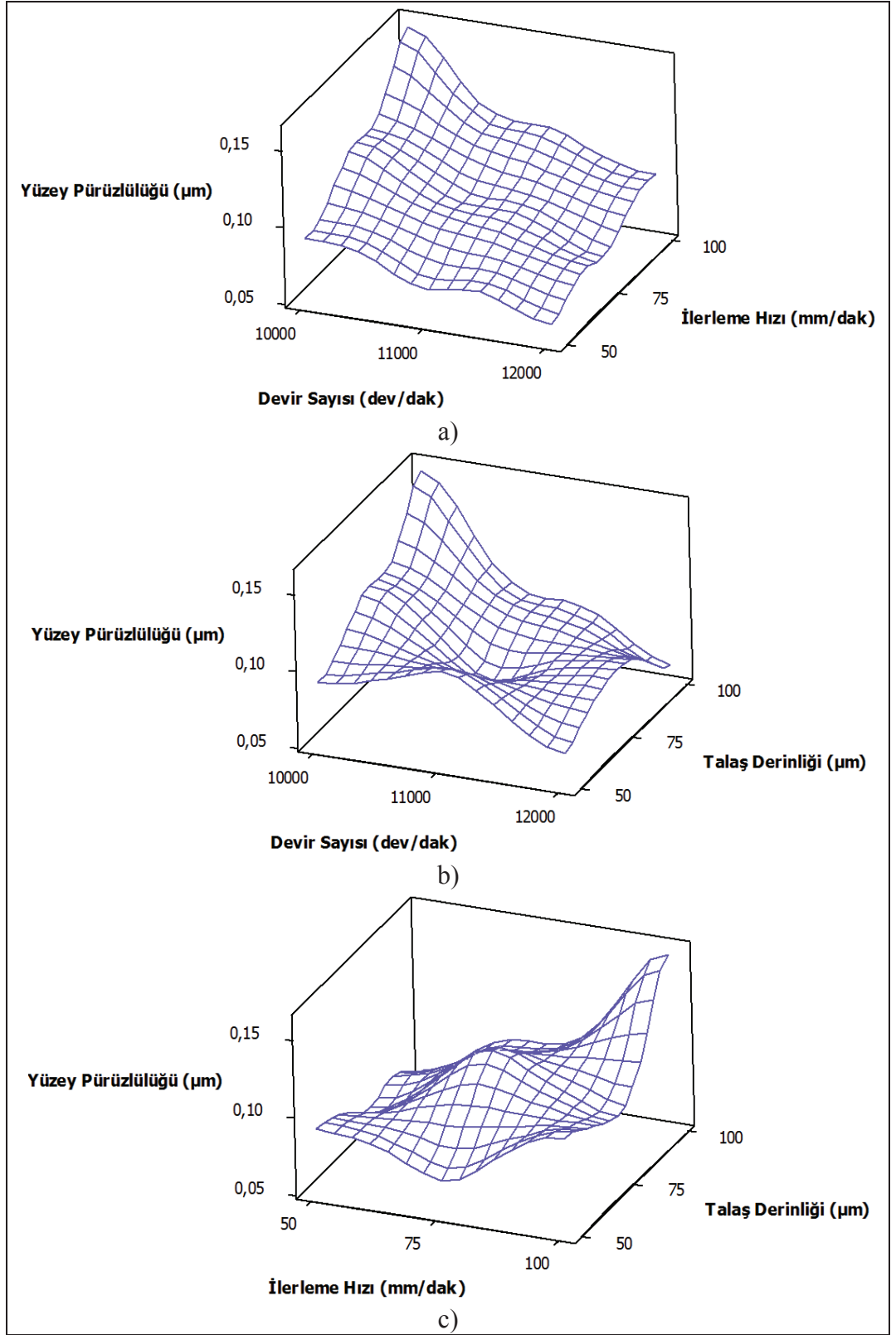
yüzey pürüzlülüğünün artması makro frezelemede de gözlemlenen bir sonuçtur ve bu sonuç mikro frezeleme ile ilgili yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [37], [43], [92], [100], [102], [103]. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmıştır (Şekil 4.51.a ve Şekil 4.51.b) ve bu sonucun literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu bulunmuştur [39], [91], [105]. Talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin ise devir sayısı ve ilerleme hızı ile karşılaştırıldığında çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.52.a ve Şekil 4.52.b) ve ilerleme hızı (Şekil 4.52.a ve Şekil 4.52.c) arttıkça P-to-V Fx kuvveti artmıştır. Başlangıçta P-to-V Fx kuvvetinin artan talaş derinliği ile arttığı daha sonra artan talaş derinliği ile azaldığı bulunmuştur (Şekil 4.52.b ve Şekil 4.52.c).

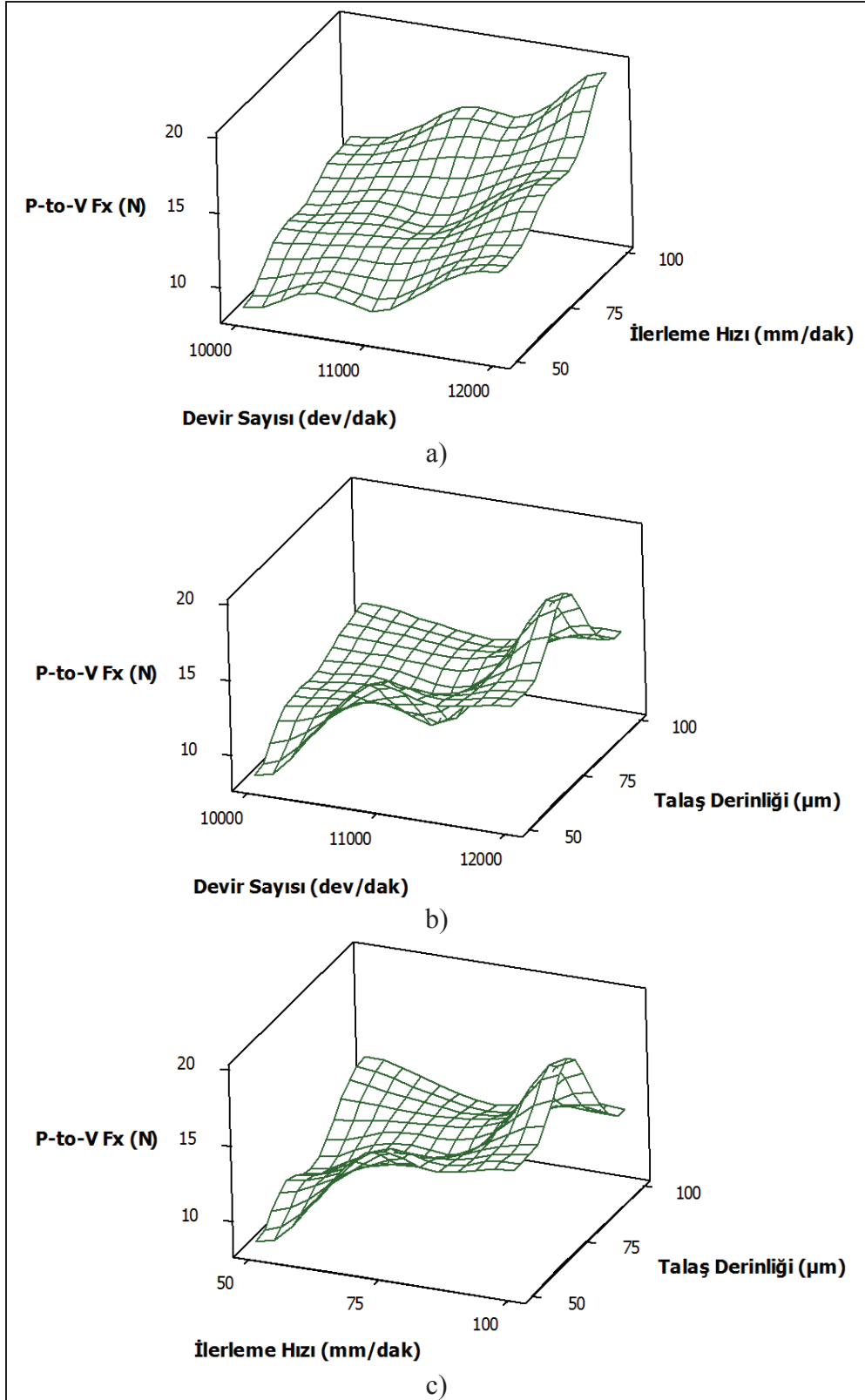
Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.53.a ve Şekil 4.53.b), ilerleme hızı (Şekil 4.53.a ve Şekil 4.53.c) ve talaş derinliği (Şekil 4.53.b ve Şekil 4.53.c) arttıkça P-to-V Fy kuvveti artmıştır. Kesme kuvvetlerinin (Fx ve Fy) devir sayısı [91], ilerleme [46], [48], [91], [98], [105] ve talaş derinliği [48] ile artması literatürde de ifade edilmiştir. Talaş derinliğindeki artış ile kuvvet değerinin artmasının nedeni talaş kesit alanının artmasına atfedilebilir.



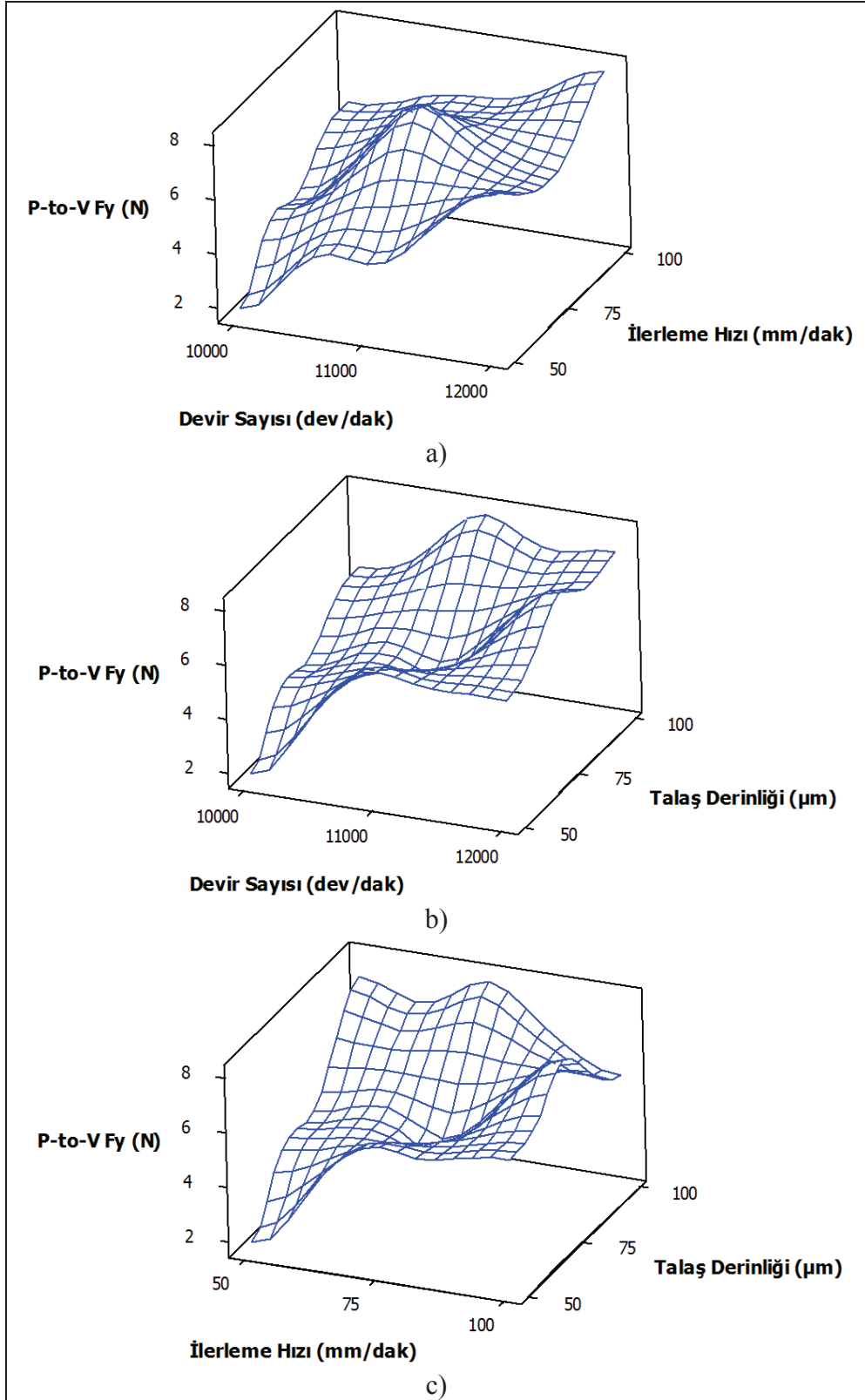
Şekil 4.50: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.51: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.52: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.53: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

4.1.3.5. Varyans Analizi (ANOVA)

Ti6Al4V malzemesi için mikro yüzey frezeleme deneylerinde ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri için ANOVA tablosu oluşturulmuştur (Tablo 4.21-4.24).

Tablo 4.21’de verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını sırasıyla %39.700, %13.485 ve %46.281 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği için hesaplanan F değeri (Tablo 4.21), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.21: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	1306.68	653.34	74.37	0.013	39.700
İlerleme Hızı	2	443.84	221.92	25.26	0.038	13.485
Talaş Derinliği	2	1523.27	761.63	86.69	0.011	46.281
Hata	2	17.57	8.79			0.534
Toplam	8	3291.35				100

Tablo 4.22’de verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla %51.020, %43.149 ve %3.790 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı ve ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.22), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Ti6Al4V malzemesinin mikro frezelenmesinde talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin çok az olduğu bulunmuştur ve bu sonuç literatürde de ifade edilmiştir [29], [100], [141].

Tablo 4.23’te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvvetini sırasıyla %49.961, %47.403 ve %1.535 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı ve ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.23), tablodan alınan F değerinden

büyük olduğu için devir sayısının ve ilerleme hızının P-to-V Fx kuvveti üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.22: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.0038889	0.0019444	25.00	0.038	51.020
İlerleme Hızı	2	0.0032889	0.0016444	21.14	0.045	43.149
Talaş Derinliği	2	0.0002889	0.0001444	1.86	0.350	3.790
Hata	2	0.0001556	0.0000778			2.041
Toplam	8	0.0076222				100

Tablo 4.23: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	49.747	24.873	45.37	0.022	49.961
İlerleme Hızı	2	47.199	23.600	43.05	0.023	47.403
Talaş Derinliği	2	1.528	0.764	1.39	0.418	1.535
Hata	2	1.096	0.548			1.101
Toplam	8	99.571				100

Tablo 4.24'te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde P-to-V Fy kuvvetini sırasıyla %55.254, %19.230 ve %22.631 etkilemektedir. Devir sayısı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.24), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının P-to-V Fy üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.24: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	19.9331	9.9665	19.15	0.050	55.254
İlerleme Hızı	2	6.9372	3.4686	6.67	0.130	19.230
Talaş Derinliği	2	8.1640	4.0820	7.84	0.113	22.631
Hata	2	1.0408	0.5204			2.885
Toplam	8	36.0751				100

4.1.3.6. Çoklu Optimizasyon

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede ölçülen tepkilerin çoklu optimizasyonu için gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Normalizasyon işlemi sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.25’de ve gri ilişkisel katsayı değerleri ise Tablo 4.26’da verilmiştir. Tablo 4.27’de ve Şekil 4.54’te gri ilişkisel dereceler verilmiştir. En yüksek (optimum) sonuç 1 numaralı deney ile elde edilmiştir. Yani minimum takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet 1 numaralı deneyde kullanılan işleme şartlarında elde edilmiştir.

Tablo 4.25: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.

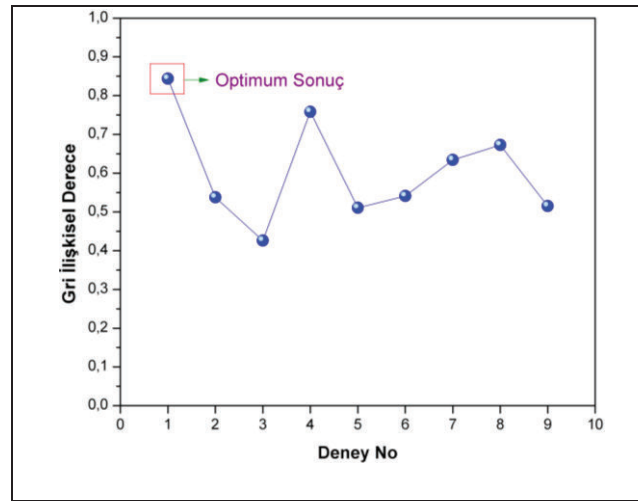
Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	0.833	0.700	1.000	1.000
2	0.285	0.400	0.758	0.681
3	0.000	0.000	0.626	0.427
4	0.883	0.900	0.893	0.619
5	0.367	0.700	0.721	0.000
6	0.896	0.500	0.335	0.273
7	0.739	1.000	0.550	0.089
8	1.000	0.900	0.347	0.322
9	0.848	0.700	0.000	0.006

Tablo 4.26: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.

Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	0.750	0.625	1.000	1.000
2	0.411	0.455	0.673	0.611
3	0.333	0.333	0.572	0.466
4	0.810	0.833	0.824	0.567
5	0.441	0.625	0.642	0.333
6	0.828	0.500	0.429	0.407
7	0.657	1.000	0.526	0.354
8	1.000	0.833	0.434	0.425
9	0.767	0.625	0.333	0.335

Tablo 4.27: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.

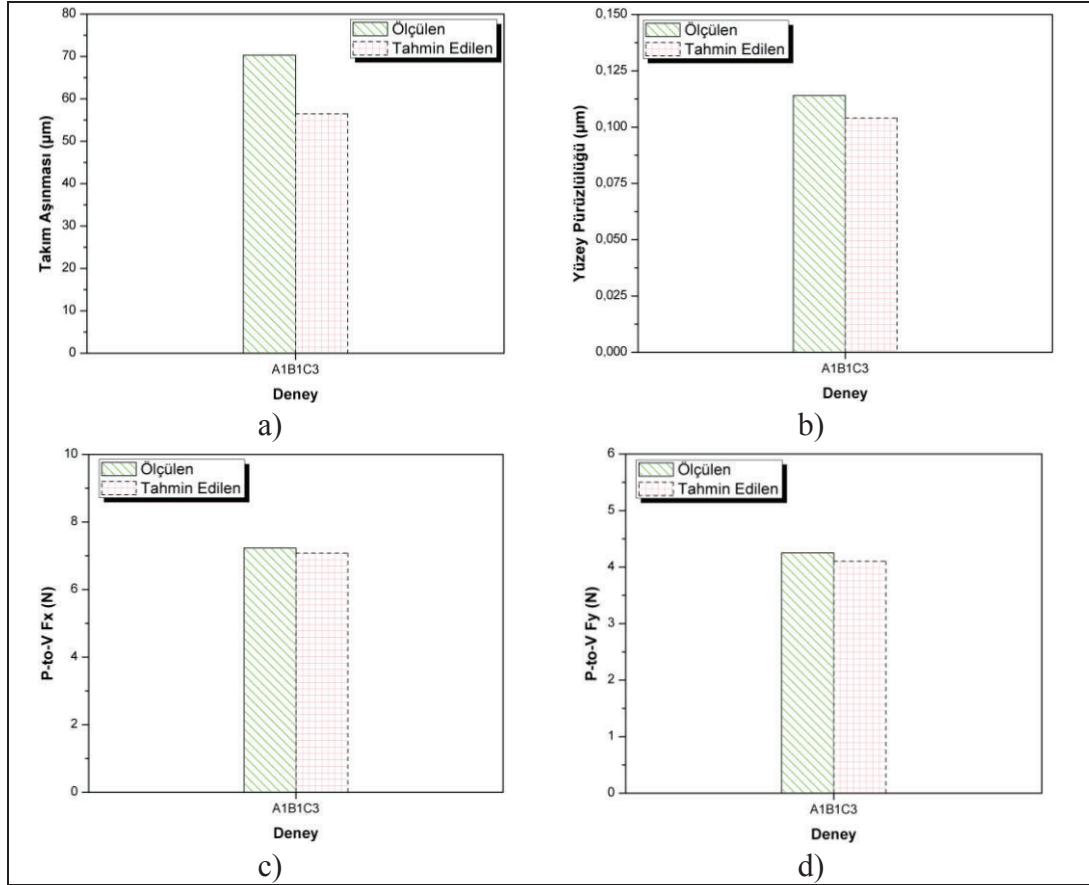
Deney No	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Talaş Derinliği (μm)	Gri Derece	Sıralama
1	10000	50	50	0.844	1
2	10000	75	75	0.537	6
3	10000	100	100	0.426	9
4	11000	50	75	0.759	2
5	11000	75	100	0.510	8
6	11000	100	50	0.541	5
7	12000	50	100	0.634	4
8	12000	75	50	0.673	3
9	12000	100	75	0.515	7



Şekil 4.54: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler.

4.1.3.7. Doğrulama Deneyleri

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde Taguchi deney planına göre yürütülen deney sonuçlarını doğrulamak için 1 adet doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi P-to-V Fx kuvvetinin optimum olduğu şartta yürütülmüştür. Yani doğrulama deneyi A1B1C3 kombinasyonunda yapılmıştır. Doğrulama deneyinde devir sayısı 10000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 100 μm değerlerindedir. Optimum şartlarda yürütülen deneylerin sonuçları ve tahmin edilen değerler Şekil 4.55’de verilmiştir. Doğrulama deneyinin sonuçları ile tahmin edilen sonuçların birbirine yakın değerler verdiği bulunmuştur.

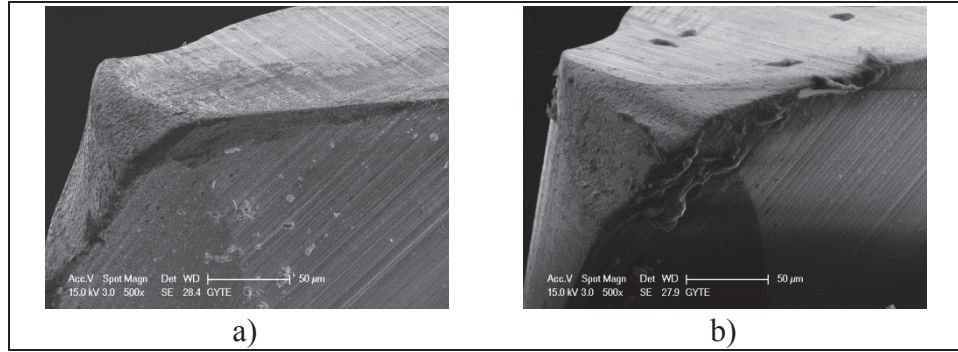


Şekil 4.55: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesi için doğrulama deneyinin sonuçları. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

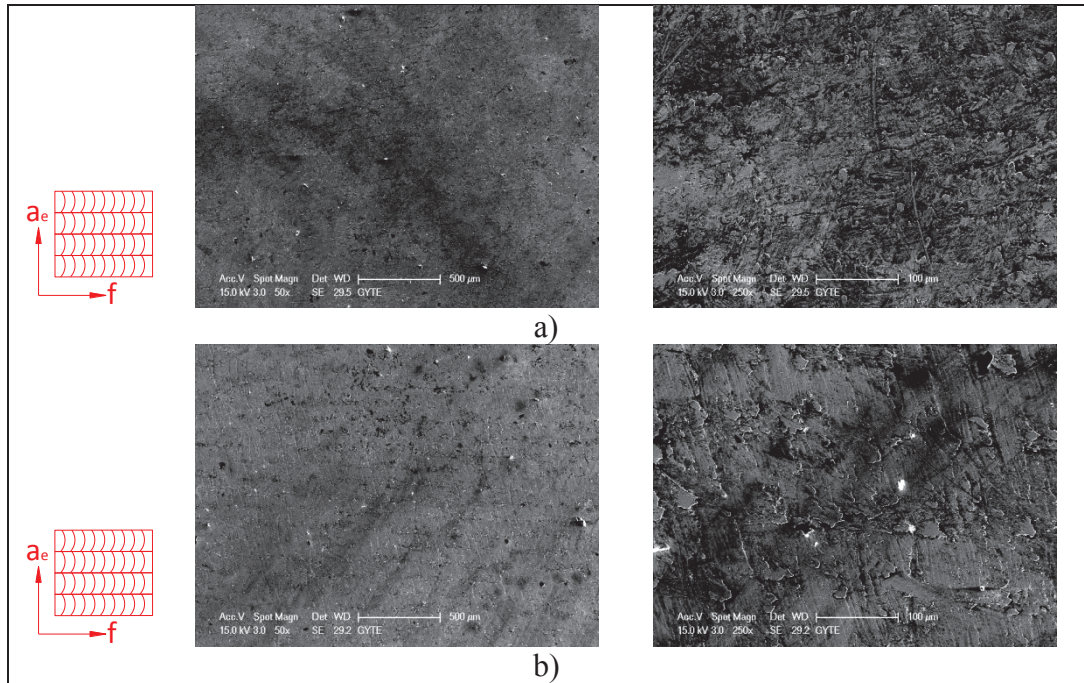
4.1.4. Inconel 718 Malzemesinin Mikro Yüzey Frezelenmesi

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesi sonucu mikro kesici takımlarda meydana gelen takım aşınmalarının örnek görüntüleri Şekil 4.56'da verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi takım aşınması kesici takımların kenarına yakın kısımlarda meydana gelmiştir. Bu çalışmada Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde işleme şartları ve kesici takımlar aynı seçilmiştir. Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde bazı deneylerde dökülme görülmüştür, fakat Ti6Al4V malzemesinde dökülme görülmemiştir. Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde işlenen yüzeylerinin durumu Şekil 4.57'de gösterilmiştir. Bu şekillerde iş parçası yüzeylerinin görüntüleri 50× ve 250× büyütme ile alınmıştır. Yüzey şekillerinde yana kayma izleri açık bir şekilde görülmektedir. İş parçası yüzeyleri büyütülerek incelendiğinde yüzeylerde herhangi bir yapışma olmadığı görülmüştür. Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey

frezelenmesinde iş parçası yüzeyinde Al 7075 ve AISI 304 malzemeleri ile karşılaştırıldığında mikro çapak oluşumu gözlenmemiştir. Bunun nedeni Ti6Al4V malzemesinde olduğu gibi Inconel 718 malzemesinin sertliğinin talaş ayrılmasını kolaylaştırmayı desteklemesine atfedilebilir. Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet sonuçları kantitatif olarak Tablo 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.56: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede takım aşınması görüntüleri. a) Deney 2 (Devir sayısı: 10000 dev/dak, ilerleme hızı: 75 mm/dak ve talaş derinliği: 75 μm), b) Deney 8 (Devir sayısı: 12000 dev/dak, ilerleme hızı: 75 mm/dak ve talaş derinliği: 50 μm).



Şekil 4.57: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede iş parçası yüzeylerinin görüntüleri. a) Deney 2, b) Deney 8.

Tablo 4.28: Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri.

Deney No	Takım Aşınması (μm)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	P-to-V Fx (N)	P-to-V Fy (N)
1	19.467	0.04	26.41	20.49
2	22.653	0.12	31.47	22.32
3	30.277	0.18	33.29	27.46
4	21.428	0.08	27.71	21.42
5	29.017	0.17	33.38	28.45
6	32.541	0.12	37.82	31.14
7	29.736	0.16	34.24	22.05
8	37.480	0.18	39.43	27.83
9	45.875	0.25	43.94	28.47

4.1.4.1. Regresyon Analizi

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerini deney yapmadan tahmin edebilmek için regresyon modelleri geliştirilmiştir. Modellerin geliştirilmesinde işleme parametrelerinin etkilerini içeren birinci dereceden denklemler oluşturulmuştur.

Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede takım aşınması değerini veren denklem:

$$VB = -63.6 + 0.00678n + 0.254f - 0.0031a_p \quad (4.25)$$

$$R^2 = \%93.5 \quad R^2(\text{adj}) = \%89.5$$

Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede yüzey pürüzlülüğü değerini veren denklem:

$$Ra = -0.534 + 0.000042n + 0.00180f + 0.00113a_p \quad (4.26)$$

$$R^2 = \%88.8 \quad R^2(\text{adj}) = \%82.1$$

Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede kuvvet değerlerini veren denklemler:

$$F_x = -26.3 + 0.00441n + 0.178f - 0.0183a_p \quad (4.27)$$

$$R^2 = \%95.7 \quad R^2 (\text{adj}) = \%93.1$$

$$F_y = -0.1 + 0.00135n + 0.154f - 0.0100a_p \quad (4.28)$$

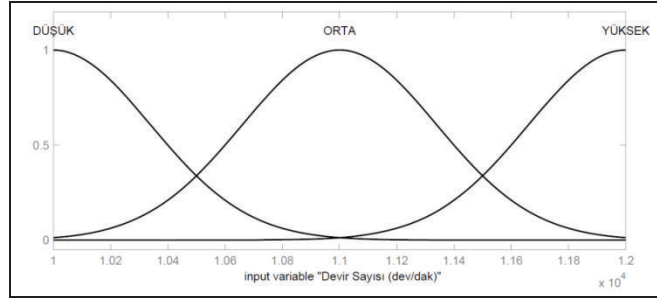
$$R^2 = \%81.9 \quad R^2 (\text{adj}) = \%71.1$$

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde çıktı performanslarını tahmin edebilmek için geliştirilen matematiksel modellerin tamamının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini açıklamada yeterli olduğu bulunmuştur.

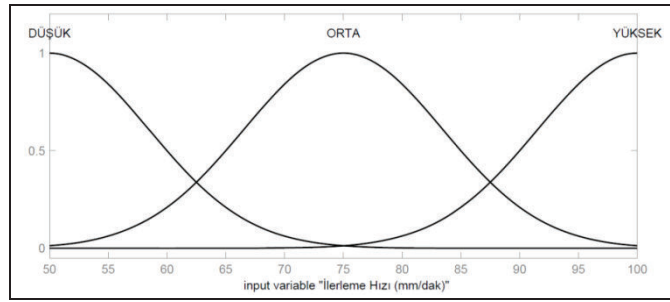
4.1.4.2. Bulanık Mantık

Çıktıları deney yapmadan tahmin edebilmek için bulanık mantık modelleri de geliştirilmiştir. Devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği sistemin girdisi olarak, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V F_x ve P-to-V F_y çıktılar olarak kullanılmıştır. Sayısal değerlerin sözel ifadelerle dönüştürülebilmesi için Gaussian üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Girdilerin üyelik fonksiyonu düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç kategoride hazırlanmıştır (Şekil 4.58-4.60).

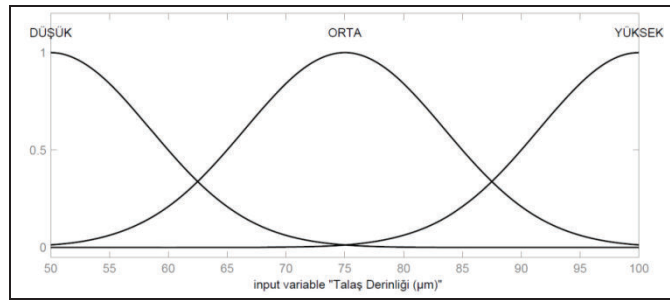
Takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini modellemek için 9 adet kural oluşturulmuştur. Kurallara göre çalıştırılan bulanık mantık sistemiyle çıktılar sayısal olarak tahmin edilmiştir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V F_x ve P-to-V F_y için ölçülen ve hem regresyon hem de bulanık mantık yöntemleri ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırması Şekil 4.61'de verilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen bulanık mantık modellerinin tamamının Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet verilerini açıklamada yeterli olduğu görülmüştür.



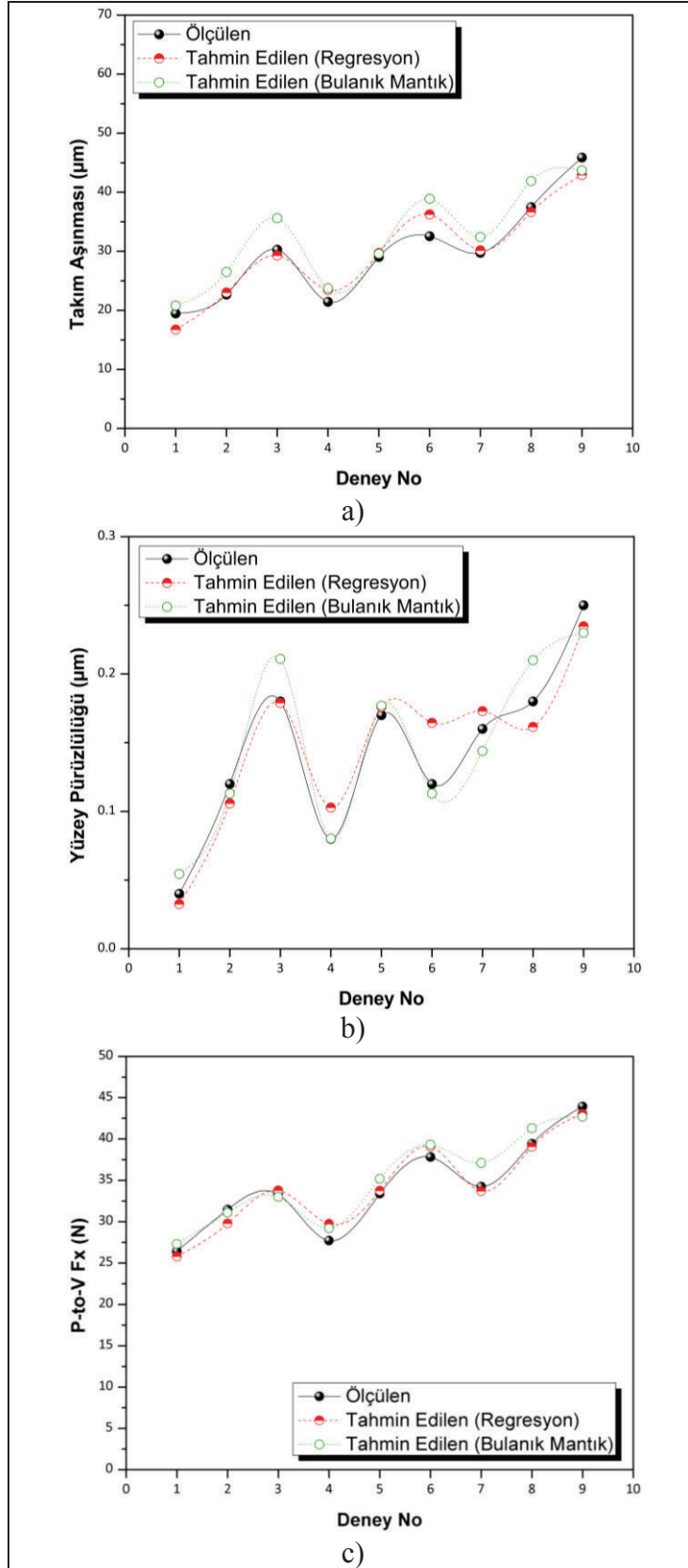
Şekil 4.58: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede devir sayısı için üyelik fonksiyonu grafiği.



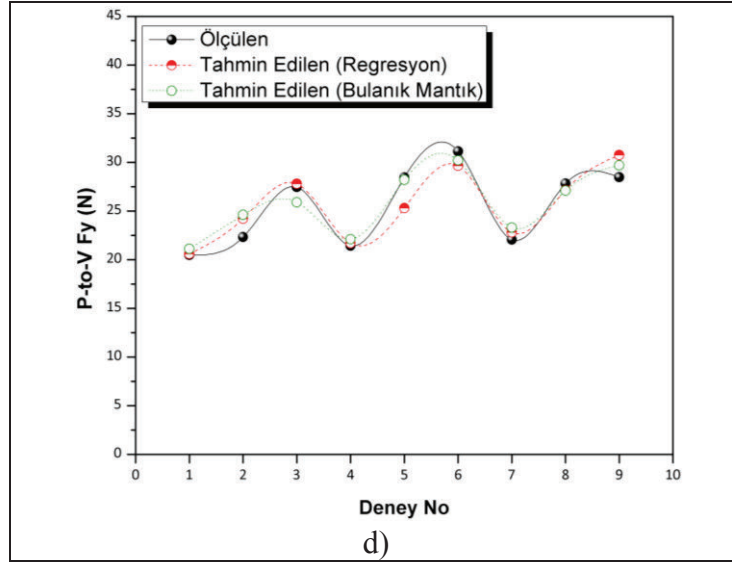
Şekil 4.59: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede ilerleme hızı için üyelik fonksiyonu grafiği.



Şekil 4.60: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede talaş derinliği için üyelik fonksiyonu grafiği.

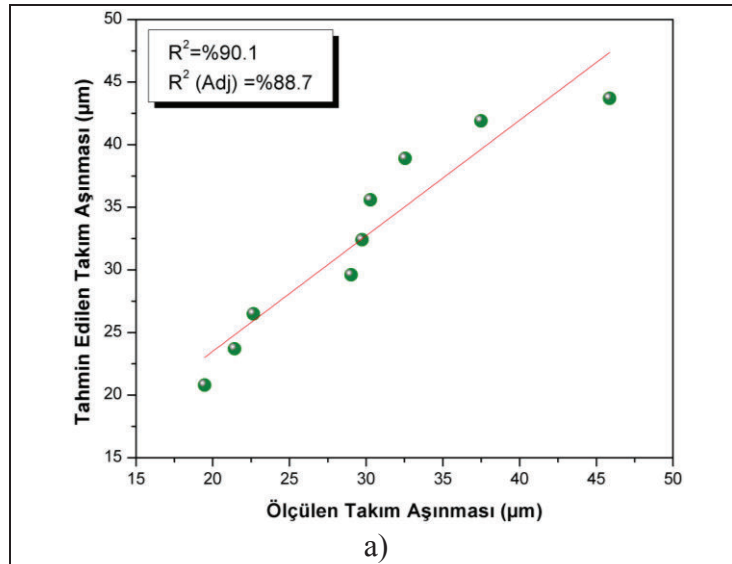


Şekil 4.61: Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

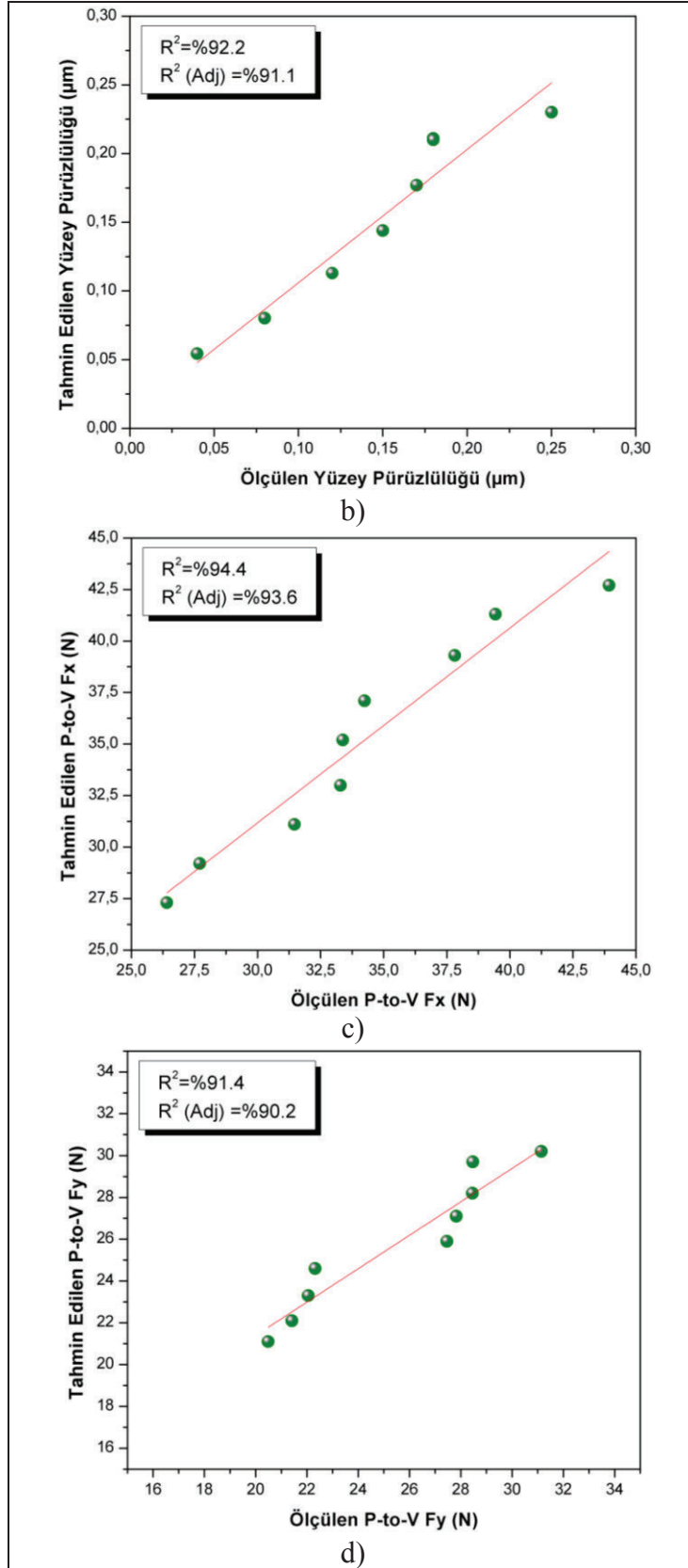


Şekil 4.61: Devam.

Bulanık mantık modellerinin tümü için R^2 değerlerinin %90'ın üzerinde olduğu bulunmuştur (Şekil 4.62) ve bu nedenle Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini tahmin etmede bulanık mantık ile modellemenin mümkün olduğu görülmüştür.



Şekil 4.62: Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede bulanık mantık yaklaşımı ile tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.



Şekil 4.62: Devam.

4.1.4.3. S/N Analizi

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler ölçüldüğünden, analizlerde S/N oranı en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 4.29’da verilmiştir.

Tablo 4.29: Inconel 718 malzemesi için yüzey işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerinin S/N oranları.

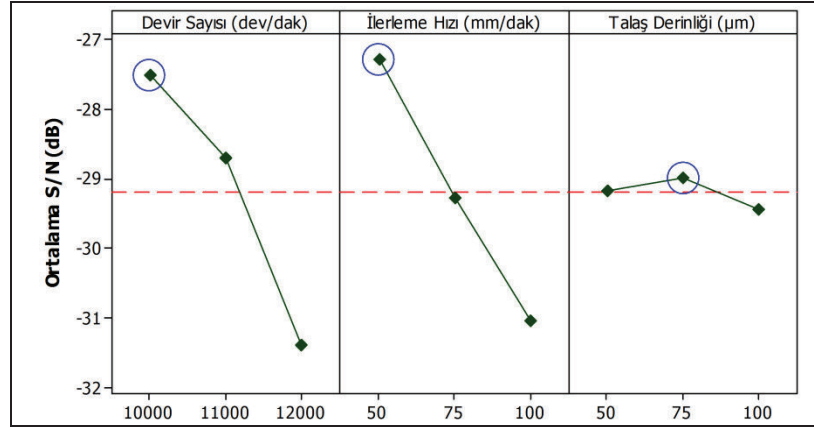
Deney No	S/N Oranları (dB)			
	Takım Aşınması	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	-25.7860	27.9588	-28.4354	-26.2308
2	-27.1025	18.4164	-29.9579	-26.9739
3	-29.6223	14.8945	-30.4463	-28.7740
4	-26.6196	21.9382	-28.8527	-26.6164
5	-29.2531	15.3910	-30.4697	-29.0816
6	-30.2486	18.4164	-31.5544	-29.8664
7	-29.4657	15.9176	-30.6907	-26.8682
8	-31.4760	14.8945	-31.9165	-28.8903
9	-33.2315	12.0412	-32.8572	-29.0877

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ölçülen çıktıların S/N oranları grafiksel olarak verilmiştir (Şekil 4.63-4.66). Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınması için optimum işleme şartları seti A1B1C2 olarak bulunmuştur (Şekil 4.63). Yani, takım aşınmasını minimize etmek için en iyi kombinasyon devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 75 µm olduğu kesme şartlarında elde edilmiştir.

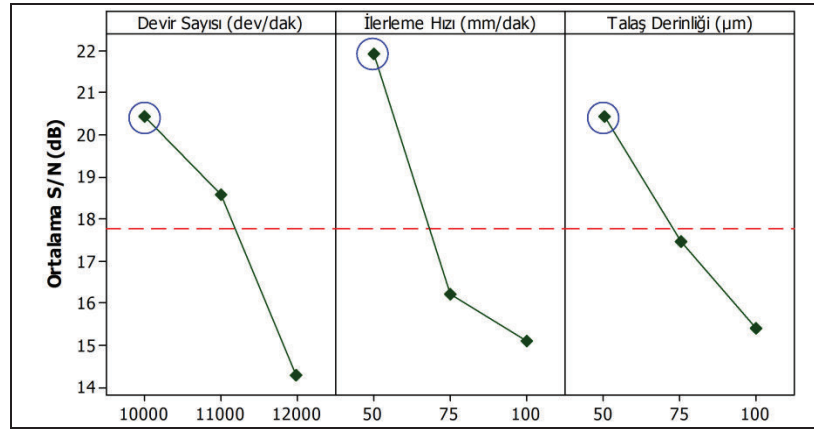
Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde minimum yüzey pürüzlülüğü değerini elde etmek için optimum işleme şartları seti devir sayısı 10000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 50 µm olarak bulunmuştur (Şekil 4.64).

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvveti için optimum işleme şartları seti devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 100 µm olduğu değerlerde elde edilmiştir (Şekil 4.65).

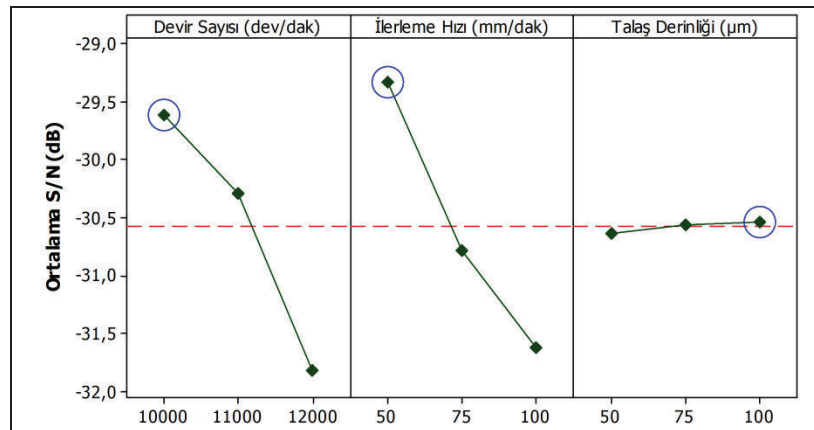
Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fy kuvveti için optimum işleme şartları seti devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 75 µm olduğu değerlerde elde edilmiştir (Şekil 4.66).



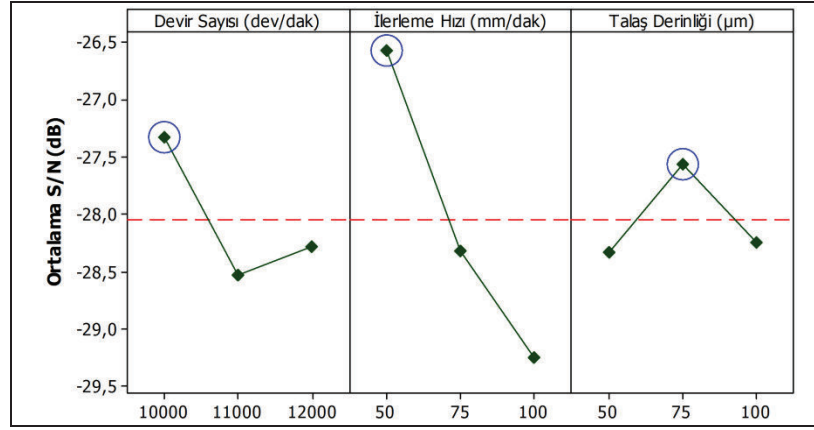
Şekil 4.63: Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.



Şekil 4.64: Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen yüzey pürüzlülüklerinin S/N oranları.



Şekil 4.65: Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fx kuvvetlerinin S/N oranları.



Şekil 4.66: Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezelemede ölçülen P-to-V Fy kuvvetlerinin S/N oranları.

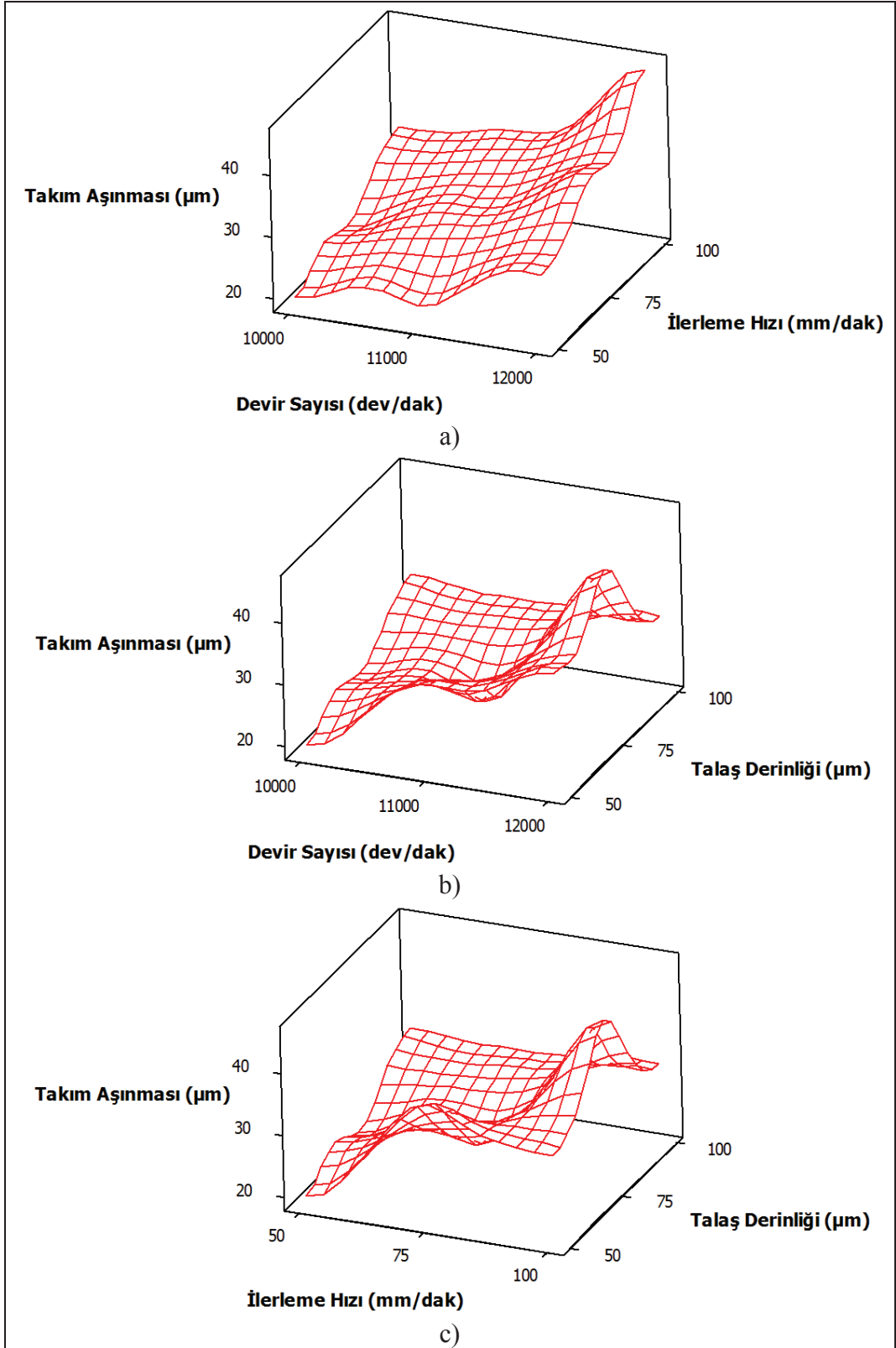
S/N grafikleri incelendiğinde, Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde işleme şartlarının ölçülen çıktılar üzerinde farklı etkiler yaptığı bulunmuştur.

4.1.4.4. İşleme Şartlarının Etkisi

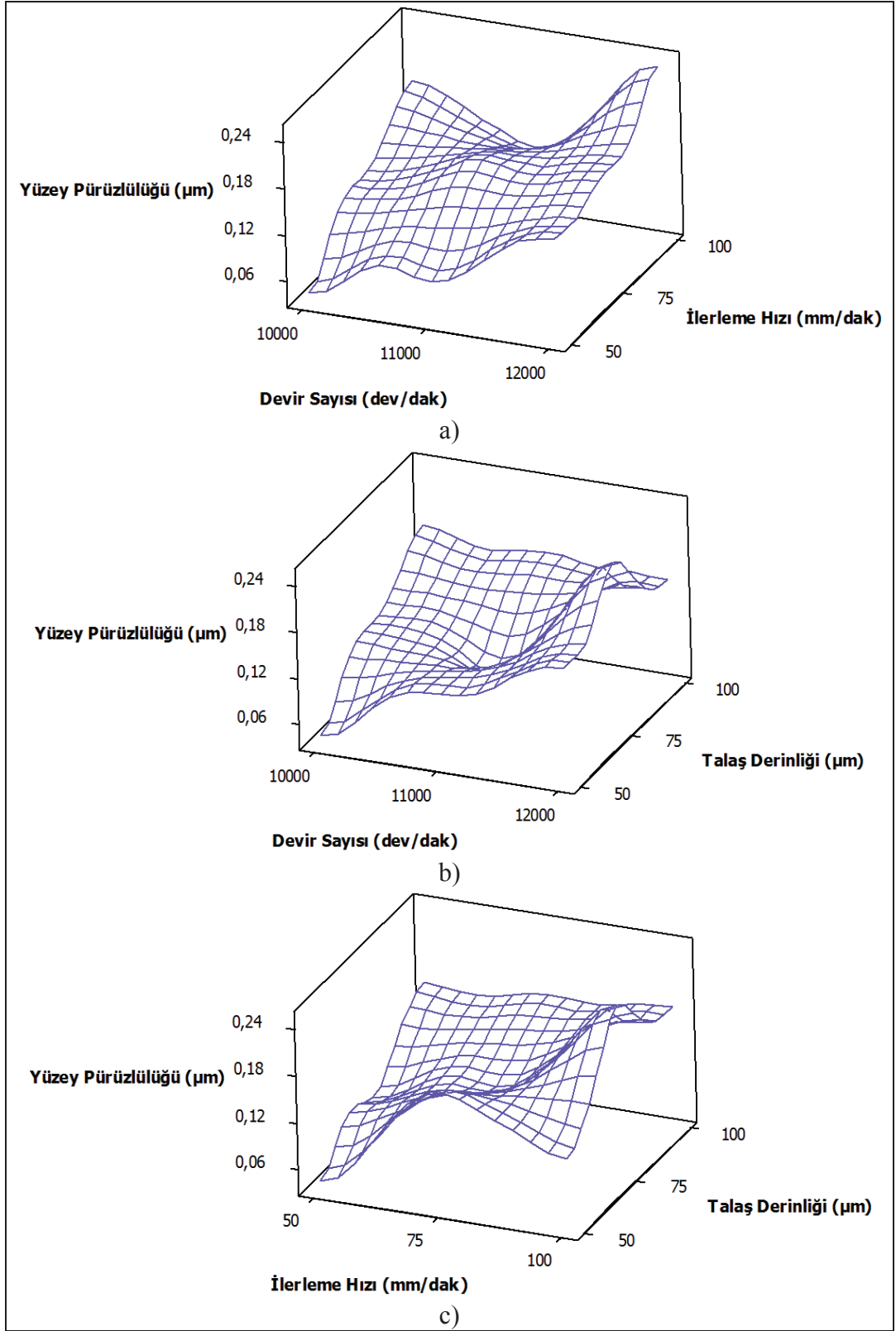
Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde işleme şartlarının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy üzerindeki etkisini inceleyebilmek için 3D yüzey grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.67-4.70). Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.67.a ve Şekil 4.67.b) ve ilerleme hızı (Şekil 4.67.a ve Şekil 4.67.c) arttıkça takım aşınması artmıştır. Mikro frezelemede takım aşınmasının devir sayısı [99] ve ilerleme [97] değerlerinin artması ile arttığı literatürde de ifade edilmiştir.

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin artması yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır (Şekil 4.68). Artan ilerleme [37], [43], [92], [100], [102], [103], [105] ve talaş derinliği [29] ile yüzey pürüzlülüğünün artması diğer çalışmalarda da bulunmuştur.

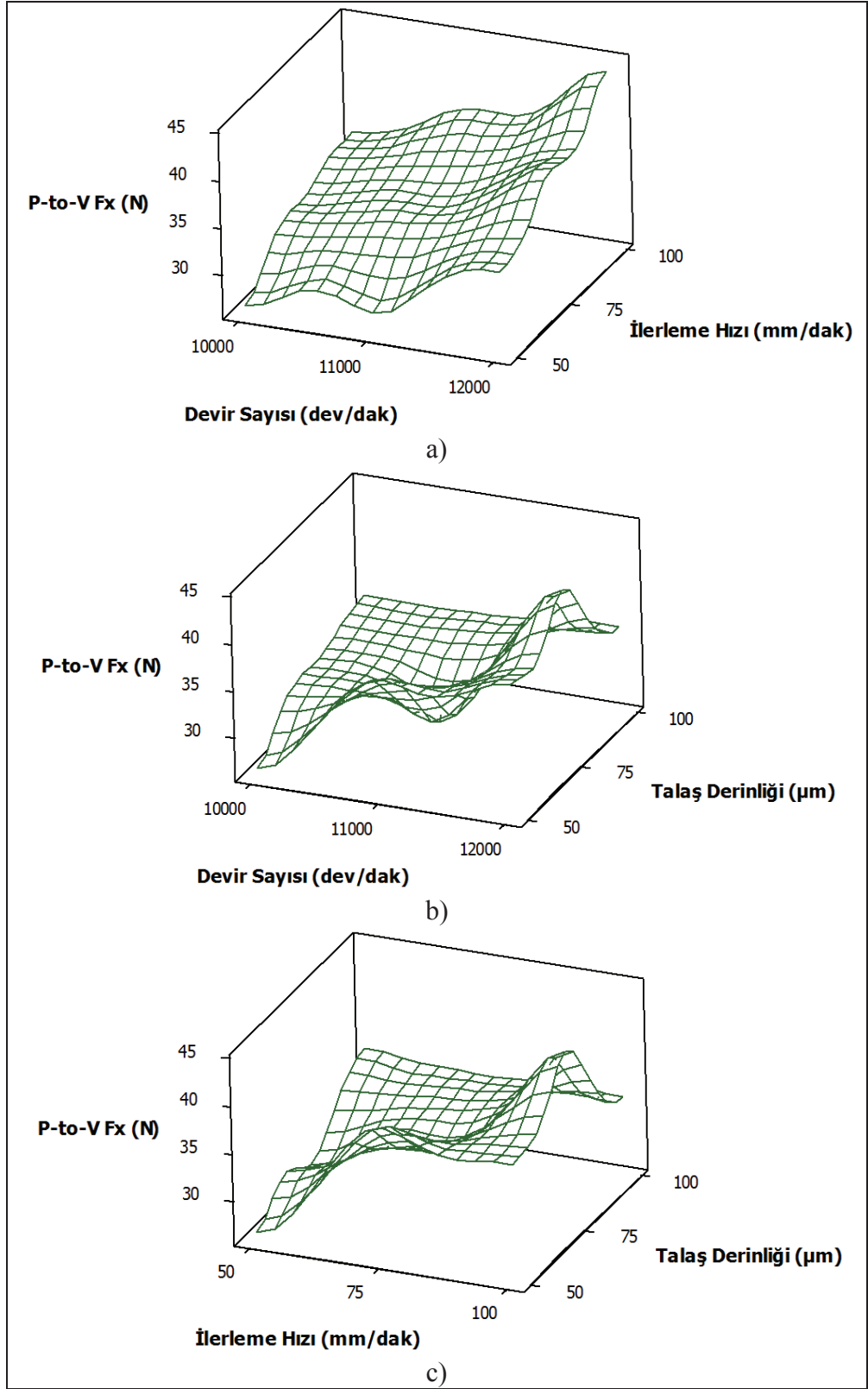
Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.69.a ve Şekil 4.69.b) ve ilerleme hızı (Şekil 4.69.a ve Şekil 4.69.c) arttıkça P-to-V Fx kuvvetinin arttığı bulunmuştur. Fx kuvvetinin devir sayısı [91] ve ilerleme [46], [48], [91], [98], [105] ile arttığı diğer çalışmalarda da belirtilmiştir.



Şekil 4.67: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

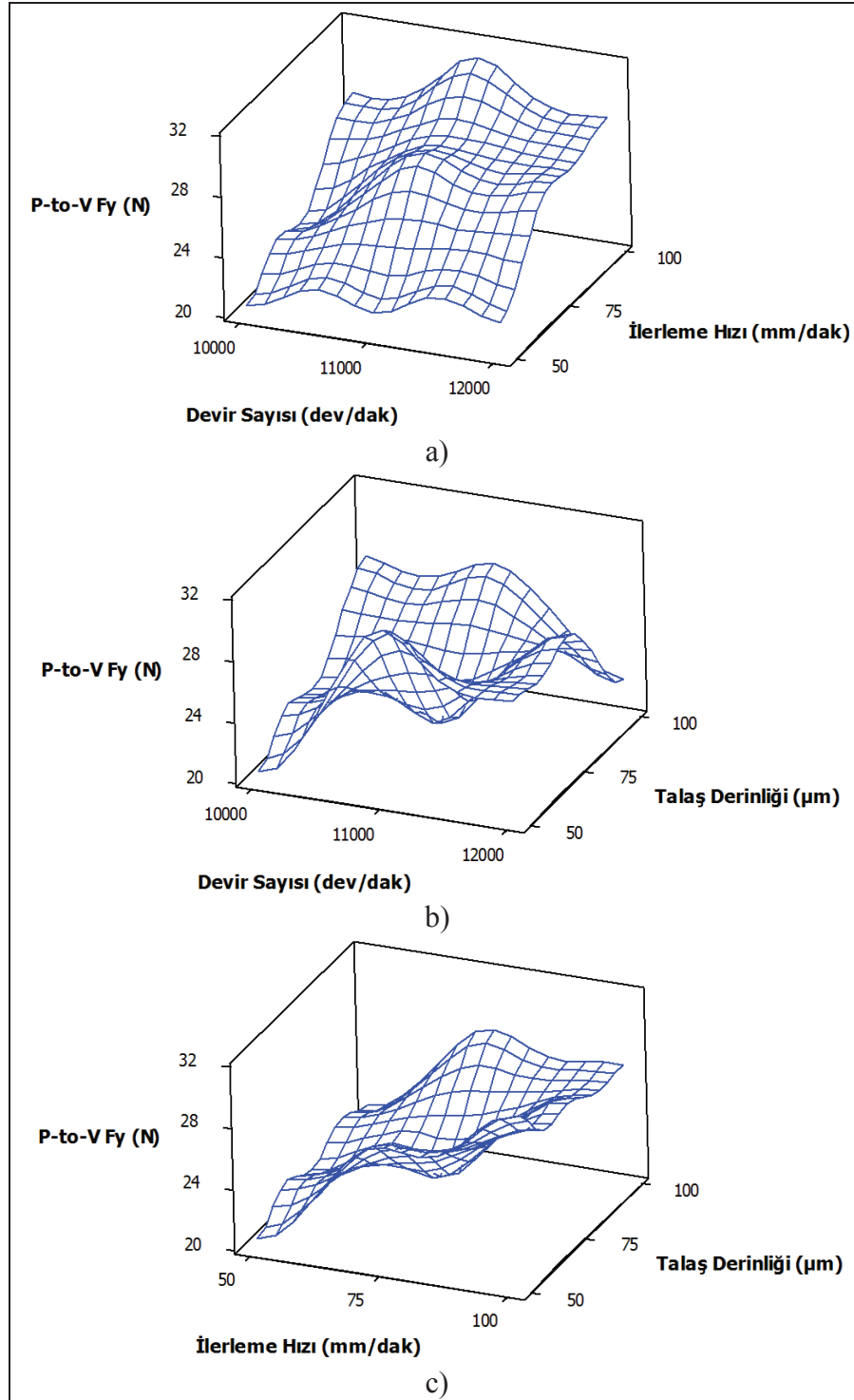


Şekil 4.68: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.69: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V Fx kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ilerleme hızı (Şekil 4.70.a ve Şekil 4.70.c) ve talaş derinliği (Şekil 4.70.b ve Şekil 4.70.c) arttıkça P-to-V F_y kuvveti artmıştır.



Şekil 4.70: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin P-to-V F_y kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

4.1.4.5. Varyans Analizi (ANOVA)

Inconel 718 malzemesi için mikro yüzey frezeleme deneylerinde ölçülen takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri için ANOVA tablosu oluşturulmuştur (Tablo 4.30-4.33).

Tablo 4.30’da verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını sırasıyla %53.670, %43.619 ve %0.026 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.30), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Devir sayısının takım aşınmasını etkileyen en önemli parametre olduğu diğer çalışmalarda da ifade edilmiştir [11], [150]. Ayrıca talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu da literatürde belirtilmiştir [80].

Tablo 4.30: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	297.160	148.580	19.99	0.048	53.670
İlerleme Hızı	2	241.511	120.755	16.25	0.058	43.619
Talaş Derinliği	2	0.143	0.071	0.01	0.990	0.026
Hata	2	14.865	7.432			2.685
Toplam	8	553.678				100

Tablo 4.31’de verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla %40.302, %41.601 ve %16.078 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı ve ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.31), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğünü en fazla etkileyen parametrenin ilerleme olduğu diğer çalışmalarda da belirtilmiştir [29], [140].

Devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fx kuvvetini sırasıyla %49.856, %48.647 ve %0.573 etkilemektedir. Devir sayısı ve ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.32),

tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devirin ve ilerleme hızının P-to-V Fx üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.33'te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde P-to-V Fy kuvvetini sırasıyla %17.045, %74.473 ve %7.979 etkilemektedir. Devir sayısı ve ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.33), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının ve ilerleme hızının P-to-V Fy üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Talaş derinliğinin kuvvetler üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu literatürde de belirtilmiştir [46].

Tablo 4.31: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.0124222	0.0062111	19.96	0.048	40.302
İlerleme Hızı	2	0.0128222	0.0064111	20.61	0.046	41.601
Talaş Derinliği	2	0.0049556	0.0024778	7.96	0.112	16.078
Hata	2	0.0006222	0.0003111			2.019
Toplam	8	0.0308222				100

Tablo 4.32: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fx değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	123.186	61.593	53.98	0.018	49.856
İlerleme Hızı	2	120.199	60.100	52.67	0.019	48.647
Talaş Derinliği	2	1.415	0.708	0.62	0.617	0.573
Hata	2	2.282	1.141			0.924
Toplam	8	247.083				100

Tablo 4.33: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde Taguchi deneyleri sonucu ölçülen P-to-V Fy değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	20.857	10.428	33.88	0.029	17.045
İlerleme Hızı	2	91.127	45.563	148.04	0.007	74.473
Talaş Derinliği	2	9.764	4.882	15.86	0.059	7.979
Hata	2	0.616	0.308			0.503
Toplam	8	122.363				100

4.1.4.6. Çoklu Optimizasyon

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde çoklu optimizasyon için gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır. Normalizasyon işlemi sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.34'te ve gri ilişkisel katsayı değerleri ise Tablo 4.35'de verilmiştir. Tablo 4.36'da ve Şekil 4.71'de gri ilişkisel dereceler verilmiştir. En yüksek (optimum) değer 1. deney sonucunda bulunmuştur. Yani minimum takım aşınması, pürüzlülük ve kuvvet 1. deneyde kullanılan şartlarda elde edilmiştir.

Tablo 4.34: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için normalizasyon sonuçları.

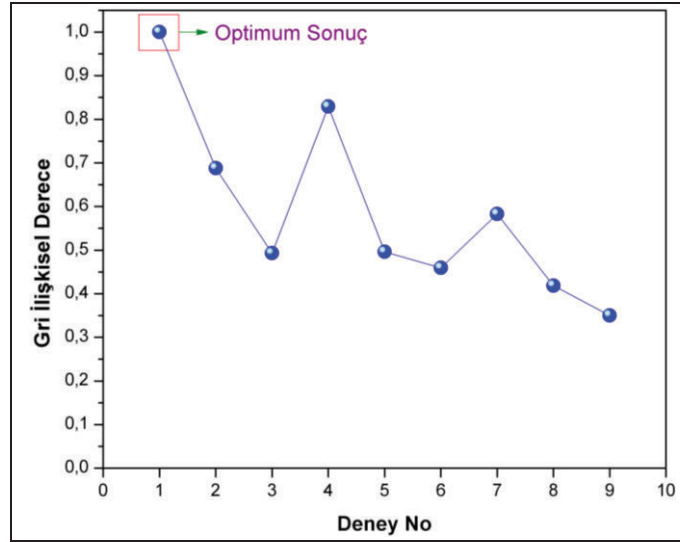
Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.880	0.619	0.711	0.828
3	0.591	0.333	0.608	0.346
4	0.926	0.810	0.926	0.913
5	0.638	0.381	0.602	0.253
6	0.505	0.619	0.349	0.000
7	0.611	0.429	0.553	0.854
8	0.318	0.333	0.257	0.311
9	0.000	0.000	0.000	0.251

Tablo 4.35: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel katsayı sonuçları.

Deney No	Aşınma	Yüzey Pürüzlülüğü	P-to-V Fx	P-to-V Fy
1	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.806	0.568	0.634	0.744
3	0.550	0.429	0.560	0.433
4	0.871	0.724	0.871	0.851
5	0.580	0.447	0.557	0.401
6	0.503	0.568	0.434	0.333
7	0.563	0.467	0.528	0.773
8	0.423	0.429	0.402	0.420
9	0.333	0.333	0.333	0.400

Tablo 4.36: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler ve sıralamalar.

Deney No	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Talaş Derinliği (μm)	Gri Derece	Sıralama
1	10000	50	50	1.000	1
2	10000	75	75	0.688	3
3	10000	100	100	0.493	6
4	11000	50	75	0.829	2
5	11000	75	100	0.496	5
6	11000	100	50	0.459	7
7	12000	50	100	0.583	4
8	12000	75	50	0.419	8
9	12000	100	75	0.350	9

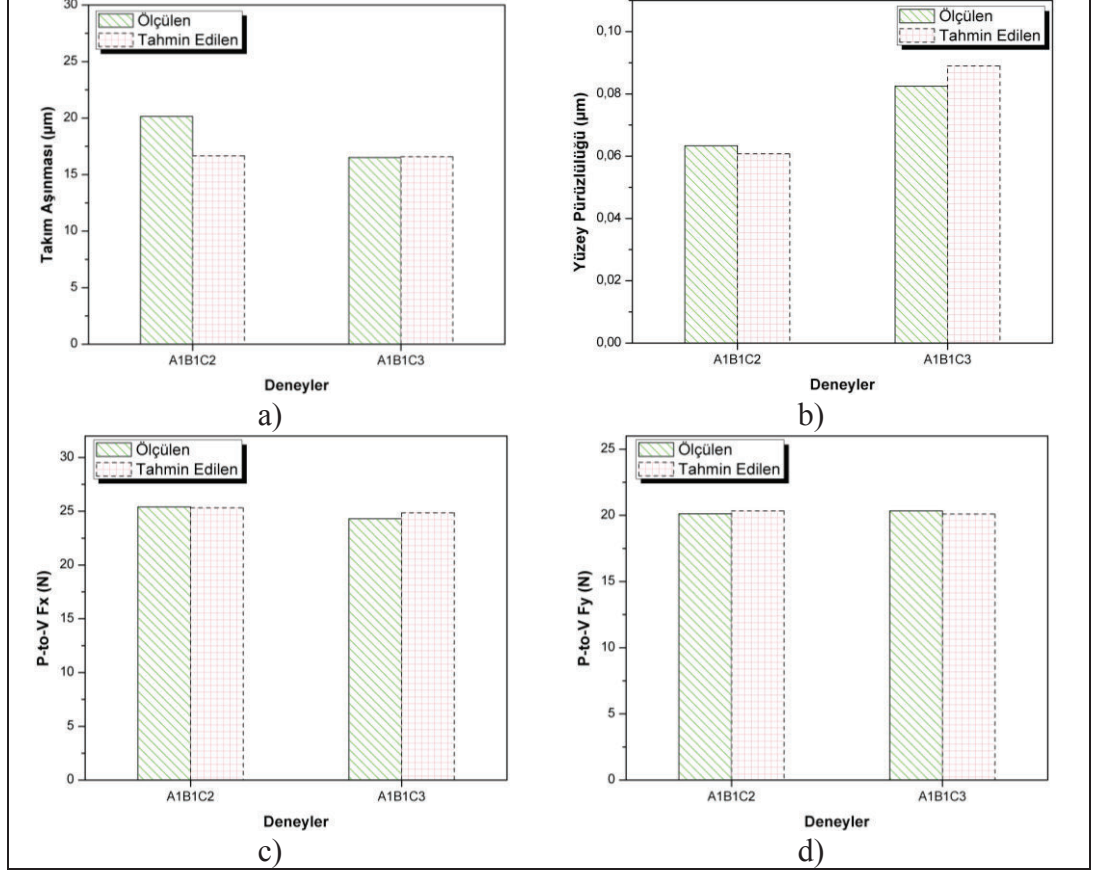


Şekil 4.71: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için gri ilişkisel dereceler.

4.1.4.7. Doğrulama Deneyleri

Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde Taguchi deney planına göre yürütülen deney sonuçlarını doğrulamak için 2 adet doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyleri P-to-V F_x ve P-to-V F_y kuvvetlerinin optimum olduğu şartlarda yürütülmüştür. Yani doğrulama deneyleri A1B1C2 ve A1B1C3 kombinasyonlarında yapılmıştır. A1B1C2 doğrulama deneylerinde devir sayısı 10000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 75 μm ve A1B1C3 doğrulama deneylerinde devir sayısı 10000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve

talaş derinliği 100 µm değerlerindedir. Optimum şartlarda yürütülen deneylerin sonuçları ve tahmin edilen değerler Şekil 4.72’de verilmiştir. Tahmin edilen sonuçların deney sonuçlarına yakın değerler verdiği görülmüştür.



Şekil 4.72: Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi için doğrulama deneyinin sonuçları. a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx, d) P-to-V Fy.

4.2. Kesici Takım Çapının Etkisi Deneyleri

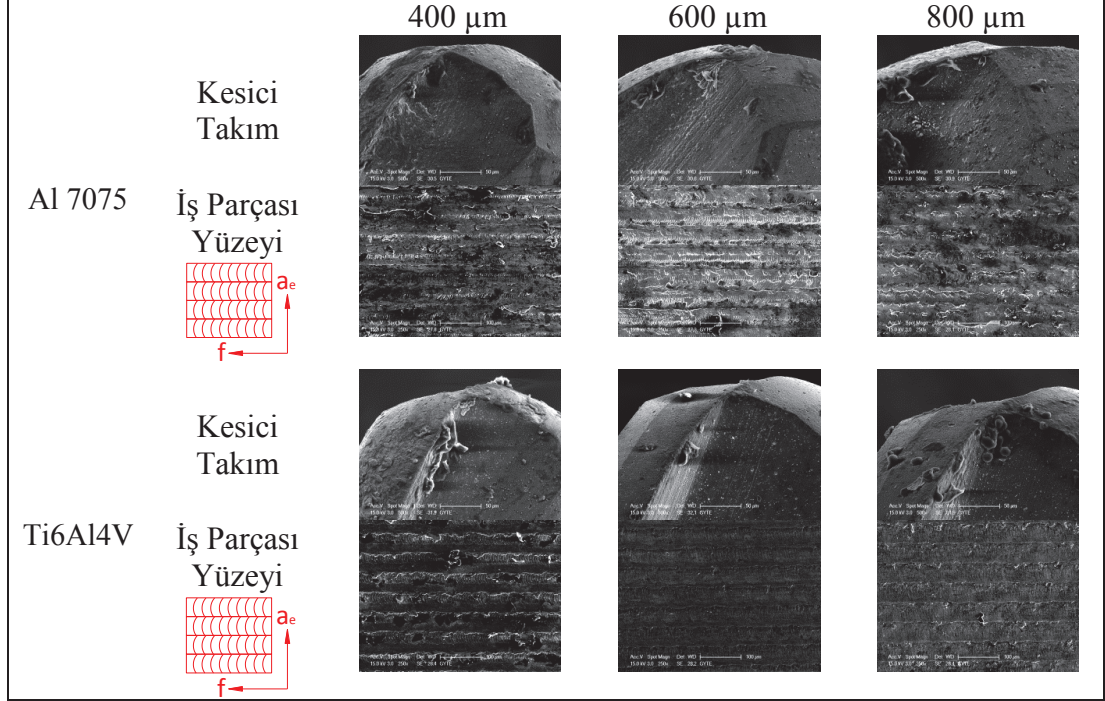
Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takım çapının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.73’te gösterilmiştir. Her 3 takım çapında da kesici takımında herhangi bir kırılma ya da dökülme görülmemiştir. Kesici takım aşınması hem Al 7075 hem de Ti6Al4V malzemeleri için bütün kesici takım çaplarında özellikle 800 µm çapındaki kesici takımında çok düşüktür ve takım ömrünü tamamlamamıştır. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde iş parçası yüzeyinde mikro çapak oluşumu görülmüştür, fakat Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde mikro

çapak oluşumunun çok düşük olduğu görülmüştür. Ti6Al4V malzemesi için artan takım çapı ile mikro çapak oluşumu azalmıştır.

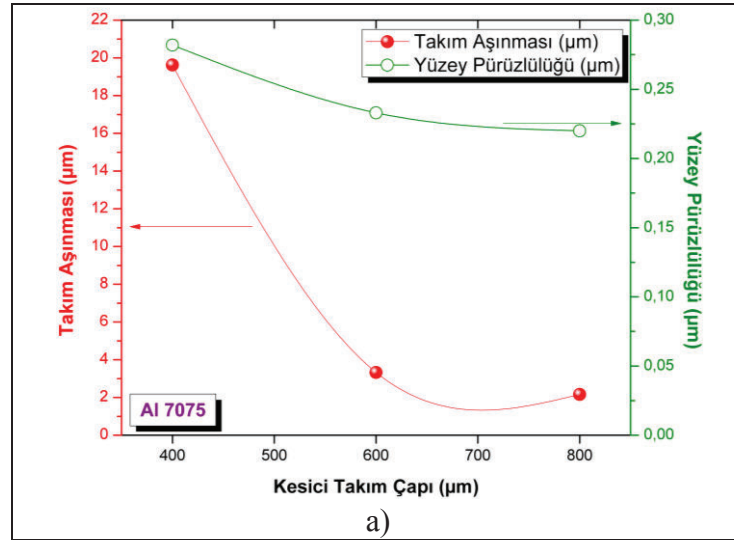
Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takım çapının aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisi kantitatif olarak da incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.74'te verilmiştir. Hem Al 7075 hem de Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takım çapı arttıkça takım aşınmasının azaldığı bulunmuştur. Kesici takım çapının 400 µm'den 800 µm'ye artırılması takım aşınmasını Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde %88.98 ve Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde %77.31 azaltmıştır. Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde artan kesici takım çapı ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı bulunmuştur. Azalan kesici takım çapı ile yüzey pürüzlülüğünün artmasının nedeni küçük takım çaplarında takım sehimi ve deformasyonun daha büyük hale gelmesi ile açıklanabilir. Kesici takım çapının 400 µm'den 800 µm'ye artırılması Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla %21.99 ve %11.34 azaltmıştır. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takım çapının 400 µm'den 800 µm'ye artırılması halinde hem Fx kuvveti hem de Fy kuvveti azalmıştır. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde Fx yönündeki kuvvetin kesici takım çapı ile değişiminin Fy yönündeki kuvvete göre daha az olduğu bulunmuştur. Al 7075 malzemesinde kesici takım çapının 400 µm'den 800 µm'ye artırılması Fx kuvvetinin %45.41, Fy kuvvetinin %74.27 azalmasına neden olmuştur. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde ise kesici takım çapının 400 µm'den 600 µm'ye artırılması halinde hem Fx kuvveti hem de Fy kuvveti azalmıştır. Kesici takım çapının daha fazla artırılması ise Fx ve Fy kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde bütün kesici takım çaplarında Fx kuvvetinin Fy kuvvetinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Kesici takım çapının 400 µm'den 600 µm'ye artırılması Ti6Al4V malzemesi için Fx kuvvetinin %26.26, Fy kuvvetinin %57.02 azalmasına neden olmuştur. Kesici takım çapının 600 µm'den 800 µm'ye artırılması ise Ti6Al4V malzemesi için Fx kuvvetini %28.76, Fy kuvvetini %121.78 arttırmıştır.

Sonuç olarak Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde en düşük takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri 800 µm

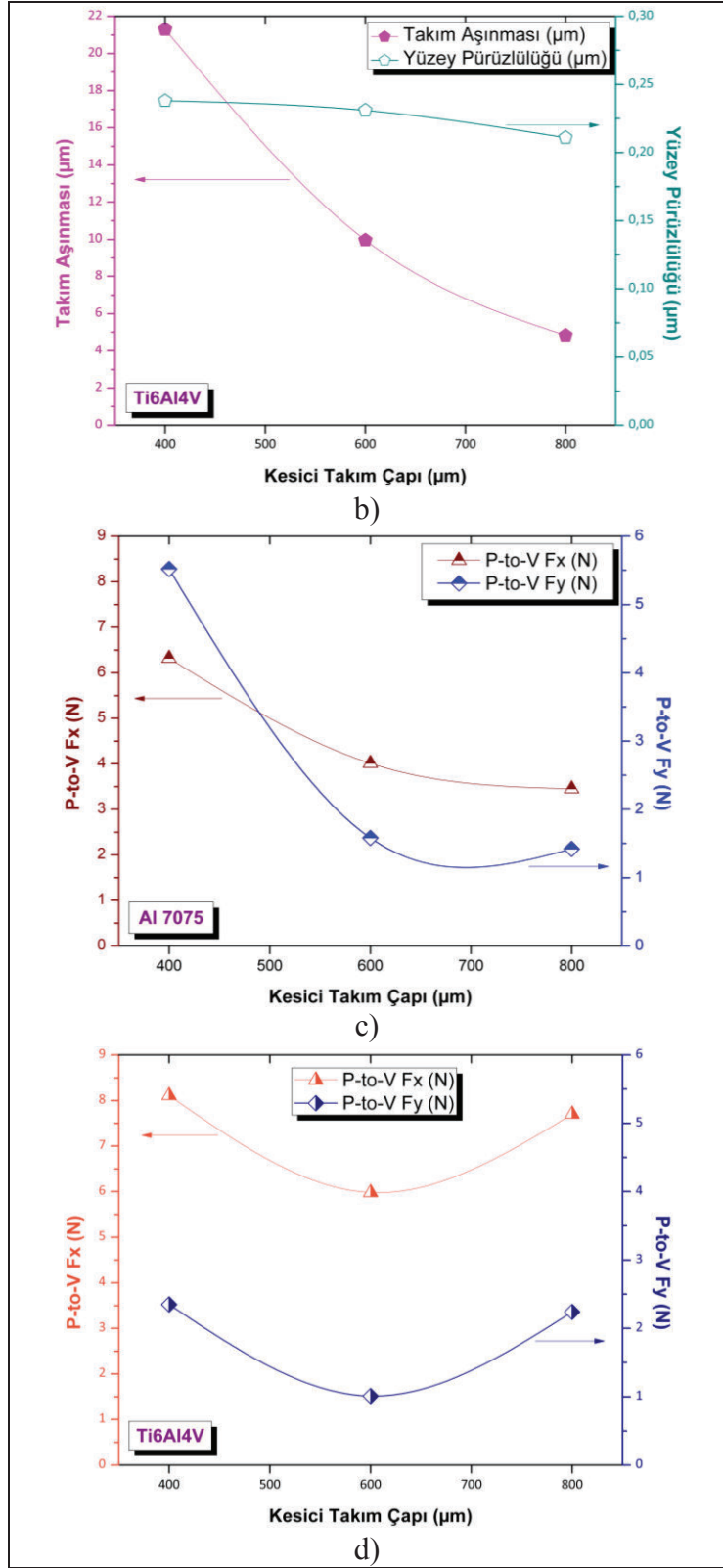
takım çapında elde edilmiştir. En düşük kuvvet değerleri ise Al 7075 için 800 μm takım çapında ve Ti6Al4V malzeme için 600 μm takım çapında gözlemlenmiştir. Ayrıca kesici takım çapının en fazla takım aşınmasını etkilediği bulunmuştur.



Şekil 4.73: Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelemede farklı kesici takım çaplarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e : Yana kayma mesafesi).



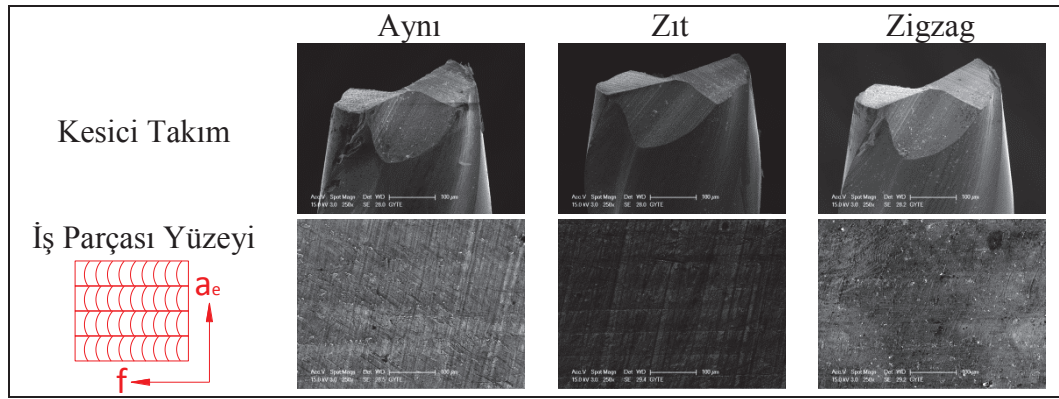
Şekil 4.74: Mikro yüzey frezelemede kesici takım çapının a) Al 7075 malzemesi için takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, b) Ti6Al4V malzemesi için takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, c) Al 7075 malzemesi için kuvvetler, d) Ti6Al4V malzemesi için kuvvetler üzerindeki etkisi.



Şekil 4.74: Devam.

4.3. Takım Yollarının ve Yüksek Hız Kafasının Etkisi Deneyleri

Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.75’de gösterilmiştir. Bütün mikro kesici takımlarda herhangi bir kırılma görülmemiştir ve takım aşınmasının oldukça düşük olduğu bulunmuştur. Bütün takım yollarında işleme sonrası iş parçası yüzeylerinin kalitesinin iyi olduğu görülmüştür.

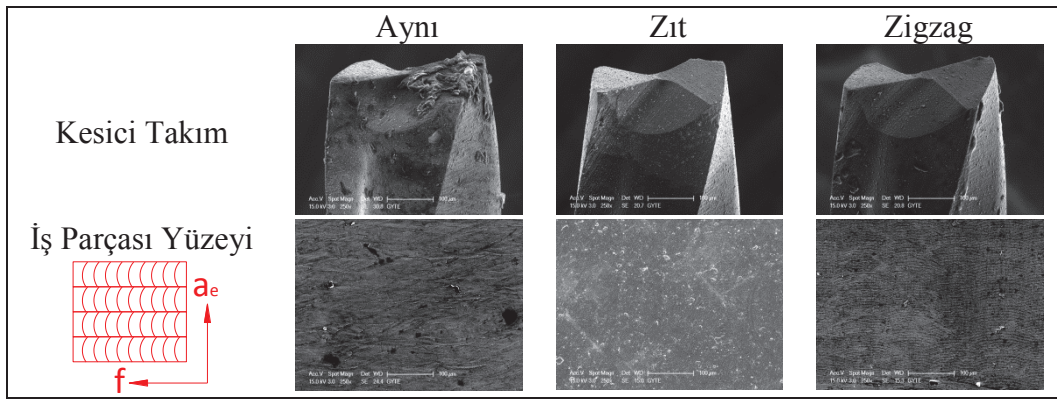


Şekil 4.75: Al 7075 malzemesinin mikro frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e : Yana kayma mesafesi).

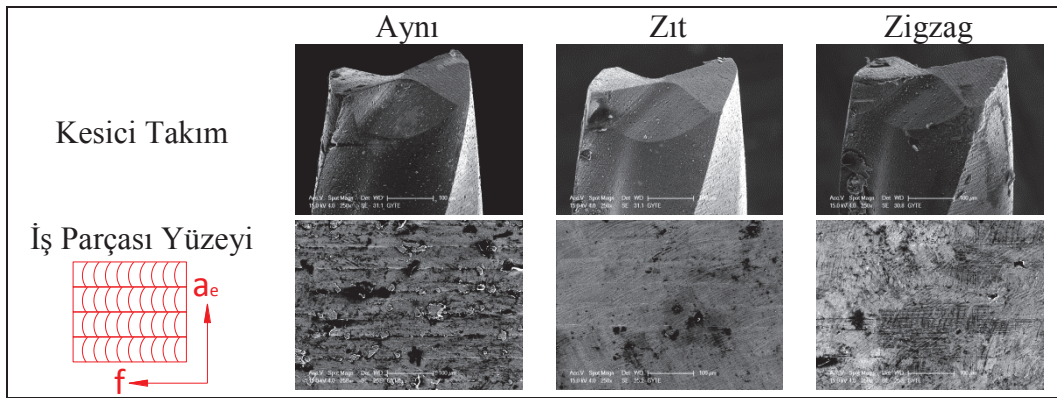
Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.76’da gösterilmiştir. Tezgahın 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak Ti6Al4V malzemesinin yüzey frezelenmesinde kesici takımlarda herhangi bir kırılma görülmemiştir. İş parçası yüzeylerinin görsel incelenmesi sonucunda en iyi yüzey kalitesinin zıt yönlü mikro frezeleme ile elde edildiği görülmüştür. En kötü yüzey kalitesi ise zigzag işleme stratejisi ile elde edilmiştir.

Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.77’de gösterilmiştir. Aynı yönlü mikro frezelemede iş parçası yüzeyinde mikro çapak ve talaş yapışması görülmüştür. Zıt yönlü mikro frezelemede de az da olsa iş parçası yüzeyine talaş yapışmıştır. Zigzag mikro frezelemede ise parça yüzeyi üzerinde yüzey kalitesinin bozulmasına neden olan çizikler görülmüştür. Şekil 4.78’de aşınma tipleri ve mekanizmaları detaylı bir şekilde verilmiştir. Aynı yönlü mikro frezelemede serbest yüzey üzerinde aşınma

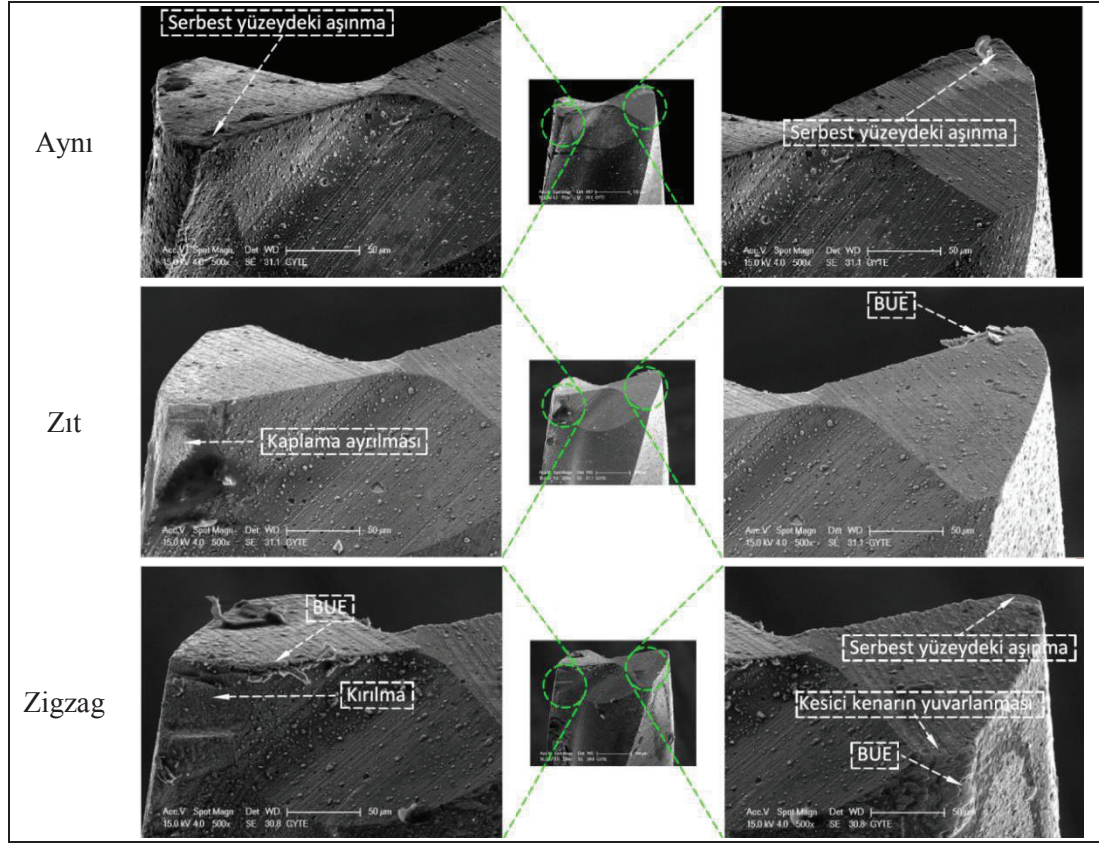
görülmüştür. Zıt yönlü mikro frezeleme stratejisinde kaplama ayrılması ve BUE oluşumu gözlenmiştir. Kaplama ayrılmasının frezeleme gibi kesikli operasyonlarda oluşmasının nedeni mekanik darbe veya kimyasal reaksiyonlar olabilir. Zigzag stratejisinde ise, serbest yüzeyde aşınma, kesici kenarın yuvarlanması, BUE ve kırılma meydana gelmiştir. Kesici kenarın yuvarlanması abrasiv aşınma mekanizmasının varlığının göstergesidir. Kırılmanın nedeni zigzag işleme stratejisinde mikro kesici takımın aşırı darbeye maruz kalmasıdır. En düşük aşınma aynı yönlü işleme stratejisi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.76: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında tezgahın 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelemede takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e : Yana kayma mesafesi).



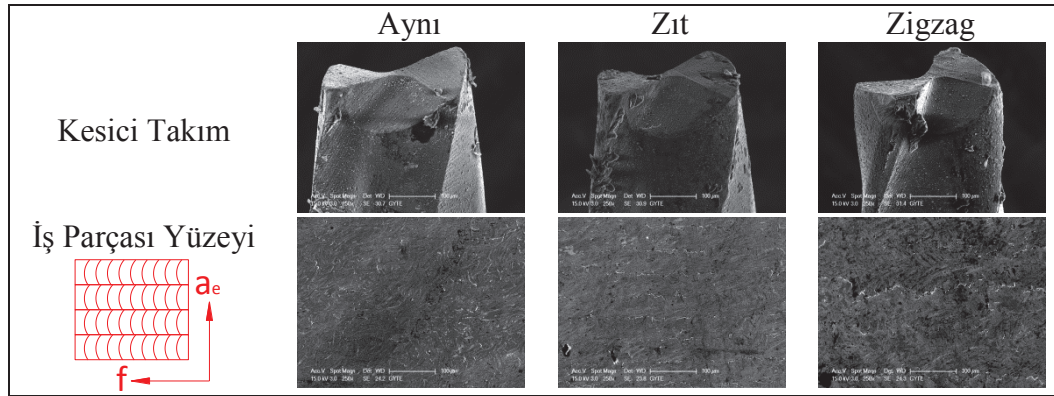
Şekil 4.77: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında tezgahın 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelemede takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e : Yana kayma mesafesi).



Şekil 4.78: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında tezgahın 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede meydana gelen aşınma tipleri.

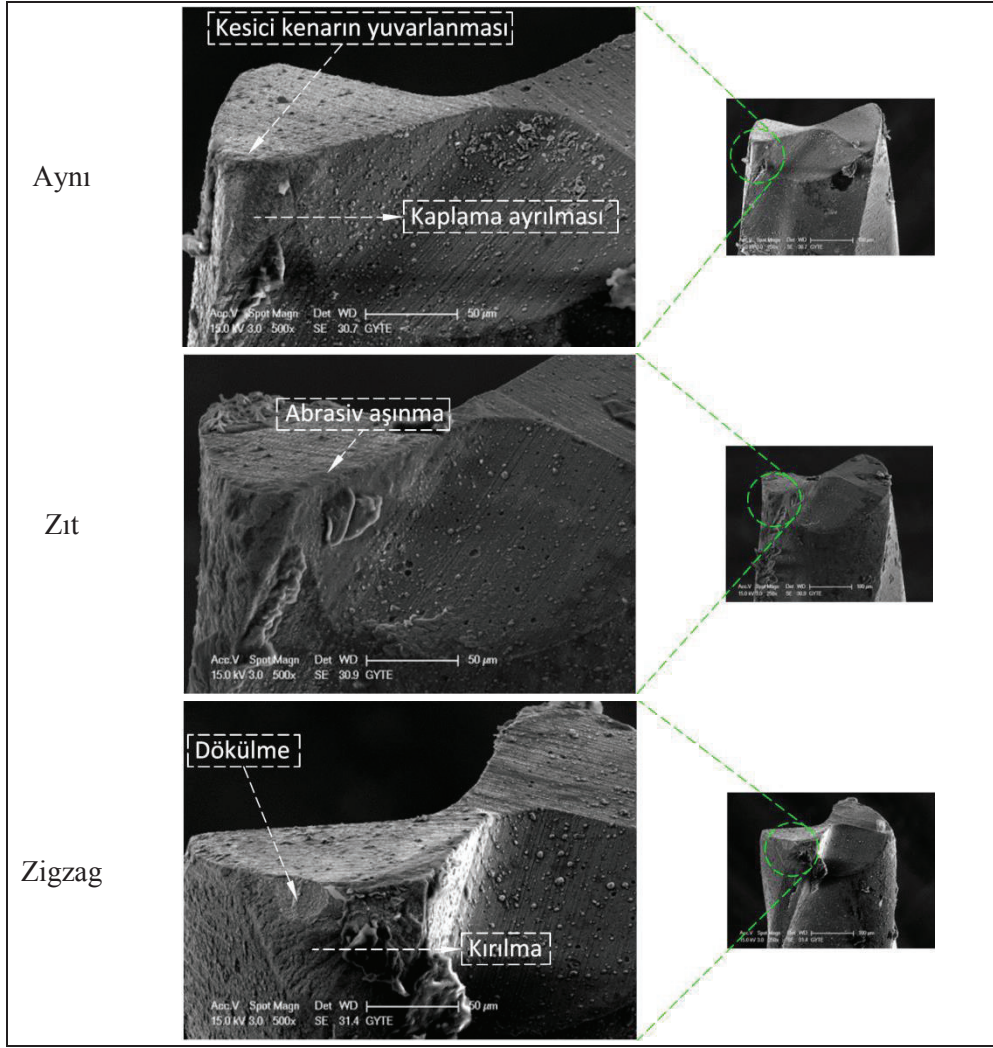
Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.79’da gösterilmiştir. Şekil 4.80’de aşınma tipleri ve mekanizmaları detaylı bir şekilde verilmiştir. Aynı yönlü mikro frezeleme stratejisinde kesici kenara yakın bölgede kaplama ayrılması görülmüştür ve literatürde bu tip aşınmanın titanyum temelli malzemelerin TiAlN kaplamalı takımlar ile işlenmesinde çok yaygın bir aşınma formu olduğu belirtilmiştir [99]. Kaplama ayrılması mekanik darbe, değişen termo-mekanik gerilmeler, kaplamanın kalıntı gerilmesi ve kimyasal reaksiyonlar gibi bazı parametrelerin sonucudur [152]. Ti6Al4V malzemesinin işlenmesi esnasında kesici takım-talaş ara yüzeyinde meydana gelen adhezyonun kaplama ayrılmasını başlattığı ifade edilmiştir [153]. Ayrıca frezeleme operasyonunun kesikli doğası kesme kenarlarında kesikli kuvvetlere neden olmaktadır [154] ve bu şartlar altında kaplama kolaylıkla ayrılmaktadır. Aynı yönlü mikro frezelemede abrasiv

aşınmanın varlığını gösteren kesici kenarın yuvarlanması da gözlenmiştir. Zıt yönlü mikro frezelemede, abrasiv aşınma görülmüştür ve bu aşınmanın kesici kenarın yuvarlanmasını başlattığı bilinmektedir. Abrasiv mekanizmasında, işleme esnasında kaymadan ziyade sürtünme (rubbing) baskındır. Abrasiv aşınma kesici kenar radyüsünde artışa, takım geometrisinde değişime ve kesici takım çapında azalmaya neden olmaktadır [150]. Zigzag mikro frezelemede kesici kenarlar üzerinde aşırı gerilmeler nedeniyle dökülme görülmüştür. Takım kaplaması ve iş parçası malzemesi arasındaki kimyasal afinite aşırı reaksiyona neden olmaktadır. İşleme esnasındaki bu reaksiyon kaplamanın kesici kenardan ayrılması ile sonuçlanmaktadır. Bu durum kesici takımın neden dökülmeye maruz kaldığını açıklamaktadır. Ayrıca, frezeleme prosesinin kesikli doğası dökülmeyi başlatan tekrarlı darbelere neden olmaktadır. Zigzag mikro frezelemede, kırılma da gözlenmiştir. Kırılma oluşumu kesici kenar ve iş parçası malzemesi arasındaki yüksek gerilme ve darbe nedeniyledir [155]. Kaplama ayrılmasını takiben tekrarlı darbeler kesici takımda küçük kırıkları başlatmaktadır. Kesme devam ettikçe, mikro dökülme kesici takımın etkili çapını azaltan kesici takım ucunun kırılmasına değişmektedir [150]. BUE oluşumunun da BUE'nin kalkması esnasında kesici kenarda kırılmayı başlatabileceği ifade edilmiştir [150].

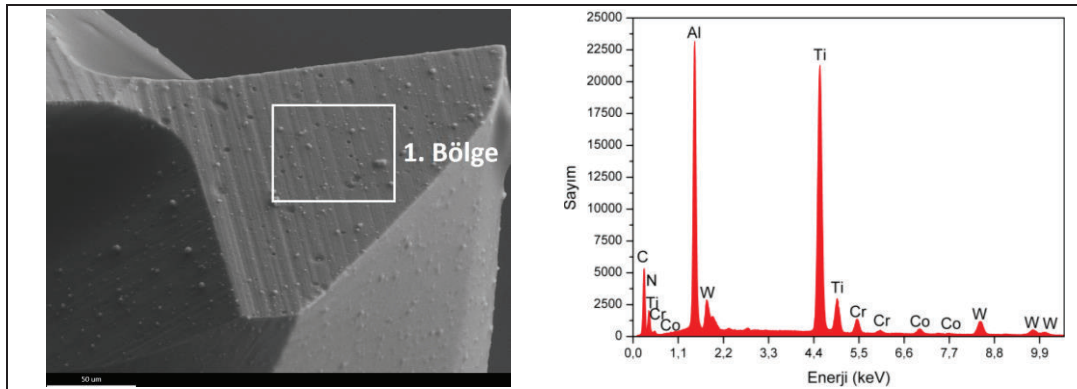


Şekil 4.79: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelemede takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e : Yana kayma mesafesi).

Şekil 4.81'de yeni mikro kesici takımın EDX analiz sonucu gösterilmiştir. Şekilden titanyum (Ti), alüminyum (Al) ve azot (N) elementleri görülebilmektedir. Bu elementler bu çalışmada kullanılan TiAlN kaplamalı kesici takımların ana bileşenleridir.



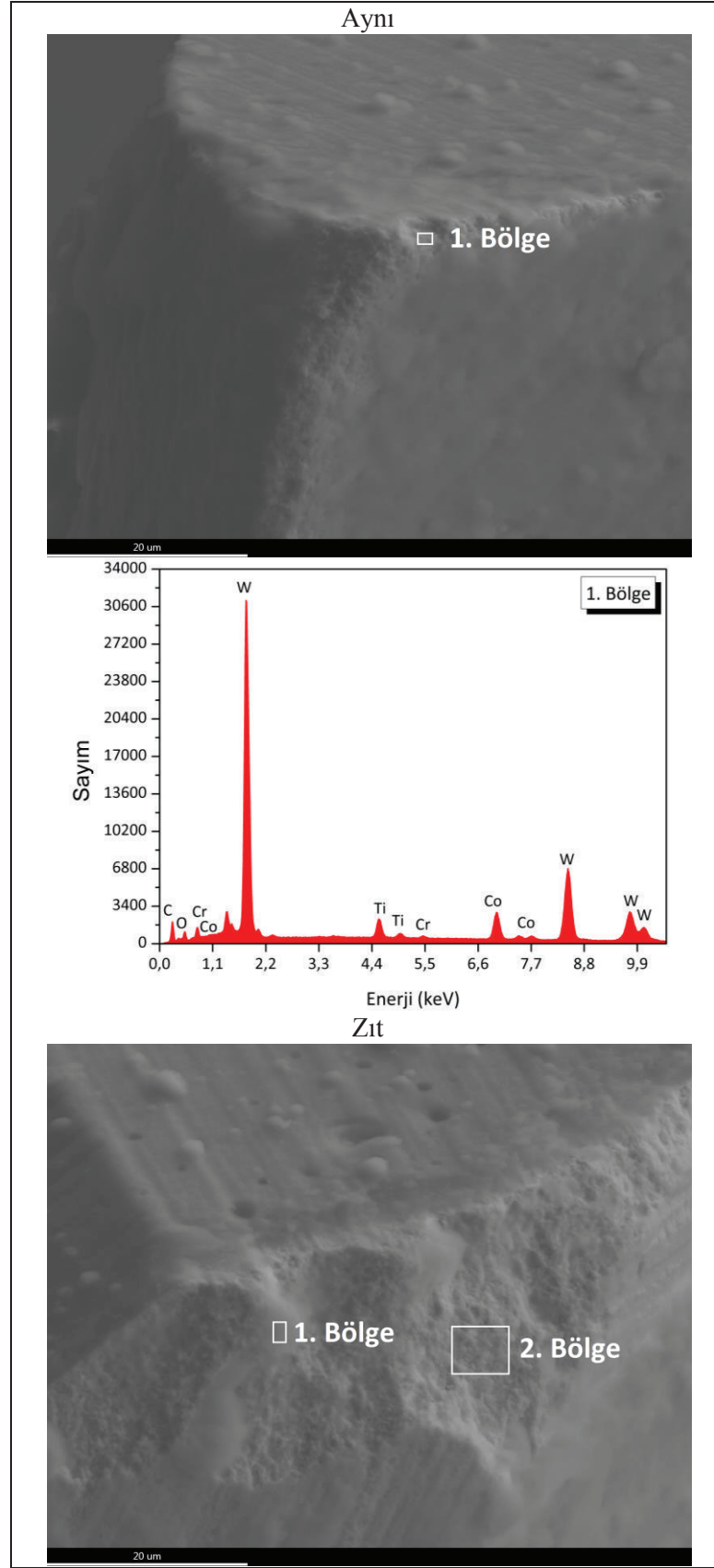
Şekil 4.80: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede meydana gelen aşınma tipleri.



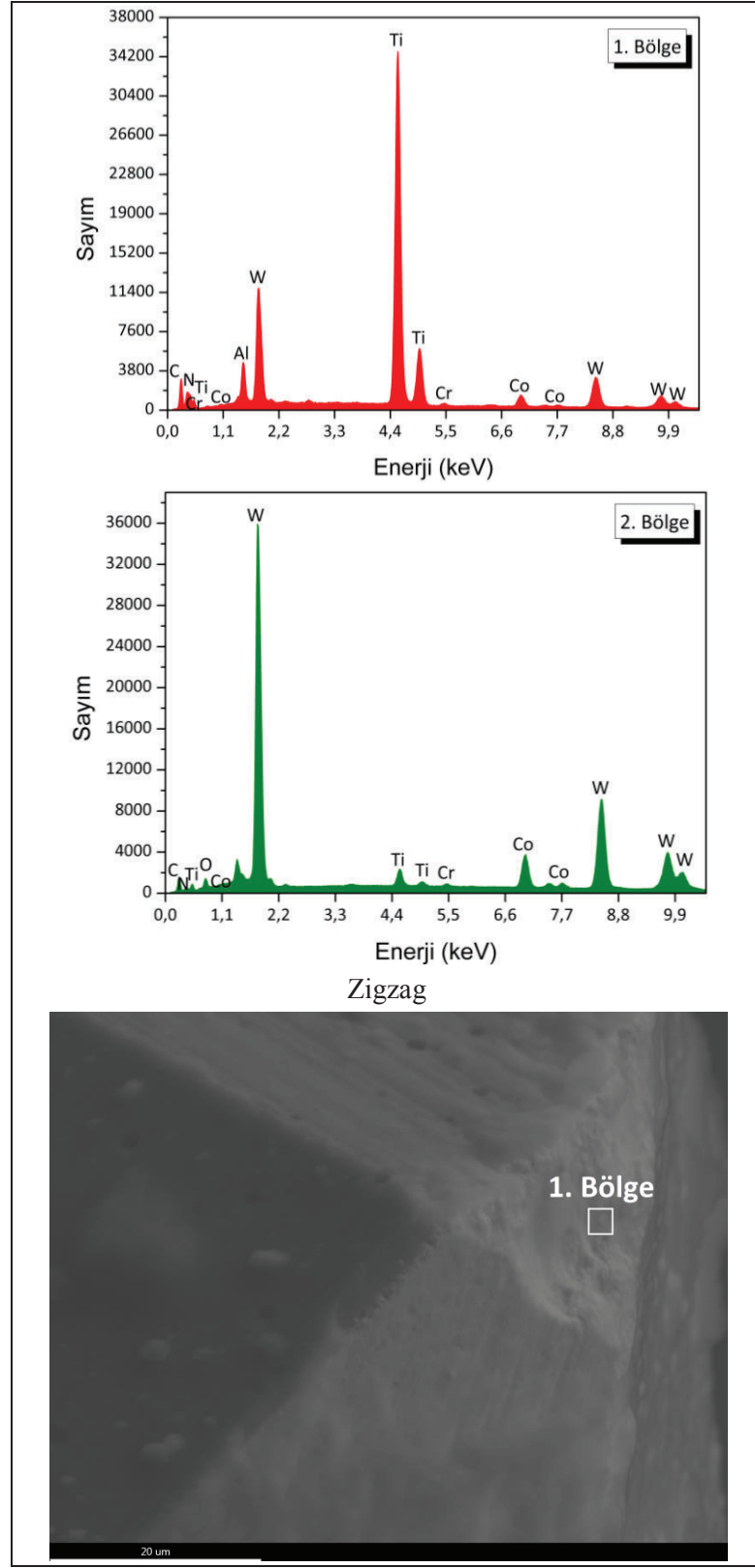
Şekil 4.81: Yeni mikro kesici takımın EDX analizi.

Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımların EDX analiz sonuçları Şekil 4.82’de gösterilmiştir. Aynı yönlü mikro frezeleme için, “1. Bölge”de kaplama bileşenleri (Ti, Al ve N) yerine yüksek tungsten (W) ve kobalt (Co) içeriği elde edilmiştir. Bu sonuç aynı yönlü mikro frezelemede kaplama ayrılmasının bir belirtisidir. Aşınmış kesici takım yüzeylerinde oksit tabakaların varlığını gösteren oksijenin (O) bulunduğu gözlenmiştir. Zıt yönlü frezelemede, “1. Bölge”de ve “2. Bölge”de görüldüğü gibi mikro kesiciden önemli miktarda TiAlN kaplamanın kalktığı saptanmıştır. “1. Bölge”de ve “2. Bölge”de W elementi gözlenmiştir. Fakat “1. Bölge”de Ti elementinin varlığı kısmi kaplama ayrılmasını veya BUE oluşumunu işaret etmektedir. Zigzag mikro frezelemede kaplama ayrılması gözlenmiştir. Ayrıca Ti elementinin varlığının yüksekliği iş parçası malzemesinden kesici takıma bu elementin transfer olduğunu kanıtlamaktadır.

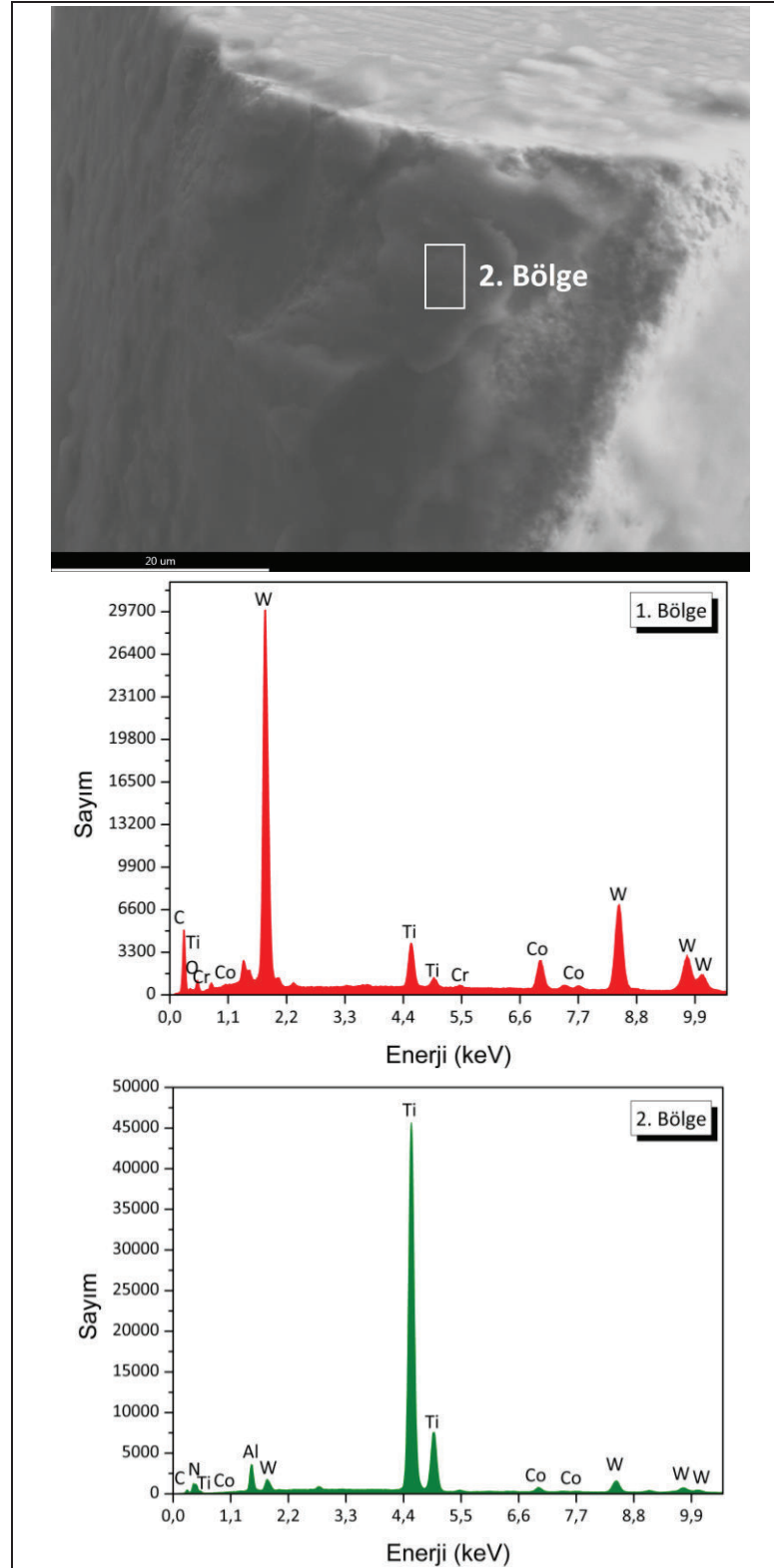
Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.83’te gösterilmiştir. Şekil 4.84’te aşınma tipleri ve mekanizmaları detaylı bir şekilde verilmiştir. Kaplama ayrılmasının aynı yönlü mikro frezeleme stratejisinde ana aşınma mekanizması olduğu görülmüştür. Zıt yönlü mikro frezeleme kullanıldığı zaman kaplama ayrılması ve kesici kenarın yuvarlanması gözlenen aşınma tipleri olmuştur. Zigzag stratejisinde kesici takımda kırılma gözlenmiştir.



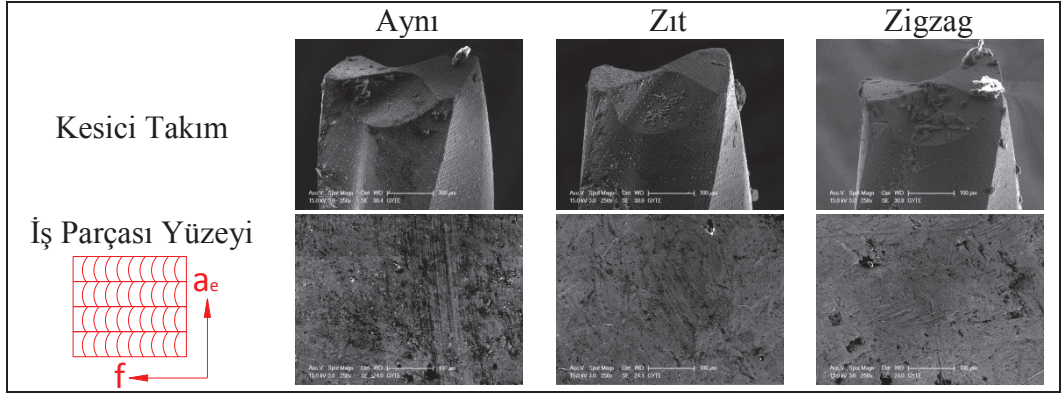
Şekil 4.82: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 12000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede kullanılan kesici takımların EDX analizi.



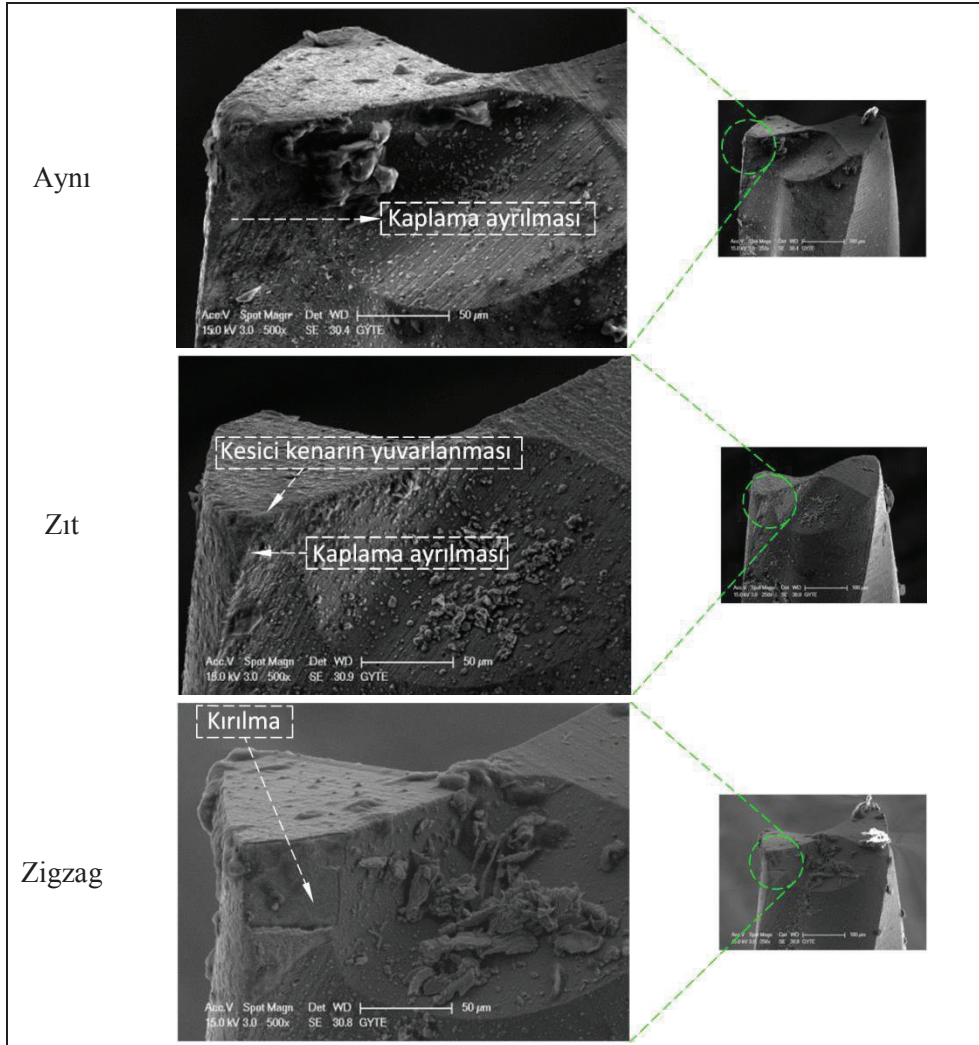
Şekil 4.82: Devam.



Şekil 4.82: Devam.

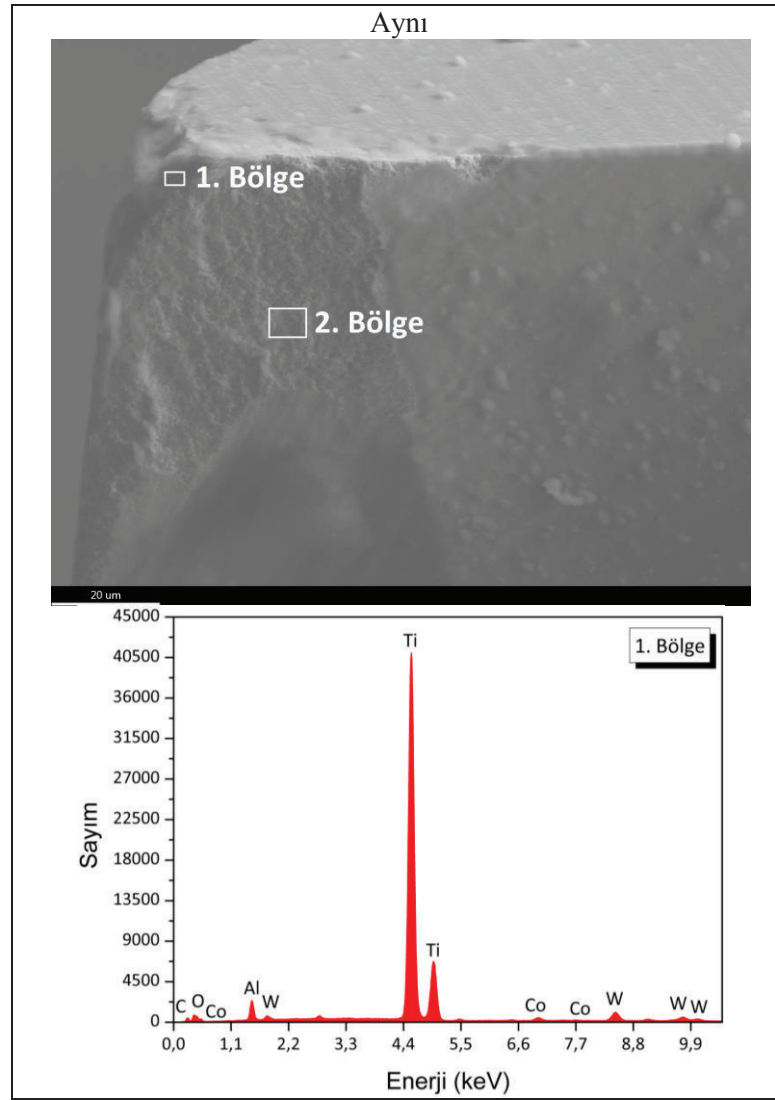


Şekil 4.83: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelemede takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e: Yana kayma mesafesi).

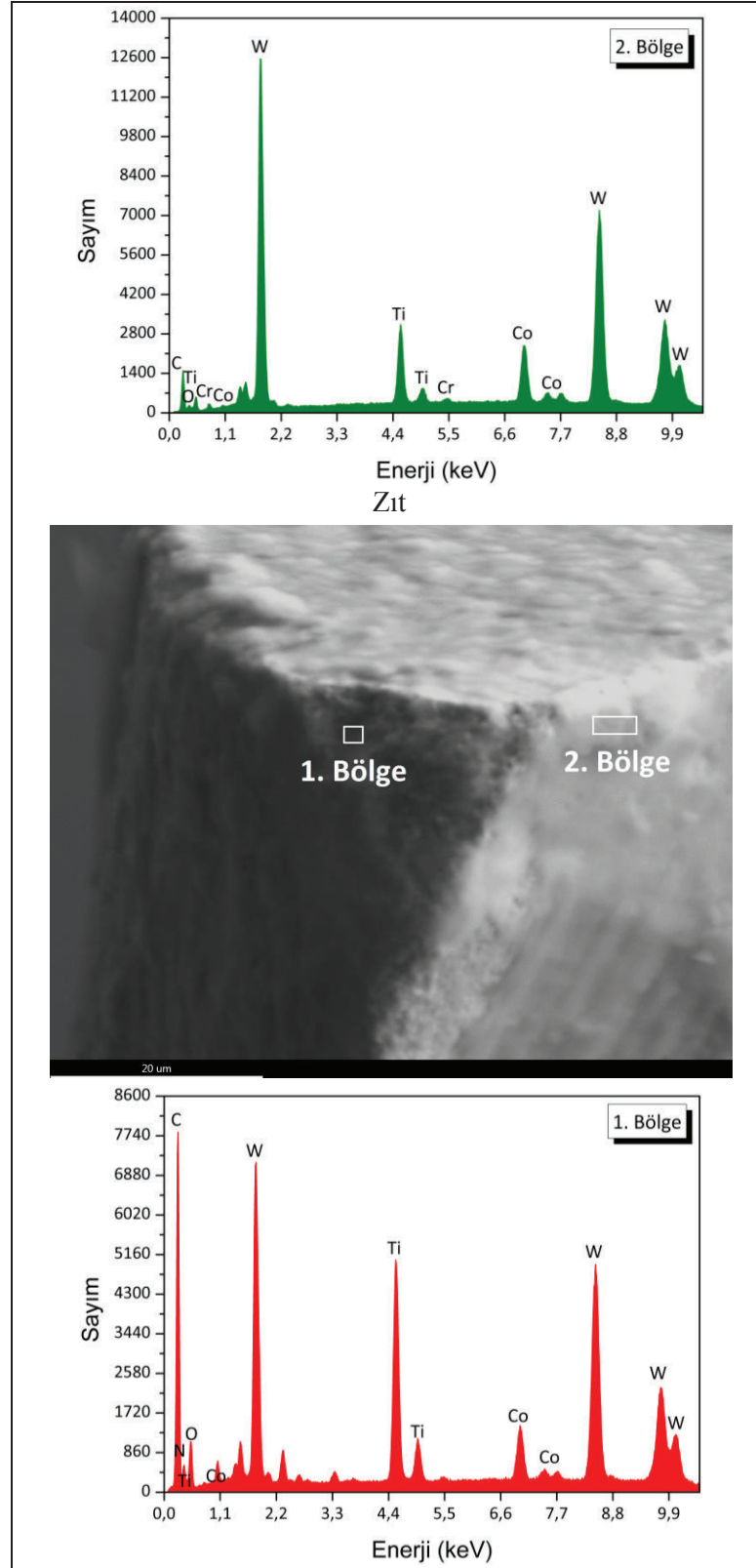


Şekil 4.84: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede meydana gelen aşınma tipleri.

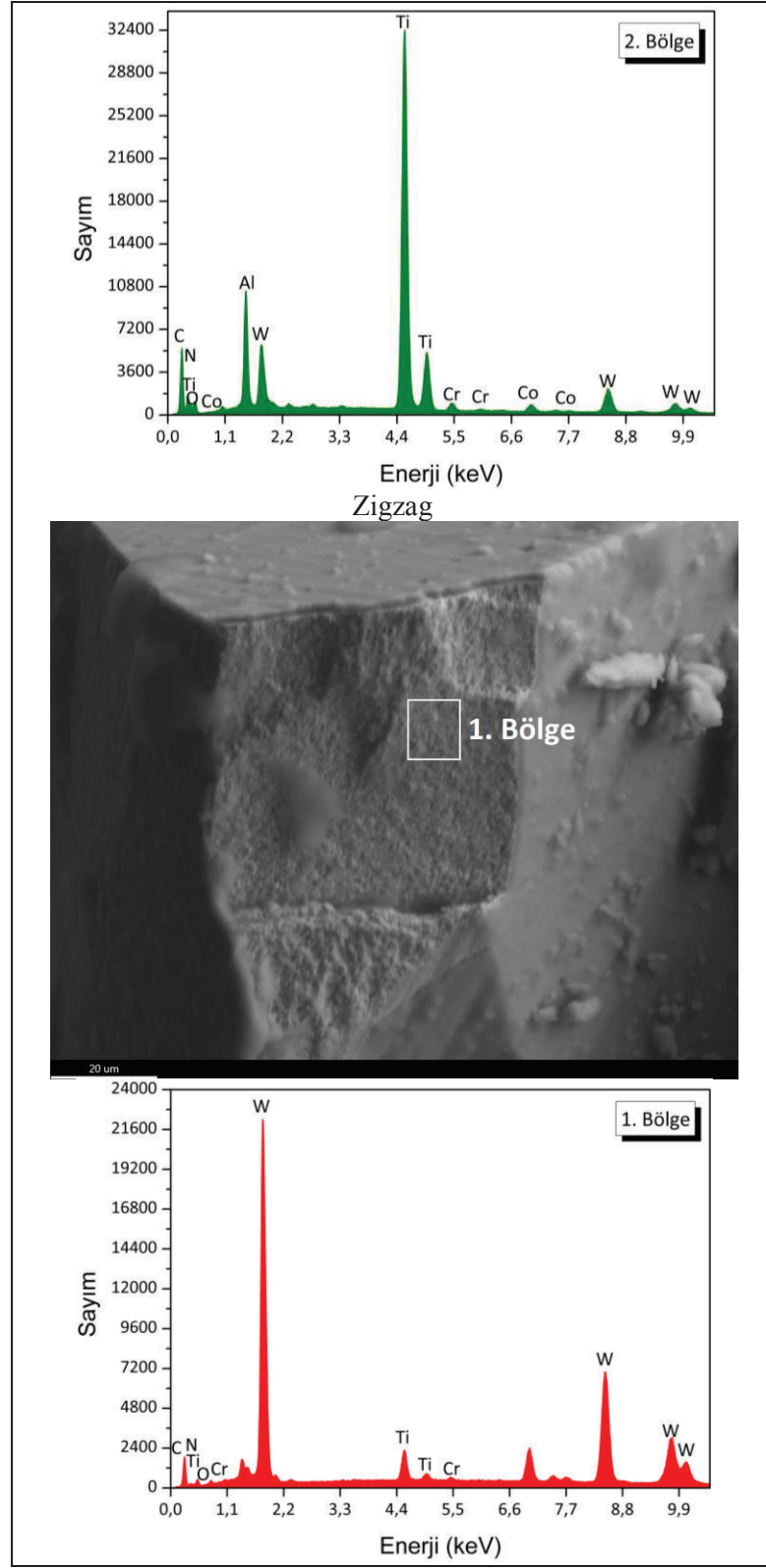
Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımların EDX analiz sonuçları Şekil 4.85’de gösterilmiştir. Aynı yönlü mikro frezeleme için, “1. Bölge”de elde edilen yüksek Ti içeriği BUE oluşumunu göstermektedir. “2. Bölge”de yüksek W elementinin varlığı nedeniyle kaplama ayrılmasının olduğu söylenebilir. Aşınmış kesici takım yüzeyinde gözlenen O elementinin varlığı oksit tabakasının bulunduğunu göstermektedir. Zıt yönlü frezelemede, “1. Bölge”de görüldüğü gibi mikro kesiciden TiAlN kaplamanın kalktığı saptanmıştır. “2. Bölge”de Ti elementinin varlığı BUE oluşumunu işaret etmektedir. Zigzag mikro frezelemede kaplama ayrılması gözlenmiştir.



Şekil 4.85: Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede kullanılan kesici takımların EDX analizi.

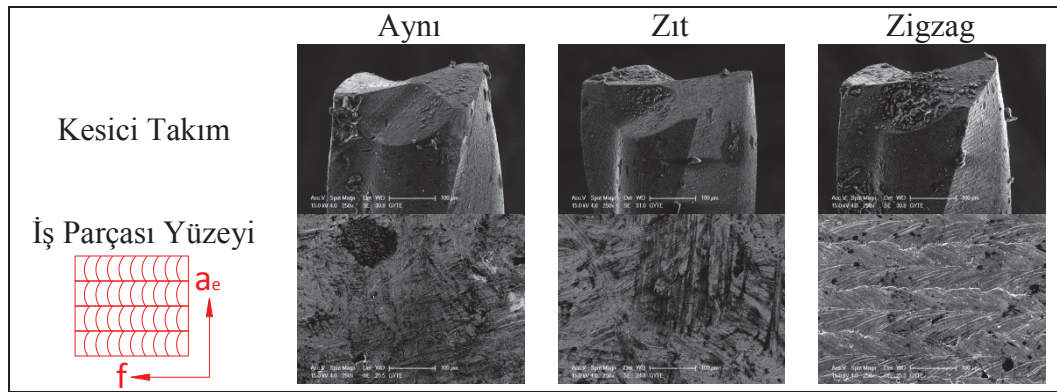


Şekil 4.85: Devam.

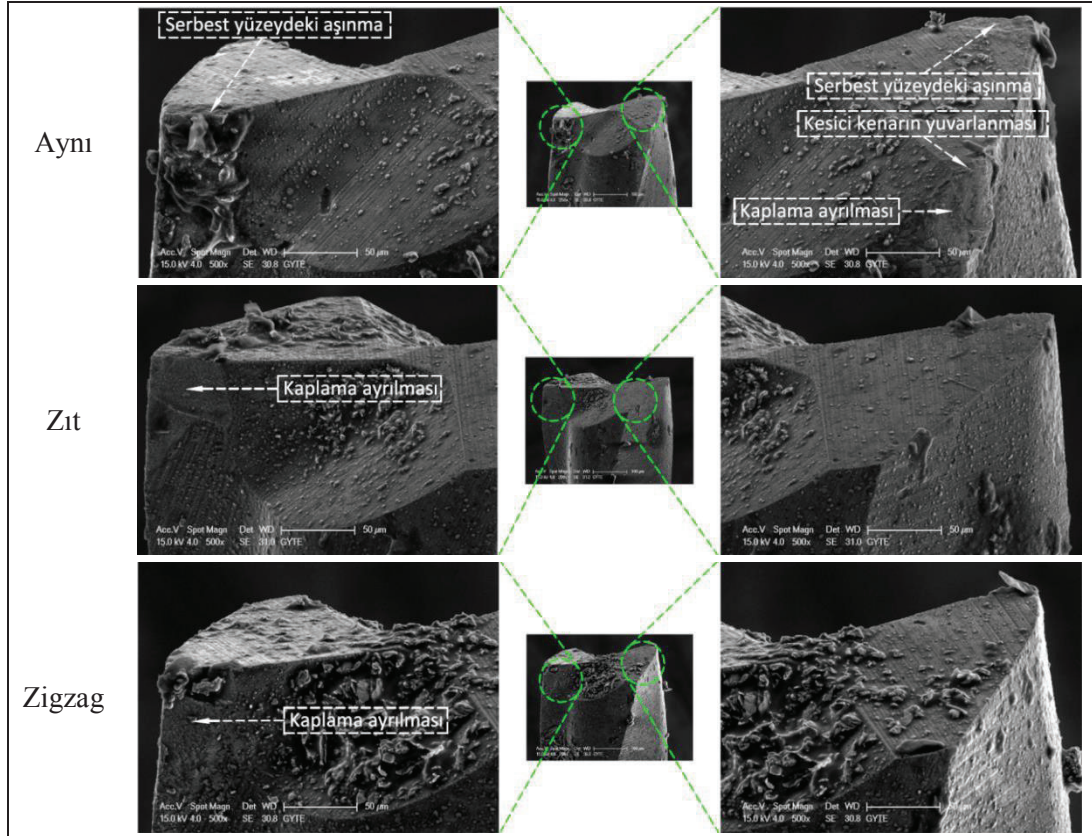


Şekil 4.85: Devam.

Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.86’da gösterilmiştir. Şekil 4.87’de aşınma tipleri ve mekanizmaları detaylı bir şekilde verilmiştir. Aynı yönlü frezeleme stratejisinde, kaplama ayrılması, serbest yüzey üzerinde aşınma, abrasiv aşınma nedeniyle kesici kenar yuvarlanması ve kesici takıma iş parçası malzemesinin yapışması gözlenmiştir. Kaplama ayrılması aynı zamanda zıt ve zigzag frezeleme stratejilerinde de görülmüştür. Aynı yönlü mikro frezeleme durumunda aşınma bölgesinin zıt ve zigzag mikro frezeleme durumlarından daha düşük olduğu bulunmuştur. Mikro frezeleme prosesi 20000 dev/dak devir sayısında ve 150 mm/dak ilerleme hızında yürütüldüğünde aynı yönlü işleme stratejisinin aşınma bakımından en iyi strateji olduğu sonucuna varılmıştır.

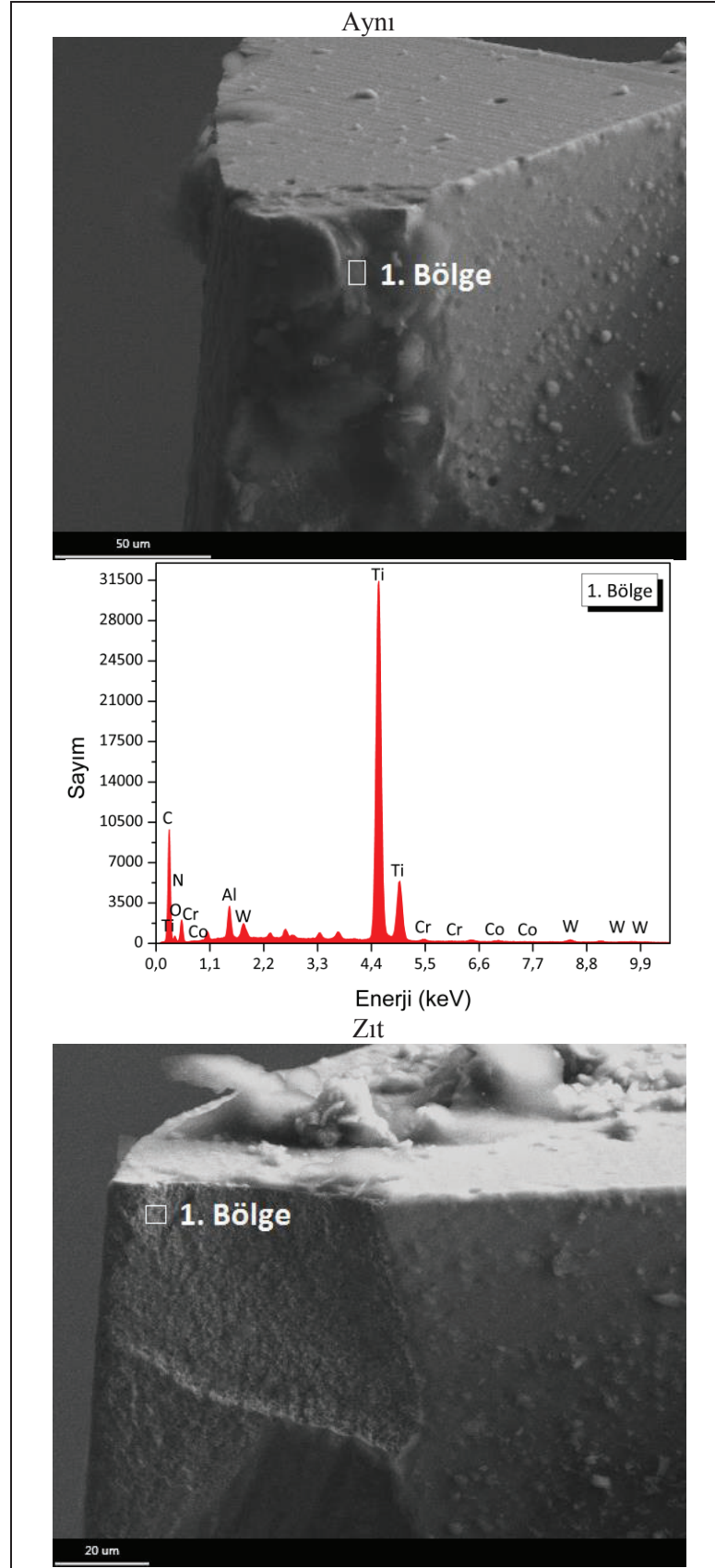


Şekil 4.86: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e : Yana kayma mesafesi).

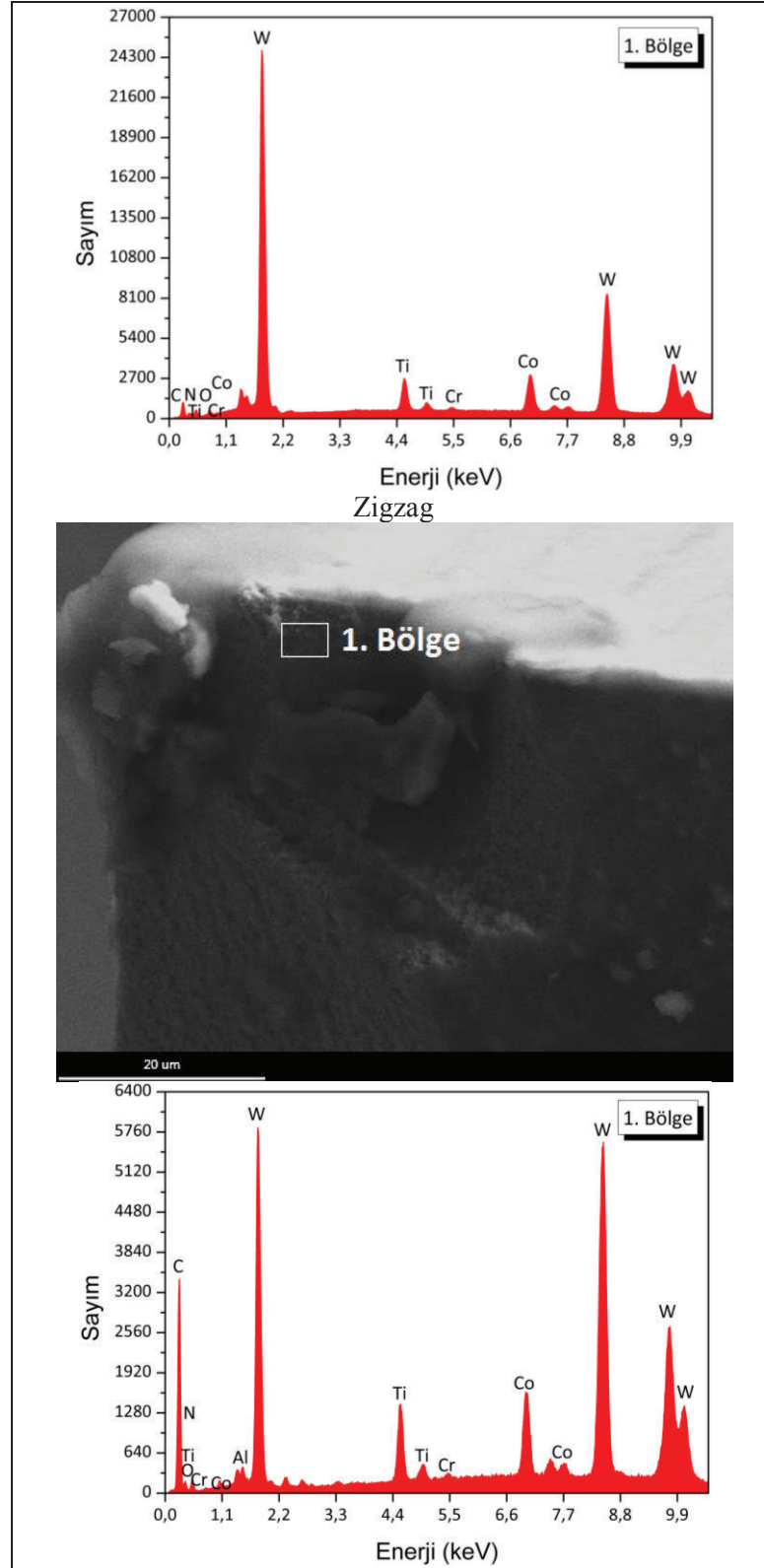


Şekil 4.87: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde meydana gelen aşınma tipleri.

Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımların EDX analiz sonuçları Şekil 4.88’de gösterilmiştir. Aynı yönlü mikro frezelemede, “1. Bölge”de iş parçası malzemesinin mikro kesici takıma yapıştığını kanıtlayan yüksek konsantrasyonda Ti elementi gözlenmiştir. Zıt yönlü mikro frezelemede, W “1. Bölge”de bulunan ana elementtir. Bu elementin varlığı mikro kesici takımdan kaplama ayrılmasının olduğunu göstergesidir. Zigzag mikro frezelemenin EDX spektrasında kaplama ayrılmasının belirtisi olan W elementinin olduğu görülmüştür.

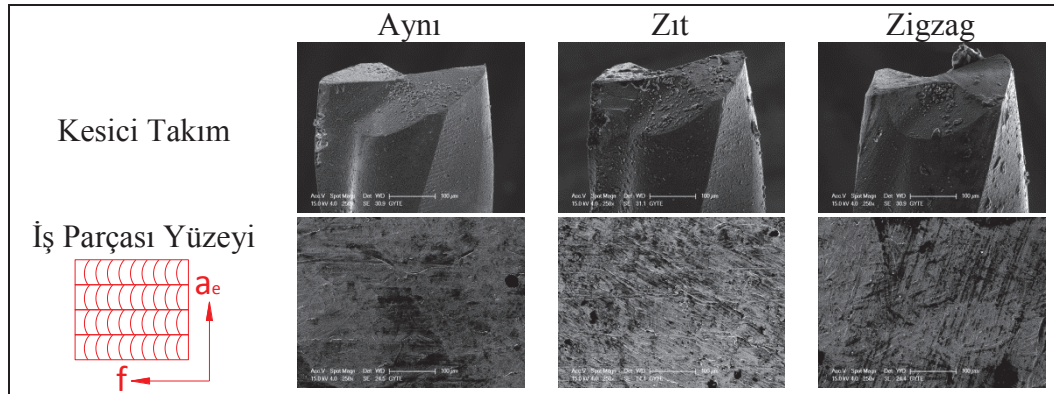


Şekil 4.88: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 20000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemesinde kullanılan kesici takımların EDX analizi.

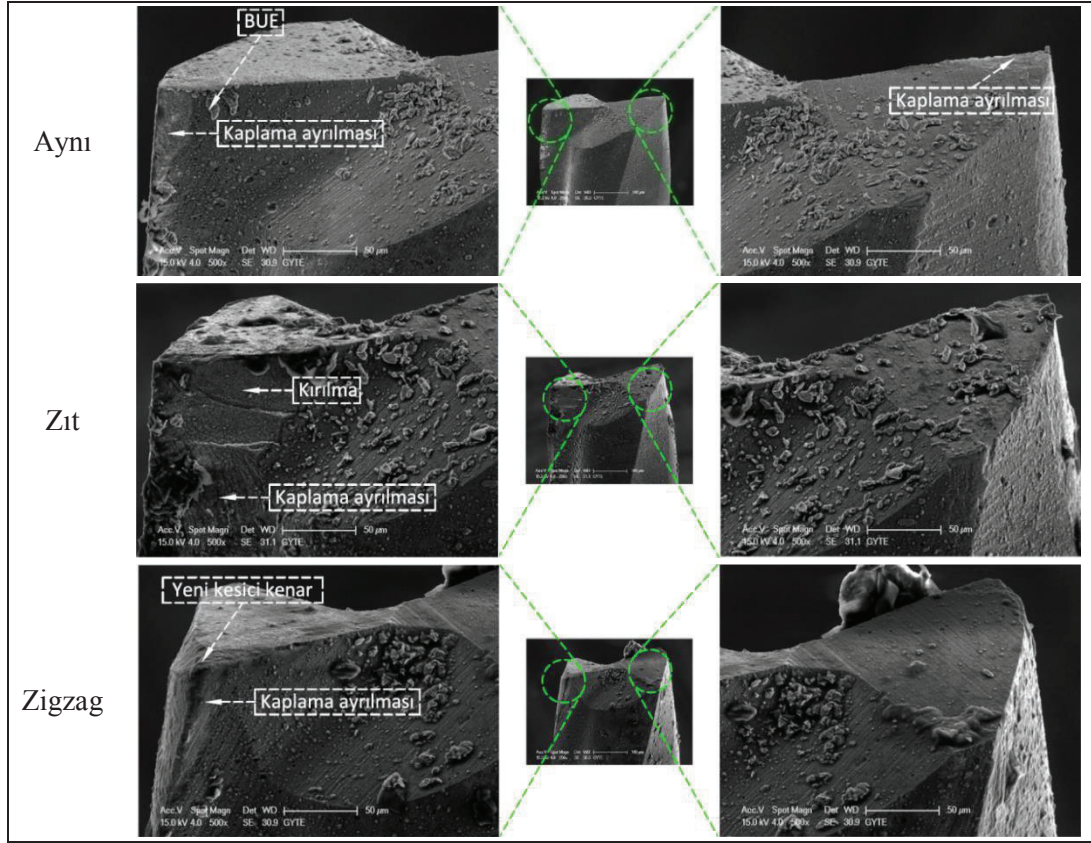


Şekil 4.88: Devam.

Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.89’da gösterilmiştir. Şekil 4.90’da aşınma tipleri ve mekanizmaları detaylı bir şekilde verilmiştir. Aynı yönlü mikro frezelemede, kaplama ayrılması, serbest yüzey üzerinde aşınma ve kesme kenarına talaş yapışması görülmüştür. Zıt yönlü mikro frezelemede, abrasiv aşınma nedeniyle kesici kenarın yuvarlanması gözlenmiştir. Ayrıca iş parçası malzemesinin kesici takıma yapıştığı da görülmüştür. Zıt yönlü mikro frezelemede kaplama ayrılması ve kırılmanın daha ciddi olduğu bulunmuştur. Zigzag mikro frezelemede, orjinal kesme kenarı bozulmuş ve yeni kesici kenar oluşmuştur. Zigzag mikro frezelemede aynı zamanda kaplama ayrılması ve talaş yüzeyinde aşınma da görülmüştür. Sonuç olarak, aynı yönlü mikro frezelemede aşınma alanının zıt ve zigzag mikro frezeleme stratejilerine göre daha düşük olduğu bulunmuştur.

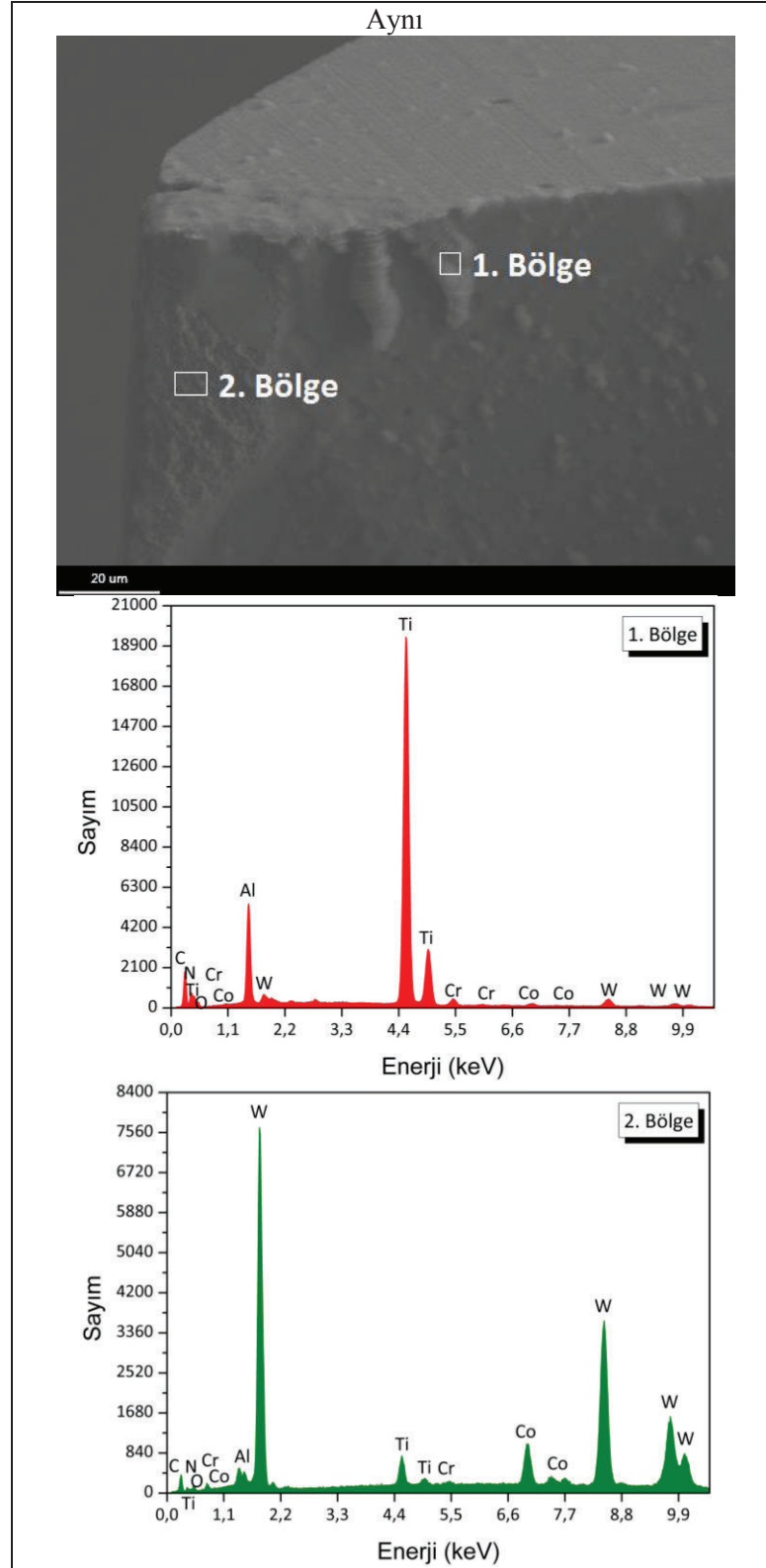


Şekil 4.89: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, a_e : Yana kayma mesafesi).

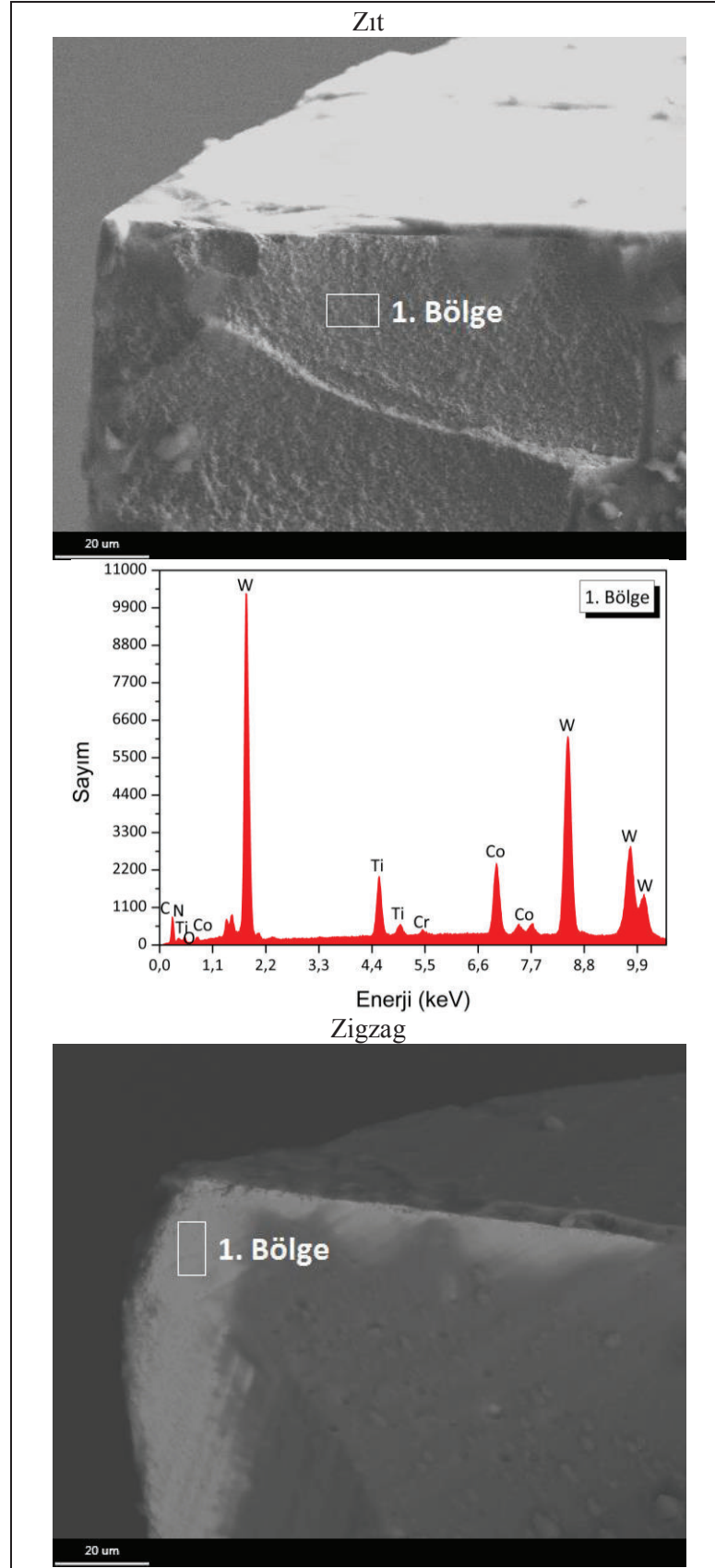


Şekil 4.90: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede meydana gelen aşınma tipleri.

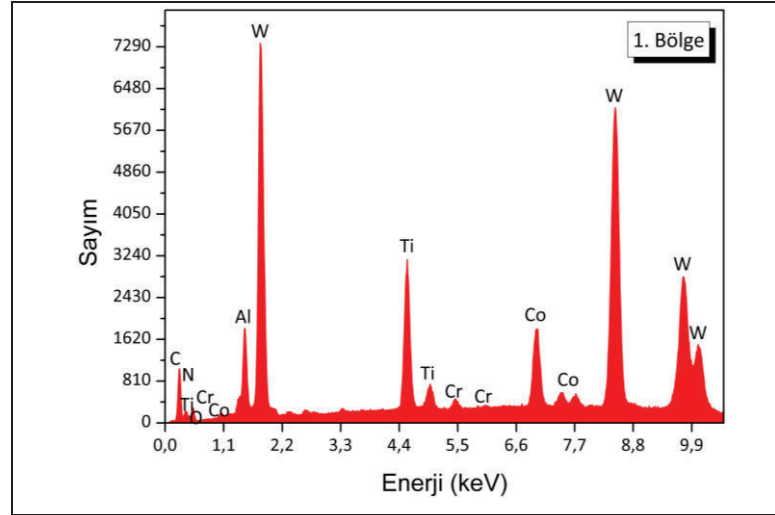
Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısı kullanılarak mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımların EDX analiz sonuçları Şekil 4.91’de gösterilmiştir. Aynı yönlü mikro frezelemede, “1. Bölge”de iş parçası malzemesinin yapışması nedeniyle Ti elementi bulunmuştur. “2. Bölge”de yüksek W elementi elde edilmiştir. Bu sonuç aynı yönlü mikro frezeleme esnasında kaplama ayrılmasının belirtisidir. Aşınmış kesici takımların yüzeyinde oksit tabakalarının varlığını gösteren O elementine rastlanmıştır. Zıt yönlü mikro frezelemede, “1. Bölge”de görüldüğü gibi mikro kesici takımdan TiAlN kaplamanın kalktığı gözlenmiştir. Zigzag mikro frezeleme için, kaplama ayrılması görülmüştür. Bu sonuca W elementinin varlığı nedeniyle varılmıştır.



Şekil 4.91: Ti6Al4V malzemesinin 150 mm/dak ilerleme hızında yüksek hız kafası ile 28000 dev/dak devir sayısında farklı takım yolları ile mikro yüzey frezelemede kullanılan kesici takımların EDX analizi.



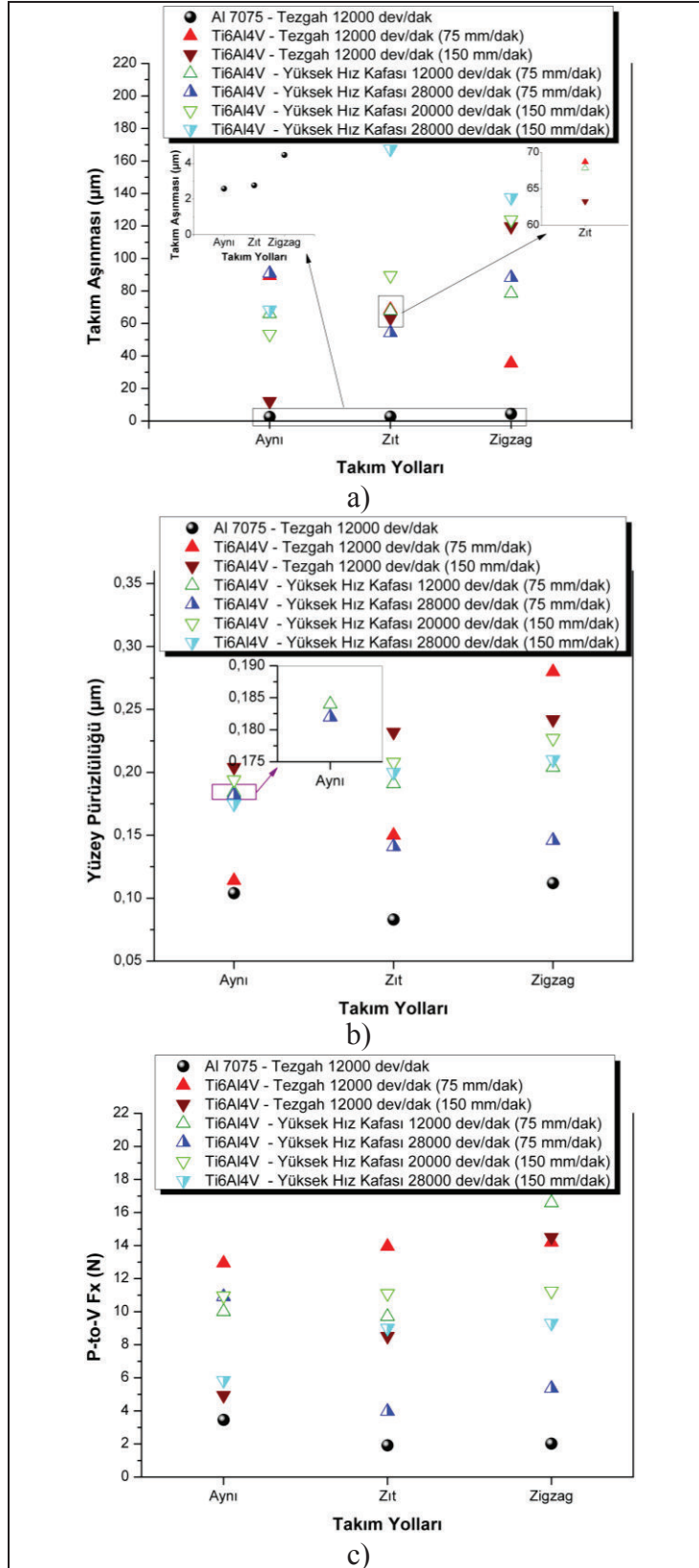
Şekil 4.91: Devam.



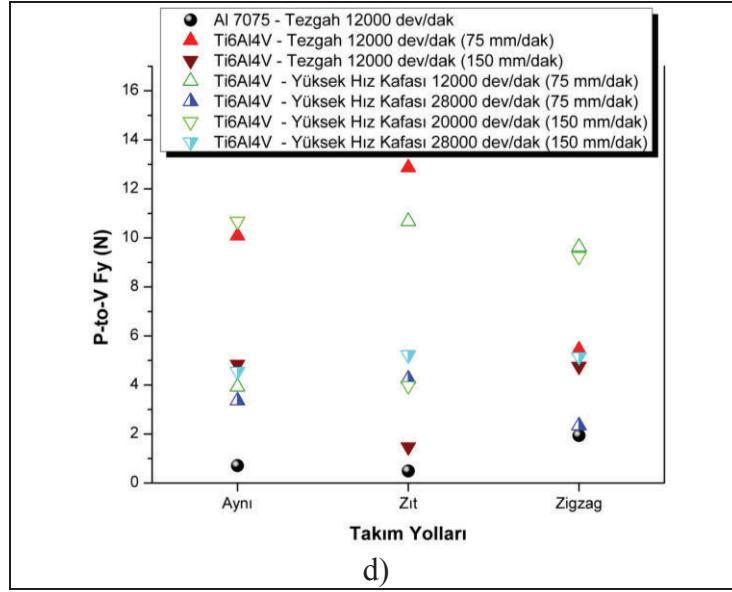
Şekil 4.91: Devam.

Mikro yüzey frezelemede takım yollarının aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisi kantitatif olarak da araştırılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.92'de verilmiştir. Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemede en düşük takım aşınması aynı yönlü frezeleme ile, en düşük yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy kuvveti zıt yönlü frezeleme stratejisi ile elde edilmiştir. Genellikle en kötü değerler ise zigzag işleme stratejisi ile elde edilmiştir. Literatürde de zıt yönlü frezelemenin aynı yönlü frezelemeden daha iyi yüzey kalitesi verdiği belirtilmiştir [103].

Ti6Al4V malzemesinin yüksek hız kafası takılmadan 12000 dev/dak devir sayısında 75 mm/dak ilerleme hızı ile mikro yüzey frezelemede en düşük yüzey pürüzlülüğü ve P-to-V Fx kuvveti aynı yönlü işleme stratejisi ile elde edilmiştir. En düşük takım aşınması ve P-to-V Fy kuvveti ise zigzag işleme stratejisi ile elde edilmiştir. Yüksek hız kafası takıldığında en düşük takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve P-to-V Fy kuvvetini aynı yönlü frezeleme stratejisi vermiştir. Zıt yönlü mikro frezelemede en düşük P-to-V Fx kuvveti elde edilmiştir. Devir sayısı 28000 dev/dak olduğunda ise en düşük takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve P-to-V Fx kuvveti zıt yönlü frezeleme stratejisi ile en düşük P-to-V Fy kuvveti zigzag işleme stratejisi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.92: Mikro yüzey frezelemede takım yollarının ve yüksek hız kafasının a) Takım aşınması, b) Yüzey pürüzlülüğü, c) P-to-V Fx kuvveti, d) P-to-V Fy kuvveti üzerindeki etkisi.



Şekil 4.92: Devam.

Yüksek hız kafası kullanılması durumunda düşük ilerleme hızında devir sayısının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Ti6Al4V malzemesi ile 75 mm/dak ilerleme hızında 12000 ve 28000 dev/dak devir sayılarının kullanıldığı deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Devir sayısının artırılması aynı ve zigzag mikro frezeleme stratejilerinde daha yüksek takım aşınması ile sonuçlanmıştır. Fakat zıt yönlü mikro frezelemede takım aşınması artan devir sayısı ile iyileşmiştir. Bütün takım yollarında devir sayısındaki artış ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır, fakat bu azalmanın aynı yönlü mikro frezelemede düşük olduğu bulunmuştur. Literatürde yüksek kesme hızlarında daha iyi yüzey kalitesinin elde edildiği, fakat bu iyileşmenin çok az olduğu ifade edilmiştir [103]. Devir sayısındaki artış ile yüzey pürüzlülüğündeki azalma zıt yönlü mikro frezelemede %26.2 ve zigzag mikro frezelemede %28.4 olmuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü 28000 dev/dak devir sayısında zıt yönlü mikro frezeleme ile elde edilmiştir. Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 28000 dev/dak'a yükseltilmesi zıt ve zigzag mikro frezelemede P-to-V Fx kuvvetinde sırasıyla %59.1 ve %67.6 azalmaya, fakat aynı yönlü mikro frezelemede %9 artışa neden olmuştur. Her iki devir sayısında da zıt yönlü mikro frezeleme en düşük P-to-V Fx değeri vermiştir. Bütün takım yollarında devir sayısının artması P-to-V Fy kuvvetinde azalmaya neden olmuştur. Devir sayısı 12000 dev/dak'dan 28000 dev/dak'a yükseltildiği zaman, aynı, zıt ve zigzag mikro frezelemede P-to-V Fy kuvvetinde sırasıyla %14.5, %60.2

ve %75.7 azalma bulunmuştur. En düşük P-to-V F_y , 12000 dev/dak değerinde aynı yönlü mikro frezeleme ile 28000 dev/dak değerinde zigzag mikro frezeleme ile elde edilmiştir.

Yüksek hız kafası kullanılması durumunda yüksek ilerleme hızında devir sayısının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Ti6Al4V malzemesi ile 150 mm/dak ilerleme hızında 20000 ve 28000 dev/dak devir sayılarının kullanıldığı deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bütün takım yolu stratejilerinde yüksek devir sayısı yüksek takım aşınmasına sebep olmuştur. Devir sayısı arttığı zaman iş parçası ile kesici takım arasındaki temas zamanı artmaktadır ve bu durum temas alanında sıcaklık artışına neden olmaktadır. Artan devir sayısı ile takım aşınmasının kötüleşmesinin nedeni bu sıcaklık artışıdır. Her iki devir sayısında yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi performans aynı yönlü mikro frezeleme ile elde edilmiştir. 28000 dev/dak değeri için, aynı yönlü mikro frezeleme yüzey pürüzlülüğünü zıt yönlü mikro frezelemeye göre %6.7, zigzag mikro frezelemeye göre %14.5 azaltmıştır. Devir sayısı 28000 dev/dak'dan 20000 dev/dak'a düştüğü zaman, aynı yönlü mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğü zıt yönlü mikro frezelemeye göre %12.5, zigzag mikro frezelemeye göre %16.7 azalmıştır. Bütün takım yollarında devir sayısındaki artış ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Fakat, zıt yönlü mikro frezelemede devir sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi azdır. Yüksek devir sayılarında kesme sıcaklığı artmaktadır ve bu durum malzemenin yumuşamasına neden olmaktadır. Malzemenin yumuşaması daha düzgün yüzey ile sonuçlanmaktadır. Aynı yönlü mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğünün zıt yönlü mikro frezelemeden daha düşük olduğu bulunmuştur. Zıt yönlü frezelemede, talaş kalınlığı kesici takım parçaya girdiği zaman 0'dır ve talaş kalınlığı kesici takım parçadan çıktığı zaman 0'dan maksimum değere artmaktadır. Kesmenin başlangıcında, kesici takım ile işlenen yüzey arasında daha fazla kesme sıcaklığına neden olan kayma (sliding) ve sürtünme (rubbing) olacaktır ve bu işlenen yüzeyin düzgünlüğüne zarar verecektir. Aynı yönlü frezelemede ise, talaş kalınlığı maksimum değerden 0'a azalmaktadır ve kayma ile sürtünme olayı meydana gelmemektedir. Bu nedenle aynı yönlü mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğü daha düşüktür. Genellikle, P-to-V F_x ve P-to-V F_y kuvvetleri artan devir sayısı ile azalmıştır. Devir sayısı arttıkça kayma bölgesinde kesme sıcaklığı artmaktadır. Yüksek sıcaklık iş parçası dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Düşük devir

sayılarında, kesme sıcaklığı yeteri kadar yüksek değildir ve iş parçası malzemesi yüksek sertliğini korumaktadır. Yüksek mekaniksel yük kuvveti arttırmaktadır. Devir sayısı arttırıldığında kayma bölgesindeki sıcaklık oldukça yüksek bir değere ulaşmaktadır. Daha yüksek kesme sıcaklığı kayma gerilmesinde ve kayma bölgesinde iş parçası malzemesinin sertliğinde azalmaya neden olmaktadır. Bu durum yüksek devir sayılarında kuvvetin neden düşük olduğunun sebebidir. 20000 dev/dak devir sayısında, P-to-V Fx kuvveti farklı işleme şartları altında çok az değişmiştir, fakat minimum P-to-V Fx aynı yönlü mikro frezeleme ile elde edilmiştir. 28000 dev/dak devir sayısında, aynı yönlü mikro frezelemede P-to-V Fx kuvveti zıt yönlü mikro frezelemeye göre %35.1, zigzag mikro frezelemeye göre %37.3 azalmıştır. Devir sayısı 28000 dev/dak'dan 20000 dev/dak'a düştüğü zaman, aynı yönlü mikro frezelemede P-to-V Fx kuvvetindeki azalma zıt yönlü mikro frezelemeye göre %1.3, zigzag mikro frezelemeye göre %2.6 olmuştur. Sonuç olarak minimum P-to-V Fx kuvveti 28000 dev/dak değerinde aynı yönlü mikro frezeleme stratejisi ile elde edilmiştir. Zıt yönlü mikro frezelemede daha yüksek kuvvetin görülmesinin nedeni kesici takım iş parçası malzemesine girdiği zaman kayma ve sürtünme olmasıdır. Devir sayısı 20000 dev/dak olduğu zaman, zıt yönlü mikro frezelemede P-to-V Fy kuvveti aynı yönlü mikro frezelemeden daha düşüktür. Fakat devir sayısı 28000 dev/dak iken, aynı yönlü mikro frezelemede P-to-V Fy kuvveti zıt yönlü mikro frezelemeden daha düşüktür.

Yüksek hız kafası kullanılması durumunda 28000 dev/dak devir sayısında ilerleme hızının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Ti6Al4V malzemesi ile 75 ve 150 mm/dak ilerleme hızlarının kullanıldığı deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Aynı yönlü mikro frezeleme hariç diğer takım yollarında ilerleme hızının artması ile takım aşınması artmıştır. En düşük takım aşınması 75 mm/dak ilerleme hızında zıt işleme stratejisi ile elde edilmiştir. Zıt mikro frezeleme stratejisi en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini vermiştir. Aynı yönlü mikro frezeleme hariç diğer takım yollarında ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur. Fakat aynı yönlü mikro frezelemede artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişim olmamıştır. Zıt yönlü mikro frezeleme en düşük P-to-V Fx kuvvetini 75 mm/dak ilerleme hızında vermiştir. İlerleme hızı 75 mm/dak'dan 150 mm/dak'a yükseldiğinde, aynı yönlü mikro frezeleme en düşük P-to-V Fx kuvvetini vermiştir. Aynı yönlü mikro

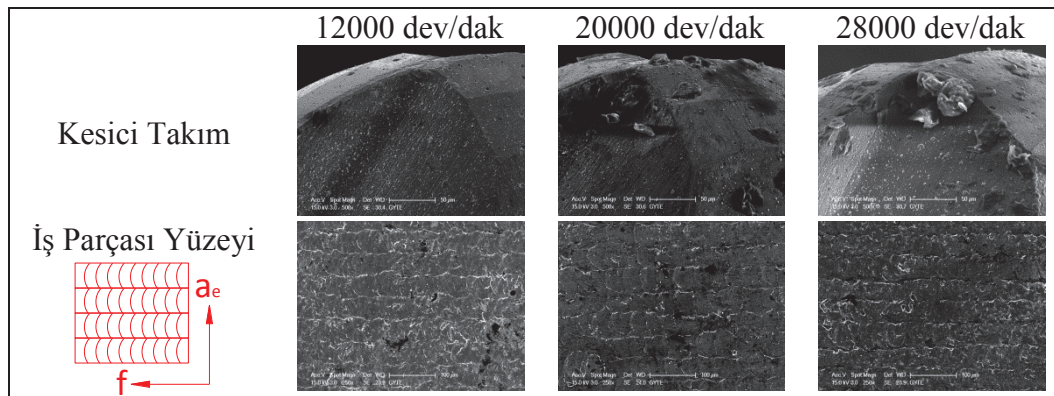
frezeleme hariç diğer takım yollarında artan ilerleme hızı ile P-to-V Fx kuvvetinin arttığı bulunmuştur. Bütün takım yollarında artan ilerleme hızı ile P-to-V Fy kuvveti artmıştır. En düşük P-to-V Fy değeri 150 mm/dak ilerleme hızında aynı yönlü mikro frezeleme ile 75 mm/dak ilerleme hızında zigzag mikro frezeleme ile elde edilmiştir.

Mikro frezelemede yüksek hız kafası kullanılmasının takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Ti6Al4V malzemesinin 75 mm/dak ilerleme hızında işlenmesinde tezgahın 12000 dev/dak devir sayısının ve yüksek hız kafasının kullanıldığı deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. En düşük takım aşınması değeri tezgahın 12000 dev/dak devir sayısının kullanıldığı zigzag işleme stratejisi ile elde edilmiştir. Aynı ve zıt yönlü mikro frezeleme stratejilerinde yüksek hız kafası kullanılması sonucunda ölçülen takım aşınması değerlerinin tezgahın 12000 dev/dak devir sayısının kullanılması sonucunda ölçülen takım aşınmasından daha düşük olduğu bulunmuştur. Yüksek hız kafasının performansı yüzey pürüzlülüğü ile değerlendirildiğinde, zigzag işleme stratejisi hariç diğer stratejilerde tezgahın 12000 dev/dak devir sayısının kullanıldığı durumlara göre daha kötü yüzey kalitesi göstermiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri tezgahın 12000 dev/dak devir sayısının kullanıldığı aynı yönlü işleme stratejisi ile elde edilmiştir. En düşük P-to-V Fx kuvveti yüksek hız kafasının kullanıldığı zıt yönlü mikro frezelemede, en düşük P-to-V Fy kuvveti yüksek hız kafasının kullanıldığı aynı yönlü mikro frezelemede bulunmuştur. Yukarıda ifade edilen sonuçlara göre, işleme şartları ve stratejileri doğru seçildiği zaman yüksek maliyetli yüksek-hızlı tezgahlar yerine standart tezgaha yüksek hız kafası takılması ile işleme performansında olumlu sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.

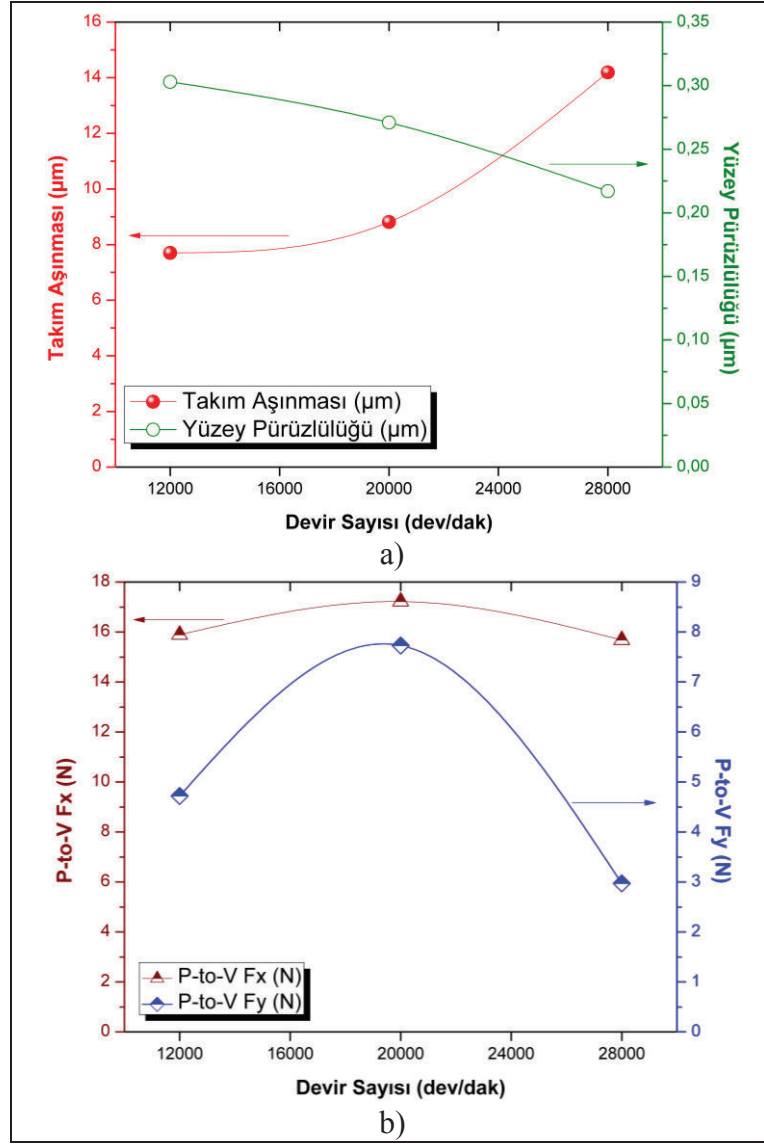
4.4. Devir Sayısının Etkisi Deneyleri

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi kalitatif olarak Şekil 4.93'te gösterilmiştir. Her 3 devir sayısında da kesici takımda herhangi bir kırılma ya da dökülme gözlemlenmemiştir. Devir sayısı arttıkça kesici takımda BUE'nin arttığı bulunmuştur. Kesici takım aşınması bütün devir sayılarında özellikle 12000 dev/dak değerinde çok düşüktür ve takım ömrünü tamamlamamıştır. İş parçası yüzeyinde mikro çapak oluşumu görülmüştür, fakat devir sayısı arttıkça mikro çapak oluşumu

azalmıştır. Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisi kantitatif olarak da araştırılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.94'te sunulmuştur. Devir sayısı arttıkça takım aşınmasının arttığı, yüzey pürüzlülüğünün ise azaldığı bulunmuştur. Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 28000 dev/dak'a artırılması takım aşınmasını %84.28 arttırmıştır. Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 20000 dev/dak'a artırılması ise takım aşınmasını sadece %14.41 arttırmıştır. Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 20000 dev/dak'a ve 28000 dev/dak'a artırılması yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla %10.56 ve %28.38 azaltmıştır. Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 20000 dev/dak'a artması halinde hem Fx kuvveti hem de Fy kuvveti artmıştır. Devir sayısının daha fazla artırılması ise Fx ve Fy kuvvetlerinin azalmasına neden olmuştur. Fx yönündeki kuvvetin devir sayısı ile değişiminin çok az olduğu, Fy yönündeki kuvvetin devir sayısına daha duyarlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca bütün devir sayılarında Fx kuvvetinin Fy kuvvetinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 20000 dev/dak'a artırılması Fx kuvvetini %8.37, Fy kuvvetini %63.77 arttırmıştır. Devir sayısının 20000 dev/dak'dan 28000 dev/dak'a artırılması ise Fx kuvvetini %8.94, Fy kuvvetini %61.58 azaltmıştır. Sonuç olarak Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde en düşük kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü değerleri 28000 dev/dak değerinde, en düşük aşınma değeri ise 12000 dev/dak değerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.93: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesinde farklı devir sayılarının kesici takım ve iş parçası yüzeyi üzerindeki etkisi (f: İlerleme, ae: Yana kayma mesafesi).



Şekil 4.94: Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemede devir sayısının a) Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, b) Kuvvetler üzerindeki etkisi.

4.5. Mekanistik Kuvvet Modeli

Frezeleme esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin hesaplanması günümüzde önemli bir araştırma konusudur ve kesme kuvvetlerinin modellenmesi için 3 farklı yaklaşım bulunmaktadır: analitik, mekanistik ve nümerik. Analitik modeller sürtünme, geometri ve malzemelerin mekanik davranışı gibi mekanik yönler ile kesme kuvvetleri arasında bağlantı kurmayı denemektedir. Mekanistik modeller bazı işleme değişkenleri ile kesme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi kullanmaktadır. Bu ilişki prosesin geometrik karakteristiğini ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bazı

ampirik verileri dikkate almaktadır. Nümerik metotlar kesici uç bölgesine ve kesici takım ve iş parçası arasındaki etkileşime odaklanmaktadır [69]. Sonlu elemanlar metodu nümerik metottur. Bu çalışmada, mikro frezeleme prosesi için konvansiyonel mekanistik frezeleme modeli kullanılmıştır ve ortalama kuvvet (statik) modellenmiştir. Mekanistik kuvvet modeli kesici kenarı küçük kesikli elemanlara bölmeye ve kesme kuvvetlerini tahmin etmek için bu elemanlara matematiksel ifadelerin uygulanmasına dayanmaktadır. Her bir kesikli elemanın kuvvetleri hesaplandığında, bu değerler kesme kenarı boyunca toplanmaktadır ve böylece kesme kuvveti elde edilmektedir. Mekanistik kuvvet modellerinde parmak freze rijit takım olarak düşünülmektedir. Bu modellerde kayma etkisi spesifik kesme kuvveti katsayısı ve kazıma etkisi spesifik kenar kuvveti katsayısı ile karakterize edilmektedir. Spesifik kesme kuvveti katsayıları iş parçası malzemesine ve kesici takıma (kaplama, talaş açısı ve helis açısı) bağlıdır. Katsayılar ve bu parametreler arasındaki ilişki çok karmaşıktır ve bu değerleri tahmin etmek için kullanılacak genel bir kural yoktur. Bu nedenle, her bir kesici takım-iş parçası malzemesi çifti için spesifik kesme ve kenar kuvveti katsayıları karakterizasyon testleri ile hesaplanmaktadır. Karakterizasyon testlerinde ölçülen kesme kuvvetleri girdi olarak kullanılmaktadır. Mekanistik kuvvet modelleri iki farklı şekilde ele alınmaktadır: Ekspansiyonel (üstel) kuvvet katsayı modeli ve lineer kenar kuvvet modeli.

4.5.1. Ekspansiyonel (Üstel) Kuvvet Katsayı Modeli

Frezeleme kuvvetlerinin tahmini teğetsel kesme kuvvetinin talaş yükünün oranı olduğu ve radyal kuvvetin teğetsel kuvvetin oranı olduğu düşünülerek yapılmaktadır:

$$dF_t = K_t h(\theta) dz \quad (4.29)$$

$$dF_r = K_r dF_t \quad (4.30)$$

Burada dF_t teğetsel kuvveti, dF_r radyal kuvveti, dz aksenal disklerin kalınlığını, h talaş kalınlığını, K_t ve K_r kuvvet katsayılarını ifade etmektedir. Talaş kalınlığı eşitlik (4.31) ile ifade edilmektedir:

$$h = f_t \sin(\theta) \quad (4.31)$$

Burada f_t diş başına ilerlemeyi ve θ takımın anlık açısal pozisyonunu (takımın dönme açısı) ifade etmektedir. Diş başına ilerleme, lineer ilerleme (f), devir sayısı (n) ve kesici ağız sayısı (Z) ile tanımlanmaktadır.

$$f_t = \frac{f}{nZ} \quad (4.32)$$

K_t ve K_r kuvvet katsayıları talaş kalınlığının üstel bir fonksiyonu olarak aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır:

$$K_t = K_T h_a^{-p} \quad (4.33)$$

$$K_r = K_R h_a^{-q} \quad (4.34)$$

$$K_a = K_A h_a^{-s} \quad (4.35)$$

Yukarıdaki denklemdeki sabitler (K_T , K_R , K_A , p, q ve s) deneysel olarak bulunmaktadır. h_a ortalama talaş kalınlığını ifade etmektedir (eşitlik (4.36)).

$$h_a = \frac{a_p \int_{\theta_s}^{\theta_e} f_t \sin \theta d\theta}{a_p(\theta_e - \theta_s)} \quad (4.36)$$

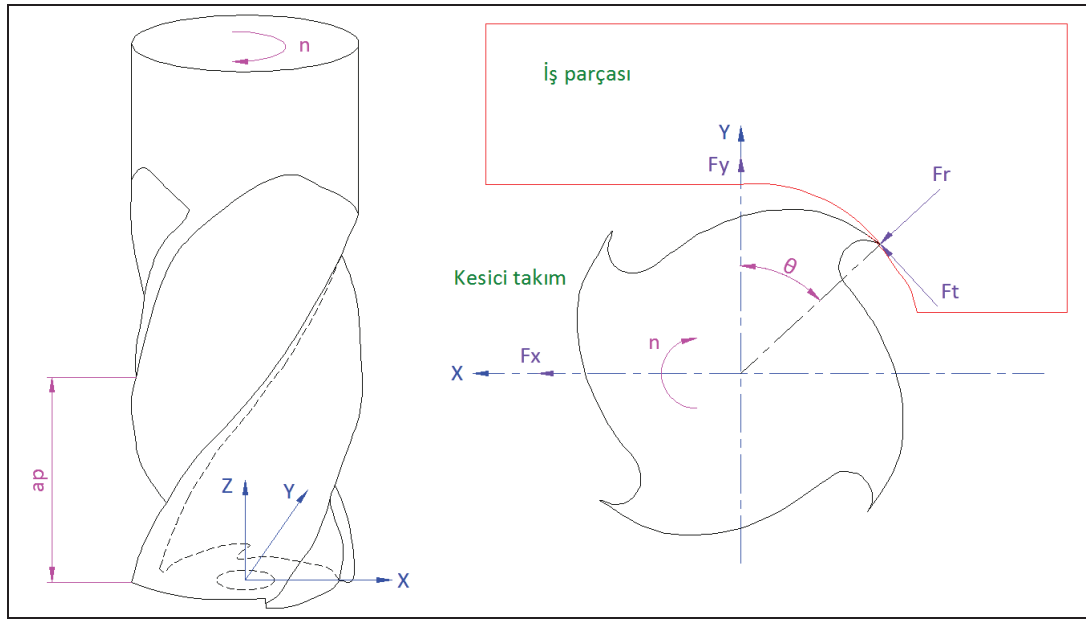
Burada a_p talaş derinliğini, θ_s ve θ_e sırasıyla takımın malzemeye giriş ve çıkış açılarını ifade etmektedir.

4.5.2. Lineer Kenar Kuvvet Modeli

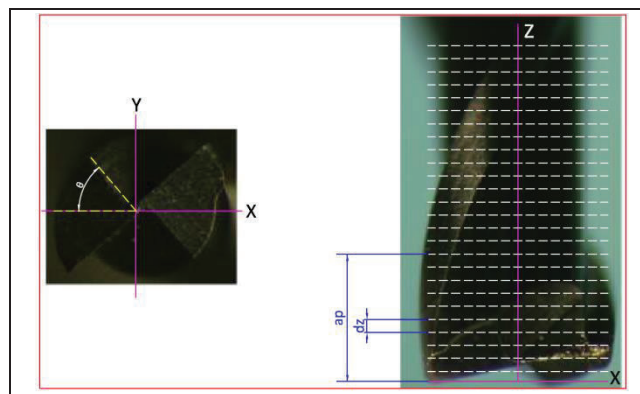
Eşitlik (4.29) ve eşitlik (4.30) direkt olarak talaş kalınlığının (ve eksenel talaş derinliği) oranına bağlıdır fakat diğer işleme parametrelerinden bağımsızdır. Kesici kenar radyüsü 0 olmadığı için talaş kalınlığı kenar radyüsüne yakın değerlerde kazıma artar ve eşitlik (4.29) ve eşitlik (4.30) modellerinin hesapladığı kuvvetlerden

daha büyük değerler elde edilir. Bu nedenlerle kuvvet modellerine kenar katsayısı adı verilen yeni katsayılar eklenmektedir.

Mikro kesici takımın şematik görüntüsü Şekil 4.95’de gösterilmiştir. Kuvvet modellerinin helis açısının etkisini içermesi için aksel talaş derinliği (a_p) dz ölçüsünde dilimlere bölünmüştür (Şekil 4.96). Her bir dilimdeki kuvvet ayrı olarak hesaplanır, kesici takıma uygulanan toplam kuvvet bütün dilimlerin kuvvetlerinin integrasyonudur.



Şekil 4.95: Mikro kesici takımın şematik görüntüsü.



Şekil 4.96: Kuvvet modeli için koordinat sistemi.

Her bir dilim için, kuvvetler teğetsel kuvvet dF_t ve radyal kuvvet dF_r dir. Bu kuvvetler ve proses parametreleri (talaş kalınlığı h ve elemansal talaş derinliği dz) arasındaki ilişki dönme açısı θ da aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$dF_t(\theta) = (K_{tc}h(\theta) + K_{te})dz \quad (4.37)$$

$$dF_r(\theta) = (K_{rc}h(\theta) + K_{re})dz \quad (4.38)$$

K_{tc} ve K_{rc} kesme kuvveti katsayılarıdır. K_{te} ve K_{re} kenar kuvveti katsayılarıdır. Talaş kalınlığı aşağıdaki Martelloti denklemi ile hesaplanmaktadır:

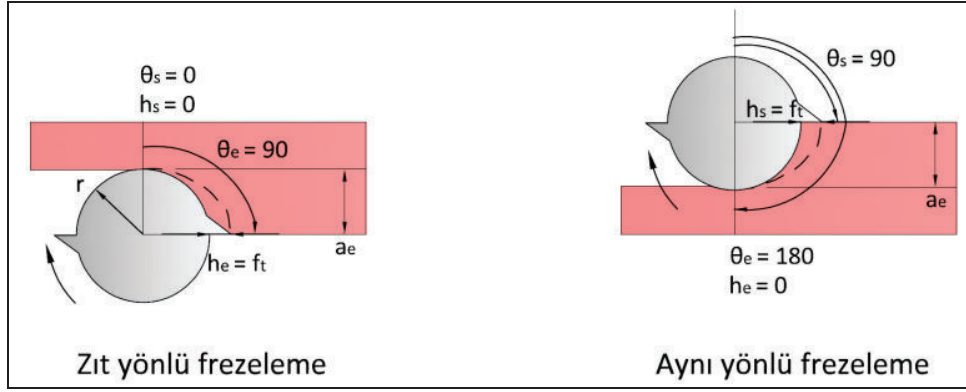
$$h(\theta) = f_t \sin(\theta) \quad (4.39)$$

Eşitlik (4.39)'da görüldüğü gibi, frezelemede talaş kalınlığı periyodik olarak değişmektedir. $\theta=0$ ve 180° olduğunda talaş kalınlığı 0 ve $\theta=90^\circ$ olduğunda talaş kalınlığı maksimum (f_t) olmaktadır. Şekil 4.97'de hem aynı hem de zıt yönlü frezelemede talaş kalınlığının değişimi gösterilmiştir [156]. Talaş kalınlığının aynı yönlü frezelemede azaldığı, zıt yönlü frezelemede arttığı bilinmektedir. Her iki durumda da, talaş kalınlığı $180 < \theta < 360^\circ$ için bu açılar arasında kesme meydana gelmediğinden 0 olmaktadır. Aynı yönlü frezelemede, çıkış açısı $\theta_e = 180^\circ$ olmaktadır (Şekil 4.98) ve başlangıç açısı yana kayma mesafesinin ve takım yarıçapının fonksiyonu olarak yazılmaktadır (eşitlik (4.40)).

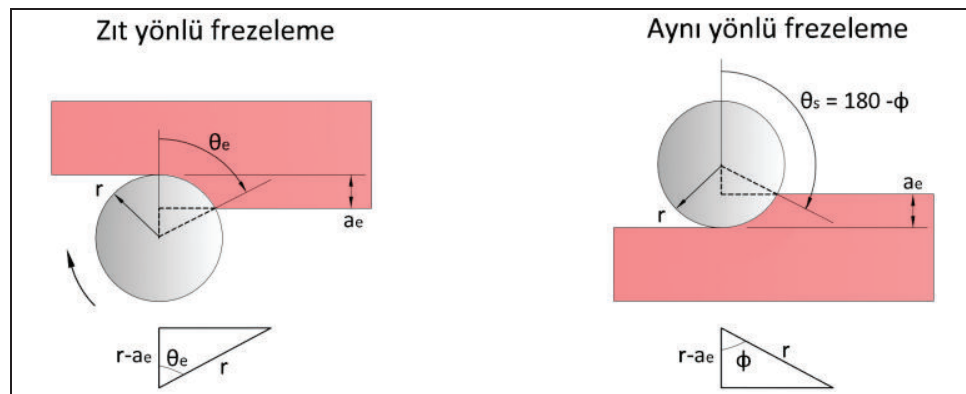
$$\theta_s = 180 - \phi = 180 - \cos^{-1}\left(\frac{r - a_e}{r}\right) \quad (4.40)$$

Zıt yönlü frezelemede, başlangıç açısı $\theta_s = 0^\circ$ olmaktadır (Şekil 4.98) ve çıkış açısı yana kayma mesafesinin ve takım yarıçapının fonksiyonu olarak yazılmaktadır (eşitlik (4.41)).

$$\theta_e = \cos^{-1}\left(\frac{r - a_e}{r}\right) \quad (4.41)$$



Şekil 4.97: Aynı ve zıt yönlü frezelemede talaş kalınlığının değişimi ($a_e=r$).



Şekil 4.98: Aynı ve zıt yönlü frezelemede çıkış ve başlangıç açıları.

Konvansiyonel makro frezelemede, talaş kalınlığı Martelloti denklemi ile ifade edilmektedir. Mikro frezelemede talaş kalınlığını hesaplamak için Bao ve Tansel [75] eşitlik (4.42)'de verildiği gibi bir analitik model önermiştir.

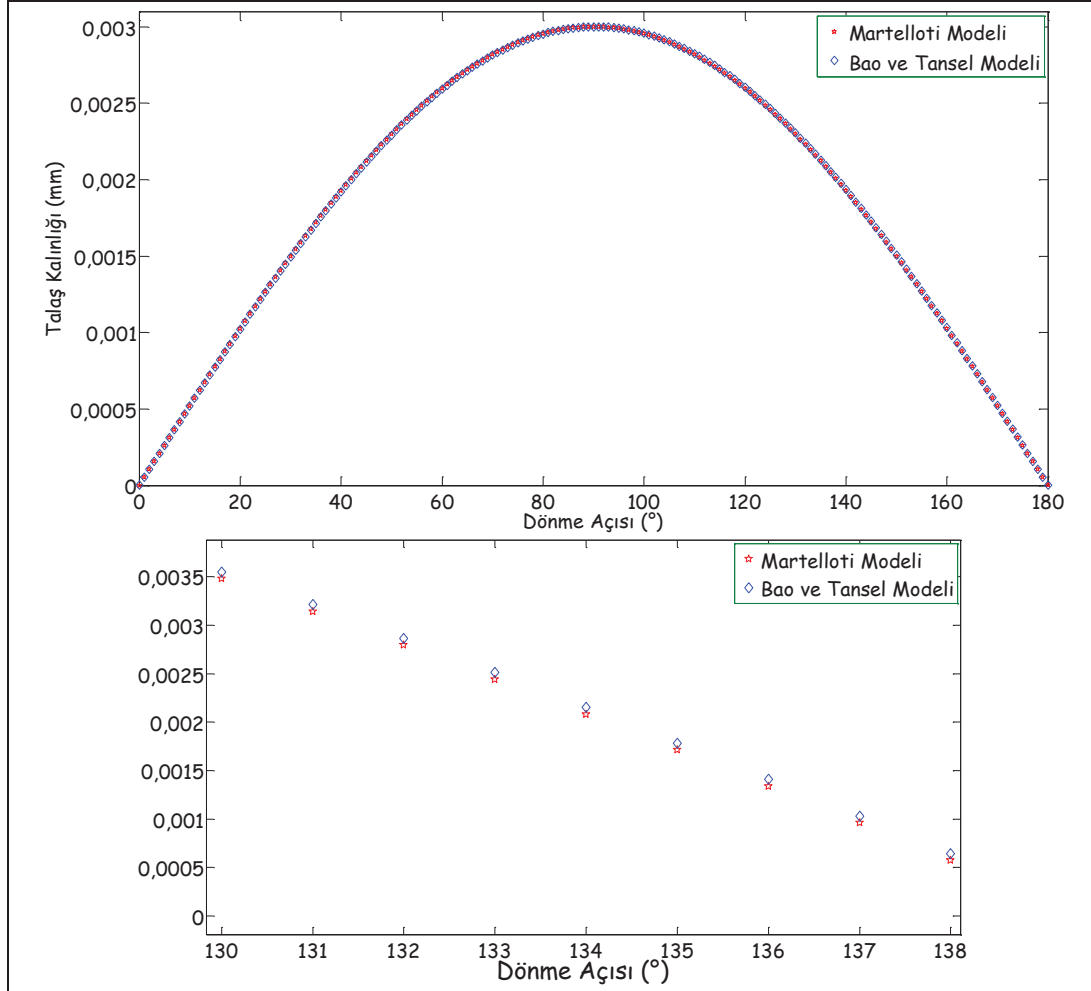
$$h = f_t \sin \theta - \frac{Z}{2\pi r} f_t^2 \sin \theta \cos \theta + \frac{1}{2f} f_t^2 \cos^2 \theta \quad (4.42)$$

Burada h talaş kalınlığını, f_t diş başına ilerlemeyi, Z kesici ağız sayısını ve r takım yarıçapını ifade etmektedir. Bao ve Tansel [75] tarafından önerilen analitik model ve Martelloti denklemi ile hesaplanan talaş kalınlığı arasındaki fark Şekil 4.99'da gösterilmiştir. Bu şeklin çizilmesinde ilerleme $3 \mu\text{m}/\text{diş}$, devir sayısı 12000 dev/dak ve 2 ağızlı kesici takımın çapı $400 \mu\text{m}$ olarak alınmıştır.

Daha sonra bu elemansal kuvvetler (dF_t ve dF_r) transformasyon kullanılarak x ve y yönlerindeki kuvvetlere dönüştürülür.

$$dF_x(\theta) = +dF_t(\theta)\cos\theta + dF_r(\theta)\sin\theta \quad (4.43)$$

$$dF_y(\theta) = +dF_t(\theta)\sin\theta - dF_r(\theta)\cos\theta \quad (4.44)$$



Şekil 4.99: Talaş kalınlığı için Martelloti ve Bao ve Tansel modellerinin karşılaştırılması.

Eksenel talaş derinliği boyunca elemansal kuvvetleri integre ederek ve bütün ağızlardaki (Z) kuvvetleri toplayarak kesici üzerindeki toplam kuvvet hesaplanır:

$$F_x(\theta) = \sum^Z \sum^{a_p} dF_x \quad (4.45)$$

$$F_y(\theta) = \sum^z \sum^{a_p} dF_y \quad (4.46)$$

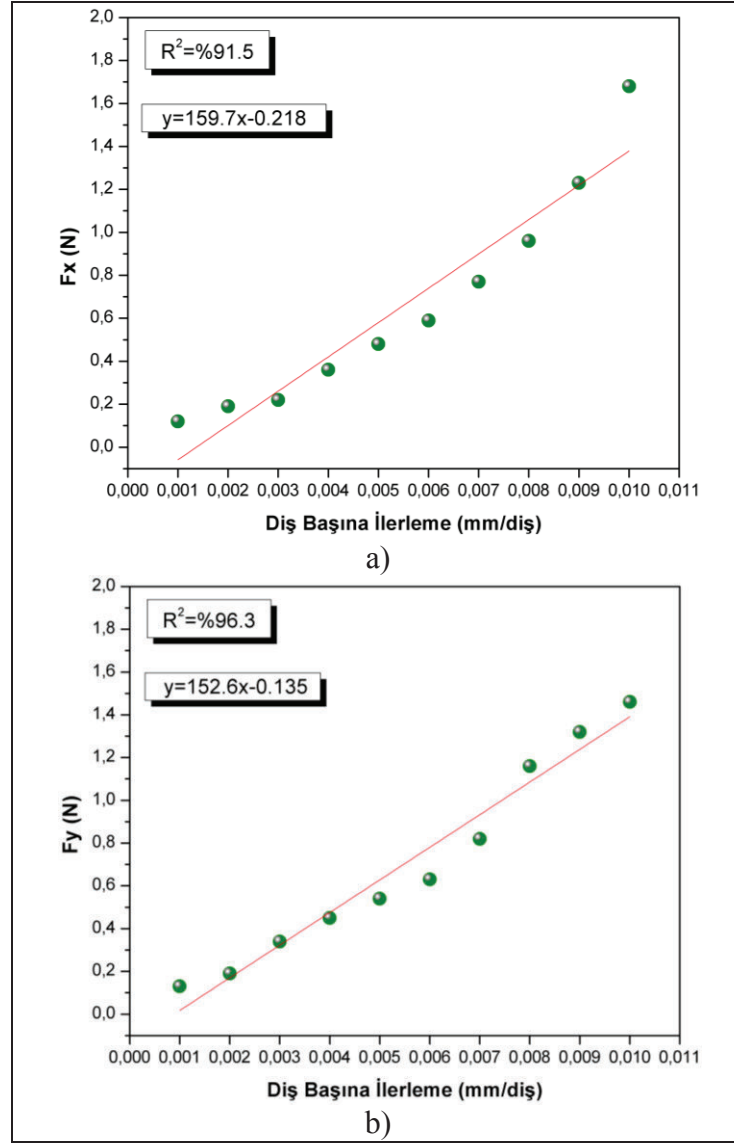
Kesme kuvvetlerinin tahmini için iş parçası malzemesi ve kesici takım çiftine özgü olan kesme kuvveti katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu katsayılar mekanistik kalibrasyon ile elde edilmektedir. Mekanistik kalibrasyon deneylerinde kesme hızı ve talaş derinliği sabit alınarak farklı ilerlemelerde kuvvetler ölçülmektedir. Kesme kuvvetlerinin artan ilerleme ile arttığı bilinmektedir. Belirli aralıklı ilerleme değerlerinde yürütülen deneyler sonucunda ölçülen ortalama kuvvetlere uydurulan doğru denklemi (eşitlik (4.47)) ile kesme kuvveti katsayıları hesaplanmaktadır. Kuvvet katsayıları aşağıda verilen formüller ile bulunmaktadır:

$$\overline{F_{x,y}} = \overline{F_{xc,yc}}c + \overline{F_{xe,ye}} \quad (4.47)$$

$$K_{tc} = \frac{4\overline{F_{yc}}}{Za_p} \quad , \quad K_{te} = \frac{\pi\overline{F_{ye}}}{Za_p} \quad , \quad K_{rc} = \frac{4\overline{F_{xc}}}{Za_p} \quad , \quad K_{re} = \frac{\pi\overline{F_{xe}}}{Za_p} \quad (4.48)$$

Burada a_p talaş derinliğini, Z kesici takım ağız sayısını, $\overline{F_{xc}}$, $\overline{F_{yc}}$, $\overline{F_{xe}}$, $\overline{F_{ye}}$ ise x ve y yönündeki ortalama kuvvetlerin bileşenlerini ifade etmektedir.

Bu çalışmada mekanistik kalibrasyon deneyleri 12000 dev/dak iş mili hızında, 50 μ m talaş derinliğinde ve farklı ilerleme değerlerinde kanal işlenerek yapılmıştır. İşlenen kanalların uzunluğu 15 mm olarak belirlenmiştir. Mekanistik kalibrasyon sonucunda ölçülen ortalama kuvvet değerleri Şekil 4.100'de ve hesaplanan kesme kuvveti katsayıları Tablo 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.100: Ortalama a) F_x , b) F_y kuvvetleri - diş başına ilerleme grafiği.

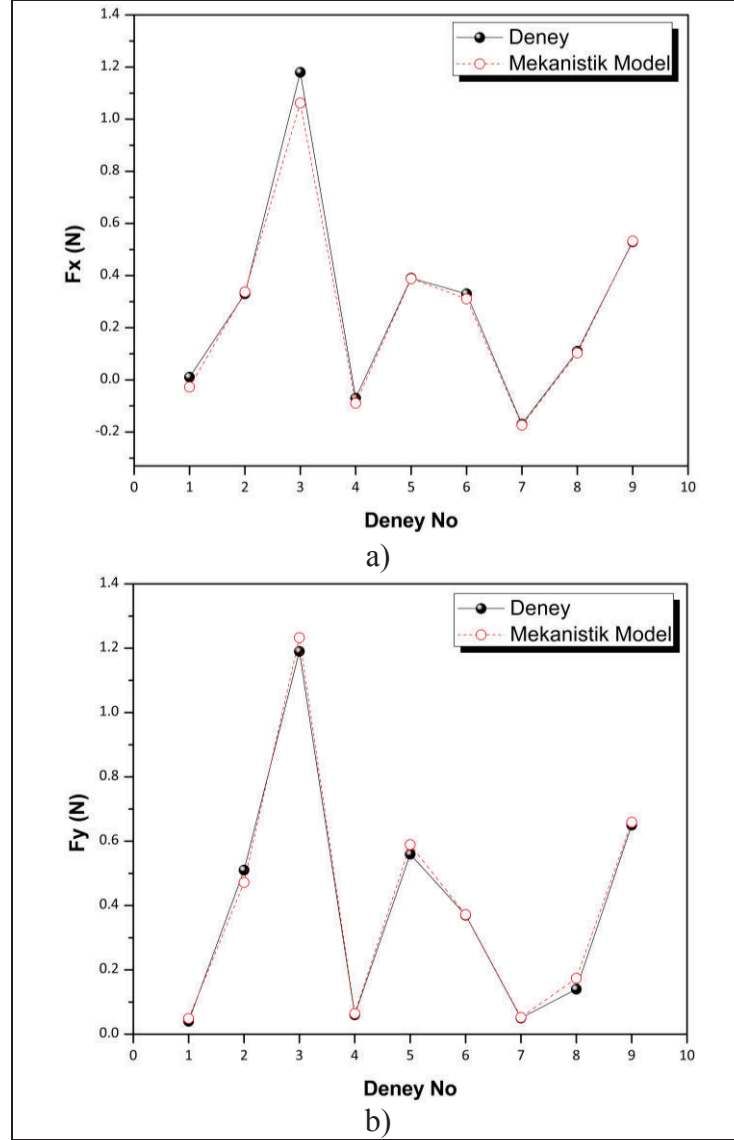
Tablo 4.37: Ti6Al4V malzemesi ve 400 μm çapındaki düz kesici takım için hesaplanan kesme kuvveti katsayıları.

K_{tc} (N/mm ²)	K_{te} (N/mm)	K_{rc} (N/mm ²)	K_{re} (N/mm)
6104	-4.24	6388	-6.849

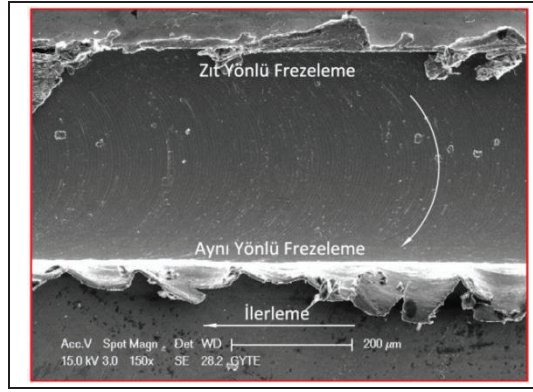
Mikro frezelemede kuvvetleri tahmin etmek için Matlab yazılımı ile program yazılmıştır ve modelin tahmin performansını belirleyebilmek için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Daha önceden belirtildiği gibi doğrulama deneyleri Taguchi deney planına göre oluşturulmuştur. Sonuçta 9 adet doğrulama deneyi farklı işleme şartlarında yürütülmüştür. Doğrulama deneyleri ve mekanistik model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.101'de gösterilmiştir. Kuvvet modelinin incelenen şartlar

altında hem F_x hem de F_y kuvvetlerini tahmin etmede olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Mekanistik kuvvet modeli için yürütülen kalibrasyon deneylerinde ayrıca kanalların genişliği ve çapak genişliği ölçülerek diş başına ilerlemenin etkisi de incelenmiştir. Kanal frezelemede kanalın bir tarafı aynı yönlü frezeleme diğer tarafı zıt yönlü frezeleme olmaktadır (Şekil 4.102).

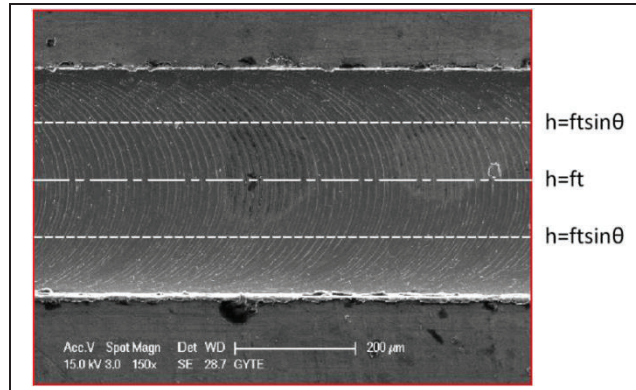


Şekil 4.101: Deney ve mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması. a) F_x , b) F_y .



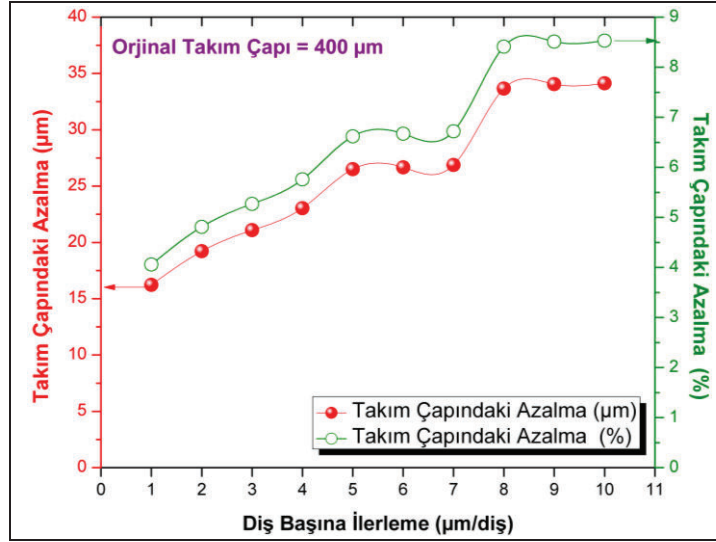
Şekil 4.102: Mikro kanal frezelemede aynı ve zıt yönlü frezeleme.

Şekil 4.103'te görüldüğü gibi ilerleme değeri takım kanal merkezinden geçtiğinde daha yüksek olmaktadır. İlerlemenin kanal merkezinde daha yüksek olması bu çizgi boyunca yüzey pürüzlülüğünün daha büyük olmasına neden olacaktır.



Şekil 4.103: İşlenmiş kanalın taban yüzeyindeki takım yörüngesi.

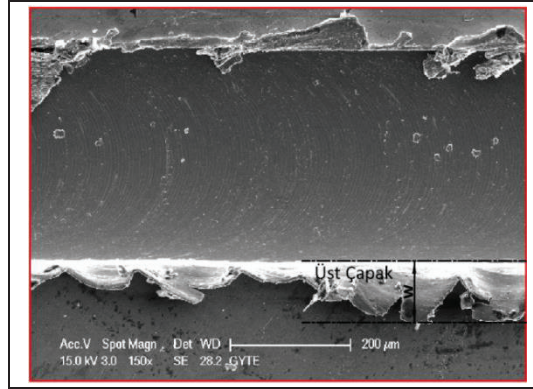
Mikro kanal frezelemede kanal genişliği ölçülerek takım çapındaki azalma belirlenmiştir (Şekil 4.104). Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemede artan diş başına ilerleme ile takım çapındaki azalmanın arttığı bulunmuştur. Bu sonuç diş başına ilerlemedeki artış ile takım aşınmasının arttığı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.104: Takım çapındaki azalma - diş başına ilerleme grafiği.

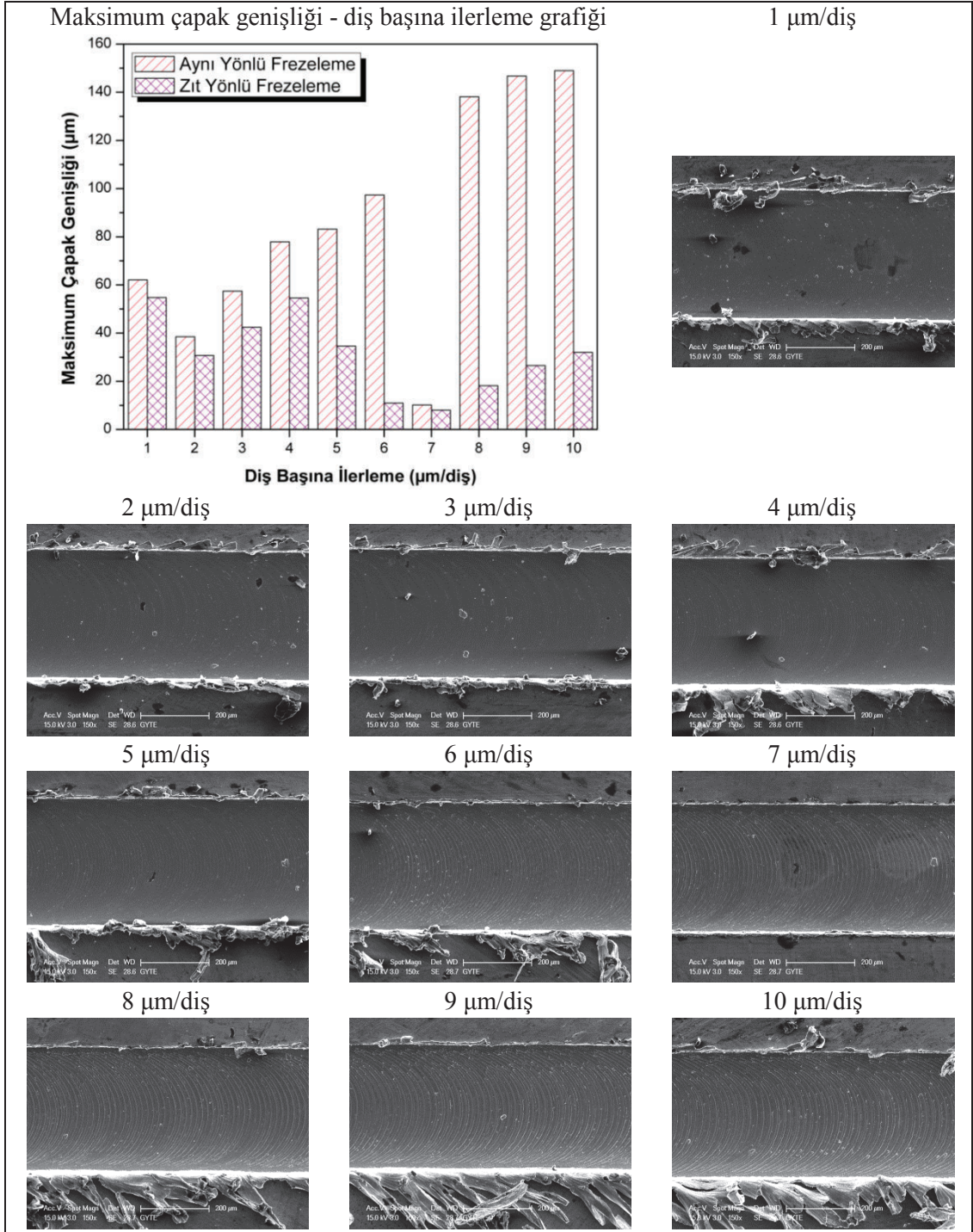
Bu çalışmada mikro kanal frezelemede üst çapak genişliği ölçülmüştür (Şekil 4.105). Kanal mikro frezelemede aynı ve zıt yönlü işleme tarafındaki maksimum üst çapak genişliği ölçülerek, diş başına ilerlemenin çapak genişliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Diş başına ilerlemenin hem aynı hem de zıt yönlü frezeleme tarafında maksimum çapak genişliği üzerindeki etkisi Şekil 4.106'da verilmiştir. Bütün diş başına ilerlemelerde zıt yönlü frezeleme tarafındaki üst çapak genişliğinin daha az olduğu bulunmuştur. Mikro kanal frezelemede aynı yönlü işleme tarafındaki çapak boyutunun zıt yönlü işleme tarafındaki çapak boyutundan daha fazla olduğu literatürde de belirtilmiştir [23], [37], [111], [114], [124], [130], [131], [141], [150], [157]. Zıt yönlü frezelemede kesme işleminin başlangıcında deforme olmamış talaş kalınlığı sıfırdır. Böylelikle malzeme ilk aşamada ezilir ve itilir. Deforme olmamış talaş kalınlığının artması ile yeni kesilmiş malzemenin destekleyici etkisi artmaktadır ve malzeme kayma modunda kesilir. Buna zıt olarak, kanal frezelemede aynı yönlü frezeleme boyunca kesilmemiş malzemenin destekleyici etkisi daha düşüktür. Talaş kalınlığı azaldığı zaman, malzeme açıkça kesilmez, bu olay aynı yönlü kesmenin son aşamasında meydana gelmektedir. Böylece, kesilmemiş malzeme direncin en düşük olduğu yönde (kanalın üst tarafı) itilir [129]. Genellikle, çapak genişliğinin aynı yönlü kesme tarafında artan diş başına ilerleme ile arttığı, zıt yönlü kesme tarafında artan diş başına ilerleme ile azaldığı bulunmuştur. En düşük çapak genişliği diş başına ilerlemenin 7 µm/diş olduğu değerde elde edilmiştir.

Şekil 4.106’da görüldüğü gibi ilerleme arttıkça iki bitişik profil arasındaki mesafe artmıştır.



Şekil 4.105: Üst çapak genişliği (w).

Mekanistik kuvvet modeli için yürütülen doğrulama deneyleri Taguchi deney planına göre oluşturulduğu için işleme şartlarının kuvvet, takım aşınması ve çapak genişliği üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde ölçülen takım aşınması, kuvvet ve üst çapak genişliği sonuçları kantitatif olarak Tablo 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.106: Maksimum çapak genişliği - diş başına ilerleme ilişkisi.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde ölçülen çıktı değerlerini deney yapmadan tahmin edebilmek için regresyon modelleri geliştirilmiştir. Bütün takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği denklemlerinin geliştirilmesinde işleme parametrelerinin etkilerini içeren birinci dereceden denklemler oluşturulmuştur.

Tablo 4.38: Ti6Al4V malzemesi için kanal işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği değerleri.

Deneý No	Takım Aşınması (µm)	F _x (N)	F _y (N)	Çapak Genişliği (Aynı Yönlü Frezeleme) (µm)	Çapak Genişliği (Zıt Yönlü Frezeleme) (µm)
1	25.39	0.38	0.04	49.41	17.10
2	29.84	1.22	0.51	96.89	59.90
3	31.25	2.36	1.19	163.26	136.89
4	31.78	0.79	0.06	83.22	51.43
5	34.67	1.69	0.56	128.68	122.81
6	36.34	0.69	0.37	61.32	40.34
7	39.83	1.12	0.05	76.86	64.58
8	41.20	0.50	0.14	37.80	20.04
9	43.01	1.41	0.65	90.93	77.42

Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede takım aşınmasını veren denklem:

$$VB = -39.5 + 0.00626n + 0.0944f + 0.00940a_p \quad (4.49)$$

$$R^2 = \%98.7 \quad R^2 (\text{adj}) = \%97.8$$

Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede kuvvet değerlerini veren denklemler:

$$F_x = 0.911 - 0.000155n + 0.0151f + 0.0120a_p \quad (4.50)$$

$$R^2 = \%97.1 \quad R^2 (\text{adj}) = \%95.3$$

$$F_y = 0.943 - 0.000150n + 0.0143f + 0.00417a_p \quad (4.51)$$

$$R^2 = \%95.0 \quad R^2 (\text{adj}) = \%92.0$$

Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede çapak genişliğini veren denklemler:

$$w_{ayni} = 169 - 0.0173n + 0.736f + 0.734a_p \quad (4.52)$$

$$R^2 = \%95.8 \quad R^2 (\text{adj}) = \%93.3$$

$$w_{zit} = 37.9 - 0.00864n + 0.844f + 0.823a_p \quad (4.53)$$

$$R^2 = \%94.7 \quad R^2 (\text{adj}) = \%91.5$$

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde çıktı performanslarını tahmin edebilmek için geliştirilen matematiksel modellerin tamamının takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği verilerini açıklamada yeterli olduğu bulunmuştur.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemede takım aşınması, kuvvetler ve çapak genişliği ölçüldüğünden, analizlerde en küçük en iyi formülüne göre hesap edilen S/N oranı dikkate alınmıştır ve sonuçlar Tablo 4.39'da verilmiştir.

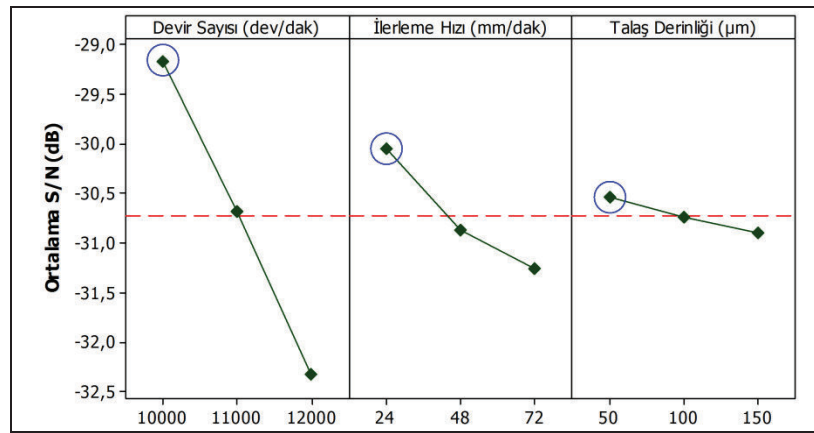
Tablo 4.39: Ti6Al4V malzemesi için kanal işlemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği değerlerinin S/N oranları.

Deney No	S/N Oranları (dB)				
	Takım Aşınması	Fx	Fy	Çapak Genişliği (Aynı Yönlü Frezeleme)	Çapak Genişliği (Zıt Yönlü Frezeleme)
1	-28.0933	8.40433	27.9588	-33.8763	-24.6599
2	-29.4960	-1.72720	5.8486	-39.7256	-35.5485
3	-29.8970	-7.45824	-1.5109	-44.2576	-42.7274
4	-30.0431	2.04746	24.4370	-38.4046	-34.2243
5	-30.7991	-4.55773	5.0362	-42.1902	-41.7847
6	-31.2077	3.22302	8.6360	-35.7520	-32.1147
7	-32.0042	-0.98436	26.0206	-37.7140	-36.2020
8	-32.2979	6.02060	17.0774	-31.5498	-26.0380
9	-32.6714	-2.98438	3.7417	-39.1741	-37.7771

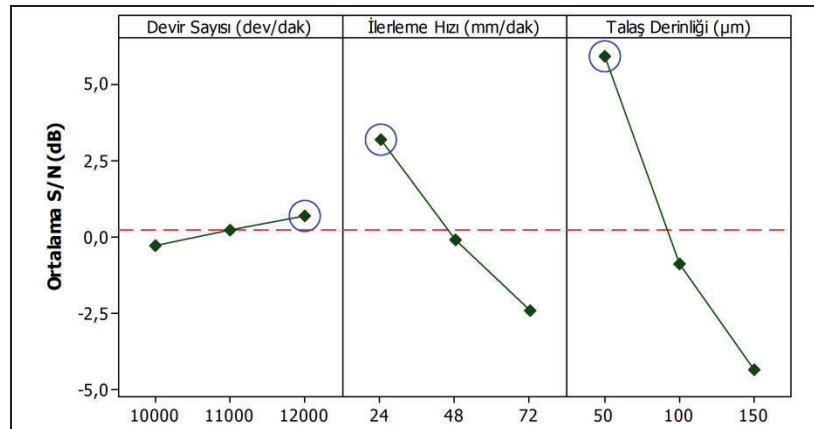
Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde ölçülen çıktıların S/N oranları grafiksel olarak verilmiştir (Şekil 4.107-4.111). Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde takım aşınması için optimum işleme şartları seti A1B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.107). Yani, minimum takım aşınması devir

sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 24 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde F_x kuvveti için optimum işleme şartları seti A3B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.108). Yani, minimum F_x kuvveti devir sayısının 12000 dev/dak, ilerleme hızının 24 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir. Literatürde de minimum F_x kuvveti düşük ilerleme, yüksek kesme hızı ve düşük talaş derinliği değerlerinde bulunmuştur [150].



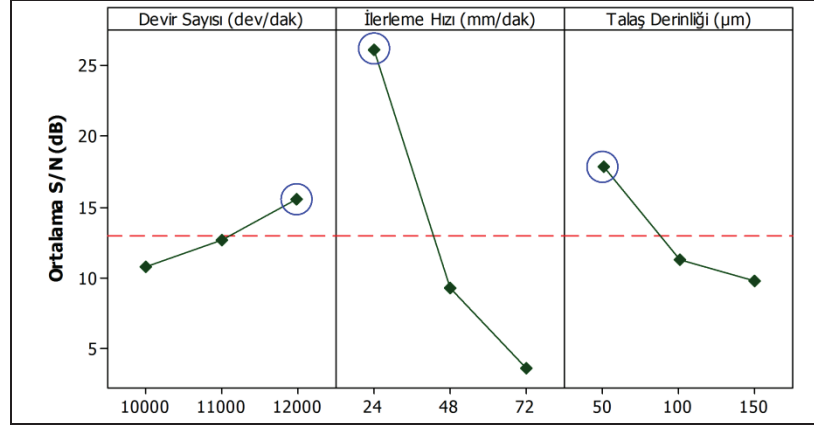
Şekil 4.107: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede ölçülen takım aşınmalarının S/N oranları.



Şekil 4.108: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede ölçülen F_x kuvvetinin S/N oranları.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde F_y kuvveti için optimum işleme şartları seti A3B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.109). Yani, minimum F_y kuvveti devir sayısının 12000 dev/dak, ilerleme hızının 24 mm/dak ve talaş

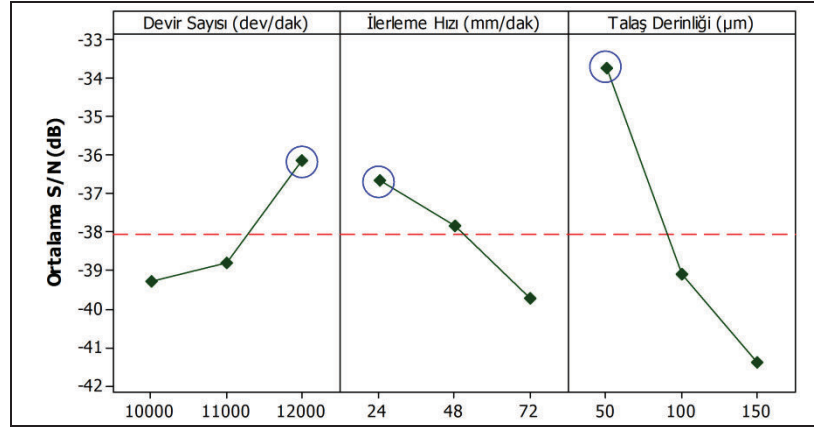
derinliğinin 50 μm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir. Literatürde de minimum F_y kuvvetinin düşük ilerleme, yüksek kesme hızı ve düşük talaş derinliği değerlerinde elde edildiği ifade edilmiştir [150].



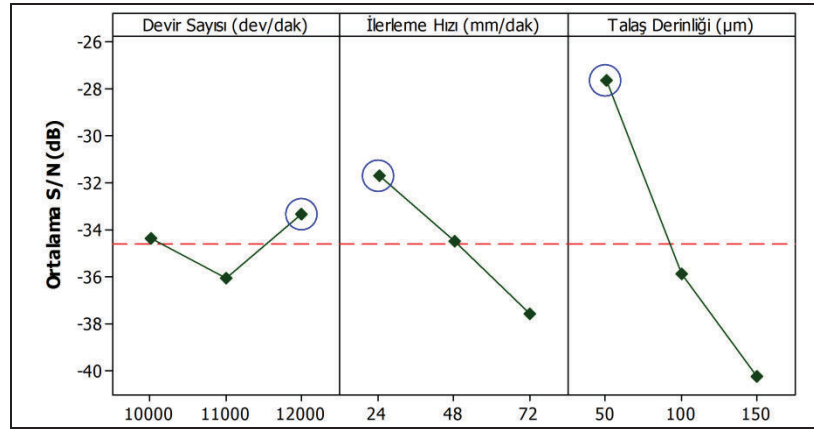
Şekil 4.109: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede ölçülen F_y kuvvetinin S/N oranları.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde aynı yönlü frezeleme tarafında çapak genişliği için optimum işleme şartları seti A3B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.110). Yani, aynı yönlü frezeleme tarafında minimum çapak genişliği devir sayısının 12000 dev/dak, ilerleme hızının 24 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir. Literatürde de minimum çapak genişliği düşük ilerleme, yüksek kesme hızı ve düşük talaş derinliği kombinasyonunda bulunmuştur [150]. İlerleme hızının artması işleme bölgesinden sürekli olarak uzaklaştırılmayan tek bir pasoda kaldırılan malzeme hacminin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ilerleme hızındaki artış daha büyük üst çapak ile sonuçlanmaktadır.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde zıt yönlü frezeleme tarafında çapak genişliği için optimum işleme şartları seti A3B1C1 olarak bulunmuştur (Şekil 4.111). Yani, zıt yönlü frezeleme tarafında minimum çapak genişliği devir sayısının 12000 dev/dak, ilerleme hızının 24 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.



Şekil 4.110: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede aynı yönlü frezeleme tarafında ölçülen çapak genişliğinin S/N oranları.



Şekil 4.111: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede zıt yönlü frezeleme tarafında ölçülen çapak genişliğinin S/N oranları.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde işleme şartlarının takım aşınması, F_x , F_y ve çapak genişliği üzerindeki etkisini inceleyebilmek için 3D yüzey grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.112-4.116). Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.112.a ve Şekil 4.112.b), ilerleme hızı (Şekil 4.112.a) ve talaş derinliği (Şekil 4.112.b ve Şekil 4.112.c) arttıkça takım aşınmasının arttığı bulunmuştur.

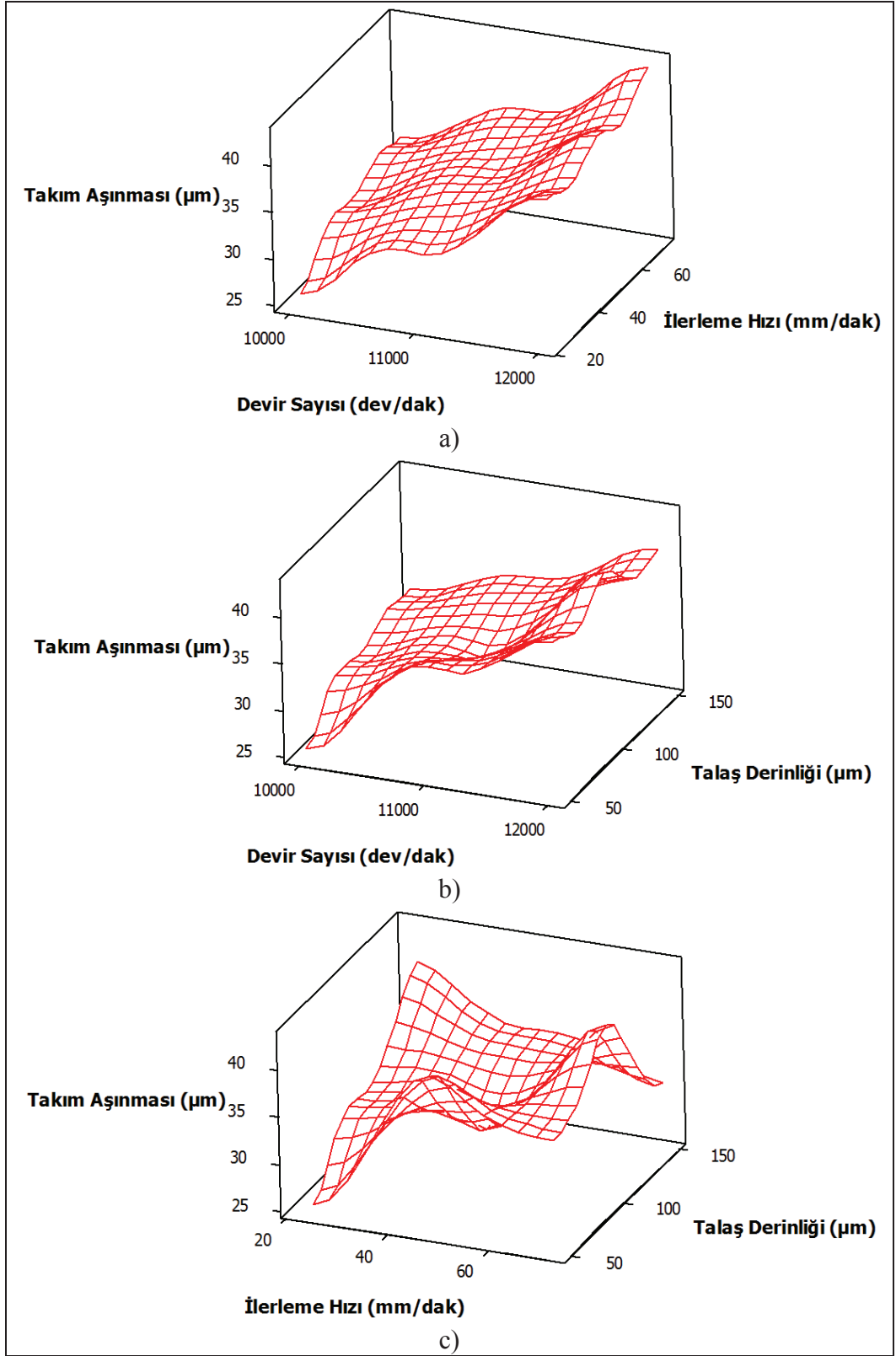
Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.113.a ve Şekil 4.113.b) azaldıkça, ilerleme hızı (Şekil 4.113.a) ve talaş derinliği (Şekil 4.113.b ve Şekil 4.113.c) arttıkça F_x kuvvetinin arttığı bulunmuştur. Devir sayısındaki artışın mikro frezelemede kuvvetleri azalttığı literatürde de ifade edilmiştir [134]. İlerleme arttıkça artan deforme olmamış talaş kalınlığı nedeniyle

kuvvetler artmıştır. İlerlemedeki artış ile kesme kuvvetlerinin artması literatürde de belirtilmiştir [134], [158].

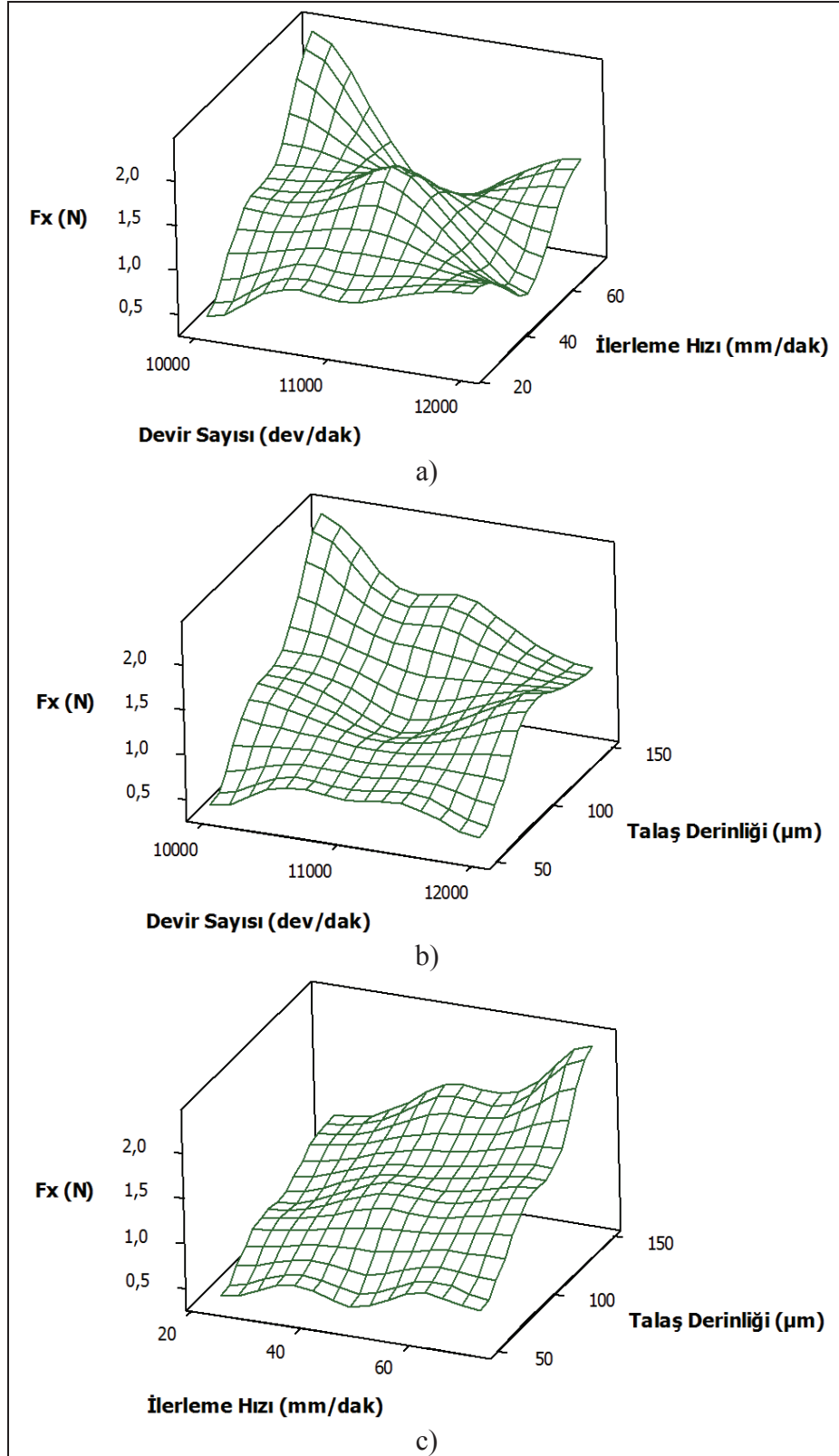
Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde devir sayısı (Şekil 4.114.a ve Şekil 4.114.b) azaldıkça, ilerleme hızı (Şekil 4.114.a) ve talaş derinliği (Şekil 4.114.b ve Şekil 4.114.c) arttıkça F_y kuvvetinin arttığı bulunmuştur. Daha büyük ilerleme ve talaş derinliği talaş kesit alanını arttırdığı için daha büyük kuvvet değerine neden olmaktadır.

Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde aynı yönlü frezeleme tarafında devir sayısı (Şekil 4.115.a ve Şekil 4.115.b) azaldıkça, ilerleme hızı (Şekil 4.115.a) ve talaş derinliği (Şekil 4.115.b ve Şekil 4.115.c) arttıkça çapak genişliğinin arttığı bulunmuştur. Devir sayısının artması ile çapak boyutunun azaldığı literatürde de ifade edilmiştir [114], [150]. Bajpai ve arkadaşları [114] devir sayısındaki artış ile çapak boyutunun azalmasını azalan deforme olmamış talaş kalınlığı nedeniyle gözlemlendiğini açıklamıştır. Bir diğer çalışmada ise çapak genişliğinin azalan devir sayısı ile artması düşük devir sayılarında takım geometrisini etkileyen ve takım keskinliğini azaltan BUE artışına bağlanmıştır [150]. Diş başına ilerleme arttıkça çapak genişliği artmıştır. Yüksek diş başına ilerlemelerde talaş kaldırma oranı artmaktadır ve malzeme işleme bölgesinden sürekli olarak uzaklaştırılmamaktadır. Talaş kaldırma oranının artması daha fazla malzemenin kanalın üst tarafında bastırılmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda da daha fazla çapak oluşmaktadır.

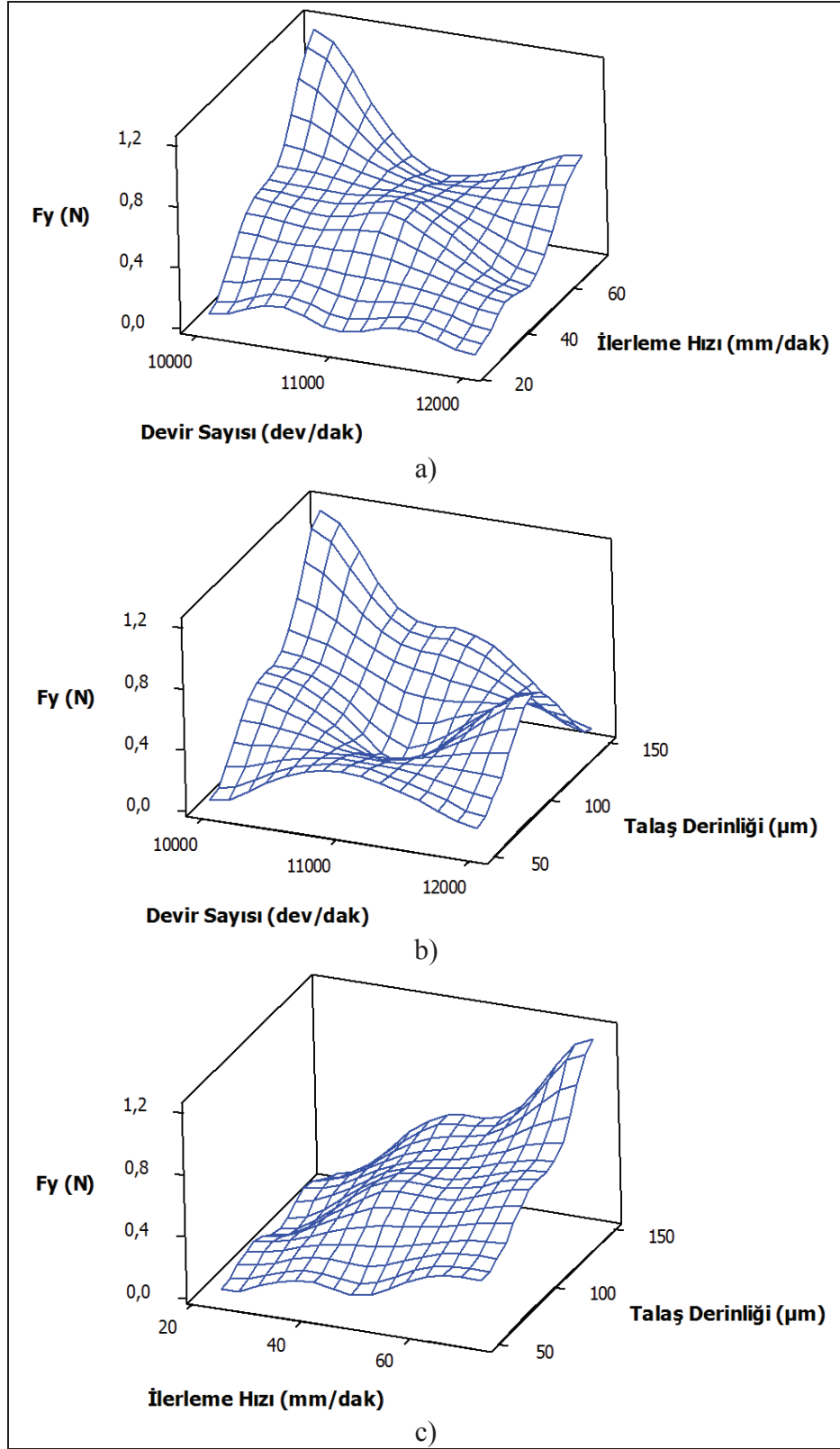
Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde zıt yönlü frezeleme tarafında devir sayısı (Şekil 4.116.a ve Şekil 4.116.b) azaldıkça, ilerleme hızı (Şekil 4.116.a) ve talaş derinliği (Şekil 4.116.b ve Şekil 4.116.c) arttıkça çapak genişliğinin arttığı bulunmuştur. Çapak boyutu ile talaş derinliği arasındaki korelasyonun aynıysa literatürde de gözlenmiştir [29], [124]. Literatürde artan talaş derinliği ile çapak boyutunun artması artan deforme olmamış talaş alanı ile açıklanmıştır. Deforme olmamış talaş alanındaki artışın talaş kaldırma oranını arttırdığı ve böylece takım çıkışında çapak boyutunda artışa neden olduğu ifade edilmiştir [114].



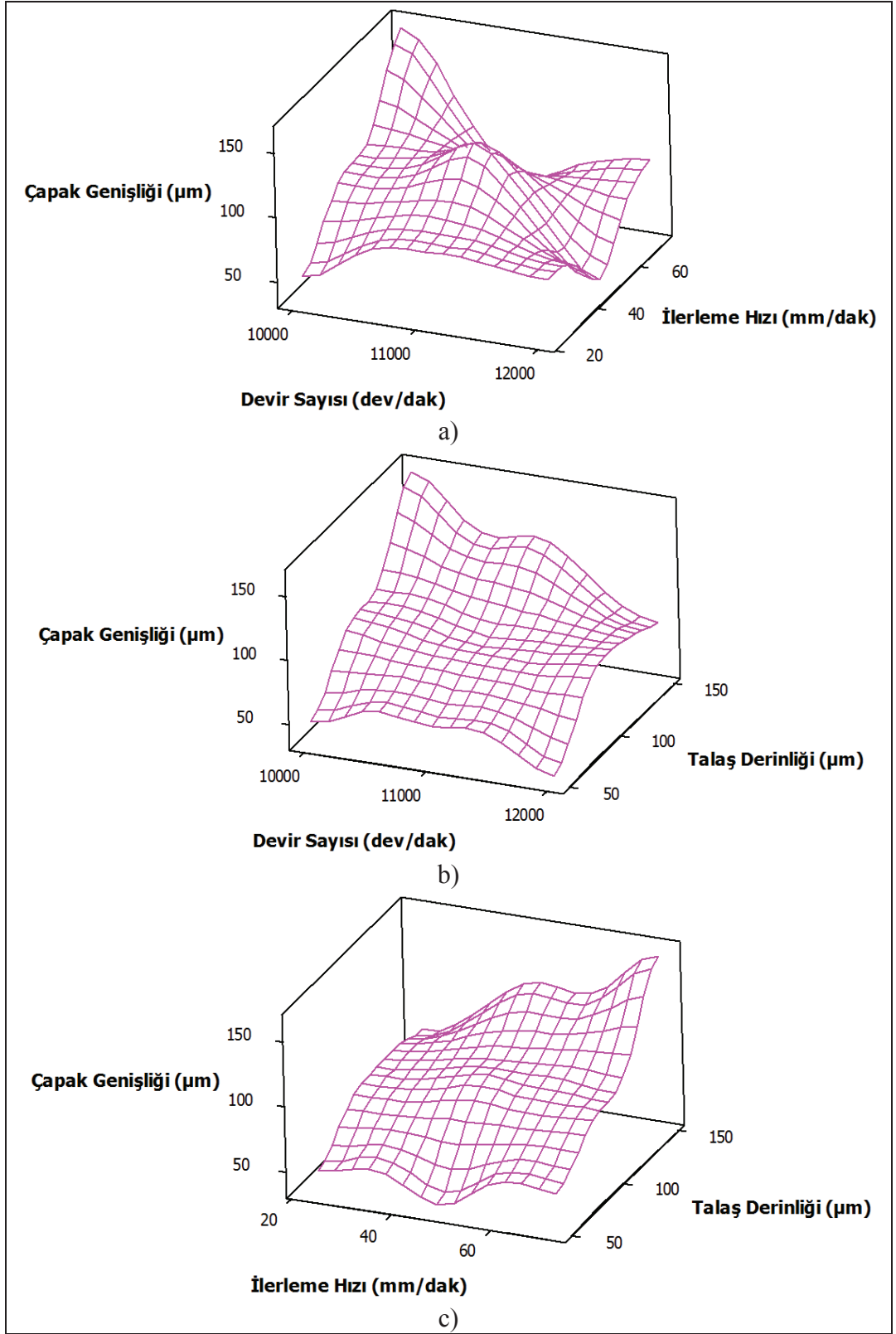
Şekil 4.112: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin takım aşınması üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



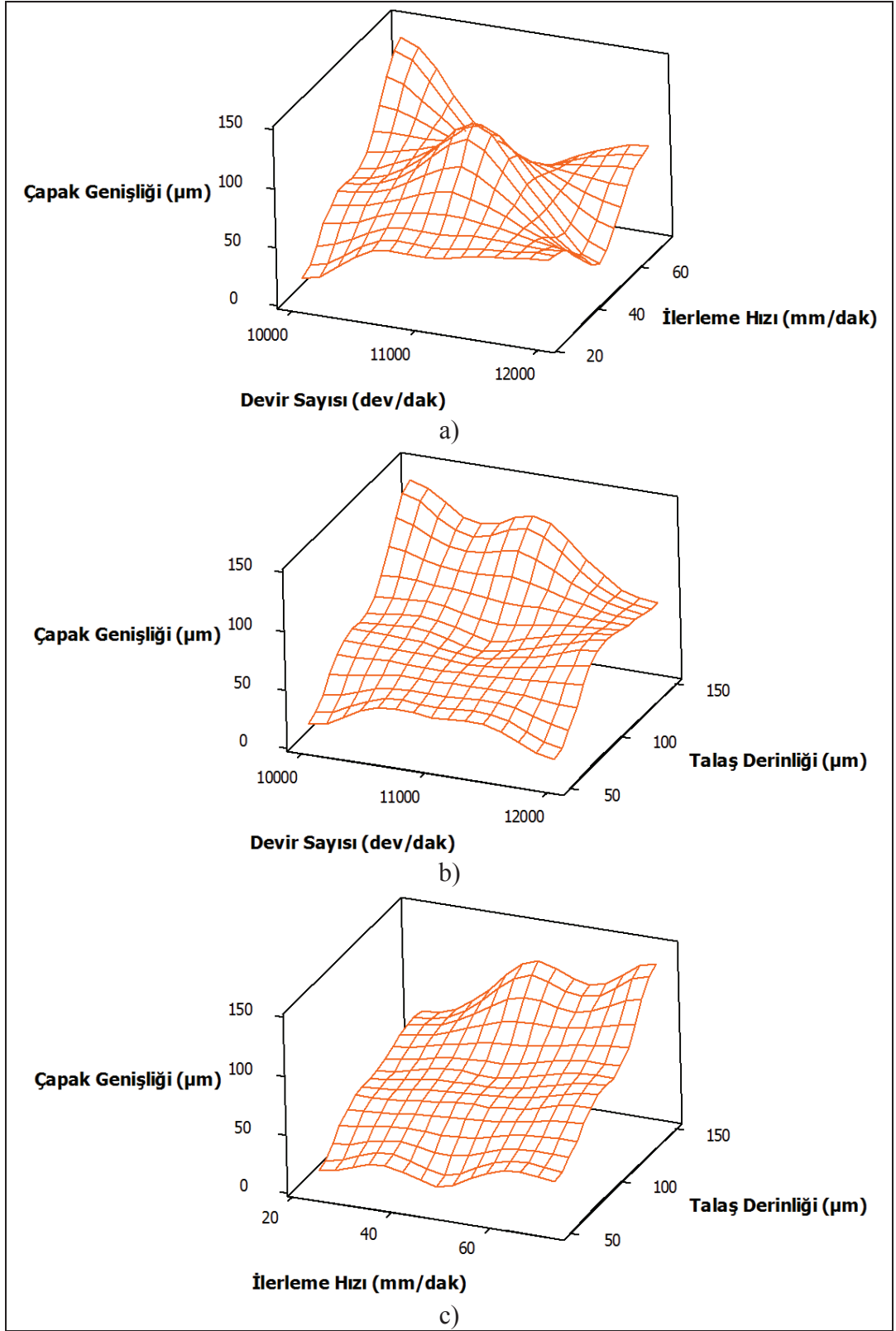
Şekil 4.113: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin F_x kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.114: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin F_y kuvveti üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.115: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin aynı yönlü frezeleme tarafında çapak genişliği üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.



Şekil 4.116: Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelemede a) Devir sayısının ve ilerleme hızının, b) Devir sayısının ve talaş derinliğinin, c) İlerleme hızının ve talaş derinliğinin zıt yönlü frezeleme tarafında çapak genişliği üzerindeki etkisi için 3D yüzey grafikleri.

Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezeleme deneylerinde ölçülen takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği değerleri için ANOVA tablosu hazırlanmıştır (Tablo 4.40-4.44).

Tablo 4.40'da verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde takım aşınmasını sırasıyla %87.287, %11.677 ve %0.496 etkilemektedir. Mikro frezelemede devir sayısı ve ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.40), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için devir sayısının ve ilerleme hızının takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.40: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen takım aşınması için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	236.481	118.241	161.76	0.006	87.287
İlerleme Hızı	2	31.637	15.819	21.64	0.044	11.677
Talaş Derinliği	2	1.344	0.672	0.92	0.521	0.496
Hata	2	1.462	0.731			0.540
Toplam	8	270.925				100

Tablo 4.41'de verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde Fx kuvvetini sırasıyla %5.268, %24.675 ve %67.906 etkilemektedir. Mikro frezelemede talaş derinliği için hesaplanan F değeri (Tablo 4.41), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için talaş derinliğinin Fx kuvveti üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.41: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen Fx kuvvet değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.16762	0.08381	2.45	0.290	5.268
İlerleme Hızı	2	0.78509	0.39254	11.47	0.080	24.675
Talaş Derinliği	2	2.16056	1.08028	31.58	0.031	67.906
Hata	2	0.06842	0.03421			2.151
Toplam	8	3.18169				100

Tablo 4.42'de verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde Fy kuvvetini sırasıyla

%13.357, %60.968 ve %22.481 etkilemektedir. Mikro frezelemede ilerleme hızı için hesaplanan F değeri (Tablo 4.42), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için ilerleme hızının Fy kuvveti üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.42: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen Fy kuvvet değerleri için ANOVA tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	0.15500	0.07750	4.18	0.193	13.357
İlerleme Hızı	2	0.70747	0.35373	19.09	0.050	60.968
Talaş Derinliği	2	0.26087	0.13043	7.04	0.124	22.481
Hata	2	0.03707	0.01853			3.194
Toplam	8	1.16040				100

Tablo 4.43'te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde aynı yönlü frezeleme tarafındaki çapak genişliğini sırasıyla %15.123, %15.265 ve %66.165 etkilemektedir. Mikro frezelemede talaş derinliği için hesaplanan F değeri (Tablo 4.43), tablodan alınan F değerinden büyük olduğu için talaş derinliğinin çapak genişliği üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Mikro frezelemede üst çapak oluşumunun en fazla talaş derinliği tarafından etkilendiği diğer çalışmalarda da belirtilmiştir [122], [138].

Tablo 4.43: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen çapak genişliği değerleri için ANOVA tablosu (aynı yönlü frezeleme).

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	1856.0	928.0	4.39	0.186	15.123
İlerleme Hızı	2	1873.5	936.8	4.43	0.184	15.265
Talaş Derinliği	2	8120.5	4060.3	19.20	0.050	66.165
Hata	2	423.0	211.5			3.447
Toplam	8	12273.1				100

Tablo 4.44'te verildiği gibi devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği; Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde zıt yönlü frezeleme tarafındaki çapak genişliğini sırasıyla %4.389, %17.974 ve %73.825 etkilemektedir. Mikro frezelemede talaş derinliği için hesaplanan F değeri (Tablo 4.44), tablodan alınan F

değerinden büyük olduğu için talaş derinliğinin çapak genişliği üzerinde istatistiksel olarak önemli olduğu bulunmuştur. Mikro frezelemede talaş derinliğinin devir sayısına ve ilerlemeye göre üst çapak boyutu üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu literatürde de açıklanmıştır [124].

Tablo 4.44: Ti6Al4V malzemesi için mikro kanal frezelemede Taguchi deneyleri sonucu ölçülen çapak genişliği değerleri için ANOVA tablosu (zıt yönlü frezeleme).

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Katkı (%)
Devir Sayısı	2	605.5	302.7	1.15	0.465	4.389
İlerleme Hızı	2	2479.5	1239.7	4.71	0.175	17.974
Talaş Derinliği	2	10184.4	5092.2	19.36	0.049	73.825
Hata	2	525.9	263.0			3.812
Toplam	8	13795.3				100

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tezde; Al 7075, AISI 304, Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının, ilerlemenin ve talaş derinliğinin aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvetler üzerindeki etkisini inceleyebilmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu mühendislik malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetlerini deney yapmadan tahmin edebilmek için regresyon ve bulanık mantık modelleri geliştirilmiştir. Regresyon analizi ve bulanık mantık metodu ile geliştirilen modellerin tamamının mikro yüzey frezelemede takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerlerini tahmin etmede olumlu sonuçlar verdiği bulunmuştur. Taguchi deney tasarımına göre yürütülen mikro yüzey frezeleme deneyleri sonucunda elde edilen diğer sonuçlar malzeme esasına dayanarak ayrı ayrı sunulmuştur.

- Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi

Taguchi deney tasarımına göre yürütülen Al 7075 alüminyum alaşımının mikro yüzey frezelenmesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımda BUE oluşumu görülmüştür. Al 7075 malzemesinin sünek yapısının yapışmaya neden olduğu düşünülmektedir.
- S/N analizi sonucunda, takım aşınmasını minimize etmek için en iyi kombinasyon devir sayısının 10000 dev/dak, dış başına ilerlemenin 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu kesme şartları olarak bulunmuştur.
- En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri devir sayısının 12000 dev/dak, dış başına ilerlemenin 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu şartlarda elde edilmiştir.
- Minimum P-to-V Fx kuvveti devir sayısının 10000 dev/dak, dış başına ilerlemenin 0.5 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ve talaş derinliğinin 100 μm olduğu işleme şartlarında olmuştur.

- Devir sayısının 10000 dev/dak, dış başına ilerlemenin 0.5 µm/diş ve talaş derinliğinin 75 µm olduğu kesme şartlarında minimum P-to-V Fy kuvveti elde edilmiştir.
- S/N analizi ve ANOVA sonucunda, Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü hariç bütün ölçülen çıktılarda devir sayısının en etkili faktör olduğu bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için ise en etkili faktör dış başına ilerleme olmuştur.
- Devir sayısı ve talaş derinliği arttıkça takım aşınması artmıştır. Dış başına ilerlemenin arttırılması başlangıçta takım aşınmasının artmasına neden olmuştur, fakat bu parametrenin daha fazla arttırılması takım aşınmasını azaltmıştır.
- Devir sayısının artması yüzey pürüzlülüğünü azaltmıştır. Artan dış başına ilerleme ve talaş derinliği ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur.
- Devir sayısı ve dış başına ilerleme arttıkça P-to-V Fx ve P-to-V Fy kuvvetlerinin arttığı bulunmuştur. Ayrıca P-to-V Fx kuvveti artan talaş derinliği ile azalmıştır.
- Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak yapılan çoklu optimizasyona göre takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve kuvvetlerin eş zamanlı olarak minimum olduğu değerler devir sayısının 10000 dev/dak, dış başına ilerlemenin 0.5 µm/diş ve talaş derinliğinin 50 µm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.
- P-to-V Fx kuvvetinin ve yüzey pürüzlülüğünün optimum olduğu şartlarda yürütülen doğrulama deneyleri ile tahmin edilen sonuçlar arasındaki farkın çok az olduğu bulunmuştur.

- AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi

AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikro yüzey frezelenmesinde Taguchi metoduna göre yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımda kaplama ayrılması, dökülme ve BUE oluşumu gözlenmiştir. Kaplama ayrılmasının nedenleri mekanik darbe, kimyasal reaksiyonlar ve termo-mekanik gerilmeler olabilir. Dökülmenin frezeleme gibi kesikli operasyonlarda oluştuğu bilinmektedir ve oluşumu darbe ve gerilme nedeniyle AISI 304 malzemesinin sünek yapısının ise yapışmaya neden olduğu düşünülmektedir. Al 7075 alüminyum alaşımı ile karşılaştırıldığında AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikro yüzey

frezelenmesinde daha yüksek aşınma değerleri elde edilmiştir. Yüksek aşınma değerleri bu malzemenin mikro frezelenmesinde deformasyon sertleşmesi etkisi nedeniyle olabilir.

- S/N analizine göre, minimum takım aşınması devir sayısının 8000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek için optimum işleme şartları seti devir sayısı 12000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 150 µm olarak bulunmuştur.
- P-to-V Fx kuvveti için optimum işleme şartları seti devir sayısının 8000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 100 µm olduğu işleme şartları olarak elde edilmiştir.
- P-to-V Fy kuvveti için optimum işleme şartları kombinasyonu devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olduğu değerler olarak bulunmuştur.
- S/N analizi ve ANOVA sonuçlarına göre, AISI 304 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde bütün ölçülen çıktılarda en etkili faktör ilerleme hızı olmuştur.
- Devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği arttıkça takım aşınması artmıştır.
- Devir sayısının artması ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğü artmıştır.
- Devir sayısı ve ilerleme hızı arttıkça P-to-V Fx kuvveti artmıştır. Başlangıçta P-to-V Fx kuvvetinin artan talaş derinliği ile azaldığı daha sonra artan talaş derinliği ile arttığı bulunmuştur.
- P-to-V Fy kuvveti artan ilerleme hızı ve talaş derinliği ile artmıştır.
- Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak yapılan çoklu optimizasyona göre takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve kuvvetlerin eş zamanlı olarak en düşük olduğu değerler 8000 dev/dak devir sayısında, 50 mm/dak ilerleme hızında ve 50 µm talaş derinliğinde elde edilmiştir.
- P-to-V Fx ve P-to-V Fy kuvvetlerinin minimum olduğu şartlarda yürütülen doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki farkın çok az olduğu bulunmuştur.

- Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelemesi

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde Taguchi metoduna göre yürütülen deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde kesici takımında BUE oluşumu gözlenmemiştir. Yapışmanın olmamasının nedeni olarak Ti6Al4V malzemesinin sertliğinin talaş oluşumunu kolaylaştırması düşünülmektedir.
- S/N analizine göre, takım aşınmasını minimize etmek için devir sayısının 11000 dev/dak, ilerleme hızının 100 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olarak seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Minimum yüzey pürüzlülüğü değeri 12000 dev/dak devir sayısında, 50 mm/dak ilerleme hızında ve 50 µm talaş derinliğinde elde edilmiştir.
- P-to-V Fx kuvveti için minimum değer 10000 dev/dak devir sayısında, 50 mm/dak ilerleme hızında ve 100 µm talaş derinliğinde bulunmuştur.
- P-to-V Fy kuvveti için en düşük değer devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 µm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.
- S/N analizi ve ANOVA sonuçlarından; takım aşınmasını etkileyen en önemli parametrenin talaş derinliği olduğu ve yüzey pürüzlülüğünü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy kuvvetlerini en çok etkileyen parametrenin devir sayısı olduğu bulunmuştur.
- Talaş derinliği arttıkça takım aşınması artmıştır. Devir sayısının ve ilerleme hızının takım aşınması üzerindeki etkisinin ise değişken olduğu ve talaş derinliğine göre etkilerinin daha az olduğu bulunmuştur.
- İlerleme hızı arttıkça pürüzlülüğün arttığı, devir sayısı arttıkça ise pürüzlülüğün azaldığı bulunmuştur. Talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin ise devir sayısı ve ilerleme hızı ile karşılaştırıldığında çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır.
- P-to-V Fx kuvvetinin devir sayısı ve ilerleme hızı arttıkça arttığı bulunmuştur. Başlangıçta P-to-V Fx kuvvetinin artan talaş derinliği ile arttığı daha sonra artan talaş derinliği ile azaldığı sonucu elde edilmiştir.
- Devir sayısı, ilerleme hızı ve talaş derinliği arttıkça P-to-V Fy kuvveti artmıştır.
- Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak yürütülen çoklu optimizasyona göre takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve kuvvetlerin eş zamanlı olarak

minimum olduğu değerler 10000 dev/dak devir sayısında, 50 mm/dak ilerleme hızında ve 50 µm talaş derinliğinde elde edilmiştir.

- P-to-V Fx kuvvetinin en düşük olduğu işleme şartlarında yapılan doğrulama deneyinden elde edilen değerler ile tahmin edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu bulunmuştur.

- Inconel 718 malzemesinin mikro yüzey frezelemesi

Inconel 718 malzemesi için Taguchi metoduna göre yürütülen mikro yüzey frezeleme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- S/N analizine göre, minimum takım aşınması değeri devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 75 µm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.

- Devir sayısı 10000 dev/dak, ilerleme hızı 50 mm/dak ve talaş derinliği 50 µm olduğunda minimum yüzey pürüzlülüğü değeri bulunmuştur.

- P-to-V Fx kuvveti için optimum değer devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 50 mm/dak ve talaş derinliğinin 100 µm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.

- P-to-V Fy kuvveti için optimum işleme şartları seti şöyle bulunmuştur: 10000 dev/dak devir sayısı, 50 mm/dak ilerleme hızı ve 75 µm talaş derinliği.

- S/N analizi ve ANOVA sonuçlarına göre; takım aşınmasını ve P-to-V Fx kuvvetini etkileyen en önemli parametrenin devir sayısı olduğu bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğünü ve P-to-V Fy kuvvetini en çok etkileyen parametre ise ilerleme hızı olmuştur.

- Devir sayısı ve ilerleme hızı arttıkça takım aşınması artmıştır.

- Devir sayısının, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin artması yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır.

- Devir sayısı ve ilerleme hızı arttıkça P-to-V Fx kuvvetinin arttığı bulunmuştur.

- İlerleme hızı arttıkça P-to-V Fy kuvveti artmıştır.

- Gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak yürütülen çoklu optimizasyona göre takım aşınmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve kuvvetlerin eş zamanlı olarak en düşük olduğu değerler 10000 dev/dak devir sayısında, 50 mm/dak ilerleme hızında ve 50 µm talaş derinliğinde elde edilmiştir.

- P-to-V Fx ve P-to-V Fy kuvvetlerinin minimum olduğu işleme şartlarında yapılan doğrulama deneylerinin sonuçları ile tahmin edilen değerlerin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği bulunmuştur.

- Kesici takım çapının etkisi deneyleri

Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde küresel uçlu kesici takım çapının aşınma, pürüzlülük ve kuvvetler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kesici takım çapının etkisi için yürütülen mikro yüzey frezeleme deneylerinden elde edilen sonuçlar Al 7075 ve Ti6Al4V malzemeleri için ayrı ayrı verilmiştir.

Al 7075 malzemesi için takım çapının etkisi deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Kesici takım çapı arttıkça takım aşınmasının azaldığı bulunmuştur. Kesici takım çapının 400 μm 'den 800 μm 'ye artırılması takım aşınmasını %88.98 azaltmıştır.
- Artan kesici takım çapı ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Kesici takım çapının 400 μm 'den 800 μm 'ye artırılması yüzey pürüzlülüğünü %21.99 azaltmıştır.
- Kesici takım çapının 400 μm 'den 800 μm 'ye artırılması Fx kuvvetinin %45.41, Fy kuvvetinin %74.27 azalmasına neden olmuştur.
- Sonuç olarak Al 7075 malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde en düşük takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kuvvet değerleri 800 μm takım çapında elde edilmiştir.

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde takım çapının etkisi için sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kesici takım çapı arttıkça takım aşınması azalmıştır. Kesici takım çapının 400 μm 'den 800 μm 'ye artırılması durumunda takım aşınmasının %77.31 azaldığı bulunmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğü artan kesici takım çapı ile azalmıştır. Kesici takım çapının 400 μm 'den 800 μm 'ye artması halinde yüzey pürüzlülüğü %11.34 azalmıştır.
- Kesici takım çapının 400 μm 'den 600 μm 'ye artırılması halinde hem Fx kuvveti hem de Fy kuvveti azalmıştır. Kesici takım çapının daha fazla artırılması ise Fx

ve Fy kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur. Kesici takım çapının 400 µm'den 600 µm'ye artırılması Fx kuvvetini %26.26, Fy kuvvetini %57.02 azaltmıştır. Kesici takım çapının 600 µm'den 800 µm'ye artırılması ise Fx kuvvetini %28.76, Fy kuvvetini %121.78 arttırmıştır.

- Sonuç olarak Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde en düşük takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri 800 µm takım çapında elde edilmiştir. En düşük kuvvet değerleri ise 600 µm takım çapında bulunmuştur.

- Takım yollarının ve yüksek hız kafasının etkisi deneyleri

Al 7075 ve Ti6Al4V malzemelerinin mikro yüzey frezelenmesinde takım yollarının (aynı yönlü, zıt yönlü ve zigzag frezeleme) aşınma, pürüzlülük ve kuvvetler üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve sonuçlar her bir malzeme için ayrı ayrı verilmiştir.

Al 7075 malzemesi için takım yollarının etkisi deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- En düşük takım aşınması aynı yönlü frezeleme ile, en düşük yüzey pürüzlülüğü, P-to-V Fx ve P-to-V Fy kuvveti zıt yönlü frezeleme stratejisi ile elde edilmiştir.
- Genellikle en kötü performansı ise zigzag işleme stratejisi göstermiştir.

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde standart tezgah kullanılması ve tezgaha yüksek hız kafası takılması durumunda takım yollarının (aynı yönlü, zıt yönlü ve zigzag frezeleme) aşınma, pürüzlülük ve kuvvetler üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Ti6Al4V malzemesinin yüksek hız kafası takılmadan (standart tezgah) 12000 dev/dak devir sayısında ve 75 mm/dak ilerleme hızında mikro yüzey frezelemesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü ve P-to-V Fx kuvveti aynı yönlü işleme stratejisi ile elde edilmiştir. Fakat minimum takım aşınması ve P-to-V Fy kuvveti ise zigzag işleme stratejisi ile bulunmuştur. Yüksek hız kafası takıldığında en düşük takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve P-to-V Fy kuvvetini aynı yönlü frezeleme stratejisi vermiştir. Zıt yönlü mikro frezelemede en düşük P-to-V

Fx kuvveti elde edilmiştir. Yüksek hız kafası takıldığında ve devir sayısı 28000 dev/dak değerine yükseldiğinde ise takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve P-to-V Fx kuvveti zıt yönlü frezeleme stratejisi ile, en düşük P-to-V Fy kuvveti zigzag işleme stratejisi ile elde edilmiştir.

- Yüksek hız kafası kullanılması durumunda ilerleme hızı 75 mm/dak olduğunda devir sayısının 12000 dev/dak'dan 28000 dev/dak'a artırılması tüm takım yolu stratejilerinde yüzey pürüzlülüğünü azaltmıştır. Devir sayısının artırılması aynı ve zigzag mikro frezeleme stratejilerinde daha yüksek takım aşınması ile sonuçlanmıştır. Fakat zıt yönlü mikro frezelemede takım aşınması artan devir sayısı ile iyileşmiştir. Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 28000 dev/dak'a yükseltilmesi zıt ve zigzag mikro frezelemede P-to-V Fx kuvvetinde azalmaya, fakat aynı yönlü mikro frezelemede artışa neden olmuştur. Her iki devir sayısında da zıt yönlü mikro frezeleme en düşük P-to-V Fx değeri vermiştir. Bütün takım yollarında devir sayısının artması P-to-V Fy kuvvetinde azalmaya neden olmuştur. En düşük P-to-V Fy, 12000 dev/dak değerinde aynı yönlü mikro frezeleme ile, 28000 dev/dak değerinde zigzag mikro frezeleme ile elde edilmiştir.

- Yüksek hız kafası kullanılması durumunda ilerleme hızı 150 mm/dak olduğunda devir sayısının 20000 dev/dak'dan 28000 dev/dak'a artırılması tüm takım yolu stratejilerinde takım aşınmasını arttırmıştır. Her iki devir sayısında yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi performans aynı yönlü mikro frezeleme ile elde edilmiştir. Bütün takım yollarında devir sayısındaki artış ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Genellikle, P-to-V Fx ve P-to-V Fy kuvvetleri artan devir sayısı ile azalmıştır.

- Yüksek hız kafası kullanılması durumunda 28000 dev/dak devir sayısında aynı yönlü mikro frezeleme hariç diğer takım yollarında ilerleme hızının artması ile takım aşınması artmıştır. En düşük takım aşınması 75 mm/dak ilerleme hızında zıt işleme stratejisi ile elde edilmiştir. Zıt mikro frezeleme stratejisi en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini vermiştir. Aynı yönlü mikro frezeleme hariç diğer takım yollarında ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur. Fakat aynı yönlü mikro frezelemede artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişim olmamıştır. Zıt yönlü mikro frezeleme en düşük P-to-V Fx kuvvetini 75 mm/dak ilerleme hızında vermiştir. İlerleme hızı 75 mm/dak'dan 150 mm/dak'a yükseldiğinde, aynı yönlü mikro frezeleme en düşük P-to-V Fx

kuvvetini vermiştir. Aynı yönlü mikro frezeleme hariç diğer takım yollarında artan ilerleme hızı ile P-to-V Fx kuvvetinin arttığı bulunmuştur. Bütün takım yollarında artan ilerleme hızı ile P-to-V Fy kuvveti artmıştır. En düşük P-to-V Fy değeri 150 mm/dak ilerleme hızında aynı yönlü mikro frezeleme ile, 75 mm/dak ilerleme hızında zigzag mikro frezeleme ile elde edilmiştir.

- İşleme şartları ve stratejileri doğru seçildiği zaman yüksek maliyetli yüksek-hızlı tezgahlar yerine standart tezgaha yüksek hız kafası takılması ile işleme performansında olumlu sonuçlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

- Devir sayısının etkisi deneyleri

Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde devir sayısının aşınma, pürüzlülük ve kuvvetler üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Devir sayısı arttıkça takım aşınmasının arttığı, yüzey pürüzlülüğünün ise azaldığı bulunmuştur.
- Devir sayısı arttıkça kesici takımında BUE'nin arttığı görülmüştür.
- Devir sayısının 12000 dev/dak'dan 20000 dev/dak'a artması halinde hem Fx kuvveti hem de Fy kuvveti artmıştır. Devir sayısının daha fazla arttırılması ise Fx ve Fy kuvvetlerinin azalmasına neden olmuştur.
- Sonuç olarak Ti6Al4V malzemesinin mikro yüzey frezelenmesinde en düşük kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü değerleri 28000 dev/dak değerinde, en düşük aşınma değeri ise 12000 dev/dak değerinde elde edilmiştir.

- Mekanistik kuvvet modeli

Ti6Al4V malzemesinin mikro frezelenmesinde mekanistik kuvvet modeli oluşturulmuştur. Mekanistik kuvvet modeli için yürütülen kalibrasyon deneylerinde ayrıca kanalların genişliği ve çapak genişliği ölçülerek diş başına ilerlemenin etkisi de incelenmiştir. Doğrulama deneylerinin tasarımında Taguchi metodu kullanılmıştır ve böylece hem kesme kuvveti modellerinin deneysel sonuçlar ile uyumu hem de işleme parametrelerinin kuvvetler, takım aşınması ve çapak genişliği üzerindeki etkisi de incelenebilmiştir. Hem kalibrasyon hem de doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Mekanistik kuvvet modelinin incelenen şartlar altında hem F_x hem de F_y kuvvetlerini tahmin etmede olumlu sonuçlar verdiği bulunmuştur.
- Artan diş başına ilerleme ile takım çapındaki azalma artmıştır.
- Mikro kanal frezelemede aynı yönlü işleme tarafındaki çapak boyutunun zıt yönlü işleme tarafındaki çapak boyutundan daha fazla olduğu görülmüştür.
- Genellikle, çapak genişliğinin aynı yönlü kesme tarafında artan diş başına ilerleme ile arttığı, zıt yönlü kesme tarafında artan diş başına ilerleme ile azaldığı bulunmuştur.
- Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde çıktı performanslarını tahmin edebilmek için geliştirilen regresyon modellerin tamamı takım aşınması, kuvvet ve çapak genişliği verilerini açıklamada yeterli olmuştur.
- S/N sonucuna göre, minimum takım aşınması devir sayısının 10000 dev/dak, ilerleme hızının 24 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu işleme şartlarında elde edilmiştir.
- Devir sayısının 12000 dev/dak, ilerleme hızının 24 mm/dak ve talaş derinliğinin 50 μm olduğu işleme şartlarında minimum F_x ve F_y kuvvetleri elde edilmiştir.
- Hem aynı yönlü hem de zıt yönlü frezeleme tarafındaki çapak genişliği için optimum işleme şartları setinin F_x ve F_y kuvvetleri için elde edilen optimum şartlarla aynı olduğu bulunmuştur.
- S/N analizi ve ANOVA sonuçları incelendiğinde; takım aşınmasını en çok etkileyen parametrenin devir sayısı olduğu, F_x kuvvetini en çok etkileyen parametrenin talaş derinliği olduğu, F_y kuvvetini en çok etkileyen parametrenin ise ilerleme hızı olduğu bulunmuştur. Hem aynı yönlü hem de zıt yönlü frezeleme tarafında çapak genişliğini en çok etkileyen parametre ise talaş derinliği olmuştur.
- Devir sayısı, talaş derinliği ve ilerleme hızı arttıkça takım aşınması artmıştır.
- İlerleme hızı ve talaş derinliği arttıkça, devir sayısı azaldıkça F_x ve F_y kuvvetlerinin arttığı bulunmuştur.
- Ti6Al4V malzemesinin mikro kanal frezelenmesinde hem aynı yönlü hem de zıt yönlü frezeleme tarafında devir sayısı azaldıkça, ilerleme hızı ve talaş derinliği arttıkça çapak genişliği artmıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada araştırılmayan ve araştırılması öneriler konular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Bu tezde, mikro frezeleme prosesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve çapak genişliği ölçülmüştür. Bu ölçümler dışında mikro frezeleme esnasında sıcaklık, titreşim, tork ve güç tüketimi gibi veriler de ölçülebilir.
- Bu çalışmada, TiAlN kaplamalı mikro kesici takımlar kullanılmıştır. Farklı kaplama malzemelerinin mikro frezelemede performansı nasıl etkilendiği incelenebilir.
- Deneysel sonuçlardan iş parçası malzemesinin mikro frezelemede çıktı performansları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Bu nedenle bu tezde kullanılmayan farklı iş parçası malzemeleri için mikro frezeleme deneyleri yürütülebilir.
- Bu tezde, mekanistik kuvvet modeli sabit devir sayısında kullanılmıştır. Mikro frezelemede yüksek devir sayıları değişen proses mekaniği ve dinamiği nedeniyle kuvvet katsayılarını etkilemektedir. Bu nedenle, mekanistik kuvvet modelleri farklı devir sayılarında özellikle yüksek devir sayılarında incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Masuzawa T., Tönshoff H. K., (1997), “Three-dimensional micromachining by machine tools”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 46 (2), 621-628.
- [2] Masuzawa T., (2000), “State of the art of micromachining”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 49, 473-488.
- [3] Liu X., DeVor R. E., Kapoor S. G., (2004), “The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science”, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126 (4), 666-678.
- [4] Chae J., Park S. S., Freiheit T., (2006), “Investigation of micro-cutting operations”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 313-332.
- [5] Dornfeld D., Min S., Takeuchi T., (2006), “Recent advances in mechanical micromachining”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55 (2), 745-768.
- [6] Ng C. K., Melkote S. N., Rahman M., Kumar A. S., (2006), “Experimental study of micro and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 929-936.
- [7] Aramcharoen A., Mativenga P. T., Yang S., Cooke K. E., Teer D. G., (2008), “Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 1578-1584.
- [8] Mohamed M. F. A., (2006), “Multi-Scale Modeling of Material Behaviour in Micro-Cutting Processes”, *Doctoral Thesis, McMaster University*.
- [9] Friedrich C. R., (2000), “Near-cryogenic machining of polymethyl methacrylate for micromilling tool development”, *Materials and Manufacturing Processes*, 15 (5), 667-678.
- [10] Tansel I. N., Bao W. Y., Reen N. S., Kropas-Hughes C. V., (2005), “Genetic tool monitor (GTM) for micro-end-milling operations”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 293-299.
- [11] Rodriguez P., Perez H., Labarga J. E., Vizan A., (2008), “Research on tool life in micro end milling as related to workpiece quality criteria”, *Proceedings of ECTC 2008, 2008 ASME Early Career Technical Conference*, 1.1-1.5, Miami, Florida, USA, 3-4 October.
- [12] Friedrich C. R., Kulkarni V. P., (2004), “Effect of workpiece springback on micromilling forces”, *Microsystem Technologies*, 10, 472-477.
- [13] Min S., Dornfeld D., Inasaki I., Ohmori H., Lee D., Deichmueller M., Yasuda T., Niwa K., (2006), “Variation in machinability of single crystal materials in micromachining”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55 (1), 103-106.

- [14] Liu X., (2010), "Experimental investigation of micro-milling accuracy using on-machine measurement system", Proceedings of the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 1-9, Erie, Pennsylvania, USA, 12-15 October.
- [15] Popov K., Dimov S., Pham D. T., Ivanov A., (2006), "Micromilling strategies for machining thin features", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 220, 1677-1684.
- [16] Li J., Liu J., Xu C., (2010), "Machinability study of SiC nano-particles reinforced magnesium nanocomposites during micro-milling processes", Proceedings of the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 1-8, Erie, Pennsylvania, USA, 12-15 October.
- [17] Biermann D., Kahleyss F., Krebs E., Upmeier T., (2011), "A study on micro-machining technology for the machining of NiTi: Five-axis micro-milling and micro deep-hole drilling", Journal of Materials Engineering and Performance, 20, 745-751.
- [18] Mian A. J., (2011), "Size Effect in Micromachining", Doctoral Thesis, The University of Manchester.
- [19] Wu T., (2012), "Tooling Performance in Micro Milling: Modelling, Simulation and Experimental Study", Doctoral Thesis, Brunel University.
- [20] Sodemann A. A., (2009), "A Study on Productivity Enhancement in High-Speed, High-Precision Micromilling Processes", Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology.
- [21] Sun Y., Meng Q., Liu H., (2009), "Experiment and simulation of micro-milling process for plastic material", Proc. SPIE7282, 4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technoloiges, 1-6, 20 May.
- [22] Shukor S. A., (2010), "The Development of a Manufacturability Analysis System for Micro-Milling", Doctoral Thesis, The University of Nottingham.
- [23] Mian A. J., Driver N., Mativenga P. T., (2010), "A comparative study of material phase effects on micro-machinability of multiphase materials", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 50, 163-174.
- [24] Heaney P. J., Sumant A. V., Torres C. D., Carpick R. W., Pfefferkorn F. E., (2008), "Diamond coatings for micro end mills: enabling the dry machining of aluminum at the micro-scale", Diamond and Related Materials, 17, 223-233.
- [25] Heaney P. J., (2009), "Improving Nanocrystalline Diamond Coatings for Micro End Mills", Doctoral Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- [26] Torres C. D., Heaney P. J., Sumant A. V., Hamilton M. A., Carpick R. W., Pfefferkorn F. E., (2009), "Analyzing the performance of diamond-coated micro

end mills”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 599-612.

- [27] Wu T., Cheng K., (2012), “An investigation on the cutting performance of nanocrystalline diamond coatings on a micro-end mill”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226, 1421-1424.
- [28] Wu T., Cheng K., (2013), “Micro milling performance assessment of diamond-like carbon coatings on a micro-end mill”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 227, 1038-1046.
- [29] Huo D., Cheng K., (2010), “Experimental investigation on micromilling of oxygen-free, high-conductivity copper using tungsten carbide, chemistry vapour deposition, and single-crystal diamond micro tools”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224, 995-1003.
- [30] Bissacco G., Gietzelt T., Hansen H. N., (2008), “Force analysis in micro milling Al 6082 T6 in various engagement conditions”, *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M)*, 241-244, Cardiff, United Kingdom, 9-11 September.
- [31] Shin S. H., Kim M. W., Kang M. C., Kim K. H., Kwon D. H., Kim J. S., (2008), “Cutting performance of CrN and Cr-Si-N coated end-mill deposited by hybrid coating system for ultra-high speed micro machining”, *Surface & Coatings Technology*, 202, 5613-5616.
- [32] Kim M. W., Tak H. S., Kang M. C., Kim K. H., Park I. D., Je T. J., (2009), “Cutting performance of nanocomposite Cr-C-N, Cr-Si-N and Cr-Si-C-N coated tools for micro end-milling operation”, *Current Applied Physics*, 9, 201-204.
- [33] Aramcharoen A., Mativenga P. T., Yang S., (2007), “The contribution of CrTiAlN coatings in micro milling of hardened die steel”, *Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Liverpool, UK, 30 May-1 June.
- [34] Aramcharoen A., Mativenga P. T., Yang S., (2007), “The effect of AlCrTiN coatings on product quality in micro-milling of 45 HRC hardened H13 die steel”, *Proceedings of the 35th International Matador Conference*, 203-206, Taipei, Taiwan, 18-20 July.
- [35] Zdebski D., Allen D. M., Stephenson D. J., Hedge J., Ducros C., Sanchette F., (2008), “An analysis of the effects of nanolayered nitride coatings on the lifetimes and wear of tungsten carbide micromilling tools”, *Proceedings of 4M Conference*, 179-182, Cardiff, United Kingdom, 9-11 September.

- [36] Kuram E., Ozcelik B., (2014), "Micro Milling". In: J. P. Davim, Editor, "Modern Mechanical Engineering Research, Development and Education", Springer.
- [37] Aramcharoen A., Mativenga P. T., (2009), "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel", *Precision Engineering*, 33, 402-407.
- [38] Malekian M., Park S. S., Jun M. B. G., (2009), "Tool wear monitoring of micro-milling operations", *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4903-4914.
- [39] Weule H., Hüntrup V., Tritschler H., (2001), "Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 50 (1), 61-64.
- [40] Kim C.-J., Mayor J. R., Ni J., (2004), "A static model of chip formation in microscale milling", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 710-718.
- [41] Vogler M. P., DeVor R. E., Kapoor S. G., (2003), "Microstructure-level force prediction model for micro-milling of multi-phase materials", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125 (2), 202-209.
- [42] Bissacco G., Hansen H. N., De Chiffre L., (2005), "Micromilling of hardened tool steel for mould making applications", *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 201-207.
- [43] Vogler M. P., DeVor R. E., Kapoor S. G., (2004), "On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: surface generation", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126 (4), 685-694.
- [44] Lee K., Dornfeld D. A., (2005), "Micro-burr formation and minimization through process control", *Precision Engineering*, 29 (2), 246-252.
- [45] Yun H. T., Heo S., Lee M. K., Min B.-K., Lee S. J., (2011), "Ploughing detection in micromilling processes using the cutting force signal", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 377-382.
- [46] Kang I.-S., Kim J.-S., Seo Y.-W., (2011), "Investigation of cutting force behaviour considering the effect of cutting edge radius in the micro-scale milling of AISI 1045 steel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225, 163-171.
- [47] Liu X., DeVor R. E., Kapoor S. G., (2006), "An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128, 474-481.
- [48] Lai X., Li H., Li C., Lin Z., Ni J., (2008), "Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum

- chip thickness”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 1-14.
- [49] Son S. M., Lim H. S., Ahn J. H., (2005), “Effect of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 529-535.
- [50] Wang J., Gong Y., Abba G., Antoine J. F., Shi J., (2009), “Chip formation analysis in micromilling operation”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45, 430-447.
- [51] Ku M.-S., Kang I.-S., Kim J.-S., (2011), “An investigation of machining characteristics in micro-scale milling process”, *AIP Conference Proceedings*, 1315, 1627-1632.
- [52] Mian A. J., Driver N., Mativenga P. T., (2011), “Estimation of minimum chip thickness in micro-milling using acoustic emission”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225, 1535-1551.
- [53] Malekian M., Mostofa M. G., Park S. S., Jun M. B. G., (2012), “Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum”, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 553-559.
- [54] Mian A. J., Driver N., Mativenga P. T., (2009), “Micromachining of coarse-grained multi-phase material”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223, 375-385.
- [55] Wu T., Cheng K., Rakowski R., (2012), “Investigation on tooling geometrical effects of micro tools and the associated micro milling performance”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226, 1442-1453.
- [56] Woon K. S., Rahman M., Fang F. Z., Neo K. S., Liu K., (2008), “Investigations of tool edge radius effect in micromachining: A FEM simulation approach”, *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 204-211.
- [57] Vogler M. P., Kapoor S. G., DeVor R. E., (2004), “On the modeling and analysis of machining performance in micro end milling, Part II: cutting force prediction”, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126 (4), 695-705.
- [58] Uriarte L., Azcarate S., Herrero A., Lopez de Lacalle L. N., Lamikiz A., (2006), “Mechanistic modelling of the micro-end milling operation”, *Multi-Material Micro Manufacture*, 237-240.
- [59] Zaman M. T., Senthil Kumar A., Rahman M., Sreeram S., (2006), “A three-dimension analytical cutting force model for micro end milling operation”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 353-366.

- [60] Kang I. S., Kim J. S., Kim J. H., Kang M., Seo Y., (2007), "A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process", *Journal of Material Processing Technology*, 187-188, 250-255.
- [61] Pérez H., Vizán A., Hernandez J. C., Guzmán M., (2007), "Estimation of cutting forces in micromilling through the determination of specific cutting pressures", *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 18-22.
- [62] Li C., Lai X., Li H., Ni J., (2007), "Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-end-milling", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17, 671-678.
- [63] Lee H. U., Cho D.-W., Ehmann K. F., (2008), "A mechanistic model of cutting forces in micro-end-milling with cutting-condition-independent cutting force coefficients", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130, 031102-1-9.
- [64] Malekian M., Park S. S., Jun M. B. G., (2009), "Modeling of dynamic micro-milling cutting forces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 586-598.
- [65] Piotrowska-Kurczewski I., Vehmeyer J., (2011), "Simulation model for micro-milling operations and surface generation", *Advanced Materials Research*, 223, 849-858.
- [66] Wang S. M., Chiang Z. S., Chen D. F., (2008), "Determination of cutting forces for micro milling", *Proceedings of the 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2008*, Evanston, Illinois, USA, 7-10 October.
- [67] Bissacco G., Hansen H. N., Slunsky J., (2008), "Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 113-116.
- [68] Park S. S., Malekian M., (2009), "Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58 (1), 49-52.
- [69] Uriarte L., Azcárate S., Herrero A., Lopez de Lacalle L. N., Lamikiz A., (2008), "Mechanistic modelling of the micro end milling operation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222, 23-33.
- [70] Newby G., Venkatachalam S., Liang S. Y., (2007), "Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations", *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 41-47.
- [71] Ko J. H., Heisel U., (2007), "Mechanistic cutting force model for micro ball-end milling", *2nd International Conference on Micro Manufacturing*, 80-85, Greenville, USA, 10-13 September.

- [72] Araujo A. C., Mougo A. L., de Oliveira Campos F., (2013), "Micro milling cutting forces on machining aluminum alloy", 8th International Conference on Micro Manufacturing (ICOMM 2013), 1-6, Victoria, BC, Canada, 25-28 March.
- [73] Kang Y.-H., Zheng C. M., (2012), "Fourier analysis for micro-end-milling mechanics", *International Journal of Mechanical Sciences*, 65, 105-114.
- [74] Srinivasa Y. V., Shunmugam M. S., (2013), "Mechanistic model for prediction of cutting forces in micro end-miling and experimental comparison", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 67, 18-27.
- [75] Bao W. Y., Tansel I. N., (2000), "Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2155-2173.
- [76] Jin T., Zdebski D., Allen D. M., Stephenson D. J., (2008), "Micro milling force prediction by coupling FE and analytical modelling approaches", *Proceedings of the Cranfield Multi-Strand Conference*, 263-268, Cranfield, UK, 6-7 May.
- [77] Rao S., Shunmugam M. S., (2012), "Analytical modeling of micro end-milling forces with edge radius and material strengthening effects", *Machining Science and Technology*, 16 (2), 205-227.
- [78] Ismail M. S., Baharudin B. T. H. T., Hon K. K. B., (2012), "Analytical model prediction: micro-cutting tool forces with the effect of friction on machining titanium alloy (Ti-6Al-4V)", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 68, 1634-1637.
- [79] Rodríguez P., Labarga J. E., (2013), "A new model for the prediction of cutting forces in micro-end-milling operations", *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 261-268.
- [80] Zdebski D., (2012), "The Impact of Tool Performance on Micromachining Capability", *Doctoral Thesis*, Cranfield University.
- [81] Tansel I., Rodriguez O., Trujillo M., Paz E., Li W., (1998), "Micro-end-milling-I.wear and breakage", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38, 1419-1436.
- [82] Tansel I. N., Arkan T. T., Bao W. Y., Mahendrakar N., Shisler B., Smith D., McCool M., (2000), "Tool wear estimation in micro-machining. Part I: tool usage-cutting force relationship", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 599-608.
- [83] Rahman M., Senthil Kumar A., Prakash J. R. S., (2001), "Micro milling of pure copper", *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 39-43.
- [84] Li H., Lai X., Li C., Feng J., Ni J., (2008), "Modelling and experimental analysis of the effects of tool wear, minimum chip thickness and micro tool

geometry on the surface roughness in micro-end-milling”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, 025006-1-12.

- [85] Nakamoto K., Katahira K., Ohmori H., Yamazaki K., Aoyama T., (2012), “A study on the quality of micro-machined surfaces on tungsten carbide generated by PCD micro end-milling”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 567-570.
- [86] De Cristofaro S., Funaro N., Feriti G. C., Rostagno M., Comoglio M., Merlo A., Stefanini C., Dario P., (2012), “High-speed micro-milling: Novel coatings for tool wear reduction”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 63, 16-20.
- [87] ISO, (1989), *Tool life testing in milling—Part 2: end milling*, ISO 8688-2, International Organization for Standardization.
- [88] Kajaria S., Chittipolu S., Adera S., Hung W. N., (2012), “Micromilling in minimum quantity lubrication”, *Machining Science and Technology*, 16 (4), 524-546.
- [89] Baharudin B. T. H. T., Dimou N., Hon K. K. B., (2004), “Tool wear behaviour of micro-tools in high speed CNC machining”, *Proceedings of the 34th International MATADOR Conference*, 111-118, Manchester, UK, 7-9 July.
- [90] Klocke F., Quito F., Arntz K., Souza A., (2009), “A study of the influence of cutting parameters on micro milling of steel with cubic boron nitride (CBN) tools”, *Proc. of SPIE*, 7204, 72040D-1-10.
- [91] Uhlmann E., Piltz S., Schauer K., (2005), “Micro milling of sintered tungsten–copper composite materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 402-407.
- [92] Takács M., Verő B., Mészáros I., (2003), “Micromilling of metallic materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 152-155.
- [93] Gandarias E., Dimov S., Pham D. T., Ivanov A., Popov K., Lizarralde R., P. J. Arrazola, (2005), “New methods for tool failure detection in micro-milling”, *Proceedings of the 1st International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, 371-374, Karlsruhe, Germany, 29 June-1 July.
- [94] Bao W. Y., Tansel I. N., (2000), “Modeling micro-end-milling operations. Part III: influence of tool wear”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2193-2211.
- [95] Bissacco G., Hansen H. N., De Chiffre L., (2004), “Improving axial depth of cut accuracy in micromilling”, *Proceedings of 4th EUSPEN International Conference*, 386-387, Glasgow, UK, 30 May-3 June.

- [96] Jun M. B. G., Bourne K., DeVor R. E., Kapoor S. G., (2007), "Estimation of effective error parameters in high-speed micro-endmilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47 (9), 1449-1454.
- [97] Li P., (2009), "Micromilling of Hardened Tool Steels", Doctoral Thesis, Delft University of Technology.
- [98] Park J. B., Wie K. H., Park J. S., Ahn S. H., (2009), "Evaluation of machinability in the micro end milling of printed circuit boards", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223 (11), 1465-1474.
- [99] Biermann D., Kahleyss F., Surmann T., (2009), "Micromilling of NiTi shape-memory alloys with ball nose cutters", *Materials and Manufacturing Processes*, 24 (12), 1266-1273.
- [100] Wang W., Kweon S. H., Yang S. H., (2005), "A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool", *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 702-708.
- [101] Bissacco G., Hansen H. N., De Chiffre L., (2006), "Size effects on surface generation in micro milling of hardened tool steel", *Annals of the CIRP*, 55 (1), 593-596.
- [102] Schmidt J., Tritschler H., (2004), "Micro cutting of steel", *Microsystem Technologies*, 10, 167-174.
- [103] Litwinski K. M., Min S., Lee D.-E., Dornfeld D. A., Lee N., (2006), Scalability of tool path planning to micro machining, 1st International Conference on Micromanufacturing, 1-6, Urbana-Champaign, Illinois, USA, 13-15 September.
- [104] Schmidt J., Spath D., Elsner J., Hüntrup V., Tritschler H., (2002), "Requirements of an industrially applicable microcutting process for steel micro-structures", *Microsystem Technologies*, 8, 402-408.
- [105] Kakinuma Y., Yasuda N., Aoyama T., (2008), "Micromachining of soft polymer material applying cryogenic cooling", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2 (4), 560-569.
- [106] Wang J., Gong Y., Shi J., Abba G., (2009), "Surface roughness prediction in micromilling using neural networks and Taguchi's design of experiments", *ICIT'09 Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 1-6, Churchill, Victoria, Australia, 10-13 February.
- [107] Fang F. Z., Wu H., Liu X. D., Liu Y. C., Ng S. T., (2003), "Tool geometry study in micromachining", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13, 726-731.

- [108] Uhlmann E., Schauer K., (2005), "Dynamic load and strain analysis for the optimization of micro end mills", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54, 75-78.
- [109] Baschin A., Kahnis P., Biermann D., (2008), "Dynamic analysis of the micromilling process - influence of tool vibrations on the quality of microstructures", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39 (9), 616-621.
- [110] Peng F., Wu J., Fang Z., Yuan S., Yan R., Bai Q., (2013), "Modeling and controlling of surface micro-topography feature in micro-ball-end milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67 (9-12), 2657-2670.
- [111] Jin C.-Z., Kang I.-S., Park J.-H., Jang S.-H., Kim J.-S., (2009), "The characteristics of cutting forces in the micro-milling of AISI D2 steel", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, 2823-2829.
- [112] Dimov S., Pham D. T., Ivanov A., Popov K., Fansen K., (2004), "Micromilling strategies: Optimization issues", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218, 731-736.
- [113] Wang J., (2009), "Micromilling Mechanism Research and Realization", *Doctoral Thesis, University of Metz*.
- [114] Bajpai V., Kushwaha A. K., Singh R. K., (2013), "Burr formation and surface quality in high speed micromilling of titanium alloy (Ti6Al4V)", *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 1-8, Madison, Wisconsin, USA, 10-14 June.
- [115] Min S., Sangermann H., Mertens C., Dornfeld D., (2008), "A study on initial contact detection for precision micro-mold and surface generation of vertical side walls in micromachining", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 109-112.
- [116] Denkena B., Hoffmeister H.-W., Reichstein M., Illenseer S., Hlavac M., (2006), "Micro-machining processes for microsystem technology", *Microsystem Technologies*, 12 (7), 659-664.
- [117] Horsch Ch., Schulze V., Löhe D., (2006), "Deburring and surface conditioning of micro milled structures by micro peening and ultrasonic wet peening", *Microsystem Technologies*, 12, 691-696.
- [118] Gillespie L. K., (1979), "Deburring precision miniature parts", *Precision Engineering*, 1 (4), 189-198.
- [119] Yunming Z., Guicheng W., Shutian F., Zhi W., Hongjie P., (2008), "A study on milling burr expert system in micro-machining", *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 965-969.

- [120] Zhu Y. M., Chen J. P., Zheng G., (2011), "Application of neural network on burr expert system in micro-machining", *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 1, 1-9.
- [121] Lee K., Dornfeld D. A., (2002), "An experimental study on burr formation in micro milling aluminium and copper", *Trans NAMRI/SME*, 30, 255-262.
- [122] Lekkala R., Bajpai V., Singh R. K., Joshi S. S., (2011), "Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling", *Precision Engineering*, 35, 625-637.
- [123] Liang Y. C., Yang K., Bai Q. S., Chen J. X., Wang B., (2009), "Modeling and experimental analysis of microburr formation considering tool edge radius and tool-tip breakage in microend milling", *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 27, 1531-1535.
- [124] Chen M. J., Ni H. B., Wang Z. J., Jiang Y., (2012), "Research on the modeling of burr formation process in micro-ball end milling operation on Ti-6Al-4V", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62, 901-912.
- [125] Web 1, (2013), www.aspe.net/publications/Annual_2001/PDF/.../1254.PDF, (Erişim Tarihi: 25/07/2013).
- [126] Chern G.-L., Wu Y.-J. E., Cheng J.-C., Yao J.-C., (2007), "Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM", *Precision Engineering*, 31, 122-129.
- [127] Schaller Th., Bohn L., Mayer J., Schubert K., (1999), "Microstructure grooves with a width of less than 50 μm cut with ground hard metal micro end mills", *Precision Engineering*, 23, 229-235.
- [128] Fang F. Z., Liu Y. C., (2004), "On minimum exit-burr in micro cutting", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 984-988.
- [129] Biermann D., Steiner M., (2012), "Analysis of micro burr formation in austenitic stainless steel X5CrNi18-10", *Procedia CIRP*, 3, 97-102.
- [130] Aurich J. C., Reichenbach I. G., Schüler G. M., (2012), "Manufacture and application of ultra-small micro end mills", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 83-86.
- [131] Li K.-M., Chou S.-Y., (2010), "Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling", *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2163-2170.
- [132] Chae J., Park S. S., (2007), "High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1433-1441.

- [133] Web 2, (2013), www.geniemeca.fpms.ac.be/Recherche/Articles/ducob2009c.pdf, (Erişim Tarihi: 25/07/2013).
- [134] Farina S., Thepsonti T., Ceretti E., Özel T., (2011), “Determination of specific forces and tool deflections in micro-milling of Ti-6Al-4V alloy using finite element simulations and analysis”, AIP Conference Proceedings, 1353, 645-650.
- [135] Zdebski D., Stephenson D. J., Ratchev S., Allen D. M., (2012), “Methodology for design of micro end-mills”, Procedia CIRP, 1, 150-155.
- [136] Fortgang J. D., (2006), “Combined Mechanical and Command Design for Micro-Milling Machines”, Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology.
- [137] Li P., Zdebski D., Langen H. H., Hoogstrate A. M., Oosterling J. A. J., Munnig Schmidt R. H., Allen D. M., (2010), “Micromilling of thin ribs with high aspect ratios”, Journal of Micromechanics and Microengineering, 20, 115013-1-10.
- [138] Monroy-Vázquez K. P., Attanasio A., Ceretti E., Siller H. R., Hendrichs-Troeglen N. J., Giardini C., (2013), “Evaluation of superficial and dimensional quality features in metallic micro-channels manufactured by micro-end-milling”, Materials, 6, 1434-1451.
- [139] Pham D. T., Elkaseer A. M., Popov K. P., Dimov S. S., Olejnik L., Rosochowski A., (2009), “An experimental and statistical study of the factors affecting surface roughness in the micromilling process”, Innovative Production Machines and Systems Conference, 1-7, Cardiff, UK, 6-17 July.
- [140] Vázquez E., Rodríguez C. A., Elías-Zúñiga A., Ciurana J., (2010), “An experimental analysis of process parameters to manufacture metallic micro-channels by micro-milling”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 51, 945-955.
- [141] Mian A. J., Driver N., Mativenga P. T., (2011), “Identification of factors that dominate size effect in micro-machining”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51, 383-394.
- [142] Ali M. Y., Khan A. A., Asharaf A. B. M., Wahab A. A., (2012), “Prediction of minimum chip thickness in tool based micro end milling”, International Journal of Integrated Engineering, 4 (1), 6-10.
- [143] Chi-Hsiang C., Yung-Cheng W., Bean-Yin L., (2013), “The optimal design of micro end mill for milling SKD61 tool steel”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68, 165-173.
- [144] Cardoso P., Davim J. P., (2010), “Optimization of surface roughness in micromilling”, Materials and Manufacturing Processes, 25, 1115-1119.
- [145] Natarajan U., Periyanan P. R., Yang S. H., (2011), “Multiple-response optimization for micro-endmilling process using response surface

methodology”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, 177-185.

- [146] Fard M. J. B., Bordatchev E. V., (2013), “Experimental study of the effect of tool orientation in five-axis micro-milling of brass using ball-end mills”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1079-1089.
- [147] Dow T. A., Miller E. L., Garrard K., (2004), “Tool force and deflection compensation for small milling tools”, *Precision Engineering*, 28, 31-45.
- [148] Zadeh L. A., (1975), “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I”, *Information Sciences*, 8, 199-249.
- [149] Taguchi G., Chowdhury S., Wu Y., (2005), “Taguchi’s Quality Engineering Handbook”, John Wiley & Sons.
- [150] Saedon J. B., (2011), “Micromilling of Hardened (62 HRC) AISI D2 Cold Work Tool Steel”, Doctoral Thesis, The University of Birmingham.
- [151] Deng J., (1989), “Introduction to grey system theory”, *The Journal of Grey System*, 1, 1-24.
- [152] Zhou L., Wang C.Y., Qin Z., (2009), “Tool wear characteristic in high-speed milling of graphite using a coated carbide micro endmill”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223, 267-277.
- [153] Nouari M., Makich H., (2013), “Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41, 259-269.
- [154] Bian R., Ferraris E., He N., Reynaerts D., (2014), “Process investigation on meso-scale hard milling of ZrO₂ by diamond coated tools”, *Precision Engineering*, 38, 82-91.
- [155] Saedon J.B., Soo S.L., Aspinwall D.K., Barnacle A., (2012), “Micro-milling of hardened AISI D2 tool steel”, *Advanced Materials Research*, 445, 62-67.
- [156] Schmitz T. L., (2009), “Machining Dynamics Frequency Response to Improved Productivity”, Springer.
- [157] Li K.-M., Chou S.-Y., (2009), “Effect of minimum quantity lubrication on tool wear and surface roughness in micro-milling”, *Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2009*, 393-399, West Lafayette, Indiana, USA, 4-7 October.
- [158] Arif M., (2011), “Modeling of Ductile-Mode Machining of Brittle Materials for End-Milling”, Doctoral Thesis, National University of Singapore.

ÖZGEÇMİŞ

Emel KURAM Gebze'de doğmuştur. İlkokulu Zeki Gezer İlkokulu'nda ortaokulu ise 1998 yılında Servet Çambol İlköğretim Okulu'nda tamamlamıştır. STFA Anadolu Teknik Lisesi Makine bölümünden 2002 yılında mezun olmuştur. 2006 yılında Marmara Üniversitesi'nden lisans derecesi, 2009 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan yüksek lisans derecesi almıştır. Halen Gebze Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Tasarım ve İmalat Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Kuram E., Ozcelik B., (2013), “Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill”, *Measurement*, 46, 1849-1864.

Kuram E., Ozcelik B., (2014), “Micro-milling performance of AISI 304 stainless steel using Taguchi method and fuzzy logic modelling”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, doi: 10.1007/s10845-014-0916-5.

Kuram E., Ozcelik B., (2015), “Optimization of machining parameters during micro-milling of Ti6Al4V titanium alloy and Inconel 718 materials using Taguchi method”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, doi: 10.1177/0954405415572662.