

**Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO
TORNALANMASI VE KESME KUVVETLERİNİN
MEKANİSTİK MODELLENMESİ**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ömer ŞAHAN
DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Eylül 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO TORNALANMASI VE KESME
KUVVETLERİNİN MEKANİSTİK MODELLENMESİ

Ömer ŞAHAN

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Eylül 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Ömer ŞAHAN tarafından hazırlanan “Ti6Al4V Alaşımının Mikro Tornalanması ve Kesme Kuvvetlerinin Mekanistik Modellenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 16/09/2019 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 : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Başkan : Doç. Dr. Oğuz ÇOLAK
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

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

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER
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.

16/09/2019



Ömer ŞAHAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO TORNALANMASI VE KESME KUVVETLERİNİN MEKANİSTİK MODELLENMESİ

Ömer ŞAHAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Mikro tornalama, mikro mekanik kesme işlemleri içerisinde yer alan ve mikro silindirik veya aksel simetrik parçaların üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Mikro silindirik bileşenler ağırlıklı olarak mikro akışkan sistemlerinde, damar içi mikro motorlarda, mikro cerrahi uygulamalarında ve optik lens uygulamalarında kullanılmaktadır. Mikro tornalamada, iş parçası çapı çok küçük olduğundan, kesme kuvvetlerinden daha çok etkilenir. Bu nedenle kesme kuvvetlerinin bilinmesi/tahmin edilebilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, takım burun yarıçapı dikkate alınarak, kesme kuvvetini tahmin etmek için mekanistik bir model kullanılmıştır. Yarı deneysel olarak geliştirilen mekanistik modelde, takım burun yarıçapının yanı sıra kesme kenarı açısı da dikkate alınmıştır. Kesme kuvveti katsayılarını belirlemek için bir dizi kesme testi yapılmıştır. Geliştirilen mekanistik modeli doğrulamak için farklı kesme parametreleri, burun yarıçapı ve kesme kenarı açısı için doğrulama deneyleri yapılmıştır. İş parçası olarak Ti6Al4V alaşımı kullanıldı ve deneyler kuru kesme koşullarında yapıldı. Elde edilen sonuçlar, artan ilerleme ve talaş derinliği ile birlikte kesme kuvvetlerinin de arttığını göstermiştir. Ayrıca farklı kesme parametreleri için yapılan deneyler ile mekanistik model arasındaki farkın kabul edilebilir düzeyde olduğunu gözlemlenmiştir.

2019, xi + 78 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikro tornalama, Ti6Al4V, Kesme kuvveti, Kesme kuvvet katsayısı, Modelleme.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

MICRO TURNING OF Ti6Al4V ALLOY AND MECHANISTIC
MODELING OF CUTTING FORCES

Ömer ŞAHAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şükrü ÜLKER

Micro turning is a method used in the production of micro cylindrical or axially symmetrical parts which are involved in micro mechanical cutting processes. Micro cylindrical components are mainly used in microfluidic systems, intravenous micro motors, micro surgery applications and optical lens applications. In micro turning, since the workpiece diameter is very small, it is more affected by the cutting forces. Therefore, it is very crucial to know/estimate cutting forces. In this study, a mechanistic model was used to estimate cutting force by considering tool nose radius. In the semi-experimentally developed mechanistic model, the tool nose radius as well as cutting edge angle are taken into consideration. A series of cutting tests were performed to determine cutting force coefficients. Validation experiments were performed for different cutting parameters, nose radius and cutting edge angle to verify the developed mechanistic model. Ti6Al4V alloy was used as the workpiece and the experiments were carried out under dry cutting conditions. The results showed that the cutting forces increased with increasing feed and depth of cut. In addition, it was observed that the difference between the experiments performed for different cutting parameters and the mechanistic model was acceptable.

2019, xi + 78 pages

Keywords: Micro Turning, Ti6Al4V, Cutting Force, Cutting force coefficient, Modelling.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER'e,

Tez çalışması boyunca, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm, akademik tecrübesi, tez sonuçlarının değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkıları ve her konuda öğrencilerine verdiği değerle, özellikler şahsıma göstermiş olduğu ilgi ve alakasından dolayı Sayın Prof. Dr. Kubilay Aslantaş'a

Yüksek Lisans Tez aşamasında fikir alışverişinde bulunduğum, bilgilerini benimle paylaşan çok değerli hocalarıma özellikle Sayın Doç. Dr. İbrahim ATMACA'ya,

Tez yazım süresince bana destek olan Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası yönetimine, özellikle başkanımız Hüsnü Serteser'e, Genel Sekreter Ali ŞENOL'a ve çalışma arkadaşlarıma,

Teknik anlamda destek olan arkadaşım Özgür DEMİR'e

Her zaman olduğu gibi te süresi boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı, beni bugünlere getiren emeklerini üzerimden esirgemeyen çok değerli ve kıymetli ailem başta annem Şehri ŞAHAN, babam Kahraman ŞAHAN olmak üzere, kardeşlerim Murat ve Sude ŞAHAN'a,

Teze başlamamda bana ilham kaynağı olan, bu süreçte daima yanımda olup, bana destek veren, bugün ve bundan sonrada aynı desteği kendisinden göreceğimi bildiğim ve varlığıyla hayatıma anlam katan sevgili eşim Merve Nur ŞAHAN'a, ayrı ayrı çok teşekkür ederim.

Ömer ŞAHAN
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.2 Araştırmanın Amacı ve Hedefleri	2
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Mikro Mekanik İşleme	3
2.2 Mikro Ölçekte Talaş Kaldırma	4
2.2.1 Mikro Ölçekte Kenar Radyüsünün Önemi	6
2.2.2 Boyut Etkisi	9
2.2.3 Minimum Talaş Kalınlığı	12
2.2.4 Mikro Tornalama	15
2.3 Mikro İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü	20
2.4 Mikro İşlemede Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi	23
2.4.1 Mekanistik Modelleme	24
2.4.2 Nümerik Modelleme	28
2.5 Ti6Al4V Alaşımının Mikro Ölçekte İşlenebilirliği	31
3. MATERYAL ve METOT	35
3.1 Deney Düzenegi	35
3.2 Kesme Parametreleri	36
3.3 Kesici Takım ve İş Parçası	37
3.4 Dinamometre ve Data Alma Sistemi	39
3.5 Mekanistik Modelleme	40
4. BULGULAR	51
4.1 Kesme Kuvvetlerinin Analizi	51
4.1.1 İlerlemenin Etkisi	51
4.1.2 Talaş Derinliğinin Etkisi	56
4.2 Kesme Kuvveti Katsayılarının Elde Edilmesi	56

4.4 Mekanistik Model ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
6. KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	78

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

V_c	Kesme hızı
a_p	Talaş derinliği
f	İlerleme
r	Takım burun (uç) yarıçapı
a_p	Talaş derinliği
d	Kesme derinliği (Depth of cut)
R_e	Burun radyüsü
R_e	Kenar radyüsü
F_t	Teğetsel kuvvet
F_p	Pasif kuvvet
F_f	İlerleme kuvveti
F_s	Kayma kuvveti
K_{tc}	Teğetsel kuvvet katsayısı
K_{te}	Teğetsel kuvvet kenar katsayısı
K_{fc}	İlerleme kuvvet kesme katsayısı
K_{fe}	İlerleme kuvveti kenar katsayısı
K_{rc}	Pasif kuvvet kesme katsayısı
K_{re}	Pasif kuvveti kenar katsayısı
β (°)	Sürtünme açısı
α (°)	Talaş açısı
b	Kesme genişliği
h	Kesme derinliği
t_c (min)	Minimum talaş kalınlığı
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
V	Vanadyum
O	Oksijen
H	Hidrojen
C	Karbon
s	Saniye
dk	Dakika
dev	Devir
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
m	Metre
$R_e(\mu\text{m})$	Takım kenar yarıçapı
$R_e(\mu\text{m})$	Takım burun yarıçapı

Kısaltmalar

3D	Üç boyut
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
CBN	Kübik bor nitrür
CNC	Bilgisayar destekli kesme
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Mikro kesme işlemi (Zhanqiang <i>et al.</i> 2013).....	5
Şekil 2.2 Takım köşe yarıçapının talaş kaldırma mekanizması üzerindeki etkileri (Zhang <i>et al.</i> 2015).....	7
Şekil 2.3 Kenar yarıçapının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi (Wu <i>et al.</i> 2016).....	8
Şekil 2.4 Mikro kesme işleminde talaş yığılması (Wu <i>et al.</i> 2016).	9
Şekil 2.5 Kesme esnasında özel kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişim (Liu and Melkote 2007).....	10
Şekil 2.6 a) Konvansiyonel makro kesme işlemi pozitif talaş (Aramcharoen and Mativenga 2008), b) Kesme işleminde istenen takım ucu (Subbiah and Melkote 2013), c) Pratikte Radyüslü kesici takım ve negatif talaş etkisi (Aramcharoen and Mativenga 2008).....	11
Şekil 2.7 Radyüslü takımla kesme işleminde malzemede meydana gelen kazınma ve elastik deformasyon (Ding <i>et al.</i> 2011).	12
Şekil 2.8 Köşe radyüslü takımla yapılan mikro kesme işleminde talaş kaldırma esnasında meydana gelen elastik ve plastik deformasyon (Son <i>et al.</i> 2005).	13
Şekil 2.9 Köşe yarıçapı ile minimum talaş kalınlığının değişimi (Fang and Liu 2004).	14
Şekil 2.10 Kesme mesafesinin yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki etkisi (Rahman <i>et al.</i> 2007).	17
Şekil 2.11 Kesme kuvvetleri ve özel kesme kuvvetleri ile kesme alanı arasındaki ilişki (Lu and Yoneyama 1999).....	18
Şekil 2.12 Talaş derinliği ve ilerleme değerinin kuvvetler üzerindeki etkisi (Rahman <i>et al.</i> 2006).....	19
Şekil 2.13 Takım köşe radyüsünün kesme kuvvetlerine etkisi (Dogra <i>et al.</i> 2011).	19
Şekil 2.14 Kesme kuvvetleri altında iş parçasında meydana gelen sapmanın tahmin edilmesi (Rangel <i>et al.</i> 2011).....	20
Şekil 2.15 Farklı takım burun yarıçapının işleme süresine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değeri değişimi (Binoy <i>et al.</i> 2015).....	21
Şekil 2.16 Kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Jagadesh and Samuel 2015).....	23
Şekil 2.17 Kesme işlemi esnasında takıma etki eden dik yönlü kuvvet bileşenleri (Altıntaş 2012).....	25
Şekil 2.18 Merchant kuvvet diyagramı. (Altıntaş 2012).....	26
Şekil 2.19 Titanyum alaşımlarının kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvet sabitlerinde meydana gelen değişim (Arrozola <i>et al.</i> 2009).....	28

Şekil 2.20 Talaş oluşumu ve boyut etkisinin modelleme yöntemiyle gösterimi (Lai <i>et al.</i> 2008).	30
Şekil 2.21 Kesme kuvvetleri tahmini a) F_x , b) F_y , c) F_z (Kosaraju <i>et al.</i> 2013).	31
Şekil 2.22 Ti6Al4V ve Ck45 Çeliğinin İşlenmesi Sırasında Ortaya Çıkan Isıl İletkenliklerinin Takıma ve Talaşa Dağılımı (λ_n (J / mm s °C) (Ezugwu and Wang 1997).....	32
Şekil 3.1 Kesme kuvvetleri yönü ve ortogonal kesme işlemi.	37
Şekil 3.2 Kesici takım özellikleri.	38
Şekil 3.3 Dinamometre ve data alma sistemi.	39
Şekil 3.4 Ölçülen kuvvetlerin ortalama değerinin elde edilmesi.	40
Şekil 3.5 Mekanistik modellemenin oluşturulmasında izlenen yöntem.....	41
Şekil 3.6 Mikro tornalama işleminde deforme olmamış talaş kesiti ve kesme parametreleri (Fernández-Abia <i>et al.</i> 2015).	42
Şekil 3.7 $k_r=90^\circ$ için mikro tornalama işlemi ve talaş kesiti.	43
Şekil 3.8 Sinüs teoremi yardımıyla γ açısı değerinin hesaplanması (Fernández-Abia <i>et al.</i> 2015).	46
Şekil 3.9 Mapple programı yardımıyla G ve Z katsayılarının hesaplanması.	50
Şekil 4.1 $V_c=300$ m/dak, $a_p=40$ μ m için F_x , F_y , ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri. ..	52
Şekil 4.2 $V_c=300$ m/dak, $a_p=65$ μ m için F_x , F_y , ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri. ..	53
Şekil 4.3 $V_c=300$ m/dak, $a_p=100$ μ m için F_x , F_y ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri. .54	
Şekil 4.4 $V_c=150$ ve 500 m/dak için farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.	54
Şekil 4.5 Farklı kesme hızlarında ve $f_n=0,5$ μ m/dev, $a_p=40$ μ m için F_x , F_y , ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri.	55
Şekil 4.6 Sabit kesme hızı ve ilerleme değerinde talaş derinliğinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi.	56
Şekil 4.7 İlerleme hızına bağlı olarak SII ve AII nin değişimi.	58
Şekil 4.8 $V_c=300$ m/dak ve farklı talaş derinliğinde kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayılarının değişimi.	60
Şekil 4.9 $V_c=150, 300$ ve 500 m/dak ve $a_p=40$ μ m için kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayılarının değişimi.	61
Şekil 4.10 Farklı ilerleme değerlerinde deney sonuçları ile mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması.	64
Şekil 4.11 Farklı kesme hızı değerlerinde, deney sonuçları ile mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması	65

Şekil 4.12 Farklı talaş derinliğinde değerlerinde deney sonuçları ile mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Deney düzeneği için belirlenen kesme parametreleri.	36
Çizelge 3.2 Ti6Al4V alaşımın ait kimyasal kompozisyonu (%), (İnt. Kyn. 6).	37
Çizelge 3.3 Ti6Al4V alaşımına ait mekanik özellikler (Rather et al. 2004).	37
Çizelge 3.4 Ti6Al4V alaşımını kaldırılan talaşa ait S_I ve A_I değerleri.	44
Çizelge 3.5 Deneylerde elde edilen θ_1 ve θ_2 değerleri	45
Çizelge 4.1 Ti6Al4V alaşımını kaldırılan talaşa ait SI ve AI değerleri.	57
Çizelge 4.2 $V_c=300$ m/dak için farklı talaş derinliği ve ilerleme değerlerinde G ve Z değerleri.	59
Çizelge 4.3 $V_c=300$ mm/dak için en az kareler yöntemi ile elde edilen kesme kuvvet katsayıları.	60
Çizelge 4.4 $V_c=150, 300, 500$ mm/dak ve $ap=40$ μ m için en az kareler yöntemi ile elde edilen kesme kuvvet katsayıları.	61

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Mikro mekanik işleme yöntemleri ile üretilmiş bazı parça örnekleri (İnt.Kyn.1, İnt.Kyn.2, İnt.Kyn.3).....	3
Resim 2.2 Ti6Al7Nb'nin mikro frezeleme işleminde meydana gelen çapaklar (a)Schueler <i>et al.</i> 2009, b) Aslantaş ve Kaynak 2018).	6
Resim 2.3 a) Mikro tornalama operasyonları için geliştirilmiş olan bir deney düzeneği (Tanaka 2001), b) Mikro tornalama yapan bir tezgâhın şematik görünümü (Lu and Yoneyama 1999), c) Kademeli mikro tornalama işlemi (Senthilkumar and Muruganandam 2012).....	16
Resim 2.4 Dental alanda yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V diş implant malzemesi (İnt.Kyn.4, İnt.Kyn.5).....	33
Resim 3.1 Mikro tornalama deneylerinde kullanılan sistemin genel görünümü.....	35
Resim 3.2 Alfa-beta Ti6Al4V alaşımının mikro yapısı (Zhao <i>et al.</i> 2018).	38

1. GİRİŞ

Günümüzde değişen tüketici ihtiyaçlarının karşılanması için imalat alanında minyatür malzemeler büyük önem kazanmıştır. Mikro ve nano ölçekli son gelişmeler malzemelerin fonksiyonel özelliklerinde iyileşme ve boyutsal anlamda avantaj sağlamasından dolayı endüstriyel ürünlere talep giderek artmaktadır.

Geçmişte karmaşık bir işi zorlukla yerine getirebilen devasa bilgisayarlar yerine günümüzde çok küçük tabletler ve hatta bilgisayarlardan daha fazlasını gerçekleştirebilen bir el boyutundan bile küçük akıllı telefonlar tarafından kolaylıkla yerine getirilebilmektedir. Bir yerden bir yere taşınması güç aletler günümüzde insan eliyle taşınabilecek hatta cebimizde taşıyabileceğimiz oranlarda küçülmüştür. Bilgisayarlardan daha fazla verim alma isteği ve güç kaynağına bağımlı hale gelmeden ihtiyaçları karşılama isteği bilgisayarın bu denli küçük ve daha küçük hale getirilmesinin nedenlerinden biridir.

Bu noktada mikro işleme büyük önem arz etmektedir. Malzeme işlenmesi, mikro ve nano boyut seviyesinde olduğu gibi, yüksek doğrulukta olduğu kadar yüksek hassasiyette de olabilmektedir. Geleneksel kesim işlemleri bu kadar doğrulukta ve hassasiyette malzeme elde etmek için kullanılamamaktadır. Bu nedenle mikro işleme süreçleri çok önemli hale gelmektedir. Bazı materyallerin üretilmesi için mikro işleme tekniklerine zorunlu olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle sağlık alanında laboratuvar ve klinik araçlarında malzeme boyutlarının minimum boyutlarda olması istenmekte, ortopedi ve ortodonti de kullanılan implant üretiminde mikro işleme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Havacılık ve otomotiv endüstrisinde de hareketli ve uçan ekipmanlarının ağırlığını azaltmak için mikro ve nano parçalara çok fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Mikro işleme yöntemi ile üretilen minyatür malzemeler, mekanik işlemlerden geçerek daha kompleks geometrili malzemelerin üretimine olanak sağlamaktadır. Malzeme boyutunda küçülme artıkça genel anlamda malzemenin kütlelerinde de önemli bir ölçüde azalma olmakta buna bağlı olarak, malzemenin işlenebilirliği ve üretim hızı artmakta buna ek olarak

enerjiden ve zamandan tasarruf sağlanabilmektedir. Minyatürleşme işlemine bir başka örnek ise, geleneksel son işlemlerle elde edilemeyen türbin kanadındaki çok sayıda soğutma deliği gibi karmaşık üç boyutlu bileşenler üzerindeki nano seviyeli yüzey bitirme işleminin üretilmesidir. Böyle bir bitirme görevini başarmanın tek yolu, gelişmiş işleme süreçlerinin kullanılmasına bağlıdır.

1.2 Araştırmanın Amacı ve Hedefleri

Yukarıda verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere mikro imalat teknikleri günümüz endüstrisinde önemli bir yer tutmuş durumdadır. Bu noktadan hareketle, bu çalışmada da özellikle implant sektöründe kullanılan Ti6Al4V alaşımın mikro şartlarda işlenebilirliği ve meydana gelen kesme kuvvetlerinin önceden tahminine yönelik mekanistik bir kuvvet modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun için özel tasarlanmış ve deney düzeneği kullanılarak farklı kesme parametreleri dikkate alınmıştır. Buna ilave olarak, aşağıda sıralanan bazı unsurlara da bu tez çalışması kapsamında cevap aranmaya çalışılmıştır;

- Tane boyutuna yakın ilerleme ve talaş derinliğinin kesme kuvvetlerini nasıl etkilediği.
- Kesme kuvveti katsayılarının kesme hızı ve talaş derinliği ile nasıl değiştiği.
- Burun ve kenar radyüslerinin kesme kuvveti katsayılarını nasıl etkilediği.

Bu tez çalışması dört farklı bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerin genel içerikleri ve kapsamı aşağıda verilmektedir:

Bölüm 1: Mikro kesme işleminin temel tanımı ve uygulama alanları arasında bilgi verilmiştir. Ayrıca bu bölümde çalışmanın amacı ve hedefleri de verilmektedir.

Bölüm 2: Mikro mekanik kesme işlemleri ve özellikle mikro tornalama ile ilgili yapılan çalışmaların bir literatürünü kapsamaktadır.

Bölüm 3: Çalışmada kullanılan deney düzeneği ve mekanistik modellemenin nasıl yapıldığı tarif edilmiştir.

Bölüm 4: Kesme kuvveti deney sonuçları, mekanistik model için oluşturulan kesme kuvveti katsayıları ve elde edilen modelin doğrulaması yapılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Mikro Mekanik İşleme

Mikro işleme, basitçe işlenecek parçanın boyutu üzerinde herhangi bir kısıtlama olmaksızın malzemenin bir mikro-nano boyut seviyesinde işlenebilmesi anlamına gelmektedir. Mikro işleme konvansiyonel işlemde yapılabilen bir işi, belirli bir oranda küçültülerek mikron seviyelerinde yapılabilen kesme işlemidir. Mikro tornalama, mikro frezeleme, mikro delme ve mikro taşlama dahil mikro-mekanik işleme, alışılmamış imalat tekniklerine göre, yüksek talaş kaldırma oranlarına sahip bir kesme yöntemidir. Yukarıda belirtilen teknikler arasında mikro frezeleme en fazla esnekliğe sahiptir.

Mikro işlemede mikro, mikrometreyi belirtir ve 1 μm ile 999 μm aralığındaki değerleri göstermektedir. Aslında, mikro aralığı, çağa, kişiye, işleme yöntemine, ürün türüne veya malzemeye göre değişim göstermektedir. Son yıllar da bu karışıklığı ortadan kaldırmak için 1 μm ile 500 μm işleme aralığı kabul görmektedir (Masuzawa 2000). Son zamanlarda her ne kadar 500 μm , mikro ve makro işleme arasında üst sınır olarak belirlenmiş olsa da mikro işleme terimi, genellikle 1 ile 999 μm arasında ölçüleri olan parçaların üretimi için malzemenin işlenmesi olarak tanımlamaktadır. Resim 2.1'de mikro mekanik işleme yöntemleriyle üretilen bazı parçalara örnekler verilmiştir. Mikro mekanik kesme işlemlerinde, sadece işlenen boyutun veya parçanın küçük olması değil, aynı zamanda kullanılan kesici boyutunun küçük olması da kastedilmektedir. Özellikle mikro frezeleme işlemlerinde kullanılan takım çapları 100 μm kadar düşebilmektedir (McGeough 2002).



Resim 2.1 Mikro mekanik işleme yöntemleri ile üretilmiş bazı parça örnekleri (İnt.Kyn.1, İnt.Kyn.2, İnt.Kyn.3).

Mikro mekanik kesme işlemi, genellikle konvansiyonel olan kesme işlemlerinin daha küçük takım boyutu ile daha yüksek kesme hızlarında işlenmesi olarak tanımlanabilir. Kesici takım geometrisinin çok küçük olması, beraberinde hızlı takım aşınmasını getirmektedir. Takım geometrisinde meydana gelebilecek mikron boyutundaki bir değişiklik, bazen işlenen geometriyi de olumsuz etkileyebilmektedir. Özellikle mikro frezeleme işleminde takım çapı çok küçük olduğundan, yüksek devir sayılarına ihtiyaç duyulur. Bu da işleme esnasında takım kırılmalarına kadar gidebilmektedir. Fakat mikro tornalama işleminde kesici takım, mikro frezelemedeki kadar risk altında değildir. Ayrıca kesme işleminde, iş parçasının devri çok yüksek olmak zorunda da değildir. Bununla birlikte mikro delik delme işlemlerinde de takımın kesme yapabilmesi için yüksek devir sayıları gerekmektedir. Özellikle takımın çıkış noktası ve giriş noktalarında meydana gelen çapak, hem mikro delik delme hem de mikro frezeleme işlemi için oldukça önemli bir problemdir. Çünkü geometri çok küçük olduğundan ikinci bir operasyonla çapağın temizlenmesi neredeyse imkânsızdır.

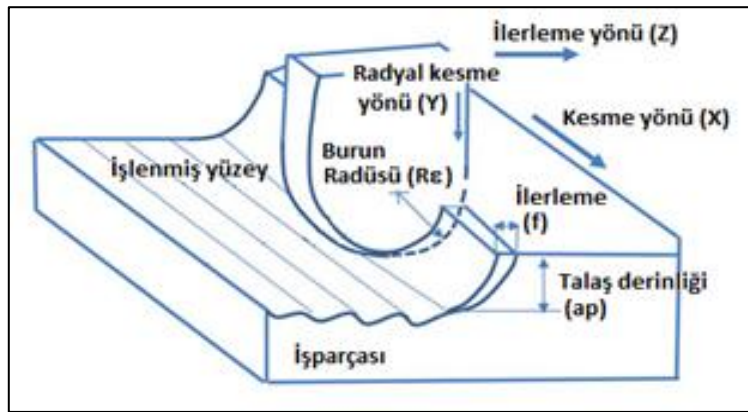
2.2 Mikro Ölçekte Talaş Kaldırma

Bileşenlerin minyatürleştirilmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Bunlar kesme mekanizmasını ve geometrik parametreleri etkileyen en önemli unsurlardır. Hem konvansiyonel kesme işlemlerinde hem de mikro kesme işleminde kesme mekanizması, işlenecek malzemeye göre değişme göstermektedir. Çelik ve çelik olmayan malzemeler farklı yapılara sahiptir ve takım geometrisinin uygun seçilmesi, talaş kaldırma işlemi için büyük etkiye sahip parametrelerden bir tanesidir (Lauro *et al.* 2013).

Mikro ölçekte talaş kaldırmak için tezgâh yapısının belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. İşlem yapılacak tezgâhlarda hassasiyetin yüksek olması istenmekle birlikte, konum doğruluğunun sağlanması da çok önemlidir. Talaş kaldırılırken kullanılan takım tezgâhların genel anlamda titreşimlerden uzak kalmış, rijit bir yapıda olması ve buna ek olarak iş parçasının bağlandığı noktalarında aynı rijitliğe sahip olması istenmektedir. Isıl kararlılık, hareket kontrolü ve yüksek çözünürlük de takım tezgâhlarında istenen diğer parametrelerdir. Sistemden ölçüm yapılabilmesi için ölçme sisteminin, tezgâh ile bir bütün olması ancak işlem esnasında tezgâh ve çevresinden

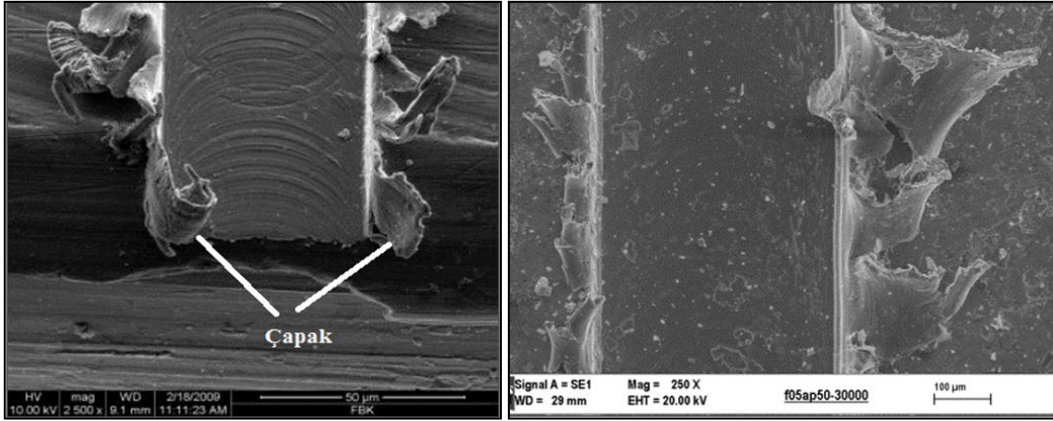
gelebilecek etkilere karşı korunmuş olması gerekmektedir. Bir diğer önemli husus da rutubet ortamından uzak, ortam sıcaklığının uygun değer de tutulması, toz ve kirliliğe karşı kontrolü sağlayan, kısacası sistemi etkileyebilecek çevresel etkenlere karşı koruma önlemlerinin alınmış olması işlem mekanizması için gereklidir (Arıkan ve Altan 2005).

Mikro tornalama işleminde kesme derinliği çok küçüktür ve bu kesici takımın köşe yarıçapından daha küçük değerdedir. Kesici ucun burun kısmı, iş parçasına daha az temas ettiğinden dolayı, kesilmemiş talaş kalınlığında farklılıklar oluşmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere, talaşın oluşumu takım ve iş parçasının birbirine olan hareketiyle oluşmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere X eksenini ilerleme eksenini gösterirken, Y eksenini radyal kesme yönünü, Z eksenini de kesme yönünü göstermektedir.



Şekil 2.1 Mikro kesme işlemi (Zhanqiang *et al.* 2013).

Mikro işlemede, kesilmemiş talaş kalınlığı kritik değerin (minimum talaş kalınlığı) altında olması halinde, takım kenar yarıçapının etkisinden dolayı talaş oluşmayacaktır. Bu nedenle malzemenin tornalanması sırasında sağlıklı bir kesme işlemi gerçekleşmeyecek ve malzeme üzerinde kazınma meydana gelecektir. Kesme işleminin devam etmesi durumunda boyut etkisinden dolayı kuvvetler artacak (Vogler *et al.* 2004), çapak oluşumu gözlenecek ve yüzey pürüzlülük değeri artacaktır (Weule *et al.* 2001). Mikro tornalama işleminde çapak oluşumuna pek rastlanmamakla birlikte mikro frezeleme işleminde birçok çalışmaya konu olmuştur. Schueler vd. (2009) ve Aslantaş ve Kaynak (2018), tarafından yapılan bir araştırmada, titanyum alaşımlarının mikro frezeleme işleminde oluşan çapak, sadece işlenen kanalın her iki tarafında değil, aynı zamanda takımın çıkış noktasında da meydana gelmektedir (Resim 2.2).



a)

b)

Resim 2.2 Ti6Al7Nb'nin mikro frezeleme işleminde meydana gelen çapaklar (a)Schueler *et al.* 2009, b) Aslantaş ve Kaynak 2018).

Yuan vd. (1996), yapmış olduğu çalışmada minimum talaş kalınlığının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırılmasında kesme kenarı yarıçapı değeri 0.2-0.6 µm iken elde edilen minimum talaş kalınlığı değeri yaklaşık 0.05-0.2 µm aralığında bulmuşlardır. Bu değer köşe yarıçapının %20 ile %40 arasındaki bir değerde olduğu tahmin edilmiştir.

Minimum ölçekte talaş kaldırmak için yapılan kapsamlı deneyler sonucunda, çeşitli malzemeler için plastik deformasyondan (malzemede meydana gelen kazınma) mikro kesmeye geçiş koşulunun, Kragelskii-Drujuanov denklemi tarafından belirlenebileceğini söylenmiştir (Denklem 2.1). Kragelskii-Drujuanov formülünden yola çıkarak malzemede kazınma olmadan mikro talaş kaldırma işleminin gerçekleşmesi için ortalama talaş kalınlığı (λ), minimum talaş kalınlığı oranının (t_{cmin}), takım köşe yarıçapı (r_e) oranı olarak hesaplanmıştır (Kragelsky *et al.* 1977).

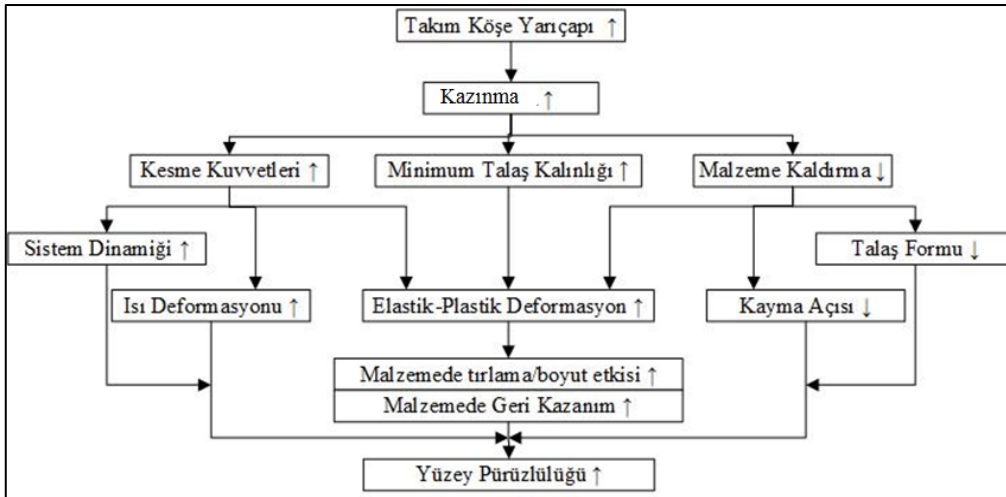
$$\lambda = \frac{t_{cmin}}{r_e} \quad (2.1)$$

2.2.1 Mikro Ölçekte Kenar Radyüsünün Önemi

Talaş oluşum mekanizmasını daha iyi anlamak, kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları, takım aşınması ve yüzey kalitesi gibi işleme performanslarını doğru bir şekilde tahmin

etmek için takım köşe yarıçapının etkisini dikkate almak önemlidir.

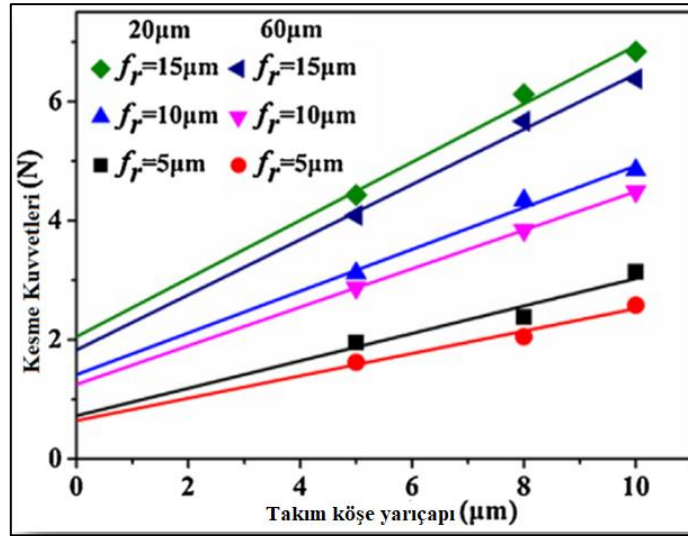
Kesme işlemini etkileyen geometrik parametreler, takım kenarı yarıçapı, takım köşe yarıçapı ve takıma ait kesme açıları (talaş açısı ve yanaşma açısı) olarak bilinmektedir. Takıma ait köşe yarıçapının artması ya da azalması kesme işlemlerinde birçok parametreyi etkilemektedir. Şekil 2.2’de takım köşe yarıçapının etki ettiği parametreler gösterilmektedir. Talaş derinliğine bağlı olarak, kesici takım köşe yarıçapının seçimi çok önemlidir. Takım köşe yarıçapı aynı zamanda talaş formunu ve oluşumunu da etkilemektedir. Yapılan araştırmalarda talaş derinliğinin köşe yarıçapı değerinin 2/3 oranından daha az değerde olmaması ya da ilerleme değerinin takım köşe yarıçapı değerinin 1/2 sinden daha az olması istenmektedir. Çok fazla arttırılan köşe yarıçapları, kesme işleminde talaşın cılız ve zayıf olmasıyla sonuçlanmaktadır. Aynı zamanda kesme direncinin artmasına yol açmakta, bu da yüzeyde kazınmaya neden olmaktadır. Bu nedenle uygun değerlerde kesici uç seçilmesi kesme işleminin sürekliliği için gerekli olmaktadır.



Şekil 2.2 Takım köşe yarıçapının talaş kaldırma mekanizması üzerindeki etkileri (Zhang *et al.* 2015).

Wyen ve Wegener (2010), tarafından Ti6Al4V'nin dik kesme işleminde, sürtünme kuvveti de dâhil olmak üzere kesici kenar yarıçapı değerinin artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığını bulmuşlardır. Biermann ve Baschin (2009), takım çeliğinin mikro frezelemesini araştırmış ve kesme kenarı yarıçapı arttığında daha fazla malzeme

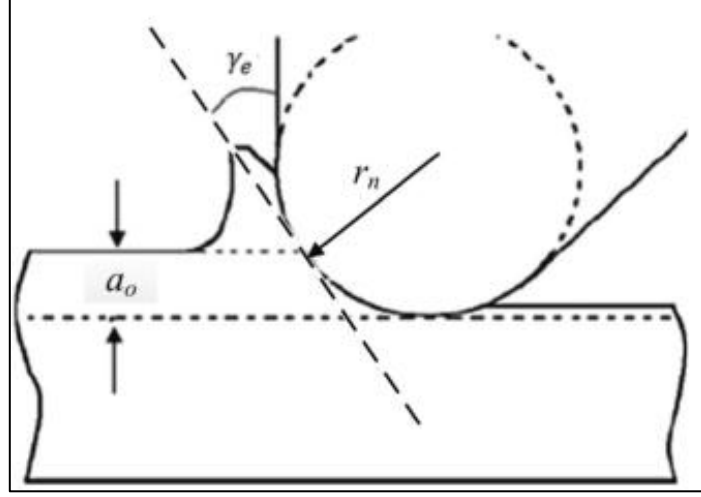
işlendiğinden dolayı, kesme kuvvetlerinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca mikro tornalama işleminde hem kesme kuvvetinin hem de radyal kuvvetin, lineer olarak kesme kenarı yarıçapı ile arttığını ifade edilmiştir (Childs 2010). Şekil 2.3'te, Wu vd. (2016), yapmış olduğu çalışmada 6 mm çapında saf bakır iş parçasının mikro tornalanması işleminde iş parçasında farklı tane boyutları elde etmek için önce yeniden kristalleştirme tavlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra 20 μm ve 60 μm tane boyutlarında elde edilen iş parçaları, mikro tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda her iki tanecik boyutunda artan kesme kenar yarıçapıyla kuvvetlerde lineer bir artış olduğu görülmüştür. Toplam kesme kuvvetlerinin bu denli lineer bir şekilde artmasının yüzeyde kazınmaya neden olan kuvvetlerin artmasıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.3 Kenar yarıçapının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi (Wu *et al.* 2016).

Düşük ilerleme değerlerinde kenar yarıçapının yüksek olması, negatif talaş etkisi göstermekte bu durumda kesme işlemini zorlaştırmaktadır. Kesme işleminin zorlaşmasıyla birlikte iş parçasında, malzeme yığılması ve çapak oluşumu gözlenmekte, bu da iş parçası yüzeyinin kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır (Aslantaş *et al.* 2016). Ohbuchi ve Obikawa (2003), geliştirdikleri termo-elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemiyle, ortogonal kesme şartlarında büyük negatif talaş açısına sahip takımlar ile sonlu eleman çözümleri gerçekleştirmişlerdir. Kesici ucun önünde küçük bir üçgensel bölgede, takım kesme kenarı boyunca negatif talaş açısına bağlı olarak talaşın

akmadığını ve kesici uç bölgesinde talaşın yığıldığını belirtmişlerdir. Wu vd. (2016), tarafından yapılan bir çalışmada da mikro tornalama işleminde, kesilmemiş talaş kalınlığının takım kenar radyüsünden küçük olması durumunda, kesme işleminin negatif talaş açısına sahip bir takım ile yapıldığı kesme durumuna benzetilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Mikro kesme işleminde talaş yığılması (Wu *et al.* 2016).

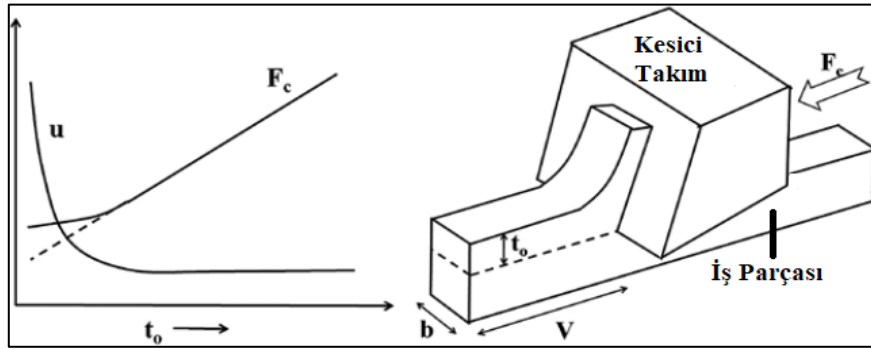
Talaş derinliği ve ilerleme değeri de köşe radyüsü seçimini etkileyen bir diğer unsur olup, yüzey kalitesini, talaş kırma ve kesici uç dayanımını etkilemektedir. Küçük talaş derinliği istenilen durumlar için genel itibariyle küçük köşe yarıçaplı takımlar tercih edilmektedir. Küçük yarıçaplı kesici köşeler, kesme işlemi esnasında titreşimleri azaltmaktadır. Bu yüzden takım tezgâhı ve iş parçası düşük rijitlik değerine sahip olduğu durumlarda, kesme işleminde genel olarak köşe radyüsü küçük kesici takımlar tercih edilmektedir (Hirao *et al.* 1982).

2.2.2 Boyut Etkisi

Yaygın olarak kesme derinliğindeki azalma ile belirli kesme kuvvetlerinin artışı olarak bilinen mikro kesmedeki boyut etkisi, ilk olarak 1952'de bildirilmiştir (Backer vd. 1952). Bu etkiler, tornalama işlemlerinde Masuko (1956) ve frezeleme işlemlerinde Finnie (1963) tarafından da keşfedilmiştir. Birçok araştırmacı (Nakayama and Tamura 1968, Shaw 2003, Aramcharoen and Mativenga 2009, Vollertsen *et al.* 2009) boyut

etkisinin nedenlerini araştırmışlardır. Temel olarak, boyut etkisi iki farklı temele dayandırılmaktadır. Birincisi, kesme esnasında iş parçasında meydana gelen deformasyon sertleşmesidir (Subbiah 2006). Diğeri ise kesilmemiş talaş kalınlığının kesici kenar yarıçapına oranıdır. Bu oran takımın etkili talaş açısının değişmesine hatta negatife dönmesine neden olmaktadır.

Armarego ve Brown (2007), alüminyum iş parçası üzerinde çeşitli geometri kesici takımlarla bir dizi deney yapmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre, takımın boşluk açısı verildiği yüzeyde meydana gelen yüksek sürtünme kuvveti, özgül enerjinin hızlı bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Nakayama ve Tamura (1968), pirinç malzeme için benzer deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çok küçük kesim derinliğinde yapılan kesme deneylerinde, özgül enerjinin arttığını belirtmişlerdir. Liu ve Melkote (2007), özgül enerji ile kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi şematik olarak ifade etmiştir (Şekil 2.5).

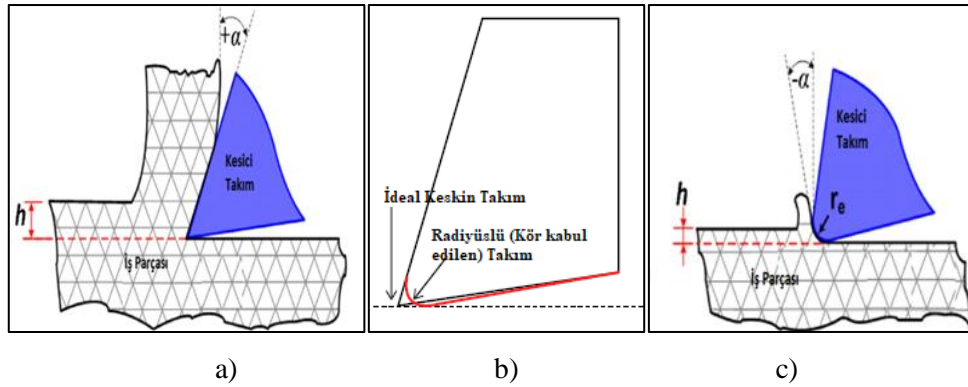


Şekil 2.5 Kesme esnasında özel kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişim (Liu and Melkote 2007).

Özgül kesme enerjisi, bir birim malzeme kaldırmak için gereken enerji miktarını ölçmek için kullanılmaktadır. Özgül kesme enerjisinin yüksek olması, daha az miktarda talaş kaldırıldığı, ayrıca kesme işleminin beklenenden daha zor gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Kesme kenarının, kesme hızına dik olduğu durumlarda, özgül kesme enerjisi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Denklem 2.2):

$$u = \frac{F_c \cdot V}{b \cdot t_o \cdot V} = \frac{F_c}{b \cdot t_o} \quad (2.2)$$

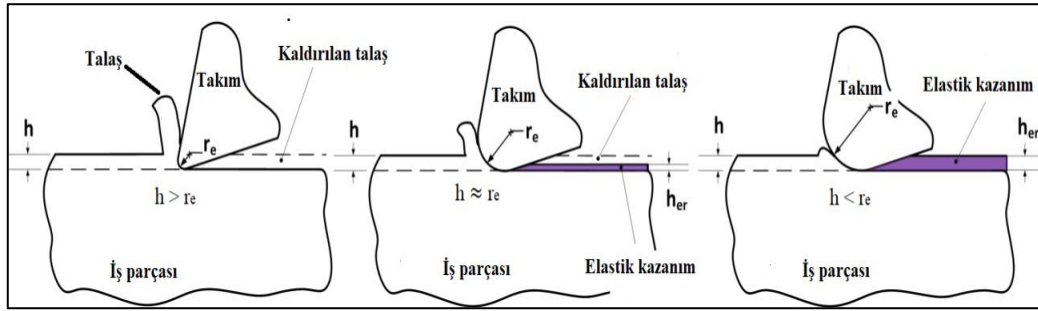
Burada F_c kesme kuvveti, V kesme hızı, b kesme genişliği, t_o talaş kalınlığıdır. Mikro kesme işleminde hem iş parçasının türü hem de kesme parametreleri (özellikle ilerleme değeri) kritik talaş derinliğini doğrudan etkilemektedir. Buna yönelik yapılan bir çalışmada pirinç, alüminyum alaşımları, çelik, gibi farklı iş parçaları için sabit kesme hızında kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Backer *et al.* 1952, Liu *et al.* 2006). Kesme kenarı yarıçapı, küçük değerlerde dahi, kesme işlemi üzerinde önemli bir boyut etkisine yol açmaktadır. Pratik uygulamalarda kesici takımlar hiçbir zaman istenilen keskinliği gösterememektedir. Bu sebeple, radyüslü takım pratikte kör takım olarak kabul edilmektedir. Kör bir takım talaşı kesmek yerine yüzeyde kazıma etkisi yapmaktadır. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere radyüslü takım kaldırılan talaşı itme eğiliminde olup, negatif bir talaş açısına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda, takım kenar yarıçapının son derece keskin değerlere yakın olduğu, kesilmemiş talaş kalınlığının kesme kenarı yarıçapı değerine eşit olduğu durumlarda dahi enerji eğilimlerinin hızlı bir şekilde değiştiği ifade edilmektedir (Brown and Komanduri 1972).



Şekil 2.6 a) Konvansiyonel makro kesme işlemi pozitif talaş (Aramcharoen and Mativenga 2008), b) Kesme işleminde istenen takım ucu (Subbiah and Melkote 2013), c) Pratikte Radyüslü kesici takım ve negatif talaş etkisi (Aramcharoen and Mativenga 2008).

Özellikle mikro kesme işlemlerinde kaldırılan talaş hacmi küçük olmasından dolayı, malzemede büyük deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Şekil 2.7'de görüldüğü üzere kesme kenarı yarıçapı deforme olmamış talaş kalınlık değerine eşit veya daha büyük değerde olduğu durumlarda, kesme sırasında iş parçasında talaş oluşmayacak ve malzeme üzerinde kesme işlemi yapılamadığından, yüzeyde kazınma ve elastik

deformasyon meydana gelecektir (Aramcharoen and Mativenga 2009). Boyut etkisi, büyük ölçüde malzemenin mukavemetini arttırdığı, başka bir deyişle kesme sırasında iş parçasının plastik deformasyona beklenenden çok daha fazla reaksiyon gösterdiği ifade edilmiştir. Bu sebeple malzemede meydana gelen elastik ve plastik davranışların, özellikle malzemede görülen boyut etkisinin, kesme performansı üzerinde birçok parametreyi etkilediği de belirtilmektedir (Ding *et al.* 2011).



Şekil 2.7 Radyüslü takım ile kesme işleminde malzemede meydana gelen kazanma ve elastik deformasyon (Ding *et al.* 2011).

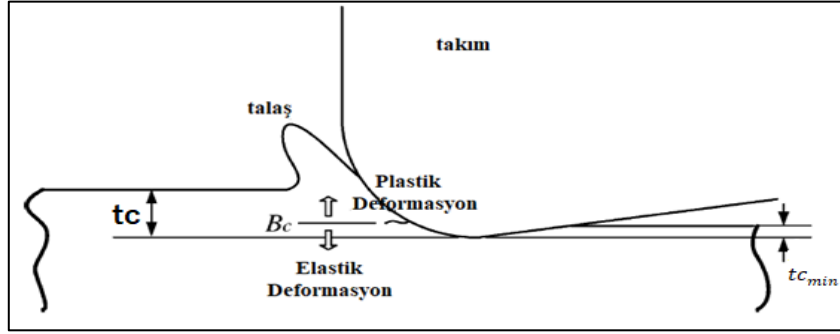
Mikro kesme işleminde, boyut etkisi teorik ve deneysel olarak kapsamlı bir şekilde incelenmesine rağmen, odak noktası çoğunlukla alüminyum alaşımları (Liu 2007), bakır (Lai 2008) ve hafif karbonlu çelikler (Liu 2006) gibi yumuşak malzemeler üzerinde olmuştur. Shelton ve Shin (2010), yapmış oldukları çalışmada, 100 μm çaplı tungsten karbür freze ile Ti6Al4V, AISI 316 ve 422 paslanmaz çelik gibi işlenmesi zor malzemeleri, lazer destekli mikro delme işlemiyle kesme esnasında malzemelerde meydana gelen boyut etkisini sayısal olarak modellemişlerdir. Aramcharoen ve Mativenga (2009), 900 μm çapında tungsten karbür mikro frezesi kullanarak 45 HRC sertlik değerindeki H13 takım çeliğini işlemiştir. Çalışmada özgül kesme kuvvetinin farklı talaş kalınlıklarındaki değişimi ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ile değişimi de elde edilmiştir.

2.2.3 Minimum Talaş Kalınlığı

Mikro mekanik kesme ile konvansiyonel kesme işlemleri arasındaki temel fark, kesici takımın kenar radyüsünün, talaş kalınlığı ve talaş derinliği ile kıyas edilebilecek kadar

küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Minimum talaş kalınlığı, öncelikli olarak kesici takım kenar radyüsüne bağlı olmakla birlikte, malzemelerin plastik davranışına, kimyasal bileşimine, takım talaş ara yüzeyindeki sürtünme katsayısına bağlıdır (Chae *et al.* 2006).

Buna bağlı olarak takım kenar yarıçapı değeri ile kesme derinliği aynı büyüklük değerinde yani belli bir kesme derinliğinden daha küçük değerlere ulaşması durumunda malzeme de talaş oluşumu gözlenmemektedir. Şekil 2.8'de malzemede yeterli miktarda talaş kaldıramadığı zaman iş parçası üzerinde elastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu elastik deformasyon takımın kesme bölgesini terk edip geçtiği yüzeylerde meydana gelmektedir. Meydana gelen bu elastik deformasyon takıma etki eden kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün de artmasına neden olabilmektedir (Son *et al.* 2005).



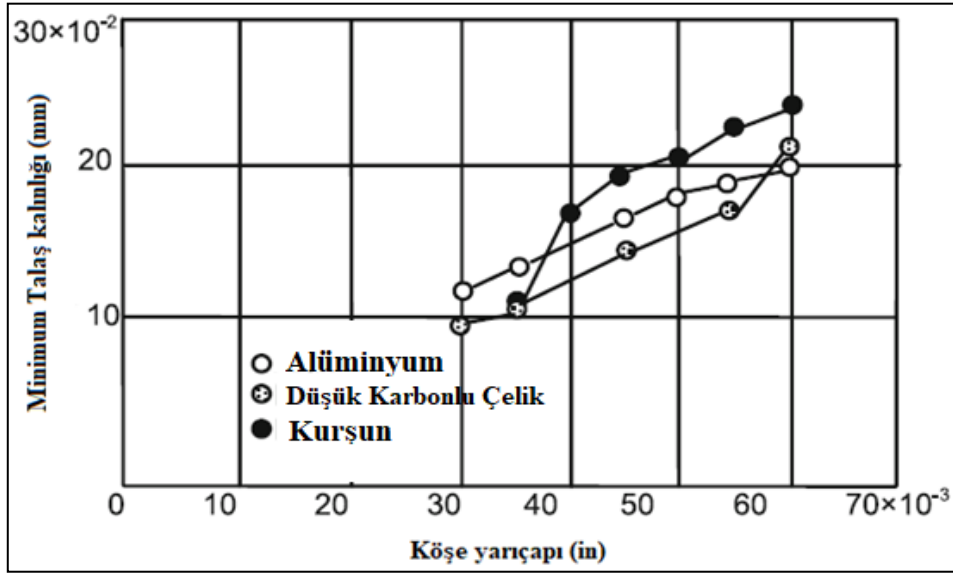
Şekil 2.8 Köşe radyüslü takımla yapılan mikro kesme işleminde talaş kaldırma esnasında meydana gelen elastik ve plastik deformasyon (Son *et al.* 2005).

Son vd. (2005)'in yaptıkları bir çalışmada takım kenar radyüsü ile minimum talaş kalınlığı arasında ampirik bir ifade elde etmişlerdir. Bu ifadede takım ile talaş ara yüzeyine bağlı olarak elde edilen sürtünme açısı (β) kullanılmıştır (Denklem 2.3).

$$t_{c(min)} = R_e \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \right) \quad (2.3)$$

Formülde, $t_{c(min)}$ minimum talaş kalınlığı, R_e takım kenar radyüsünü ve β sürtünme açısını ifade etmektedir. Sürtünme açısı kesme esnasında elde edilen teğetsel kuvvet ile normal kuvvetin oranından hesaplanmaktadır.

Ikawa vd. (1992), elektrolitik bakır malzeme ve elmas kesici uçlu kesici takımlar kullanarak yapmış oldukları ultra hassas tornalama deneylerinde minimum talaş kalınlığının, kesme kenarı yarıçapına oranını 1/10 olarak bulmuşlardır. Vogler vd. (2004) ve Chuzhoy vd. (2002), tarafından geliştirilen sonlu elemanlar metodunu kullanarak, ferrit ve perlit çelikleri için h_{min} değerini yaklaşık olarak 0.14-0.43 r_e bulmuşlardır. Bir başka çalışmada ise Lui vd. (2006) analitik model yöntemini kullanarak AISI 1040 ve Al60882-T6 için h_{min} değerini 0.20-0.35 r_e olarak bulmuşlardır. Ramos vd. (2012), h_{min} değerini AISI-1045 çeliği için 100 m/min kesme hızlarında ortalama 0,295 r_e bulmuşlardır. Minimum talaş kalınlığı sadece kenara radyüsüne bağlı olmadığından, farklı malzemeler için minimum talaş kalınlığını bulmaya yönelik yapılan bir çalışmada da üç farklı malzeme gurubu için farklı kenar radyüsleri ile minimum talaş kalınlığının değişimi elde edilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Köşe yarıçapı ile minimum talaş kalınlığının değişimi (Fang and Liu 2004).

Liu vd. (2007), malzemenin termo-mekanik durumlarına dayanarak minimum talaş kalınlığını tahmin etmek için analitik bir kayma hattı modeli sunmuştur (kesme sıcaklığı, gerilme, gerilme oranı). Yapılan deneysel çalışmalarda, takım kenar yarıçapına minimum talaş kalınlığı oranı Al 6084-T6 için yaklaşık yüzde 38 ile 40 çıkarken, AISI 1040 çeliği için ise yüzde 24 ile 35 çıkmıştır. AISI 1040 çeliği için kesme hızındaki ve takım kenarı yarıçapındaki artışa bağlı olarak minimum talaş kalınlığında bir artma meydana gelmiştir. Çelik, kesme sıcaklığındaki yükselme

nedeniyle daha sünek bir yapı göstermektedir. Bu sayede talaş daha kolay bir şekilde oluşmaktadır. Bu nedenle düşük talaş yüklerinde aralıklı talaş oluşumunun önüne geçebilme adına karbon çelikleri için daha düşük kesme hızları tercih edilmektedir. Bununla birlikte, Al6082-T6 için, kesme hızı ve takım kenarı yarıçapındaki değişikliğe bağlı olarak minimum talaş kalınlığı aynı kalmıştır. Basuray vd. (1977), analitik ve deneysel olarak, minimum deforme olmamış talaş kalınlığının, takım kenar yarıçapının keskinliğine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Weule vd. (2001), malzeme özelliklerinin minimum talaş kalınlığına etkisini incelemiştir. Başka bir araştırmada ise kesici takımların talaş açısının, talaş oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Araştırmada -55° kesme açısında talaş oluşmadığı, -75° kesme açısında talaşın oluştuğu belirtilmiştir. Abdelmoneim ve Scrutton (1973), serbest kesim pirinç ve ince taneli çinko frezeleme işleminde, talaş açısının -76° 'den fazla olan ucun, mat bir takım ile talaş oluşum sürecini geciktirdiğini belirtmiştir. Bisacco vd. (2006), Minimum talaş kalınlığının, kayma kuvvetlerini arttırdığı ve işlenmiş yüzeylerin pürüzleşmesine yol açtığını, bunun da kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerini arttırdığını belirtmişlerdir.

Önceki çalışmalardan edinilen bilgilerden yola çıkılarak, deneysel çalışmaların çoğu minimum talaş kalınlığını tahmin etmek için kesme kuvvetlerini temel bir özellik olarak kullanmışlardır. Minimum talaş kalınlığı, yapılan çalışmalarda genel olarak takım kenarı yarıçapının yüzde 5 ile 43'ü arasında olduğu görülmüştür. Minimum talaş kalınlığının belirlenmesinde takım kenarı yarıçapının, iş parçasından kaldırılan talaş büyüklüğüne göre keskinliğinin uygun değerlerde seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca, iş parçası termo-mekanik özellikleri, takım ile iş parçası arasındaki sürtünme ve kesme hızı etkileri de minimum talaş kalınlığı konusunda dikkate alınmalıdır.

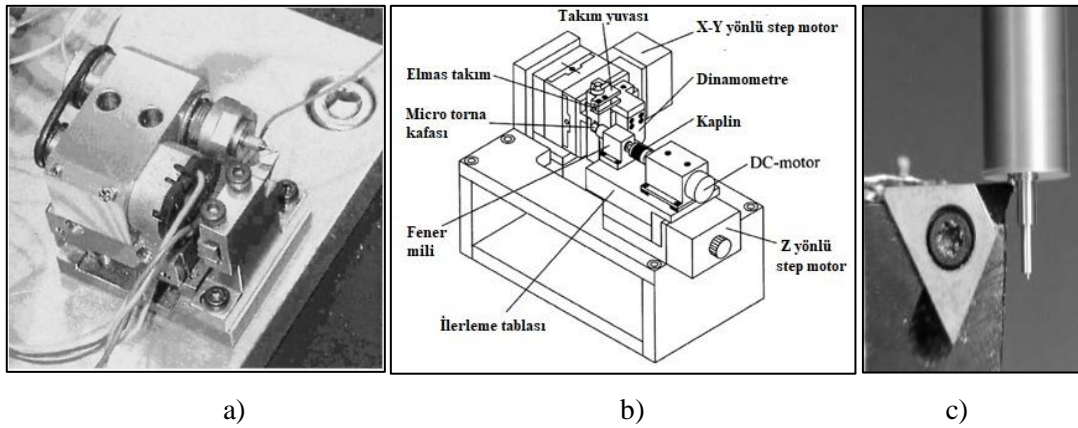
2.2.4 Mikro Tornalama

Mikro tornalama işlemi, aksel simetrik geometriye sahip minyatür ürünlerin üretimi için kullanılan bir kesme yöntemidir. Kesme işleminin gerçekleştirilmesi ve malzeme üzerindeki fazla talaş tabakasını ayırmak için iş parçasının ve kesici takımın birbirine göre hareket ettirilmesi gerekmektedir. Kesme stratejisi, konvansiyonel tornalama işlemine oldukça benzemekle beraber, kaldırılan talaş hacmi oldukça küçük

boyutlardadır. Talaş hacminin küçük olması kullanılan ekipmanın da küçülmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle mikro tornalama işlemlerinde kullanılan tezgâh boyutları oldukça sınırlı ve yüksek devirde daha rijit tezgâhlardır (Resim 2.3-a, 2.3-b).

1996 yılında mühendisler tarafından mikro tornalama işlemleri için minyatür bir sistem tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen bu mikro tornalama makinesi sadece 1 cm³ büyüklüğünde olmasına rağmen, geleneksel torna makinelerine kıyasla önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayarak malzemeleri daha düzgün bir şekilde işleyebilmekteydi (Tanaka 2001).

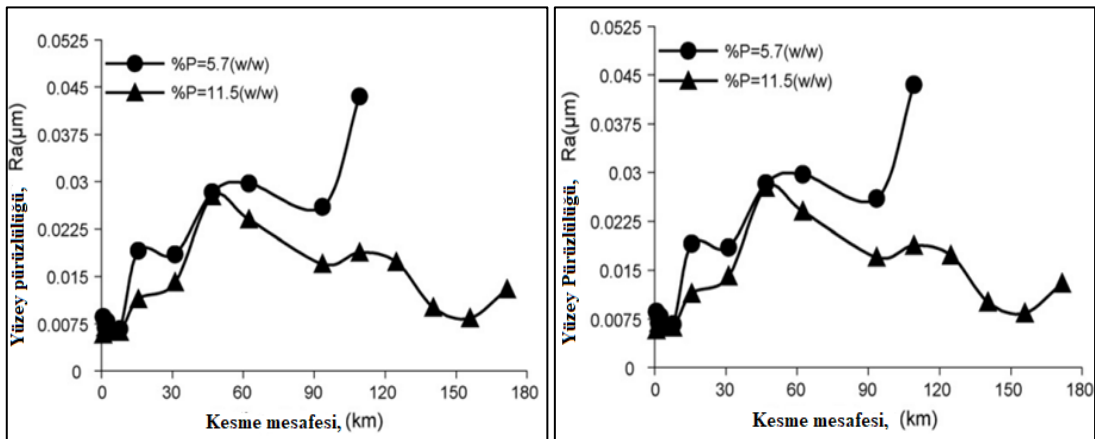
Tornalama esnasında iş parçası çapının çok küçük olması da beraberinde eğilme problemlerini ortaya çıkarır. Bu da kesme esnasında kaldırılan talaş derinliğinin azalması anlamına gelir. Bunu bertaraf edebilmek için kesme derinliği olabildiği kadar küçük alınarak kademeli tornalama işlemi yapılır (Resim 2.3-c).



Resim 2.3 a) Mikro tornalama operasyonları için geliştirilmiş olan bir deney düzeneği (Tanaka 2001), b) Mikro tornalama yapan bir tezgâhın şematik görünümü (Lu and Yoneyama 1999), c) Kademeli mikro tornalama işlemi (Senthilkumar and Muruganandam 2012).

Mikro tornalama işlemi için takım, tezgâh özellikleri ve kesme koşulları iyi seçilmelidir. Üretim de istenen en önemli temel faktörlerden olan işleme süresinin kısa sürmesi, takım ömrünün uzun ve işleme performansının yüksekliğidir. Kesme işleminde hız takım ömrüyle doğrudan ilişkilidir. Kesme hızının az miktarlarda dahi artırılması takım ömrünü önemli miktarda azaltmaktadır. Aynı zamanda çok düşük hızlarda yapılan

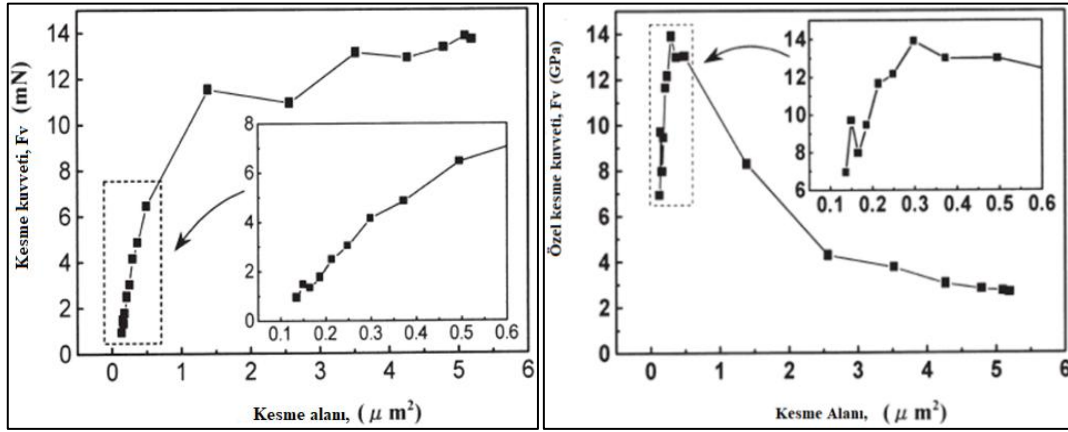
kesme işlemi de kesme performansını etkilemesinden dolayı takım ömrünü azaltmaktadır. Durairaj ve Gowri (2013), tarafından yapılan bir çalışmada Inconel 600 süper alaşım malzemesinin mikro şartlarda tornalanması sırasında meydana gelen takım aşınması deneysel olarak çalışılmıştır. Çalışmada farklı kesme hızları ve ilerleme değerleri ile talaş derinlikleri kullanılmıştır. Çalışmada genetik algoritma tekniği kullanılarak kesme parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Rahman vd. (2007), yapmış oldukları çalışmada optik malzemenin tek noktadan kesme yapana elmas kesici takım ile işlenmesini deneysel olarak ele almışlardır. Çalışmada kesme zamanına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün ve serbest yüzey aşınmasının değişimini araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre artan kesme mesafesiyle R_a değerinin arttığı ama bir süre sonra azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.10). Bununla birlikte artan kesme mesafesiyle serbest yüzey aşınmasının arttığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.10 Kesme mesafesinin yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki etkisi (Rahman *et al.* 2007).

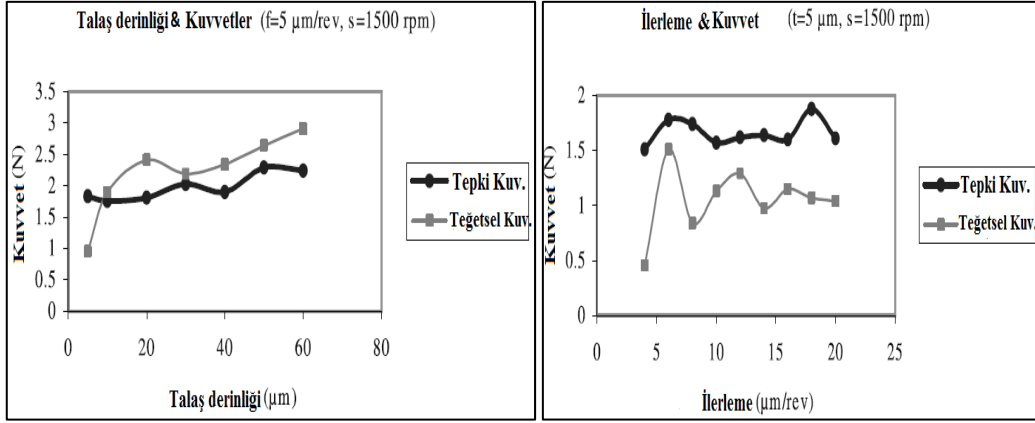
Kesme işlemi etkileyen bir diğer parametrede ilerleme ve kesme derinliğidir. İlerleme miktarını azaltmak, iş parçası yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilerken artan ilerleme değeri de yüzey kalitesinin olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle ilerleme miktarının uygun düzeyde tutulması işlem verimliliği arttıracaktır. Fazla ilerleme oranı kesme işleminde sıcaklığın artmasına neden olacak ve takım yüzeyinde aşınmayı da arttıracaktır. Mikro tornalama işleminde artan ilerleme ve talaş derinliği talaş kesitinin artmasına neden olacağından kesme kuvvetlerini de arttıracaktır. Lu ve Yoneyama (1999), tarafında yapılan bir çalışmada, artan talaş kesitinin, kesme kuvvetini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu artışın lineer olarak gerçekleşmediği ve belirli bir talaş kesitine

kadar kuvvet artışının daha büyük bir eğimle meydana geldiği ifade edilmektedir (Şekil 2.11). Çalışmada bu talaş kesiti kritik talaş kesiti olarak tanımlanmış ve bunu ortaya koymak adına da kesme esnasındaki özel kesme kuvvetinin değişimi de elde edilmiştir (Şekil 2.11). Spesifik kesme kuvvetinin değişiminden de anlaşılacağı üzere $0,5 \mu\text{m}^2$ kesiti alanına kadar özel kesme kuvvetinin hızlı bir şekilde arttığı sonucuna varılmıştır.



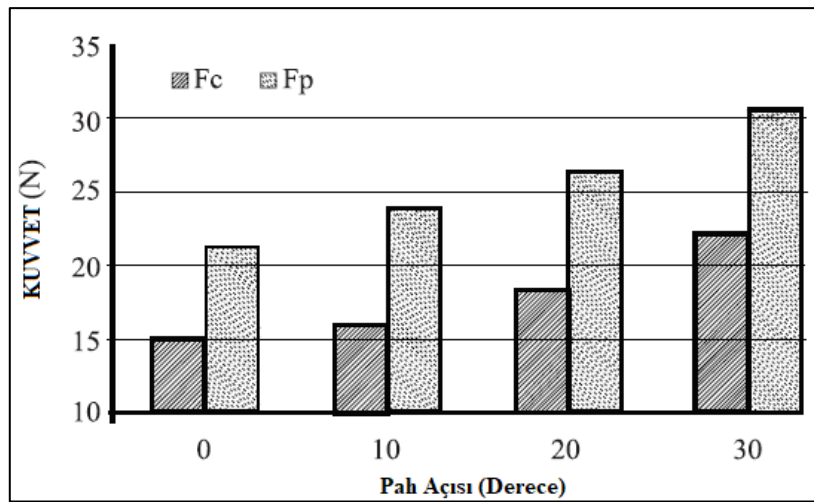
Şekil 2.11 Kesme kuvvetleri ve özel kesme kuvvetleri ile kesme alanı arasındaki ilişki (Lu and Yoneyama 1999).

Rahman vd. (2006), tarafından yapılan çalışmada talaş derinliği ve ilerleme değerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 6 mm uzunluğunda pirinç malzeme takımın fener miline sabitlenerek kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Geleneksel tornalamanın aksine iş parçası dikey olarak yerleştirilmiştir. 60 dereceli kesme açısına sahip 0,1 mm burun yarıçaplı karbür kesici takımın kullanıldığı kesme işleminde sabit kesme ve ilerleme değerlerinde 1500 rpm'de kesme yapılmıştır. Çalışmada belli bir ilerleme değerine kadar pasif kesme kuvvetinin, teğetsel kuvvetten daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Artan ilerleme değeri ile birlikte teğetsel kuvvetin daha büyük olduğu vurgulanmıştır. Bu durumun nedenini boyut etkisi olarak açıklamışlardır. Deforme olmayan talaş kalınlığı, kesici uç yarıçapına eşit veya ondan küçük değer de olduğu durumlarda iş parçasında kesme gerçekleşmediği ve kazıma meydana geldiği belirtilmiş olup, bu sebeple ilerleme değerlerinin küçük talaş derinliğinde, tepki kuvvetlerinin teğetsel kuvvete baskın olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.12).



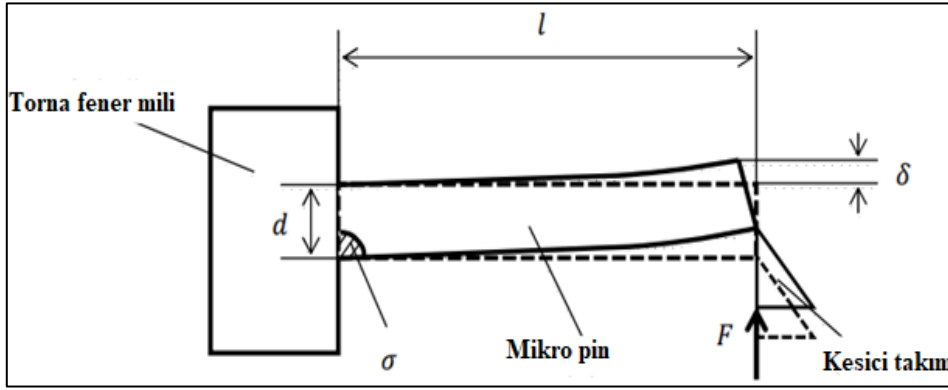
Şekil 2.12 Talaş derinliği ve ilerleme değerinin kuvvetler üzerindeki etkisi (Rahman *et al.* 2006).

Mikro şartlarda kesme işleminde sadece kesme parametreleri değil aynı zamanda kesici takım geometrisi de kesme kuvvetlerini etkilemektedir. Bununla ilgili olarak son işlem tornalamayı konu alan bir çalışmada Dogra vd. (2011) artan pah açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada PCBN (Polikristal kübik bor nitrür) ile 60 HRC sertliğinde AISI 52100 rulman çeliği kullanılarak, farklı pah açılarında tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan pah açısıyla birlikte kesme kuvvetleri de artmaktadır. Fakat tüm kesme şartlarında asıl kesme kuvvetinin, pasif kesme kuvvetinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Takım köşe radyüsünün kesme kuvvetlerine etkisi (Dogra *et al.* 2011).

Mikro tornalama işleminde önemli olan unsurların biri de iş parçası çapının çok küçük olması nedeniyle, meydana gelen elastik deformasyondur. Bu elastik deformasyon talaş derinliğinin de değişmesine neden olacağından, işlenen parçasının iki ucu arasında boyutsal farklılıklar meydana gelmektedir. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada iş parçası ankastre bir kirş olarak düşünölmüş olup (Şekil 2.14), kesme esnasında meydana gelen kuvvetlerin etkisiyle iş parçasındaki elastik deformasyonun değişimi araştırılmıştır (Rangel *et al.* 2011).



Şekil 2.14 Kesme kuvvetleri altında iş parçasında meydana gelen sapmanın tahmin edilmesi (Rangel *et al.* 2011).

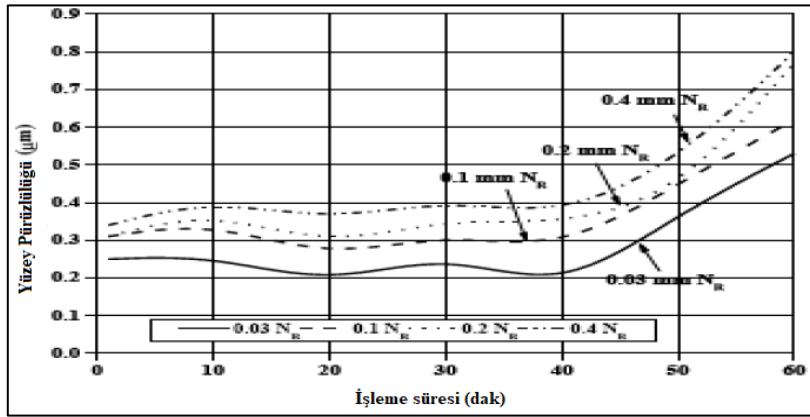
2.3 Mikro İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü

Mikro işleme yöntemi ile üretilecek olan silindirik parçaların imalatında önemli çıktı parametrelerin biri de yüzey pürüzlülüğüdür. Konvansiyonel kesme işlemler sonrasında üretilen parçalara ikincil bir talaş kaldırma operasyonu (çoğunlukla taşlama) uygulanarak, yüzey kalitesi iyileştirilir. Fakat mikro işleme şartlarında şekillendirilen parçaların çaplarının veya boyutlarının çok küçük olması nedeniyle ikincil bir işlem uygulamak neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle, mikron seviyelerinde gerçekleştirilen mekanik bir kesme işlemiyle, üretilen yüzey pürüzlülüğünün doğru tahmin edilmesi, kısmen kalite ve performansta iyileşmeye katkıda bulunabilmektedir.

Tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğünü belirleyen ana iki temel faktör; ilerleme ve takıma ait burun yarıçapıdır. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri, ilerleme ve takım burun yarıçapına bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Grzesik (1996), Brammertz formülünü

revize ederek yapmış olduğu bir çalışmada, yüzey pürüzlülüğü için sadece ilerleme ve burun radyüsü değil farklı parametreleri de dikkate almıştır. Mikro tornalamada hem talaş derinliğinin hem de ilerleme değerinin çok küçük olması nedeniyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü teorik yüzey pürüzlülüğü ile uyuşmamaktadır. Özellikle de kenar radyüsünden daha küçük ilerleme değerlerinde teorik ile deneysel yüzey pürüzlülükleri arasındaki fark artmaktadır (Liu and Melkote 2006). Malzemeden talaş kaldırılırken, talaş yüksek basınca maruz kalmakta ve sonucunda kesici takım köşesi tarafından oluşturulan plastik deformasyon nedeniyle oluşan yan akış meydana gelmektedir. Bu durum kesme esnasında takımın gerisinde kalan bölgede talaş yığılmasına sebebiyet vermekte yüzeyin kalitesini bozmaktadır.

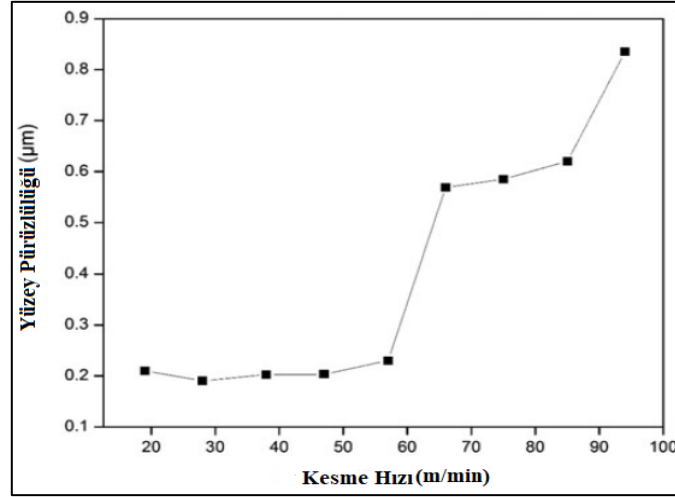
Singh vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada, tornalama işleminde, takım burun yarıçapının, yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir. Burun yarıçapındaki küçük azalmalar yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilerken, aynı çalışmada artan burun yarıçapıyla birlikte yüzeyde iyileşme meydana geldiğini belirtmişlerdir. Binoy vd. (2015), paslanmaz 316L çeliğinin mikro tornalanması işleminde takım burun yarıçapının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Seçilen kesici takım 0,03 mm, 0,1 mm, 0,2 mm ve 0,4 mm köşe yarıçapına sahip çok kaplamalı tungsten karbür kesici takımıdır. Şekil 2.15’de kırkınıca dakikaya kadar işleme süresi ile yüzey pürüzlülük değerinin artıp azaldığı, daha sonra dik bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu durumun nedeni, takımın hızlı aşınmasına bağlı olarak artan takım-iş parçası temas alanının artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.



Şekil 2.15 Farklı takım burun yarıçapının işleme süresine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değeri değişimi (Binoy et al. 2015).

Yüzey pürüzlülük değerine etki eden bir diğer parametrede ilerleme değeridir. İlerleme değeri arttıkça, kesme işlemi esnasında meydana gelen kuvvetler artmaktadır. Bunun nedeni, ilerleme hızı arttığında kaldırılan talaş kesitinin artmasıdır. Artan ilerlemenin etkisiyle, iş parçasından kaldırılan talaş, kopmaya karşı daha fazla direnç göstereceğinden dolayı talaş kesme kuvvetlerinde artışa yol açacaktır. Polishetty vd. (2017), Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde artan kesme kuvvetleri ve ilerlemenin etkisiyle kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmişlerdir. Deney sonucunda azalan talaş yapışmasına bağlı olarak artan kesme hızlarında yüzey pürüzlülük değerinin azaldığını belirtmişlerdir. Kesme esnasında artan ilerlemeye bağlı olarak takım titreşimlerinin meydana geldiği ifade edilmiş olup artan ilerleme ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığını belirtmişlerdir.

Yüzey pürüzlülüğü kesme hızı arttıkça azalmaktadır. Yüksek kesme hızı, sıcaklık ile ilişkilidir. Sıcaklığın artmasıyla, iş parçası malzemesinin yumuşamasını arttırmakta bu da kesme kuvvetlerini azaltıcı etkide bulunmaktadır. Böylece malzemedede daha iyi bir yüzey kalitesi sağlanmaktadır. Aynı sonuç, Che-Haron ve Jawaid (2005) tarafından da belirtilmiştir. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde kesme hızındaki artışla düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Ancak hızın makul değerde tutulması önemlidir. Çok fazla artan hız değerlerinde takım ile iş parçası arasında sıcaklık artacaktır. Sistem de çok fazla artan sıcaklık ile birlikte takım ile iş parçasının birbirine kaynak olma olasılığı artacaktır. Kesici takıma kaynak olan talaş, kesme yüzeyini bozacağından dolayı iş parçasının yüzey kalitesini olumsuz etkileyecektir. Bir başka çalışmada ise, Jagadesh ve Samuel (2015), sabit ilerleme ve talaş derinliğinde, farklı hızlarda Titanyum alaşımının mikro tornalanmasında, yüzey pürüzlülük değerinin değişimini araştırmışlardır. Şekil 2.16'da görüldüğü üzere, kesme hızı 19 m/dk'dan, 28 m/dk'ya yükseldiğinde, yüzey pürüzlülüğü az miktarda azalmıştır. Kesme hızı 28 m/dk'dan, 57 m/dk'ya yükseldiğinde, talaş formunun sürekli olduğu durumdan süreksiz bir duruma geçmesinden dolayı yüzey pürüzlülük değerinin nispeten artmaya başladığı belirtilmiştir. Kesme hızının 57 m/dk değerinden sonra yüksek kesme hızlarında, sürekli talaş oluşumundan kaynaklı olarak yüzey pürüzlülük değeri sürekli olarak artış göstermiştir.



Şekil 2.16 Kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Jagadesh and Samuel 2015).

2.4 Mikro İşlemede Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi

Kesme kuvvetleri malzemenin kalitesi ve hassasiyetini etkileyen önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Yüksek oranda talaş kaldırmak için kesme işlemi parametrelerini ve takım geometrisini optimize etmek gerekmektedir. Ancak talaşlı imalat sürecinde gerek kesme işlemi, gerekse işlenmiş malzemenin analizi zaman alıcı ve pahalı bir süreçtir. Bu sebeple, birçok deneysel süreçte, zaman kayıplarını önleme adına modelleme işlemi devreye girmektedir.

İstenilen özellikte son ürün elde etmek için, takım ile iş parçası arasındaki ilişkiyi bilmek önemlidir. Mikro kesme işlemlerinde en büyük zorluklardan bir tanesi de, takımın aşırı aşınması, kırılması ve sapmasıdır. Tüm bu istenmeyen parametreleri önlemek için işleme kuvvetlerini kritik bir sınırın altında tutmak, işlemin verimliliği için önemlidir. Mühendislik uygulamalarında modelleme, kesme kuvvetlerinin bulunmasında, işleme yapılacak takım tezgâhı yapısının oluşturulmasında, takım aşınmasının tahmin edilmesinde, işleme için gerekli olan güç tüketiminin, yüzey pürüzlülük değerinin ve boyutsal hassasiyetler gibi birçok parametrenin bulunmasına yardımcı olabilmektedir. Kesme kuvveti modelinin iyi analiz edilmesi, işlemi yapan kişinin doğru kesme parametrelerini seçmesine yardımcı olmakta, bu sayede takım aşınması ve takım kırılmasına yol açabilecek etkenler kesme işlemine başlamadan tahmin edilebilmektedir.

Kesme işleminin önceden tahmin edilebilmesi için, günümüze kadar çeşitli modelleme örnekleri geliştirilmiştir. Literatürde karşımıza çıkan bazı modelleme örnekleri; mekanistik model, analitik model, sonlu elemanlar modeli, yapay zekâ gibi makro ve mikro kesme işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

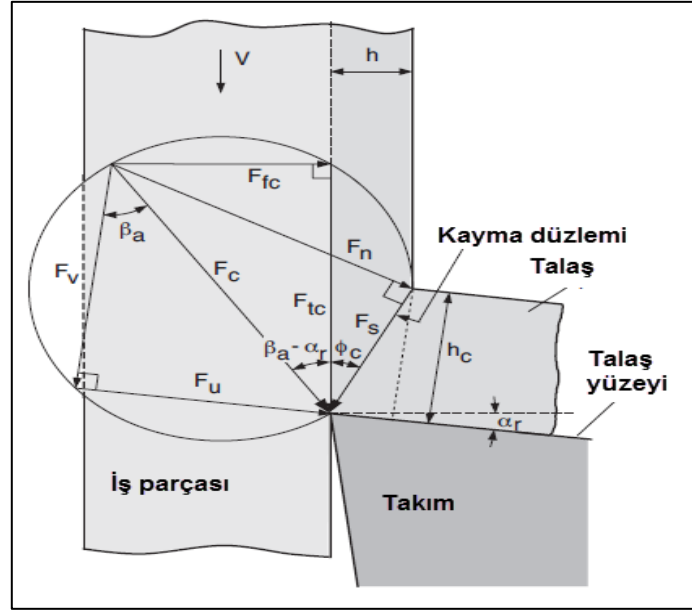
2.4.1 Mekanistik Modelleme

Mekanistik yaklaşım hem analitik hem de deneysel yaklaşımların bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Bunun için de dik kesme deneyleri yapılır. Modellemede elde edilmek istenen kesme kuvveti katsayıları veya kesme sabitleri, sabit kesme derinliğinde ve farklı ilerleme değerlerinde yapılan deneylerden yola çıkılarak hesaplanır.

Mekanistik model de, kesme kuvvetinin fiili kesim alanına orantılı olduğunu düşünülmektedir. Kesme kuvveti ile fiili kesim alanı oranına kesme kuvveti oransallık sabiti denilmektedir. Kesme kuvveti sabiti, takım ve iş parçası malzemesi, takım geometrisi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler nedeniyle, kesme kuvveti sabitini birçok durumda ölçmek zorlaşmaktadır. Kesme katsayı sabitleri esas olarak takım geometrisine, kesme koşullarına, takım ve talaş arasındaki sürtünme ve kesme gerilmesine bağlıdır. Mikro tornalama işlemlerinde kuvvetlerin modellenmesi talaşın kesit alanı ile doğru orantılı olarak değişme göstermektedir. Talaş kesit alanı, kesilmemiş talaş kalınlığı ve kaldırılan talaşın genişliği toplamıdır. Şekil 2.17’de yapılan dik kesme işleminde kesme kuvvetinin büyüklüğünü elde etmek için kesme sabiti, fiili kesme alanıyla çarpılır.

Kuvvet dengesi kuvvetler arasındaki ilişkiden yola çıkılarak elde edilir. Elde edilen kesme kuvveti, Altıntaş (2012), tarafından sunulan teğetsel kuvvet (F_t) ve ilerleme kuvvetinden (F_f) oluşur (Denklem 2.4).

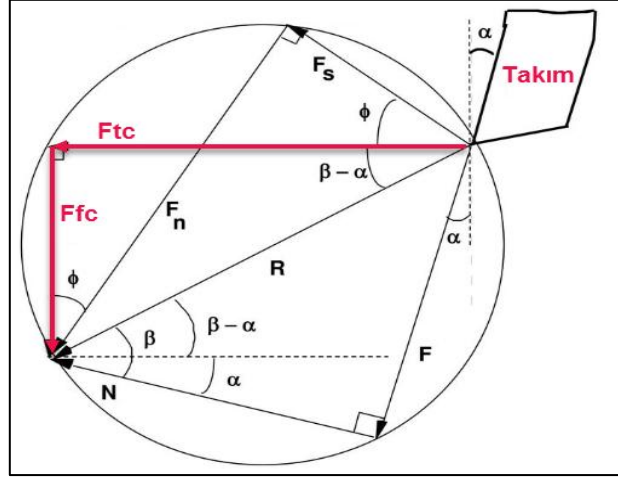
$$F_C = \sqrt{F_t^2 + F_f^2} \quad (2.4)$$



Şekil 2.17 Kesme işlemi esnasında takıma etki eden dik yönlü kuvvet bileşenleri (Altıntaş 2012).

İlerleme kuvveti (F_f), kesilmemiş talaş kalınlığı yönündeki kuvvet olurken, Teğetsel kuvvet (F_t) ise kesme hızı (V_c) yönündeki kuvvettir. Ancak, Şekil 2.17’de verilen tüm kuvvetlerin doğrudan ölçülemeyeceği vurgulanmalıdır. Aslında, yalnızca takıma etki eden F_t ve F_f kuvvetleri doğrudan ve dinamometre vasıtasıyla ölçülür. Diğer kuvvetler talaşa etki eden kuvvetlerdir ve Şekil 2.18’deki geometrik ilişkiden faydalanılarak hesaplanabilmektedir. Bunun için de Merchant diyagramından faydalanılır (Şekil 2.18). Kayma kuvveti (F_s) kesme düzleminde meydana gelen kuvvettir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Altıntaş 2012):

$$F_s = F_c \cos(\phi_c + \beta - \alpha_r) \quad (2.5)$$



Şekil 2.18 Merchant kuvvet diyagramı. (Altıntaş 2012).

Yukarıda verilen F_s denklemini kullanılarak F_c kuvveti hesaplanabilmektedir (Denklem 2.6).

$$F_c = \frac{F_s}{\cos(\phi_c + \beta - \alpha_r)} = T_s b h \frac{1}{\sin \phi_c \cos(\phi_c + \beta - \alpha_r)} \quad (2.6)$$

Teğetsel ve ilerleme kuvvetleri bileşke kesme kuvveti cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Denklem 2.7 ve 2.8).

$$F_{tc} = F_c \cos(\beta_a - \alpha_r) \quad (2.7)$$

$$F_{fc} = F_c \sin(\beta_a - \alpha_r) \quad (2.8)$$

Burada verilen β_a sürtünme açısını, α_r de talaş açısını ifade etmektedir. Denklem 2.9 ve 2.10'de yerine yazıldığında;

$$F_{tc} = b h \left[T_s \frac{\cos(\beta_a - \alpha_r)}{\sin \phi_c \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} \right] \quad (2.9)$$

$$F_{fc} = b h \left[T_s \frac{\sin(\beta_a - \alpha_r)}{\sin \phi_c \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} \right] \quad (2.10)$$

Denklem 2.11 ve 2.12 elde edilir. Talaş kaldırma işlemi spesifik kesme basıncı ve teğetsel kesme kuvveti katsayısı (K_{tc}) ve ilerleme kesme kuvveti katsayısı (K_{fc}) aşağıdaki gibi verilmektedir (Denklem 2.11 ve 2.12).

$$K_{tc}[N/mm^2] = T_s \frac{\cos(\beta_a - \alpha_r)}{\sin\phi_c \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} \quad (2.11)$$

$$K_{fc}[N/mm^2] = T_s \frac{\sin(\beta_a - \alpha_r)}{\sin\phi_c \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} \quad (2.12)$$

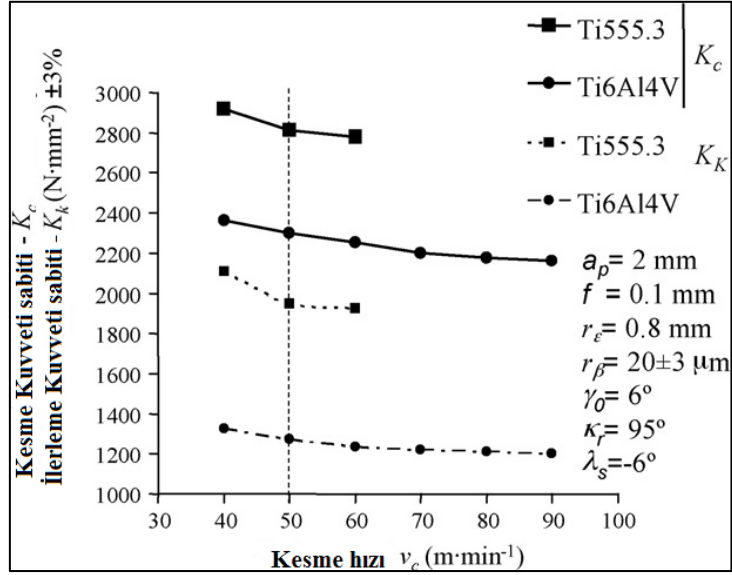
Bu kesme kuvveti katsayılarının elde edilmesi için sürtünme açısının, akma kayma gerilmesinin (τ_s) ve kayma açısının bilinmesi gerekir. Oysaki bu büyüklüklerin her biri de analitik olarak hesaplanabilse de tam olarak gerçeği yansıtmamaktadır. Akma kayma gerilmesi, talaş kalınlığının ve şekil değiştirme sertleşmesinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle kesme kuvvetleri, talaş derinliğine, talaş kalınlığına ve kesme kuvveti katsayılarına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir (Denklem 2.13 ve 2.14).

$$F_t = K_{tc}bh + K_{te}b \quad (2.13)$$

$$F_f = K_{fc}bh + K_{fe}b \quad (2.14)$$

Denklem 2.13 ve 2.14'de verilen K_{te} ve K_{fe} kenar kuvveti katsayılarını ifade eder ve kaymaya etkileri yoktur.

Kesme kuvveti katsayıları özellikle malzemeye ve takım geometrisine bağlı olarak değişebilmektedir. Bununla birlikte kesme hızı ve talaş derinliğine de bağlı olarak da değiştiği literatürde ifade edilmektedir. Arrozola vd. (2009), yapmış olduğu çalışmada Ti6Al4V ve Ti555.3 tornalanması kesme kuvveti (K_c) ve ilerleme kuvvet (K_k) katsayılarının kesme hızı ile değiştiğini ifade etmişlerdir. Bunun nedeninin, artan kesme sıcaklığı ile malzemede meydana gelen termal yumuşamanın kesme işlemini kolaylaştırmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Titanyum alaşımlarının kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvet sabitlerinde meydana gelen değişim (Arrozola *et al.* 2009).

2.4.2 Nümerik Modelleme

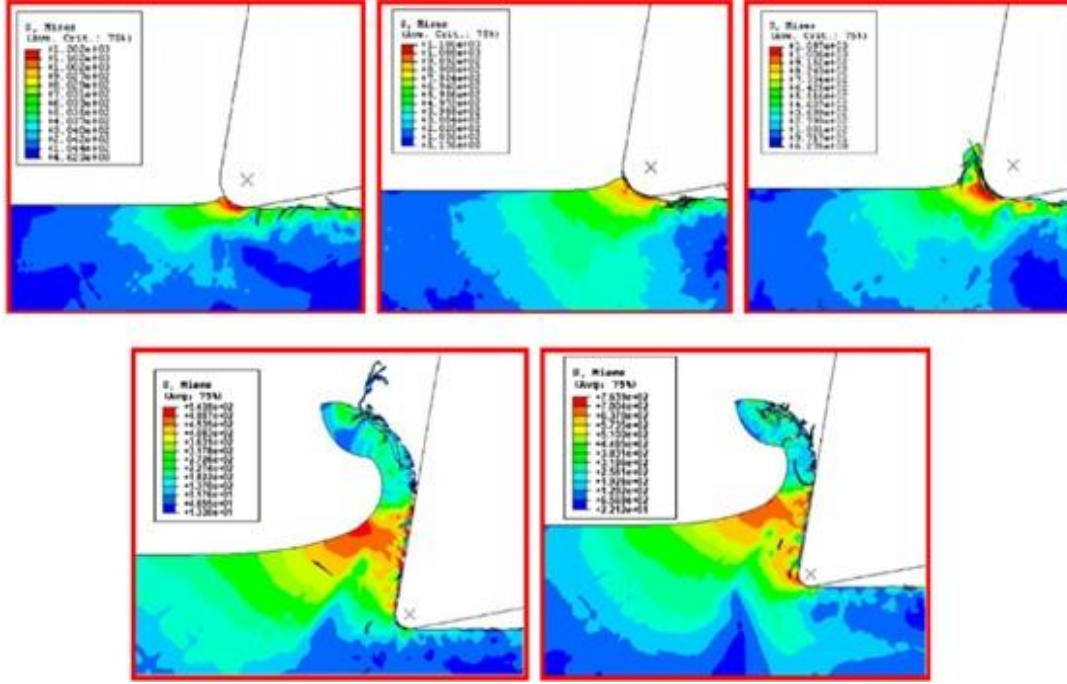
Nümerik modelleme fiziksel olarak var olan bir sistemin matematiksel olarak denklemler yardımıyla açıklanması işlemidir. Nümerik modelleme ve simülasyon, ilgili araştırmaları genişletmek ve deneye destek sağlamak için kullanılabilir. Nümerik modelleme de en yaygın kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. (Arrozola *et al.* 2013).

Sonlu elemanlar metodu ile analiz işlemi yapan birçok yazılım programı mevcut olup bunlardan bir tanesi de Deform 2D/3D yazılımıdır. Scientific Forming Technologies Corporation (Bilimsel Şekillendirme Teknolojileri Şirketi)'nin geliştirdiği DEFORM yazılımı, tasarımcılara metal şekillendirme, kesme ve kaynaklama dahil birçok imalat analiz edebilme imkanı sağlamaktadır. Son yıllarda geliştirilen ara yüzü ve malzeme kütüphanesi sayesinde sıcak ve soğuk şekillendirme işlemlerinin yanı sıra talaşlı imalat işlemleri de modellenebilmektedir. Deform yazılımı özellikle non-lineer problemlerin modellenmesi için tasarlandığından, literatürde yer alan farklı malzeme modellerini de içinde barındırmaktadır.

Talaşlı imalatta kesme esnasında gerek takımda meydana gelen ve gerekse kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklık ve gerilme dağılımlarını, deneysel olarak ölçmek neredeyse imkansızdır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi, kesme bölgesinde daha detaylı bilgi edinmenin en pratik yoludur. Fakat unutulmamalıdır ki sonlu elemanlar yöntemi bir nümerik çözümlene yöntemidir ve yaklaşık sonuç vermektedir. Dolayısıyla sınır şartları ve özellikle de malzemenin termo-mekanik özellikleri büyük önem arz etmektedir.

Talaşlı imalat işlemlerinin modellenmesinde sıklıkla kullanılan Deform yazılımı mikro tornalama işlemlerinde ve kenar geometrisinin etkisinin modellenmesinde de kullanılmaktadır.

Çalışmalarda çoğunlukla Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmakla beraber, son yıllarda modifiye edilmiş Johnson-Cook malzeme modeli tercih edilmektedir (Calamaz, *et al.* 2008). Bu modelin en önemli özelliği, kesme esnasında iş parçasında meydana gelen termal yumuşamayı dikkate almasıdır. Jagadesh ve Samuel (2015), tarafından yapılan bir çalışmada, Ti6Al4V alaşımının mikro şartlarda tornalanması sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışmada TiN kaplanmış takım kullanılarak 3 boyutlu modelleme yapılmıştır. Farklı kesme hızları ve ilerleme değerleri için yapılan çalışmada takım talaş ara yüzeyindeki sıcaklık tahmin edilmeye çalışılmıştır. Lai vd. (2008), tarafından yapılan bir çalışmada, Johnson-Cook malzeme modelini revize etmişler ve mikro kesme için yeni bir malzeme modeli geliştirmişlerdir (Şekil 2.20). Çalışma sonunda elde edilen modelleme sonuçları ile deneysel veriler oldukça benzerlik arz etmiştir.

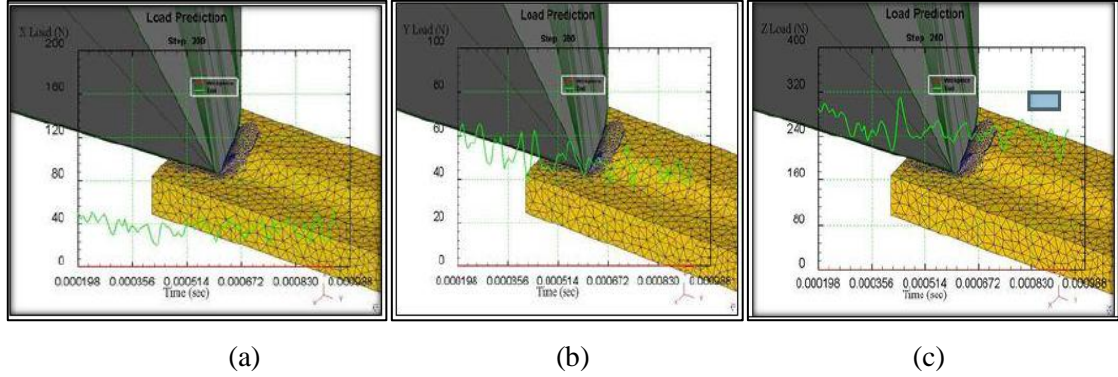


Şekil 2.20 Talaş oluşumu ve boyut etkisinin modelleme yöntemiyle gösterimi (Lai *et al.* 2008).

Rao ve Vijayaraghavan (2012), tarafından yapılan bir çalışmada da mikro kesme koşullarında kenar radyüsünün etkisi modellenmiştir. Çalışmada Abaqus yazılımı kullanılmış olup, takım talaş ara yüzündeki eşdeğer gerilmelerin değişimi elde edilmiştir. Seramik bir kesici takımın mikro şartlardaki aşınma davranışının modellenmesinin yapıldığı bir çalışmada, Hu vd. (2015), tarafından yapılmıştır. Çalışmada, H13 çelik malzemesi kullanılmış ve 1 µm ebatlarında seramik kesicinin aşınma davranışı modellenmiştir. Araştırmada mikro kesmenin üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir ve simülasyonun ve malzeme özelliklerinin mikro-kesme koşulları uygulanmıştır.

Ceretti vd. (2000), Deform-3D yazılımını kullanarak uyguladıkları tornalama işlemini Lagrangian formülasyonu yardımıyla üç boyutlu bir FEM kodu geliştirmiştir. Sonuçların meydana çıkan kuvvetler ve talaş geometrisinin deneysel değerlerle benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Umbrello (2008), üç farklı Johnson-Cook yapıcı malzeme modeli parametresini kullanarak Ti6Al4V'nin sonlu elemanlar yöntemiyle, dik kesme işlemini için Deform-3D programıyla simule etmiştir. Kosaraju vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada Deform-3D yazılımı PVD kaplı Tungsten karbür kesici takımla, Ti6Al4V'nin tornalanması sırasındaki kesme kuvvetlerindeki değişimi analiz

etmek için kullanılmıştır. Farklı ilerleme, hız ve talaş açısı değerlerinde kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Kesme işleminde, kesme kuvvetlerinde dalgalanmanın bitmesiyle, kesme kuvvetlerinin ortalaması alınarak kuvvet hesapları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve hata oranı hesaplanmıştır (Şekil 2.21).



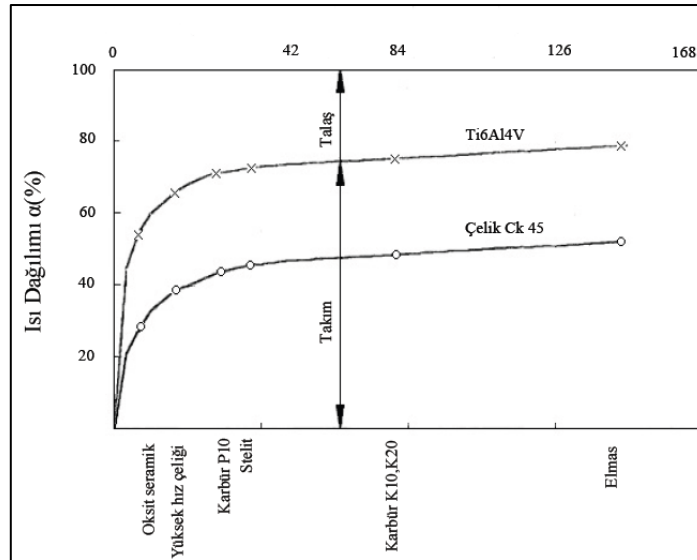
Şekil 2.21 Kesme kuvvetleri tahmini a) F_x , b) F_y , c) F_z (Kosaraju *et al.* 2013).

2.5 Ti6Al4V Alaşımının Mikro Ölçekte İşlenebilirliği

Titanyum, atom numarası 22 olan gümüş renkli parlak bir elementtir. İlk olarak William Gregor tarafından 1791 yılında bulunmuş olup, kimyasal olarak “Ti” ile gösterilmektedir. Doğada sıklıkla bulunabilen Titanyum elementi her ne kadar saf (alaşımsız) halde korozyona karşı yüksek direnç gösterse de, saf halde kullanılmamaktadır. Titanyum, mekanik özellikleri arttırmak için genellikle Alüminyum (Al) ve Vanadyum (V) gibi az miktarda başka elementlerle alaşım haline getirilip kullanılmaktadır (Yang and Liu 1990).

Titanyum alaşımları 3 grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar α , β , α ve β stabilizatörleridir. Bu alaşım grubu α ve β stabilizatörlerinin ilavesini içerir ve α ve β fazlarının karışımlarından oluşan mikro tabakalara sahiptir. α ve β alaşımları en yaygın kullanılan alaşımlardır. En yaygın α ve β alaşımı Ti6Al4V alaşımıdır. Bu fazdaki alaşımlar yüksek mukavemet seviyelerine kadar ısıtılabilir. Bu nedenle 350 ile 400°C arasındaki yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımlı uygulamalar için kullanılabilir (Ezugwu and Wang 1997).

Titanyum ve alaşımları yapısal olarak iyi korozyon direnci, yüksek mukavemet düşük ağırlık oranı gibi malzeme özelliklerine sahip olmasına rağmen genel olarak işlenebilme kabiliyeti zayıf olarak kabul edilmektedir. Titanyum ve alaşımları kesici takım malzemelerinin çoğuyla yüksek kimyasal tepkimeye girme eğilimindedir. Ayrıca, bu alaşımların düşük ısıl iletkenliğinden ötürü, işleme sırasında ortaya çıkan ısı, işleme bölgesinin yakınında birikmiş olarak kalmaktadır. Sonuç olarak, bu meydana çıkan ısıdan dolayı kesici takımda aşınmalar meydana gelebilmektedir. Şekil 2.22’de görüldüğü üzere Ti6Al4V alaşımının işlenirken düşük iletkenliğinden dolayı, kullanılan takımlar üzerinde meydana gelen ısı birikiminin (yaklaşık %80), Ck45 Çeliğinin işlenmesinde kullanılan takımlara oranla daha fazla olduğu görülmektedir (Ezugwu and Wang 1997). Bir başka çalışmada ise Fang vd. (2012), Inconel 718 ve Ti6Al4V alaşımının yüksek hızda işlenmesinde, Ti6Al4V ile karşılaştırıldığında, Inconel 718 daha yüksek (neredeyse iki katı) bir termal iletkenliğe sahip olduğu, kesici takımının daha az ısıya maruz kaldığını belirtilmiştir. Çalışmada Ti6Al4V’a kıyasla, Inconel 718’in işlenmesinde takım kenarı aşınmasının daha düşük olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.22 Ti6Al4V ve Ck45 Çeliğinin İşlenmesi Sırasında Ortaya Çıkan Isıl İletkenliklerinin Takıma ve Talaşa Dağılımı (λn (J / mm s °C) (Ezugwu and Wang 1997).

Ek olarak, Ti6Al4V alaşımlarının düşük elastikiye modülü ve yüksek sıcaklıkta yüksek mukavemeti, talaş kaldırma işlemini daha da zorlaştırmaktadır. Ancak diğer titanyum alaşımlarıyla kıyaslandığında daha iyi mekanik özellikleri ve işlenebilme kabiliyetinin

iyi olmasından ötürü Ti6Al4V alaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Ti6Al4V alaşımı özellikle havacılık ve denizcilikte kullanılan ekipmanlarda ağırlık azaltma için çok yönlü performansı sunmakla kalmayıp doku ve kemiklerle olan uyumu sayesinde Ti6Al4V biyomedikal sektöründe birçok alanda uygulanmaktadır. Resim 2.4’de diş implant malzemesi olarak biyomedikal ve dental alanında da sıklıkla kullanılan Ti6Al4V hipo-alerjenik olup nikel içermemektedir ve kemik yapısıyla en iyi uyum gösteren alaşımlardan bir tanesidir (Upase *et al.* 2016).



Resim 2.4 Dental alanda yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V diş implant malzemesi (İnt.Kyn.4, İnt.Kyn.5).

Titanyumun işlenebilme kabiliyetinin düşük olmasından dolayı, takımın düşük kesme hızında ve ilerleme de gerçekleştirilen mikro tornalama işlemi sonucu yüzeydeki tabakada sertleşmenin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kesme parametreleri iyi seçilmediği takdirde daha da kötüleşmektedir. Bunun sonucunda mikro sertlik değerinin, daha düşük kesme hızlarında gözle görülür bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir (Singaravel and Selvaraj 2015). Titanyuma kıyasla daha iyi özelliklere sahip titanyuma alaşımları özellikle Ti6Al4V tornalanmasında takım burun ve köşe radyüsünde bağlı olarak ilerleme oranı ve pasif kuvvetler hassasiyet göstermektedir (Cedergren vd. 2013). Bu sebeple Titanyum alaşımları işlenmesi zor malzeme olarak kabul görmektedir.

Arrazola vd. (2009), yapmış olduğu bir çalışmada, Ti6Al4V alaşımı ile Ti555.3 alaşımlarının işlenebilmesini araştırmışlardır. Aynı kesme şartları altında Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliğinin daha iyi olduğu belirtilmiştir. Kahles vd. (1985),

titanyumun işlenmesinde takım ömrünün artan ilerleme miktarında azaldığını belirterek, titanyumun işlenmesinde kesme derinliği ve ilerleme miktarını sabit tutarak (ilerleme 0,1 mm, kesme derinliği 2 mm) kesme hız değerlerinde değişikliğe giderek titanyum ve alaşımlarının işlenebilirliğini araştırmışlardır.

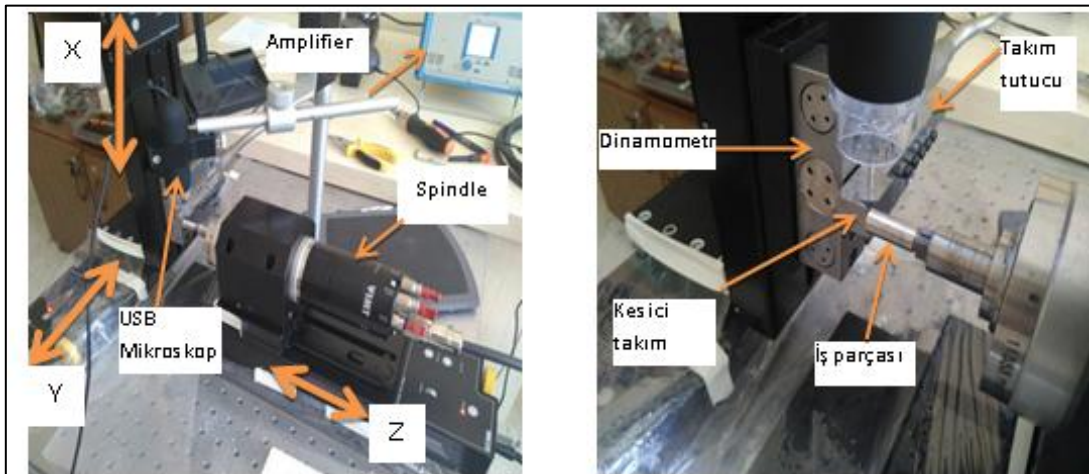
Kesme parametrelerinin ve takım tezgâhlarının optimize edilmesiyle son yıllarda titanyum alaşımlarının işlenebilmesinden kaynaklanan zorlukların üstesinden gelebilmek için yeni takımlar üretilmiştir. Titanyum alaşımlarının işleme performansı, kesici takım malzemesinin ve kaplamalı takımlar seçilerek performansı artırılabilir (Corduan *et al.* 2003).

Aslantaş vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada Ti6Al4V alaşımının mikro frezeleme işleminde bir hibrid sistem tasarlamışlardır. Tasarlanan hibrid sistem kesme işlemi için hem soğutma hem de yağlama görevini üstlenmiş olup, çalışmada Ti6Al4V alaşımının mikro frezelemesinde, hibrid sistemin kesme performansı üzerindeki etkisi, takım aşınması ve çapak oluşumu üzerindeki etkileri araştırmışlardır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Deney Düzeneği

Mekanistik modelin oluşturulması amacıyla farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kesme testlerinin yapılması gerekir. Bunun için yüksek devirlere çıkabilen ve yüksek hassasiyete sahip bir deney düzeneğinin kullanılması şarttır. Bu çalışmada da mikro kesme testleri için özel tasarlanmış ve maksimum 60000 dev/dk ulaşabilen bir deney düzeneği kullanılmıştır (Resim 3.1). Deney düzeneği bir yatay işleme merkezine benzemekte olup, iş parçası spindle (torna mili)'a bağlanmışdır. Kullanılan spindle, IMT marka ve kendisine ait bir sürücü vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Eksen hareketleri için mikro step motorlarla desteklenmiş lineer kızaklar (Thorlabs) kullanılmıştır. Kızakların maksimum hareket mesafesi 150mm olup, hassasiyeti ise 0,1 μm 'dir. Spindle Z eksenini hareketini sağlayan kızak üzerine monte edilmiştir. Kesici takım mini dinamometre üzerine, dinamometre de X eksenini ifade eden kızak üzerine sabitlenmiştir. Talaş derinliği Y eksenini vasıtasıyla verilmektedir. Yanaşma açısının 90° olması ve dinamometreye bağlanabilmesi adına, takım tutucu özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Deneylerde kesme bölgesinin daha net olarak gözlemlenebilmesi adına 50-800 arasında büyütme yapabilen bir USB mikroskop kullanılmıştır. Tüm sistem titreşimsiz optik bir tabla üzerine montaj edilmiştir.



Resim 3.1 Mikro tornalama deneylerinde kullanılan sistemin genel görünümü.

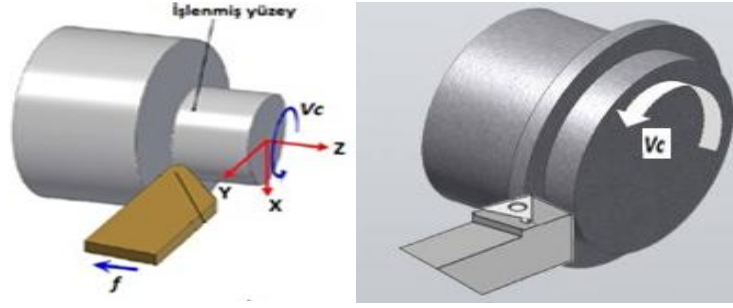
3.2 Kesme Parametreleri

Çalışmada talaş derinliği ve ilerleme değerleri kesici takımın kenar radyüsü ve burun radyüsü dikkate alınarak seçilmiştir. Kesme hızı, kesme derinliği ve ilerlemenin etkisinin görülebilmesi adına farklı kesme parametreleri tercih edilmiştir. Kullanılan kesme parametreleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Deney düzeneği için belirlenen kesme parametreleri.

Kesme Parametreleri		
Kesme Hızı (m/dk)	Talaş Derinliği (μm)	İlerleme (mm/dev)
150	40	0,00050
	40	0,00100
300	65	0,00250
	100	0,00500
500	100	0,01000
	40	0,02000

Oluşturulacak olan mekanistik modelde kesme hızının ve talaş derinliğinin de etkisini gözlemlemek adına üç farklı kesme hızı ve üç farklı talaş derinliği alınmıştır. Minimum talaş derinliği kesici takımın burun radyüsüne eşit olarak alınmış, diğer talaş derinlikleri daha büyük seçilmiştir. İlerlemeye bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimini elde etmek adına oldukça geniş bir yelpazede ilerleme değeri seçilmiştir. Kesici takım kenar radyüsü $7,25 \mu\text{m}$ olarak ölçüldüğünden, bu değer altında ve üstünde ilerleme değerleri alınmıştır. Minimum ilerleme değeri $0,5 \mu\text{m}$ iken, maksimum ilerleme değeri $20 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiş olup, çıktı olarak her üç yöndeki kesme kuvvetleri elde edilmiştir (Şekil 3.2). Takımdaki aşınma miktarını göz ardı edebilme adına her bir deneyde ya yeni bir takım kullanılmış ya da kesme mesafesi kısa tutulmuştur.



Şekil 3.1 Kesme kuvvetleri yönü ve ortogonal kesme işlemi.

3.3 Kesici Takım ve İş Parçası

Bu çalışmada, özellikle biyomedikal sektöründe ve diş implantlarında sıklıkla kullanılan ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle birçok çalışmaya konu olan Ti6Al4V alaşımı, iş parçası olarak seçilmiştir. Ti6Al4V alaşımın ait kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.3’te verilmektedir.

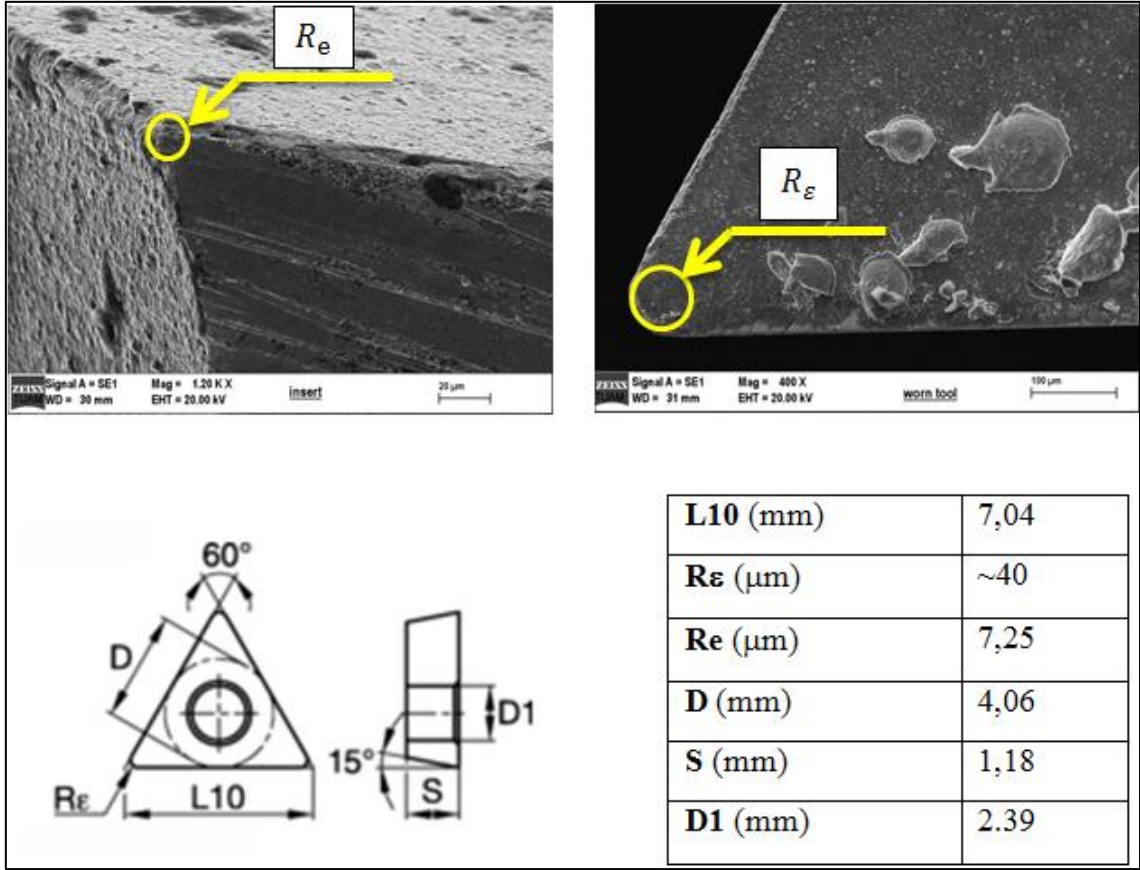
Çizelge 3.2 Ti6Al4V alaşımın ait kimyasal kompozisyonu (%), (İnt. Kyn. 6).

	Al	V	C	N	O	H	Fe	Y	Diğer	Ti
Min	5,5	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Mak	6,75	4,5	0,08	0,05	0,2	0,0125	0,3	0,005	0,4	Kalan

Çizelge 3.3 Ti6Al4V alaşımına ait mekanik özellikler (Rather *et al.* 2004).

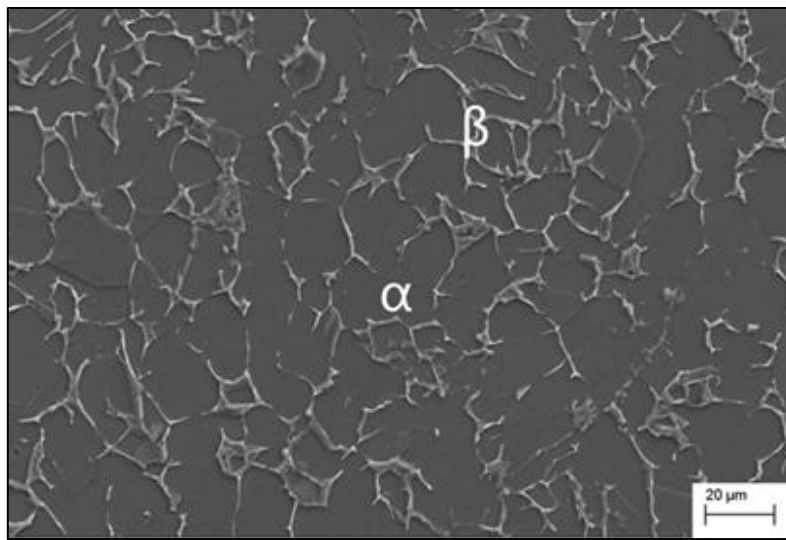
Esneklik katsayısı (GPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Yüzde uzama (%)
120	830	900	18

Deney düzeneğinde kesme işleminde kullanılmak üzere, Kennametal firmasının TDHB07T12S0 KCU 10 kodlu AlTiN kaplı kesici takımı tedarik edilmiştir. Takımın gövdesinden yapılan kesme işlemi sonrasında kenar radyüsü elektron mikroskop vasıtasıyla ölçülmüştür. Buna göre, kesici takımın kenar radyüsü ortalama 7,25 μm ve kaplama kalınlığı ise yaklaşık 4 μm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kesici takıma ait burun radyüsü ise ortalama 40 μm olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.1’de kesici takıma ait geometrik parametreler verilmektedir.



Şekil 3.2 Kesici takım özellikleri.

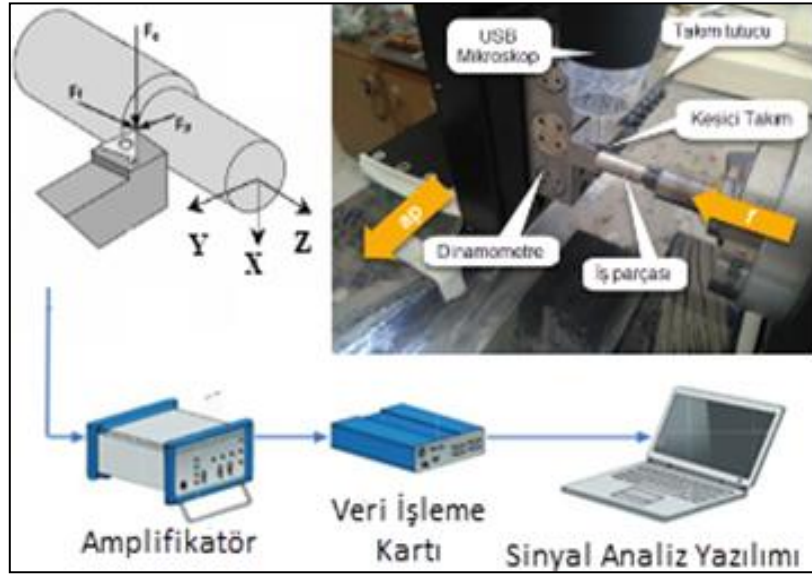
Deneylerde kullanılan Ti6Al4V alaşımı alfa ve beta alaşımıdır. Resim 3.2'de alaşıma ait mikro yapı görülmektedir.



Resim 3.2 Alfa-beta Ti6Al4V alaşımının mikro yapısı (Zhao *et al.* 2018).

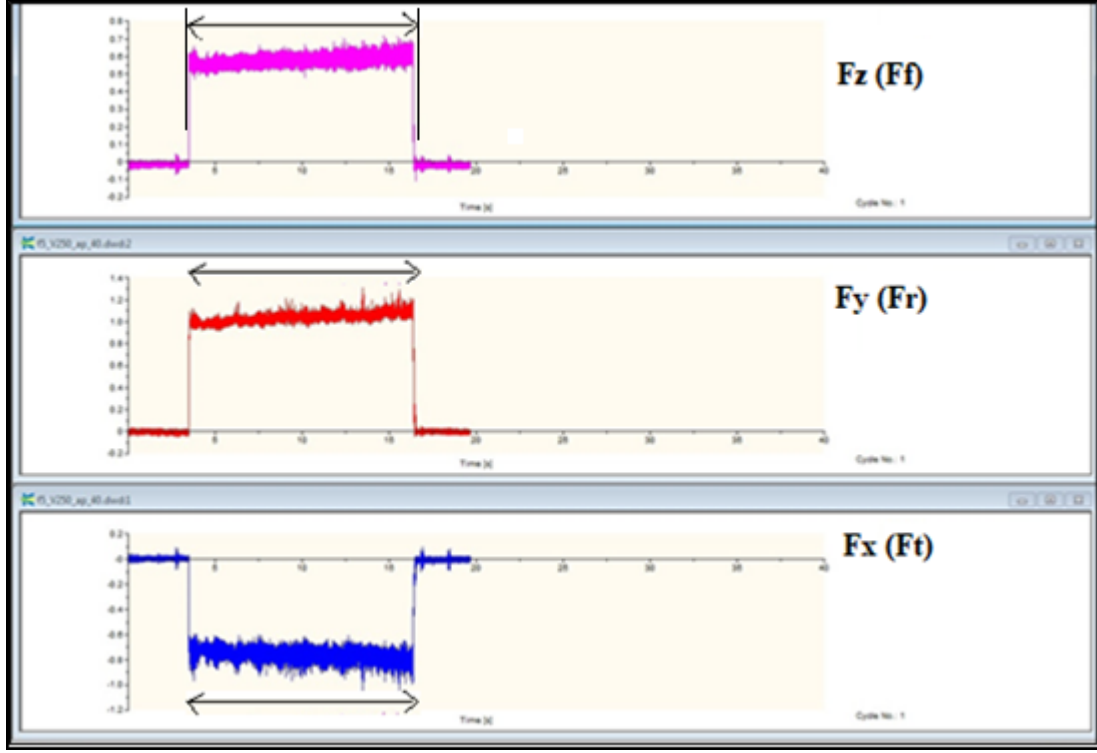
3.4 Dinamometre ve Data Alma Sistemi

Kesme kuvvetlerinin hesaplanması, tornalama işlemlerinde kritik öneme sahiptir. Çünkü kesme kuvvetleri; yüzey pürüzlülüğüne, takım aşınmasına, takımda meydana gelen titreşimlere vb. gibi kesme performansına etki eden faktörlerden bir tanesidir. Bu çalışma boyunca meydana gelen kuvvetler Kistler 9119AA1 mini dinamometre ile ölçülmüştür (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Dinamometre ve data alma sistemi.

Kesici takımın üzerinden sensör yardımıyla dinamometre yardımıyla ölçülen kuvvet değerleri amplifikatör yardımıyla veri işleme kartı vasıtasıyla sinyal analiz yazılım sistemi üzerinden aktarılmıştır. Elde edilen kuvvetler bilgisayar programından elde edilmiş olup, kuvvetlerin ortalaması hesaplanıp not edilmiştir. F_z kuvveti ilerleme kuvveti, F_y pasif kuvveti ve F_x yönündeki kuvvet de teğetsel kuvvet olarak ölçülmüştür (Şekil 3.4).

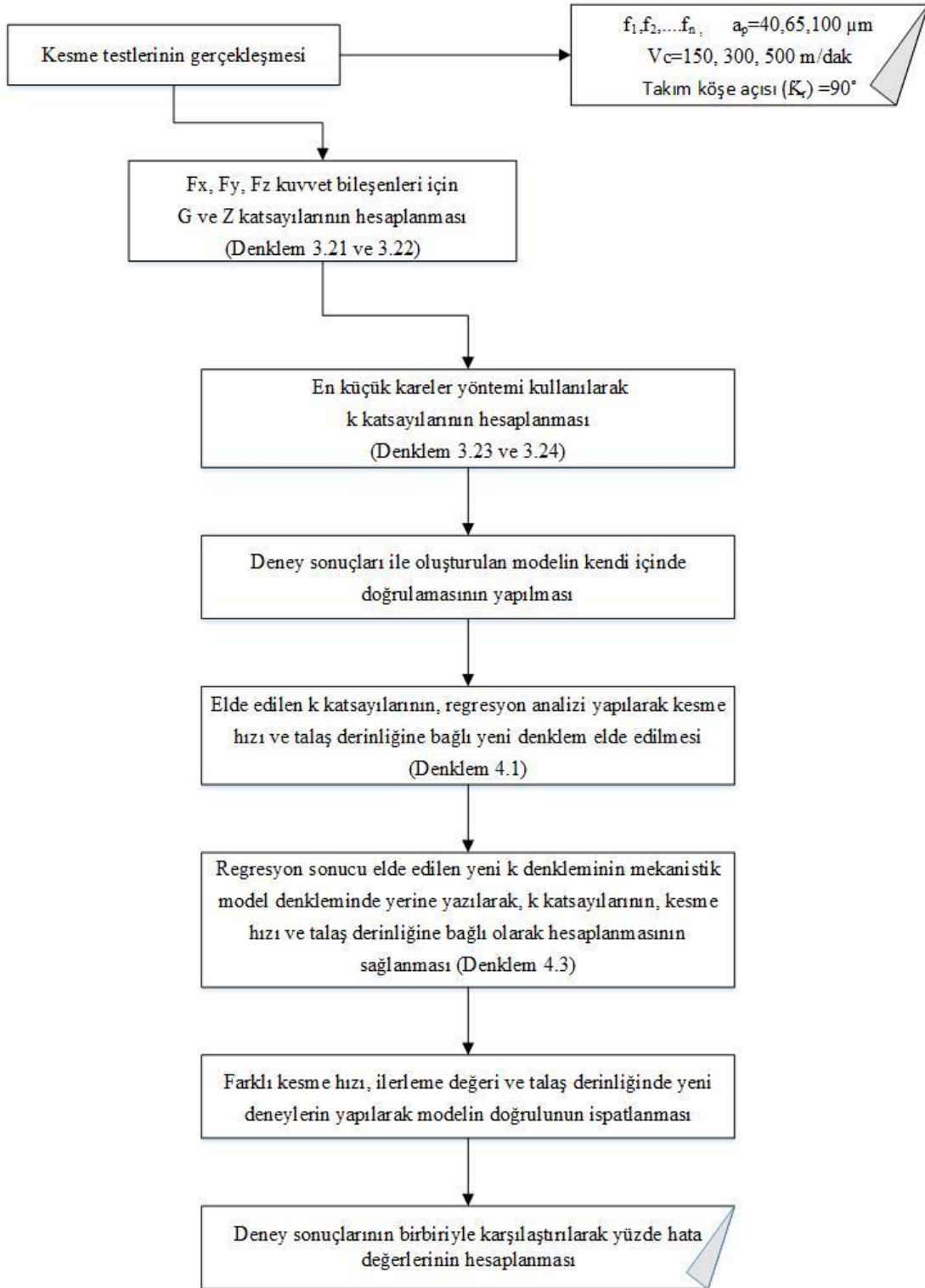


Şekil 3.4 Ölçülen kuvvetlerin ortalama değerinin elde edilmesi.

3.5 Mekanistik Modelleme

Çalışma da farklı parametreler için kesme deneyleri gerçekleştirilmiş olup, dinamometreden ölçülen kesme kuvvetleri veri alma sistemi vasıtasıyla not edilmiştir. Her bir ilerleme değerine karşılık gelen ortalama F_t , F_f ve F_r kuvvetleri excel programına aktarılmış ve grafiğe dökülmüştür. Grafikte her bir ilerleme değerine karşılık gelen kesme kuvvetleri için eğilim çizgisi, çizgi grafiği oluşturulmuş olup, oluşturulan grafiğin formülü program yardımıyla hesaplanmıştır.

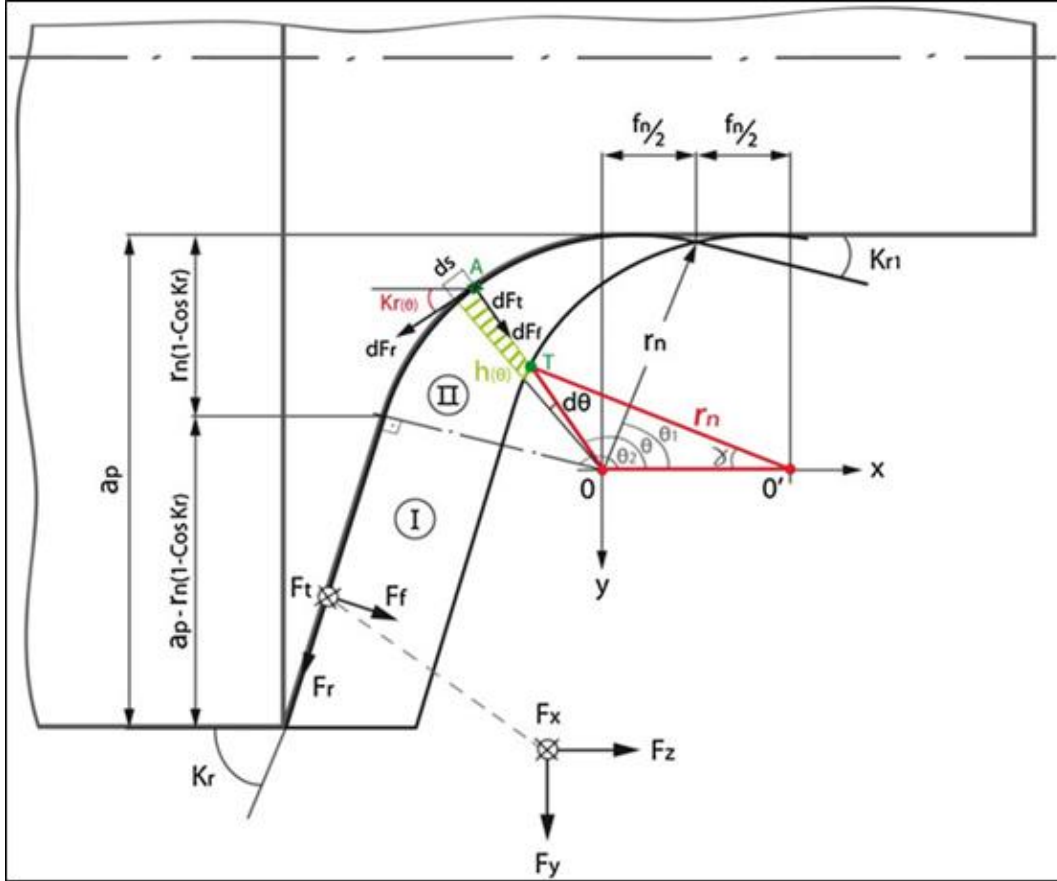
Kesme işlemleri tamamlandıktan sonra kesme işleminin doğrulanması amacıyla bir mekanistik model oluşturulmuştur. Deneyde elde edilen kesme kuvvetleri mekanistik modelde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Mekanistik modellemenin oluşturulmasında izlenen yöntem.

Fernández-Abia vd. (2015) tarafından geliştirilen mekanistik model, deneysel çalışmamıza uyarlanıp ilgili formüllerin güncellenmesiyle bir mekanistik model oluşturulmuştur. Geliştirilen bu mekanistik modellemede, kesici takım ucu yarıçapı göz

önüne alındığında kesme alanı için iki bölge tanımlanmaktadır. Kesme işlemi sırasında Şekil 3.6'da görüldüğü üzere I. bölgede kaldırılan talaş kesme düzlemi boyunca düz bir hat çizerek ilerlerken, II. bölgede talaş takım burun yarıçapı ve eğim açısına bağlı olarak eğimli bir hat çizmektedir (Fernández-Abia *et al.* 2015).



Şekil 3.6 Mikro tornalama işleminde deforme olmamış talaş kesiti ve kesme parametreleri (Fernández-Abia *et al.* 2015).

Kesme alanında I. bölgede, kaldırılan talaş kalınlığı hep aynı kalmaktadır. Bu bölgede kaldırılan talaş miktarı ilerleme miktarına ve eğim açısına bağlıdır. I. bölgedeki kaldırılan talaş (Şekil 3.7) için talaş uzunluğu (S_I) ve talaş alanı (A_I) aşağıda belirtilen Formül 3.1, 3.2 ve 3.3'teki denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır. Formülde k_r eğim açısını belirtmektedir. Deneysel kesme işleminde k_r değeri 90° olarak seçilmiştir. Denklem 3.1'de k_r değeri yerine yazıldığında, S değeri talaş derinliğine (a_p) eşit çıkarken, h değeri de ilerleme f_n değerine eşit çıkmıştır (Fernández-Abia *et al.* 2015).

Çizelge 3.4 Ti6Al4V alaşımını kaldırılan talaşa ait S_I ve A_I değerleri.

a_p (mm)	f_n (mm/dev)	$S_I=(a_p - r_n)$ (mm)	$A_I = (f_n \times (a_p - r_n))$ (mm ²)
0,04	0,0005	0,00000	0,0000000
	0,0010	0,00000	0,0000000
	0,0025	0,00000	0,0000000
	0,0050	0,00000	0,0000000
	0,0100	0,00000	0,0000000
	0,0200	0,00000	0,0000000
	0,065	0,0005	0,02500
0,0010		0,02500	0,0000250
0,0025		0,02500	0,0000625
0,0050		0,02500	0,0001250
0,0100		0,02500	0,0002500
0,0200		0,02500	0,0005000
0,100		0,0005	0,06000
	0,0010	0,06000	0,0000600
	0,0025	0,06000	0,0001500
	0,0050	0,06000	0,0003000
	0,0100	0,06000	0,0006000
	0,0200	0,06000	0,0012000

İkinci bölgede talaş kalınlığı ve eğim açısı sürekli olarak değişim göstermektedir. Bu alanın hesaplanabilmesi için bölgenin integral alan hesabıyla hesaplanması gerekmektedir (Denklem 3.6). Deforme olmamış talaş uzunluğu, S_{II} ve talaş alanı, A_{II} ise Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 ile hesaplanmaktadır (Fernández-Abia *et al.* 2015).

$$S_{II} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} dS = \int_{\theta_1}^{\theta_2} r_n d\theta \quad (3.6)$$

$$A_{II} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} h(\theta) dS = \int_{\theta_1}^{\theta_2} h(\theta) r_n d\theta \quad (3.7)$$

S ve A değerleri θ açısına bağlı olarak değişim göstermesinden dolayı θ_1 ve θ_2 açı

değerleri Denklem 3.8 ve 3.9 ile bulunabilmektedir (Fernández-Abia *et al.* 2015).

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{f_n}{2r_n} \quad (3.8)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} + k_r \quad (3.9)$$

Altı farklı ilerleme değerine karşılık gelen θ_1 değeri denklem 3.8 kullanılarak hesaplanmış olup, θ_2 , değeri k_r açısı değerinin 90° olmasından dolayı 180° olacaktır. Hesaplanan θ_1 ve θ_2 değeri Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 Deneyle elde edilen θ_1 ve θ_2 değerleri

İlerleme (f_n) (mm)	Burun yarıçapı (r_n) (mm)	θ_1	θ_2
0,0005	0,04	89,641689	180
0,0010		89,283575	180
0,0025		88,209009	180
0,0050		86,416476	180
0,0100		82,819051	180
0,0200		75,522311	180

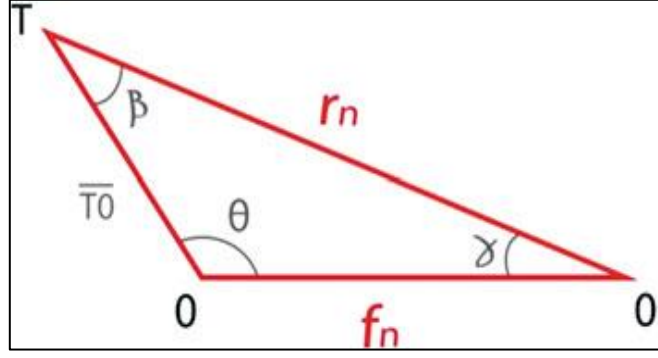
Talaş kalınlığı $h(\theta)$, ikinci bölge için diferansiyel bir değişim göstermekte ve aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Denklem 3.10).

$$h(\theta) = \overline{AT} = r_n - \overline{TO} \quad (3.10)$$

Denklemden \overline{TO} değeri Kosinüs teoreminden yola çıkarak denklem 3.11 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\overline{TO} = \sqrt{f_n^2 + r_n^2 - 2f_n r_n \cos \gamma} \quad (3.11)$$

Bulunan \overline{TO} değeri kullanılarak Sinüs teoremi yardımıyla (Şekil 3.8) Denklem 3.13’te γ açısı değeri elde edilir (Fernández-Abia *et al.* 2015).



Şekil 3.8 Sinüs teoremi yardımıyla γ açısı değerinin hesaplanması (Fernández-Abia *et al.* 2015).

$$\frac{f_n}{\sin\beta} = \frac{r_n}{\sin\theta} \Rightarrow \frac{f_n}{\sin(\pi-\theta-\gamma)} = \frac{r_n}{\sin\theta} \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'den γ açısı çekildiğinde;

$$\gamma = \pi - \theta - \sin^{-1}\left(\frac{f_n}{r_n} \sin\theta\right) \quad (3.13)$$

Denklem 3.13 elde edilmiş olur. Denklem 3.11 ve Denklem 3.13, Denklem 3.10'da yerine yazıldığında talaş kalınlığı, θ açısının bir fonksiyonu olarak Denklem 3.14'ü elde etmek mümkündür.

$$h(\theta) = r_n - \sqrt{f_n^2 + r_n^2 - 2f_n r_n \cos[\pi - \theta - \sin^{-1}\left(\frac{f_n}{r_n} \sin(\theta)\right)]} \quad (3.14)$$

Kesme kuvvetleri, Altıntaş (2007)'in belirtmiş olduğu ilerleme, teğetsel ve eksenel kuvvet ifadelerinde talaş kesiti, A ve yay uzunluğu S değeri Denklem 3.15, 3.16 ve 3.17'deki gibi yazıldığında, talaş derinliği (a_p) ve ilerleme değeri, f_n ve yanaşma açısı k_r 'ye bağlı olarak F_t , F_f ve F_r elde edilmiş olur (Fernández-Abia *et al.* 2015).

$$F_t = F_{tc} + F_{te} = k_{tc}A + k_{te}S = k_{tc}a_p f_n + k_{te} \frac{a_p}{\sin k_r} \quad (3.15)$$

$$F_f = F_{fc} + F_{fe} = k_{fc}A + k_{fe}S = k_{fc}a_p f_n + k_{fe} \frac{a_p}{\sin k_r} \quad (3.16)$$

$$F_r = F_{rc} + F_{re} = k_{rc}A + k_{re}S = k_{rc}a_p f_n + k_{re} \frac{a_p}{\sin k_r} \quad (3.17)$$

Kesme işlemi sırasında dinamometrede üç ekseninde de kuvvet ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu üç kuvvet X-Y-Z düzleminde meydana getirdiği kuvvet bileşenleri denklem 3.18’de matris yardımıyla hesaplanmıştır. Matris formu açıldığında denklem 3.16 elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin k_r & \cos k_r \\ 0 & -\cos k_r & \sin k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_f \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$F_x = F_t \quad (3.19)$$

$$F_y = F_f \cos k_r + F_r \sin k_r \quad (3.20)$$

$$F_z = F_f \sin k_r - F_r \cos k_r \quad (3.21)$$

Denklem 3.15, 3.16 ve 3.17’de elde edilen bu kuvvetler, denklem 3.19, 3.20 ve 3.21’de yerine yazıldığında, denklem 3.22, 3.23 ve 3.24 elde edilmiştir. Takım burun yarıçapı dikkate alındığında, kaldırılan talaş bölgesi kesme düzlemini iki bölgeye ayrılmış olup I. bölge denklem 3.22, 3.23 ve 3.24 ile II. Bölge ise denklem 3.25, 3.26 ve 3.27 ile hesaplanmıştır.

$$F_{fI} = k_{fc}A_1 + k_{fe}S_1 \quad (3.22)$$

$$F_{rI} = k_{rc}A_1 + k_{re}S_1 \quad (3.23)$$

$$F_{tI} = k_{tc}A_1 + k_{te}S_1 \quad (3.24)$$

II. Bölgede eğim açısı k_r , düzenli olarak artmaktadır. Bu bölgede kuvvet bir eğim doğrultusunda değişim göstermekte olup θ açısının bir fonksiyonu olarak integral hesabıyla denklem 3.25, 3.26 ve 3.27’ de hesaplanmaktadır (Fernández-Abia *et al.* 2015).

$$F_{fII} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{fc}(\theta)h(\theta)r_n d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{fe}(\theta)r_n d\theta \quad (3.25)$$

$$F_{rII} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{rc}(\theta)h(\theta)r_n d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{re}(\theta)r_n d\theta \quad (3.26)$$

$$F_{tII} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{tc}(\theta)h(\theta)r_n d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{te}(\theta)r_n d\theta \quad (3.27)$$

Denklem 3.22, 3.23, 3.24 ve 3.25, 3.26, 3.27’de elde edilen kuvvetler toplanarak Denklem 3.28, 3.29 ve 3.30 elde edilmiştir.

$$F_f = F_{fI} + F_{fII} \quad (3.28)$$

$$F_t = F_{tI} + F_{tII} \quad (3.29)$$

$$F_r = F_{rI} + F_{rII} \quad (3.30)$$

I. ve II. bölge için X, Y ve Z düzleminde meydana gelen kuvvet bileşenleri her iki bölge için denklem 3.28, 3.29 ve 3.30’da yerine yazıldığında denklem 3.31, 3.32 ve 3.33 elde edilmiştir.

$$F_x = F_{tu} + F_{tII} \quad (3.31)$$

$$F_z = F_{fI} \sin k_r + F_{fII} \sin k_r(\theta) - F_r \cos k_r - F_r \cos k_r(\theta) \quad (3.32)$$

$$F_y = F_{fI} \cos k_r + F_{fII} \cos k_r(\theta) + F_r \sin k_r + F_r \sin k_r(\theta) \quad (3.33)$$

F_f, F_t ve F_r kuvvetleri denklem 3.31, 3.32 ve 3.33’te I. ve II. bölgede toplam kuvvetler yazıldığında X, Y ve Z düzlemindeki toplam kuvvet bileşenleri denklem 3.34, 3.35 ve 3.36’da elde edilmiştir (Fernández-Abia *et al.* 2015).

$$F_x = k_{tc} A_I + k_{te} S_1 + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{tc}(\theta) h(\theta) r_n d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{te}(\theta) r_n d\theta \quad (3.34)$$

$$F_y = k_{fc} A_I \cos k_r + k_{fe} S_1 \cos k_r + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{fc}(\theta) h(\theta) r_n \cos k_r(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{fe}(\theta) r_n \cos k_r(\theta) d\theta + k_{rc} A_1 \sin k_r + k_{re} S_1 \sin k_r + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{rc}(\theta) h(\theta) r_n \sin k_r(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{re}(\theta) r_n \sin k_r(\theta) d\theta \quad (3.35)$$

$$F_z = k_{fc} A_I \sin k_r + k_{fe} S_1 \sin k_r + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{fc}(\theta) h(\theta) r_n \sin k_r(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{fe}(\theta) r_n \sin k_r(\theta) d\theta - k_{rc} A_1 \cos k_r - k_{re} S_1 \cos k_r - \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{rc}(\theta) h(\theta) r_n \cos k_r(\theta) d\theta - \int_{\theta_1}^{\theta_2} k_{re}(\theta) r_n \cos k_r(\theta) d\theta \quad (3.36)$$

Denklem 3.34, 3.35 ve 3.36'nin basitleştirilerek yeniden yazılmış şekli Denklem 3.37, 3.38 ve 3.39'da verilmektedir. Burada verilen G ve Z ifadeleri rastgele verilmiş isimlendirmelerdir. Fakat G ve Z ifadelerinde kullanılan alt indisler ilgili kuvvet katsayısının yine ilgili yöndeki çarpanını ifade etmektedir. Örneğin, G_{fy} ifadesi ilerleme kuvveti kenar katsayısının y yönündeki çarpanını ifade etmektedir.

$$F_{xexp} = k_{te}G_{tz} + k_{tc}Z_{tz} \quad (3.37)$$

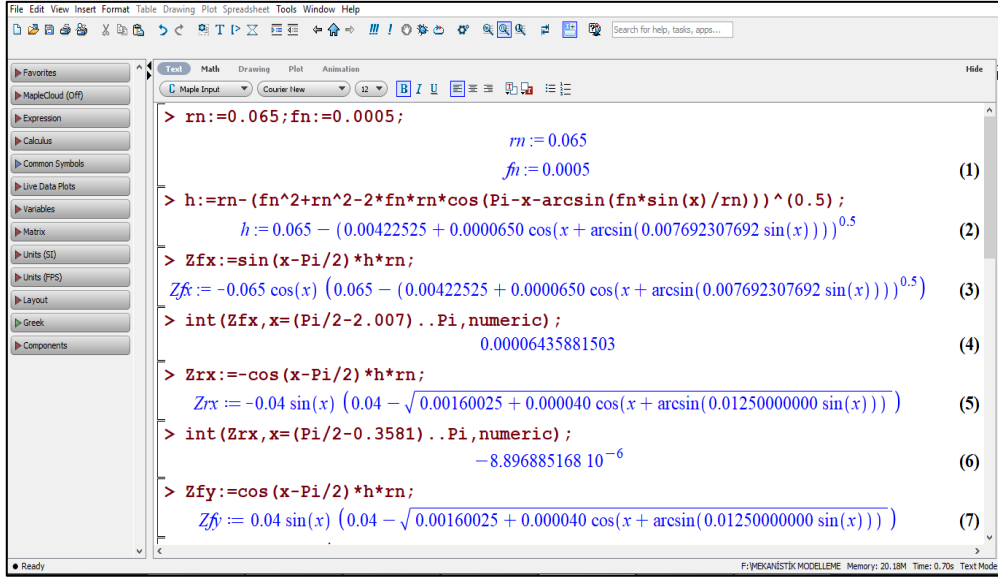
$$F_{yexp} = k_{fe}G_{fy} + k_{re}G_{ry} + k_{fc}Z_{fy} + k_{rc}Z_{ry} \quad (3.38)$$

$$F_{zexp} = k_{fe}G_{fx} + k_{re}G_{rx} + k_{fc}Z_{fx} + k_{rc}Z_{rx} \quad (3.39)$$

Ayrıca G ve Z katsayılarının açık hali denklem 3.40'da verilmektedir (Fernández-Abia *et al.* 2015).

$$\begin{aligned} G_{fz} &= \sin k_r S_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) r_n d\theta; \\ G_{rz} &= -\cos k_r S_I - \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) r_n d\theta; \\ G_{fy} &= \cos k_r S_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) r_n d\theta; \\ G_{ry} &= \sin k_r S_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) r_n d\theta; \\ Z_{fz} &= \sin k_r A_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) h(\theta) r_n d\theta; \\ Z_{rz} &= -\cos k_r A_I - \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) h(\theta) r_n d\theta; \\ Z_{fy} &= \cos k_r A_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) h(\theta) r_n d\theta; \\ Z_{ry} &= \sin k_r A_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) h(\theta) r_n d\theta; \\ G_{tx} &= S_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} r_n d\theta; \\ Z_{tx} &= A_I + \int_{\theta_1}^{\theta_2} h(\theta) r_n d\theta \end{aligned} \quad (3.40)$$

Denklem 3.40'da verilen G ve Z çarpanları ilgili kesme şartları için Mapple programı (Şekil 3.10) kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9 Maple programı yardımıyla G ve Z katsayılarının hesaplanması.

Elde edilen G ve Z çarpanları Denklem 3.41 ve 3.42’de yerine yazılarak en küçük kareler yöntemi uygulanmış ve kesme kuvvet katsayı değerleri (k_{fe} , k_{re} , k_{fc} , k_{te} , k_{tc}) katsayıları elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} F_{x1} \\ \vdots \\ F_{xm} \end{matrix} \right\} \\ \left\{ \begin{matrix} F_{y1} \\ \vdots \\ F_{ym} \end{matrix} \right\} \end{bmatrix}_{deney} = \begin{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} G_{fz1} & G_{rz1} & Z_{fz1} & Z_{rz1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{fzm} & G_{rzm} & Z_{fzm} & Z_{rzm} \\ G_{fz1} & G_{ry1} & Z_{fz1} & Z_{ry1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{fzm} & G_{rym} & Z_{fzm} & Z_{rym} \end{matrix} \right\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_{fe} \\ k_{re} \\ k_{fc} \\ k_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} F_{z1} \\ \vdots \\ F_{zm} \end{matrix} \right\} \end{bmatrix}_{deney} = \begin{bmatrix} G_{tx1} & Z_{tx1} \\ \vdots & \vdots \\ G_{txm} & Z_{txm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} k_{te} \\ k_{tc} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

4. BULGULAR

4.1 Kesme Kuvvetlerinin Analizi

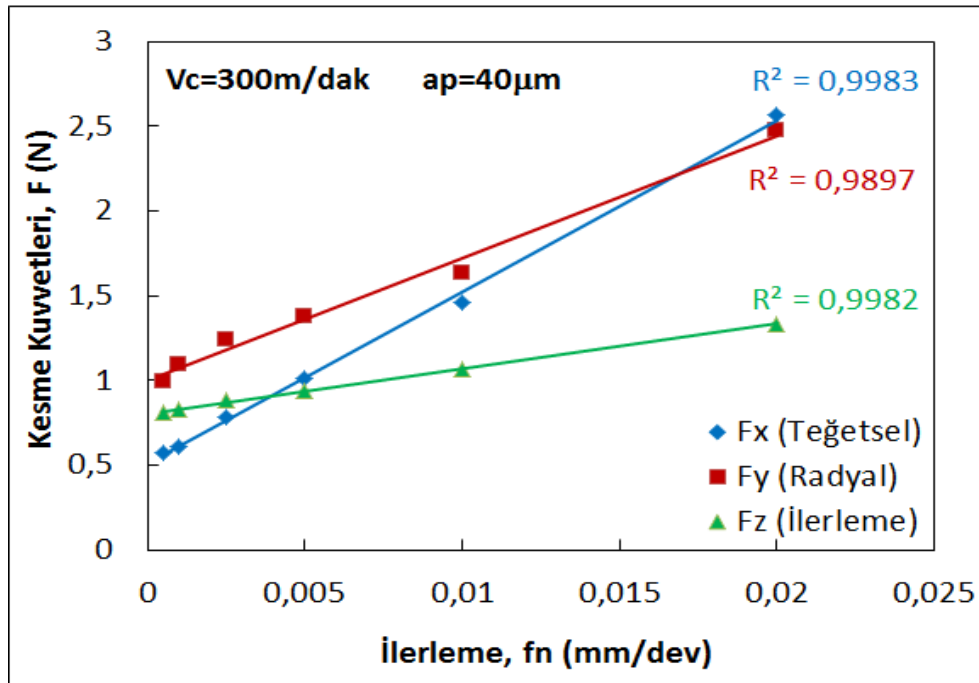
Çalışmanın bu bölümünde mikro tornalama esnasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin kesme parametreleri ile değişimi verilmiştir. Geleneksel tornalama işleminde, maksimum kesme kuvveti genellikle teğetsel kesme kuvvetidir (F_t). Bunu ilerleme kuvveti (F_f) ve pasif kuvvet (F_r) izler. Fakat gerek takım geometrisinin değişimi (özellikle negatif talaş açısının kullanılması) ve gerekse kesme yöntemi bu sıralamanın değişmesine neden olabilmektedir. Özellikle kaldırılan talaş derinliği ve ilerleme değerinin takım geometrisi ile kıyaslanabilecek ölçekte olması bu sıralamayı etkilemektedir. Mikro tornalama işleminde de kullanılan kesici takıma ait burun ve kenar radyüsü sadece kesme kuvvetlerini değil aynı zamanda işlenen yüzey kalitesini de etkilemektedir. Kuvvetlerin değişimi üç alt başlıkta ele alınmıştır. Bunlar; ilerleme hızının etkisi, talaş derinliğinin etkisi ve kesme hızının etkisidir. İlerleme değeri kesici takım kenar radyüsü ile ilişkilendirilirken, talaş derinliği de takıma ait burun radyüsü ile ilişkilendirilmiştir.

4.1.1 İlerlemenin Etkisi

Kesme kuvvetleri değerini etkileyen en önemli faktörler, ilerleme ve talaş derinliği olarak gösterilebilir. Kaldırılan talaş kesiti, ilerleme hızı ve talaş derinliğine bağlıdır. Bu parametrelerin herhangi birinin artması talaş kesitinin artmasına neden olur. Artan talaş kesiti de kesme kuvvetlerinin lineer olarak artmasına neden olmaktadır (Sürücüler 2010).

Çalışmada altı farklı ilerleme değeri için (0,005 mm/dev, 0,01 mm/dev, 0,025 mm/dev, 0,05 mm/dev, 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev) kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen ilerleme değerleri takım üretici firmanın önerdiği değerlerin hem altında hem üstünde yer almaktadır. Deneylerde kesme hızı ve talaş derinliği sabit tutulmuş olup, ilerlemenin kesme kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sabit talaş derinliği ve kesme hızıyla yapılan mikro kesme işleminde, ilerleme değerindeki

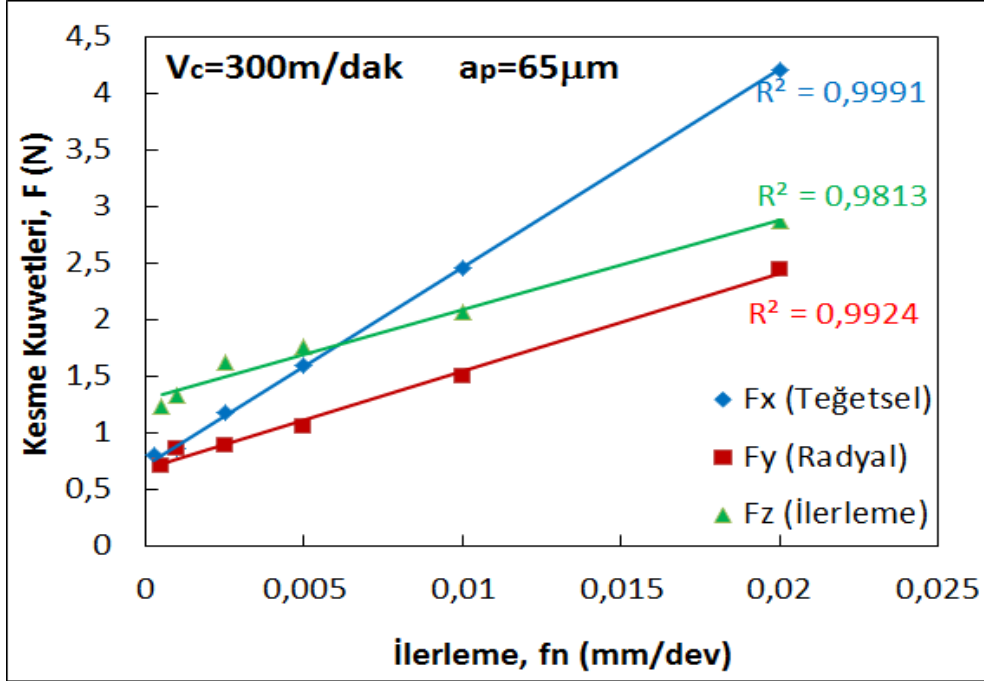
değişime bağlı olarak her üç yöndeki kesme kuvveti değerlerinin değişimi verilmektedir. Geleneksel tornalamada olduğu gibi, mikro tornalama işleminde de artan ilerleme değerine bağlı olarak, kesme kuvvetleri de lineer olarak artış göstermektedir. (Umbert 2007). Şekil 3.7’de verilen koordinat sistemi göz önüne alındığında, F_x (Teğetsel) ve F_z (İlerleme) kuvvetleri artan ilerleme değerleri ile oldukça lineer bir davranış sergilemiş olup, R^2 hata değerleri oldukça küçüktür. Şekil 4.1’de talaş derinliğinin burun radyüsüne eşit olması nedeniyle y eksenini üzerindeki kuvvet bileşeni radyal kuvvet, x eksenini üzerindeki teğetsel kuvvete yakın bir değer elde edilmiştir. Ayrıca $5 \mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme değerinden daha küçük ilerleme değerlerinde (kesici takımın kenar radyüsünden küçük) F_z kuvvetinin F_x ’den daha büyük çıkmasının sebebi, kazınma ağırlıklı bir kesme işleminin meydana gelmesidir. Bununla birlikte $f_n > 16 \mu\text{m}$ için F_x kuvvetinin, maksimum kesme kuvveti olduğu da Şekil 4.1’den görülmektedir.



Şekil 4.1 $V_c=300 \text{ m/dak}$, $a_p=40 \mu\text{m}$ için F_x , F_y , ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri.

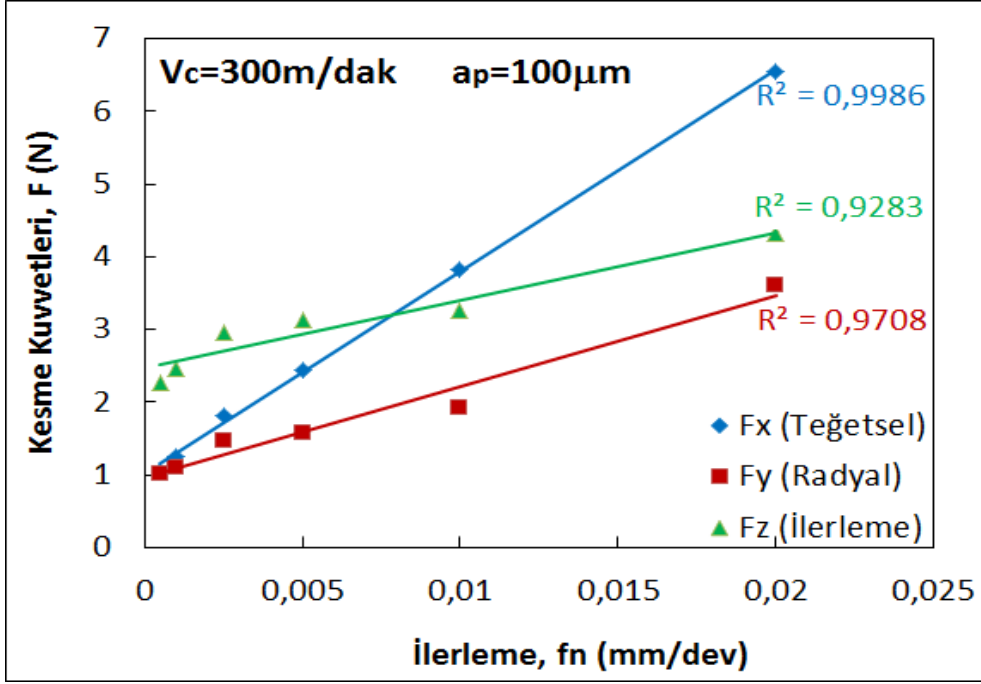
Şekil 4.2’de ise takım burun radyüsünden daha büyük bir talaş derinliği kullanılarak, farklı ilerleme değerleri için kesme deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 4.2’den de görüleceği üzere artan ilerleme değeri ile birlikte kesme kuvvetlerinin lineer artmaktadır. Ayrıca Şekil 4.1’de elde edilen kuvvetlere nazaran kesme kuvveti değerlerinin daha büyük olduğu da net olarak görülmektedir. Talaş derinliğinin burun

radiusünden daha büyük olması durumunda, radyal kuvvetin diğer kuvvetlerden daha küçük oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca kesici takım kenar radius değerinden büyük ilerleme değeri ile yapılan kesme işleminde, teğetsel kuvvetin maksimum kuvvet olduğu da Şekil 4.2'den çıkarılabilecek diğer bir sonuç.



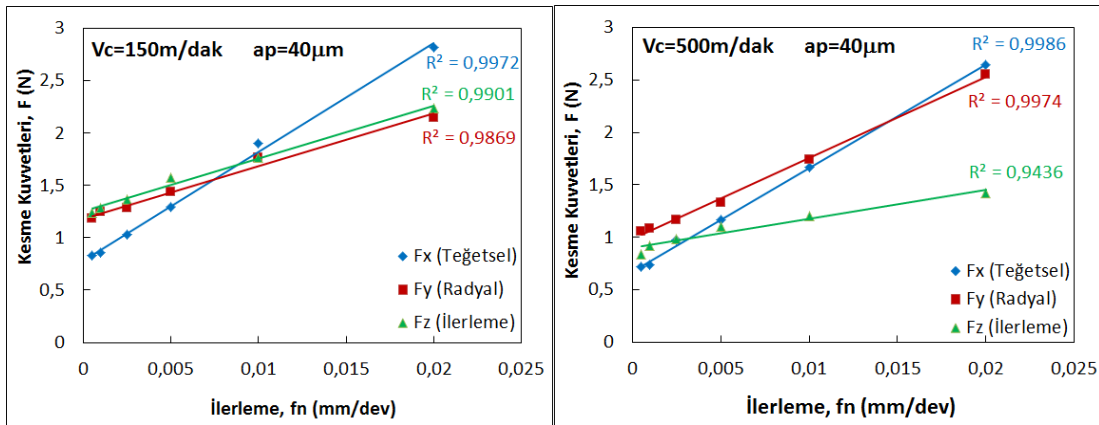
Şekil 4.2 $V_c=300$ m/dak, $a_p=65$ μ m için F_x , F_y , ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri.

Şekil 4.3'te de talaş derinliğinin 100 μ m olduğu kesme şartında ilerleme değerlerine bağlı olarak her üç kesme kuvvetinin değişimi verilmektedir. Şekil 4.2 ve 4.3 beraber değerlendirildiğinde, burun radiusünden daha büyük olan talaş derinliklerinde kesme kuvvetlerinin benzer bir seyir izlediği sonucu çıkarılabilmektedir. Şekil 4.3'ten de görüldüğü üzere, radyal kesme kuvvetinin minimum ve takım kenar radiusünden büyük ilerleme değerlerinde, teğetsel kuvvet maksimum kesme kuvveti olarak meydana gelmektedir.



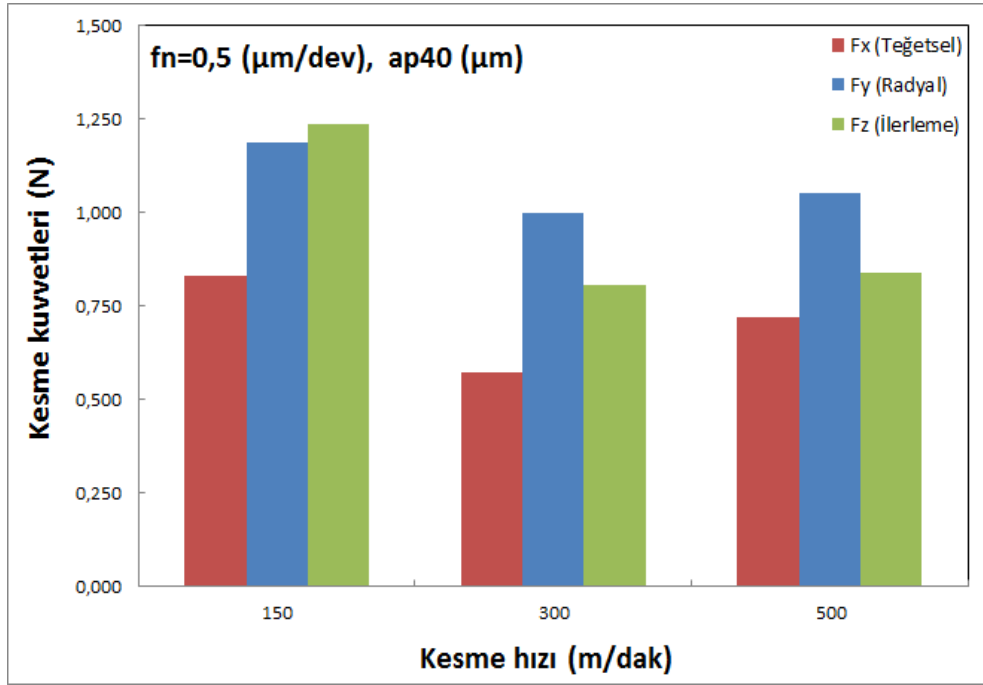
Şekil 4.3 $V_c=300\text{ m/dak}$, $a_p=100\ \mu\text{m}$ için F_x , F_y ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri.

Kesme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini ortaya koymak ve oluşturulan mekanistik modele dâhil etmek için 150 ve 500 m/dak için de farklı ilerleme değerlerindeki kesme kuvvetlerinin değişimi elde edilmiştir. Her üç kesme kuvvetinin değişimi Şekil 4.4'te verilmektedir. $V_c=150\text{m/dak}$ için radyal kuvvet ile ilerleme kuvveti çok benzer bir seyir izlemiştir. Oysaki 500 m/dak da radyal kesme kuvvetinin ilerleme kuvvetinden daha büyük olduğu ve teğetsel kesme kuvvetine benzer bir davranış sergilediği dikkati çekmektedir.



Şekil 4.4 $V_c=150$ ve 500 m/dak için farklı ilerleme değerlerine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.

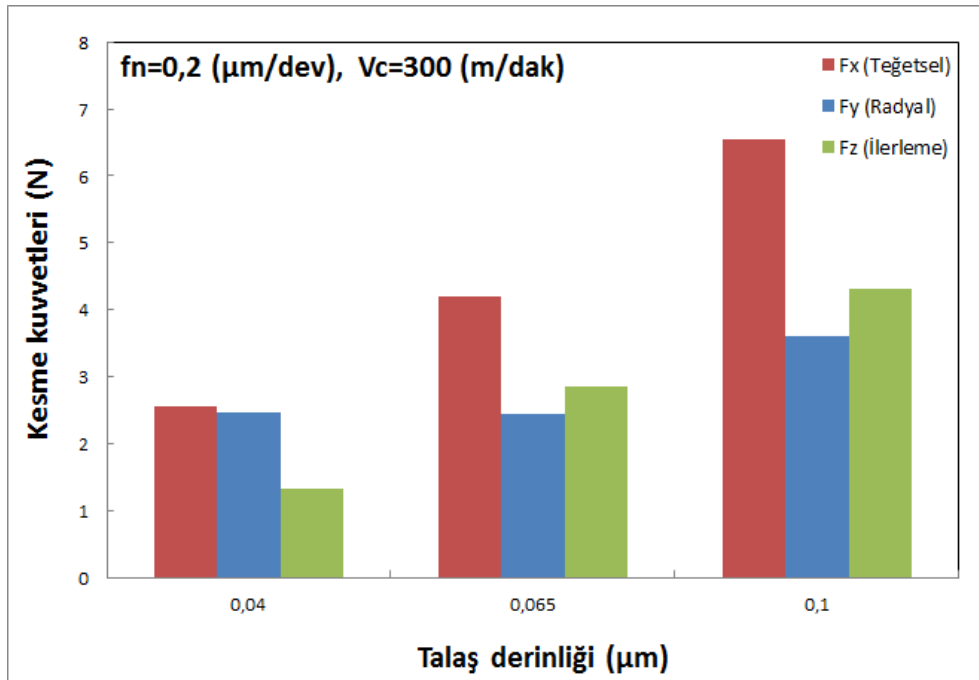
Genellikle artan kesme hızı ile kesme kuvvetinin bir miktar düşmesi beklenir (Aksu 2008). Şekil 4.5 te sabit ilerleme ve talaş derinliğinde kesme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi verilmiştir. Artan kesme hızına bağlı olarak, kesme kuvvetleri bir miktar azalsa da, bu azalma çokta dikkat çekici bir oranda değildir. Literatürde yapılan çalışmalarda göz önünde bulundurulduğunda, talaş derinliğinin kesme kenar yarıçapına eşit olduğu ve kesme hızının artmasıyla malzemede oluşmaya başlayan deformasyon sertleşmesi nedeni ile kuvvetlerin yüksek çıktığı görülmektedir. Kesme hızının 300 m/dak seçildiği kesme şartlarında, malzemede oluşan termal yumuşamaya bağlı olarak, kuvvetlerde önemli miktarlarda bir düşme meydana gelmektedir. Kesme hızı 500 m/dak değerinde ise talaş derinliğinin de etkisiyle malzemede başlayan deformasyon sertleşmesi ve titanyum alaşımının termal iletkenliğinin zayıf olmasından dolayı kesme kuvvetleri bir miktar artma göstermiştir (Jagadesh ve Samuel, 2014).



Şekil 4.5 Farklı kesme hızlarında ve $f_n=0,5 \mu\text{m/dev}$, $a_p=40 \mu\text{m}$ için F_x , F_y , ve F_z düzleminde ölçülen kesme kuvvetleri.

4.1.2 Talaş Derinliğinin Etkisi

Şekil 4.6’da sabit ilerleme değerinde üç farklı talaş derinliğinde kesme kuvvetlerinin değişimi verilmektedir. Mikro tornalama işleminde kesme kuvvetlerinde meydana gelen bu değişim, konvansiyonel tornalama işlemine benzerlik göstermektedir. Talaş derinliğinin mikron seviyede bile artma göstermesi talaş kesit alanının artması anlamına gelmektedir. Artan talaş kesitine bağlı olarak, talaşı malzemedan kopartabilmek için daha fazla kesme kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. Artan talaş derinliği özellikle teğetsel kuvvetin daha fazla artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte talaş derinliğinin 40 μm dan 65 μm artması ilerleme ve radyal kuvveti çok etkilemediğini söylemek mümkündür (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Sabit kesme hızı ve ilerleme değerinde talaş derinliğinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi.

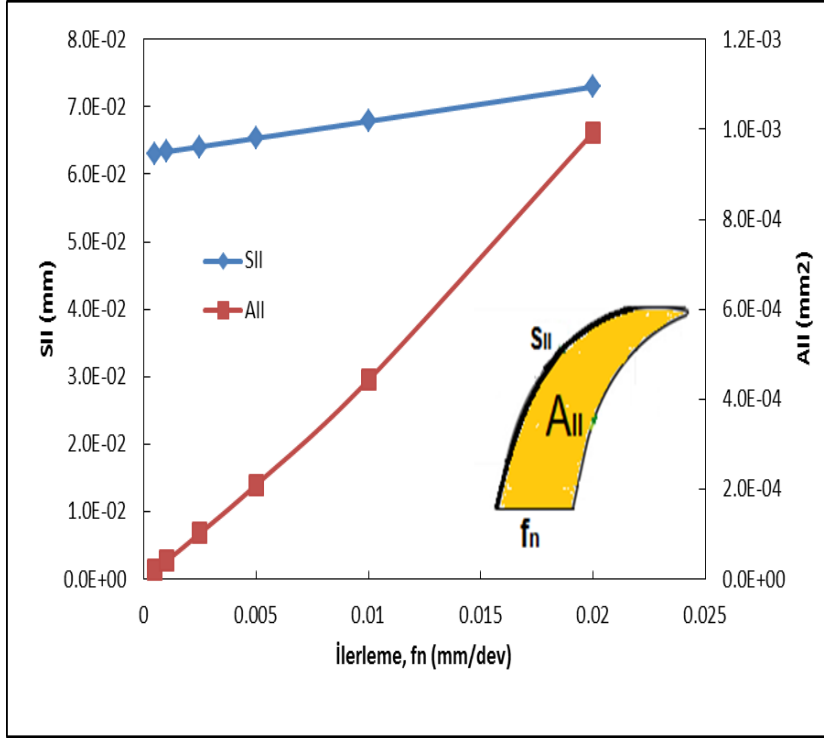
4.2 Kesme Kuvveti Katsayılarının Elde Edilmesi

Mikro tornalama işleminde, kesici takım burun radyüsünün de dikkate alındığı, mekanistik model için Bölüm 4.1 de elde edilen kesme kuvveti değerleri dikkate alınmıştır. Tornalama işlemlerinde yanaşma açısı $\kappa_r=90^\circ$ olduğundan, Bölüm 3.5’te

verilen S_I ve A_I değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Talaş derinliğinin burun radyüsüne eşit olduğu durumda, hem S_I hem de A_I değerleri sıfır olacaktır (bakınız Şekil 3.6). Bununla birlikte, burun radyüsü ve talaş kalınlığına bağlı S_{II} ve A_{II} değerleri de θ_1 ve θ_2 ye bağlı olarak elde edilmiştir. S_{II} ve A_{II} 'nin ilerleme miktarı ile değişimleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Artan ilerleme değerine bağlı olarak, talaş kesitinin II. Bölgesinde, hem yay uzunluğu (S_{II}) hem de talaş kesiti (A_{II}) lineer olarak artmaktadır. Kesme kuvveti katsayılarını bulmak için Denklem 3.21 ve 3.22'deki ifadelerde verilen G ve Z çarpanları ayrı ayrı hesaplanmıştır. G ve Z çarpanları kesici takımın burun radyüsüne, ilerleme değerine, yanaşma açısına ve talaş derinliğine bağlıdır. Bu sayılan dört parametre de geometrik parametredir ve kesme hızı ile ilişkili değildir. Bu nedenle kesme hızının kesme kuvveti katsayıları üzerindeki etkisini elde etmek adına, farklı kesme hızlarında da deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.2'de farklı talaş derinlikleri ve ilerleme değerleri için elde edilen G ve Z çarpanları verilmiştir.

Çizelge 4.1 Ti6Al4V alaşımını kaldırılan talaşa ait S_I ve A_I değerleri.

Talaş derinliği (mm)	İlerleme (mm/dev)	$S_I=(a_p - r_n)$ (mm)	$A_I = (f_n x (a_p - r_n))$ (mm ²)
0,04	0,0005	0,000000000	0,000000000
	0,0010	0,000000000	0,000000000
	0,0025	0,000000000	0,000000000
	0,0050	0,000000000	0,000000000
	0,0100	0,000000000	0,000000000
	0,0200	0,000000000	0,000000000
0,065	0,0005	0,025000000	0,000012500
	0,0010	0,025000000	0,000025000
	0,0025	0,025000000	0,000062500
	0,0050	0,025000000	0,000125000
	0,0100	0,025000000	0,000250000
	0,0200	0,025000000	0,000500000
0,100	0,0005	0,060000000	0,000030000
	0,0010	0,060000000	0,000060000
	0,0025	0,060000000	0,000150000
	0,0050	0,060000000	0,000300000
	0,0100	0,060000000	0,000600000
	0,0200	0,060000000	0,001200000



Şekil 4.7 İlerleme hızına bağlı olarak SII ve AII nin değişimi.

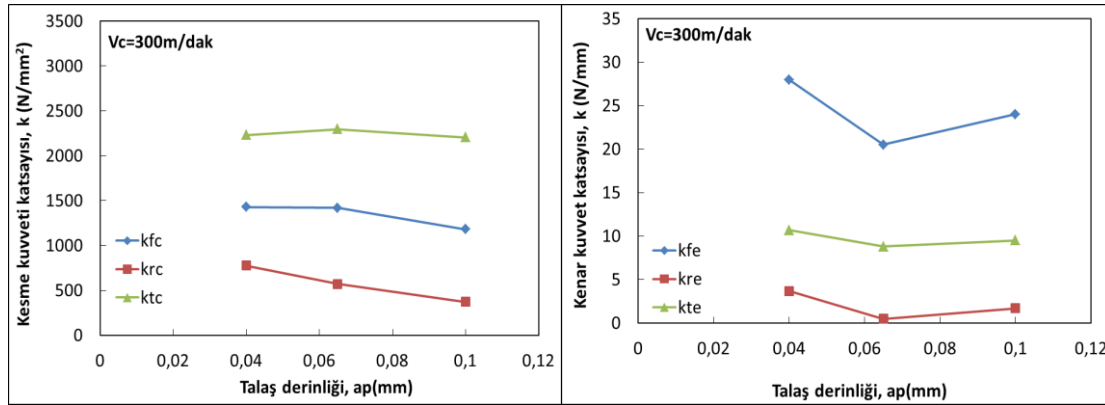
Cizelge 4.2 $V_c=300\text{m/dak}$ için farklı talaş derinliği ve ilerleme değerlerinde G ve Z değerleri.

$a_p(\text{m})$	$\theta(^{\circ})$	$f_n(\text{mm})$	Gfz	Grz	Gfy	Gry	Gtx	Zfz	Zrz	Zfy	Zry	Zfx
0,040	89,641	0,0005	0,03999	-0,04025	0,04025	0,03999	0,06308	0,00001	-0,00001	0,00001	-0,00001	0,00002
	89,283	0,001	0,03999	-0,04050	0,04050	0,03999	0,06333	0,00003	-0,00002	0,00002	-0,00003	0,00004
	88,209	0,0025	0,03998	-0,04125	0,04125	0,03998	0,06408	0,00007	-0,00005	0,00005	-0,00007	0,00010
	86,416	0,005	0,03992	-0,04250	0,04250	0,03992	0,06533	0,00016	-0,00010	0,00010	-0,00016	0,00021
	82,819	0,01	0,03968	-0,04500	0,04500	0,03968	0,06784	0,00033	-0,00023	0,00023	-0,00033	0,00044
75,522	0,02	0,03872	-0,05000	0,05000	0,03872	0,07293	0,00069	-0,00056	0,00056	-0,00069	0,00099	
0,065	89,641	0,0005	0,06499	-0,04025	0,04025	0,06499	0,08808	0,00002	-0,00001	0,00001	-0,00003	0,00003
	89,283	0,001	0,06499	-0,04050	0,04050	0,06499	0,08833	0,00005	-0,00002	0,00002	-0,00006	0,00006
	88,209	0,0025	0,06498	-0,04125	0,04125	0,06498	0,08908	0,00014	-0,00005	0,00005	-0,00017	0,00016
	86,416	0,005	0,06492	-0,04250	0,04250	0,06492	0,09033	0,00028	-0,00010	0,00018	-0,00036	0,00033
	82,819	0,01	0,06468	-0,04500	0,04500	0,06468	0,09284	0,00058	-0,00023	0,00023	-0,00080	0,00069
75,522	0,02	0,06372	-0,05000	0,05000	0,06372	0,09793	0,00119	-0,00056	0,00056	0,00197	0,00149	
0,100	89,641	0,0005	0,09999	-0,04025	0,04025	0,09999	0,12308	0,00004	-0,00001	0,00001	-0,00001	0,00005
	89,283	0,001	0,09999	-0,04050	0,04050	0,09999	0,12333	0,00009	-0,00002	0,00002	0,00002	0,00010
	88,209	0,0025	0,09998	-0,04125	0,04125	0,09998	0,12408	0,00022	-0,00005	0,00005	0,00007	0,00025
	86,416	0,005	0,09992	-0,04250	0,04250	0,09992	0,12533	0,00046	-0,00010	0,00010	0,00013	0,00051
	82,819	0,01	0,09968	-0,04500	0,04500	0,09968	0,12784	0,00093	-0,00023	0,00023	0,00026	0,00104
75,522	0,02	0,09872	-0,05000	0,05000	0,09872	0,13293	0,00189	-0,00056	0,00056	0,00050	0,00219	

Bölüm 3'te, Denklem 3.24'te verilen lineer denklem sistemi en az kareler yöntemi ile çözümlenerek k_{te} , k_{tc} , k_{fe} , k_{fc} , k_{re} ve k_{rc} katsayıları elde edilmiştir. Kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayılarının farklı kesme hızı ve talaş derinlikleriyle olan değişimini elde etmek adına farklı serilerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Çizelge 4.3'te kesme hızı sabit tutulup, talaş derinliği değiştirilmiştir. Çizelge 4.3'ün grafiksel gösterimi de Şekil 4.8'de verilmektedir.

Çizelge 4.3 $V_c=300$ mm/dak için en az kareler yöntemi ile elde edilen kesme kuvvet katsayıları.

a_p (μm)	k_{fe} (N/m)	k_{re} (N/m)	k_{fc} (N/m^2)	k_{rc} (N/m^2)	k_{te} (N/m)	k_{tc} (N/m^2)
0,040	28,0	3,7	1430	776,5	10,7	2232
0,065	20,5	0,5	1420	570,1	8,8	2296
0,100	24,0	1,7	1182	371,5	9,5	2204



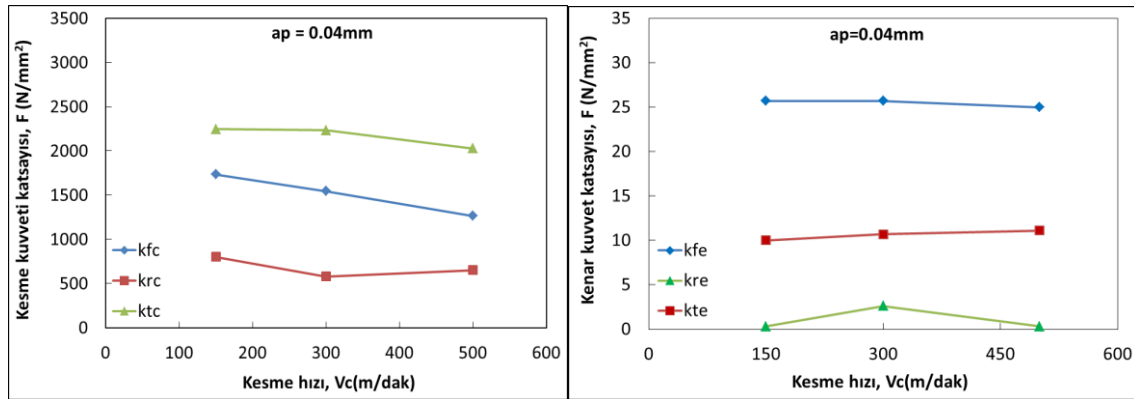
Şekil 4.8 $V_c=300$ m/dak ve farklı talaş derinliğinde kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayılarının değişimi.

Kesme kuvveti katsayı değerleri k_{fc} , k_{tc} ve k_{rc} değerleri artan kesme hızının değişmesine bağlı olarak neredeyse sabit bir seyir izlediği görülmüştür. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere, kesme kuvvet katsayı değerleri talaş derinliğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Talaş derinliğinin artmasıyla genel anlamda kesme kuvveti katsayılarında çok az da olsa bir azalma görülmektedir. Kesme kuvvet katsayı değerleri 0,04 mm'den 0,06 mm'ye kadar sabit bir seyir izlese de 0,06 mm'den sonra kuvvet katsayı değerlerinde az miktarda da olsa bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu azalma miktarı çok kayda değer miktarda olmamasına rağmen kenar kuvveti

katsayılarında ise 0,04 mm talaş derinliğinden 0,06 mm'ye ciddi bir azalma olduğu görülmektedir. Özellikle k_{fe} değeri 0,04 mm talaş derinliğinde 28 N/mm iken, 0,065 mm değerinde 20,5 N/mm olarak elde edilmiştir. Bu durum kullanılan kesici takımın kenar radyüsünün bir sonucu olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. Sabit talaş derinliğinde farklı kesme hızlarının kullanıldığı deneylerde kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayılarının değişimi de Çizelge 4.4 ve Şekil 4.9'da verilmektedir.

Çizelge 4.4 $V_c=150, 300, 500$ mm/dak ve $a_p=40$ μ m için en az kareler yöntemi ile elde edilen kesme kuvvet katsayıları.

V_c (mm/dak)	k_{fe} (N/m)	k_{re} (N/m)	k_{fc} (N/m ²)	k_{rc} (N/m ²)	k_{te} (N/m)	k_{tc} (N/m ²)
150	25,7	0,3	1735,0	800,0	10,0	2245
300	25,7	2,6	1545,6	579,4	10,7	2232
500	25,0	0,3	1263,5	652,7	11,1	2027



Şekil 4.9 $V_c=150, 300$ ve 500 m/dak ve $a_p=40$ μ m için kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayılarının değişimi.

Kesme kuvveti katsayı değerleri k_{fc} , k_{tc} ve k_{rc} değerleri artan kesme hızının değişmesine bağlı olarak neredeyse sabit bir seyir izlediği görülmüştür. Bununla birlikte Şekil 4.9'da kenar kuvveti katsayılarında ise benzer durum söz konusu olsa da k_{fe} ve k_{re} değerinin artan kesme hızına bağlı olarak bir miktar azaldığı, k_{te} değerinin ise az miktarda artma gösterdiği görülmektedir. Her üç katsayı değeri için de bu değişim miktarının çok ciddi miktarda olmadığı görülmektedir.

4.4 Mekanistik Model ile Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde Denklem 3.37, 3.38 ve 3.39'da oluşturulan mekanistik modele kesme hızı ve talaş derinliğinin etkisi de dâhil edilmek suretiyle son hali verilmiştir. G ve Z katsayıları talaş kesimine ve takım geometrisine bağlı olarak değişen katsayılardır. Çizelge 4.3 ve 4.4'de elde edilen katsayılar, Minitab yazılımı kullanılarak çoklu lineer regresyon analizine tabi tutulmuştur. Şekil 4.8 ve 4.9 da hem kesme hızına hem de talaş derinliğine bağlı olarak elde edilen k katsayılarının, V_c ve a_p 'ye bağlı lineer bir denklem ile ifade edilmesi sağlanmış oldu (Denklem 4.1).

$$\begin{aligned}k_{fc} &= 2181,5 - 5833a_p - 1,3543V_c \\k_{tc} &= 2363 + 724a_p - 0,658V_c \\k_{rc} &= 58 - 540a_p + 1,401V_c \\k_{fe} &= 26,79 - 37,5a_p - 0,0015V_c \\k_{te} &= 10,22 + 21,2a_p - 0,00324V_c \\k_{re} &= 0,78 - 8a_p + 0,00052V_c\end{aligned}\tag{4.1}$$

Daha önce Bölüm 3'te elde edilen Denklem 3.37, 3.38 ve 3.39'da belirli bir kesme şartı için deneysel kesme kuvveti verilerini kullanarak k katsayılarını elde etmek için kullanılmıştır. Denklem 3.37, 3.38 ve 3.39 aşağıdaki gibi yeniden düzenlenerek, k katsayılarının yerine Denklem 4.1'de elde edilen ifadeler Denklem 4.2'de yerine yazılmıştır. Böylece herhangi bir talaş kesiti ve takım geometrisi dikkate alınarak hesaplanan G ve Z çarpanları ile yine herhangi bir kesme hızı ve talaş derinliği için kesme kuvvetini tahmin etmek için Denklem 4.3 kullanılabilir hale getirilmiştir.

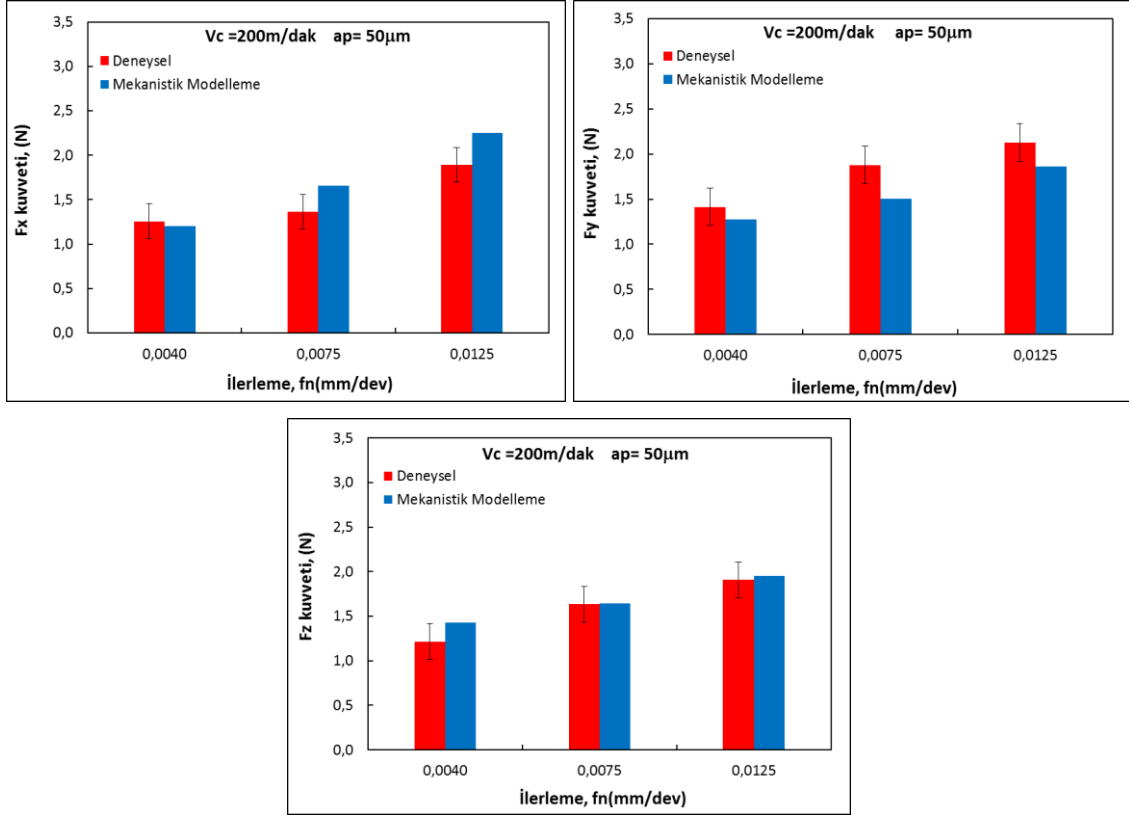
$$\begin{aligned}F_x &= k_{te}G_{tz} + k_{tc}Z_{tz} \\F_y &= k_{fe}G_{fy} + k_{re}G_{ry} + k_{fc}Z_{fy} + k_{rc}Z_{ry} \\F_z &= k_{fe}G_{fx} + k_{re}G_{rx} + k_{fc}Z_{fx} + k_{rc}Z_{rx}\end{aligned}\tag{4.2}$$

Elde edilen yeni kuvvet denkleminde farklı kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme değerleri, Denklem 4.3'te yerine yazılmış ve deney sonucu elde edilen kesme kuvvetleri ile mekanistik modelden elde edilen kuvvet değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır

(Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12). Oluşturulan modelin doğruluğunu gösterme adına birden fazla kesme işlemi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen deneysel kuvvetlerin ortalaması alınmıştır. Hesaplanan kuvvet değerleri ile formül sonucu elde edilen kuvvet değerleri hemen hemen birbirine yakın değerler gösterse de bazı durumlarda hata oranları %24'lere kadar çıkabilmektedir.

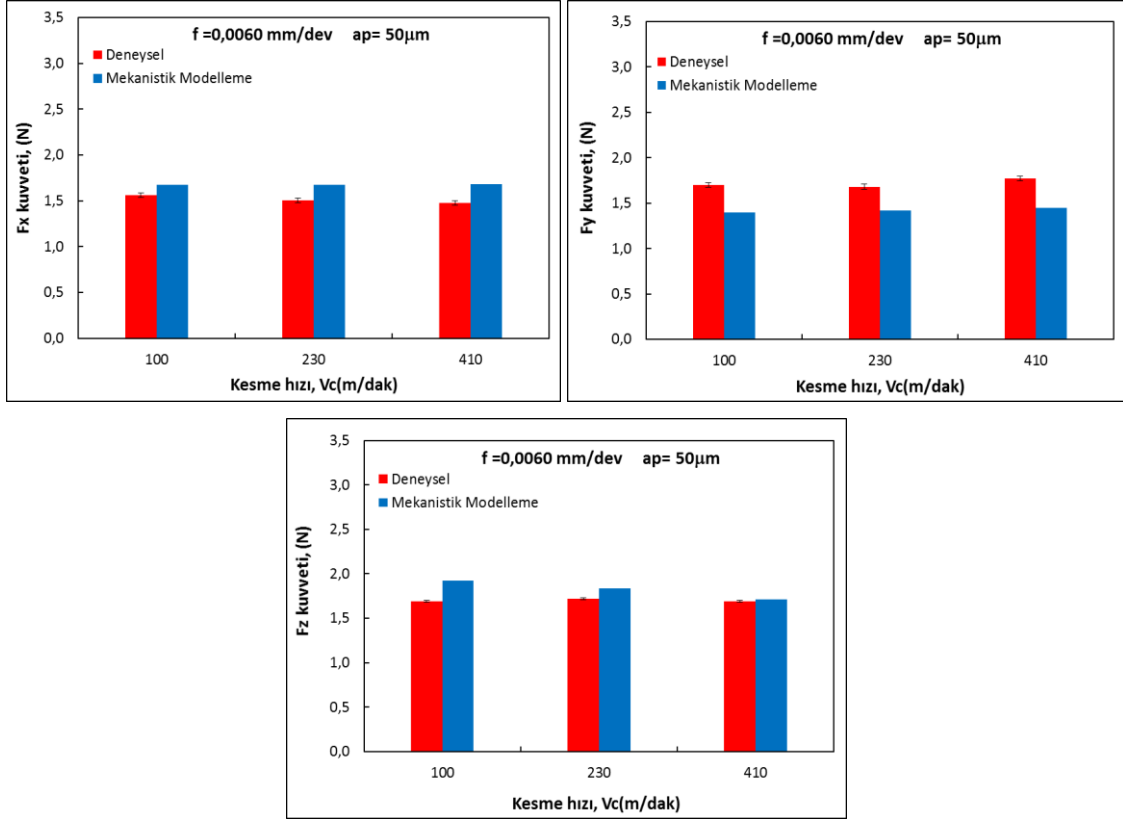
$$\begin{aligned}
F_X &= (10,22 + 21,2a_p - 0,00324V_C)G_{tx} + (2363 + 724a_p - 0,658V_C)Z_{tx} \\
F_Y &= (26,79 - 37,5a_p - 0,0015V_C)G_{fy} + (0,78 - 8a_p + 0,00052V_C)G_{ry} + \\
&\quad (2181,5 - 5833a_p - 1,3543V_C)Z_{fy} + (58 - 540a_p + 1,401V_C)Z_{ry} \quad (4.3) \\
F_Z &= (26,79 - 37,5a_p - 0,0015V_C)G_{fz} + (0,78 - 8a_p + 0,00052V_C)G_{rz} + \\
&\quad (2181,5 - 5833a_p - 1,3543V_C)Z_{fz} + (58 - 540a_p + 1,401V_C)Z_{rz}
\end{aligned}$$

Denklem 4.3 kullanılarak, sabit kesme hızı ve talaş derinliğinde ve farklı ilerleme değerleri için kesme kuvvetlerinin tahmini yapılmıştır. Sonrasında aynı kesme parametreleri için üç farklı mikro tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10'da kesme hızı ve talaş derinliği sabit tutulmak koşulu ile ilerlemenin değişimi ile deneysel ve mekanistik modelleme sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir. Model ve deney sonuçları birbiriyle karşılaştırıldığında, kabul edilebilir bir yakınsamanın meydana geldiğini söylemek mümkün. Fakat bazı kesme koşullarında hata oranının %24'lere kadar çıktığı tespit edilmiştir. Hatanın bu denli fazla çıkmasının nedeni; kesme hızına ve talaş derinliğine bağlı olarak elde edilen k katsayı değerlerinin regresyon analizinde lineer olarak kabul edilmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir. Hem talaş derinliğine hem de kesme hızına bağlı olarak yapılan lineer regresyon her iki durumda ortaya çıkan hata miktarının çarpılması anlamına geldiğinden, hata miktarı da artmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda bu hata oranının %25'lere kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir (Aksu 2008). Bir başka çalışmada ise bu oran F_y kuvvetleri için %30'lara kadar çıkmıştır (Fernández-Abia *et al.* 2015).



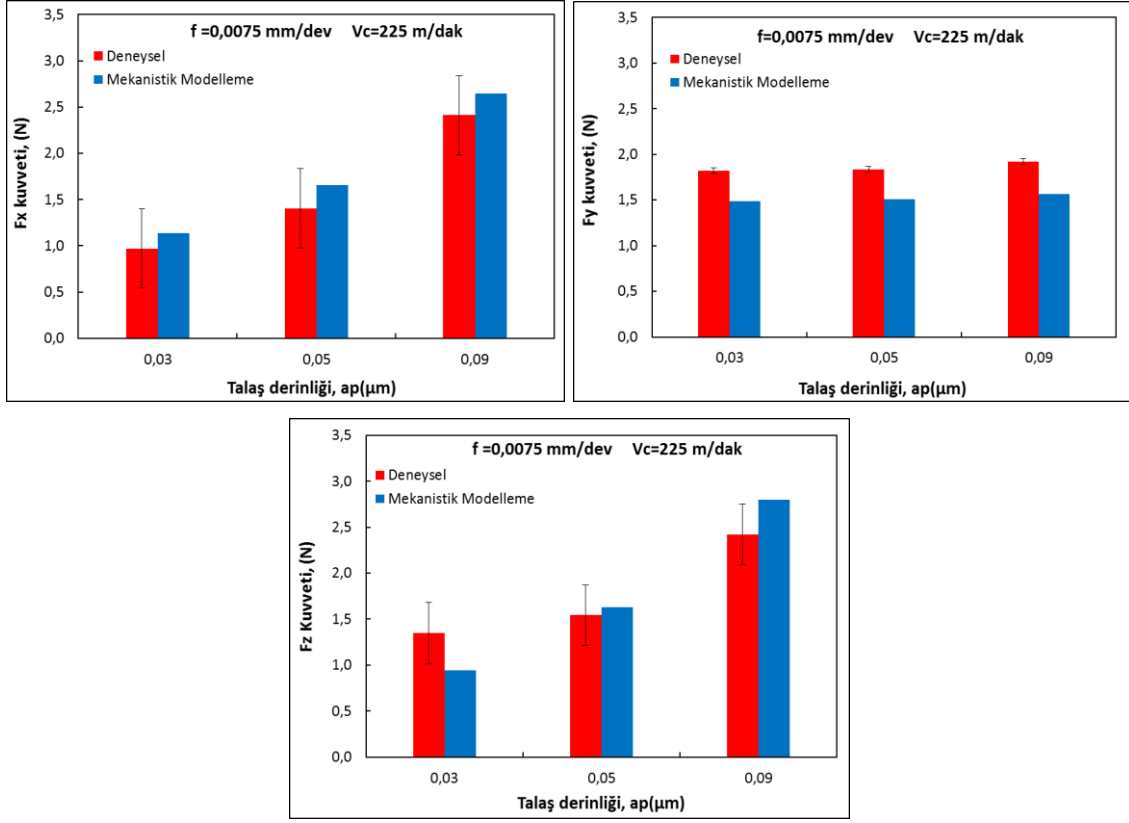
Şekil 4.10 Farklı ilerleme değerlerinde deney sonuçları ile mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması.

Oluşturulan modelin doğruluğunu ortaya koymak adına farklı kesme hızlarında da deneyler yapılmış ve mekanistik model ile sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.11). F_x ve F_z kuvvetlerinde hata oranı ortalama %8 iken, F_y kuvvetlerindeki hata yaklaşık %15 civarındadır. F_y kuvvetlerinde deneysel verilen daha büyük çıkmasının nedeni; kesme esnasında meydana gelen takım aşınması olabilir. Abrasif aşınmanın etkisiyle kenar radyüsü bir miktar daha büyümesi radyal kuvvetlerin de büyümesine neden olmuş olabilir. Buna rağmen tahmin edilen kesme kuvvetleri ile deneysel sonuçlar arasındaki hata miktarının kabul edilebilir bir seviyede olduğunu söylemek gerekir.



Şekil 4.11 Farklı kesme hızı değerlerinde, deney sonuçları ile mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması

En fazla hata oranı, sabit kesme ve ilerlemeye bağlı olarak 0,09 mm talaş derinliğinde, %22 ile F_y kuvvetinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.12). Talaş derinliğinin artması kesme işleminde birinci ve ikinci bölgede kesme kuvvetlerini çok fazla etkilemektedir. Talaş derinliğinin burun yarıçap değerinden küçük olması, deneysel kuvvetlerin çok fazla artmasına neden olduğu gözlemlenirken, talaş derinliğinden büyük değerlerde kesme kuvvetleri ile mekanistik model sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. İlerleme (F_z) yönündeki kuvvetler, talaş miktarının artırılması ile gerek kesme parametreleri ve kesme koşulları göz önüne alındığında modeldeki kadar artma göstermediği görülmektedir. Her üç deneyde de görüldüğü üzere radyal kuvvetler mekanistik model sonuçlarına oranla yüksek çıkmıştır. Teğetsel kuvvetler (F_x) birbirleriyle kıyaslandığında hata oranları ortalama %9-10 civarında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.12 Farklı talaş derinliğinde değerlerinde deney sonuçları ile mekanistik model sonuçlarının karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı çok yüksek hızlarda ve mikro şartlarda tornalamak suretiyle, kesme kuvveti ve kesme kuvvet katsayı değerlerinde meydana gelen değişim araştırılmıştır. Özellikle geniş bir yelpazede ilerleme ve talaş derinliği dikkate alınmak suretiyle sağlıklı bir kesme işleminin gerçekleştiği aralık tayin edilmiştir. Kesme işlemi yapılırken ilerleme ve talaş derinliği değerinin takım kenar ve burun radyüsü değerlerinden büyük seçilmesine dikkat edilmiştir. Kesme kuvvetleri bileşenlerinin, kesme parametrelerine bağlı olarak tahmin edebilme adına literatürdeki modelleme örneklerinden yararlanılmış olup, literatür araştırmaları ve pratik uygulamalar göz önüne alınarak bir mekanistik model geliştirilmiştir. Eğik kesme işleminde elde edilen kesme kuvvetleri, kesme kuvvet katsayıları ile G ve Z çarpanları kullanılarak mekanistik modellenmiştir. Daha sonra mekanistik modelleme yöntemi ile elde edilen k katsayı değerleri çoklu regresyon yöntemiyle, talaş derinliği ve kesme hızına bağlı olarak mekanistik model tekrar düzenlenmiş ve elde edilen kuvvet değeri ile deneysel veriler birbiriyle karşılaştırılarak oluşturulan modelin doğrulanması amaçlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında öne çıkan sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

- Ti6Al4V alaşımın tornalanması esnasında kuvvetlerin tahmini için bir mekanistik model geliştirilmiştir. İlk olarak kuru kesme şartlarında gerçekleştirilen deneysel veriler kaydedilmiştir. Kesme bölgesi analiz edilip, kesme şartları ve takım geometrisi hesaba katılmıştır ve mekanistik model de deneysel veriler kullanılarak kuvvet katsayı değerleri elde edilmiştir.
- Elde edilen kuvvet katsayı değerleri lineer regresyon analizi yapılarak kesme hızı ve talaş derinliğinin etkisini de içine alarak k katsayılarına bağlı bir denklem elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ile doğrudan hesaplanamayan k değerleri mekanistik modelin revize edilmesi ile kuvvet tahminini küçük hatalar ile tahmin etmeye imkan sağlamıştır.
- Revize edilen kuvvet denkleminde göre farklı kesme hızı talaş derinliği ve ilerleme değerlerinde (iki tanesi sabit olacak şekilde) yeni deneyler yapılmış ve

mekanistik model ile deneylerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

- Kenar ve kesme kuvvet katsayılarının kesme hıza bağlı olarak kuvvet değerleri değişme göstermesine rağmen k katsayıları değerinin değişmediği görülmüştür.
- En yüksek hata oranı, 200 m/dak kesme hızı, 0,005 µm talaş derinliği ve 0,0075 mm/dev ilerleme değerine bağlı olarak F_y kuvvetinde yaklaşık %24 çıkarken, en düşük hata oranı kesme hızı 410 m/dak, talaş derinliği 0,06 µm ve ilerleme değeri 0,0060 mm/dev ile F_z kuvvetinde %1 olarak ölçülmüştür.
- Kesme hızının artmasıyla, malzemede oluşan termal yumuşamaya bağlı olarak, kuvvetlerde önemli miktarlarda bir düşme meydana gelmiştir. Kesme hızının belli bir değer aralığından yüksek seçilmesi talaş derinliğinin de etkisiyle malzemede başlayan deformasyon sertleşmesi ve titanyum alaşımının termal iletkenliğinin zayıf olmasından dolayı kesme kuvvetleri bir miktar artma gösterdiği görülmüştür.
- Talaş derinliğinin arttırılması ile Teğetsel kuvvetin diğer kuvvetlere oranla daha fazla artış gösterdiği görülmüştür.

Kesme işleminde meydana gelen kesme kuvvetleri incelendiğinde, bundan sonra yapılacak çalışmalara yardımcı olması açısından aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- Farklı yanaşma açıları ve farklı takım kenar radyüsüne sahip takımlar için oluşturulan mekanistik modelin doğrulaması yapılabilir.
- Elde edilen model sonlu elemanlar yöntemiyle desteklenerek ayrıca bir karşılaştırma yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdelmoneim, M.E. and Scrutton, R.F. (1973). Post-machining plastic recovery and the law of abrasive wear. *Wear*, **24**: 1–13.
- Aksu B. (2008). Experimental and analytical Investigation on mechanics of Metal Cutting including edge forces. Master of Science, Sabancı University, Engineering and Natural Sciences.
- Altintas, Y. (2012). Manufacturing Automation. Cambridge University Press, Second Edition, New York, USA
- Aramcharoen, A. and Mativenga, P.T. (2009). Size effect and tool geometry in micro milling of tool steel. *Precision Engineering*, **33**: 402-407.
- Arıkan, A. ve Altan, E. (2005). Nano ölçekte talaş kaldırma. *Mühendis ve Makina*, **46**: 46-55.
- Armarego, E.J.A. and Brown, R.H. (2007). On the size effect in metal cutting. *International Journal of Production. Research*, **1**: 75-99.
- Arrazola, P.J., Özel, T., Umbrello, D., Davies, M. and Jawahir, I.S. (2013). Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Annals*, **62**: 695-718.
- Arrazolaa, P.J., Garaya, A., Iriarte, L.M., Armendiaa, M., Marya, S. and Maîtrec, F.L. (2009). Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *Journal of Materials Processing Technology*, **209**: 2223–2230.
- Aslantas, K., Çicek, A., Uçun, İ., Percin, M. and Hopa, H.E. (2016). Performance evaluation of a hybrid cooling–lubrication system in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Procedia CIRP*, **46**: 492 – 495.
- Aslantas, K.,Hopa, H.E., Percin, M. and Cicek, A., (2016). Cutting performance of nano-crystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precision Engineering*, **45**: 55-66
- Aslantaş, K. ve Kaynak, Y. (2018). Şekil hafızalı NiTi alaşımının mikro frezelenmesi ve kritik talaş kalınlığının belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **3**: 1201-1211
- Backer, W.R., Marshall, E.R. and Shaw, M.C. (1952). The size effect in metal cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, **74**: 61–72.

- Basuray, P.K., Misra, B.K. and Lal, G.K. (1977). Transition from ploughing to cutting during machining with blunt tool wear. *Wear*, **43**: 341–349.
- Biermann, D. and Baschin, A. (2009). Influence of cutting edge geometry and cutting edge radius on the stability of micro milling processes. *Production Engineering Research and Development*, **3**: 375–380.
- Binoy, R., Gopikrishnan, A. and Kanthababu, M. (2015). Studies on the effect of different nose radius in micro turning of stainless steel 316l. International conference on interdisciplinary research in engineering and technology [ICIDRET], 14 February, 204-208.
- Bisacco G., Hansen, H.N. and Chiffre L.D. (2006). Size effects on surface generation in micro milling of hardened tool steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **55**: 593-596.
- Brown, R.H. and Komanduri, R. (1972). An investigation of the performance of a quick-stop device for metal cutting studies. Proceedings of the thirteenth International machine tool design and research conference, 225-231.
- Calamaz, M., Coupard D. and 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 & Manufacture* **48**: 275–288.
- Cedergren, S., Petti, G. and Sjöberg, G. (2013). On the Influence Of Work Material Microstructure On Chip Formation, Cutting Forces And Acoustic Emission when Machining Ti6Al4V. *Procedia CIRP*, **12**: 55–60.
- Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L. and Altan, T. (2000). Turning simulations using a three-dimensional FEM code. *Journal of Materials Processing Technology*, **98**: 99–103.
- Chae, J., Park, S.S. and Freiheit, T. (2006). Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **46**: 313–332
- Che-Haron, C.H. and Jawaid, A. (2005). The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, **166**: 188-192.
- Childs, T.H.C. (2010). Surface energy cutting edge radius and material flow stress size effect in continuous chip formation of metals. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **3**: 27-39.

- Chuzhoy L., Devor, R.E., Kapoor, S.G. and Bammann, D.J. (2002). Microstructure level modeling of ductile iron machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **124**: 162–169.
- Corduan, N., Hirnbert, T., Poulachon, G., Dessob, M., Lambehn, M., Mgneau, J. and Payod, B. (2003). Wear mechanisms of new tool materials for Ti-6Al-4V high performance machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **1**: 73-76.
- Ding, H., Shen, N. and Shin, Y.C. (2011). Experimental and modeling analysis of micro-milling of hardened H13 tool steel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **133**: 041007/1-11.
- Dogra, M., Sharmab, V.S. and Durejac, J. (2011). Effect of tool geometry variation on finish turning. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, **4**: 1-13.
- Durairaja, M. and Gowri, S. (2013). Parametric optimization for improved tool life and surface finish in micro turning using genetic algorithm. *Procedia Engineering*, **64**: 878 – 887.
- Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M. (1997). Titanium alloys and their machinability. A review. *Journal of Materials Process Technology* **68**: 262–274.
- Fang, F.Z. and Liu, Y.C. (2004). On minimum exit-burr in micro cutting. *Journal of Micromechanics and Micro Engineering* **14**: 984-988.
- Fang, N., Pai, P.S. and Edwards, N. (2012). A comparative study of high-speed machining of Ti–6Al–4V and inconel 718 - part I: effect of dynamic tool edge wear on cutting forces. *International Journal Advance Manufacturing Technology Springer*, **68**: 1839–1849.
- Fernández-Abia, A.I., García J.B., de Lacalle, L.N.L. and Neto, O.P. (2015). Estimation of Cutting Forces and Tool Wear Using Modified Mechanistic Models in High Performance Turning. *Springer*, 49-107
- Finnie, I. (1963). A comparison of stress strain behavior in cutting with that in other materials tests. *International Research in Production Engineering, ASME*, 76–82.
- Grzesik, W. (1996). A revised model for predicting surface roughness in turning. *Wear*, **194**: 143–148.
- Hirao, M., Tlusty,J., Sowerby,R. and Chandra, G. (1982). Chip formation with chamfered tools. *Transactions of the ASME*, **104**: 339-342.
- Hu, H., Zhai, Z., Li, Y., Wang, H. and Dai, J. (2015). Researches on physical field

- evolution of micro-cutting of steel H13 by micron scale ceramic cutter based on finite element modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **78**: 1407–1414.
- Ikawa, N., Shimada, S. and Tanaka, H. (1992). Minimum thickness of cut in micromachining. *Nanotechnology*, **3**: 6–9.
- Jagadesh, T. and 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.
- Kahles, J.F., Field, M., Eylon, D. and Fores, F.H. (1985). Machining of titanium alloys. *Journal of Materials*, **4**: 27–35.
- Korucu, S. (2007). Delik işlemlerinde kesiciler üzerine etki eden gerilmelerin matematiksel olarak modellenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kragelsky, I.V., Dobychin, M.N. and Kombatov, V. S. (1977). Friction and Wear Calculation Methods, Pergamon Press, New York.
- Kurt, A. (2006). Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmelerin deneysel olarak incelenmesi ve matematiksel modellerin oluşturulması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lai, X., Li, H., Li, C., Lin, Z. and Ni, J. (2008). Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48**: 1-14.
- Lauro, C.H., Brandão, L.C., Filho, S.L.M.R. and Baldo, D. (2013). Analysis of the forces in micromilling of hardened AISI H13 steel with different grain sizes using the taguchi methodology.
- Liu, K. and Melkote, S.N. (2007). Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process. *International Journal of Mechanical Sciences*, **49**: 650-660.
- Liu, K. and 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. and Kapoor, S.G. (2006). An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining. *Journal of Manufacturing Science*

- and Engineering, *Transactions of the ASME*, **128**: 474-481.
- Lu, Z. and Yoneyama T. (1999). Micro cutting in the micro lathe turning system, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **39**: 1171–1183.
- Masuko, M. (1956). Fundamental researches on the metal cutting – Force acting on a cutting edge and its experimental discussion. *Transactions Japanese Society of Mechanical Engineers*, **22**: 371-377
- Masuzawa, T. (2000). State of the art of micromachining. *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, **49**: 473-488.
- McGeough, J. (2002). *Micromachining of engineering materials*. Marcel Dekker, New York, USA.
- Nakayama, K. and Tamura, K. (1968). Size effect in metal-cutting force. *ASME Journal of Engineering for Industry*, **90**: 119-126.
- Ohbuchi, Y. and Obikawa, T. (2003). Finite element modeling of chip formation in the domain of negative rake angle cutting. *Journal Engineering material Technology, ASME*, **125**: 324-332.
- Polishetty, A., Shunmugavel, M., Goldberg M., Littlefair, G. and Singh R.K. (2017). Cutting force and surface finish analysis of machining additive manufactured titanium alloy Ti6Al4V. International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2017 Kruger National Park, 284-289.
- Rahman, M.A., Rahman, M., Senthil Kumar, A., Lim, H. S. and Asad, A.B.M.A. (2006). Development of micropin fabrication process using tool based micromachining. *International Journal Advance Manufacturing Technology*, **27**: 939–944.
- Rahman, M., Lim, H.S., Neo, K.S., Senthil Kumar, A., Wong, Y.S. and Li, X.P. (2007). Tool-based nano finishing and micro machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **185**: 2–16.
- Ramos, A., Autenrieth, H., Strauß, T., Deuchert, M., Hoffmeister, J. and Schulze, V. (2012). Characterization of the transition from ploughing to cutting in micro machining and evaluation of the minimum thickness of cut. *Journal of Materials Processing Technology*, **212**: 594–600.
- Rangel, D.A., Rojas, F.A. and Arteaga, A.N. (2011). Development of a cnc micro-lathe for bone micro implants. *Revista EIA*, **15**: 113-127.

- Schueler, G., Engmann, J., Marx, T., Haberland, R. and Aurich, J. (2009). Burr formation and surface characteristics in micro-end milling of titanium alloys. Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, University of Kaiserslautern, Germany, 2nd–3rd April, 129-138
- Senthilkumar, V. and Muruganandam, S. (2012). State of the art of micro turning process. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* **1**: 36-42
- Shaw, M.C. (2003). The size effect in metal cutting. *Sadhana*, **28**: 875-896.
- Shelton, J.A. and Shin, Y.C. (2010). Experimental evaluation of laser-assisted micromilling in a slotting configuration. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, **132**: 1-9
- Singaravel, B. and Selvaraj, T., (2015). A review of micro hardness measurement in turning operation. *Applied Mechanics and Materials*, **813–814**: 274–278.
- Singh, D., Chadha, V. and Singari, R.M. (2016). Effect of nose radius on surface roughness during cnc turning using response surface methodology. *International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering (Ijmech)*, **5**: 31-45.
- Son S.M., Lim H.S. and 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.
- Subbiah, S. (2006). Some investigation of scaling effects in micro cutting. Phd. Thesis. Georgia, Institute of Technology.
- Subbiah, S. and Melkote, S.N. (2013). Engineering Materials for Micro Cutting. In: Cheng, K. and Huo, D., *Micro-Cutting: Fundamentals and Applications*. John Wiley and Sons, Ltd, First Edition, United Kingdom. 87-112.
- Sürücüler, S. (2010). Tornalamada kesme parametrelerindeki değişime göre kesme kuvvetlerinin tahmini için matematiksel bir model geliştirme. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tanaka, M., (2001). Development of desktop machining microfactory, *RIKEN Review Focused on Advances on Micro-mechanical Fabrication Techniques*, **34**: 46-49
- Umbrello, D. (2008) Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, **196**: 79–87.

- Upase, V.K., Thakur, R.Y., Kanna, P.D., Burla, B.V., Kongari, N.N. and Patil Y.B., (2016). A review on turning of Ti6Al4V alloy, International Journal Of Innovation in Engineering, Research and Technology [Ijert] National Conference On Innovative Trends in Engineering & Technology Conference Proceedings, 11th & 12th March, 2394-3696.
- Umbert, S.M (2017). Cutting Forces in Turning Operations, Bachelor Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Mechanical and Industrial Engineering.
- Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G. (2004). On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: surface generation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **126**: 685–694.
- Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G. (2004). On the modeling and analysis of machining performance in micro-end milling, Part II: Cutting force prediction. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. **126**: 695–705.
- Vollertsen, F., Biermann, D., Hansen, H. N. Jawahir, I. S. and Kuzman, K. (2009). Size effects in manufacturing of metallic components. *CIRP Annals*, **2**: 566-587
- Weule, H., Huntrup, V., and Tritschler, H. (2001). Micro-Cutting of steel to meet new requirements in miniaturization. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **50**: 61–64.
- Wu, X., Li, L., He, N., Yao, C. and Zhao, M. (2016). Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting. *Precision Engineering*, **45**: 359-364.
- Wyen, C.F. and Wegener, K. (2010). Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **59**: 93–96.
- Yang, X., Liu, C.R. (1999). Machining titanium and its alloys. *Machining Science and Technology*, **3**: 107–139.
- Yuan, Z.J., Zhou, M. and Dong, S. (1996). Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in ultraprecision machining. *Journal of Material Processing Technology*, **62**: 327–330.
- Zhang, S.J., To, S., Wang, S.J. and Zhu, Z.W. (2015). A review of surface roughness generation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **91**: 76–95.

- Zhanqiang, L., Zhenyu, S., and Yi, W. (2013). Definition and determination of the minimum uncut chip thickness of micro cutting. *International Journal Advance Manufacturing Technology*, **69**: 1219-1232.
- Zhao, Z., Wang, G., Hou, H., Zhang, Y. and Wang, Y. (2018). The effect of pulsed current on the shear deformation behavior of Ti6Al4V alloy. *Scientific Reports* **8**: 14748.

İnternet Kaynakları

- 1) <http://www.petersonenterprises.com/processesproducts/machining/precision-swiss-machining>, 30.04.2019
- 2) <https://www.genswiss.com/microbore.htm>, 30.04.2019
- 3) https://www.iwf.mavt.ethz.ch/research/Micro-Machining/index_EN, 06.05.2019
- 4) <http://www.bayramdental.com.tr/>, 23.05.2019
- 5) <http://www.dishekimantalya.com/tr/m/tedaviler/implantoloji.html>, 30.04.2019
- 6) <http://www.americanspecialmetals.com/titaniumgrade5es.html>, 26.05.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer ŞAHAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Antalya, 01.01.1990
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 05424149617

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : Hacı Malike Mehmet Bileydi Anadolu Lisesi,
(2004-2008)

Lisans : Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği (İngilizce), (2008-2013)

Formasyon : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Eğitim Fakültesi Makine
Teknolojisi Formasyon Eğitimi (2018-2019)

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2015-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Viyana Teknik Üniversitesi : 2013-(4Ay)
Uludağ Group : 2014-2015
TMMOB Makine Mühendisleri Odası : 2016-2018
Afyonkarahisar Ticaret ve Sanayi Odası : 2018-Devam etmektedir.

Yayınları (SCI ve diğer):

Aslantaş K., Şahan Ö., (2017). Ti6Al4V alaşımının mikro işleme şartlarında yüksek hızda tornalanması. 8. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, Antalya, 101-110.