MİKRO TORNALAMA İŞLEMİNDE TAKIM GEOMETRİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet HASÇELİK

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKRO TORNALAMA İŞLEMİNDE TAKIM GEOMETRİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet HASÇELİK

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet Hasçelik tarafından hazırlanan "Mikro Tornalama İşleminde Takım Geometri Etkisinin Araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 10 / 06 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Başkan : Doç. Dr. Abdullah KURT
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇETKİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

10/06/2019

Ahmet HASÇELİK

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

MİKRO TORNALAMA İŞLEMİNDE TAKIM GEOMETRİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet HASÇELİK
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Mikro tornalama işlemi, geleneksel tornalama işlemine çok benzemekle beraber, takım geometri etkisinin daha ön plana çıktığı bir kesme işlemidir. Bu nedenle mikro tornalama işleminde kullanılan kesici geometrisinin ve kesme parametrelerinin özenle seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada mikro tornalama işleminde burun yarıçapı ve kenar yarıçapı farklılıklarının; kesme kuvvetleri, yüzey altı artık gerilmeleri, takım gerilmeleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, yüksek hızlarda ve yüksek hassasiyette kesme yapabilen özel bir deney düzeneği kullanılmıştır. İş parçası olarak Ti6Al4V alaşımı ve iki farklı kesici takım geometrisi kullanılmıştır. Çalışmada nümerik modelleme ticari yazılımı olan DEFORM 2D/3D yazılımı kullanılmıştır. Kullanılan malzeme modeli 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizlerle doğrulanarak, farklı kenar ve burun yarıçapları için çözümler yapılmıştır. Artan kenar ve burun yarıçapı, kesme kuvvetlerinin de artmasına neden olmaktadır. Burun yarıçapının talaş derinliğinden büyük olması durumunda burun yarıçapı arttıkça, kesme kuvvetleri beklenenin aksine düşmektedir. Yüzey altında meydana gelen basma gerilmeleri, kenar yarıçapının artmasıyla çekmeye dönebilmektedir. Kritik bir değerden sonra ilerleme azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür.

2019, xiii + 102 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikro Tornalama, Takım Geometrisi, Yüzey Pürüzlülüğü, Sonlu Elemanlar Analizi.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

INVESTIGATION THE EFFECT OF TOOL GEOMETRY IN MICRO TURNING PROCESS

Ahmet HASÇELİK
Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Kubilay ASLANTAŞ

Micro-turning is very similar to conventional turning, but is a cutting operation in which the tool geometry effect is more important. For this reason, the cutting geometry and cutting parameters used in micro turning must be carefully selected. In this study, nose radius and edge radius differences in micro turning process; the effects of cutting forces, under-surface residual stresses, tool stresses and surface roughness were investigated. For this purpose, a special test setup is used which can cut at high speeds and high precision. Ti6Al4V alloy as workpiece and two different cutting tool geometry are used. In the study, numerical modeling commercial software, DEFORM 2D / 3D software was used. The material model used was confirmed by 2D and 3D analysis and solutions were made for different edge and nose radius. Increased edge and nose radius also increase cutting forces. If the nose radius is greater than the depth of cut, as the nose radius increases, the cutting forces decrease against expectation. The compressive stresses under the surface can be returned to the tensile stress by increasing the edge radius. Surface roughness increased as the feed decreased after a critical value.

2019, xiii + 102 pages

Keywords: Micro Lathe Machining, Tool Geometry, Surface Roughness, Finite Element Analysis.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, henüz başlangıcında olduğum akademik kariyerimde bana yol gösteren ışık tutan, teknik bilgisi, çalışma azmi ve kişiliği ile örnek olan, ayrıca bu araştırmanın konusu, deneysel ve nümerik çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ hocama sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi iletirim.

Araştırma ve deneysel çalışmalarıma vakit ayırmama yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen Sayın Öğr. Grv. Liyaddin YEŞİLKAYA ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi İsmail YILDIZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Değerli katkılarından dolayı tez jüri üyelerine de ayrıca teşekkürlerimi bildirmekten kıvanç duyarım.

Her anımda yanımda olan, beni motive eden ve manevi desteğini hep hissettiğim canım eşim Elmira HASÇELİK'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi iletirim.

Bugünlere gelmemde emeği çok olan kıymetli annem Hayrinnisa HASÇELİK'e, her zaman arkamda dayanağım olan saygıdeğer babam Hüsnü HASÇELİK'e ve can yoldaşım kardeşim Ali HASÇELİK'e sonsuz saygı sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Bu araştırma boyunca az ya da çok emeği geçen yakınlarıma ve iş arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Ahmet HASÇELİK
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET ii
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
RESİMLER DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
1.1 Çalışmanın Amacı 2
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ 4
2.1 Kesme İşlemini Etkileyen Faktörler 4
2.2 Mikro Mekanik İşleme 5
2.2.1 Mikro Tornalama 6
2.2.2 Mikro Kesme İşleminde Kullanılan Takım Tezgahları 8
2.2.3 Mikro Kesici Takımlar ve Takım Kaplaması 9
2.3 Mikro Ölçekte Talaş Kaldırma 11
2.3.1 Boyut Etkisi 11
2.3.2 Kenar Yarıçapının Önemi 14
2.3.3 Minimum Talaş Kalınlığı 16
2.4 Mikro İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü 22
2.5 Ti6Al4V Alaşımı 27
3. METAL KESME İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 31
3.1 Giriş 31
3.2 Johnson-Cook Malzeme Modeli 33
3.3 DEFORM Yazılımı 35
4. MATERYAL ve METOT 40
4.1 Kesici Takım ve İş Parçası 40
4.2 Deney Düzeneği 42
4.3 Nümerik Modelleme 45
4.3.1 Malzeme Modelinin Belirlenmesi 45
4.3.2 DEFORM Yazılımında Modelleme İşlemi 50

4.3.3 Modelleme Sonucu Elde Edilen Parametreler 56
4.4 Yüzey Pürüzlülüğü 57
5. BULGULAR ve TARTIŞMA 60
5.1 Giriş 60
5.2 Deneysel ve Nümerik Kesme Kuvvetleri Sonuçlarının Karşılaştırılması 61
5.2.1 İlerlemenin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi 61
5.2.2 Kesme Hızının Kesme Kuvvetlerine Etkisi 62
5.2.3 Talaş Formlarının Karşılaştırılması 64
5.3 Kenar Yarıçapının Etkisi 66
5.3.1 Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi 66
5.3.2 Yüzey Altı Artık Gerilmelere Etkisi 67
5.3.3 Takım Gerilmelerine Etkisi 70
5.3.4 Talaş Formu Üzerindeki Etkisi 71
5.4 Takım Geometrisinin Etkisi 73
5.4.1 Mikro Tornalama İşleminin Üç Boyutlu Modellenmesi 73
5.4.2 Burun Yarıçapı Etkisinin Modellenmesi 74
5.4.3 Kesme Kuvvetlerine Etkisi 76
5.5 Takım Geometrisinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi 79
5.5.1 Kesme Hızına ve Talaş Derinliğine Göre Değişimi 79
5.5.2 İlerlemeye ve Kesici Takım Geometrisine Göre Değişimi 82
6. SONUÇ 86
7. KAYNAKLAR 88
ÖZGEÇMİŞ 101

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

m	Metre
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
dk	Dakika
kg	Kilogram
L	Boy
d	Çap
dev	Devir
°C	Santigrat derece
N	Newton
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
n (dev/dk)	Tezgah devri
f (µm /dev)	İlerleme hızı
V_c (m/dk)	Kesme hızı
ap (µm)	Talaş derinliği
Fx/Fc	X ekseninde oluşan kesme kuvveti (Asıl kesme kuvveti)
Fy/Fp	Y ekseninde oluşan kesme kuvveti (Radyal kuvvet)
Fz/Ff	Z ekseninde oluşan kesme kuvveti (İlerleme kuvveti)
t_c (µm)	Talaş kalınlığı
t_{cmin} (µm)	Minimum talaş kalınlığı
σ	Akma gerilmesi
τ_a	Takım talaş ara yüzeyindeki kayma mukavemeti
Re (µm)	Kesici takım kenar yarıçapı
R_ε (µm)	Kesici takım burun yarıçapı
ε	Plastik şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}$	Şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}_o$	Referans şekil değiştirme hızı
A (MPa)	Malzeme akma gerilmesi sabiti
B (MPa)	Malzeme sertleşme modülü
C	Şekil değiştirme hızı hassasiyeti
n	Pekleşme katsayısı
m	Malzeme termal yumuşama katsayısı
T_r (°C)	Oda sıcaklığı
T_m (°C)	Ergime sıcaklığı
a	Malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi
r	Malzemenin yumuşama hızı
s	Malzemedeki yumuşama eğilimi
b	Sıcaklığa bağlı akma yumuşama etkisi
Ra (µm)	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Rz (µm)	En yüksek ve alçak 5 nokta arasındaki mesafenin ortalaması
Sa	Yüzey boyunca Ra değeri
Sz	Yüzey boyunca Rz değeri
E (GPa)	Elastite modülü

Simgeler (Devam)

ρ (kg/m^3)	Yoğunluk
C_p (J/kg°C)	Özgül ısı
k (W/m°C)	Termal iletkenlik
ς (μm/m°C)	Termal genleşme katsayısı
υ	Poisson oranı
ϵ	Salım kabiliyeti

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Al	Alüminyum
AR-GE	Araştırma-Geliştirme
CBN	Kübik bor nitrür
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
CVD	Kimyasal buhar çökertme
DEFORM	Design Environment for Forming
HB	Brinell Sertlik
HSS	Yüksek hız çeliği
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
J-C	Johnson Cook
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistem
PCD	Çok kristalli elmas
PVD	Fiziksel buhar çökertme
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SFTC	Scientific Forming Technologies Corporation
Ti	Titanyum
TiAlN	Titanyum Aliminyum Nitrür
TiC	Titanyum Karbür
TiCN	Titanyum Karbon Nitrit
TiN	Titanyum Nitrit
TUAM	Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi
V	Vanadyum
WC	Tungsten Karbür
2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Talaş kaldırma işlemi esnasındaki kesme kuvveti vektörleri (Kurt 2006)..... 4
Şekil 2.2 Mikro mekanik işlemenin diğer yöntemlerle kıyaslanması (Chae *et al.* 2006). 6
Şekil 2.3 Mikro kesme işleminde kesme kuvvetlerinin değişimi (Furukawa and Moronuki 1988). 12
Şekil 2.4 Bileşke kuvvet vektörünün değişimi (Furukawa and Moronuki 1988). 13
Şekil 2.5 Mikro tornalama işlemi (Jagadesh and Samuel 2015). 13
Şekil 2.6 a) TiN kaplı takım kenar yarıçapı, b) Kaplamasız takım kenar yarıçapı, c) NCD kaplı takım kenar yarıçapı, d) AlCrN kaplı takım kenar yarıçapı (Hopa 2016). 14
Şekil 2.7 Mikro ve geleneksel kesme işleminde kesici takım kenar yarıçapı ile talaş kalınlığının kıyaslanması (Dhanorker and Özel 2008). 15
Şekil 2.8 Minimum talaş kalınlığı ile kenar yarıçapı arasındaki ilişki (Yuan *et al.* 1996). 16
Şekil 2.9 Kesme derinliklerine göre farklı kenar yarıçaplarına sahip kesici takımlarla yapılan kesme işlemindeki kuvvetlerinin değişimi (Grzesik 2017). a) Fc/Fp=2, b) Fc/Fp=1/2, c) Fc/Fp<1/2, d) Fc/Fp<<1/2. 17
Şekil 2.10 Minimum talaş kalınlığından küçük ve büyük ilerleme değerlerinde oluşan pürüzlülük değerleri (Li *et al.* 2008). 18
Şekil 2.11 Minimum talaş kalınlığı etkisinin şematik gösterimi (Chae *et al.* 2006)..... 19
Şekil 2.12 Kenar yarıçapının talaş kalınlığından büyük olduğu kesme işlemi (Malekian *et al.* 2012). 20
Şekil 2.13 Perlit (a) ve ferrit (b) malzemeler i çin talaş yükü/kuvvet ilişkisi (Jun *et al.* 2006). 21
Şekil 2.14 Takım kenar yarıçapı ve kesme hızına bağlı olarak minimum talaş kalınlığının değişimi (Liu *et al.*2006). 21
Şekil 2.15 Minimum talaş kalınlığının sürtünme katsayısı ve kesici kenar yarıçapı ile ilişkisi (Son *et al.* 2005). 22
Şekil 2.16 Yüzey pürüzlülüğünü ifade eden sayısal parametreler. 23
Şekil 2.17 Takım burun yarıçapı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Çakır 1999). 25

Şekil 2.18 Yüzey pürüzlülüğünde deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması (iş parçası: AISI 1045 çeliği, takım: WC) (Liu and Melkote 2006). 25
Şekil 2.19 İlerleme değerine bağlı olarak Ra ve Rz yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimi (Aslantaş ve Şahan 2017). 26
Şekil 2.20 Titanyum alaşımlarının mikroyapıları (500x). (a) Tavlanmış α alaşımı. (b) Tavlanmış Ti6Al4V α + β alaşımı. (c) Tavlanmış β alaşımı. (d) Ti6Al4V, 1650°C'de ısıl işlem görüp su verilmiş martensit yapısı (Park and Kim 2002). 28
Şekil 2.21 Altıgen yapıdan kübik yapıya geçen saf titanyum şekli ve geçiş sıcaklığı (Bamford 2016). 29
Şekil 3.1 Ortogonal kesme işleminin modellenmesinde Eulerian yaklaşımı (Apaydın 2009). 31
Şekil 3.2 Ortagonal kesme işleminin modellenmesindeki Lagrangian yaklaşımı (Apaydın 2009). 32
Şekil 3.3 Ortagonal kesme işlemindeki ALE yaklaşımı (Guo and Wen 2005). 32
Şekil 3.4 Sonlu elemanlar yöntemiyle DEFORM yazılımında 2D ve 3D modellenen kesici takım ve iş parçası. 36
Şekil 3.5 Kullanılan kesme modeli (DEFORM 3D) (Ceretti *et al.* 2000). 38
Şekil 3.6 Ortogonal kesmedeki deformasyon bölgeleri (Özel ve Zeren 2004). 39
Şekil 4.1 Kesici takım görsel ve karakteristikleri. 41
Şekil 4.2 Mikro tornalama deneylerinde kullanılan sistemin genel görünümü. 43
Şekil 4.3 Dynoware yazılımındaki kesme kuvvetleri dataları. 44
Şekil 4.4 Kesme kuvvetleri ölçümü ve veri kayıt sistemi. 44
Şekil 4.5 Deneysel sonucun, yapılan modellemelerle kesme kuvvetleri açısından karşılaştırılması (f=10 μm/dev., V_c=100 m/dk., ap=40 μm). 46
Şekil 4.6 Farklı malzeme modelleri kullanılarak yapılan modellemelerdeki talaş formunun karşılaştırılması. 47
Şekil 4.7 Deneysel sonucun, yapılan modellemelerle kesme kuvvetleri açısından karşılaştırılması (f=20 μm/dev., V_c=100 m/dk., ap=40 μm). 48
Şekil 4.8 Kesme deneyleri sonucu elde edilen talaş formlarının taramalı elektron mikroskobundan alınan görüntüleri. 48
Şekil 4.9 Modellemede kullanılan farklı kenar yarıçapları. 51

Şekil 4.10 Modelleme esnasında kesici takıma ait parametreler..... 52
Şekil 4.11 İş parçası ve takım için mesh yapısı ve tane boyutu. 53
Şekil 4.12 Tornalama işleminin iki boyutlu ifadesi ve iş parçası ve kesici uç mesh yapısı. 53
Şekil 4.13 Modellemelerde kullanılan burun yarıçapları farklı modellenen iki takım görseli. 54
Şekil 4.14 Modelleme ve deneysel çalışmalarda kullanılan 2 farklı takım solidworks çizimleri, kenar ve burun yarıçapı farklılıkları. 54
Şekil 4.15 3D modelleme işlemi simulasyon modeli. 55
Şekil 4.16 DEFORM-3D yazılımı talaş kaldırma işlemi görselleri. 55
Şekil 4.17 Yüzey altı artık gerilmeler grafiği ve yönleri. 56
Şekil 4.18 İş parçası yüzey taramasının şematik gösterimi. 58
Şekil 4.19 Yüzey pürüzlülüğü tarama sonuç ekranı ve 3 boyutlu görünümü. 59
Şekil 5.1 İlerlemenin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi. 62
Şekil 5.2 Kesme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi. 63
Şekil 5.3 Talaş formu yapısı ve talaş formu üzerindeki karakteristikler. 64
Şekil 5.4 h2'nin ilerlemeye göre değişimi ve farklı ilerleme hızlarında talaş formu görselleri (Hascelik *et al.* 2019). 65
Şekil 5.5 L1'nin ilerlemeye göre değişimi ve farklı ilerleme hızlarında talaş formu görselleri (Hascelik *et al.* 2019). 66
Şekil 5.6 Kesici takım kenar yarıçapının, kesme kuvvetlerine etkisi. 67
Şekil 5.7 Farklı kenar yarıçaplarına göre yüzey altında meydana gelen çevresel artık gerilmelerin değişimi (Aslantaş ve Hasçelik 2018b). 69
Şekil 5.8 Farklı kenar yarıçaplarına göre yüzey altında meydana gelen eksenel artık gerilmelerin değişimi (Aslantaş ve Hasçelik 2018b). 69
Şekil 5.9 Farklı kenar yarıçaplarına göre takım gerilmeleri. 70
Şekil 5.10 Farklı kenar yarıçaplarına bağlı olarak talaş şeklindeki değişim. 71
Şekil 5.11 Farklı kenar yarıçaplarına göre talaş formundaki değişim. 72
Şekil 5.12 Kesici kenar yarıçapına göre talaş formu üzerinde ölü bölge değişimi a) R_e=2,25 µm, b) R_e=7,25 µm, c) R_e=15 µm 72
Şekil 5.13 Farklı ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin değişimi ve 3 boyutlu talaş oluşumu. 73

Şekil 5.14 Farklı ilerleme hızlarında, 2D ve 3D modelleme sonrası elde edilen kesme kuvvetlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması. 74
Şekil 5.15 Kesici takım burun yarıçapının kesme kuvvetlerine etkisi (ap=40 µm). 75
Şekil 5.16 Kesici takım burun yarıçapının kesme kuvvetlerine etkisi (ap=170 µm). 76
Şekil 5.17 Farklı ilerleme değerinde, iki takımla yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması. 77
Şekil 5.18 Farklı kesme hızlarında, iki takımla yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması. 78
Şekil 5.19 Kesme hızına göre Sa (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi. 80
Şekil 5.20 Kesme hızına göre Sz (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi. 80
Şekil 5.21 Talaş derinliğine göre Sa (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi. 81
Şekil 5.22 Talaş derinliğine göre Sz (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi. 81
Şekil 5.23 Farklı ilerleme hızlarında, geometrisi farklı iki takımla yapılan kesme işlemi sonrası iş parçası yüzeyinden elde edilen tarama verileri. 82
Şekil 5.24 Takım geometrisi ve ilerleme değerinin Sa (µm) değeri üzerindeki etkisi... 84
Şekil 5.25 Takım geometrisi ve ilerleme değerinin Sz (µm) değeri üzerindeki etkisi... 84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Ti6Al4V alaşımının metalurjik ve fiziksel özellikleri (Olgun 2013)..... 30
Çizelge 2.2 Ti6Al4V alaşımının mekanik ve termal özellikleri (Olgun 2013). 30
Çizelge 3.1 Ducobu ve diğerleri (2017)'nin Ti6Al4V alaşımı için kullandığı 20 farklı Johnson-Cook malzeme model sabiti. 35
Çizelge 4.1 Kesme deneylerinde kullanılan iki farklı takımın geometrik özellikleri. ... 41
Çizelge 4.2 Kesme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri. 42
Çizelge 4.3 Modellemelerde kullanılan Johnson-Cook malzeme model sabitleri (Karpat 2011, Özel ve Sima 2010b). 45
Çizelge 4.4 Model-1'de kullanılan J-C malzeme model sabitleri. 50
Çizelge 4.5 Model-1'de kullanılan diğer J-C malzeme model sabitleri. 50
Çizelge 4.6 Modellemede kullanılan kesme parametreleri ve kesme kuvvetleri. 51
Çizelge 4.7 Malzeme modelinde kullanılan J-C malzeme model parametreleri (Ratchev 2011). 52
Çizelge 4.8 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri iş parçası kesme parametreleri ve Sa/Sz değerleri. 57

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 1.1 Minyatür parça örnekleri (Çelik 2017)……...1

Resim 2.1 Konvansiyonel torna tezgahının ölçeklendirilerek mikro parça işleme seviyesine indirilmiş mini torna tezgahı……..…….…7

Resim 2.2 Ticari olmayan portatif tip mikro işleme tezgahları, a) Mikro torna (Tanaka 2011), b) Çok fonksiyonlu mikro freze tezgahı (Okazaki *et al.* 2004), c) CNC Mikro işleme tezgahı (İnt. Kyn. 1, Çelik 2017)……...8

Resim 2.3 Ticari tip mikro tezgâhlar, a) (İnt. Kyn. 1), b) (İnt. Kyn. 2), c) (İnt. Kyn. 3), d) (İnt. Kyn. 4), e) (İnt. Kyn. 5)…….....9

Resim 2.4 Tungsten Karbür mikro freze takımı (Chae *et al.*2006). Mikro kesici takım ve SEM fotoğrafı (Mativenga *et al.* 2013)..…….…….....10

Resim 2.5 İki farklı kesici takım ve kaplama özellikleri (Gürbüz *et al.* 2011)…….....11

Resim 2.6 a) Jet motorlarında Ti6Al4V alaşımı kullanımı (Hopa 2016). b) Diş implantında Ti6Al4V alaşımı kullanımı (İnt. Kyn. 9)……..…….....…27

Resim 4.1 Deneylerde kullanılan Ti6Al4V alaşımının a) boyu b) çapı c) pense bağlı hali……....40

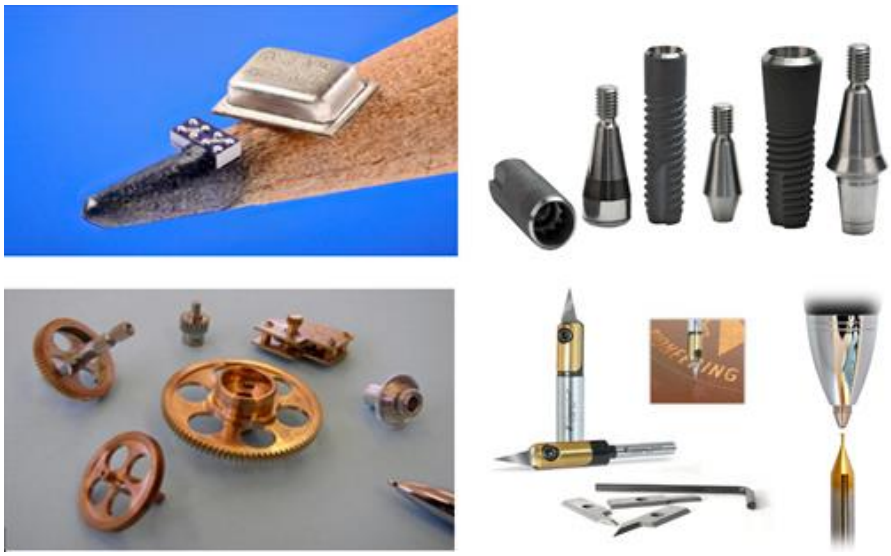
Resim 4.2 Kesme deneylerinde kullanılan geometrik özellikleri farklı iki takım.……42

Resim 4.3 Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan cihaz ve iş parçası…….58

1. GİRİŞ

Günümüz imalat teknolojilerinde, parçaların minyatürleşmesi, küçülen cihaz boyutları ve yüksek hassasiyette parça gereksinimi yeni arayışlara neden olmuştur. Bütün bu gereksinimler, gelişen teknoloji ile birleştiğinde mikro işlemeyi ortaya çıkarmıştır. İçinde bulunduğumuz minyatürleşme çağında bütün bu gereksinimlerden dolayı mikro işleme, imalatın en popüler araştırma konularından biri haline gelmiştir (Hasçelik ve Aslantaş 2018a). Özellikle son yıllarda popüler bir konu haline gelen mikro işleme ile ilgili mikro boyutlarda birçok çalışma yapılmaktadır.

Mikro ekipman üretiminde yaygın olarak tercih edilen mikro mekanik işleme, geleneksel tornalama, frezeleme ve delik delme işlemlerinin mikro ölçekte yapılmasına imkan sağlayan bir talaşlı imalat sürecidir. Dünya genelinde hızla büyüyen bu endüstri sayesinde kaynak ve zaman kullanımında yüksek verim elde edilebilmektedir. Verimi artırmada takım geometrisinin doğru seçilmesi çok önemli bir etkendir. Takım geometrisindeki burun yarıçapı ve kenar yarıçapı farklılıklarının iş parçası üzerinde hangi farklı etkilere yol açtığının bilinmesi, operatörü doğru takım seçimine yönlendireceği gibi, deneme-yanılma yöntemini minimize ederek iş parçası ve zamandan tasarruf sağlayıp verimi artıracaktır. Resim 1.1'de mikro mekanik işleme yöntemi ile üretilmiş bazı parçalardan örnekler verilmiştir.



Resim 1.1 Minyatür parça örnekleri (Çelik 2017).

İmalat sektöründe mikro ekipman ihtiyacı arttıkça, mikro mekanik işlemede kullanılan yöntem ve teknikler de artmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları; fotolitografi, mikro lazer, ultrasonik, iyon demeti, mikro elektro erozyondur. Fakat bu yöntemlerin imalat hızı yavaş olup, üretilebilecek parça geometrisi oldukça sınırlıdır. (Masuzawa 2000, Alting *et al*. 2003). Mikro frezeleme ve mikro delik delme işlemleriyle beraber, mekanik işleme yöntemlerinden biri olan mikro tornalama yönteminde ise imalat hızı yüksektir ayrıca silindirik parçaları üretmek için etkili bir yoldur. İmalat hızının yüksek olmasıyla mikro ürün başına düşen birim maliyeti de düşmektedir (Chae *et al.* 2006).

Otomotiv sanayisi, havacılık ve uzay sanayi, elektronik cihaz teknolojileri, enerji sektörü ve tıbbi teknolojilerde bir çok mikro ekipman üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu mikro ekipmanların üretiminde, kesme yöntemi belirlendikten sonra kesici takım ve iş parçası arasındaki ilişkinin tayin edilmesi, ürünün optimum koşullarda elde edilebilmesine olanak sağlayacaktır. Bu konuyla ilgili literatürde çalışmalar olmakla beraber, özellikle mikro tornalama ile ilgili yapılmış çalışma sayısı oldukça yetersizdir.

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında Ti6Al4V iş parçasının mikro tornalanmasındaki kesme karakteristikleri ve takım geometrisinin kesme işlemine etkisinin tespiti amaçlanmıştır. Kullanılan takımlar için performans kriteri olarak; kesme kuvvetlerinin değişimi, elde edilen yüzey kalitesi ve talaş formu genel olarak dikkate alınmıştır.

Çalışmanın bir diğer amacı ise; Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasının nümerik olarak modellenerek, deneysel bir çalışmaya gerek duyulmadan imalat işlemi hakkında bilgi sahibi olunmasına olanak tanımaktır. Ayrıca, nümerik model sayesinde, deneysel olarak tespiti oldukça zor olan kesici takım gerilmesi, yüzeyaltı artık gerilmeler, sıcaklık gibi imalat çıktılarını da tespit etmektir. Nümerik çözümlerden elde edilen verilerin, deneysel verilerle birlikte incelenmesiyle, imalat işlemi hakkında çok boyutlu bir değerlendirmenin yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Bunun dışında, nümerik modelleme yardımıyla, değişik kesici takım geometrilerinin, imalat işleminin verimliliği üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu sayede imalat sonucu istenilen ürün özelliklerine göre kesme karakteristikleri ve takım özelliklerini belirlemek mümkün olacağı gibi

nümerik modelleme sayesinde kesme işlemine müdahale ederek değişiklik yapmak daha kolay bir hâl alacaktır.

Bu çalışmada, mikro tornalama işleminde takım geometrisinin kesme işlemine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen kesme kuvvetleri not edilerek DEFORM yazılımında modelleme sonucu elde edilen kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmış, bu sayede malzeme modelinin doğruluğu ispatlanmıştır. Sonrasında DEFORM-2D yazılımında takım geometrisindeki kenar yarıçapı farklılığının (Re=2,25 µm, Re=7,25 µm, Re=15 µm) kesme işlemine etkisi modellenmiştir. Ayrıca iş parçası yüzeyindeki artık gerilmeler ve takım yüzeyindeki gerilmeler tespit edilerek kenar yarıçapının etkisi incelenmiştir. Bütün bu deneysel ve nümerik çalışmalar; üç farklı ilerleme hızı (f=10 µm/dev, f=20 µm/dev, f=40 µm/dev), kesme hızı (V_c=100 m/dk, V_c=150 m/dk, V_c=200m/dk) ve talaş derinliği (ap=5 µm, ap=15 µm, ap=25 µm) için yapılmış olup, mikro tornalama işlemindeki boyut farklılığının, kesme parametrelerinin değişimi ile kesme işlemini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Geometrik olarak farklı iki takım ile (I.Takım_R_e=7,25 µm ve R_ε=40 µm II.Takım_ R_e=12 µm, R_ε=166,5 µm) kesme deneyleri gerçekleştirilmiş, kesme parametreleri sabit tutularak takım geometrisi farklılığının kesme işlemine etkisi incelenmiştir. DEFORM-3D yazılımı kullanılarak takım geometrisindeki burun yarıçapı farklılığı modellenmiş ve burun yarıçapının kesme işlemine etkisi tespit edilmiştir.

Takım geometrisi farklılıklarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelemek adına iki farklı kesici takım kullanılarak (I.Takım_R_e=7,25 µm, R_ε=40 µm, II.Takım_R_e=12 µm, R_ε=166,5 µm) üç farklı kesme hızı (V_c=100 m/dk, V_c=150 m/dk, V_c =200 m/dk), talaş derinliği (ap=5 µm, ap=15 µm, ap=25 µm) ve ilerleme hızında (f=10 µm/dev, f=25 µm/dev, f=40 µm/dev) kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V iş parçası yüzeyinde farklı noktalardan alınan ölçümlerin ortalamasında Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Bu sayede mikro tornalamada takım geometrisi ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır.

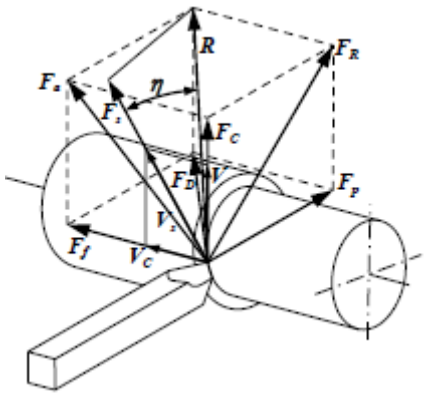
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kesme İşlemini Etkileyen Faktörler

Talaşlı imalat, kesici takım ve iş parçasının birbirine göre izafi bir hareketinin sonucu olarak gerçekleşir. Bu izafi hareket ile birlikte kesme işleminin gerçekleşebilmesi için kesici takımın belirli bir geometriye sahip olması ve iş parçasından daha sert olması gerekmektedir. Kesme sırasındaki bu hareketler: kesme, ilerleme veya yardımcı olmak üzere üç şekildedir.

- Kesme hareketi, esasen talaş kaldıran harekettir.
- İlerleme hareketi, parçanın uzunluğu veya genişliği boyunca işleyen harekettir.
- Yardımcı hareket takımın parçaya göre ayarlanmasını sağlayan örneğin parçaya yaklaşma ve uzaklaşma gibi hareketlerdir (Akkurt 2012).

Genellikle bir kesici takım tarafından uygulanan kuvvet sistemi üç boyutludur. Bileşke kesme kuvveti R, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi karşılıklı üç dikey bileşen içerir. Koordinat sistemi, dönme ve ilerleme hareketlerinin yönleri doğrultusunda şematize edilir ve toplam R kuvveti dikey bileşenlerini ayrılır. Sonuç olarak elde edilen kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti Fc ve Ff sembolleri ile gösterilir. Kesici takımı radyal bir doğrultuda ve çalışma düzlemine dikey olarak itme eğiliminde olan pasif kuvvet Fp olarak tanımlanmaktadır. Dik kesme için genellikle pasif kuvvet göz ardı edilir. Böylece toplam kesme kuvveti Fc ve Ff kuvvetlerinin bileşkesi olan Fa kuvvetidir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Talaş kaldırma işlemi esnasındaki kesme kuvveti vektörleri (Kurt 2006).

Talaşlı imalat sonrasında en ideal sonuçları elde edebilmek için, çalışmanın amacı doğrultusunda talaş kaldırmaya etki eden kesme parametrelerinin çok dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekir.

Talaş kaldırmaya etki eden faktörler şunlardır;

- Kesme hızı (V_c)
- Kesici takım ömrü (T)
- Talaş derinliği (a_p)
- İlerleme miktarı (f)
- Kesici uç burun yarıçapı (R_ε)
- Kesici uç kenar yarıçapı (R_e)
- Takım-iş parçası malzemesi çifti
- Titreşim
- Soğutma Sıvısı
- Kesme Açıları

Kesme işleminde talaş kaldırma için gerekli etki, iş parçası ve takımın hareketiyle gerçekleşir. İş parçası ve takımın bu hareketleri; kesme, ilerleme ve talaş verme (yaklaştırma) hareketleridir. İlerleme ve talaş verme hareketi doğrusaldır. Kesme hareketi de doğrusaldır ve dönen iş parçası üzerinde görülür (Akkurt 2012).

2.2 Mikro Mekanik İşleme

Günümüz teknolojisinde mikro ekipmanlara çok sık rastlanmakta, bu da üretimde mikro ekipmanların yerini giderek sağlamlaştırarak bu alanda yapılan çalışma sayısını artırmaktadır. Bu ekipmanların elde edilmesi için mikro üretim teknikleri kullanılmaktadır. Mikro üretim teknikleri temel olarak MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistem) ve Alışılmamış MEMS olarak ikiye ayrılır. Alışılmamış yani geleneksel olmayan MEMS üretim tekniklerinden biri ise mikro mekanik işlemedir (Çelik 2017).

Mikro boyutlarda yapılan talaş kaldırma işlemine mikro mekanik işleme adı verilmektedir. Mikro mekanik işleme 10 μm'dan bir kaç milimetre boyut aralığındaki unsurları içeren minyatür cihaz ve parçaları imal etmek için kullanılan bir imalat yöntemidir (Şekil 2.2). Konvansiyonel işleme operasyonlarına benzemesine rağmen, mikro mekanik işleme minyatürleştirilmiş kesici takımlar kullanılarak malzeme yüzeylerini şekillendirmektedir (Yücel ve Çiçek 2011).

Şekil 2.2 Mikro mekanik işlemenin diğer yöntemlerle kıyaslanması (Chae *et al*. 2006).

Mikro mekanik işleme, nano ve makro bilimler arasındaki boşluğu doldurarak nanobilim ve nano teknoloji gelişmelerinin yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlayan bir teknolojidir. Küçük ölçeklerde üretime imkan tanıyarak maliyeti azaltır. Makro üretime göre daha az sermaye yatırımı, azaltılmış alan ve enerji maliyetleri, artan taşınabilirlik ve yüksek verimlilik ile herhangi bir ülkenin rekabet seviyesini artırabilecek stratejik bir teknolojidir (Slunský 2007).

Mikro mekanik işleme yöntemi, iş parçalarını yüksek hızda ve yüksek hassasiyette üretmeyi mümkün kılmaktadır. Minyatür sistemler, kolay taşınabilme ve kullanılabilme, düşük malzeme ve güç tüketimi, küçük numune gereksinimleri, yüksek ısı transferi ve daha iyi süreç entegrasyonu ve otomasyonu sağlayabilmektedir (Hasçelik ve Aslantaş 2018a).

Mikro mekanik işleme teknikleri genel olarak mikro tornalama, mikro frezeleme ve mikro delme olarak sınıflandırılır. Mikro tornalama, farklı uygulamalarda kullanılmak üzere mikro elektrotlar, mikro miller gibi silindirik geometriye sahip mikro bileşenleri üretmek için kullanılır.

2.2.1 Mikro Tornalama

Kendi ekseninde dönmekte olan iş parçası üzerinden ekseni doğrultusunda hareket eden bir kesici takım yardımıyla mikro boyutlarda talaş kaldırma işlemine mikro tornalama

denir. Mikro silindirik parçaların üretiminde kaynak kullanımı ve zaman açısından yüksek verimlilik elde edilen mikro tornalama, aslında geleneksel tornalama işleminin mikro seviyede ölçeklendirilmiş şeklidir (Resim 2.1). Bu ölçeklendirmeden kaynaklı fiziksel değişimler talaş kaldırma mekanizmasında birçok farklılığa sebep olmaktadır. Genel olarak talaş kaldırma prensibi aynı olsa da boyut küçüldükçe kesme kuvvetlerinin birbirleri arasındaki oran değişmektedir. Özellikle mikro boyutlara inildiğinde Ff/Fc oranı artmaktadır.

Geleneksel tornalamada kullanılan kesici takımlara ait burun yarıçapları 0,2 ile 1,6 mm arasında değişmekte iken, mikro tornalamada burun yarıçapı daha küçük kesici takımlar kullanılır. Bu nedenle karşılaşılan problemler; yüksek kesme kuvvetleri, boyut etkisinden dolayı oluşan titreşimler ve minimum talaş kalınlığına bağlı negatif talaş açısı etkisidir. Özellikle burun yarıçapına bağlı olarak talaş derinliği ve kenar yarıçapına bağlı olarak ilerleme hızının seçimi hem kesme kuvvetlerini hem de yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Aslantaş ve Şahan 2017).

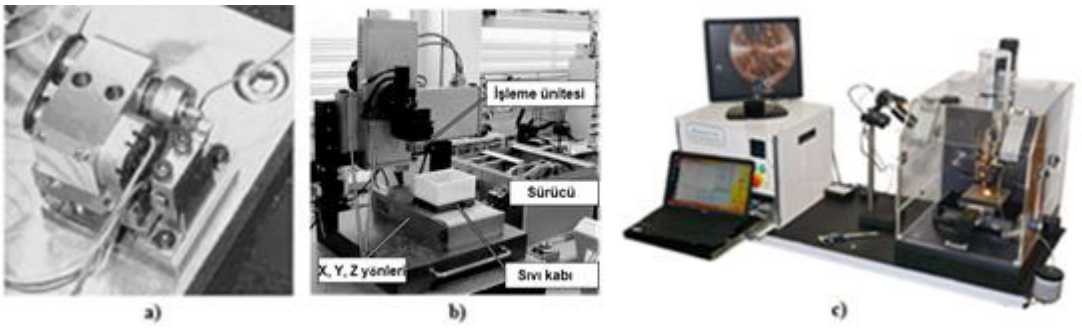
Resim 2.1 Konvansiyonel torna tezgahının ölçeklendirilerek mikro parça işleme seviyesine indirilmiş mini torna tezgahı.

Mikro tornalama işleminde karşılaşılan problemler; 1) İş parçasının çapının küçük olması eğilmeye neden olur, 2) Eğilmenin etkisiyle kaldırılan talaş kesiti değişir, 3) Minimum talaş derinliğinde ve ilerleme hızlarında kesme yerine, kazımanın oluşmasıdır (Aslantaş ve Hasçelik 2018b). Tüm bu problemler, çalışmanın boyut etkisi kısmında detaylı olarak ele alınmıştır.

2.2.2 Mikro Kesme İşleminde Kullanılan Takım Tezgahları

Günümüz teknoloji çağında birçok yeni cihaz üretilmekte ve buna paralel olarak da mevcut cihazlar ihtiyaçlar doğrultusunda ve daha ergonomik kullanım sağlamak amacıyla küçülmektedir. Bu cihazlarda kullanılan parçalar, bazen bir milimetreden de daha küçük olabilmektedir. Bu kadar küçük boyutlu parçanın üretimi için küçük ve yüksek hassasiyete sahip tezgahlar ve kesici takımlar gerekmektedir. Bu gereksinim gelişen teknoloji ile her geçen gün artmaktadır. Küçük ölçekli ekipmanların geleneksel tezgahlarda üretimi zor olduğundan fazla tercih edilmemektedir. Haliyle mikro ekipman üretiminde mikro işleme tezgahları kullanılmakta (Resim 2.2) ve zamanla daha çok tercih edilir hale gelmektedir (Chae *et al.* 2006).

Mikro mekanik yöntemle kesme işlemi yapan tezgahların en önemli avantajı, taşınabilir ve kullanılabilirliğinin kolay olmasıdır. Fakat gövde yapısının küçük olması, beraberinde rijitlik problemlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Özellikle yüksek devir sayılarında titreşimsiz çalışmaları tezgahın gövde yapısıyla doğrudan ilişkilidir (Okazaki *et al.* 2004).



Resim 2.2 Ticari olmayan portatif tip mikro işleme tezgahları, a) Mikro torna (Tanaka 2011), b) Çok fonksiyonlu mikro freze tezgahı (Okazaki *et al.* 2004), c) CNC Mikro işleme tezgahı (İnt. Kyn. 1, Çelik 2017).

Mikro mekanik işleme tezgahlarını, yüzeysel olarak geleneksel tezgahların daha küçük boyutlara indirgenmiş hali olarak tanımlasak da, teknik olarak bazı farklı özelliklere sahiptirler. Fener milinin doğal frekanslarla daha yüksek devir sayılarında olması ve daha hassas kontrol ünitesi kullanılması, bu farklılıklardandır. Kesme işlemi esnasında oluşan titreşim genliklerinin daha az olması, mikro mekanik işleme tezgahlarının geleneksel tezgahlardan farklı olan bir diğer tarafıdır. Kullanılan step/servo motorlar

çok kısa sürede yüksek hızlara ulaşabilmektedir. Bununla birlikte sahip oldukları esnek tasarımları ile termal deformasyonu azaltarak iş parçalarını daha kaliteli ve hassas olarak işleyebilmektedirler (Okazaki *et al.* 2004, Chae *et al.* 2006).

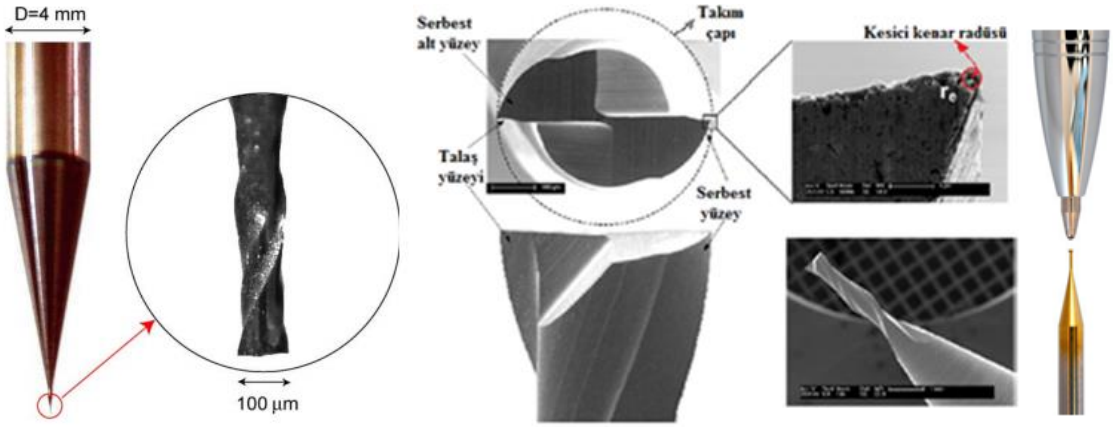
Hassas parçaların üretimi için geliştirilmiş mikro mekanik işleme tezgahları genellikle optik, kuyumculuk ve implant sektöründe kullanılmakla beraber, mikron boyutunda ekipman ihtiyacı olan her sektörde kullanılabilir. Ultra hassas mikro kesme özelliğine sahip bu tezgahlar (Resim 2.3), her geçen gün sektörde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Japonya'daki araştırma enstitüleri, konsorsiyumları ve özel sektör tarafından gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla yeni tezgahlar üretilmeye ve piyasada yerini almaya devam etmektedir (Tanaka 2001, Çelik 2017).

Resim 2.3 Ticari tip mikro tezgâhlar, a) (İnt. Kyn. 2), b) (İnt. Kyn. 3), c) (İnt. Kyn. 4), d) (İnt. Kyn. 5), e) (İnt. Kyn. 6).

2.2.3 Mikro Kesici Takımlar ve Takım Kaplaması

Mikro işleme takımlarının geometrik tasarımı ve imalatında kullanılan teknoloji, ürün kalitesini doğrudan etkilediği için hem araştırmacılar hem de imalatçı firmalar için çok önemli bir araştırma konusu olmuştur (Venkatesh *et al.* 2016). Kesici takım tasarımı üzerine yapılan çalışmalarda takım rijitliğini ve takım ömrünü artırmak temel amaçtır.

Mikro kesici takımlar, kesme işleminin performansını ve karakteristiklerini tayin etmek adına son derece önemlidir. Kesici takım malzemesi ve geometrisi, talaş oluşumunu, takım aşınmasını, ısı üretimini ve yüzey kalitesini büyük ölçüde etkiler. Bu sebeple mikro ölçekli ürünlerin ihtiyaçlar doğrultusunda istenilen geometrik boyut ve özelliklerde üretilmesi mikro kesici takımların işleme performansına bağlıdır. İşleme performansı ve takım ömrü, kesici takımın rijitliğine, kesici takım malzemesine ve kaplama malzemesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Chae *et al.* 2006, Okazaki *et al.* 2004). Mikro kesme işlemi, yüksek hızlarda gerçekleştirildiğinden, mikro takımların aşınma hızı yüksektir. Bu sebeple mikro takımların kesme işlemi esnasında açığa çıkan sıcaklık ve sürtünme kuvvetlerine dayanabilecek rijitliğe sahip olması büyük önem arz etmektedir. Takım rijitliği ise takım malzemesi içeriği, kullanılan bağlayıcı oranı ve kaplama malzemesinin türüne bağlıdır. Bu sebeple kesici takımlarda takım malzemesi olarak genelde tungsten karbür, elmas, kübik bor nitrür (CBN) ve çok kristalli elmas (PCD) kullanılır. Hali hazırda günümüz teknolojisinde, tungsten karbür kesici takımlar, sektörde en çok kullanılan kesici takım malzemesidir. Maliyetinin diğer takım maliyetlerine göre düşük olması ve üretiminin daha kolay olması bunun nedenidir. Bununla birlikte aşınma dayanımı ve sertliği sayesinde yüksek sıcaklık ve korozyon gibi zor koşullar altında kullanılmaktadır. Resim 2.4'de ticari amaçla üretimi yapılmış bazı kesici takım görselleri sunulmuştur.

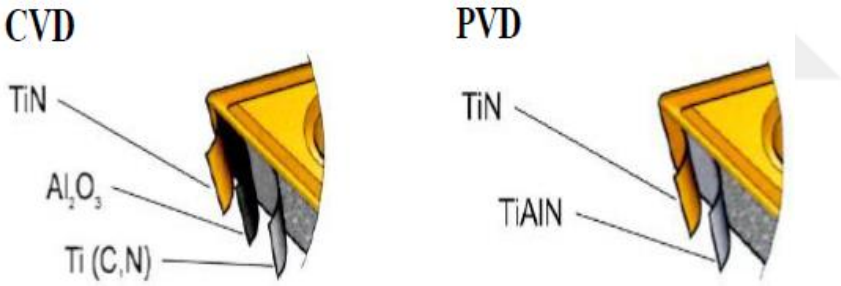


Resim 2.4 Tungsten Karbür mikro freze takımı (Chae *et al.* 2006). Mikro kesici takım ve SEM fotoğrafı (Mativenga *et al.* 2013).

Günümüzde kesme işlemi operasyonlarının yaklaşık %80'i kaplamalı kesici takımlarla yapılmaktadır. Bu kaplamalı kesici takımlar; titanyum karbür (TiC), titanyum alüminyum nitrür (TiAlN), titanyum nitrür (TiN), titanyum karbon nitrür (TiCN) ve

alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi farklı kaplama malzemeleri ile ağırlıklı olarak kimyasal buhar çökertme (CVD) ve fiziksel buhar çökertme (PVD) yöntemleri kullanılarak kaplanmaktadır (Rech 2006). Kesici takıma uygulanan kaplama malzemesi kesme performansını büyük ölçüde etkilediği gibi takım ömrünü de uzatmaktadır.

Genelllikle imalat sektöründe kullanılan kesici takımların hemen hemen hepsi kaplanmıştır. Bu kaplama bazen tek katmanlı olabildiği gibi birden fazla kaplananın da yapıldığı uygulamalar bulunmaktadır (Resim 2.5). Kaplama malzemesinin kesme performansı ve takım ömrü üzerindeki etkisini göstermek adına yapılmış çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür (Jindal *et al.*1999, Thepsonthi and Özel 2013, Gürbüz *et al.* 2011, Gökkaya *et al.* 2004). Bunlardan Jindal ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, tornalamada farklı kaplama malzemeleri ile PVD yöntemi ile kaplanmış kesici takımların performansı incelenmiştir. Bu kesici takımlar ile farklı iş parçası malzemeleri üzerinde düşük ve yüksek kesme hızlarında kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. En iyi performansın TiAlN kaplanmış kesici takım olduğu ifade edilmiştir (Jindal *et al.*1999).



Resim 2.5 İki farklı kesici takım ve kaplama özellikleri (Gürbüz *et al.* 2011).

2.3 Mikro Ölçekte Talaş Kaldırma

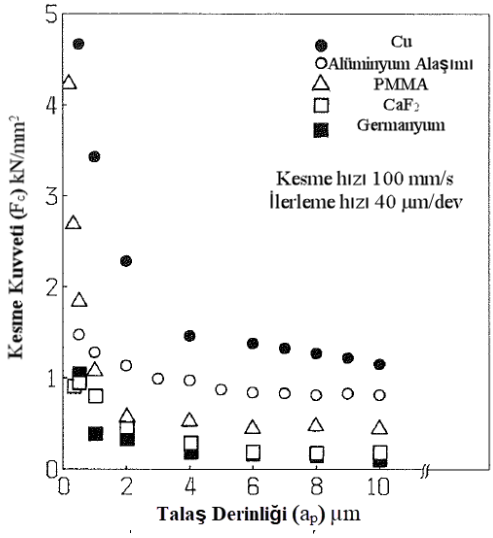
2.3.1 Boyut Etkisi

Konvansiyonel tornalama işleminin minyatürleştirilmiş şekli olarak tanımladığımız mikro tornalama ile konvansiyonel tornalama arasındaki en temel unsur, iki işlem arasındaki boyut farklılığıdır. Kesme işlemi boyutsal olarak küçüldüğünde, mikro tornalamada bu işlemi analiz etmek daha zor ve karmaşık bir hal almaktadır (Ucun 2013).

Yaygın olarak kesme derinliğindeki azalma ile kesme kuvvetlerinin artışı olarak bilinen mikro işlemedeki boyut etkisi ilk olarak 1952'de dillendirilmiştir (Backer *et al.* 1952). Bu etkiler, tornalama işlemlerinde Masuko (1956) ve taşlama işlemlerinde Finnie (1963) tarafından da ifade edilmiştir. Birçok araştırmacı (Aramcharoen and Mativenga 2009, Shaw 2003, Vollertsen *et al.* 2009, Nakayama and Tamura 1968, Lucca *et al.* 1991) nedenlerini araştırmış ve araştırmaya da devam edilmektedir. Esas olarak bunun nedeni, iki farklı unsura bağlanmaktadır. Birincisi; yüksek şekil değiştirme hızlarında iş parçasında meydana gelen pekleşmedir. İkincisi ise; kesilmemiş talaş kalınlığının, kesici kenar yarıçapına oranının etkisidir.

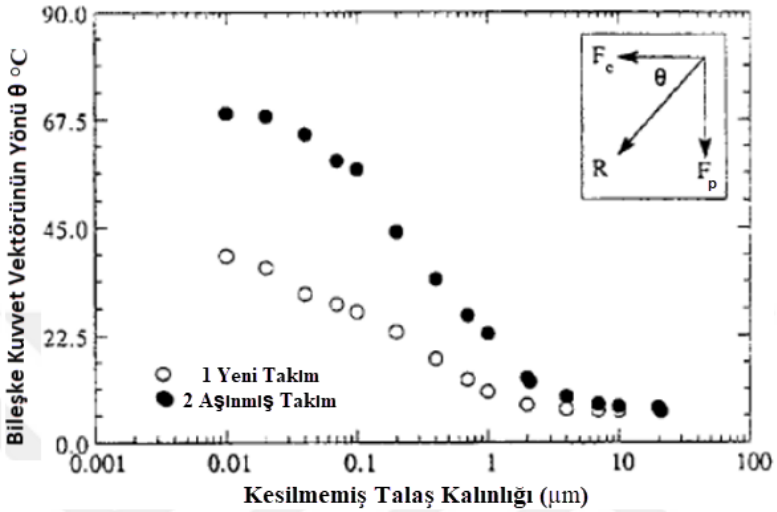
Talaş kaldırma işlemi makrodan mikroya doğru küçültüldükçe, kesici uç geometrisi, talaş kaldırma mekanizmasında önemli bir etkendir. Kesilmemiş talaş kalınlığının kenar yarıçapından küçük olması halinde, boyut etkisinden dolayı spesifik kesme enerjisinde doğrusal olmayan bir artış olur (Liu *et al.* 2005).

Furukawa ve Moronuki (1988), farklı iş parçaları için yüksek hızda mikro kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler sonucunda, kritik bir talaş derinliğine kadar, talaş derinliği azaldıkça kesme kuvvetinin neredeyse sabit kaldığı, kritik bir talaş derinliğinden sonra ise, talaş derinliği azaldıkça, kesme kuvvetlerinde ani bir artış olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.3).



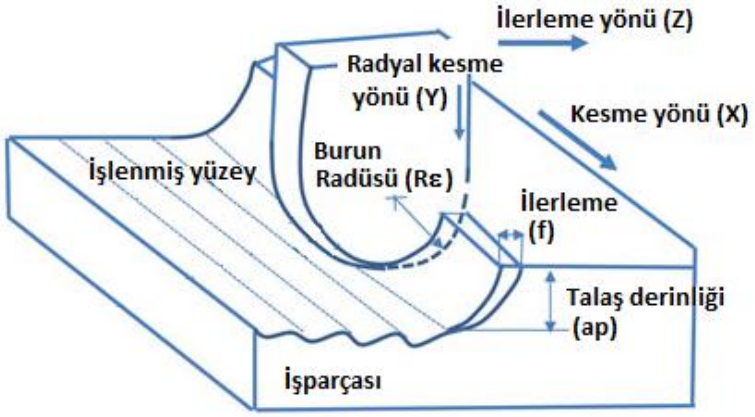
Şekil 2.3 Mikro kesme işleminde kesme kuvvetlerinin değişimi (Furukawa and Moronuki 1988).

Mikro kesme işleminde düşük talaş kalınlıklarında θ açısı artmaktadır (Şekil 2.4). Bu da mikro kesme işleminde boyut etkisinden dolayı kesilmemiş talaş kalınlığı azaldıkça pasif kesme kuvvetinin, asıl kesme kuvvetine göre artışının daha fazla olmasına sebep olmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Bileşke kuvvet vektörünün değişimi (Furukawa and Moronuki 1988).

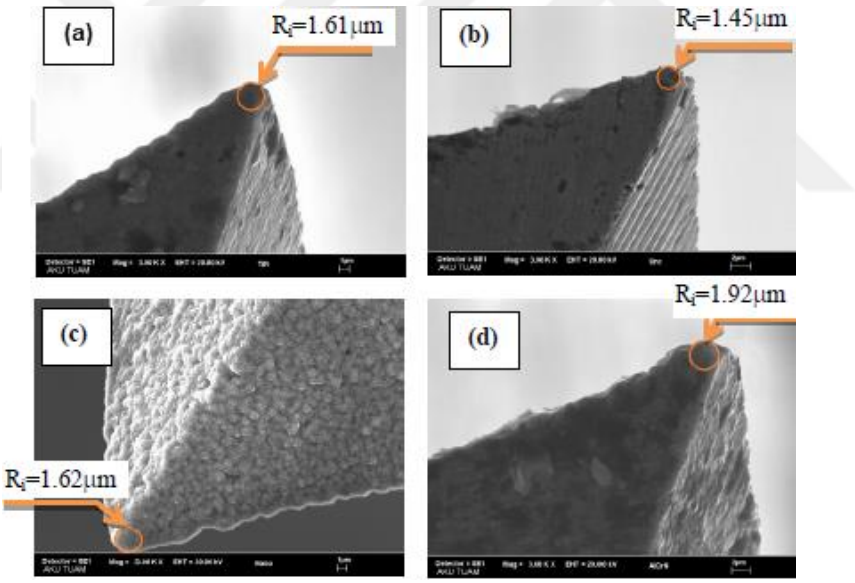
Mikro tornalama işleminde talaş derinliği, burun yarıçapından dahi daha küçüktür. Dolayısıyla kesici ucun burun kısmı iş parçasına daha az temas etmekte bu da kesilmemiş talaş kalınlığını etkilemektedir. Kartezyen koordinat sistemi takım ve iş parçası göreceli hareketine göre tanımlanır. Kesme yönü x ekseni olmak üzere, ilerleme yönü z ekseni ve radyal yön y ekseni kabul edilir. Şekil 2.5'de tipik bir mikro tornalama işlemi 3 boyutlu olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Mikro tornalama işlemi (Jagadesh and Samuel 2015).

2.3.2 Kenar Yarıçapının Önemi

Mikro tornalamada kesici takıma ait kenar ve burun yarıçapı çok küçük olduğundan kesilmemiş talaş kalınlığı ve derinliği ile kıyas edilebilmektedir. Şekil 2.6'da Hopa (2016)' nın yapmış olduğu çalışmada kullandığı her bir takıma ait kesici takım kenar yarıçapı SEM görüntüleri gösterilmiştir. Bu çalışmada, mikro kesme işleminde farklı kaplama malzemesi ve kenar yarıçaplarına sahip takımların kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Konvansiyonel kesme işleminde ilerleme hızı arttıkça kesme kuvvetleri artmaktadır fakat mikro kesme işleminde boyut etkisinden dolayı kritik bir değerden sonra ilerleme azaldıkça kesme kuvvetlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu da kesici takım kenar yarıçapının, ilerlemeye yakın değerler almasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada Ti6Al4V iş parçasını kesme işleminde, kritik ilerleme hızının yaklaşık 0,5 µm/dev olduğu ifade edilmiştir (Hopa 2016).

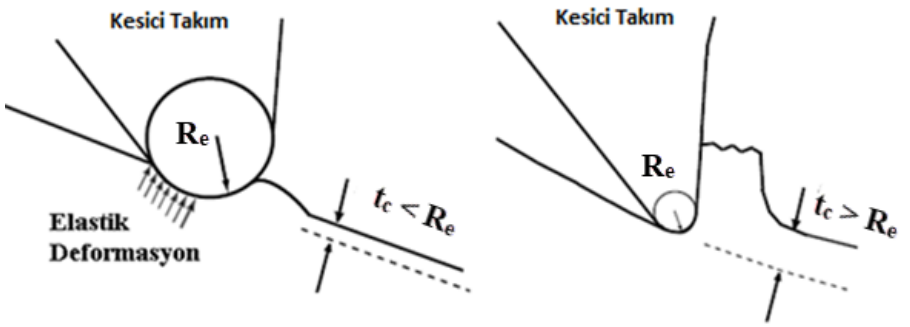


Şekil 2.6 a) TiN kaplı takım kenar yarıçapı, b) Kaplamasız takım kenar yarıçapı, c) NCD kaplı takım kenar yarıçapı, d) AlCrN kaplı takım kenar yarıçapı (Hopa 2016).

Talaş kaldırma işlemi yapılan iş parçası boyutunun küçülmesi, haliyle kaldırılan talaş derinliğinin de küçülmesine neden olmaktadır. Kesici takım kenar yarıçapının kaldırılan talaş derinliğinden büyük olması yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri açısından konvansiyonel tornalama işlemine göre farklı sonuçlara sebep olmaktadır. Bu sonuçlardan en önemlisi; kenar yarıçapının büyümesi, negatif talaş açısı etkisi oluşturarak kesme işlemini zorlaştırır ve beraberinde de yüzey kalitesini bozarak çapak

oluşumunu arttırır (Aslantaş ve Şahan 2017).

Mikro tornalama ile kesme işleminde, iş parçasının küçülmesiyle talaş derinliği de küçülmektedir. Haliyle kesici ucun kenar yarıçapı konvansiyonel tornalama işlemine göre daha çok önem kazanmaktadır. Mikro tornalamada kesici takım kenar yarıçapı, talaş oluşumunun düzgün bir şekilde meydana gelebilmesi için oldukça önemlidir (Chae *et al.* 2006). Konvansiyonel tornalama işleminde, iş parçasından kaldırılan talaş derinliği, kesici takımın kenar yarıçapından fazlasıyla büyük olduğu için kesme işlemi sonucunda düzgün bir talaş oluşumu sağlanabilmektedir. Mikro tornalamada ise kaldırılan talaş derinliği ve ilerleme hızı, kesici takım kenar yarıçapına çok yakın ya da küçük bir değerde olduğu için talaş oluşumunda farklı etkiler gözlemlenir (Bao *et al.* 2000; Kang *et al.* 2007). Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir; kesici takım talaş derinliğinin, kenar yarıçapından küçük olması durumunda, kesici takım kenarı, negatif bir talaş açısı etkisi oluşturmaktadır. Bir anlamda, kesici takım talaş kaldırmak için yeterli derinliğe ulaşamamaktadır. Bu durum, kesme işleminde kararsızlıklara sebep olmaktadır (Shimada *et al.* 1993, Yuan *et al.* 1996, Kim *et al.* 2002, Chae *et al.* 2006, Sun and Cheng 2010). Bu sebeple mikro tornalama işleminde düzgün bir talaş oluşumunun meydana gelmesi için talaş kalınlığının takım kenar yarıçapına oranının belirli bir değerin üzerinde olması gerekmektedir. Bu orana karşılık gelen talaş kalınlığı, minimum talaş kalınlığı olarak tanımlanmaktadır (Ikawa *et al.* 1992, Shimada *et al.* 1993, Yuan *et al.* 1996, Spath *et al.* 1999, Chae *et al.* 2006, Li 2009). Kenar yarıçapının talaş derinliğinden büyük olmasıyla kesme esnasında iş parçası yüzeyinde meydana gelen elastik geri esneme (Şekil 2.7), ilave kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu geri esneme miktarı malzemeden malzemeye göre değişebilir.

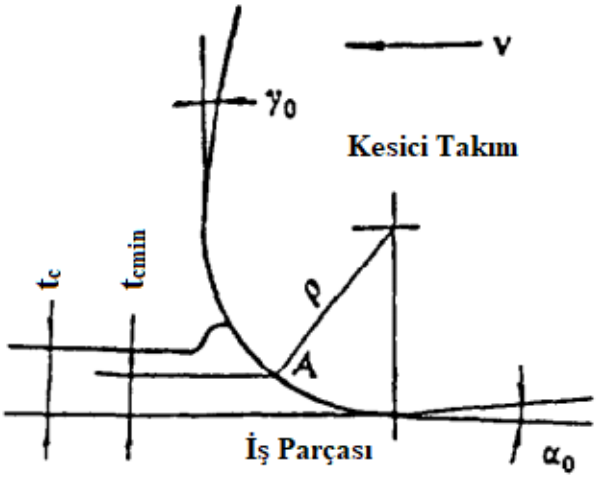


Şekil 2.7 Mikro ve geleneksel kesme işleminde kesici takım kenar yarıçapı ile talaş kalınlığının kıyaslanması (Dhanorker and Özel 2008).

2.3.3 Minimum Talaş Kalınlığı

Konvansiyonel tornalama işleminde, imalat sonrası ilave işlemlerle üretilen parçanın yüzey kalitesi artırılabilmektedir. Fakat mikro tornalamada, iş parçası ve takımın küçük yapısı ilave bir yüzey düzeltme işlemi için uygun olmayabilir. Dolayısıyla mikro tornalamada yüzey oluşumu için optimum şartların tanımlanması önemlidir. Yüzey kalitesini belirleyen en önemli unsur minimum talaş kalınlığıdır. Bu parametrenin yüzey kalitesi üzerindeki etkisinin ne derece önemli olduğunu ortaya koymak adına bir çok çalışma yapılmıştır (Yuan *et al.* 1996, Li *et al.* 2008, Bisacco *et al.* 2006, Shreyes and Melkote 2006, Vogler *et al.* 2004).

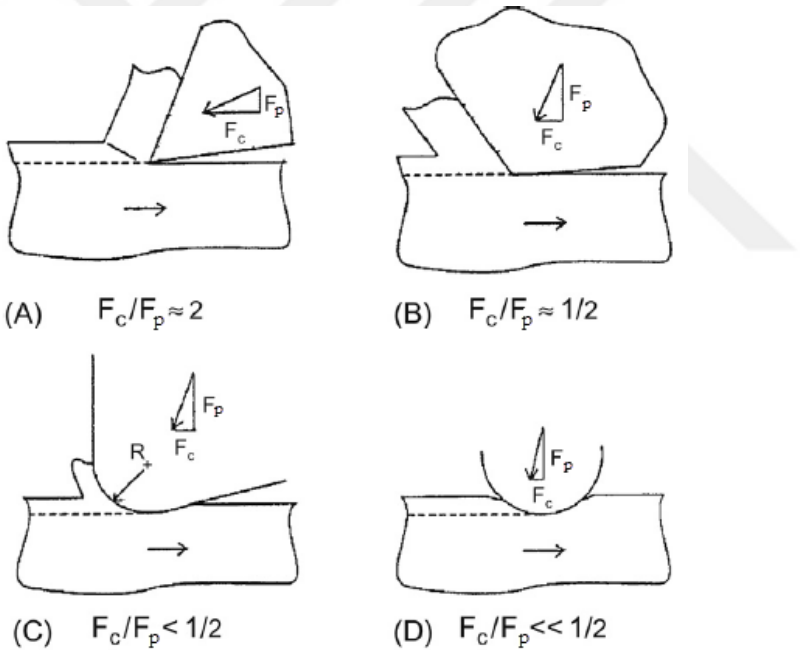
Yuan ve diğerleri (1996), elmas takımı keskinliğinin teorik ve deneysel olarak etkisini incelemiştir. Modellerinde (Şekil 2.8'da gösterildiği gibi) kritik bir A noktası tanımlamışlardır. Kesme işlemi sırasında, eğer talaş kalınlığı A noktasının üzerinde kalıyor ise talaş oluşumu gerçekleşeceği ifade edilmiştir. Eğer talaş kalınlığı, minimum talaş kalınlığının altında ise (yani A noktasının altında ise) talaş oluşumunun sağlıklı gerçekleşmeyeceği vurgulanmıştır (Yuan *et al.* 1996).



Şekil 2.8 Minimum talaş kalınlığı ile kenar yarıçapı arasındaki ilişki (Yuan *et al.* 1996).

Komanduri ve diğerleri (1971), tüm kesme kenarı yarıçapı ile talaş kalınlığı arasındaki ilişkiyi ifade etmek için dört farklı durumun ortaya çıkabileceğini ön görmüştür (Şekil 2.9). 1) Geleneksel kesme işlemi; kesme derinliği, takım kenar yarıçapına oranla çok büyük ve talaş açısı pozitiftir (Şekil 2.9a). Bu durumda, kesme kuvveti, pasif kuvvetin

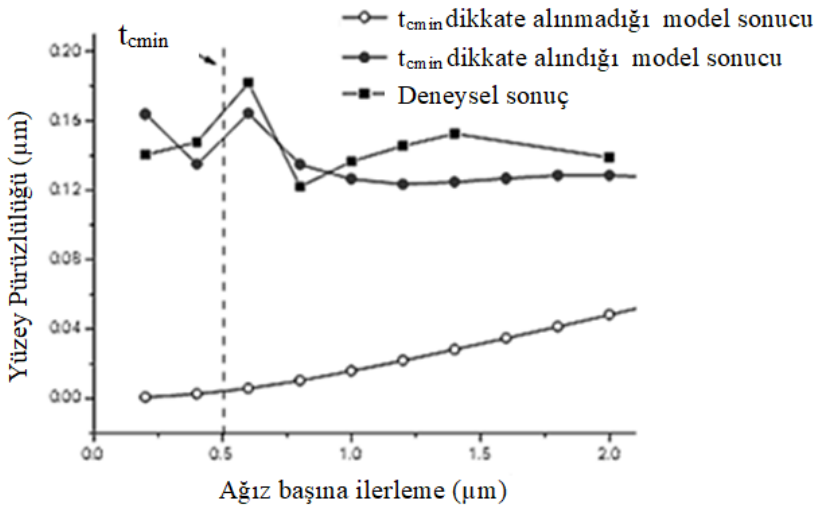
yaklaşık iki katıdır ve talaş esas olarak birinci deformasyon bölgesinde kayma deformasyonu ile oluşturulur. 2) Negatif talaş açısına sahip kesici ile kesme (daha çok taşlama işlemi kastedilmiştir) (Şekil 2.9b). Kesme derinliği aşındırıcı tanenin kesme kenarı yarıçapından çok daha büyüktür ve aşındırıcı çok büyük bir negatif talaş açısına (yaklaşık -60°) sahiptir. Bu durumda, kesme kuvveti, itme kuvvetinin yaklaşık yarısı kadardır. 3) Ultra hassas işleme veya mikro işleme, talaş kalınlığı, kenar yarıçapı ile aynı veya daha düşüktür (Şekil 2.9c). Talaş açısı büyük bir negatif değere eşdeğerdir. Bu durumda kesme kuvveti, itme kuvvetinin yarısından daha küçüktür. 4) Batma-kayma, talaş kalınlığı takım kenar yarıçapından çok daha küçüktür ve çok büyük bir negatif talaş açısına sahiptir (-90°'ye yakın) (Şekil 2.9d). Bu durumda, kesme kuvveti, baskı kuvvetinden çok daha küçüktür ve malzeme, yüksek basınç nedeniyle çok büyük bir plastik deformasyona sahiptir.



Şekil 2.9 Kesme derinliklerine göre farklı kenar yarıçaplarına sahip kesici takımlarla yapılan kesme işlemindeki kuvvetlerinin değişimi (Grzesik 2017). a) Fc/Fp=2, b) Fc/Fp=1/2, c) Fc/Fp<1/2, d) Fc/Fp<<1/2.

Minimum talaş kalınlığı sadece kesme kuvvetlerini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda yüzey kalitesini de etkilemektedir. Şekil 2.9'dan da görüldüğü üzere negatif yönde artan talaş açısı, kesme işlemini güçleştirmektedir. Bu da yüzeyde hem elastik hem de plastik deformasyona neden olmaktadır. Minimum talaş kalınlığının altında ve ağız başına ilerleme değerinde, pürüzlülük değerinin arttığı ifade edilmiştir (Weule *et al.* 2001,

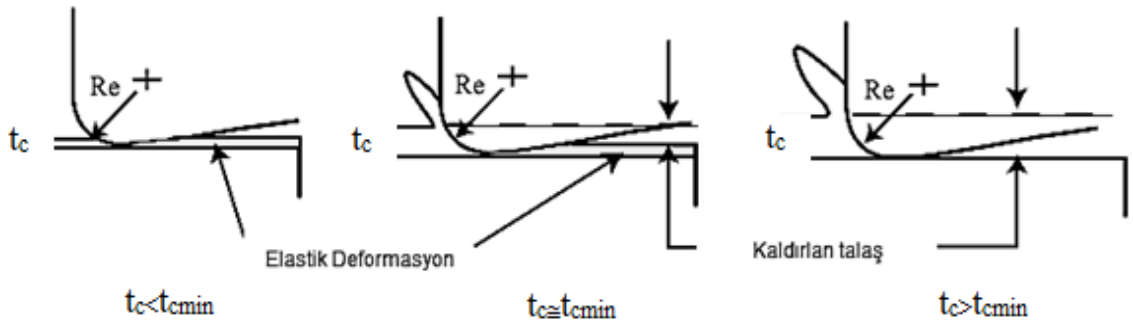
Vogler *et al.* 2004, Takacs *et al.* 2003, Aramcharoen and Mativenga 2008, Chae *et al.* 2006). Bu konu üzerine yapılan bir çalışmada Vogler ve diğerleri (2004), minimum talaş kalınlığı miktarına bağlı olarak bir yüzey pürüzlülüğü modeli geliştirmişler ve minimum talaş kalınlığı altındaki ilerleme değerlerinin, işlenen yüzeyin kalitesini olumsuz etkilediğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, minimum talaş kalınlığı altındaki parametrelerde iş parçasında görülen deformasyon (ovalama/kazıma) şeklinden dolayı, malzemenin yüzeyinde ve yüzey altında aşırı yük ve kalıntı gerilmeleri iş parçası yüzeyi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmaktadır. Bu sonuçlar, Son ve diğerleri (2005)'nin yapmış olduğu bir çalışmayla da desteklenmektedir. Bu sonuçlara paralel bir diğer bulgu ise; Li ve diğerleri (2008)'nin yapmış oldukları çalışma gösterilebilir. Literatürde, özellikle düşük ilerleme değerlerinde yani minimum talaş kalınlığının altındaki parametrelerde, daha pürüzlü bir yüzey oluşumu gözlenmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Minimum talaş kalınlığından küçük ve büyük ilerleme değerlerinde oluşan pürüzlülük değerleri (Li *et al.* 2008).

Mikro mekanik kesme işlemlerinin tümünde minimum talaş kalınlığından dolayı karşılaşılan iki temel deformasyon mekanizması mevcuttur. Bunlardan biri; talaş kalınlığının, minimum talaş kalınlığından büyük olduğu durumda ($t_c > t_{cmin}$) uniform bir talaş oluşumunun meydana geldiği plastik deformasyondur (Şekil 2.11). Diğeri ise; talaş kalınlığının, minimum talaş kalınlğından küçük olması halinde ($t_c < t_{cmin}$) düzgün bir talaş oluşumunun görülmediği daha ziyade kazıma mekanizmasının hakim olduğu elastik-plastik deformasyondur (Şekil 2.11) (Chae *et al.* 2006). Kazıma ağırlıklı bir

kesme işlemi; kesme kuvvetlerinin artmasına ve bazen bileşke kuvvetinin yönünün değişmesine (Şekil 2.11), yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve çapak oluşumuna neden olduğu bir çok çalışmada vurgulanmaktadır (Yuan *et al.* 1996, Chae *et al.* 2006, Filiz *et al.* 2007). Dolayısıyla mikro kesme işleminde optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi son derece önem arz etmektedir.



Şekil 2.11 Minimum talaş kalınlığı etkisinin şematik gösterimi (Chae *et al.* 2006).

Deneysel çalışmaların yanı sıra, minimum talaş kalınlığının analitik olarak tespit edilmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur. Son ve diğerleri (2005), sürtünme katsayısına dayanarak minimum talaş kalınlığını belirlemek için bir algoritma önermiştir. Bu çalışmada, kesme kenar yarıçapının ve sürtünme katsayısının minimum talaş kalınlığını belirleyen temel faktörler olduğu iddia edilmiştir. Kesicinin önündeki malzemenin iki türe ayrıldığı varsayılmaktadır. Bunlar; talaşı oluşturan kusursuz plastik ve kesme işlemi sonrasında geri esneyen kusursuz elastiktir. Kenar yarıçapı bölgesindeki kesme kuvvetleri modellenmiş ve minimum talaş kalınlığının sürtünme katsayısı ile ilişkisi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

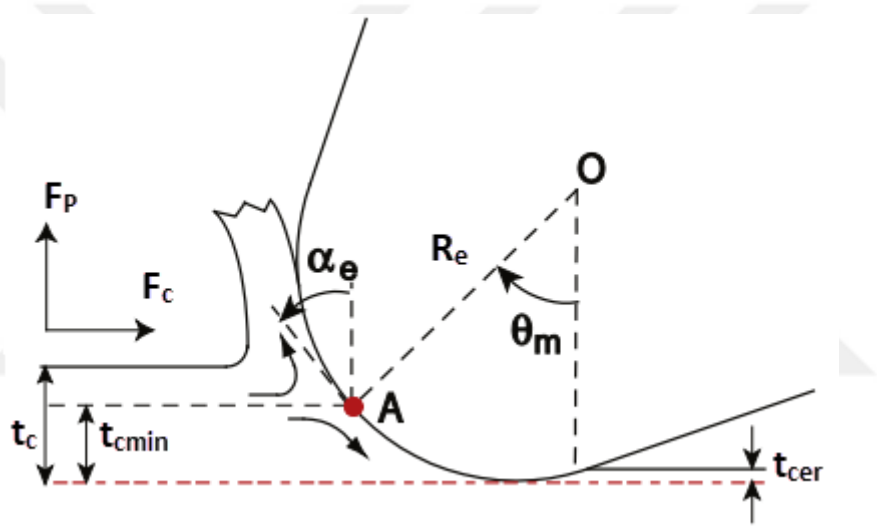
$$t_{cmin} = R_e\left(1 - cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2}\right)\right) \qquad (2.1)$$

Burada β takım talaş ara yüzeyindeki sürtünme açısını, R_e ise kenar yarıçapını temsil etmektedir. Bu denklem malzeme ve işleme koşullarını içermemektedir ama deneysel koşullarla benzer sonuçlar gösterdiği ifade edilmektedir. Liu ve diğerleri (2005) tarafından yapılan çalışmada da minimum talaş kalınlığı için bir analitik model geliştirilmiştir. Çalışmada 1040 çeliği ve Al6082-T6 alaşımı kullanılmış ve farklı kesme parametreleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen analitik model Denklem 2.2'de verilmektedir.

$$\lambda_n = \frac{tc_{min}}{R_e} = 0{,}5\,\frac{\tau_a}{\sigma} \qquad (2.2)$$

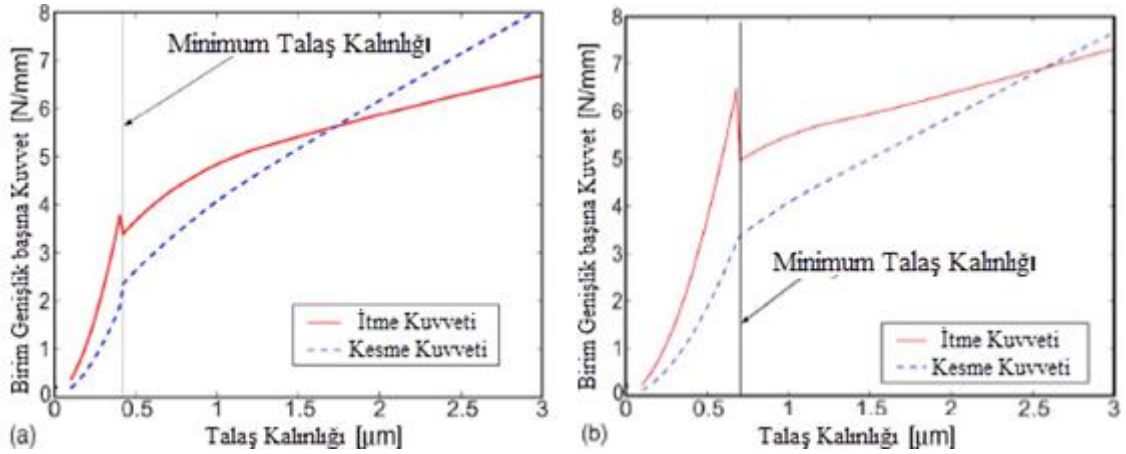
Malekian ve diğerleri (2012), minimum talaş kalınlığının malzeme özellikleri ve takım geometrisi ile ilişkisini analitik olarak incelemişlerdir. Şekil 2.12'de gösterilen talaş oluşumunu simüle etmek için durma noktası (A noktası) adını verdikleri kavramı ortaya atmışlardır. Bu nokta minimum kesme enerjisi teorisi baz alınarak çözülmüş ve aşağıdaki son şekli elde edilmiştir.

$$t_c = R_e\,(1 - \cos\theta_m) \qquad (2.3)$$



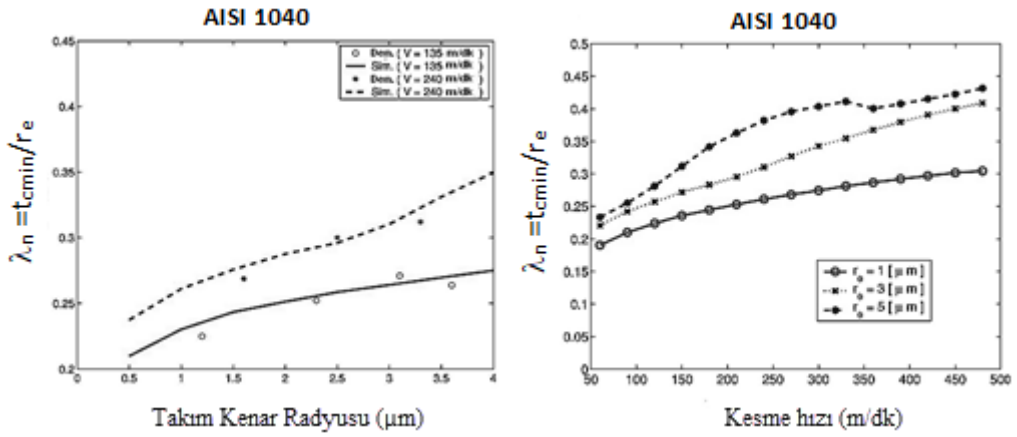
Şekil 2.12 Kenar yarıçapının talaş kalınlığından büyük olduğu kesme işlemi (Malekian *et al.* 2012).

Minimum talaş kalınlığının belirlenmesi zordur. Bu sebeple araştırmacılar, deneysel ve nümerik çalışmalarla minimum talaş kalınlığını tespit etmeye çalışmışlardır (Weule *et al.* 2001, Schmidt *et al.* 2002, Kim *et al.* 2002, Vogler *et al.* 2004a, Vogler *et al.* 2004b, Schmidt and Tritschler 2004, Kim *et al.* 2004). Vogler ve diğerleri (2004a), çelik bir malzeme için, sonlu elemanlar metodu kullanarak minimum talaş kalınlığını elde etmişler ve minimum talaş kalınlığının perlit ve ferrit malzemeler için sırasıyla, kesici takım kenar yarıçapının 0,2 ve 0,3 katı olduğunu söylemişlerdir (Şekil 2.13).



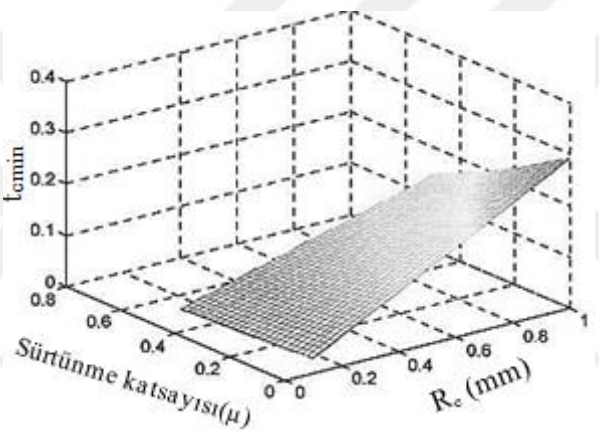
Şekil 2.13 Perlit (a) ve ferrit (b) malzemeler için talaş yükü/kuvvet ilişkisi (Jun *et al.* 2006).

Minimum talaş kalınlığı, kullanılan iş parçası malzemesine ve kesici takım kenar yarıçapına bağlıdır (Yuan *et al.* 1996). Liu ve diğerleri (2006)'de bu durumu göz önünde bulundurarak minimum talaş kalınlığının, işlenen parçanın özellikleriyle olan ilişkisini araştırmıştır. AISI 1040 ve Al6082-T6 malzemeleri üzerinde yaptığı deneysel ve analitik çalışmada, AISI 1040 çeliği için t_{cmin}/r_e = 0,2-0,4 arasında olduğunu, Al6082-T6 malzemesi için ise; t_{cmin}/r_e = 0,4 olduğunu elde etmişlerdir. Bu elde edilen sonuçların, literatürde benzer malzemelerle yapılan çalışmalardaki sonuçlarla da iyi bir uyum içinde olduğu vurgulanmıştır (Şekil 2.14). Yuan ve diğerleri (1996) ise; alüminyum alaşımının mikro işlenmesinde minimum talaş kalınlığı değerini deneysel olarak tanımlamışlardır. Bu çalışma neticesinde, minimum talaş derinliğinin kesici takım kenar yarıçapının %20' si ile %40'ı arasında olduğunu tahmin etmişlerdir.



Şekil 2.14 Takım kenar yarıçapı ve kesme hızına bağlı olarak minimum talaş kalınlığının değişimi (Liu *et al.*2006).

Minimum talaş kalınlığı ile ilgili Son ve diğerleri (2005)'nin yaptığı çalışmada, bu parametrenin iş parçası malzemesi ve kesici takım kenar yarıçapının haricinde, kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünme koşullarından da etkilendiği ileri sürülmüştür. Son ve diğerleri (2005), tek kristal yapılı elmas bir kesici takımla alüminyum, pirinç ve bakır malzemeleri üzerinde deneysel ve teorik bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, minimum talaş kalınlığının sırasıyla 0,09, 0,1 ve 0,12 mm olduğu teorik sonuçlardan elde edilmiştir. Bu teorik sonuçların deneysel verilerle de uyum içinde olduğu söylenmiştir. Ayrıca, minimum talaş kalınlığının sürtünme katsayısı ve kesici takım kenar yarıçapı ile ilişkili olduğu ve minimum talaş kalınlığında, yüzey özelliklerinin iyileştiği çalışmada belirtilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Minimum talaş kalınlığının sürtünme katsayısı ve kesici kenar yarıçapı ile ilişkisi (Son *et al.* 2005).

2.4 Mikro İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey özellikleri mekanik yöntem ve optik yöntem olmak üzere iki farklı yoldan tayin edilebilmektedir. Mekanik ve optik yöntem arasındaki ilişkiyi tanımlayan çok sayıda makale ve kitaba rastlamak mümkündür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü doğrudan bir yüzeyin dokusunu ölçer ve yüzey dokusunu profil grafiği şeklinde temsil eder. Yüzey pürüzlülüğü, bir 2D çizgi ölçümünden veya bir 3D yüzey ölçümünden elde edilebilir. Yüzey pürüzlülüğünü karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan parametreler, quadratik ortalama yüzey pürüzlülüğü Rq ve ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra gibi genlik parametreleridir.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L}\int_0^L z^2 dx} \quad (2.4)$$

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |z| dx \quad (2.5)$$

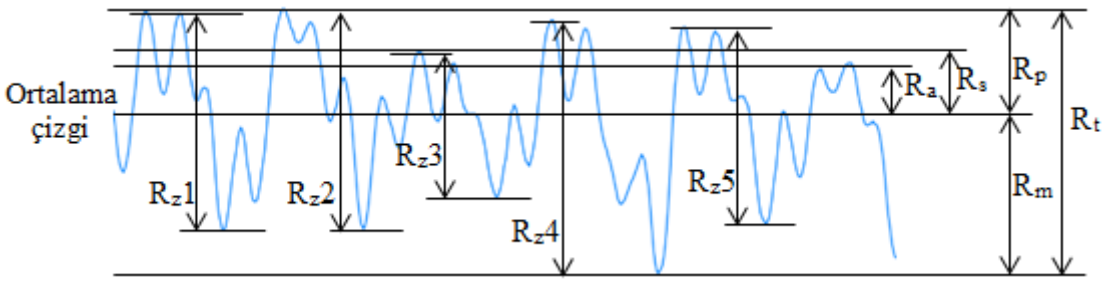
Burada z=f(x), birkaç yöntemle elde edilebilecek tek boyutlu bir yüzey profilidir, L değerlendirilmekte olan profilin uzunluğudur. Buradaki ölçüm çizgisel yapılan bir ölçümdür ve yüzeyin farklı yerlerinde farklı sonuç vermesi çok doğaldır. Bunun yerine incelenen yüzeyin üç boyutlu profili gözlemlenerek, alan yüzey pürüzlülük değerleri dikkate alınır. Yukarıda verilen Ra ve Rq'nun dışında yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde aşağıdaki parametrelerin de kullanıldığı görülmektedir (Şekil 2.16).

On nokta yüksekliği (Rz): Seçilen örnekleme uzunluğundaki en yüksek beş tepe noktası yüksekliği ile en derin beş dip arası mesafenin mutlak değerlerinin ortalamasıdır.

Maksimum profil yüksekliği (Rmax, Rt): Örnekleme boyunda dikkate alınan en yüksek tepe ve en düşük dip arasındaki dikey mesafe olarak tanımlanır.

Profil maksimum tepe yüksekliği (Rp): Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en yüksek tepe (çıkıntı) ile temas eden ve eksen çizgisine paralel olan çizgi ile ortalama çizgisi arasındaki mesafedir.

Profil maksimum dip derinligi (Rm, Rv): Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en dip girintiye temas edecek şekilde ve eksen çizgisine paralel olarak çizilen doğru ile ortalama çizgisi arasındaki mesafedir.



Şekil 2.16 Yüzey pürüzlülüğünü ifade eden sayısal parametreler.

Yüzey pürüzlülüğü temel anlamda üç farklı kesme karasteristiğine bağlıdır. Bunlar; kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğidir. Genel olarak; kesme derinliği ve ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü artarken, kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Ayrıca kesici takım geometrisi ve takım-iş parçası arasında kesme işlemi esnasında oluşan titreşim, yüzey pürüzlülüğüne doğrudan etki eder (Kirik 2010). Bunun dışında kesici takım burun yarıçapı ve kesici takımda meydana gelen aşınmaların da yüzey pürüzlülüğünü etkilediği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bazı çalışmalarda aşınmanın pürüzlülük değerini olumsuz etkilediği ileri sürülürken bazı çalışmalarda da bunun aksine yüzey kalitesini artırdığı ifade edilmiştir (Schmidt and Tritschler 2004, Fang *et al.* 2004, Filiz *et al.* 2007, Li *et al.* 2008).

Mikro tornalamada kesici takım ve iş parçası boyutları çok küçük olduğundan, iş parçası yüzeyindeki izler de çok küçüktür. Bundan dolayı mikro tornalama ile gerçekleştirilen kesme işlemi sonucu, iş parçasındaki yüzey pürüzlülük değerleri, ölçme hassasiyeti fazla olan bir cihazla tespit edilmelidir. Pürüzlülüğü 0,05 μm ve daha küçük olan değerlerin elde edildiği yöntemler hassas olarak değerlendirilmiştir (Kirik 2010).

Tornalamada, örneklemedeki maksimum mesafeyi ifade eden R_t değeri teorik olarak aşağıdaki denklemle ifade edilir;

$$Rt = f^2 / 8.R_\varepsilon \tag{2.6}$$

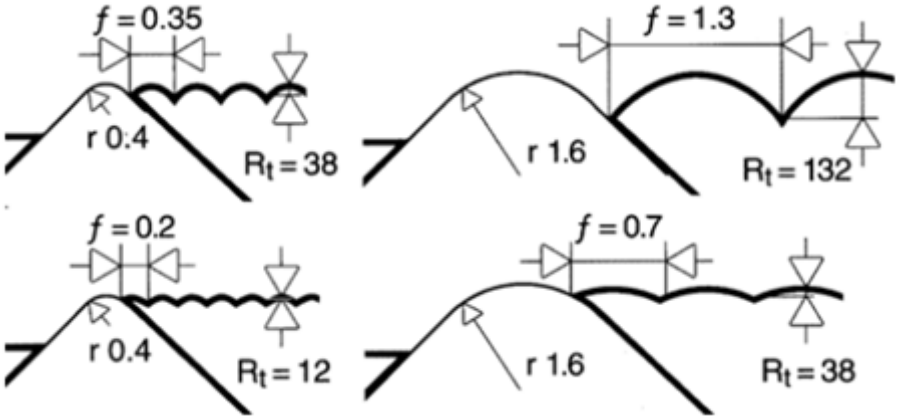
Örnekleme sınırındaki eksen çizgisinin altında ve üstünde oluşan profil sapmalarının ortalama değeri olan Ra ise, teorik olarak aşağıdaki denklemle formülize edilir;

$$R_a = 0.0642.\ f^2 / R_\varepsilon \tag{2.7}$$

Denklem (2.6) ve (2.7)'den anlaşılacağı üzere yüzey pürüzlülük değerleri ilerleme ve takımın burun yarıçapı ile direk bağlantılıdır.

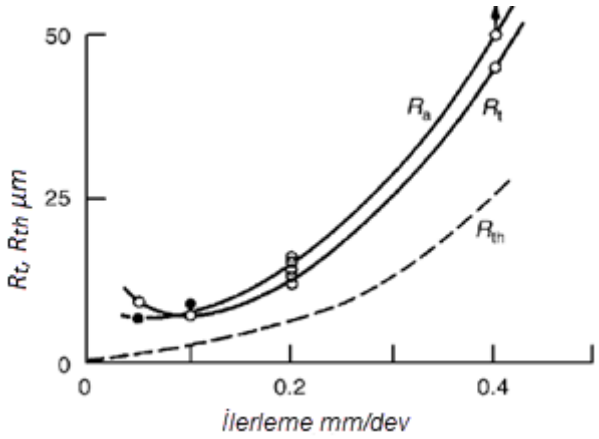
İlerleme ve kesici takım burun yarıçapının, teorik R_t yüzey pürüzlülük değerine etkisi Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Daha yüksek kesme hızlarında ve daha pozitif bir talaş açısı kullanıldığında R_t değeri artar. Kesme hızının artırılması ayrıca talaşın yapışması, titreşim ve takım aşınmasını da etkileyeceğinden yüzey pürüzlülüğü üzerinde ikinci

dereceden bir etkiye sahiptir (Kirik 2010).



Şekil 2.17 Takım burun yarıçapı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Çakır 1999).

Teorik olarak maksimum yüzey pürüzlülüğü Denklem (2.6) ile hesaplanabilir ve denkleme göre ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artması beklenmektedir. Fakat mikro tornalamada, küçük ilerleme değerlerinden dolayı bu formül yetersiz kalmaktadır. (Liu and Melkote 2006) 'un yaptığı çalışmada mikro tornalamada küçük ilerleme hızlarında, kritik bir değerden sonra yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Şekil 2.18'de görüldüğü üzere özellikle 50 μm'den daha küçük ilerleme değerinde yüzey pürüzlülüğü bir miktar artmıştır.



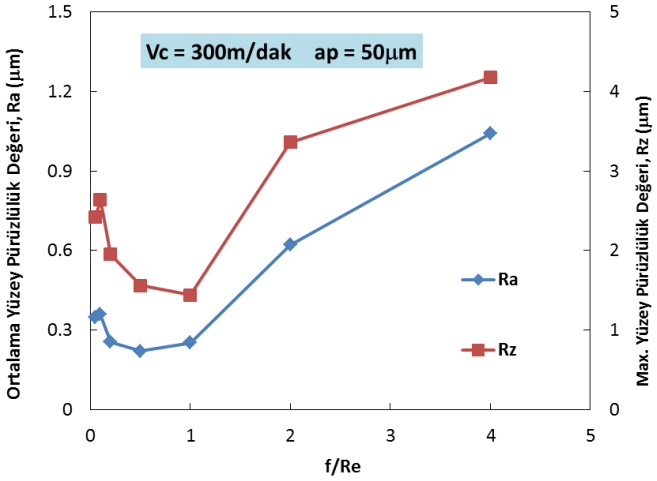
Şekil 2.18 Yüzey pürüzlülüğünde deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması (iş parçası: AISI 1045 çeliği, takım: WC) (Liu and Melkote 2006).

Kesikli çizgilerle gösterilen eğri, teorik sonucu simgelerken, diğer eğriler deneysel yüzey pürüzlülüğü parametrelerini göstermektedir. Teorik sonuçta ilerleme arttıkça, yüzey pürüzlülüğünde lineer bir artıştan söz edilebilirken deneysel sonuçta yaklaşık 50

µm'den daha küçük ilerleme değerinde yüzey pürüzlülüğünde bir farklılık söz konusudur. Liu and Melkote (2006) 'a göre Şekil 2.18'de gösterilen bu farklılığın sebebi "plastik yan akış" olarak tabir edilen etkidir. Minimum değere ulaşan yüzey pürüzlülüğünün, ilerlemenin azalmasıyla artması, mikro tornalamadaki boyut etkisinden kaynaklı meydana gelen bu etkinin sonucudur.

Shaw (1984)' a göre küçük ilerleme değerlerinde, talaş oluşumundaki akış, yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur. Bunun sebebi olarak, ilerleme azaldıkça takım talaş ara yüzeyindeki basınç ve kesme esnasındaki enerjinin hızla artması gösterilmektedir.

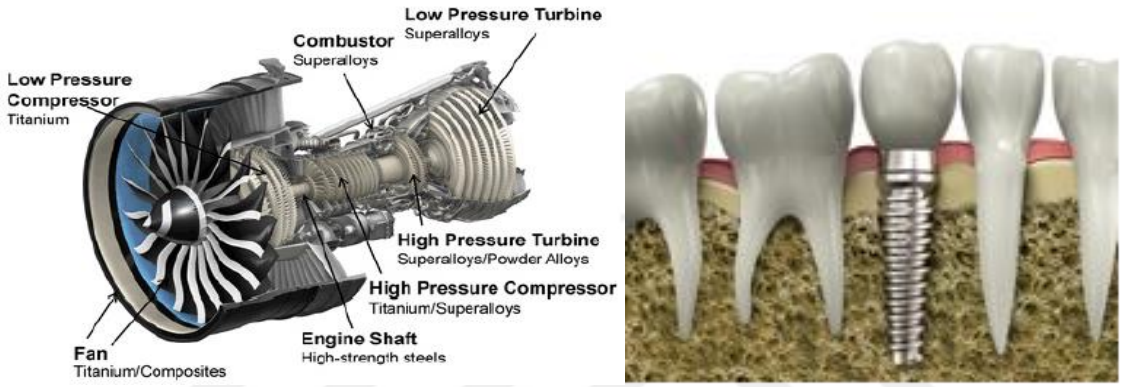
Aslantaş ve Şahan (2017), Ti6Al4V alaşımının mikro işleme şartlarında yüksek hızda tornalamışlardır. İş parçası yüzeyinde farklı ilerleme değerleri için yapılan kesme deneylerine göre yüzey pürüzlülüğünün değişimi incelenmiştir. Analiz sonucunda krtik bir ilerleme değerinin altında ve üstünde R_a ve R_z yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca işlenen yüzeyde takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir parametre olduğu söylenmiştir. Talaş derinliğinin burun yarıçapından, ilerleme değerinin de kenar yarıçapından küçük olduğu durumda radyal kesme kuvvetinin arttığı, yüzey kalitesininde bozulduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 İlerleme değerine bağlı olarak Ra ve Rz yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimi (Aslantaş ve Şahan 2017).

2.5 Ti6Al4V Alaşımı

Titanyum, alerjik reaksiyonlara yol açmaması ve doku cevabının iyi oluşu sebebiyle biyouyumlu bir materyaldir. Titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V), havacılık sanayi (Resim 2.6a), ortopedi ya da diş implantları (Resim 2.6b) gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılan eksenel simetrik minyatür parçaları üretmek için yaygın olarak tercih edilen bir alaşımdır. İyi bir korozyon direnci, düşük ısıl iletkenlik ve düşük elastite modülü gösterir (Jagadesh and Samuel 2015).



Resim 2.6 a) Jet motorlarında Ti6Al4V alaşımı kullanımı (Hopa 2016). b) Diş implantında Ti6Al4V alaşımı kullanımı (İnt. Kyn. 7).

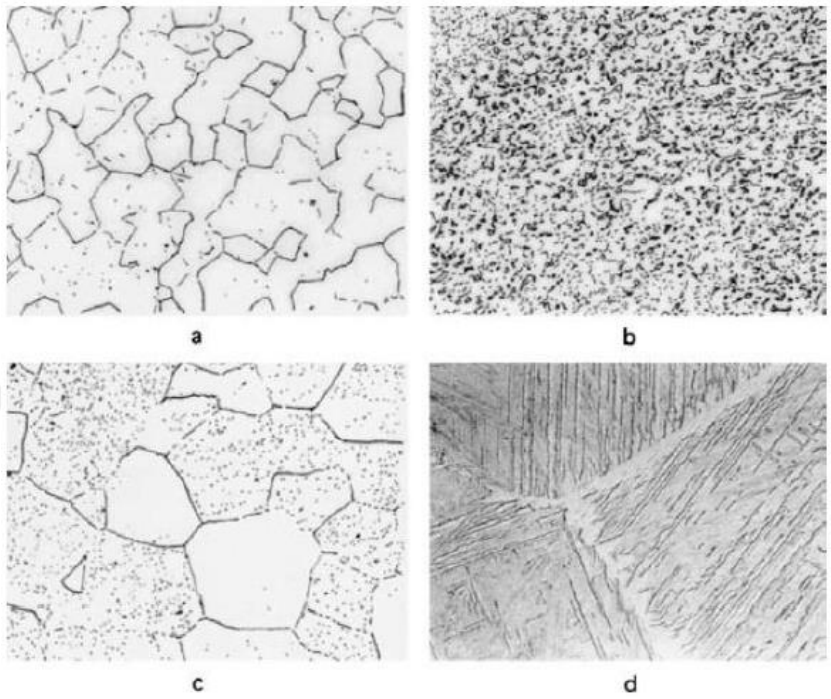
İnsan vücuduna uyumlu bir malzeme olan titanyum, yoğunluğunun düşük olması (4,5 g/cm3), mükemmel korozyon direnci, düşük sıcaklıkta yüksek tokluk, çatlak yayılımına karşı direnç gibi özellikleriyle çokca tercih edilir. Genelde titanyum alaşımlarının çalışma sıcaklığı yaklaşık 550°C ile 700°C arasındadır (Chunxiang *et al*. 2011).

Havacılık sanayinde sıklıkla gaz türbin çarkları, biyomedikal materyaller ve uçak iniş takımları için tercih edilen Ti6Al4V alaşımının geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar uzay sanayinden, diğer endüstriyel uygulamalara kaymıştır (Allen *et al*. 1996).

Son yıllarda titanyum ve titanyum alaşımlarının, medikal ve dental alandaki uygulamalarında ciddi bir artış görülmektedir. Genellikle titanyumun kullanımı uzay, denizcilik ve uçak sanayi alanlarında yoğunlaşmıştır. Bu alanlarda titanyumun tercih edilmesinin nedeni, dayanıklı ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve kısmen hafif oluşu, yüksek ısılara karşı dayanıklılığı ve korozyona karşı direncidir. Yeni işleme

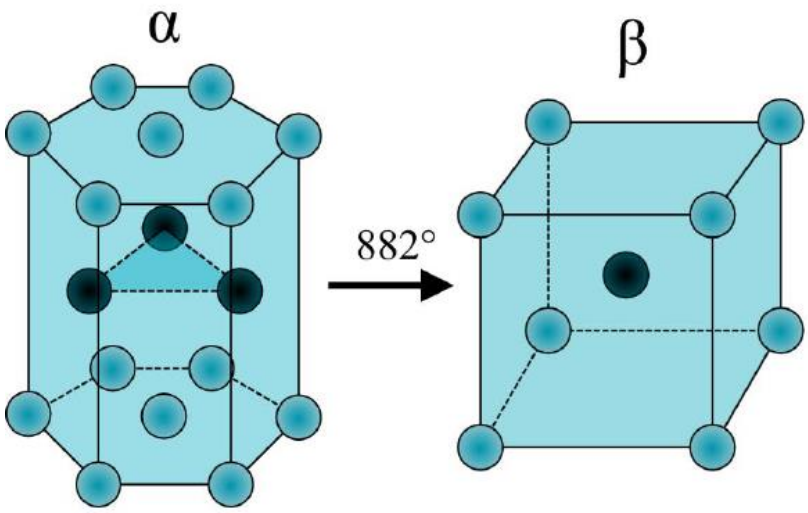
yöntemlerinin gelişimine paralel olarak son yıllarda özellikle biyomedikal ürünlerde titanyum kullanımı artmaktadır. Günümüzde titanyum ve alaşımları protez eklem, cerrahi sabitleyici, damar stentleri ve bağlayıcıları, implant, kuron köprü ve parsiyel protez yapımında kullanılmaktadır (Ungan 2009, Köktaş 2015).

Metalin mekanik özelliklerini geliştirmek ve faz yapılarını değiştirmek için bazı metallerle alaşımlaması yapılır. Bu metallere örnek olarak; alüminyum, vanadyum ve demir verilebilir. (Ungan 2009). Şekil 2.20'de α, α + β ve β alaşımlarına ait mikroyapı örnekleri bulunmaktadır.



Şekil 2.20 Titanyum alaşımlarının mikroyapıları (500x). (a) Tavlanmış α alaşımı. (b) Tavlanmış Ti6Al4V α + β alaşımı. (c) Tavlanmış β alaşımı. (d) Ti6Al4V, 1650°C'de ısıl işlem görüp su verilmiş martensit yapısı (Park and Kim 2002).

Titanyum alaşımları alfa, alfa+beta ve beta olmak üzere üç ana grupta toplanır. Alfa fazındaki titanyum oda sıcaklığında kararlı iken beta fazındaki titanyum ise yüksek sıcaklıklarda kararlıdır (Oyar 2015). Şekil 2.21'de 882°C'de sıcaklıkta α fazından β fazına dönüşen titanyum alaşımının yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.21 Altıgen yapıdan kübik yapıya geçen saf titanyum şekli ve geçiş sıcaklığı (Bamford 2016).

α ve β fazını kararlı hale getiren elementlerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olan bir mikroyapı elde edilebilmektedir (Berberich *et al.* 2000). Alfa ve beta fazlarında kararlılığı arttıran elementler, α+β alaşımların yapılarında birlikte bulunurlar ve bu iki form arasında özellikler taşırlar. Tavlama işleminden sonra bile, çok iyi sünekliğe ve homojenliğe sahiptirler. Ayrıca çok iyi dayanım özelliği gösterirler. İyi şekil verilebilir ve yüksek ısıda kullanılabilirler (Lautenschlager and Monaghan 1993). Bu tip alaşımlara Ti6Al4V ve Ti6Al7Nb örnek olarak verilebilir. Dental implantlarda kullanılan alaşımlar (Ti6Al4V), genellikle alfa-beta karışımlarıdır. Dental implant materyali için gereken fiziksel ve kimyasal özellikleri ısı ile muamele edildikten sonra kazanırlar. Elastikiyetleri kemik dokusunun elastikliğine diğer herhangi bir implant materyalinkinden daha yakındır. Bu sayede daha iyi stres dağılımı sağlarlar. Hafiftirler, korozyona ve yorgunluğa dirençlidirler (Oyar 2015).

Dengeli özellikleri nedeniyle Ti6Al4V alaşımı en yaygın kullanılan α+β alaşımıdır. Özellikle havacılık sanayindeki yaygın kullanımı, en çok test edilmiş denenmiş ve geliştirilmiş titanyum alaşımı olmasını sağlamıştır (Fujii 1998).

Ti6Al4V alaşımına asidik çevre şartlarında paladyum, nikel ve rutenyum eklenince korozyon direnci artar. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı, plastik deformasyona

uğramamasını sağlar. Ayrca yüksek mukavemet değeri ve hafif ağırlığı sayesinde mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bu alaşımın karakteristik özelliklerinin bilinmesi, uygulama alanına göre malzeme seçimi, titanyumun amaca uygun şekillendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Şekil 2.22 ve 2.23'de Ti6Al4V alaşımının metalurjik, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri verilmiştir (Olgun 2013).

Çizelge 2.1 Ti6Al4V alaşımının metalurjik ve fiziksel özellikleri (Olgun 2013).

Element	Al	V	C	N	O	H	Fe	Y	Ti
İçerik %	6	4	0,1	0,05	0,02	0,02	0,4	0,01	Balans

Özellik	**Metrik Ölçü**
Yoğunluk	4430 kg/m^3
Erime Noktası	1649°C

Çizelge 2.2 Ti6Al4V alaşımının mekanik ve termal özellikleri (Olgun 2013).

Özellik	**Metrik Ölçü**
Özgül Isı Kapasitesi	0,53 J/kg*°C
Termal İletkenlik	7,2 W/m*K
Termal Genleşme katsayısı	8,6*10^{-6}/°C

Özellik	**Metrik Ölçü**
Çekme Dayanımı	950MPa
Akma Dayanımı	880MPa
Kesme Dayanımı	550MPa
Elastite Modülü	114GPa
Brinell Sertliği	334HB

Ti6Al4V alaşımının ısıl direnç, dayanım, esneklik, tokluk, işlenebilirlik, kaynak edilebilirlik özellikleri ve korozyon direnci yüksektir (Hopa 2016). Titanyum alaşımları, hafif metal alaşımları, çelikler, nikel alaşımlar vb. malzeme türleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanıma sahiptirler (Chunxiang *et al*. 2011).

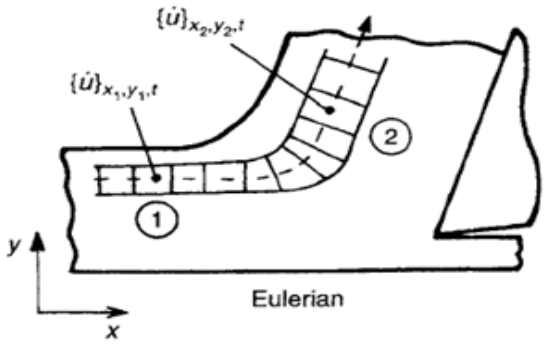
Ti6Al4V alaşımı, bütün bu malzeme özellikleri bakımından sıklıkla tercih edilmektedir. Tercih edildiği sektörlerdeki minyatür parça ve cihaz ihtiyacı, bu alaşımın mikro tekniklerle işlenmesini zorunlu kılmaktadır. Ti6Al4V alaşımından mikro tornalama ile eksenel simetrik parçalar elde edebilmek mümkündür. Ürünün optimum şartlarda elde edilebilmesi için kesme parametrelerinin ve kesici takım karakteristiklerinin etkileri öngörülebilmelidir.

3. METAL KESME İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

3.1 Giriş

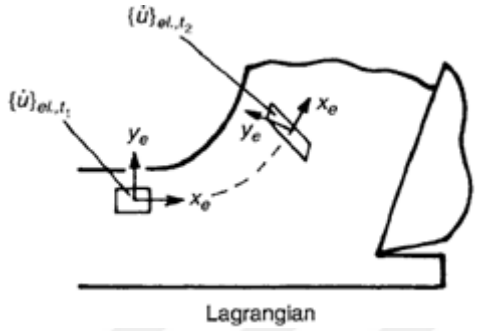
Sonlu elemanlar metodu, ilk defa karmaşık olan problemleri basit alt programlara ayırarak bu alt programların kendi içinde çözümlenmesi ile sonucunun bulunduğu, bilgisayar çözümüne uyarlanarak matris formundaki denklemlerin kullanıldığı sayısal bir yöntemdir. Temelinde 1960 yılında Clough tarafından kullanılmış, uçakların yapısal analizlerin geliştirilmesi temeline dayanmaktadır (Apaydın 2009). Günümüzde yüksek hızda çözüm yapabilen bilgisayarlarında olmasıyla birlikte bu yöntem bir çok alanda kendine yer bulmuştur. Özellikle deneysel yöntemlerle veri almanın çok zor veya imkansız olduğu durumlarda, kullanılan ticari sonlu eleman yazılımları tasarım ve analizde çok önemli yer tutmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle kesme işleminin modellenmesinde, üç farklı teknik kullanılmaktadır. Bunlar; Eulerian yaklışımı, Lagrangian yaklaşımı ve Arbitrary Lagrangian Eulerian yaklaşımıdır. Eulerian yaklaşımında; sonlu eleman ağı (mesh) sabittir. Mesh yapısında zaman içinde herhangi bir değişiklik olmadığında yeniden mesh üretimi gerçekleşmemektedir. Kararlı kesme işlemi için geçerli olan bu teknikte, talaş şeklinin önceden tanımlanması gerekmektedir. Dolayısıyla değişken olan kesme kalınlıklarında (frezeleme), yüksek hızda kesmenin ve kopuk talaş oluşumunun modellenmesinde bu teknik kullanılamaz. Mesh yapısı yenilenmediğinden çözüm süresi oldukça kısadır. Şekil 3.1'de bu teknikle takım talaş ara yüzey sıcaklığını tespit etmek için oluşturulmuş bir sonlu eleman sonucu verilmiştir (Apaydın 2009).



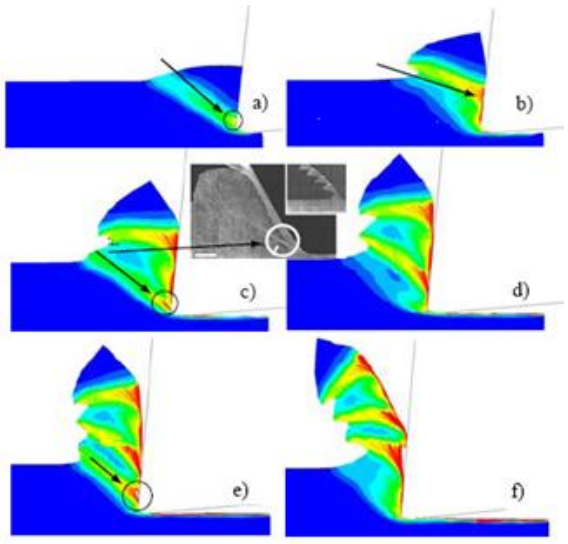
Şekil 3.1 Ortogonal kesme işleminin modellenmesinde Eulerian yaklaşımı (Apaydın 2009).

Lagrangian yaklaşımında; mesh malzeme ile birlikte akmaktadır. Dolayısıyla talaş oluşumunun her aşamasında mesh yapısı değişmektedir. Buna bağlı olarak, eleman ve düğüm sayısı da değişmektedir (Şekil 3.2). Bu teknikte talaş şeklinin önceden tanımlanması gerekmez. Dolayısı ile elde edilen talaş şekli deneysel olarak elde edilen talaş şekline benzemektedir (Apaydın 2009).



Şekil 3.2 Ortagonal kesme işleminin modellenmesindeki Lagrangian yaklaşımı (Apaydın 2009).

Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yaklaşımı ise; adından da anlaşılacağı üzere yukarıda verilen her iki yaklaşımın birleşimidir. Bu yaklaşımda mesh iş malzemesinden bağımsız hareket eder. Bu da yüksek oranda şekil değişiminin meydana geldiği analizlerde oldukça önemli bir unsurdur (Şekil 3.3). ABAQUS, MARC, DEFORM 2D, FORGE 2D, ALGOR, FLUENT gibi birçok ticari yazılım programları bu yaklaşımı kullanmaktadır. Bu yaklaşımda sadece sürekli talaş oluşumu değil, aynı zamanda kesikli talaş oluşumunun modellenmesi de mümkündür (Apaydın 2009).



Şekil 3.3 Ortagonal kesme işlemindeki ALE yaklaşımı (Guo and Wen 2005).

Talaşlı imalat, yüksek şekil değiştirme hızlarında bir şekillendirme prosesi olduğu için, lineer çözümleme teknikleri veya statik-mekanik özelliklerle malzemenin modellenmesi imkansızdır. Bu nedenle sadece nonlineer çözümler yapan bir takım ticari yazılımlarda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle takım talaş ara yüzeyindeki sıcaklık dağılımı, ısı oluşumu, kesme bölgesindeki gerilmelerin dağılımını/değişimini deneysel olarak tayin etmek çok zordur. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi problemleri gerçeğe en yakın hali ile çözerek kullanıcıya önemli ip uçları verebilmektedir. Fakat gerçeğe yakın sonuç elde edebilmek için de problemin sınır şartları ve kullanılan malzeme modelinin doğru tayin edilmesi gerekmektedir.

3.2 Johnson-Cook Malzeme Modeli

Talaşlı imalat işleminin modellenmesinde malzeme modeli, sonuçları büyük ölçüde değiştirebildiği için oldukça önemlidir. Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli, Ti6Al4V alaşımı için talaş kaldırma simülasyonunda en çok kullanılan malzeme modelidir. Bununla birlikte literatürde modifiye edilmiş Johnson-Cook malzeme modelleri de mevcuttur (Ducobu *et al.* 2017).

Temel J-C;

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n]\left[1 + C\ ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o}\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \tag{3.1}$$

Temel Johnson-Cook malzeme modeli 3 fonksiyonun kombinasyonu olarak temsil edilir (Özel ve Sima 2010a);

$$\sigma = f_{(\varepsilon)} \,.\, g_{(\dot{\varepsilon})} \,.\, h_{(T)} \tag{3.2}$$

$$f_{(\varepsilon)} = (A + B\varepsilon^n) \tag{3.3}$$

$$g_{(\dot{\varepsilon})} = \left(1 + C\ ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o}\right) \tag{3.4}$$

$$h_{(T)} = \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right] \tag{3.5}$$

Bu gösterimde $\boldsymbol{f}_{(\varepsilon)}$, $\boldsymbol{g}_{(\dot{\varepsilon})}$ ve $\boldsymbol{h}_{(T)}$ sırasıyla, şekil değiştirme sertleşmesi, şekil değiştirme hassasiyet oranı ve termal yumuşama davranışını temsil eder (Johnson and Cook 1983).

Uygun malzeme modelinin belirlenmesi için, temel J-C malzeme modelinin haricinde, literatürde mevcut olan, modifiye edilmiş iki farklı J-C malzeme modeli de incelenmiştir (Styger *et al.* 2014). Bunlar model-1 ve model-2 olarak isimlendirilmiştir.

Model-1) Şekil değiştirme yumuşaması ve sıcaklığa bağlı, modifiye edilmiş malzeme modeli (Calamaz *et al.* 2008).

$$\sigma = \left[A + B\varepsilon^n \left(\frac{1}{exp(\varepsilon^a)}\right)\right]\left[1 + C\ ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o}\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right]\left[D - (1 - D)\ \left[tanh\frac{1}{(\varepsilon+p)^r}\right]^s\right]$$

$$D = 1 - \left(\frac{T}{T_m}\right)^d \quad p = \left(\frac{T}{T_m}\right)^b \tag{3.6}$$

Model-2) Sıcaklığa bağlı olmayan modifiye edilmiş malzeme modeli aşağıda verilmiştir. Modele dahil edilen 4.fonksiyon (3.7) ve temel modeldeki 2.fonksiyon (3.4) şekil değiştirmeye bağlıdır. Bu sebeple ile her iki fonksiyonda benzerlik göstermektedir

$$g_{(\varepsilon)} = \left[M + (1 - M)\ \left[tanh\frac{1}{(\varepsilon+p)^r}\right]^s\right] \tag{3.7}$$

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n]\left[1 + C\ ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o}\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right]\left[M + (1 - M)\ \left[tanh\frac{1}{(\varepsilon+p)^r}\right]^s\right] \tag{3.8}$$

Temel Johnson-Cook malzeme modeli ile beraber modifiye edilmiş bu 2 model incelenmiştir. Ti6Al4V iş parçası için bu malzeme modelleri ile hangi Johnson-Cook malzeme model sabitlerinin kullanılabildiği araştırılmış ve 20 den fazla farklı malzeme model sabitine (Çizelge 3.1) ulaşılmıştır (Ducobu *et al.* 2017). Ducobu ve diğerleri (2017), bu çalışmasında Çizelge 3.1'de gösterilen 20 farklı malzeme model sabitinin ve kesme kuvvetleri, gerilme, şekil değiştirme gibi kesme karakteristiklerine etkisi üzerine çalışmıştır. 5,11,14 ve 16 numaralı sabitler kullanılarak gerçekleştirilen nümerik çözümlerde Fc kuvveti deneysel sonuçlara yakın çıkarken, Ff kuvveti deneysel sonuçlardan küçük çıkmıştır (Ducobu *et al.* 2017).

Çizelge 3.1 Ducobu ve diğerleri (2017)'nin Ti6Al4V alaşımı için kullandığı 20 farklı Johnson-Cook malzeme model sabiti.

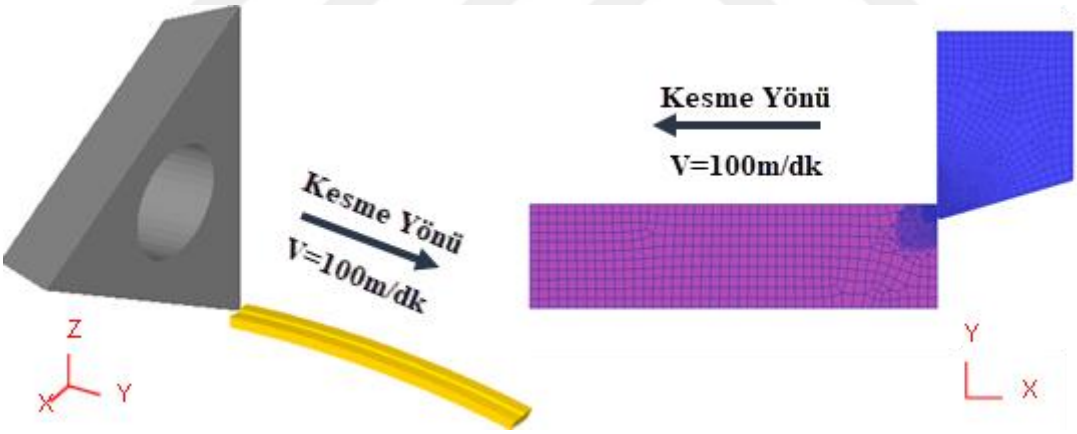
Malzeme Modelleri	Parametreler					
	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	$\dot{\varepsilon}_0$ (s^{-1})
1	418.4	394.4	0.035	0.47	1	1^{+}
2	724.7	683.1	0.035	0.47	1	10^{-5}
3	782.7	498.4	0.028	0.28	1	10^{-5}
4	804	545	0.05	0.362	1.04	1^{+}
5	859	640	0.000022	0.22	1.1	1^{+}
6	862.5	331.2	0.012	0.34	0.8	1
7	870	990	0.008	1.01	1.4	1
8	870	990	0.011	0.25	1	1^{+}
9	881	468	0.039	0.122	0.7	1^{+}
10	884	599	0.034	0.362	1.04	1^{+}
11	896	656	0.0128	0.5	0.8	1
12	968	380	0.0197	0.421	0.577	0.1
13	983	348	0.024	0.32	0.69	0.1
14	984	520.3	0.015	0.5102	0.8242	1^{+}
15	988	762	0.015	0.414	1.51	1^{+}
16	997.9	653.1	0.0198	0.45	0.7	1
17	1080	1007	0.01304	0.5975	0.7701	1
18	1098	1092	0.014	0.93	1.1	1
19	1104	1036	0.0139	0.6349	0.7794	1
20	1119	838.6	0.01921	0.4734	0.6437	1^{+}

Ti6Al4V iş parçası, malzeme özellikleri bakımından çokca tercih edilen bir alaşım olduğu için, bu alaşımın işlenmesi ile ilgili literatürde bir çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların geneli deneysel çalışmalardır. Fakat özellikle son yıllarda, sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme tekniği kullanılarak kesme karakteristiklerinin incelenmesi üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Literatürdeki bu mevcut çalışmalarda, özellikle kesme kuvvetleri ve gerilme değerlerinin önceden tespit edilmesi adına ANSYS, DEFORM, FRANC2D gibi farklı modelleme yazılımları kullanılmıştır.

3.3 DEFORM Yazılımı

Karmaşık mühendislik problemlerinin doğru sonuca en yakın çözüme ulaştırılması için kullanılan SEM, oldukça yaygın ve kullanışlı bir yöntemdir. Matematiksel altyapısı SEM'e dayanan DEFORM yazılımı ile laboratuvar ortamında gerçek iş parçası üzerinde yapılan deneyleri, modelleyerek sanal ortama taşımak mümkündür. Bu sayede laboratuvar ortamında kimi zaman maliyetli, kimi zaman ölçümü mümkün olmayan bazı verilerin elde edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Matematiksel altyapısı Sonlu Elemanlar Metoduna dayanan, Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC)'nin geliştirdiği DEFORM yazılımı, tasarımcıların ısıl işlemler, metal şekillendirme, kesme ve kaynaklama gibi birçok prosesi analiz edebilmek için laboratuvarda gerçek iş parçaları üzerinde yapılan deneyleri sanal ortama taşımalarını sağlayan bir mühendislik yazılımıdır. DEFORM aynı zamanda inanılmaz esnekliği sayesinde tasarımcılara birçok uygulama, geliştirme ve araştırma dallarında çalışma olanağı sağlayan bir sistemdir. 2 ve 3 boyutlu modellemeye imkan tanıyan bu ticari yazılım, mühendislik sistemlerini modelleyip simule ederek sıcaklık, kesme kuvvetleri, gerilme vb. gibi kesme işlemi ile ilgili birçok veriye bilgisayar ortamında ulaşmaya olanak sağlar. Bu sayede deneysel çalışmaları minimuma indirgeyip tasarruf sağlayarak, verimi artırmak mümkündür, dolayısıyla bu yazılım oldukça kullanışlıdır. Şekil 3.4'de DEFORM-2D ve DEFORM-3D yazılımlarıyla tornalama işleminin modellenmesinde kullanılan kesici takım ve iş parçası kesitinden örnekler verilmiştir.



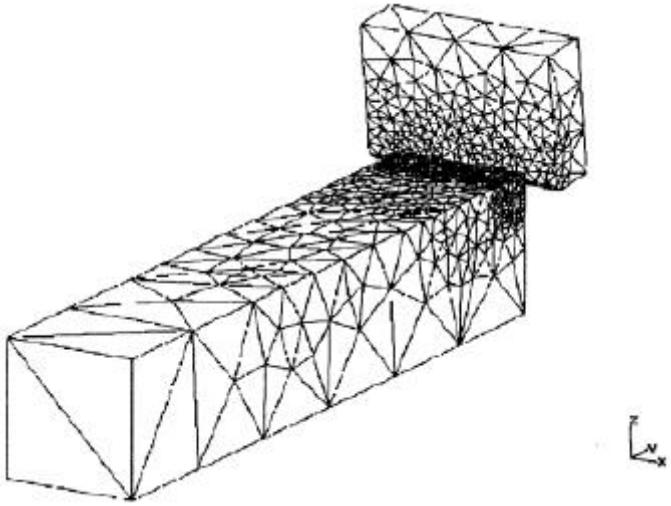
Şekil 3.4 Sonlu elemanlar yöntemiyle DEFORM yazılımında 2D ve 3D modellenen kesici takım ve iş parçası.

DEFORM yazılımı kullanılarak oluşturulan matematiksel modelin çözümü sonucunda tasarımcı; kesme kuvvetleri, yüzey altı artık gerilmeler, talaş formu ve kesici takımdaki gerilme ve sıcaklık dağılımları gibi kesme işlemi ile ilgili birçok veride kolaylıkla analiz yapabilmektedir. Bu sebeple sıkça kullanılan bu çözüm yöntemiyle ilgili, literatürde bir çok çalışma mevcuttur.

Calamaz ve diğerleri (2008), yeni bir malzeme modeli kullanarak Ti6Al4V alaşımının işlenmesini 2 boyutta modellemişlerdir. Modelleme sonucunda talaş formunu ve kesme kuvvetlerini farklı ilerleme hızlarında deneysel çalışmalarla kıyaslamışlardır (Calamaz *et al.* 2008). Özel ve Sima, Ti6Al4V alaşımını yüksek hızda sonlu elemanlar yöntemiyle modellemişlerdir. Kullanılan malzeme modelini testere formunda talaş oluşumunu sağlamak için modifiye etmişlerdir. Malzeme modellerinin talaş formuna ve kesme kuvvetlerine etkisi incelenmiştir (Özel ve Sima 2010b). Ducobu ve diğerleri (2017), Ti6Al4V alaşımını ortogonal kesme işleminde sonlu elemanlar yöntemiyle modellemişlerdir. Johnson-Cook malzeme modelinin ve malzeme model sabitlerinin kesme karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Ducobu *et al.* 2017).

Lin ve Lin (1992), ortogonal kesme işlemini modelleyerek kesme karakteristiklerini incelemişlerdir. Elasto plastik malzeme modeli oluşturarak yüzey altı artık gerilmeler, talaş ve kesici takımdaki sıcaklık dağılımını tespit etmişlerdir. Kesme kuvvetleri açısından deneysel sonuçlara çok yakın modelleme sonuçları elde edilmiştir. Ratchev ve diğerleri (2011), Ti6Al4V alaşımını mikro tornalamada sonlu elemanlar yöntemiyle modellemişlerdir. Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak yapılan nümerik sonuçlar ile deneysel verileri kıyaslamışlardır. Yüzey altı artık gerilmelerin, farklı talaş derinlikleri ve farklı kesme hızlarındaki değişimi incelenmiştir. Styger ve diğerleri (2017), Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasını iki boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellemişlerdir. Malzeme modeli farkının, yüzey altı artık gerilmelerin değişimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

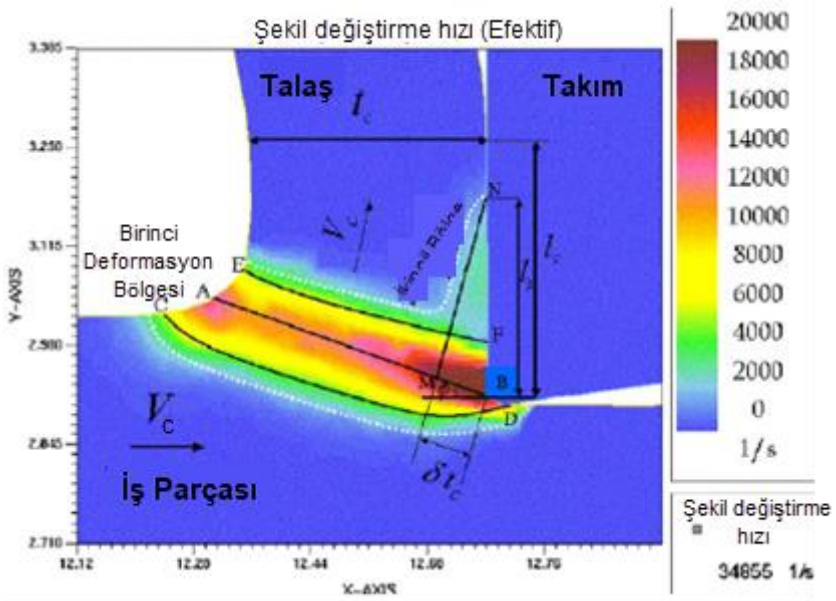
Ceretti ve diğerleri (2000), tornalama işlemini sonlu elemanlar yöntemiyle DEFORM 3D yazılımını kullanarak araştırmışlardır. Modelleme sonucu elde edilen simulasyon sonuçlarının yeni takımlar tasarlanması ve kesme işleminin optimizasyonu konusunda sektörde pratik olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Modelleme sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.5'de kullanılan kesme modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kullanılan kesme modeli (DEFORM 3D) (Ceretti *et al.* 2000).

Ceretti ve diğerleri (1996), DEFORM 2D yazılımını kullanarak kesme işleminde talaş oluşumunu simule etmişlerdir. Talaş oluşumuna etki eden parametreleri incelemişlerdir. Modelleme simulasyon sonuçları ile deneysel verileri kıyaslamışlardır. Yen ve diğerleri (2004), burun yarıçapının talaş oluşumu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı burun yarıçaplarında tahmin edilen kesme kuvvetleri ve talaş formlarını literatür sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Kesici takımın sıcaklık ve gerilme değerlerini tahmin etmişlerdir.

Budak ve Özlü (2018), kesme bölgesinde Johnson-Cook malzeme modelini kullanmışlardır. Geliştirilen modelle; kesme kuvveti, gerilme ve ısı dağılımları, talaş açısı gibi parametreleri tahmin edebilmişlerdir. Özel ve Zeren (2004), iş parçası malzemesinin akma gerilmesi ve sürtünmesini tespit etmek için sonlu eleman analizi yapmışlardır. Çalışmada Johnson-Cook akma gerilmesi malzeme modelini kullanmışlardır. Analizler sonucu; kesme kuvvetleri, sıcaklık ve gerilme dağılımı, kesici takım geometrisi, yüzey altı gerilmeler gibi önemli işleme parametrelerini tahmin etmişlerdir. Şekil 3.6'de ortogonal kesmedeki deformasyon bölgelerinin sonlu elemanlar simulasyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Ortogonal kesmedeki deformasyon bölgeleri (Özel ve Zeren 2004).

Özel ve diğerleri (2010), kaplamalı kesici takımların, Ti6Al4V alaşımının işlenmesindeki etkilerini sonlu elemanlar yöntemiyle modelleyerek simule etmişlerdir. TiAlN ve TiAlN+cBN kaplı Tungsten Karbür takım kullanmışlardır. Bu takımlarda talaş oluşumunun, kesme kuvvetlerinin, sıcaklıkların ve takım aşınmalarının öngörülmesi için 3 boyutta sonlu elemanlar modellemesi kullanmışlardır. Özel (2009), bir başka çalışmasında ise; kesici takım geometrisinin farklılığını inceleyerek DEFORM 3D programıyla tornalama sürecini modellemiştir. Deneylerde AISI 4340 çeliğinin tornalanmasında kesme kuvvetleri, talaş geometrisi, talaş oluşumları, iş parçası ve kesici takım gerilmelerini belirlemiştir.

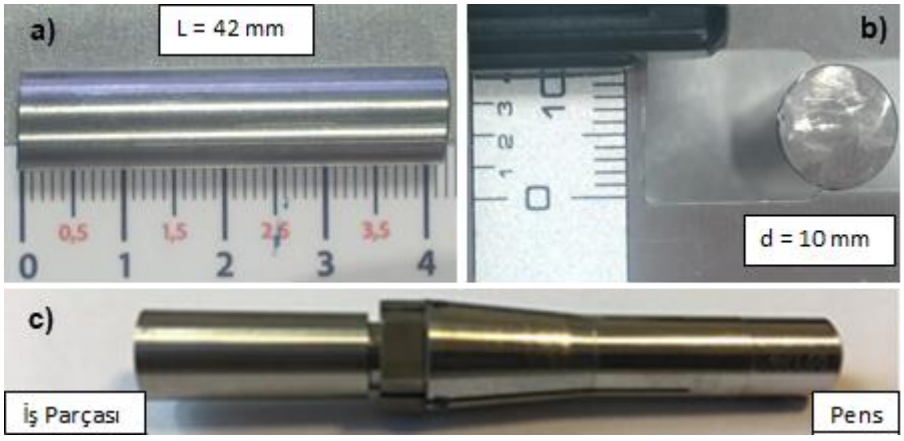
Sonlu elemanlar analizi için kullanılan DEFORM yazılımı ile kesme işlemini 2 boyutlu ya da 3 boyutlu modelleyip bir çok parametreyi tespit etmek mümkündür. Kesme işlemine etki eden faktörlerden kesme hızı, talaş derinliği, ilerleme hızı, kesici takım ve iş parçası geometrisi gibi temel karakteristikler girilerek yapılan modelleme sonucu, kesme kuvvetleri, gerilme ve şekil değiştirme değerleri, sıcaklık ve talaş formu gibi kesme işlemi sonucu takım ve iş parçasına ait bir çok veri elde edilebilir. Ayrıca deneysel çalışmalarla tespiti oldukça zor ve maliyetli olan takım gerilmeleri ve elasto-plastik modelleme yapılarak iş parçası üzerindeki artık gerilmeleri tespit etmek mümkündür.

4. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada mikro tornalama işleminde burun ve kenar yarıçapının kesme kuvvetleri, takım gerilmeleri, yüzey altı gerilmeleri, talaş geometrisi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geniş bir yelpazede kesme parametreleri ile birlikte iki farklı burun ve kenar yarıçapı dikkate alınmıştır. Yapılan mikro tornalama deneyleri ile kesme ve ilerleme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Sonlu eleman analizlerinin yapılması ve uygun malzeme modelinin seçimi için ön nümerik çözümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan 2D nümerik çözümler sonrasında yüzey altında meydana gelen artık gerilmeler ve takım gerilmeleri elde edilmiştir. 3D modelleme yapılarak takım geometrisinin kesme işlemine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kesme parametrelerinin ve takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir.

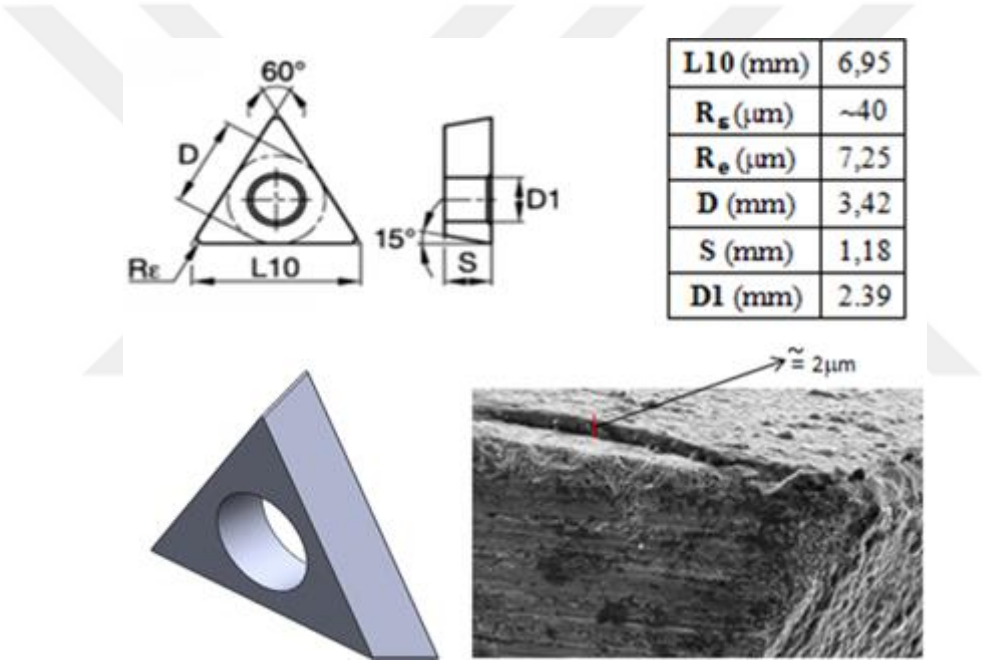
4.1 Kesici Takım ve İş Parçası

Çalışmada iş parçası olarak, biyomedikal sektöründe geniş bir kullanım alanına sahip, korozyona ve yorgunluğa karşı dirençli Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır. İş parçası 6 m boyda ve 10 mm çapında olmak üzere yurtdışından tedarik edilmiş, kesme deneylerinde kullanılmak üzere küçük parçalara ayrılmıştır. İş parçasına normalleştirme tavlamasının dışında herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır. Kesme deneylerinde kullanılan iş parçasının toplam boyu 42 mm olup, yaklaşık 20 mm'lik kısmı, çap 6 mm olacak şekilde tornalanarak pense tatlı sıkı geçmesi sağlanmıştır. Resim 4.1'de deneylerde kullanılan Ti6Al4V alaşımının çapı, boyu ve pense takılmış hali gösterilmiştir.



Resim 4.1 Deneylerde kullanılan Ti6Al4V alaşımının a) boyu b) çapı c) pense bağlı hali.

WC kesici takım, Kennametal firmasından tedarik edilmiş olup, TiAlN kaplanmıştır (kaplama kalınlığı yaklaşık 2 μm). Standart bir takım tutucu kullanılmamış, yanaşma açısı 90° olacak şekilde yeni bir takım tutucu tasarlanıp imal edilmiştir. Kesici takımın burun yarıçapı yaklaşık 40 μm ve kenar yarıçapı da yaklaşık 7,25 μm olarak ölçülmüştür. Kesici takımın talaş açısı sıfır ve boşluk açısı 15°'dir. Kesici takım geometrisi ile ilgili boyut ve ölçüm karakteristikleri ve kesici takımın 3D modeli Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Ayrıca kesici takımdan alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde, takım üzerindeki 2 μm kalınlığındaki TiAlN kaplama da Şekil 4.1'de görülebilmektedir.



L10 (mm)	6,95
R_ε (μm)	~40
R_e (μm)	7,25
D (mm)	3,42
S (mm)	1,18
D1 (mm)	2.39

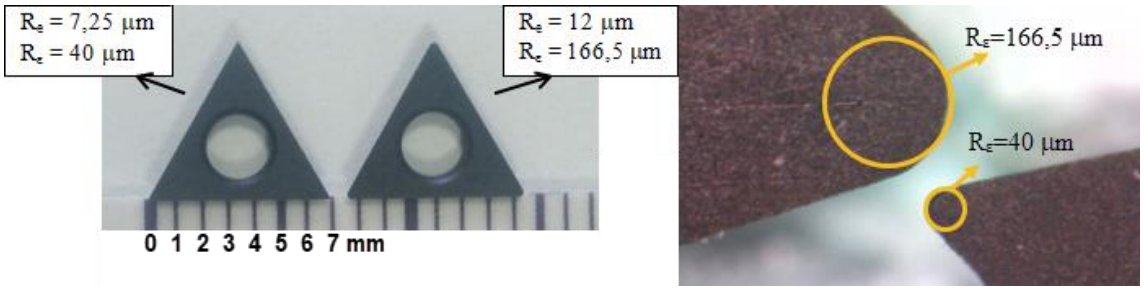
Şekil 4.1 Kesici takım görsel ve karakteristikleri.

Kesme deneylerinde iki farklı kesici takım kullanılmıştır. Bu takımlar birbirine benzemesine rağmen kenar ve burun yarıçapları farklıdır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Kesme deneylerinde kullanılan iki farklı takımın geometrik özellikleri.

	I.Takım	**II.Takım**
Kenar Yarıçapı	R_e=7,25 μm	R_e=12 μm
Burun Yarıçapı	R_ε=40 μm	R_ε=166,5 μm
ISO Kodu	TDHB07T12S0	TDHB07T1202

Kesme deneylerinde kullanılan bu takımlara ait görüntüler Resim 4.2'de gösterilmiştir. Resim 4.2'de iki takımın geometri farklılığının daha iyi anlaşılabilmesi adına burun yarıçaplarının mikroskobik görüntüsüne de yer verilmiştir.



Resim 4.2 Kesme deneylerinde kullanılan geometrik özellikleri farklı iki takım.

4.2 Deney Düzeneği

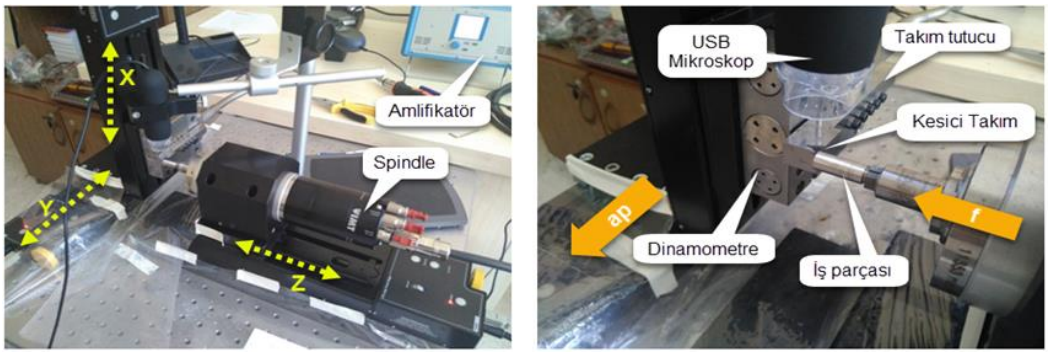
Çalışmada kesme parametrelerinin kesme işlemine etkisini gözlemlemek adına üç farklı ilerleme ve kesme hızında kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme deneylerinde kullanılan parametreler ve kesme kuvvetleri sonuçları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Kesme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri.

Kesme Deneyleri Parametreleri	Kesme Kuvvetleri (N)		
	Fc	Ff	
V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm	1,842	1,828	I.Takım Re=7,25 µm, Re=40 µm
V_c=100 m/dk, f=20 µm/dev, ap=40 µm	3,104	1,94	
V_c=100 m/dk, f=40 µm/dev, ap=40 µm	4,949	2,054	
V_c=150 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm	2,047	1,520	
V_c=200 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm	1,816	1,327	
V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm	2,285	1,43	II.Takım Re=12 µm, Re=166,5 µm
V_c=200 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm	1,986	1,156	
V_c=100 m/dk, f=20 µm/dev, ap=40 µm	3,4	1,723	
V_c=100 m/dk, f=40 µm/dev, ap=40 µm	5,024	1,82	

Çizelgedeki kesme kuvvet sonuçları, en az üç kesme deneyi sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

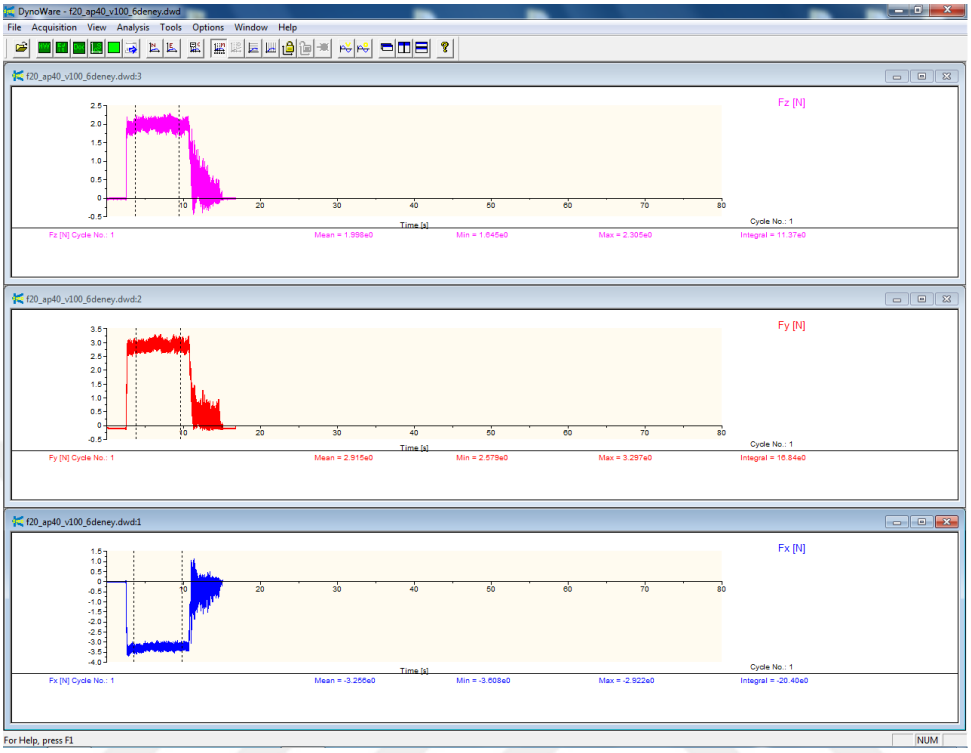
Çizelge 4.2'de gösterilen parametreler kullanılarak bir dizi mikro tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mikro tornalama işlemi için tasarlanmış özel bir deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 4.2). Yatay bir işleme merkezine benzemekte olan deney düzeneğinde, iş parçası, fener miline pens vasıtasıyla ve pnömatik hava basıncı yardımıyla sabitlenmiştir. Kullanılan IMT marka fener mili maksimum 60000 dev/dk'ya kadar çıkabilmekte ve devir ayarı kendine ait bilgisayar yazılımı ile hassas olarak elde edilebilmektedir. Eksen hareketleri için mikro step motorlarla desteklenmiş lineer kızaklar (Thorlabs) kullanılmıştır. Kızakların maksimum hareket mesafesi 150 mm olup, hassasiyeti ise 0,1 μm'dur. Fener mili Z ekseni boyunca hareket etmektedir. Kesici takım, kesme kuvvetleri verilerini elde etmek ve bilgisayar ortamına aktarmak için kullanılan mini dinamometre üzerine, mini dinamometre (Kistler-9119AA1) ise, X eksenini ifade eden kızak üzerine sabitlenmiştir. Talaş derinliği Y ekseni vasıtasıyla verilmekte ve ilerleme Z ekseni boyunca olmaktadır. Yanaşma açısının 90° olması ve dinamometreye bağlanabilmesi adına takım tutucu özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Deneylerde kesme bölgesinin daha net olarak gözlemlenebilmesi adına 20-800 arasında büyütme yapabilen bir USB mikroskop kullanılmıştır. Tüm sistem titreşimsiz optik bir tabla üzerine montaj edilmiştir.



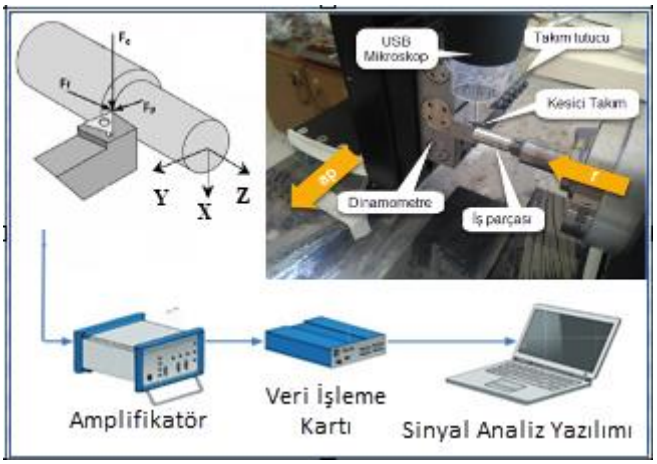
Şekil 4.2 Mikro tornalama deneylerinde kullanılan sistemin genel görünümü.

Deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan mini dinamometre ve sinyal yükseltici (amplifikatör) yardımıyla kesme kuvveti değerlerinin zamanla değişimi elde edilmiş ve elde edilen değerler Dynoware yazılımı ile analiz edilerek ortalaması alınmıştır. Kesme esnasında elde edilen kesme kuvvetlerinin zamanla değişimini gösteren grafik Şekil 4.3'de verilmiştir. Şekilde aynı zamanda kuvvet datalarının nasıl ortalamasının alındığı da gösterilmektedir. Şekil 4.4'de ise veri

kayıt sistematiği ve aşamaları gösterilmiştir. Deneylerde kesme mesafesi kısa tutulmak suretiyle (2 mm ile 8 mm arasında) takımdaki aşınma göz ardı edilmiştir.



Şekil 4.3 Dynoware yazılımındaki kesme kuvvetleri dataları.



Şekil 4.4 Kesme kuvvetleri ölçümü ve veri kayıt sistemi.

Çalışmada talaş derinliği, a_p = 40 µm alınmış ve deneyler 100 m/dk, 150 m/dk ve 200 m/dk olmak üzere üç farklı sabit kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızı için (10 µm/dev, 20 µm/dev, 40 µm/dev) yapılmıştır.

4.3 Nümerik Modelleme

Çalışmada DEFORM yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar çözümü gerçekleştirilmiş ve öncelikle malzeme modeli kesme kuvvetleri ve talaş formu dikkate alınarak doğrulanmıştır. Sonrasında ise nümerik çözümler gerçekleştirilerek kenar yarıçapının kesme işlemine etkisi araştırılmıştır. 2D modelleme yapılarak yüzey altı artık gerilmeler ve takım gerilmeleri tespit edilmiştir. 3D modelleme yapılarak ise kesici takım burun yarıçapının kesme kuvvetlerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca 2D ve 3D modellemede talaş formu da dikkate alınmıştır.

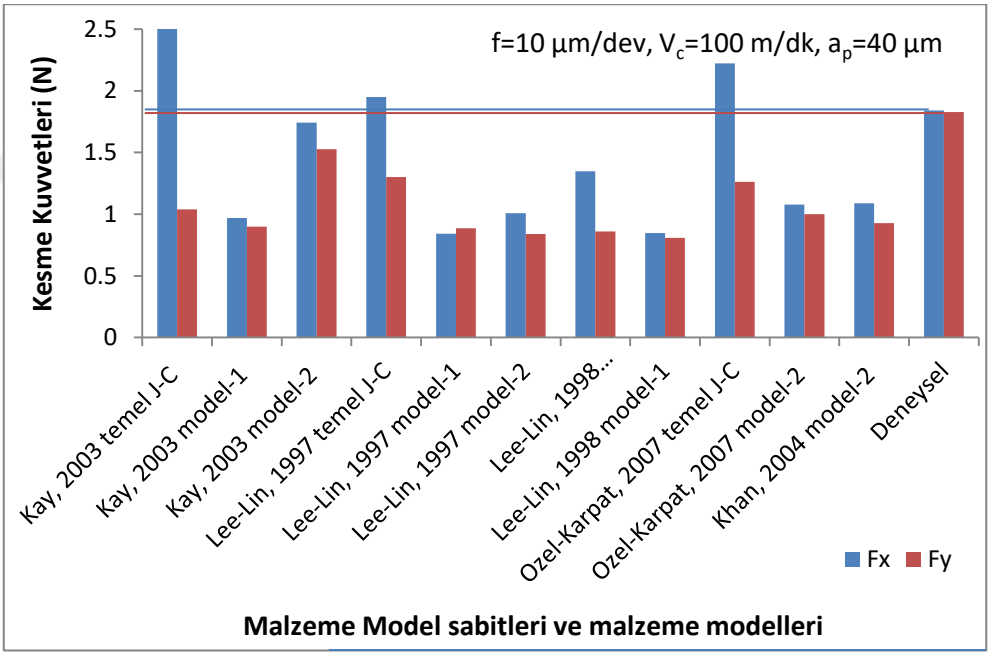
4.3.1 Malzeme Modelinin Belirlenmesi

Ti6Al4V alaşımı için geliştirilmiş ve literatürde yer alan farklı malzeme modellerine ve malzeme model sabitine rastlamak mümkündür (Karpat 2011, Ducobu *et al.* 2017, Özel *et al.* 2010). Literatürde yer alan farklı malzeme model sabitleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kullanılan malzeme model sabitleri kendi aralarında değerlendirildiğinde dahi, önemli farklılıkların olduğu göze çarpmaktadır. Örneğin 1 ile 20 nolu modelin A ve B parametreleri arasında büyük bir sayısal farkın olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında literatürde var olan tüm modeller kullanılarak ön çözümler yapılmıştır. Yapılan modellemelerde kesme kuvvetleri ve talaş formu deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, önce kullanılacak malzeme modelinin, sonra ise malzeme model sabitlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalarda (Özel ve Sima 2010a, Özel ve Sima 2010b, Ratchev *et al.* 2011) daha çok önerilmesi sebebiyle ağırlıklı olarak Çizelge 4.3'deki malzeme model sabitleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.3 Modellemelerde kullanılan Johnson-Cook malzeme model sabitleri (Karpat 2011, Özel ve Sima 2010b).

J-C Malzeme Model Sabitleri	Çizelge 3.1 sıralaması	A(MPA)	B(MPA)	C	n	m
1-) Lee-Lin, 1997	2.model	724,7	683,1	0,035	0,47	1
2-) Lee-Lin, 1998	3.model	782,7	498,4	0,028	0,28	1
3-) Ozel-Karpat, 2007	15.model	987,8	761,5	0,0151	0,4143	1,516
4-) Kay, 2003	18.model	1098	1092	0,014	0,93	1,1
5-) Khan, 2004	19.model	1104	1036	0,0139	0,6349	0,7794

Çizelge 4.3'de gösterilen malzeme model sabitleri, bu çalışmadaki 3.2 numaralı bölümde belirtilen üç farklı malzeme modelinde de kullanılmıştır. Yapılan modellemeler deneysel sonuçlarla, talaş formu ve kesme kuvvetleri açısından karşılaştırılıp deneme-yanılma metodu ile doğru malzeme modelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan modellemelerin kesme kuvvetleri açısından birbirleriyle ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 4.5'de verilmiştir.

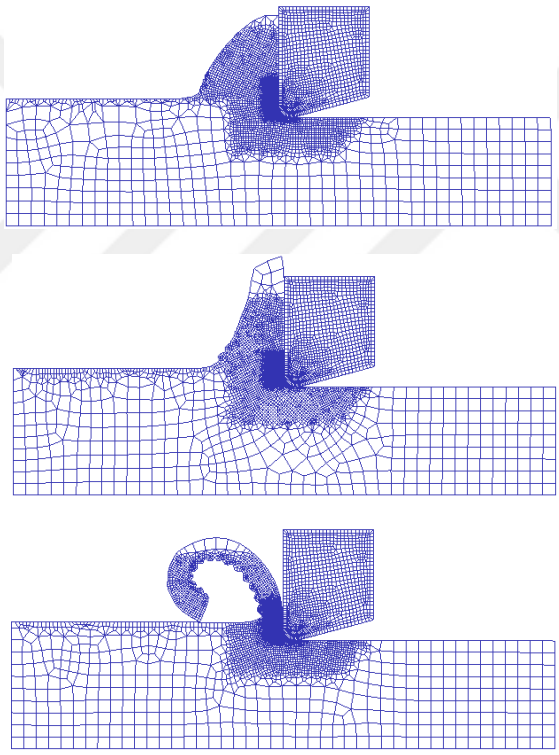


Şekil 4.5 Deneysel sonucun, yapılan modellemelerle kesme kuvvetleri açısından karşılaştırılması (f=10 µm/dev., V_c=100 m/dk., ap=40 µm).

Çizelge 4.3'de Lee-Lin (1997), Kay (2003) ve Lee-Lin (1998)'in önerdiği malzeme model sabitleriyle yapılan modellemeleri karşılaştırdığımızda kesme kuvvetleri genel olarak temel J-C malzeme modelinde en büyük, model-1'de ise en küçük çıkmıştır. Genel olarak model-1 ve model-2 ile kullanılarak yapılan nümerik çözümlerdeki kesme kuvvetlerinin deneysel sonuçlara göre küçük çıkmasından dolayı, diğer iki malzeme model sabiti (Ozel-Karpat (2007), Khan (2004)) kullanılarak yapılan modellemelerde öncelikle Model-1 kullanılmamıştır. Ozel-Karpat (2007)'ın kullanıldığı malzeme model sabitiyle yapılan modellemelerde model-2'den elde edilen kesme kuvvetlerinin küçük çıkması sebebiyle Khan (2004)'ın kullanıldığı modelleme, sadece temel J-C malzeme modeliyle yapılmıştır.

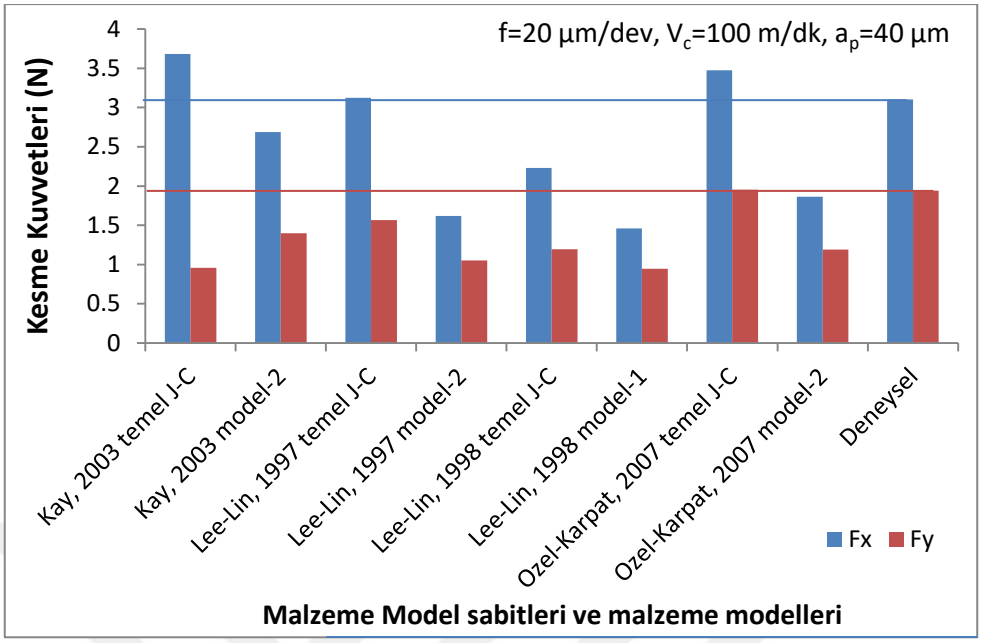
Şekil 4.5'de görüldüğü üzere, belirtilen parametrelerde yapılan kesme deneylerinde, ilerleme hızının çok küçük olması sebebiyle asıl kesme kuvveti ile ilerleme kuvveti birbirine çok yakın değerdedir. Deneysel sonuçlar ile modelleme sonuçları birbiriyle tam olarak eşleşmemekle beraber, deneysel sonuçtaki kesme kuvvetlerine en yakın model, Lee-Lin (1997)'in önerdiği temel J-C malzeme modeli ile Kay (2003)'in önerdiği modifiye edilmiş J-C malzeme modeli (model-2)'dir.

Talaş formunu dikkate aldığımızda ise, temel J-C malzeme modeli ve modifiye edilmiş J-C malzeme modeli (model-2) kullanılarak yapılan modellemelerde düz talaş formunun, modifiye edilmiş J-C malzeme modeli (model-1) kullanılan modelde ise testere tipi talaş formunun elde edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.6).



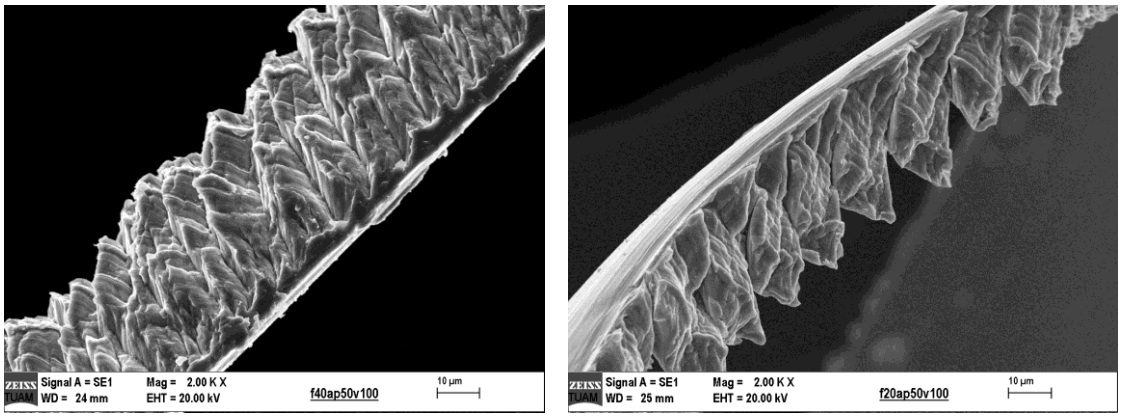
Şekil 4.6 Farklı malzeme modelleri kullanılarak yapılan modellemelerdeki talaş formunun karşılaştırılması.

İlerleme hızı 20 µm/dev alınıp, Şekil 4.5'de kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında deneysel sonuçlardan farklı çıkan birkaç malzeme modeli elenerek, geriye kalan farklı malzeme modelleri ve sabitleri kullanılarak nümerik çözümler yapılmış ve sonuçları Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7 Deneysel sonucun, yapılan modellemelerle kesme kuvvetleri açısından karşılaştırılması (f=20 µm/dev., V_c=100 m/dk., ap=40 µm).

Şekil 4.7'de ise deneysel sonuçtaki kesme kuvvetlerine en yakın model, Lee-Lin (1997)'in önerdiği temel J-C malzeme modeli ile Şekil 4.5'in aksine Ozel-Karpat (2007)'ın önerdiği temel J-C malzeme modelidir. Fakat gerek talaş formunun düz olması, gerekse temel J-C malzeme modelinin yüksek sıcaklık ve şekil değiştirme hızlarında yetersiz kalması bu modelin kullanılmaması gerektiğini göstermektedir. Deneysel çalışmadan elde edilen talaş formlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Kesme deneyleri sonucu elde edilen talaş formlarının taramalı elektron mikroskobundan alınan görüntüleri.

Bütün sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, doğru sonuçlar elde etmek için malzemenin yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışlarını dikkate alan bir malzeme modelinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Ayrıca deneylerden elde edilen talaş kesitlerinden alınan SEM çıktılarında (Şekil 4.7) testere tipi talaş oluşumu gözlendiğinden bu çalışmada Denklem (3.6)'da verilen, model-1 olarak gösterilen modifiye edilmiş Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır (Johnson and Cook 1983). Bu modelin son çarpanı olarak verilen kısım, sıcaklığın etkisiyle meydana gelen termal yumuşamayı dikkate almaktadır.

Kullanılacak malzeme modeline karar verildikten sonra, modelleme sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin, deneysel sonuçlarla tam uyuşmaması, malzeme model sabitleri için bir revizyon yapılmasını zorunlu kılmıştır. Kesme kuvvetlerini büyük oranda etkileyen malzeme özelliklerinde, denklem 3.6'da A, akma gerilmesini, B, pekleşme modülünü, C, şekil değiştirme hızı hassasiyeti, n, malzemenin pekleşme katsayısı, m, malzemenin termal yumuşama katsayısını simgelemektedir. A, B, C ve m değerlerinin artmasıyla gerilmeler artar dolayısıyla kesme kuvvetleri de artar. n değerinin artması gerilmelerin ve kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olur. Bunun dışında denklem 3.6'da belirtilen, a, b, s, d gibi malzemeyle ilgili diğer parametrelerde kesme kuvvetlerini etkilemekle beraber, bu etki diğer katsayıların etkisine göre daha azdır.

Model-1 kullanılarak yapılan nümerik çözümler, talaş formu açısından deneysel sonuçlarla örtüşmekte fakat kesme kuvvetleri deneysel sonuçlardan küçük çıkmaktadır. Bu nedenle denklem 3.6'da belirtilen malzeme model sabitlerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. A, B, C ve m değerlerinin artması kesme kuvvetlerini artırdığı için, Çizelge 3.1'de mevcut olan 20 farklı malzeme model sabitinde bu değişkenler için en büyük değerler alınırken, "n" değerinin azalması kesme kuvvetlerini artırdığı için, 20 farklı değişken için en küçük "n" değeri alınmıştır. Buna rağmen nümerik çözümler sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin (özellikle Fc) deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında küçük olması üzerine, n ve B değeri değiştirilmeden A, C ve m değeri %20 oranında artırılmıştır. A, C ve m değeri artırılırken B değerinin artırılmamasının nedeni ise, ağırlıklı olarak Fc kuvvetinin artırılmak istenmesi ve A, C ve m değerlerinin Ff'e göre Fc üzerinde daha etkili olmasıdır.

Literatürden (Ducobu *et al.* 2017) incelenen malzeme model sabitleri parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisi göz önünde bulundurularak, deneme yanılma yoluyla bu çalışma özelinde malzeme model sabitleri yeniden türetilmiştir. Bu malzeme model sabitlerinin sayısal değerleri Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Model-1'de kullanılan J-C malzeme model sabitleri.

A(MPA)	B(MPA)	C	n	m
1343	1092	0,06	0,22	1,82

Denklem 3.6'da mevcut olan Çizelge 4.4'de belirtilen sabitler haricinde a,b,s ve d gibi parametrelerin kesme kuvvetlerine etkisi daha az olduğu için bu parametreler Özel ve Sima (2010b)' nın çalışmasındaki model 2'den alınmış ve Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 Model-1'de kullanılan diğer J-C malzeme model sabitleri.

a	b	s	d	r
2,5	2	1,5	1	2

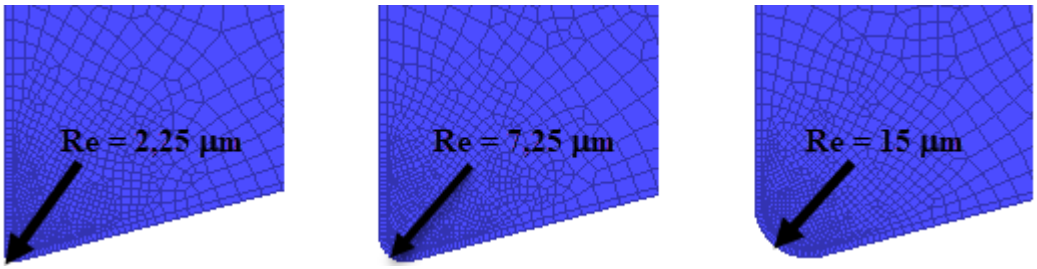
4.3.2 DEFORM Yazılımında Modelleme İşlemi

Ti6Al4V iş parçası için kullanılacak malzeme modeline karar verildikten sonra DEFORM yazılımında nümerik çözümler yapılmış ve öncelikle 2 boyutlu modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında olduğu gibi modelleme kısmında da V_c=100 m/dk, 150 m/dk ve 200 m/dk olmak üzere üç farklı kesme hızı ve f=10 μm/dev, 20 μm/dev, 40 μm/dev olmak üzere üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır.

Çalışmanın deneysel kısmında öncelikle kullanılan I.Takımın yanına modellemede R_e=2,25 μm ve R_e=15 μm olmak üzere iki farklı kenar yarıçapı (Şekil 4.9), R_ε=100 μm olmak üzere bir farklı burun yarıçapı (Şekil 4.13) ilave edilerek, kenar ve burun yarıçapı farklılıklarının kesme parametrelerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın 3D modelleme kısmında I.Takım ve II.Takım ile farklı kenar ve burun yarıçaplarında bir dizi modelleme yapılmıştır. Çalışmada kesme parametreleri, kenar yarıçapı, burun yarıçapı ve takım geometrisi farklılıklarının kesme işlemine etkisi ayrı ayrı modellenmiş ve Çizelge 4.6'da modelleme parametreleri ve kesme kuvvetleri gösterilmiştir.

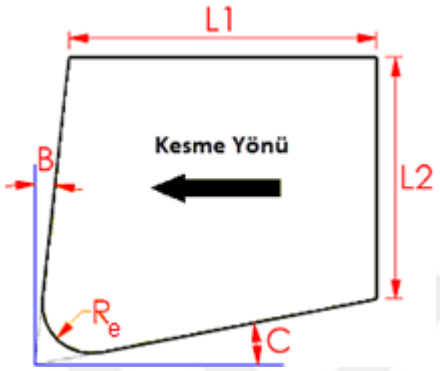
Çizelge 4.6 Modellemede kullanılan kesme parametreleri ve kesme kuvvetleri.

Model 2D/3D	Modellemede Kullanılan Parametreler	Kesme Kuvvetleri (N)			
		Fc	Ff	Fp	
2D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	1,709	2,086	---	Re=7,25 µm
2D	V_c=100 m/dk, f=20 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	2,904	2,243	---	
2D	V_c=100 m/dk, f=40 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	5,055	2,414	---	
2D	V_c=150 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	1,691	2,1	---	
2D	V_c=200 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	1,671	2,08	---	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	2,54	1,85	2,85	
3D	V_c=100 m/dk, f=20 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	3,55	1,83	2,89	
3D	V_c=100 m/dk, f=40 µm/dev, ap=40 µm, Rε=40 µm	5,63	1,53	3	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=30 µm	2,42	1,6	2,15	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=50 µm	2,4	2,01	3,32	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=100 µm	2,31	1,61	5,3	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=166,5 µm	3,073	1,92	6,44	Re=12 µm
3D	V_c=200 m/dk, f=10 µm/dev, ap=40 µm, Rε=166,5 µm	2,77	1,72	6,57	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=170 µm, Rε=50 µm	7,99	9,69	4,86	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=170 µm, Rε=100 µm	8,12	10,49	7,67	
3D	V_c=100 m/dk, f=10 µm/dev, ap=170 µm, Rε=166,5 µm	9,29	16,82	14,64	



Şekil 4.9 Modellemede kullanılan farklı kenar yarıçapları.

Çalışmada çevre sıcaklığı 20°C olup, takım talaş ara yüzeyinde kayma sürtünme katsayısı DEFORM yazılımında varsayılan değer olan 0,6 alınmıştır. Modellemede kullanılan kesici takıma ait geometrik parametreler Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Modellemede özellikle L1 ve L2 değerleri küçük tutulmak suretiyle eleman sayısı azaltılıp çözüm süresinin kısaltılması amaçlanmıştır.



L1= 0,1 mm

L2= 0,1 mm

B= 0°

C= 15°

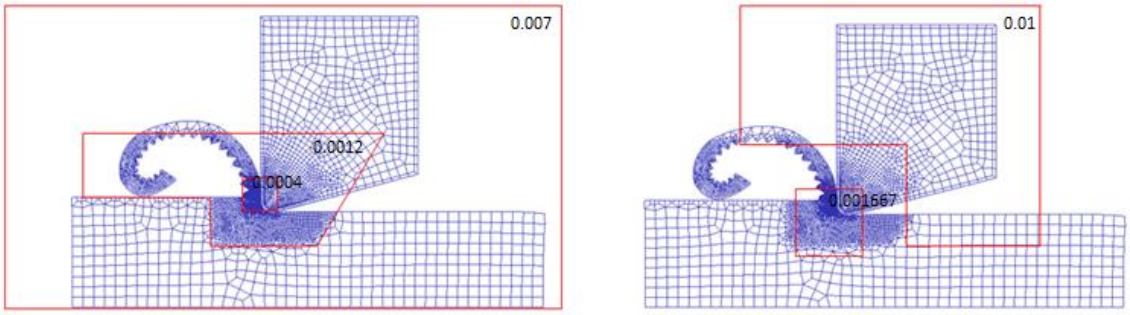
R_e= 0.00725 mm

Şekil 4.10 Modelleme esnasında kesici takıma ait parametreler.

Modelleme esnasında kesici takım malzemesi WC seçilip, 2 µm TiAlN kaplama eklenmiştir. Takım için mesh oluşturma işlemi gerçekleştirildikten sonra iş parçası ile ilgili parametrelere geçilmiştir. Ti6Al4V iş parçası malzemesi için DEFORM yazılımı içindeki varsayılan değerler kullanılmamış, farklı sıcaklık ve şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri, kullanılan malzeme modeli üzerinden hesaplanıp modelleme verilerine eklenmiştir. Ti6Al4V alaşımının E (GPa), ρ (kg/m^3), C_p (J/ kg°C), k (W/m°C), ς (µm/m°C), ϵ, υ, gibi mekanik ve fiziksel malzeme özellikleri ise Ratchev ve diğerleri (2011)'nin çalışmasından alınmıştır (Çizelge 4.7). Gerekli mesh belirlenip sınır şartları girildikten sonra çözüm işlemi başlatılmıştır (Şekil 4.11).

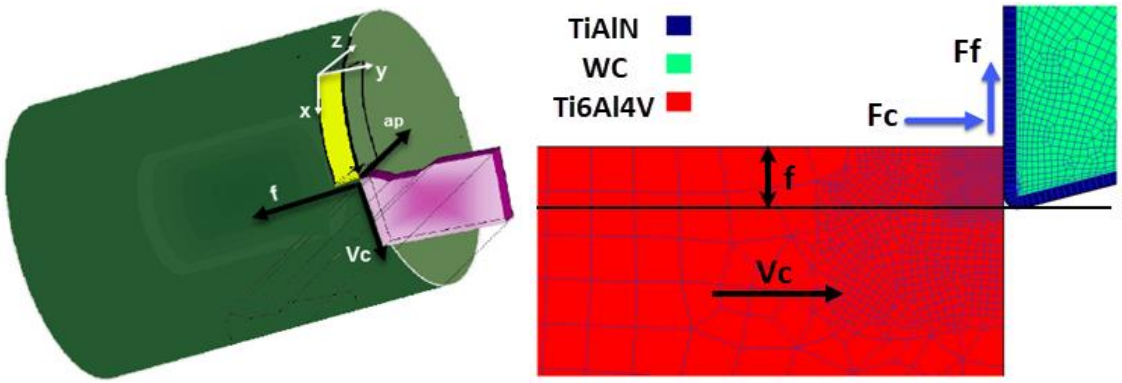
Çizelge 4.7 Malzeme modelinde kullanılan J-C malzeme model parametreleri (Ratchev 2011).

Sıcaklık (°C)	25	100	200	400	500	600	700
Elastite Modülü, E (GPa)	103	99	94	89	84	80	74
Özgül Isı, C_p (J/kg°C)	532	553	573	632	676	806	906
Termal İletkenlik, k (W/m°C)	7	7,6	8,6	11,5	13,7	14,4	17,3
Termal genleşme, ς (µm/m°C)	8,78	8,9	9,5	9,9	10,1	10,3	11,7
Yoğunluk, ρ (kg/m^3)	4420	4410	4400	4370	4350	4340	4330
Poisson Oranı, υ	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Salım kabiliyeti, ϵ	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7



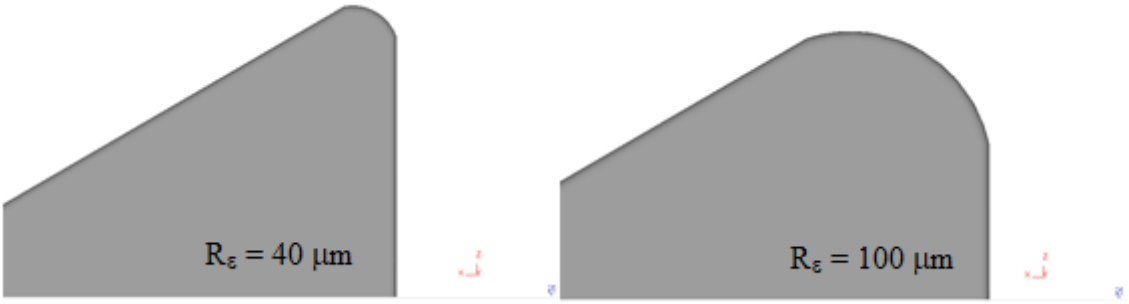
Şekil 4.11 İş parçası ve takım için mesh yapısı ve tane boyutu.

Nümerik çözümde, iş parçasının boyutları 10 µm/dev ilerleme için; 0,07 mm x 0.3 mm'dir. İlerleme arttıkça iş parçası boyutu da doğru orantılı olarak artırılmıştır. Çalışmada iş parçası için modellenen geometrideki ağ yapısı yeterince küçük alınmıştır. Bunun için minimum eleman boyutu, ilerleme değerinin dörtte birinden daha küçük olacak şekilde belirlenmiştir. Kesme hızı iş parçasına verilmiş olup, elasto-plastik olarak modellenmiştir. Talaş oluşumu prosesinde remeshing tekniği kullanılarak, her bir çözüm aralığı için yeniden sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Her bir çözüm aralığında kesme esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklığı veri olarak program tarafından kaydedilmiştir. Çözümlerde kullanılan sonlu eleman modeli Şekil 4.12'de verilmektedir. Modellemede iş parçası için 4111 adet, kesici takımda ise 1154 adet kuadratik eleman kullanılmış ve problem düzlem şekil değiştirme şartlarında modellenmiştir.



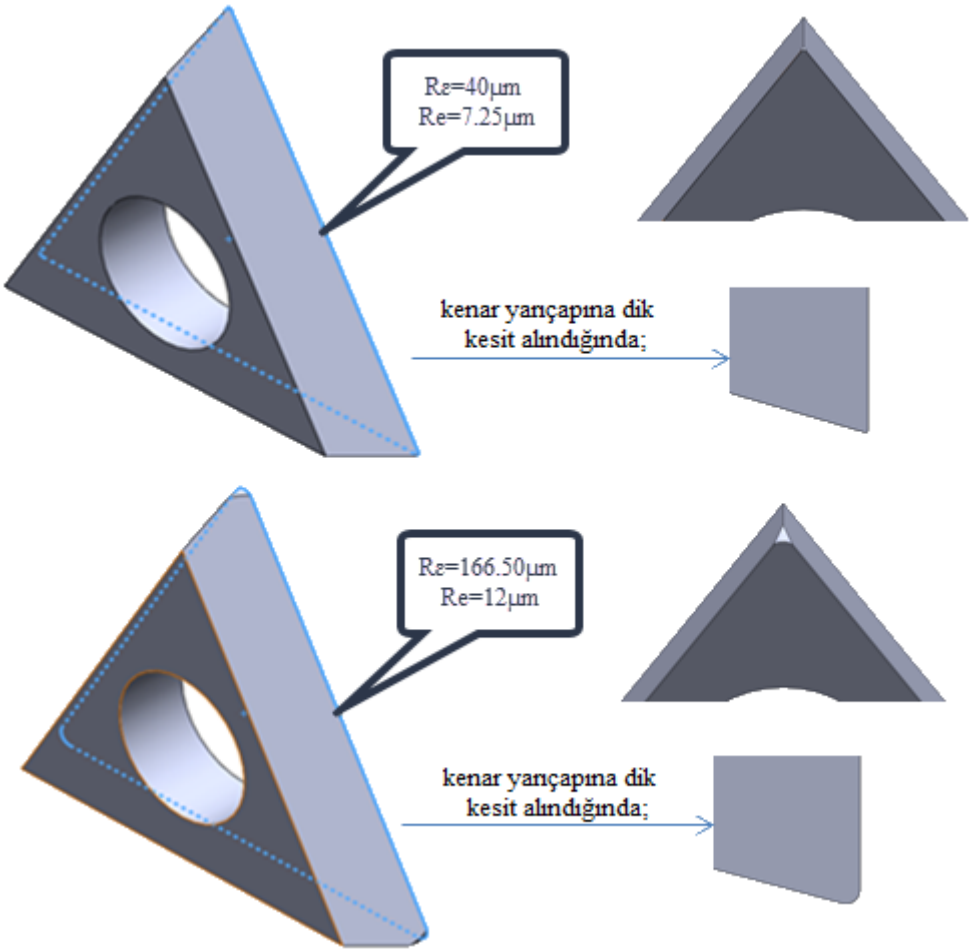
Şekil 4.12 Tornalama işleminin iki boyutlu ifadesi ve iş parçası ve kesici uç mesh yapısı.

Kesme işleminde burun yarıçapının kesme kuvvetlerine etkisini gözlemlemek adına DEFORM yazılımında 3D modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. 3D modellemede kullanılan burun yarıçaplarından ikisi Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Modellemelerde kullanılan burun yarıçapları farklı modellenen iki takım görseli.

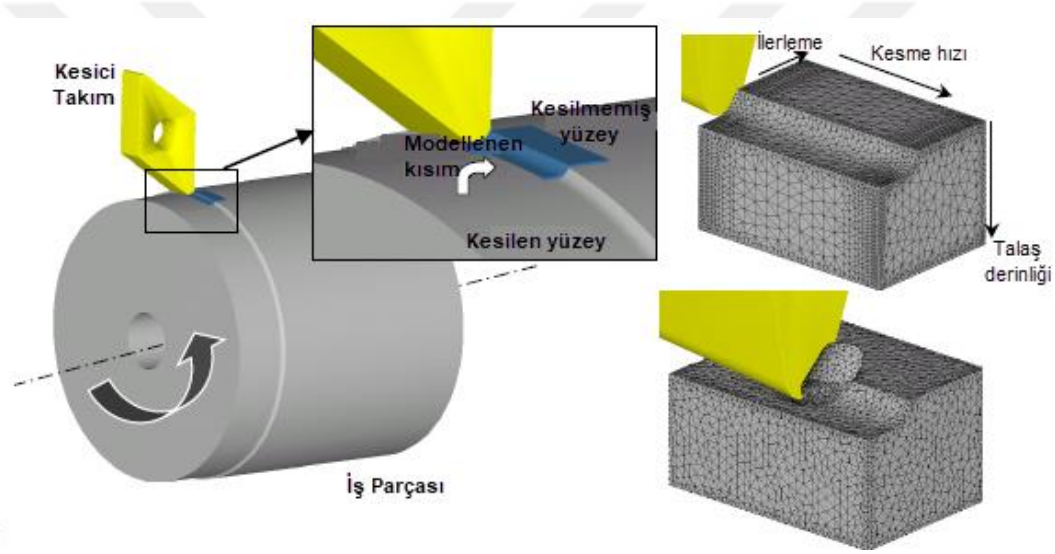
İki farklı takımla yapılan kesme deneyleri, aynı şartlarda (talaş derinliği ap=40 µm, kesme hızı V_c=100 m/dk ve ilerleme hızı f=10 µm/dev) 3 boyutlu modellenmiştir. Modellemelerde kullanılan bu takımlar, Solidworks programında çizilmiş ve DEFORM-3D yazılımına aktarılmıştır. Bu takımlara ait çizimler Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



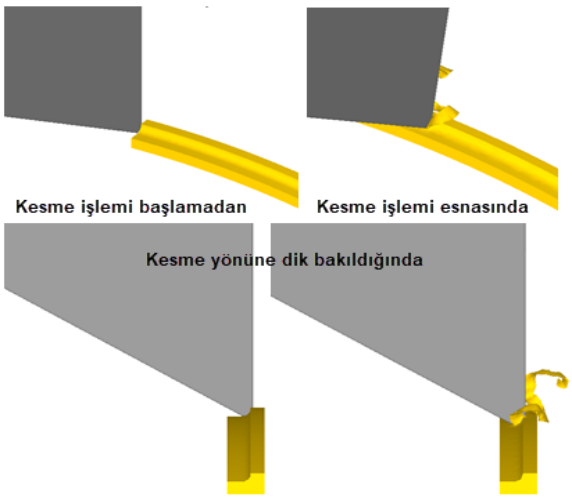
Şekil 4.14 Modelleme ve deneysel çalışmalarda kullanılan 2 farklı takım solidworks çizimleri, kenar ve burun yarıçapı farklılıkları.

3D modellemelerde iş parçası ile ilgili veriler, 2D modelleme işleminde olduğu gibi gerilme değerleri, sıcaklık ve şekil değiştirme hızlarına bağlı olarak Denklem (3.6)'da verilen model-1 kullanılarak her bir sıcaklık aralığı için excel programında hesaplanarak DEFORM-3D yazılımına aktarılmıştır. İş parçası malzemesi ile özellikler de aynı şekilde Ratchev ve diğerleri (2011)'nin çalışmasından alınmıştır (Çizelge 4.7).

DEFORM yazılımındaki nümerik çözümlerde kullanılan modelin daha net anlaşılabilmesi adına, Şekil 4.15'de DEFORM yazılımının kendi kurulum notlarında mevcut olan 3D simülasyon modeli gösterilmiştir. Şekil 4.16'da ise bu çalışmadaki, 3D kesme işlemi simülasyonundan kesitler gösterilmiştir.



Şekil 4.15 3D modelleme işlemi simulasyon modeli.



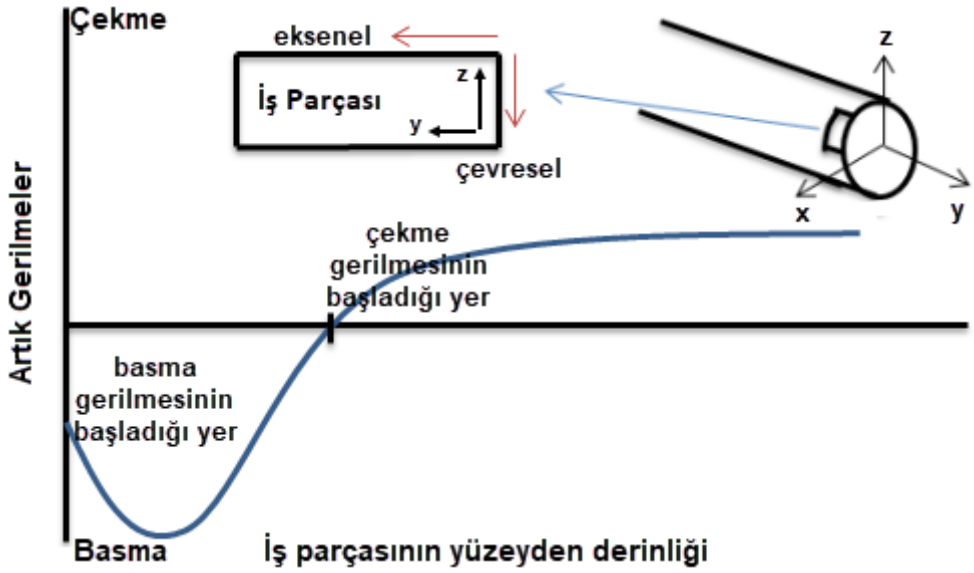
Şekil 4.16 DEFORM-3D yazılımı talaş kaldırma işlemi görselleri.

4.3.3 Modelleme Sonucu Elde Edilen Parametreler

Yapılan çalışmada öncelikle, deneysel çalışmadan elde edilen kesme kuvvetleri ile modelleme sonucu elde edilen kesme kuvvetleri kıyaslanmış ve malzeme modelinin doğrulaması yapılmıştır. Sonrasında ilerleme, kesme hızı ve takım geometrisinin kesme kuvvetlerine ve talaş formuna etkisi incelenmiştir.

Kesme deneyleri sonucu elde edilen talaş formları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. SEM çıktıları, DEFORM-2D'den elde edilen modelleme sonuçları ile karşılaştırılmış ve modelleme sonucu elde edilen talaş formu ve karakteristiklerinin deneysel sonuçlarla benzerliği incelenmiştir.

DEFORM-2D yazılımında elasto-plastik çözüm sonrasında, DEFORM-2D/3D Pre kısmından ikinci bir çözüm gerçekleştirilmiştir. Model üzerinden takım silinerek, iş parçası için yeni bir nümerik çözüm gerçekleştirilmiş ve yüzey altı artık gerilmelerin tespiti amaçlanmıştır (Şekil 4.17). Ayrıca benzer bir işlem takım için de uygulanmış, nümerik çözüm bittikten sonra, DEFORM-2D/3D Pre kısmından, bu kez iş parçası modelden silinerek, takım yüzeyinde ikinci bir çözüm yapılmış ve takım gerilmeleri tespit edilmiştir.



Şekil 4.17 Yüzey altı artık gerilmeler grafiği ve yönleri.

3D modelleme işlemi sonrası, takım geometrisi farklılıklarının kesme kuvvetlerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca mikro tornalama işleminde boyut etkisinden kaynaklanan kesici takım burun yarıçapının, talaş derinliğinden büyük olması durumunda kesme kuvvetlerinin değişimindeki farklılıklar gözlenmiştir.

4.4 Yüzey Pürüzlülüğü

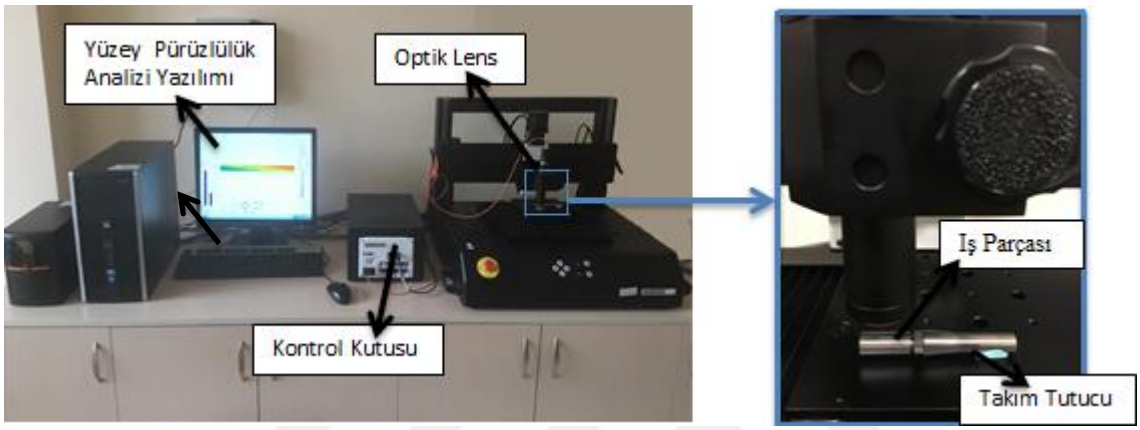
Mikro tornalama işleminde, kesme parametreleri kadar (özellikle ilerleme ve talaş derinliği), takım kenar ve burun yarıçapı da yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında kesme parametrelerinin ve takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Bu sebeple, yeniden kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir ve kesme parametreleri Çizelge 4.8'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.8 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri iş parçası kesme parametreleri ve Sa/Sz değerleri.

Kesme Deneyleri Parametreleri	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)		
	Sa	**Sz**	
V_c=250 m/dk, f=10 μm/dev, ap=15 μm	0,405	3,91	**I.Takım**
V_c=250 m/dk, f=25 μm/dev, ap=15 μm	1,264	7,193	
V_c=250 m/dk, f=40 μm/dev, ap=15 μm	1,87	11,3	
V_c=250 m/dk, f=25 μm/dev, ap=5 μm	0,598	4,52	
V_c=250 m/dk, f=25 μm/dev, ap=25 μm	0,77	7,14	
V_c=100 m/dk, f=25 μm/dev, ap=15 μm	0,719	5,57	
V_c=400 m/dk, f=25 μm/dev, ap=15 μm	0,856	5,64	
V_c=250 m/dk, f=10 μm/dev, ap=15 μm	0,59	4,44	**II.Takım**
V_c=250 m/dk, f=25 μm/dev, ap=15 μm	0,54	4,3	
V_c=250 m/dk, f=40 μm/dev, ap=15 μm	0,299	2,59	

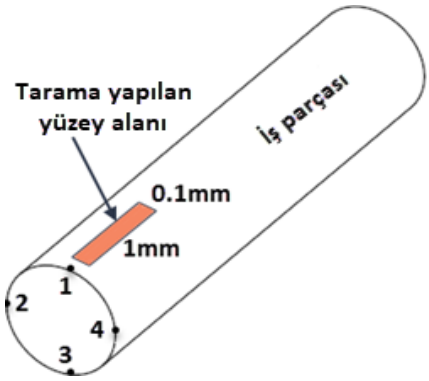
Çizelgedeki Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerleri, en az dört yüzey pürüzlülük ölçümü sonucunun ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Kesme deneyleri sonrasında numunelerin, beyaz ışık teknolojisi ile çalışan Nanovea optik profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır (Resim 4.3). Yüzey pürüzlülük ölçümleri için ayrıca gerçekleştirilen kesme deneyleri, üç farklı ilerleme hızı (10 µm/dev, 25 µm/dev, 40 µm/dev), üç farklı kesme hızı (100 m/dk, 250 m/dk ve 400 m/dk) ve üç farklı talaş derinliği (5 µm, 15 µm, 25 µm) için gerçekleştirilmiştir. İki parametre sabit tutularak, üçüncü parametrenin etkisi araştırılmıştır.



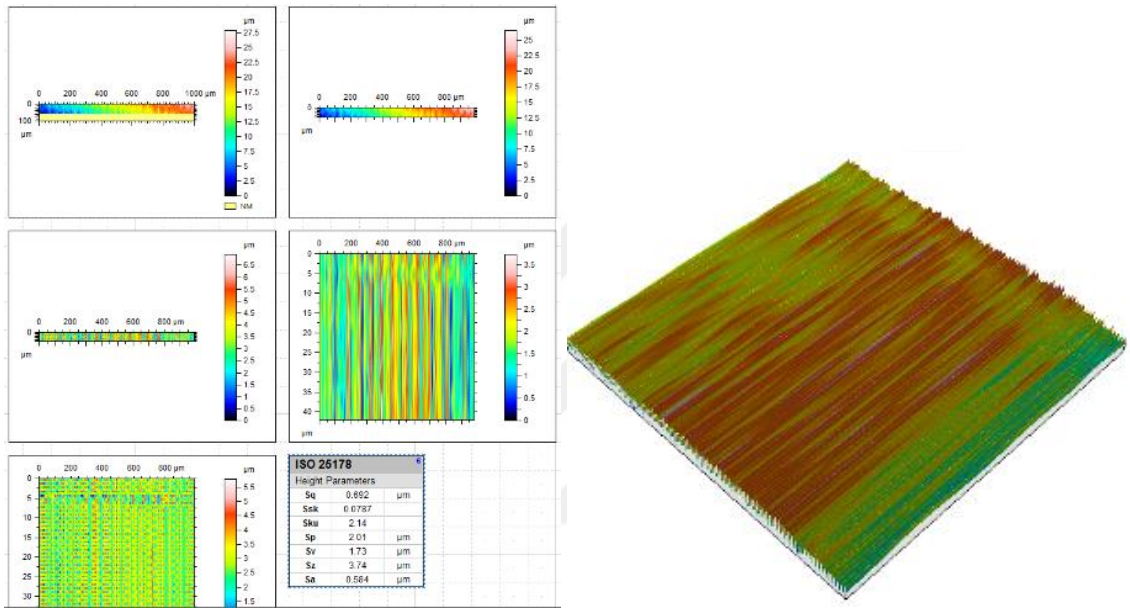
Resim 4.3 Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan cihaz ve iş parçası.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerini sağlıklı gerçekleştirebilmek için kesme işlemi sonrasında, iş parçası, yüzeyine basınçlı hava tutularak temizlenmiştir. Tarama işlemi x ekseninde 1 mm mesafe ve y ekseninde 0.1 mm mesafe için yüzey boyunca yapılmıştır. X ve Y eksenlerindeki adım ise 1 µm'dir. Tarama tipi çift yön olan cihazın tarama hızı 0,5 mm/s'dir. Kesme deneyleri sonrasında iş parçası 90° döndürülmek suretiyle iş parçası yüzeyinde 4 farklı yerden yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmış (Şekil 4.18) ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak Çizelge 4.8 ve bulgular da grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 4.18 İş parçası yüzey taramasının şematik gösterimi.

İş parçası yüzeyinden alınan ölçümler için çıktı parametresi olarak Sa ve Sz değerleri dikkate alınmıştır. Kesme deneylerinde kullanılan iki farklı takımla kesme işlemi gerçekleştirildikten sonra talaş derinliği ap=15 µm, kesme hızı V_c=250 m/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızında (f=10 µm/dev, f=25 µm/dev, f=40 µm/dev) numuneler üzerinde Sa ve Sz değerleri tespit edilmiştir. Bu sayede takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi tespit edilmiştir. Sa ve Sz değerlerinin hesaplanması ve yüzey pürüzlülüğün 3 boyutlu görünümü Şekil 4.19'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Yüzey pürüzlülüğü tarama sonuç ekranı ve 3 boyutlu görünümü.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1 Giriş

Çalışma hem deneysel hem de nümerik modellemeden ibaret olduğu için, malzeme modelinin doğrulamasını yapmak adına Deform-2D yazılımı kullanılarak bir dizi ön çözümler gerçekleştirilmiştir. Farklı ilerleme ve kesme hızlarına göre modellenen kesme işlemindeki kuvvetlerin değişimi, deneysel sonuçlardan elde edilen kesme kuvvetleriyle karşılaştırılmıştır. İki boyutta yapılan modellemelerde elde edilen kesme kuvvetleri, talaş derinliğinden bağımsız olmak üzere N/mm değerinde belirtilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan talaş derinliği, 2D modelleme sonucu elde edilen kesme kuvvetleri ile çarpılarak Newton birimli kesme kuvvetleri elde edilebilmektedir. Ayrıca deneysel çalışmalar sonucunda talaş formunun SEM çıktıları alınmış ve modelleme sonucu elde edilen talaş formu ile görsel olarak karşılaştırılmıştır.

İki boyutlu modellemede kenar yarıçapının kesme kuvvetleri, takım ve yüzey altı gerilmeleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yüzey altında meydana gelen artık gerilmeleri elde etmek için iş parçası malzemesi elasto-plastik olarak modellenmiştir. Çözümde kararlı kesme şartları elde edildikten sonra kesici takım modelden silinerek, iş parçasının sıcaklığı 20°C ye düşene kadar ikinci bir çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu sayede iş parçası yüzeyindeki eksenel ve çevresel artık gerilmeler elde edilmiştir. Takım yüzeyindeki gerilmeleri elde etmek içinse, iş parçası modelden silinerek, ikinci bir çözüm gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kenar yarıçapları farklı kesici takımlarla kesme işlemi modellenerek kenar yarıçapının talaş formu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kesici takımda kenar yarıçapından sonra kesme işlemini etkileyen bir diğer parametre de burun yarıçapıdır. Öncelikle üç boyutlu modelleme işlemi yapılarak, kesme kuvvetleri, deneysel ve 2D modelleme sonucu elde edilen kesme kuvvetleri ile farklı ilerleme hızlarında karşılaştırılmıştır. Sonrasında burun yarıçapı farklılıklarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini ortaya koymak adına üç farklı burun yarıçapı için 3D kesme analizleri gerçekleştirilmiştir. Burun yarıçapının talaş derinliğinden büyük ve küçük olması durumunda kesme kuvvetlerinin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir.

Farklı talaş derinliği, kesme ve ilerleme hızlarında yapılan kesme deneyleri sonucu iş parçası yüzeyinde optik profilometre cihazı ile Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Bu üç kesme parametresinden (talaş derinliği, kesme ve ilerleme hızı) iki tanesi sabit tutularak üçüncü parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca burun ve kenar yarıçapı farklı iki takımla yapılan kesme deneyleri sonucunda, takım geometrisinin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır.

Artan kuvvetler ve iş parçasının yüksek devirlerde dönmesi sonucu meydana gelen, özellikle abrasiv ve difüzyon aşınma mekanizmalarının, sonucu etkilemesine izin vermemek adına sık sık takım değiştirilmiştir. Birkaç kesme işleminden sonra, daha önce kullanılmamış aynı geometrik özelliklere sahip farklı takımlar kullanılmıştır.

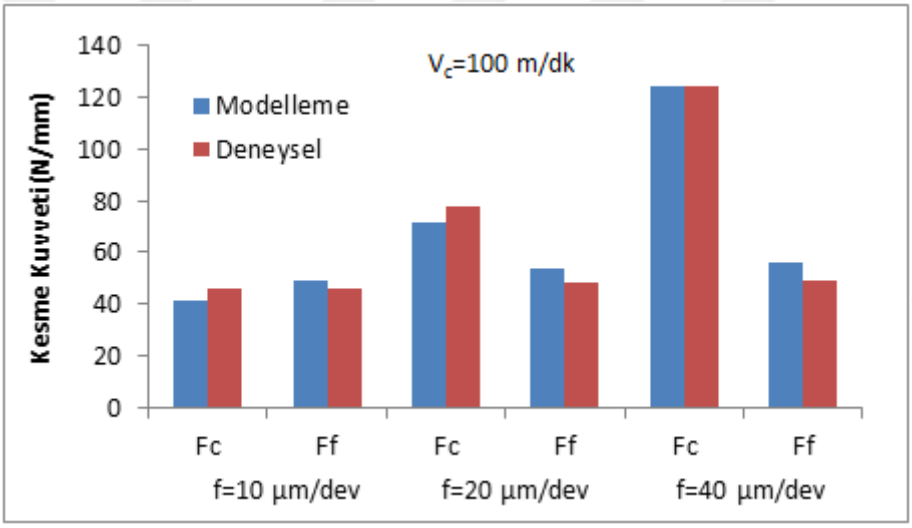
5.2 Deneysel ve Nümerik Kesme Kuvvetleri Sonuçlarının Karşılaştırılması

Metal kesme işleminin nümerik olarak modellenmesinde kullanılan malzeme modeli ve sınır şartları çok önemlidir. Bu çalışmada malzeme modelinin doğrulaması hem ilerleme hem de kesme hızına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.

5.2.1 İlerlemenin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi

Çalışmanın deneysel kısmında, I.Takım (R_ε=40 μm ve R_e=7,25 μm) kullanılarak sabit talaş derinliğinde (ap=40 μm) ve üç farklı ilerleme hızında kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel kesme kuvvet verileri ile modelleme sonucu elde edilen değerler kıyaslanarak malzeme modelinin doğrulaması yapılmıştır. f=10 μm/dev, f=20 μm/dev, f=40 μm/dev olmak üzere üç farklı ilerleme hızında ve V_c=100 m/dk, sabit kesme hızında yapılan kesme deneyleri ve 2D modelleme sonucu kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. İlerleme hızlarına göre, asıl kesme kuvveti ve ilerleme kuvvetinin değişimi Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere, deneysel kesme kuvvet verileri ile 2D modelleme sonuçları birbirine oldukça yakın ve kabul edilebilir bir hata oranına sahiptir. İlerleme değeri arttıkça, Fc asıl kesme kuvveti bariz bir şekilde artmaktadır. İlerlemenin artmasıyla birlikte kesilmek istenen talaş kesiti de artacaktır.

Bu da doğal olarak kesme kuvvetlerinin artmasına neden olacaktır. Ff ilerleme kuvvetindeki artış, Fc asıl kesme kuvvetindeki kadar bariz olmamakla birlikte, bir artışın olduğunu söylemek mümkündür. İlerleme kuvvetinin bariz bir şekilde artmamasının sebebi ise, takım talaş ara yüzeyinde sürtünme katsayısının çok değişmemesi gösterilebilir. Fc asıl kesme kuvveti ve Ff ilerleme kuvvetindeki bu değişim, literatürdeki çalışmalar incelendiğinde (Karpat 2011, Ducobu *et al.* 2017, Özel *et al.* 2010, Karpat 2011, Ducobu *et al.* 2017, Özel *et al.* 2010) bilinen ve beklenen bir durumdur. Burada asıl dikkat çeken nokta ise, azalan ilerleme değerine bağlı olarak, Ff/Fc oranının giderek 1'e yaklaşmasıdır. Bu oranın 1'e yaklaşması demek, kesme işleminin, kayma mekanizmasından ziyade kazıma mekanizmasıyla gerçekleştiğinin bir göstergesidir (Aslantaş ve Şahan 2017).

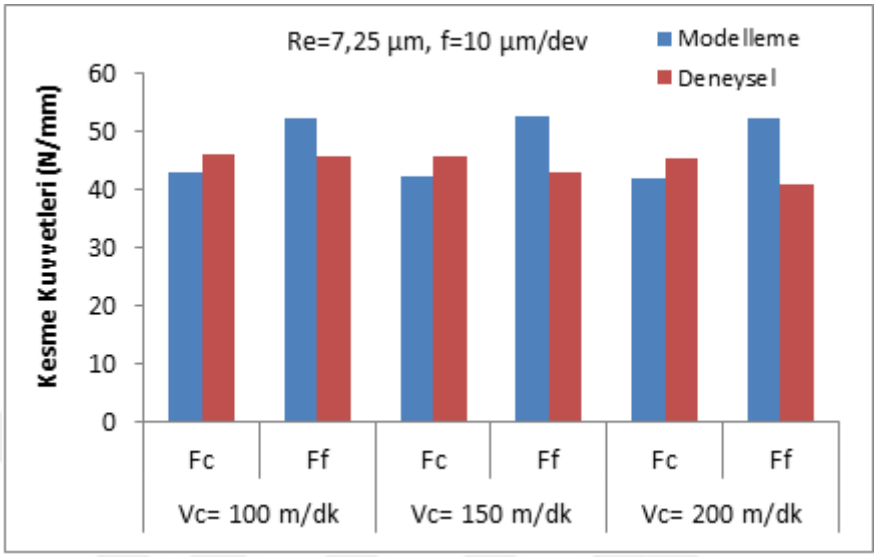


Şekil 5.1 İlerlemenin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi.

5.2.2 Kesme Hızının Kesme Kuvvetlerine Etkisi

Metal kesme işleminde, kesme hızı en çok şekil değiştirme hızını etkilemektedir. Daha yüksek kesme hızı, daha yüksek şekil değiştirme hızı anlamına gelir. Nümerik çözümlerden elde edilen kesme kuvveti değerlerinin deneysel çalışma ile uyumlu hale gelmesi için, nümerik modellemede kullanılan malzeme modelinin de yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışı tanımlanmalıdır. Çalışmada kesme hızının etkisini elde etmek adına, I.Takım kullanılarak sabit ilerleme değerinde (f=10 µm/dev), üç farklı kesme hızında (V_c=100 m/dk, V_c=150 m/dk, V_c=200 m/dk) kesme deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Aynı parametrelerle DEFORM-2D yazılımında modelleme işlemi de gerçekleştirildikten sonra, deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Kesme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi.

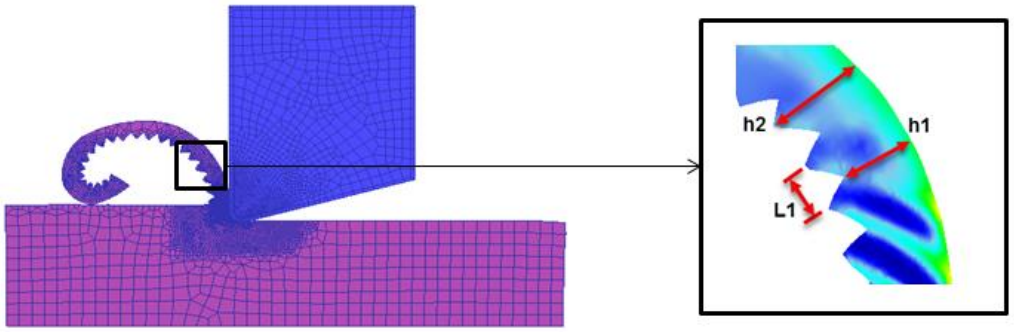
Şekil 5.2'de görüldüğü üzere, deneysel sonuçlar ve nümerik veriler birbirine oldukça yakındır. Bu da kullanılan malzeme modelini farklı kesme hızları açısından da doğrulamaktadır. Mikro tornalama işleminde, kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinde bariz bir değişimin olmadığı gözlemlenmektedir. Fc asıl kesme kuvveti ve Ff ilerleme kuvveti çok az bir miktarda azalmaktadır.

Kesme kuvvetlerinin çok az bir miktarda da olsa azalması kesme bölgesinde açığa çıkan ısı miktarının artmasına bağlanabilir. Bu ısı enerjisi kesme bölgesinde sıcaklığın artmasına ve atomlar arası bağların yumuşamasına neden olur. Böylece plastik deformasyon için gereken kuvvet de azalmaktadır (Yardımeden ve Turan 2015, Jagadesh and Samuel 2015, Chae *et al.* 2006, Jin and Altintas 2011).

Geleneksel tornalama işleminde en büyük kuvvet genellikle Fc asıl kesme kuvvetidir. Ff ilerleme kuvveti ve Fp radyal (pasif) kuvvet daha küçüktür. Ancak mikro tornalamada çok küçük ilerleme değeri, talaş derinliği ve kesme hızlarında çalışıldığı için Fc ve Ff birbirine çok yakın ve hatta bazı uygulamalarda Ff, Fc'den daha büyüktür (Furukawa and Moronuki 1988, Malekian *et al.* 2012, Grzesik 2017).

5.2.3 Talaş Formlarının Karşılaştırılması

Kullanılan malzeme modelinin doğruluğunu ortaya koymak adına deney sonrası elde edilen talaş geometrisinin SEM analizi yapılarak, modellemeden elde edilen talaş geometrisi ile kıyaslanmıştır. Sabit hızda (V_c=100 m/dk), 40 µm talaş derinliğinde ve üç farklı ilerleme hızında (f=10 µm/dev, f=20 µm/dev, f=40 µm/dev) gerçekleştirilen kesme deneylerinden elde edilen talaşlar, deforme edilmeden muhafaza edilerek SEM analizine tabi tutulmuştur. Talaş geometrisinin değerlendirmesi yapılırken genellikle deforme olmuş talaş kalınlığı dikkate alınır. Eğer oluşmuş ise testere formundaki talaş için minimum ve maksimum yükseklik ile her bir yükselti arasındaki mesafe dikkate alınır (Umbrello *et al.* 2007). Bu çalışmada da genellikle testere formunda talaş geometrisi elde edildiği için h1, h2 ve L1 tanımları kullanılmıştır (Şekil 5.3).

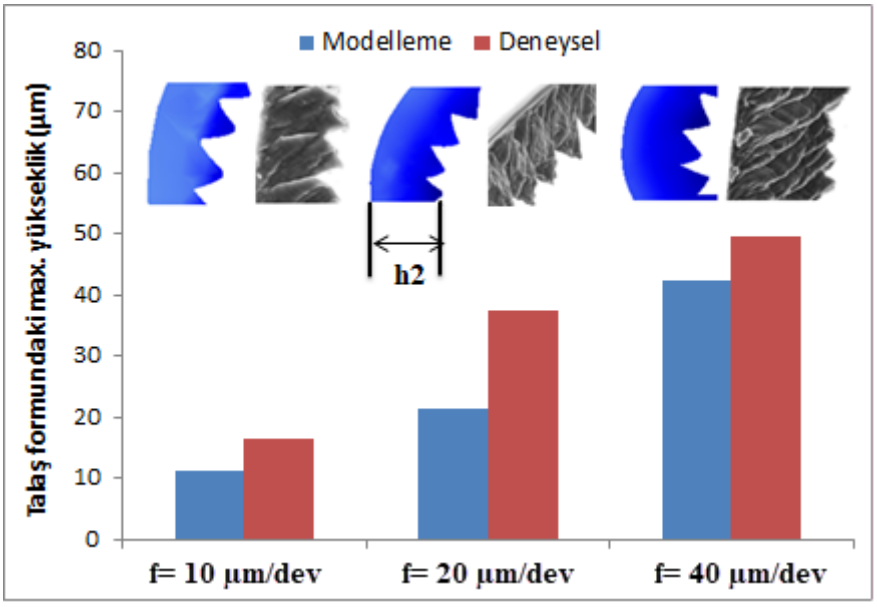


Şekil 5.3 Talaş formu yapısı ve talaş formu üzerindeki karakteristikler..

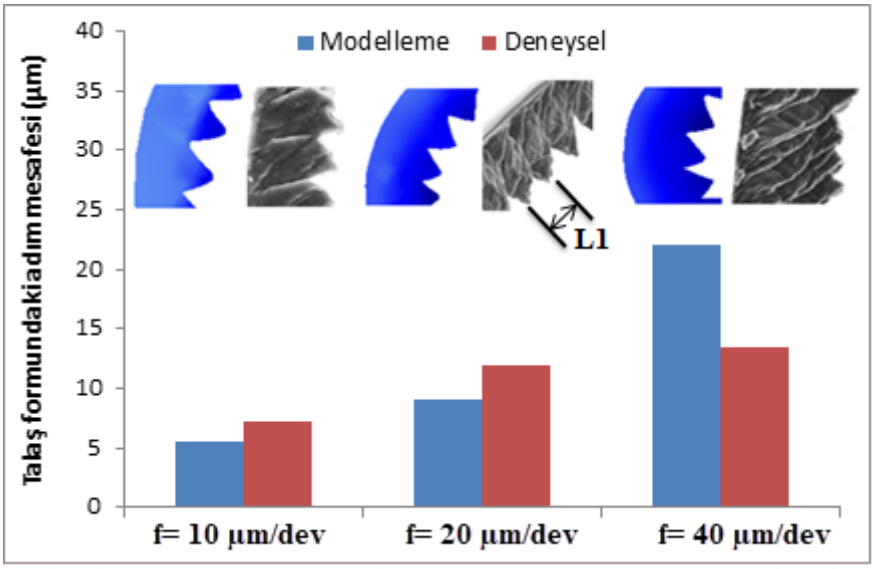
Deneysel çalışmalar sonrasında incelenen talaş tiplerinin tamamında testere formu gözlemlenmiştir. Kullanılan malzeme modeli baz alınarak, yapılan nümerik çözümlerde elde edilen talaş geometrisi ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.4 ve 5.5'te de verilmektedir. SEM analizinden bir çok farklı görüntü alınmış ve en az beş farklı ölçüm yapılmıştır. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de görüldüğü üzere deneysel çalışmalar sonucu elde edilen talaş formları ile modellemelerden elde edilen talaş formlarının birbirleri ile kabul edilebilir derecede uyumlu olduğunu söylemek mümkündür. Bu talaş formları üzerinden "Caliper" yazılımı kullanılarak alınan ölçümlerde, h2 ve L1 değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.4'den de görüldüğü üzere artan ilerleme değeri ile talaş kalınlığı da artmaktadır. Bu artış modelleme sonuçlarında da bariz bir şekilde

gözlemlenmektedir. Fakat 20 µm/dev ilerleme değerinde modelleme ile deneysel sonuç arasındaki fark en fazladır ve % 40'lar civarındadır. 10 µm/dev ve 40 µm/dev ilerleme değerlerindeki fark ise sırasıyla % 30 ve % 15'dir. Deneysel ile nümerik modelleme sonuçları arasındaki farkın temelinde ise takım talaş ara yüzeyindeki sabit sürtünme şartları yatmaktadır. Bu çalışmada takım talaş ara yüzeyinde, sürtünme katsayısı sabit ve 0,6 alınmıştır. Eğer hibrit (Dandekar *et al*. 2010, Xu and Mansori 2015), veya farklı sürtünme koşulları modellemeye dahil edilirse sonuçların daha da yakınsaması muhtemeldir. Literatürde verilen çalışmalara bakıldığında, (Ducobu *et al.* 2017, Özel ve Sima 2010b, Umbrello *et al.* 2007) elde edilen bu sonuçların oldukça tatmin edici olduğu ve kullanılan malzeme modelinin de kabul edilebilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 5.5'de artan ilerleme değerine bağlı olarak adım değerinin arttığı görülmektedir. Fakat artan ilerleme değeri ile birlikte modelleme ve deneysel veriler arasındaki farkta artmaktadır. Artan ilerleme değeri, birim zamanda kaldırılan talaş kalınlığının artmasına neden olacaktır. Bu da takım üzerinde plastik deformasyona zorlanan talaş kalınlığının artmasına neden olur. Artan talaş kalınlığı; kesme bölgesindeki ısı transferini ve talaşa geçen ısı miktarını, bu da birinci deformasyon bölgesindeki talaş davranışını etkiler.



Şekil 5.4 h2'nin ilerlemeye göre değişimi ve farklı ilerleme hızlarında talaş formu görselleri (Hascelik *et al.* 2019).



Şekil 5.5 L1'nin ilerlemeye göre değişimi ve farklı ilerleme hızlarında talaş formu görselleri (Hascelik *et al.* 2019).

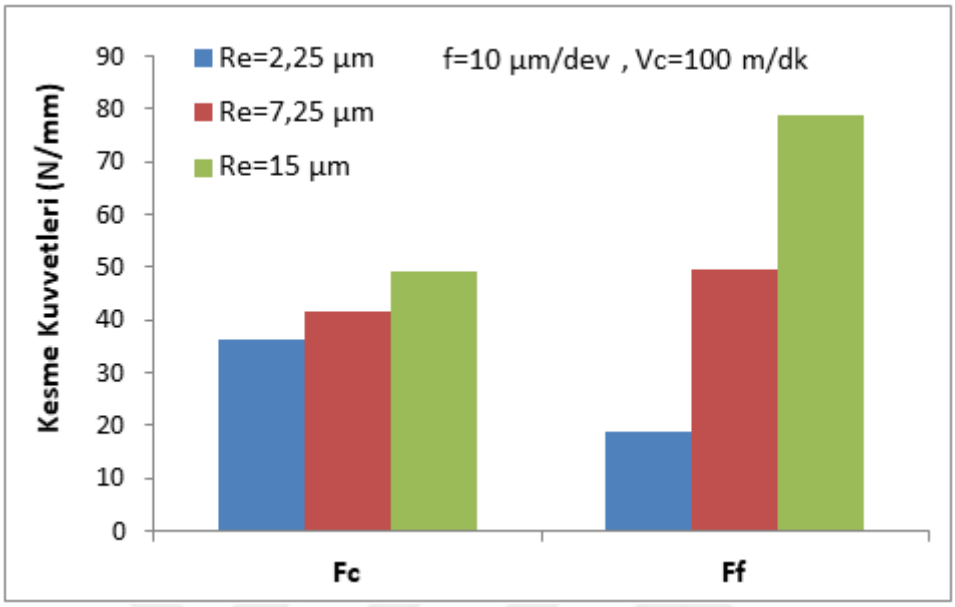
5.3 Kenar Yarıçapının Etkisi

Çalışmanın bu kısmında Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasında, kesici takım kenar yarıçapının kesme işlemine etkisi incelenmiştir. Malzeme modeli doğrulandıktan sonra, DEFORM-2D yazılımı kullanılarak 10 µm/dev ilerleme hızı ve 100 m/dk kesme hızında modellemeler yapılmıştır. Modellemelerde üç farklı kesici takım kenar yarıçapı (R_e=2,25 µm, R_e=7,25 µm, R_e=15 µm) kullanılmıştır. Bu modellemelerde kenar yarıçapının; kesme kuvvetlerine, takım gerilmelerine, yüzey altı artık gerilmelere ve talaş formuna etkisinin tespiti amaçlanmıştır.

5.3.1 Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisi

Kenar yarıçapının kesme kuvvetlerine etkisini gözlemlemek adına, malzeme modelinin doğrulaması yapıldıktan sonra, kenar yarıçapları farklı üç takımla, nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sabit 100 m/dk kesme hızı ve sabit 10 µm/dev ilerleme değerinde yapılan 2D modellemelerde kesici takımlara ait kenar yarıçapları R_e=2,25 µm, R_e=7,25 µm, R_e=15 µm'dir. Çalışmada kullanılan kesici takımın kenar yarıçapı 7,25 µm olup, bu değerin altında üstünde iki farklı değer için nümerik çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Kenar yarıçapının ilerleme değerinden küçük ya da büyük olması durumunda kesme kuvvetlerinin nasıl değiştiği ve kesici takım kenar yarıçapı

farklılıklarının asıl kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti üzerindeki etkileri Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Kesici takım kenar yarıçapının, kesme kuvvetlerine etkisi.

Kesici takıma ait kenar yarıçapı arttıkça kesme kuvvetleri artmaktadır. İlerleme kuvvetindeki artış, asıl kesme kuvvetindeki artışa göre daha belirgin olmaktadır. İlerleme değerinden daha küçük kenar yarıçapına sahip kesici takım ile gerçekleştirilen modellemede Fc kuvveti Ff kuvvetinden daha büyüktür. İlerleme değerine yakın kenar yarıçapına sahip kesici takım ile gerçekleştirilen modellemede Fc ve Ff kuvvetleri birbirine yakındır. İlerleme değerinden daha büyük kenar yarıçapına sahip kesici takım ile gerçekleştirilen modellemede ise Ff kuvveti Fc kuvvetinden daha büyüktür. Kesici takım kenar yarıçapının, ilerleme değerinden büyük olması, takımın negatif talaş açısına sahip bir kesici gibi davranmasına neden olmaktadır. Bu da talaş oluşumunu güçleştirdiği için ilerleme kuvveti artmaktadır. Kenar yarıçapının artmasıyla, takım talaş temas boyu arttığı için sürtünme kuvvetleri artmaktadır. Bu da Ff kuvvetinin daha belirgin bir şekilde artmasına neden olmaktadır (Aslantaş ve Hasçelik 2018b).

5.3.2 Yüzey Altı Artık Gerilmelere Etkisi

Mikro tornalamada özellikle kritik ilerleme ve talaş derinliğinin altında yapılan kesme işlemlerinde yüzey altı artık gerilmeler meydana gelir. Bu artık gerilmeler bir sonraki

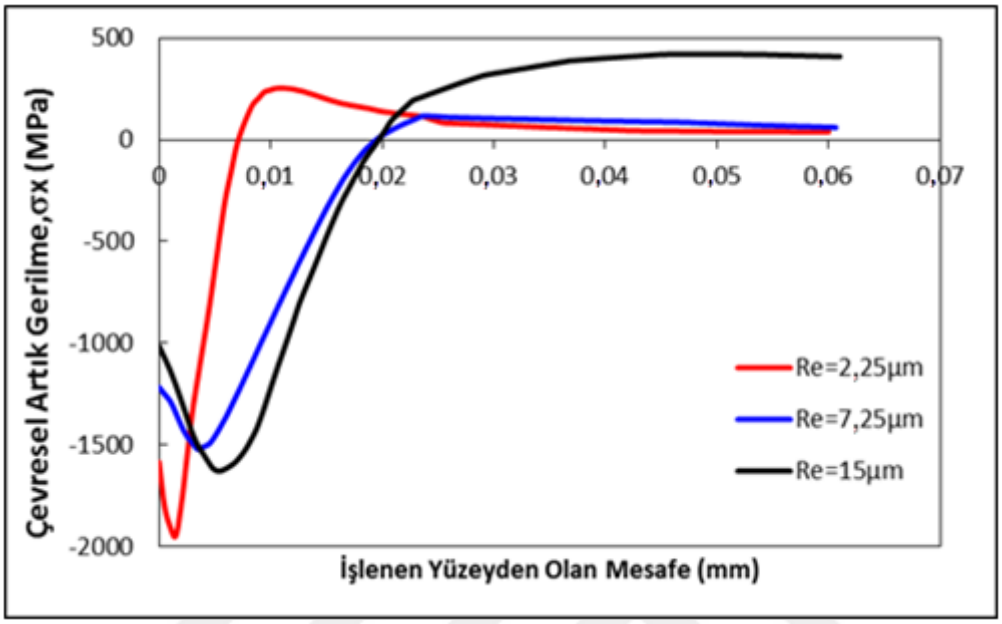
kesme işleminde, hem kesme kuvvetlerini hemde yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Yüzey altında meydana gelen bu gerilmeler, genellikle basma ve çekme olmak üzere iki farklı şekilde oluşur. Basma şeklinde meydana gelen gerilmeler yorulma ömrünü olumlu etkilerken, çekme şeklinde meydana gelen gerilmeler iş parçasının yorulma ömrünün azalmasına neden olur. Bu gerilmelerin yönü kadar büyüklüğü ve yüzeyden ne kadar bir derinlikte etkili olduğu da önemlidir. Bu nedenle imalat sonrasında yüzey altındaki artık gerilmelerin büyüklüğü ve yönü (basma veya çekme) dikkate alınmalıdır. Fakat bu artık gerilmelerin tespiti çok kolay olmamakla beraber oldukça maliyetlidir. Bu sebeple kesme kuvvetleri açısından malzeme modelinin doğruluğu ortaya konduktan sonra, nümerik çözüm yöntemiyle artık gerilmeler elde edilmiştir. Fakat artık gerilmelerin deneysel doğrulaması yapılamamıştır (Aslantaş ve Hasçelik 2018b).

DEFORM-2D yazılımında, elasto-plastik çözüm sonrası kesici takım modelden silinerek, iş parçasının sıcaklığı 20°C ye düşene kadar ikinci bir nümerik çözüm gerçekleştirilmiştir. Böylece iş parçasındaki eksenel ve çevresel artık gerilmeler elde edilmiştir. 10 µm/dev ilerleme hızı ve 100 m/dk kesme hızında, kenar yarıçapları farklı (Re=2,25 µm, Re=7,25 µm, Re=15 µm) üç kesici takımla modellemeler yapılmış ve kenar yarıçapının yüzey altındaki artık gerilmelere etkisi incelenmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de çevresel ve eksenel artık gerilmelerin işlenen yüzeyden derinliği bağlı olarak değişimleri verilmiştir.

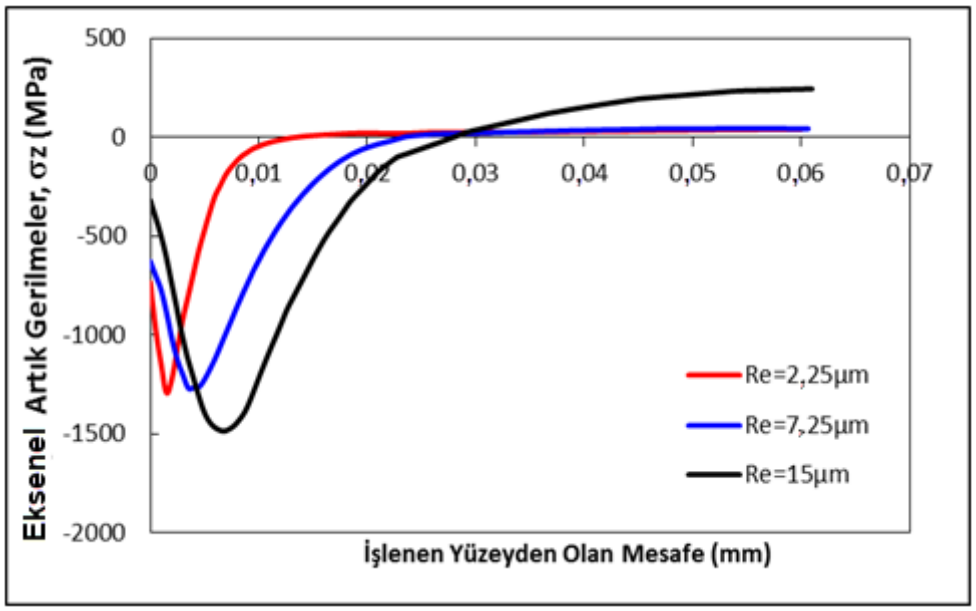
Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'den de görüldüğü üzere, işlenen yüzeyde meydana gelen çevresel ve eksenel artık gerilmeler genellikle basma gerilmesi şeklindedir. Kesici takım kenar yarıçapına bağlı olarak basma şeklindeki gerilmeler çekmeye dönebilmektedir. Kenar yarıçapının artmasıyla çevresel artık gerilmelerde bir miktar azalma görülürken, eksenel yöndeki gerilmelerde artış gözlenmiştir. Kenar yarıçapının artmasıyla, basma yönündeki çevresel ve eksenel gerilmelerin görüldüğü derinlik de artmaktadır.

Her iki durumdaki grafikte de gözlendiği üzere, basma gerilmeleri 20 µm derinliğe kadar etkili olmaktadır. 20 µm derinlikten sonra çekme gerilmeleri etkindir. Kenar yarıçapının artması hem eksenel hem de çevresel yönde, çekme artık gerilmelerine neden olmaktadır. Özellikle Re = 15 µm için, 20 µm derinliğinden sonra çekme

yönünde artık gerilmeler oluşmaktadır. Fakat R_e = 2,25 µm ve 7,25 µm için 20 µm'den sonra meydana gelen çekme gerilmeleri daha düşük seviyelerdedir (Aslantaş ve Hasçelik 2018b).



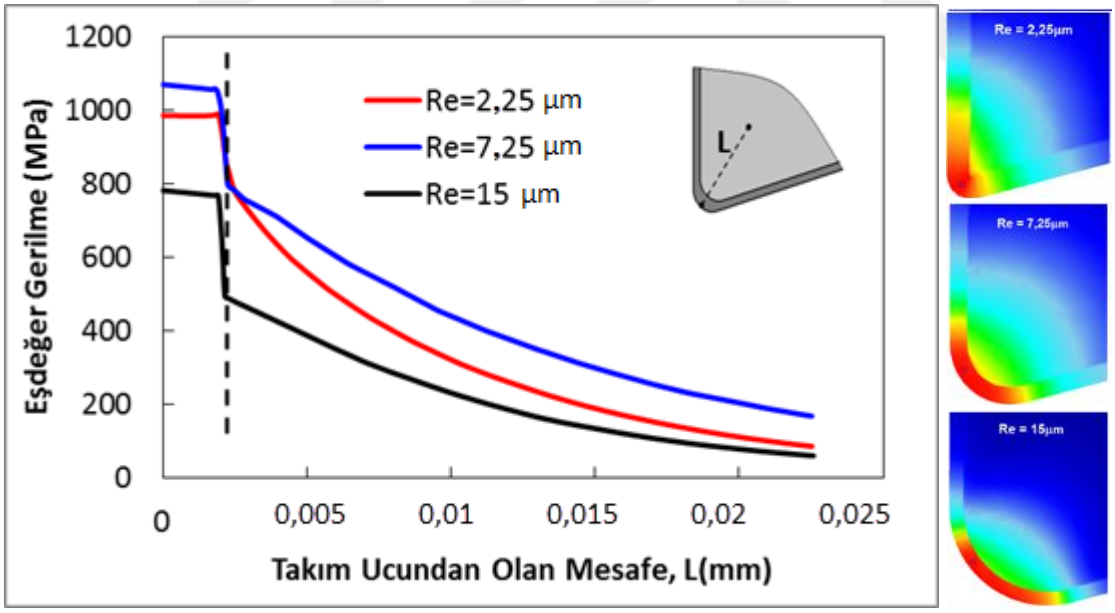
Şekil 5.7 Farklı kenar yarıçaplarına göre yüzey altında meydana gelen çevresel artık gerilmelerin değişimi (Aslantaş ve Hasçelik 2018b).



Şekil 5.8 Farklı kenar yarıçaplarına göre yüzey altında meydana gelen eksenel artık gerilmelerin değişimi (Aslantaş ve Hasçelik 2018b).

5.3.3 Takım Gerilmelerine Etkisi

Takım yüzeyindeki gerilmelerin tespiti için öncelikle 10 µm/dev ilerleme hızı ve 100 m/dk kesme hızında, farklı kenar yarıçapına sahip takımlarla DEFORM-2D yazılımında modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında iş parçası modelden silinerek ikinci bir nümerik çözüm gerçekleştirilmiştir. Kenar yarıçapları R_e=2,25 µm, R_e=7,25 µm, R_e=15 µm olan kesici takımlara ait bu çözümlerde, kenar yarıçapının takım yüzeyindeki gerilmelere etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kesici takıma ait kaplama kalınlığı sabit ve 2 µm olduğundan nümerik çözümlerde de kaplama kalınlığı değiştirilmemiştir. Şekil 5.9'da eşdeğer gerilmelerin değişimi verilmiştir. Gerilme değerleri L mesafesi boyunca ifade edilmiş, takımın en uç noktasından iç kısmına doğru alınmıştır. Takımda kullanılan kaplama malzemesinin son bulunduğu noktadan sonra, eşdeğer gerilmelerde ani bir düşüş eğilimi gözlenmektedir. Kenar yarıçapının 2,25 µm'den 7,25 µm'ye artması eşdeğer gerilmelerin bir miktar artmasına sebep olmuştur fakat kenar yarıçapı 15 µm olan kesici takıma ait eşdeğer gerilmeler daha küçüktür.



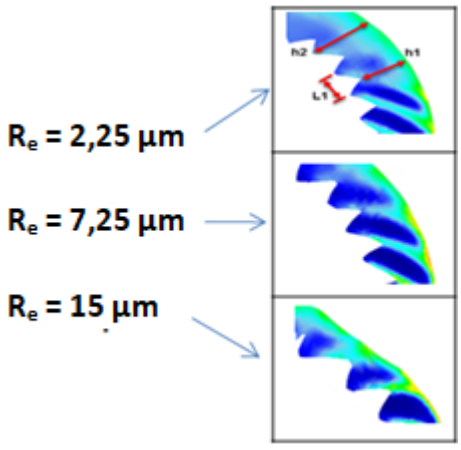
Şekil 5.9 Farklı kenar yarıçaplarına göre takım gerilmeleri.

Kenar yarıçapının artmasıyla takım ucunda rijitlik artar. Bunun sonucunda takım ucunda meydana gelen gerilmelerinde azalması beklenir. Aynı zamanda kenar yarıçapının artmasıyla kesme kuvvetleri de arttığından R_e=7,25 µm için elde edilen gerilme değeri, R_e=2,25 µm için elde edilen gerilme değerinden daha yüksek olarak

gerçekleşmiştir. Yani R_e=2,25 µm ve R_e=7,25 µm arasındaki ilişkide, takıma etki eden kesme kuvvetleri, artan kenar yarıçapının sağladığı rijitlik artışına nazaran daha baskınken; R_e=15 µm ve R_e=7,25 µm arasındaki ilişkide ise, artan kenar yarıçapının sağladığı rijitlik, takıma etki eden kesme kuvvetlerinden daha baskındır.

5.3.4 Talaş Formu Üzerindeki Etkisi

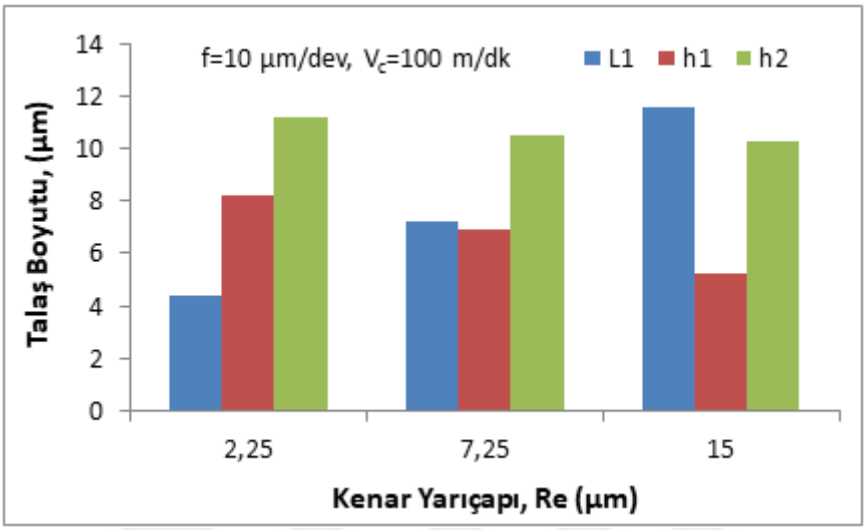
Mikro tornalama işleminde kesici takım kenar yarıçapı, talaş oluşum mekanizmasını doğrudan etkiler. Kenar yarıçapının artması, kesici takımın iş parçasına dalmasını zorlaştıracağı için kesme kuvvetleri artacak, dolayısıyla talaş şekli de değişecektir. Kenar yarıçapının talaş formuna etkisini gözlemlemek adına kenar yarıçapları farklı üç kesici takım ile nümerik modellemeler yapılmıştır. Nümerik çözümlemeler sonrasında elde edilen talaş şekline ait üç farklı parametre yine DEFORM yazılımı içerisindeki cetvelden ölçülerek elde edilmiştir. Farklı kenar yarıçaplarına sahip kesici takımlarla yapılan nümerik çözümlerde, talaş şekilleri arasındaki görsel farklılık Şekil 5.10'da verilmiştir. Sabit ilerleme (f=10 µm/dev) ve sabit kesme hızında (V_c=100 m/dk), kenar yarıçapının değişimiyle, talaş boyutunun nasıl etkilendiği grafik halinde verilmektedir. Testere tipi talaş formu üzerinde h2 ifadesi maksimum yüksekliği, h1 ifadesi minimum yüksekliği, L1 ifadesi ise adımı simgelemektedir.



Şekil 5.10 Farklı kenar yarıçaplarına bağlı olarak talaş şeklindeki değişim.

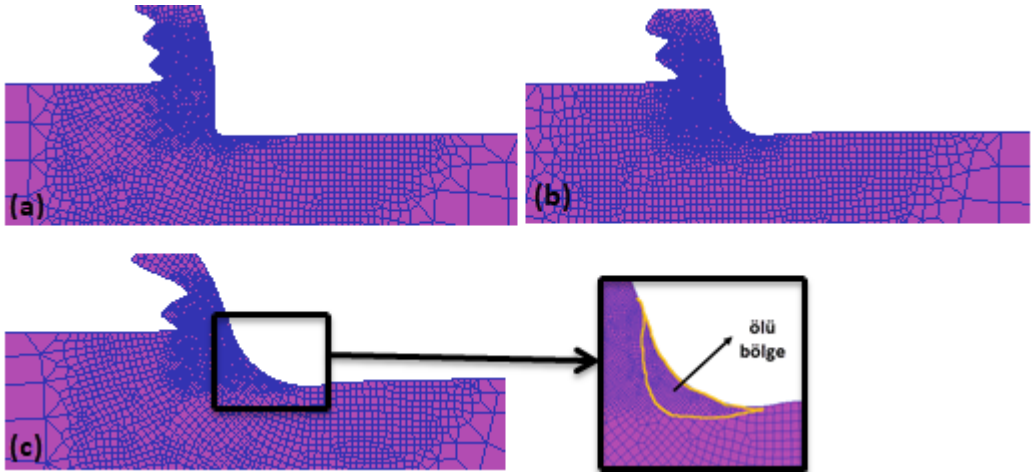
Şekil 5.11'de görüldüğü üzere kenar yarıçapının artmasıyla L1 değeri doğrusal olarak artmaktadır. Yani talaşın segmantasyonu (birim zamanda oluşan diş sayısı) azalmaktadır. L1 değerinin artmasıyla testere tipi talaş oluşumunda meydana gelen

dişler daha derinleşerek belirginleşmiştir. Bu da kenar yarıçapının artmasıyla h1 değerinin azalmasına neden olmuştur. h2 değeri ise neredeyse sabit kalmıştır. h2 değeri kesici takım kenar yarıçapından ziyade ilerlemeye bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla h2 değerinde, kenar yarıçapı değişiminin etkisi, ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 5.11 Farklı kenar yarıçaplarına göre talaş formundaki değişim.

Kenar yarıçapının artması, negatif bir talaş açısı etkisi oluşturduğundan kayma açısının da değişmesine neden olmuştur. Kenar yarıçapı artışına bağlı olarak negatif talaş açısı etkisinden dolayı kesici takım önünde ölü bölge oluşumu gözlenmiştir. Kesici takım kenar yarıçapı arttıkça, ölü bölge büyümekte (Şekil 5.12), dalma kuvveti artmaktadır. Bu da kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır (Wan *et al.* 2018).



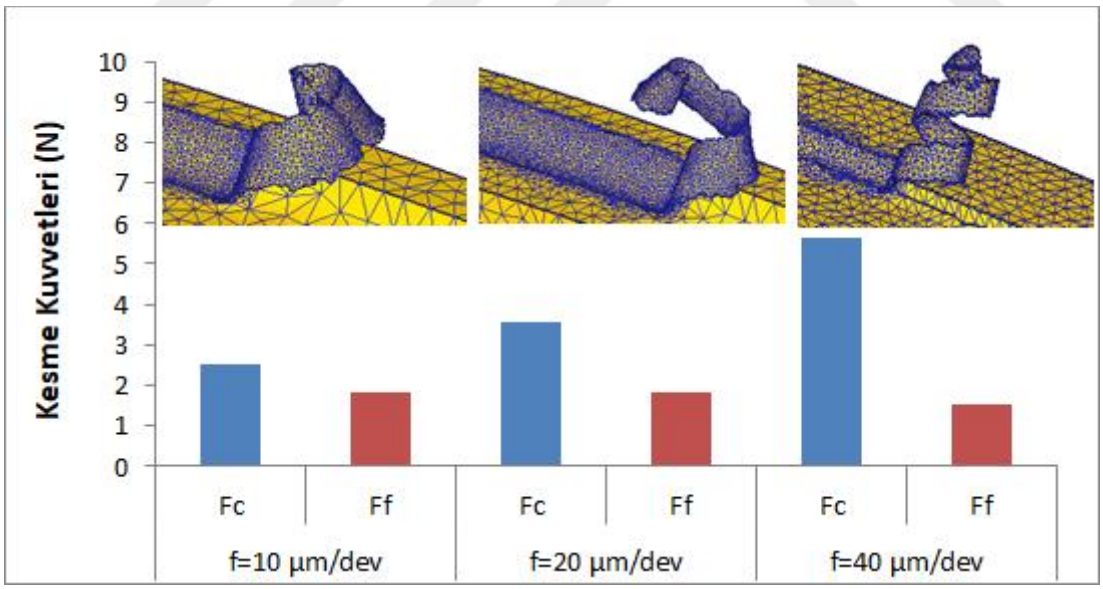
Şekil 5.12 Kesici kenar yarıçapına göre talaş formu üzerinde ölü bölge değişimi a) R_e=2,25 µm, b) R_e=7,25 µm, c) R_e=15 µm

5.4 Takım Geometrisinin Etkisi

Bölüm 5.1 ve 5.2'de belirtildiği üzere, malzeme modelinin doğrulaması yapıldıktan sonra kenar yarıçapının kesme işlemine etkisi 2D modellenmiştir. Fakat takım geometrisinin, özellikle de burun yarıçapının etkisini gözlemlemek için 2D modelleme yetersizdir. Bu sebeple öncelikle, aynı malzeme modeli ile 3D modelleme yapılarak malzeme modelinin doğruluğu teyit edilmiştir. Sonrasında ap<R_ε, ap=R_ε ve ap>R_ε olması durumlarında burun yarıçapı farklılıkları modellenmiştir. En son ise, takım geometrisi farklılıklarının kesme kuvvetlerini nasıl etkilediği tespit edilmiştir.

5.4.1 Mikro Tornalama İşleminin Üç Boyutlu Modellenmesi

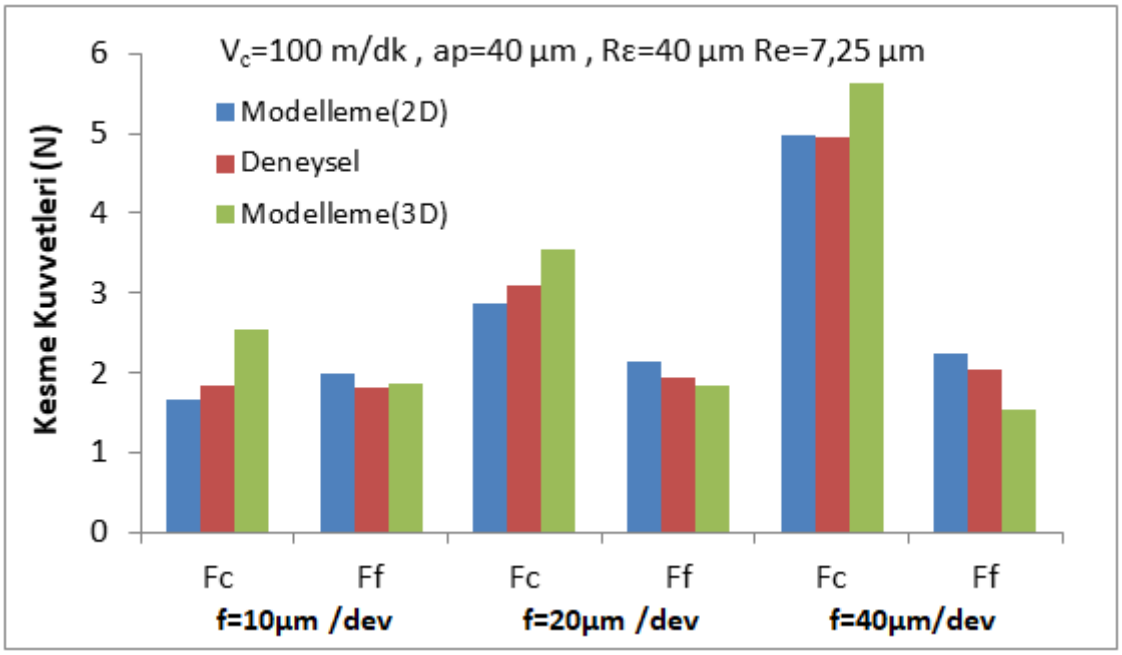
Çalışmanın bu kısmında öncelikle, sabit talaş derinliği (a_p=40 µm) ve kesme hızında (V_c=100 m/dk), farklı ilerleme hızlarında (f=10 µm/dev, f=20 µm/dev, f=40 µm/dev) nümerik çözümler gerçekleştirilerek ilerleme hızının talaş oluşumu ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi 3 boyutlu modellenmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 Farklı ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin değişimi ve 3 boyutlu talaş oluşumu.

3 boyutlu modellleme sonrasında elde edilen kesme kuvvetleri, 2D modelleme verileri ve deneysel sonuçlar ile Şekil 5.14'de karşılaştırılarak hem kullanılan malzeme modelinin doğruluğu hem de 2 ve 3 boyutlu modelleme sonuçlarının doğruluğu ortaya

konulmuştur. Şekil 5.14'den görüldüğü üzere, I.Takım (R_e=7,25 µm, R_ε=40 µm) kullanılarak yapılan kesme deneyleri ve 2D-3D modelleme sonuçları birbirleriyle uyum içerisindedir. 3D modelleme verileri ve deneysel kesme kuvvetleri arasında %2 ila %20 arasında bir hata payı vardır. Bu da kabul edilebilir bir hata payı olarak düşünülmektedir. Zira literatürde yapılan bazı çalışmalarda bu hata payının daha yüksek olduğu çalışmalara da rastlamak mümkündür (Cakir *et al.* 2015, Parihar *et al.* 2016).

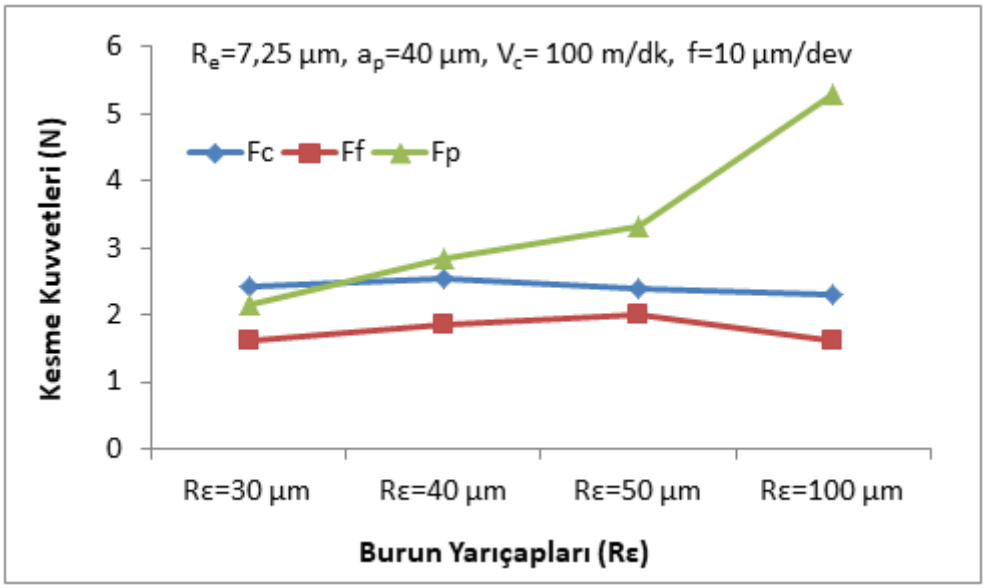


Şekil 5.14 Farklı ilerleme hızlarında, 2D ve 3D modelleme sonrası elde edilen kesme kuvvetlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

5.4.2 Burun Yarıçapı Etkisinin Modellenmesi

Kesme deneylerinde kenar ve burun yarıçapı farklı iki takım kullanıldığından, elde edilen sonuçları değerlendirirken, I.Takım (R_e=7,25 µm, R_ε=40 µm) ve II.Takım (R_e=12 µm, R_ε=166,5 µm) şeklinde tanımlama yapılmıştır. I.Takım kullanılarak 40 µm talaş derinliği ve 100 m/dk kesme hızında burun yarıçapının talaş derinliğinden küçük, eşit ve büyük (R_ε<ap, R_ε=ap ve R_ε>ap) olması durumunda, kesme kuvvetlerinin değişimi Şekil 5.15'de gösterilmiştir. Burun yarıçapının talaş derinliğinden küçük ve eşit ($R_\varepsilon \leq$ap) olduğu nümerik çözümler (R_ε=30 µm ve R_ε=40 µm) karşılaştırıldığında, konvansiyonel tornalama işlemine benzer bir etki gözlenmiş, burun yarıçapı arttıkça kesme kuvvetleri de artmıştır. Burun yarıçapının R_ε=50 µm olduğu çözümde, R_ε'nin ap'den büyük

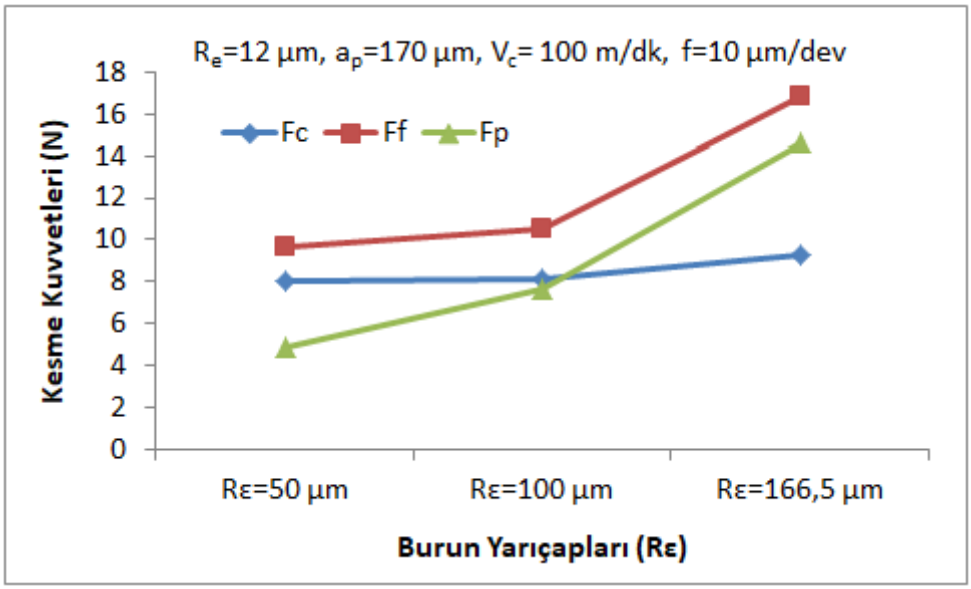
olmasıyla kesici ucun burun kısmı, iş parçasına daha az temas etmeye başlamıştır. Bu etkiden dolayı Fc kuvveti azalırken, bu etkinin henüz az olmasından dolayı Ff kuvveti artmaya devam etmiştir. Burun yarıçapının R_ε=100 µm olduğu çözümde ise R_ε, ap'den fazlasıyla büyük olduğu için kesici ucun burun kısmı iş parçasına çok az temas etmiştir. Dolayısıyla Fc ve Ff burun yarıçapı arttıkça azalmıştır. Mikro tornalamayı konvansiyonel tornalamadan farklı kılan en önemli unsur, boyut etkisinden kaynaklanan farklılıklardır. Radyal yönde işlenmiş yüzeye dik etki eden Fp ise, ilerlemenin artmasıyla artmaktadır. R_ε'nin ap'den büyük değerler almasıyla Fc azalırken, Fp'nin arttığı gözlemlenmektedir (Jagadesh and Samuel 2014).



Şekil 5.15 Kesici takım burun yarıçapının kesme kuvvetlerine etkisi (ap=40 µm).

Burun yarıçapı ve kenar yarıçapı I.Takıma göre daha yüksek değerde olan II.Takım kullanılarak 170 µm talaş derinliği ve 100 m/dk kesme hızında 3 boyutlu nümerik çözümler gerçekleştirilmiştir. Sonrasında aynı kesme parametrelerinde, kesici takım burun yarıçapı R_ε=50 µm, R_ε=100 µm olmak üzere 2 farklı kesici takım burun yarıçapı da ilave edilmiş ve burun yarıçapının kesme işlemine etkisi modellenmiştir. Kesme kuvvetlerinin değişimi Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Modelleme işleminde kullanılan kesici takımların R_ε<ap'dir. Dolayısıyla burada konvansiyonel tornalama işlemine benzer bir durum söz konusudur. Burun yarıçapının artmasıyla kesme kuvvetlerinin artması beklenir ki (Kosaraju *et al.* 2013, Asad *et al.* 2014), Şekil 5.16'de görüldüğü üzere kesme kuvvetleri artmıştır. Burun yarıçapı arttıkça Ff kuvvetindeki artış Fc

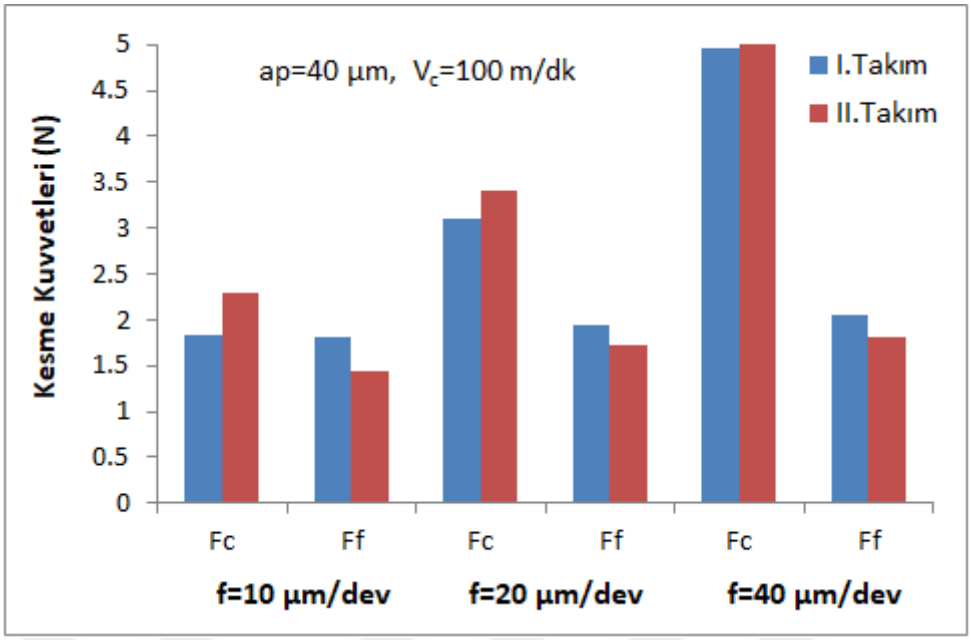
kuvvetindeki artışa nazaran daha belirgin olmuştur. Ff kuvvetinin Fc kuvvetinden büyük olması kesme işleminin, kayma mekanizmasından çok kazıma mekanizmasıyla gerçekleştiğinin bir göstergesidir (Madariaga *et al.* 2014, Aslantaş ve Şahan 2017) Burun yarıçapının artmasıyla pasif kuvvet de artmaktadır. R_ε/ap oranı 1'e yaklaştıkça Fp, Fc'ye nazaran büyük değerler almaktadır (Madariaga *et al.* 2014, Jagadesh and Samuel 2015, Ducobu *et al.* 2017).



Şekil 5.16 Kesici takım burun yarıçapının kesme kuvvetlerine etkisi (ap=170 µm).

5.4.3 Kesme Kuvvetlerine Etkisi

Takım geometrisinin kesme kuvvetlerine etkisini gözlemlemek adına burun yarıçapı ve kenar yarıçapı farklı 2 kesici takım kullanılarak mikro tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her iki takım ile yapılan kesme deneylerinde talaş derinliği, kesme hızı sabit alınmış, farklı ilerleme hızlarında takım geometrisinin kesme kuvvetlerine etkisi Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Her iki takımla yapılan kesme deneylerinde, üç farklı ilerleme değerinde de, I.Takımla yapılan kesme işlemindeki asıl kesme kuvveti, II.Takımla yapılan kesme işlemindeki Fc'den büyüktür. II.Takımla yapılan kesme işlemindeki ilerleme kuvveti ise, I.Takımla yapılan kesme işlemindeki Ff'den büyüktür. Burun ve kenar yarıçapının artması; Fc kuvvetinin artmasına, Ff kuvvetinin ise azalmasına neden olmaktadır (Madariaga *et al.* 2014).



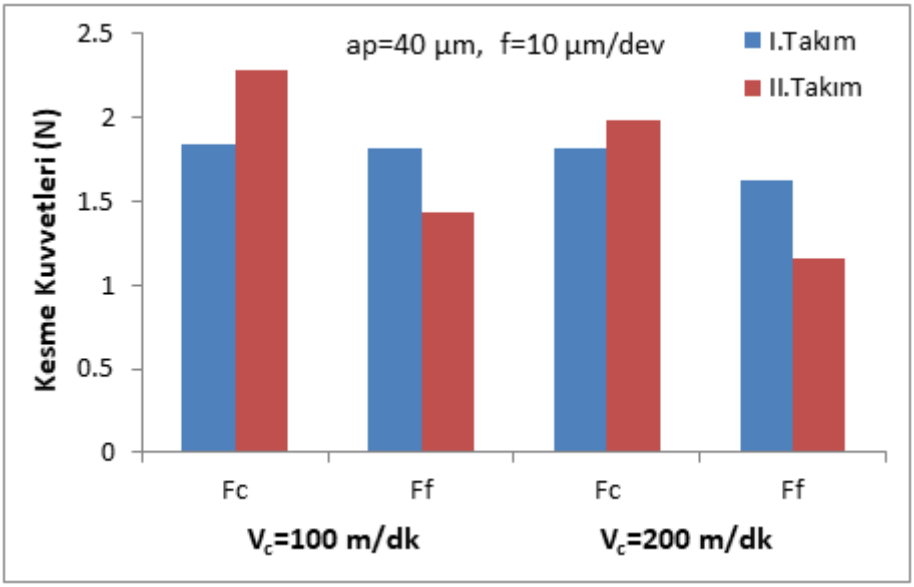
Şekil 5.17 Farklı ilerleme değerinde, iki takımla yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Konvansiyonel tornalama işleminde burun ve kenar yarıçapının artması kesme kuvvetlerini artırmaktadır (Ma *et al.* 2012). Fakat mikro tornalama işleminde, kesme parametreleri takım geometrisine göre çok küçük değerler almaktadır. Bu da mikro tornalama işlemini, konvansiyonel tornalama işleminden farklı kılmaktadır.

I.Takımın kenar yarıçapı, üç ilerleme değerinden de küçükken (7,25 µm<10 µm,20 µm, 40 µm), burun yarıçapı, talaş derinliği ile eşdeğerdir (R_ε=ap=40 µm). II.Takımın kenar yarıçapı sadece 10 µm/dev ilerleme değerinden biraz büyük olup diğer iki ilerleme değerinden küçük (10 µm<12 µm<20 µm,40 µm), burun yarıçapı ise talaş derinliğinden fazlasıyla büyüktür (166,5 µm>40 µm). Kenar yarıçapının artması kesme kuvvetlerini artırmaktadır. Mikro tornalamada burun yarıçapının talaş derinliğinden büyük olması durumunda ise burun yarıçapının artması kesme kuvvetlerini bir miktar azaltmaktadır. Şekil 5.17'de görüldüğü üzere, üç farklı ilerleme değerinde de, II.Takım kullanılarak yapılan kesme işlemindeki asıl kesme kuvvetileri, I.Takım kullanılarak yapılan asıl kesme kuvvetlerinden daha büyük olması, kesici takımdaki kenar yarıçapı değişiminin daha ağır bastığını göstermektedir. Üç farklı ilerleme değeri için I.Takım kullanılarak yapılan kesme işleminde ise ilerleme kuvvetlerinin, II.Takım kullanılarak yapılan kesme işlemindeki ilerleme kuvvetlerinden daha büyük olması, kesici takımdaki burun yarıçapı

değişiminin daha ağır bastığının göstergesidir. Kısacası Fc kuvvetinin değişiminde R_e'nin, Ff kuvvetinin değişiminde ise R_ε'un daha etkili olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 5.17). Ayrıca 10 µm/dev ilerleme değerinde II.Takım ile, 20 µm/dev ve 40 µm/dev ilerleme değerlerinde ise her iki takım ile yapılan kesme işleminde Fc kuvveti Ff kuvvetinden büyüktür. 10 µm/dev ilerleme değerinde I.Takım ile yapılan kesme işleminde ise Fc ve Ff kuvvetleri birbirine çok yakındır. Bu farklılığın sebebi ise burun ve kenar yarıçapının ilerleme değeriyle kıyaslanabilecek küçüklükte sayısal değere sahip olmasıdır.

Takım geometrisinin, 40 µm talaş derinliği ve 10 µm/dev ilerleme değerinde, iki farklı kesme hızında (V_c=100 m/dk, V_c=200 m/dk) karşılaştırılması Şekil 5.18'de verilmiştir. Her iki takımda da kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinde %2 ile %18'lik bir oranda düşüş göze çarpmaktadır. Şekil 5.17'ye benzer şekilde I.Takım ile gerçekleştirilen kesme işleminde II.Takıma kıyasla, Fc kuvveti daha küçük, Ff kuvveti daha büyüktür. Burada da aynı etki söz konusu olup, kesici takım kenar yarıçapının artması Fc kuvvetinin artmasına neden olurken, I.Takımda ap'ye eşit olan R_ε'nin II.Takımda daha da artması, kesici ucun burun kısmının iş parçasına temasına azaltarak Ff kuvvetinin düşmesine neden olmuştur.



Şekil 5.18 Farklı kesme hızlarında, iki takımla yapılan kesme deneyleri sonucunda oluşan kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

5.5 Takım Geometrisinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi

Tez çalışmasının son adımında, mikro tornalama işleminde takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini tespit etmek adına, bu çalışmada kullanılan burun ve kenar yarıçapları farklı 2 takım ile yeniden kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyleri her iki takım için, üç farklı kesme hızı (V_c=100 m/dk, V_c=250 m/dk, V_c=400 m/dk), talaş derinliği (ap=5 µm, ap=15 µm, ap=25 µm) ve ilerleme hızında (f=10 µm/dev, f=25 µm/dev, f=40 µm/dev) gerçekleştirilerek iş parçası numuneleri saklanmıştır. Bu iş parçası numuneleri yüzeyinde optik profilometre cihazı kullanılarak Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerleri alınmıştır.

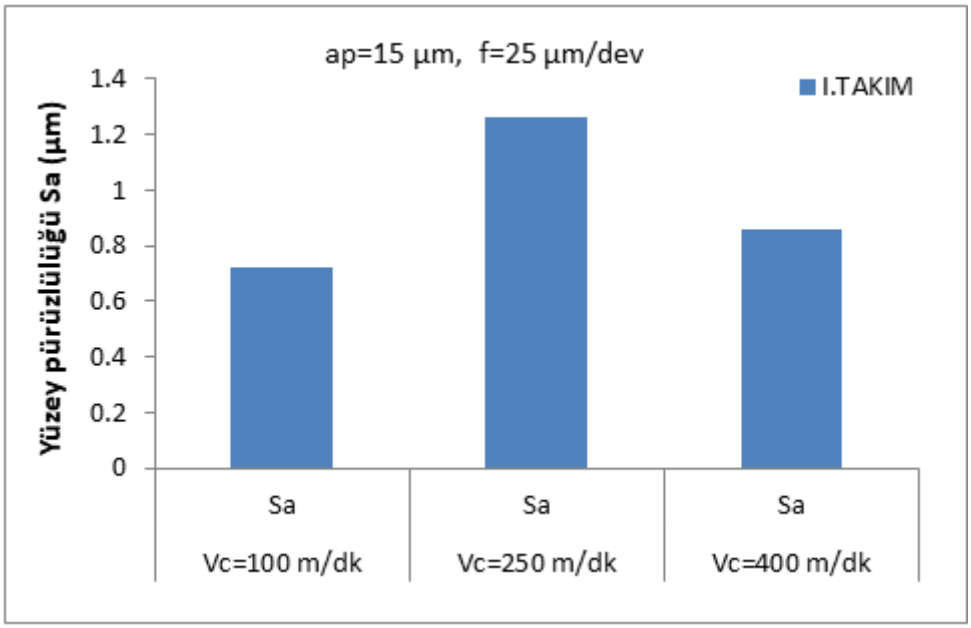
Sabit talaş derinliği ve ilerleme değerinde kesme hızının etkisi, sabit kesme hızı ve ilerleme değerinde ise talaş derinliğin etkisi araştırılmıştır. Sonrasında ise üç farklı ilerleme değerinde, sabit talaş derinliği ve kesme hızında, takım geometrisi farklı iki takımla gerçekleştirilen kesme deneyleri sonucunda, iş parçası üzerinde Sa ve Sz değerleri incelenerek, takım geometrisi farklılıklarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi tespit edilmiştir.

5.5.1 Kesme Hızına ve Talaş Derinliğine Göre Değişimi

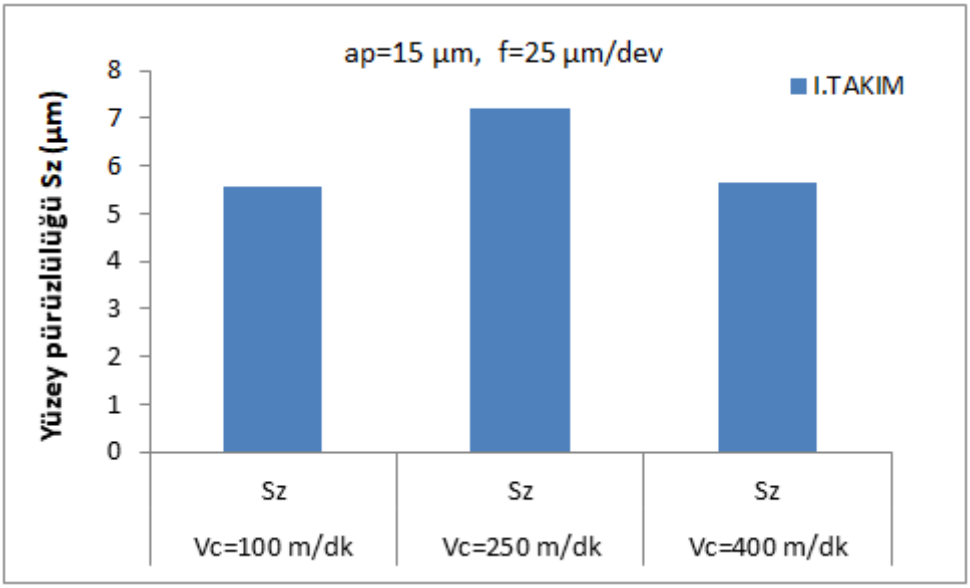
Kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisini gözlemlemek adına, 15 µm talaş derinliği ve 25 µm/dev ilerleme değerinde, üç farklı kesme hızında (V_c=100 m/dk, V_c=250 m/dk, V_c=400 m/dk), iş parçası kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Sonrasında iş parçasından yüzey pürüzlülük ölçümleri alınarak, bu ölçümlerin ortalaması grafiklere dökülmüş Şekil 5.19'da Sa yüzey pürüzlülük ifadesi, Şekil 5.20'de ise Sz yüzey pürüzlülük ifadesinin değişimi gösterilmiştir.

Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesi literatürde bilinen bir durumdur (Özel and Karpat 2005). Fakat Şekil 5.19 ve 5.20'de görüldüğü üzere, kesme hızının artmasıyla Sa ortalama yüzey pürüzlülük değeri ve Sz ortalama yüzey pürüzlülük değeri önce artmış daha sonra azalmıştır. Burada 15 µm talaş derinliğinin, kesici takım burun yarıçapına göre küçük olması, bu durumun nedeni olarak

gösterilebilir. Burada kazıma ağırlıklı bir kesme işleminin meydana geldiği, yüzeye sıvanmış talaş kalıntılarınında yüzey pürüzlülük ölçümlerini etkilediği düşünülmektedir (Aslantaş ve Şahan 2017).



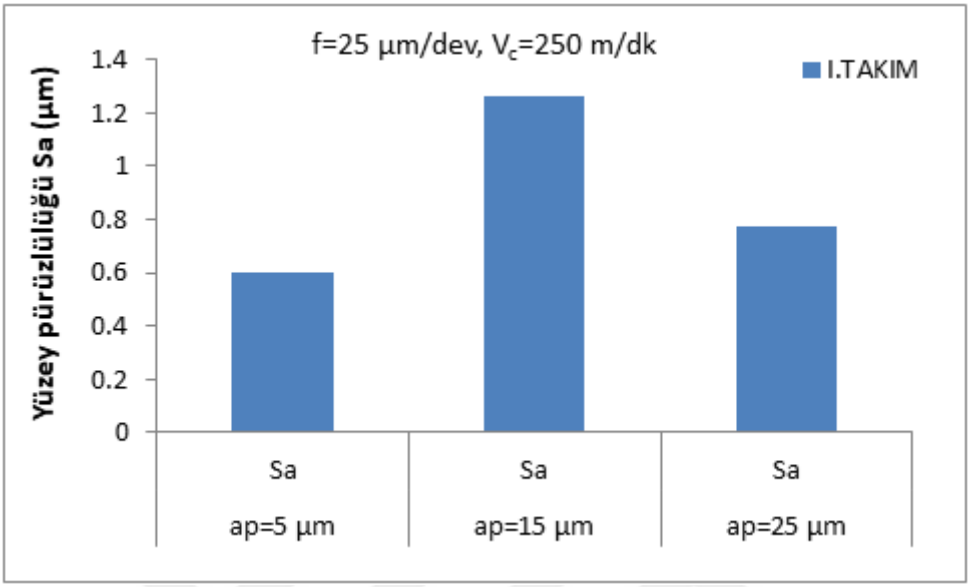
Şekil 5.19 Kesme hızına göre Sa (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi.



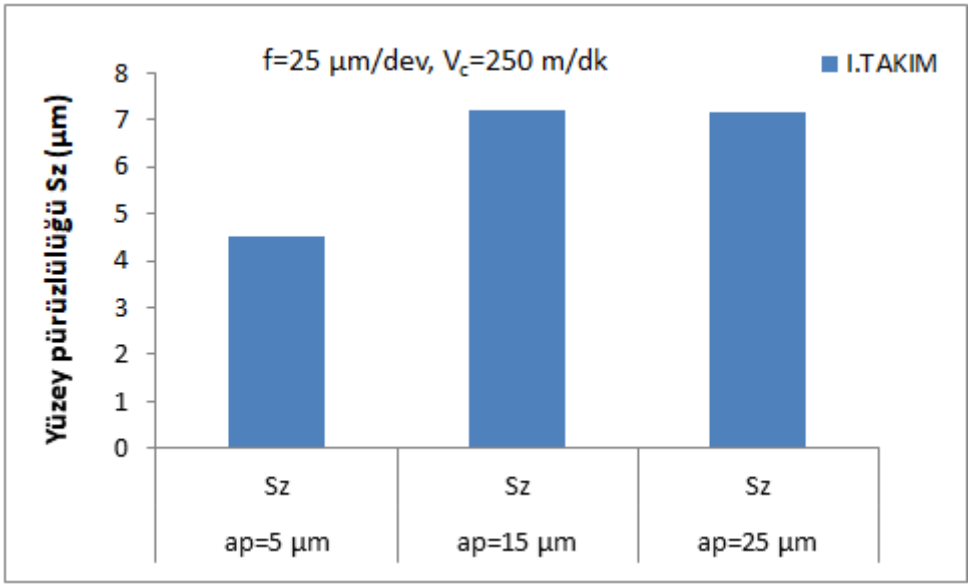
Şekil 5.20 Kesme hızına göre Sz (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi.

Talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini gözlemlemek adına, 25 µm/dev ilerleme ve 250 m/dk kesme hızında, üç farklı talaş derinliğinde (ap=5 µm, ap=15 µm, ap=25 µm), iş parçası kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Kesme deneyleri sonucu elde edilen

ölçümlerin ortalaması not edilip grafiklere dökülmüş Şekil 5.21'de Sa yüzey pürüzlülük ifadesi, Şekil 5.22'de ise Sz yüzey pürüzlülük ifadesinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.21 Talaş derinliğine göre Sa (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi.



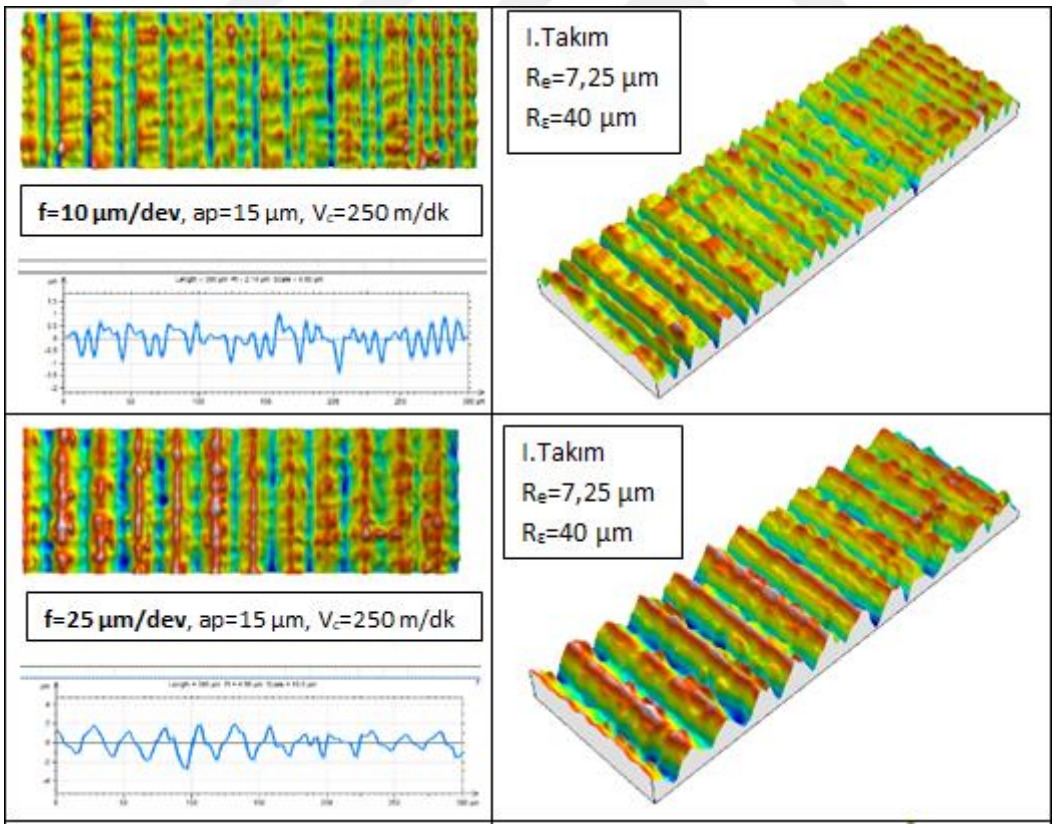
Şekil 5.22 Talaş derinliğine göre Sz (µm) yüzey pürüzlülük değerinin değişimi.

Talaş derinliğinin artması genellikle yüzey pürüzlülüğünü artırır fakat literatürde bu ifade ile çelişen çalışmalar da mevcuttur (Sumardiyanto *et al.* 2018, İnce and Asiltürk 2015, Anil *et al.* 2017). Şekil 5.21'da görüldüğü üzere, talaş derinliğinin artması, Sa yüzey pürüzlülük değerini önce artırmış sonra ise azaltmıştır. Şekil 5.22'de ise genel anlamda talaş derinliği arttıkça Sz değeri artmıştır. ap=5 µm olan yüzey pürüzlülük

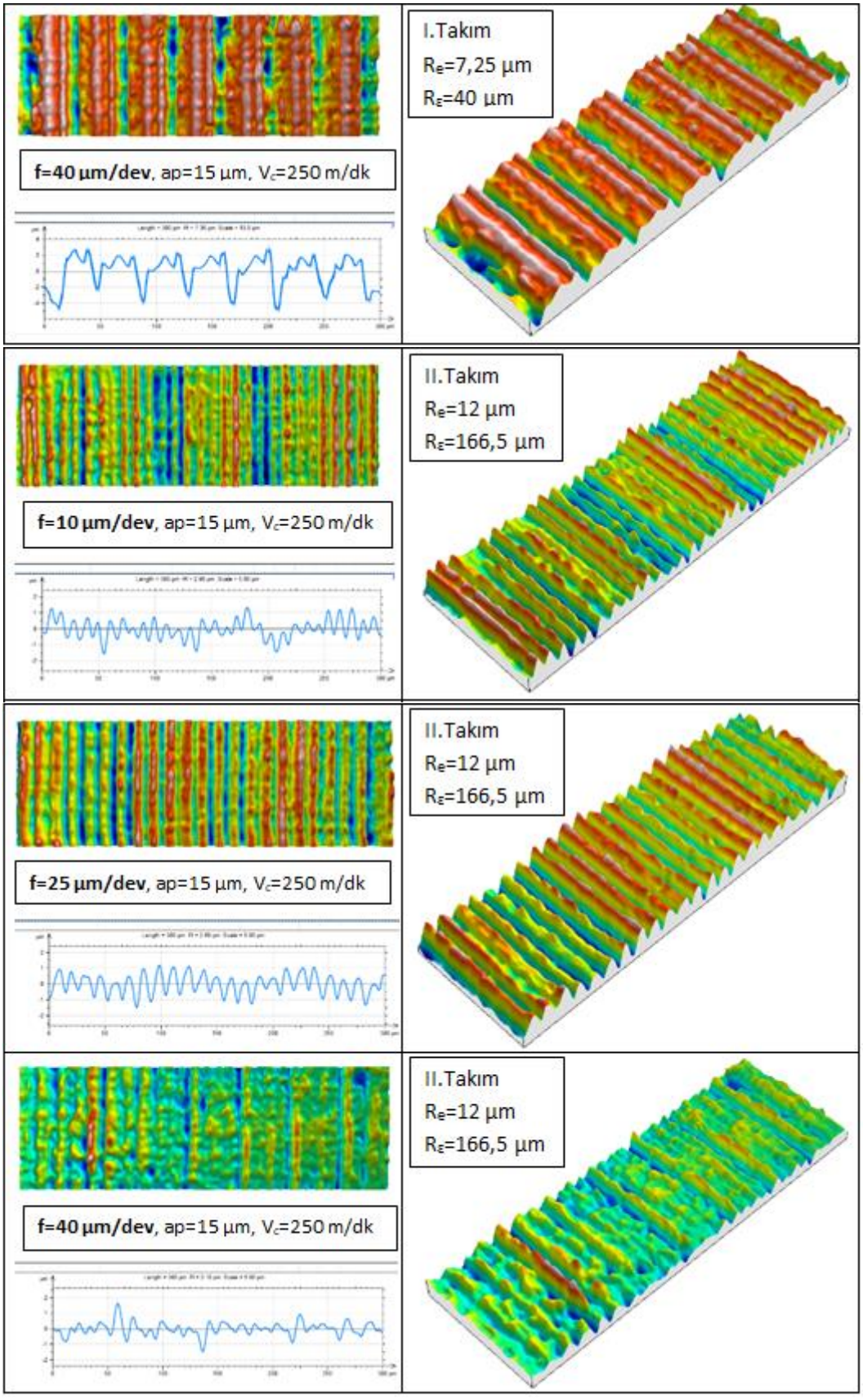
ölçümünde R_e>ap olduğu için kesici takımda negatif talaş açısı etkisi görülmüştür. Buna rağmen en ideal yüzey pürüzlülüğü en küçük talaş derinliğine sahip kesme işlemine tabi tutulan iş parçasına aittir.

5.5.2 İlerlemeye ve Kesici Takım Geometrisine Göre Değişimi

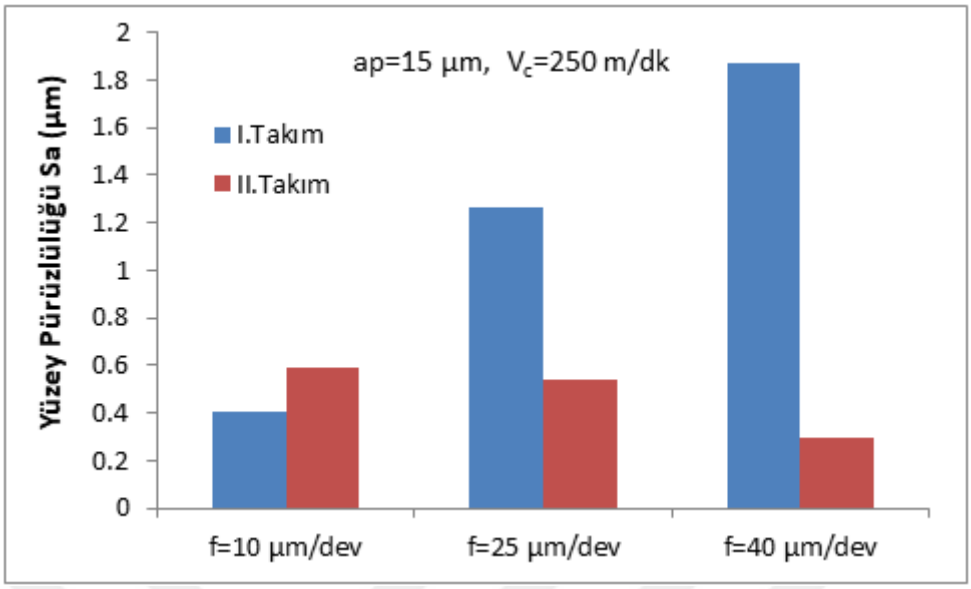
Mikro tornalamada kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek adına, 15 µm sabit talaş derinliği ve 250 m/dk kesme hızında, üç farklı ilerleme değerinde (f=10 µm/dev, f=25 µm/dev, f=40 µm/dev) iki farklı takımla (I.Takım, R_e=7,25 µm, R_ε=40 µm, II.Takım, R_e=12 µm, R_ε=166,5 µm) kesme deneyleri gerçekleştirilmiş, sonrasında iş parçası üzerinde yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5.23). Şekil 5.24 ve 5.25'de her iki takımla yapılan kesme işleminden alınan ortalama Sa ve Sz yüzey pürüzlülük sabitlerinin farklı ilerleme değerlerine göre değişimi grafiksel olarak sunulmuştur.



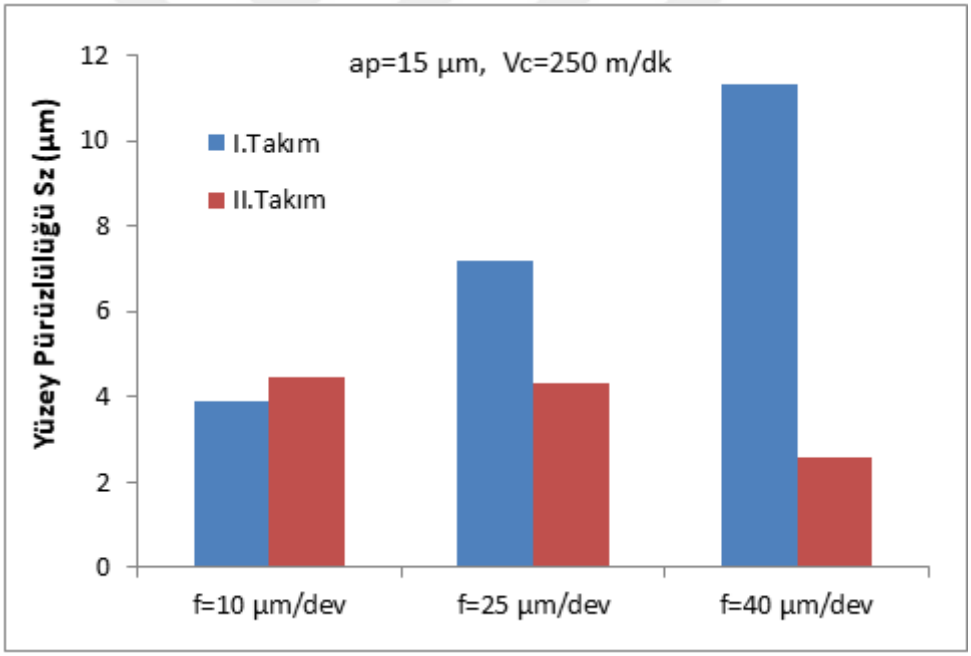
Şekil 5.23 Farklı ilerleme hızlarında, geometrisi farklı iki takımla yapılan kesme işlemi sonrası iş parçası yüzeyinden elde edilen tarama verileri.



Şekil 5.23 (Devam) Farklı ilerleme hızlarında, geometrisi farklı iki takımla yapılan kesme işlemi sonrası iş parçası yüzeyinden elde edilen tarama verileri.



Şekil 5.24 Takım geometrisi ve ilerleme değerinin Sa (µm) değeri üzerindeki etkisi.



Şekil 5.25 Takım geometrisi ve ilerleme değerinin Sz (µm) değeri üzerindeki etkisi.

Şekil 5.24 ve 5.25'de görüldüğü üzere; I.Takım kullanılarak gerçekleştirilen kesme deneylerinden alınan iş parçasının Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerleri, ilerleme arttıkça artmış fakat II.Takım kullanılarak gerçekleştirilen kesme işlemlerinden alınan iş parçasının Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerleri, ilerleme arttıkça azalmıştır. Burada takım geometrisine göre iki farklı etki söz konusudur. I.Takımın burun ve kenar yarıçap

değerleri, II.Takıma göre daha düşüktür. I.Takımın burun yarıçapı talaş derinliğinden fazla (40 µm>15 µm), kenar yarıçapı ilerleme değerlerinden küçüktür (7,25 µm<10 µm, 20 µm,40 µm). II.Takımın ise burun yarıçapı talaş derinliğinden oldukça büyüktür (166,5 µm>40 µm). Kenar yarıçapı ise 10 µm/dev ilerleme değerinden büyük, diğer iki ilerleme değerinden küçüktür (10 µm<12 µm<25 µm,40 µm). Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerleri, I.Takımda konvansiyonel tornalama işlemine benzer bir şekilde ilerleme ile artmıştır. Burun ve kenar yarıçapı değerlerinin çok küçük olması bunda etkendir. II.Takımda ise, ilerleme ile Sa ve Sz yüzey pürüzlülük değerlerinin azalmasının, mikro tornalamada boyut etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kritik bir değerden sonra ilerleme değerinin azalmasıyla yüzey pürüzlülük değeri artmaktadır. Burun yarıçapının ilerlemeye göre çok büyük değerler alması Sa ve Sz'nin çok küçük çıkmasına neden olmaktadır.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasında öncelikle kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerine göre malzeme modeli doğrulandıktan sonra kenar yarıçapının kesme işlemine etkisi modellenmiştir. Yüzey altı artık gerilmeler ve takım gerilmeleri sonlu elemanlar metoduyla elde edilmiştir. Nümerik çözümler sonucu elde edilen talaş formu, deneysel çalışmalardan alınan SEM görüntüleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca 3D modelleme yapılarak burun yarıçapının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi modellenmiştir. Burun ve kenar yarıçapının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ise deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı kesme parametreleri için kesme deneyleri yapılarak, iş parçası yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışma sonrasında elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi maddelendirmek mümkündür;

- Mikro tornalama işleminde ilerleme hızının azalması veya kenar yarıçapının artması ile Ff/Fc oranı büyümektedir. Bu da kesme işleminin kayma mekanizmasından çok, kazıma mekanizmasıyla gerçekleştiğini göstermektedir.
- Ti6Al4V alaşımının mikro tornalanmasında yüzey altında basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Kenar yarıçapının artmasıyla basma gerilmeleri çekmeye dönebilmektedir.
- Kenar yarıçapının artmasıyla, hem eksenel hemde çevresel yönde, yaklaşık 20 μm derinlikten sonra basma gerilmeleri çekmeye dönmektedir.
- Artan kenar yarıçapı, takımın uç noktasındaki rijitliğini artırdığı için takım gerilmeleri azalmaktadır.
- Kesme işleminde ağırlıklı olarak testere formunda talaş oluşumu meydana gelmektedir. Kenar yarıçapının artmasıyla birim zamanda oluşan testere dişi sayısı artmaktadır. Talaş formundaki maksimum yükseklik ise kenar yarıçapıyla değişmezsen, daha çok ilerlemeye bağlıdır.
- Konvansiyonel tornalama işleminde kenar yarıçapı ve burun yarıçapının artmasıyla kesme kuvvetleri artmaktadır fakat R_e>f ve R_ε>ap olması durumunda, mikro tornalamada boyut etkisinden dolayı kesme kuvvetlerinde azalma görülebilir.

- R_ε>ap olması durumunda burun yarıçapı arttıkça, takımın ucu iş parçasına daha az temas etmekte ve kesme kuvvetleri beklenenin aksine düşmektedir.
- R_e'nin artması kesme kuvvetlerini artırıken, R_ε>ap olması durumunda R_ε arttıkça kesme kuvvetleri azalmaktadır. Sabit ap değerinde geometrisi farklı iki takımla yapılan kesme işlemi karşılaştırıldığında; I.Takımın Fc kuvveti II.Takımdan küçükken, Ff kuvveti ise II.Takımdan büyüktür. Bu durum, Fc kuvvetinin değişiminde R_e'nin, Ff kuvvetinin değişiminde ise R_ε'un daha etkili olduğu şeklinde yorumlanmıştır.
- R_e>f olması, takımın, negatif talaş açısına sahip kesici gibi davranmasına neden olmaktadır. Bu da yüzey kalitesini bozarak yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır.
- Mikro tornalamada yüzey pürüzlülüğünün, kesme hızı ve talaş derinliğine göre artan ya da azalan bir etkisinden söz etmek zordur.
- Burun yarıçapının talaş derinliğine göre çok büyük değerler alması, yüzey pürüzlülük değerlerini azaltarak daha kaliteli bir yüzey oluşumu sağlamaktadır.
- Mikro tornalamada küçük ilerleme değerlerinde kritik bir değerden sonra ilerleme azaldıkça yüzey pürüzlülüğü artar. II.takımda bu etki gözlemlenmiş ve 40 μm/dev'den 10 μm/dev'e gidildikçe yüzey pürüzlülüğü artmıştır.

7. KAYNAKLAR

Akkurt, M. (2012). Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi CNC Takım Tezgahları ve Üretim Otomasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.

Allen, P. (1996). Titanium alloy development. *Advanced Materials and Processes*, **154:** 35–37.

Alting, L., Kimura, F., Hansen, H.N., Bissacco, G. (2003). Micro Engineering. *Annals of CIRP, Manufacturing Technology*, **52**: 635-657.

Anil, K., C., Vikas, M., G., Shanmukha, Teja, B., Sreenivas, Rao, K., V. (2017). Effect of Cutting Parameters on Surface Finish and Machinability of Graphite Reinforced Al-8011 Matrix Composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **191:** 20-25.

Apaydın, D. (2009). AISI 4340 Malzemenin Tornalanmasında Oluşan Kesme Kuvvetlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Aramcharoen, A., Mativenga, P.T. (2008). Tool Wear Modes in Micro/Meso Scale Milling of Hardened Die Steel. 3rd Cirp International Conference High Performance Cutting, Dublin, Ireland, 12-13 June, 179-188.

Aramcharoen, A., Mativenga, P.T. (2009). Size Effect and Tool Geometry in Micromilling of Tool Steel. *Precision Engineering*, **33:** 402-407.

Asad, M., Mabrouki, T., Ijaz, H., Khan, M., A., Saleem, W. (2014). On the Turning Modeling and Simulation: 2D and 3D FEM Approaches. *Mechanics & Industry* **15:** 427-434.

Aslantaş, K., Hasçelik, A. (2018b). Mikro Tornalama İşleminde Kenar Radyus Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi. 9. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, Antalya, 8-10 Kasım, 37-43.

Aslantaş, K., Şahan, Ö. (2017). Ti6Al4V Alaşımının Mikro İşleme Şartlarında Yüksek Hızda Tornalanması. 8. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, Antalya, 2-4 Kasım 2017, 101-110.

Bao, W.Y., Tansel, I.N. (2000). Modeling Micro-End-Milling Operations. Part I: Analytical Cutting Force Model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* **40:** 2155–2173.

Bamford, E. (2016). Tool Wear in Turning of Titanium Alloy Ti-6Al-4V. Master Thesis, Uppsala Universitet, Uppsala, Sweden.

Backer, W.R., Marshall, E. R., Shaw, M.C. (1952). The Effect in Metal Cutting. *Transactions ASME*, **74:** 61-72.

Berberich, F., Matz, W., Richter, E., Schell, N., Kreißig, U., Möller, W. (2000). Structural mechanisms of the mechanical degradation of Ti6Al4V alloys in study during annealing. *Surface and Coatings Technology,* **128:** 450-454.

Bissacco, G., Hansen, H.N. and De Chiffre, L. (2006). Size Effects on Surface Generation in Micro Milling of Hardened Tool Steel. *Annals of the CIRP*, **55**: 593-596.

Budak, E., Ozlu, E. (2008). Development of a Thermomechanical Cutting Process Model For Machining Process Simulations. *CIRP Annals - Manufacturing Technlogy,* **57:** 97-100.

Cakir, F., H., Gurgen, S., Sofuoglu, M., A., Celik, O., N., Kushan, M., C. (2015). Finite Element Modeling of Ultrasonic Assisted Turning of Ti6Al4V Alloy. *Procedia-Social and Behavioral Sciences,* **195:** 2839-2848.

Calamaz, M., Coupard, D., Girot, F., (2008). A New Material Model For 2D Numerical Simulation Of Serrated Chip Formation When Machining Titanium Alloy Ti–6Al–4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **48:** 275–288.

Ceretti, E., C. Lazzaroni, L. Menegardo, Atlan T. (2000). Turning simulations using a three-dimensional FEM code. *Journal of Materials Processing Technology*, **98:** 99-103.

Ceretti, E., Fallböhmer, P., Wu, W., T., Atlan T. (1996). Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting**,** *Journal of Materials Processing Technology*, **59:** 169-180.

Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T. (2006). Investigation of Micro-Cutting Operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* **46:** 313-332.

Chunxiang, C., Baomin, H., Lichen, Z., Shuangjin, L. (2011). Titanium Alloy Production Technology, Market Prospects and Industry Development. *Materials and Design,* **32:** 1684–1691.

Çakır, M.C. (1999). Modern Talaşlı İmalatın Esasları. Uludağ Üniversitesi Yayınları, Yayın No:140, Bursa.

Çelik, S. G. (2017). Mikro Frezeleme İşleminde Takım Geometri Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Dandekar, C., R., Shin, Y., C., Barnes, J. (2010). Machinability Improvement of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and Hybrid Machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* **50:** 174-182.

Dhanorker, A., Özel, T. (2008). Meso/ Micro Scale Milling for Micro Manufacturing. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, **1:** 23-42.

Ducobu, F., Riviere-Lorphevre, E., Filippi, E. (2017). On the Importance Of the Choice of the Parameters of the Johnson-Cook Constituve Model and Their Influence on The Results of A Ti6Al4V Orthogonal Cutting Model. *International Journal of Mechanical Sciences* **122:** 143-155.

Fang, F.Z., Liu, Y.C. (2004). On Minimum Exit-Burr in Micro Cutting. *Journal of Micromechanics and Microengineering,* **14:** 984-988.

Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Özdoganlar, O.B. (2007). An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro Endmill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* **47:** 1088-1100.

Finnie, I. (1963). A Comparison Of Stress Strain Behavior in Cutting with that in Other Materials Tests. *International Research in Production Engineering, ASME,* **1:** 76-82.

Fujii, H. (1998). Strengthening of α + β Titanium Alloys by Thermomechanical Processing. *Materials Science and Engineering*, **243:** 103–108.

Gökkaya, H., Habalı, K., Özçatalbaş, Y. (2004). Kaplamalı Kesici Takımlarda Kaplama Malzemesinin Takım-Talaş Ara Yüzey Sıcaklığı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, **7:** 23-30.

Grzesik, W. (2017). Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Elsevier, 2. edition, Opole University of Technology, Poland.

Guo, Y.B., Wen, Q. (2005). A Hybrid Approach to Investigate Chip Morphology Transition from Saw-tooth to Discontinuous Chips with the Effects of Cutting Edge Geometry. *Transactions of NAMRI/SME*, **33:** 469-476.

Gürbüz, H., Kafkas, F., Şeker, U. (2011). Kesici Takıma Farklı Yöntemle Uygulanmış Kaplamaların Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *International Advanced Technologies*, **6:** 27-32.

Hasçelik, A., Aslantaş, K. (2018a). Mikro Tornalama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi ve Uygun Malzeme Modelinin Seçimi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, **2**: 30-33.

Hascelik, A., Aslantas, K., Ahmed, W. (2019). Finite element Modelling of Edge Radius Effect in Micro Turning Process. Advance in Science & Engineering Technology, Dubai, 26-28 March.

Hopa, H. E. (2016). Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Koşulları ve Kaplama Malzemesinin Ti6Al4V Alaşımının İşlenebilirliği Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H. (1992). Minimum Thickness of Cut in Micromachining. *Nanotechnology*, **3:** 6-9.

İnce, M., A., Asiltürk, İ. (2015). Effects of Cutting Tool Parameters on Surface Roughness. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, **4:** 15-22.

Jagadesh, T., Samuel, G., L. (2015). Mechanistic and Finite Element Model for Prediction of Cutting Forces During Micro-Turning of Titanium Alloy. *Machining Science and Technology*, **19:** 593-629.

Jagadesh, T., Samuel, G., L. (2014). Investigations into Cutting Forces and Surface Roughness in Micro Turning of Titanium Alloy Using Coated Carbide Tool. *Procedia Materials Science*, **5:** 2450–2457.

Jin, X., Altintas, Y. (2011). Slip-Line Field Model of Micro-Cutting Process with Round Tool Edge Effect. *Journal of Materials Processing Technology*, **211:** 339-355.

Jindal, P.C. Santhanam A., T., Schleinkofer U., Shuster A.F. (1999) Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN Coated Cemented Carbide Tools in Turning. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, **17**: 163 -170.

Johnson, G., R., Cook, W., H. (1983). A Constitutive Model For Metals Subjected To Large Strains, High Strain Rates And High Temperatures, In: Proceedings Of The Seventh International Symposium On Ballistics, Hague, Netherlands..

Jun, M., B., G., DeVor, R., E., Kapoor, S., G. (2006). Investigation of the Dynamics of Microend Milling-Part II: Model Validation and Interpretation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **128:** 901-912.

Kang, I.S., Kim, J.S., Kim, J.H., Kang, M.C., Seo, Y.W. (2007). A Mechanistic Model of Cutting Force in the Micro End Milling Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **187:** 250-255.

Karpat, Y. (2011). Temperature Dependent Flow Softening of Titanium Alloy Ti6Al4V: An Investigation Using Finite Element Simulation of Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **211:** 737–749.

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.

Kim, C.J., Bono, M., Ni, J. (2002). Experimental Analysis of Chip Formation in Micro Milling. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, **30:** 247-254.

Kirik, A. (2010). Tornalamada Kesme Parametrelerindeki Değişime Göre Yüzey Pürüzlülüğünün Tahmini için Model Geliştirme. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Komanduri, R. (1971). Some Aspects of Machining with Negative Rake Tools Simulating Grinding. *International Journal of Machine Tool Design and Research* **11:** 223–233.

Kosaraju, S., Anne, V., G., Popuri, B., B. (2013). Finite Element Simulation of Cutting Forces in Turning Ti6Al4V Using DEFORM 3D. Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Diego, 15-21 November.

Köktaş, S. (2015). Ti6Al4V Alaşımının İçyapı ve Yüzey Özelliklerinin CaP Bileşikleri ile Doyurulmuş Mg İçerikli Mao Filmlerinin Oluşumuna Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Kurt, A. (2006). Talaş Kaldırma Sırasında Oluşan Kesme Kuvvetleri ve Mekanik Gerilmelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Matematiksel Modellerinin Oluşturulması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Lautenschlager, E., Monaghan, P. (1993). Titanium and titanium alloys as dental materials. *International Dental Journal,* **43:** 245-253.

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 Micromechanical and Microengineering,* **18:** 1-12.

Li, P. (2009). Micromilling of Hardened Tool Steels. Technical University of Delft, PhD Thesis, 160p, Delft.

Lin, Z.C., Lin, S.Y. (1992). A Coupled Finite Element Model Of Thermo-Elastic Plastic Large Deformation For Orthogonal Cutting. *International Journal of Engineering Materials Technology*, **114:** 219-226.

Liu, K., Melkote, S., N. (2006). Effect of Plastic Side Flow on Surface Roughness in Micro-Turning Process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **46:** 1778-1785.

Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. (2006). An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **128:** 474-481.

Liu, X., Ehmann, K.F., DeVor, R.E., Kapoor, S.G. (2005). The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126**: 666–678.

Lucca, D.A., Seo, Y.W., Komanduri, R. (1993). Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining. *Annals of CIRP*, **42:** 83–86.

Ma, J., Yong, Y., Lei, S. (2012). 3D FEM Investigation of the Effects of Nose Radius and Edge Radius on Turning of AISI 4140. Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress, Houston, 9-15 November.

Madariaga, A., Esnaola, J., A., Fernandez, E., Arrazola, P., J., Garay A., More, F. (2014). Analysis Of Residual Stress And Work-Hardened Profiles on Inconel 718 When Face Turning with Large-Nose Radius Tools. *International Journal Advanced of Manufacturing Technology*, **71:** 1587-1598.

Malekian, M., Mostafa M.G., Park S.S., Jun M.B.G. (2012). Modeling of Minimum Uncut Chip Thickness in Micro Machining of Aluminum. *Journal of Material Processing Technology*, **212:** 553-559.

Masuko, M. (1956). Fundamental Research on Metal Cutting. *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers* **22:** 371–377.

Masuzawa, T. (2000). State of the Art of Micromachining. *Annals of CIRP*, **49:** 473-488.

Mativenga, P., T., Aramcharoen, A., Huo, D. (2013). Micro Tooling Design and Manufacturing. Micro-Cutting: Fundamentals and Applications, First Edition, pages 46, John Willey & Sons, China.

Nakayama, K., Tamura, K. (1968). Size Effect in Metal Cutting Force. *Journal of Engineering for Industry*, **90:** 119–126.

Okazaki, Y., Mishima, N., Ashida, K. (2004). Microfactory-Concept, History, and Developments. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126:** 837-844.

Olgun, U. (2013). Experimental Investigation of Rotary Turning Processes For Metal Alloys. Master Thesis, Sabancı University, Science Institute, İstanbul.

Oyar, P. (2015). Titanyum ve Özellikleri. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi,* **11:** 151-159.

Özel, T. (2009). Computational modelling of 3D turning: Influence of edge microgeometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcBN tooling. *Journal of Materials Processing Technology,* **209:** 5167-5177.

Özel, T., Karpat, Y. (2005). Predictive Modeling of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning Using Regression and Neutral Networks. *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* **45:** 467–479.

Özel, T., Sima, M. (2010a). Modified Material Constituve Models for Serrated Chip Formation Simulations and Experimental Validation in Machining of Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools*. **50:**.943-960.

Özel, T., Sima, M. (2010b). Finite Element Simulations of High Speed Machining Ti-6Al-4V Alloy Using Modified Material Models. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME,* **38:**.49-56.

Özel, T., Sima, M., Srivastava, A., K., Kaftanoglu, B. (2010). Investigations on the Effects of Multi-Layered Coated Inserts in Machining Ti6Al4V Alloy with Experiments and Finite Element Simulations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology,* **59:** 77-82.

Özel, T., Zeren, E. (2004). Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting tests. *Journal of Materials Processing Technology,* **153:** 1019-1025.

Parihar, R., S., Sahu, R., K., Srinivasu, G. (2017). Finite Element Analysis of Cutting Forces Generated in Turning Process Using Deform 3D Software. *Materials Today: Proceeedings,* **4:** 8432-8438.

Ratchev, S.M., Afazov, S.M., Becker, A.A., Liu, S. (2011). Mathematical Modelling and Integration of Micro-scale Residual Stresses into Axisymmetric FE Models of Ti6Al4V Alloy in Turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,* **4**: 80–89.

Rech, J. (2006). Influence of Cutting Tool Coatings on the Tribological Phenomena at the Tool/chip Interface in Orthogonal Dry Turning, *Surface Coating Technology*, **200**: 5132-5139.

Schmidt, J., Spath, D., Elsner, J., Huentrup, V., Tritschler, H. (2002). Requirements of An Industrially Applicable Microcutting Process for Steel Micro-Structures. *Microsystem Technologies*, **8:** 402-408.

Schmidt, J., Tritschler, H. (2004). Micro Cutting of Steel. *Microsystem Technologies*, **10:** 167-174.

Shaw, M., C. (1984). Metal Cutting Principles, Oxford University Press, New York.

Shaw, M., C. (2003). The Size Effect in Metal Cutting. *Sadhana Academy Proceedings in Engineering Science*, **28:** 875-896.

Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmuri, G., Uchikoshi, J., Yoshinaga, H. (1993). Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation. *Annals of the CIRP*, **42:** 91–94.

Shreyes, K., L., Melkote, N. (2006). Effect of Plastic Side flow on Surface Roughness in Micro-Turning Process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* **46:** 1778–1785.

Slunský, J. (2007). Enhancement and Verification of a Cutting Force Model For Micro Cutting. Master Thesis, Technical University of Denmark, Department of Manufacturing Engineering and Management, Copenhagen.

Son, S., M., Lim, H.S., Ahn, J.H. (2005). Effects of the Friction Coefficient on the Minimum Cutting Thickness in Micro Cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* **45:** 529–535.

Spath, D., Huntrup, V. (1999). Micro-milling of Steel for Mold Manufacturing Influences of Material, Tools and Process Parameters. Precision Engineering Nanotechnology, Proceedings of the First International Euspen Conference, Bremen, Germany, 31 May-4 June, 203–206.

Styger, G., Laubscher, R.F., Oosthuizen G.A. (2014). Effect Of Constituve Modeling During Finite Element Analysis Of Machining-Induced Residual Stresses in Ti6Al4V. *Procedia CIRP*, **13:** 294-301.

Sumardiyanto, D., Susilowati, S., E., Cahyo, A. (2018). Effect of Cutting Parameter on Surface Roughness Carbon Steel S45C. *Journal of Mechanical Engineering and Automation* **8:** 1-6.

Sun, X., Cheng, K. (2010). Micro/Nano-Machining through Mechanical Cutting. 414p, Oxford.

Takacs, M., Verö, B., Meszaros, I. (2003). Micromilling of Metallic Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, **138:** 152–155.

Tanaka, M. (2001). Development of Desktop Machining Microfactory. *Riken Review*, **34:** 46-49.

Thanongsak, T., Özel, T. (2013). Experimental and Finite Element Simulation Based Investigations on Micro-Milling Ti-6Al-4V Titanium Alloy: Effects of cBN Coating on Tool Wear. *Journal of Materials Processing Technology*, **213:** 532-542.

Ucun, İ. (2013). İnconel 718 Malzemesinin Mikro İşlenebilirliği ve Kaplama Malzemesinin Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Umbrello, D., Saoubi, R., M., Outeiro, J., C. (2007). The Influence of Johnson-Cook Material Constants on Finite Element Simulation of Machining of AISI 316L steel. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, **47:** 462-470.

Ungan, G., G. (2014). Characterization of the Mg Doped Ca-P Compounds Electrochemically Deposited on MAO Modified Implant Materials. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Venkatesh, V., Swain, N., Sırınıvas, G., Kumar, P. and Barshilia, H.C. (2016). Review on the Machining Characteristics And Research Prospects of Conventional Micro Scale Machining Operations. *Materials and Manufacturing Process*, **32:** 235-262.

Vogler, M., P., Devor, R., E., Kapoor, S., G. (2003). Microstructure-Level Force Prediction Model for Micro-milling of Multi-Phase Materials. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **125:** 202-209.

Vogler, M., P., DeVor, R., E., Kapoor, S., G. (2004a). On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro Endmilling Part I: Surface generation. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126:** 685- 694.

Vogler, M., P., DeVor, R., E., Kapoor, S., G. (2004b). On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro Endmilling Part II: Cutting Force Prediction. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126:** 695-705.

Vollertsen, F., Biermann, D., Hansen, H., Jawahir, I., Kuzman, K., (2009). Size Effect in Manufacturing of Metallic Components. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **58:** 566-587.

Wan, L., Haddag, B., Wang, D., Sheng, Y., Yang, D., (2018). Effects of Friction Conditions on the Formation of Dead Metal Zone in Orthogonal Cutting – A Finite Element Study, *Machining Science and Technology*, **0:** 1-19.

Weule, H., Huntrup, V., Tritschle, H. (2001). Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization. *Annals of the CIRP*, **50:** 61-64.

Xu, J., Mansori, M., E. (2015). Finite Element Analysis when Orthogonal Cutting of Hybrid Composite CFRP/Ti. *Materials Science and Engineering*, **87:** 1-7.

Yardımeden, A., Turan, A. (2015). AISI 1040 çeliğin tornalamasında kesme parametrelerinin kesme kuvvetine etkisi. *DÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi,* **6:** 51-59.

Yen, Y.C., Jain, A., Altan, T. (2004). A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries. *Journal of Materials Processing Technology*, **146:** 72-81.

Yuan, Z.J., Zhou, M., Dong, S. (1996). Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultra Precision Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **62:** 327–330.

Yücel, E., Çiçek, A. (2011). İmalat Alanında Yaygın Olarak Kullanılan Mikro İşleme Teknikleri. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, **15:** 46-59.

İnternet Kaynakları

1- http://cameronmicrodrillpress.com , 08.02.2019

2- https://www.kugler-precision.com/index.php?micromaster--3-5X-EN , 08.02.2019

3- https://www.kern-microtechnik.com/en/machine-tool-manufacture/products/ , 08.02.2019

4- https://www.proxxon.com/en/micromot/27110.php , 08.02.2019

5- https://www.yenadent.com/Products/Machines/ , 08.02.2019

6- http://www.mitarhrd.com/elektrikli-aletler/sieg/sieg-marka-torna-model-c2.html , 08.02.2019

7- http://dentamar.com.tr/dental-implant-nedir , 11.02.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:	Ahmet HASÇELİK
Doğum Yeri ve Tarihi	:	Merkez / AFYON, 26.02.1990
Yabancı Dili	:	İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta)	:	05455006221 / ahascelik@aku.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl) :

Lise	:	Afyon Milli Piyango Anadolu Lisesi, (2004-2008)
Lisans	:	Niğde Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, (2009-2014)
Yüksek Lisans	:	Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Proigam Instalaciones S.L., Biyokütle Enerji Sistemleri ve Montajı (09.2014 - 12.2014), Badajoz/İspanya

Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Avrupa Yakası, Asansör Gözetim ve Denetim Muayene Uzmanı (12.2014 - 01.2016), İstanbul

Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Afyon İl Temsilciliği, Asansör-Araç-Proje-Sızdırmazlık-İş Ekipmanları Muayene Uzmanı (01.2016 - 03.2017), Afyon

Afyon Kocatepe Üniversitesi İscehisar Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı Öğretim Görevlisi (04.2017 - Devam Ediyor), İscehisar/Afyon

Yayınları (SCI ve diğer) :

Hasçelik, A., Aslantaş, K. (2018). Mikro Tornalama İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi ve Uygun Malzeme Modelinin Seçimi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, **2**: 30-33.

Aslantaş, K., Hasçelik, A. (2018). Mikro Tornalama İşleminde Kenar Radyus Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi. 9. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, Antalya, 8-10 Kasım.

Hascelik, A., Aslantas, K., Ahmed, W. (2019). Finite Element Modelling of Edge Radius Effect in Micro Turning Process. Advance in Science & Engineering Technology, Dubai, 26-28 March.