

**MİKRO İNCE DUVAR GEOMETRİSİNE SAHİP
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ FREZELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge ZOR

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2021

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKRO İNCE DUVAR GEOMETRİSİNE SAHİP
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ FREZELENMESİ

Özge ZOR

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Özge ZOR tarafından hazırlanan “Mikro İnce Duvar Geometrisine Sahip Alüminyum Alaşımının Frezelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 11 / 02 / 2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Başkan : Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Bekir YALÇIN
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 çalışmada;

- 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.

11 / 02 / 2021

Özge ZOR

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**MİKRO İNCE DUVAR GEOMETRİSİNE SAHİP
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ FREZELENMESİ**

Özge ZOR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Mikro ince duvarlı yapılar, mikro kanallı soğutucu plakalarda, mikro pompalarda, mikro kalıplarda ve bazı biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikro frezeleme tekniği ile, bu tür mikro bileşenleri, yüksek doğrulukta ve yüksek hızda üretmek mümkündür. İnce duvar geometrisinin frezelenmesinde, kesme parametreleri, kesme stratejisi ve takım geometrisi, duvar deformasyonunu etkileyen en önemli unsurlardır. Bu çalışmada mikro frezeleme tekniği kullanılarak, ince duvarın frezelenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada alüminyum alaşımı kullanılmış olup, kesme parametrelerinin, takım geometrisinin ve kesme stratejilerinin duvar deformasyonuna etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; boyut etkisinden dolayı, $f_z < 1 \mu\text{m}/\text{diş}$ ve $f_z > 1 \mu\text{m}/\text{diş}$ için duvardaki deformasyon artmaktadır. Deformasyonun minimum olduğu ilerleme değeri $f_z = 1 \mu\text{m}/\text{diş}$ 'tir. $200 \mu\text{m}$ den daha büyük aksel talaş derinliğinde ince duvar deformasyonu önemli oranda arttığı gözlemlenmiştir. Artan helis açısı ve kesici ağız sayısı da duvar deformasyonunun artmasına neden olmaktadır. Deneyleerde ince duvar deformasyonunun en az kesme stratejisi 1 (adım destekli kesme) de meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Zıt yönlü frezeleme yönteminin kullanıldığı ince duvarlarda deformasyonun daha az gerçekleştiği tespit edilmiştir.

2021, xiii + 92 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikro frezeleme, İnce duvar yapılar, Plastik deformasyon,
Kesme stratejisi, Kesme parametreleri, Takım geometrisi.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

MILLING OF ALUMINIUM ALLOY WITH MICRO THIN WALL GEOMETRY

Özge ZOR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Kubilay ASLANTAŞ

Micro thin-walled structures are widely used in microchannel cooler plates, micro pumps, micro molds and some biomedical applications. By using the micro milling technique, it is possible to produce such micro components with high accuracy and high speed. In the milling of thin wall geometry, cutting parameters, cutting strategy and tool geometry are the most important factors affecting wall deformation. In this study, milling of thin wall was performed using micro milling technique. Aluminum alloy was used in the study, and the effect of cutting parameters, tool geometry and cutting strategies on wall deformation in the wall increases for $f_z < 1 \mu\text{m/tooth}$. The feed rate at which the deformation is minimum is $f_z = 1 \mu\text{m/tooth}$. For $f_z > 1 \mu\text{m/tooth}$, deformation increases with increasing feed rate. It was observed that thin wall deformation significantly increased at axial depth of cut greater than $200 \mu\text{m}$. Increasing helix angle and the number of cutting edges also cause an increase in wall deformation. In the experiments, it was concluded that thin wall deformation occurred at least in shear strategy 1 (step assisted shear). It has been determined that deformation occurs less in thin walls where the opposite direction milling method is used.

2021, xiii + 92 pages

Keywords: Micro-milling, Thin wall structures, Plastic deformation, Cutting strategy, Cutting parameters, Tool geometry.

TEŐEKKÖR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tezdanişmanım Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarım Soner Yılmaz ve Halil çalışır'a teŐekkr ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay aileme teŐekkr ederim.

Özge ZOR
Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Hedefleri	2
1.1.1 Çalışmanın Amacı	2
1.1.2 Çalışmanın Hedefi	3
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 İnce Duvar Yapıların Tanımı ve Uygulama Alanları	4
2.2 İnce Duvar Geometrisinin İşlenmesindeki Zorluklar	8
2.3 İnce Duvar İçeren Geometrilerin İşlenmesinde Güncel Uygulamalar	14
2.4 Mikro İnce Duvar Geometriler İçin Kullanılan Üretim Yöntemleri	17
2.4.1 Mikro Frezeleme	18
2.4.1.1 Mikro Frezelemede Boyut Etkisi ve Minimum Talaş Kalınlığı	20
2.5 Kesme Parametrelerinin Etkisi	22
2.5.1 Eksenel Kesme Derinliğinin Etkisi	23
2.5.2 Dış Başına İlerlemenin Etkisi	25
2.6 İnce Duvar İşleme Stratejileri	26
2.6.1 Frezeleme Yönteminin Etkisi	26
2.6.2 Kesme Stratejileri	30
2.7 Kesici Takım Geometrisinin Etkisi	32
2.7.2 Kesici Ağız Sayısının Etkisi	40
3. MATERYAL ve METOT	43
3.1 İş Parçası ve Kesici Takım Özellikleri	43
3.2 Kesici Takım Geometrik Özellikleri	44
3.3 Takım Radyal Sapma Miktarının Tespiti	45
3.4 İş Parçasının Deney Şartlarına Uygun Olarak Hazırlanması	46
3.5 Deney Düzenneği	47

3.6 Kesme Parametreleri.....	50
3.7 İnce Duvar Deformasyonunun Ölçümü.....	52
3.8 Kullanılan Kesme Stratejileri	53
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	55
4.1 Kesme Parametrelerinin Etkisi	55
4.1.1 İlerlemenin Etkisi.....	55
4.1.2 Eksenel Kesme Derinliğinin Etkisi.....	59
4.2 Takım Geometrisinin Etkisi.....	62
4.2.1 Kesici Ağız Sayısının Etkisi	62
4.2.2 Helis Açısının Etkisi	65
4.3 Kesme Stratejilerinin Etkisi.....	67
5. SONUÇ.....	77
6. KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	92

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	Alüminyum
L	Takım toplam uzunluk
L_2	Helis uzunluğu
D	Takım şaft çapı
d	Takım çapı
V_f	İlerleme hızı
n	Tezgah devri
a_p	Eksenel kesme derinliği
z	Kesici ağız sayısı
N	Newton
mm	Milimetre
μm	Mikronmetre
f_z	Diş başına ilerleme
λ	Helis açısı
a_e	Radyal kesme derinliği
φ	Eksenel boşluk açısı
γ	Radyal talaş açısı
α	Radyal boşluk açısı
WC-Co	Tungsten karbür-kobalt
kHz	(Kilohertz), Frekans birimi
Zn	Çinko
Mg	Magnezyum
Cu	Bakır
Cr	Krom
Mn	Manganez
MPa	Akma ve çekme dayanımı
GPa	Elastisite modülü
HR _B	Sertlik ölçüm birimi
F_x	X ekseninde oluşan kesme kuvveti
F_y	Y ekseninde oluşan kesme kuvveti
F_z	Z ekseninde oluşan kesme kuvveti
Fr	Radyal kuvvet
Fa	Eksenel kuvvet
Ff	Normal ilerleme kuvveti
h	Duvar yüksekliği
t	Duvar kalınlığı

Kısaltmalar

CNC	Computer Numerical Control
FEM	Finite Element Method
FRF	Frequency Response Function
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistem
SEM	Scanning Electron Microscopy

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Uçak kanadı iç yapısı (İnt. Kyn. 1).	4
Şekil 2.2 İnce duvarlı parça örnekleri: (a) çerçeve, (b) uçak yapısını oluşturan yapısal elemanlardan biri (nervür), (c) pervane, (d) kanatçıklı disk, (e) ince duvar geometri için araştırmalarda kullanılan numune parçası, (f) ön bölme sacı ve (g) havacılıkta kullanılan gövde kaplama sacı (Sol vd. 2019).	5
Şekil 2.3 Bir deney hayvanında vücudunun farklı bölgelerine yerleştirilen A) biyobozunur ince magnezyum plakası, B) çözüldükten sonraki hali (Sato vd. 2018).	7
Şekil 2.4 Pulmoner hücre kültürleri için kullanılan tipik mikrokanal örneği. (a) Ch0, (b) Ch45, (c) Ch90, hücre kültür kesitinin olduğu örnekler giriş kanalına bağlı sırasıyla 0, 45 ve 90° açılarla (Moghadas vd. 2017).	8
Şekil 2.5 Çok kanallı mikro parçanın tek kanalının gösterimi (Khan vd. 2020).	8
Şekil 2.6 İnce duvar doğruluğunu etkileyen faktörler (Bing vd.2015).	9
Şekil 2.7 İnce duvar geometrisinin işlenmesinde oluşan duvar sapması ve form hatası (Bolar ve Joshi 2018).	10
Şekil 2.8 Parmak freze takımıyla ince duvar geometrinin işlenmesi: (a) Kenar frezeleme modeli (Tsai ve Liao 1999), (b) Kesici takımın ve iş parçasının deformasyonu, yüzey kalitesinin bozulması (Polzer vd. 2015).	10
Şekil 2.9 a) simüle edilmiş ve termokupl ölçülen sıcaklıkların karşılaştırılması, b) iş parçası 90 derecelik daldırma açısında (üstten görünüm) ve 180 derecelik daldırma açısında/takım çıkış noktasında (alttan görünüm) ilerleme yönünde sıcaklık alanı, c) 90 derecelik daldırma açısında iş parçası sıcaklığının yaklaştırılmış görünümü, d) takım çıkış noktasında iş parçası sıcaklığının yaklaştırılmış görünümü (Mamedov ve Lazoglu 2016).	12
Şekil 2.10 15000 dev/dk iş mili hızı, 0,5 mm/sn ilerleme hızı, 20 µm radyal kesme derinliği ve 600 µm eksenel kesme derinliği kullanılarak üretilen çapak ve deformasyon morfolojisi (Liu vd. 2017).	13
Şekil 2.11 Mikro ince duvar dizisinin SEM görüntüleri (Agirre vd. 2012).	14
Şekil 2.12 İkiz kesici (ayna frezeleme) işleme tekniğinde kesme kuvvetlerinin şematik gösterimi (Izamshah vd. 2018).	15
Şekil 2.13 MTorres firmasının ürettiği yüzey frezeleme makinesi (İnt. Kyn. 2).	16
Şekil 2.14 İnnoclamp şirketinin ince duvar geometriler için tasarladığı iş parçası tutucu sistemi (İnt. Kyn. 3).	17
Şekil 2. 15 Mikro üretim teknikleri (Venkatesh vd. 2016).	18
Şekil 2.16 Yüksek hassasiyette frezelenmiş mikro parça örnekleri: a. Mikro Reaktör (Huo vd. 2010) b. Mikro Kalıp (Weule vd. 2001) c. Sıralanmış Mikro İğneler (Takeuchi vd. 2006) d.Nükleer Füzyon İçin Metal Yaprak (Huo vd. 2010) e. Mikro Duvarlar (Weck vd. 2001).	20

Şekil 2.17 Kesici takımın iş parçasından talaş kaldırma şematik gösterimi (a) makro ölçekli talaş kaldırma, (b) mikro ölçekte talaş kaldırma (Aramcharoen ve Mativanga 2009).....	21
Şekil 2.18 Eksenel kesme derinliği (ap) değişiminin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata üzerindeki etkisi (Wang vd. 2018).	24
Şekil 2.19 Deney için tasarlanmış ince duvar dizisi (Agirre vd. 2012).....	24
Şekil 2.20 Ana etki grafikleri (Agirre vd. 2012).	25
Şekil 2.21 Dış başına ilerleme (fz) değerindeki değişimin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata üzerindeki etkisi (Wang vd. 2018).....	26
Şekil 2.22 Aynı yönlü ve zıt yönlü frezelemenin şematik gösterimi.	27
Şekil 2.23 (a) Dış başına ilerleme (fz) değişiminin aynı ve zıt yönlü frezeleme yönteminde kesme kuvvetine etkisi, (b) Eksenel kesme derinliği (ap) değişiminin zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme yönteminde kesme kuvvetine etkisi, (c) Radyal kesme derinliği (ae) değişiminin zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme yönteminde kesme kuvvetine etkisi (Li vd. 2010).....	29
Şekil 2.24 a) takım çapı kadar frezelenerek ince duvar oluşturma b) var olan bir ince duvarın yanıl yüzeylerinden talaş almak sureti ile kalınlığının azaltılması....	30
Şekil 2.25 İnce duvar işlemede kullanılan kesme stratejileri (İnt. Kyn. 4).	31
Şekil 2.26 Takım yolu stratejileri (Lianos vd. 2014).	31
Şekil 2.27 İnce cidarların işlenmesinde talaş kaldırma yolları (a) su yolu, (b) adım destekli, tüm ölçüler mm cinsindedir (Kuram 2016).....	32
Şekil 2.28 Parmak freze geometrik özellikleri (Izamshah vd. 2013).	33
Şekil 2.29 Kesme esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin şematik gösterimi. ...	34
Şekil 2.30 Kesme kenarının λ helis açısının işleme parametreleri için kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki etkisi: a) $ae=8\text{mm}$, $fz=0.15\text{mm/dış}$, b) $ae=12\text{mm}$, $fz=0.10\text{mm/dış}$, c) $ae=16\text{mm}$, $fz=0.075\text{mm/dış}$ (Burek vd. 2017).....	36
Şekil 2.31 Helis açısındaki değişime bağılı olarak ortalama kuvvet bileşenlerinin değişimi (Joshi ve Bolar 2020).....	37
Şekil 2. 32 İnce duvar işleme anında helis açısının değişimi ile frezeleme kuvveti bileşenleri ve iş parçası temas noktaları şematik gösterimi (Joshi ve Bolar 2020).....	38
Şekil 2. 33 Değişken helis açıları için parça sapmasının 3 boyutlu grafiğı (a) 25° , (b) 30° , (c) 35° , (d) 40° , (e) 45° (Izamshah vd. 2013).	39
Şekil 2.34 Kesici ağız sayısındaki değişime bağılı olarak ortalama kuvvet bileşenlerinin değişimi (Joshi ve Bolar 2020).....	40
Şekil 2.35 Kesici ağız sayısındaki değişime göre iş parçasından talaş kaldırma şematik gösterimi (Joshi ve Bolar 2020).	41
Şekil 3.1 Kesme deneylerinde kullanılan kesici takıma ait geometrik parametreler.	45

Şekil 3.2 SEM görüntüleri kullanılarak; a) hassas ölçülen takım çapları, b) İş parçası yüzeyinde oluşturulan dairesel geometrilerin çapları.....	46
Şekil 3.3 Deneylede kullanılan numune tutucu.	47
Şekil 3.4 a) İnce duvar geometrisinin boyutları, b) İnce duvarın oluşturulmasında kullanılan frezeleme tekniği.	51
Şekil 3.5 İnce duvar işlemede kullanılan kesme stratejileri; a) Sıralı kesme stratejisi (Strateji 0), b) Adım destekli kesme (Strateji 1), c) Tek taraflı kesme stratejisi (Strateji 2), d) Su yolu kesme (Strateji 3).....	54
Şekil 4.1 Farklı ilerleme değerlerindeki kesme işleminde ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	56
Şekil 4.2 Dış başına ilerlemedeki değişime bağlı ince duvarda meydana gelen deformasyon miktarı.....	57
Şekil 4.3 Dış başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.	58
Şekil 4.4 Farklı ilerleme değerleri için ince duvar geometrisinde meydana gelen deformasyonun SEM görüntüleri.	59
Şekil 4.5 Farklı aksel kesme derinlikleri ile oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	60
Şekil 4.6 Aksel kesme derinliğindeki değişime bağlı duvarda meydana gelen deformasyon miktarı.....	61
Şekil 4.7 Aksel talaş derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.	62
Şekil 4.8 Farklı kesme derinlikleri için ince duvar geometrisinde meydana gelen deformasyonun SEM görüntüleri.	62
Şekil 4.9 Kesici ağız sayısındaki değişime bağlı ince duvarda meydana gelen deformasyon.	64
Şekil 4.10 Farklı ağız sayıları ile oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	64
Şekil 4.11 Kesici ağız sayısına bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim.	65
Şekil 4.12 Helis açısındaki değişime bağlı ince duvarda meydana gelen deformasyon miktarı.	66
Şekil 4.13 Farklı helis açıları ile oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	67
Şekil 4.14 Kesme stratejisi deneylerinde kullanılan kesme yönleri; zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme işlemleri.	68
Şekil 4.15 KS-0 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.	69
Şekil 4.16 KS-0 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	69

Şekil 4.17 KS-1 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.	70
Şekil 4.18 KS-1 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	71
Şekil 4.19 KS-2 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.	72
Şekil 4.20 KS-2 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	72
Şekil 4.21 KS-3 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.	73
Şekil 4.22 KS-3 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.	74
Şekil 4.23 KS-0, KS-1, KS-2, KS-3 için ters yönlü frezeleme dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.	75
Şekil 4.24 KS-0, KS-1, KS-2, KS-3 için aynı yönlü frezeleme dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Deneylelerde kullanılan kesme parametreleri (Wang vd. 2018).....	23
Çizelge 3.1 Al7075-T651 alaşımının ısıı işlem özellikleri (İnt. Kyn. 5).....	44
Çizelge 3.2 Al7075-T651alaşımının kimyasal kompozisyonu (Çevik vd. 2014).	44
Çizelge 3.3 Al7075-T651 alaşımına ait mekanik özellikleri (Çevik vd. 2014).	44
Çizelge 3.4 Deneylelerde Kullanılan Kesme Parametreleri.....	51

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Kesme esnasında eksenlerin kontrolü ve kesme bölgesinin görüntülenmesi.	48
Resim 3.2 Kesici takımın iş parçası yüzeyine sıfırlanması sırasında kullanılan Fz kuvveti değişim sinyalleri.	48
Resim 3.3 Kesme sırasında alınan örnek kuvvet değerlerinin zamanla değişimi.	49
Resim 3.4 Mikro frezeleme testleri için kullanılan test düzeneğinin genel görünümü..	50
Resim 3.5 İnce duvar deformasyonu ölçüm düzeneği.	52
Resim 3.6 İnce duvar deformasyonu ölçümünde alınan ham data örneği.	53

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte, mikro parçalara olan gereksinim her geçen gün artmaktadır. İnce duvar geometrisine sahip mikro parçalar, elektronik, biyomedikal ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle de biyomedikal uygulamalarda denek hayvanlarının vücutlarına yerleştirilen küçük implant uygulamaları buna en iyi örnektir. Bu alanlarda kullanılacak mikro parçaların hassas bir şekilde imal edilmesi son derece önem arz etmektedir. Her ne kadar, mikro parçaların imalatında alışılmamış imalat yöntemleri de kullanılsa, mikro mekanik kesme yöntemlerinin (özellikle de mikro frezeleme) üstünlükleri tartışılmaz. Üç boyutlu mikro geometrik parçaların imalatında yüksek kesme hızı ve yüksek talaş hacmi, mikro frezelemeyi diğer mikro kesme yöntemlerinden ayıran en önemli özelliklerdir (Cheng ve Huo 2013). Mikro parçaların frezelenmesinde hızlı takım aşınması, çapak oluşumu ve takım kırılması temel problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok mühendislik malzemelerinin yanı sıra, özellikle biyomedikal malzemelerin mikro frezelenmesinde takım aşınması ve çapak oluşumu detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Mikro frezelemede meydana gelen deformasyon elastik ve plastik olmak üzere iki farklı şekilde oluşur. Elastik deformasyon, özellikle yüksek talaş yüklerinde, kesici takımda meydana gelir (Chae vd. 2006). Plastik deformasyon ise ince duvar geometrileri içeren mikro parçalarda oluşur (Lazoğlu ve Mamedov 2016).

Bir geometrinin ince duvar olarak kabul edilebilmesi için duvar yüksekliğinin kalınlığa oranı (h/t) minimum 15 olmalıdır. İnce duvar geometriler içeren parçalar, çoğunlukla havacılık endüstrisinde, uçağın gövde kısmında güçlendirme elemanı olarak kullanılırlar (Hadzley vd. 2015). Genellikle alüminyum ve titanyum alaşımlarından üretilen bu parçalarda, ince duvarda meydana gelen plastik deformasyonun minimum olması için çok sıkı tolerans kuralları uygulanır. Geleneksel frezeleme yöntemi ile büyük kütle geometrilerden boşaltma yapılarak üretilen bu parçalar üzerine, çok sayıda çalışma yapılmıştır ve yapılmaya da devam edilmektedir (Sol vd. 2019). İnce duvar içeren parçalar sadece havacılık sektöründe değil aynı zamanda mikro parçalarda da kullanılmaktadır. Özellikle mikro akışkan uygulamalarında, çok dar toleranslarla oluşturulmuş ince duvar yapılar kullanılmaktadır (Tosello vd. 2008). Bununla birlikte yarı iletken endüstrisinde kullanılan minyatür ince yüzgeçler ve tıbbi cihazlar ve

biyoteknoloji endüstrisindeki mikro elektronik tıbbi implantlar, daha büyük en boy oranına sahip mikro parçalara olan talebi arttırmıştır (Liao vd. 2005, Kasem vd. 2015). İnce duvarın frezelenmesinde meydana gelen mekanik ve termal yükler oluşturulmak istenen geometrinin elastik ve plastik deformasyonuna neden olabilmektedir (Annoni vd. 2013). Bunun için de kesme sırasında kullanılan kesme parametreleri kadar kesme stratejisi de büyük önem arz etmektedir. Özellikle de alüminyum ve titanyum alaşımları için konvensiyonel frezeleme uygulamalarında buna yönelik çalışmaları literatürde bulmak mümkündür. Fakat mikro frezelemedeki boyut etkisi dikkate alınarak ince duvarın mikro frezelenmesi yeniden tasarlanmalıdır.

İnce duvar geometrilerin mikro frezelenmesi konusundaki çalışmaların çok yeni olduğu ve genellikle demir dışı malzemelerin iş parçası malzemesi olarak seçildiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda ağırlıklı olarak kesme stratejisi ve kesme parametrelerinin etkisinin dikkate alındığı ve çalışmalarda bazı faktörlerin göz ardı edildiği/çalışılmadığı tespit edilmiştir. Takım geometrisi; helis açısı ve kesici ağız sayısı da ince duvar kalitesini etkileyecek diğer unsurlardır.

1.1 Tez Çalışmasının Amacı ve Hedefleri

1.1.1 Çalışmanın Amacı

Yapılan bu tez çalışmasında imalat endüstrisinde genellikle uzay, elektronik ve havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan Al7075-T651 alaşımı iş parçası olarak seçilmiştir. İnce duvar geometrisine sahip yapıların imalatında öne çıkan tüm kesme parametreleri ve takım geometrisinin yanı sıra kesme stratejisinin etkileri de bu çalışmada ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla kuru kesme şartlarında kesme parametreleri (eksenel talaş derinliği, diş başına ilerleme), takım geometrisi (ağız sayısı, helis açısı), frezeleme yöntemi (aynı/ters yönlü frezeleme) ve kesme stratejilerinin ince duvar deformasyonuna etkisi deneylerle test edilmiştir.

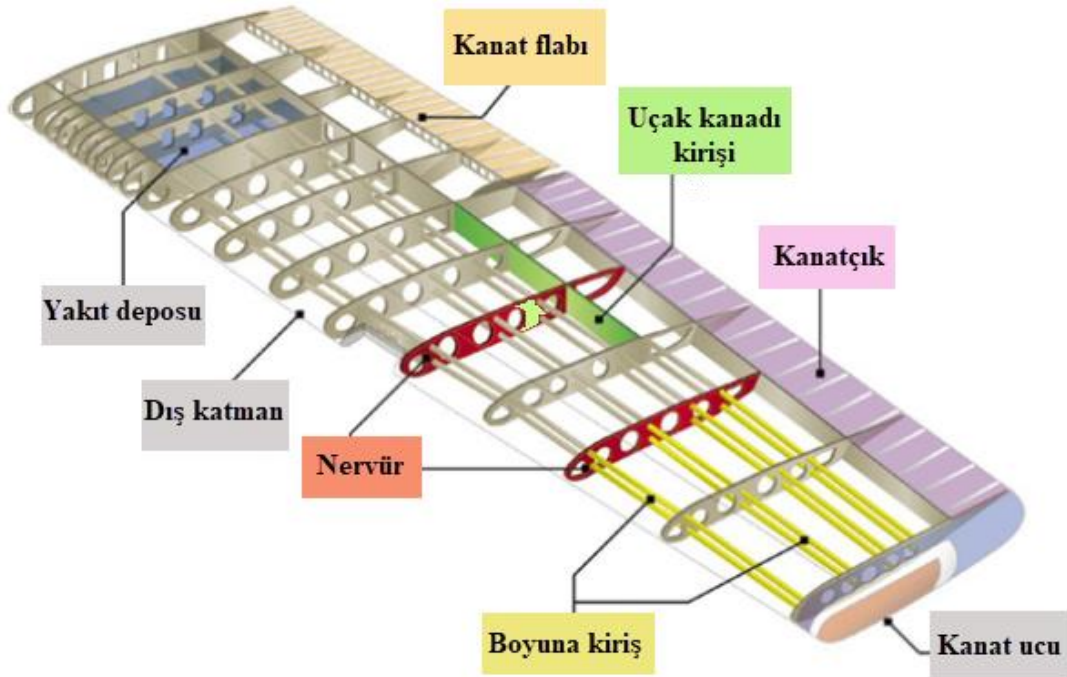
1.1.2 Çalışmanın Hedefi

Çalışmanın temel hedefi, ince duvar geometriye sahip parçaların işlenirken parça deformasyonunun en aza indirgenmesini sağlayarak parça kalitesini artırmaktır. Özellikle kesme parametreleri, takım geometrisi, frezeleme yöntemi ve takım yolu gibi unsurların işlenen parçanın kalitesi üzerindeki etkilerini gözler önüne sererek sanayi uygulamalarında bir karşılık bulması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 İnce Duvar Yapıların Tanımı ve Uygulama Alanları

Havacılık endüstrisindeki zorlu üretim süreçlerinden biri de kanat, dikey ve yatay stabilizatörler gibi yük taşıyıcı elemanlara monte edilen ince duvarlı yapısal bileşenlerin işlenmesidir. Yük taşıyıcı yapılar, deri, kiriş ve kaburga olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Örneğin kanat, uzunluğu boyunca birbirine bakan ön ve arka kirişler olarak adlandırılan iki kirişe sahiptir. Bu kirişler, kirişlerle bağlanır ve deri ile kaplanır, bu da yükü, nervürlere ve kirişlere dağıtırken kanadın aerodinamik şeklini verir (Şekil 2.1).

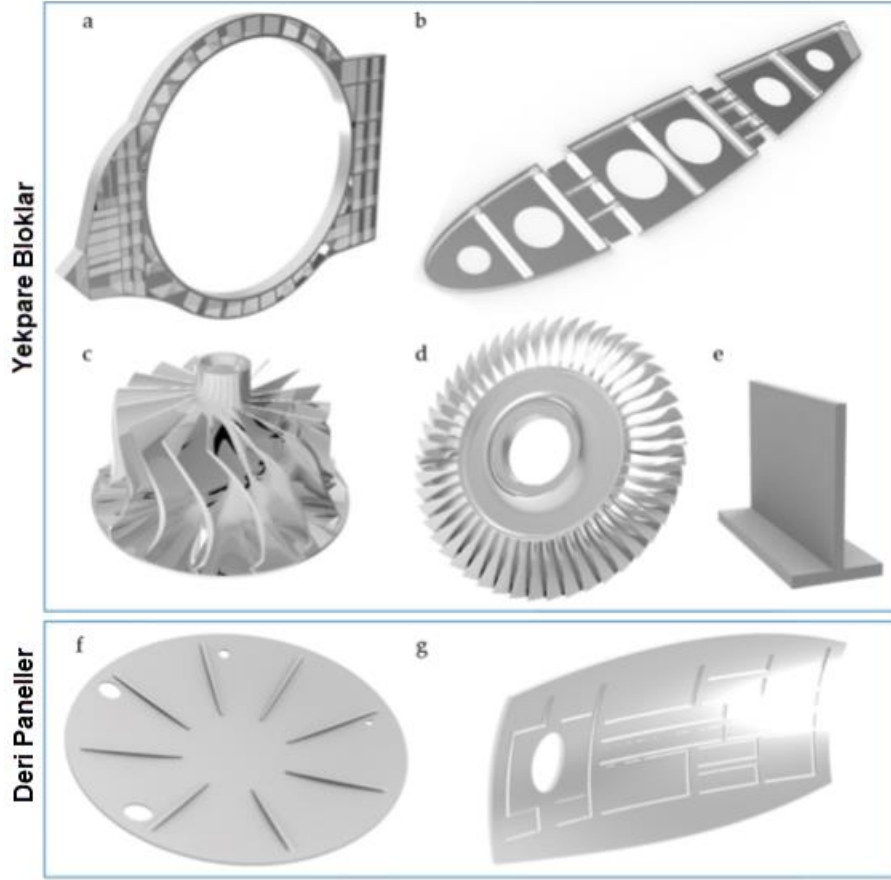


Şekil 2.1 Uçak kanadı iç yapısı (İnt. Kyn. 1).

Havacılık endüstrisinde hafiflik ve dayanım beraber istenen iki özellik olduğundan genellikle alüminyum alaşımları tercih edilir. Bu bileşenler genellikle haddeleme sonrasında çok eksenli frezeleme operasyonları ile üretilirler. Bazen çok karmaşık ve yekpare olması gereken bu bileşenlerin üretiminde yapılan en küçük bir hata tüm geometrinin çöpe atılmasına neden olabilmektedir.

İnce duvar yapısı içeren parçalar işleme süreci ve özellikleri ile ilgili olarak iki gruba ayrılır. Birinci grubu oluşturan parçalar, yekpare bloklardan işlenmiş bir geometriye sahiptir. Parça işleme operasyonları ile bloğun başlangıç malzeme hacminin %90-

95'inin çıkarılmasıyla elde edilir (Garimella ve Ramesh 2013, Izamsah vd. 2011). Şekil 2.2 de İnce duvar geometriye sahip yekpare parçalara örnekler verilmiştir.



Şekil 2.2 İnce duvarlı parça örnekleri: (a) çerçeve, (b) uçak yapısını oluşturan yapısal elemanlardan biri (nervür), (c) pervane, (d) kanatçıklı disk, (e)ince duvar geometri için araştırmalarda kullanılan numune parçası, (f) ön bölme sacı ve (g) havacılıkta kullanılan gövde kaplama sacı (Sol vd. 2019).

Kirişler, nervürler veya çerçeveler yapısal güçlerini koruyarak ve ağırlıklarını azaltarak farklı cep şekilleri elde edilerek işlenir. Hem ince zeminler hem de ince duvarlar için işlemenin son adımlarında rijit olmayan işleme sorunları ortaya çıkmaktadır. Pervaneler, kanatçıklı diskler ve bıçaklar da bu gruba dahil edilir, ancak parçaların karmaşık şekilleri, takım kuvvetinin sürekli olarak değiştirilmesini gerektirir. Dahası parçalar işlenirken yüksek bir sapma meydana gelir ve gerçek kesme derinliğinin kontrolünü yapmak daha da zorlaşır. İnce duvar geometriye sahip parçalarla ilgili yapılan çalışmalarda, araştırmacılar genel olarak çalışmalarında Şekil 2.2(e) de gösterilen ince duvar örneğini kullanmaktadırlar. İşleme parametrelerini test etmek, doğrulamak ve hesaplamayı azaltan dinamik modeller geliştirmek için genellikle şekildeki gibi olan

ince duvar yapılar üzerinde deneyler yapmışlardır (Zhang vd. 2016, Khandagale vd. 2018). Daha sonra kaba işleme adımlarının ve frezeleme işlemlerinin davranışları daha karmaşık şekillere uyarlanmaktadır.

Genellikle deri paneller olarak bilinen diğer grup, esas olarak daha yüksek ince bir faktör sunan kabuklar, kanatlar, gövde parçaları (Şekil 2.2g), perdeler (Şekil2.2f), kapılar, uydu parçaları ve çerçevelerden oluşmaktadır (Scheider ve Brocks 2009).

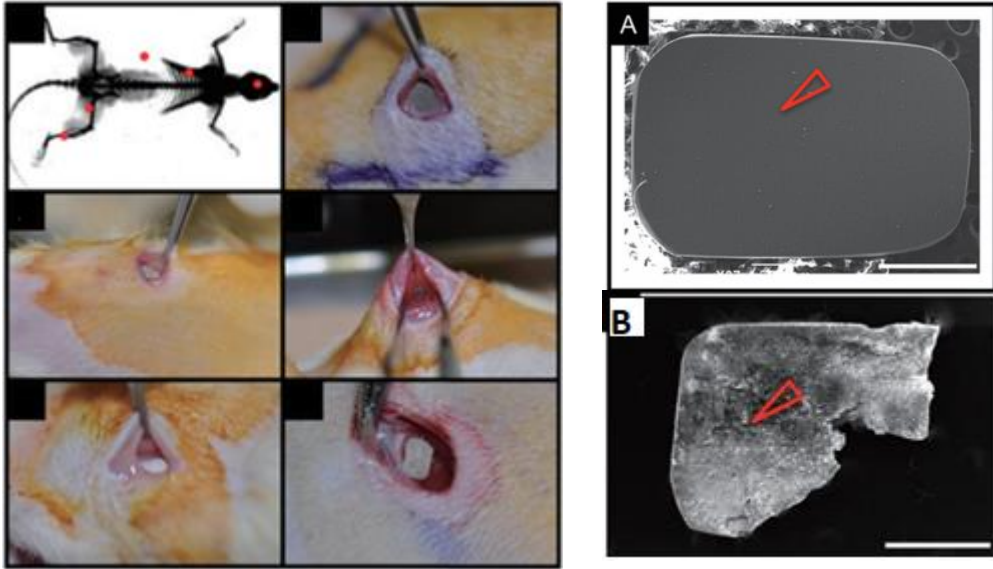
İnce duvar parçaların temel yapısal özellikleri ve ince duvar parçaların sınıflandırılmasında farklı önerilere rastlamak mümkündür. Fitzgerald (1982), ince duvarlı ve kalın duvarlı silindirler arasındaki farkı ayırt edebilmek için bir yaklaşım önermiştir. İnce duvarlı silindirler ve küreler teorisi, 1/10 ince duvar kalınlık/çap oranının ince duvarlı ve kalın duvarlı silindir arasında bir ayırma çizgisini temsil ettiği varsayımına dayanmaktadır.

Yang (1980), süper ince, ince ve kalın plakalar arasındaki ayırım hakkında önerilerde bulunmuştur. Bu önerilere göre, süper ince plakalar için kalınlığın yüksekliğe oranı $h/t < (1/100)$ iken; ince plakalar için bu oran $(1/100) \leq h/t \leq (1/5)$ şeklindedir. Kalınlığın yüksekliğe oranı 1/5 ten büyük olan parçalar kalın parça grubunda değerlendirilmiştir.

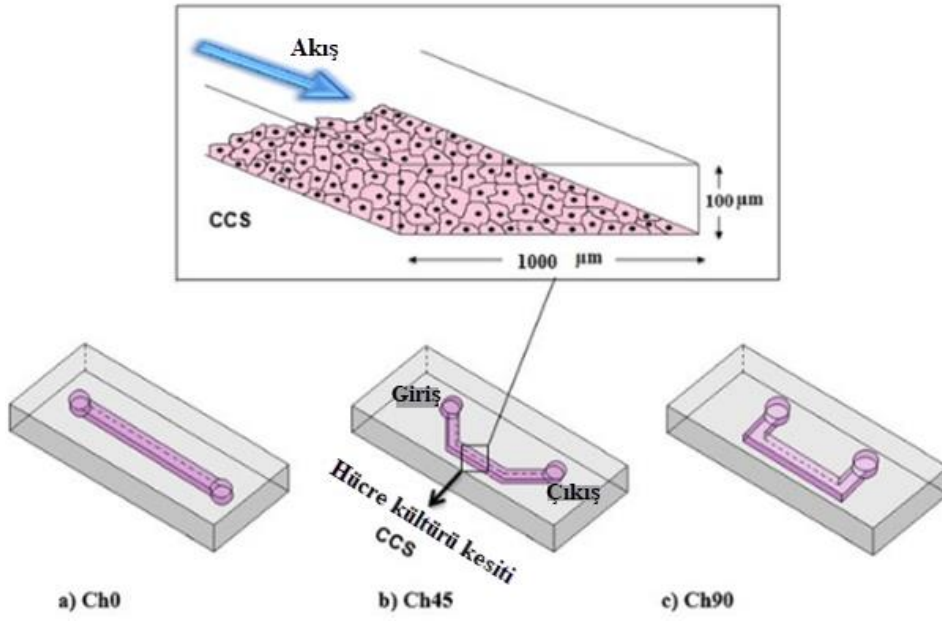
Boyutsal anlamda, ince duvar içeren yapıları iki ana başlık altında değerlendirmek gerekirse, birincisi konvensiyonel işleme teknikleri ile üretilen ince duvarlı yapılardır. Yukarıdaki paragraflarda konvensiyonel işleme tekniğinin kullanıldığı alanlardan örnek verilmiştir. Mikro ince duvarlı yapılar, mikro kanallı soğuk levha, mikro pervane, mikro kalıp, biyomedikal ve diğer karmaşık bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yi vd. 2019). Mikro frezeleme tekniği, bu mikro bileşenleri yüksek doğrulukta ve yüksek talaş kaldırma hızlarında üretebilir. Mikro kanal uygulamasında ince duvar, kalınlığı 100 μm ' den az ve en-boy oranı 5'ten (Yarin vd. 2009) büyük olan bir duvar olarak tanımlanır. İnce duvar, boru, pervane veya türbin kanatları, mikro kanalın duvarı ve ısı esanjörünün kanatçıkları gibi mekanik bileşenlerin temel bir şeklidir. Mikro frezeleme tekniği kullanarak ince duvarlı bir ürün imal etmek istendiğinde dikkate alınması gereken birçok husus vardır. Bunlar; takım tezgahının titreşimi (Fortgang 2006) ve iş

parçasının türü (Weinert vd. 2008, Seguy vd. 2008), takım tezgahının rijitliği (Luo vd. 2005), takım- iş parçası çifti (Wan vd. 2005), takımların geometrik özellikleri (Mamedov vd. 2013) ve iş parçasının özellikleri (Malekian vd. 2009) ve kesme kuvvetidir. (Otieno ve Mirman 2008, Malekian vd. 2009).

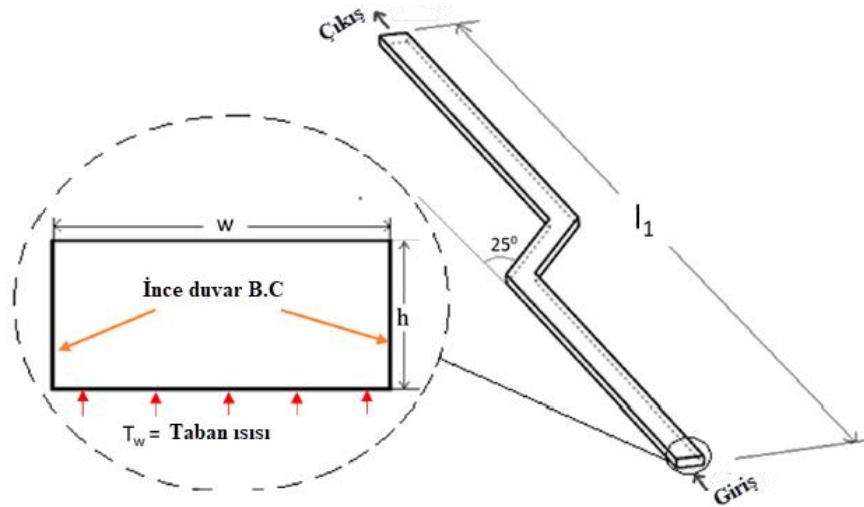
Son yıllarda biyomedikal sektöründe, mikro mekanik işleme tekniği, implant vb. gibi vücut veya damar içerisine yerleştirilen ekipmanlar sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle yeni geliştirilen implant malzemelerinin ilk denemeleri denek hayvanlarında yapılmaktadır. Bunun içinde rat olarak ifade edilen sıçan veya tavşanlar kullanılmaktadır. Bu tür hayvanların vücut içerisine yerleştirilecek implantın da küçük olması gerektiğinden, mikro frezeleme önemli bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.3 te bir denek hayvanının vücudunun farklı yerlerine yerleştirilen ve belirli aralıklarla çözünmesi izlenen bir magnezyum alaşımının görüntüsü verilmektedir. Hayvan vücuduna yerleştirilen plakanın boyutları 3x2x0.1 mm dir. Bu boyutlarda olan bir numuneyi mikro frezeleme tekniği ile üretip kullanmak mümkündür. Yapılan başka bir çalışmada ise hücre hareketlerini gözlemlemek adına mikro kanal geometrisine sahip bir deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 2.4) (Moghadas vd. 2017).



Şekil 2.3 Bir deney hayvanında vücudunun farklı bölgelerine yerleştirilen A) biyobozunur ince magnezyum plakası, B) çözüldükten sonraki hali (Sato vd. 2018).



Şekil 2.4 Pulmoner hücre kültürleri için kullanılan tipik mikrokanal örneği. (a) Ch0, (b) Ch45, (c) Ch90, hücre kültür kesitinin olduğu örnekler giriş kanalına bağlı sırasıyla 0, 45 ve 90° açılarla (Moghadas vd. 2017).



Şekil 2.5 Çok kanallı mikro parçanın tek kanalının gösterimi (Khan vd. 2020).

2.2 İnce Duvar Geometrisinin İşlenmesindeki Zorluklar

Günümüzde havacılıkta kullanılan parçalar kaynak veya perçinleme ile birleştirilen küçük parçalar yerine esas olarak yekpare bileşenlerden oluşmaktadır. Bu kategoride kaburgalar kirişler, halkalar ve perdeler sayılabilir. Frezeleme işleminden sonra parçalar birleştirilir. Bu parçaların amacı homojenliklerinden dolayı iyi bir mukavemet/ağırlık oranı elde etmektir. Yekpare bir yapısal parçanın frezelenmesi, ham blok malzemeden

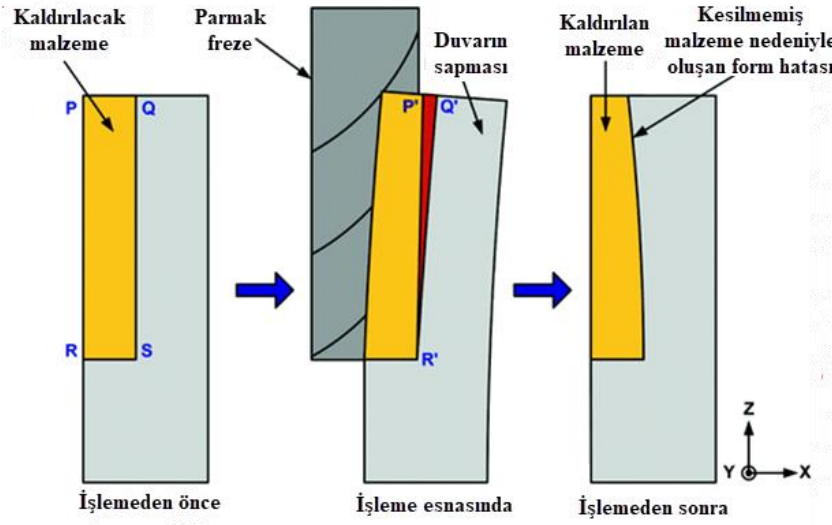
ağırlığın % 95 ine kadar çıkarılması gerekebilir. Bu nedenle mümkün olduğunca daha yüksek bir malzeme kaldırma oranına ulaşmak temel amaçtır. Bununla birlikte yüksek talaş kaldırma hızlarında (yüksek ilerleme ve kesme derinliği), rijitliğin yeterince yüksek olmadığı bölgelerde (ince duvar ve zeminler) plastik deformasyon ve kararsız kesme koşulları meydana gelebilir. Bu problemler genellikle geometrik hatalara, düşük yüzey kalitesine ve belki de tezgah spindle nın hasar görmesine yol açabilmektedir.

Uçak gövdesinde kullanılan ince duvarlı yapılar yapısal rijitlikleri koruyacak şekilde ağırlıkları azaltılarak farklı cep şekilleri elde edilerek imal edilirler. Hem ince zeminler hem de ince duvarlar için işlemenin son adımlarında deformasyon kaynaklı işleme sorunları ortaya çıkmaktadır. Karmaşık şekilli parçaların işlenmesinde, takım kuvvetleri sürekli olarak değişir ki bu da kesme işleminin daha zorlaşmasına neden olur. Dahası parçalar işlenirken yüksek bir sapma meydana gelir ve gerçek kesme derinliğinin kontrolünü yapmak daha da zorlaşır. Bu tür ince duvarlı yapılarda işleme doğruluğu, genel olarak termal deformasyonlara ve kesme sıcaklıklarına, takım yolunun seçimine, takım malzemesine ve tasarımına, takım aşınmasına, iş parçası malzemesine bağlıdır (Zhang vd. 2016, Khandagale vd. 2018). Farklı bir çalışmada da parça deformasyonunu etkileyen temel faktörler Şekil 2.6 daki gibi ifade edilmiştir (Bing vd.2015) .



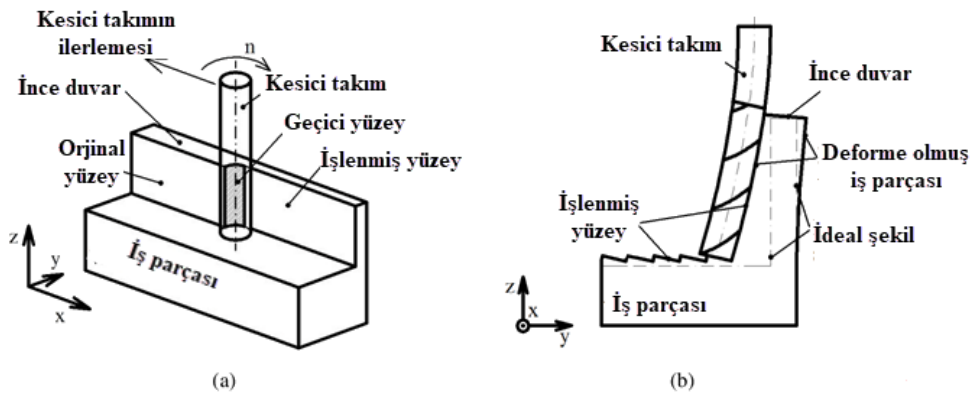
Şekil 2.6 İnce duvar doğruluğunu etkileyen faktörler (Bing vd.2015).

İnce duvar geometrisine sahip parçalarla ilgili yapılan çalışmalarda, araştırmacılar genel olarak çalışmalarında Şekil 2.7 de gösterilen ince duvar örneğini kullanmaktadırlar. İşleme parametrelerini test etmek, doğrulamak ve dinamik modeller geliştirmek için genellikle şekildeki gibi olan ince duvar yapılar üzerinde deneyler yapmışlardır (Zhang vd. 2016, Khandagale vd. 2018).



Şekil 2.7 İnce duvar geometrisinin işlenmesinde oluşan duvar sapması ve form hatası (Bolar ve Joshi 2018).

Şekil 2.7 den de görüldüğü üzere frezeleme esnasında ince duvarın elastik deformasyonu nedeniyle kaldırılmak istenen radyal talaş derinliği gerçekten daha küçüktür. Bunun sonucunda ince duvarda geometrik hatalar oluşmaktadır. Şekil 2.7 de takım rijit kabul edildiğinde ince duvarda meydana gelen geometrik hataya bir örnektir. Eğer takım çapı da yeterince büyük değilse takım da elastik deformasyon meydana gelecek (Şekil 2.8) ve bu durum hata miktarının daha da artmasına neden olacaktır. Hem kesici takımda hem de iş parçasında meydana gelen elastik deformasyon sadece geometrik hataya değil aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün artmasına da neden olur (Izamshah 2011, Bing vd. 2015, Wojciechowski 2015).



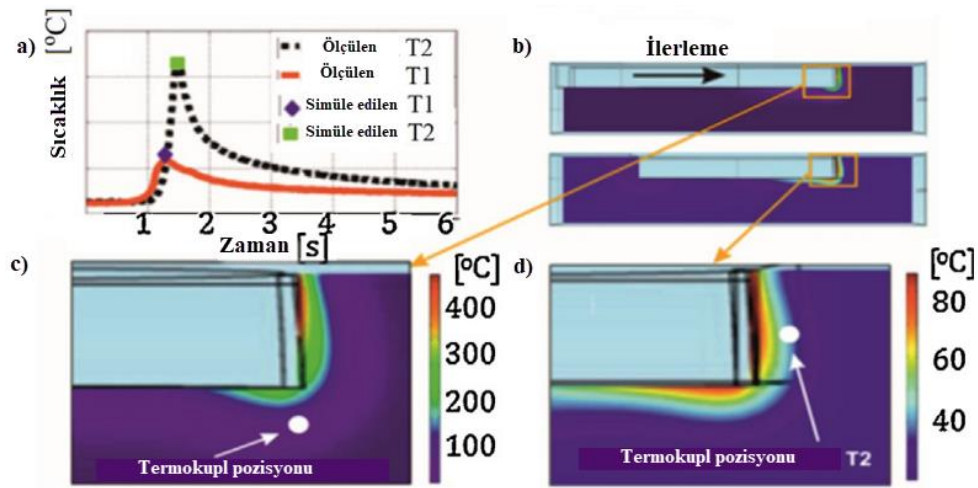
Şekil 2.8 Parmak freze takımıyla ince duvar geometrisinin işlenmesi: (a) Kenar frezeleme modeli (Tsai ve Liao 1999), (b) Kesici takımın ve iş parçasının deformasyonu, yüzey kalitesinin bozulması (Polzer vd. 2015).

Endüstride kullanılan ince cidarlı bileşenlerin çoğu alüminyum ve titanyum bloklardan işlenmiştir. Alüminyum, düşük akma gerilimi ve iyi işlenebilirlik derecesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, iyi bir yorulma direnci, onu havacılık ve otomobil uygulamalarında elverişli kılar. İnce duvar işleme alanında, yüksek hızlı ince duvar işleme, düşük frezeleme kuvveti, düşük kesme sıcaklığı, azaltılmış işleme süresi ve daha kaliteli yüzey oluşturma gibi avantajları nedeniyle popülerlik kazanmaktadır (Davim vd. 2008). Alüminyum alaşımlarının kolay işlenebilirliğinin yanı sıra rijitliğinin düşük olması önemli bir dezavantajdır. İnce duvarlı alüminyum yapılarda işlenen geometri düşük rijitliğe sahip olduğundan, kesme sırasında oluşan titreşimler en büyük problemler olarak görülmektedir. Sebeplerine bağlı olarak titreşimler; kendiliğinden meydana gelen titreşimler veya zorlanmış titreşimler olarak iki gruba ayrılırlar. Sistem doğal frekans tepkisi işleme sırasında etkilidir (Biermann vd. 2010). Bu dengesizlikler genellikle işleme sırasında meydana gelen takım titreşimleriyle ilişkilidir. Ancak en önemlisi sürekli olarak parçanın doğal frekans tepkisidir (Campa vd. 2011, Kolluru vd. 2013, Qu vd. 2016). Bu çevrimsel davranış, sistemin doğal frekans tepkisini değiştirir ve kararsız bir işleme prosesi oluşturur (Ratchev vd. 2004, Zhang vd. 2018).

İnce duvarlı yapıların frezelenmesi sırasında parçanın rijitliği, sabit bir talaş kalınlığını korumak için yeterli değildir. Bu da kesilmekte olan radyal talaş derinliğinin ve nihayetinde kesme kuvvetlerinin değişmesine neden olur (Elbestawi ve Sagherian 1991, Tian vd. 2018). Otlama frezeleme operasyonu nedeniyle sistemin doğal frekans tepkisi (FRF) uyarıldığında gerçekleşir. Otlama frezeleme sırasında ortaya çıkan bir kararsız kesme durumudur genellikle işleme sırasında üretilen takım titreşimleriyle ilgilidir. Fakat parça rijitliğinin çok düşük olduğu durumlarda parçanın FRF si de önemlidir ve sürekli değişkendir. Hem takımın hem de ince duvarın FRF nin sürekli değişkenlik göstermesi kararsız kesme koşullarının oluşmasına neden olur (Ratchev vd. 2004, Zhang vd. 2018). Bu kararsız kesme koşulları da işlenen yüzey kalitesinin de bozulmasına neden olmaktadır.

İnce duvarın mikro frezelenmesinde de ürün kalitesini etkileyen parametreler, geleneksel frezeleme yöntemi ile benzerlik göstermektedir. Şöyle ki ince duvar içeren yapıların mikro frezelenmesinde de ürün kalitesini veya duvar deformasyonunu

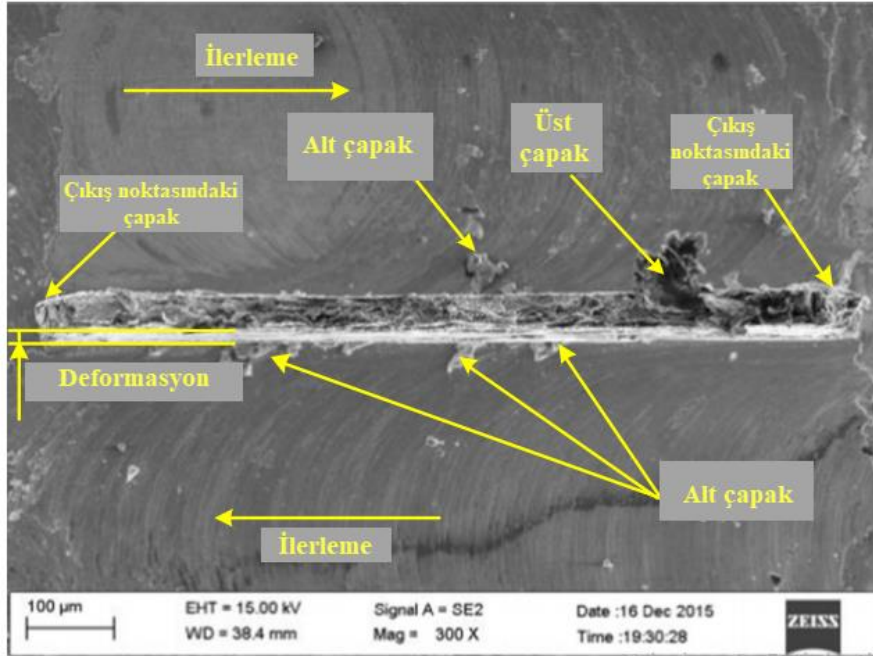
etkileyen faktörler; iş parçası malzemesi, takım geometrisi, kesme parametreleri ve kesme stratejisidir. Bu faktörlerin bazılarının etkileri önceki çalışmalarla saptanmıştır. Lazoglu ve Mamedov (2016) frezeleme esnasında meydana gelen mekanik ve termal yükleri dikkate alarak, mikro duvarda meydana gelen plastik deformasyonun tahmini için bir model geliştirmiştir. Yaptıkları çalışmada ince duvar geometrisinde meydana gelen plastik deformasyonun sadece mekanik kaynaklı olmadığı, aynı zamanda termal etkilerin de dikkate alınması gerektiği ortaya konulmuştur. Çünkü kesme esnasında meydana gelen kesme sıcaklığının ince duvarı etkileyecek kadar yüksek olduğuna dikkati çekmişlerdir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 a) Simüle edilmiş ve termokupl ölçülen sıcaklıkların karşılaştırılması, b) iş parçası 90 derecelik daldırma açısında (üstten görünüm) ve 180 derecelik daldırma açısında/takım çıkış noktasında (alttan görünüm) ilerleme yönünde sıcaklık alanı, c) 90 derecelik daldırma açısında iş parçası sıcaklığının yaklaşılmış görünümü, d) takım çıkış noktasında iş parçası sıcaklığının yaklaşılmış görünümü (Lazoglu ve Mamedov 2016).

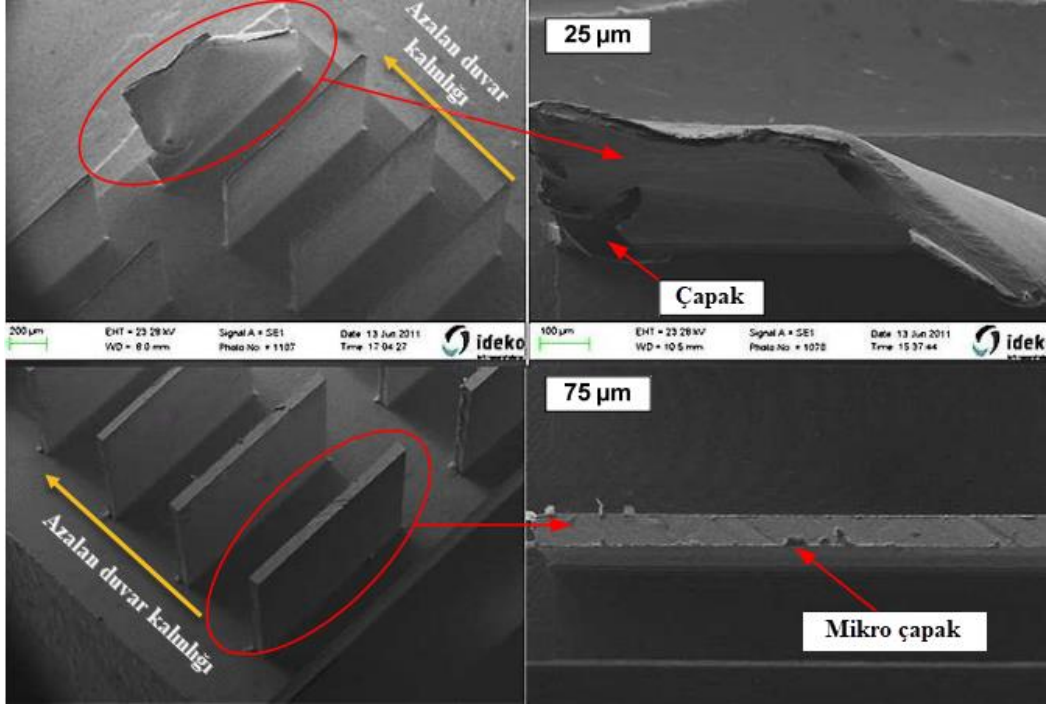
Mikro parçaların frezelenmesinde hızlı takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra çapak oluşumu da önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle ince duvar geometrilerinin mikro frezelenmesinde meydana gelen çapak oluşumunun ikinci bir operasyonla temizlenmesi çok mümkün değildir. Çünkü ikinci bir operasyon, oluşturulan mikro duvarın bozulmasına neden olacaktır. Bu noktadan hareketle yapılan bazı çalışmalarda ince duvarın mikro frezelenmesi sonrasında meydana gelen çapak boyutları da dikkate alınmıştır. Liu vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada ince duvarlı bir bakır alaşımının mikro frezelenmesi sonrasında gerek duvar girişinde ve

gerekse duvar üzerinde meydana gelen çapak boyutları dikkate alınmıştır. Elde edilen bulgular, en az çapak oluşumu açısından aynı yönlü frezelemenin daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir.



Şekil 2.10 15000 dev/dk iş mili hızı, 0,5 mm/sn ilerleme hızı, 20 µm radyal kesme derinliği ve 600 µm aksenal kesme derinliği kullanılarak üretilen çapak ve deformasyon morfolojisi (Liu vd. 2017).

Mikro ince duvar geometrilerde yaşanan en önemli sorunların biri de duvar kalınlığının azalması ile birlikte duvarda telafi edilemeyecek deformasyonların meydana gelmesidir. Bu durum sadece kesme parametrelerine bağlı olmayıp aynı zamanda kullanılan takım geometrisine ve kesme stratejisine de bağlıdır. Agirre vd. (2012) yaptıkları çalışmada mikro duvarda meydana gelen plastik deformasyonun azalan duvar kalınlığı ile önemli ölçüde arttığı vurgulanmıştır. Elde edilen SEM fotoğraflarında da bu durumu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Mikro ince duvar dizisinin SEM görüntüleri (Agirre vd. 2012).

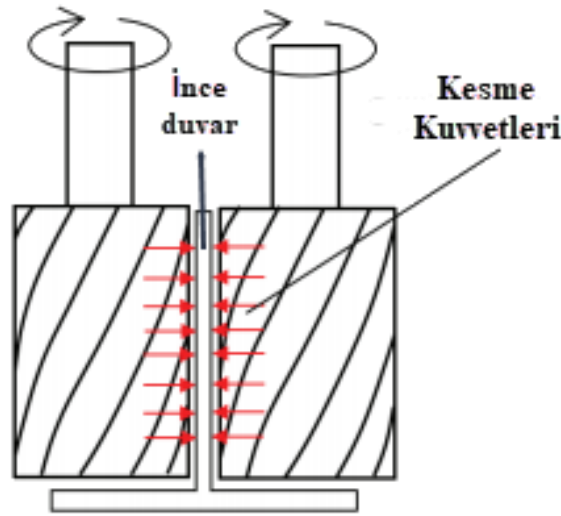
2.3 İnce Duvar İçeren Geometrilerin İşlenmesinde Güncel Uygulamalar

İnce duvarlı parçaların üretilmesinde karşılaşılan problemler yeni üretim yöntemleri ve yeni makine tasarımlarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. İnce duvar kalitesini artırmak için birçok araştırmacı titreşimi azaltmak ve sistem için en iyi parametreleri seçme çalışmaları yapmıştır (Li vd. 2015). Diğerleri de kuvvet etkileşimi (Ratchev 2004) veya meydana gelen artık gerilme (Richter-Trummer 2013) nedeniyle parçanın sapmasını incelemiştir. Alternatif olarak da endüstride özel sıkıştırma ve izleme sistemleri geliştirilmiştir; uygulanabilir kontrol, böylece kalite çevrimiçi olarak ölçülür ve istatistiksel parametre optimizasyonları periyodik değişiklikleri izlemek için kullanılır (Izamshah 2011).

Başlangıçta ince duvar parçalar daha önce tanımlanan kritik problemlerle tanımlanır, sınıflandırılır ve ilişkilendirilir. Bu işleme işleminin dinamik ve statik davranışını anlamak için en yaygın analitik modeller ortaya konmaktadır. Modellere veya endüstriyel yaklaşımlara odaklanan önerilen çözümler araştırılmıştır. İnce duvar geometriye sahip parçaların işlenebilirliğini artırmak için çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Parçadaki deformasyonu oluşturan kuvvet etkisini azaltmaya yönelik yeni

CNC makine tasarımları önerilmiştir. Daha karmaşık ince duvar yapıları sahip parçaların makineye bağlanması ve titreşimi azaltmaya yönelik bağlantı iş parçası tutucuları da tasarlanması yönünde çalışmalar yapılmıştır (Sol vd. 2019).

İnce duvar parçalar işlenirken oluşturulan cepler kimyasal frezeleme yöntemi kullanılarak da işlenir, bu durum artık gerilmeleri tetiklemeyen ve kenetleme sistemini basitleştiren yüksek derecede kirletici bir işlemdir (Mahmud vd. 2015). Ancak 2007'den bu yana ve esas olarak çevre için özel freze dik işleme merkezleri bu amaçla tasarlanmış ve kullanılmıştır (Panczuk 2007). Bu özel dış işleme merkezlerinde iki simetrik kafa (spindle) bulunmaktadır. Bu nedenle operasyona ayna frezeleme denir. İşleme kafası yüzeye dik olarak çalışır ve ikinci kafa, parçaya destek sağlamak ve sapmayı azaltmak için işleme kafasını takip eder. Ayna frezeleme tekniği şematik olarak Şekil 2.12 te gösterilmiştir.

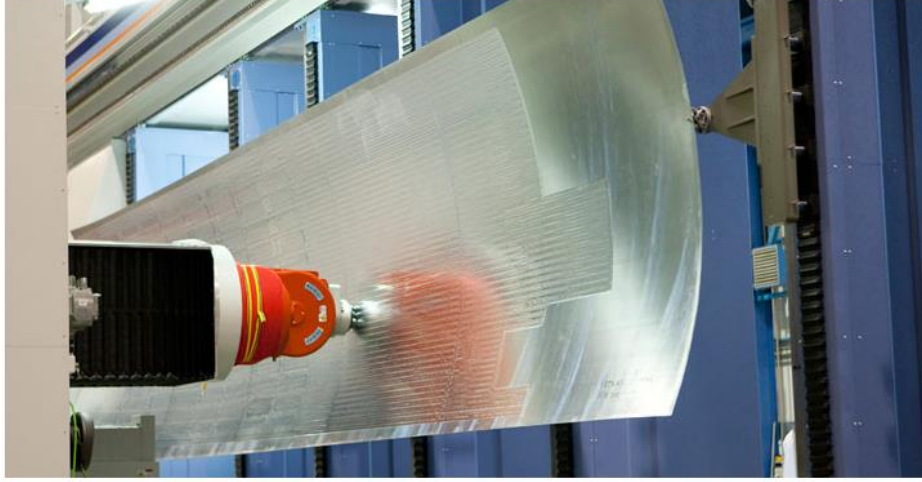


Şekil 2.12 İkiz kesici (ayna frezeleme) işleme tekniğinde kesme kuvvetlerinin şematik gösterimi (Izamshah vd. 2018).

Ayna frezeleme yönteminde iki iş milinden oluşan kenetleme sistemindeki konumları genellikle tasarlananla eşleşmez, gerçek parça geometrisi varyasyonları nedeniyle üst kesişme alanları meydana gelir (Mahmud vd. 2015, Do vd. 2018).

M.Torres firması tarafından Şekil 2.13 te gösterilen çift kafalı mekanizma ile donatılmış bir ayna frezeleme mantığına dayanan yüzey frezeleme makine merkezi geliştirilmiştir.

Bir kafaya takılan kesici takım, panelin bir tarafından malzemeleri çıkarmak için kullanılır. Çift kafalar aynı anda hareket ederek panelin kalınlığı ölçülürken aynı zamanda yardımcı destek sağlar.

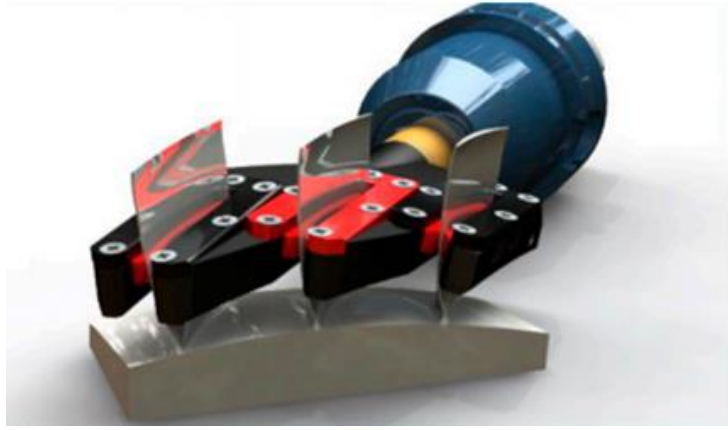


Şekil 2.13 M-Torres firmasının ürettiği yüzey frezeleme makinesi (İnt. Kyn. 2).

Gövde panellerinin frezelenmesi için endüstriyel düzeyde çözümler uygulanmıştır. Ancak yeniden tasarım için ön ölçüm tekniklerini kullanmaları gerektiğinden ve yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle hala sınırlıdır.

Yekpare bloklarda işleme operasyonları ve parçayı sabitlemeye yarayan elemanlar son parçalar için işleme toleranslarını sağlamaz ve tüm işleme sürecinin zorluğunu artırır. Parça deformasyonunu azaltmak ve belirli işlerin tasarımını doğrulamak için parametreler veya takım yolu seçmeye izin veren endüstride farklı iş tutma ve takviye cihazları kullanılabilir. Pervaneler, kanatlar, kanatçıklı diskler genellikle sıkma basıncını düşürmeye çalışan olası mekanik deformasyonu azaltan hidrolik parçalar veya özel çeneler kullanılarak kelepçelenir. Bu sistemler, ilk kaba talaş işleme adımları için titreşimleri ve sapmayı önleyebilir, ancak işleme performansı ek iş tutma aparatları kullanılarak iyileştirilebilir. İşleme parametrelerini ve operasyon verimliliğini artırmak ince duvar parçaların işlenmesi için cihazlar tasarlanmıştır. Cihazlar FEM çalışmalarına dayanarak öngörülen optimal pozisyon için bir destek uygulamaktadır (Wan vd. 2013, Wang vd. 2015).

Şekil 2.14 te Innoclamp şirketinin ürettiği ince duvar iş parçası tutma aparatına bir örnek gösterilmektedir. İş parçası kesme enerjisini parça boyunca telafi etmek için özel olarak tasarlanmıştır. Pozisyon simülasyonlar kullanılarak tanımlanır ve destekler en esnek pozisyonlarda uygulanır. Sistem genellikle gömülü sensörler içerir, bu nedenle işleme ve çalışma durumuna bağlı olarak iş tutucusunun davranışını değiştirmek mümkündür.

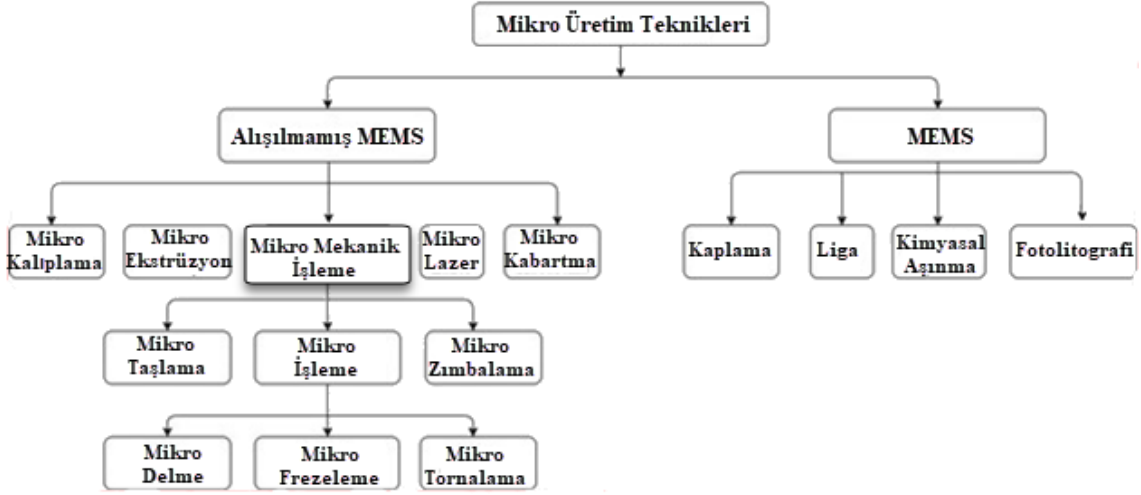


Şekil 2.14 Innoclamp şirketinin ince duvar geometriler için tasarladığı iş parçası tutucu sistemi (İnt. Kyn. 3).

Alternatif olarak düşük rijitlikte parça işleme sırasında stabiliteyi korumak için hareketli destek elemanları kullanılır. Çözümlerin çoğu takıma senkronize olarak hareket eden bir destek elemanı olan ayna frezeleme mantığına dayanmaktadır.

2.4 Mikro İnce Duvar Geometriler İçin Kullanılan Üretim Yöntemleri

Günümüz imalat teknolojisinde mikro parçaların üretiminde çok farklı yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu imalat yöntemleri üretilecek geometrinin boyutlarının yanı sıra kullanıldıkları mekanizmaya göre de sınıflandırılmaktadır. Bu yöntemlerin çalışma prensibi, talaş kaldırma işleminin kimyasal, elektriksel, ultrasonik ve mekanik etkilerle uzaklaştırılması esasına dayanır (Masuzawa 2000). Bu üretim yöntemlerini Mikro Elektro Mekanik Sistem (MEMS) ve alışılmamış MEMS olarak iki gruba ayırmak mümkündür (Şekil 2.15). MEMS yönteminde 1 ile 100 μm ebatları arasındaki parçalar üretilirken, alışılmamış MEMS yönteminde 100 μm ve üzerindeki ebatlarda parçalar üretilmektedir (Madou 2011).



Şekil 2. 15 Mikro üretim teknikleri (Venkatesh vd. 2016).

Şekil 2.15 te de görüldüğü üzere mikro mekanik kesme işleminin farklı uygulama şekilleri bulunmaktadır. Geleneksel kesme işlemlerinde olduğu gibi mikro mekanik kesme işlemlerinde de frezeleme, delik delme ve tornalama işlemleri yapılmaktadır. Mikro mekanik kesme işlemi son 20 yılda hem araştırmacıların hem de endüstrinin dikkatini çekmiştir. Mekanik kesme, iyi bilinen bir alan olduğundan, geleneksel veya makro kesme işleminden elde edilen bilgiler, mikro kesme proseslerini incelemek üzere uyarlanmıştır (Çelik 2017).

Yüksek en-boy oranına sahip ince duvarlar, mikro frezeleme yönteminin avantajlarından dolayı genellikle bu şekilde imal edilirler. Mikro frezeleme yöntemi; küçük yük oluşturma, yüksek işleme hassasiyeti, geniş işleme aralığı, üstün çalışma performansı ve benzeri birçok avantaja sahiptir (Dornfeld vd. 2006, Fabia vd. 2017). Diğer mikro üretim işlemlerinden daha hızlı ve daha ucuz olduğu için neredeyse tüm malzemelerde 3D karmaşık mikro özelliklerin üretilmesinde kullanılan çok yönlü bir işlemdir.

2.4.1 Mikro Frezeleme

Sanayideki gelişmeler ile makine endüstrisi birçok farklı alanda küçük mekanizmalara ihtiyaç duymuştur. Bu da her alanda küçük ve hayatı kolaylaştıran mekanizmalara yönelimi artırmıştır. Özellikle makine ile ilgili diğer bilim dallarının (elektronik,

biyomedikal vb.) bir araya geldiği alanlarda mikro parçalara olan ihtiyaç önemli bir çıkış noktası olmuştur. Her alanda mekaniğin elektrik-elektronikle birleştiği hatta bilgisayar yazılımlarının da dahil olduğu makineler kullanılmaktadır. Ayrıca savunma sanayisindeki gelişmeler minyatür parçalara ve makinelere duyulan ihtiyacı daha da artırmıştır. Minyatür parçalara olan ihtiyacın artması ile yeni bir talaşlı imalat yöntemi doğmuştur.

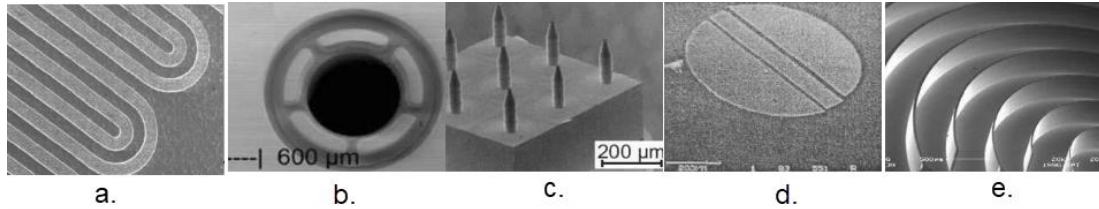
Mikro mekanik imalat yöntemi olarak adlandırılan yöntem aslında torna, freze, delme, taşlama işlemlerinin minyatür makinelerle ve çok küçük çaplı takımlarla yapılan işleme yöntemidir (Friedrich and Coane 1997, Dhanorker and Özel 2008).

Bu işleme yönteminin temelini makro imalat yönteminin oluşturduğu söylenebilir. Makro imalat ile mikro imalatın talaş kaldırma yöntemleri aynı olsalar bile aralarında büyük farklılıklar bulunmaktadır. Bazı kaynaklarda makro ve mikro frezelemenin genel farklılıkları şu şekilde ele alınmıştır; Makro frezelemenin talaş kaldırma teorisi, mikro frezelemenin talaş kaldırma teorisinden farklıdır. Çünkü makro frezelemedeki dış etkenler ve takım talaş etkisinin buna verdiği tepki ile mikro ölçekteki takım talaş etkisi ve buna verdiği tepki aynı değildir. (Li et al. 2007, Zhu et al. 2009, Heamawatonachai and Bomberg 2009). Konvansiyonel freze tezgahları ile aynı özellikleri taşısa da mikro freze tezgahları küçük olması ve yüksek devirlerde çalışması, çok küçük çaplı takımların kullanılması makrodan ayıran en büyük özelliklerdir. Mikro frezeleme işleminin diğer mikro üretim yöntemlerinden en büyük farkı hızlı imalat süreci ve düşük üretim maliyetidir. (Dhanorker and Özel 2008).

Konvansiyonel freze tezgahları veya farklı üretim yöntemleri ile üretilen üç boyutlu karmaşık mikro parçaların mikro frezeleme yöntemiyle daha hızlı, kolay ve hassas bir yüzey kalitesiyle üretilebildiği görülmüştür. (Lee ve Dornfeld 2004, Ducobu vd. 2009). İki frezeleme yönteminde de kesme işlemi; keskin bir takımın iş parçası ile mekanik etkileşimi ile gerçekleşir. Takımın tanımlanmış yollar boyunca malzemeden parça koparılmasına ve malzemeden koparılan parçaların talaş biçiminde çıkarılması ile sonuçlanır.

Mikro kutuplar, dişli milleri, çubuklar ve kaburgalar gibi yüksek en boy oranlarına sahip mikro yapılar, mikro frezeleme ile işlenen en yaygın olarak bilinen örneklerdir (Je vd. 2004, Bang vd. 2005). Buna ek olarak, yüksek en boy oranlı mikro yapılar sıklıkla mikro işleme proseslerinin kapasitesini değerlendirmek için bir kriter olarak kullanılır (Masuzawa 2000, Uriarte vd. 2005).

Şekil 2.16, mikro mekanik kesme ile üretilen yüksek hassasiyetli mikro bileşenlerin ve mikro yapıların bazı örneklerini göstermektedir. Bu örnekler, karmaşık 3D geometrilere sahip mikro bileşenlerin sadece silikondan değil, çeşitli malzemelerden yapılması gerektiğini göstermektedir (Cheng ve Huo 2013). Özellikle işlenmesi zor olarak nitelendirilen ve biyomedikal endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımları ve kalıp sektöründe kullanılan sertleştirilmiş çelikler de mikro frezeleme yöntemi ile şekillendirilmesi gerekebilmektedir. Bu durumda başta hızlı takım aşınması olmak üzere birçok problem de gün yüzüne çıkmaktadır. Mikro frezelemede birçok araştırmaya konu olan boyut etkisi, hızlı takım aşınması, çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü gibi konular tezin ilerleyen bölümlerinde ele alınmıştır.



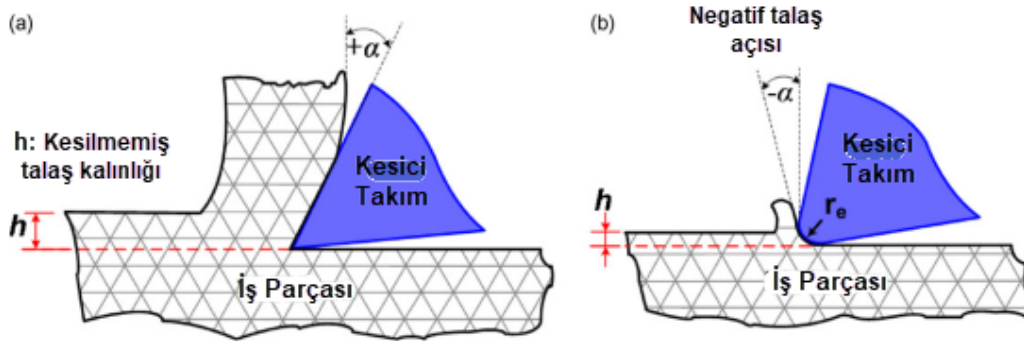
Şekil 2.16 Yüksek hassasiyette frezelenmiş mikro parça örnekleri: a. Mikro Reaktör (Huo vd. 2010) b. Mikro Kalıp (Weule vd. 2001) c. Sıralanmış Mikro İğneler (Takeuchi vd. 2006) d. Nükleer Füzyon İçin Metal Yaprak (Huo vd. 2010) e. Mikro Duvarlar (Weck vd. 2001).

2.4.1.1 Mikro Frezelemede Boyut Etkisi ve Minimum Talaş Kalınlığı

Geleneksel frezeleme ile mikro frezeleme her ne kadar benzerlik gösterse de talaş kaldırma işlemlerinde iş parçasından kaldırılan talaş kalınlığının farkı büyüktür. Mikro frezelemede asıl talaş kaldırma işlemini kesici takım kenar radyüsü yapmaktadır. Ancak geleneksel frezelemede talaş derinliği kesici kenar radyüsünden büyük olduğundan talaş kaldırma işlemi normal seyrinde devam etmekte ve düzgün bir talaş akışı oluşmaktadır. (Vogler vd. 2004, Chae vd. 2006). Mikro frezelemede diş başına düşen ilerleme

değerinin, kesici takım kenar radyüsüne oranı çok büyük önem taşır. Ayrıca talaş kaldırma esnasında takım kesme kenarı yarıçapı ile negatif talaş açısı, işleme esnasında yüzeyin elastik deformasyonu, minimum talaş kalınlığı gibi bazı kritik konuları gündeme getirmektedir.

Makro ölçekli talaş kaldırma işlemlerinde, kesilmemiş talaş kalınlığı genellikle takımın kesme kenarı yarıçapından daha büyüktür, bu nedenle kenar köşeleri ihmal edilebilir ve takımların keskin olduğu varsayılır. Ek olarak, etkili talaş açısı neredeyse nominal takım talaşı açısına eşittir. Bu durumda, malzemeden talaş kaldırma yöntemi, temel olarak geleneksel kesme mekanizmalarının prensiplerine dayandığı söylenebilir. Kesilmemiş talaş kalınlığı, takımın kenar yarıçapı ile aynı büyüklükte olduğunda takımlar artık keskin olarak kabul edilemez. Takımın keskinliğini kaybetmesinin nedeni talaş açısının negatif bir değer almasıdır. Bu durumda kesici takım artık yüzeyden talaş kaldırmak yerine, kazıma işlemi yapmaya başlar. Makro ölçekli ve mikro ölçekli talaş kaldırması Şekil 2.17 de şematik olarak gösterilmiştir. Kesilmemiş talaş kalınlığı, talaş kaldırma sırasında takımın kesici kenar yarıçapı belirli kritik değere düştüğünde, talaş oluşmaz ve bu değer minimum talaş kalınlığı olarak adlandırılır (Wu ve Cheng 2013).



Şekil 2.17 Kesici takımın iş parçasından talaş kaldırma şematik gösterimi (a) makro ölçekli talaş kaldırma, (b) mikro ölçekte talaş kaldırma (Aramcharoen ve Mativanga 2009).

Kesilmemiş talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından daha küçük olduğunda, takımında sadece negatif bir talaş açısı oluşmaz aynı zamanda iş parçası yüzeyinde elastik ve plastik deformasyona neden olur. Sıkıştırma kazıma işlemi yapmış olur. Yüzeyde meydana gelen elastik deformasyonun geri toparlanması ile birlikte yüzeyin pürüzlülüğü de ciddi anlamda bozulur (Vogler vd. 2004). Bu kazınma olayı artan kesme

kuvvetlerine ve çapak oluşumuna daha büyük özgül kesme enerjisine ve düşük yüzey kalitesine neden olduğu görülmüştür (Lee ve Dornfeld 2004, Lucca vd. 1991, Ng vd. 2006).

Mikro frezeleme için ticari olarak temin edilebilen kesici takımlar normal olarak fabrikasyon sınırlamaları nedeniyle kesme kenarı yarıçapları 0,8 µm ile 5 µm arasındadır. Takım çapının azaltılmasıyla, takımdeki radyal sapmada önemli hale gelmektedir. Artan radyal sapma takım kenarlarının dengesiz aşınmasına ve erken takım kırılmalarına neden olabilmektedir. Mikro frezelemede ilerleme hızı düşük seçilerek, kesme kuvvetlerinin ve talaş yükünün azaltılması, beraberinde kazınmanın oluşmasına da zemin hazırlayacağı unutulmamalıdır. İlerlemenin büyük seçilmesi, kazınmayı bertaraf edebilir ama talaş yükünü arttırdığı için takım kırılma riski de artar. Bu nedenle kesme parametrelerinin dikkatli seçilmesi ve kesme öncesinde kesici takıma ait bazı kritik geometrik verilerin (kenar radüsü, maksimum kaldırabileceği talaş derinliği vb.) dikkate alınması gereklidir (Aslantaş vd. 2018, Uzun vd. 2014).

2.5 Kesme Parametrelerinin Etkisi

İnce duvarları, düşük rijitlikleri ve mekanik özelliklerinin sürekli değişimi ile tanımlamak mümkündür. Düşük rijitliğe sahip olduklarından esneme ve bükülmeleri kolaydır. Bu gerçek, kesme işlemi sırasında dinamik ve statik problemlere yol açar. Bir yandan dinamik kararsızlıklar artar ve titreşimler meydana gelir. Bu da son parçanın yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasını artırır (Bravo vd. 2005, Arnaud vd. 2010). Parçanın düşük rijitliği ile ilişkili diğer bir temel sorun boyutsal hatadır. Parçanın sapsması nedeniyle meydana gelen statik bir sorundur. Statik sapma, kesme kuvvetlerinin etkileşimi nedeniyle ortaya çıkabilir (Wan vd. 2008). Bu durumda deformasyon genellikle kesme stratejisine ve kesme kuvvetlerini tanımlayan kesme parametrelerine bağlıdır (Sol vd. 2019). Kesme parametreleri öncelikli olarak mikro frezelemedeki kuvvetleri etkiler. Bunlar kesme hızı (V_c), kesme derinliği (a_p , a_e) ve diş başına ilerlemedir (f_z). Yüksek değerli işleme parametreleri kullanmak verimliliği artıracaktır. Mikro parçalarda ve mikro takımlarda eğilmeye ve hatta takım kırılmasına neden olur. Bu nedenle takım üreticisi firmanın önerdiği kesme parametrelerini kullanmak ilk bakışta yapılacak olan en güvenli yol olabilir. Özellikle çok küçük

ilerleme değerlerinin seçilmesi boyut etkisi nedeniyle, kesme işleminin olumsuz etkilenmesine neden olabilir (Ikawa vd. 1992, Kim vd. 2004).

Elastik ve plastik deformasyonlar genellikle ince duvarın mikro frezelenmesinde meydana gelir ve ince duvarda meydana gelen plastik deformasyon telafisi mümkün olmayan bir problemdir. İşlemenin doğruluğunu artırmak ve deformasyonun elastik aralıkta olmasını sağlamak için kesme parametrelerinin doğru seçilmesi önem arz etmektedir (Liu vd. 2017). İnce duvar kalitesini artırmak için birçok araştırmacı titreşimi azaltmak ve sistem için en iyi parametreleri seçme çalışmaları yapmıştır (Li vd. 2015). İnce duvar yapısına sahip mikro geometrinin frezelenmesinde en önemli kesme parametresi diş başına ilerleme değeridir. Sonrasında, aksenal ve radyal talaş derinliği, gelmektedir (Vukman vd. 2016).

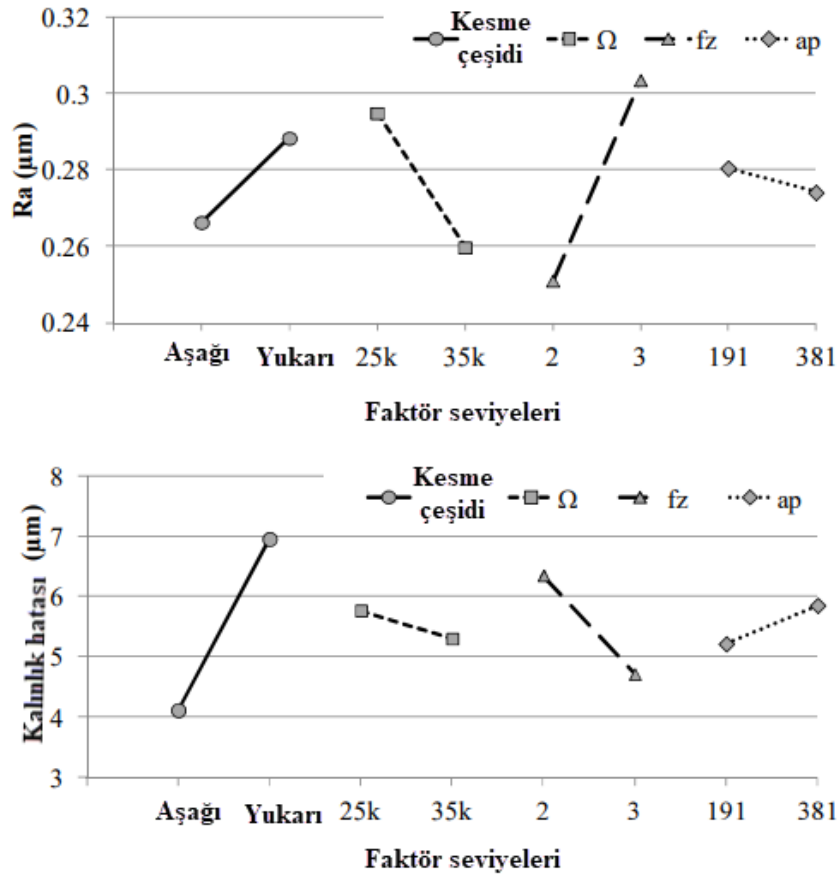
2.5.1 Aksenal Kesme Derinliğinin Etkisi

Wang vd. (2018), yaptıkları çalışmada ince duvarlı parça işlenirken aksenal kesme derinliğinin kuvvet, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata üzerindeki etkilerini de araştırmışlardır. Deneyler ilk aşamada tek faktörlü olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Çizelge 2.1 deki kesme parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 2. 1 Deneylerde kullanılan kesme parametreleri (Wang vd. 2018).

No.	İş mili hızı n (min^{-1})	Aksenal kesme derinliği a_p (μm)	Radyal kesme derinliği a_c (μm)	Diş başına ilerleme f_z ($\mu\text{m}/z$)
1	60000	60	500	0.1, 0.3, 0.5, 1, 1.5, 2
2	60000	10, 15, 20, 30, 60	500	1
3	60000	60	50, 150, 250, 350, 500	1

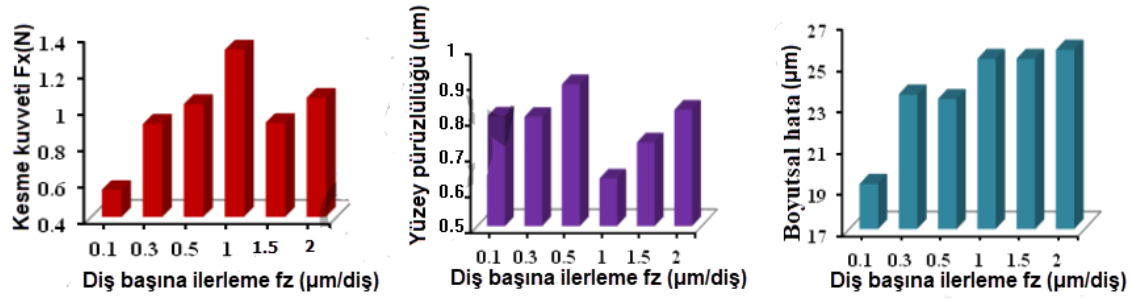
Çalışmalarında duvar kalınlığını 50 μm olarak belirlemişlerdir. Tüm frezeleme işlemlerinde frezeleme yöntemi, aynı yönlü frezeleme seçilmiş ve tüm ince duvarların yükseklikleri, radyal kesme derinliğine eşit alınmıştır. Yaptıkları tek faktörlü deneylerde farklı aksenal kesme derinliği (a_p) dikkate alınarak, F_x kesme kuvveti, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata üzerindeki etkileri elde edilmiştir (Şekil 2.18). Şekil 2.18 den de görüldüğü üzere artan aksenal talaş derinliği ile birlikte hem kuvvet değerleri



Şekil 2.20 Ana etki grafikleri (Agirre vd. 2012).

2.5.2 Diş Başına İlerlemenin Etkisi

Wang vd. (2018) yaptıkları çalışmada diş başına ilerleme parametresindeki değişimin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata üzerine etkisini de araştırmışlardır. Şekil 2.21 de gösterildiği gibi diş başına ilerleme (f_z) 0,1 $\mu\text{m}/\text{diş}$ 'ten 1 $\mu\text{m}/\text{diş}$ artarken kesme kuvveti de lineer olarak artmaktadır. Fakat $f_z=1,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ olduğunda F_x kuvveti azalmış ve bunun nedeni olarak da mikro kesme işlemindeki boyut etkisi gösterilmiştir. Benzer bir durum yüzey pürüzlülüğü için de gözlemlenmektedir. Yüzey pürüzlülüğü açısından $f_z=1 \mu\text{m}/\text{diş}$ olması ile R_a değerleri minimum olarak elde edilmiştir. Şekil 2.21 de dikkati çeken diğer bir sonuç ise artan f_z ile birlikte mikro duvardaki boyutsal hata değerinin de artmasıdır.



Şekil 2.21 Diş başına ilerleme (fz) değerindeki değişimin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hata üzerindeki etkisi (Wang vd. 2018).

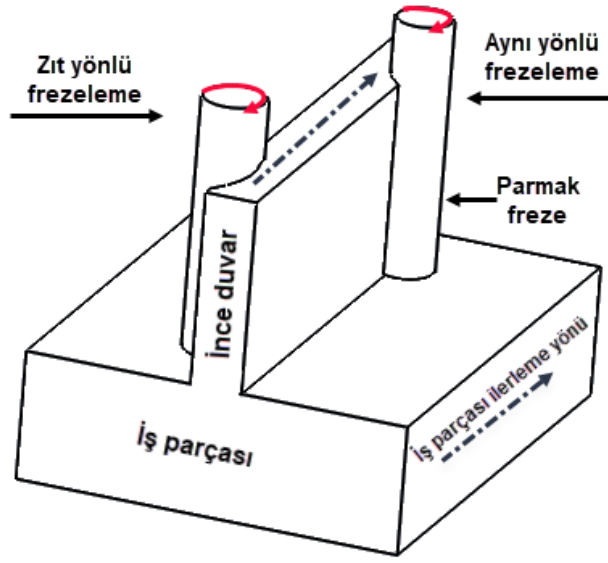
Liu vd. (2017) nin yapmış oldukları çalışmada da bakır iş malzemesi olarak kullanılmış ve farklı kesme parametreleri için mikro ince duvar geometrisindeki boyutsal hata ve çapak oluşumunu araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre bakır malzeme için aynı yönlü frezelemenin, zıt yönlü frezelemeye oranla daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ayrıca kesme sırasında yüksek ilerleme değerlerinin kullanılması kesme kuvvetlerini artırdığı için ince duvarda plastik deformasyon miktarının da arttığı ifade edilmiştir.

2.6 İnce Duvar İşleme Stratejileri

İnce duvar geometriye sahip parçaların rijitliği düşüktür, ancak bu durum kesme işlemi sırasında takımın farklı konumları için önemli ölçüde değişir. Buna ek olarak sertlik, sürekli olarak malzemenin iş parçasından çıkarılması işlemi ile birlikte değiştiğinden farklı takım yolları ince duvarlı yapıların farklı eğilimlerine yol açar. Bu nedenle uygun bir işleme stratejisinin veya takım yolunun seçilmesi de çok önemlidir (Vukman vd. 2016).

2.6.1 Frezeleme Yönteminin Etkisi

Kesicinin dönme (kesme hızı) yönü ve ilerleme (f) yönü arasındaki ilişkiye bağlı olarak çevresel frezeleme zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme operasyonları olarak ikiye ayrılır (Tlustý 2000, Groover 2002). Yapılan araştırmaların çoğunda da deneyler gerçekleştirilirken frezeleme yönteminde aynı yönlü/zıt yönlü frezelemeye dikkat edilmiştir. Aynı yönlü ve zıt yönlü frezeleme yöntemi Şekil 2.22 de gösterilmiştir.

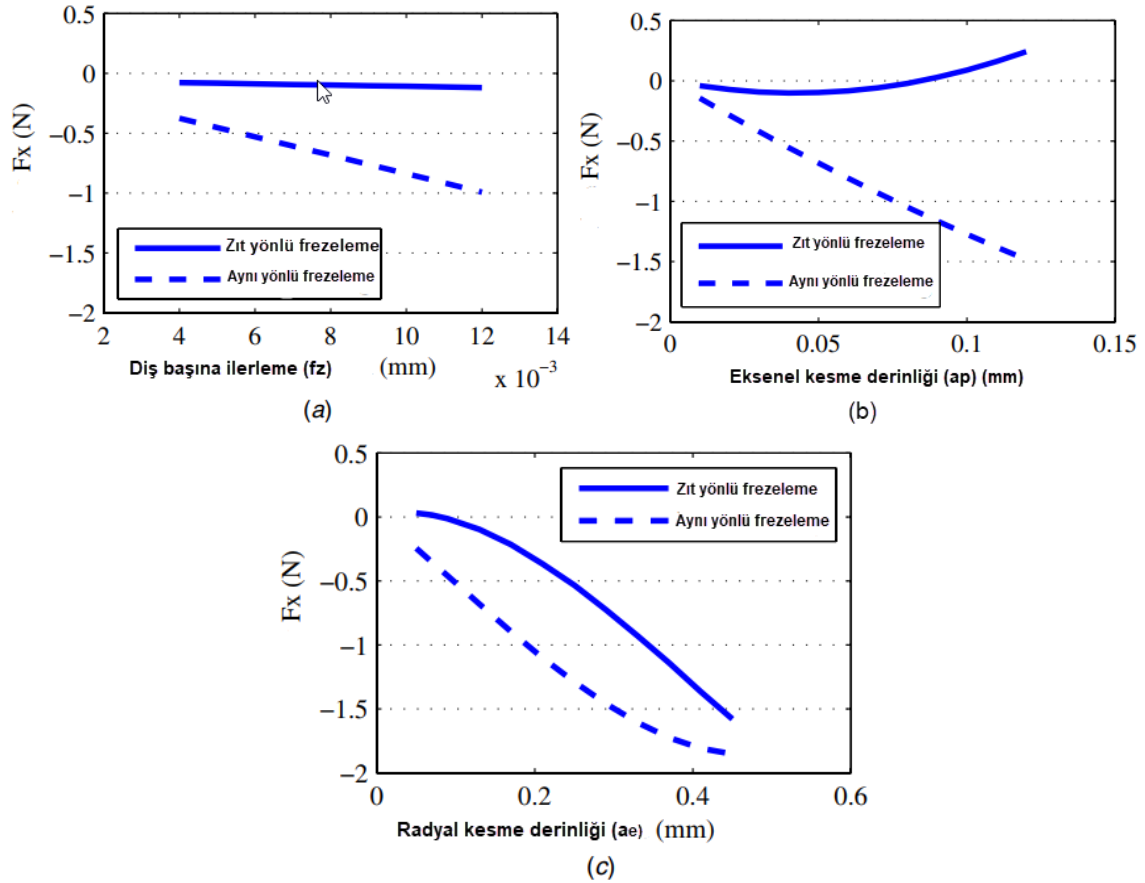


Şekil 2.22 Aynı yönlü ve zıt yönlü frezelemenin şematik gösterimi.

Zıt yönlü frezelemede kesici ağızlar iş parçasından talaş kaldırmaya başladığında dönme hareketinin yönü ilerleme yönüne zıttır. Aynı yönlü frezelemede ise, kesici ağızlar iş parçasından talaş kaldırmaya başladığında dönme hareketinin yönü ilerleme yönü ile aynıdır. Bu iki frezeleme tarzının izafi geometrileri kesme hareketlerinde farklılıklara neden olmaktadır (Groover 2002). Zıt yönlü frezelemede kesme başlangıcında talaş kalınlığı sıfırdır (Tlusty 2000). Talaş kalınlığı kesme süresince artar ve kesici ağız iş parçasını terk edeceği zaman maksimum olur (Tlusty 2000, Groover 2002, Kalpakjian ve Schmid 2006). Zıt yönlü frezelemede kesme prosesi iş parçası yüzey karakteristiklerinin fonksiyonu değildir ve yüzeydeki oksit katmanı takım ömrünü olumsuz şekilde etkilemez. Aksi takdirde, kesici ağız kesmeye başlamadan önce yüzeye sürtünerek körelecektir. Ancak, kesici takım tırlamalara, iş parçası da yukarıya doğru çekilmeye eğilim gösterebilir. Bu nedenle, iş parçasının güvenli şekilde bağlanması gerekir. (Kalpakjian ve Schmid 2006). Aynı yönlü frezelemede ise, tersi bir durum vardır. Kesme talaş kalınlığının maksimum olduğu iş parçası yüzeyinden başlar ve kalınlık kesme süresince azalır (Kalpakjian ve Schmid 2006, Groover 2002). Ayrıca, kesme kuvvetinin aşağıya doğru olan bileşeni ince parçaların sabit tutulmasını sağlar. Ancak, bu operasyonda rijit bir iş bağlama düzeneği kullanılmalıdır. Aynı yönlü frezeleme soğuk şekillendirilmiş metaller ve dövme ve döküm prosesleri ile üretilmiş yüzeyi oksitli parçaların işlenmesi için uygun değildir. Oksit katmanı sert ve aşındırıcı olup, aşırı aşınmaya ve hasara, dolayısıyla takım ömrünün kılmasına yol açar

(Kalpakjian ve Schmid 2006). Aynı yönlü frezelemede talaş uzunluğu zıt yönlü frezelemeye göre daha kısadır. Bu durum kesici dişlerin iş parçasıyla daha kısa süre temas halinde olması anlamına gelir ve aynı yönlü frezelemede takım ömrünün artmasına yol açar (Groover 2002).

Li vd. (2010) yaptıkları çalışmada ilk olarak her bir işleme parametresinin (f_z , a_p ve a_e) F_x ortalama kuvveti üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Burada F_x kuvvetinin dikkate alınma nedeni ise ince duvarı yanal olarak deforme eden radyal kuvvet olmasıdır. Kesme kuvvetleri zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme yöntemi için Şekil 2.23 te gösterildiği gibidir. Şekil 2.23(a) ve Şekil 2.23(c)'den, a_e 'nin etkisinin f_z 'nin etkisinden daha önemli olduğu görülmektedir. Bu durum kesme parametrelerinde a_e seçiminin önemli olduğunun ipucunu vermektedir. Şekil 2.23(b)'den a_p artışının (küçük bir aralık içinde) ortalama kuvveti önemli ölçüde artırmadığı gözlemlenmiştir. Bu iş parçası kalitesini etkilemeden verimliliği artırmak için daha büyük bir a_p değerinin (belirli bir dereceye kadar) kullanılabileceği anlamına gelir (Liv d. 2010).



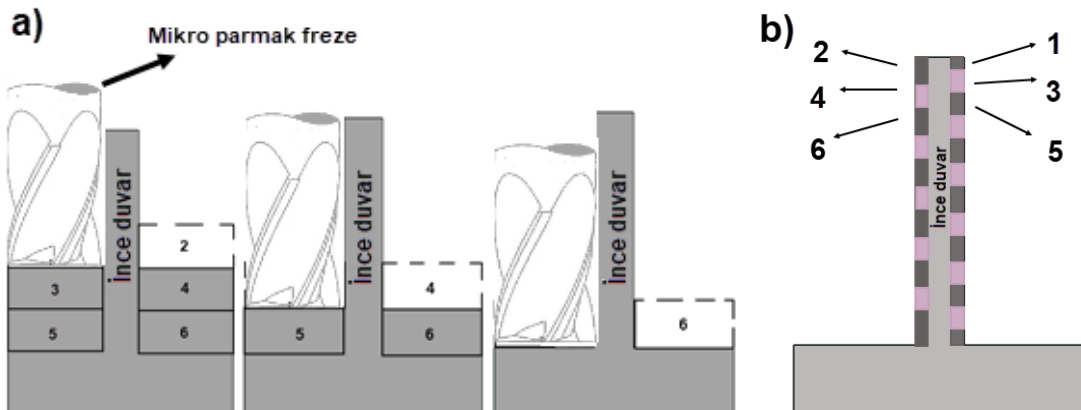
Şekil 2.23 (a) Diş başına ilerleme (f_z) değişiminin aynı ve zıt yönlü frezeleme yönteminde kesme kuvvetine etkisi, (b) Eksenel kesme derinliği (a_p) değişiminin zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme yönteminde kesme kuvvetine etkisi, (c) Radyal kesme derinliği (a_e) değişiminin zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme yönteminde kesme kuvvetine etkisi (Li vd. 2010).

Aynı yönlü frezeleme için F_x kuvveti zıt yönlü frezelemeye göre her zaman daha yüksektir. Bu durum, ince duvar yapıların mikro frezelenmesi için zıt yönlü frezelemenin tercih edilen bir yöntem olduğunu açıkça göstermektedir. Zıt yönlü frezeleme için kuvvetin büyüklüğünün kesme genişliği (a_e) ve diş başına ilerleme (f_z) ile arttığı gözlenmektedir. Şekil 2.23(a) ve Şekil 2.23(c)'den, a_e 'nin etkisinin f_z 'nin etkisinden daha önemli olduğu görülmektedir (Li vd. 2010).

Michalik vd. (2014), yaptıkları çalışmada ise aynı ve zıt yönlü frezeleme yöntemi kullanarak ince duvarları frezelerken, sabit kesme koşullarında yüzey pürüzlülüğü (R_z) için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Modele bağlı olarak, daha yüksek kaliteli ve daha doğrusal yüzey pürüzlülüğü elde etmek için ince duvarlı parçaların üretiminde aynı yönlü frezeleme yöntemini önermişlerdir.

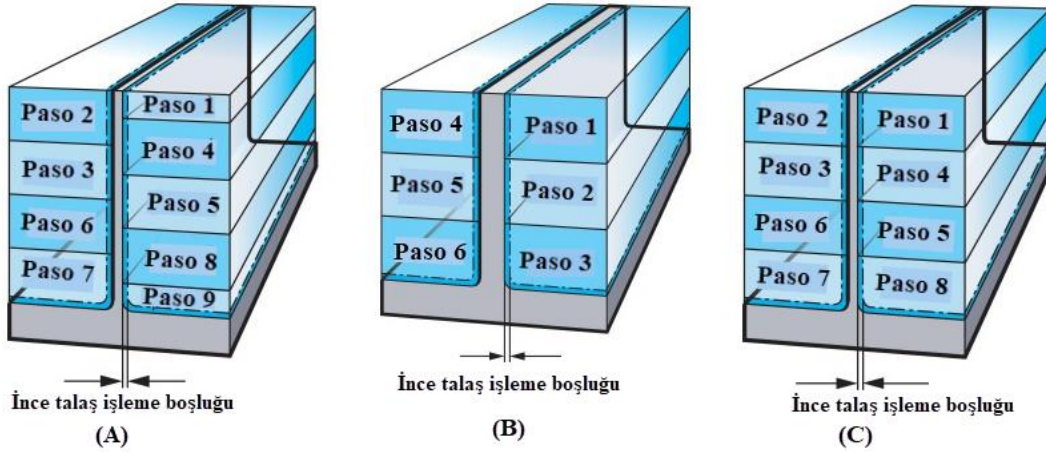
2.6.2 Kesme Stratejileri

İnce duvar yapıların frezelenmesinde ister geleneksel işleme yöntemi kullanılmış olsun ister mikro frezeleme yöntemi kullanılmış olsun belirli bir kesme stratejisinin kullanıldığı görülmektedir. Kesme stratejisi ile kastedilen şey, ince duvar yapıyı oluştururken kullanılan kesme yöntemi veya boşaltma metodudur. İnce duvar yapılar oluşturulurken aslında temelde iki farklı yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi; takım çapına eşit ve tam kanal genişliğinde iki taraflı yapılan boşaltma işlemidir (Şekil 2.24a). ikincisi ise var olan bir geometriyi her iki tarafından incelterek istenilen ince duvar kalınlığının elde edilmesidir (Şekil 2.24b). Her iki yöntemde de kesme için kullanılan sıralama kendi içinde ayrı bir öneme sahiptir. Bu nedenle literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ağırlıklı olarak kullanılan/önerilen bazı kesme stratejilerine rastlamak mümkündür.



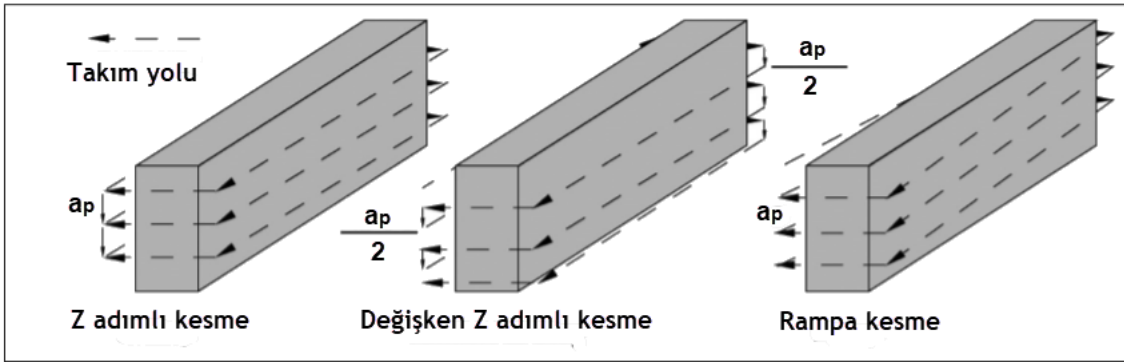
Şekil 2.24 a) takım çapı kadar frezelenerek ince duvar oluşturma b) var olan bir ince duvarın yan yüzeylerinden talaş almak sureti ile kalınlığının azaltılması

İnce duvarları frezelemek için en yaygın yaklaşımlar, yapının her iki tarafında farklı modellerde değişen geçişlere dayanmaktadır (su hattı stratejisi). Şekil 2.25 te duvar inceldikçe farklı önerilerde bulunulan bu stratejilerden bazıları gösterilmektedir. Şekil 2.25 teki durum A, yükseklik-kalınlık (h/t) oranları 15'ten küçük olan duvarlar için tavsiye edilir ve h/t oranı 30'un üzerinde olan duvarlar için B ve C durumları önerilir. Sandvik firması tarafından önerilen bu yaklaşımlar sadece parça sapmasını en aza indirmek için yapılan önerilerdir.



Şekil 2.25 İnce duvar işlemede kullanılan kesme stratejileri (İnt. Kyn. 4).

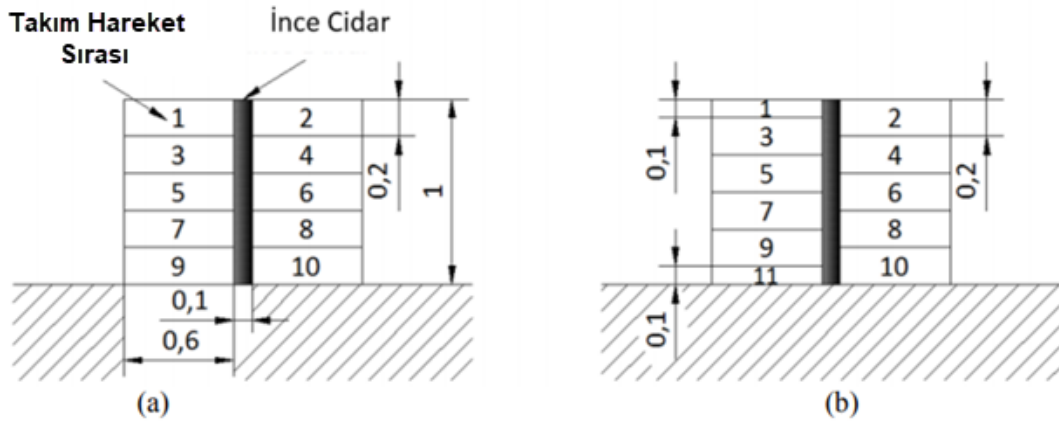
Lianos vd. (2014), ince duvarların işlenmesinde takım yolunun etkisini incelemiştir. Çalışmasında pirinç ve alüminyum alaşımı iki ayrı malzeme ile oluşturulan ince duvarların işleme kalitesi üzerine kesme parametreleri ve frezeleme yönteminin etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak Z adımlı bir kesme stratejisi ve aynı yönlü frezelemenin pirinç malzemede işleme kalitesini olumlu etkilediğini, alüminyum alaşımı malzeme için de rampa frezeleme stratejisi (Şekil 2.26) ve aynı yönlü frezeleme yönteminin uygun olduğu sonucuna varmıştır.



Şekil 2.26 Takım yolu stratejileri (Lianos vd. 2014).

Popov vd. (2006) yaptıkları çalışmada ise pirinç malzeme üzerine yüksek en boy oranlı ince duvar yapıları, kesme kuvvetleri nedeniyle ince duvar bükülmesini önlemek için özel mikro freze takım yolları uygulayarak işlemişlerdir. Bununla birlikte takım yolu deneyler sırasında kesme kuvvetleri ölçülmemiş duvar deformasyonu ve kalınlık hatasını incelemek için sadece nitel bir yaklaşım uygulamışlardır.

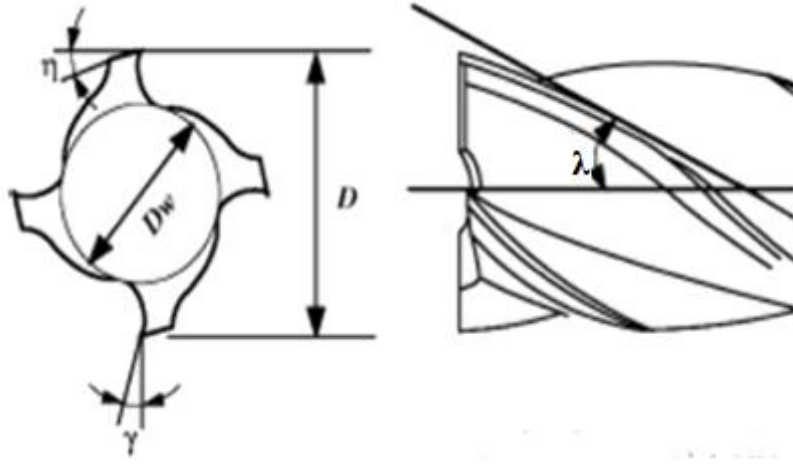
Kuram (2016) yaptığı çalışmada yüksekliği 1 mm kalınlığı 100 μm olan, yükseklik/kalınlık oranı 10 olan ince duvarlı parçalar elde etmiştir. İnce duvarlı parçaların işlenmesinde iki farklı takım yolu; su yolu (Z adımlı) ve adım destekli (değişken z adımlı) takım yolunu seçmiştir. Deneysel çalışmada, adım destekli kesme stratejisinin daha az çapak oluşturduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte maksimum takım aşınmasının adım destekli kesme stratejisinde meydana geldiği de vurgulanmaktadır.



Şekil 2.27 İnce cidarların işlenmesinde talaş kaldırma yolları (a) su yolu, (b) adım destekli, tüm ölçüler mm cinsindedir (Kuram 2016).

2.7 Kesici Takım Geometrisinin Etkisi

İnce duvarlı bir yapıyı frezelerken kesme parametreleri ve stratejisi kadar kullanılan kesici takım geometrisi de önemlidir. Özellikle kesici takımın kenar radyüsü ki aşınmış olan takımlarda bu kenar radyüsü daha büyük olacaktır. Kenar radyüsünün artması da kesme işlemini zorlaştıracığı için ince duvarın sapmasını artıracaktır. Bir parmak frezenin temel geometrik özellikleri Şekil 2.28 de gösterildiği gibi çap (D), çekirdek çapı (D_w), kesici ağız sayısı (z), talaş açısı (γ), boşluk açısı (η) ve helis açısı (λ) ndan oluşur. Geometrik özelliklerin her birinin kendine özgü bir işlevi vardır (Izamshah vd. 2013). Fakat ince duvar yapıların frezelenmesinde ağız sayısı ve helis açısı en önemli iki geometrik parametredir. Bundan sonra talaş açısı ve boşluk açısı gelir ki, bunlar da kesici ağızın keskinliğini belirleyen iki geometrik unsurdur.

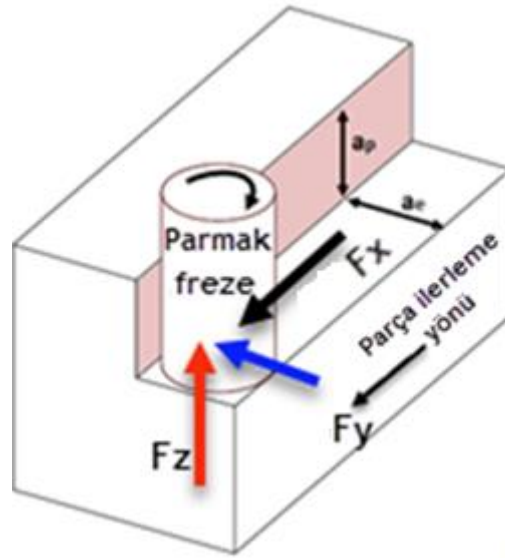


Şekil 2.28 Parmak freze geometrik özellikleri (Izamshah vd. 2013).

Oluk sayısı parmak frezenin rijitliğini etkileyebilir. Talaş açısı değeri kesici kenarın rijitliğini ve dolayısıyla takımın rijitliğini etkiler. Pozitif talaş açısına sahip bir parmak freze, kesme sırasında daha düşük kesme kuvvetlerinin oluşmasına katkıda bulunur. Daha büyük bir boşluk açısı, yüzey pürüzlülüğünü artırırken, talaş kaldırılma işlemini kolaylaştıracaktır. Frezeleme işleminde, helisel kesici kenarlar, genellikle düz kesici kenarlara göre tercih edilir. Sarmal bir kesme kenarı talaşları kesme bölgesinin yukarı ve dışına hareket ettirmeye yardımcı olur ve aynı zamanda mükemmel bir yüzey kalitesi oluşturur. Helis açısı birkaç dişin aynı anda kesme işlemi yapmasına izin verir, bu da daha düzgün kesme işlemine neden olur. Genel işleme prosesi için standart parmak freze helis açısı, keskinlik ve kesme kenarı gücü için 30° ve 45° arasındadır. Bu karbon çelikleri, bazı takım çelikleri ve hatta alüminyumdan hafif son işleme geçişleri için yeterlidir. Bununla birlikte, paslanmaz çelikleri işlerken, iş sertleştirme etkilerini azaltmak ve daha serbest bir kesme işlemi teşvik etmek için daha keskin bir kesme kenarı kullanılmalıdır. 45° helis açısının iyi olduğu yer burasıdır, çünkü gerekli keskinliğin yanı sıra yine de bazı keskin kenar kuvvetleri olacaktır. Bu açı, daha derin bir yuvaya veya çevresel kesime geçen alüminyum için de iyidir. Ancak kesicinin çekirdek çapı arttıkça mevcut talaş boşluğu azalır. Talaşın parçadan uzaklaştırılması da biraz sarmal açısına bağlıdır. Yüksek sarmal açısı için bu daha kolaydır. Bununla birlikte helis açısı arttıkça kesici kenar zayıflar (Izamshah vd. 2013).

İnce duvar geometriye sahip parçaların işlenmesi, iş parçasından büyük malzeme hacmi kaldırıldığından çok aşamalı bir şekilde gerçekleştirilir. İlk adım kaba işleme ve

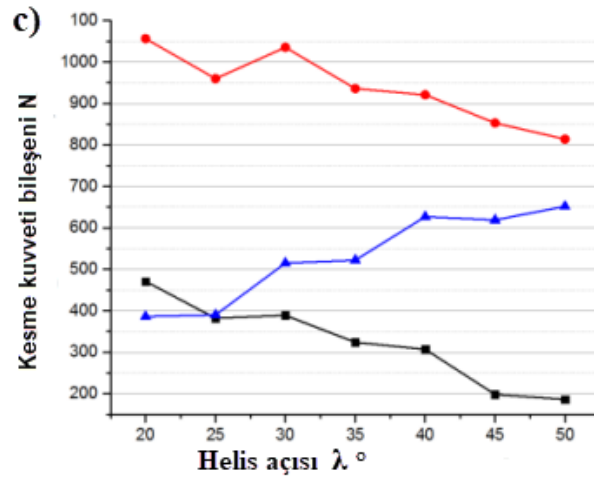
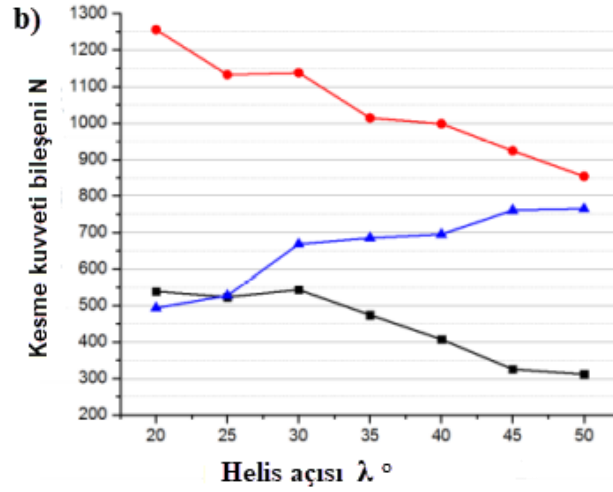
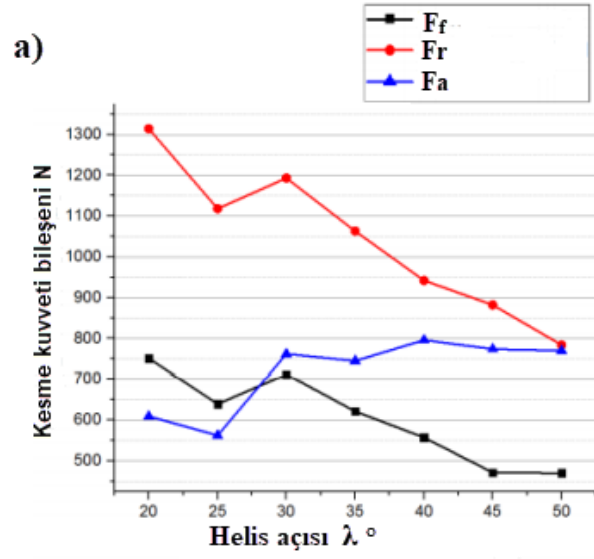
şekillendirme için malzemeyi mümkün olan en kısa sürede çıkarmayı içeren yüksek performanslı işleme kullanılmaktadır. Yüksek performanslı işleme, inkar edilemez avantajlara ek olarak bazı sınırlamalara sahiptir. Yüksek performanslı işleme, yüksek kesme kuvveti bileşen değerlerinin oluşmasına sebep olur. Kesme işlemi sırasında oluşan bu kesme kuvveti bileşenleri; normal ilerleme kuvveti F_x , radyal kuvvet F_y , ve eksenel kuvvet F_z (Şekil 2.29).



Şekil 2.29 Kesme esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin şematik gösterimi.

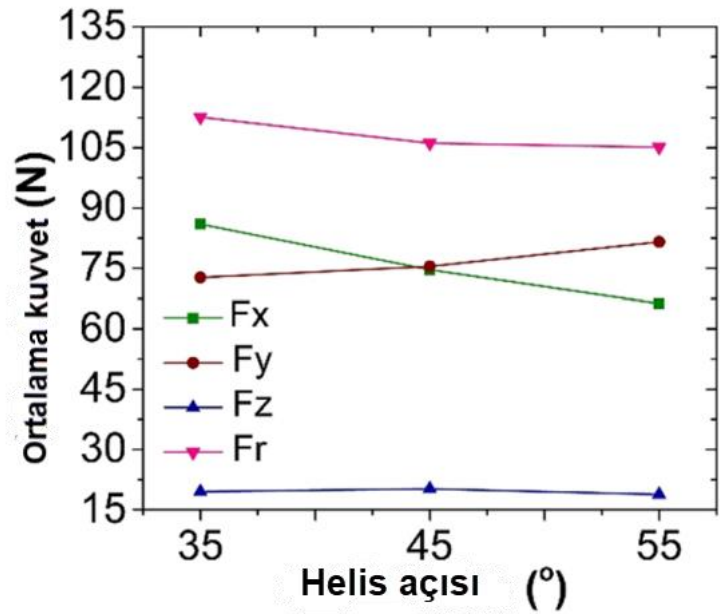
Bu kuvvetler, frezeleme işleminin stabilitesini etkiler ve iş parçası üzerinde etkili olur (Delio 2002, Burek ve Plodzien 2012). Kesme kuvvetlerinin yüksek değerleri nedeniyle hem kesici takımında elastik deformasyon hem de iş parçasının ince duvarında meydana gelebilir. Yüksek hızlı işlemede büyük takım boyutları, ince iş parçası duvarları ve yüksek kesme kuvveti bileşenleri, makinede kendinden tahrikli titreşimler oluşturma riskini de artırır. Bu nedenle, yüksek frezeleme performansı sağlamak için kesme kuvveti bileşenlerinin azaltılması arzu edilir (Delio 2002, Izamshah vd. 2013, Kuczmaszewski ve Zaleski 2015). Kesme kuvvetlerini azaltmanın yollarından biri, takımın geometrik parametreleri kesme kenarının şekli ve helis açısının seçimidir (Burek ve Plodzien 2012, Burek vd. 2015). Örneğin, dalgalı ve kesintili bir kesme kenarı profili kullanmanın kesme kuvvetinde, kesintisiz kesme kenarı şekline kıyasla yaklaşık %30 bir azalmaya katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Burek vd. 2015, Burek vd. 2016).

Burek vd. (2017), yaptıkları çalışmada helis açısının kesme kuvveti bileşenleri ve titreşim genlik değerleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde 20 mm çapında ve 5° artışla, 20° ile 50° aralığında helis açısına sahip karbür parmak frezeler kullanmışlardır. Şekil 2.30 da helis açısının değişimine göre kesme kuvvetleri bileşenlerindeki değişim gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, helis açısının artması, radyal kuvvet (F_r) ve ilerleme kuvveti (F_f) azalmasına neden olduğu ve tüm deneylerde helis açısının artmasıyla aksenal kuvvetin (F_a) arttığı gözlenmiştir.



Şekil 2.30 Kesme kenarının λ helis açısının işleme parametreleri için kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki etkisi: a) $a_e=8\text{mm}$, $f_z=0.15\text{mm/diş}$, b) $a_e=12\text{mm}$, $f_z=0.10\text{mm/diş}$, c) $a_e=16\text{mm}$, $f_z=0.075\text{mm/diş}$ (Burek vd. 2017).

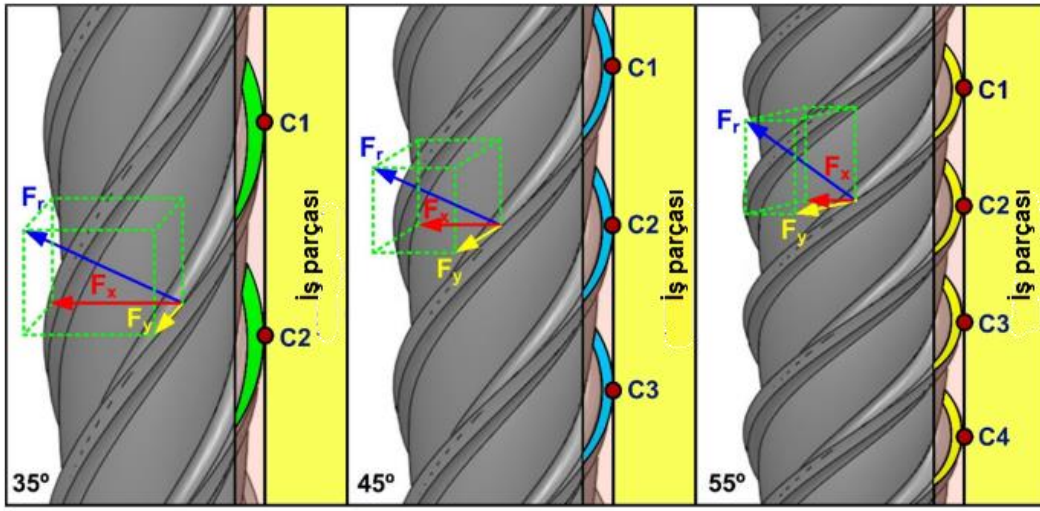
Şekil 2.30 dan da görüldüğü üzere daha büyük helis açılarının kullanılması, kesme sırasında meydana gelen radyal kuvvetin de azalmasına neden olmaktadır. Bu sonuç özellikle ince duvar frezelemesi için önemlidir. Özellikle Şekil 2.24b deki gibi bir ince duvar işleniyor ise kesme sırasında meydana gelen radyal yükü azaltmak için ince duvarın deformasyonu açısından avantaj sağlayabilir. Bu ifadeyi doğrulayan bir sonuç Joshi ve Bolar (2020) tarafından yapılan bir çalışmada da elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmada Al2024-T351 alaşımı üzerinde farklı parmak freze geometrisine sahip kesici takımlar kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. 35°, 45°, 55° helis açısına sahip, parmak frezeler kullanmışlardır. 1.25 mm kalınlığında 24 mm yüksekliğinde ve 50 mm uzunluğunda ince duvarlar oluşturmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre artan helis açısı ile birlikte radyal yönde meydana gelen kesme kuvveti (F_x) azalmaktadır (Şekil 2.31). Şekil 2.32’de verilen F_r kuvveti, F_x ve F_y kuvvetlerinin bileşkesini ifade etmektedir.



Şekil 2.31 Helis açısındaki değişime bağlı olarak ortalama kuvvet bileşenlerinin değişimi (Joshi ve Bolar 2020).

Buna ek olarak Şekil 2.32 de görüldüğü gibi, düşük helis açısına sahip bir takım durumunda belirli bir aksel kesme derinliği için aksel temas noktalarının sayısı daha azdır. Sonuç olarak kesilen malzeme hacmi her temas noktasında daha yüksek olur. Bu da kesilmemiş talaş hacmini ve dolayısıyla ortaya çıkan yükü artırır. Helis

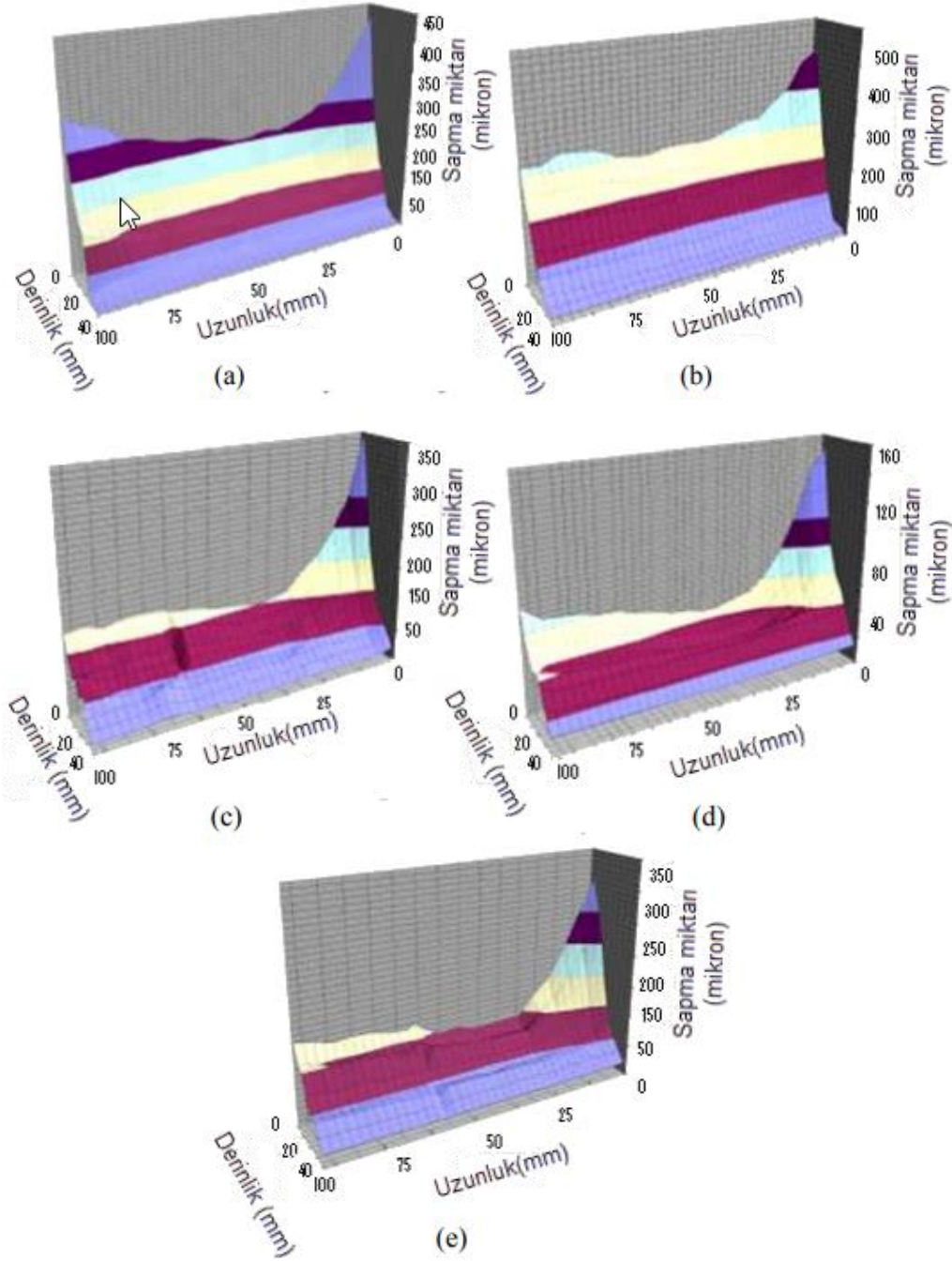
açısının değeri arttıkça aksel temas noktalarının sayısı artar (Baowan vd. 2017, Joshi ve Bolar 2020). Bu durum her bir aksel temas noktası için kesilecek malzemenin hacmini azaltır böylece kesme kuvveti azalmış olur. Ayrıca yüksek helis açılı bir takım kullanarak işleme, etkin talaş açısını azaltır ve böylece kesme kenarının keskinliğini artırır (Kim vd. 2002). Bu da daha pürüzsüz ve etkili işlemeye yardımcı olarak kuvvet değerini azaltır. Ancak kesici takımın helis açısı 45° ve 55° e çıktıkça takım kesme kenarları neredeyse yatay olarak yönlendirilir. Bu durum F_y kuvvet bileşeninin yanı sıra ortaya çıkan F_r kuvvetinin radyal olarak yönlendirilmesine neden olur.



Şekil 2. 32 İnce duvar işleme anında helis açısının değişimi ile frezeleme kuvveti bileşenleri ve iş parçası temas noktaları şematik gösterimi (Joshi ve Bolar 2020).

Helis açısı etkisine bağlı yapılan bir diğer çalışmanın deneysel sonuçları Şekil 2.33 te verilmiştir (Izamshah vd. 2013). Çalışmada $25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ ve 45° için değişen helis açılara bağlı olarak duvar sapmasının miktarları tespit edilmiştir. Helis açısının değiştirilmesine yönelik biçim hataları duvar esnekliğinin azaldığı parçanın üst kısmına kıyasla alt konumlarda daha küçüktür. Malzemenin çıkarılması sonucu duvarın azalan rijitliğinden dolayı, ilerleme yönünde iki bölge (başlangıç ve bitiş) arasında artan boyutsal hatalar göze çarpmaktadır. Büyük ölçüde duvar ne kadar esnek olursa kesim sırasında daha yüksek yüzey hataları ortaya çıkmaktadır. 40° ve 45° helis açısının kullanıldığı kesme işlemlerinde ince duvardaki boyutsal sapma minimum düzeydedir. Küçük helis açılara sahip parmak frezelerin titreşim ve parmak frezenin iş parçası malzemesi ile temas ettiği sürenin azalması nedeniyle iş parçasını saptıran yüksek

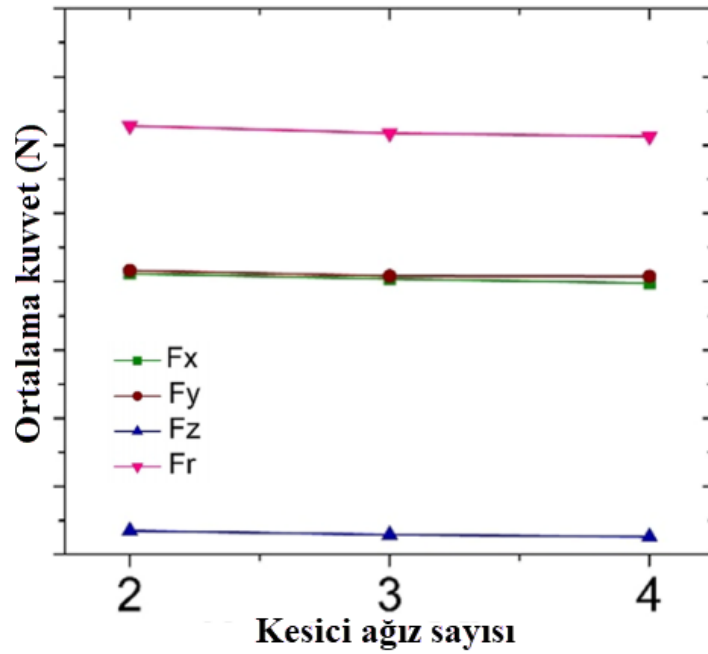
kesme kuvvetlerine neden olduğunu gösterir. Parmak freze helis açısının, ince duvarlı bileşenlerin işlenmesi sırasında duvar sapsmasının büyüklüğünü etkilediğini göstermektedir. Helis açısı değeri arttıkça duvar sapsmasının büyüklüğü azalır. Helis açısı 40° ile 45° arasında değişen parmak frezeler, ince duvar uygulaması frezeleme için tavsiye edilir.



Şekil 2. 33 Değişken helis açıları için parça sapsmasının 3 boyutlu grafiği (a) 25° , (b) 30° , (c) 35° , (d) 40° , (e) 45° (Izamshah vd. 2013).

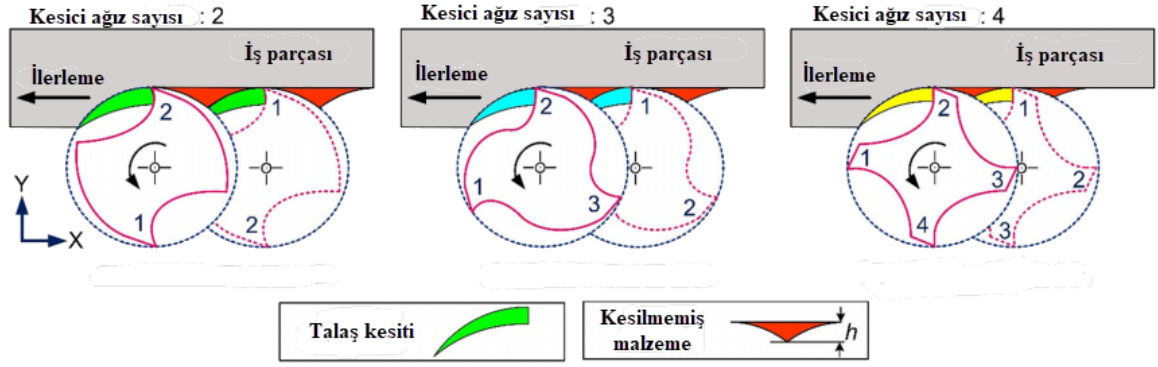
2.7.2 Kesici Ağız Sayısının Etkisi

Joshi ve Bolar (2020), yaptıkları çalışmada kesici ağız sayısının etkisini de araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre kesici ağız sayısındaki değişim, frezeleme kuvvet bileşenleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir (Şekil 2.34). Frezeleme kuvveti bileşenlerinin (F_x ve F_y) ve sonuçta ortaya çıkan kesme kuvveti F_r 'nin, kesici ağız sayısındaki artışla çok az azaldığı Şekil 2.34 te görülmektedir.



Şekil 2.34 Kesici ağız sayısındaki değişime bağlı olarak ortalama kuvvet bileşenlerinin değişimi (Joshi ve Bolar 2020).

Kesici takım ağız sayısındaki değişime göre iş parçası ile kesici ağızların temas süreleri farklılık göstermektedir. İki ağızlı bir parmak freze için her bir kesici kenarın iş parçasıyla temas süresi daha fazladır. Bu durum talaş yükünü artırır ve frezeleme kuvvetinin artmasına neden olur. Ancak daha yüksek kesici ağız sayısına sahip takımlar için her bir kesici ağızın iş parçası ile temas süresi azalır. Böylece talaş yükü ve frezeleme kuvveti azalmış olur. Kesici ağız sayılarına göre iş parçası teması Şekil 2.35 te gösterilmiştir (Joshi ve Bolar 2020).



Şekil 2.35 Kesici ağız sayısındaki değişime göre iş parçasından talaş kaldırma şematik gösterimi (Joshi ve Bolar 2020).

Genel bir frezeleme işleminde, kesme sırasında oluşan radyal (F_r), teğet (F_t) ve aksel (F_a) kuvvetler Denklem 2.1 ile hesaplanır. Talaş kalınlığına, kesme derinliğine ve kesme katsayılarına bağlıdır (Altıntaş 2012).

$$\begin{aligned}
 dF_{t,j}(\phi, z) &= [K_{tc}h_j(\phi_j(z)) + K_{te}] dz, \\
 dF_{r,j}(\phi, z) &= [K_{rc}h_j(\phi_j(z)) + K_{re}] dz, \\
 dF_{a,j}(\phi, z) &= [K_{ac}h_j(\phi_j(z)) + K_{ae}] dz
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$h_j(z)$ talaş kalınlığıdır ve Denklem 2.2 kullanılarak hesaplanabilir. Bir frezeleme işleminde, talaş kalınlığı kesici takım ucunun konumuna göre sürekli olarak değişir. K_{tc} , K_{rc} ve K_{ac} sırasıyla teğetsel, radyal ve aksel kesme kuvveti katsayılarıdır. K_{te} , K_{re} ve K_{ae} kenar kuvveti katsayılarıdır.

$$h_j(\phi, z) = f_z \sin \phi_j(z) \tag{2.2}$$

burada $h_j(z)$, aksel koordinatı z olan aksel diferansiyel elemanla ilgili daldırma açısıdır. dz aksel uzunluktur ve Denklem 2.3 ile hesaplanabilir:

$$dz = \frac{D_1}{\tan \lambda} d\phi(z) \tag{2.3}$$

burada D_1 kesici takım çapı ve λ helis açısıdır. Tam kanal frezeleme işleminde, çıkış

açısı 180° iken takımın giriş açısı sıfırdır. Diş başına ortalama kuvvetler, aşağıdaki gibi kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayıları kullanılarak Denklem 2.4 ile hesaplanabilir (Altıntaş 2012):

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_x &= \frac{Z a_p}{4} K_{tc} f_z + \frac{Z a_p}{\pi} K_{te} \\ \bar{F}_y &= \frac{Z a_p}{4} K_{rc} f_z + \frac{Z a_p}{\pi} K_{re} \\ \bar{F}_z &= \frac{Z a_p}{\pi} K_{ac} f_z + \frac{Z a_p}{2} K_{ae} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

burada z ve a_p sırasıyla kesme kenarı sayısı ve aksel kesme derinliğidir. Ortalama kesme kuvvetleri, diş başına ilerlemenin (f_z) doğrusal bir fonksiyonu ve kenar kuvvetlerinin eklenmesiyle aşağıdaki gibi Denklem 2.5 ile ifade edilebilir (Altıntaş 2012).

$$\bar{F}_q = \bar{F}_{qc} f_z + \bar{F}_{qe} \quad (q = x, y, z) \quad (2.5)$$

Deneysel her diş başına ilerleme için ortalama kuvvetler ölçülür ve kesme kenarı bileşenleri, verilerin lineer bir doğruya uyarlanması ile tahmin edilir. Kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayıları Denklem 2.6 kullanılarak elde edilmiş olur.

$$\left. \begin{aligned} K_{tc} &= \frac{4\bar{F}_{xc}}{Z a_p}, & K_{te} &= \frac{\pi\bar{F}_{xe}}{Z a_p}, \\ K_{rc} &= \frac{4\bar{F}_{yc}}{Z a_p}, & K_{re} &= \frac{\pi\bar{F}_{ye}}{Z a_p}, \\ K_{ac} &= \frac{\pi\bar{F}_{zc}}{Z a_p}, & K_{ae} &= \frac{2\bar{F}_{ze}}{Z a_p} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

İkiden fazla kesici ağıza sahip bir kesici takımla frezeleme yaparken, iş parçasıyla temas eden kenarların sayısı da artar. Doğal olarak, F_x ve F_y kuvvetlerinin de artması beklenir. Kesme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan katsayılar (K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} , K_{te} , K_{re} ve K_{ae}) ve kesici kenar sayısı ters orantılıdır (Denklem 2.6). Denklem 2.6, Denklem 2.4 te yerine yazıldığında kesici kenar sayısının kesme kuvvetine etkisi olmadığı görülmektedir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 İş Parçası ve Kesici Takım Özellikleri

Bu çalışmada, elektronik, havacılık, uzay, otomotiv, silah ve savunma sanayi alanında kullanılan hafif ve sünek bir malzeme olan Al7075-T651 alaşımı kullanılmıştır. 7XXX serisi alaşımlar içeriğinde çinko, bakır, düşük oranda magnezyum, krom ve zirkonyum alaşım elementleri bulundurduğundan, alüminyum alaşımları içerisinde mukavemeti en yüksek alaşım serisidir.

Alüminyum ve alaşımları hafiflik, yüksek dayanım, korozyon direnci ve şekillendirme kabiliyeti gibi mükemmel özelliklerinden dolayı endüstride yaygın kullanım alanına sahiptir. 7xxx serisi alüminyum alaşımları havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılan, malzemelerdir. Bu seriye dahil 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) alüminyum alaşımı da düşük özgül yoğunlukla birlikte yüksek bir dayanıma sahiptir. Bu üstünlüklerinden dolayı havacılık ve savunma sanayinde yoğun kullanılan bir malzemedir. Dövme alüminyum alaşımlarından olan 7xxx serisi alaşımlar ısıtma işlemi ile sertleştirilebilir. 7075 Al alaşımının en yüksek mekanik özelliğini T6/T651 ısıtma işlemi ile elde edilir (Hatamleh vd. 2009, Özyürek vd. 2012).

Alüminyum alaşımlarının ısıtma işlemi sırasında ortaya çıkan özellik değişimleri, çözünme ve belirli alaşım elemanlarının çökmesi ile gerçekleşir. Çökme sertleştirme aşırı doymuş katı fazdan zaman ve sıcaklık etkisiyle yeni bir fazın çökmesi sonucu malzemenin sertlik ve mukavemetinin artmasıdır. Isıtma işlemi, genel olarak mekanik ve fiziksel özellikleri geliştirmek amacıyla uygulanan ısıtma ve soğutma işlemi veya işlemler zinciridir (Geçkinli 2003).

Isıtma işlemi türleri için yapay yaşlandırma tipleri (T6, T7, T8) yüksek mukavemet sağladıkları için tercih edilmektedir (Kaya 2005). T6 ısıtma işleminde iş parçası öncelikle çözeltiye alma sıcaklığının üzerine kadar ısıtılıp parça kalınlığına göre belirli bir zaman beklenir daha sonra ani su verilerek aşırı doymuş çözelti oluşturulmuş olur daha sonra ise 160-190°C aralığında yapay yaşlandırarak süreç tamamlanır.

T651 ısıtıl işlemi de alüminyum malzemenin T6 ısıtıl işleminde olduğu gibi önce çözeltiye alınarak su verilmesi ve ardından da yapay yaşlandırması ile gerçekleşmektedir. Ancak T651 sürecinde su vermenin ardından oluşan kalıntı gerilmeler giderilerek yapay yaşlandırma sürecine geçilmektedir. T651 ısıtıl işlemi Çizelge 3.1 de verilen sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 3.1 Al7075-T651 alaşımının ısıtıl işlem özellikleri (İnt. Kyn. 5).

Tavlama sıcaklığı	413 °C
Yaşlandırma sıcaklığı	121 °C

İş malzemesi olarak seçilen Al7075-T651 alaşımının bazı kimyasal bileşimi Çizelge 3.1 ve mekanik özellikleri de Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Al7075-T651 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Çevik vd. 2014).

Malzeme (%Ağırlık)	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Al
7075-T651	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	0,18-0,28	≤ 0,30	Kalan

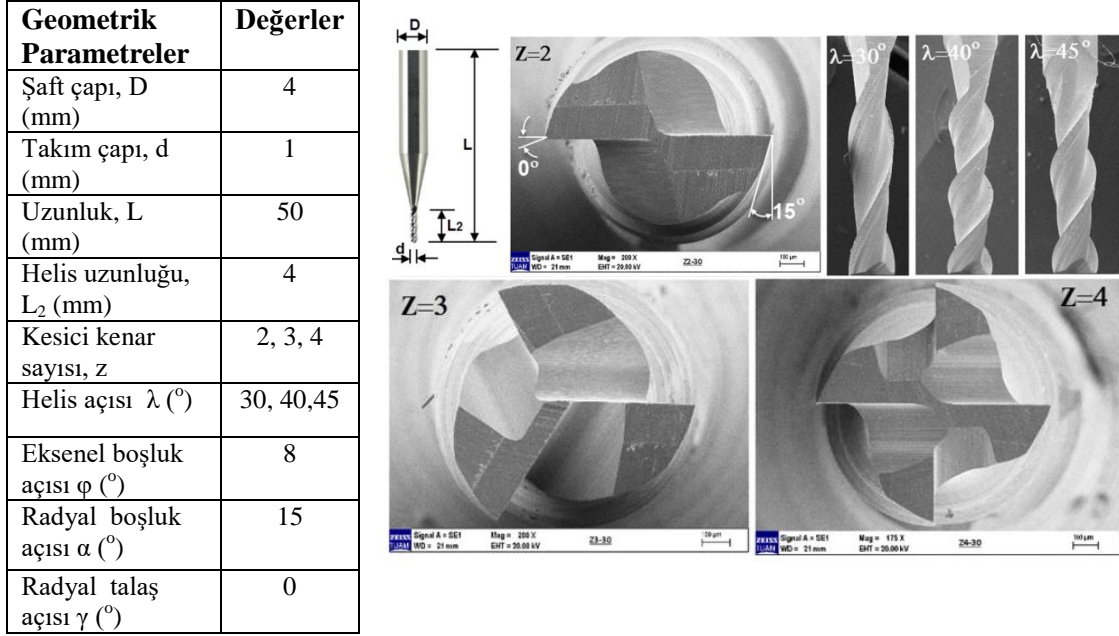
Çizelge 3.3 Al7075-T651 alaşımına ait mekanik özellikleri (Çevik vd. 2014).

Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Uzama %	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HR_B)
545,1	610,5	~12	72	~90

3.2 Kesici Takım Geometrik Özellikleri

Kesme parametrelerinin ve kesici geometrisinin ince duvar deformasyonu üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla deneylerde kullanılacak tungsten karbür parmak freze kesici takımlar Maraton Hole firması tarafından üretilmiştir. Mikro frezeleme deneylerinde kullanılan kesici takımlar tungsten karbür kobalt (%90WC-%10Co) bileşimidir. Kesici takım çapı 1 mm dir. Takım çapı ince duvar kalınlığına nazaran oldukça büyüktür. Takım çapı büyük seçilerek, takımdaki elastik deformasyonun minimum düzeyde kalması amaçlanmıştır. İnce duvarda meydana gelecek deformasyonu etkileyecek en önemli iki geometrik parametre (helis açısı ve kesici ağız sayısı) dikkate alınmıştır. Üç farklı ağız sayısı (z= 2, 3 ve 4) ve helis açısı ($\lambda= 30^\circ, 40^\circ$

ve 45°) dikkate alınmıştır. Kullanılan takımlara ait taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ve diğer geometrik detaylar Şekil 3.1 de verilmektedir.

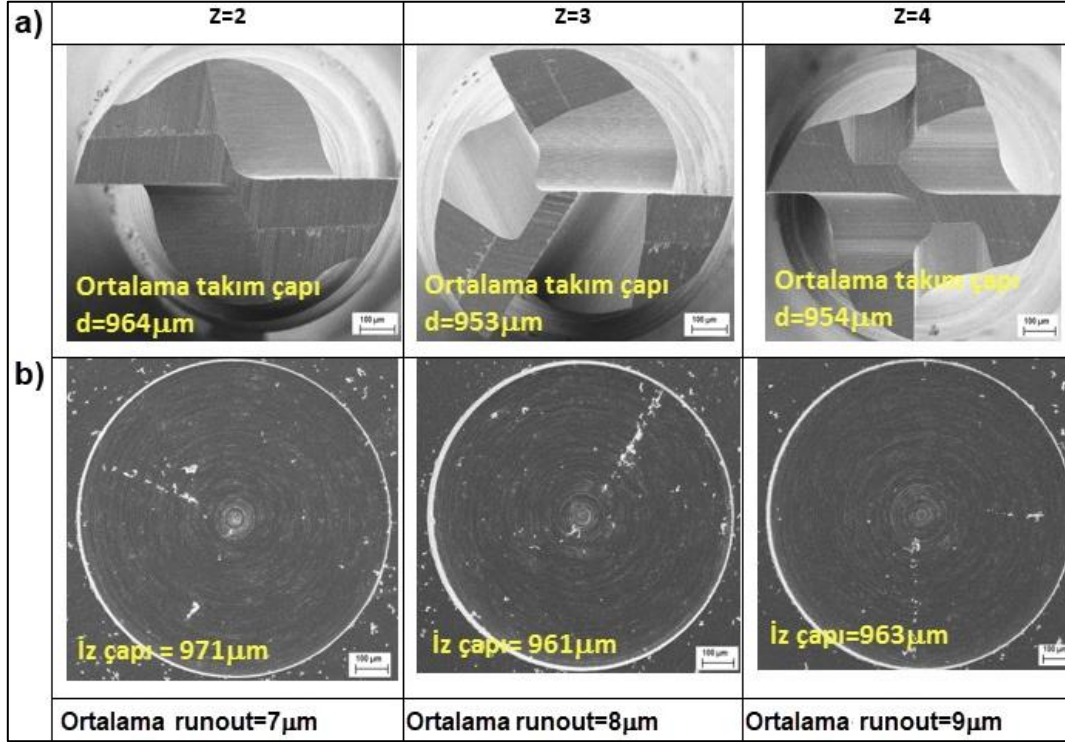


Şekil 3. 1 Kesme deneylerinde kullanılan kesici takıma ait geometrik parametreler.

3.3 Takım Radyal Sapma Miktarının Tespiti

Kesme sırasında meydana gelen radyal sapma kaçınılmazdır ve sıfıra indirmek neredeyse imkansızdır. Mikro işlemede run-out a neden olan iki unsur vardır. Bunlar; kesici takıma etki eden kesme kuvvetleri ve takımın üretimindeki tolerans aralığıdır. Takımdaki ve spindle daki run-out birleştiğinde kesme öncesindeki takım ucundaki toplam run-out değerini oluşturur. Bu çalışmada kesme testleri öncesinde takım ucunda meydana gelen run-out değeri tespit edilmiştir. Bunun için SEM görüntüleri kullanılarak takım çapları hassas olarak ölçülmüştür (Şekil 3.2a). İş parçası yüzeyinde dairesel bir cep oluşturmak için yaklaşık 10 μm derinlikte bir dalma frezeleme gerçekleştirilmiştir. Dairesel cep oluşturma işleminde kullanılan devir sayısı deneylerde kullanılan devir sayısı ($n=30000$ dev/dk) ile aynı alınmıştır. Gerçek takım salgısı, gerçek takım arasındaki farklar karşılaştırılarak ölçülmüştür. Oluşturulan dairesel geometrilerin çapları ölçülerek run-out değeri tespit edilmiştir (Şekil 3.2b). Yapılan ölçümler neticesinde takım çapı ile dairesel cepler arasındaki farkın maksimum 9 μm olduğu tespit edilmiştir. Takımın helis boyunu azaltmak suretiyle run-out değerini de azaltmak

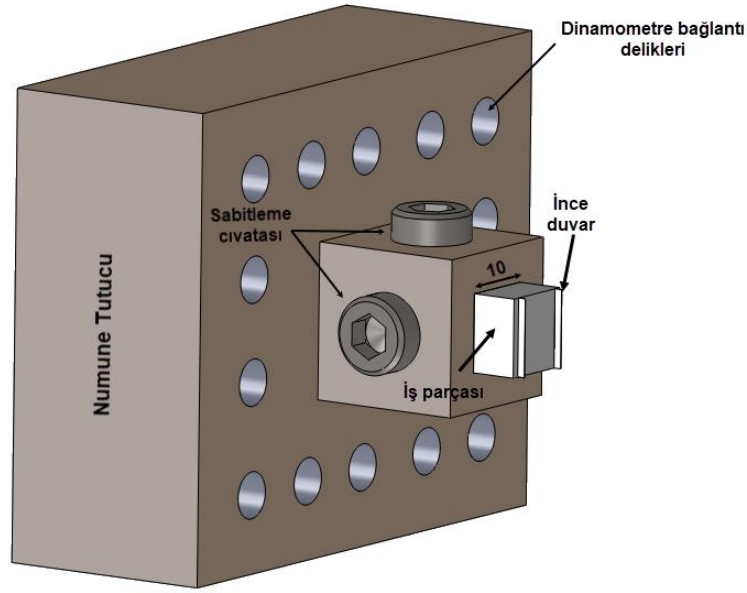
mümkündür. Fakat bu durumda ince duvar frezelemek için takım efektif kesme uzunluğu azaltılmış olacaktır. Bu çalışmada takımın pensin dışında kalan boyu 15 mm olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 3.2 SEM görüntüleri kullanılarak; a) hassas ölçülen takım çapları, b) İş parçası yüzeyinde oluşturulan dairesel geometrilerin çapları.

3.4 İş Parçasının Deney Şartlarına Uygun Olarak Hazırlanması

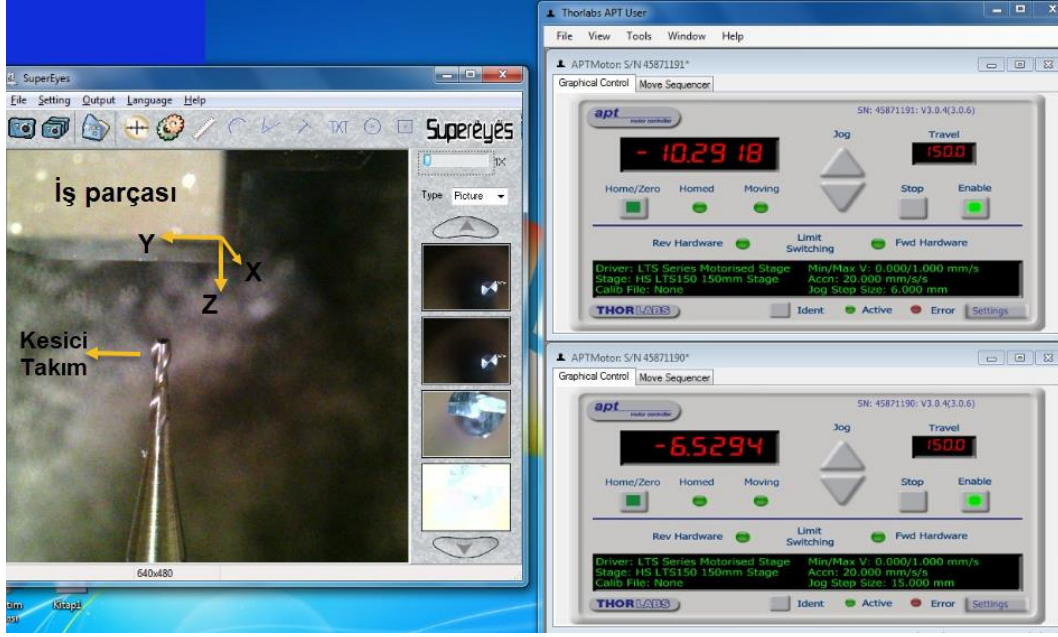
İş parçası malzemesi 20 mm kalınlığa sahip Alüminyum plakadan çıkartılmıştır. Numune boyutları 10x10x15 mm şeklindedir ve yüzeyleri düzeltilmiştir. Numuneyi dinamometreye sabitlemek için özel bir numune tutucu tasarlanmıştır (Şekil 3.3). Numune tutucunun dinamometre ile temas eden yüzeyi taşlanarak hassas işlenmiştir. Numune tutucuda yer alan kare delik ise tel erozyon yöntemi ile oluşturulmuştur. Numune tutucu dört köşeden alyen başlı civata ile dinamometreye sabitlenmiştir. İş parçası numunesi ise numune tutucu içerisinde yerleştirildikten sonra iki farklı yüzeyden civata ile sıkılarak sabitlenmiştir. Numune tutucu dinamometreye bir kez sabitlendikten sonra tekrar tekrar sökmeye gerek kalmadan iş parçası sökülüp takılabilmektedir.



Şekil 3.3 Deneylerde kullanılan numune tutucu.

3.5 Deney Düzenegi

Deneylerde mikro frezeleme işlemine uygun yüksek hızda ve yüksek hassasiyette kesme yapabilen özel dizayn edilmiş bir test düzenegi kullanılmıştır. Spindle'ın maksimum devir sayısı 60000 dev/dk'dır ve kendisine ait bir sürücü vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Test aparatında kullanılan eksenlerin hassasiyeti 0,1 μm ve tekrarlanabilirlik hassasiyeti 0,4 μm 'dir. Eksenlerin kontrolü ve deney esnasında kesme bölgesinin görüntülenmesi için kullanılan USB mikroskop yazılımına ait ekran görüntüsü Resim 3.1 de verilmiştir. Kesme kuvvetlerinin ölçümü için bir Kistler 9119AA1 marka mini dinamometre kullanılmıştır. Kesme kuvveti sinyalleri bir amplifikatör vasıtasıyla kuvvet ölçümlerine dönüştürülmüş ve Dynoware yazılımı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Kesici takım iş parçası yüzeyine göre sıfırlamak için dinamometreden alınan veriler kullanılmıştır. Dinamometreden veri alındığı esnada kesici takım iş parçasına 10 μm adımlarla yaklaştırılmıştır. Takım iş parçasına temas ettiğinde kesme kuvveti sinyallerindeki değişime bağlı olarak takım yüzeye sıfırlanmış olur (Resim 3.2). Resim 3.4 te mikro frezeleme işleminin gerçekleştirildiği deney düzenegi gösterilmektedir. Kesme sistemi titreşim izoleli bir masa üzerine sabitlenmiştir. Kesme esnasında kullanılan devir sayısı spindle'a ait sürücü ve sürücü yazılımı ile kontrol edilmiştir. Kesme sırasında sadece F_x ve F_y kuvvetlerinin ölçümü gerçekleştirilmiş olup data alma frekansı 50 kHz dir.

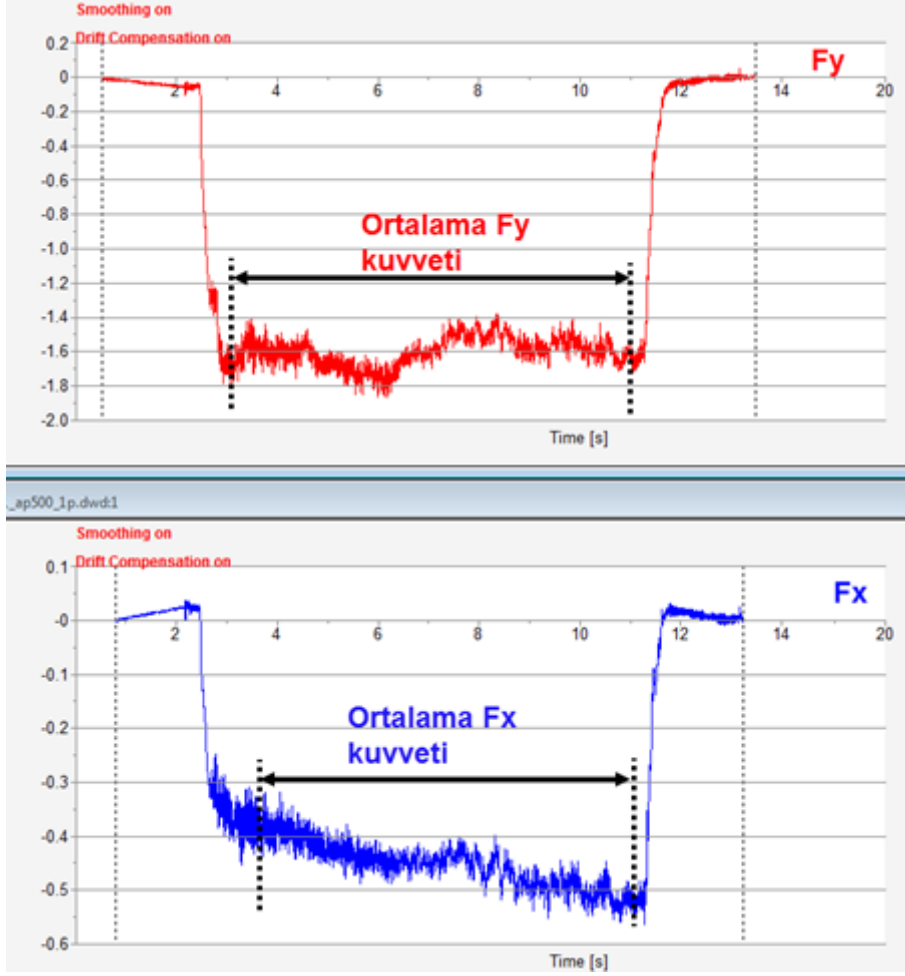


Resim 3.1 Kesme esnasında eksenlerin kontrolü ve kesme bölgesinin görüntülenmesi.

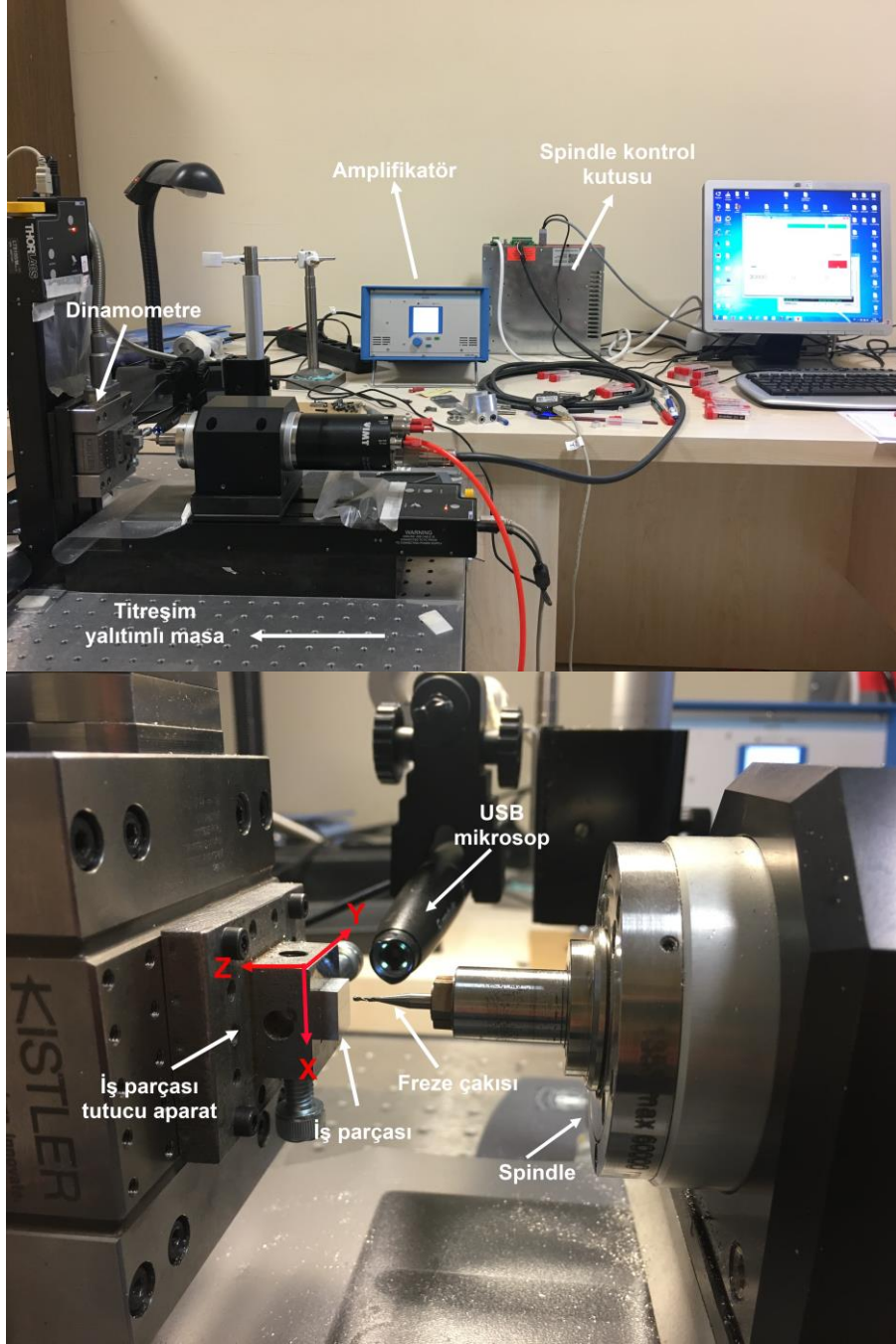


Resim 3.2 Kesici takımın iş parçası yüzeyine sıfırlanması sırasında kullanılan Fz kuvveti değişim sinyalleri.

Kesme sırasında meydana gelen F_x ve F_y kuvvetleri için stabil kesme bölgesinden ortalama kuvvet değerleri dikkate alınmıştır. Kuvvet ölçümleri sırasında filtreleme yapılmamış olup, elde edilen datalar yazılıma ait “smooth on” özelliği ile daha anlaşılır hale getirilmiştir. Ayrıca sinyal gürültüsü nedeniyle oluşan kuvvet değerlerindeki sapma (drift) yine yazılıma ait “drift compensation” özelliği ile bertaraf edilmiştir. Ölçümler sırasında alınan F_x ve F_y kuvvet değerlerinin değişimi ve ortalama kuvvet değerlerinin nasıl elde edildiğini gösteren ekran görüntüsü Resim 3.3 te verilmiştir.



Resim 3.3 Kesme sırasında alınan örnek kuvvet değerlerinin zamanla değişimi.

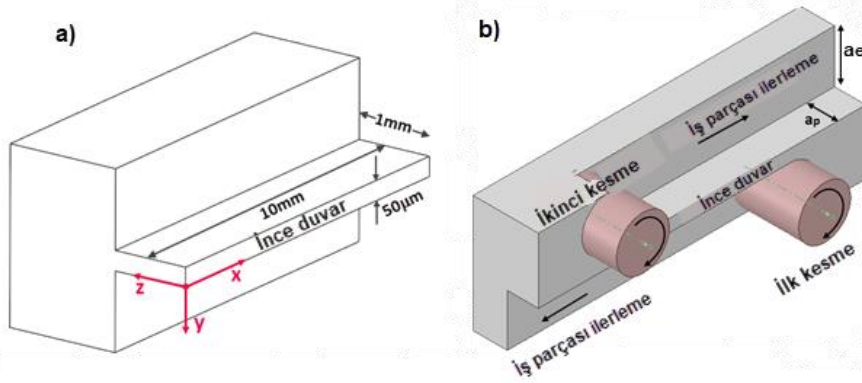


Resim 3.4 Mikro frezeleme testleri için kullanılan test düzeneğinin genel görünümü.

3.6 Kesme Parametreleri

Kesme parametrelerinin etkilerini araştırmak amacıyla farklı diş başına ilerleme değerleri, farklı helis açısı değerleri, farklı aksel talaş derinliği değerleri ve kesici ağız sayısı dikkate alınmıştır. Kesme parametreleri ve takım geometrisinin etkisinin incelenmesi için oluşturulan ince duvar geometrisinin detayları Şekil 3.4a da

verilmektedir. Çalışmada duvar kalınlığı $t=50 \mu\text{m}$ ve duvar yüksekliği $h=1 \text{ mm}$ sabit alınmıştır. Kesme parametrelerinin etkisi araştırmak için yapılan deneylerde devir sayısı ($n=30000 \text{ dev/dk}$) ve radyal talaş derinliği ($a_e = 1000 \mu\text{m}$) alınmıştır. Bu deneylerde kesme yönünün aynı olmasına dikkat edilmiş ve oluşturulan duvarın her iki kenarı zıt yönlü frezeleme yöntemi ile frezelenmiştir (Şekil 3.4b).



Şekil 3.4 a) İnce duvar geometrisinin boyutları, b) İnce duvarın oluşturulmasında kullanılan frezeleme tekniği.

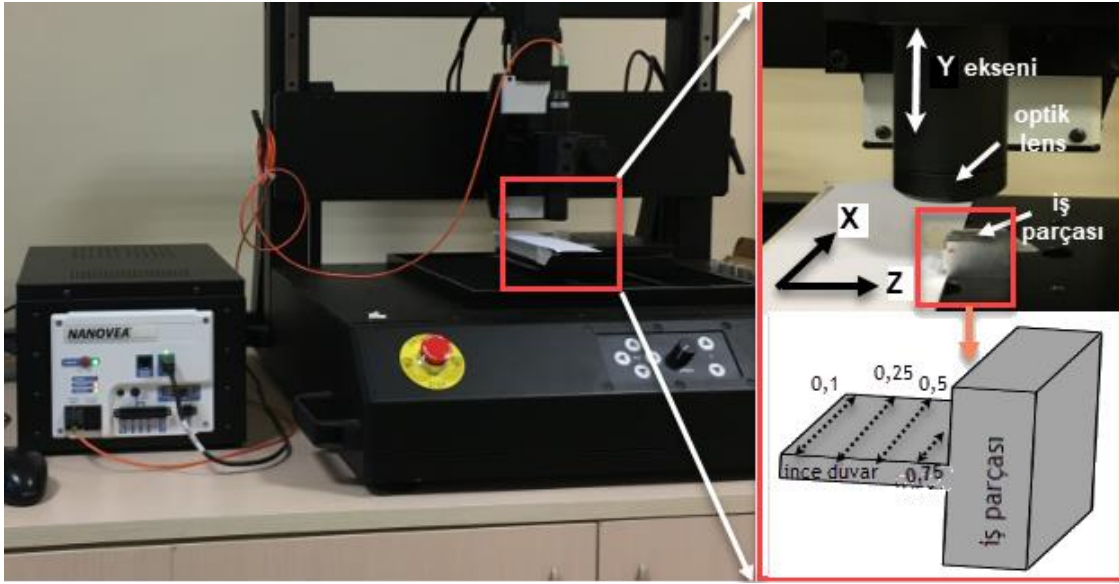
Tüm deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiş olup, çalışmada kullanılan kesme parametreleri Çizelge 3.4 te verilmiştir.

Çizelge 3. 4 Deneylerde Kullanılan Kesme Parametreleri

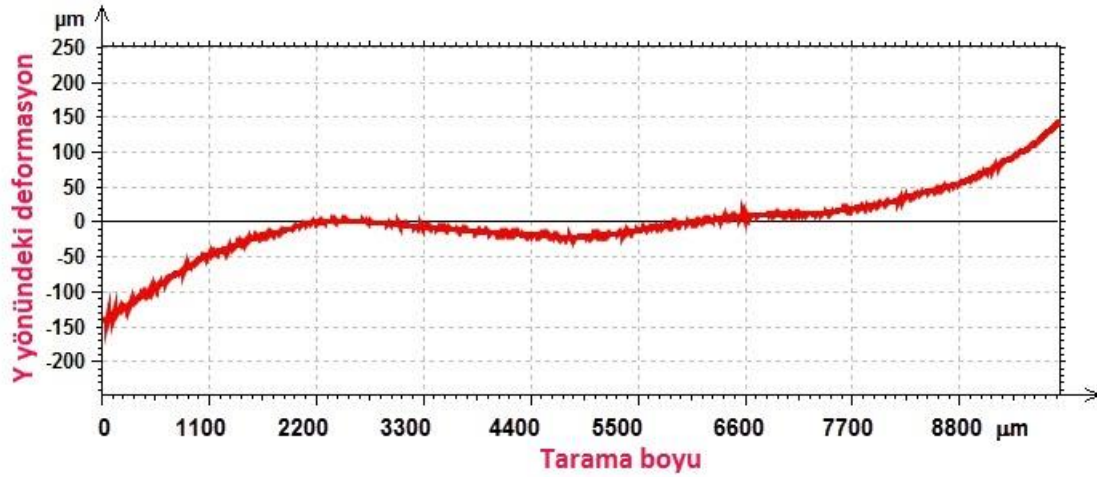
	Eksenel kesme derinliği, a_p (μm)	Radyal kesme derinliği a_e (μm)	Diş başına ilerleme f_z ($\mu\text{m}/\text{diş}$)	Kesici takım geometrisi	
				Helis açısı, λ	Ağız sayısı, z
I. Grup deneyler	100	1000	1	30°	2
	250				
	500				
II. Grup deneyler	100	1000	0,25	30°	2
			0,5		
			1		
			2		
			4		
III. Grup deneyler	100	1000	1	30°	2
				40°	
				45°	
IV. Grup deneyler	100	1000	1	30°	2
					3
					4

3.7 İnce Duvar Deformasyonunun Ölçümü

Kesme deneyleri sonrasında ince duvarlarda meydana gelen deformasyonu ölçmek için Nanovea 3D ST400 marka optik yüzey profilometresi kullanılmıştır. Belirlenen kesme parametreleri ve kesme stratejilerine göre işlenen 1mm yüksekliğinde 50 µm kalınlığında ve 10 mm uzunluğundaki ince duvar geometrilerindeki deformasyon ölçümü y ekseninde meydana gelen plastik deformasyon miktarı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Resim 3.5 te verildiği gibi, ince duvarın üst noktasından belirli aralıklarla (0,1, 0,25, 0,50 ve 0,75mm) y yönündeki deformasyon doğrusal tarama yöntemi ile ölçülmüştür. Ölçümde alınan ham data örneği Resim 3.6 da verilmiştir. Bu ölçüm değerleri dikkate alınarak deformasyon miktarını gösteren grafikler oluşturulmuştur.



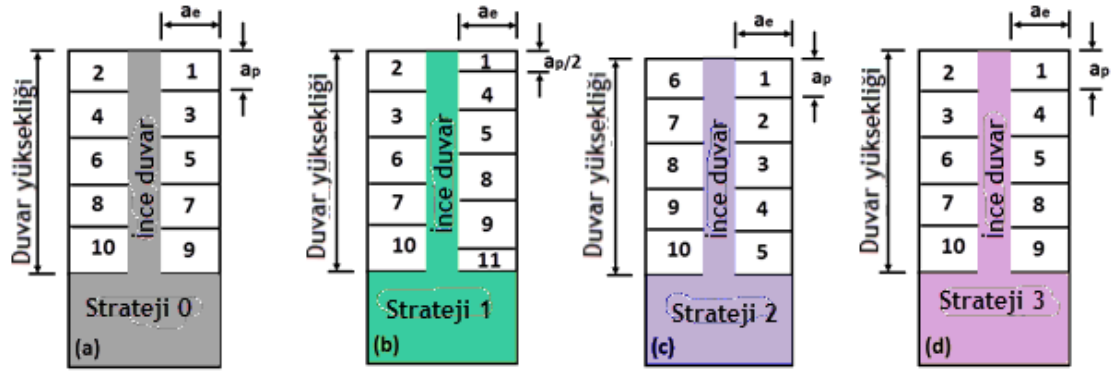
Resim 3.5 İnce duvar deformasyonu ölçüm düzeni.



Resim 3.6 İnce duvar deformasyonu ölçümünde alınan ham data örneği.

3.8 Kullanılan Kesme Stratejileri

Tez çalışmasının literatür bölümünde de görüldüğü üzere ince duvar yapılarının mikro frezelenmesinde farklı kesme stratejileri de çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak belirli bir kalınlığa sahip olan ince duvarın frezeleme yöntemi ile bu kalınlığının daha da düşürülmesi şeklindedir. Bu tez çalışmasında sabit kalınlıkta bir ince duvarın oluşturulmasında mikro frezeleme tekniği kullanılmış ve tam kanal (full slot) işleme gerçekleştirilmiştir. Bunun için dört farklı kesme stratejisi dikkate alınmıştır. Kesme stratejisi deneylerinde radyal talaş derinliği takım çapı ile aynı 1000 µm, aksel talaş derinliği ise 200 µm olarak alınmıştır. Strateji deneyleri sabit devir sayısı ($n=30000$ dev/dk) ve diş başına ilerleme miktarında ($f_z=1\mu\text{m}/\text{diş}$) gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön deneylerde $a_p=200$ µm ve $f_z=1\mu\text{m}/\text{diş}$ için duvarda meydana gelen plastik deformasyon değerinin minimum olduğu tespit edilmiştir. Kesme stratejisinin incelendiği deneylerde 2 ağızlı ve 30° helis açısına sahip kesici takımlar kullanılmıştır. Şekil 3.5 te mikro frezeleme ile ince duvar oluşturmak için kullanılan dört farklı kesme stratejisinin şematik görünümleri verilmektedir. Şekil 3.5(a) da verilen kesme yöntemi; sıralı kesme, Şekil 3.5(b) deki kesme yöntemi; adım destekli kesme, Şekil 3.5(c) de verilen kesme yöntemi; tek taraflı kesme, Şekil 3.5(d) de verilen kesme yöntemi; su yolu kesme olarak adlandırılmaktadır (İnt. Kyn. 4). Kesme stratejileri için duvar yüksekliği 1 mm, duvar kalınlığı ise 50 µm dir. Her bir stratejide yeni kesici takım kullanılmıştır. Ayrıca mikro frezeleme esnasında, ince duvarın her iki yüzeyi zıt yönlü frezeleme ve aynı yönlü frezeleme yöntemi kullanılarak kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5 İnce duvar işlemede kullanılan kesme stratejileri; a) Sıralı kesme stratejisi (Strateji 0), b) Adım destekli kesme (Strateji 1), c) Tek taraflı kesme stratejisi (Strateji 2), d) Su yolu kesme (Strateji 3).

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

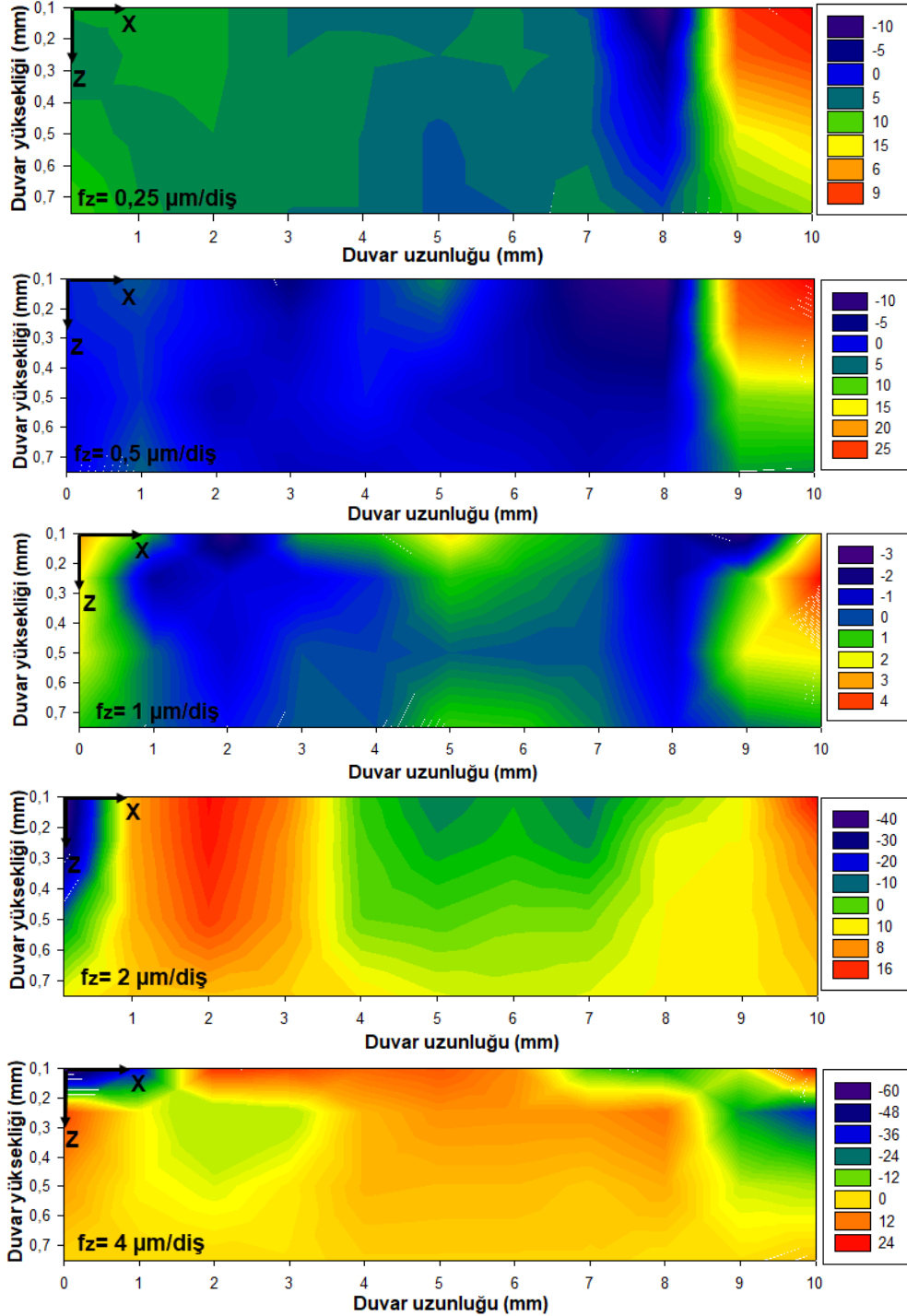
Çalışmada çok fazla değişken olması nedeniyle, elde edilen bulgular alt başlıklar halinde sunulmuştur. İnce duvar yapıların mikro frezelenmesini etkileyen faktörler; kesme parametreleri, takım geometrisi, kesme stratejisi olarak dikkate alınmıştır. Kesme parametrelerinin ve takım geometrisinin etkisini tespit etmek için yapılan frezeleme testlerinde, strateji 0, iki ağızlı ve 30° helis açısına sahip kesici takım kullanılmıştır. Strateji testlerinde aksenal talaş derinliği $a_p = 200 \mu\text{m}$ ve radyal talaş derinliği $a_e = 1000 \mu\text{m}$ olarak sabit alınmıştır.

4.1 Kesme Parametrelerinin Etkisi

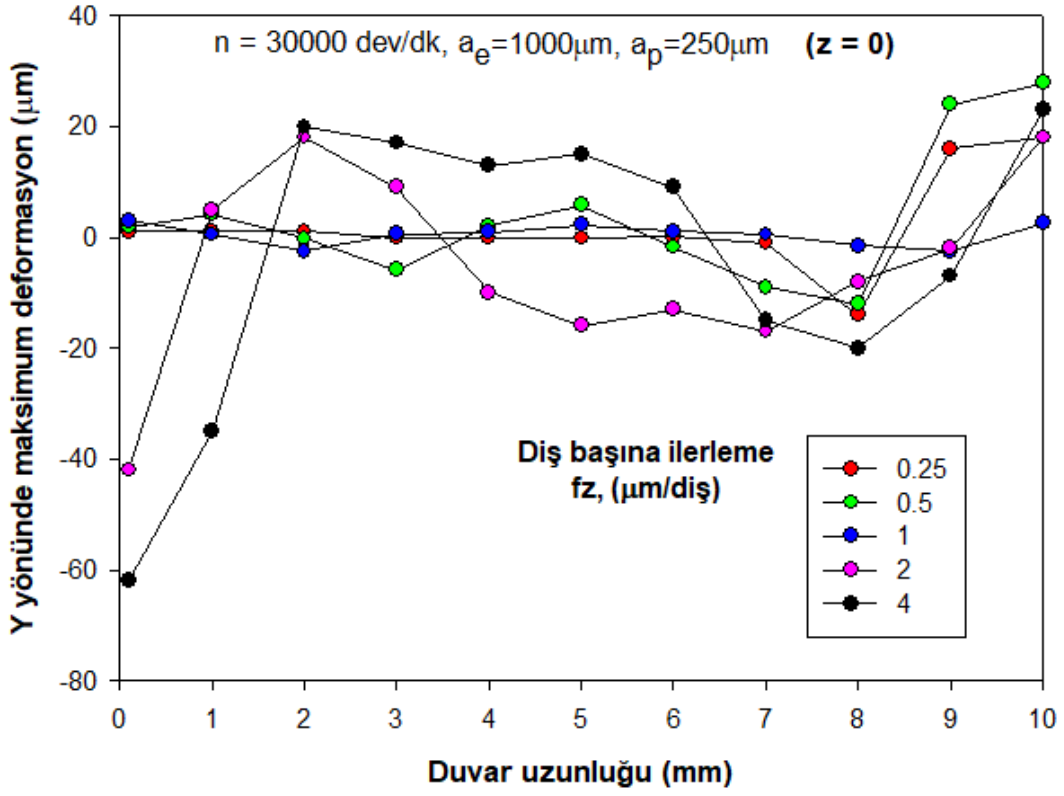
4.1.1 İlerlemenin Etkisi

Şekil 4.1 de farklı ilerleme değerlerinin kullanıldığı kesme işleminde ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü verilmektedir. Şekildeki x eksenini ince duvar boyuna ve z eksenini duvar yüksekliğine karşılık gelmektedir. y eksenini ise ince duvarın deformasyon yönünü göstermektedir (Şekil 3.4a). Şekil 3.4b deki kesme yönleri dikkate alındığında, takım $x = 0$ da kesmeye başlamakta (Şekil 3.4b) ve $x=10$ mm de iş parçasından çıkmakta ve ince duvarın diğer yönünde kesme yapmak üzere iş parçasına tekrar girmektedir. Şekil 4.1 den görüldüğü üzere $f_z = 0,25 \mu\text{m}/\text{diş}$ için $x = 0$ da ince duvardaki deformasyon minimum düzeydedir. Fakat $x = 10$ mm deki deformasyon ise maksimumdur. Bunun nedeni $x = 0$ da ince duvarın bir yüzeyi işlenmiş ama diğer yüzeyi işlenmemiştir. Fakat $x = 10$ mm de duvarın diğer yüzeyi işlenmeye başladığında, ince duvar + y yönünde deformasyona maruz kalmaktadır. Bu durumda duvar daha az rijit olduğundan kesme işleminin gerçekleştiği yüzeyin tersine deformasyona uğramaktadır. $f_z = 0,25 \mu\text{m}/\text{diş}$ ve $f_z = 0,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ için ince duvarda meydana gelen deformasyon miktarının yüksek olduğu görülmektedir. Mikro frezelemede minimum talaş kalınlığından daha düşük ilerleme değerlerinde kazınma meydana gelmektedir (Rezaei vd. 2018). Yapılan bazı çalışmalarda $f_z < 1 \mu\text{m}/\text{diş}$ için kazınmanın meydana geldiği ifade edilmiştir (Aslantaş vd. 2016). Bu çalışmada da $f_z < 1 \mu\text{m}/\text{diş}$ için tespit edilen deformasyon değeri $f_z = 1 \mu\text{m}/\text{diş}$ için elde edilenden daha büyüktür. Kesme esnasında meydana gelen kazınma ince duvarda deformasyona neden

olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.2 den de görüldüğü üzere $f_z \geq 2 \mu\text{m}/\text{diş}$ için deformasyon değeri önemli bir oranda artmakta ve aynı zamanda yön değiştirmektedir. $f_z \leq 1 \mu\text{m}/\text{diş}$ için meydana gelen deformasyon $x = 10 \text{ mm}$ de maksimumdur. Artan ilerleme ile birlikte $x = 10 \text{ mm}$ deki deformasyon artarken $x = 0$ daki maksimum deformasyon da $-y$ yönünde artmaktadır.

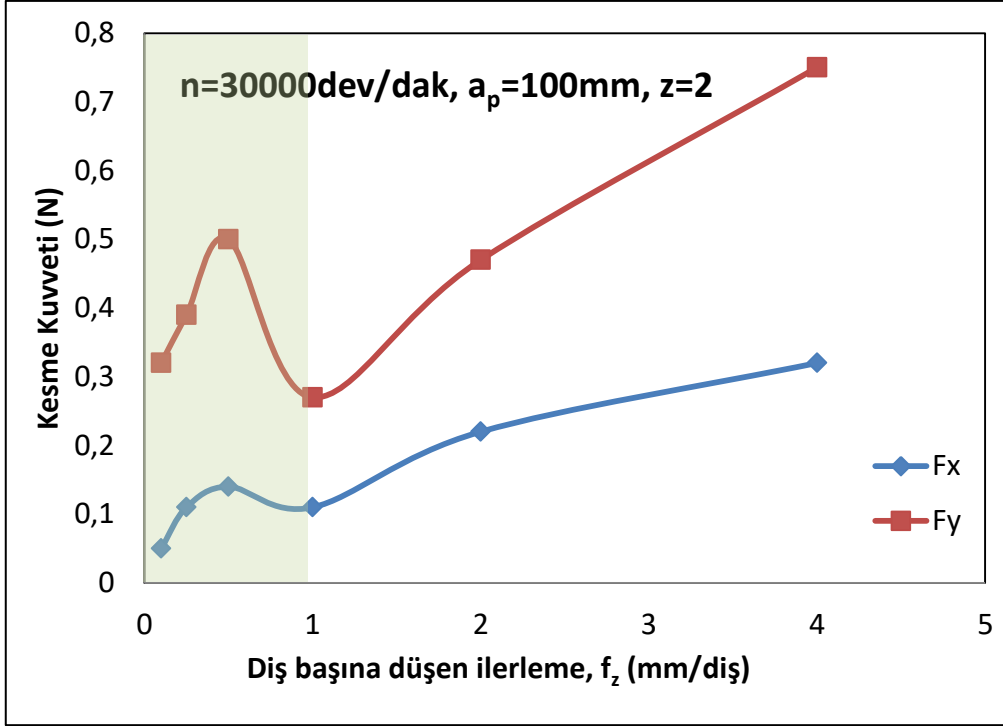


Şekil 4.1 Farklı ilerleme değerlerindeki kesme işleminde ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.



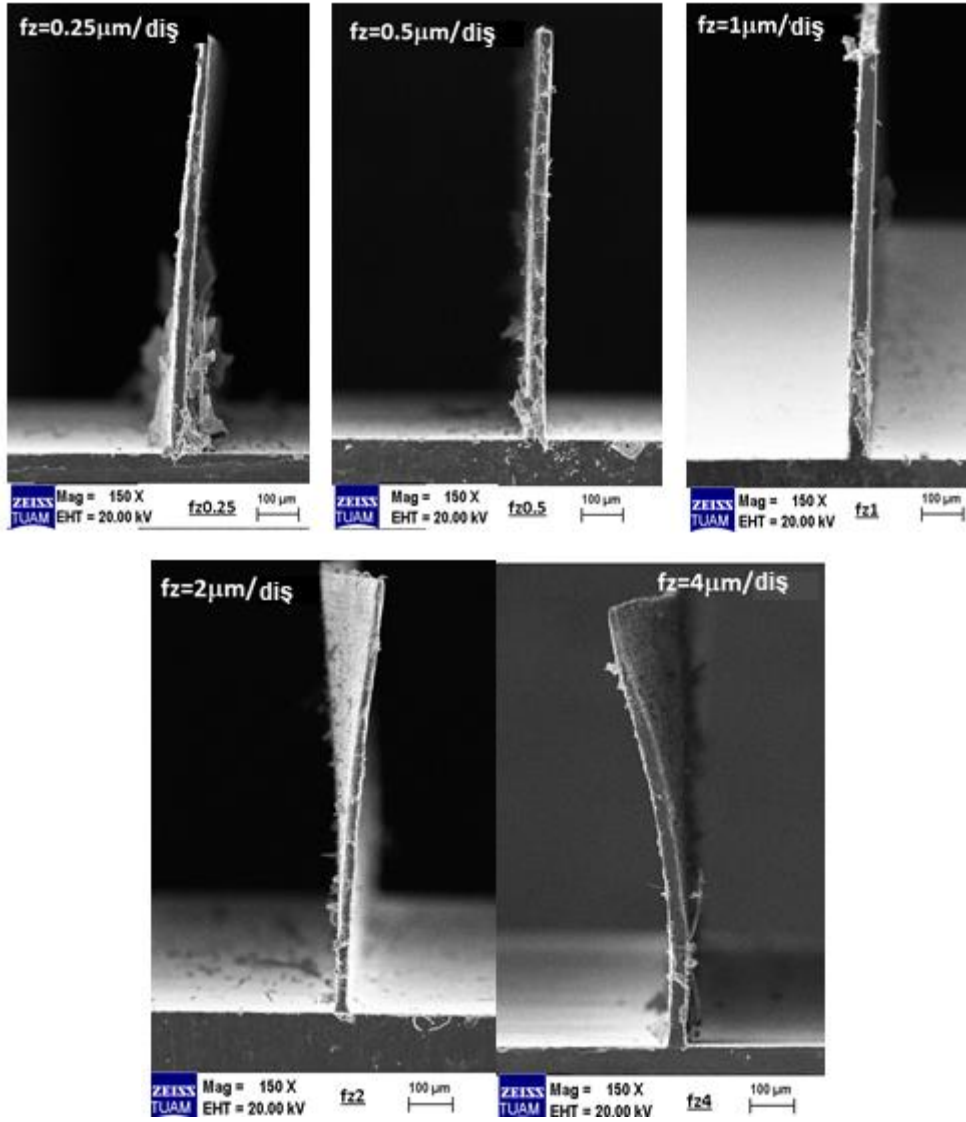
Şekil 4.2 Diş başına ilerlemedeki değişime bağlı ince duvarda meydana gelen deformasyon miktarı.

Şekil 4.3 te diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak F_x ve F_y kuvvetindeki değişim verilmiştir. Dikkat edilecek olursa artan ilerlemeye bağlı olarak kesme kuvvetleri de lineer bir artış sergilememektedir. $f_z \geq 1 \mu\text{m/diş}$ için her iki kesme kuvveti de kararsız bir durum sergilemektedir. Bunun sebebi, mikro işlemenin temelindeki sorun olarak ifade edilen, boyut etkisidir. Kesicinin kenar radyüsünününden daha küçük ilerleme değerlerinde yapılan kesme işlemlerinde sağlıklı bir talaş kaldırma işlemi gerçekleşmemektedir. Kesme işlemi kayma mekanizmasından ziyade kazınma ağırlıklı olarak gerçekleşmektedir. Bu da hem yüzey kalitesini hem de kesme kuvvetlerini olumsuz etkilemektedir. Şekil 4.3 te elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 de elde edilen sonuçları da doğrular niteliktedir. Nitekim $f_z < 1 \mu\text{m/diş}$ olduğu durumlarda oluşturulan ince duvarda deformasyon değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Azalan talaş kesitine nazaran kesme kuvvetlerinin artması kesicinin kararsız bir davranış sergilediğinin de bir göstergesidir.



Şekil 4.3 Diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.

Şekil 4.4 te farklı ilerleme değerleri için ince duvar geometrisinde meydana gelen deformasyonun SEM görüntüleri verilmektedir. $f_z = 0,25 \mu\text{m/diş}$ için mikro ince duvarın her iki tarafında önemli bir çapak oluşumu göze çarpmaktadır. Çapak miktarı artan ilerleme değeri ile azaldığını söylemek mümkündür. Fakat $f_z \geq 2 \mu\text{m/diş}$ için çapak miktarı tekrar artmaktadır. İnce duvarda meydana gelen deformasyonun $f_z = 1 \mu\text{m/diş}$ için minimum olduğu SEM fotoğraflarından da görülebilmektedir. $f_z \geq 2 \mu\text{m/diş}$ için mikro duvardaki deformasyon önemli oranda artmaktadır. $f_z = 0,5 \mu\text{m/diş}$ için mikro duvarda meydana gelen deformasyonun kabul edileceğini söylemek mümkündür. Fakat $f_z = 0,25 \mu\text{m/diş}$ için deformasyon $0,5 \mu\text{m/diş}$ ten daha büyüktür. Bu durum, mikro frezelemedeki boyut etkisinin bir sonucu olarak gerçekleşmiştir.

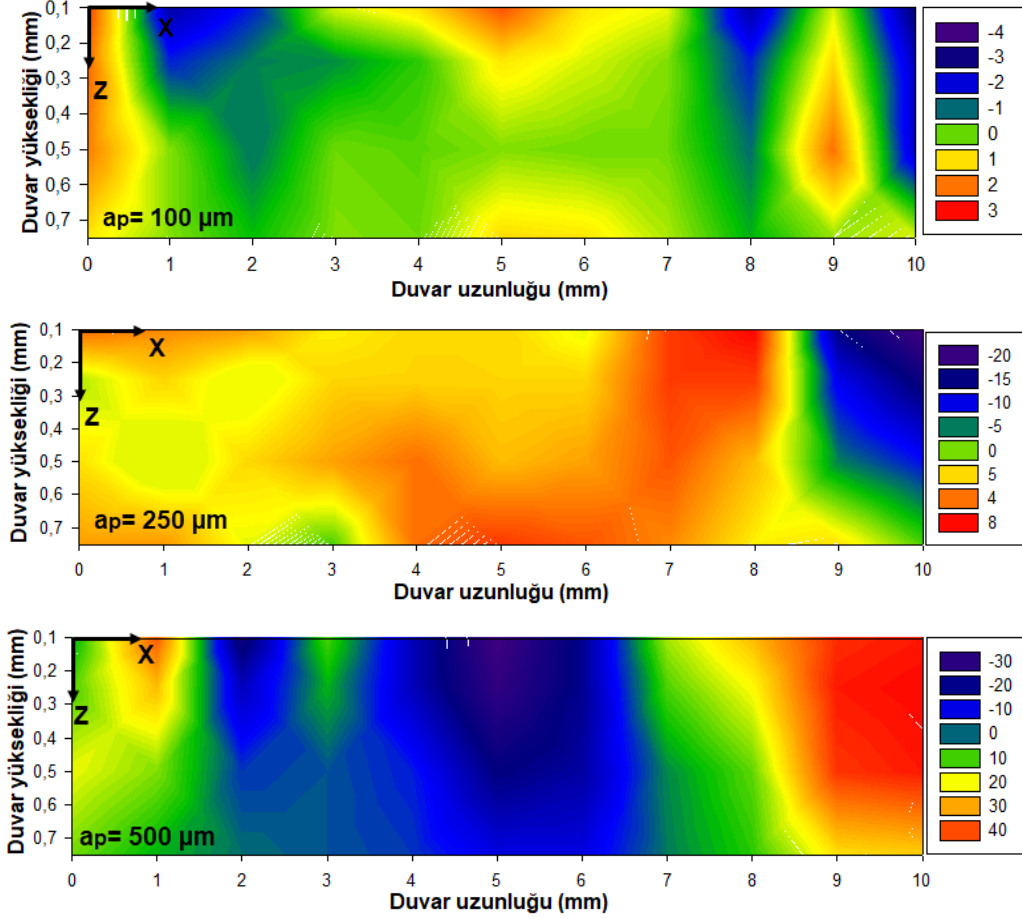


Şekil 4.4 Farklı ilerleme değerleri için ince duvar geometrisinde meydana gelen deformasyonun SEM görüntüleri.

4.1.2 Eksenel Kesme Derinliğinin Etkisi

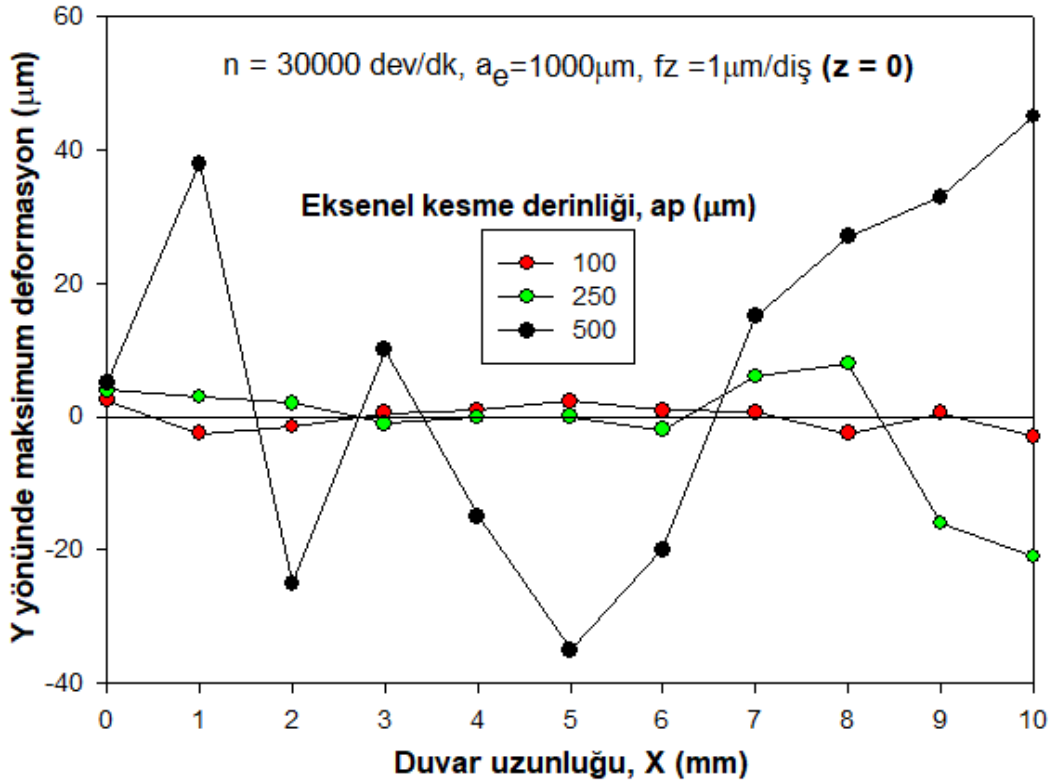
Eksenel kesme derinliğinin ince duvar deformasyonu üzerindeki etkisini tespit etmek için sabit ilerleme hızı ve devir sayısında kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5 te üç farklı talaş derinliği için ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü verilmektedir. $a_p = 100 \mu\text{m}$ için y yönünde meydana gelen minimum ve maksimum deformasyonun toplamı $7 \mu\text{m}$ dir. Eksenel talaş derinliği $250 \mu\text{m}$ olduğunda toplam deformasyon $28 \mu\text{m}$ iken, $a_p = 500 \mu\text{m}$ için bu değer yaklaşık $70 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Bilindiği üzere, eksenel talaş derinliğinin artması talaş yükünün artmasına neden olur. Artan talaş yükü hem F_x hem de F_y kuvvetlerinin artmasına neden olur.

Özellikle F_y yönündeki (ilerleme yönünün normalinde) kesme kuvvetleri artması, ince duvarda meydana gelen deformasyonun miktarının da artmasına katkıda bulunur (Liu vd. 2016, Zariatin vd. 2017). Ayrıca artan aksel talaş derinliği, takımın kesici kenarı ile iş parçası arasındaki temas uzunluğunun da artmasına neden olacaktır.



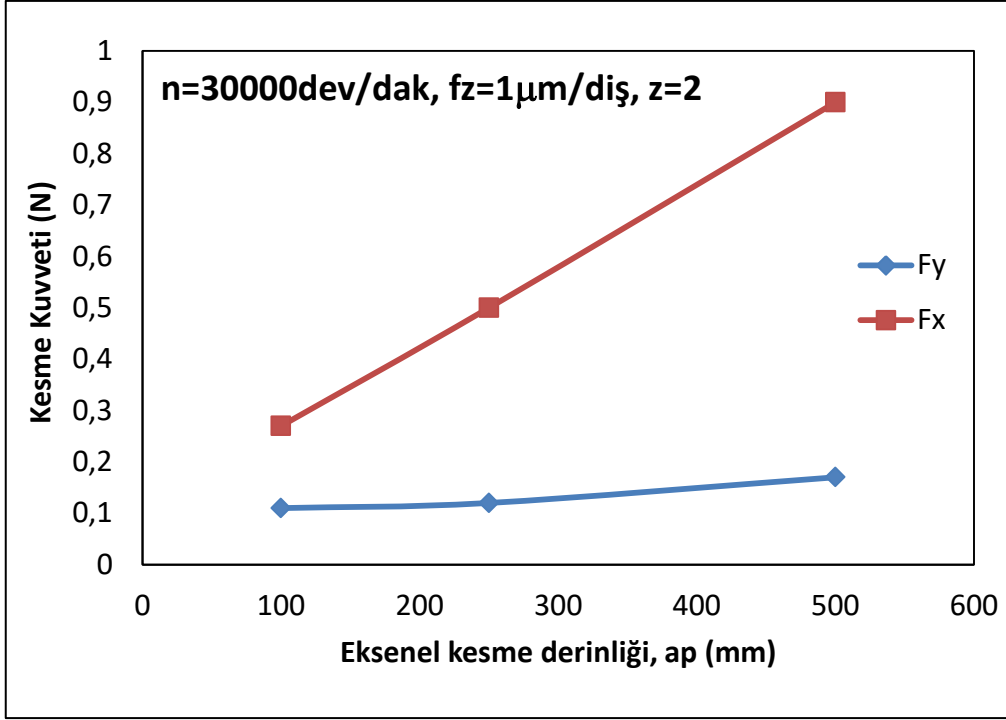
Şekil 4.5 Farklı aksel kesme derinlikleri ile oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.

Şekil 4.6 da farklı talaş derinlikleri için $z=0$ da ince duvarda meydana gelen maksimum deformasyon değerlerinin duvar boyunca değişimi verilmiştir. Tüm aksel talaş derinlikleri için de duvar uzunluğu boyunca meydana gelen deformasyonun yönü değişmektedir. Aksel talaş derinliğinin 100 ve 250 μm olduğu durumlarda, takımın kesmeye başladığı ilk konumda y yönündeki deformasyon pozitif iken, takımın iş parçasını terk ettiği noktada negatife dönmektedir. Fakat $a_p= 500 \mu\text{m}$ için bu durum farklılık göstermektedir. Duvar uzunluğu boyunca y yönünde meydana gelen deformasyon sürekli olarak yön değiştirmektedir. Bu durum Şekil 4.8 de verilen SEM fotoğrafları ile de doğrulanmaktadır.

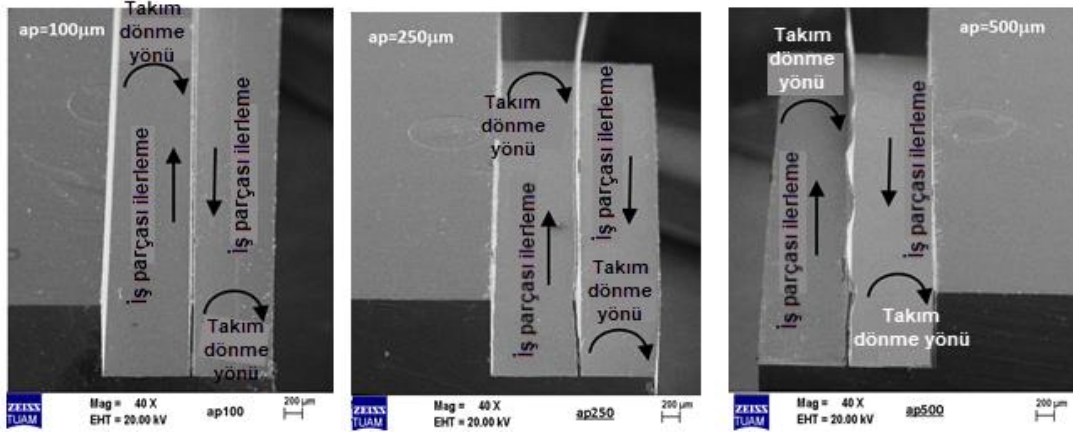


Şekil 4.6 Eksenel kesme derinliğindeki değişime bağlı duvarda meydana gelen deformasyon miktarı.

Genellikle eksenel talaş derinliğinin artması ile kesici takıma etki eden kesme yüklerinin de lineer olarak artması beklenir. Bu çalışma kapsamında üç farklı eksenel talaş derinliği için ince duvar geometrisinin deformasyonu incelendiğinden kesme sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi de elde edilmiştir. Şekil 4.7 de eksenel talaş derinliğinin değişimine bağlı olarak F_x ve F_y kesme kuvvetlerinin değişimi verilmiştir. Beklenildiği üzere, artan talaş derinliği kesme kuvvetlerinin de artmasına neden olmaktadır. Artan kesme kuvvetleri kesici takımında elastik deformasyona neden olacaktır. Bu da takımın radyal sapmasını arttıracığından, ince duvardaki deformasyon da buna paralel olarak artacaktır.



Şekil 4.7 Eksenel talaş derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimi.



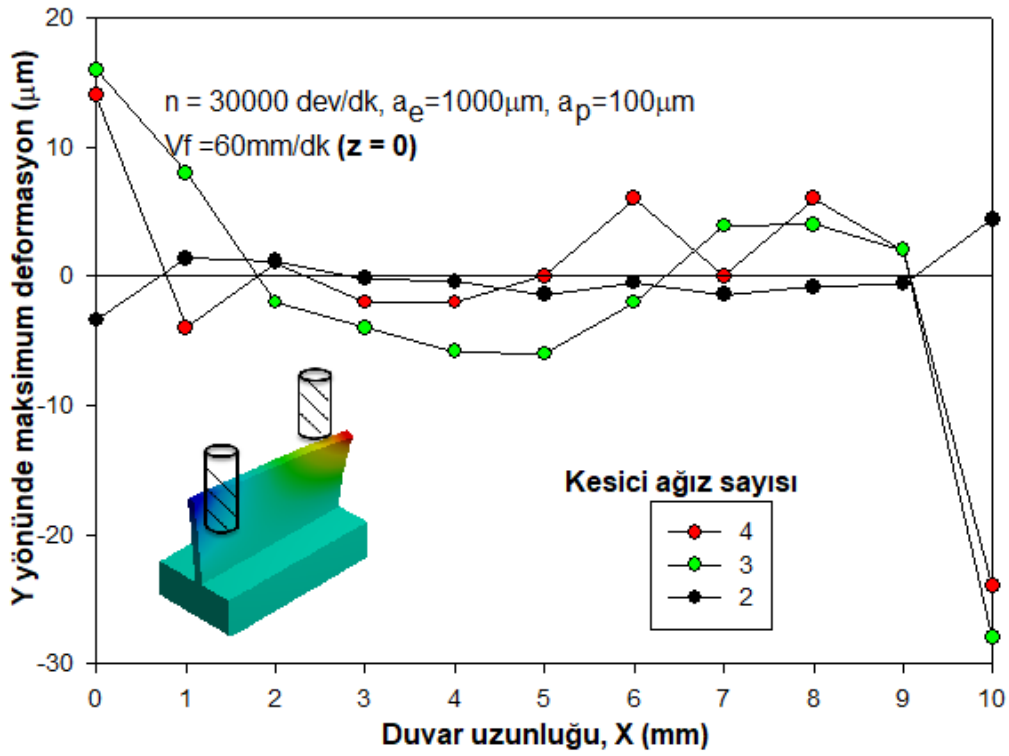
Şekil 4.8 Farklı kesme derinlikleri için ince duvar geometrisinde meydana gelen deformasyonun SEM görüntüleri.

4.2 Takım Geometrisinin Etkisi

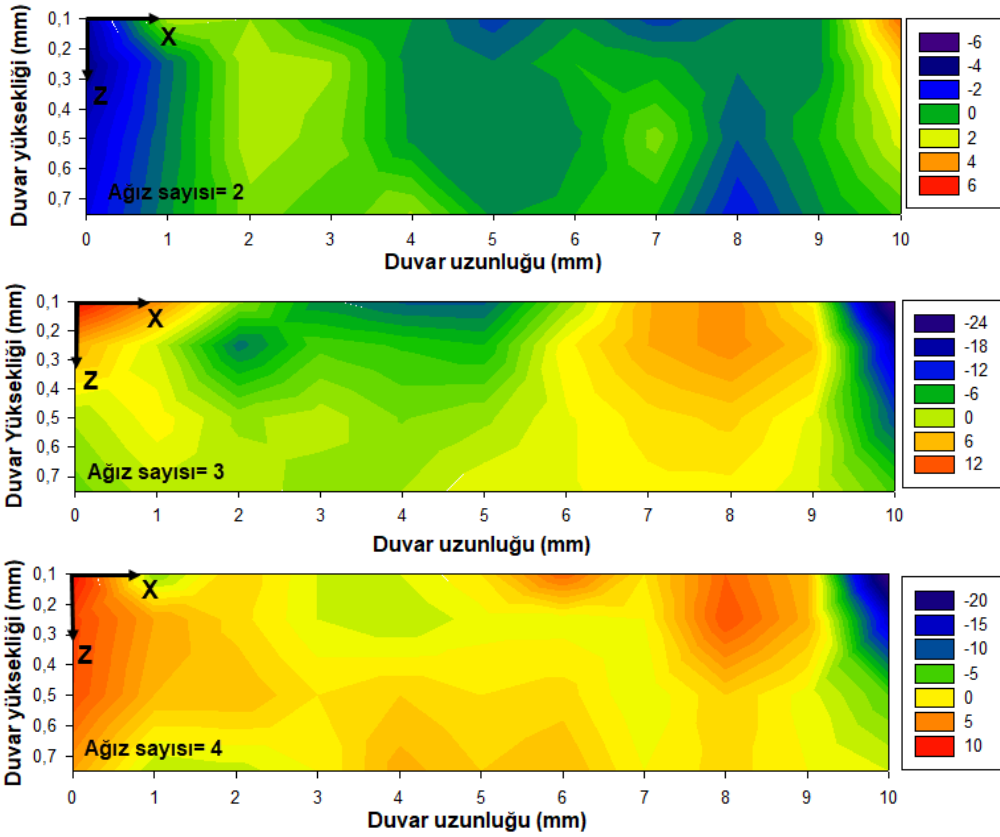
4.2.1 Kesici Ağız Sayısının Etkisi

Frezeleme işleminde kesici ağız sayısının artması birim zamanda kaldırılan talaş hacminin de artmasına neden olur. Kesici ağız sayısının artmasıyla birlikte iş parçası ile temas halinde olan kesici kenar sayısı da artar. Normal şartlarda artan ağız sayısı frezeleme kuvvetlerini etkilemez (Aslantaş ve Alatrushi 2020, Altıntaş 2012). Fakat

aynı şartlarda yapılan frezeleme operasyonları için artan ağız sayısı takım ömrünün artmasına katkı sağlayabilir. Mikro frezeleme işleminin endüstriyel uygulamalarında 2, 3 ve 4 ağızlı kesici takımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte mikro ince duvar işleme operasyonlarında ağız sayısının etkisi neredeyse hiç çalışılmamıştır. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında elde edilen bilgiler hem literatüre hem de endüstriyel uygulamalara önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Şekil 4.9 da aynı kesme şartlarında ve farklı ağız sayılarına sahip kesici takımlarla oluşturulan ince duvardaki deformasyonun değişimi verilmiştir. Frezeleme testleri KS-0 kesme stratejisi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Ağız sayısının etkisini görmek için iş parçasının ilerleme hızı (V_f) sabit alınmıştır. İki ağızlı kesici takımın kullanıldığı frezeleme işleminde duvarda meydana gelen deformasyon minimumdur. Takımın giriş ve çıkış noktalarında ($x=0$ ve $x=10$ mm) meydana gelen maksimum deformasyon yaklaşık 4 μ m civarındadır. Kesici ağız sayısının 3 ve 4 olduğu frezeleme işlemlerinde mikro ince duvarda meydana gelen deformasyon miktarı da önemli oranda artmaktadır. Her iki kesici takım için de maksimum deformasyon $x=10$ mm de meydana gelmektedir. 3 ve 4 ağızlı kesici takımda meydana gelen ince duvar aldığı şekli göstermek için grafikte ince duvarın deformasyon şekli de verilmiştir. 3 ve 4 ağızlı kesici takımlarda deformasyonun artmasının nedeni titreşim olabilir. Artan ağız sayısı ile birlikte ince duvarla temas halinde olan kesici kenar sayısı da artmaktadır. Bu da ince duvarın birim zamanda radyal yönde daha fazla sayıda zorlanmasına neden olacaktır.

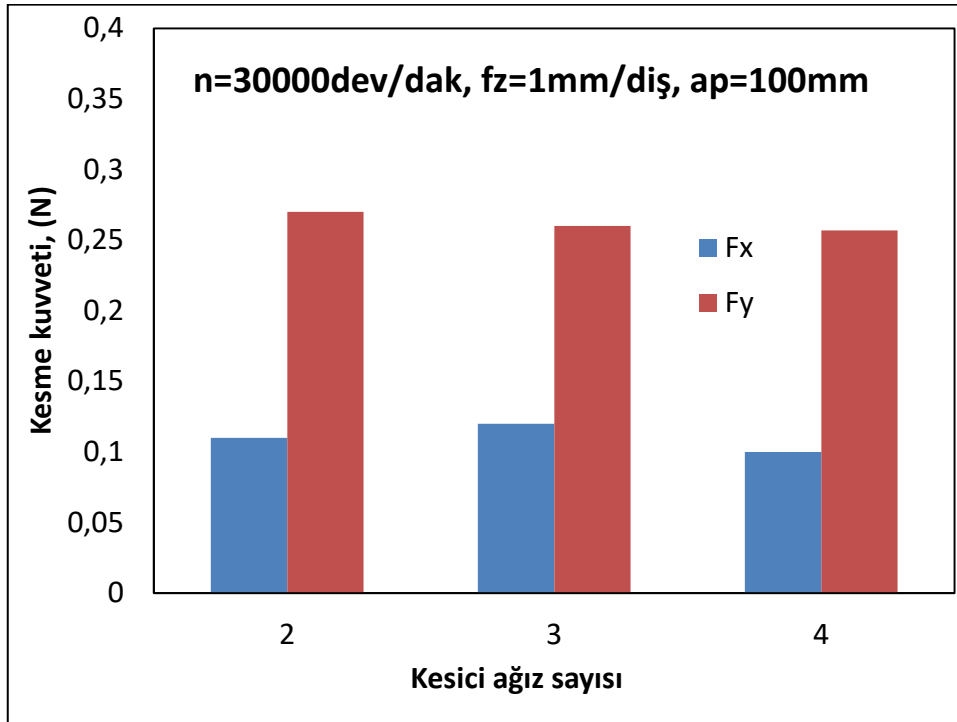


Şekil 4.9 Kesici ağız sayısındaki değişime bağlı ince duvarda meydana gelen deformasyon.



Şekil 4.10 Farklı ağız sayıları ile oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.

Çalışmada üç farklı kesici ağız sayısı için ince duvar geometrisinin deformasyonu incelendiğinden kesme sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin değişimi de elde edilmiştir. Şekil 4.11 de kesici ağız sayısına bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kesici ağız sayısına bağlı olarak F_x ve F_y kesme kuvvetlerindeki değişimler birbirine benzerlik göstermektedir. Bu durum normal şartlarda kesici ağız sayısındaki değişimin kesme kuvvetlerini etkilemediğini göstermiştir.

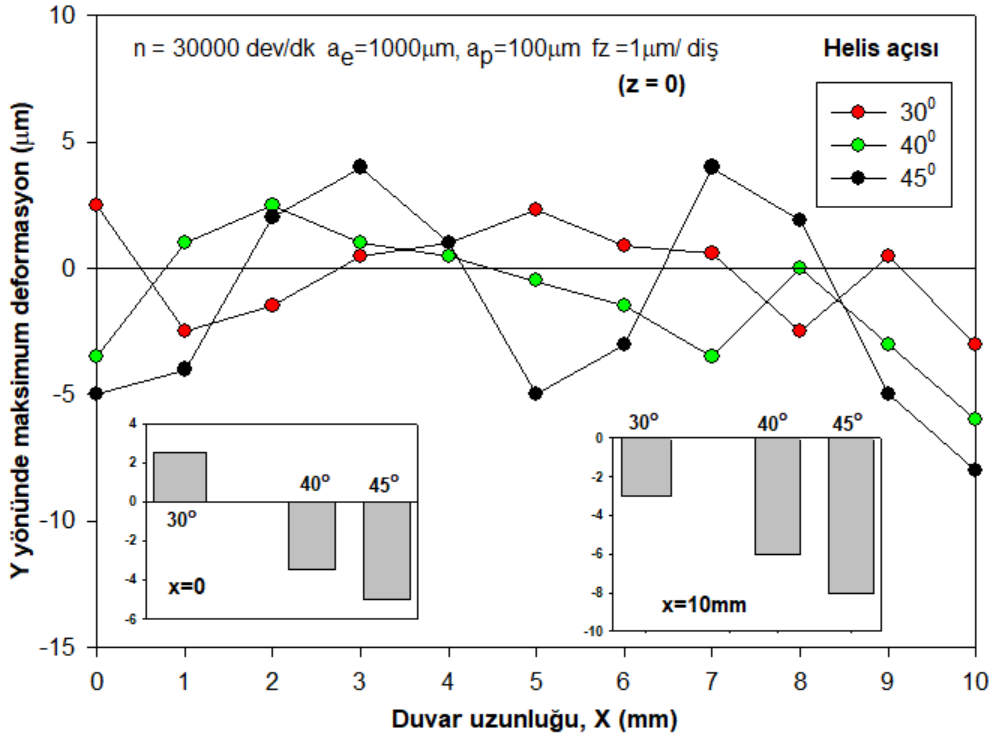


Şekil 4.11 Kesici ağız sayısına bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim.

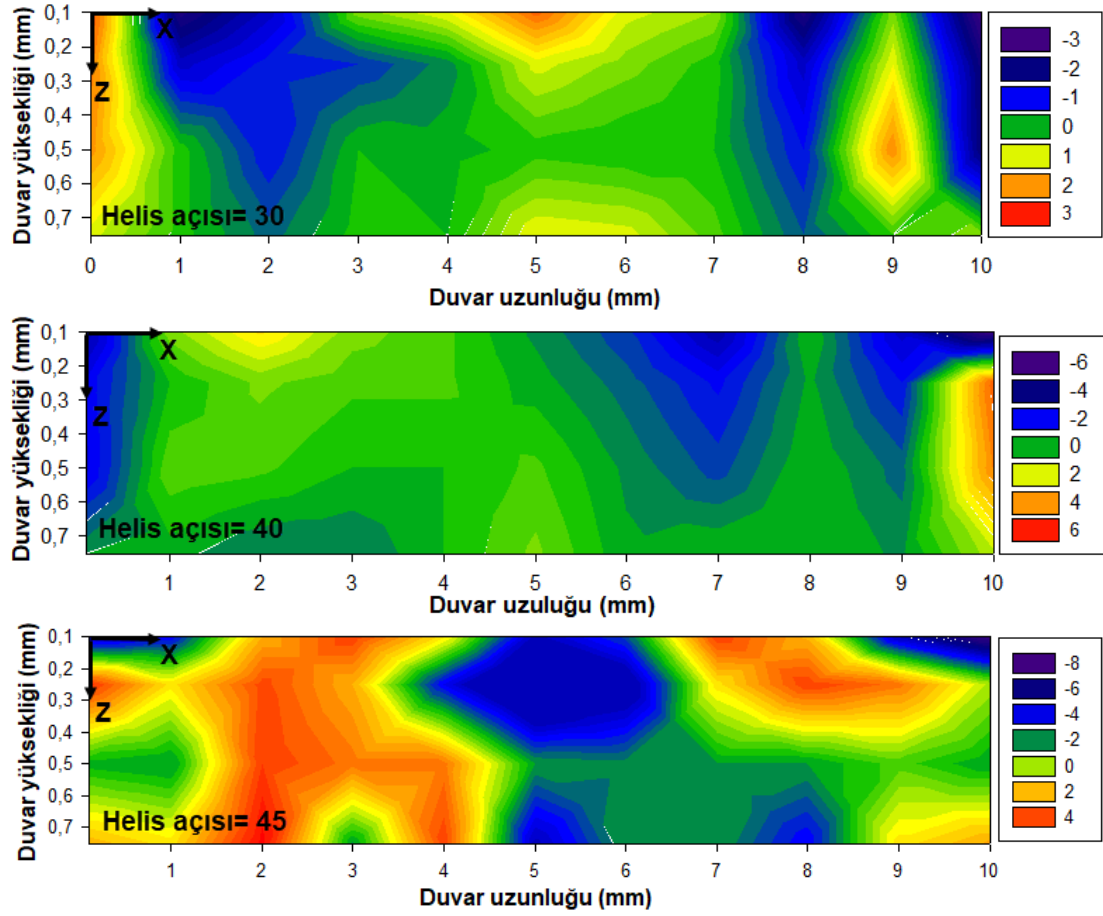
4.2.2 Helis Açısının Etkisi

Frezeleme işlemlerinde helis açısının etkisini iki açıdan değerlendirmek doğru olacaktır. Bunlardan birincisi, artan veya azalan helis açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisidir. İkincisi ise helis açısının titreşim üzerindeki etkisidir. İnce duvarların geleneksel frezelenmesinde artan helis açısı radyal kuvvetlerin bir miktar azalmasına neden olduğundan, ince duvardaki deformasyon da bir miktar azalmaktadır (Bolar ve Joshi 2020). Bununla birlikte 20° - 30° arasındaki helis açılarında titreşim genliğinin yüksek olduğu, artan helis açısıyla titreşim genliğinin daha düşük olduğu ifade edilmektedir (Burek 2017). Bu çalışmadaki ince duvarlar var olan bir duvarın daha da

inceltilmesi şeklinde değildir. 50 μm kalınlığındaki ince duvarı elde etmek için her iki yandan takım çapı kadar frezeleme işlemi yapılmıştır. Bu işlem literatürde full slot (tam kanal) işleme olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla çalışma bu yönü ile literatürde yapılan çalışmalardan farklıdır. Şekil 4.12 de helis açısının mikro ince duvardaki deformasyon miktarı üzerindeki etkisi verilmiştir. Aynı zamanda Şekil 4.12 de ince duvarın $x=0$ (birinci kesme) ve $x=10$ mm (ikinci kesme) deki deformasyon değerleri çubuk grafik olarak verilmiştir. Artan helis açısıyla birlikte duvarda meydana gelen deformasyon miktarının da arttığını söylemek mümkündür. $x=0$ noktasında 30° için meydana gelen deformasyon pozitif y yönünde iken 40° ve 45° de negatif y yönünde meydana gelmektedir. $x=10$ mm de her üç kesici takımda meydana gelen deformasyon – y yönündedir. İkinci kesme işleminin başlangıcında ince duvarda – y yönünde deforme olmaktadır. Bunun da nedeni birinci kesme işlemi sonrasında ince duvarın rijitliği azalmaktadır. İkinci kesme işleminin başlangıcında kesici, iş parçasına daldığında daha az rijit olan yöne doğru duvarı deforme olmaya zorlamaktadır.



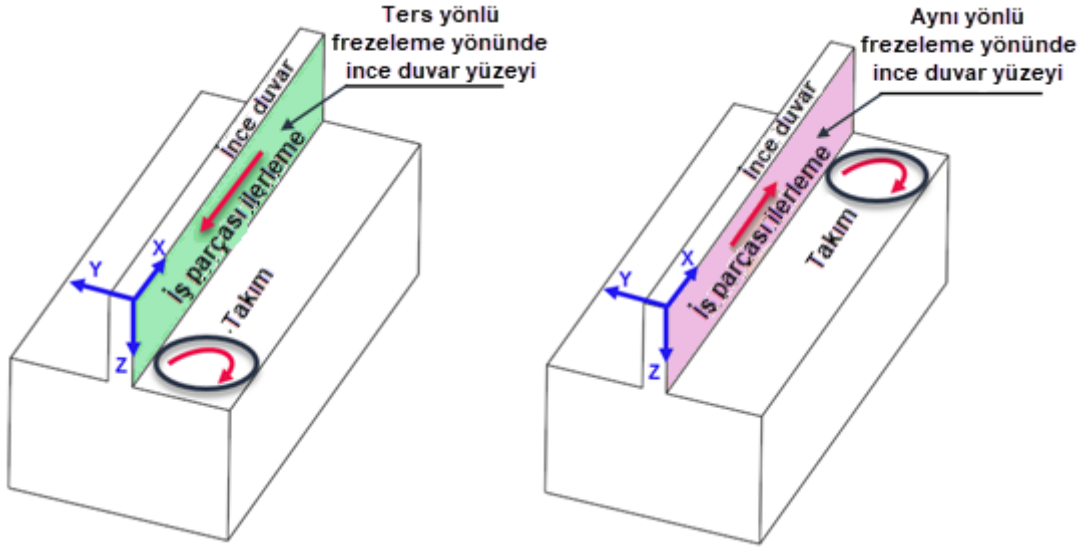
Şekil 4.12 Helis açısındaki değişime bağlı ince duvarda meydana gelen deformasyon miktarı.



Şekil 4.13 Farklı helis açıları ile oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.

4.3 Kesme Stratejilerinin Etkisi

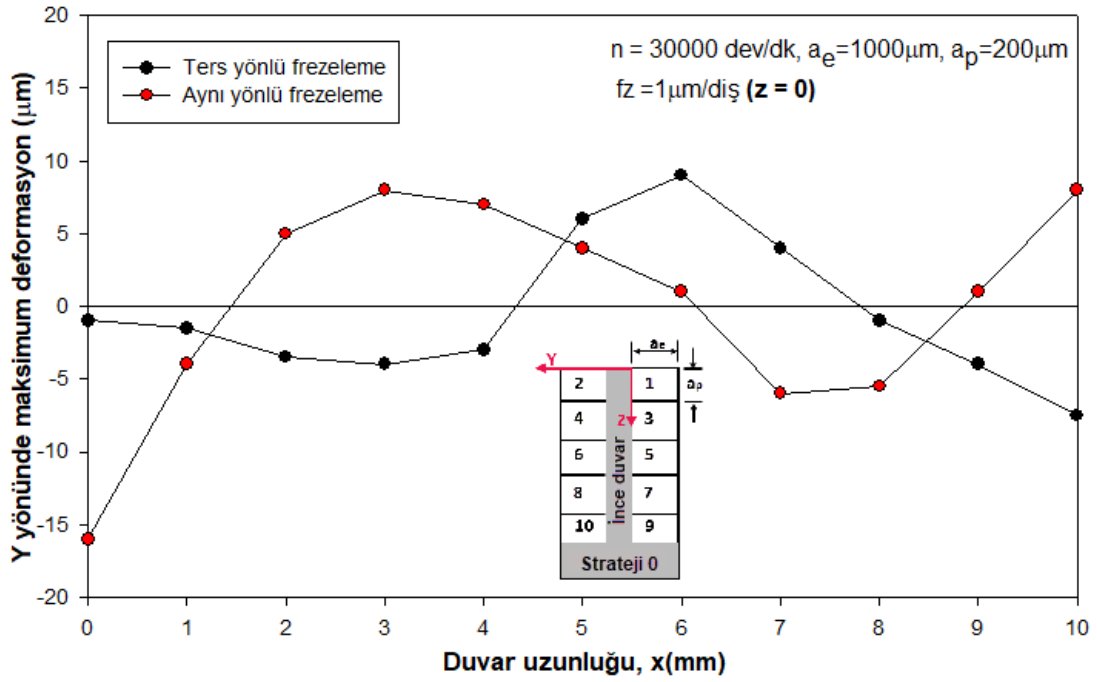
Çalışmada Şekil 3.5 te verilen dört farklı stratejinin (strateji 0, 1, 2 ve 3) duvar deformasyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Her bir stratejide kesme parametreleri sabit alınmıştır ve her bir deney için yeni takım kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca her bir kesme stratejisinde kesme yönünün etkisi de araştırılmış olup aynı yönlü ve zıt yönlü frezeleme işlemleri için de kesme testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.14). İnce duvarın her iki yüzeyi de aynı frezeleme yönü dikkate alınarak kesme işlemi tamamlanmıştır.



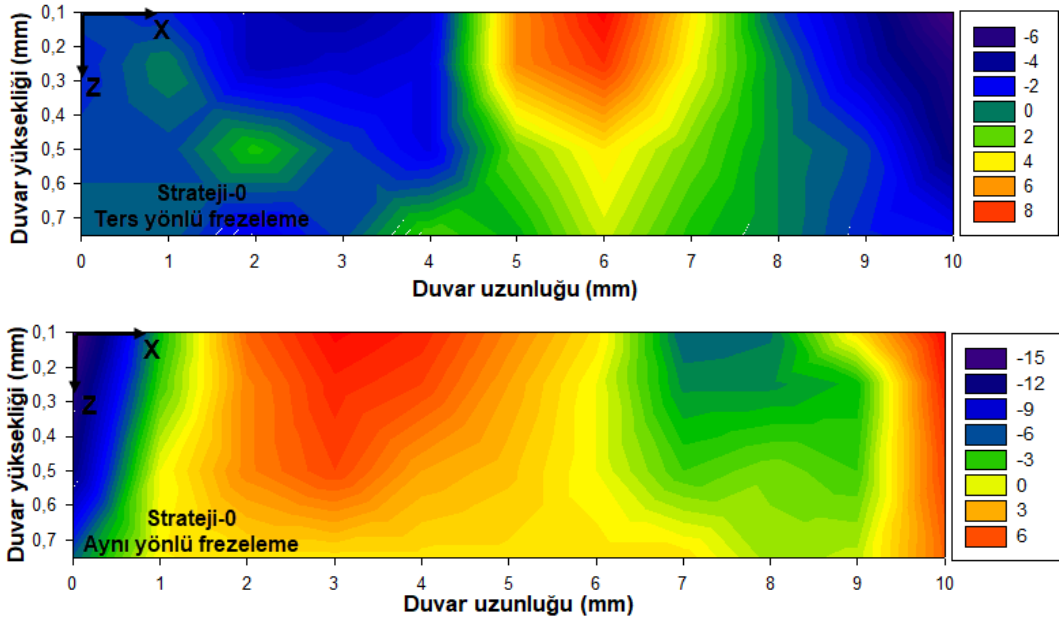
Şekil 4.14 Kesme stratejisi deneylerinde kullanılan kesme yönleri; zıt yönlü ve aynı yönlü frezeleme işlemleri.

Kesme stratejisi 0 ile ince duvarlar oluşturulurken duvarın bir tarafında kesme işlemi yapıldıktan sonra duvarın diğer tarafına geçilerek kesme sırayla gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.15 te KS-0 ile oluşturulan ince duvarda meydana gelen maksimum deformasyon $x=0$ noktasında ve aynı yönlü frezeleme yönteminde meydana gelmiştir. İnce duvarda meydana gelen minimum deformasyon miktarının ise $x=0$ noktasında ve ters yönlü frezeleme yönteminde meydana geldiği Şekil 4.15 teki grafikten de görülmektedir. $x=10$ mm takım çıkış noktasında ise iki frezeleme yönteminde de duvardaki deformasyonun arttığı görülmektedir. KS-0 yöntemi ile oluşturulan ince duvarlarda aynı yönlü ve ters yönlü frezelemenin etkisi diğer strateji yöntemlerine göre daha belirgindir.

Şekil 4.16 da KS-0 için aynı ve zıt yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü verilmiştir. İnce duvarın yüksekliği boyunca y yönündeki deformasyonun değiştiği ve maksimum deformasyonun $z=0$ da meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca aynı yönlü frezelemede meydana gelen maksimum deformasyon $-y$ yönünde $15 \mu\text{m}$ iken, ters yönlü frezelemede bu değer $+y$ yönünde ve $8 \mu\text{m}$ dir. Duvar yüksekliğinin $0,7 \text{ mm}$ olduğu konumda aynı yönlü frezelemede meydana gelen deformasyonun daha büyük olduğu 2D mesh görünümünden çıkartılabilecek diğer bir sonuçtur.



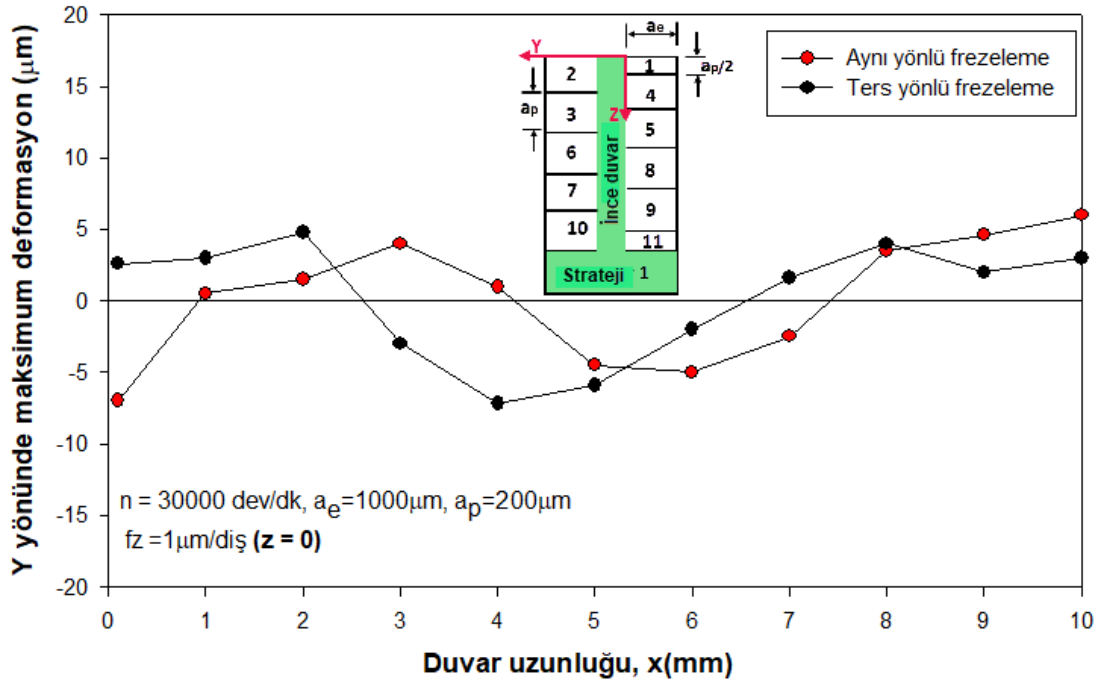
Şekil 4.15 KS-0 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.



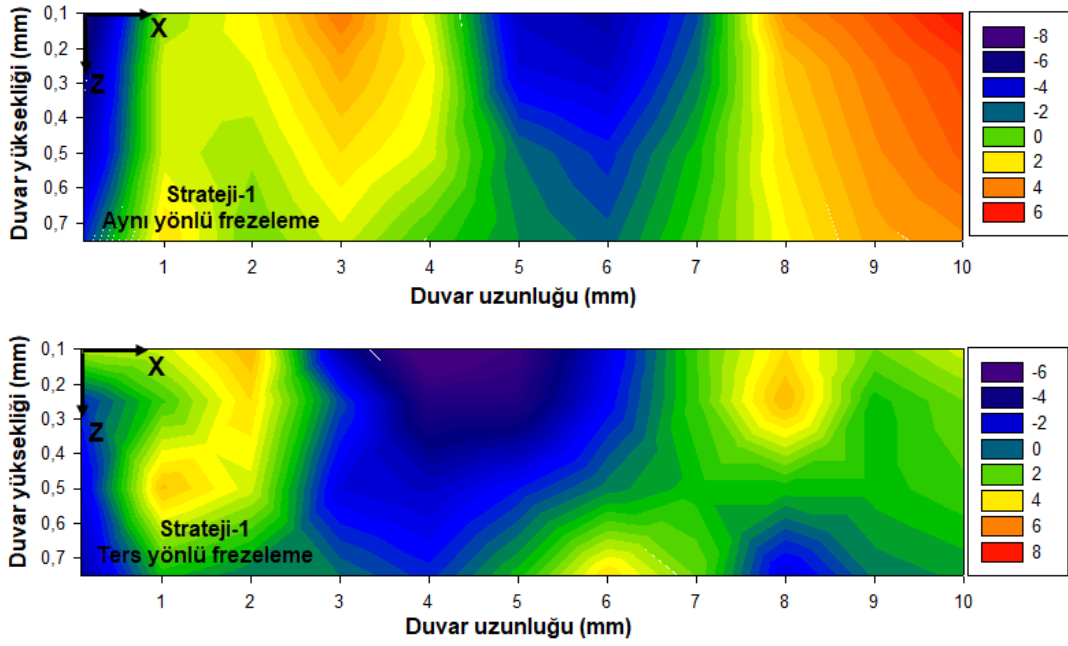
Şekil 4.16 KS-0 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.

Şekil 4.17 de 1 nolu kesme stratejisinin (KS-1) ince duvar deformasyonu üzerindeki etkisi verilmiştir. İnce duvarda meydana gelen deformasyon davranışı aynı yönlü ve ters yönlü kesme yöntemlerinde de benzerlik göstermektedir. Fakat hem $x=0$ hem de $x=10$ mm de maksimum deformasyon aynı yönlü frezelemede meydana gelmektedir. KS-2 ve

KS-3 ün tersine KS-1 de $4 < x < 6$ mm de ince duvarda meydana gelen deformasyon kenarlardaki kadar büyüktür (Şekil 4.17). $x=0$ da kesme yönlerinin farklı olması duvarın da deformasyon yönünün değişmesine neden olmuştur. Fakat bu durum $x=10$ mm de gözlemlenmemiştir. Maksimum deformasyon miktarı açısından karşılaştırıldığında KS-1 de meydana gelen deformasyon miktarı diğer kesme stratejilerine nazaran daha küçüktür. Bunun da nedeni ilk kesme işlemindeki aksenel talaş derinliğinin %50 daha küçük olmasıdır. İkinci kesme işleminde $a_p=200$ μm olmasına rağmen ince duvarın ilk oluşturulan yüzeyi 100 μm yüksekliğe sahiptir. Bu da ince duvarın daha rijit olmasına neden olduğundan $x=0$ ve $x=10$ mm deki deformasyon değerleri diğer stratejilere nazaran daha düşüktür. Şekil 4.18 de KS-1 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarın yüksekliği boyunca meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü verilmiştir. Duvarın uzunluğu dikkate alındığında, yaklaşık $x=5$ mm civarında meydana gelen deformasyonun benzerlik arz ettiği görülmektedir. Fakat $z=0,7$ mm de (duvarın gövdeye yakın olduğu bölgede) aynı yönlü frezelemede meydana gelen deformasyonun daha küçük olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum Şekil 4.15 te verilenin tam tersi mahiyetindedir. KS-0 da ters yönlü frezelemede meydana gelen deformasyon minimum iken KS-1 de aynı yönlü frezelemede meydana gelen deformasyon daha büyüktür.

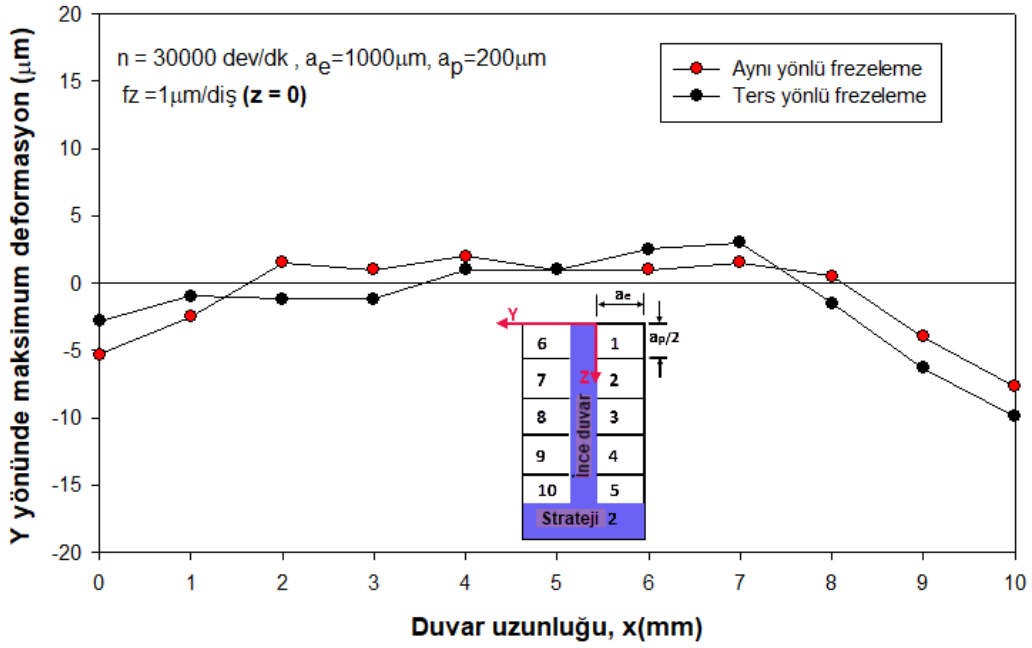


Şekil 4.17 KS-1 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.



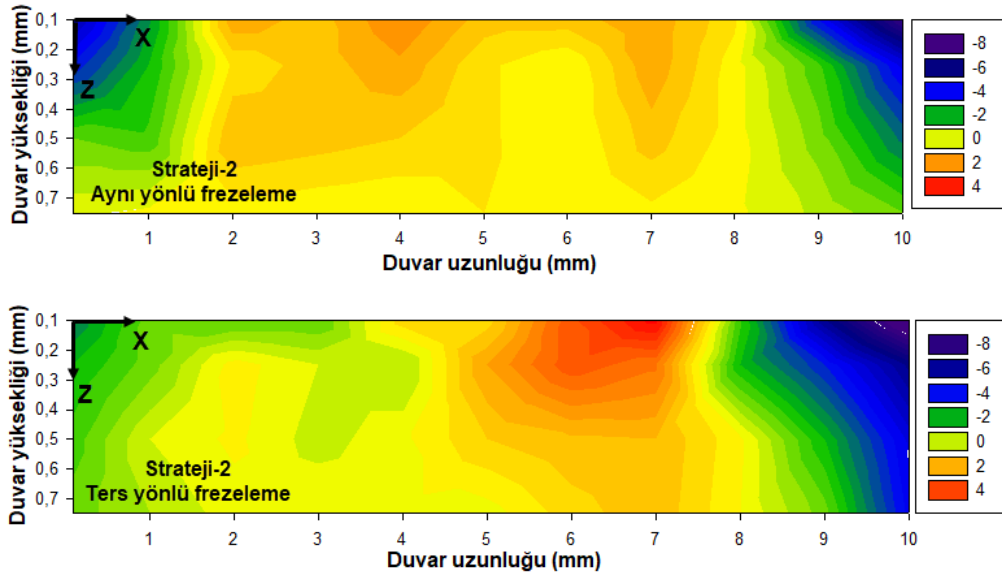
Şekil 4.18 KS-1 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.

Şekil 4.19 da KS-2 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyonun değişimi verilmiştir. Hem aynı yönlü hem de ters yönlü kesme yönteminde de duvarda meydana gelen deformasyon uç noktalardadır ve $-y$ yönünde meydana gelmiştir. Bunun da nedeni duvarın diğer tarafının frezelenmiş ve daha az rijitliğe sahip olmasıdır. İnce duvarın orta bölgesinde ($2 < x < 8$) meydana gelen deformasyon KS-1 e göre daha küçüktür. KS-1 de duvarın her iki ucunda meydana gelen deformasyon yön değiştirmektedir. Bir anlamda kesme yönünün aynı veya ters yönlü frezeleme olmasından etkilenmektedir. Fakat KS-2 kesme yönünden etkilenmemektedir. $x=10$ mm de duvarda meydana gelen deformasyon değeri $x=0$ daki deformasyon değerlerinden daha büyüktür. Özellikle ters yönlü frezelemede takımın giriş ve çıkışındaki deformasyon miktarları arasında iki kattan daha büyük fark vardır.



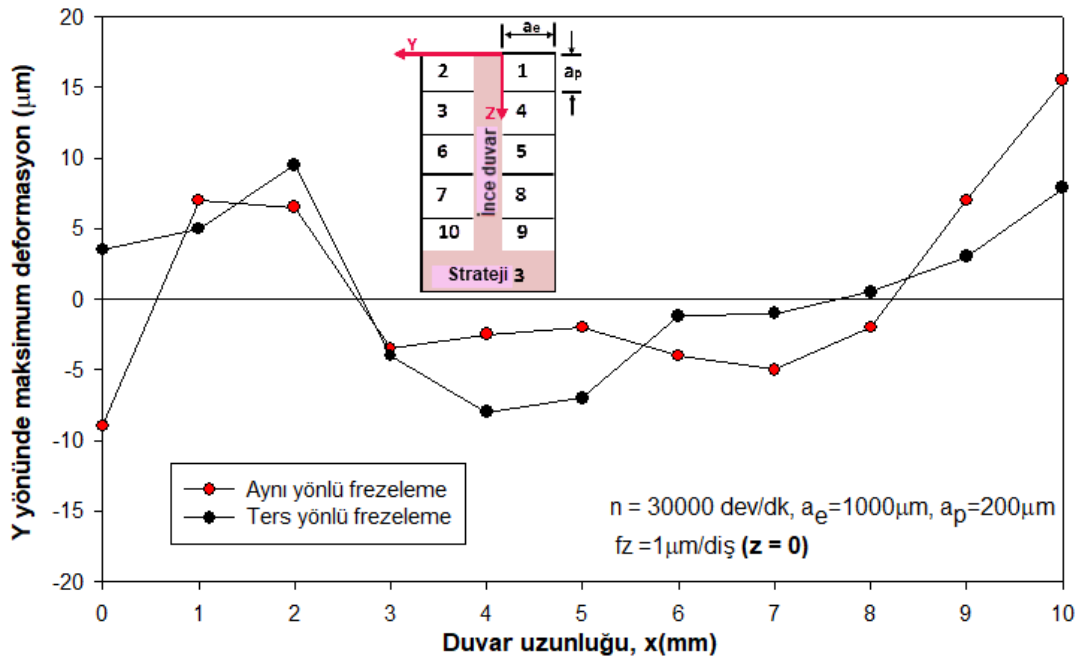
Şekil 4.19 KS-2 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.

Şekil 4.20 de KS-2 için deformasyonun 2D mesh görünümü verilmektedir. İnce duvarın $z = 0$ dan $z = 0,7$ mm ye kadarki yüksekliği göz önüne alındığında hem aynı yönlü hem de ters yönlü frezelemede benzer bir deformasyonun meydana geldiği görülmektedir. Duvarın her iki ucunda $-y$ yönünde deformasyon meydana gelirken, duvarın orta kısımlarında $+y$ yönünde bir deformasyon meydana gelmiştir. Sayısal değer olarak maksimum deformasyonun ters yönlü frezelemede meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.20 KS-2 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.

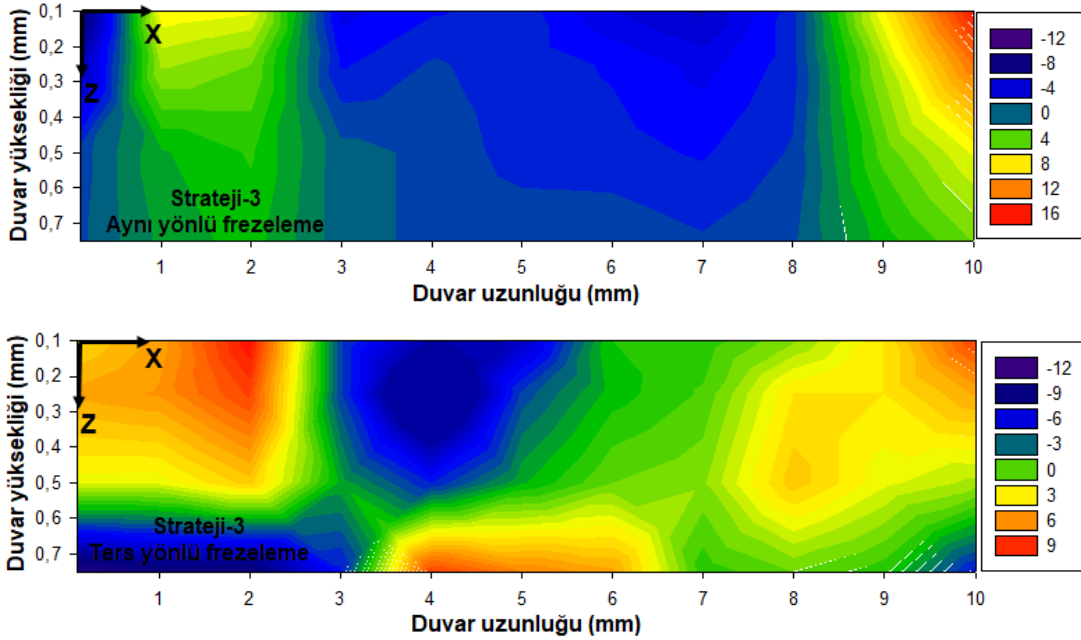
Şekil 4.21 de su yolu kesme yöntemi olarak isimlendirilen, kesme stratejisi 3 (KS-3) te aynı ve ters yönlü frezeleme yönteminin etkisi verilmiştir. Aynı yönlü frezeleme yönteminin kullanıldığı kesme işleminde ince duvardaki deformasyon miktarı daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum hem takımın giriş hem de çıkış noktasında değişmemektedir. İnce duvarın orta bölgesinde ($3 < x < 8$ mm) meydana gelen deformasyon miktarının daha küçük olduğunu söylemek mümkündür. Fakat ince duvarın orta kısmında maksimum deformasyon ters yönlü frezeleme yönteminde elde edilmiştir. Tüm duvar uzunluğu boyunca ters yönlü frezelemede meydana gelen maksimum deformasyon yaklaşık 8 μm civarında iken aynı yönlü frezeleme yönteminde elde edilen maksimum deformasyon 15 μm dir. Aynı yönlü frezeleme yöntemi için ortalama kuvvetin genliği zıt yönlü frezelemeye göre her zaman daha yüksektir (Li vd. 2010). Bu durum, ince duvar yapıların mikro frezelenmesi için ters yönlü frezeleme yönteminin tercih edilen bir yöntem olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 4.21 KS-3 için aynı yönlü ve ters yönlü kesme yönleri dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.

Şekil 4.22 de KS-3 için ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümünü verilmektedir. Sayısal değer anlamında ters yönlü frezelemede meydana gelen deformasyonun daha küçük olduğunu söylemek mümkündür. Fakat ince duvarın tüm yüzeyi düşünüldüğünde ters yönlü frezelemedeki deformasyonun y yönünde daha

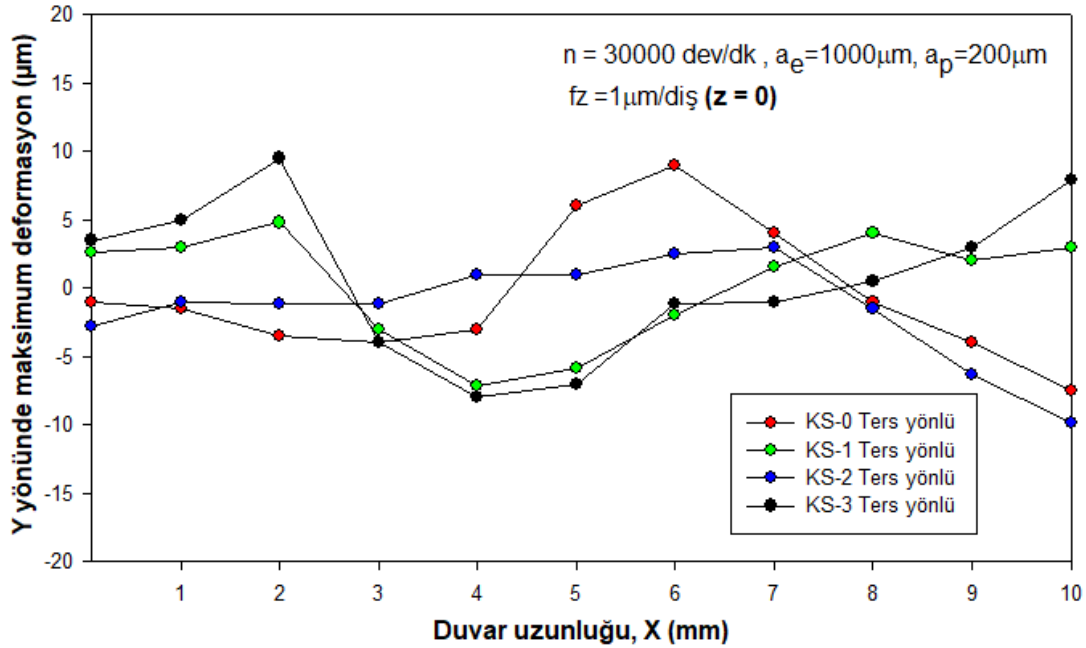
fazla bir yön değiştirdiği görülmektedir. Aynı yönlü frezeleme sonrasında ince duvarın büyük bir kısmında meydana gelen deformasyon sıfıra çok yakın iken ters yönlü frezelemede ince duvarın sadece belirli bir kısmında ($x=4\text{mm}$) meydana gelen deformasyon yaklaşık sıfır civarındadır.



Şekil 4.22 KS-3 için aynı ve ters yönlü frezeleme sonrasında ince duvarda meydana gelen deformasyonun 2D mesh görünümü.

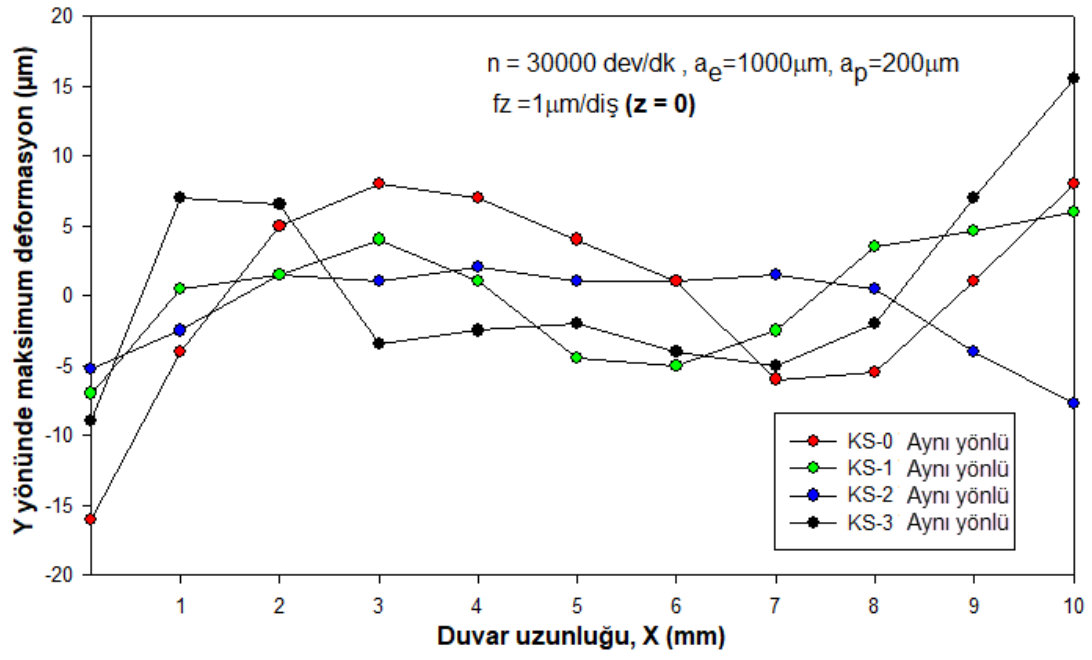
Yapılan deneylerde kesme stratejilerinden; sıralı kesme (KS-0), adım destekli kesme (KS-1), tek taraflı kesme (KS-2) ve su yolu kesme (KS-3) stratejilerinin, duvar deformasyonu üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.23 te verilmiştir. Ters yönlü frezeleme yöntemi ile oluşturulan ince duvardaki deformasyon miktarları kıyaslandığında su yolu kesme stratejisinde (KS-3) meydana gelen deformasyonun diğer yöntemlere nazaran bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir. KS-2 yönteminde ise ince duvardaki deformasyon miktarının belli bir noktadan sonra arttığı grlmştir. Bu durum tek taraflı kesme yönteminde belli bir pasoya kadar ince duvarın desteklenmesi fakat belli bir noktadan sonra ince duvar desteklenmeyeceğinden deformasyonun arttığını söylemek mümkündür. İnce duvarda meydana gelen minimum deformasyon ise $x=0$ noktasında ve KS-0 da gerçekleşmiştir. $x=0$ ve $x=10$ mm de gerçekleşen deformasyonlarda ise en az fark KS-1 de gerçekleşmiştir. Bu noktalarda deformasyon miktarları arasında farkın az olması; KS-1 de ilk pasoda aksenal kesme derinliğinin yarısı alınarak hem talaş kaldırma yükü azaltılmış hem de ince duvarda destekleme

durumu oluştuğundan $x=0$ da ve $x=10$ mm de diğer kesme stratejilerine göre meydana gelen deformasyonun daha az oluştuğunu söylemek mümkündür. KS-1 de son kesme işleminde de aksel kesme derinliğinin yarısı alınarak kesme işlemi tamamlandığından $x=10$ mm de diğer kesme stratejilerine nazaran duvardaki deformasyonun daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.23 KS-0, KS-1, KS-2, KS-3 için ters yönlü frezeleme dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.

Dört farklı kesme stratejisinde aynı yönlü frezeleme kullanıldığında ince duvarda meydana gelen deformasyonun değişimi Şekil 4.24 te verilmiştir. Bu dört strateji yönteminde de ince duvarda meydana gelen deformasyon ters yönlü frezeleme yöntemi kullanılarak oluşturulan ince duvarlara kıyasla daha belirgin bir şekilde artmaktadır. Bu durum daha önce açıklandığı gibi aynı yönlü frezeleme yönteminde ortalama kuvvet genliğinin daha fazla olması ve duvardaki deformasyon miktarının artması ile sonuçlanmaktadır. $x=0$ ve $x=10$ mm de gerçekleşen minimum deformasyon KS-1 de gerçekleşmiştir. İnce duvarın orta kısmında $3 < x < 8$ mm olan noktalarda ise deformasyon artmıştır. KS-1 de paso sayısının daha fazla olması takım yolunun artmasına sebep olduğundan deformasyonun bu noktalarda arttığını söylemek mümkündür. Dört kesme stratejisi içerisinde KS-0 ve KS-3 te meydana gelen deformasyon maksimum düzeydedir. Bu her iki kesme stratejisinde maksimum deformasyon duvarın uç (takımın giriş çıkış yaptığı) noktalarında meydana geldiği saptanmıştır.



Şekil 4.24 KS-0, KS-1, KS-2, KS-3 için aynı yönlü frezeleme dikkate alınarak oluşturulan ince duvarda meydana gelen deformasyon.

5. SONUÇ

Bu çalışmada iş parçası malzemesi olarak Al 7075-T651 alaşımı kullanılmıştır ve bu malzeme üzerinde 1mm yüksekliğinde ve 50 µm kalınlığında ince duvarlar mikro frezeleme yöntemi ile işlenmiştir. Frezeleme işlemleri gerçekleştirilirken devir sayısı 30000 dev/dk ve radyal talaş derinliği 1000 µm sabit alınmıştır. Çalışmada ince duvar deformasyonuna takım geometrisinin, kesme parametrelerinin, frezeleme yönteminin ve kesme stratejilerinin etkisini gözlemlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde takım geometrisinin etkisini incelemek amacıyla değişken helis açılara ve farklı kesici ağız sayılarına sahip takımlar kullanılmıştır. Helis açısı deneylerinde devir sayısı, aksenal kesme derinliği ve radyal kesme derinlikleri ve dış başına ilerleme değerleri sabit alınarak 30°, 40° ve 45° helis açılı takımlarla deneyler gerçekleştirilmiştir. İnce duvar deformasyonunda kesici ağız sayısının etkisi araştırılırken ise 30° helis açısına sahip 2, 3 ve 4 ağızlı takımlar kullanılmıştır. İnce duvarlar işlenirken kesme parametrelerinin etkisini gözlemlemek amacıyla yapılan deneylerde de farklı aksenal kesme derinlikleri ve farklı ilerleme değerlerinde frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Frezeleme yönteminin etkisi araştırılırken ise aynı yönlü ve ters yönlü frezeleme işlemleri ile deneyler yapılmıştır. İnce duvar deformasyonunda kesme stratejilerinin etkisini gözlemlemek amacıyla da dört farklı kesme yöntemi kullanılmıştır. Tüm bu yapılanlar doğrultusunda tez sonucunda ortaya çıkan sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

1. Artan helis açısıyla birlikte duvarda meydana gelen deformasyon miktarının da arttığını söylemek mümkündür. Bu nedenle mikro ince duvarlar işlenirken küçük helis açısına sahip kesici takımların seçilmesi, ince duvarda meydana gelen deformasyonu azaltmak açısından önerilebilir.

2. Kesici ağız sayısının da ince duvar deformasyonunda etkili bir unsur olduğu yapılan deneyler sonucunda anlaşılmıştır. Çalışmada elde edilen deney sonuçları ile minimum deformasyonun 2 ağızlı kesici takımında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ağız sayısı arttıkça duvardaki deformasyon miktarı da artmaktadır. İnce duvar deformasyonunu azaltmak için 2 ağızlı kesici takım önerilebilir.

3. İlerleme değerinin artırılması durumunda ince duvarlardaki deformasyon artmaktadır. Fakat ilerleme değerinin belli bir değerden küçük alınması da duvardaki deformasyonu artırmaktadır. $fz=0,25 \mu\text{m}/\text{diş}$ ve $fz=0,5 \mu\text{m}/\text{diş}$ için ince duvarda meydana gelen deformasyon miktarı artmaktadır. Bunun da temel nedeni boyut etkisidir. Bu noktadan hareketle, ince duvar işlemede ilerleme değeri minimum talaş kalınlığından daha büyük alınması tavsiye edilir. Artan ilerleme değeri ile de duvardaki deformasyonun ciddi şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle ince duvarlar mikro frezeleme ile işlenirken ilerleme değeri çok düşük ve çok yüksek seçilmemesi gerekmektedir.

4. Aksenal kesme derinliğinin artması talaş kesitinin artmasına neden olmaktadır. Artan talaş kesiti de hem kesme kuvvetlerini hem de takımın radyal sapmasını arttırmaktadır. Bu durum da ince duvardaki deformasyon miktarını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle ince duvarlar işlenirken düşük kesme derinlikleri tercih edilmesi önerilir.

5. Kesme stratejileri de duvar deformasyonunu etkileyen önemli bir faktördür. KS-1 için ince duvar deformasyonu incelendiğinde takım giriş ve çıkış noktalarındaki fark en az bu stratejide meydana gelmiştir. Bu durum ince duvar oluşturulurken ilk ve son pasoda aksenal kesme derinliği değerinin yarısı alındığından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle KS-1 ince duvarlar işlenirken tercih edilmesi önerilir.

6. Frezeleme yöntemi de duvar deformasyonunda dikkat edilmesi gereken bir unsurdur. Kesme stratejileri, aynı yönlü ve ters yönlü frezeleme yöntemlerine dikkat edilerek incelendiğinde genellikle aynı yönlü frezeleme yönteminde duvarda deformasyon miktarının arttığı görülmektedir. Bu nedenle deformasyonun daha az gerçekleştiği ters yönlü frezeleme yöntemi ince duvarlar işlenirken tercih edilmesi önerilir.

6. KAYNAKLAR

- Agirre A, Thepsonti T, Özel T, 2012, Micro-Milling of Metallic Thin-Wall Features with Applications in Micro-Heat Sinks, Ninth International Conference on High Speed Machining, March 2012, San Sebastian, Spain.
- Altıntaş Y, 2012, Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design, January 2012, Cambridge University, Cambridge, UK.
- Annoni M, Petro S, Rebaioli L, Semeraro Q, Solito R, 2013, Process Parameters Effect on Cutting Forces and Geometrical Quality in Thin Wall Micromilling, Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, 41, 489-498.
- Annoni M, Rebaioli L, Semeraro Q, 2015, Thin Wall Geometrical Quality Improvement in Micromilling, Int J Adv Manuf Technol, 79, 881–895.
- Aramcharoen A, Mativenga P T, 2009, Size Effect and Tool Geometry in Micromilling of Tool Steel, Precision eng., 33, 402-407.
- Arnaud L, Gonzalo O, Seguy S, Jauregi H, Peigne G, 2010, Simulation of Low Rigidity Part Machining Applied to Thin-walled Structures. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 54, 479–488.
- Aslantaş K, Ekici E, Çiçek A, 2013, Optimization of Process Parameters for Micro Milling of Ti-6Al-4V Alloy Using Taguchi-based Gray Relational Analysis, Measurement, 128, 419-427.
- Aslantaş K, Hopa H E, Perçin M, Uçun İ, Çiçek A, 2016, Cutting performance of nanocrystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy, Precision Engineering, 45, 55-66.
- Aslantaş K, LKH Alatrushi, 2020, Experimental Study on the Effect of Cutting Tool Geometry in Micro-Milling of Inconel 718, Arabian Journal for Science and Engineering, 46, 2327-2342.
- Baowan P, Saikaew C, Wisitsoraat A, 2017, A. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 90, 3085.
- Bang Y B, Lee K M and Oh S, 2005, 5-axis Micro Milling Machine for Machining

- Micro Parts Int. J. Adv. Manuf. Technol. 25, 888–894.
- Bing D, Guang-bin Y, Yan-qi G, Jun-peng S, Yan-qi G, Xue-mei W, Yu-xin L, 2015, Machining Surface Quality Analysis of Aluminum Alloy ThinWalled Parts in Aerospace, International Journal of Security and Its Applications, 9, 201-208.
- Biermann D, Kersting P, Surmann T, 2010, A General Approach to Simulating Workpiece Vibrations During Five-axis Milling of Turbine Blades. CIRP Ann. Manuf. Technol., 59, 125–128.
- Bravo U, Altuzarra O, Lopez de Lacalle L N, Sanchez J A A, Campa F J J, 2005, Stability Limits of Milling Considering The Flexibility of The Workpiece and The Machine. Int. J. Mach. Tools Manuf., 45, 1669–1680.
- Bolar G, Joshi S N, 2018, Numerical Modeling and Experimental Validation of Machining of Low-Rigidity Thin-Wall Parts. In: Pande S., Dixit U. (eds) Precision Product-Process Design and Optimization, Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering, Springer, Singapore, 99-122.
- Bolar G, Joshi S N, 2020, Influence of End Mill Geometry on Milling Force and Surface Integrity While Machining Low Rigidity Parts Int. J. Mach. Mach. Mater, 22, 212.
- Borojević, S, Lukić D, Milošević M, Vukman J, Kramar D, 2018, Optimization of process parameters for machining of Al 7075 thin—Walled structures. Adv. Prod. Manag., 13, 125–135.
- Brecher C, Utsch P, and Wenzel C, 2009, “Five-axes Accuracy Enhancement by Compact and Integral Design,” CIRP Ann. -Manuf. Technol., 58, 355–358.
- Burek J, Żyłka L, Płodzien M, Sulkowicz P, Buk J, 2017, The Effect of The Cutting Edge Helix Angle of The Cutter on The Cutting Force Components and Vibration Acceleration Amplitude, Mechanik, 90, 971-973.
- Burek J, Płodzien M, 2012, Wysoko Wydajna Obrobka Części Ze Stopow Aluminium o Złożonych Kształtach, Mechanik. 7, 542–549.
- Burek J, Żyłka Ł, Płodzien M, Buk J, 2016, Wpływ Zarysu Ostrza Frezu Na Kształtowanie Wiórów w Wysokowydajnym Frezowaniu Stopu Aluminium,

- Mechanik. 8–9, 1216–1217.
- Burek J, Żyłka Ł, Gdula M, Płodzień M, 2015, Wpływ Zarysu Linii Ostrza Frezu Na Siłę Skrawania w Procesie Wysokowydajnej Obróbki Stopu AlZn5.5MgCu, *Mechanik. 8–9*, 275–284.
- Campa F J, Lopez de Lacalle L N, Celaya A, 2011, Chatter avoidance in the milling of thin floors with bull-nose end mills: Model and stability diagrams. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 51, 43–53.
- Chae J, Park S S, Freiheit T, 2006, Investigation of Micro-cutting Operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 313-332.
- Cheng K, Huo D, 2013, *Micro-Cutting: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, 366p, United Kingdom.
- Çelik S G, 2017, Mikro Frezeleme İşleminde Takım Geometri Etkisinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 105s, Afyon.
- Çevik B, Ozcatalbas Y, Gülenç B, 2014, SKK İle Birleştirilen 7075-T651 Al Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Devir Sayısının Etkisi, 658-668.
- Davim, J P, Maranhão C, Jackson M J, Cabral G, and Gracio J. 2008, FEM Analysis in High Speed Machining of Aluminium Alloy (Al7075-0) Using Polycrystalline Diamond (PCD) and Cemented Carbide (K10) Cutting Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 39, 1093–1100.
- Delio T, 2002, Putting the High in Machining Performance, *Tooling and Production*, 68-7, 38–41.
- Dimov S, Pham D T, Ivanov A, 2004, Micromilling Strategies: Optimization Issues. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture*, 218, 731–736.
- Do M D, Son Y, Choi H J, 2018, Optimal Workpiece Positioning in Flexible Fixtures for Thin-Walled Components. *CAD Comput. Aided Des.*, 95, 14–23.
- Dornfeld D, Min S and Takeuchi Y, 2006, Recent Advances in Mechanical Micromachining *Ann. CIRP* 55, 745- 768.

- Elbestawi M A, Sagherian R, 1991, Dynamic Modeling for The Prediction of Surface Errors in The Milling of Thin-walled Sections. *J. Mater. Process. Technol.*, 25, 215–228.
- Fabio O C, Adriane L M and Anna C A, 2017, Study of The Cutting Forces on Micromilling of An Aluminum Alloy *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng* 39, 1289–1296.
- Feng J, Sun Z, Jiang Z, Yang L, 2016, Identification of Chatter in Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Thin-Walled Workpieces Based on Cutting Force Signals and Surface Topography. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 82, 1909–1920.
- Fıçıcı F, Dündar M, Özen F, 2015, Mikro Frezeleme Tezgahının Tasarımı ve Kısımları, *El Cezeri Journal of Science Engineering*, 3, 335-344.
- Filiz S, Conley C M, Wasserman M B, Özdoğanlar O B, 2007, An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro Endmill, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 1088-1100.
- Fitzgerald R W, 1982, *Mechanics of materials*, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1 January 1982, Massachusetts, USA.
- Friedrich C R, Vasile M J, 1997, Development of The Micromilling Process for High-Aspect-Ratio Microstructures *J. Microelectromech, Syst.* 5, 33-38.
- Fortgang J D, 2006, *Combined mechanical and command design for micro-milling machines*, Georgia Institute of Technology, 459p, Georgia.
- Garimella S, Ramesh Babu P, 2013, Understanding The Challenges in Machining Thin Walled Thin Floored Avionics Components, *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.*, 2, 93–100.
- Geçkinli E, 2002, *Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi*, 2. Isıl İşlem Sempozyumu, 07-08 Şubat 2002, İTÜ, İstanbul.
- Groover M P, 2002 *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1025p, New York.
- Hadzley M A B, Fatin M R N, Izamshah R, Sarah S, Kasim M S, Ali M A, Sulaiman

- M A, 2015, Effects Of Helix Angle On Cutting Performance For Machining Thin-Wall Aerospace Monolithic Component, *Applied Mechanics and Materials*, 699, 3-8.
- Hatamleh O, Singh P M, Garmestani H, 2009, Corrosion Susceptibility of Peened Friction Stir Welded 7075 Aluminum Alloy Joints, *Corrosion Science*, 51, 135-143.
- Herranz S, Campa F J, López de Lacalle L N, Rivero A, Lamikiz A, Ukar E, Sánchez J A, Bravo U, 2005, The Milling of Airframe Components with Low Rigidity: A General Approach to Avoid Static and Dynamic Problems. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 219, 789–801.
- Huo D, Cheng K, and Wardle F, 2010, Design of A Five-axis Ultra-Precision Micro-milling Machine-UltraMill, Part 1, Holistic Design Approach, Design Considerations and specifications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 47, 867–877.
- Ikawa N, Shimada S, Tanaka H, 1992, Minimum Thickness of Cut in Micromachining, *Nanotechnology*, 3, 6–9.
- Izamshah R A, Mo J P T, Ding S, 2011, Hybrid Deflection Prediction on Machining Thin-Wall Monolithic Aerospace Components, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 226, 592–605.
- Izamshah R R A, 2011, Hybrid Deflection Prediction for Machining Thin-Wall Titanium Alloy Aerospace Component, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226, 592-605.
- Izamshah R, Yuhazri M Y, Hadzley M, Amran M, Subramonian S, 2013, Effects of End Mill Helix Angle on Accuracy for Machining Thin-Rib Aerospace Component, 315, 773-777.
- Izamshah R, Affendi H, Mo J P T, Kasim M S, Ding S, Mohamad N, Liew P J, Ali M A, Sundi S A and Sued M K, 2018, Simultaneous Twin Cutter Technique for Machining Thin Wall Low Rigidity Part, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12, 39-50.
- Je T, Lee J, Choi D, Lee E, Shin B and Whang K, 2004, A Study of The Micro Pole

- Structure Fabrication and Application Technology by Micro End-Milling Processes Key Eng. Mater. 257–8, 453–8.
- Jiang X, Zhu Y, Zhang Z, Guo M, Ding Z, 2018, Investigation of Residual Impact Stress and Its Effects on The Precision During Milling of The Thin-Walled Part, Int. J. Adv. Manuf. Technol, 97, 877–892.
- Joshi S N, Bolar G, 2020, Influence of End Mill Geometry on Milling Force and Surface Integrity While Machining Low Rigidity Parts, Journal of The Institution of Engineers, 101, 671-681.
- Kalpakjian S, Schmid S R, 2006, Manufacturing Engineering and Technology, Prentice Hall, 1148p, New York.
- Kasem H, Tsipenyuk A and Varenberg M, 2015, Biomimetic wall-shaped hierarchical microstructure for gecko-like attachment SoftMatter, 11, 2909-2915.
- Kaya I, 2005, Al7075 Alaşımının Şekillenme ve Isıl İşleme Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, İstanbul.
- Khan M Z U, Uddin E, Akbar B, Akram N, Naqvi A A, Sajid M, Ali Z, Younis Md. Y, Márquez F P G, 2020, Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop in Microchannel Heat Sink Using Al₂O₃ and ZrO₂ Nanofluids, 10, 1796.
- Khandagale P, Bhakar G, Kartik V, Joshi S S, 2018 Modelling Time-Domain Vibratory Deflection Response of Thin-Walled Cantilever Workpieces During Flank Milling, J. Manuf. Process, 33, 278–290.
- Kim C J, Mayor J R, Ni J, 2004, A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling J. Manuf. Sci. Eng., 126, 710–8.
- Kim Y H, Ko S L, 2002, Development of A Design and Manufacturing Technology for the End Mill in Machining-hardened Steel, J Mater Process Technol 130-131,653-661.
- Kolluru K V, Axinte D, Becker A, 2013, A Solution For Minimising Vibrations in Milling of Thin Walled Casings by Applying Dampers to Workpiece Surface. CIRP Ann. Manuf. Technol., 62, 415–418.

- Kuczmaszewski J, Zaleski K, 2015, Obróbka Skrawaniem Stopów Aluminium I Magnezu, Politechnika Lubelska, 311p, Lublin OWPL.
- Kuram E, 2016, İnce Cidarlı Parçaların Mikro Frezelenmesinde Talaş Kaldırma Yolunun Takım Aşınması, Kuvvetler ve Parça Kalitesi Üzerindeki Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4, 293-298.
- Lazoglu I, Mamedov A, 2016, Deformation of thin parts in micromilling, CIRP Annals, 65, 117-120.
- Lee K, Dornfeld D A, 2004, A Study of Surface Roughness in The Micro-end-milling process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95, 1655-1664.
- Li P, Zdebski D, Langen H H, Hoogstrate A M, Oosterling J A J, Munnig Schmidt R H, Allen D M, 2010, Micromilling of Thin Ribs With High Aspect Ratios, Journal of micromechanics and microengineering, 20-11, 5013.
- Li X, Zhao W, Li L, He N, Chi S, 2015, Modeling and Application of Process Damping in Milling of Thin-Walled Workpiece Made of Titanium Alloy. Shock and Vibration, 2, 1-12.
- Liao Y S, Chen S T, Lin C S and Chuang T J, 2005, Fabrication of high aspect ratio microstructure arrays by micro reverse wire-EDM J. Micromech. Microeng., 15, 1547–1555.
- Lianos I, Agirre A, Urreta H, Thepsonthi T, Özel T, 2014, Micromilling High Aspect Ratio Features Using Tungsten Carbide Tools, The Journal of Engineering Manufacture, 228, 1350–1358.
- Liu Y, Li P F, Liu K, Zhang Y M, 2016, Micro Milling of Copper Thin Wall Structure Int. J. Adv. Manuf. Technol., 90, 1-8.
- Liu Y, Li P, Liu K, Zhang Y M, 2017, Micro milling of copper thin wall structure, Int J Adv Manuf Technol, 90, 405–412.
- Lucca D A, Rhorer R L, Komanduri R, 1991, Energy Dissipation in The Ultraprecision Machining of Copper, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 40, 69-72.

- Luo X, Cheng K, Webb D, Wardle F, 2005, Design of ultraprecision machine tools with application to manufacture of miniature and micro components. *J Mater Process Technol* 167, 515–528.
- Madou, M J, 2011, *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology Volume III from MEMS to BioMEMS and Bio-NEMS, Manufacturing Techniques and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 9781420055160, 650p, Boca Raton, London, Newyork.
- Mahmud A, Mayer J R R, Baron L, 2015, Determining The Minimum Clamping Force by Cutting Force Simulation in Aerospace Fuselage Pocket Machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 80, 1751–1758.
- Mahmud A, Mayer J R R, Baron L, 2015, Magnetic Attraction Forces Between Permanent Magnet Group Arrays in A Mobile Magnetic Clamp for Pocket Machining. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 11, 82–88.
- Malekian M, Park S S, Jun M B, 2009, Tool wear monitoring of micro-milling operations, *J Mater Process Technol*, 209, 4903–4914.
- Malekian M, Park S S, Jun M B, 2009, Modeling of dynamic micromilling cutting forces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 586–598.
- Mamedov A, Layegh K S E and Lazoglu I, 2013, Machining force and tool deflections in micro-milling. In: 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operation (CIRP CMMO), Torino, Italy, June 13th – 14th, 2013, *Procedia CIRP*, 8,147-151.
- Mamedov A, Lazoglu I, 2016, Thermal Analysis of Micromilling Titanium Alloy Ti–6Al–4V, *Journal of Materials Processing Technology* 229, 659–667.
- Masuzawa T, 2000, State of The Art of Micromachining *Ann. CIRP* 49, 473–88.
- Michalik P, Zajac J, Hatala M, Mital D, Fecova V, 2014, Monitoring Surface Roughness of Thin-walled Components from Steel C45 Machining Down and Up Milling, 58, 416-428.
- Moghadas H, Saidi M S, Kashaninejad N, Nguyen N T, 2017, Challenge in particle delivery to cells in a microfluidic device, *Drug Delivery and Translational*

- Research, 8, 830-842.
- Ng C K, Melkote S N, Rahman M, Kumar A S, 2006, Experimental Study of Micro-and Nano-scale Cutting of Aluminium 7075-T6, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 929-936.
- Ning H, Zhigang W, Chengyu J, Bing Z, 2003, Finite Element Method Analysis and Control Strategy for Machining Deformation of Thin-walled Components, *J. of Mat. Processing Tech.*, Vol., 139, 332-336.
- Otieno A and Mirman C, 2008, Finite element analysis of cutting forces and temperatures on microtools in the micromachining of aluminum alloys, In: *Proceedings of The IAJC-IJME International Conference*, November 2008, Nashville TN.
- Özyürek D, Yılmaz R, Kibar E, 2012, RRA İşleminde Yeniden Çözeltiyeye Alma Parametreleri 7075 Alüminyum Alaşımlarının Çekme Dayanımına Etkisi, *Gazi Müh.Mim. Fak. Dergisi*, 27, 193-203.
- Panczuk R, 2007, Clean Alternative Technology to Chemical Milling: Demonstration of Technical, Environmental and Economic Performance of Mechanical Milling for The Machining of Complex Shaped Panels Used in The Aeronautical and Space Industries—GAP (Green Advanced Panel), 25 June 2008, France.
- Polzer A, Dufkova K, Pokorny P, 2015, On The Modern CNC Milling With a Compensation of Cutting Tools and Thin-Walled Workpiece Deflections, *Journal of Machine Engineering*, 15, 3.
- Popov K, Dimov S, Pham D T, Ivanov A, 2006, Micromilling Strategies for Machining Thin Features, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 220, 1677-1684.
- Qu S, Zhao J, Wang T, 2016, Three-dimensional Stability Prediction and Chatter Analysis in Milling of Thin-walled Plate. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 86, 2291–2300.
- Ratchev S, Liu S, Huang W, Becker A A, 2004, A Flexible Force Model for End Milling of Low-rigidity Parts. *J. Mater. Process. Technol.*, 153–154, 134–138.

- Rezaei H, Sadeghi M H, Budak E, 2018, Determination of minimum uncut chip thickness under various machining conditions during micro-milling of Ti-6Al-4V, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 1617-1634.
- Richter-Trummer V, Koch D, Witte A, Dos Santos J F, De Castro P M S T, 2013, Methodology for Prediction of Distortion of Workpieces Manufactured by High Speed Machining Based on An Accurate Through-the-thickness Residual Stress Determination. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 68, 2271–2281.
- Sato T, Shimizu Y, Sano Y, Shima O K, 2018, In vitro and in vivo analysis of the biodegradable behavior of a magnesium alloy for biomedical applications, *Dental Materials Journal*, 38, 1.
- Scheider I, Brocks W, 2009, Residual Strength Prediction of A Complex Structure Using Crack Extension Analyses. *Eng. Fract. Mech.* , 76, 149–163.
- Seguy S, Dessein G, Arnaud L, 2008, Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interaction. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48, 261–274.
- Sol I D, Rivero A, Lopez de Lacalle L N, Gamez A J, 2019, Thin-Wall Machining of Light Alloys: A Review of Models and Industrial Approaches, 12, 2012.
- Takeuchi Y, Suzukawa H, Kawai T, and Sakaida Y, 2006, Creation of Ultra-precision Microstructures with High Aspect Ratios, *CIRP Ann. -Manuf. Technol.*, 55, 107–110.
- Tang A, Liu Z, 2009, Three-dimensional Stability Lobe and Maximum Material Removal Rate in End Milling of Thin-Walled Plate. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 43, 33–39.
- Tian W, Ren J, Wang D, Zhang B, 2018, Optimization of Non-uniform Allowance Process of Thin-walled Parts Based on Eigenvalue Sensitivity. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 96, 2101–2116.
- Tlusty G, 2000, *Manufacturing Process and Equipment*, Prentice Hall, New Jersey.
- Tosello G, Bissacco G, Tang P T, Hansen H N, Nielsen P C, 2008, High aspect ratio

- micro tool manufacturing for polymer replication using μ EDM of silicon, selective etching and electroforming, *Microsyst Technol*, 14, 1757–1764.
- Tsai J S, Liao C L, 1999, Finite-element modelling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpieces, *Journal of Materials Processing Technology*, 94, 235-246.
- Ucun İ, Aslantaş K, Gökçe B, Bedir F, 2014, Effect of Tool Coating Materials on Surface Roughness in Micromachining of Inconel 718 Super Alloy, *Journal of Engineering Manufacture*, 228, 1550–1562.
- Uriarte L, Ivanov A, Oosterling J A J, Staemmler L, Tang P T and Allen D M, 2005, A Comparison Between Microfabrication Technologies for Metal Tooling Proc. 1st Int. Conf. on Multi-Material Micro Manufacture, 351–4 p, Karlsruhe, Germany.
- Venkatesh V, Swain N, Sırımıvas G, Kumar P and Barshilia H C, 2016, Review on the machining characteristics and research prospects of conventional micro scale machining operations. *Materials and Manufacturing Process*, 32, 235-262.
- Vogler, M P, Devor R E, Kapoor S G, 2004, On The Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-endmilling, *J. Manuf. Sci. Eng*, 126, 685-694.
- Vukman J, Lukic D, Milosevic M, Borojevic S, Antic A, Durdev M, 2016, Fundamentals of The Optimization of Machining Process Planning for The Thin-Walled Aluminium Parts, *J. Prod. Eng*, 19, 53-56.
- Wan M, Zhang W, Qui K, Gao T, 2005, Numerical prediction of static form errors in peripheral milling of thin-walled workpieces with irregular meshes, *J Manuf Sci Eng*, 127, 13–22.
- Wan M, Zhang W H, Qin G H, Wang Z P, 2008, Strategies for Error Prediction and Error Control in Peripheral Milling of Thin-walled Workpiece. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 48, 1366–1374.
- Wan X J, Zhang Y, Huang X D, 2013, Investigation of Influence of Fixture Layout on Dynamic Response of Thin-Wall Multi-Framed Workpiece in Machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 75, 87–99.
- Wang H, Huang L, Yao C, Kou M, Wang W, Huang B, Zheng W, 2015, Integrated

- Analysis Method of Thin-Walled Turbine Blade Precise Machining. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 16, 1011–1019.
- Weck M, Hennig J, and Hilbing R, 2001, Precision Cutting Processes for Manufacturing of Optical Components, *Lithogr. Micromach. Tech. Opt. Compon. Fabr.*, 4440, 145–151.
- Weinert K, Kersting P, Surmann T, Biermann, 2008, Modeling regenerative workpiece vibration in five-axis milling. *Prod Eng* 2, 255–260.
- Weule H, Hüntrup V, and Tritschler H, 2001, Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization, *CIRP Ann. -Manuf. Technol.*, 50, 61–64.
- Wojciechowski S, 2015, The Estimation of Cutting Forces and Specific Force Coefficients During Finishing Ball End Milling of Inclined Surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 110-123.
- Wu T, 2013, Cheng K (Ed), *Micro Milling, The State of The Art Approach Towards Applications (185-226)*, *Micro Cutting, Fundamentals and Applications*, Wiley, 368p, UK.
- Yarin L, Musyak A, Hetsroni G, 2009, *Fluid Flow, Heat Transfer and Boiling in Micro-Channels* Springer Heidelberg, 495p, Berlin.
- Yang G, 1980, *Elastic and plastic mechanics*, People Education Published Inc., 433p, PRC.
- Yi J, Wang X, Jiao L, Xiang J, Yi F, 2019, Research on Deformation Law and Mechanism for Milling Micro Thin Wall with Mixed Boundaries of Titanium Alloy in Mesoscale, *Science Direct*, 144, 106-329.
- Yuan Z J, Zhou M, Dong S, 1996, Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 62, 321-330.
- Zhang D, Gao K, Zhou T, 2015, Discussion on NC machining process of Thin Walled Parts Technical Measures, *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Switzerland, 701- 702, 864-868.
- Zhang L, Gao W, Zhang D, Tian Y, 2016, Prediction of Dynamic Milling Stability

Considering Time Variation of Deflection and Dynamic Characteristics in Thin-Walled Component Milling Process. Shock Vib, Article number 3984186.

Zhang J, Lin B, Fei J, Huang T, Xiao J, Zhang X, Ji C, 2018, Modeling and experimental validation for surface error caused by axial cutting force in end-milling process. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 99, 327–335.

İnternet Kaynakları

- 1- <http://havkar.com/tr/blog/view/ucak-yapisindaki-ana-bilesenler-ve-islevlerinin-tanimi-kanatlar/80>, 25.12.2020
- 2- <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/metallic/torres-surface-milling> 28.09.2020.
- 3- <http://www.innoclamp.de/>, 28.09.2020.
- 4- <https://www.sandvik.coromant.com>,10.01.2020.
- 5- <http://www.matweb.com/search/DataSheet>, 15.01.2021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özge ZOR
Doğum Yeri ve Tarihi : İzmir / 20.05.1988
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : +905054143882 / ozgezor@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Şehit Ali Karaoğlan Lisesi (2002–2006)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Böl.,
(2012–2015)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: HMS makine (2015)
: Milli Eğitim Bakanlığı Teknik Öğretmen (2015–Devam Ediyor)