



**İNCE CİDARLI YAPILARIN MİKRO  
FREZELENMESİNDE KESME PARAMETRELERİ  
VE KESME STRATEJİSİ ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ahmet HASÇELİK

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2025

Bu tez çalışması 22.Fen.Bil.22 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.  
Bu tez çalışması 122M223 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**İNCE CİDARLI YAPILARIN MİKRO FREZELENMESİNDE**  
**KESME PARAMETRELERİ VE KESME STRATEJİSİ**  
**ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Ahmet HASÇELİK**

**Danışman**

**Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran 2025**

## TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet HASÇELİK tarafından hazırlanan “İnce Cidarlı Yapıların Mikro Frezelenmesinde Kesme Parametreleri ve Kesme Stratejisi Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 30 / 06 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

**Başkan** : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER  
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

**Üye** : Prof. Dr. Adem ÇİÇEK  
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

**Üye** : Prof. Dr. Bekir YALÇIN  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

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

**Üye** : Doç. Dr. Ali ERÇETİN  
Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi

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

.....  
Prof. Dr. Bekir YALÇIN  
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.**

**30 / 06 / 2025**

**Ahmet HASÇELİK**

## ÖZET

Doktora Tezi

### İNCE CİDARLI YAPILARIN MİKRO FREZELENMESİNDE KESME PARAMETRELERİ VE KESME STRATEJİSİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet HASÇELİK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Son yıllarda havacılık, biyomedikal ve elektronik gibi sektörlerde, düşük ağırlıklı ve yüksek yapısal verimliliğe sahip ince cidarlı mikro yapıların kullanımı artış göstermiştir. Genellikle mikro frezeleme ile üretilen bu yapılar, yüksek geometrik hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilmekte; ancak düşük rijitlik ve kesme kuvvetlerinden kaynaklanan deformasyonlar, yüzey bütünlüğü ve boyutsal doğruluk üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle, mikro ölçekte uygun işleme stratejileri ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Al 6061-T6 alüminyum alaşımından üretilmiş mikro ince cidarlı yapıların mikro frezeleme sürecinde; kesme parametreleri, kesme stratejileri, kesici takım geometrisi ve kaplama türlerinin, yüzey kalitesi, cidar deformasyonu ve çapak oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Literatürde ilk kez bu tez kapsamında önerilen değişken ilerleme stratejisi ile, kesme işleminin başlangıç ve bitiş bölgelerinde meydana gelen plastik deformasyon %47'ye kadar azaltılmıştır. Cidar deformasyonu açısından, zıt-eş yönlü kesme stratejisi, zıt-zıt ve eş-eş yönlü kesmeye kıyasla 10 ila 15 kat daha düşük deformasyon değerleri sağlamıştır. Ayrıca 0°, 5° ve 15° talaş açlarına sahip farklı kaplamalı (AlTiN, TiSiN, ZrN, DLC) kesici takımlar kullanılarak takım geometrisinin ve yüzey özelliklerinin süreç performansına etkileri ortaya konmuştur. Optimum sonuçlar DLC kaplamaya sahip kesici takımlarla elde edilirken, 15° talaş açısına sahip kesiciler ile kesme kuvvetleri %22'ye, cidar deformasyonu ise %64'e kadar azaltılmıştır. Taguchi ve ANOVA yöntemiyle kesme parametrelerin etki büyüklükleri analiz edilmiş, ilerleme hızının deformasyon üzerindeki etkisinin %92,2 güven düzeyinde ve etki büyüklüğünün %87,3 olduğu ortaya

konulmuştur. Bu bulgular, ince cidarlı yapıların mikro frezelenmesinde deformasyonun azaltılması ve yüzey kalitesinin artırılmasına yönelik parametre optimizasyonuna imkân tanımıştır.

**2025, xvii + 152 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Mikro Frezeleme, İnce Cidarlı Yapılar, Değişken İlerleme Hızı, Plastik Deformasyon, Al 6061-T6.



## **ABSTRACT**

Ph.D. Thesis

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING PARAMETERS AND CUTTING STRATEGY IN MICRO-MILLING OF THIN-WALLED STRUCTURES**

Ahmet HASÇELİK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Kubilay ASLANTAŞ

In recent years, there has been an increased use of thin-walled microstructures with low weight and high structural efficiency in sectors such as aerospace, biomedical and electronics. These structures, which are generally produced by micro-milling, are favoured in applications requiring high geometric precision. However, deformations caused by low stiffness and cutting forces have adverse effects on surface integrity and dimensional accuracy. It is therefore imperative to ascertain the most suitable machining strategies and optimum cutting parameters at the micro scale. This study investigates the effects of cutting parameters, cutting strategies, cutting tool geometry and coating types on surface quality, wall deformation and burr formation during the micro milling process of micro thin-walled structures made of Al 6061-T6 aluminium alloy. The variable feed strategy proposed in this thesis is a pioneering contribution to the existing literature on the subject, with the plastic deformation occurring at the beginning and end of the cutting process being reduced by up to 47%. With regard to the deformation of the cutting edge, the up-down milling yielded values that were 10 to 15 times lower than those observed with the up-up and down-down milling. Furthermore, the impact of tool geometry and surface properties on process performance has been demonstrated through the utilisation of cutting tools with varying coatings (AlTiN, TiSiN, ZrN, DLC) with 0°, 5°, and 15° rake angles. While it was found that optimum results were obtained with cutting tools that had DLC coating, cutting forces were reduced up to 22% and wall deformation up to 64% with cutters that had a 15° rake angle. Taguchi and ANOVA methods were employed to

analyse the effect size of the cutting parameters, and it was found that the effect of feed rate on deformation was 87.3%, with a confidence level of 92.2%. These findings enabled the optimisation of parameters for the purpose of reducing deformation and improving surface quality in micro-milling of thin-walled structures.

**2025, xvii + 152 pages**

**Keywords:** Micro Milling, Thin-Walled Structures, Variable Feed Rate, Plastic Deformation, Al 6061-T6.



## TEŞEKKÜR

Bahsettiği sayısız nimetlerin yanı sıra bu çalışmayı da başarılı bir şekilde sonlandırmamı nasip eden Yüce Allah’a hamdüsena olsun.

Kişiliği, mesleki bilgisi ve çalışma azmi ile kendisini rol model olarak gördüğüm, bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yorumlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ’a sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi iletirim.

Değerli katkılarından dolayı, kıymetli hocam Prof. Dr. Bekir YALÇIN ve tez jüri üyelerine ayrıca teşekkürlerimi bildirmekten kıvanç duyarım.

Deneysel çalışmalarına vakit ayırmama destek olan Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ’a, yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ALBAŞKARA’ya ve her konuda öneri ve eleştirileriyle desteklerini gördüğüm iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

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

Bu süreçte desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, çocuklarımızın yükünü sırtlanan, canım eşim Elmira HASÇELİK’e, belki de hak ettikleri zamanı ayıramadığım aslan oğlum Aybars HASÇELİK ve prenses kızım Umay HASÇELİK’e gösterdikleri sabır ve anlayış için sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi iletirim.

Tübitak 1002 Hızlı Destek programı kapsamında 122M223 nolu proje ile tez çalışmamı maddi olarak destekleyen TÜBİTAK’a ve 22.Fen.Bil.22 nolu proje ile çalışmanın yürütülmesine maddi katkı sağlayan AKÜ BAPK’ya teşekkür ederim.

Ahmet HASÇELİK  
Afyonkarahisar 2025

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                   | i     |
| ABSTRACT .....                                                               | iii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                               | v     |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....                                                      | vi    |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                                         | ix    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                        | xi    |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                                       | xvi   |
| RESİMLER DİZİNİ .....                                                        | xvii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                | 1     |
| 1.1 İnce Cidarlı Yapıların İmalatında Frezelemenin Önemi.....                | 2     |
| 1.2 Çalışmanın Amacı.....                                                    | 5     |
| 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....                                                  | 8     |
| 2.1 İnce Cidarlı Yapılar .....                                               | 8     |
| 2.1.1 Özellikleri ve Kullanım Alanları.....                                  | 8     |
| 2.1.2 Alüminyum Alaşımının İnce Cidarlı Yapılarda Kullanımı.....             | 10    |
| 2.1.3 İnce Cidarlı Yapılar İçin Kullanılan Üretim Yöntemleri .....           | 11    |
| 2.1.4 Frezelemede Kullanılan Teknikler.....                                  | 14    |
| 2.1.5 İnce Cidar Frezeleme İçin Takım Seçim Kriterleri.....                  | 17    |
| 2.1.6 İnce Cidarlı Yapıların Frezelenmesindeki Zorluklar .....               | 19    |
| 2.2 Mikro Frezeleme Tekniği .....                                            | 24    |
| 2.2.1 Mikro Frezeleme Yöntemi ile İnce Cidarlı Yapıların Oluşturulması ..... | 24    |
| 2.2.2 Boyut Etkisi ve Minimum Talaş Kalınlığı .....                          | 25    |
| 2.3 Kesme İşlemini Etkileyen Parametreler .....                              | 27    |
| 2.3.1 Kesici Takım Malzemesi ve Kaplaması.....                               | 27    |
| 2.3.2 Kesici Takım Geometrisi .....                                          | 29    |
| 2.3.3 Kesme Parametreleri .....                                              | 29    |
| 2.3.4 Kesme Stratejileri.....                                                | 31    |
| 2.3.5 Kesme Yönü.....                                                        | 33    |
| 2.3.6 Dinamik Titreşimler.....                                               | 34    |
| 2.4 Yüzey Bütünlüğü ve Kalitesi .....                                        | 36    |
| 2.4.1 Yüzey Pürüzlülüğü.....                                                 | 36    |
| 2.4.2 Kalıntı Gerilmeler ve Distorsiyon.....                                 | 38    |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4.3 Yüzey Bütünlüğü Değerlendirme Teknikleri.....                               | 39  |
| 2.5 Optimizasyon Çalışmaları.....                                                 | 42  |
| 3. MATERYAL ve METOT.....                                                         | 45  |
| 3.1 Kesici Takım ve İş Parçası.....                                               | 45  |
| 3.1.1 Takım Geometrisinin Etkisi .....                                            | 47  |
| 3.1.2 Takım Kaplamasının Etkisi.....                                              | 48  |
| 3.2 Deney Düzeneği ve Kesme Kuvvetleri Ölçümü.....                                | 50  |
| 3.3 Salgı Tanımlaması ve Kontrolü .....                                           | 53  |
| 3.4 Değişken İlerleme Hızı Kesme Deneyleri .....                                  | 54  |
| 3.5 Kesme Yönü Deneyleri.....                                                     | 55  |
| 3.6 Kesme Stratejisi Deneyleri .....                                              | 56  |
| 3.7 İnce Cidar Deformasyon ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri .....                   | 57  |
| 3.8 Kalıntı Gerilme Analizi .....                                                 | 60  |
| 3.9 Taguchi Deney Tasarımı.....                                                   | 61  |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....                                                     | 63  |
| 4.1 Minimum Talaş Kalınlığının Tespiti ve Kesme Kuvvetlerinin Değişimi.....       | 63  |
| 4.2 Cidar Yüksekliği Boyunca Deformasyon Ölçümü .....                             | 66  |
| 4.3 Kesme Yönünün Deformasyona Etkisi.....                                        | 67  |
| 4.4 Kesme Stratejisinin Deformasyona Etkisi .....                                 | 69  |
| 4.5 Değişken İlerleme Hızlarının Etkisi .....                                     | 73  |
| 4.5.1 Cidar Deformasyonuna Etkisi .....                                           | 73  |
| 4.5.2 Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....                                             | 81  |
| 4.6 Kesme İşleminin Kalıntı Gerilme Üzerindeki Etkisi .....                       | 82  |
| 4.7 Takım Geometrisi ve Kaplamasının Etkisi .....                                 | 85  |
| 4.7.1 Takım Aşınmasının Etkisi.....                                               | 85  |
| 4.7.2 Talaş Açısının Etkisi .....                                                 | 87  |
| 4.7.3 Kaplama Türünün Etkisi .....                                                | 91  |
| 4.8 Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu .....                                    | 94  |
| 4.8.1 Sinyal Gürültü (S/N) Oranı ve ANOVA Analizleri.....                         | 94  |
| 4.8.1.1 Kesme Kuvvetleri.....                                                     | 94  |
| 4.8.1.2 Cidar Deformasyonu .....                                                  | 98  |
| 4.8.2 Kesme Parametreleri Arasındaki Etkileşim .....                              | 100 |
| 4.8.3 Regresyon Modelleme Analizi ve Optimizasyon Sonuçlarının Doğrulanması ..... | 105 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 5. SONUÇ.....     | 109 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 112 |
| ÖZGEÇMİŞ.....     | 149 |



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                             |                                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| $a_e$ ( $\mu\text{m}$ )     | Radyal kesme derinliği           |
| $a_p$ ( $\mu\text{m}$ )     | Eksenel kesme derinliği          |
| $D$ (mm)                    | Takım şaft çapı                  |
| $D_s$                       | Çekirdek çapı                    |
| $d$ ( $\mu\text{m}$ )       | Takım çapı                       |
| $E$                         | Elastite modülü                  |
| $f_z$ ( $\mu\text{m} / z$ ) | Ağız başına düşen ilerleme hızı  |
| $F_x$ (N)                   | X ekseninde oluşan kesme kuvveti |
| $F_y$ (N)                   | Y ekseninde oluşan kesme kuvveti |
| $F_z$ (N)                   | Z ekseninde oluşan kesme kuvveti |
| $h$ (mm)                    | İnce cidar yüksekliği            |
| $K_c$                       | Kırılma tokluğu                  |
| $L$ (mm)                    | Boy                              |
| $L_2$ (mm)                  | Helis uzunluğu                   |
| $n$ (dev/dk)                | Devir sayısı                     |
| $t$ ( $\mu\text{m}$ )       | İnce cidar kalınlığı             |
| $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )     | Ortalama yüzey pürüzlülüğü       |
| $R_c$ ( $\mu\text{m}$ )     | Kesici takım uç (burun) yarıçapı |
| $R_e$ ( $\mu\text{m}$ )     | Kesici takım kenar yarıçapı      |
| $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )     | Maksimum yüzey pürüzlülüğü       |
| $S_a$ ( $\mu\text{m}$ )     | Yüzey boyunca $R_a$ değeri       |
| $S_z$ ( $\mu\text{m}$ )     | Yüzey boyunca $R_z$ değeri       |
| $V_c$ (m/dk)                | Kesme hızı                       |
| $x$                         | X eksen                          |
| $y$                         | Y eksen                          |
| $z$                         | Z eksen                          |
| $z$                         | Kesici ağız sayısı               |
| $\lambda$ ( $^\circ$ )      | Helis açısı                      |
| $\gamma$ ( $^\circ$ )       | Talaş açısı                      |
| $\eta$ ( $^\circ$ )         | Boşluk açısı                     |

## Kısaltmalar

---

|                 |                                                                             |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ABD             | Anabilim Dalı                                                               |
| AKÜ             | Afyon Kocatepe Üniversitesi                                                 |
| ANOVA           | Analysis of Variance (Varyans Analizi)                                      |
| AlTiN           | Alüminyum Titanyum Nitrür                                                   |
| Ar-Ge           | Araştırma-Geliştirme                                                        |
| BTF             | Buy-To-Fly                                                                  |
| BUE             | Built Up Edge (Talaş Yapışması veya Sıvanması)                              |
| CNC             | Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)                   |
| DLC             | Diamond-Like Carbon (Elmas benzeri karbon)                                  |
| DMLS            | Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme)              |
| EBM             | Electron Beam Melting (Elektron Işınli Ergitme)                             |
| EDM             | Electrical Discharge Machining (Elektro Erozyon ile İşleme)                 |
| EMA             | Experimental Modal Analysis (Deneyisel Modal Analiz)                        |
| FEMA            | Finite Element Modal Analysis (Sonlu Elemanlar Modal analizi)               |
| FIB             | Focused Ion Beam (Elektro-iyon İşleme)                                      |
| FRF             | Frequency Response Function (Frekans Tepki Fonksiyonu)                      |
| HSS             | High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)                                        |
| LN <sub>2</sub> | Sıvı Azot                                                                   |
| MUCT            | Minimum Uncut Chip Thickness (Minimum Kesilmemiş Talaş Kalınlığı)           |
| RCSA            | Receiver Coupling Substructure Analysis (Alıcı Bağlantısı Alt Yapı Analizi) |
| SEM             | Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)                 |
| SLM             | Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)                              |
| SLS             | Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)                         |
| S/N             | Sinyal/Gürültü Oranı                                                        |
| USB             | Universal Serial Bus                                                        |
| UVAC            | Ultrasonik Titreşim Destekli Kesme                                          |
| Xrd             | X-ışınları Difraktometresi                                                  |
| 3D              | Üç Boyutlu                                                                  |

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1</b> Mikro boyutta farklı ince cidarlara ait SEM görüntüleri ve cidara ait yapısal boyutların tanımı. ....                                                                                                                                                                              | 8  |
| <b>Şekil 2.2</b> Monolitik bloklardan üretilmiş ince cidarlı uçak parçaları. ....                                                                                                                                                                                                                   | 9  |
| <b>Şekil 2.3</b> (a) Derin çekme, (b) kaynak, (c) eklemeli imalat, (d) frezeleme yöntemiyle üretilen ince cidarlı yapılar. ....                                                                                                                                                                     | 13 |
| <b>Şekil 2.4</b> Deformasyon azaltma yönteminin akış şeması. ....                                                                                                                                                                                                                                   | 15 |
| <b>Şekil 2.5</b> Jet türbininde meydana gelen deformasyon ölçüm sonuçları. ....                                                                                                                                                                                                                     | 16 |
| <b>Şekil 2.6</b> (a) CNC freze deney düzeneği, (b) LN <sub>2</sub> 'nin uygulanış biçiminin şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                 | 17 |
| <b>Şekil 2.7</b> (a) Kesici takım geometrik özellikleri, (b) kesici takım çapı. ....                                                                                                                                                                                                                | 18 |
| <b>Şekil 2.8</b> İş parçası h/t oranına göre değişen farklı kesme stratejileri. ....                                                                                                                                                                                                                | 20 |
| <b>Şekil 2.9</b> a) İnce cidarda meydana gelen elastik ve plastik deformasyon, b) lazer sensörü ile gerçek zamanlı olarak ölçülen toplam elastik ve plastik deformasyon ve yakınlaştırılmış görünümü, elastik deformasyon bölgesindeki lazer yer değiştirme sinyalinin hızlı Fourier dönüşümü. .... | 22 |
| <b>Şekil 2.10</b> İnce cidarlı bir iş parçasının işleme hataları, (a) sabit uçta tasarlanan frezeleme yüzeyi, (b) kesme kuvveti nedeniyle deformasyona uğrayan tasarlanan frezeleme yüzeyi, (c) dengeleme olmadan tamamlanan yüzey, (d) tasarım yüzeyleri arasındaki hacimsel hata. ....            | 24 |
| <b>Şekil 2.11</b> Mikro frezeleme işleminde kazınma ve kayma bölgelerinin gösterimi, a) tam kanal frezeleme, b) eş yönlü frezeleme ( $a_e=d/2$ ), c) eş yönlü frezeleme tekniği kullanılarak ince cidar frezeleme tekniği ( $d \gg a_e$ ). ....                                                     | 26 |
| <b>Şekil 2.12</b> Kesici takım kaplama türleri ve özellikleri. ....                                                                                                                                                                                                                                 | 28 |
| <b>Şekil 2.13</b> Kesici takım ile ince cidar geometrisinin oluşturulması: (a) kenar frezeleme modeli, (b) rijit olmayan kesici takım kullanılması sonucu iş parçasının yüzey deformasyonu ve iş parçasında oluşan yüzey pürüzlülüğü ....                                                           | 29 |
| <b>Şekil 2.14</b> Farklı h/t oranları için ince cidar işleme stratejileri ve bu stratejilerdeki talaş kesiti. ....                                                                                                                                                                                  | 32 |
| <b>Şekil 2.15</b> (a) Doğrusal sıralı frezeleme, (b) su yolu frezeleme, (c) tek taraflı frezeleme, (d) atlamalı geçişli frezeleme stratejileri. ....                                                                                                                                                | 33 |

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.16</b> (a) Zıt yönlü frezeleme ve (b) eş yönlü frezelemenin şematik gösterimi. ....                                                                                                | 34 |
| <b>Şekil 2.17</b> İnce cidar deformasyonu için S/N oranı grafiği (daha küçük daha iyidir (smaller is better)) .....                                                                           | 37 |
| <b>Şekil 2.18</b> (a) X-ışını yöntemi ile parçalardaki kalıntı gerilimin ölçümü, (b) kalıntı gerilmelerin derinliğe göre değişimi .....                                                       | 38 |
| <b>Şekil 2.19</b> En kötü ve en iyi uyan kalıntı gerilim profilleri, (b) numune yüzey topoğrafileri ve pürüzlülüğü, (c) işlemeden sonra numunenin mikro yapıları.....                         | 41 |
| <b>Şekil 2.20</b> (a) Cidar deformasyonu, (b) $F_x$ kesme kuvveti ve (c) $F_y$ kesme kuvvetinin ilerleme hızı. ve kesme derinliğine göre değişimini gösteren 3 boyutlu yüzey grafikleri. .... | 43 |
| <b>Şekil 3.1</b> (a) Kesme deneylerinde kullanılan kesici takımın geometrik değerleri, (b) takım uç yarıçapı, (c) takımın çapı ve (d) takımın kenar yarıçapına ait SEM ölçümü. ....           | 46 |
| <b>Şekil 3.2</b> Aşınmış takıma ait (a) SEM görüntüsü, (b) kenar yarıçapı, (c) uç yarıçapı, (d) takım çapı. ....                                                                              | 47 |
| <b>Şekil 3.3</b> (a) $0^\circ$ , (b) $5^\circ$ , (c) $15^\circ$ talaş açısına sahip kesici takımlara ait SEM görüntüleri. ....                                                                | 48 |
| <b>Şekil 3.4</b> (a) AlTiN, (b) TiSiN, (c) DLC, (d) ZrN kaplamaya sahip kesici takımların ve (e) kaplamasız kesici takımın EDX analizleri. ....                                               | 50 |
| <b>Şekil 3.5</b> Mikro frezeleme testleri için kullanılan test düzeneğinin genel görünümü. ....                                                                                               | 51 |
| <b>Şekil 3.6</b> (a) Deney düzeneği ve ekipmanların genel görünümü, (b) ince cidar geometrisi için kesme işlemi. ....                                                                         | 52 |
| <b>Şekil 3.7</b> $F_x$ ve $F_y$ kesme kuvvet verilerinin genlik ölçüm örneği. ....                                                                                                            | 52 |
| <b>Şekil 3.8</b> (a) $10\ \mu\text{m}$ 'luk dalma işlemi, (b) iş parçasının son hali, (c) radyal salgı ölçümü. ....                                                                           | 53 |
| <b>Şekil 3.9</b> Mikro kesici takımdaki radyal salgının ölçülmesi. ....                                                                                                                       | 54 |
| <b>Şekil 3.10</b> İlerleme hızının ince cidar uzunluğu boyunca değişimi. ....                                                                                                                 | 55 |
| <b>Şekil 3.11</b> (a) Zıt-zıt yönlü (b) eş-eş yönlü (c) eş-zıt yönlü kesme işlemleri. ....                                                                                                    | 56 |
| <b>Şekil 3.12</b> İnce cidar yapısının elde edilmesinde kullanılan farklı kesme stratejileri. ....                                                                                            | 57 |
| <b>Şekil 3.13</b> (a) Deformasyon ölçümünde kullanılan optik profilometre cihazı, (b) ince cidar deformasyonu tarama sistematigi, (c) ince cidar yüzeyindeki tarama aşaması. ....             | 58 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.14 İnce cidar deformasyonu yüzey ölçüm aralıkları. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 58 |
| Şekil 3.15 İş parçası yüzeyinden alınan 3B yüzey topoğrafyası. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 59 |
| Şekil 3.16 Kalıntı gerilme analizi yapılan iş parçası. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 60 |
| Şekil 4.1 Farklı ilerleme hızlarına göre kesme kuvvetlerinin değişimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 63 |
| Şekil 4.2 İlerleme hızına bağlı olarak değişen ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) ve maksimum yüzey pürüzlülüğü ( $S_z$ ) değerleri. ....                                                                                                                                                                                                                   | 65 |
| Şekil 4.3 (a) 0,2 $\mu\text{m/z}$ , (b) 0,5 $\mu\text{m/z}$ , (c) 0,7 $\mu\text{m/z}$ ve (d) 1 $\mu\text{m/z}$ ilerleme hızlarında kesme kuvveti sinyal formunun karşılaştırılması. ....                                                                                                                                                                      | 66 |
| Şekil 4.4 İnce cidar deformasyonun z eksenı boyunca değişimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 67 |
| Şekil 4.5 (a) Kesme yönünün ince cidar deformasyonu üzerindeki etkisi, (b) kesme yönlerinin gösterimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                   | 68 |
| Şekil 4.6 Farklı frezeleme yönlerinde elde edilen cidar deformasyonunun SEM görüntüleri. ....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 69 |
| Şekil 4.7 Farklı kesme stratejilerinde ince cidarda meydana gelen deformasyonun cidar boyunca değişimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                  | 70 |
| Şekil 4.8 Farklı kesme stratejilerinde ince cidardaki deformasyonun SEM görüntüleri. ....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 71 |
| Şekil 4.9 Farklı kesme stratejilerinde işlenen ince cidar geometrilerinin SEM görüntüleri. ....                                                                                                                                                                                                                                                               | 72 |
| Şekil 4.10 (a) Sabit ve (b) değişken ilerleme hızlarında yapılan kesme deneyleri sonucunda elde edilen ince cidar geometrilerinin deformasyon sonuçları. ....                                                                                                                                                                                                 | 74 |
| Şekil 4.11 Sabit ve değişken ilerleme hızlarında $z=50 \mu\text{m}$ 'da ince cidarda y yönünde meydana gelen maksimum ve minimum deformasyon. ....                                                                                                                                                                                                            | 75 |
| Şekil 4.12 $f_{z(\text{maks})}=2 \mu\text{m/z}$ değişken ilerleme hızında (a) $F_x$ , (b) $F_y$ kesme kuvvetleri. ....                                                                                                                                                                                                                                        | 76 |
| Şekil 4.13 (a) $f_z=2 \mu\text{m/z}$ sabit ilerleme hızında (a) $F_x$ , (b) $F_y$ kesme kuvvetleri. ....                                                                                                                                                                                                                                                      | 77 |
| Şekil 4.14 Sabit (0,5, 0,7, 1, 2 $\mu\text{m/z}$ ) ilerleme hızı kullanılarak mikro kesme işlemine tabi tutulan ince cidar geometrilerine ait SEM görüntüleri. ....                                                                                                                                                                                           | 77 |
| Şekil 4.15 Değişken (0,5, 0,7, 1, 2 $\mu\text{m/z}$ ) ilerleme hızı kullanılarak mikro kesme işlemine tabi tutulan ince cidar geometrilerine ait SEM görüntüleri. ....                                                                                                                                                                                        | 78 |
| Şekil 4.16 Sabit ve değişken ilerleme hızı kullanılarak yapılan ince cidar frezelemede elde edilen deformasyonun SEM görüntüleri ve deformasyonun cidar boyunca değişimi (a) $f_{z(\text{maks})}=0,5 \mu\text{m/z}$ , (b) $f_{z(\text{maks})}=0,7 \mu\text{m/z}$ , (c) $f_{z(\text{maks})}=1 \mu\text{m/z}$ , (d) $f_{z(\text{maks})}=2 \mu\text{m/z}$ . .... | 79 |

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.17</b> Sabit ve değişken ilerleme hızları kullanılarak frezelenen ince cidarın farklı yerlerinden alınan $S_a$ değerlerinin değişimi. ....                                     | 81  |
| <b>Şekil 4.18</b> Farklı ilerleme değerleri için elde edilen ince cidar yüzeyinin 3B yüzey topoğrafisi.....                                                                               | 82  |
| <b>Şekil 4.19</b> Üç farklı derinlikte ve iki farklı yönde kalıntı gerilme analizi. ....                                                                                                  | 84  |
| <b>Şekil 4.20</b> (a) Yeni ve (b) aşınmış takım ile yapılan kesme işlemi sonucunda ince cidardan alınan SEM görüntüleri. ....                                                             | 85  |
| <b>Şekil 4.21</b> Kesici takım aşınmasının ince cidar deformasyonuna etkisi. ....                                                                                                         | 86  |
| <b>Şekil 4.22</b> Kesici takım talaş açılarının ince cidar deformasyonundaki değişime etkisi. ....                                                                                        | 87  |
| <b>Şekil 4.23</b> Kesici takım talaş açılarının kesme kuvvetlerindeki değişime etkisi.....                                                                                                | 89  |
| <b>Şekil 4.24</b> (a) $15^\circ$ , (b) $5^\circ$ , (c) $0^\circ$ talaş açısına sahip kesicilerle mikro frezeleme işlemine tabi tutulan ince cidar geometrilerinin SEM görüntüleri.....    | 90  |
| <b>Şekil 4.25</b> (a) $5^\circ$ talaş açısına ve (b) $15^\circ$ talaş açısına sahip kesici takımlarda farklı kaplamaların ince cidar deformasyonuna etkisi. ....                          | 92  |
| <b>Şekil 4.26</b> Kesici takım kaplaması ve talaş açısına göre (a) $S_a$ ortalama yüzey pürüzlülüğü ve (b) $S_z$ maksimum yüzey pürüzlülüğünün değişimi.....                              | 93  |
| <b>Şekil 4.27</b> (a) DLC, (b) ZrN, (c) AlTiN, (d) TiSiN kaplamaya sahip kesiciler ve (e) kaplamasız kesici ile işlenmiş ince cidar geometrilerinin SEM görüntülerinin kıyaslanması. .... | 94  |
| <b>Şekil 4.28</b> $F_x$ teğetsel kuvvet için S/N oranı grafiği (smaller is better). ....                                                                                                  | 97  |
| <b>Şekil 4.29</b> $F_y$ ilerleme kuvveti için S/N oranı grafiği (smaller is better). ....                                                                                                 | 97  |
| <b>Şekil 4.30</b> İnce cidar deformasyonu için S/N oranı grafiği (smaller is better). ....                                                                                                | 99  |
| <b>Şekil 4.31</b> (a) İşlenmiş ince cidarlı yapının genel bir görünümü, (b) minimum ve (c) maksimum deformasyona sahip mikro ince cidar geometrileri. ....                                | 100 |
| <b>Şekil 4.32</b> $F_x$ teğetsel kuvvet için etkileşim grafiği. ....                                                                                                                      | 101 |
| <b>Şekil 4.33</b> $F_y$ ilerleme kuvveti için etkileşim grafiği. ....                                                                                                                     | 102 |
| <b>Şekil 4.34</b> İnce cidar deformasyonu için etkileşim grafiği. ....                                                                                                                    | 102 |
| <b>Şekil 4.35</b> $F_x$ teğetsel kuvvet için ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin kontur grafiği. ....                                                                             | 103 |
| <b>Şekil 4.36</b> $F_y$ ilerleme kuvveti için ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin kontur grafiği.....                                                                             | 104 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.37</b> İnce cidar deformasyonu için ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin kontur grafiği.....                              | 104 |
| <b>Şekil 4.38</b> $F_x$ teğetsel kuvvete ait hata analizi.....                                                                              | 106 |
| <b>Şekil 4.39</b> $F_y$ ilerleme kuvvetine ait hata analizi.....                                                                            | 106 |
| <b>Şekil 4.40</b> İnce cidarlı yapıların deformasyonuna ait hata analizi. ....                                                              | 107 |
| <b>Şekil 4.41</b> Doğrulama deneylerinin sonuçları (a) $F_x$ teğetsel kuvvet, (b) $F_y$ ilerleme kuvveti, (c) ince cidar deformasyonu. .... | 108 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                              | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1 Al 6061-T6 malzemesinin mekanik özellikleri.....                                                 | 45    |
| Çizelge 3.2 Çalışmada kullanılan kaplama türlerinin termal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. .... | 49    |
| Çizelge 3.3 Mikro frezeleme testlerinde kullanılan kesme parametreleri.....                                  | 61    |
| Çizelge 3.4 L18 ortogonal dizisi ile Taguchi deney tasarımı.....                                             | 62    |
| Çizelge 4.1 Farklı ilerleme hızlarına göre deformasyonun karşılaştırılması.....                              | 80    |
| Çizelge 4.2 Kalıntı gerilme analiz detayları. ....                                                           | 83    |
| Çizelge 4.3 İnce cidarlı mikro frezelemede $F_x$ teğetsel kuvvet için varyans analizi.....                   | 95    |
| Çizelge 4.4 İnce cidarlı mikro frezelemede $F_y$ ilerleme kuvveti için varyans analizi....                   | 96    |
| Çizelge 4.5 $F_x$ teğetsel kuvvet sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu.....                            | 96    |
| Çizelge 4.6 $F_y$ ilerleme kuvveti sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu.....                           | 97    |
| Çizelge 4.7 Mikro frezelemede ince cidar deformasyonu için varyans analizi.....                              | 98    |
| Çizelge 4.8 İnce cidar deformasyon sinyal/gürültü oranlarına ilişkin yanıt tablosu. ....                     | 99    |
| Çizelge 4.9 Tahmin sonuçları ile doğrulama deney sonuçlarının kıyaslanması ve hata oranları.....             | 108   |

## RESİMLER DİZİNİ

### Sayfa

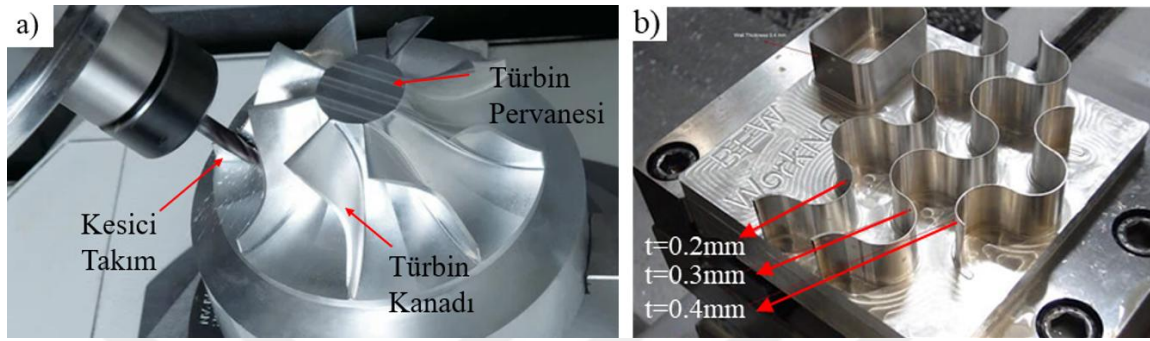
|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Resim 1.1</b> (a) Beş eksen frezeleme ile işlenen karmaşık geometriye sahip ince cidarlı yapı, (b) dik işleme merkezi ile işlenen ince cidarlı yapı.....                                  | 2  |
| <b>Resim 1.2</b> a) Bir impeller geometrisinin beş eksen frezelenmesi, b) blisk'in çift kesici takım ile aynı anda frezelenmesi.. ..                                                         | 3  |
| <b>Resim 1.3</b> Bir uçakta kullanılan ince cidarlı parçalara dair örnekler.....                                                                                                             | 4  |
| <b>Resim 1.4</b> Mikro ince cidarlı yapılar içeren ekipmanlar a) mikro iğne, b) damlacık biriktirme tekniği ile üretilmiş ince cidarlı yapı, c) stent, d) mikro kanallı ısı değiştirici..... | 5  |
| <b>Resim 2.1</b> İnce panellerden üretilmiş ince cidarlı uçak kısımları.. ..                                                                                                                 | 10 |
| <b>Resim 2.2</b> Frezeleme işlemine tabi tutulan iş parçasının yüzeyinde titreşim izleri. ....                                                                                               | 21 |

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda, havacılık endüstrisindeki hızlı gelişmeye paralel olarak düşük ağırlık-mukavemet oranları nedeniyle üstün mekanik performans sergileyen ince cidarlı yapıların kullanımı yaygınlaşmıştır (Ma vd. 2025). 1900'li yıllarda ilk uçakların tasarımlarında genellikle ahşap ve çelik çerçeveler kullanılmıştır. Ancak bu yapıların ağırlığı, uçakların performansını sınırlamaktadır. Birinci dünya savaşı yıllarında, uçakların performansını artırmak amacıyla daha hafif ve dayanıklı malzemelere yönelim başlamıştır. İnce cidarlı yapılar, özellikle çelik ve alüminyum gibi malzemelerin kullanımıyla yaygınlaşmıştır. İkinci dünya savaşı yılları havacılık teknolojisinde önemli bir dönüm noktası olmuştur. Savaş sırasında, ince cidarlı yapılar ve kompozit malzemelerin kullanımı artmıştır. Uçak tasarımında aerodinamik tasarım ve hafiflik ön planda tutulmaya başlanmıştır. 1950'li yıllardan sonra alüminyum ve titanyum gibi hafif malzemelerle yapılan ince cidarlı yapılar, uçakların performansını artırmada kritik bir rol oynamıştır (Hoff 1966). Günümüzde ince cidarlı yapılar, modern mühendislik ve imalat, özellikle de ağırlık azaltma, malzeme verimliliği ve yüksek performansın kritik olduğu endüstrilerde hayati bir rol oynamaktadır. Bu yapılar, diğer boyutlara göre ince cidarlı ile karakterize edilir, bu da onları hafif ancak önemli yüklere ve gerilmelere dayanabilecek hale getirir. Günümüzde ince cidarlı tasarımlar sadece havacılık ve uzay bileşenlerinde değil, aynı zamanda otomotiv parçaları, inşaat sektörü, tıbbi ve mikro elektronik cihazlar gibi sertlik ve mukavemetin sağlanması önkoşulu ile birçok sektörde kullanılmaktadır (Zhang vd. 2019, Chen vd. 2021).

İnce cidarlı yapılar, işleme prosesi sonucunda ağırlığı azaltılarak elde edilen parçaların yapısal verimlilik avantajı sebebiyle, sıklıkla tercih edilmektedir (Bağcı vd. 2018, Duan vd. 2021). Daha kompakt ve hafif parçalar üretilmesi, montaj ve nakliye de kolaylık sağlamaktadır (Sun vd. 2023). Ayrıca yüksek yüzey alanları sayesinde daha iyi ısı transferine imkan tanımaktadır (Wu vd. 2021). İnce cidarlı yapılar, hafif tasarım ve eko verimlilik gereksiniminden dolayı monolitik bloklardan yüksek oranda malzeme kaldırılarak üretilir (Grossi vd. 2020). Bunun için de çoğunlukla frezeleme operasyonları tercih edilir. Resim 1.1'de gösterildiği üzere çok karmaşık geometriye sahip ince cidarlı yapılarda beş eksen frezeleme yöntemi kullanılırken (Resim 1.1a), daha basit geometriye

sahip ince cidarlı yapılarda dik işleme merkezi kullanılmaktadır (Resim 1.1b). Ancak frezeleme işlemi sırasında meydana gelen kesme kuvveti ve takımdeki radyal sapma, ince cidarda deformasyonlara, titreşime ve yüzey kalitesinin bozulmasına neden olur (Bao vd. 2022).

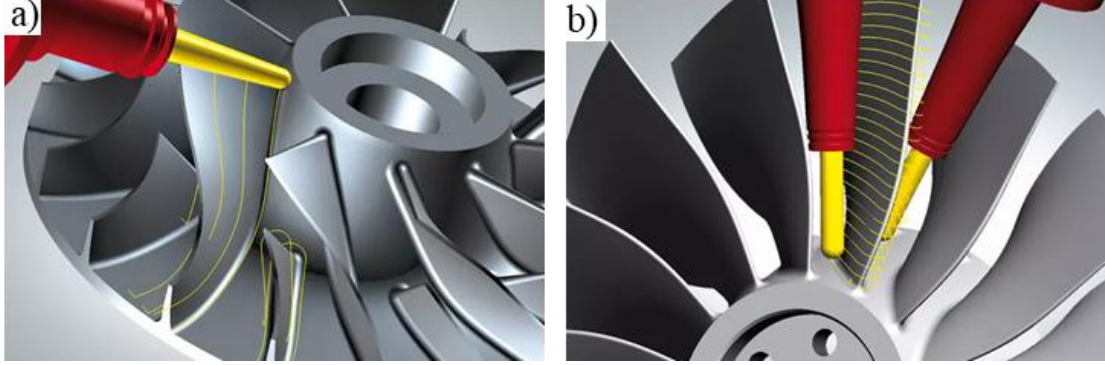


**Resim 1.1** (a) Beş eksen frezeleme ile işlenen karmaşık geometriye sahip ince cidarlı yapı (İnt. Kyn. 1), (b) dik işleme merkezi ile işlenen ince cidarlı yapı (İnt. Kyn. 2).

## 1.1 İnce Cidarlı Yapıların İmalatında Frezelemenin Önemi

İnce cidarlı yapıların imalatında hassasiyet ve yapısal bütünlük çok önemlidir. Bu nedenle bu tür yapıların şekillendirilmesinde en çok tercih edilen yöntem frezelemedir (Qu vd. 2017). Havacılık, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan ince cidarlı bileşenler, sıkı toleranslar ve pürüzsüz yüzeyler gerektirdiğinden frezeleme, bu hedeflere ulaşmak için en etkili işleme tekniklerinden biridir (Dornfeld vd. 2006). Frezelemenin ince cidar imalatında önemli olmasının ana nedenlerinden biri de boyutsal olarak yüksek doğruluğu korurken, karmaşık geometriler oluşturmaya izin vermesidir. Özellikle de yeterince rijit olan bir beş eksen freze tezgahında kesici takım, iş parçasına birden fazla açıdan yaklaşabilir (Resim 1.2a) ve diğer yöntemlerle elde edilmesi zor veya imkânsız olan karmaşık şekillerin üretilmesini sağlar. Hatta bazı tezgahlarda aynı anda iki kesici takımla (Resim 1.2b) kesme yapmak suretiyle ince cidarlı geometriler daha az deformasyonla üretilmektedir. Bu çok yönlülük, sıkı boyutsal toleranslara sahip karmaşık profilli ince cidarlı parçalar için özellikle önemlidir. Frezeleme işleminin bir diğer önemli avantajı da taşlamaya gerek kalmadan, kabul edilebilir pürüzlülüğe sahip yüzeyler elde edilebiliyor olmasıdır (Cao vd. 2013). Özellikle yeterince karmaşık bir geometriye sahip ve klasik taşlama yöntemlerinin kullanılmasının zor olduğu ince cidarlı

yapılarda yüksek hızlı finiş frezeleme önemli bir imalat tekniği olarak görülmektedir (Zawada-Michałowska vd. 2020).



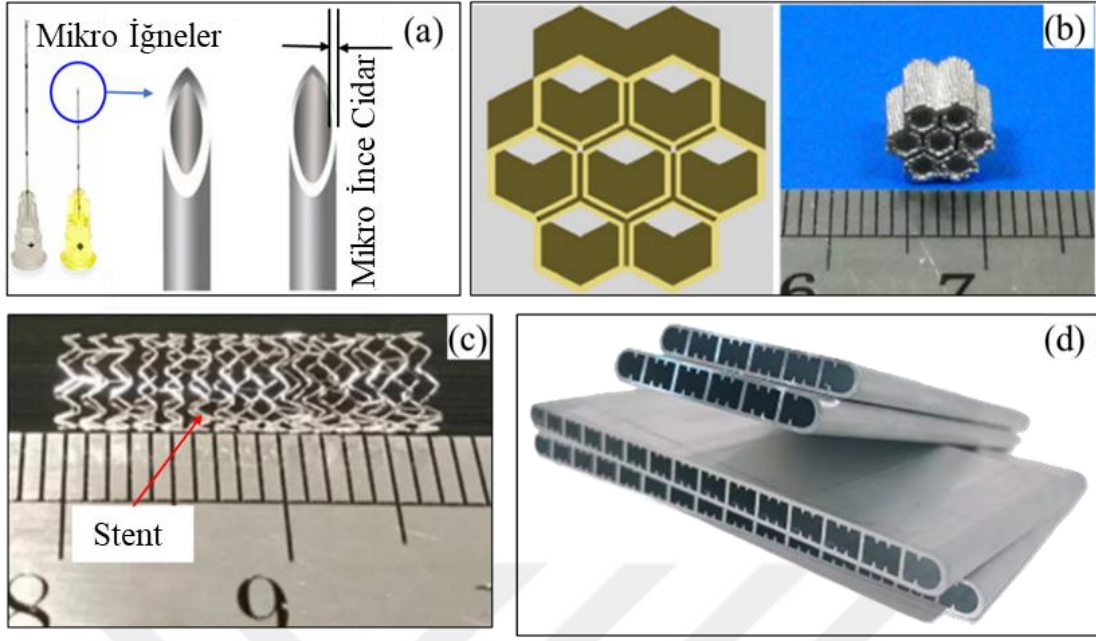
**Resim 1.2** a) Bir impeller geometrisinin beş eksen frezelenmesi, b) blisk'in çift kesici takımla aynı anda frezelenmesi (İnt. Kyn. 3).

İnce cidarlı yapıların imalatında, önemli bir malzeme kaldırma işlemi yapılmaktadır. Bu işlem özellikle havacılık sektöründe kullanılan ekipmanların imalatında tercih edilmektedir. Resim 1.3'de havacılık ve uzay sanayinde kullanılan cep şeklindeki ince cidarlı iş parçaları, (kanat kafesi, iniş takım kirişi, motor askı ayağı ve flap rayı) yaygın olarak dik işleme merkezinde tek seferde üretilirler. Bu parçalarda genellikle taşlama işlemi yapılmadığından, frezeleme işlemi kaba, yarı finiş ve finiş olmak üzere planlanır ve süreç oldukça zaman alıcıdır. Fakat son yıllarda daha hassas tezgahların kullanılıyor olması, uygulanan frezeleme tekniklerinin (yüksek hızlı frezeleme gibi) ve takım tutucularının hızlı gelişimi ile birlikte üretim süreçlerini bir miktar kısaltmak mümkün hale gelmiştir (Özçelik ve Bayramoğlu 2006). Yüksek rijitliğe ve tekrarlanabilirlik hassasiyetine sahip freze tezgâhları ile talaş kaldırma prosesini kontrol etmek hem daha kolay hem de eşit cidar kalınlığı ve iyi bir yüzey kalitesi elde etmek mümkündür (Joshi ve Bolar 2021). Ayrıca frezeleme işleminde, ince cidarlarla çalışırken sık karşılaşılan zorluklar olan boyutsal sapma ve titreşimin etkilerini en aza indirmek de mümkündür. İnce cidarlı malzemeler kesme kuvvetleri altında deformasyona daha yatkındır (Wu vd. 2018). Ancak özel kesici takımların kullanımı, optimize edilmiş ilerleme hızları ve kesme derinlikleri ile kesme kuvvetleri minimize edilebilir (Kurpiel vd. 2024). Bu sayede titreşimde kaynaklı olası problemleri de en aza indirmek mümkündür.



**Resim 1.3** Bir uçakta kullanılan ince cidarlı parçalara dair örnekler (Dang vd. 2021).

İnce cidarlı yapılar sadece geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmeyip, farklı teknikler kullanılarak mikro ölçekte ince cidarlı yapılar da üretilmektedir. Özellikle medikal, otomotiv ve mikro elektromekanik sistemlerde daha sıklıkla kullanılan bu ekipmanlar geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin yanı sıra alışılmamış imalat teknikleri ile üretilmektedirler. Lazer mikro işleme, elektro erozyon işleme, elektro-iyon işleme (FIB) mikro üç-boyutlu yazıcı ile baskı ve mikro enjeksiyon kalıplama yöntemleri alışılmamış imalat tekniklerine örnek olarak gösterilebilir. Bu teknikler mikro iğneler, mikro stentler, mikro kalıplar ve karmaşık yapılara sahip mikro yapıların üretiminde kullanılmaktadır (Luo vd. 2023, Zhang vd. 2024). Resim 1.4'de mikro ince cidar geometrisi içeren bazı uygulama örnekleri verilmektedir. Bunlardan medikal sektöründe kullanılan ve cidar kalınlığı azaltılmış iğneler (Resim 1.4a) hastanın daha az acı duymasına neden olmaktadır. Otomotiv ve enerji sektöründe kullanılmak üzere tasarlanmış bir bal peteği kafes yapısı Resim 1.4b'de, mikro kanallar içeren bir ısı değiştirici ise Resim 1.4d'de gösterilmektedir. Bir diğer ince cidarlı yapı örneği ise, medikal sektöründe kullanılmak üzere tasarlanmış stentlerdir (Resim 1.4c).



**Resim 1.4** Mikro ince cidarlı yapılar içeren ekipmanlar a) mikro iğne (İnt. Kyn. 4), b) damlacık biriktirme tekniği ile üretilmiş ince cidarlı yapı (Chao vd. 2012), c) stent (Langi vd. 2021), d) mikro kanallı ısı değişirici (İnt. Kyn. 5).

## 1.2 Çalışmanın Amacı

Elektronik, biyomedikal, savunma ve havacılık gibi yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerde yaygın olarak kullanılan ince cidarlı mikro yapılar, yapısal verimlilik ve hafiflik avantajları sunmaktadır. Bu yapılar; mikro kanallı soğutucu plakalar, mikro pompalar, mikro kalıplar ve biyomedikal implantlar gibi uygulama alanlarında karşımıza çıkmakta ve bu alanlarda yüksek geometrik hassasiyetle üretilmeleri büyük önem arz etmektedir.

İnce cidarlı yapıların üretiminde sıklıkla tercih edilen mikro frezeleme yöntemi, yüksek kesme hızı ve küçük talaş hacmi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Ancak, bu yöntemde düşük rijitlik nedeniyle yapı üzerinde oluşabilecek deformasyonlar, yüzey kalitesi ve geometrik doğruluk açısından önemli sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda, kesme parametreleri (ilerleme hızı, devir sayısı, kesme derinliği vb.), kesme yönü ve işleme stratejisinin doğru bir şekilde belirlenmesi, üretim kalitesinin artırılmasında kritik rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında, mikro frezeleme yöntemiyle imal edilen ince cidarlı yapıların üretiminde karşılaşılan temel zorluklar analiz edilmiş ve bu zorlukların üstesinden gelinmesine yönelik uygun işleme stratejileri ile optimum kesme parametreleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, mikro frezeleme işlemi sırasında meydana gelen deformasyonların azaltılması amacıyla, özellikle kesme işleminin başlangıç ve bitiş bölgelerinde düşük ilerleme hızlarının uygulanmasının etkileri incelenmiştir. Takımın giriş ve çıkış noktalarında oluşan maksimum plastik deformasyonun minimize edilmesi hedeflenmiştir; ayrıca, yüzey kalitesi ve yapısal bütünlüğün artırılması amacıyla farklı kesme yönü ve işleme stratejileri değerlendirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda en uygun işlem parametreleri ortaya konmuştur. Bu kapsamda, yalnızca kesme parametreleri, kesme yönü ve stratejileri değil; aynı zamanda kesici takım geometrisi ve kaplama özelliklerinin de ince cidarlı yapıların işlenebilirliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma boyunca  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  ve  $15^\circ$  talaş açlarına sahip kesici takımlar ile mikro frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiş, talaş açısının kesme kuvvetleri ve cidar deformasyonu üzerindeki rolü irdelenmiştir. Ayrıca AlTiN, TiSiN, ZrN ve DLC gibi farklı kaplama türlerinin takım-perde etkileşiminde ortaya çıkardığı mekanik etkiler incelenmiş; kaplama malzemesinin yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve plastik deformasyon üzerindeki katkıları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Böylece mikro frezeleme sürecine etki eden geometrik ve yüzeysel takım değişkenlerinin, ince cidarlı yapıların hassas işlenmesindeki rolü araştırma kapsamına dahil edilmiştir. Bununla birlikte, kesme kuvvetlerinin ve cidar deformasyonlarının minimize edilmesi için kesme parametreleri Taguchi yöntemi ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak optimize edilecektir. Elde edilen sonuçların hem literatürdeki mevcut boşlukları doldurması hem de endüstriyel uygulamalara doğrudan katkı sağlayacak öneriler sunması beklenmektedir. Bu kapsamda çalışma, ince cidarlı mikro yapıların hassas üretiminde kaliteyi ve üretim verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir kaynak teşkil etmektedir.

Bu çalışma, literatürde sıklıkla ihmal edilen takım kaplaması ve talaş açısı gibi takım özelliklerinin, mikro frezeleme işlemi sırasında oluşan cidar deformasyonu ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini inceleyerek mevcut bilgi birikimine önemli bir katkı sunmuştur. Ayrıca, kesme başlangıç ve bitiş bölgelerine özel ilerleme hızı optimizasyonunun sistematik biçimde değerlendirilmiş olması, ince cidarlı yapıların

hassas işlenmesine yönelik literatürdeki sınırlı yaklaşımlar arasında özgün bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Çalışmanın amacı ince cidarlı mikro yapıların frezelenmesinde optimum kesme parametreleri ve uygun işleme stratejilerinin belirlenmesiyle, meydana gelen deformasyonların en aza indirilmesi ve böylece iş parçası yüzey bütünlüğünün korunmasıdır.

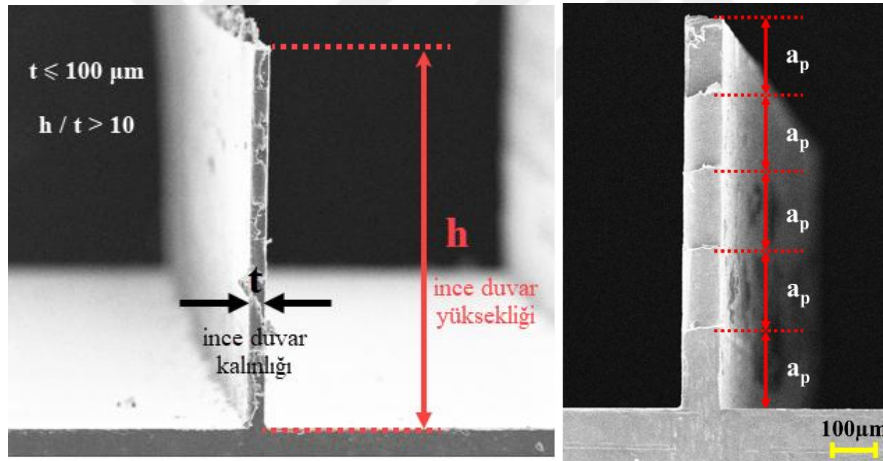


## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 İnce Cidarlı Yapılar

#### 2.1.1 Özellikleri ve Kullanım Alanları

İnce cidarlı yapılar en genel şekilde, cidar yüksekliğinin ( $h$ ) cidar kalınlığına ( $t$ ) oranla büyük olduğu yapılar olarak tanımlanabilir (Şekil 2.1) (Izamshah vd. 2010). Cidar yüksekliğinin kalınlığa oranı 10 ve daha büyük ise bu yapı ince cidarlı yapı olarak kabul edilebilir (Khandagale vd. 2018). Cidar kalınlığı  $100\ \mu\text{m}$  ve daha az ise bu yapılar mikro ince cidarlı yapı olarak tanımlanabilir (Yarin vd. 2009). Cidar kalınlığının  $100\ \mu\text{m}$  ve daha az olduğu mikro yapılarda da cidar yüksekliğinin kalınlığa oranının 10 ve daha büyük olması gereklidir (Li vd. 2008).

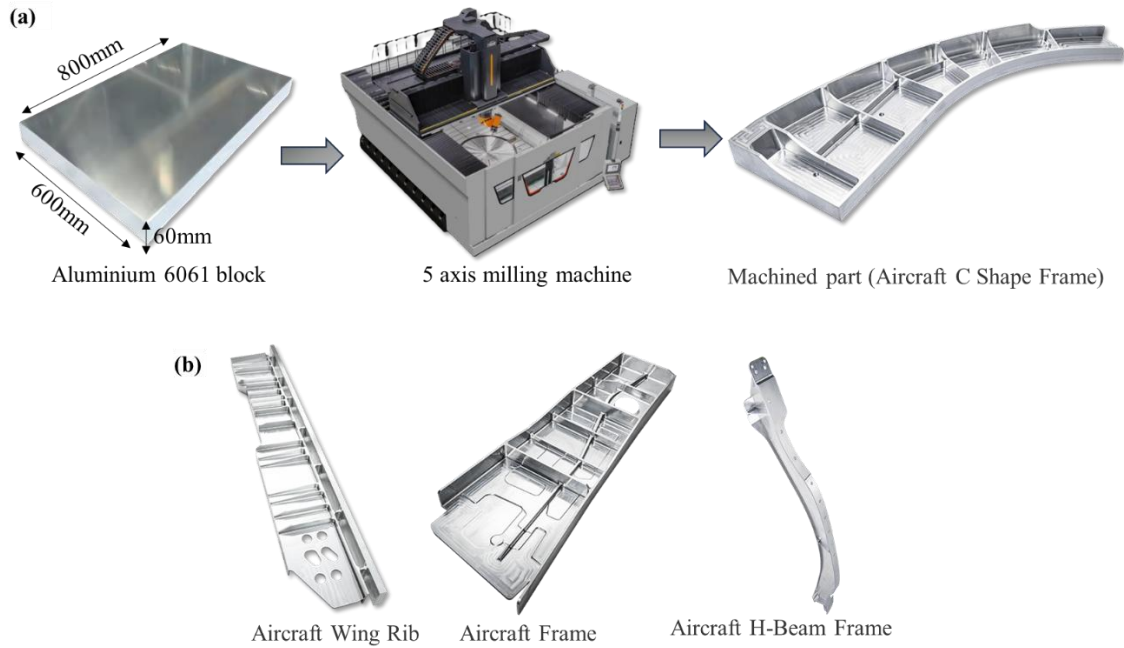


**Şekil 2.1** Mikro boyutta farklı ince cidarlara ait SEM görüntüleri ve cidara ait yapısal boyutların tanımı.

Hafif ve kompakt parça gereksinimi olan elektronik sektöründe ve küçük boyutlarda ölçü hassasiyeti gereken tıbbi ekipman ve cihazlarda birçok mikro ince cidarlı bileşen bulunmaktadır (Friedrich ve Vasile 1996, Dang vd. 2019, Wu vd. 2020). Düşük ağırlık oranı ile mikro pervane, mikro kalıp gibi havacılık ve uçak bileşenleri, ince cidarlı yapıların sıklıkla kullanıldığı bir diğer sektördür (Yi vd. 2019, Xiang ve Yi 2021, Samuel vd. 2021). Hassas geometrik özellikler gerektiren mikro yakıt hücreleri ve çiplerde de ince cidarlı ekipmanlara sıkça rastlanılır (Annoni vd. 2015, Liu vd. 2017, Tee vd. 2019, De Pasquale 2021, Fathi vd. 2023). Sahip oldukları hassas geometrileri ile ışığın

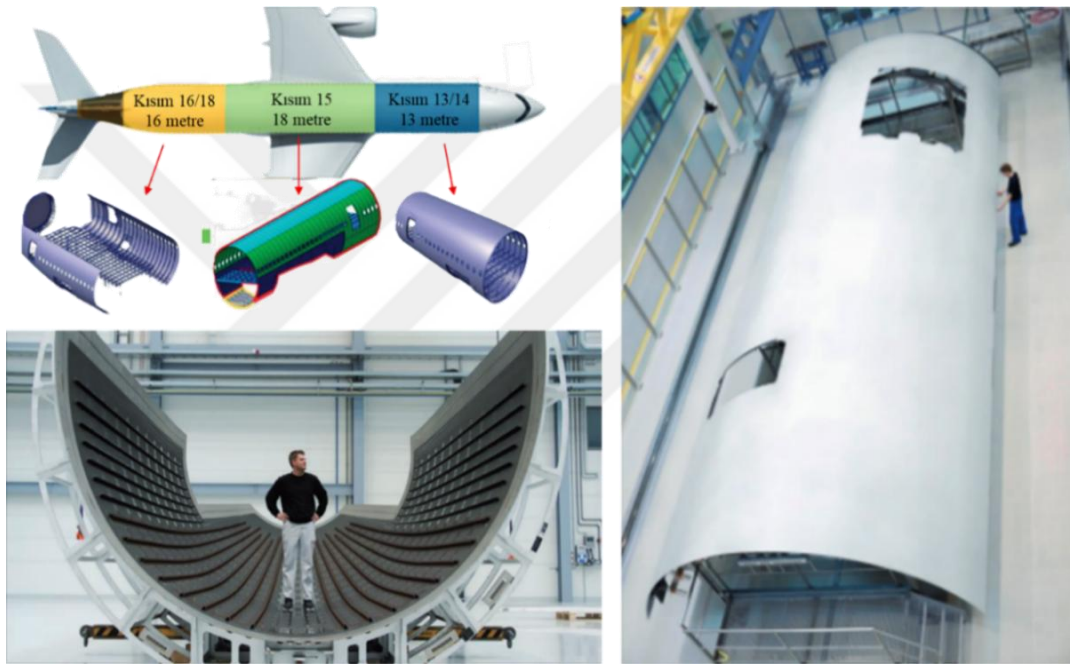
mikroskobik düzeyde kontrol edilmesine olanak tanınmasıyla mikro lens, fotonik cihazlar ve optik fiberler gibi optik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Zhong vd. 2019, Manoukian vd. 2019). Mikro ölçekte manipülasyon yeteneği ile mikro akışkan kullanılan cihazlarda, yüksek ısı transferi ile ise mikro ısı eşanjörleri ve mikro kanallı soğutucu sistemlerde kullanılmaktadırlar (Liu vd. 2004, Khan ve Fartaj 2012).

İnce cidarlı yapılar, orijinal bloktan büyük oranda malzeme çıkartılarak üretilir. Bu nedenle havacılık endüstrisinde buy-to-fly (BTF) oranı ile isimlendirilen bir kavram ortaya çıkmıştır. BTF, ham maddenin ağırlığının nihai bileşenin ağırlığına bölünmesiyle elde edilir. Frezeleme gibi geleneksel bir talaşlı imalat yöntemi için, BTF oranı genellikle 10'dan yüksektir. Tipik olarak bu oran 30'a kadar ulaşabilmektedir (Herranz vd. 2005, Bolar ve Joshi 2014). İnce cidarlı parçaları işleme süreci özelliklerine göre temel olarak monolitik bloklar (monolithic blocks) ve ince paneller (skin panels) olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür (Del Sol vd. 2019). Birinci gruptaki ince cidarlı yapılar, malzemenin başlangıç hacminin yaklaşık %95'inin çıkarılmasıyla elde edilir (Izamshah vd. 2012). Monolitik bloklardan işlenen bu yapılarda malzemenin rijitliği korunarak ağırlığı önemli ölçüde azaltılır (Şekil 2.2a).



**Şekil 2.2** Monolitik bloklardan üretilmiş ince cidarlı uçak parçaları (İnt. Kyn. 6).

Bununla birlikte bazı monolitik bloklardan frezeleme yöntemi ile üretilmiş ince cidarlı yapılarda Şekil 2.2b’de verilmektedir. İnce paneller olarak isimlendirilen ikinci gruptaki (Resim 2.1) ekipmanlar ise daha yüksek bir incelik faktörüne sahiptir (Scheider ve Brocks 2009). İnce paneller yükleri gövde kabuğuna aktardığını ve uzunlamasına kirişler için sütun desteği sağladığını bilinmektedir (Megson 2016). BTF oranı monolitik parçalardan daha düşük olan bu ekipmanlarda geniş bir yüzeyde cep frezeleme işlemi sonucu parçanın ağırlığı azaltılır. Bu cepler ile parçanın bağlama sistemi basitleştirilir ve düşük artık gerilmelerin elde edilmesi sağlanır (Mahmud vd. 2015).



**Resim 2.1** İnce panellerden üretilmiş ince cidarlı uçak kısımları (Hiken 2017).

### 2.1.2 Alüminyum Alaşımının İnce Cidarlı Yapılarda Kullanımı

İnce cidarlı yapılar, taşıyıcı sistemlerinde geleneksel kalın cidarlı yapılara göre daha dar kesit alanlarına sahip, genellikle hafif ve ince elemanlardan oluşur. Bu yapılar, özellikle de malzeme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte havacılık ve inşaat sektöründe sıklıkla tercih edilir olmuştur (Wang vd. 2025). İnce cidarlı yapıların temel karakteristikleri, ağırlıkça hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılması ile boyutlarına oranla minimum cidar kalınlığına sahip olmalarıdır (Ha ve Lu 2020). Bu yapılar, çelik, alüminyum, ahşap olabileceği gibi, cam elyaf veya karbon fiber kompozit malzemelerden de üretilmektedir. Alüminyum, hafifliği ve korozyona karşı dayanıklılığı nedeniyle

özellikle havacılık ve inşaat sektörünün dış cephe sistemlerinde tercih edilir. Havacılık sektöründe, karmaşık ince cidarlı yapılar havacılık ekipmanlarının birincil yük taşıyan bileşenleri olarak ortaya çıkmıştır. Bunlardan bazıları, uçak kanat kaplamaları, yarı monokok gövde bölümleri, güçlendirici roket yakıt tankları, uydu yapısal dış kasalarında kullanılan petek panel yapıları, füze gövdeleri ve kanatçıklarıdır (Ren vd. 2024).

Alüminyum alaşımları, hafiflik ve kolay işlenebilirlik özellikleri ile bilinmektedir. Böylece ince cidarlı yapılarda istenilen yapısal verimliliğin alüminyum alaşımlarının işlenmesiyle elde edilmesi mümkündür (Zawada-Michałowska vd. 2021). Aslında alüminyum alaşımlarının işlenmesi kesme kuvvetleri ile doğrudan ilişkilidir (Ciecielağ ve Zaleski 2022). İşleme esnasında takım-talaş ara yüzeyinde oluşacak temas genişliğinin artması, kesme kuvvetlerinin artmasına ve ısı oluşumuna neden olur. Ancak alüminyum alaşımlarının düşük kesme mukavemeti dikkate alındığında nispeten kolay işlenebilir olarak tanımlanabilir (Santos vd. 2016). Ayrıca alüminyum alaşımları yüksek rijitlik ve iyi korozyon direnci özellikleriyle ön plana çıkmaktadır (Liu vd. 2015). Fakat ince cidarlı alüminyum yapıların işlenmesi sırasında deformasyon sorunlarını meydana gelmektedir (Rusinek ve Zaleski 2016). Bu sorunların uygun işleme stratejileri ve takım geometrisi ile minimize edilmesi mümkündür (Ramanaiah vd. 2018). Böylece optimum yüzey kalitesi ve yapısal bütünlüğün elde edilebilir.

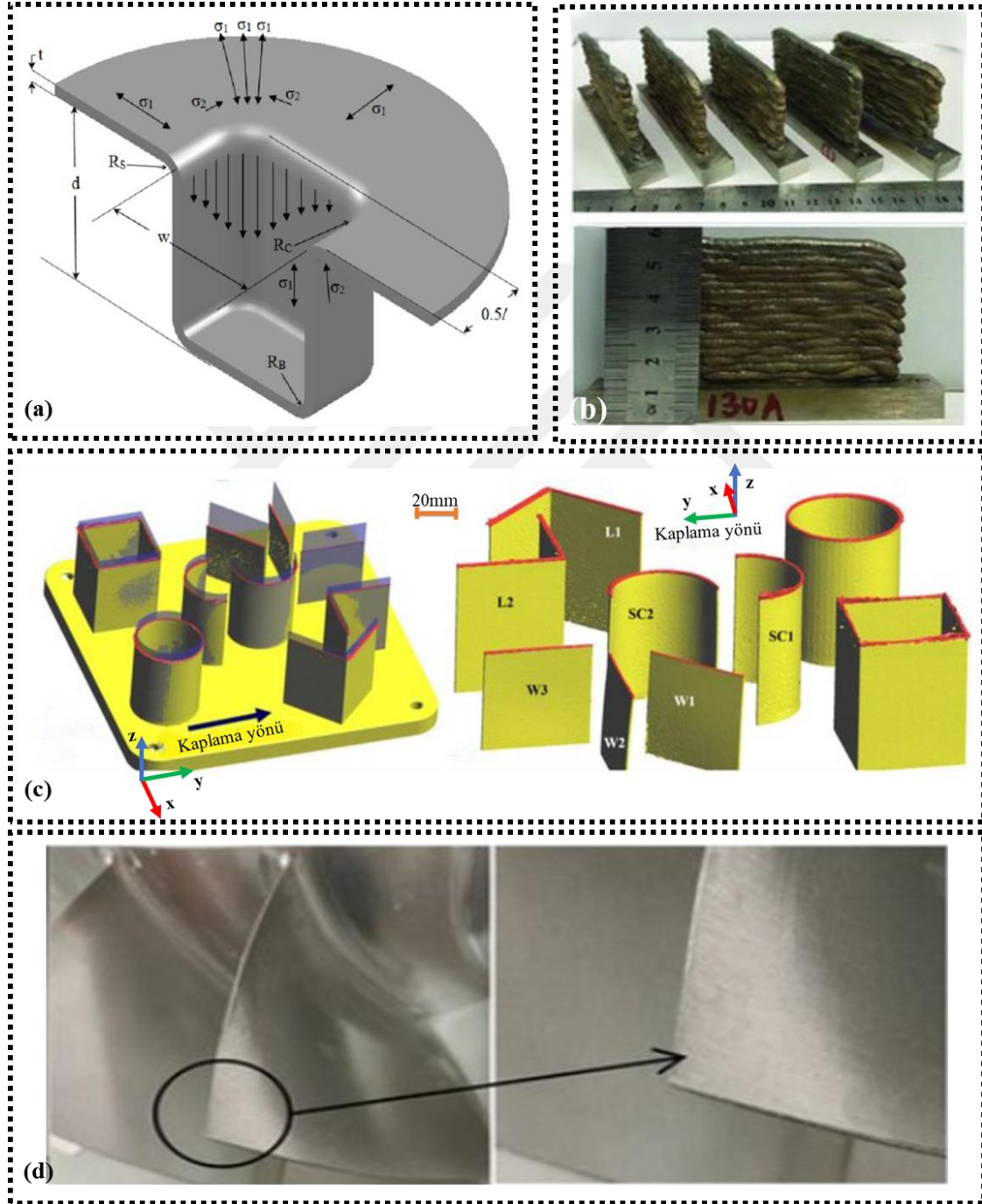
### **2.1.3 İnce Cidarlı Yapılar İçin Kullanılan Üretim Yöntemleri**

İnce cidarlı yapıların elde edilmesinde kullanılan birçok farklı yöntem vardır. Lazer mikro işleme, mikro elektro-erozyon (EDM), mikro 3B baskı, mikro enjeksiyon kalıplama, elektro-iyon işleme (FIB) ve mikro mekanik işleme bu yöntemlere örnek olarak gösterilebilir. Derin çekme (Şekil 2.3a) ve hidroform gibi plastik şekillendirme yöntemleri genellikle ince cidarlı sac metal yapıların üretiminde tercih edilir. Sac metale kalıp yardımıyla ince cidarlı şekil verilmesi ya da yüksek basınçlı sıvılarla sac metalin şekillendirilmesi işlemi bunlara örnek gösterilebilir. Kaynak (TIG, MIG, lazer kaynağı) (Şekil 2.3b) ve döküm yöntemleri (yatırım döküm, kayıp mum döküm), ince cidarlı parçaların elde edilmesinde kullanılan diğer yöntemlerdir. Bu yöntemler genellikle medikal, kuyumculuk ve sanat alanlarında tercih edilir. Günümüzde eklemeli imalat

yöntemleri ince cidarlı ekipmanların üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. En yaygın eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan elektron ışınli ergusme (EBM)'nin yanında, doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), seçici lazer ergusme (SLM) (Şekil 2.3c) ve seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojileri ince cidarlı parçaların üretiminde tercih edilmektedir (Isaev vd. 2016). Eklemeli imalat yöntemleri her ne kadar karmaşık geometriye sahip ince cidarlı parçaların hafif bir şekilde üretilmesine olanak tanısa da, üretilen parçaların katmanlı yapısından dolayı meydana gelen kötü yüzey kalitesi, yüksek sıcaklık farklarından dolayı oluşan iç gerilmeler ve uzun baskı süreleri nedeniyle geleneksel yöntemlere göre dezavantajlıdır. Ayrıca çoğunlukla eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen karmaşık geometriye sahip ince cidarlı parçaların, son halini alması için, geleneksel yöntemlerle (tornalama, frezeleme, taşlama) ya da geleneksel olmayan yöntemlerle (elektro erozyon ile işleme, su jeti ile kesme) işlenmesi gerekmektedir (Isaev vd. 2016). Frezeleme tekniğı bu noktada ön plana çıkmaktadır. İkinci bir yüzey düzeltme işlemine gerek duyulmadan, hassas toleransların elde edilebildiğı oldukça yaygın bir işleme yöntemidir (Şekil 2.3d).

Frezeleme tekniğı ince cidarlı yapıların elde edilmesinde sıklıkla kullanılan bir işleme yöntemidir (Campos vd. 2017). Frezeleme, karmaşık geometriye sahip parçaların hassas bir şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır (Aslantas vd. 2022). İnce cidarlı yapıların geometrik özellikleri, frezeleme işlemi esnasında istenmeyen şekil değışiklikleri/boyutsal hatalar yaşanmasına elverişlidir. İnce cidarlı parçaların frezelenmesinde takım-iş parçası çifti, kesme parametreleri, kesme kuvvetleri, kesme yönü, kesme stratejisi ve dış etkilere kaynaklanan dinamik sorunlara maruz kalır. Bu dinamik sorunların sıklaşması, kesme işlemi esnasında kendiliğinden uyarılan titreşimlerin oluşmasını ve ortaya çıkma sıklığını artırır (Arnaud vd. 2011, Li vd. 2015). Frezeleme işleminde, en yaygın görülen titreşim türü kendiliğinden uyarılan titreşimlerdir (Cheng 2009). Bu titreşimlerin neden olduğu kararsızlıklar sonucunda iş parçasında geometrik hatalar meydana gelmekte, yüzey kalitesi bozulmakta ve kesici takımda hızlı bir takım aşınması görülmektedir (Cao vd. 2015, Cao vd. 2018). Bu kararsızlıkların aşırıya kaçtığı frezeleme işlemleri ise tırlama etkisiyle kesici takımın ani kırılmasına ve iş parçası yüzeyinde plastik deformasyona neden olabilir (Li vd. 2018). Bu ince cidarlı yapıların işlenmesinde karşılaşılan yaygın bir sorundur (Bolar ve Joshi 2014). İnce cidarlı parçaların işlenmesinde frezeleme yöntemi

kritik bir rol oynar. Bu sebeple ince cidarlı yapıların hassas bir şekilde işlenmesi için frezeleme yöntemi esnasında yukarıda belirtilen problemlerin işleme esnasında iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Böylece işleme sonucunda iyi yüzey kalitesinde, yüksek boyutsal doğruluk ve hassasiyette parçalar üretilebilmektedir.



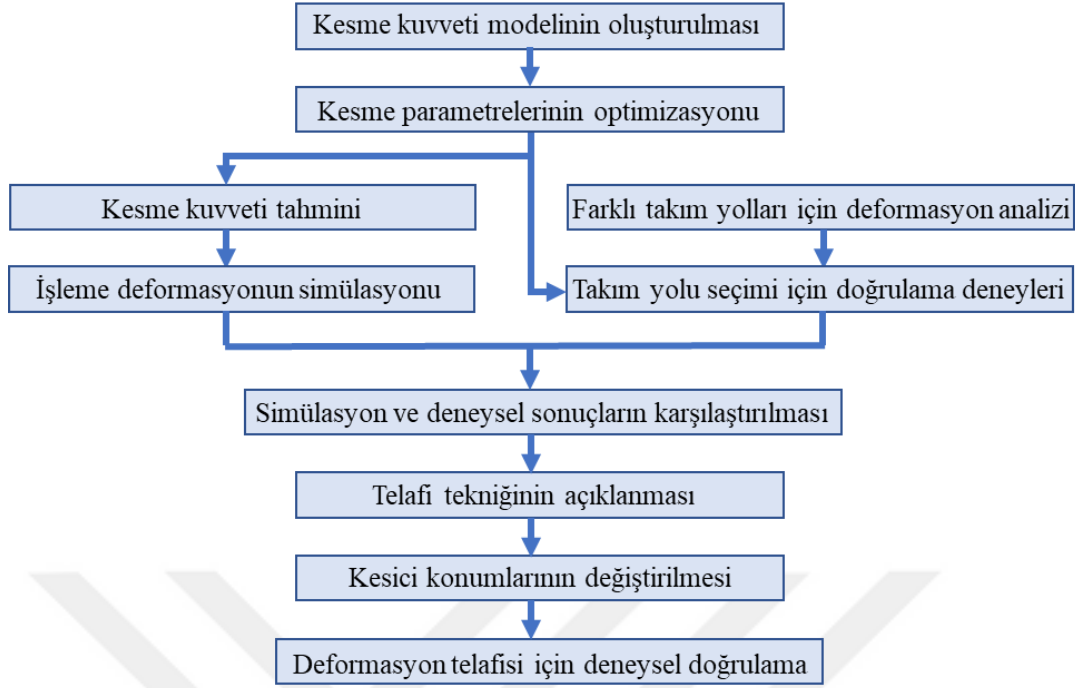
**Şekil 2.3** (a) Derin çekme (Vairavan ve Abdullah 2017), (b) kaynak (Chen vd. 2021), (c) eklemeli imalat (Lu vd. 2023), (d) frezeleme (Wu vd. 2020), yöntemiyle üretilen ince cidarlı yapılar.

### 2.1.4 Frezelemede Kullanılan Teknikler

Günümüzde ince cidarlı parçaların işlenmesinde, frezeleme yöntemi çok önemli bir yer tutmaktadır (Davim 2011). Karmaşık geometrilere sahip bileşenlerin üretimini mümkün kılan frezeleme yöntemi, mühendislik ve imalat alanlarında geniş uygulama alanı olan bir işleme tekniğidir (Kurpiel vd. 2023). Frezeleme yöntemi ince cidarlı yapıların yüksek hassasiyet ve doğrulukta işlenmesini mümkün kılarak, iyi bir yüzey kalitesi elde edilmesine olanak tanır. Frezeleme yöntemi, malzeme kaldırma sürecinde çeşitli kesme kuvvetlerinin ve termal etkilerin optimize edilmesiyle, karmaşık şekillerin ve hassas toleransların elde edilmesini sağlar. Ayrıca, modern frezeleme teknikleri, yüksek performanslı kesici takımlar ve ileri işleme stratejileri kullanarak, işleme sürelerini ve maliyetlerini azaltırken, ürün kalitesini artırmayı hedefler (Burek vd. 2019).

Frezeleme tekniklerinden biri olan yüksek hızlı frezeleme ile iş parçalarını yüksek hızda ve düşük kesme derinliğinde işleyebilmek mümkündür (Aijun ve Zhanqiang 2008, Jiang vd. 2013). Kesici takımın frezeleme kuvveti, yüksek frezeleme hızlarında büyük ölçüde azaltılır. Böylece kesme kuvvetlerinden kaynaklanan deformasyon hatası minimum seviyelere düşürülür (Singh ve Agrawal 2016, Zawada-Michałowska vd. 2020b). Yapılan bir çalışmada ince cidarlı parçaların yüksek hızlı frezeleme ile işlenmesinde deformasyonu azaltmaya yönelik yürütülecek çalışmalar için bir akış şeması Şekil 2.4’de verilmektedir (Gao vd. 2016).

Bu avantajından dolayı yüksek hızlı frezeleme tekniği ile, çoğunlukla hafif metal alaşımlar (alüminyum, titanyum) monolitik bloklardan yüksek performanslarda işlenebilmektedir (Başon vd. 2020). Bu tür ince cidarlı parçaların frezelenmesinde buy-to-fly oranı %95 e kadar çıkabilmektedir (Seguy vd. 2008, Leite vd. 2015). Bu sebeple büyük hacimli işleme süreçlerini uygun maliyet ve yüksek verimlilikte gerçekleştirebilmek için yüksek hızlı frezeleme teknikleri tercih edilir. Böylece iyi fiziksel özelliklere ve mukavemet-ağırlık oranına sahip ince cidarlı yapılar elde edilebilir (Adamski 2010).

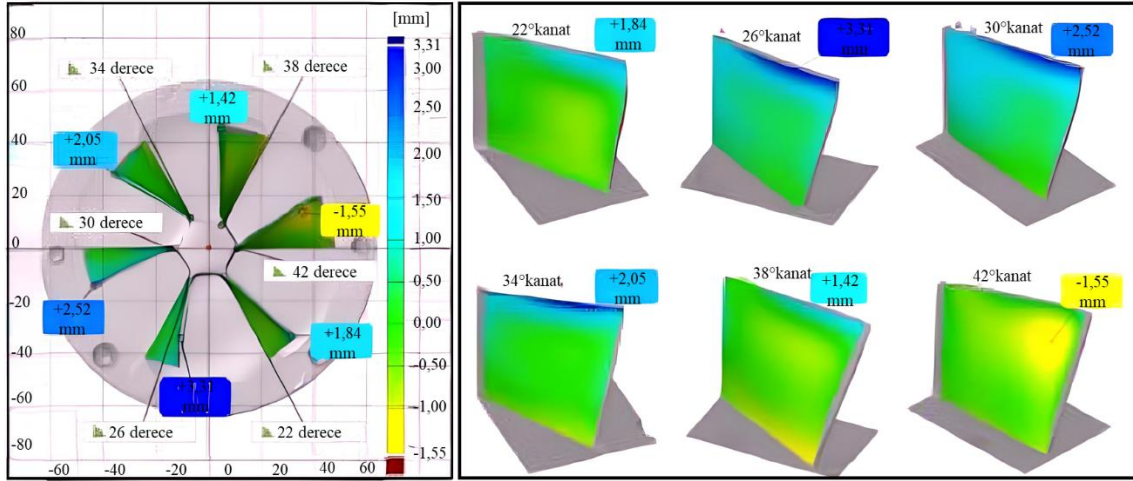


**Şekil 2.4** Deformasyon azaltma yönteminin akış şeması (Gao vd. 2016).

Yüksek hızlı frezelemede yaygın olarak kullanılan kesme parametreleri, yüksek kesme hızı, orta ilerleme hızı ve düşük kesme derinliğidir. Yüksek hızlı frezeleme tekniği, alüminyum ve titanyum alaşımından elde edilen ince cidarlı yapıların işlenmesinde üstün performans sağlamaktadır (Jomaa vd. 2014). Bununla birlikte, yüksek hızlı frezelemede yüzey kalitesi ve işleme doğruluğunu maksimum ölçüde sağlayabilmek için iş parçası ve kesici takım özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir (Soren vd. 2019). Yüksek hızlı frezeleme tekniği ile kesme işlemi esnasında iş parçasında meydana gelen kalıntı gerilmeler büyük ölçüde azaltılabilir (Kuczmazewski vd. 2018, Zawada-Michałowska vd. 2024).

İnce cidarlı parçaların frezelenmesinde düşük sertlik nedeniyle tırlama ve kalınlık hatası sıkça meydana gelir. Bu hataları kontrol etmek için adaptif frezeleme tekniği kullanılır (Zhao vd. 2022). Adaptif frezeleme tekniği ile iş parçası deformasyonu minimize edilerek işleme verimliliği önemli ölçüde artırılır. Adaptif frezeleme, cebin içine spiral bir giriş ve dışarıdan radyal bir giriş yoluyla işleme başlamakta ve iş parçasının başlangıç pozisyonuna hızlı bir şekilde geri dönmesini sağlamaktadır. Adaptif frezeleme işlemi, kesme bölgesinde daha az ısı ve titreşim üreterek takım ömrünü uzatır ve yüzey kalitesini iyileştirir. Ayrıca optimize edilmiş kesme yolları ve değişken ilerleme hızları kullanılarak

iş parçasının geometrik doğruluğu maksimum düzeyde elde edilir (Kurpiel vd. 2023). Karmaşık geometriye sahip ince cidarlı daha düşük deformasyonda üretilmesinde adaptif frezeleme önerilen bir stratejidir (Xu vd. 2020). Şekil 2.5’de adaptif frezeleme yöntemi kullanılarak işlenen ince cidarlı jet motoru türbininin her bir kanadında meydana gelen deformasyonların simülasyon tabanlı ölçüm sonuçları sunulmuştur (Wu vd. 2025).



**Şekil 2.5** Jet türbininde meydana gelen deformasyon ölçüm sonuçları (Wu vd. 2025).

İnce cidarlı parçaların işleminde kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklık, iş parçasında deformasyona neden olmaktadır (Chen vd. 2021). Kriyojenik frezeleme teknikleri, ince cidarlı parçaların işleme yükünün neden olduğu sapma ve eğrilik deformasyonunun optimum düzeylere çekilmesi hususunda oldukça etkilidir (Wang vd. 2025). Kriyojenik soğutma stratejisi, etkili frezeleme hızını artırabilmekte ve kesme ısı transfer verimliliğini iyileştirebilmektedir. Bunlar, ince cidarlı parçaların frezelenmesinde deformasyon kusurlarının iyileştirilmesinin ana nedenleridir (Wang ve Wang 2022). Kriyojenik soğutma ile iş parçası malzemesinin elastik modülü artmakta ve buna bağlı olarak  $F_y$  kesme kuvveti pozitif yönde değişmektedir (Li vd. 2004). Yüksek hızlı frezelemede üretilen ısı, sıvı azotla kriyojenik soğutma ( $LN_2$ ) ile hızlı bir şekilde buharlaştırılarak kesme bölgesindeki sıcaklık düşürülür (Wang ve Wang 2019). Kriyojenik soğutma koşulları, düşük sıcaklıklarda talaşın sertleşmesine ve gevrekleşmesine yol açarak parçaların işlenebilirliğine olumlu katkı yapmaktadır. Talaşın kolay kırılması sağlanarak iş parçasının yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır (Kaynak ve Gharibi 2019). Kriyojenik soğutma ile kesme işlemi yapmak freze takımların düşük

sıcaklıkta uzun süre çalışmasını sağlar ve böylece yüksek kesme hızlarında dahi düşük kesme kuvvetleri elde edilerek takım ömrünün uzun olması sağlanır (Varghese vd. 2019, Song vd. 2020). Kriyojenik soğutma ile ince cidarlı yapıların frezelenmesinde cidar sapması %30'a kadar azaltılabilir (Wang ve Wang 2023). İnce cidarlı parçaların işlenmesi esnasında kriyojenik soğutma tekniğinin nasıl uygulandığı örnek bir çalışmada gösterilmiştir (Şekil 2.6).



**Şekil 2.6** (a) CNC freze deney düzeneği, (b) LN<sub>2</sub>'nin uygulanış biçiminin şematik gösterimi (Wang ve Wang 2023).

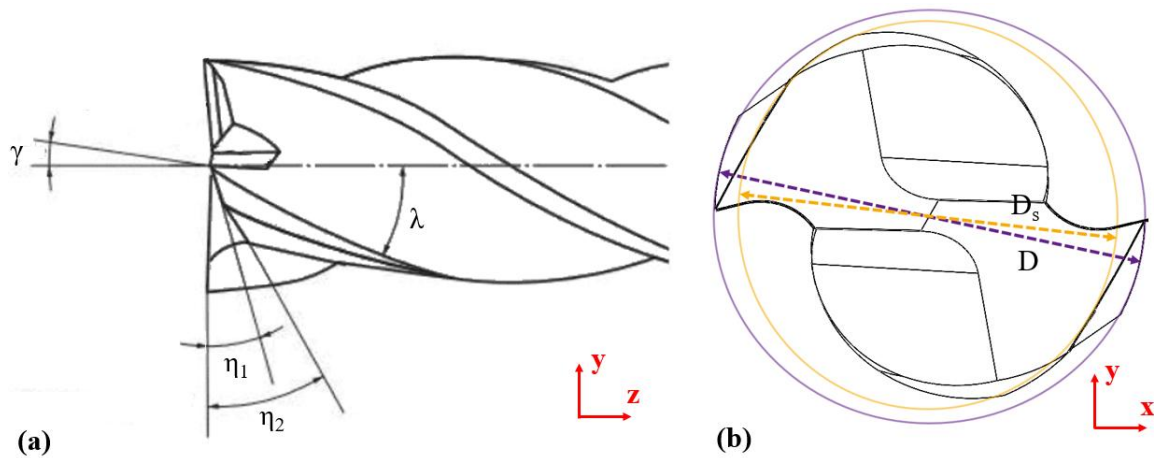
### 2.1.5 İnce Cidar Frezeleme İçin Takım Seçim Kriterleri

İnce cidarlı yapıların frezelenmesinde ortaya çıkan işleme hatalarının, titreşim kaynaklı deformasyonların ve boyutsal sapmaların önlenmesinde kesici takım seçimi ile iş parçasının uygun şekilde fikstürlenmesi kritik öneme sahiptir (Lukic vd. 2020). Kesici takım seçiminde takımın malzemesi, geometrik yapısı, kesici ağız sayısı, talaş ve boşluk açıları gibi özellikler dikkate alınmalıdır. Fikstür tasarımında ise sistemin tipi, iş parçası ile temas alanı, sabitleme noktalarının sayısı ve uygulanan sıkıştırma kuvveti gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır (Fei vd. 2018, Lukic vd. 2020).

Fikstürleme sisteminin, kesme işlemi esnasında oluşan maksimum kesme kuvvetlerine karşı koyabilecek düzeyde sıkma kuvveti sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Aksi halde iş parçasında oluşabilecek serbestlik, yüksek genlikli titreşimlerin oluşmasına ve buna bağlı olarak istenmeyen elastik deformasyonlara yol açabilir. İş parçasının fikstür ile temas eden yüzey alanı olabildiğince geniş tutulmalı ve sıkma noktalarının sayısı optimum düzeyde belirlenmelidir. Bu şekilde hem rijitlik artırılır hem de yerel deformasyonlar önlenmiş olur (Bing vd. 2015).

Kesici takım geometrisi, frezeleme performansını belirleyen temel faktörlerden biridir. Bir takımın temel geometrik bileşenleri;  $\phi$ ap ( $D$ ), çekirdek  $\phi$ apı ( $D_s$ ), kesici ağız sayısı ( $z$ ), talaş açısı ( $\gamma$ ), birincil ve ikincil boşluk açısı ( $\eta$ ) ile helis açısıdır ( $\lambda$ ) (Şekil 2.7). Kesici ağız sayısının artması, takımın iş parçası ile temas süresini ve temas alanını artırır; bu durum işlem süresini uzatmakta ve talaş tahliyesini zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak takımda aşırı ısınma ve titreşim meydana gelerek ince cidar yüzeyinde istenmeyen deformasyonlara sebep olabilir (Weicheng vd. 2021). Aksine, ağız sayısının azaltılması, talaş sıkışmasını engelleyerek yüzey bozulmalarını azaltabilir ve daha düşük kesme kuvvetleriyle işleme yapılmasına olanak tanır. Ancak bu durumda da takım rijitliğinde azalma yaşanabilir.

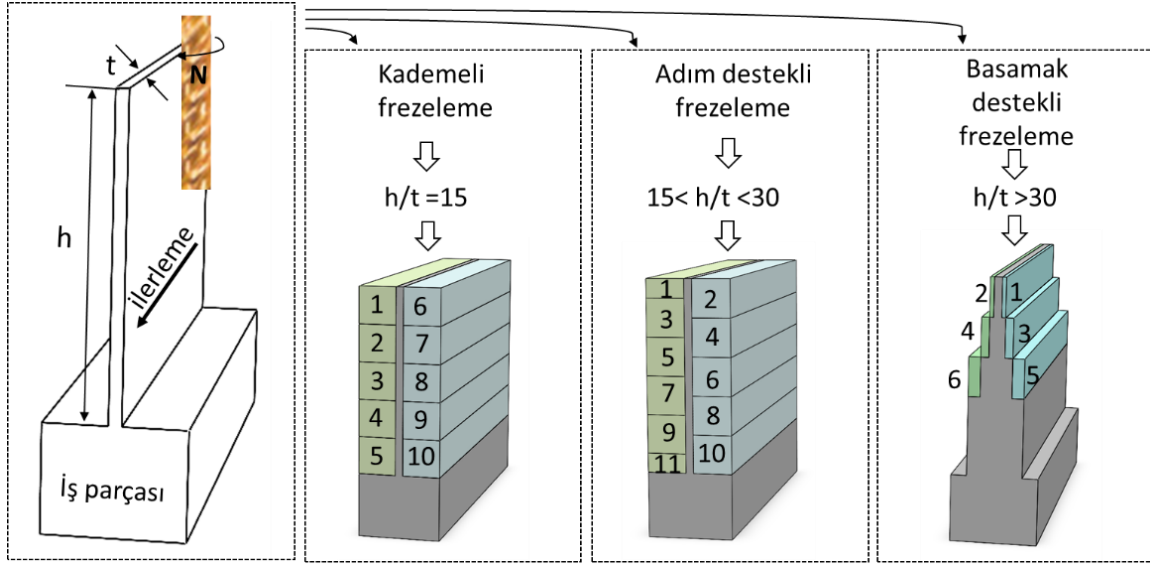
Helis açısı da takım performansı açısından önemli bir parametredir. Helis açısının artması, kesme kuvvetlerinin yukarı yönlü dağılmasına ve dolayısıyla cidar deformasyonunun artmasına neden olurken, daha düşük helis açıları ile daha yatay bir kuvvet bileşeni elde edilerek deformasyon seviyesi düşürülebilir. Pozitif talaş açıları, özellikle ince cidarlı yapıların frezelenmesinde tercih edilmelidir. Pozitif talaş açısı, kesme kuvvetini azaltmakta ve bu sayede cidardaki plastik şekil değişimini minimize etmektedir. Ancak talaş açısının çok küçük olması talaş akış direncini artırarak kesme kuvvetlerini olumsuz etkilerken, çok büyük talaş açılarında takım mukavemetinin düşmesi ve termal iletimin azalması gibi sorunlar da gözlemlenebilir (Bing vd. 2015).



### 2.1.6 İnce Cidarlı Yapıların Frezelenmesindeki Zorluklar

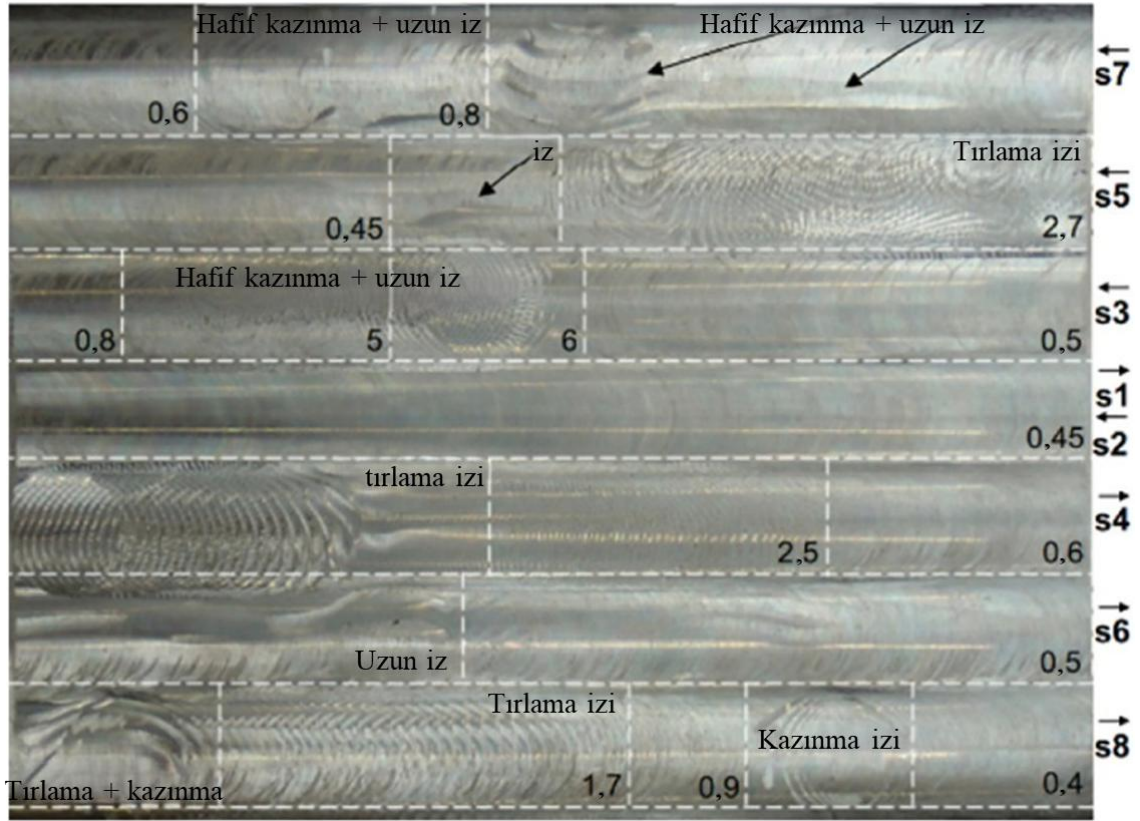
Yüksek en-boy oranına ( $h/t > 10$ ) sahip ince cidarların frezelenmesine yönelik çalışmalar son otuz yılda çok hızlı bir şekilde artmıştır (Sun vd. 2023). Frezeleme sonucunda oluşan elastik geri yaylanma (deformasyon geri kazanımı), ince cidarlı iş parçasının boyutlarında, şeklinde ve konumunda tutarsızlıklara yol açar (Chen vd. 2009). İnce cidarlı bileşenler yerleşik bir kirişe benzer şekilde davrandığından, sertlikleri tabandan tepeye doğru kademeli bir düşüş gösterir. Sonuç olarak, frezeleme sırasında aynı kesme parametrelerinin kullanılmasına rağmen, ince cidarın üst kısmında gözlemlenen deformasyon, alt kısımda gözlemlenenenden daha fazla olabilir. Bu da ince cidarın üst kısmındaki kalınlığın alt kısmındaki kalınlıktan daha fazla olduğu bir durumla sonuçlanır (Chen vd. 2020).

İnce cidarlı yapıların frezelenmesi bağlamında, kesme kuvvetlerinin parça üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla iki temel yaklaşım izlenebilir. İlk yaklaşım, kesilmemiş iş parçasının doğal sertliğinden yararlanan takım yolu stratejileri kullanmaktır. İkinci yöntem, cidar deformasyonu yönünde düşük işleme kuvvetleri oluşturan kesici takım geometrilerini seçmektir. Şekil 2.8'de  $h/t \geq 15$  için frezeleme işlemlerinde kullanılabilecek bir dizi strateji sunmaktadır.  $h/t = 15$  için, kademeli frezeleme yöntemi bir çözüm olarak önerilmektedir.  $15 < h/t < 30$  için adım destekli frezeleme tekniği alternatif olarak önerilmektedir.  $h/t < 30$  için önerilen frezeleme işlemlerinde, talaş kesiti  $180^\circ$ 'lik bir açı içerecek şekilde tam kanal frezeleme gerçekleştirilir.  $h/t > 30$  için, talaş kesiti ağırlıklı olarak  $90^\circ$ 'den küçük olan bir eş/zıt frezeleme işlemi önerilmektedir. Ek olarak,  $h/t > 30$  için, cidar deformasyonunu azaltmanın bir yolu olarak zıt yönlü frezeleme tavsiye edilmektedir (Herranz vd. 2005). Şekil 2.8'de gösterilen kesme stratejilerinden de görülebileceği gibi, ince cidar oluşumu için temelde iki farklı metodoloji vardır. Bunlardan birincisi ham blok malzemeden ince cidar oluşturmak için tam kanal frezeleme yöntemi uygulamaktır. Kademeli ve adım destekli frezeleme stratejileri tam kanal frezelemeye örnektir. İkincisi ise, basamak destekli frezeleme uygulanarak belirli bir kalınlığa sahip cidarın istenen kalınlığa indirilmesi ile uygulanan yöntemdir.



**Şekil 2.8** İş parçası  $h/t$  oranına göre değişen farklı kesme stratejileri.

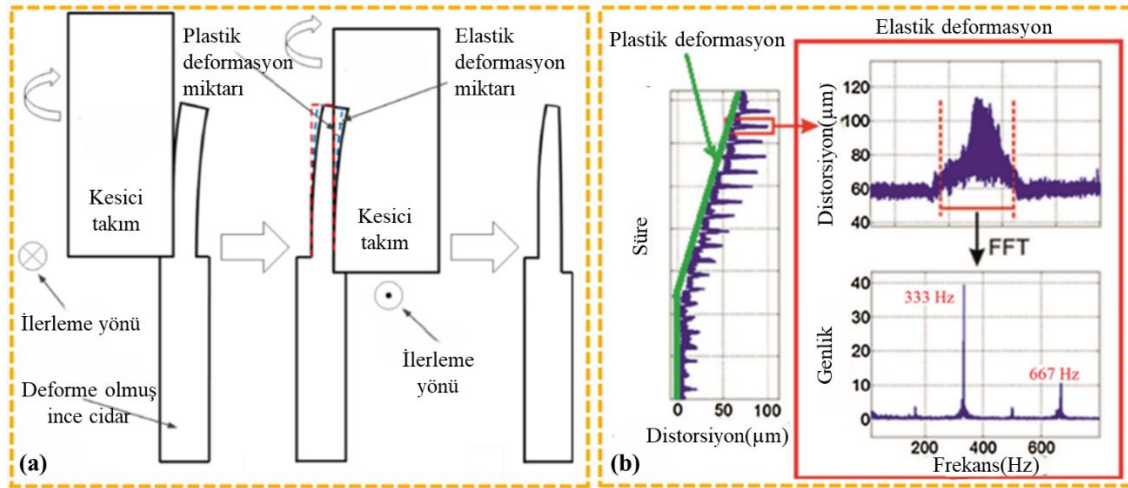
İnce cidarlı parçaların karmaşık geometrilerinden dolayı ortaya çıkan zorluklar işleme sürecinin hem kalitesi hem de verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir (Budak vd. 2012, Muhammad vd. 2018). İnce cidarlı parçaların frezelenmesinde sıkça karşılaşılan zorluklardan biri de titreşimler ve dinamik deformasyonlardır (Munoa vd. 2020). Titreşimler, iş parçasının yüzey kalitesini bozmakta ve takım aşınmasını artırarak takım ömrünü kısaltmaktadır. Kesme parametreleri, işleme stratejileri ve kullanılan kesici takımlar, titreşimi etkileyen faktörlerden sadece birkaçıdır. Ayrıca, titreşimler nedeniyle istenilen toleransların dışına çıkılması da mümkündür. İşleme esnasında oluşan dinamik etkileşimler, kötü işlenmiş yüzeye (Tian vd. 2018), yüksek gürültü seviyesine, istenmeyen artık gerilmeye (Jiang vd. 2018) ve zayıf işleme performansına neden olmaktadır (Herranz vd. 2005). Kesme işlemi esnasında meydana gelen tırlama (Biermann vd. 2010), işleme doğruluğu ve verimliliğini doğrudan etkiler. İşleme esnasında oluşan titreşimler, iş parçasının bitmiş yüzeyinde izler oluşturarak yüzey kalitesinin bozulmasına neden olur (Elbestawi ve Sagherian 1991). Bazı durumlarda iş parçasının hurdaya çıkmasına ve takım tezgahının zarar görmesine neden olabilir (Sun vd. 2023). Ayrıca mikro mekanik işlemede boyut etkisinden kaynaklanan etkilerde göz ardı edilmemelidir (Fu ve Wang 2021). Kesilmemiş talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığından daha küçük olduğunda, negatif bir talaş açısı oluşur ve kesici takım iş parçası üzerinde kazınma ile talaş kaldırır (Vogler vd. 2004). Böylece iş parçası yüzeyinde kazınma ve tırlama etkisinden kaynaklanan izler oluşur (Resim 2.2).



**Resim 2.2** Frezeleme işlemine tabi tutulan iş parçasının yüzeyinde titreşim izleri (Campa vd. 2011).

İnce cidarlı yapıların işlenmesinde meydana gelen statik sorunlar oldukça önemlidir. Karşılaşılan temel problemlerden biri elastik ve plastik deformasyonlardır (Şekil 2.9a) (Zawada-Michałowska vd. 2020a). Deformasyon hataları, ince cidarlı yapıların frezelenmesinde yaygın bir sorundur (Izamshah vd. 2013). İnce cidarların statik deformasyonları, kesme kuvvetleri nedeniyle oluşur (Wan vd. 2008). Bu da boyutsal form hatalarına yol açabilir (Bolar ve Joshi 2018). Özellikle uzun ve ince freze takımları kullanıldığında bu deformasyonlar daha belirgin hale gelir (Budak 1994). Kesme deneyleri sonucunda iş parçasındaki elastik deformasyonu plastik deformasyondan doğru bir şekilde ayırt etmek çok zordur. Deformasyonun temel nedeni olan kesme kuvvetini makul bir aralıkta kontrol etmek, malzemelerin deformasyonunu etkili bir şekilde azaltabilir (Gao vd. 2022). İnce cidar yüzeyinde lazer deplasman sensörü ile ölçüm alınarak elastik ve plastik deformasyon hakkında fikir sahibi olmak mümkündür (Lazoglu ve Mamedov 2016). Elastik deformasyonlar, parçanın zorlanmış titreşiminden kaynaklanmakta ve her geçişten sonra geri kazanılmaktadır. Elastik deformasyon

bölgesinde lazer sinyallerinin hızlı Fourier dönüşümü (FFT) alındığında, elastik deformasyon sinyalinin frekansının dış geçiş frekanslarıyla mükemmel bir şekilde eşleştiği gözlemlenmektedir. Lazer yer değiştirme sensörüyle ölçülen toplam deformasyon sinyalinden elastik deformasyon sinyalleri filtrelenerek, parçanın plastik deformasyonu gerçek zamanlı olarak belirlenebilmektedir (Şekil 2.9b) (Lazoglu ve Mamedov 2016).



**Şekil 2.9** a) İnce cidarda meydana gelen elastik ve plastik deformasyon (Gao vd. 2022). b) lazer sensörü ile gerçek zamanlı olarak ölçülen toplam elastik ve plastik deformasyon ve yaklaşılmış görünümü, elastik deformasyon bölgesindeki lazer yer değiştirme sinyalinin hızlı Fourier dönüşümü (Lazoglu ve Mamedov 2016).

Elastik deformasyonlar, iş parçasında form hatalarına, titreşimlere ve işlenmiş yüzey kalitesinde bozulmalara neden olur (Borojevic vd. 2018). Bunlar, iş parçasının işlenmesi esnasında kesici kenar darbesi altında sarkması olgusundan kaynaklanır (Ozoegwu ve Eberhard 2024). Kesici takımında ise yüksek talaş yüklerinde elastik deformasyon görülür (Vogler vd. 2004, Si-meng vd. 2017). Plastik deformasyonlar şekil hatalarına neden olur (Awan ve Mabrouki 2017) ve ortadan kaldırılması zor olan kalıntı gerilmeler üretir. İş parçasında geometrik olarak kalıcı değişikliklerine neden olur (Kuczmazewski vd. 2017). Endüstriyel uygulamalarda kalıntı gerilmeleri gidermek amacıyla relief annealing (kabartma tavlama) gibi ısı işlemleri uygulanmaktadır. Ancak bu işlemler ek maliyetleri ile ekonomik açıdan dezavantajlıdır ve üretim süresini önemli ölçüde artırırlar. (Tang vd. 2013, Kuczmazewski vd. 2016, Yuan vd. 2017).

İşleme esnasında meydana gelen statik deformasyon, kesme kuvvetlerinin yanı sıra,

kesme stratejisi ve parametrelerine bağlıdır (Llanos vd. 2014, Zariatın vd. 2017). Kesme parametreleri (kesme hızı, ağız başına düşen ilerleme, eksenel ve radyal kesme derinliği), kesme kuvvetleri ve cidar deformasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Kesme işleminde cidar deformasyonunun elastik aralıkta olmasını sağlamak için kesme parametrelerinin optimum değerlerde seçilmesi oldukça önemlidir (Wang vd. 2015, Del Sol vd. 2019). Kesme parametrelerinden ilerleme hızının cidar deformasyonu üzerinde oldukça etkili olduğu bilinmektedir (Wang vd. 2019). Bir sonraki etkili parametrenin ise eksenel ( $a_p$ ) ve radyal ( $a_e$ ) kesme derinlikleri olduğunu vurgulamıştır (Vukman vd. 2016). Genellikle yüksek kesme hızı, düşük kesme derinliği ve ilerleme hızında cidar deformasyonu minimum seviyededir ve optimum kesme parametreleri ile cidar deformasyonu %52 ye kadar azaltılabilir (Gao vd. 2016). İlerleme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü negatif etkilemekte, buna bağlı olarak deformasyon artmaktadır (Özel ve Karpat 2005). Optimum frezeleme yönü ve stratejisi ile cidar deformasyonunu daha düşük değerlere düşürülebilir (Li vd. 2010). Kesme stratejileri ince cidar deformasyonu ve çapak oluşumu ile doğrudan ilişkilidir (Kuram 2016).

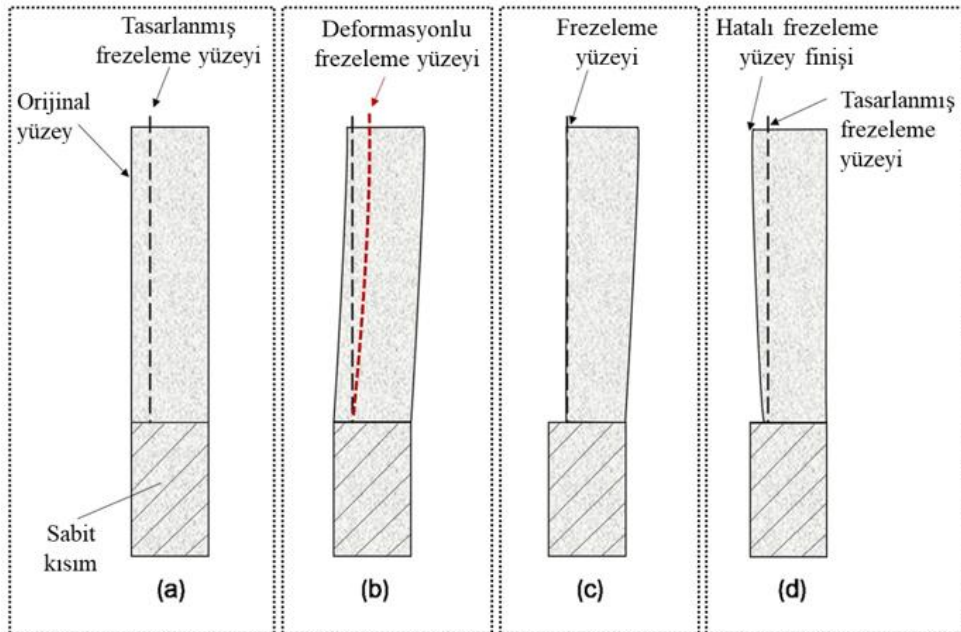
Ayrıca iş parçasındaki deformasyon, takım aşınmasına, takım yoluna, takım geometrisine, iş parçası-takım çifti malzemesine, termal deformasyonlara ve kalıntı gerilmelere bağlıdır (Kuczmazewski vd. 2016b, Wang vd. 2017). Deformasyon üzerinde kesme kuvvetleri baskın kabul edildiğinden termal yük ve kalıntı gerilmeler göz ardı edilir lakin bu etkiler iş parçasında önemli deformasyonlara yol açabilir (Yang ve Liu 2015). Kalıntı gerilmelerin dağılımı ise optimum kesme parametreleri ve soğutma stratejileri ile parça sapmasını %45 e kadar azaltabilir (Arrazola vd. 2013).

Gelişen teknoloji ile endüstride ince cidarlı mikro yapılara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Mikro frezeleme yöntemi, ince cidarlı mikro yapıların işlenmesinde kullanılan en yaygın mikro üretim tekniklerinden biridir. Mikro frezeleme tekniği ile yüksek hızda, hassasiyette ve düşük maliyetlerde üretim yapabilmek mümkündür (Dhanorker ve Özel 2008). Üretim sürecinde gerek frezeleme işleminde karşılaşılan zorlukların, gerekse mikro işlemede boyut etkisinden kaynaklanan farklılıkların göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Hasçelik ve Aslantaş 2023).

## 2.2 Mikro Frezeleme Tekniği

### 2.2.1 Mikro Frezeleme Yöntemi ile İnce Cidarlı Yapıların Oluşturulması

İnce cidarlı mikro yapıların elde edilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri mikro frezelemedir (Dornfeld vd. 2006, Campos vd. 2017). Mikro frezeleme işlemi genel olarak konvansiyonel frezeleme işleminin mikro boyutlara indirgenmiş halidir. Mikro frezeleme ile yüksek en boy oranına sahip ( $h/t > 10$ ) ince cidarların deformasyonu son on yılda birçok çalışmaya konu olmuş zorlu bir araştırma alanıdır (Abdolvand vd. 2015, Annoni vd. 2015, Gao vd. 2016, Yi vd. 2019, Gao vd. 2022, Tang vd. 2024). Frezeleme sonrasında elastik geri esneme (deformasyon iyileşmesi), ince cidarlı iş parçasının boyut, şekil ve konum hatasına neden olur (Chen vd. 2009). İnce cidarlı parçalar bir ankastre kiriş gibi davrandığından rijitliği aşağıdan yukarıya doğru giderek azalır. Bu nedenle, frezelemede aynı kesme parametreleri kullanılmasına rağmen ince cidarın üst kısmındaki deformasyon alt kısmındaki deformasyondan daha fazla olabilmektedir. Bunun sonucunda ince cidarın üst kısmındaki kalınlığı alttaki kalınlıktan daha büyük olduğu bir durum ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.10) (Chen vd. 2020).



**Şekil 2.10** İnce cidarlı bir iş parçasının işleme hataları, (a) sabit uça tasarlanan frezeleme yüzeyi, (b) kesme kuvveti nedeniyle deformasyona uğrayan tasarlanan frezeleme yüzeyi, (c) dengeleme olmadan tamamlanan yüzey, (d) tasarım yüzeyleri arasındaki hacimsel hata (Chen vd. 2020).

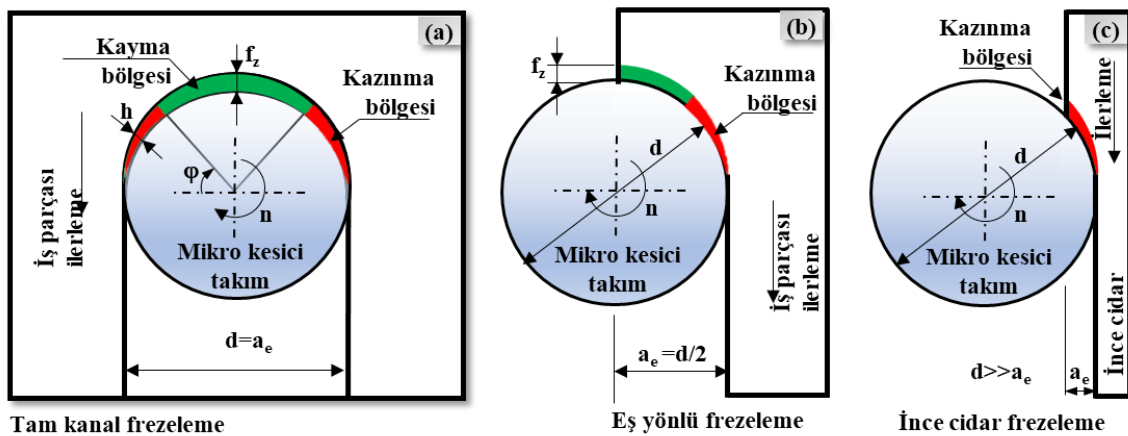
İnce cidarlı yapıların imalatında hem kesici takımın hem de ince cidarın dinamik karakteristiğinin dikkate alınması gerekir. Özellikle konvansiyonel ince cidar frezeleme işlemlerinde, takım çapı cidar kalınlığı ile kıyaslanacak boyuttadır. Bu nedenle hem takıma hem de ince cidara darbe testi (tap testing) yapılmak suretiyle kararlılık diyagramı elde edilir (Dang vd. 2022). Mikro ince cidarlarda kesici takıma darbe testi yapılsa da, ince cidara darbe testi uygulamak imkansızdır (Dong vd. 2021). Bu nedenle mikro ince cidar yapılan frezelenmesinde cidar deformasyonu, daha çok deneysel çalışmalar (Zhou vd. 2021) ve bu çalışmalar sonrasında uygulanan istatistiki yaklaşımlarla tahmin edilmiştir (Pengfei vd. 2018). Ren vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada takım çapı 16 mm ve cidar kalınlığı 3 mm olduğu kesme işleminde takımda meydana gelen elastik deformasyon da dikkate alınmıştır. Fakat mikro frezeleme yöntemi ile ince cidar oluşturma işleminde, takım çapı cidar kalınlığına göre yeterince büyük alınmak suretiyle takımdaki elastik deformasyonun ihmal edilebileceği de ifade edilmiştir (Liu vd. 2017). Literatürde takımdaki elastik deformasyonun dikkate alınmadığı ve  $h/t=50$  olduğu çalışmalara da rastlamak mümkündür (Li vd. 2010, Llanos vd. 2014).

### **2.2.2 Boyut Etkisi ve Minimum Talaş Kalınlığı**

Mikro frezeleme işleminde, kesilmemiş talaş kalınlığının kenar yarıçapından küçük olması, boyut etkisinden dolayı spesifik kesme enerjisinde doğrusal olmayan bir artışa neden olur (Liu vd. 2004). İnce cidarların mikro frezelenmesinde cidar deformasyonunu etkileyen bu unsur, kazınma mekanizması olarak tanımlanır. Boyut etkisi sebebiyle kesici kenar yarıçapının kesilmemiş talaş kalınlığından büyük olması, kesme işlemi esnasında kazınmaya neden olur (Aslantas vd. 2024). Mikro frezeleme işleminde boyut etkisi nedeniyle oluşan negatif talaş açısı etkisi, kesme kuvvetlerinin (Campos vd. 2017), yüzey pürüzlülüğünün (Wu vd. 2020) ve çapak oluşumunun (Sahoo vd. 2020) artmasının başlıca nedenlerinden biridir.

Kesilmemiş talaş kalınlığı kesici takımın kesme kenarı yarıçapı ile aynı mertebeye düştüğünde, takımın kesici kenarı iş parçasını sıkıştırmak ve kazımak zorunda kalacaktır. Kesilmemiş talaş kalınlığı belirli bir kesici kenar yarıçapı için kritik bir değere

düştüğünde, talaş oluşmayacaktır ve bu değer minimum kesilmemiş talaş kalınlığı (MUCT) olarak adlandırılır (Rezaei vd. 2018). Mikro ince cidarın frezelenmesinde kesilmemiş talaş kalınlığı ağız başına düşen ilerleme değeri ile belirlenir. Eğer tam kanal (full slot) frezeleme işlemi yapılıyorsa, kesici ağızın iş parçası ile temasa başladığı ve bitirdiği bölgelerde kesilmemiş talaş kalınlığı sıfıra yakındır ve kazınma kaçınılmaz olur (Şekil 2.11a). Maksimum kesilmemiş talaş kalınlığı  $\varphi=90^\circ$  de gerçekleşir ve  $h_{maks}=f_z$  olur. Ağız başına düşen ilerleme değeri azaldıkça  $\varphi=90^\circ$  deki kesilmemiş talaş kalınlığı da MUCT'ye yaklaşır ki bu, kesme işleminin tamamının kazınma ağırlıklı olmasına neden olur. Kesme genişliği, kesici takım çapının yarısı kadar olduğu bir frezeleme işleminde, ağız başına düşen ilerleme değeri MUCT'den küçük seçilirse kesme işlemi ağırlıklı olarak kazınma şartları altında gerçekleşir (Şekil 2.11b). İnce cidardaki deformasyonu azaltmak için kesme genişliğini azaltmak uygulanan yöntemlerden biridir (Li vd. 2021). Eğer kesme genişliği takım çapından çok çok küçük olursa bu durumda gerçek bir frezeleme/kesme işlemi gerçekleşmeyecek ve boyut etkisi nedeniyle meydana gelen kazınma ince cidarda daha büyük deformasyona neden olabilecektir (Şekil 2.11c). İnce cidar frezelemede kullanılan frezeleme tekniği (zıt ve eş yönlü frezeleme) de cidardaki deformasyonunu etkilemektedir (Lyu vd. 2023). Şekil 2.11c'de eş yönlü frezeleme tekniği örnek olarak gösterilmiştir. Eğer kesme işlemi zıt yönlü frezeleme yöntemi ile yapılırsa ince cidardaki deformasyon miktarı eş yönlü frezeleme yöntemine göre daha az olacaktır (Zariatin vd. 2017, Han vd. 2022).



**Şekil 2.11** Mikro frezeleme işleminde kazınma ve kayma bölgelerinin gösterimi, a) tam kanal frezeleme, b) eş yönlü frezeleme ( $a_e=d/2$ ), c) eş yönlü frezeleme tekniği kullanılarak ince cidar frezeleme tekniği ( $d>>a_e$ ).

Mikro ince cidarların frezelenmesinde ortaya çıkan deformasyonu ve geometrik hataları gidermek adına kesme parametrelerini optimize etmeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Del Sol vd. 2019, Wang vd. 2019). Bununla birlikte farklı kesme stratejileri de kullanmak suretiyle cidar deformasyonu minimum seviyeye çekilmeye çalışılmıştır (Lassila vd. 2024). İnce cidar geometrisinde maksimum plastik deformasyon kesme işleminin başlangıcında ve bitişinde olduğu da yapılan bazı çalışmalarda ortaya konulmuştur (Ge vd. 2022). Bu çalışmada ince cidarda meydana gelen deformasyonu azaltmak adına değişken ilerleme hızı kullanılmıştır. Kesme işleminin başlangıcından itibaren ivmeli bir ilerleme hızı kullanılmıştır. Bu sayede, takımın kesmeye başladığı ve bitirdiği konumlarda, ilerleme hızı daha düşük değerdedir. Bu, mikro ince cidarın uç kısımlarındaki deformasyon miktarının azalmasına katkı sağlamıştır. Elde edilen bulgular, bu alandaki literatürde önemli bir eksikliği gidermiş hem de endüstriyel uygulamalar için yeni bir tekniğin uygulanabileceğini göstermiştir.

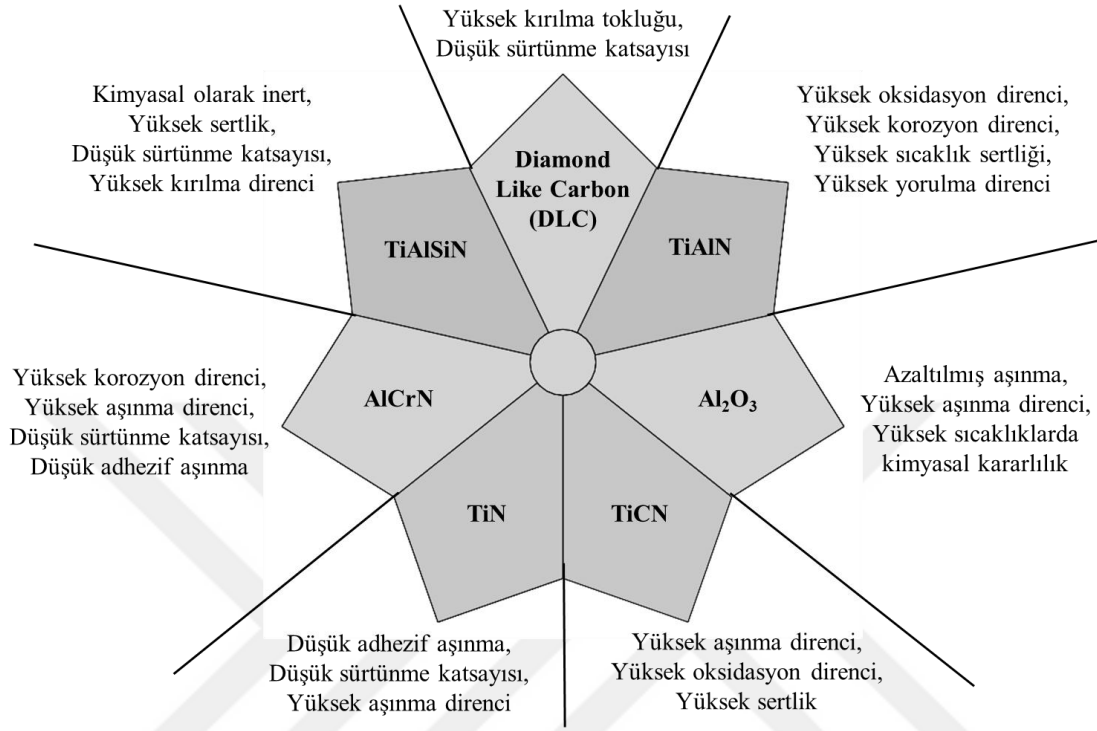
### **2.3 Kesme İşlemini Etkileyen Parametreler**

#### **2.3.1 Kesici Takım Malzemesi ve Kaplaması**

Yüksek hızlarda frezeleme işlemi yapılabilmesi için kesici takım performansının yeterli olması gerekmektedir. Kesici takımlar genellikle sert ve dayanıklı malzemelerden üretilirler. Böylece yüksek tokluk ve aşınma direncine sahip rijit takımlar elde edilebilmektedir. Kesici takımları kalite ve maliyet olmak üzere iki temel açıdan değerlendirebilmek mümkündür. Kaliteyi koruyarak ve artırarak, maliyeti düşürmek için kesici takımlara kaplama yapılmaktadır (Seenath ve Sarhan 2024).

Kesme işlemi esnasında takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmeden kaynaklanan yüksek ısı, kesici takımın ve bitmiş ürünün mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde etkilidir (Bahceci 2019, Meng vd. 2021). Kesici takımlar uygun şekilde kaplandığında aşınma direnci, oksidasyon direnci artmakta metal yorgunluğa direnci ve termal şok direnci iyileşmektedir. Böylece olumsuz etkiler azaltılarak, yüksek performansa ve uzun takım ömrüne sahip kesiciler elde edilmektedir (Aditharajan vd. 2023). Kesici takımların ömrünü uzatmak ve yüksek hızlarda kesme işlemi yapmasına olanak tanımak için en etkili yöntem kaplamadır. Bu kaplamalar mikrometre düzeyinde, tek ya da çoklu katmanlar

halinde olabilmektedir (Assurin vd. 2021). Şekil 2.12’de kesici takımlarda sıklıkla kullanılan kaplama türleri ve belirgin özellikleri gösterilmiştir (Aditharajan vd. 2023).



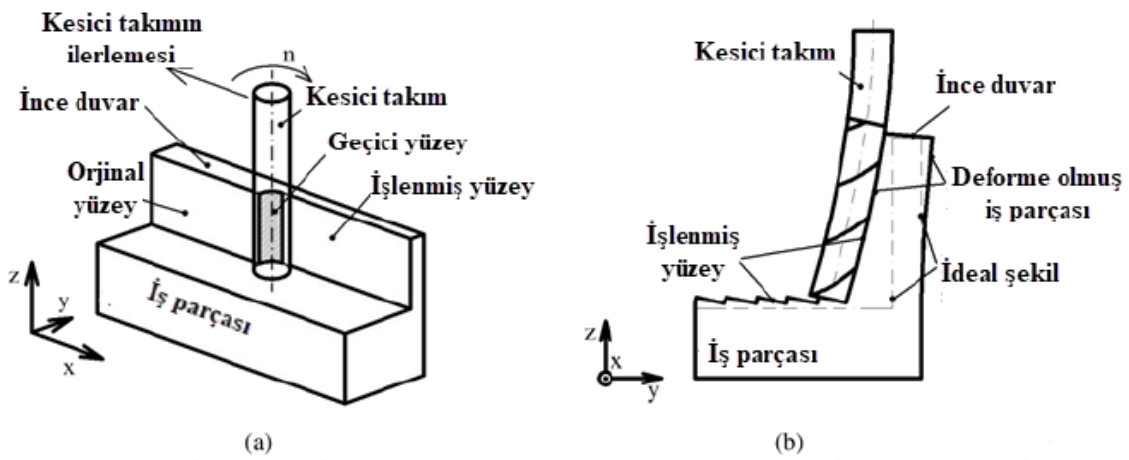
Şekil 2.12 Kesici takım kaplama türleri ve özellikleri (Aditharajan vd. 2023).

Yüksek hız çeliği (HSS), sermetler, karbürler ve süper sert malzemeler, yaygın olarak kullanılan kesici takım malzemelerindendir. Yüksek sıcaklıklarda ve yüksek işleme hızlarında yumuşama eğiliminde olan HSS takımlar, düşük hız ve sıcaklıklardaki kesme işlemleri için tercih edilmektedir (Inspektor ve Salvador 2014).

Karbür takımlar ise, geniş bir sertlik yelpazesindeki malzemeleri işleyebilme esnekliği ve yüksek işleme hızlarına uygunlukları nedeniyle en yaygın kullanılan takım uçlarıdır (Fang vd. 2009, Sun vd. 2020). Karbür takımların ömrü ve performansı, sert ve aşınmaya dirençli kaplamalar uygulanarak artırılmıştır (Bull vd. 2003, Bobzin 2017). Bu sebeple ince cidarlı yapıların frezelenmesinde karbür takımlar sıklıkla tercih edilir. Optimum kesme sonuçları elde etmek ve verimliliği artırmak için, kesici takım malzemesi iyi mekanik özelliklere, yüksek güvenilirlik, ısı ve termal şok direncine sahip olmalıdır.

### 2.3.2 Kesici Takım Geometrisi

Mikro ince cidarlı yapıların işlenmesinde, iş parçasının geometrisinden dolayı genellikle deformasyon kaynaklı işleme hataları ortaya çıkmaktadır. Deformasyon kaynaklı işleme hatalarının giderilmesi için dikkat edilmesi gereken birçok parametreden biri de kesici takımın geometrik özellikleridir. Kesme işlemi esnasında kesici takımın rijit olmaması durumunda Şekil 2.13’de gösterildiği gibi geometrik bir hata meydana gelecek, bu da iş parçasının yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir (Polzer vd. 2015).



**Şekil 2.13** Kesici takım ile ince cidar geometrisinin oluşturulması: (a) kenar frezeleme modeli (Tsai ve Liao 1999), (b) rijit olmayan kesici takım kullanılması sonucu iş parçasının yüzey deformasyonu ve iş parçasında oluşan yüzey pürüzlülüğü (Polzer vd. 2015).

İnce cidarlı yapıların frezelenmesinde ağız sayısı, helis açısı ve talaş açısı oldukça etkili geometrik parametrelerdir (Izamshah vd. 2013). Özellikle mikro frezelemede kenar ( $R_e$ ) ve uç ( $R_c$ ) yarıçapı değişiminin etkileri konvansiyonel frezeleme işlemine göre daha fazladır. Kenar yarıçapı, takımın kesme kabiliyeti ve talaş oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Kenar yarıçapındaki büyümeye ile mikro frezeleme işleminde negatif talaş açısı etkisi meydana gelmektedir (Zhang vd. 2024, Selvakumar Joyson vd. 2024). Bu da iş parçasının yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir.

### 2.3.3 Kesme Parametreleri

Mikro ince cidarlı yapıların frezelenmesinde cidar deformasyonuna neden olan temel faktörlerin başında kesme kuvvetleri gelmektedir. Kesme kuvvetleri ise kesme

parametreleri ile doğrudan ilişkilidir (Llanos vd. 2014). Bilindiği gibi talaşlı imalatla kesme parametreleri aksel ve radyal kesme derinliği ( $a_p$ ,  $a_e$ ), ilerleme değeri ( $f_z$ ) ve kesme hızı ( $V_c$ )'dır. Özellikle ince cidarlı yapıların frezelenmesinde aksel ( $a_p$ ) ve radyal ( $a_e$ ) talaş derinlikleri cidar deformasyonunu en çok etkileyen iki parametre olarak bilinmektedir (Li vd. 2015). Gao vd. (2022)'nin yaptığı çalışmada aksel talaş derinliğinin radyal talaş derinliğine göre cidar deformasyonunun daha fazla etkilediğini göstermiştir. Buna karşın Vukman vd. (2016)'nın yaptığı çalışmada ilerleme hızının cidar deformasyonu üzerinde daha etkin olduğu, kesme hızının ise cidar deformasyonu üzerinde çokta belirleyici bir etki göstermediği ifade edilmektedir.

Kesme işleminde cidar deformasyonunun elastik aralıkta olmasını sağlamak için kesme parametrelerinin optimum değerlerde seçilmesi oldukça önemlidir (Liu vd. 2017). Birçok araştırmacı, farklı malzemelerde, ince cidar geometrisindeki yüzey kalitesini artırmak için optimum kesme parametrelerini seçmek üzerine çalışmalar yapmıştır (Li vd. 2015, Wang vd. 2015). En etkili kesme parametresinin ise, ağız başına düşen ilerleme, bir sonraki parametrenin ise aksel ve radyal kesme derinlikleri olduğunu vurgulamıştır. Saha ve Bandyopadhyay (2024), mikro frezeleme ile oluşturulan ince cidarlı yapılarda ilerleme hızını belirlemede takım kenar yarıçapını minimum talaş kalınlığı ile ilişkilendirmiştir. Sonuç olarak, minimum talaş kalınlığının sadece takım kenar yarıçapının sabit bir oranı olmadığını, talaş derinliğinin de dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Mikro işlemede boyut etkisinden kaynaklanan farklılıklar göz ardı edildiğinde, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını söylemek mümkündür. Artan yüzey pürüzlülüğü ise ince cidar deformasyonunu etkilemektedir (Hascelik ve Aslantas 2025).

Deformasyon hataları, ince cidarlı yapıların mikro frezelenmesinde yaygın bir sorundur (Gao vd. 2022). Araştırmacılar cidar deformasyonunu azaltmak için birçok çalışma yapmışlardır. Ramanaiah vd. (2018), deformasyonu en aza indirmek için optimum kesme parametrelerine dikkat çekmiştir. Yüksek kesme hızı, düşük kesme derinliği ve ilerleme hızında cidar deformasyonunun düşük olduğunu kanıtlamışlardır (Gao vd. 2022). Roy vd. (2024), mikro frezeleme işleminde cidar deformasyonunu sonlu elemanlar yöntemi ile modellemiş ve deformasyona sebebiyet veren etkileri incelemişlerdir. Gao vd. (2016), optimum kesme parametreleriyle ince cidar deformasyonunu azaltmak için bir strateji

geliştirmiş ve cidar deformasyonunu %52 oranında azaltmıştır. Cidar deformasyonun ölçülmesinde optik profilometre cihazlarından faydalanabilmektedir. Loehe vd. (2012), mikro ince cidarlı iş parçalarının mekanik deformasyon değerini ölçmek için optik ölçüm cihazları kullanmışlardır.

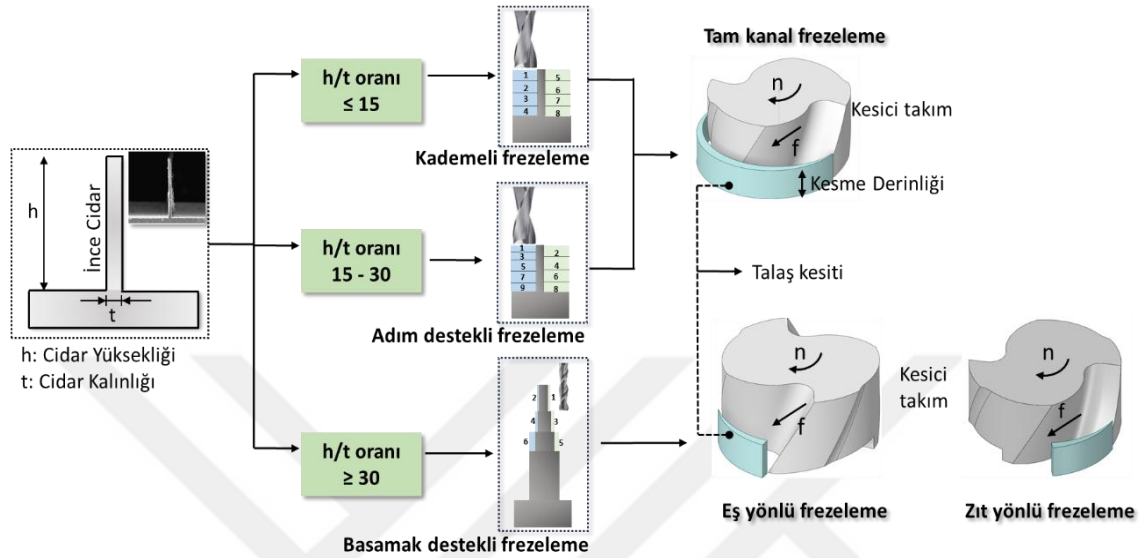
Frezeleme işleminde, kesici takımın kesmeye başladığı (giriş) ve bitirdiği (çıkış) bölgelerde cidar deformasyonunun yüksek olmaktadır (Lin vd. 2020). İlerleme hızının cidar deformasyonu üzerinde en etkili parametre olduğu bilinmektedir (Wang vd. 2019). Bu noktadan hareketle takımın kesmeye başladığı ve bitirdiği bölgelerde ilerleme hızının daha düşük alınması yöntemiyle cidar deformasyonunun en az %15 azaltılabileceği düşünülmektedir. Lakin kesme işlemi esnasında değişken ilerleme hızlarının uygulanmasına yönelik literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

#### **2.3.4 Kesme Stratejileri**

Mikro frezeleme işleminde cidar deformasyonunu en çok etkileyen unsurlar kesme parametreleri ve kesme stratejisidir (Wang vd. 2019, Del Sol vd. 2019). Literatürde kesme parametreleri ve kesme stratejilerinin ince cidar deformasyonu ve işleme kalitesi üzerinde etkili olduğu birçok çalışmada kanıtlanmıştır (Llanos vd. 2014, Annoni vd. 2015, Zariatin vd. 2017). İnce cidarlı yapıların mikro frezelenmesinde kesme parametrelerinin yanında kesme stratejisinin cidar deformasyonu üzerinde oldukça etkili olduğunu savunmuşlardır (Vukman vd. 2016, Del Sol vd. 2019). Frezeleme yönü ve stratejisi ile cidar deformasyonu daha da düşük değerlere düşürülebilir (Li vd. 2010). Agirre vd. (2012), mikro ince cidarda meydana gelen plastik deformasyonun azalan cidar kalınlığı ile önemli ölçüde arttığı vurgulanmıştır. Bu durumda, ince cidar geometrisindeki deformasyon genellikle kesme parametreleri ve stratejisine bağlıdır. Kuram (2016) ise, farklı kesme stratejilerinin ince cidar deformasyonuna ve çapak oluşumu üzerinde oldukça etkili olduğunu kanıtlamıştır.

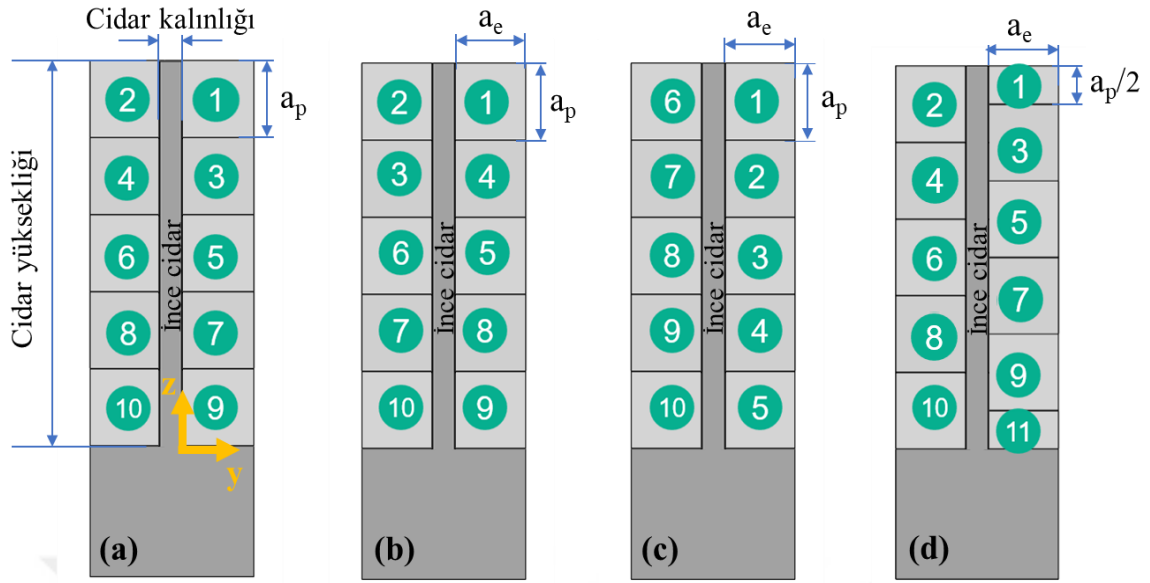
İnce cidarlı yapıların elde edilmesinde temel olarak iki farklı kesme stratejisinden bahsetmek mümkündür. Birincisi ham blok halinde iş parçasından çift taraflı yapılan boşaltma işlemidir. Tam kanal frezeleme ile yapılan boşaltma işleminde uygulanan farklı

takım yollarına göre belirlenen kesme stratejileri cidar deformasyonu ile doğrudan ilişkilidir. İkincisi ise mevcut bir ince cidarlı yapıyı, her iki taraftan incelterek cidar kalınlığını azaltıp, daha ince bir cidar yapısı elde etmektir (Şekil 2.14).



**Şekil 2.14** Farklı h/t oranları için ince cidar işleme stratejileri ve bu stratejilerdeki talaş kesiti.

Şekil 2.14’de gösterilen kademeli frezeleme ve adım destekli frezeleme stratejileri, oldukça yaygın olan tam kanal frezeleme yöntemleridir. Kademeli frezelemede iş parçası katmanlar halinde yukarıdan aşağıya doğru işlenerek ince cidar geometrisi elde edilir. Her katmanda belirli bir miktar malzeme kaldırılarak cidarın rijitliği korunur ve deformasyon riski azaltılır (Izamshah vd. 2014). Adım destekli frezelemede ise iş parçasının her iki tarafı eş zamanlı işlenerek kesme kuvvetleri dengelenir ve cidar deformasyonu minimize edilir (Mejbel vd. 2022). Basamak destekli frezeleme yönteminde her adımda destekleyici malzeme bırakılarak cidarın stabilitesi korunur ve deformasyon azaltılır (Zawada-Michałowska vd. 2020). Tüm yöntemlerde de kesici takımın boşaltma işlemi esnasında takip ettiği sıra, farklı kesme stratejilerini oluşturmaktadır. Bu farklı kesme stratejileri ince cidar deformasyonunda değişikliklere neden olmaktadır. Şekil 2.15’de literatürde kullanılan kesme stratejileri ve takım yolları gösterilmiştir. Bunlar doğrusal sıralı frezeleme (in-line milling) (Şekil 2.15a), su yolu frezeleme (water-line milling) (Şekil 2.15b), tek taraflı frezeleme (single-sided milling) (Şekil 2.15c), ve atlamalı geçişli frezeleme (jump-to jump milling) (Şekil 2.15d) stratejileridir. Bu stratejilerdeki kesici takımın takip ettiği sıra, iş parçası üzerinde numaralandırılmıştır.

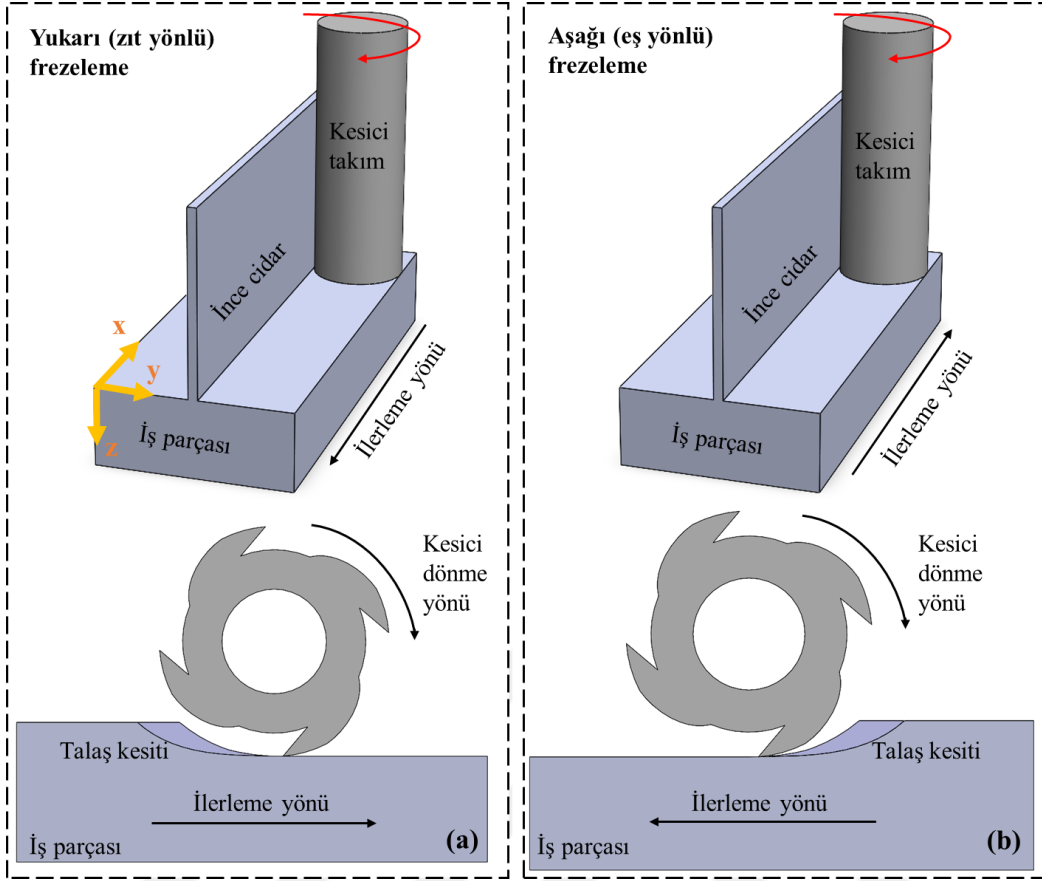


Şekil 2.15 (a) Doğrusal sıralı frezeleme, (b) su yolu frezeleme, (c) tek taraflı frezeleme, (d) atlamalı geçişli frezeleme stratejileri.

### 2.3.5 Kesme Yönü

Frezeleme işleminde, kesici takımın dönme yönü ve tablanın ilerleme yönüne göre, çevresel frezeleme işlemleri, eş yönlü frezeleme ve zıt yönlü frezeleme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Eş yönlü frezeleme işleminde, iş parçasının ilerleme yönü ile kesici takımın dönüş yönü aynı doğrultudadır. Talaş kalınlığı başlangıçta maksimumdur ve kesme süresince azalmaktadır. Kesici ağız iş parçasını terk edeceği zaman ise talaş kalınlığı sıfırdır. Zıt yönlü frezeleme işleminde ise iş parçasının ilerleme yönü ile kesici takımın dönüş yönü birbirine zıttır. Talaş kalınlığı başlangıçta sıfırdır ve kesme süresi boyunca artmaktadır. Kesici ağız iş parçasını terk edeceği zaman ise talaş kalınlığı maksimum olmaktadır (Şekil 2.16) (Groover 2013, Kalpakjian ve Schmid 2021).

Frezeleme işleminde kesme yönü, kesme kuvvetleri ve talaş oluşumunu doğrudan etkiler. Li vd. (2010)'nın yaptığı çalışmada zıt yönlü frezelemede, eş yönlü frezelemeye göre daha düşük kesme kuvvetleri genliği elde edildiği vurgulanmıştır. Ayrıca kesme derinliğinin artmasıyla, eş yönlü frezelemede kesme kuvvetleri azalırken, zıt yönlü frezelemede kesme kuvvetlerinin arttığı ifade edilmiştir.



**Şekil 2.16** (a) Zıt yönlü frezeleme ve (b) eş yönlü frezelemenin şematik gösterimi.

Groover (2013), eş yönlü frezeleme işleminde talaş uzunluğunun, zıt yönlü frezeleme işlemine göre daha kısa olduğunu belirtmiştir. Bu da kesici ağzın, iş parçası ile daha kısa süre temas edeceği anlamına geldiğinden, takım aşınmasının, eş yönlü frezelemede, zıt yönlü frezelemeye göre daha az olmasına sebep olur. Michalik vd. (2014), yaptıkları çalışmada ise iki farklı kesme yönü için sabit kesme koşullarında matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bunun sonucunda, eş yönlü frezeleme yönteminde  $R_z$  yüzey pürüzlülüğü değerinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bhagat vd. (2024), mikro frezeleme sürecinde eş yönlü frezelemenin iş parçasında daha iyi yüzey kalitesi ile sonuçlandığını belirtmiştir. Bunun sebebini eş yönlü frezelemede daha düşük ve stabil kesme kuvvetlerinin elde edilmesi şeklinde yorumlamıştır.

### 2.3.6 Dinamik Titreşimler

İnce cidarlı yapıların frezelenmesi sırasında ortaya çıkan dinamik titreşimler, işleme sürecinin en kritik problemlerinden biri olup; takım tezgâhı rijitliği, iş parçası malzemesi,

kesme parametreleri, takım geometrisi ve özellikle sistemin dinamik özelliklerine bağlı olarak gelişmektedir (Altintas 2012, Sun vd. 2023). Bu titreşimler, yalnızca yüzey kalitesini bozmakla kalmaz, aynı zamanda işleme doğruluğunu düşürür, takım ömrünü kısaltır ve iş parçasının hurdaya ayrılmasına yol açabilir (Schmitz ve Donalson 2000, Budak 2006).

İşlem esnasında meydana gelen bu titreşimlerin modellenmesi ve kontrol altına alınması, sistemin dinamik karakteristiklerinin doğru şekilde belirlenmesini gerektirir. Bu bağlamda en yaygın ve güvenilir yöntemlerden biri Experimental Modal Analysis (EMA)'dır (Smith vd. 2012, Wang vd. 2021). EMA, genellikle çekiç darbe testi ile gerçekleştirilir; test sırasında kesici takıma uygulanan darbelere karşılık olarak ivme sensörleri ya da lazer vibrometreler aracılığıyla toplanan verilerden Frequency Response Function (FRF) elde edilir ve sistemin doğal frekansları, mod şekilleri ile sönümlenme oranları belirlenebilir (Altintas 2012, Sun vd. 2023). EMA yöntemi, özellikle kesme işleminde titreşim kararlılığının belirlenmesi, FRF spektrumlarının çıkarılması ve talaş kaldırma sürecine ilişkin dinamik etkilerin gözlemlenmesi açısından önemlidir (Ismail ve Ziaei 2002, Bravo vd. 2005). Ancak, tezgâhın her test öncesinde durdurulması ve takımın iş parçasından uzaklaştırılması gerektiğinden, zaman alıcı bir yöntemdir. Bu dezavantajına rağmen, sağladığı detaylı modal parametre verileri nedeniyle tercih edilmeye devam etmektedir (Schmitz ve Donalson 2000).

EMA'ya ek olarak, özellikle analitik ve yarı analitik yöntemler (kiriş, plaka veya kabuk teorileri) ince cidarlı yapıların dinamik davranışlarını basitleştirilmiş modeller üzerinden değerlendirmede kullanılmaktadır. Rayleigh-Ritz yöntemi, Castigliano teoremi ya da RCSA (Receiver Coupling Substructure Analysis) gibi yöntemler bu kapsamda öne çıkmaktadır (Schmitz ve Honeycutt 2017). Ancak bu yaklaşımlar, karmaşık geometrili iş parçalarının analizinde yeterli doğruluğu sağlayamamaktadır (Li vd. 2024). Bu nedenle, son yıllarda Sonlu Elemanlar Modal Analizi (FEMA), özellikle karmaşık yapıya sahip ince cidarlı parçaların frekans modlarının ve mod şekillerinin çıkarılmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Altintas vd. 1992, Mañé vd. 2008). FEM tabanlı simülasyonlar, hem kesici takım hem de iş parçasının konumuna bağlı olarak değişen dinamik davranışları simüle etmede büyük avantaj sunmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi

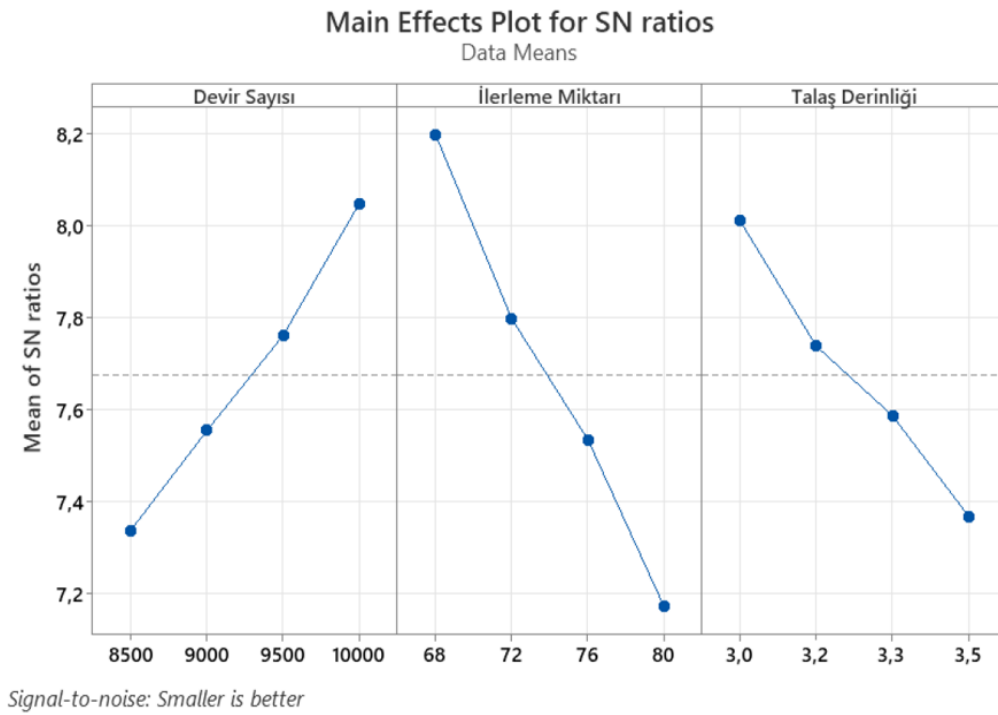
gereken husus, iş parçasının frezeleme süresince sabit bir yapı olarak modellenmesinin, gerçek işleme koşullarını yansıtmayabileceğidir (Thevenot vd. 2006, Ding ve Zhu 2018, Li vd. 2024).

## **2.4 Yüzey Bütünlüğü ve Kalitesi**

### **2.4.1 Yüzey Pürüzlülüğü**

İnce cidarlı parçaların işlenmesinde ürün kalitesinin iyileştirilmesi, parçaların düşük rijitliği nedeniyle zorlaşmaktadır (Qin vd. 2020). Ürün kalitesi performansı açısından etkili bir endeks olan yüzey pürüzlülüğü değeri, ince cidarlı parçaların aşınma direncini, yorulma dayanımını, korozyon direncini, yağlamayı ve sürtünmeyi doğrudan etkiler (Vakondios vd. 2012, Cagan vd. 2020). Bu sebeple işleme parametreleri hassas bir şekilde seçilmelidir (Bolar vd. 2018). İnce cidarlı parçaların frezelenmesinde işleme parametrelerinin seçimi, işlenmiş parçaların deformasyonunu ve yüzey kalitesini etkiler (Qu, vd. 2017, Ma vd. 2018, Wang vd. 2018). Kesme deneyleri sonucunda regresyon yoluyla kesme parametrelerine dayalı bir yüzey pürüzlülük tahmin modeli oluşturulabilmektedir (Wang vd. 2015, Hao ve Liu 2017). Bunun için RSM ve ANOVA tekniklerinden faydalanılabilmektedir (Khanghah vd. 2015). Böylece yüzey pürüzlülüğü modeli üzerinden optimum işleme parametreleri elde edilebilmektedir (Sahu ve Andhare 2017). Ayrıca Taguchi yöntemi kesme parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisini tespit etmek için sıklıkla kullanılır (Pinar vd. 2016, Tlhabadira vd. 2019). Optimizasyon yöntemleri ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olumsuz etkilerini tespit edip minimize etmek mümkündür. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkin kesme parametresinin kesme hızı ve ilerleme hızı olduğu belirtilmiştir (López de Lacalle vd. 2007). Kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü iyileşir (de Souza vd. 2015). Yüksek ilerleme hızlarda kesme kuvvetinin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Düşük devirlerde built up edge (BUE) oluşur ve yüzey pürüzlülüğü artar (Bhushan vd. 2010, Zeelanbasha vd. 2018, Cheng vd. 2020). Eksenel ( $a_p$ ) kesme derinliği de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkin olan bir diğer kesme parametresidir,  $a_p$  arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (D Liu vd. 2024). İnce cidarlı parçaların işlenmesinde rijit ve sert olmayan geometrilerinden dolayı finish işlemi esnasında meydana gelebilecek, titreşim, boyut hataları ve

deformasyonlar kaçınılmazdır. Bu sebeple optimizasyon yöntemleri kullanılarak yüzey bütünlüğünün iyileştirilebileceği bir finish işleme süreci izlenmelidir (Ding vd. 2004, Ding vd. 2005). Bu bağlamda kesme parametrelerinin optimizasyonu, yüzey bütünlüğü açısından oldukça önemlidir. İnce cidarlı iş parçalarının işlenmesinde yüzey bütünlüğü ile doğrudan ilişkili olan deformasyonlar optimum kesme parametreleri belirlenerek minimum seviyeye indirilebilir (Şekil 2.17) (Altan 2024).



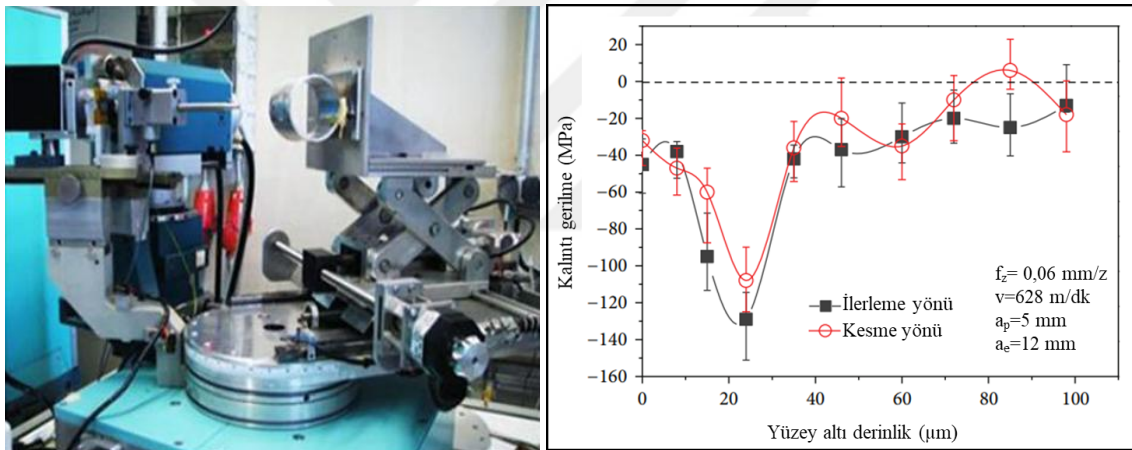
**Şekil 2.17** İnce cidar deformasyonu için S/N oranı grafiği (daha küçük daha iyidir (smaller is better)) (Altan 2024).

İnce cidarlı parçaların frezelenmesinde meydana gelen titreşim, yüzey pürüzlülüğü etkilemektedir (Zhang vd. 2018). Titreşimlerin bastırılabilmesi / sönümlenmesi durumunda yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilebileceği belirtilmiştir (Seguy vd. 2008). Kesici takım yöneliminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi analiz edilerek, titreşimsiz bir takım yönelim optimizasyonu algoritması sunulmaktadır (Zhao vd. 2020). Takım yönelim optimizasyonunu yüzey hatalarını %90 a kadar azalttığı belirtilmektedir (Habibi vd. 2021). Kesme işlemi esnasında kesici takımda ve iş parçasında meydana gelen elastik deformasyon sadece geometrik hataya değil, yüzey pürüzlülüğünün artmasına da neden olur (Izamshah vd. 2012, Wojciechowski 2015). Kesici takım eğim açısı frezeleme dinamiklerini ve işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğünü etkiler (Wojciechowski ve Mrozek

2017). Bir diğer yandan kesme yönü de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkilidir. Eş yönlü frezeleme, takım ömrü açısından daha avantajlı iken, zıt yönlü frezelemede daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmektedir (Vopát vd. 2015).

#### 2.4.2 Kalıntı Gerilmeler ve Distorsiyon

İnce cidarlı karmaşık geometriye sahip parçaların işlenmesi esnasında oluşan şekil bozuklukları distorsiyon olarak ifade edilir. İşleme esnasında meydana gelen kalıntı gerilmeler, kesme kuvvetleri veya termal etkiler sebebiyle distorsiyonlar görülmektedir (Wei ve Wang 2007). İşleme sonrasında kalıntı gerilme (Şekil 2.18a) ve distorsiyonlar ölçülebilmektedir (Masoudi vd. 2015). Ölçülen kalıntı gerilmelerin incelenerek yorumlandığı birçok çalışma mevcuttur (Şekil 2.18b) (Huang vd. 2013).



Şekil 2.18 (a) X-ışını yöntemi ile parçalardaki kalıntı gerilimin ölçümü (Masoudi vd. 2015), (b) kalıntı gerilmelerin derinliğe göre değişimi (Huang vd. 2013).

Gerilim giderme teknikleri (relief annealing pre-stretching and artificial aging) ile kalıntı gerilmeler azaltılabilir ancak tamamen yok edilemez. Ayrıca bu teknikler zaman alıcı ve maliyetli olduğundan tercih edilmeyebilir (Ratchev vd. 2005). Kalıntı gerilmeler, kesme işlemi esnasında ve ısıtılma sırasında oluşabilir (Lu vd. 2017). İşleme esnasında iş parçasının plastik deformasyonu sonucunda yüzey tabakasında basma kalıntı gerilmeleri meydana gelir. Ayrıca takım talaş arayüzeyinde açığa çıkan ve termal gerilimlere neden olan yüksek ısı sonucunda yüzey tabakasında çekme kalıntı gerilmeleri meydana gelir (Fu vd. 2009, Singh ve Agrawal 2015). İşleme sonrasında yüzeydeki mekanik ve termal yükler nedeniyle oluşan kalıntı gerilmeleri ayırt etmek zordur (Bouazid Saï vd. 2001). Bu

kalıntı gerilmeler, işleme parametreleri, takım geometrisi ve işleme yöntemi gibi birçok faktöre bağlıdır (Li vd. 2015, Rafey Khan vd. 2017, Krajewska-Śpiewak vd. 2018). Kalıntı gerilmenin ince cidarlı parçaların deformasyonu üzerindeki etkisi, ısıl işlem süreci, kesme parametreleri ve işleme süreci dikkate alınarak araştırılmaktadır (Cerutti ve Mocellin 2016, Jiang vd. 2017, Guo vd. 2019, Li vd. 2019, Ma vd. 2025).

Kalıntı gerilmeden kaynaklanan distorsiyonu en az indirmek için, işleme süreçlerini kontrol etmek amacıyla farklı stratejiler kullanılmıştır (Qi vd. 2025). Kesme işlemine ait distortion modellerini tahmin etmek için üç boyutlu termo-mekanik analiz yapılmaktadır. Malzeme ısı işlem döngüsünün sayısal simülasyonu oluşturularak mekanik tepkiler belirlenmektedir (Rohde ve Jeppsson 2000). Termal, metalurjik ve mekanik yönler birlikte ele alınarak mikro yapı ve sertlik üzerinde nicel tahminler yapılmaktadır (Denis vd. 2002). İnce cidarlı parçaların frezelenmesinde kalıntı gerilme dağılımının dinamik bir tahmin modeli oluşturulmuştur (Schulze vd. 2010). Kalıntı gerilme dağılımının analizi için çevrimiçi ölçümlerden elde edilen işleme şeması ile takım yolu telafisi yapılabilmektedir (Berghout vd. 2020, Bergmann ve Reimer 2021, You vd. 2022).

#### **2.4.3 Yüzey Bütünlüğü Değerlendirme Teknikleri**

Yüzey bütünlüğü, iş parçası yüzeyinin mekanik, metalurjik, kimyasal ve topolojik durumu tarafından belirlenir (Saini vd. 2011). İşlenmiş bir parçanın performans ve kalitesi tamamen yüzey bütünlüğü ile ilişkilidir ve bu üç ana grupta incelenmektedir (Gürbüz 2012, Kafkas vd. 2022, Wan vd. 2023).

Bunlar,

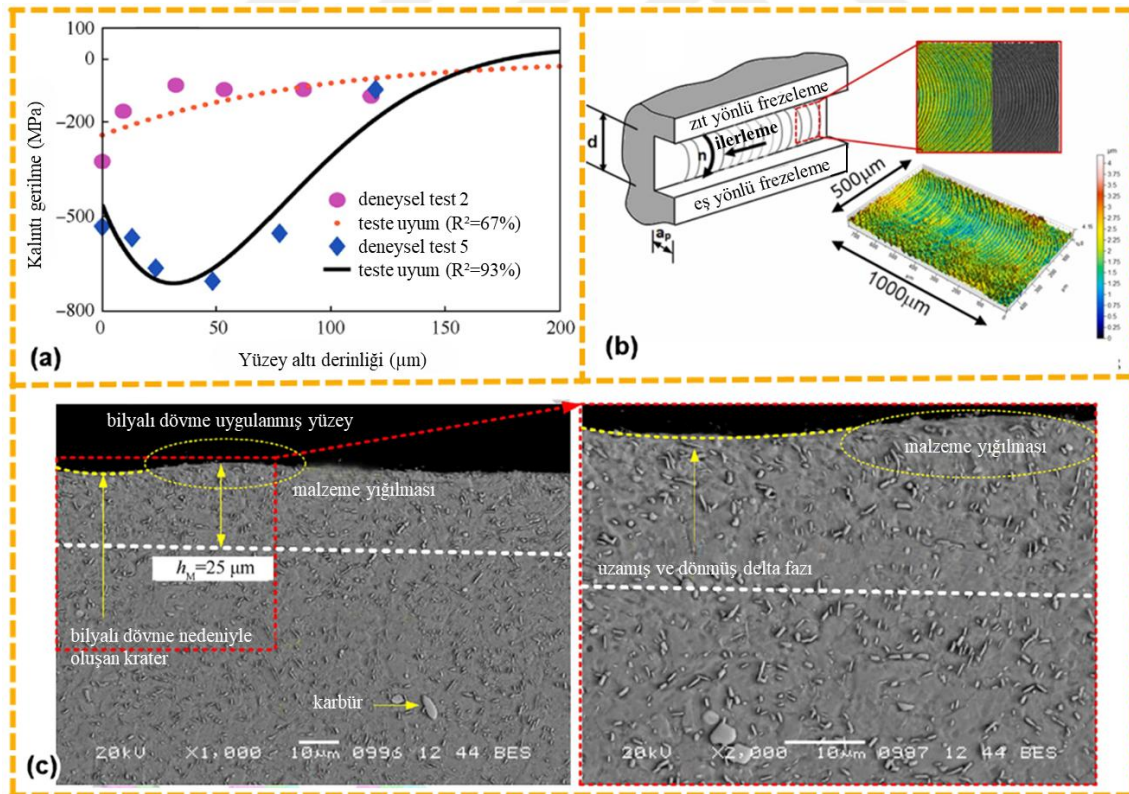
- Yüzey dokusu topolojisi (yüzey pürüzlülüğü, boyutsal ve biçim tamlığı) (Xiao vd. 2003, Bosheh ve Mativenga 2006, Ulutan ve Ozel 2011),
- İşleme sonucu oluşmuş yüzey katmanlarının metalurjik yapısı (mikrosertlik, faz dönüşümü, mikroyapısal değişiklikler) (Che-Haron 2001, Barbacki vd. 2003, Schwach ve Guo 2005, Jawahir vd. 2011),
- Mekanik özellikler (yüzey ve yüzey altı bölgelerinde oluşmuş kalıntı gerilmeler, sertlik) (Outeiro vd. 2006, Liang ve Su 2007, Mohammadpour vd. 2010, Maranhão ve Paulo Davim 2010) dir.

İnce cidarlı parçaların frezelenmesi sonrasında işlenmiş yüzeyde meydana gelen yüksek kalıntı gerilmeler, gerinim sertleşmesi ve mikro çatlaklar gibi hasara neden olan bileşenler yüzey bütünlüğünü bozmaktadır (Wang vd. 2018). Bu da iş parçasının yorulma direncinin düşük olmasına neden olmakta ve performansını etkilemektedir (Madariaga vd. 2015, Brown vd. 2022). İnce cidarlı karmaşık yapılar düşük rijitliği nedeniyle işleme esnasında titreşim ve deformasyona eğilimlidir, bu da işleme kararlılığının zayıf olmasına neden olmaktadır (Wan vd. 2018). Geometrik doğruluk kontrolü ve işleme kararlılığının kontrolünün zor olması ise yüzey bütünlüğünün kontrol sorunlarını ortaya çıkarmaktadır (Zhao vd. 2023). Yüzey bütünlüğü çok önemli bir çıktı parametresidir, bu sebeple işleme süresince yüzey bütünlüğü gerekliliklerinin yerine getirilmesi bir zorunluluktur (Arunachalam vd. 2004).

Yüzey bütünlüğünün değerlendirilmesi ile ilgili geçmişten günümüze birçok deneysel ve modelleme çalışması mevcuttur. Yüzey altı kalıntı gerilmeler ile yorulma ömrü ilişkilendirilerek yüzey bütünlüğü iyileştirme çalışmaları yapılmıştır (Cui vd. 2024, Becker vd. 2025). Kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünme şartları ve kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın yüzey bütünlüğünü etkilediği vurgulanmıştır. Kesici takım geometrisi, kaplama, takım aşınması ve işleme parametrelerinin kalıntı gerilmeler ve haliyle yüzey bütünlüğüne etkisi deneysel çalışmalarla incelenmiştir (Outeiro vd. 2006, Silveira vd. 2023). Düşük kesme ve ilerleme hızlarında meydana gelen basma kalıntı gerilmelerinin yüzey bütünlüğüne önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir (Rech ve Moisan 2003). Aşınmış bir takımla yüksek ilerleme hızlarında mikroyapısal deformasyon derinliğinin ve yüzey sertliğinin arttığı belirtilmiştir (Sharman vd. 2004). Keskin (aşınmamış) bir takımla yapılan işlemede işlenmiş yüzeyin 10-15 µm derinliğinde mikroyapının değiştiği gözlenmiştir (El-Wardany vd. 2000). Takım aşınmasının yüzey bütünlüğüne etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve aşınmış kesici takımın çekme gerilmeleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır (Muñoz-Sánchez vd. 2009). Termo-mekanik tabanlı sonlu elemanlar modeli kullanılarak, mikroyapı değişimlerinin kalıntı gerilme dağılımlarını etkilediği görülmüştür (Umbrello 2011). İşleme parametreleri ve kesici kenar geometrisinin yüzey bütünlüğüne etkisi ANOVA analizi ile araştırılmıştır (Pawade vd. 2008). Üç boyutlu termo-elastik-plastik

sonlu elemanlar modeli ile yüksek hızda işlemenin mikrosertlik ve kalıntı gerilmelere etkisi incelenmiştir (El-Wardany vd. 2000). Elasto-plastik model oluşturularak başlangıç kalıntı gerilimi ve işleme yükü tahmin edilmiştir (Tang vd. 2013). Analitik tahmin modeli ile çift eksenli kalıntı gerilmenin işleme deformasyonu elde edilmiştir (Gao vd. 2017). Ultrasonik titreşim destekli kesme (UVAC) gibi yenilikçi yöntemler kullanılarak kesilmesi zor malzemelerin yüksek kalitede işlenmesi ve iyi yüzey bütünlüğü sonuçları elde edilmiştir (Tong vd. 2020, Yang vd. 2020, Ning ve Cong 2020, Gao vd. 2022, Zhou vd. 2022).

Yüzey bütünlüğünün bu denli önemli olması, son yıllarda birçok araştırmacıyı yüzey durumlarının karakterizasyonu ve kontrolü konusuna yöneltmiştir (Yue vd. 2018, Yin vd. 2020). İşlenmiş yüzey için tipi karakterisyon yöntemleri özetle kalıntı gerilmeler, yüzey topoğrafyası ve mikro yapının incelenmesidir (Şekil 2.19) (Liao vd. 2021, Osarogiagbon vd. 2024).

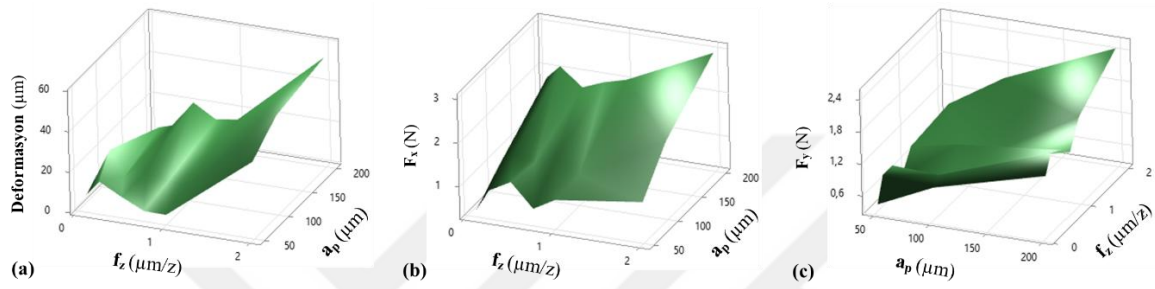


**Şekil 2.19** En kötü ve en iyi uyan kalıntı gerilim profilleri (Ulutan vd. 2014), (b) numune yüzey topoğrafileri ve pürüzlülüğü (Danish vd. 2022), (c) işlemeden sonra numunenin mikro yapıları (Wu vd. 2018).

## 2.5 Optimizasyon Çalışmaları

Kesme parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili istatistiksel deney tasarım metodları sıklıkla tercih edilmektedir (Zhu vd. 2024). Bu deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi metodu ile üretim sürecinde kaliteyi artırıp maliyeti azaltmak mümkündür (Yalçın vd. 2023, Buğdaycı vd. 2023). Taguchi metodunda, kesme parametreleri arasındaki ilişkileri değerlendirmek ve bu parametrelerin çıktı değişkenleri üzerindeki etkilerini belirlemek için L-ortogonal diziler kullanılır. Bu diziler, az sayıda deneyle çok sayıda parametrenin etkisinin analiz edilmesini mümkün kılar. Deney sonuçlarının analizinde, sinyal-gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) gibi yöntemler kullanılarak her bir parametrenin sürece olan katkısı belirlenir. S/N oranı, varyansın tersi olarak tanımlanan logaritmik bir fonksiyon olup, süreç ve ürün tasarımında optimizasyon ile değişkenliğin azaltılmasında kullanılır. S/N oranının maksimize edilmesi, gürültü faktörlerinin etkisini minimize ederek sürecin kararlılığını artırır. S/N oranı ve varyans ters orantılı olduğundan, minimum değişkenliğin elde edilmesi için faktörlerin maksimum S/N değerini sağlaması gerekir (Altan 2024). Taguchi metodunda varyasyon yüzdesi olan  $R^2$  oranının 85'in üzerinde olması modelin doğruluğunu göstermektedir. Bu oran ne kadar yüksekse, modelin tahmin yeteneği o kadar iyidir (Bahrami 2022). Mikro frezeleme prosesi performans optimizasyonu çalışmalarında Taguchi metodu sıklıkla tercih edilmektedir (Khan vd. 2023, Sredanovic vd. 2024). İnce cidarlı yapılara yönelik benzer optimizasyon çalışmaları literatürde sınırlı düzeydedir. Araştırmacılar mikro frezeleme yöntemiyle işlenen parçalarda yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla, yüzey pürüzlülüğünü (Aslantas vd. 2018), kesici takım aşınmasını (Patel vd. 2020, Ali vd. 2022), titreşimi (Yu vd. 2022), enerji tüketimini (Kahya vd. 2021, Li vd. 2022) azaltmaya yönelik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Mikro frezeleme işleminde kesme parametrelerinin değişimi işleme performansını doğrudan etkilemektedir (Ercetin vd. 2023). İş parçası yüzey pürüzlülüğüne kesme parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla yapılan bir optimizasyon çalışmasında ağız başına düşen ilerlemenin en etkili parametre olduğu belirtilmiştir (Lu vd. 2019). İnce cidarlı yapıların işlenmesinde en etkili kesme parametreleri ilerleme hızı ve kesme derinliğidir. Şekil 2.20'de optimizasyon çalışması sonucu elde edilen, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin  $F_x$ ,  $F_y$  ve ince cidar deformasyonunu nasıl etkilediğini gösteren 3-boyutlu grafikler verilmiştir. Yüksek tahmin yeteneğinde bir optimizasyon imkanı tanıyan Taguchi metodu, ince cidarlı yapılarda deformasyon ve kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde

deney sayısını minimize etmektedir (Gologlu ve Sakarya 2008). Araştırmacılar bu metodu kullanarak yaptıkları deneysel çalışmalarda kesme kuvvetlerinin azaltılması ve verimliliğin artırılmasını amaçlamışlardır (Jarosz vd. 2017). İnce cidarlı yapıların işlenmesinde meydana gelen deformasyonunun tespiti ve önlenmesinde Taguchi metodundan faydalanılmıştır (Jain ve Bajpai 2020, Zawada-Michałowska vd. 2020). Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılmış ve kesme parametrelerinin ince cidardaki kesme kuvvetleri ve deformasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Kuo ve Lin 2021).



**Şekil 2.20** (a) Cidar deformasyonu, (b)  $F_x$  kesme kuvveti ve (c)  $F_y$  kesme kuvvetinin ilerleme hızı ve kesme derinliğine göre değişimini gösteren 3 boyutlu yüzey grafikleri.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, ince cidarlı yapıların üretiminde yüksek hız, hassasiyet ve iyi yüzey kalitesi sağlaması nedeniyle en yaygın kullanılan yöntemin mikro frezeleme olduğu görülmektedir. Ancak bu yapıların yüksek yükseklik/kalınlık ( $h/t$ ) oranına bağlı olarak düşük rijitlik göstermesi, mikro frezeleme sürecinde çeşitli deformasyonlara ve yüzey kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır. Bu deformasyon mekanizmaları; kesici takım ile iş parçası malzeme çifti, kesme parametreleri, kesme yönü ve stratejileri, dinamik titreşimler ile kesici takımın geometrisi ve kaplama özellikleri gibi çok sayıda etkene bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca, mikro frezeleme sürecinde minimum talaş kalınlığına ve boyutsal farklılıklara bağlı olarak ortaya çıkan kazınma (ploughing) etkisinin, yüzey bütünlüğünü olumsuz etkilememesi için doğru biçimde tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Deneysel çalışmalar aracılığıyla optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi, bu yapıların yüzey bütünlüğü korunarak işlenmesine olanak sağlamaktadır. İnce cidarlı yapıların frezelenmesinde deformasyonları doğrudan etkileyen kesme parametreleri, daha az sayıda deneyle etkin sonuçlar verebilen Taguchi ve ANOVA gibi optimizasyon yöntemleriyle analiz edilmektedir. Özellikle en etkili parametre olan ilerleme hızının, sabit bir ivmeyle artan

veya azalan şekilde uygulanması gibi özgün stratejilerle Ar-Ge çalışmaları yürütülerek, mikro işleme verimliliğinin artırılması ve literatüre yeni yöntemlerin kazandırılması hedeflenmelidir. Kesme deneylerinden elde edilen veriler ışığında, kesme parametreleri ve stratejilerinin yüzey deformasyonu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, operatörlerin doğru tekniklere yönlendirilmesini sağlarken, deneme-yanılma sürecini azaltarak hem iş parçası kayıplarını hem de üretim süresini minimize edecektir. Böylelikle üretim kalitesi ve verimliliği artırılarak sanayi uygulamalarında doğrudan kullanılabilecek yeni ve etkin bir işleme yöntemi literatüre kazandırılmış olacaktır.



### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Kesici Takım ve İş Parçası

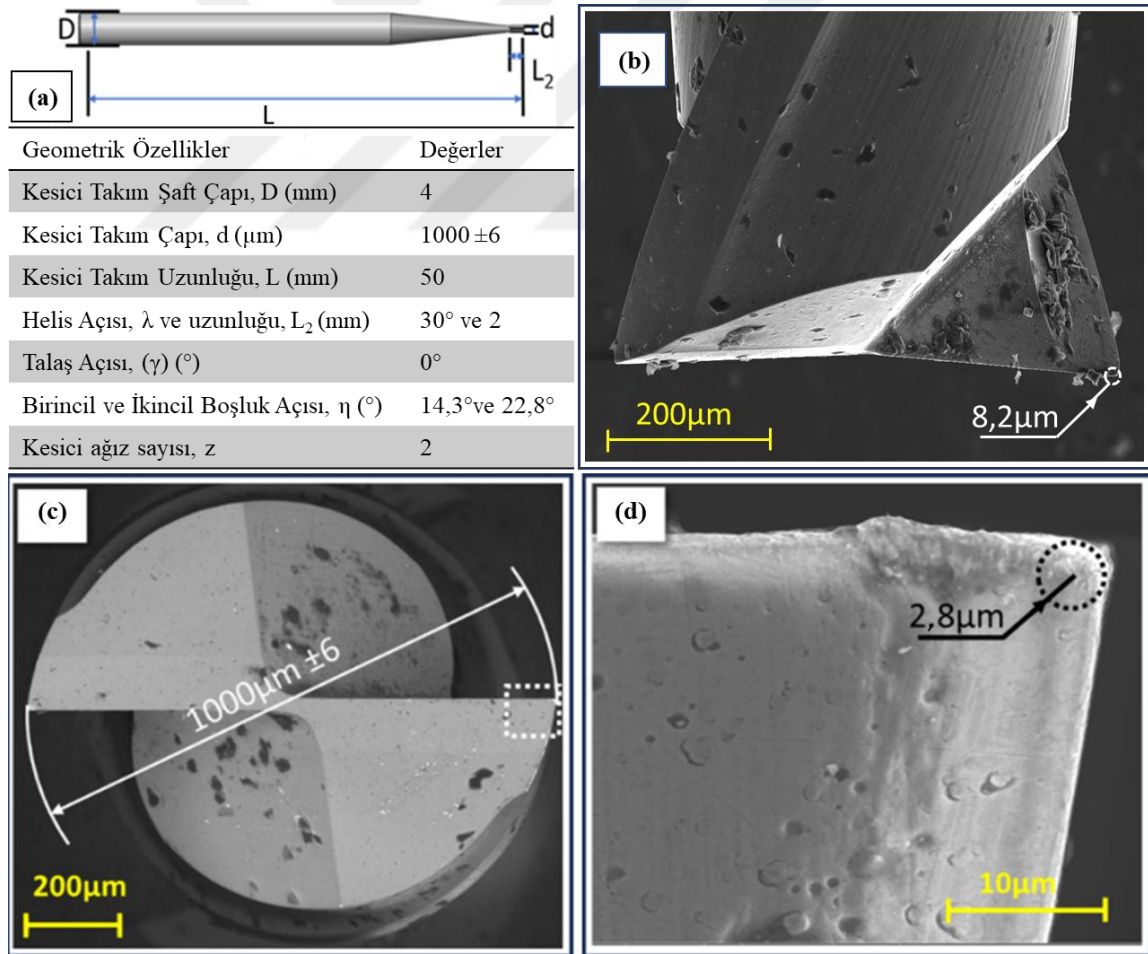
Alüminyum alaşımları, ısı ve elektrik iletkenlikleri, ısıl işlemlere elverişli olmaları, kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı ve yüksek rijitliği bakımından endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen demir dışı metallerdir (Liu vd. 2015). Hafif ve kolay işlenebilirlik özellikleri ile ince cidarlı yapılarda yapısal verimliliği mümkün kılmaktadırlar (Zawada-Michałowska vd. 2021). Al 6061 alaşımı çok yönlü ısıl işlem uygulanabilme kabiliyeti ile yaygın olarak kullanılan bir alüminyum alaşımıdır. Bu alaşımın T6 ısıl işlemine tabi tutulmasıyla elde edilen Al 6061-T6 alaşımının mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirilmekte, yüksek tokluk, düşük yoğunluk ve korozyon direnci ile ön plana çıkmaktadır (Çizelge 3.1) (Sun vd. 2022). Bu özellikleri bakımından havacılık ve uzay endüstrisinde, elektronik ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan bir malzemedir (Samuel vd. 2021). Bu tez çalışmasında iş parçası malzemesi olarak Al 6061-T6 alaşımı tercih edilmiştir.

**Çizelge 3.1** Al 6061-T6 malzemesinin mekanik özellikleri (Ding vd. 2014, Torabi ve Habibi 2016, Bagheri vd. 2023).

| Mekanik Özellikler (Al 6061-T6)                       | Değerler |
|-------------------------------------------------------|----------|
| Elastisite Modülü, E (GPa)                            | 67       |
| Poisson Oranı                                         | 0,33     |
| Akma Dayanımı (MPa)                                   | 276      |
| Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)                         | 292      |
| Kopma Uzaması (%)                                     | 11       |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )                         | 2700     |
| Isıl İletkenlik (W/m.K)                               | 167      |
| Özgül Isı (J/kg.K)                                    | 896      |
| Termal Genleşme (K <sup>-1</sup> x 10 <sup>-6</sup> ) | 23,6     |
| Maksimum Yükte Mühendislik Gerinimi                   | 0,034    |
| Gerçek Kırılma Gerilimi (MPa)                         | 299      |
| Kırılma Tokluğu, K <sub>c</sub> (MPa.√m)              | 38       |
| Gerinim-Sertleşme Katsayısı (MPa)                     | 314      |
| Gerinim-Sertleşme Üssü                                | 0,021    |

Mikro frezeleme deneylerinde kullanılan kesici takımlar tungsten karbür kobalt (%90WC-%10Co) bileşimidir. Kesme deneylerinde TiSiN kaplamaya sahip tungsten karbür parmak freze kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takım çapı 1 mm ± 6 µm ve ince cidar kalınlığı (50 µm)'na göre yaklaşık 20 kat daha büyük bir değerde seçilerek

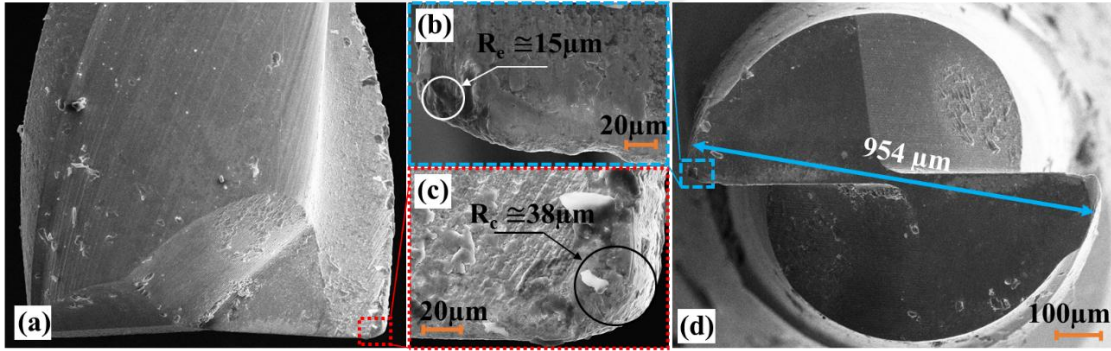
takımdaki elastik deformasyonun minimum düzeyde kalması amaçlanmıştır. Kesici takıma ait geometrik özellikler Şekil 3.1a'da verilmektedir. Kesici takımın uç yarıçapı  $8,2 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür (Şekil 3.1b). Kesme deneylerinde kullanılacak olan takımlara kesme deneyleri öncesinde ayrı ayrı çap ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.1c). Kesme deneylerinde kullanılacak kesici takımların tamamı birbirleriyle gerek malzeme gerek geometrik özellik bakımından aynı niteliklere sahiptir. Buna rağmen takım çapında mikron boyutunda farklılıklar olabilmektedir. Bu mikron boyutundaki takım çapı farklılıkları, ince cidar geometrilerinin frezelenmesinde, cidar kalınlığını doğrudan etkilemektedir. Çaplardaki bu farklılıklar, kesme deneyleri esnasında göz önünde bulundurulmuştur. Mikro frezelemede kesici takıma ait kenar yarıçapı önemli bir geometrik parametredir. Bu nedenle yapılan SEM analizlerinde kesici takıma ait kenar yarıçaplarının da tespiti yapılmış ve ortalama  $2,8 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür (Şekil 3.1d).



Şekil 3.1 (a) Kesme deneylerinde kullanılan kesici takımın geometrik değerleri, (b) takım uç yarıçapı, (c) takımın çapı ve (d) takımın kenar yarıçapına ait SEM ölçümü.

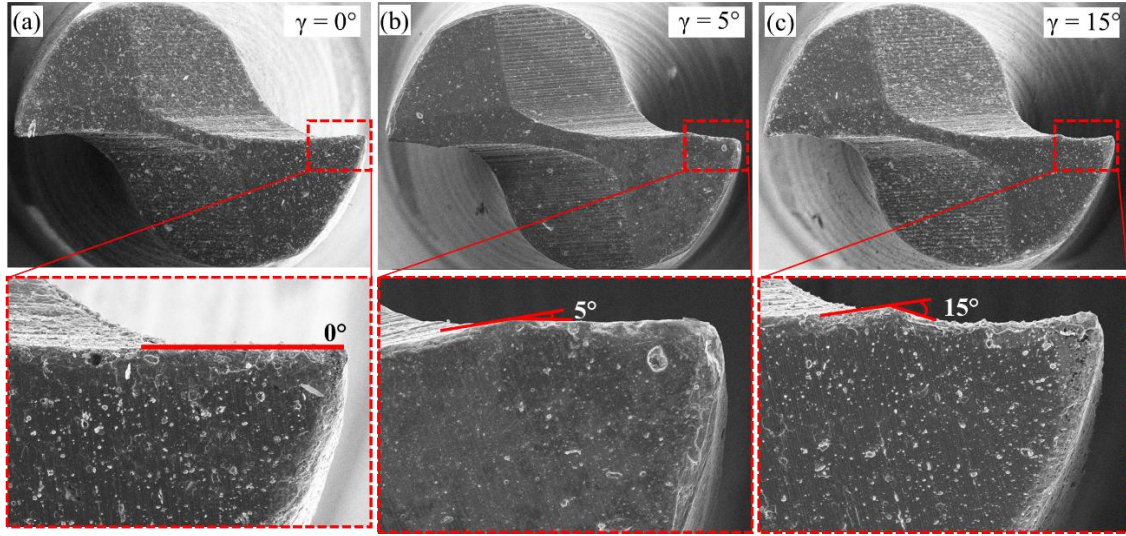
### 3.1.1 Takım Geometrisinin Etkisi

Kesme deneylerinin tamamında, takım aşınmasının sonuçları etkilememesi adına, yeni kesici takım kullanılmıştır. Bu bölümde öncelikle aşınmış takımın cidar deformasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kesici takım bir dizi kesme işlemine tabi tutulmuş ve kontrollü bir şekilde aşındırılmıştır. Aşınmış takımın geometrisindeki değişim, SEM ile görüntülenmiştir (Şekil 3.2). Aşınmış takım, aşınmamış takım ile kıyaslandığında, kesici takım çapının 1000  $\mu\text{m}$ 'dan 954  $\mu\text{m}$ 'a düştüğü, kenar yarıçapının 2,8  $\mu\text{m}$ 'dan 15  $\mu\text{m}$ 'dan çıktığı, uç (köşe ya da burun) yarıçapının 8,2  $\mu\text{m}$ 'dan 38  $\mu\text{m}$  'a çıktığı görülmektedir. Aşınmış ve yeni takım ile aynı kesme parametrelerinde ( $f_z = 1 \mu\text{m}/\text{z}$ ,  $n = 30.000 \text{ dev/dk}$ ,  $a_p = 100 \mu\text{m}$ ) kesme deneyleri yapılarak aşınmanın cidar deformasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.2 Aşınmış takıma ait (a) SEM görüntüsü, (b) kenar yarıçapı, (c) uç yarıçapı, (d) takım çapı.

Talaş açısının, ince cidarlı yapıların deformasyonu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini sistematik olarak incelemek amacıyla, farklı talaş açılarına sahip kesici takımlar ile mikro frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, deneysel çalışmalarda talaş açısı sıfır derece olan kesici takımın yanı sıra,  $5^\circ$  ve  $15^\circ$  talaş açılarına sahip takımlar da kullanılmıştır. Tüm kesme işlemleri, sabit kesme parametreleri ( $f_z = 1 \mu\text{m}/\text{z}$ ,  $n = 30.000 \text{ dev/dk}$ ,  $a_p = 100 \mu\text{m}$ ) altında yürütülerek yalnızca talaş açısındaki değişimin cidar deformasyonu üzerindeki etkisi tespit edilmek istenmiştir. Şekil 3.3'de farklı talaş açısına sahip olan takımlara ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.3 (a)  $0^\circ$ , (b)  $5^\circ$ , (c)  $15^\circ$  talaş açısına sahip kesici takımlara ait SEM görüntüleri.

### 3.1.2 Takım Kaplamasının Etkisi

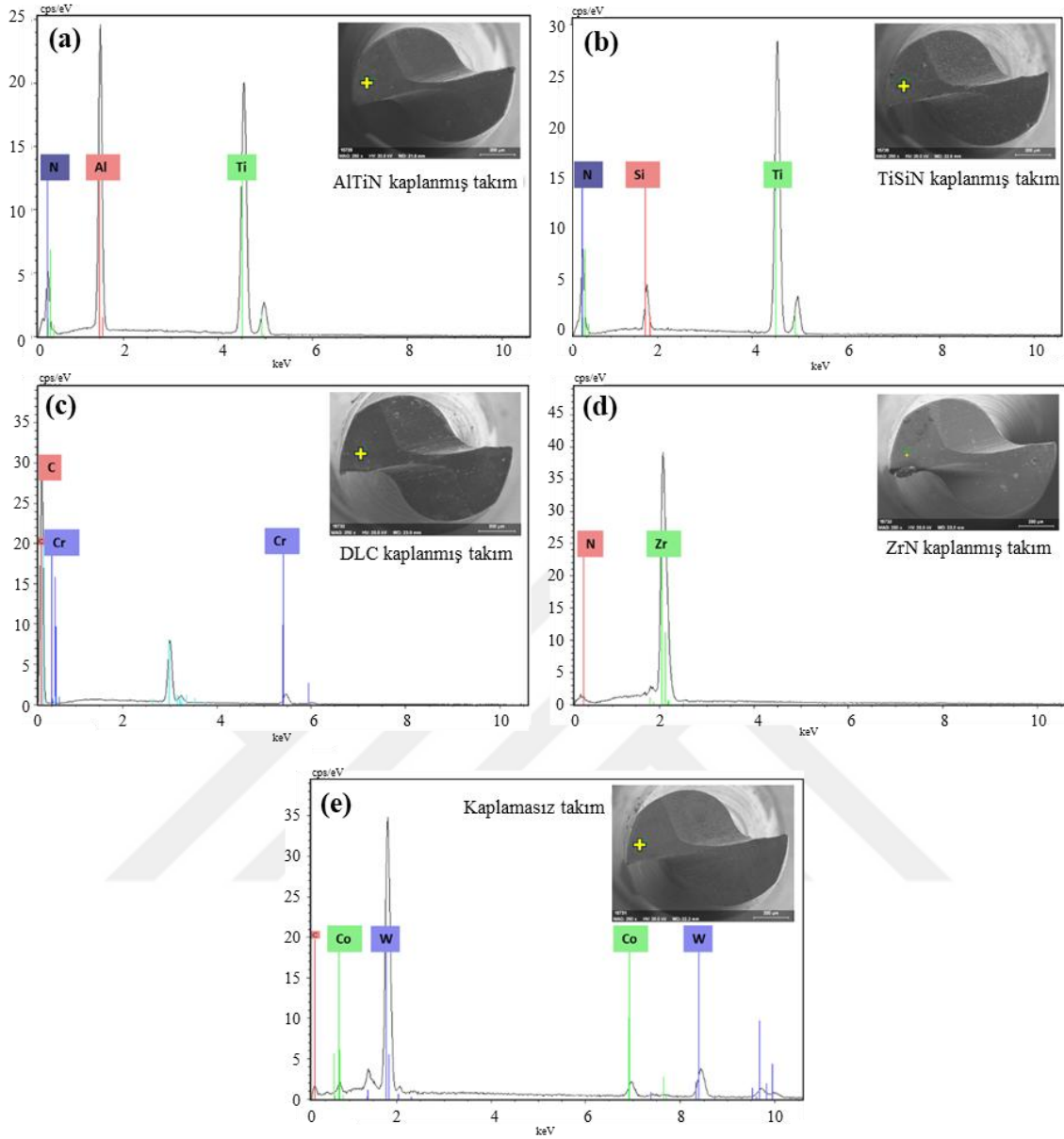
Kesici takım kaplamaları, takım aşınmasını azaltarak takım ömrünü uzatmakta ve kesme işlemi sırasında oluşan sürtünme ile ısıyı minimize ederek yüzey kalitesi ile işlenebilirliği önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle mikro frezeleme gibi yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda, kaplama türü; talaş oluşumu, kesme kuvvetleri ve ince cidar deformasyonu üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, farklı kaplama türlerinin ince cidarlı yapıların mikro frezelenmesi üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, süreç optimizasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada kullanılan DLC (Diamond-Like Carbon), ZrN (Zirkonyum Nitrür), AlTiN (Alüminyum Titanyum Nitrür) ve TiSiN (Titanyum Silisyum Nitrür) kaplamalar, mikro frezeleme işlemlerinde yaygın olarak tercih edilen ve performans avantajı sağlayan kaplama türleridir. DLC kaplamalar düşük sürtünme katsayısı ve kimyasal atıllığı sayesinde ince cidarlı yapıların işlenmesinde oluşabilecek yüzey hasarlarını minimize ederken, ZrN kaplamalar kesme bölgesindeki ısıyı etkin bir şekilde dağıtarak termal deformasyonları azaltmaktadır (Zhang vd. 2012). AlTiN ve TiSiN kaplamalar ise yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci ile bilinir ve özellikle yüksek devirli uygulamalarda takım ömrünü artırarak stabil kesme koşulları sağlar (Dudzinski vd. 2004, Aurich ve Kirsch 2016). Bu kaplamaların tercih edilme nedeni, hem yüzey pürüzlülüğünü iyileştirme hem de plastik deformasyonu sınırlama konusundaki etkinliklerinin literatürde kanıtlanmış olmasıdır. Kesici takım kaplamasının etkisini sabit kesme

parametrelerinde ( $f_z = 1 \text{ } \mu\text{m/z}$ ,  $n=30.000 \text{ dev/dk}$ ,  $a_p=100 \text{ } \mu\text{m}$ ) mikro frezeleme testleri yapılmıştır. Bu kesiciler kaplamanın haricindeki diğer tüm geometrik özellikleri tamamen aynı olacak şekilde üretilmiştir. Böylece üretilen iş parçalarında cidar deformasyonu ve yüzey pürüzlülüğü açısından hangi kaplamanın daha iyi sonuç vereceği araştırılmıştır. Çizelge 3.2’de, DLC, ZrN, AlTiN ve TiSiN kaplamalarının termal ve mekanik özelliklerini karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

**Çizelge 3.2** Çalışmada kullanılan kaplama türlerinin termal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Martan ve Beneš 2012, Ucin 2013, Al-Asadi ve Al-Tameemi 2022, Kang vd. 2025).

| Kaplama Türü                             | Sertlik (GPa) | Termal İletkenlik (W/m·K) | Oksidasyon Direnci (°C) | Açıklama                                                                                                              |
|------------------------------------------|---------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DLC</b> (Diamond-Like Carbon)         | 10-50         | 1-1000                    | 300-500                 | Düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik sunar; termal iletkenliği kaplama türüne göre değişkenlik gösterir.        |
| <b>ZrN</b> (Zirkonyum Nitrür)            | 22-26         | 62-66                     | ~600                    | Yüksek sertlik ve termal iletkenlik sağlar; iyi bir termal bariyer özelliğine sahiptir.                               |
| <b>AlTiN</b> (Alüminyum Titanyum Nitrür) | 25-35         | 4-6                       | 800–900                 | Yüksek sıcaklık dayanımı ve oksidasyon direnci ile bilinir; düşük termal iletkenlik sunar.                            |
| <b>TiSiN</b> (Titanyum Silisyum Nitrür)  | 30-40         | 10-15                     | 1000+                   | Nanokompozit yapısı sayesinde yüksek sertlik ve mükemmel oksidasyon direnci sağlar; düşük termal iletkenlik gösterir. |

Bu bölümde yer alan EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) analizleri, kaplamasız, DLC, AlTiN, TiSiN ve ZrN kaplamalı takımların yüzey kimyasal bileşimlerini doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir takım örneği için yapılan analizlerde, uygulanan kaplama türüne özgü elementlerin (örneğin Al ve Ti için AlTiN; Zr ve N için ZrN) yüzeyde bulunduğu teyit edilmiştir. Bu analizler, kaplama işlemlerinin başarılı bir şekilde uygulandığını göstermek ve ilerleyen deneysel çalışmalarda kullanılacak takım yüzeylerinin doğru kaplamaya sahip olduğunu belgelemek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, her kaplamanın karakteristik element bileşimlerini göstererek, malzeme tanımlamasının güvenilirliğini sağlamıştır.

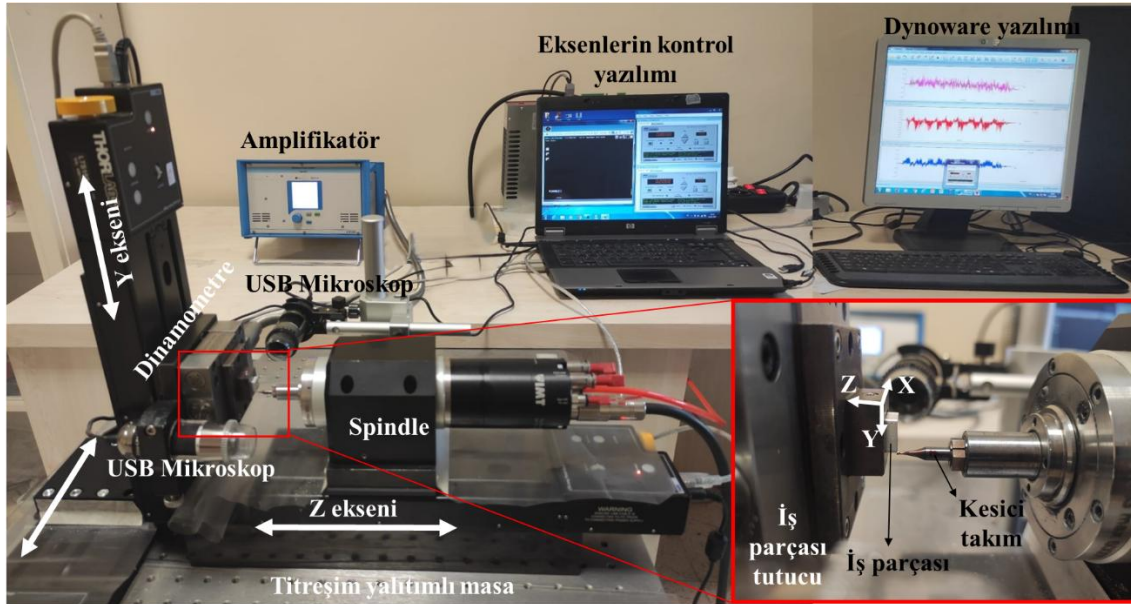


Şekil 3.4 (a) AlTiN, (b) TiSiN, (c) DLC, (d) ZrN kaplamaya sahip kesici takımların ve (e) kaplamasız kesici takımın EDX analizleri.

### 3.2 Deney Düzeneği ve Kesme Kuvvetleri Ölçümü

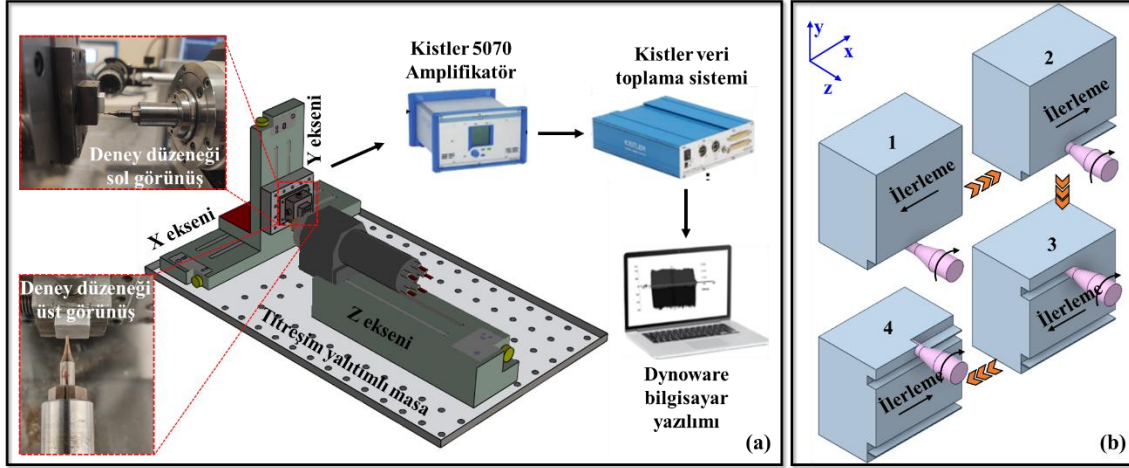
Kesme deneylerinde, yüksek hız ve hassasiyette kesme işleminin yapılabilmesine olanak tanıyan özel dizayn edilmiş bir deney düzeneği kullanılmıştır. Kullanılan IMT marka spindle maksimum 60.000 dev/dk'da çalışabilmektedir. Sistemin tüm bileşenleri titreşime yalıtımlı optik bir masaya monte edilmiştir. Böylece ince cidar geometrilerinin hassas bir şekilde işlenebilmesi için olası dengesizlikler ortadan kaldırmak kaldırılmıştır. Doğru konumsal ayarlamalara izin veren 0,1  $\mu\text{m}$  eksen hassasiyetine ve 0,4  $\mu\text{m}$

tekrarlanabilirlik hassasiyetine sahip olan doğrusal kılavuzlar, eksenel ve radyal hareketleri yüksek hassasiyetle gerçekleştirebilmektedir. Bu doğrusal kılavuzlar, mikro frezeleme işleminin sorunsuz bir şekilde yürütülmesine olanak tanıyan özel bir bilgisayar yazılımı (Thorlabs) aracılığıyla kontrol edilmektedir. Kesme bölgesini daha net gözlemleyebilmek adına bir USB mikroskop (Dino-Lite AM4113ZTL) kullanılmıştır. Bu USB mikroskop kesme işlemi esnasında, kesme bölgesini rahatça gözlemleyebilmek amacıyla mikroskop için özel üretilmiş olan tutucu standa (Dino-Lite RK-06A) sabitlenmiştir. Kullanılan deney düzeneğinin görünümü ve bileşenleri Şekil 3.5’de verilmektedir.



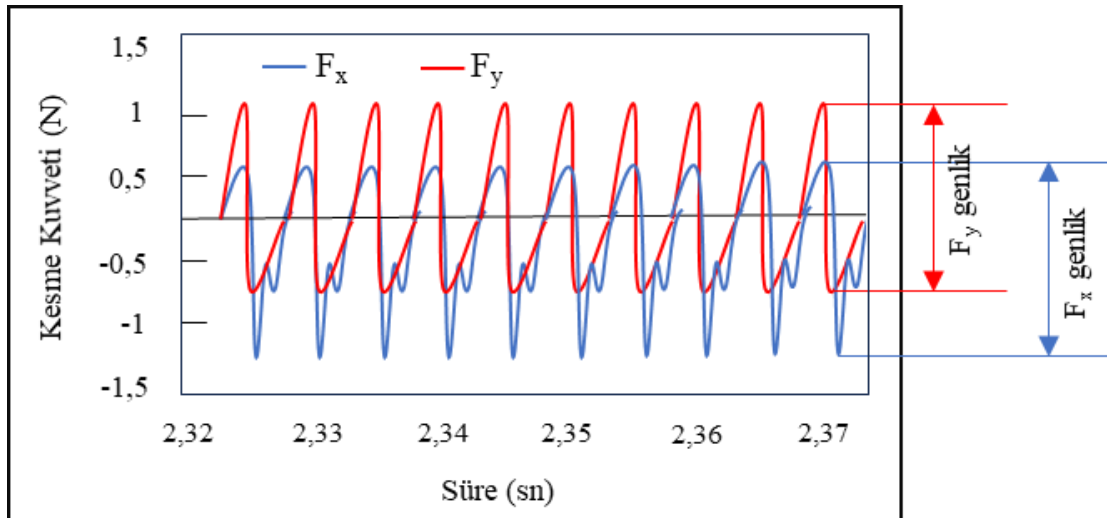
Şekil 3.5 Mikro frezeleme testleri için kullanılan test düzeneğinin genel görünümü.

İş parçası tutucusunun güvenli bir şekilde bağlandığı Kistler 9119AA1 marka mini dinamometre ile testler esnasında eş zamanlı olarak kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Kesme kuvveti sinyalleri bir amplifikatör vasıtasıyla kuvvet ölçümlerine dönüştürülmüş ve Dynoware yazılımı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Ölçülen dinamik kesme kuvvetinin örnekleme oranı frekansı 12,5 kHz’dir. Frezeleme sonrasında cidar deformasyonunu ölçebilmek için numunenin sadece alt ve üst yüzeyine ince cidar oluşturulmuştur. Şekil 3.6a’da deney düzeneği ve veri kaydının sistematik gösterimi, Şekil 3.6b’de ise mikro ince cidar frezeleme işleminin nasıl yapıldığı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6 (a) Deney düzeneği ve ekipmanların genel görünümü, (b) ince cidar geometrisi için kesme işlemi.

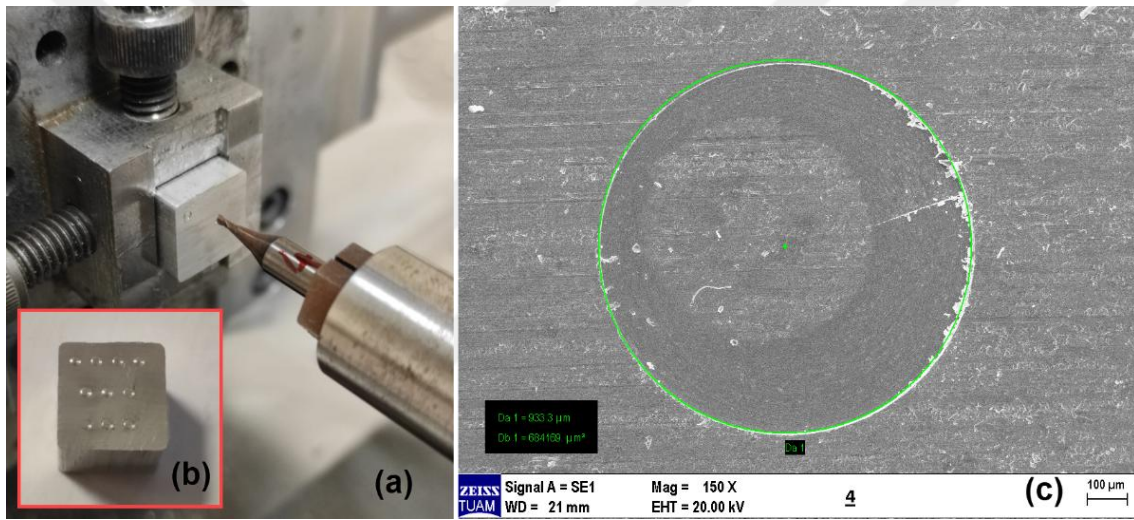
Kesme deneylerinde ölçülen kesme kuvvetleri ( $F_x$  ve  $F_y$ ), mikro frezeleme işleminin kritik çıktı parametreleri olarak özellikle önemlidir. Şekil 3.6'ya göre  $F_x$  kuvveti ilerleme kuvvetini,  $F_y$  kuvveti teğetsel kuvveti temsil etmektedir. Optimizasyon çalışmalarında ise iş parçası tutucusunun sabitlendiği dinamometrenin farklı konumlandırılması sebebiyle  $F_x$  teğetsel kuvvet ve  $F_y$  ilerleme kuvveti olarak ifade edilmektedir. Kesme kuvvetleri ölçümünde tepeden vadiye genlik değeri (peak-to-valley) dikkate alınmıştır. Maksimum ve minimum değerler arasındaki aralığı yakalayıp kesme kuvvetlerini analiz etmek için kullanılan tepe-vadi değeri, mikro-frezeleme testlerinde yaygın olarak kullanılan parametrelerden biridir. (Şekil 3.7). Elde edilen kesme kuvveti ölçümleri, en az üç ayrı ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.7  $F_x$  ve  $F_y$  kesme kuvvet verilerinin genlik ölçüm örneği.

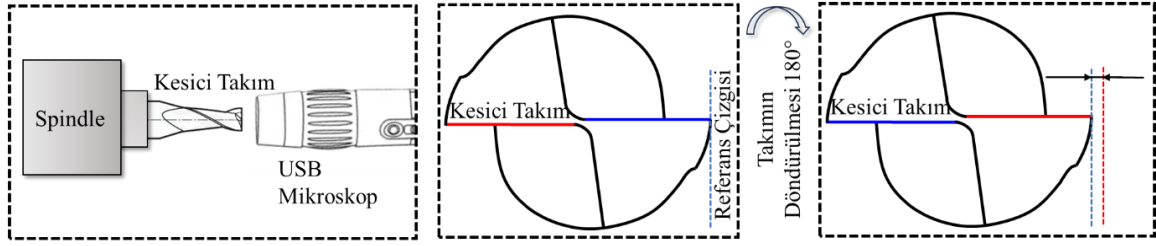
### 3.3 Salgı Tanımlaması ve Kontrolü

Talaş kaldırma işlemlerinde radyal salgı (run out) talaş yükünün kesici takımın dönüşü boyunca değişmesine neden olmaktadır. Bu değişken talaş yükü, kesme kuvvetlerini ve iş parçası geometrisini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple 40 takım içinden rastgele seçilen 10 farklı kesici takım ile 10  $\mu\text{m}$ 'luk bir dalma işlemi yapılmıştır (Şekil 3.8a). Böylece iş parçasındaki iz (Şekil 3.8b) üzerinden, taramalı elektron mikroskobu ile (Şekil 3.8c) radyal salgı miktarı belirlenmiştir. 10 kesici takımdan ayrı ayrı ölçülen radyal salgısının ortalama değeri 10  $\mu\text{m}$  çıkmaktadır.



Şekil 3.8 (a) 10  $\mu\text{m}$ 'luk dalma işlemi, (b) iş parçasının son hali, (c) radyal salgı ölçümü.

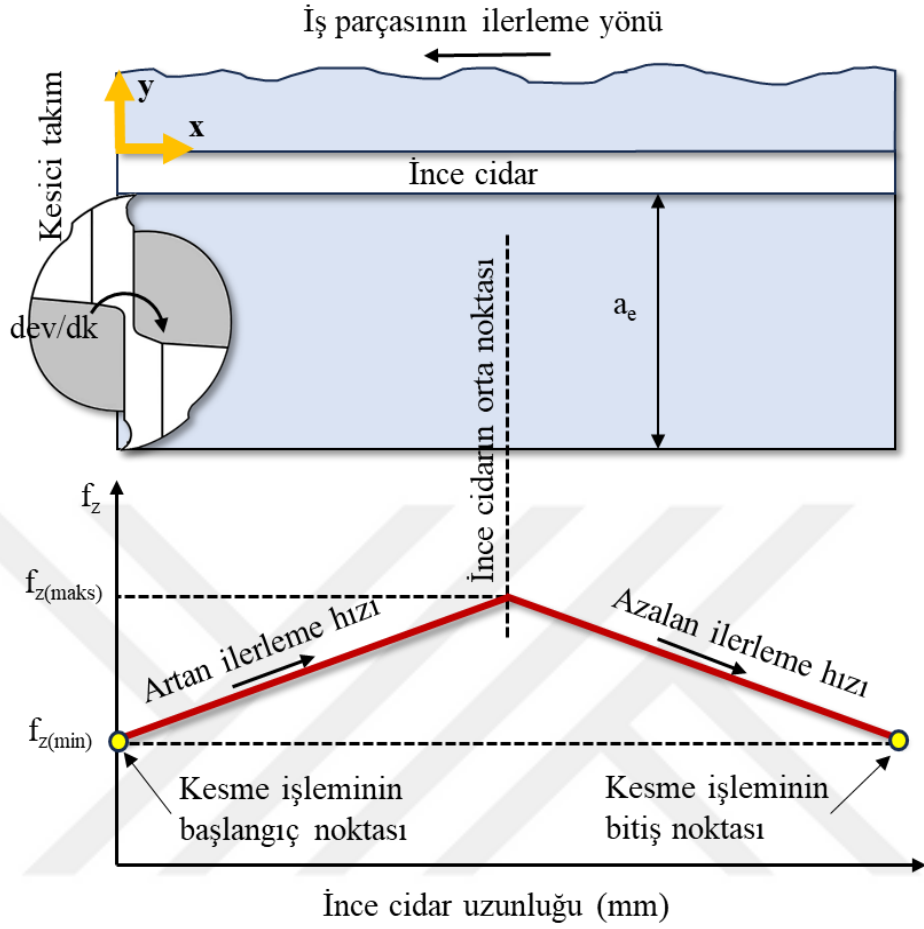
Her kesici takımdaki radyal salgı değeri mikron ölçeğinde farklılık göstermektedir. Bu da ince cidar kalınlığını etkilemektedir. Bu sebeple kesme deneylerine başlamadan önce mandren yardımıyla fener miline sabitlenen kesici takımın uç noktası USB mikroskoptan alınan görüntü üzerinden işaretlenmiştir. Kesici takım 180° döndürüldükten sonra kesicinin diğer uç noktası da işaretlenmiş, ilk işaretlenen uç nokta ile bu nokta arasında bir ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.9). Bu fark bize kesici takımdaki radyal salgıyı vermektedir. Radyal salgının 10  $\mu\text{m}$  olan ortalama değerden yüksek çıkması durumunda, mandren içinde kesici takım bir miktar döndürülerek tekrar ölçüm alınmış ve mümkün olan en küçük radyal salgı değeri elde edilene dek bu işlem tekrarlanmıştır.



Şekil 3.9 Mikro kesici takımındaki radyal salgının ölçülmesi.

### 3.4 Değişken İlerleme Hızı Kesme Deneyleri

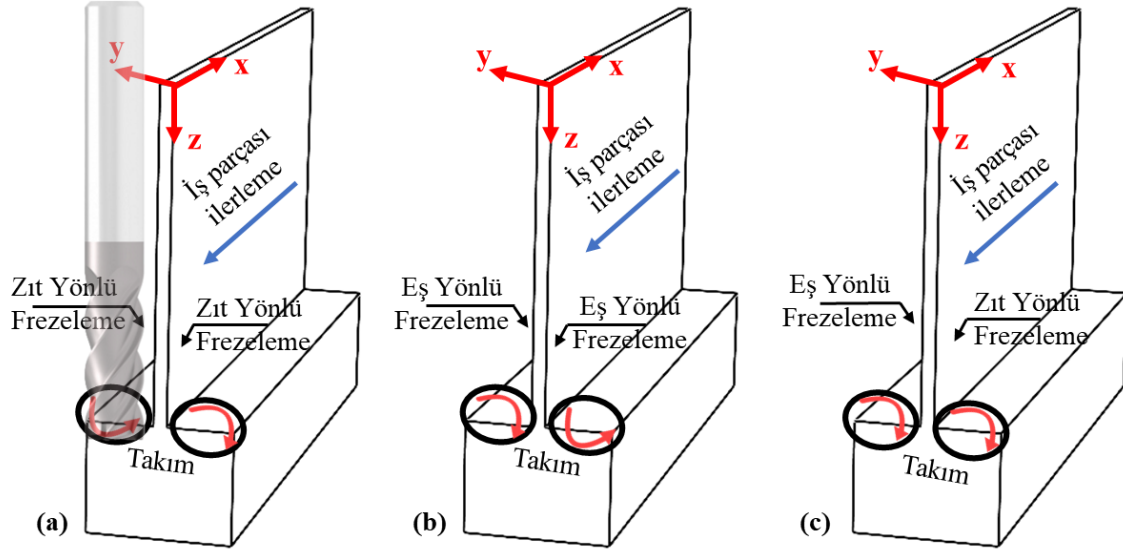
Mikro frezeleme işleminde kesici takımın iş parçasına ilk temas ettiği giriş bölgesinde ve iş parçasından ayrıldığı çıkış bölgesinde ince cidardaki deformasyon daha yüksek olduğu daha önce yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Cidar deformasyonunda etkili olan en önemli iki kesme parametresi ağız başına düşen ilerleme değeri ( $f_z$ ) ve eksenel kesme derinliği ( $a_p$ ) olduğu da bilinmektedir. Mikro işlemede talaş kalınlığını belirleyen kesme parametresi ağız başına düşen ilerleme değeridir. Çok düşük ilerleme değerlerinde, boyut etkisi nedeniyle kazınma ağırlıklı bir kesme gerçekleşeceğinden cidar deformasyonu artması beklenir. Yüksek ilerleme hızlarında ise artan kesme kuvvetleri deformasyonun artmasına neden olmaktadır. Bu noktadan hareketle kesme işleminin başlangıcında ve sonunda cidardaki deformasyonu azaltmak için değişken ilerleme hızı kullanılmıştır. Bir anlamda kesici takım kesmeye başladığında iş parçası daha düşük ilerleme hızı ile başlayacak ve cidar uzunluğunun ortasına kadar bu ilerleme hızı lineer olarak artacaktır. Sonrasında iş parçasına ait ilerleme hızı  $f_{z(max)}$ 'dan  $f_{z(min)}$  değerine azalarak kesme işlemi devam edecek ve kesici iş parçasından ayrılacaktır (Şekil 3.10). Bu sayede ince cidarın uç noktalarındaki deformasyon miktarı azaltılabilecektir. Burada minimum ilerleme hızının ne olacağı oldukça önemlidir. Eğer minimum ilerleme hızı gereğinden daha küçük seçilecek olursa boyut etkisi ile kazınma meydana gelecektir ki bu da cidar deformasyonunu olumsuz etkiler. Bu nedenle yapılmış olan ön deneyler iş parçası ve kesici takım çifti için minimum talaş kalınlığı tespit edilmiştir. Minimum talaş kalınlığına bağlı bir ilerleme hızı ile kesme işlemine başlanarak, sabit bir ivmeyle, kesme mesafesinin yarısına kadar ilerleme hızı artırılmıştır. Kesme mesafesinin ikinci yarısında ise sabit bir ivmeyle ilerleme hızı azaltılmıştır. Değişken ilerleme hızı ile yapılan kesme deneylerinde radyal talaş derinliği ( $a_e$ ) takım çapı ile aynı alınmıştır. Ayrıca sabit devir sayısı ( $n=30.000$  dev/dk) ve eksenel talaş derinliği ( $a_p=100 \mu m$ ) kullanılmıştır.



Şekil 3.10 İlerleme hızının ince cidar uzunluğu boyunca değişimi.

### 3.5 Kesme Yönü Deneyleri

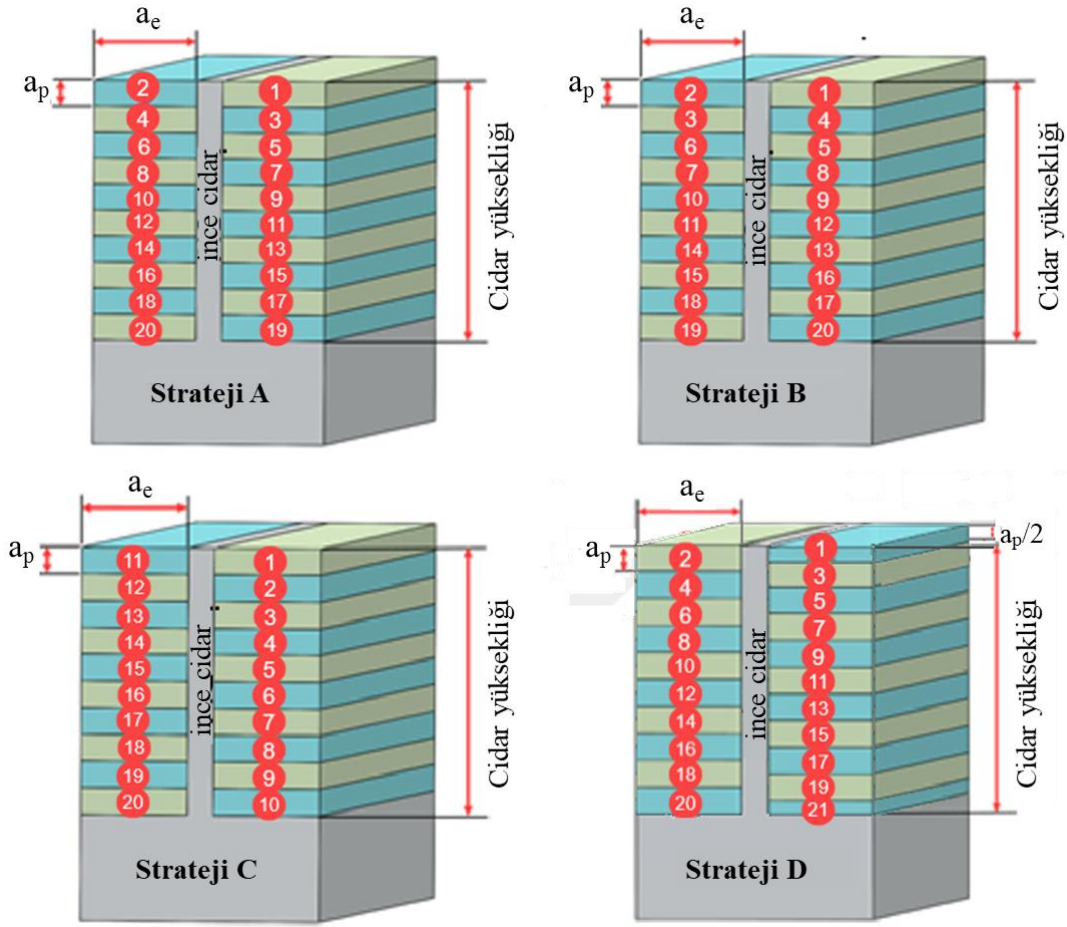
Mikro işleme ile ince cidar geometrilerinin oluşturulmasında eş yönlü ve zıt yönlü frezeleme arasındaki seçim, parçanın yüzey kalitesi ve deformasyon açısından kritik rol oynar. Bu durum özellikle cidar kalınlığının çok ince olduğu düşük rijitliğe sahip iş parçalarında daha belirgindir. Kesme yönünün ince cidarlı yapıların işlenmesi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, ince cidarın frezelenmesi esnasında cidar kalınlığının her iki tarafı zıt-zıt (Şekil 3.11a), eş-eş (Şekil 3.11b) ve eş-zıt (Şekil 3.11c) olmak üzere sabit kesme parametrelerinde işlenmiştir. Uygulanan bu kesme yönü kombinasyonlarının, oluşan cidar deformasyonu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.



Şekil 3.11 (a) Zıt-zıt yönlü (b) eş-eş yönlü (c) eş-zıt yönlü kesme işlemleri.

### 3.6 Kesme Stratejisi Deneyleri

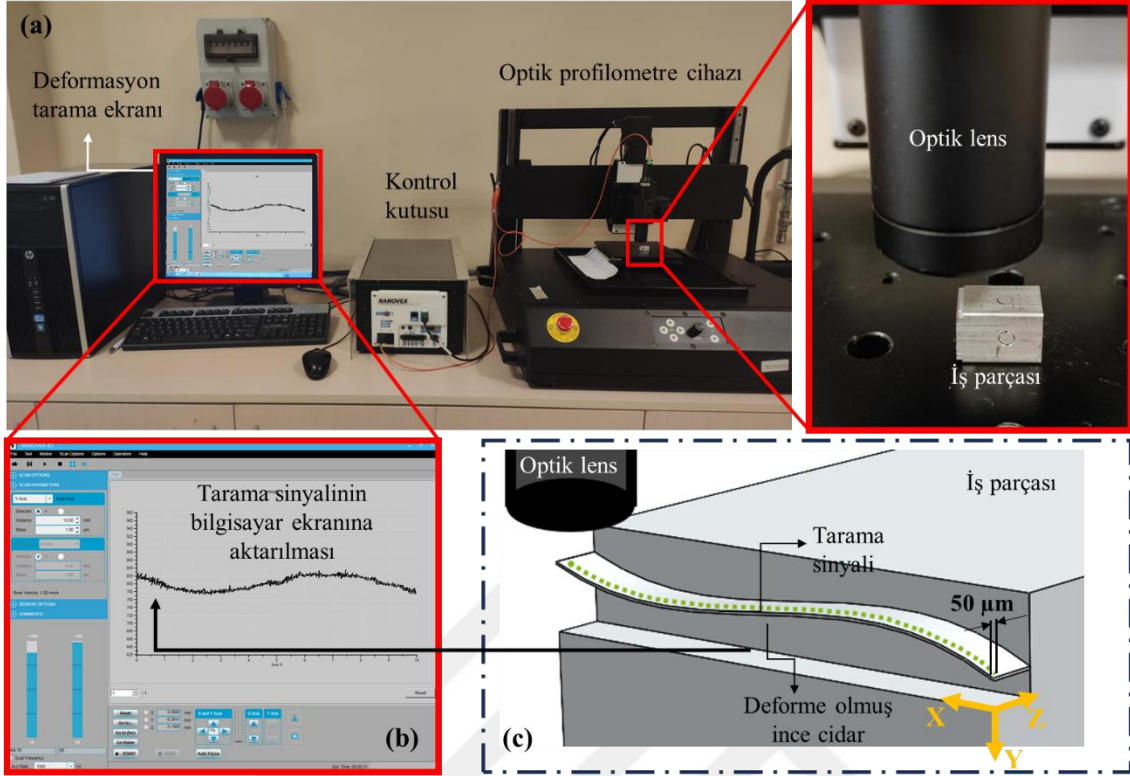
Konvansiyonel frezeleme işleminde ince cidarı işlemek için farklı kesme stratejileri önerilmiştir (Xiang ve Yi 2021). Mikro frezeleme işleminde boyut etkisi, kesme kuvvetlerini yüzey pürüzlülüğünü ve çapak oluşumunu doğrudan etkilediği için oldukça önemli bir faktördür. Bu nedenle mikro ince cidar işlemede kullanılacak kesme stratejisi daha da önemli bir hale gelmektedir. Kesme stratejisinin, mikro ince cidar deformasyonu üzerindeki etkisini ölçmek için sabit ilerleme hızında ( $f_z=1 \mu\text{m}/\text{z}$ ) dört farklı kesme stratejisi dikkate alınmıştır. Şekil 3.12’de mikro frezeleme ile ince cidar oluşturmak için kullanılan dört farklı kesme stratejisinin şematik görünümleri verilmektedir. Şekil 3.12’de verilen kesme stratejileri için ince cidarın  $h/t$  oranı 20’dir. Her bir strateji deneyinde takım aşınmasının olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla yeni kesici takım kullanılmıştır. Ayrıca mikro frezeleme esnasında, ince cidarın her iki yüzeyi zıt yönlü frezeleme yönünde kesme işlemine tabi tutulmuştur. Mikro frezeleme işleminde farklı kesme stratejilerinin ince cidarlı yapıların deformasyon davranışları üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş; bu stratejilerin, iş parçası yüzey bütünlüğü, boyutsal doğruluk ve çapak oluşumu açısından nasıl sonuçlar doğurduğu değerlendirilmiştir.



**Şekil 3.12** İnce cidar yapısının elde edilmesinde kullanılan farklı kesme stratejileri.

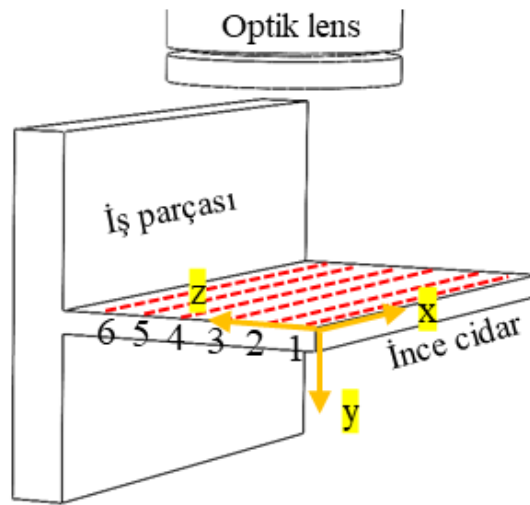
### 3.7 İnce Cidar Deformasyon ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Kesme deneyleri sonrasında ince cidar geometrisindeki deformasyonunu ölçmek için Nanovea 3D ST400 marka optik yüzey profilometresi kullanılmıştır (Şekil 3.13a). Kullanılan optik profilometrenin en önemli özelliği motorize bir sisteme sahip olmasıdır. Cidarın bir ucundan başlayıp diğer ucuna kadar iş parçası sabit hızda hareket ettirilebilmektedir. Bu sayede cidarın y eksenindeki deformasyon miktarı 0,1  $\mu\text{m}$  hassasiyetinde elde edilmiştir. Optik lensten çıkan beyaz ışık, iş parçasının kesmeye başlandığı giriş bölgesine odaklandıktan sonra x ve z eksenlerinde sıfırlama işlemi yapılmaktadır. Sonrasında Şekil 3.13c’de gösterildiği gibi z ekseninde 50  $\mu\text{m}$  içeri alınarak deformasyon yüzeyi, cidar boyunca taramaktadır. 1  $\mu\text{m}$  hassasiyette gerçekleştirilen tarama işlemi esnasında tarama sinyalinden alınan her veri eş zamanlı olarak optik profilometre cihazının bağlı olduğu bilgisayara aktarılır (Şekil 3.13b).



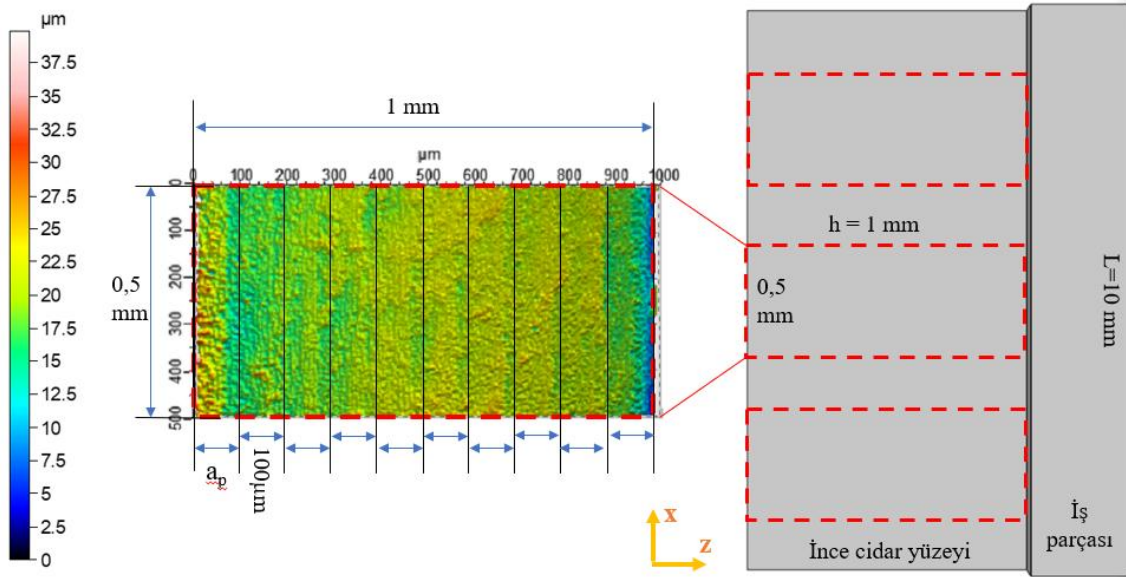
**Şekil 3.13** (a) Deformasyon ölçümünde kullanılan optik profilometre cihazı, (b) ince cidar deformasyonu tarama sistemi, (c) ince cidar yüzeyindeki tarama aşaması.

Optik lensten çıkan beyaz ışığın z ekseninde 50 µm içeri alınması ile gerçekleştirilen ilk yüzey tarama işleminden sonra 150 µm içeri alınıp ikinci bir yüzey tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 5 kez tekrarlanarak ince cidar yüzeyinin bir nevi topoğrafisi çıkartılmıştır. (Şekil 3.14).



**Şekil 3.14** İnce cidar deformasyonu yüzey ölçüm aralıkları.

Bu işlem sonucunda ince cidar deformasyonunun yükseklik boyunca nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışmanın öne çıkan önemli bir tarafı da bu ölçüm yöntemi olacaktır. Çünkü bu yöntemin kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu sayede cidarın hem yüksekliği hem de uzunluğu boyunca deformasyon değeri elde edilecektir. Şekil 3.15’de, mikro frezeleme işlemi sonrası elde edilen ince cidarlı yapıya ait üç boyutlu yüzey topoğrafisi ve ölçüm noktalarının konumlandırılması şematik olarak sunulmuştur. Sol tarafta yer alan renkli yüzey haritası, optik profilometre ile yapılan ölçümler sonucu elde edilmiş olup, cidarın işlenmiş yüzeyine ait mikrometre mertebesindeki yükseklik dağılımını göstermektedir. Renk skalası yüzey üzerindeki yükseklik farklarını temsil etmekte; mavi ve yeşil tonlar nispeten daha düz ve düşük profilili bölgeleri, sarı ve kırmızı tonlar ise yüzeydeki çıkıntıları ve yüksek pürüzlük seviyelerini göstermektedir.



**Şekil 3.15** İş parçası yüzeyinden alınan 3B yüzey topoğrafyası.

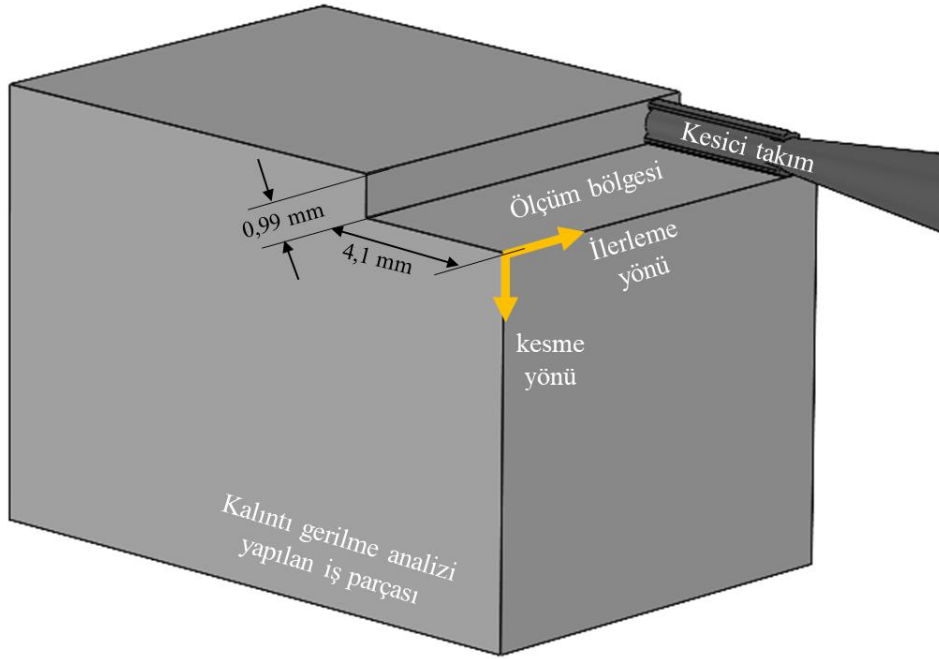
İnce cidarın 0,5 mm x 1 mm alanında gerçekleştirilen tarama işlemi sonucunda ortaya çıkan 3B yüzey topoğrafyasından her 100 µm kesme derinliğinden kaynaklanan izler görülebilmektedir. Sağ tarafta yer alan şematik gösterimde ise ince cidarın yüksekliği boyunca üç farklı bölge (üst, orta ve alt) kırmızı kesik çizgilerle tanımlanmış ve her bir bölgeden profilometre taraması yapıldığı belirtilmiştir. Bu ölçüm stratejisi ile, hem kesme işleminin doğrudan etkisinin gözlendiği taban bölgesine yakın alanlarda takım-talaş etkileşimi analiz edilebilmekte, hem de serbest uçta meydana gelen potansiyel elastik/plastik deformasyonun yüzey geometrisine yansımaları değerlendirilebilmektedir.

Böylece cidar boyunca yükseklik doğrultusunda gelişen yüzey kalitesi farklılıkları, kesme parametrelerinin sabit tutulduğu koşullar altında yalnızca yapı geometrisinin etkileri çerçevesinde değerlendirilebilecek şekilde modellenmiştir.

### 3.8 Kalıntı Gerilme Analizi

Kesme işlemi sonucunda iş parçasında kalıntı gerilmeler meydana gelmektedir. İş parçasının işleme performansı ve yüzey kalitesi açısından kalıntı gerilmelerin varlığı ciddi bir engeldir. Bu sebeple mikro frezelenmiş bir iş parçası yüzeyinden X-Işınları Difraktometresi (Xrd) cihazı ile analiz yapılarak kalıntı gerilmeler tespit edilmiştir. Elektropolisaj yöntemiyle 25  $\mu\text{m}$  ve 50  $\mu\text{m}$  aşındırma yapılarak kalıntı gerilme analizi tekrarlanmıştır.

İnce cidarlı yapının 50  $\mu\text{m}$ 'luk cidar kalınlığı, kalıntı gerilme analizi yapmaya yetersiz kaldığı için, iş parçası tek taraftan zıt yönlü frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Kesme derinliği 100  $\mu\text{m}$  olmak üzere 41 kez kesme işlemi yapılmış (Şekil 3.16) ve iş parçasının yan yüzeyinden kalıntı gerilme analizi yapılmıştır.



Şekil 3.16 Kalıntı gerilme analizi yapılan iş parçası.

### 3.9 Taguchi Deney Tasarımı

İnce cidarlı yapıların mikro frezelenmesinde kesme parametrelerinin cidar deformasyonunu doğrudan etkilediği bilinmektedir. İlerleme hızı, kesme parametreleri arasında en etkili faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Wang vd. 2019). Bu nedenle, deney tasarımı yapılırken ilerleme hızına özel önem verilmiş, kazınma etkisinin ve minimum talaş kalınlığı gibi boyut etkisi mekanizmalarının detaylı bir şekilde incelenmesi hedeflenmiştir. Kesme parametrelerinin seçimi, yalnızca cidar deformasyonunu değil, aynı zamanda kesme kuvvetlerinin kararlılığını ve işlem verimliliğini de doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu kapsamda, kesme parametrelerinin seçiminde kesici takım üretici firmasının önerileri dikkate alınmıştır. Çalışmada, 6 farklı ağız başına ilerleme hızı ( $f_z$ ), 3 farklı devir sayısı ( $n$ ) ve 3 farklı eksenel kesme derinliği ( $a_p$ ) seçilmiştir (Çizelge 3.3). Çalışmada tam kanal frezeleme yapıldığından, radyal kesme derinliği ( $a_e$ ) takım çapına eşittir. Bu parametrelerin kombinasyonları, Taguchi mixed-level yöntemi kullanılarak L18 ortogonal dizisi ile planlanmıştır (Çizelge 3.4). Deneylerin sonuçları, yalnızca kesme kuvvetlerinin optimize edilmesini değil, aynı zamanda cidar deformasyonunun minimize edilmesini hedefleyen bir yaklaşımla analiz edilmiştir. Bu, mikro frezeleme gibi yüksek hassasiyet gerektiren bir işlemde, optimum sonuçların elde edilmesine olanak sağlamıştır. Kesme parametrelerinin cidar deformasyonu üzerindeki etkisini daha iyi anlamak adına, sinyal-gürültü oranı (S/N), varyans analizi (ANOVA), regresyon modelleme analizi ve sonuçların doğrulanması gibi ileri analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu sayede, her bir parametrenin sürece olan katkısı detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır.

**Çizelge 3.3** Mikro frezeleme testlerinde kullanılan kesme parametreleri.

| Kontrol Faktörleri                              | Parametre seviyeleri |        |        |      |   |   |
|-------------------------------------------------|----------------------|--------|--------|------|---|---|
|                                                 | 1                    | 2      | 3      | 4    | 5 | 6 |
| İlerleme hızı, $f_z$ ( $\mu\text{m}/\text{z}$ ) | 0,1                  | 0,25   | 0,5    | 0,75 | 1 | 2 |
| Devir sayısı, $n$ (dev/dk)                      | 15.000               | 25.000 | 35.000 |      |   |   |
| Kesme derinliği, $a_p$ ( $\mu\text{m}$ )        | 50                   | 100    | 200    |      |   |   |

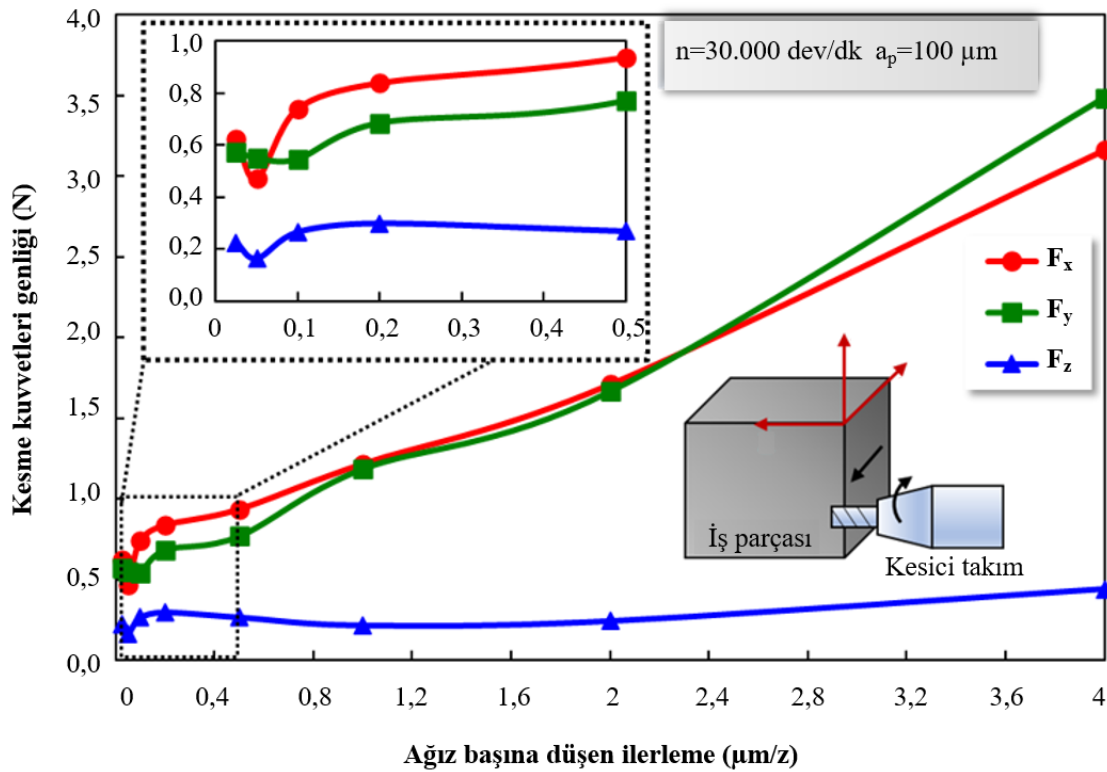
**Çizelge 3.4** L18 ortogonal dizisi ile Taguchi deney tasarımı.

| <b>Kontrol Faktörleri</b>                 | <b>L18 Ortogonal Deney Tasarımı</b> |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                           | 1                                   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| <b>İlerleme hızı (<math>f_z</math>)</b>   | 1                                   | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4  | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 6  | 6  | 6  |
| <b>Devir sayısı (n)</b>                   | 1                                   | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1  | 2  | 3  | 1  | 2  | 3  | 1  | 2  | 3  |
| <b>Kesme derinliği (<math>a_p</math>)</b> | 1                                   | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3  | 1  | 2  | 2  | 3  | 1  | 3  | 1  | 2  |

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

##### 4.1 Minimum Talaş Kalınlığının Tespiti ve Kesme Kuvvetlerinin Değişimi

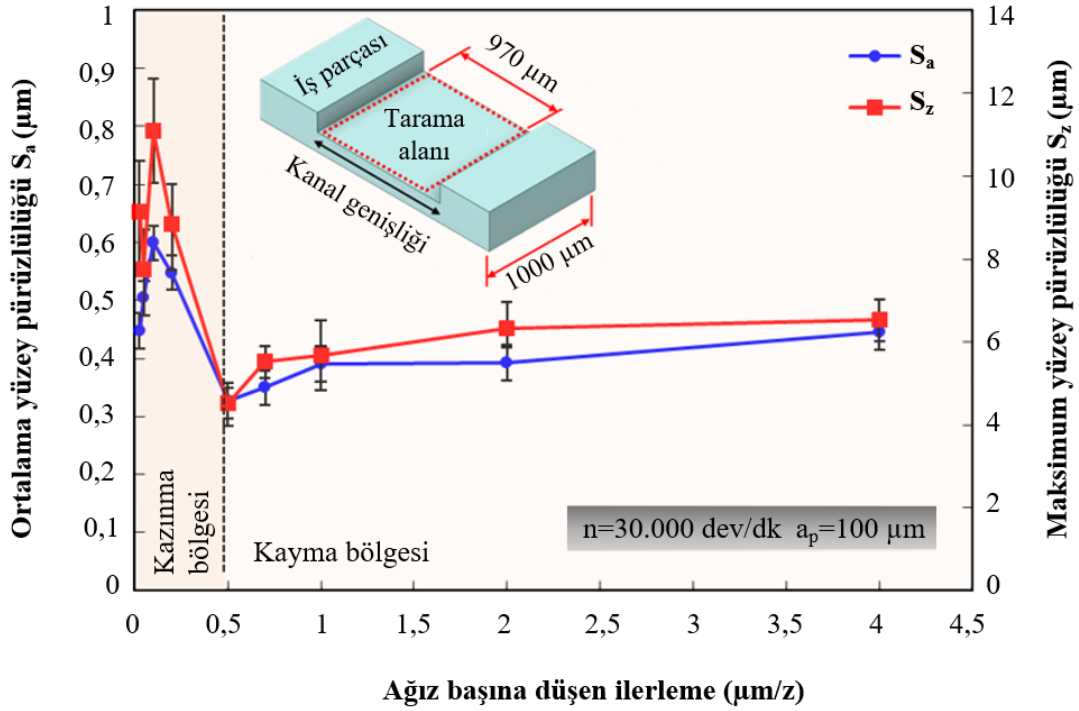
Farklı ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin değişimini tespit etmek için frezeleme deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.1’de artan ağız başına düşen ilerleme hızına bağlı olarak her üç kesme kuvveti bileşenin değişimi verilmektedir. Düşük ilerleme hızlarında ( $f_z \leq 0,1$   $\mu\text{m/z}$ ) kesme kuvvetlerinde bir kararsızlık olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni mikro frezeleme işlemindeki boyut etkisi ile açıklanabilir. Minimum talaş kalınlığına yakın veya altındaki ağız başına ilerleme hızlarında kesme kuvvetlerinin kararsız bir davranış sergilediği literatürde yapılan çalışmalardan da görülmektedir (Chae vd. 2006, Sun ve Cheng 2010). Kazınmanın etkisini ortadan kaldırmak için daha yüksek ilerleme hızlarında kesme işlemi yapmak gerekmektedir. Yüksek ilerleme hızlarında ( $f_z \geq 0,2$   $\mu\text{m/z}$ ), ilerleme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinin doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Bu, geleneksel frezeleme işlemine benzer şekilde, minimum talaş kalınlığından yüksek ilerleme hızlarında kayma mekanizmasının etkili olması gerçeğiyle açıklanabilir.



Şekil 4.1 Farklı ilerleme hızlarına göre kesme kuvvetlerinin değişimi.

İlerleme hızı ve kesme derinliğindeki artışın, takım üzerindeki talaş yükünde artışa neden olduğu ve bunun da sonuç olarak kesme kuvvetlerinde artışa yol açtığı belirlenmiştir. Tersine, artırılmış devir sayıları aracılığıyla yükseltilmiş kesme hızlarına ulaşılması, kesme kuvvetlerinde azalmaya neden olur. Dolayısıyla, kazınma etkisinin tanıtılması, kesme kuvvetlerindeki artışta nedensel bir faktördür. Buna rağmen minimum talaş kalınlığını tespit etmek için sadece kesme kuvvetleri verilerine dikkate almak doğru bir yaklaşım olmayabilir. Yapılan bazı çalışmalarda kesme kuvveti değişimine ilave olarak, yüzey pürüzlülüğünün değişimi de araştırılmıştır (Wu vd. 2020). Özellikle alüminyum gibi kolay işlenebilen demir dışı metallarda minimum talaş kalınlığının belirlenmesinde alansal yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dikkate alındığı görülmektedir (Wojciechowski vd. 2023). Bu nedenle, ağız başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi de elde edilmiştir. Alansal ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) ve maksimum yüzey pürüzlülük ( $S_z$ ) değerlerinin değişimi Şekil 4.2’de verilmektedir. Kazınma bölgesi olarak tanımlanan  $f_z < 0,5 \mu\text{m/z}$  için hem  $S_a$  hem de  $S_z$  değerlerinde önemli bir göze çarpmaktadır. Mikro frezelemede, ağız başına ilerleme minimum talaş kalınlığından daha küçük olduğunda kesme kenarında negatif bir talaş açısı etkisi oluşur. Bunun sonucunda işlenmiş yüzey kalitesi bozulur ve çapak genişliği de artar (Wan vd. 2016). Şekil 4.2’den görüldüğü üzere,  $f_z < 0,5 \mu\text{m/z}$  için hata çubukları arasında farkta da yüksektir.  $f_z \geq 0,5 \mu\text{m/z}$  için frezeleme işlemi kayma mekanizmasının bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Geleneksel frezelemeye benzer şekilde, ilerleme hızının artırılması yüzey pürüzlülüğünde bir artışa neden olur. Kesici takım kenar yarıçapı ( $2,8 \mu\text{m}$ ) dikkate alındığında, yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre minimum talaş kalınlığı kesme kenarı yarıçapının %25’ine karşılık gelmektedir. İş parçası malzemesi olarak alüminyum alaşımlarının kullanıldığı çalışmalarda bu oran %20 ile %35 arasında değişmektedir ki elde edilen bu sonuç literatür ile uyumludur (Niu vd. 2018, Chen vd. 2020). Minimum talaş kalınlığının belirlenmesi açısından Şekil 4.1 ile Şekil 4.2 birlikte değerlendirildiğinde, minimum talaş kalınlığı net olarak yüzey pürüzlülüğünün değişiminde gözlemlenmiştir. Mikro frezelemede minimum talaş kalınlığından daha küçük ilerleme değerlerinde kesme kuvvetlerinin de artabileceği (Erçetin vd. 2020, de Paiva Silva vd. 2023) veya düzensiz bir seyir izleyebileceği ifade edilmektedir (Uriarte vd. 2008, Karakılınç vd. 2023). Bu çalışmada  $f_z < 0,5 \mu\text{m/z}$  için kesme kuvveti

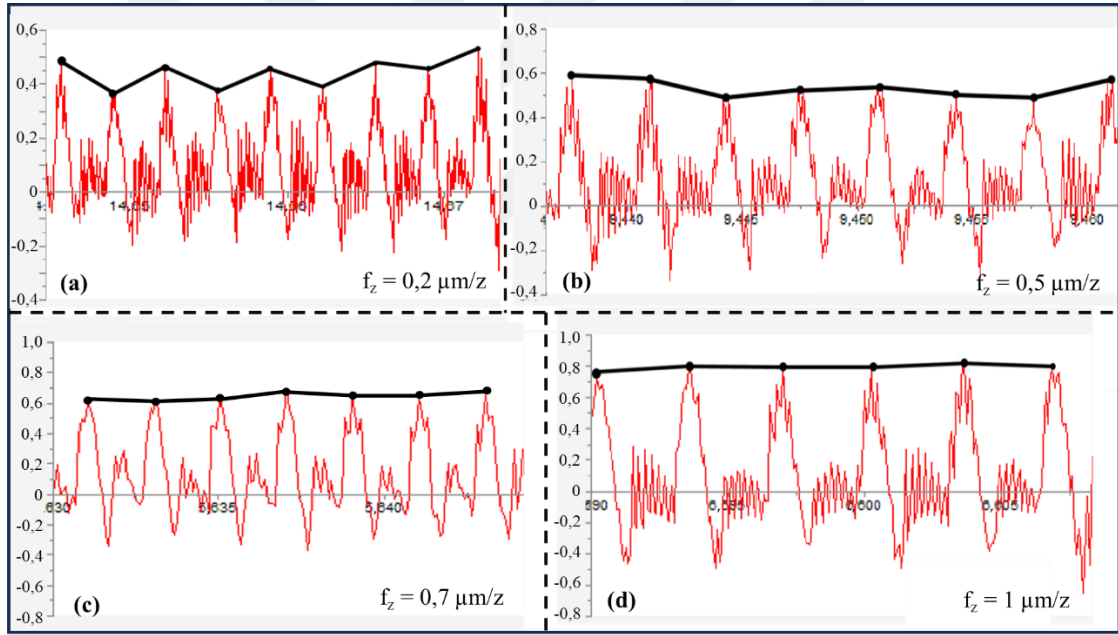
değerlerinde bir artış olmamakla birlikte bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durum hem kullanılan iş parçası malzemesi hem de kullanılan kesici takım geometrisi ile açıklanabilir.



**Şekil 4.2** İlerleme hızına bağlı olarak değişen ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) ve maksimum yüzey pürüzlülüğü ( $S_z$ ) değerleri.

Kesme kuvvetlerindeki sinyal değişimlerinden de minimum talaş kalınlığı tahmin edilebilmektedir (Wu vd. 2020). Alüminyum 6061'in mikro frezelenmesinde kesme kuvvetlerindeki sinyal değişimi gözlenmiş ve minimum deforme olmamış talaş kalınlığının kesici takım kenar yarıçapının 0,3 katı olduğu belirtilmiştir (Dib vd. 2018). Alüminyum 6082-T2 mikro frezelenmesinde ise minimum talaş kalınlığının 0,2-0,3  $\mu\text{m}$  civarında olduğu, bunun da kesici kenar yarıçapının yaklaşık %14-21'i olduğu belirtilmiştir (Niu vd. 2018). Minimum talaş kalınlığının altında bir ilerleme hızı ile yapılan mikro frezeleme işleminde kesme kuvveti sinyalinin tepe noktaları birleştirildiğinde bir dalga formunun gözlemlendiği, minimum talaş kalınlığının üstünde bir ilerleme hızında yapılan mikro frezeleme deneylerinde ise kesme kuvveti sinyalinin tepe noktalarını birleştiren bu çizginin daha düz bir forma dönüştüğü belirtilmiştir (Wu vd. 2020). Bu çalışmada da benzer bir eğilim gözlemlenmiş ve böylece minimum talaş

kalınlığının 0,5  $\mu\text{m}$  ile 0,7  $\mu\text{m}$  arasında değiştiği doğrulanmıştır (şekil 4.3). Deneyisel bulgulara göre, 0,2  $\mu\text{m}/\text{z}$  ilerleme hızı minimum talaş kalınlığının altında kaldığından dolayı kesme kuvveti sinyalinde belirgin dalga formları ortaya çıkmıştır. Bu, kesici kenarın malzemeyi kesmek yerine kazıdığı (ploughing) bir rejimi işaret etmektedir. Öte yandan, 0,5  $\mu\text{m}/\text{z}$  ve 0,7  $\mu\text{m}/\text{z}$  ilerleme hızlarında sinyalin tepe noktaları daha düzenli ve doğrusal bir yapı sergilemiş, bu da kesme mekanizmasının daha çok kayma modunda gerçekleştiğini göstermektedir. 1  $\mu\text{m}/\text{z}$  ilerleme hızında ise sinyal formu tamamen doğrusal hale gelmiş ve minimum talaş kalınlığının üzerinde çalışıldığında kesme işleminin kararlı hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu gözlemler, kesme kuvveti sinyal analizlerinin minimum talaş kalınlığının belirlenmesinde güvenilir bir gösterge olabileceğini ortaya koymaktadır.

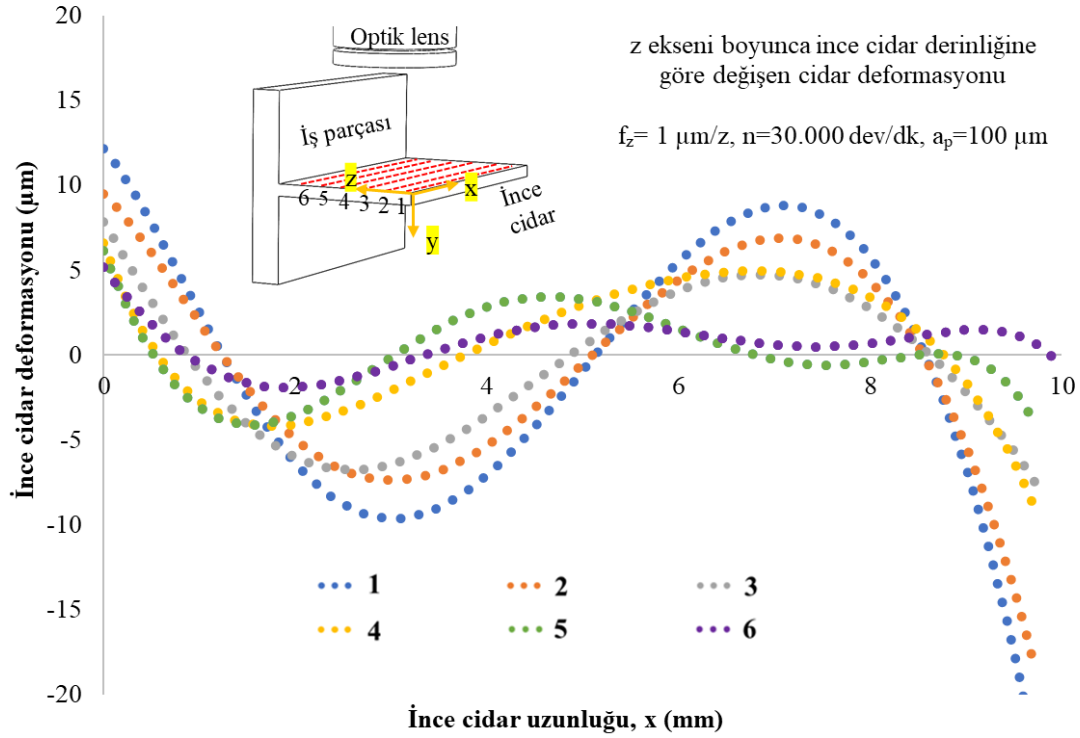


şekil 4.3 (a) 0,2  $\mu\text{m}/\text{z}$ , (b) 0,5  $\mu\text{m}/\text{z}$ , (c) 0,7  $\mu\text{m}/\text{z}$  ve (d) 1  $\mu\text{m}/\text{z}$  ilerleme hızlarında kesme kuvveti sinyal formunun karşılaştırılması.

## 4.2 Cidar Yüksekliği Boyunca Deformasyon lm

İnce cidarlı yapılarda cidar yüksekliği arttıķa cidar deformasyonun arttığı bilinmektedir. Buna bağlı olarak ince cidarlı bir yapının yüksekliği boyunca meydana gelen deformasyon farklıdır. Bu deformasyon farkının ne denli olduğunu tespit etmek adına cidar yüksekliği (z eksenı) boyunca 150  $\mu\text{m}$  aralıklarla tarama işlemi yapılmış ve

deformasyon ölçülmüştür. 1 numaralı ölçüm tepe noktasına en yakın ölçümü, 6 numaralı ölçüm ise taban noktasına en yakın ölçümü ifade etmektedir. İnce cidarın tepe noktasından tabana doğru inildikçe deformasyon azalmaktadır. Özellikle cidar yüksekliğinin yarı değerinin altında çok daha rijit bir yapının elde edildiğini söylemek mümkündür (Şekil 4.4).

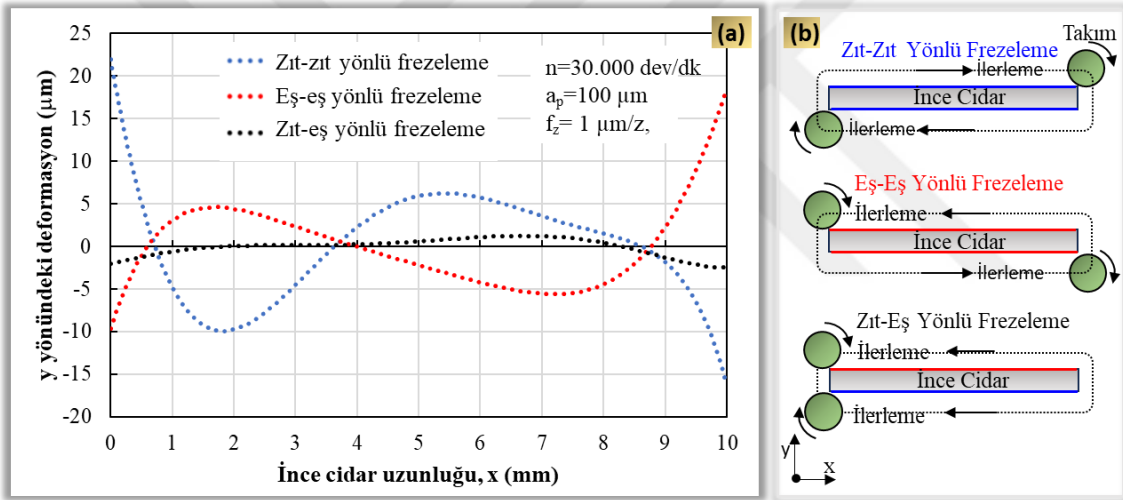


Şekil 4.4 İnce cidar deformasyonunun z eksenini boyunca değişimi.

### 4.3 Kesme Yönünün Deformasyona Etkisi

Hem konvansiyonel ince cidar işlemede hem de mikro ince cidar işlemede kesme yönünün etkisi çok dikkate alınmamıştır. Özellikle mikro ince cidar işlemede kesme yönü (Zıt / eş yönlü frezeleme) cidar deformasyonunu etkilemesi beklenir. Çünkü mikro frezelemede takım kendi eksenini etrafında dönerken minimum talaş kalınlığından daha küçük talaş kalınlığının olduğu bölgede kazınma meydana gelir (Sun vd. 2018). Bu kazınma sadece yüzey kalitesini olumsuz etkilemez (Wu vd. 2023), aynı zamanda kesme kuvvetlerini de etkiler (Wan vd. 2014). Şekil 4.5a'da üç farklı kesme yönünün dikkate alındığı bir deneyde ince cidarda oluşan deformasyon cidar boyunca değişimi verilmektedir. Deneyde tam kanal frezeleme işlemi yapılmış olup, Şekil 4.5b'de ince

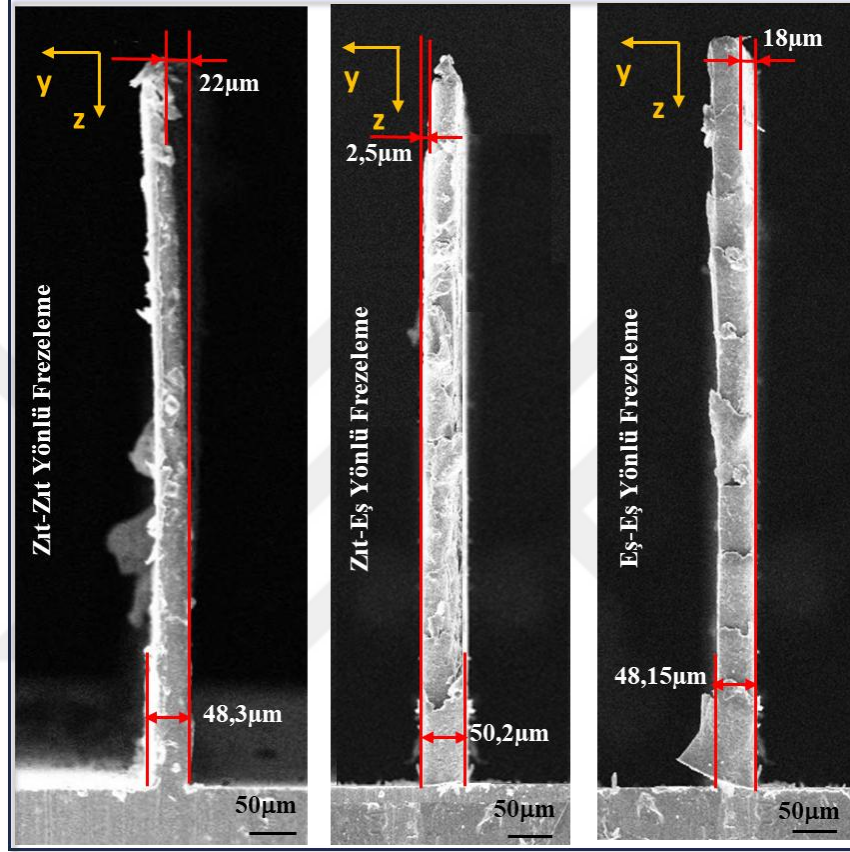
cidar frezeleme işleminde kesme yönünün şematik ifadesi verilmektedir. Zıt-zıt frezelemede ince cidarın her iki mavi kenarı zıt yönlü frezeleme bölgesinde kalmaktadır. Eş-eş frezelemede ince cidarın her iki kırmızı kenarı eş yönlü frezeleme bölgesinde kalmaktadır. Buna karşın zıt-eş yönlü frezeleme tekniğinde ince cidarın bir kenarı zıt yönlü frezeleme diğer kenarı eş yönlü frezeleme bölgesinde kalmaktadır. Şekil 4.5a'da dikkati çeken ilk unsur zıt-zıt ile eş-eş yönlü frezelemede elde edilen cidar deformasyonları birbirinin tersi olmasıdır. Bununla birlikte +y ve -y yönlerinde meydana gelen maksimum deformasyon değerleri birbirine çok yakındır. Zıt-eş yönlü frezeleme ile kesme işleminde ise cidar deformasyonu yaklaşık 15 kat azalmaktadır. Şekil 4.5'de elde edilen deformasyon sonuçlarına ait örnek SEM görüntüleri Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.5 (a) Kesme yönünün ince cidar deformasyonu üzerindeki etkisi, (b) kesme yönlerinin gösterimi.

Şekil 4.6'da mikro ince cidarda meydana gelen maksimum deformasyon değerleri ile birlikte cidar kalınlığındaki değişim de verilmektedir. Zıt-zıt yönlü frezelemede maksimum deformasyon yaklaşık 22  $\mu\text{m}$ , cidar kalınlığı ise 48,3  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Eş-eş yönlü frezeleme yönteminde maksimum deformasyon 18  $\mu\text{m}$  elde edilirken, cidar kalınlığının daha stabil olduğunu söylemek mümkündür. Zıt-zıt yönlü frezeleme yönteminde  $z=1 \text{ mm}$ 'de cidar kalınlığı eş-eş yönlü frezeleme yöntemine göre daha düşüktür. Zıt-eş yönlü frezeleme yönteminde meydana gelen maksimum cidar deformasyonu 2,5-3  $\mu\text{m}$  aralığında ölçülmüştür. Bir anlamda zıt-eş yönlü frezeleme

yönteminde cidar deformasyonu yaklaşık 10 kat daha düşüktür. Bu durumun cidar uzunluğu boyunca değişmediği Şekil 4.6'da görülmektedir. Bu sonuç, ince cidar frezeleme de minimum cidar deformasyonu için önemli bir bulgu olarak değerlendirilmiştir.

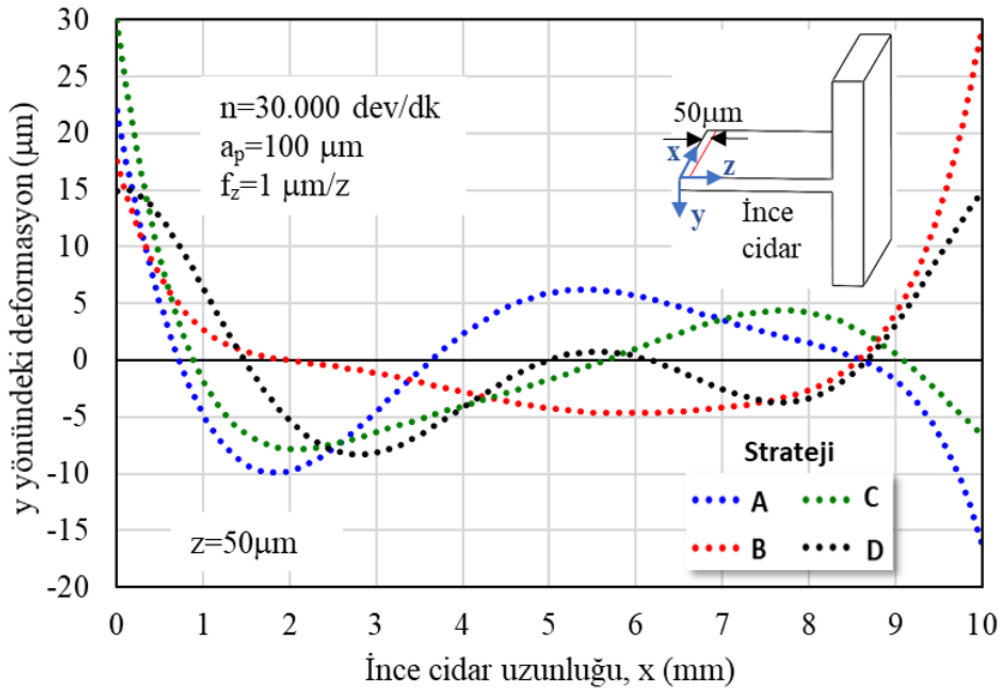


Şekil 4.6 Farklı frezeleme yönlerinde elde edilen cidar deformasyonunun SEM görüntüleri.

#### 4.4 Kesme Stratejisinin Deformasyona Etkisi

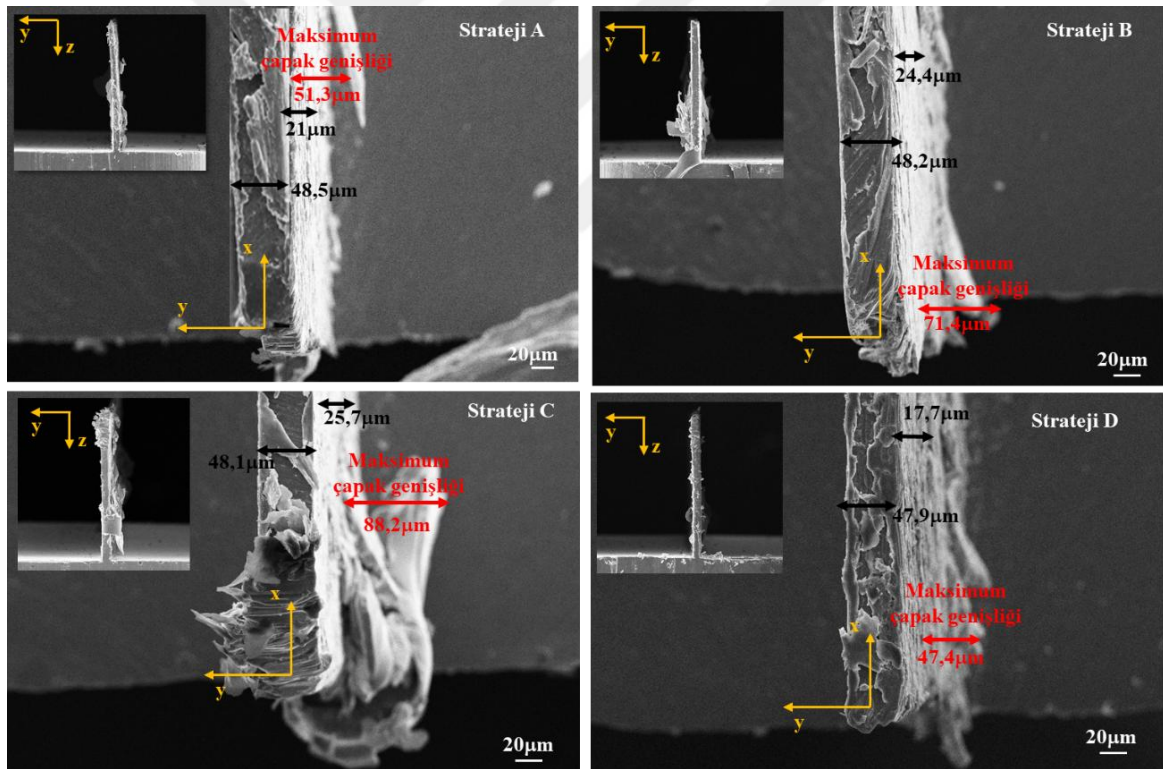
Çalışmanın bu kısmında, kesme stratejisinin cidar deformasyonuna etkisini tespit etmek adına 4 farklı kesme stratejisinden elde edilen ince cidar geometrilerinde deformasyon kıyaslanmıştır. İnce cidarın oluşturulmasında tam kanal frezeleme işlemi yapılmakta olup, deneylerde cidar yüksekliği 1 mm ve cidar kalınlığı da 50 µm alınmıştır. Deformasyon ölçümleri Bölüm 3.7'deki teknik kullanılarak,  $z=50$  µm konumundan ölçülmüştür. Maksimum cidar deformasyon ölçümünün mümkün olduğu konum olması nedeniyle  $z=50$  µm seçilmiştir. Şekil 4.7'de her bir strateji için elde edilen cidar deformasyonunun cidar uzunluğunca değişimi verilmektedir. Şekil 4.7'den de görüldüğü

üzere B ve D stratejilerinde ince cidarın her iki ucunda meydana gelen deformasyon +y yönündedir. Buna karşın A ve C stratejilerinde ince cidarın her iki ucunda meydana gelen maksimum deformasyon ters yönlerdedir. Deformasyon yönüne bakılmaksızın, maksimum deformasyon sırasıyla C ve A stratejisinde elde edilirken, minimum deformasyon strateji D'de elde edilmiştir. B stratejisi, giriş ve çıkış bölgelerinde D stratejisine kıyasla daha yüksek deformasyon sergilese de, cidarın orta bölgesinde daha düşük deformasyon değerleriyle öne çıkmaktadır. Bu durum, özellikle cidar uzunluğu çok daha fazla olan yapıların işlenmesinde orta bölgedeki deformasyonların azaltılması açısından B stratejisinin daha kararlı bir davranış gösterdiğini ve bu nedenle tercih edilebilirliğinin arttığını ortaya koymaktadır. A ve C stratejileri birbiri ile kıyaslandığında, +y yönünde elde edilen deformasyon birbirlerine çok yakın iken, -y yönündeki maksimum deformasyon strateji A'da elde edilmiştir. Şekil 4.8'de her bir kesme stratejisinde ince cidarda meydana gelen deformasyonun SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.8'de ince cidarın genel görünümünün (y-z düzlemi) yanı sıra maksimum deformasyonun meydana geldiği noktadaki üst görünümü (x-y düzlemi) verilmiştir.



**Şekil 4.7** Farklı kesme stratejilerinde ince cidarda meydana gelen deformasyonun cidar boyunca değişimi.

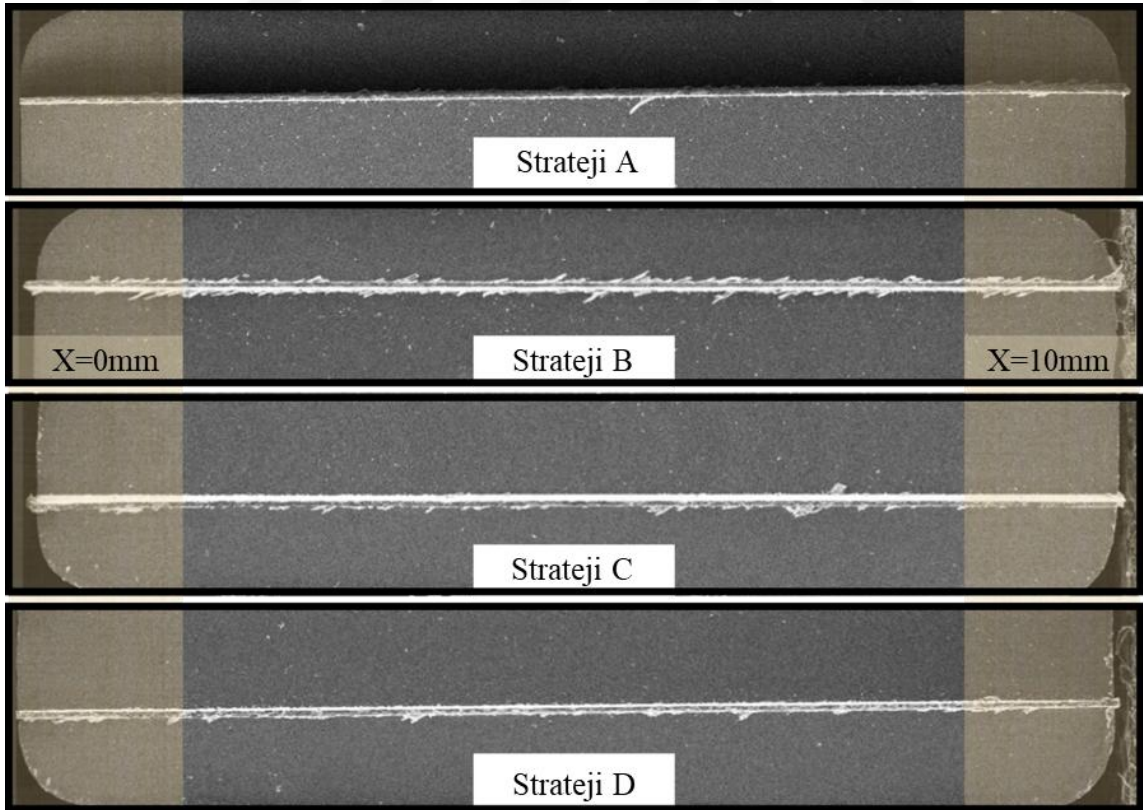
En yüksek çapak oluşumu seviyesi B ve C stratejilerinde gözlenirken, en düşük seviye D stratejisinde gözlenmiştir. Ayrıca hedef cidar kalınlığı 50  $\mu\text{m}$  olmasına rağmen, her stratejide küçük bir tutarsızlık kaydedilmiştir. Bu olgunun, kesici takımın sapma değerine veya kesme işlemi sırasında eksenlerin tekrarlanabilirlik hassasiyetine atfedilebileceği varsayılmaktadır. Nitel SEM gözlemlerine ek olarak, her strateji için çapak genişlikleri ölçülmüş ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Ortalama çapak genişliklerinin A stratejisi için yaklaşık 51,3  $\mu\text{m}$ , B stratejisi için 71,4  $\mu\text{m}$ , C stratejisi için 88,2  $\mu\text{m}$  ve D stratejisi için 47,4  $\mu\text{m}$  olduğu ölçülmüştür. Bu değerler, atlamalı geçişli bir takım yolu kullanan ve zıt ve eş yönlü frezeleme hareketlerini birleştiren D stratejisinin en küçük çapak oluşumunu ürettiğini göstermektedir. Buna göre, ince cidarlı yapıların mikro frezelenmesi sırasında çapak genişliğini en aza indirmek için zıt ve eş yönlü frezelemenin kullanılması önerilmektedir.



**Şekil 4.8** Farklı kesme stratejilerinde ince cidardaki deformasyonun SEM görüntüleri.

İnce cidar boyunca alınan SEM görüntülerinden de benzer şekilde Strateji B ve Strateji C'deki yüksek çapak genişlikleri göze çarpmaktadır. Şekil 4.9'da farklı kesme stratejileriyle işlenmiş ince cidar geometrilerine ait SEM görüntüleri sunulmakta olup, bu görüntüler

çapak oluşumu açısından önemli ipuçları içermektedir. Çapak oluşumu, mikro frezeleme işlemlerinde özellikle ince cidarlı yapılarda yüzey kalitesini ve ölçüsel doğruluğu etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Şekilde sunulan görüntülerden ve ölçülen ortalama çapak genişliklerinden elde edilen verilere göre, C ve B stratejilerinde çapak oluşumu oldukça belirgindir. C stratejisinde çapak genişliği ortalama 88,2  $\mu\text{m}$ , B stratejisinde ise 71,4  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu durum, bu iki stratejinin kesme kuvvetlerini etkin biçimde dengeleyememesi veya kesme yönlerinin kazınma etkisini artırmasıyla ilişkilendirilebilir. A stratejisi ise orta seviyede bir çapak genişliği ( $\cong 51,3 \mu\text{m}$ ) üretirken, D stratejisi en düşük çapak oluşumuna ( $\cong 47,4 \mu\text{m}$ ) neden olmuştur. D stratejisinin, destek tabanlı bir takım yolu izlemesi ve zıt ve eş yönlü frezeleme hareketlerini birleştirmesi sayesinde, kesme kuvvetlerinin cidar boyunca daha dengeli dağılması sağlanmakta; bu da çapak oluşumunu baskılamaktadır. Bu sonuç, kesme stratejisinin yalnızca deformasyon üzerinde değil, aynı zamanda çapak oluşumu üzerinde de belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.



**Şekil 4.9** Farklı kesme stratejilerinde işlenen ince cidar geometrilerinin SEM görüntüleri.

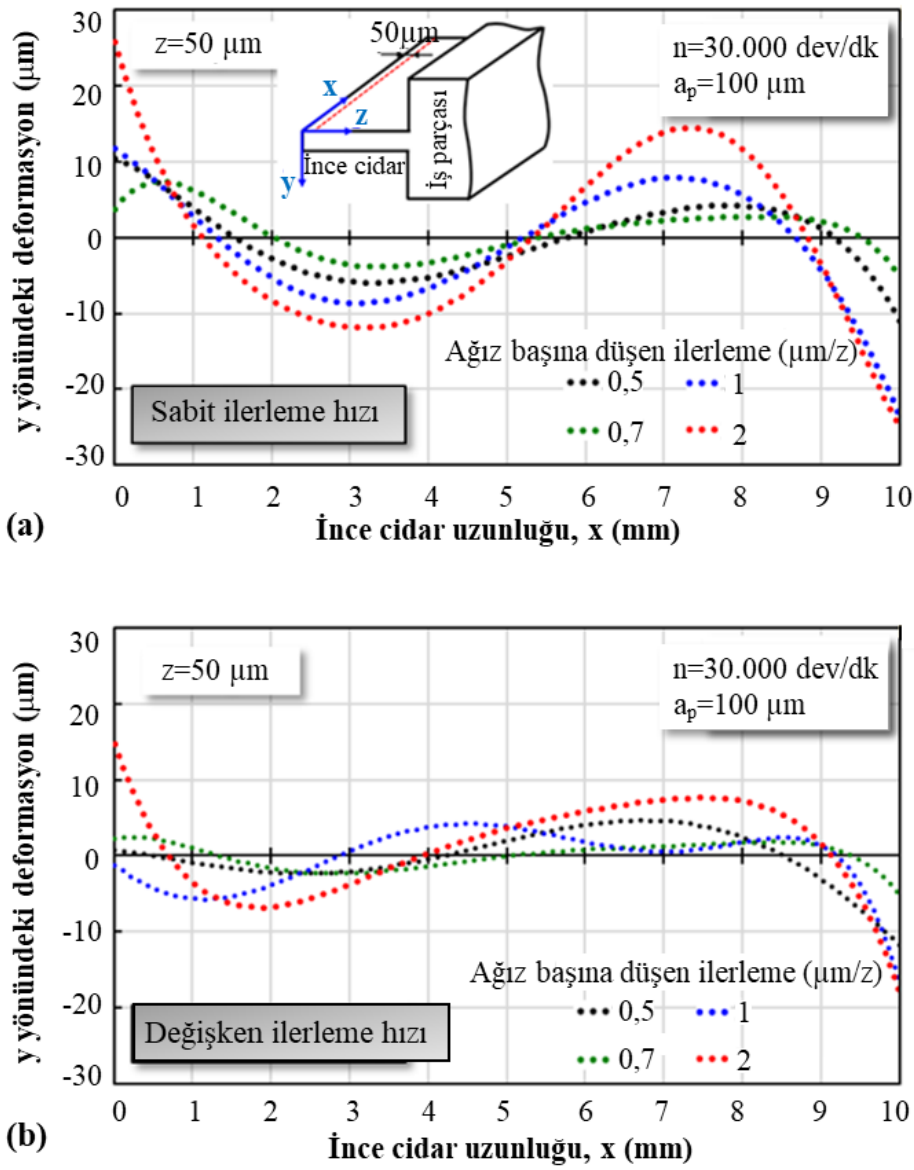
## 4.5 Değişken İlerleme Hızlarının Etkisi

### 4.5.1 Cidar Deformasyonuna Etkisi

Bölüm 3.4’de detayları verilen değişken ilerleme yöntemi ile yapılan mikro frezeleme deneyinde elde edilen cidar deformasyonun sabit ilerleme hızı ile yapılan karşılaştırması Şekil 4.10’da verilmektedir. Deneylerde devir sayısı (30.000 dev/dk), aksenal kesme derinliği (100  $\mu\text{m}$ ) ve radyal kesme derinliği takım çapı kadar ( $\cong 1\text{mm}$ ) sabit alınmıştır. Deformasyon ölçümleri tüm cidar boyunca  $z=50\ \mu\text{m}$  konumunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm kesme deneylerinde, Şekil 3.12’de gösterilen strateji A kullanılmıştır. Şekil 4.10a’da sabit ilerleme için elde edilen deformasyonun cidar boyunca değişimi verilmektedir. Tüm kesme deneylerinde maksimum deformasyon frezeleme işleminin başladığı ( $x=0$ ) ve bittiği ( $x=10\ \text{mm}$ ) konumlarda meydana gelmektedir. Şekil 4.10b’de ise değişken ilerleme hızında yapılan deneylerde elde edilen cidar deformasyon sonuçları verilmektedir. Şekil 4.10a’dan da görüldüğü üzere minimum cidar deformasyonu 0,7  $\mu\text{m}/z$  de elde edilmiştir. Artan ilerleme değeri ile birlikte cidar deformasyonu da artmaktadır. Özellikle mikro frezelemede ağız başına düşen ilerleme değerinin artması, kesme kuvvetlerinin artmasına neden olur ki (Li vd. 2024), bu durum ince cidardaki deformasyon değerini arttırmaktadır (Tang vd. 2023). Takımın kesmeye başladığı konumda ( $x=0$ ) cidarda meydana gelen deformasyon +y yönünde gerçekleşirken,  $x=10\ \text{mm}$  de -y yönünde deformasyon meydana gelmektedir. Kesme sırasında meydana gelen  $F_y$  kuvveti (radyal yöndeki kuvvet) ince cidarda +y yönünde bir deformasyona neden olmaktadır. A stratejisine göre kesici takım cidarın diğer yüzeyinden (2,4,6 nolu kesme derinlikleri) kesme yaptığında da ince cidara ters yönde (-y yönünde) bir kuvvet uygulamaktadır. Bu süreç tüm cidar yüksekliği elde edilinceye kadar devam ettiğinde cidarın her iki ucunda da ters yönlü bir deformasyon meydana gelmektedir.

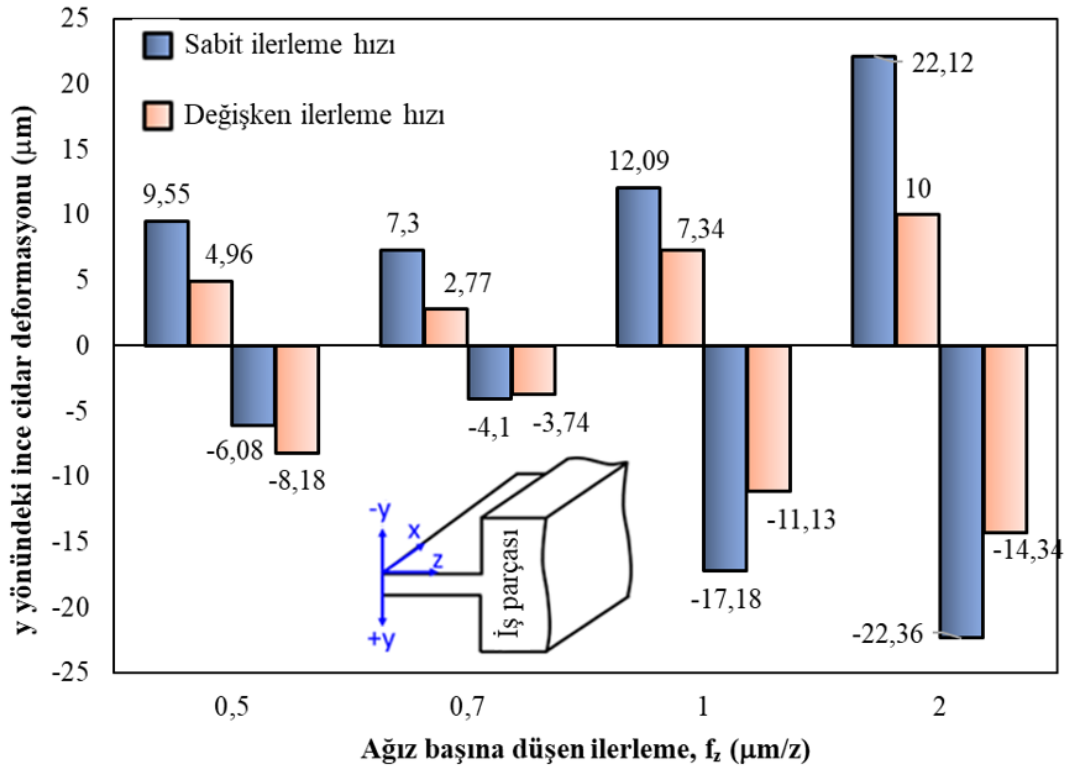
Sonuç olarak mikro ince cidarın her iki uç noktasındaki deformasyon maksimumdur. Bu noktadan hareketle takım kesmeye başladığı noktalarda ilerleme hızı lineer olarak arttırılmıştır. Değişken ilerleme yönteminde, takım ilerleme hızı 0,5  $\mu\text{m}/z$ ’den ivmelendirilerek 0,7, 1 ve 2  $\mu\text{m}/z$  değerlerine arttırılmaktadır. Böylece kesici takım kesmeye daha düşük bir ağız başına düşen ilerleme hızıyla başlamakta ve maksimum

değerine ince cidarın ortasında ulaşmaktadır (Şekil 3.10). Şekil 4.10b'den de görüldüğü üzere cidar deformasyonunda önemli bir azalma elde edilmiştir. Özellikle de  $f_z=0,7 \mu\text{m/z}$  için elde edilen deformasyon değerlerinin ortalama  $4 \mu\text{m}$  civarında olduğu tespit edilmiştir.  $f_z=0,5 \mu\text{m/z}$  için ortalama deformasyon değerinin ( $7 \mu\text{m}$ ) daha yüksek olmasının sebebi, başlangıç ilerleme hızının  $f_{z(\text{min})}=0,2 \mu\text{m/z}$  olmasıdır. Şekil 4.2'den görüldüğü üzere,  $0,2 \mu\text{m/z}$  değeri kazınma bölgesinde yer almaktadır. Kazınma bölgesinde takım, düzensiz bir talaş yüküne maruz kalmaktadır ve bu durum kararsız kesme koşullarının oluşması anlamına gelir.



Şekil 4.10 (a) Sabit ve (b) değişken ilerleme hızlarında yapılan kesme deneyleri sonucunda elde edilen ince cidar geometrilerinin deformasyon sonuçları.

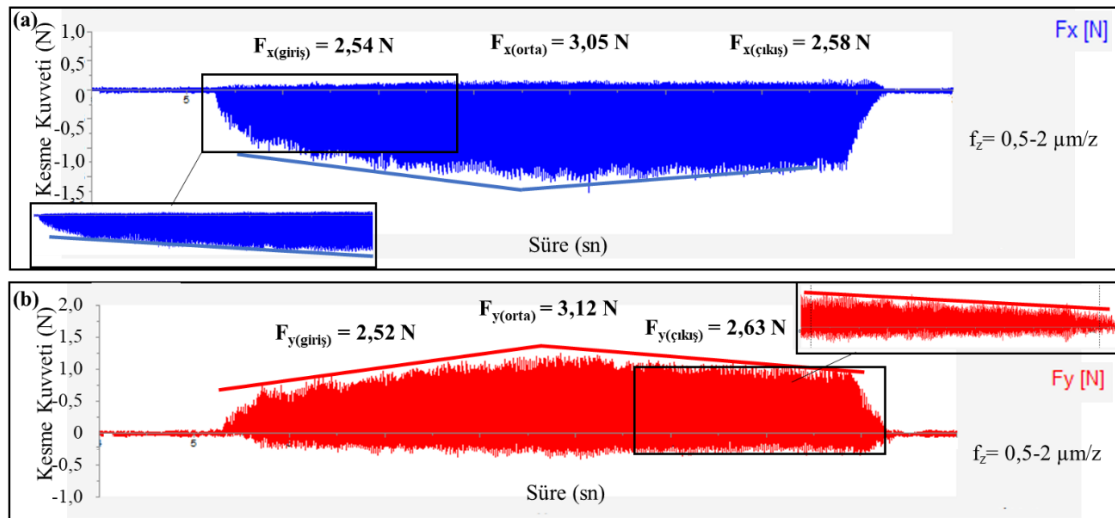
Şekil 4.11’de  $z=50 \mu\text{m}$  konumunda ince cidarda meydana gelen deformasyon değerlerinin sabit ve değişken ilerleme için karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 4.10 ve 4.11’de verilen değişken ilerleme değerleri  $0,5 \mu\text{m/z}$  ( $f_{z(\min)}=0,2 \mu\text{m/z}$ ,  $f_{z(\max)}=0,5 \mu\text{m/z}$ ),  $0,7 \mu\text{m/z}$  ( $f_{z(\min)}=0,5 \mu\text{m/z}$ ,  $f_{z(\max)}=0,7 \mu\text{m/z}$ ),  $1 \mu\text{m/z}$  ( $f_{z(\min)}=0,5 \mu\text{m/z}$ ,  $f_{z(\max)}=1 \mu\text{m/z}$ ) ve  $2 \mu\text{m/z}$  ( $f_{z(\min)}=0,5 \mu\text{m/z}$ ,  $f_{z(\max)}=2 \mu\text{m/z}$ ) şeklindedir. Değişken ilerleme hızının kullanılmasının bir sonucu olarak +y yönündeki deformasyon,  $f_z=0,7 \mu\text{m/z}$  için %62,  $f_z=1 \mu\text{m/z}$  için %39 ve  $f_z=2 \mu\text{m/z}$  için %55 azalmıştır. Değişken ilerlemenin kullanılması, -y yönündeki deformasyon miktarında da azalmaya neden olduğu Şekil 4.11’den görülmektedir. Hem sabit hem de değişken ilerleme şartlarında  $f_z=0,5 \mu\text{m/z}$  için elde edilen deformasyon değerleri  $0,7 \mu\text{m/z}$  den daha yüksektir. Bunun nedeni boyut etkisiyle oluşan kazınma mekanizmasıdır. Özellikle değişken ilerlemenin kullanıldığı  $0,5 \mu\text{m/z}$  için minimum ilerleme değeri  $f_{z(\min)}=0,2 \mu\text{m/z}$  minimum talaş kalınlığından düşüktür. Bu durum kazınma etkisini daha da güçlendirdiği için ince cidardaki deformasyon değeri de artmaktadır.



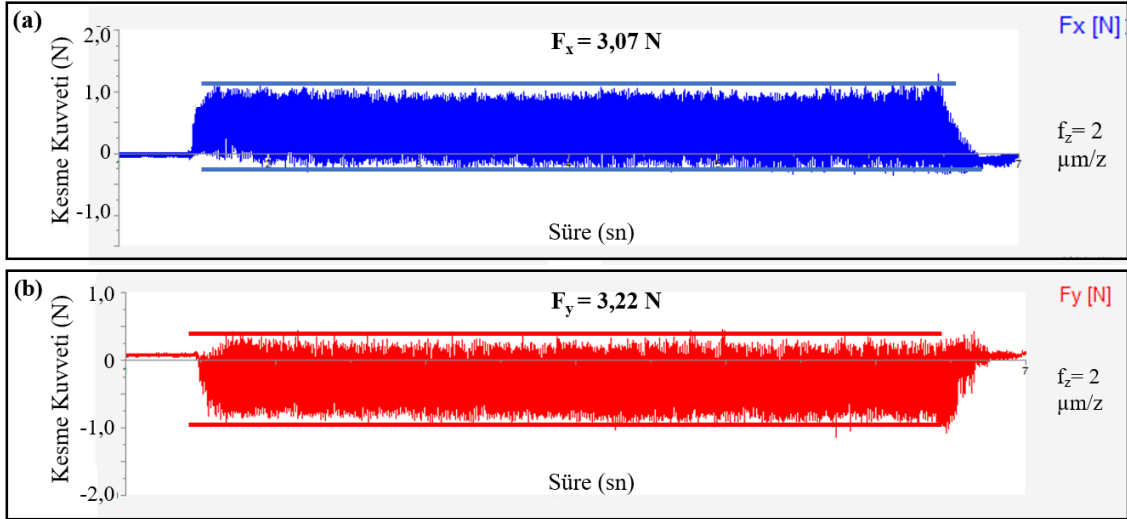
Şekil 4.11 Sabit ve değişken ilerleme hızlarında  $z=50 \mu\text{m}$ ’da ince cidarda y yönünde meydana gelen maksimum ve minimum deformasyon.

Şekil 4.10 ve 4.11 birlikte değerlendirildiğinde, mikro ince cidarın frezelenmesinde, değişken ilerleme kullanılması cidar deformasyonunun önemli oranda azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte değişken ilerlemede kullanılacak minimum ağız başına düşen ilerleme değerinin ( $f_{z(min)}$ ), minimum talaş kalınlığına eşit veya daha yüksek alınması gerektiği sonucu varılmıştır.

Değişken ilerleme hızlarının ince cidarlı yapıların deformasyonu üzerindeki olumlu etkisi, özellikle giriş ve çıkış bölgelerinde kesme kuvvetlerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu bölgelerde uygulanan düşük ilerleme hızları, talaş yükünü azaltarak deformasyon seviyelerinin düşmesine katkı sağlamaktadır. Şekil 4.12a ve Şekil 4.12b’de gösterildiği üzere, değişken ilerleme hızları ( $f_{z(min)}=0,5 \mu\text{m/z}$ ,  $f_{z(maks)}=2 \mu\text{m/z}$ ) kullanılarak gerçekleştirilen kesme işlemlerinde, cidar uzunluğu boyunca giriş, orta ve çıkış bölgelerinden elde edilen ortalama kesme kuvvetleri ham verileri; sabit ilerleme hızı ( $f_z=2 \mu\text{m/z}$ ) kullanılarak yapılan kesme işlemlerine ait Şekil 4.13a ve Şekil 4.13b’de gösterilen kesme kuvveti ham veri sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, cidarın orta bölgesinde ölçülen kesme kuvvetlerinin, giriş ve çıkış bölgelerine kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, orta bölgedeki kesme kuvveti değerlerinin, sabit ilerleme hızıyla gerçekleştirilen kesme işlemlerinde cidar boyunca elde edilen kuvvetlere sayısal olarak oldukça yakın olması, değişken ilerleme hızlarının etkisini doğrular niteliktedir.

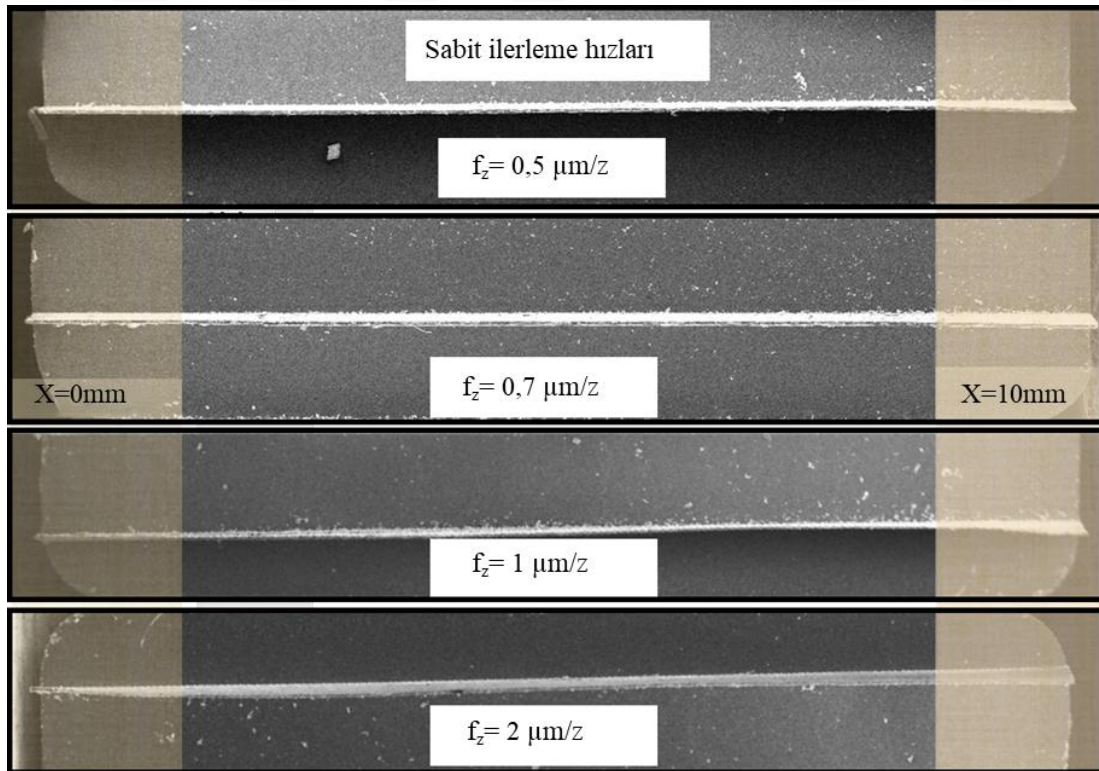


Şekil 4.12  $f_{z(maks)}=2 \mu\text{m/z}$  değişken ilerleme hızında (a)  $F_x$ , (b)  $F_y$  kesme kuvvetleri.

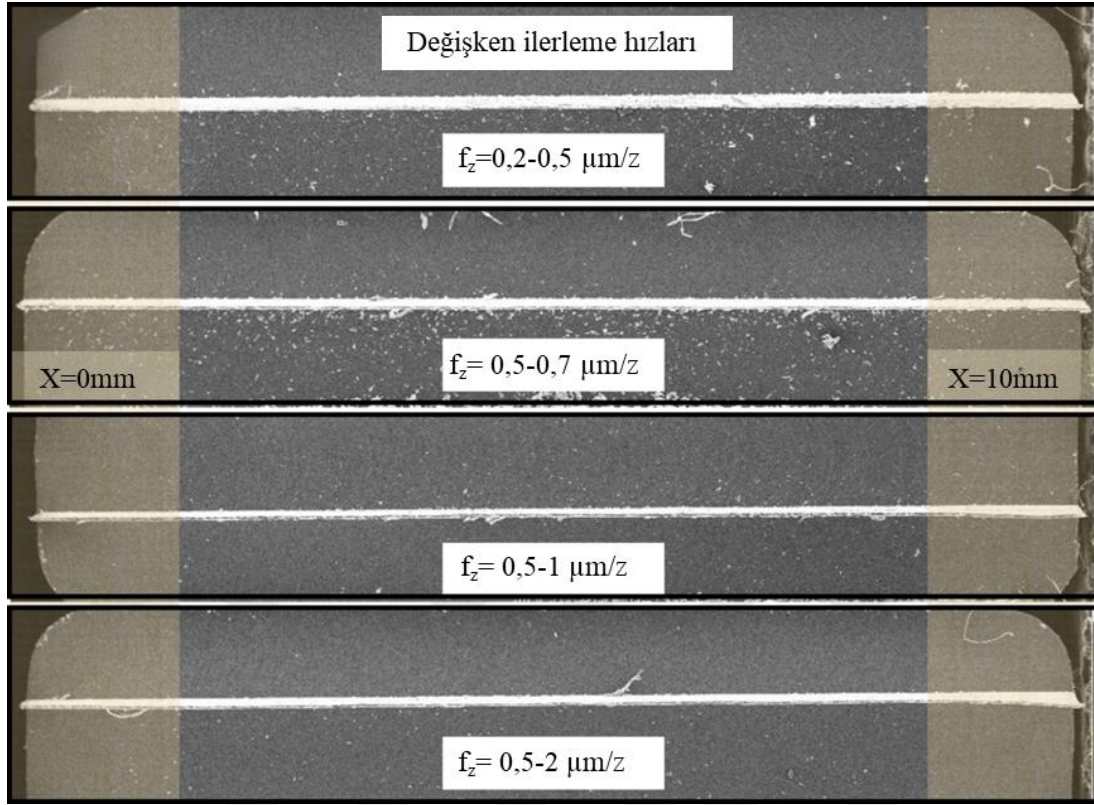


Şekil 4.13 (a)  $f_z=2 \text{ } \mu\text{m/z}$  sabit ilerleme hızında (a)  $F_x$ , (b)  $F_y$  kesme kuvvetleri.

Cidar boyunca alınan SEM görüntülerinden maksimum ilerleme hızı  $0,5, 0,7, 1$  ve  $2 \text{ } \mu\text{m/z}$  sabit (Şekil 4.14) ve değişken (Şekil 4.15) ilerleme hızlarında elde edilen iş parçalarındaki deformasyon görsel olarak kıyaslanmıştır. Grafiklere paralel olarak, değişken ilerleme hızlarıyla daha rijit ince cidar geometrilerinin elde edildiği görülmüştür. İlerleme hızının artmasıyla ince cidardaki deformasyonun arttığını söylemek mümkündür.

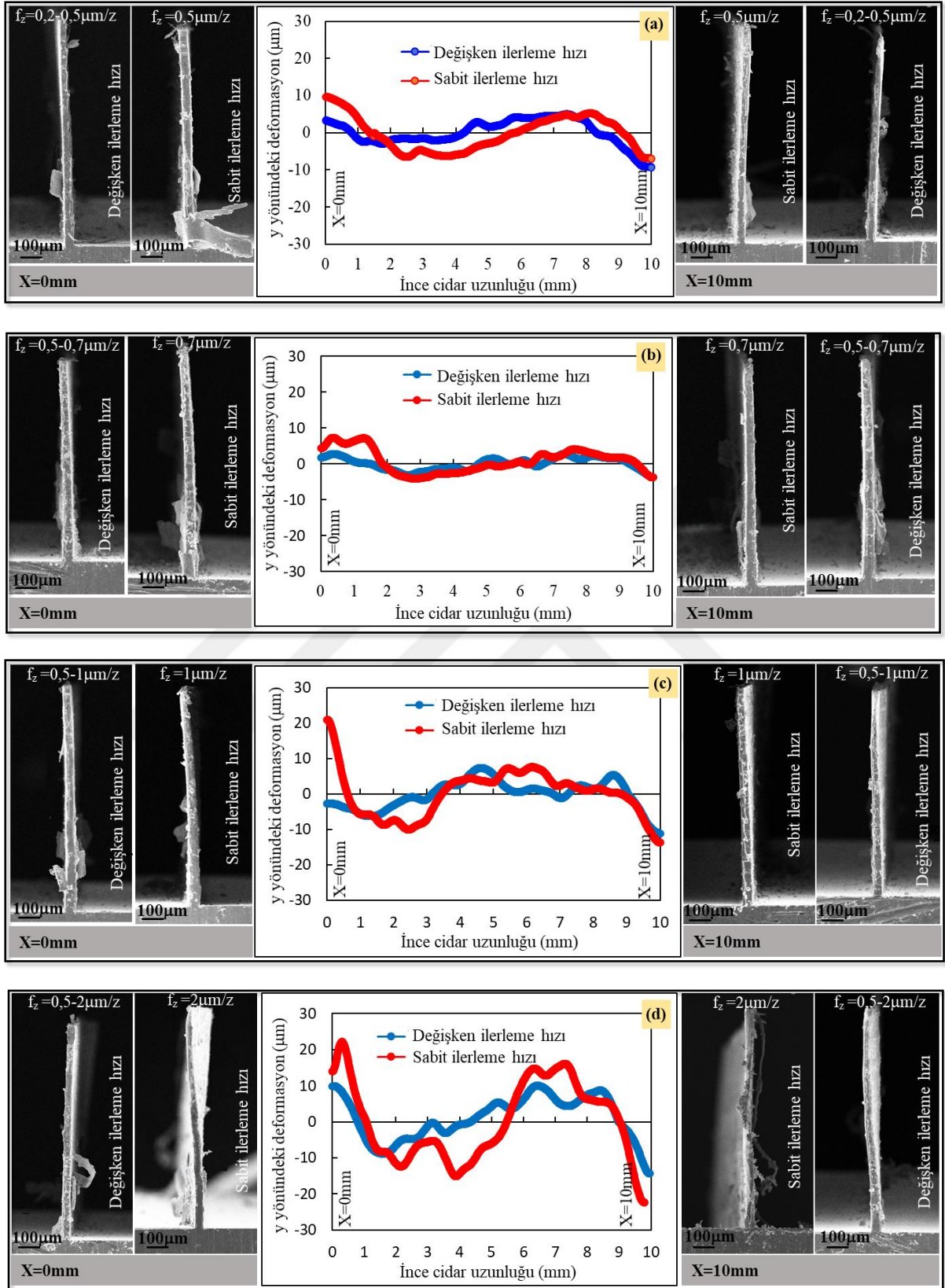


Şekil 4.14 Sabit ( $0,5, 0,7, 1, 2 \text{ } \mu\text{m/z}$ ) ilerleme hızı kullanılarak mikro kesme işlemine tabi tutulan ince cidar geometrilerine ait SEM görüntüleri.



**Şekil 4.15** Değişken (0,5, 0,7, 1, 2  $\mu\text{m/z}$ ) ilerleme hızı kullanılarak mikro kesme işlemine tabi tutulan ince cidar geometrilerine ait SEM görüntüleri.

İnce cidar geometrilerinin giriş ve çıkış bölgelerinden de SEM görüntüleri alınmış ve cidar uzunluğu boyunca deformasyon davranışındaki değişim karşılaştırmalı olarak Şekil 4.16'da verilmektedir. Şekil 4.16'da verilen grafiklerden de görüldüğü üzere maksimum cidar deformasyonu  $x=0$  ve  $x=10$  mm olduğu konumlarda elde edilmiştir.  $f_z=0,7 \mu\text{m/z}$  için sabit veya değişken ilerleme hızları kullanmak deformasyon üzerinde çokta belirleyici bir etkiye sahip değildir (Şekil 4.16b). Fakat artan ilerleme değeri cidardaki deformasyonun artmasına neden olurken, değişken ilerleme ile kesme yapmak cidar deformasyonunda belirgin bir azalmaya neden olduğu açıktır (Şekil 4.16c-d). Ağız başına düşen ilerleme değerinin minimum talaş kalınlığına yaklaşması cidar deformasyonunu arttırmaktadır. Böyle bir durumda değişken ilerleme değeri kullanmak çözüm değildir. Şekil 4.16a'da görüldüğü üzere,  $f_{z(\min)}=0,2 \mu\text{m/z}$  -  $f_{z(\max)}=0,5 \mu\text{m/z}$  için yapılan frezeleme işleminde cidar kalınlığında da bir boyutsal hata göze çarpmaktadır.  $f_{z(\min)}$  değerinin  $0,5 \mu\text{m/z}$ 'den daha küçük olması, kazınma etkisini arttırırken cidar kalınlığının da azalmasına neden olmuştur.



**Şekil 4.16** Sabit ve değişken ilerleme hızı kullanılarak yapılan ince cedar frezelemede elde edilen deformasyonun SEM görüntüleri ve deformasyonun cedar boyunca değişimi (a)  $f_{z(maks)} = 0,5 \mu m/z$ , (b)  $f_{z(maks)} = 0,7 \mu m/z$ , (c)  $f_{z(maks)} = 1 \mu m/z$ , (d)  $f_{z(maks)} = 2 \mu m/z$ .

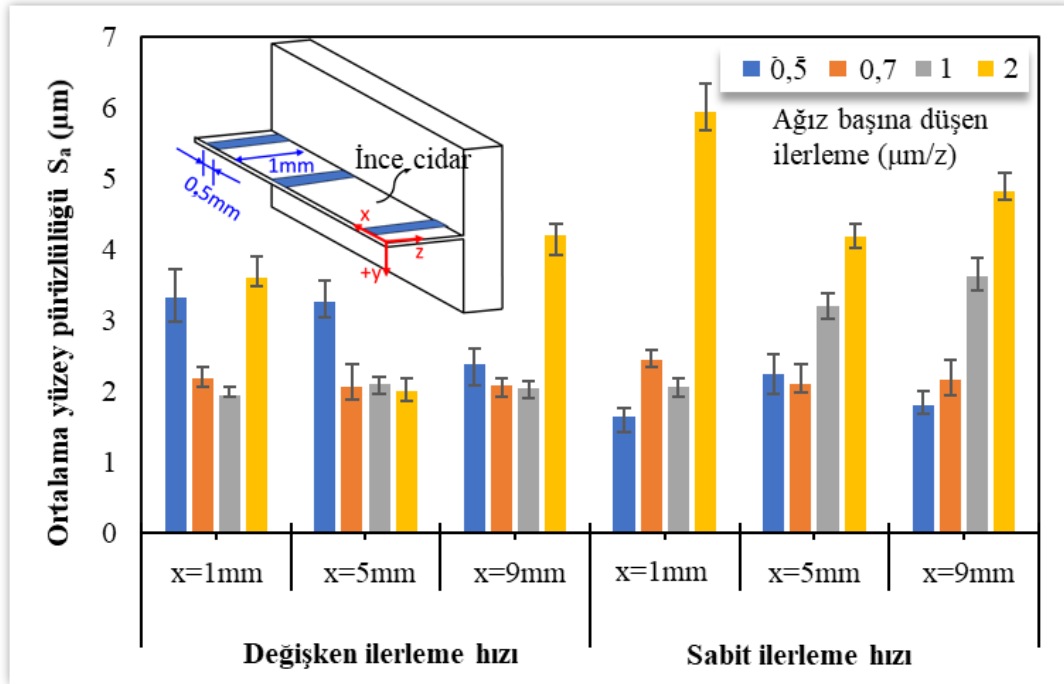
Deneyleer sabit 100 µm eksenel kesme derinliği ve 30.000 dev/dk'da gerçekleştirilmiştir. Radyal kesme derinliği ise takım çapı kadar alınmıştır. Sadece en etkili parametre olan ilerleme hızları değiştirilerek ilerlemenin cidar deformasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlerleme hızının etkisinin yanında değişken ilerleme hızlarına odaklanarak cidar deformasyonu azaltılmıştır. Devir sayısı ve talaş derinliği parametreleri ise kesici takım üreticisi firmanın tavsiye ettiği değerler aralığında, literatür özetindeki çalışmalar baz alınarak belirlenmiştir. Maksimum deformasyon sonuçları incelendiğinde, tek değişken ilerleme hızı olduğu için herhangi bir optimizasyon çalışmasına gerek duyulmadan optimum kesme parametreleri (ilerleme hızı açısından) belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de şekil 4.16'dan faydalanarak +y ve -y yönündeki maksimum deformasyonlar hesaplanmıştır. Değişken ilerleme hızları ve sabit ilerleme hızlarının kullanıldığı kesme deneylerinde, iş parçasındaki deformasyon farkı, şekil 4.16'daki SEM görüntüleri ve grafiklerle açıkça gösterilmiştir. Değişken ilerleme hızlarının kullanıldığı kesme deneylerinde iş parçasının deformasyon açısından daha iyi sonuçlar verdiği net bir şekilde görülmektedir. Optimum sonuçların, ilerleme hızının kesme boyunca 0,5 ile 0,7 µm arasında değiştiği kesme deneyinden elde edildiğini söylemek mümkündür. Bunun sebebi, seçilen ilerleme hızlarının minimum talaş kalınlığının üstünde olan en küçük ilerleme hızları olmasıdır. +y ve -y yönü birlikte incelendiğinde, değişken ilerleme hızları kullanarak ince cidar deformasyonu sabit ilerleme hızlarına göre  $f_{z(maks)}=0,5 \mu\text{m/z}$  için %19,  $f_{z(maks)}=0,7 \mu\text{m/z}$  için %41,  $f_{z(maks)}=1 \mu\text{m/z}$  için %47,  $f_{z(maks)}=2 \mu\text{m/z}$  için %45 oranında azaltılmıştır.

**Çizelge 4.1** Farklı ilerleme hızlarına göre deformasyonun karşılaştırılması.

| İlerleme Hızı                        | Maksimum deformasyon |
|--------------------------------------|----------------------|
| Sabit $f=0,5 \mu\text{m/z}$          | 17,3 µm              |
| Sabit $f=0,7 \mu\text{m/z}$          | 11 µm                |
| Sabit $f=1 \mu\text{m/z}$            | 34,6 µm              |
| Sabit $f=2 \mu\text{m/z}$            | 44,3 µm              |
| Değişken $f=0,2 - 0,5 \mu\text{m/z}$ | 14 µm                |
| Değişken $f=0,5 - 0,7 \mu\text{m/z}$ | 6,5 µm               |
| Değişken $f=0,5 - 1 \mu\text{m/z}$   | 18,4 µm              |
| Değişken $f=0,5 - 2 \mu\text{m/z}$   | 24,2 µm              |

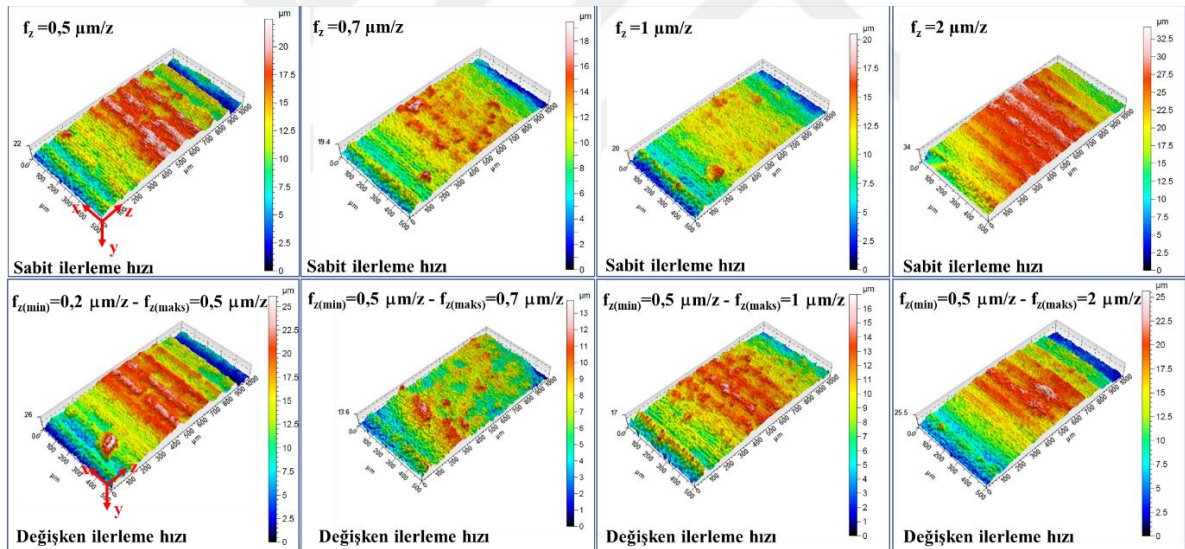
#### 4.5.2 Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Değişken ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla ince cidarlı yüzeylerde üç boyutlu alansal yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler cidarın üç farklı konumundan ( $x=1$  mm,  $x=5$  mm ve  $x=9$  mm) alınmış ve ölçüm alanı  $0,5$  mm x  $1$  mm olarak belirlenmiştir. Değişken ilerleme hızlarında hem sabit hem de değişken ilerleme hızları için elde edilen  $S_a$  değerleri Şekil 4.17'de sunulmuştur.  $0,5$   $\mu\text{m}/\text{z}$ 'lik sabit bir ilerleme hızının kullanıldığı kesme işleminden elde edilen  $S_a$  değerlerinin, değişken bir ilerleme hızı için elde edilenlerden daha küçük olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni, değişken ilerleme hızı yönteminde minimum ilerleme değerinin ( $f_{z\min}$ )  $0,2$   $\mu\text{m}/\text{z}$ , maksimum ilerleme değerinin ( $f_{z\max}$ ) ise  $0,5$   $\mu\text{m}/\text{z}$  olmasıdır. Kesme işleminin minimum talaş kalınlığı olan  $0,5$   $\mu\text{m}$ 'nin altındaki bir ilerleme değeriyle başlatılması, hem mikro cidar deformasyonu hem de yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Hem sabit hem de değişken ilerleme hızı yöntemlerinde  $f_z=0,7$   $\mu\text{m}/\text{z}$  için elde edilen  $S_a$  değerlerinin birbirine yakın olduğu bulunmuştur. Öte yandan, değişken ilerleme hızı yönteminde  $f_z=1$  ve  $2$   $\mu\text{m}/\text{z}$  için elde edilen  $S_a$  değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.17 Sabit ve değişken ilerleme hızları kullanılarak frezelenen ince cidarın farklı yerlerinden alınan  $S_a$  değerlerinin değişimi.

Deformasyon ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, değişken ilerleme hızlarının kullanıldığı yöntemde minimum ilerleme hızı değeri ( $f_{z(min)}$ ) minimum talaş kalınlığına eşit seçilirse hem ince cidarın deformasyonunu hem de minimum  $S_a$  değerini elde etmek mümkündür. Şekil 4.18’de sabit ve değişken ilerleme oranı yöntemleri için ince cidarın farklı yerlerinden alınan yüzey topoğrafyalarının örneklerini göstermektedir. Şekil 4.18’de sunulan 3 boyutlu yüzey topoğrafyaları 0,5 mm x 1 mm boyutundadır ve tarama alanı Şekil 4.17’de gösterilen grafiğin şematik görüntüsünde gösterilmiştir. Değişken ilerleme oranı kullanılarak frezelemede  $S_a$  değerlerinin daha yüksek olduğunu belirtmek önemlidir ( $f_{z(min)} = 0,2 \mu\text{m/z}$  ve  $f_{z(maks)} = 0,5 \mu\text{m/z}$ ). Buna karşılık,  $0,5 \mu\text{m/z}$ ’lik minimum ilerleme hızı ( $f_{z(min)}$ ) için değişken maksimum ilerleme hızlarında ( $f_{z(maks)}$ ) frezelemede  $S_a$  değerlerinin sabit bir ilerleme hızında elde edilenlerden daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18 Farklı ilerleme değerleri için elde edilen ince cidar yüzeyinin 3B yüzey topoğrafisi.

#### 4.6 Kesme İşleminin Kalıntı Gerilme Üzerindeki Etkisi

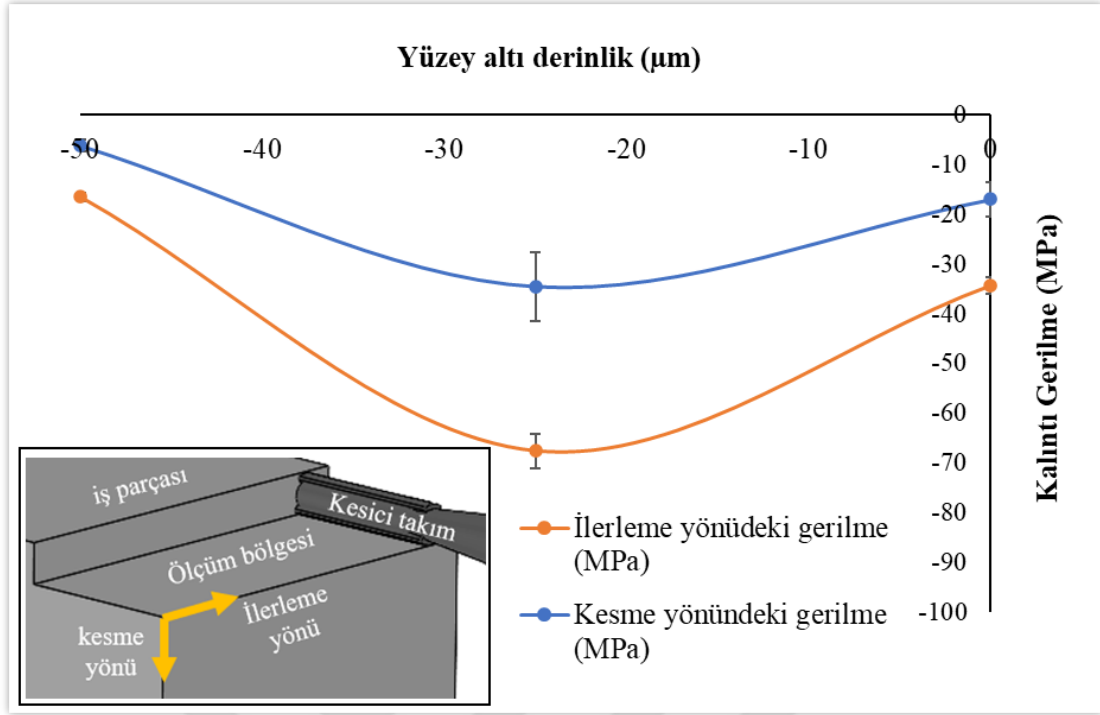
Mikro frezeleme işlemine tabi tutulan iş parçasında, derinlik boyunca oluşan kalıntı gerilme dağılımı ölçülmüş ve analiz detayları Çizelge 4.2’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu analiz kapsamında, yüzeyden derine doğru ilerleyen kalıntı gerilme profili belirlenmiş olup, aşındırma işlemi elektropolisaj yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 4.2** Kalıntı gerilme analiz detayları.

| X-Işını Tüpü | Tarama Açısı (2 $\theta$ ) | Kafes Düzlemi (hkl) | Poisson Oranı | Young Modülü |
|--------------|----------------------------|---------------------|---------------|--------------|
| Cu           | 137,2°                     | 4 2 2               | 0,33          | 71.000 MPa   |

Kalıntı gerilme, işlenen yüzeyin bütünlüğü ve iş parçasının fonksiyonel ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Mikro frezeleme işlemine tabi tutulan ince cidarlı yapılar üzerinde gerçekleştirilen XRD temelli kalıntı gerilme analizleri, özellikle yüzeye yakın bölgelerde işlem kaynaklı gerilmelerin belirgin bir şekilde ortaya çıktığını göstermektedir. Şekil 4.19'da sunulan bulgular, farklı derinliklerde (0, 25 ve 50  $\mu\text{m}$ ) ve iki farklı kesme yönünde elde edilen kalıntı gerilme profillerini yansıtmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, en yüksek basma gerilmeleri yüzeye en yakın bölgede, yani 0–25  $\mu\text{m}$  derinlik aralığında gözlenmiş, 50  $\mu\text{m}$  derinliğe inildikçe bu gerilmelerin azalarak nötr seviyelere yaklaştığı görülmüştür. Bu durum, mikro frezeleme işleminin etkisinin esasen yüzeysel bölgelerle sınırlı kaldığını ve hacimsel olarak derinlemesine nüfuz etmediğini ortaya koymaktadır. Benzer bir eğilim Zeng vd. (2017) tarafından yürütülen çalışmalarda da rapor edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, Zeng vd. (2017) gibi araştırmacıların, mikro işleme sırasında zıt yönlü frezelemenin daha yüksek oranda basma kalıntı gerilme ürettiğine dair bulgularıyla da uyumludur. Mikro frezeleme işleminde boyut etkisine bağlı olarak ortaya çıkan takım-talaş ara yüzeyinde görülen negatif talaş açısı etkisi, kesme bölgesindeki plastik deformasyonu artırarak kalıntı gerilmelerin basma yönünde gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. (Guo vd. 2019).

Kalıntı gerilmelerin dağılımı üzerinde kesme yönünün etkisi son derece belirgindir. Zıt yönlü frezeleme, takımın iş parçasına daha agresif bir giriş yaptığı bir yöntem olarak, yüzeyde daha yoğun plastik deformasyon ve dolayısıyla daha yüksek basma gerilmesi oluşturmuştur. Bu durum, literatürde "kazınma etkisi (ploughing effect)" olarak bilinen ve takımın kesme sırasında malzemeye batma eğilimiyle açıklanan mekanizma ile uyumludur (Singh ve Agrawal 2015, Lu vd. 2017). Bu etki, işlenen yüzeyde daha yüksek mekanik enerji birikimine ve bunun sonucunda daha belirgin kalıntı gerilme izlerine neden olmaktadır.



Şekil 4.19 Üç farklı derinlikte ve iki farklı yönde kalıntı gerilme analizi.

Gerilme profilinin 50 µm derinlikte neredeyse sıfıra yaklaşması, kesme işlemiyle etkilenmiş plastik deformasyon bölgesinin yüzeye oldukça yakın sınırlı bir bölgede kaldığını göstermektedir. Bu durum, mikro frezeleme işleminin yüzeye özgü bir mekanik etkisinin olduğunu ve işlem derinliğinin malzeme alt yapısına geçmediğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.19'daki verilere bakıldığında, hem yüzey tabakasındaki baskın basma gerilmeleri hem de kesme yönüne bağlı değişkenlikler, mikro frezeleme işleminin yalnızca geometrik değil, aynı zamanda metalürjik açıdan da hassas bir kontrol gerektirdiğini göstermektedir. Özellikle 50 µm kalınlığındaki cidar yapısının her iki yüzeyinden işlenmesi durumunda, iç bölgede bu kalıntı gerilmelerin üst üste binerek daha yüksek basma etkisi yaratması muhtemeldir. Bu durum, ince cidarlı yapıların frezelenmesinde simetrik işleme senaryolarının dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

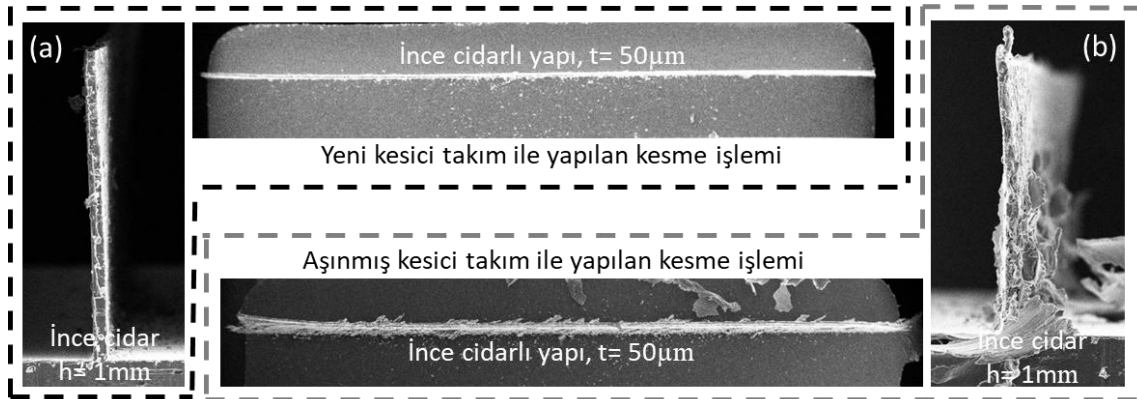
Kalıntı gerilme profillerinin sınırlı bir derinlikte kalması, yüzey mühendisliği uygulamaları açısından olumlu kabul edilse de, hassas deformasyon toleransı gerektiren yapılar için bu etkilerin mutlaka dikkate alınması gerektiği açıktır (Li vd. 2015, Guo vd. 2019). Sonuç olarak, kesme yönü, kalıntı gerilme profilinin hem büyüklüğünü hem de

derinliğe bağlı dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir. Mikro frezeleme gibi yüksek hassasiyetli uygulamalarda, uygun kesme yönü ve parametrelerinin seçilmesi, yüzey altı bütünlüğün korunması açısından kritik önemdedir.

#### 4.7 Takım Geometrisi ve Kaplamasının Etkisi

##### 4.7.1 Takım Aşınmasının Etkisi

Mikro frezeleme işlemlerinde kesici takımın aşınması, özellikle ince cidarlı yapıların işlenmesinde ciddi geometrik deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu çalışmada, belirli kesme işlemlerine tabi tutularak kontrollü şekilde aşındırılan bir kesici takım ile yapılan deneysel çalışmada, aşınmanın cidar deformasyonu üzerindeki etkisi de incelenmiştir. SEM görüntülerinden de (Şekil 4.20) anlaşılabacağı üzere, kenar yarıçapı artan aşınmış takımın keskinliğini yitirmesinin bir sonucu olarak çapak oluşumu belirgin şekilde artmıştır. Şekil 4.20’de dikkat çeken diğer bir sonuç ise, aşınmış takım ile yapılan mikro frezeleme sonrasında cidar deformasyonunun da artmış olmasıdır. Aşınmış takım kenar yarıçapının artması, mikro frezeleme işleminde negatif talaş açısı etkisi oluşturmaktadır. Bu sebeple kazınma gerçekleşmekte ve Şekil 4.20b’de görüldüğü gibi cidar deformasyon artmaktadır.

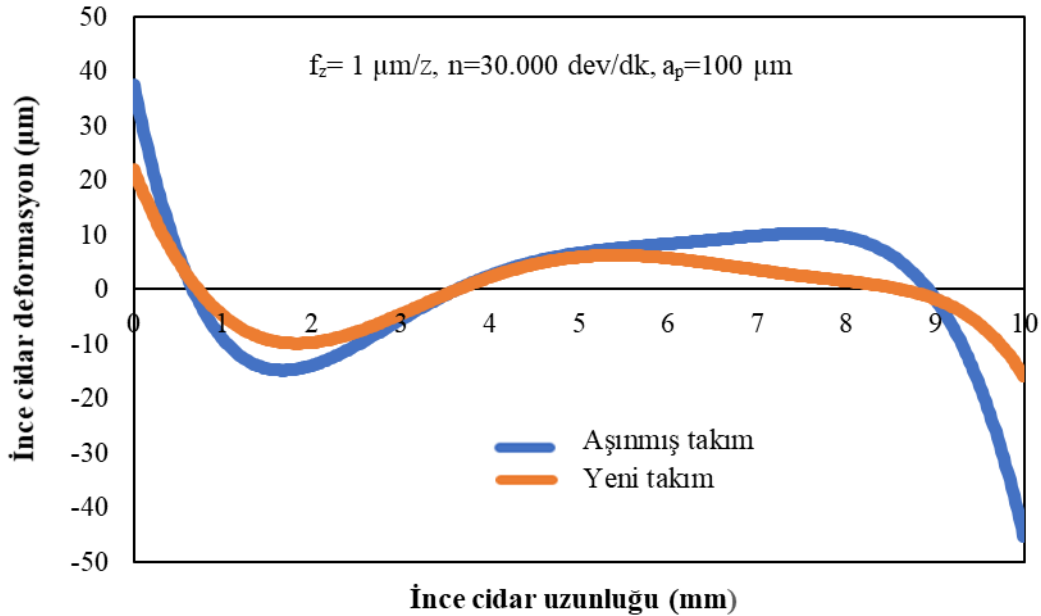


Şekil 4.20 (a) Yeni ve (b) aşınmış takım ile yapılan kesme işlemi sonucunda ince cidardan alınan SEM görüntüleri.

Ayrıca, aşınmış kesici kenarın negatif talaş açısı etkisi yarattığı görülmüş, bu durum plastik deformasyonun artmasına neden olmuştur. Optik profilometre ile yapılan

ölçümlerde, yeni takım ile elde edilen deformasyon toplamı  $34,7 \mu\text{m}$  iken, aşınmış takım ile bu değer  $78 \mu\text{m}$ 'ye ulaşmıştır. Bu da yaklaşık %125'lik bir deformasyon artışı anlamına gelmektedir. Literatürde de belirtildiği gibi, kesici takımın aşınması, kesme bölgesindeki gerilim dağılımını değiştirerek mikro yapı deformasyonlarına ve yüzey bütünlüğünde bozulmalara yol açmaktadır (Sharman vd. 2004, Muñoz-Sánchez vd. 2009). Bu nedenle, mikro ölçekte hassasiyet gerektiren uygulamalarda takım aşınmasının sürekli izlenmesi ve işleme stratejilerinin buna göre optimize edilmesi kritik önemdedir.

Şekil 4.21'de, aşınmış ve yeni kesici takımlar kullanılarak işlenmiş ince cidarlı yapıların deformasyon dağılımı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. İşleme parametreleri sabit tutulmuş olup ( $f_z = 1 \mu\text{m/z}$ ,  $n = 30.000 \text{ dev/dk}$ ,  $a_p = 100 \mu\text{m}$ ), sadece takım aşınma durumu değiştirilerek deformasyon eğilimleri analiz edilmiştir. Yeni takım ile elde edilen deformasyon, cidarın tamamı boyunca daha düşük ve dengeli bir seyir izlerken, aşınmış takım ile işlenen örnekte deformasyonun özellikle cidarın uç noktalarında belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.21'de cidarın başlangıç bölgesinde (0–2 mm) her iki durumda da negatif deformasyon (içe doğru bükülme) olduğu, ancak bu bölgedeki deformasyon miktarının aşınmış takımda daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir.

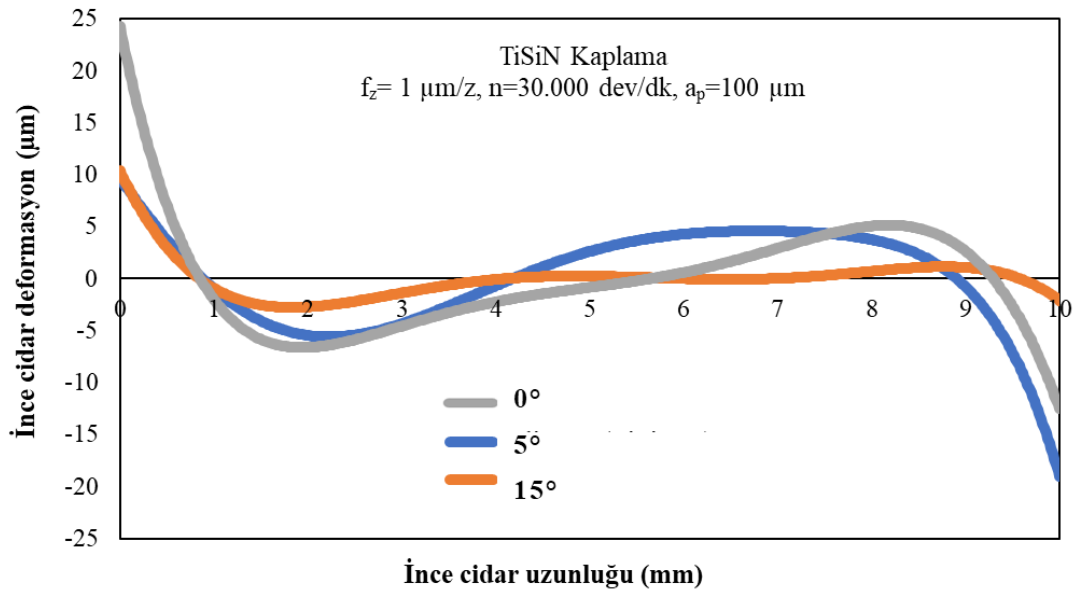


Şekil 4.21 Kesici takım aşınmasının ince cidar deformasyonuna etkisi.

Cidar boyunca ilerledikçe, orta bölgelerde (3-7 mm) pozitif deformasyon artmakta ve maksimuma yakın bir değere ulaşmaktadır. Aşınmış takım bu bölgede de daha yüksek genlikli deformasyon üretmiş, bu da takımın körelmiş kenarı nedeniyle kesme kuvvetlerinin düzgün iletilmemesiyle ilişkilendirilebilir. Özellikle 9-10 mm aralığında, uç bölgelere yaklaşıldığında, aşınmış takımın oluşturduğu deformasyonun ani şekilde arttığı ve  $40\text{ }\mu\text{m}$ 'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Bu, takımın artık kesici niteliklerini kaybettiği ve kesme yerine itme etkisi oluşturduğu anlamına gelir.

#### 4.7.2 Talaş Açısının Etkisi

Talaş açısı, kesici takım geometrisinin en kritik bileşenlerinden biri olup, kesme kuvvetlerinin büyüklüğü ve yönü üzerinde doğrudan etkilidir. Bu çalışmada, talaş açısının ince cidarlı yapıların deformasyonu üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda TiSiN kaplamalı, aynı kesme çapı ve helis açısına sahip takımlar kullanılmış; yalnızca talaş açısı değişken tutulmuştur ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$  ve  $15^\circ$ ). Talaş açısı etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan mikro frezeleme deneyleri sabit kesme parametrelerinde ( $f_z = 1\text{ }\mu\text{m/z}$ ,  $n = 30.000\text{ dev/dk}$ ,  $a_p = 100\text{ }\mu\text{m}$ ) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, talaş açısı arttıkça cidar deformasyonlarının anlamlı düzeyde azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.22).

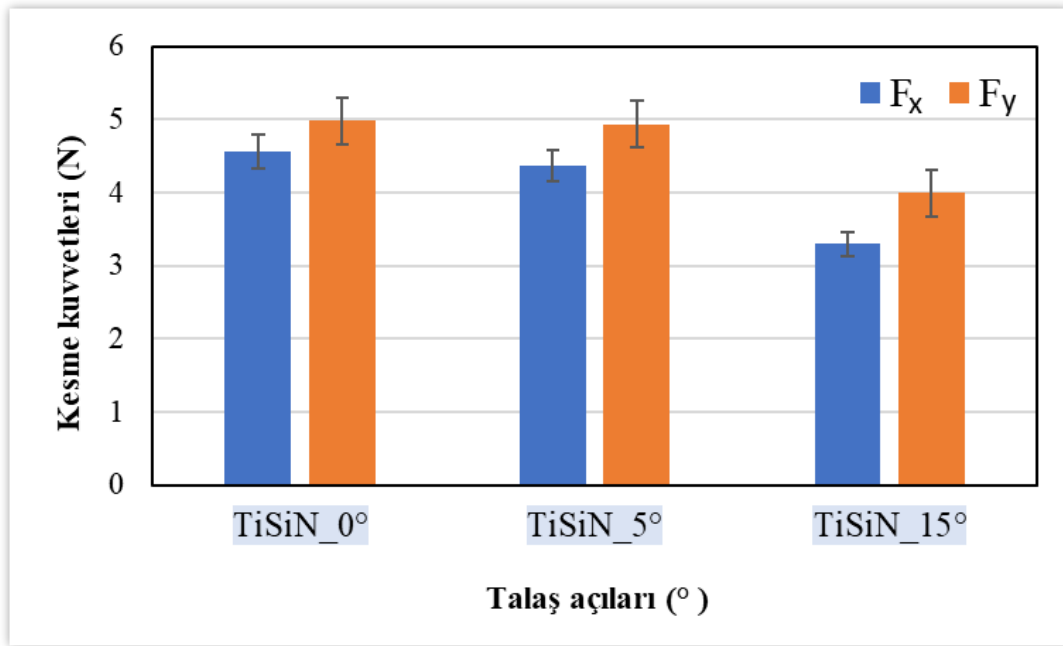


Şekil 4.22 Kesici takım talaş açılarının ince cidar deformasyonundaki değişime etkisi.

Talaş açısının artırılması ile kesici kenar yarıçapının azalması, kesici kenarın talaşı daha etkin bir şekilde kaldırmasına olanak sağlamış; bu durum kesme kuvvetlerinde belirgin bir azalma ve daha kararlı bir talaş akışı ile sonuçlanmıştır. Bu gelişmeler, kesme bölgesindeki plastik deformasyonun azalmasına katkı sağlamış ve dolayısıyla iş parçası yüzey kalitesinde iyileşme elde edilmiştir (Duong vd. 2012). +y ve -y yönü birlikte değerlendirildiğinde maksimum deformasyon sırasıyla 0° talaş açısına sahip kesici takım için 32,5 µm, 5° için 24,6 µm ve 15° için 11,6 µm olarak ölçülmüştür. Bu durum, pozitif talaş açılara sahip takımların kesme bölgesindeki plastik şekil değiştirme miktarını azalttığı ve kesme kuvvetlerini daha etkin bir şekilde ilettiğini göstermektedir. Pozitif talaş açısının kesme mekanizmasını iyileştirerek talaşın daha kolay akmasına olanak sağladığı, buna karşılık negatif veya sıfıra yakın açılarda talaş oluşumunun zorlaşarak kazınma etkisine (ploughing) neden olduğu literatürde de rapor edilmiştir (Park ve Malekian 2009). Ayrıca, SEM görüntüleriyle de doğrulanan bu sonuçlar, talaş açısının yüzey kalitesi üzerindeki olumlu etkisini desteklemektedir. Özellikle 15° talaş açısına sahip kesici takım ile işlenen yüzeylerde, daha az deformasyon ve daha düzgün cidar profilleri elde edilmiştir.

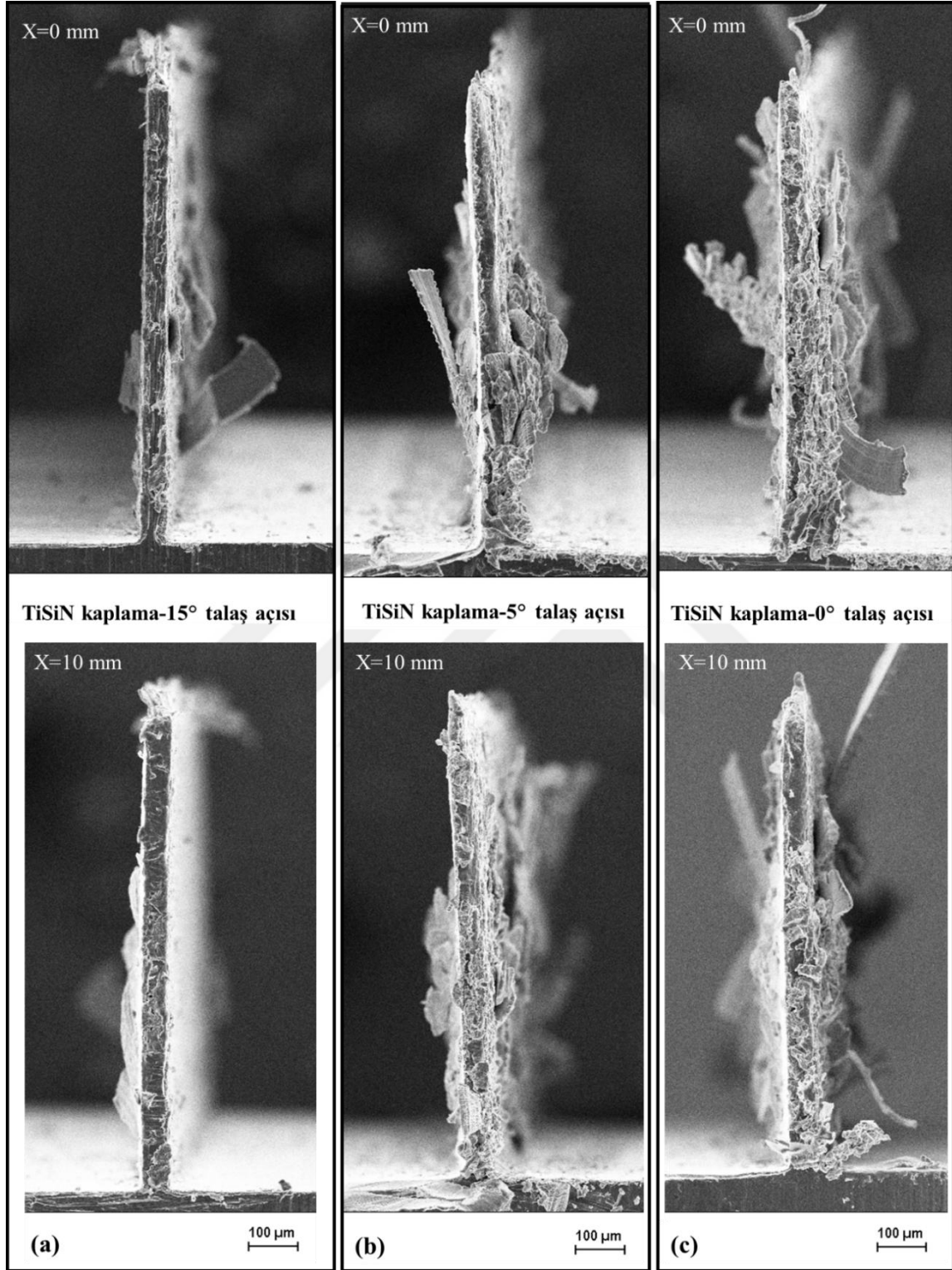
Şekil 4.23’de farklı talaş açılarına (0°, 5°, 15°) sahip TiSiN kaplamalı mikro freze takımları ile gerçekleştirilen kesme işlemleri sonucunda ölçülen kesme kuvvetleri ( $F_x$  ve  $F_y$  bileşenleri) karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.  $F_x$  eksenel yönde,  $F_y$  ise radyal yönde etki eden kuvvet bileşenini temsil etmektedir. Şekil 4.23 incelendiğinde, talaş açısının artmasıyla hem  $F_x$  hem de  $F_y$  bileşenlerinin düzenli şekilde azaldığı görülmektedir. 5° talaş açısına sahip kesici takımla yapılan işlemlerde, 0° talaş açılı takım kullanılarak gerçekleştirilen işlemlere göre kesme kuvvetlerinde azalma gözlemlenmiştir; bu durum, pozitif talaş açısının talaş kaldırma mekanizmasını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Özellikle 15° talaş açısına sahip takımda her iki kuvvet bileşeninde anlamlı bir azalma gözlemlenmiştir.  $F_x$  bileşeni, 0° talaş açısında yaklaşık 4,6 N iken, 15° açıda bu değer yaklaşık 3,5 N’ye kadar düşmektedir. Benzer şekilde  $F_y$  bileşeni de 5 N seviyelerinden 4 N seviyelerine düşmüştür. Böylece 15° talaş açısına sahip kesiciler ile kesme kuvvetleri %20-25 oranında azaltılmıştır.

Bu durum, pozitif talaş açılarının kesme bölgesinde talaş kaldırma mekanizmasını kolaylaştırdığını ve plastik deformasyon oranını azalttığını göstermektedir. Talaş açısının büyümesi, kesici kenarın malzeme içine giriş açısını artırarak kesme direncini azaltmakta ve kesme kuvvetlerinin daha düşük seviyelerde oluşmasına neden olmaktadır. Bu sonuçlar, literatürde yer alan çalışmaları da desteklemektedir; örneğin Balázs vd. (2021) ve Duong vd. (2012) pozitif talaş açılarıyla çalışan takımların daha düşük kesme kuvvetleri ve daha iyi yüzey kalitesi sağladığını vurgulamıştır.



**Şekil 4.23** Kesici takım talaş açılarının kesme kuvvetlerindeki değişime etkisi.

İş parçalarından alınan SEM görüntüleri de kesme kuvvet ve cidar deformasyonu sonuçlarını doğrulamaktadır (Şekil 4.24). Kesici takım talaş açısı azaldıkça iş parçasında çapak oluşumu artmaktadır. Şekil 4.24’de iş parçasının giriş ve çıkış bölgelerinden alınan SEM görüntülerinde 15° talaş açısına sahip kesici takım kullanılarak yapılan kesme işleminde iş parçasındaki çapak oluşumu oldukça az iken, 0° talaş açısına sahip kesici takım kullanılarak yapılan kesme işleminde çapak oluşumu oldukça fazladır. Talaş açısının artması, ince cidar deformasyonu ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuçlar vererek yüzey kalitesini artırmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları bir sonraki bölümde kaplama türünün etkisi ile beraber verilmiştir.

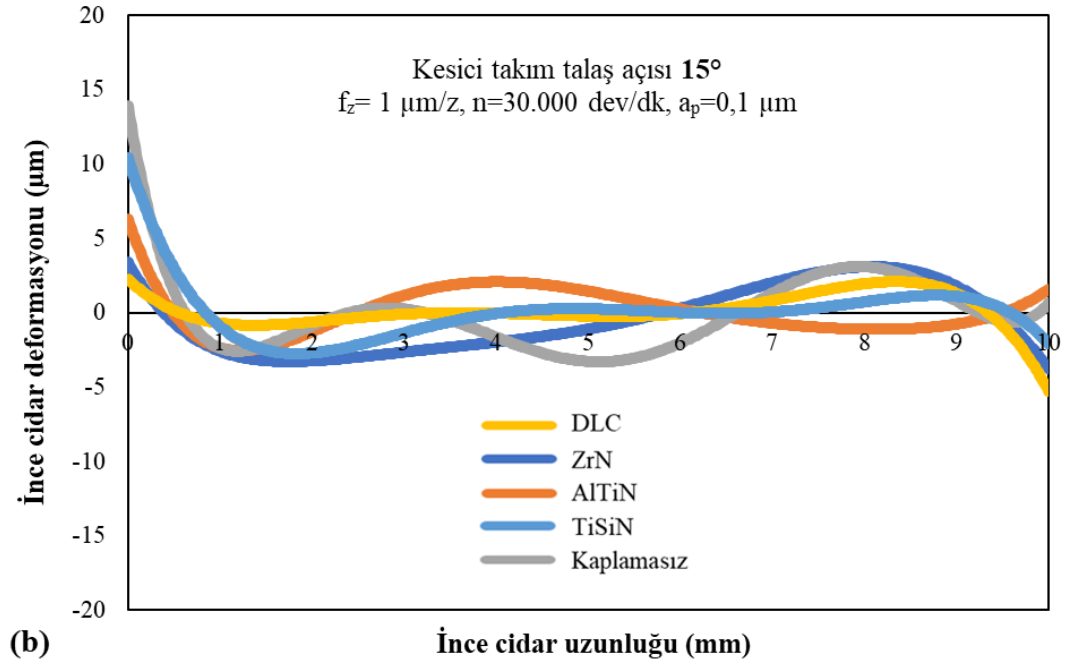
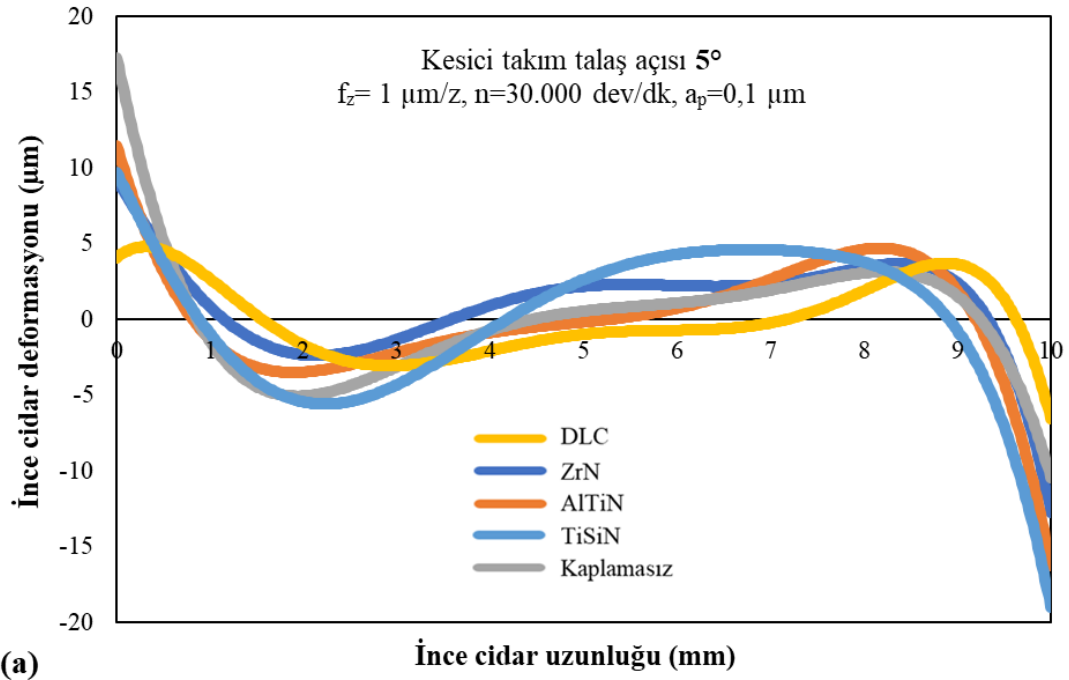


Şekil 4.24 (a) 15°, (b) 5°, (c) 0° talaş açısına sahip kesicilerle mikro frezeleme işlemine tabi tutulan ince cidar geometrilerinin SEM görüntüleri.

### 4.7.3 Kaplama Türünün Etkisi

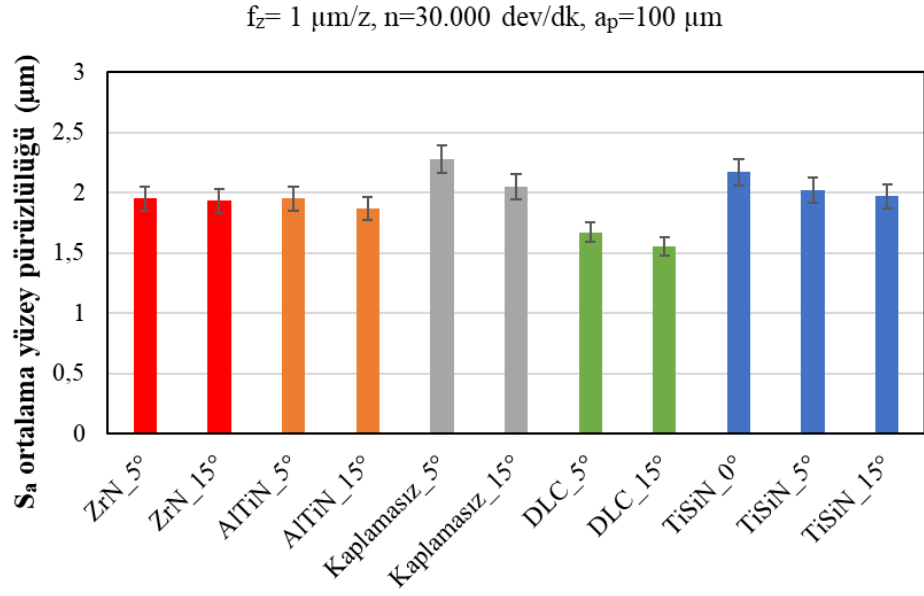
Al 6061-T6 iş parçasının Tungsten karbür kesici takım ile işlenerek ince cidar geometrilerinin oluşturulmasında hangi kaplamanın yüzey kalitesi ve bütünlüğü açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu sebeple DLC, AlTiN, TiSiN, ZrN kaplamaya sahip ve kaplamasız takımın ince cidar deformasyonu ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir.

Kaplamanın düşük sürtünme katsayısı, kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltarak kesme kuvvetlerinde azalmaya yol açar. Bu durum, özellikle düşük rijitliğe sahip ince cidarlı mikro yapılar gibi hassas parçaların işlenmesinde elastik ve plastik deformasyonların azaltılmasına katkı sağlar (Zhang vd. 2012, Seenath ve Sarhan 2024). Gerek deformasyon gerekse yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonucu DLC kaplamaya sahip kesicinin verdiği görülmüştür. Kaplamasız takımdan elde edilen sonuçlar en kötü yüzey kalitesi sonuçlarıdır. Şekil 4.25'de iş parçasının +y ve -y yönü birlikte hesaplandığında en iyi ve en kötü sonuçlar için maksimum deformasyon değerleri  $DLC_{5^\circ} = 15,2 \mu m$ ,  $DLC_{15^\circ} = 9,27 \mu m$ ,  $kaplamasız_{5^\circ} = 25,1 \mu m$ ,  $kaplamasız_{15^\circ} = 20,4 \mu m$ 'dur. Elde edilen sonuçlar, DLC kaplama ile ince cidar deformasyonunun %54'e varan oranlarda azaltılabildiğini ortaya koymaktadır. AlTiN ve TiSiN kaplamalı kesici takımlar, kaplamasız kesicilere kıyasla yüzey kalitesi ve deformasyon açısından daha iyi performans sergilemiş olsa da, bu iyileşmelerin görece sınırlı düzeyde kaldığı görülmüştür. Bu durum, AlTiN ve TiSiN kaplamaların ince cidarlı yapıların işlenmesinde yalnızca kısmi bir katkı sağladığını göstermektedir. Öte yandan, ZrN kaplamalı kesici takımlarla işlenen yüzeylerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon değerleri, DLC kaplamalı takımların sağladığı yüksek yüzey kalitesine tamamen ulaşamamakla birlikte, incelenen kaplama türleri arasında en başarılı ikinci sonuçları vermiştir. Bu bulgu, ZrN kaplamaların yüzey kalitesi açısından dikkate değer bir alternatif sunduğunu ve birçok diğer kaplamaya göre daha üstün bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.25a'da  $5^\circ$  ve Şekil 4.25b'de  $15^\circ$  talaş açısına sahip kesici takımlar kaplama türlerine göre karşılaştırıldığında, elde edilen verilerin birbirine oldukça yakın olduğu ve benzer eğilimler gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, farklı talaş açıları altında dahi kaplama türlerinin performans sıralamasının korunduğunu göstermektedir.



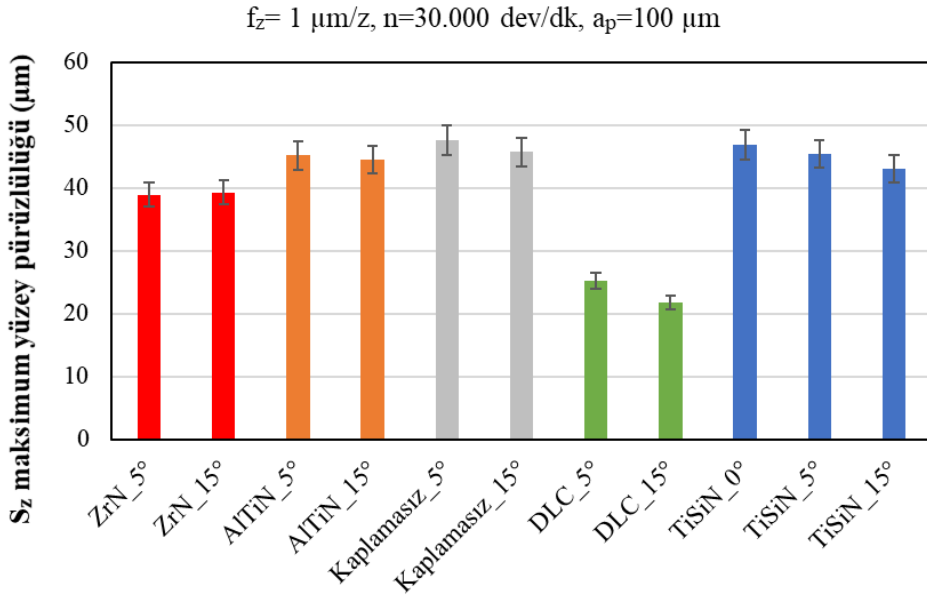
**Şekil 4.25** (a)  $5^\circ$  talaş açısına ve (b)  $15^\circ$  talaş açısına sahip kesici takımlarda farklı kaplamaların ince cidar deformasyonuna etkisi.

Farklı talaş açıları ve kaplamaya sahip mikro freze kesicileri ile elde edilen ince cidarlı parça yüzeylerinin  $0,5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  alanından 3 farklı ölçümün ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) (Şekil 4.26a) ve maksimum yüzey pürüzlülüğü ( $S_z$ ) (Şekil 4.26b) değerleri kıyaslanmıştır.



(a)

Kesici takım kaplamaları ve talaş açıları



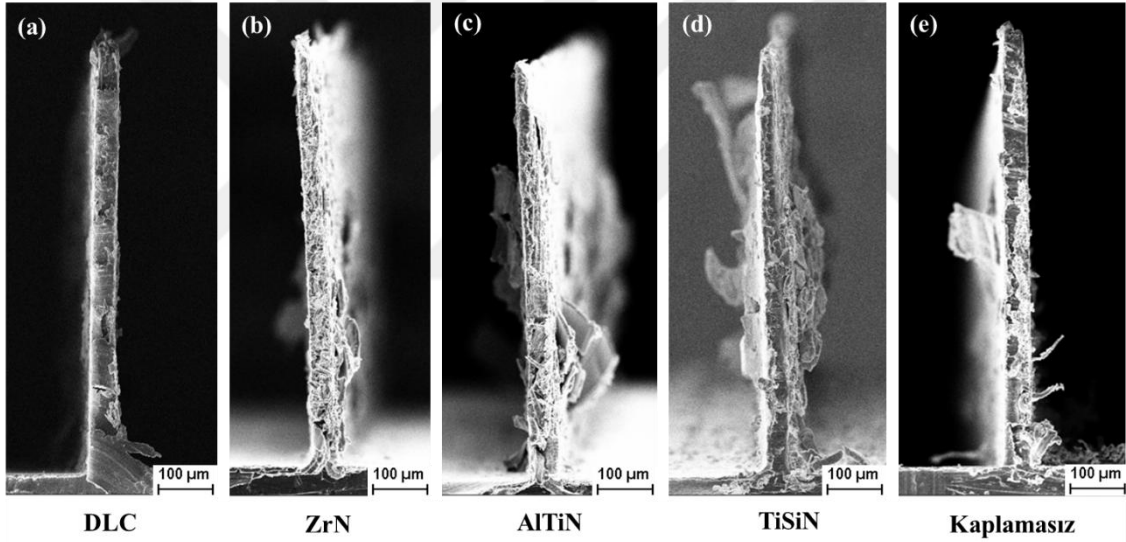
(b)

Kesici takım kaplamaları ve talaş açıları

Şekil 4.26 Kesici takım kaplaması ve talaş açısına göre (a)  $S_a$  ortalama yüzey pürüzlülüğü ve (b)  $S_z$  maksimum yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

Yüzey pürüzlülüğü ile cidar deformasyonu sonuçlarının birbiri ile paralel olduğu görülmektedir. En iyi ölçüm sonucunun  $15^\circ$  talaş açısına sahip DLC kaplamalı kesici takım kullanılarak elde edilen ince cidar yüzeyinden, en kötü ölçüm sonucunun ise  $0^\circ$

talaş açısına sahip kaplamasız kesici takım kullanılarak elde edilen ince cidar yüzeyinden alındığı görülmektedir. Kaplamasız takımda, kesme işlemi esnasında meydana gelen yüksek sürtünmenin ince cidar yüzey kalitesini bozduğu düşünülmektedir. DLC kaplamada düşük sürtünme katsayısı talaş sıvanmasını önlemektedir. Diğer kesici takımlarda Al 6061-T6 iş parçasının sünek yapısından dolayı talaş sıvanması meydana gelmekte, bu da yüzey kalitesine olumsuz yansımaktadır. Şekil 4.27’de, 5° talaş açısına sahip ve farklı kaplama özellikleri gösteren kesici takımlar kullanılarak, sabit kesme parametreleri altında işlenen numunelere ait SEM görüntüleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü üzere DLC kaplamaya sahip kesici takım ile işlenmiş iş parçası yüzey kalitesi ile ön plana çıkmaktadır. Gerek çapak oluşumu gerekse cidar deformasyonu açısından optimum sonucu vermektedir.



**Şekil 4.27** (a) DLC, (b) ZrN, (c) AlTiN, (d) TiSiN kaplamaya sahip kesiciler ve (e) kaplamasız kesici ile işlenmiş ince cidar geometrilerinin SEM görüntülerinin kıyaslanması.

## 4.8 Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu

### 4.8.1 Sinyal Gürültü (S/N) Oranı ve ANOVA Analizleri

#### 4.8.1.1 Kesme Kuvvetleri

Kesme parametrelerinin ve bunların teğetsel kuvvet ( $F_x$ ), ilerleme kuvveti ( $F_y$ ) ve işlenmiş ince cidarların deformasyonu gibi çıktı değişkenleri üzerindeki etkilerinin analizi Taguchi

yöntemi ve varyans analizi (ANOVA) teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmeleri kolaylaştırmak için Minitab yazılımı kullanılmıştır. Çizelge 3.3 ve 3.4'de özetlenen deneysel tasarım ve parametre kombinasyonları bu analizler için temel oluşturmuştur. Kesme deneyleri sırasında kaydedilen  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvetleri, kesme parametrelerinin bu kuvvetler üzerindeki etkisini belirlemek için Taguchi varyans analizi kullanılarak analiz edilmiştir (Çizelge 4.3 ve 4.4). ANOVA yaklaşımı, her bir parametrenin istatistiksel öneminin belirlenmesinde kullanılmıştır. Özellikle, varyans oranının bir ölçüsü olan F-değeri, parametre etkisinin derecesini göstermektedir. Burada 4'ü aşan bir F-değeri istatistiksel anlamlılığı ifade etmektedir (Altan 2024). Ek olarak, p-değeri bu etkinin gücünü ölçmektedir; daha küçük p-değerleri daha güçlü etkilere işaret etmektedir (Aslani vd. 2020).

Taguchi varyans analizi, eksenel kesme derinliğinin ( $a_p$ )  $F_x$  kuvvetini etkileyen en önemli parametre olarak ortaya çıktığını ve varyasyonun %56,944'ünü oluşturduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, eksenel kesme derinliğinin artırılması, kesici takımın keseceği talaş yükünün artmasına ve böylece kesme kuvvetlerinin artacağı önermesiyle tutarlıdır. Buna karşın devir sayısı ( $n$ ), %5,589 ile  $F_x$ 'e en az katkıda bulunan parametre olarak belirlenmiştir. İlerleme hızı ( $f_z$ ), %34,02'lik bir katkı oranıyla  $F_x$  üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki sergilemiştir.  $F_y$  kuvveti için ilerleme hızı, gözlemlenen varyasyona %45,201 oranında katkıda bulunarak en etkili parametre olduğunu kanıtlamıştır. Eksenel kesme derinliği %42,432'lik bir katkı ile yakından takip ederken, iş mili hızının etkisi %8,423 ile minimum düzeyde kalmıştır. Bu sonuçlar, ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin hem  $F_x$  hem de  $F_y$  kuvvetleri üzerindeki baskın etkisini göstermektedir.

**Çizelge 4.3** İnce cidarlı mikro frezelemede  $F_x$  teğetsel kuvvet için varyans analizi.

| Kaynak                                   | Serbestlik derecesi | Katkı   | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F-değeri | p-değeri |
|------------------------------------------|---------------------|---------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| İlerleme Hızı ( $\mu\text{m}/\text{z}$ ) | 5                   | %34,020 | 1,1754          | 0,23507            | 15,79    | 0,001    |
| Devir Sayısı (dev/dk)                    | 2                   | %5,589  | 0,1931          | 0,09657            | 6,49     | 0,021    |
| Kesme Derinliği ( $\mu\text{m}$ )        | 2                   | %56,944 | 1,9674          | 0,98372            | 66,09    | 0,000    |
| Hata                                     | 8                   | %3,447  | 0,1191          | 0,01488            |          |          |
| Toplam                                   | 17                  | %100    | 3,4550          |                    |          |          |

**Çizelge 4.4** İnce cidarlı mikro frezelemede  $F_y$  ilerleme kuvveti için varyans analizi.

| Kaynak                            | Serbestlik derecesi | Katkı   | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F-değeri | p-değeri |
|-----------------------------------|---------------------|---------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| İlerleme hızı ( $\mu\text{m/z}$ ) | 5                   | %45,201 | 0,96380         | 0,19276            | 18,34    | 0,00034  |
| Devir sayısı (dev/dk)             | 2                   | %8,423  | 0,17961         | 0,08980            | 8,54     | 0,01034  |
| Kesme derinliği ( $\mu\text{m}$ ) | 2                   | %42,432 | 0,90476         | 0,45238            | 43,03    | 0,00005  |
| Hata                              | 8                   | %3,944  | 0,08410         | 0,01051            |          |          |
| Toplam                            | 17                  | %100    | 2,13226         |                    |          |          |

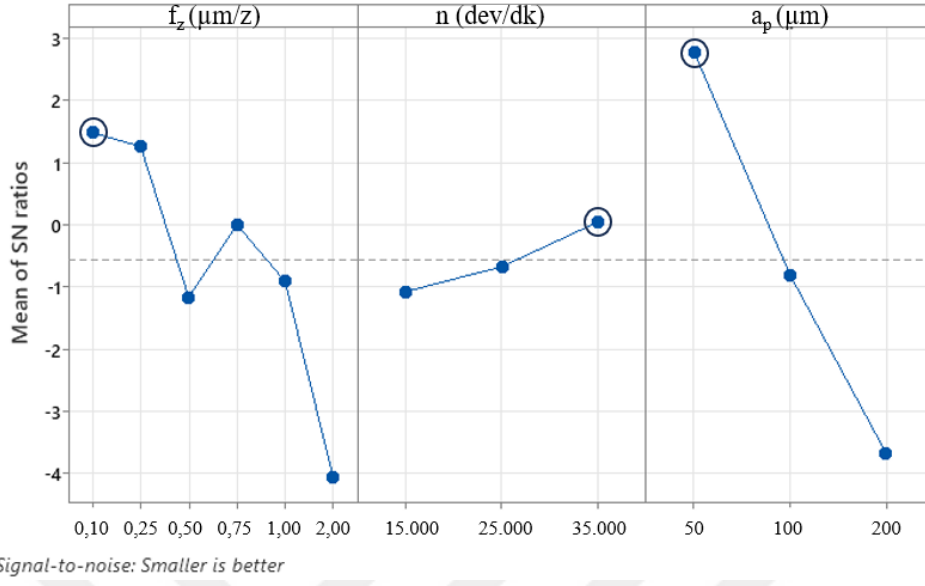
S/N oranı analizi, kesme parametreleri için optimum seviyeleri daha da net olarak ortaya koymuştur.  $F_x$  için optimum konfigürasyon 0,1  $\mu\text{m/z}$  ilerleme hızı, 35.000 dev/dk devir sayısı ve 50  $\mu\text{m}$  eksenel kesme derinliği olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.28'de gösterildiği gibi en düşük kesme kuvvetlerine karşılık gelmektedir. Benzer şekilde,  $F_y$  kuvveti analizi, 35.000 dev/dk devir sayısı ve 50  $\mu\text{m}$  eksenel kesme derinliği içeren optimum koşullarla benzer sonuçlar vermiştir, ancak 0,25  $\mu\text{m/z}$ 'lik biraz daha yüksek bir optimum ilerleme hızı vardır (Çizelge 4.6 ve Şekil 4.29). 0,75  $\mu\text{m/z}$  ilerleme hızının altında, kazınma etkisi nedeniyle düzensizlikler meydana gelmekte ve bu durum kesme kuvvetlerini artırmaktadır. Özellikle 0,5  $\mu\text{m/z}$  ilerleme hızında her iki kesme kuvvetinin de yüksek olması, bu duruma örnek teşkil etmektedir. İlerleme hızının 0,75  $\mu\text{m/z}$ 'nin üzerine çıkmasıyla birlikte talaş yükünde meydana gelen artışa bağlı olarak kesme kuvvetleri yükselmektedir. Nitekim, 0,1  $\mu\text{m/z}$  ve 0,25  $\mu\text{m/z}$  ilerleme hızlarında her iki kesme kuvvetinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir.  $F_x$  için optimum ilerleme hızı 0,1  $\mu\text{m/z}$  iken,  $F_y$  için bu değer 0,25  $\mu\text{m/z}$  olarak belirlenmiştir. Bu durum, 0,1  $\mu\text{m/z}$  ve 0,25  $\mu\text{m/z}$  ilerleme hızlarında talaş yükünün düşük olması, kazınma etkisinden baskın geldiği şeklinde yorumlanabilir.

**Çizelge 4.5**  $F_x$  teğetsel kuvvet sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu.

| Seviye                            | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | Delta  | Sıra |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| İlerleme hızı ( $\mu\text{m/z}$ ) | 1,4802 | 1,2583 | 1,1637 | 0,0027 | 0,9057 | 4,0570 | 5,5372 | 2    |
| Devir sayısı (dev/dk)             | 1,0715 | 0,6702 | 0,0491 |        |        |        | 1,1206 | 3    |
| Kesme derinliği ( $\mu\text{m}$ ) | 2,7686 | 0,8031 | 3,6581 |        |        |        | 6,4268 | 1    |

$F_x$  teğetsel kuvvet (N)

Main Effects Plot for SN ratios  
Data Means



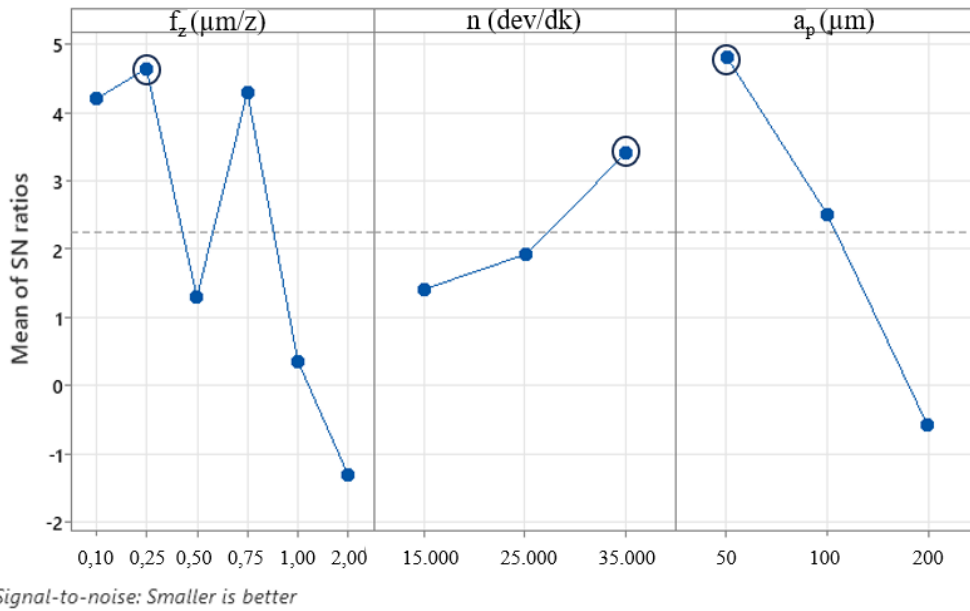
Şekil 4.28  $F_x$  teğetsel kuvvet için S/N oranı grafiği (smaller is better).

Çizelge 4.6  $F_y$  ilerleme kuvveti sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu.

| Seviye                            | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6       | Delta  | Sıra |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------|
| İlerleme hızı ( $\mu\text{m/z}$ ) | 4,1981 | 4,6374 | 1,3044 | 4,2915 | 0,3653 | -1,3039 | 5,9413 | 1    |
| Devir sayısı (dev/dk)             | 1,4169 | 1,9249 | 3,4046 |        |        |         | 1,9876 | 3    |
| Kesme derinliği ( $\mu\text{m}$ ) | 4,8085 | 2,5112 | 0,5732 |        |        |         | 5,3817 | 2    |

$F_y$  ilerleme kuvveti (N)

Main Effects Plot for SN ratios  
Data Means



Şekil 4.29  $F_y$  ilerleme kuvveti için S/N oranı grafiği (smaller is better).

#### 4.8.1.2 Cidar Deformasyonu

Deformasyon ölçümleri sonuçları Sinyal-gürültü oranı (S/N oranı) ve varyans analizi (ANOVA) yöntemleri ile analiz edilerek her bir parametrenin deformasyona olan katkısı belirlenmiştir. Gerçekleştirilen varyans analizi, en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu ve deformasyon değişimine %87.362 oranında katkıda bulunduğunu göstermiştir (Çizelge 4.7). Düşük ilerleme hızlarında kazınma etkisi nedeniyle iş parçasında deformasyon meydana gelirken, yüksek ilerleme hızlarında talaş yükünün artışıyla deformasyonun artması, ilerleme hızının cidar deformasyonu üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Bu etki, Çizelge 4.7’de p-değerinin oldukça küçük olmasıyla da kanıtlanmaktadır. Kesme kuvvetleri üzerinde baskın bir etkiye sahip olan eksenel kesme derinliğinin, cidar deformasyonu üzerinde aynı düzeyde belirgin bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Buna rağmen, ilerleme hızından sonra cidar deformasyonu üzerinde en etkili ikinci parametre olarak öne çıkmaktadır. Devir sayısının cidar deformasyonu üzerindeki etkisinin ise en düşük seviyede olduğu belirlenmiştir. Devir sayısının etkisinin minimal düzeyde olması, F değerinin 1’den küçük olması ile açıkça desteklenmektedir. Bu durum, devir sayısının cidar deformasyonu üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını ve bu parametrenin süreç performansına etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.7** Mikro frezelemede ince cidar deformasyonu için varyans analizi.

| Kaynak                                   | Serbestlik derecesi | Katkı  | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F-değeri | p-değeri |
|------------------------------------------|---------------------|--------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| İlerleme hızı ( $\mu\text{m}/\text{z}$ ) | 5                   | %87,36 | 3307,14         | 661,43             | 17,89    | 0,0004   |
| Devir sayısı (dev/dk)                    | 2                   | %1,588 | 60,11           | 30,06              | 0,81     | 0,4771   |
| Kesme derinliği ( $\mu\text{m}$ )        | 2                   | %3,236 | 122,49          | 61,25              | 1,66     | 0,2501   |
| Hata                                     | 8                   | %7,814 | 295,8           | 36,98              |          |          |
| Toplam                                   | 17                  | %100   | 3785,56         |                    |          |          |

Taguchi yönteminde S/N oran dönüşümünü kullanarak deneysel tasarım verilerinin analizinde, deformasyon değerleri için "smaller is better" kalite kriteri temel alınmıştır. Bu yaklaşım, deformasyonun minimize edilmesinin hedeflendiği durumlarda uygun bir değerlendirme ölçütü sağlamaktadır. Sürecin kararlılığını artırmak ve deformasyonu en

aza indirmek amacıyla, bu kalite özelliği dikkate alınarak S/N oranlarının optimize edilmesi gereklidir. Çizelge 4.8 ve Şekil 4.30'a göre, ince cidar deformasyonunun en düşük olduğu kesme parametreleri  $f_z = 0,75 \mu\text{m/z}$ ,  $n = 35.000 \text{ dev/dk}$  ve  $a_p = 50 \mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Devir sayısının artması ve kesme derinliğinin azalması, cidar deformasyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak, ilerleme hızının  $0,75 \mu\text{m/z}$  seviyesinin altına düşmesi durumunda, kazınma etkisi nedeniyle süreçte kararsızlıklar meydana gelmekte ve bu da cidar deformasyonunun artmasına yol açmaktadır. Öte yandan, ilerleme hızının  $1 \mu\text{m/z}$  ve üzerine çıkmasıyla kesici takım üzerindeki talaş yükü artmakta, bu da cidar deformasyonunda artışa neden olmaktadır. İlerleme hızının  $2 \mu\text{m/z}$  seviyesine ulaşmasıyla deformasyon maksimum değerine ulaşmaktadır.

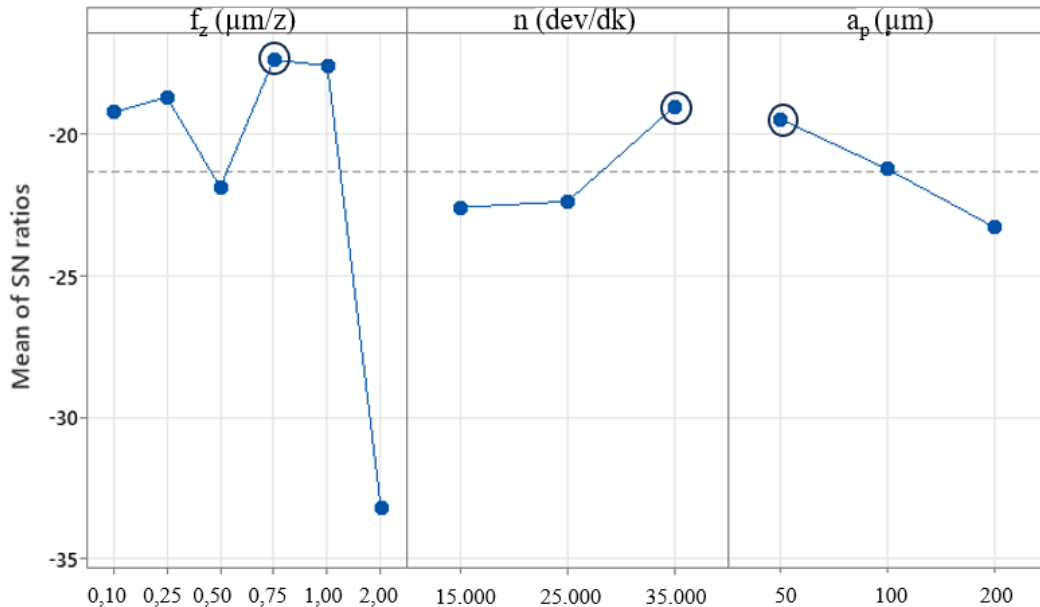
**Çizelge 4.8** İnce cidar deformasyon sinyal/gürültü oranlarına ilişkin yanıt tablosu.

| Seviye                            | 1      | 2      | 3      | 4      | 5     | 6     | Delta | Sıra |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| İlerleme hızı ( $\mu\text{m/z}$ ) | -19,24 | -18,7  | -21,87 | -17,38 | -17,6 | -33,2 | 15,82 | 1    |
| Devir sayısı (dev/dk)             | -22,58 | -22,37 | -19,04 |        |       |       |       | 3    |
| Kesme derinliği ( $\mu\text{m}$ ) | -19,48 | -21,24 | -23,28 |        |       |       |       | 2    |

Deformasyon, ( $\mu\text{m}$ )

Main Effects Plot for SN ratios

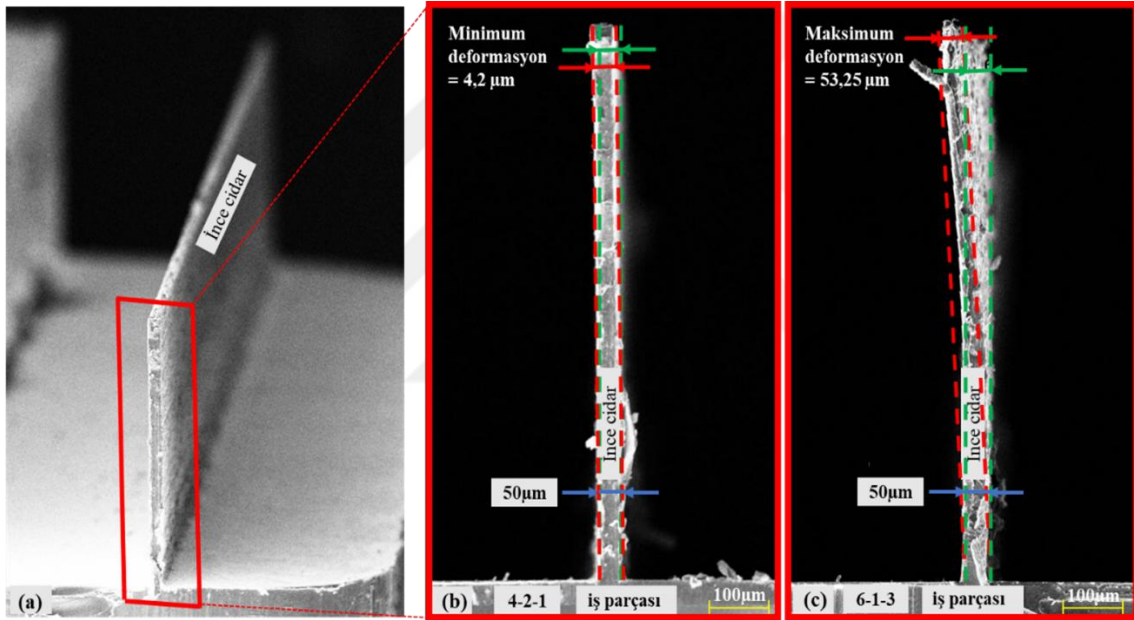
Data Means



Signal-to-noise: Smaller is better

**Şekil 4.30** İnce cidar deformasyonu için S/N oranı grafiği (smaller is better).

Mikro frezeleme testleri esnasında kesme işlemi ve iş parçasındaki deformasyon USB mikroskop kullanılarak gözlenmiştir. İnce cidardaki deformasyon, optik profilometre cihazı kullanılarak ölçülmüş ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünde deformasyon miktarı görüntülenmiştir. Deformasyon açısından en iyi ve en kötü sonucu veren ince cidar geometrilerindeki deformasyon kıyaslanmıştır (Şekil 4.31). L18 deney tasarımında Çizelge 3.3’de sırasıyla 4-2-1 nolu kesme parametrelerinde ( $f_z = 0,75 \mu\text{m/z}$ ,  $n = 25.000 \text{ dev/dk}$  ve  $a_p = 50 \mu\text{m}$ ) yapılan kesme deneyi en iyi sonucu verirken, 6-1-3 nolu kesme parametrelerinde ( $f_z = 2 \mu\text{m/z}$ ,  $n = 15.000 \text{ dev/dk}$  ve  $a_p = 200 \mu\text{m}$ ) yapılan kesme deneyden en kötü deformasyon sonucu elde edilmiştir.

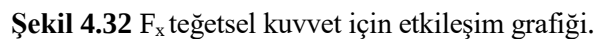


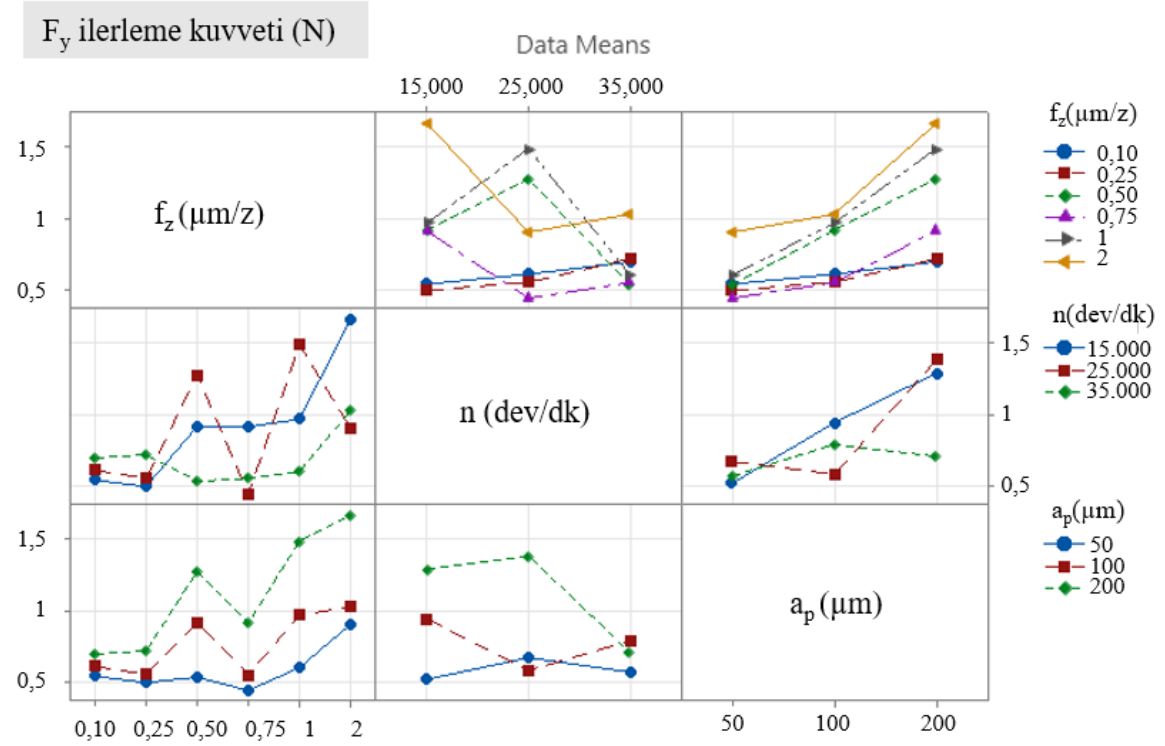
**Şekil 4.31** (a) İşlenmiş ince cidarlı yapının genel bir görünümü, (b) minimum ve (c) maksimum deformasyona sahip mikro ince cidar geometrileri.

#### 4.8.2 Kesme Parametreleri Arasındaki Etkileşim

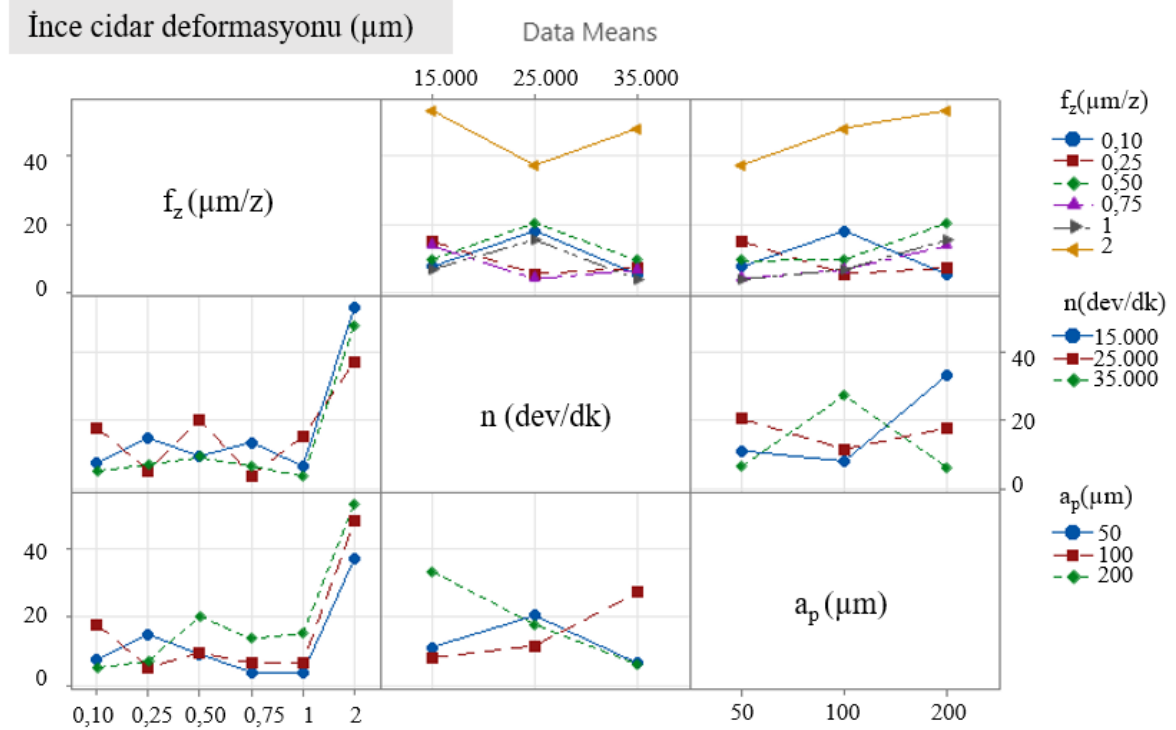
Kesme parametrelerinin birbirleri arasındaki etkileşim oldukça önemlidir. Etkileşim grafikleri ile bir girdi parametresinin seviye değişimini diğer bir girdi parametresi seviye değişimi ile karşılaştırabilmek mümkündür. Grafikler, hangi girdi parametresi seviyesinin istenen performansı sağladığını görsel olarak belirlemede yardımcı olur. Eğer grafikte çizgiler paralel değilse, bu faktörler arasında etkileşim olduğu anlamına gelir. Bu, bir faktörün etkisinin diğer faktörlere bağlı olduğunu gösterir (Ramesh

Sonuçlar, ilerleme hızı, eksenel kesme derinliği ve devir sayısının işlem performansını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. şekil 4.32 ve 4.33’deki ilerleme hızı ve kesme derinliğinin keşistiği çizgilerin paralel olduğu görülmektedir. Bu durum, bu iki parametrenin değişiminin birbirinden bağımsız şekilde kesme kuvvetlerini etkilediği şeklinde yorumlanabilir. şekil 4.34’de çizgilerin paralel olmadığı, dolayısıyla kesme parametrelerin cidar deformasyonu açısından birbirleri ile etkileşimde olduğu anlaşılmaktadır.



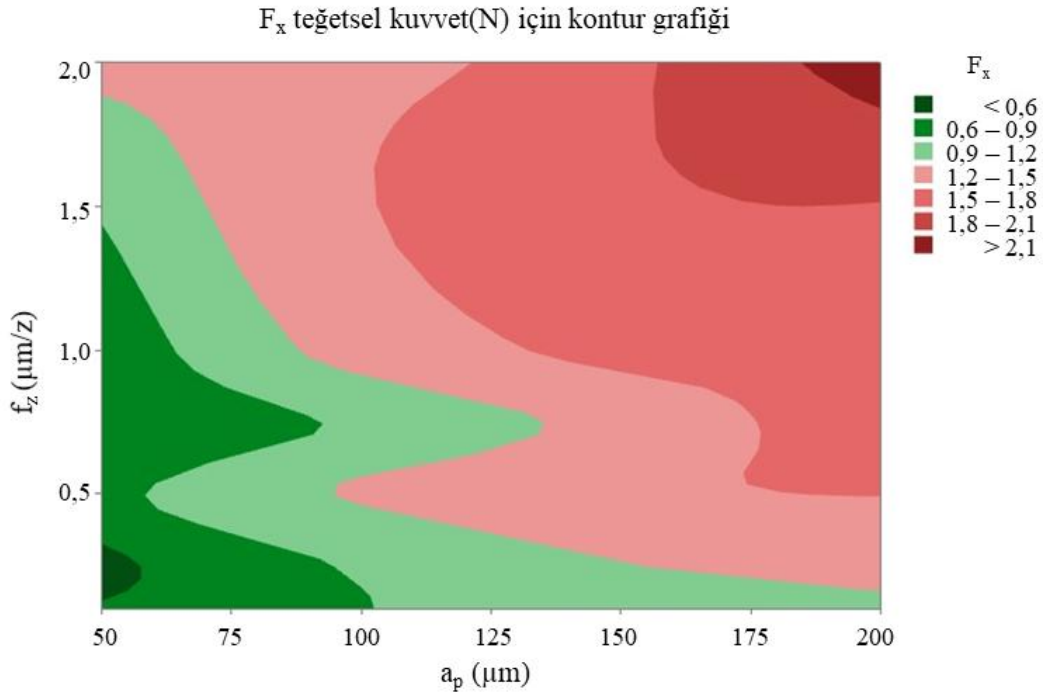


Şekil 4.33 F<sub>y</sub> ilerleme kuvveti için etkileşim grafiği.

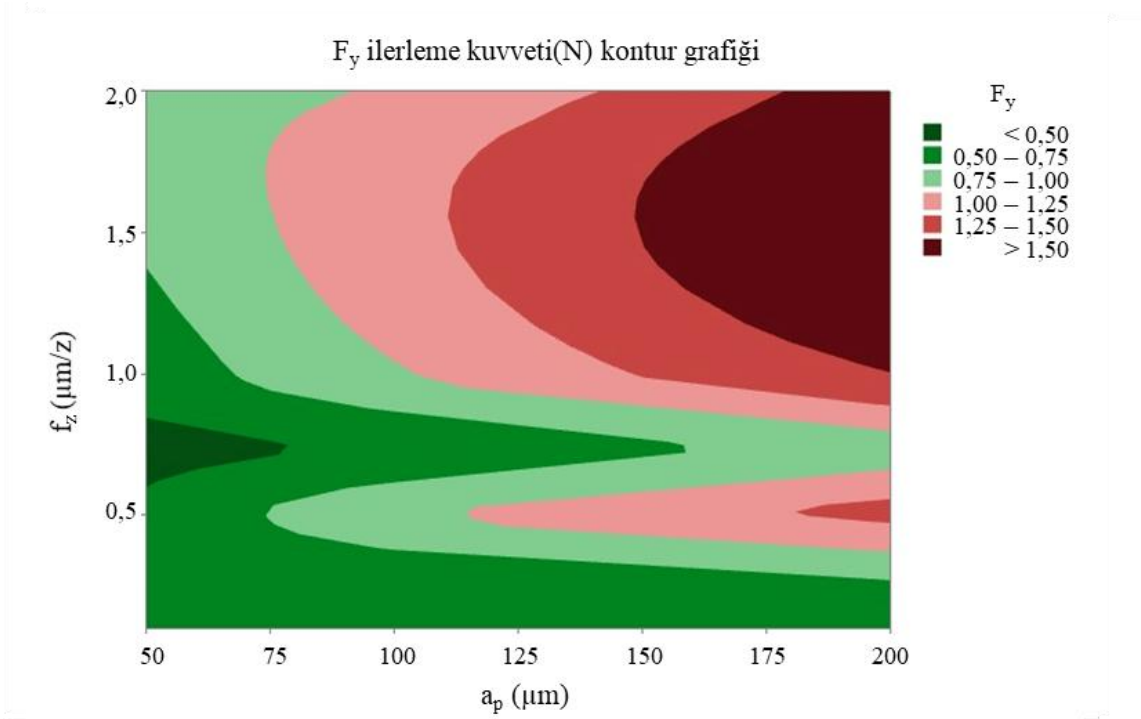


Şekil 4.34 İnce cidar deformasyonu için etkileşim grafiği.

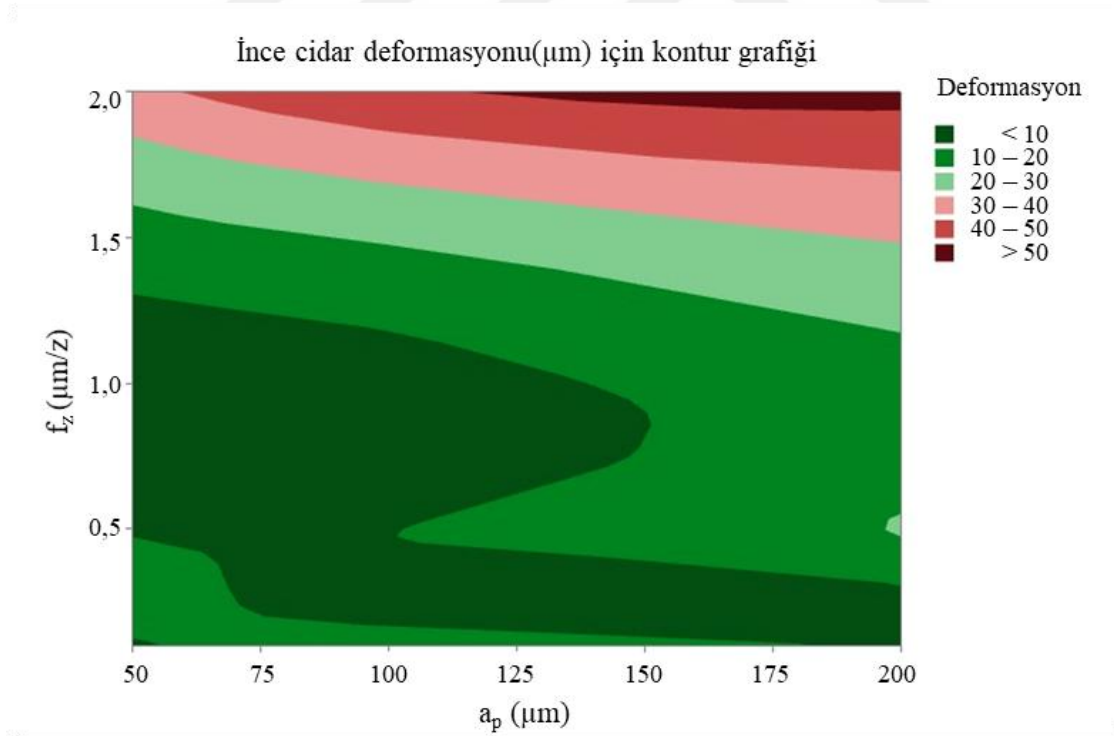
Kesme deneylerinin ardından yapılan optimizasyon çalışması, ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğindeki değişikliklerin kesme kuvvetlerini önemli ölçüde etkilediğini, iş mili hızının ise bu iki parametreye kıyasla nispeten sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. İnce cidar deformasyonu ile ilgili olarak, ilerleme hızı en kritik parametre olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, en etkili iki kesme parametresinin (ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliği)  $F_x$ ,  $F_y$  kesme kuvvetleri (Şekil 4.35 ve Şekil 4.36) ve ince cidar deformasyonu (Şekil 4.37) üzerindeki etkisi kontur grafikleri kullanılarak gösterilmeye çalışılmıştır. Bu grafikler, birden fazla yanıt değişkeninin etkileşimini görselleştirerek optimum parametre aralıklarının belirlenmesini kolaylaştırır. Belirlenen optimum parametre aralıkları, yanıt tablolarından elde edilen sonuçlarla tutarlıydı. Genel olarak, kontur grafikleri daha düşük kesme derinlikleri ve ilerleme hızlarının daha düşük kesme kuvvetleri ve ince cidar deformasyonu ile sonuçlandığını göstermiştir. Bununla birlikte, kazınma etkisi nedeniyle, 0,6 ila 0,8  $\mu\text{m}/\text{z}$  aralığındaki ilerleme hızları, 0,6  $\mu\text{m}/\text{z}$ 'nin altındakilere göre daha iyi sonuçlar sağlamıştır. Bu gözlem, mikro frezeleme işlemlerinde işlem kararlılığını ve deformasyonu etkilemede ilerleme hızının baskın rolünün altını çizmektedir.



**Şekil 4.35**  $F_x$  teğetsel kuvvet için ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin kontur grafiği.



Şekil 4.36  $F_y$  ilerleme kuvveti için ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin kontur grafiği.



Şekil 4.37 İnce cidar deformasyonu için ilerleme hızı ve eksenel kesme derinliğinin kontur grafiği.

#### 4.8.3 Regresyon Modelleme Analizi ve Optimizasyon Sonuçlarının Doğrulanması

Minitab yazılımı kullanılarak ince cidar deformasyonu (1),  $F_x$  (2) ve  $F_y$  (3) kesme kuvvetleri için birinci dereceden matematiksel modeller geliştirildi. Doğrusal regresyon sonuçlarını incelendiğinde, modelin doğruluğunu ifade eden  $R$  Square ( $R^2$ ) varyasyon yüzdesi  $F_x$  için %96,55,  $F_y$  için %96,06 ve cidar deformasyonu için %92,19'dur.

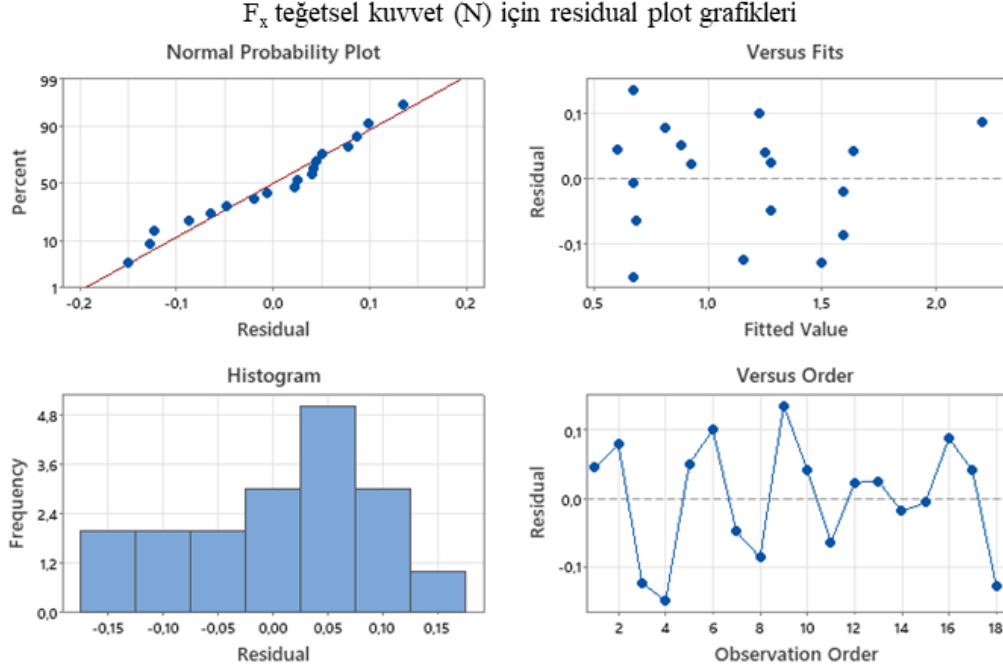
$$\begin{aligned} \text{İşlenmiş ince cidar deformasyonu} = & 16.09 - 5.62 f_{z_{0.10}} - 6.67 f_{z_{0.25}} - 2.82 f_{z_{0.5}} - 7.75 f_{z_{0.75}} - \\ & 7.24 f_{z_1} + 30.1 f_{z_2} + 1.72 n_{15000} + 0.81 n_{25000} - 2.53 n_{35000} - 3.12 a_{p_{50}} - 0.14 a_{p_{100}} + 3.26 a_{p_{200}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_x = & 1.1476 - 0.2886 f_{z_{0.10}} - 0.2199 f_{z_{0.25}} + 0.0331 f_{z_{0.5}} - 0.0619 f_{z_{0.75}} + 0.0334 f_{z_1} + \\ & 0.5041 f_{z_2} + 0.1321 n_{15000} - 0.0111 n_{25000} - 0.1209 n_{35000} - 0.3868 a_{p_{50}} - 0.0341 a_{p_{100}} + \\ & 0.4209 a_{p_{200}} \end{aligned} \quad (2)$$

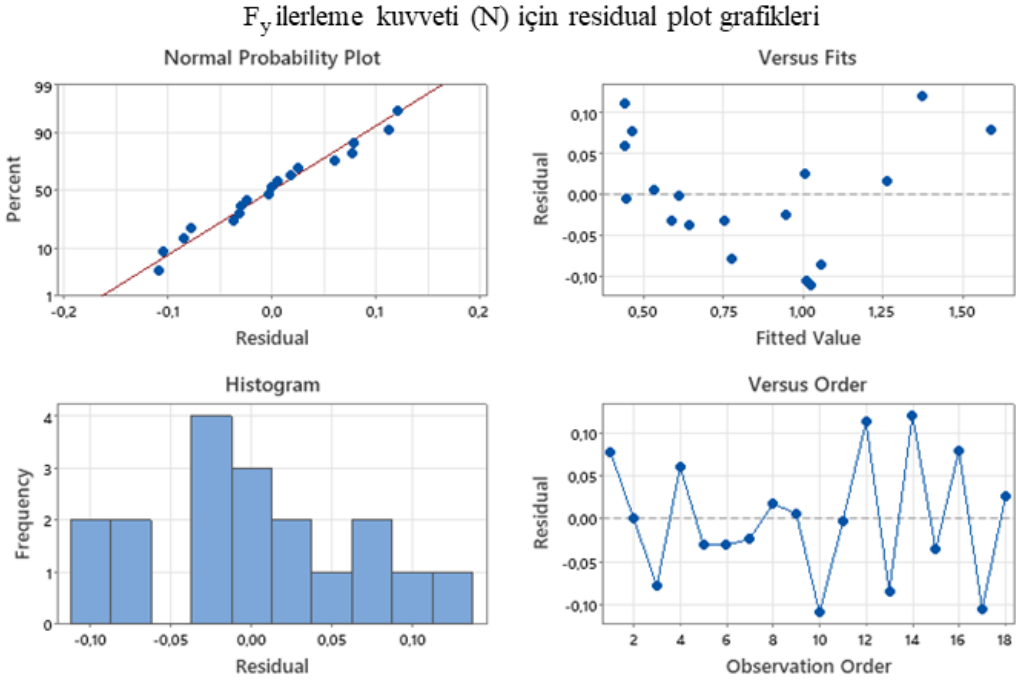
$$\begin{aligned} F_y = & 0.8327 - 0.2127 f_{z_{0.10}} - 0.2393 f_{z_{0.25}} + 0.0817 f_{z_{0.5}} - 0.1930 f_{z_{0.75}} + 0.1917 f_{z_1} + \\ & 0.3717 f_{z_2} + 0.0890 n_{15000} + 0.0505 n_{25000} - 0.1395 n_{35000} - 0.2418 a_{p_{50}} - 0.0566 a_{p_{100}} + \\ & 0.2985 a_{p_{200}} \end{aligned} \quad (3)$$

Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40'da kesme kuvvetleri ile ince cidar deformasyonu için tahmin edilen değerler, gerçek değerlerin bir fonksiyonu olarak sunulmaktadır. Bu grafikler, modelin tahmin edilebilme kabiliyeti açısından önemli bir görsel kanıt sunmaktadır. Normal Probability Plot, modelin doğruluğunu ve uygunluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır. Grafikte, verilerin düz bir çizgi boyunca sıralanması, modelin tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde gösterdiğinin kanıtıdır. Histogram grafiği, modelden elde edilen kalıntıların dağılımını analiz etme imkanı sağlamaktadır. Grafiklerde, kalıntıların normal bir dağılım sergilediği, çarpıklık içermediği ve aykırı değerlerin bulunmadığı görülmektedir. Bu durum, verilerin doğrusal regresyon analizine uygun olduğunu ve modelin istatistiksel varsayımlarını karşıladığını desteklemektedir. Versus Fits ve Versus Order grafikleri, kalıntıların davranışını incelemek için kullanılmıştır. Versus Fits grafiği, kalıntıların 0 çizgisi etrafında rastgele bir şekilde dağıldığını ve herhangi bir sistematik desen sergilemediğini göstermektedir. Bu durum, varyansın sabit olduğunu ve modelin doğrusal yapısına uygun olduğunu doğrulamaktadır. Benzer şekilde, Versus Order grafiği de kalıntıların ölçüm sırasına göre

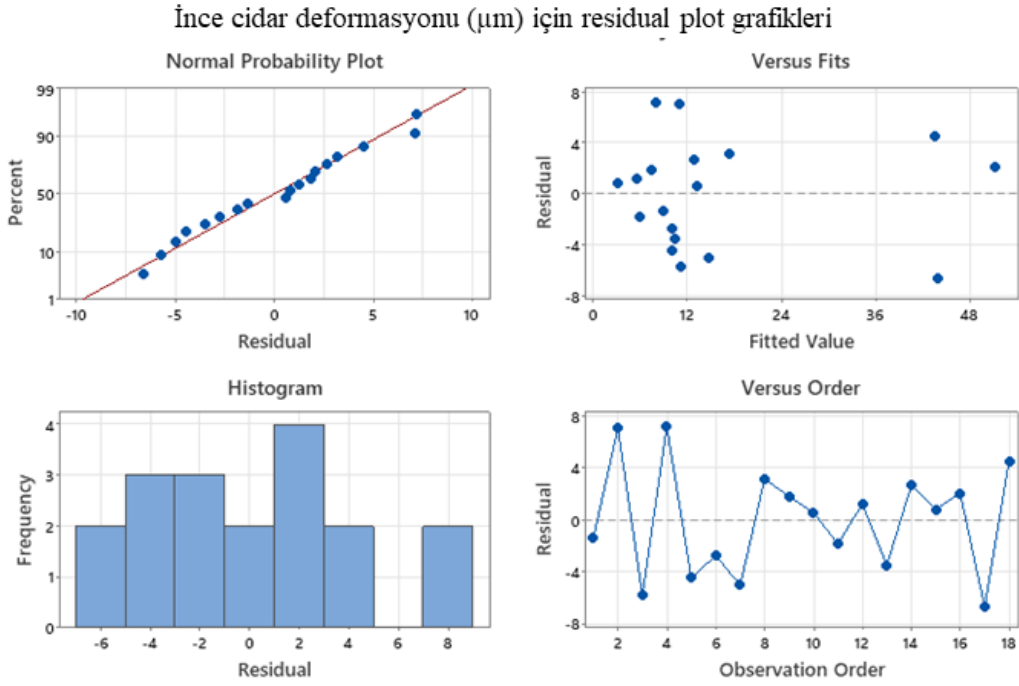
rastgele dağıldığını göstermektedir. Bu rastgelelik, verilerin modelin parametre tahminlerinin güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır (Saber vd. 2023, Pitjamit vd. 2025).



Şekil 4.38  $F_x$  teğetsel kuvvete ait hata analizi.



Şekil 4.39  $F_y$  ilerleme kuvvetine ait hata analizi.



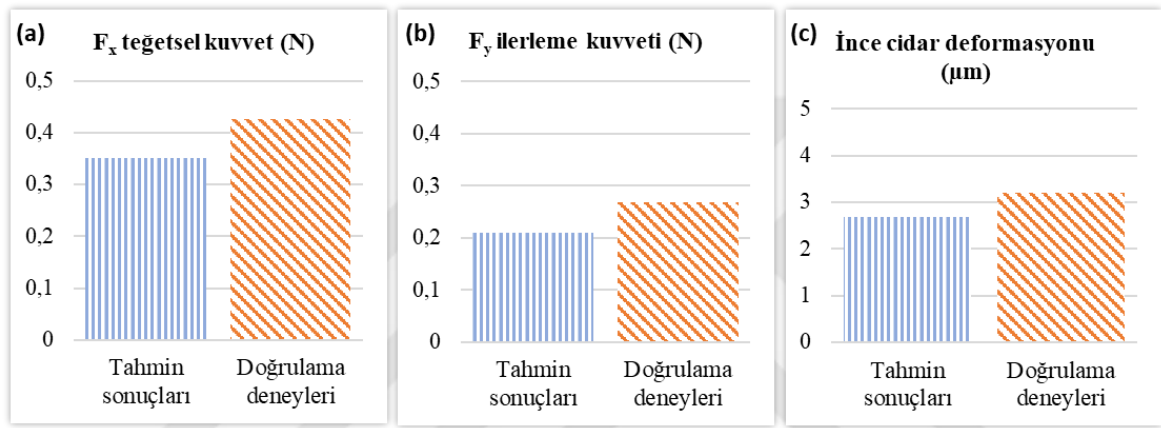
**Şekil 4.40** İnce cidarlı yapıların deformasyonuna ait hata analizi.

Sonuç olarak, tüm bu grafiklerin birlikte değerlendirilmesi, modelin istatistiksel olarak güvenilir ve doğruluk açısından tatmin edici olduğunu kanıtlamaktadır. Bu analizler, modelin kesme kuvvetleri ve ince cidar deformasyonu üzerindeki tahmin yeteneğinin güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Taguchi yaklaşımı ile gerçekleştirilen kesme parametreleri optimizasyonu sonucunda en düşük kesme kuvvetleri ve ince cidar deformasyonu 35.000 dev/dk devir sayısı ve 50  $\mu\text{m}$  aksel kesme derinliğinde gerçekleşmiştir. Üç çıktı parametresi için de optimum devir sayısı ve kesme derinliği parametreleri aynı olsa da ilerleme hızı parametresi farklıdır. Optimum ilerleme hızı  $F_x$  için 0,1  $\mu\text{m}/\text{z}$ ,  $F_y$  için 0,25  $\mu\text{m}/\text{z}$ , ince cidar deformasyonu için ise 0,75  $\mu\text{m}/\text{z}$  dir. Bu üç kombinasyon da L18 deney tasarımındaki kesme parametreleri arasında yer almamaktadır. Bu sebeple optimum parametreler  $F_x$  için,  $f_z=0,1 \mu\text{m}/\text{z}$ ,  $n=35.000 \text{ dev/dk}$ ,  $a_p=50 \mu\text{m}$ ,  $F_y$  için,  $f_z=0,25 \mu\text{m}/\text{z}$ ,  $n=35.000 \text{ dev/dk}$ ,  $a_p=50 \mu\text{m}$  ve ince cidar deformasyonu için,  $f_z=0,75 \mu\text{m}/\text{z}$ ,  $n=35.000 \text{ dev/dk}$ ,  $a_p=50 \mu\text{m}$  parametrelerinde doğrulama deneyleri yapılmıştır (Çizelge 4.9). Sonuçlar Taguchi metodunda tahmin edilen verilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.41). Doğrulama deney sonuçları ile Taguchi tahmin sonuçları ortalama %23,11 hata ile eşleşmektedir.

**Çizelge 4.9** Tahmin sonuçları ile doğrulama deney sonuçlarının kıyaslanması ve hata oranları.

| Çıktı parametreleri                       | Girdi parametreleri                                                        | Tahmin sonuçları | Doğrulama deneyleri | Hata % |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|--------|
| $F_x$ teğetsel kuvvet (N)                 | $f_z=0,1\mu\text{m/z}$ , $n=35.000\text{dev/dk}$ ,<br>$a_p=50\mu\text{m}$  | 0,35             | 0,428               | 22,28  |
| $F_y$ ilerleme kuvveti (N)                | $f_z=0,25\mu\text{m/z}$ , $n=35.000\text{dev/dk}$ ,<br>$a_p=50\mu\text{m}$ | 0,21             | 0,268               | 27,62  |
| İnce cidar deformasyonu ( $\mu\text{m}$ ) | $f_z=0,75\mu\text{m/z}$ , $n=35.000\text{dev/dk}$ ,<br>$a_p=50\mu\text{m}$ | 2,69             | 3,213               | 19,44  |



**Şekil 4.41** Doğrulama deneylerinin sonuçları (a)  $F_x$  teğetsel kuvvet, (b)  $F_y$  ilerleme kuvveti, (c) ince cidar deformasyonu.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, Al 6061-T6 alüminyum alaşımından üretilen iş parçaları üzerinde, tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak mikro frezeleme işlemi gerçekleştirilmiş ve hassas ince cidar geometrileri elde edilmiştir. İşlem sırasında oluşan kesme kuvvetleri ( $F_x$  ve  $F_y$ ), yüksek hassasiyetli sensörler aracılığıyla kaydedilmiş ve farklı kesme parametreleri altındaki davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yüzey kalitesi ve cidar deformasyonlarının ayrıntılı biçimde analiz edilebilmesi için optik profilometre cihazı ile 3B yüzey taramaları yapılmış; cidar deformasyonu ve yüzey pürüzlülüğü nicel olarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında, literatürde ilk kez bu tezde uygulanan değişken ilerleme stratejisiyle, özellikle kesme işleminin başlangıç ve bitiş noktalarındaki plastik deformasyonların azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca, kesme yönü (eş, zıt ve kombinasyonlu) ve dört farklı kesme stratejisinin cidar deformasyonu üzerindeki etkileri sistematik biçimde incelenmiştir. Bununla birlikte, farklı talaş açılarına ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ) sahip kesici takımlar ile çeşitli kaplama türlerinin (AlTiN, TiSiN, ZrN, DLC) yüzey kalitesi ve cidar deformasyonu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Kesme parametrelerinin optimizasyonu amacıyla Taguchi L18 ortogonal deney tasarımı kullanılmış ve elde edilen deneysel veriler varyans analizi (ANOVA) ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Mikro frezeleme işlemleri sonucunda elde edilen cidar deformasyonları, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri arasındaki ilişkiler belirlenmiş; ayrıca kesme sonrası elde edilen SEM görüntüleri üzerinden deformasyon biçimleri ve çapak oluşumu detaylı şekilde incelenmiştir. Çalışmanın öne çıkan sonuçlarını aşağıda gibi özetlemek mümkündür.

- Mikro frezeleme işleminde minimum kesilmemiş talaş kalınlığının (MUCT) doğru şekilde belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu sınırın altındaki ilerleme hızlarında kesme işlemi yerini kazınma (ploughing) mekanizmasına bıraktığı için, cidar deformasyonunun anlamlı şekilde arttığı gözlemlenmiştir. İş parçası ve kesici takım çifti için MUCT'nin  $0,5 \mu\text{m}$  ile  $0,7 \mu\text{m}$  arasında olduğu tespit edilmiştir. Kesici kenar yarıçapının ( $R_e$ ),  $2,8 \mu\text{m}$  ölçüldüğü dikkate alındığında, MUCT,  $R_e$  'nin %18-25'i aralığına karşılık gelmektedir.
- İlerleme hızı minimum talaş kalınlığının üzerine çıktığında ise cidar

deformasyonu ilerleme ile birlikte doğrusal olarak artmakta; bu artış, kesme kuvvetlerindeki yükselme ile doğrudan ilişkilendirilmektedir.

- Literatürde ilk kez bu çalışmada uygulanan değişken ilerleme hızları, cidar deformasyonunun azaltılmasında etkili olmuş; ancak, giriş ve çıkış bölgelerinde kullanılan ilerleme değerlerinin minimum talaş kalınlığının üzerinde olması gerektiği belirlenmiştir.
- Değişken ilerleme stratejisi ile sabit ilerleme hızına kıyasla cidar deformasyonunun %19 ila %47 arasında azaldığı tespit edilmiştir.
- Al 6061-T6 iş parçasının 1 mm çapındaki tungsten karbür kesici ile işlenmesi sonucu, en düşük cidar deformasyonu 6,5  $\mu\text{m}$  olmak üzere; giriş ve çıkış hızının 0,5  $\mu\text{m}/\text{z}$ , maksimum ilerleme hızının ise 0,7  $\mu\text{m}/\text{z}$  olduğu varyantta elde edilmiştir.
- Gözlemlenen deformasyon yönelimi, kesme yönünün sabit şekilde zıt-zıt uygulanmasından kaynaklanmaktadır; deformasyonun girişte -y yönünde, çıkışta ise +y yönünde yoğunlaştığı belirlenmiştir.
- Uygulanan dört farklı kesme stratejisi arasında, cidar deformasyonunu en aza indiren stratejinin Strateji B ve Strateji D olduğu, çapak oluşumunu en etkin şekilde sınırlandıran stratejinin ise Strateji D olduğu belirlenmiştir.
- Kesme yönü karşılaştırıldığında; eş-eş ve zıt-zıt yönlü işlemlerde deformasyon yüksek seyretmiş, buna karşın eş-zıt yönlü kesme yöntemi ile cidar deformasyonunun 10 ila 15 kat azaldığı gözlemlenmiştir.
- XRD yöntemiyle yapılan kalıntı gerilme analizleri sonucunda, işlenmiş cidar yüzeylerinde bası gerilmelerinin olduğu tespit edilmiş; bu durum, zıt yönlü frezelemenin etkisiyle ilişkilendirilmiştir.
- Kesici takım kaplamaları incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü ve cidar deformasyonu ve çapak oluşumunu en düşük seviyeye indiren kaplama DLC olmuştur. Ardından ZrN ve birbirine yakın performans gösteren AlTiN ve TiSiN gelmekte; kaplamasız takımlar ise en düşük performansı sergilemektedir.
- DLC kaplama ile ince cidar deformasyonunu maksimum %54 oranında azaltılabilmektedir.
- Takım aşınması, cidar deformasyonu ve çapak oluşumunu olumsuz yönde etkilemiş; özellikle uç ve kenar yarıçapında artışa neden olarak işleme kalitesini

düşürmüştür.

- Kesici takım talaş açısının artmasıyla iş parçası yüzey kalitesinin iyileştiği görülmüş; 15° talaş açısına sahip kesiciler 0° ve 5° açılı kesicilere göre sırasıyla %22 ve %18 daha düşük  $F_x$  ve  $F_y$  kesme kuvvetleri üretmiş ve cidar deformasyonunu sırasıyla %64 ve %54 oranında azalmıştır.
- Kesme parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan Taguchi L18 deney dizisi, yüksek doğrulukla sonuçlar üretmiş; cidar deformasyonu,  $F_x$  ve  $F_y$  kesme kuvvetleri üzerindeki etkiler sırasıyla %92,19, %96,55 ve %96,06  $R^2$  güven düzeyiyle modellenmiştir.
- Parametre etkileri incelendiğinde,  $F_x$  üzerinde en etkili faktör %56,94 ile kesme derinliği,  $F_y$  üzerinde %45,3 ile ilerleme hızı, cidar deformasyonu üzerinde ise %87,36 etki oranıyla ilerleme hızı olmuştur.
- İnce cidar deformasyonunun minimuma indirildiği optimum kesme parametreleri;  $f_z = 0,75 \mu\text{m/z}$ ,  $n = 35.000 \text{ dev/dk}$  ve  $a_p = 50 \mu\text{m}$  olarak belirlenmiş ve Taguchi tahmin modeli ile %19,44 ortalama hata oranı ile doğrulanmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda; mikro frezeleme işlemlerinde talaş yapışması (sıvanması) ve takım aşınmasının işleme kalitesi üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı ve sistematik biçimde incelenerek standartlaştırılması; ince cidarlı yapıların işlenmesi sırasında oluşan kalıntı gerilmelerin analizi ve bu gerilmelerin işlenmiş yüzey üzerindeki etkilerinin araştırılması; ayrıca, farklı kesme stratejilerinde değişken ilerleme hızlarının uygulanarak bu stratejilere özgü katkılarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi yönünde çalışmalar yapılması mümkündür.

## 6. KAYNAKLAR

- Abdolvand H, Sohrabi H, Faraji G, Yusof F, 2015, A Novel Combined Severe Plastic Deformation Method For Producing Thin-Walled Ultrafine Grained Cylindrical Tubes, *Materials Letters*, 143, 167–171.
- Adamski W, 2010, Manufacturing Development Strategies In Aviation Industry, *Advances In Manufacturing Science And Technology*, 34(3), 73–84.
- Aditharajan A, Radhika N, Saleh B, 2023, Recent Advances And Challenges Associated With Thin Film Coatings Of Cutting Tools: A Critical Review, *Transactions Of The IMF*, 101(4), 205–221.
- 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*, February.
- Aijun T, Zhanqiang L, 2008, Deformations Of Thin-Walled Plate Due To Static End Milling Force, *Journal Of Materials Processing Technology*, 206(1–3), 345–351.
- Al-Asadi M M, Al-Tameemi H A, 2022, A Review Of Tribological Properties And Deposition Methods For Selected Hard Protective Coatings, *Tribology International*, 176, 107919.
- Ali S, Abdallah S, Pervaiz S, 2022, Predicting Cutting Force And Primary Shear Behavior In Micro-Textured Tools Assisted Machining Of AISI 630: Numerical Modeling And Taguchi Analysis, *Micromachines*, 13(1).
- Altan İ, 2024, Talaşlı İmalat Uygulamalarında İdeal İşleme Parametrelerinin Belirlenebilmesi İçin Özel Bir Ölçüm Düzeneginin Geliştirilmesi Ve  $CuAl_{14}Fe_{4}Mn_2$ ,  $X_{CrNiMoTi_{17}}$  VE  $Al_{50}Zn_{50}$  Malzemeleri Özelinde Taguchi Yöntemi İle Değerlendirilmesi.
- Altintas Y, 2012, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, And CNC Design* (2nd Editio), Cambridge.
- Altintas Y, Montgomery D, Budak E, 1992, Dynamic Peripheral Milling Of Flexible Structures, *Journal Of Engineering For Industry*, 114(2), 137–145.

- Annoni M, Rebaioli L, Semeraro Q, 2015, Thin Wall Geometrical Quality Improvement In Micromilling, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 79(5–8), 881–895.
- Arnaud L, Gonzalo O, Seguy S, Jauregi H, Peigné G, 2011, Simulation Of Low Rigidity Part Machining Applied To Thin-Walled Structures, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5–8), 479–488.
- Arrazola P J, Özel T, Umbrello D, Davies M, Jawahir I S, 2013, Recent Advances In Modelling Of Metal Machining Processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(2), 695–718.
- Arunachalam R M, Mannan M A, Spowage A C, 2004, Surface Integrity When Machining Age Hardened Inconel 718 With Coated Carbide Cutting Tools, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 44(14), 1481–1491.
- Aslani K E, Chaidas D, Kechagias J, Kyratsis P, Salonitis K, 2020, Quality Performance Evaluation Of Thinwalled PLA 3D Printed Parts Using The Taguchi Method And Grey Relational Analysis, *Journal Of Manufacturing And Materials Processing*, 4(2).
- Aslantas K, Ekici E, Çiçek A, 2018, Optimization Of Process Parameters For Micromilling Of Ti-6Al-4V Alloy Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis, Measurement: *Journal Of The International Measurement Confederation*, 128, 419–427.
- Aslantas K, Hascelik A, Çiçek A, 2022, Performance Evaluation Of DLC And NCD Coatings In Micro-Milling Of Al7075-T6 Alloy, *Journal Of Manufacturing Processes*, 81, 976–990.
- Aslantas K, Hasçelik A, Erçetin A, Danish M, Alatrushi L K H, Rubaiee S, Bin Mahfouz A, 2024, Effect Of Cutting Conditions On Tool Wear And Wear Mechanism In Micro-Milling Of Additively Manufactured Titanium Alloy, *Tribology International*, 193, 109340.
- Assurin S R, Mativenga P, Rajab F, Cooke K, Field S, 2021, Laser De-Coating Of Hard DLC Coatings From Tungsten Carbide Cutting Tool, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 235(1–2),

13–22.

- Aurich J C, Kirsch D, 2016, High Performance Micro Milling Of Titanium Alloys With AlTiN Coated Tools, *Procedia CIRP*, 46, 83–86.
- Awan W S, Mabrouki T, 2017, Numerical And Experimental Investigations Of Post-Machining Distortions In Thin Machined Structures Considering Material-Induced Residual Stress, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 39(2), 509–521.
- Bagheri P, Torabi A R, Bahrami B, 2023, A New Strategy For Predicting Fracture Of U-Notched Specimens Made Of Al-6061-T6 And Al-5083 Using Extended Finite Element Method, *Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures*, 46(9), 3404–3416.
- Bahceci E, 2019, Characterization Of Atomic Layer Deposition Coated Cutting Tools By X-Ray Photoelectron Spectroscopy And Examination Of Cutting Performance, *Spectroscopy Letters*, 52(8), 456–461.
- Bahrami T, 2022, Ürün Tasarımı Geliştirmesinde Taguchi Deney Tasarımının Uygulanması, Temmuz.
- Balázs B Z, Geier N, Takács M, Davim J P, 2021, A Review On Micro-Milling: Recent Advances And Future Trends, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3–4), 655–684.
- Bałon P, Rejman E, Smusz R, Szostak J, Kiełbasa B, 2018, Implementation Of High Speed Machining In Thin-Walled Aircraft Integral Elements, *Open Engineering*, 8(1), 162–169.
- Bałon P, Rejman E, Świątoniowski A, Kiełbasa B, Smusz R, Szostak J, Cieślík J, Kowalski Ł, 2020, Thin-Walled Integral Constructions In Aircraft Industry, *Procedia Manufacturing*, 47(2019), 498–504.
- Bao Y, Wang B, He Z, Kang R, Guo J, 2022, Recent Progress In Flexible Supporting Technology For Aerospace Thin-Walled Parts: A Review, *Chinese Journal Of Aeronautics*, 35(3), 10–26.
- Barbacki A, Kawalec M, Hamrol A, 2003, Turning And Grinding As A Source Of

- Microstructural Changes In The Surface Layer Of Hardened Steel, *Journal Of Materials Processing Technology*, 133(1–2), 21–25.
- Becker N, Kuhn D, Piochowiak J, Klusemann B, 2025, Fatigue Life Enhancement Via Residual Stress Engineering Due To Local Forming During Refill Friction Stir Spot Welding, *Journal Of Materials Research And Technology*, 36, 2951–2959.
- Berghout T, Mouss L H, Kadri O, Saïdi L, Benbouzid M, 2020, Aircraft Engines Remaining Useful Life Prediction With An Adaptive Denoising Online Sequential Extreme Learning Machine, *Engineering Applications Of Artificial Intelligence*, 96, 103936.
- Bergmann B, Reimer S, 2021, Online Adaption Of Milling Parameters For A Stable And Productive Process, *CIRP Annals*, 70(1), 341–344.
- Bhagat K C, Kumar A, Thakur A, Gangopadhyay S, 2024, Analysis Of Cutting Forces And Surface Quality During Micro Milling Of AZ31B Magnesium Alloy, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*.
- Bhushan R K, Kumar S, Das S, 2010, Effect Of Machining Parameters On Surface Roughness And Tool Wear For 7075 Al Alloy Sic Composite, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 50(5–8), 459–469.
- Biermann D, Kersting P, Surmann T, 2010, A General Approach To Simulating Workpiece Vibrations During Five-Axis Milling Of Turbine Blades, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 125–128.
- Bing D, Guang-Bin Y, Yan-Qi G, Jun-Peng S, Xue-Mei W, Yu-Xin L, 2015, Machining Surface Quality Analysis Of Aluminum Alloy Thin-Walled Parts In Aerospace, *International Journal Of Security And Its Applications*, 9(11), 201–208.
- Bobzin K, 2017, High-Performance Coatings For Cutting Tools, *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 18, 1–9.
- Bolar G, Das A, Joshi S N, 2018, Measurement And Analysis Of Cutting Force And Product Surface Quality During End-Milling Of Thin-Wall Components, *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 121, 190–204.

- Bolar G, Joshi S N, 2014, 3D Finite Element Modeling Of Thin-Wall Machining Of Aluminum 7075-T6 Alloy \* Department Of Mechanical Engineering, Indian Institute Of Technology, Aimtdr, 1–6.
- Bolar G, Joshi S N, 2018, Numerical Modeling And Experimental Validation Of Machining Of Low-Rigidity Thin-Wall Parts, Lecture Notes On Multidisciplinary Industrial Engineering: C. Part F49.
- Borojevic S, Lukic D, Milošević M, Vukman J, Kramar D, 2018, Optimization Of Process Parameters For Machining Of Al 7075 Thin-Walled Structures, Advances In Production Engineering And Management, 13(2), 125–135.
- Bosheh S S, Mativenga P T, 2006, White Layer Formation In Hard Turning Of H13 Tool Steel At High Cutting Speeds Using CBN Tooling, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 46(2), 225–233.
- Bouazid Saï W, Ben Salah N, Lebrun J L, 2001, Influence Of Machining By Finishing Milling On Surface Characteristics, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 41(3), 443–450.
- Bravo U, Altuzarra O, López De Lacalle L N, Sánchez J A, Campa F J, 2005, Stability Limits Of Milling Considering The Flexibility Of The Workpiece And The Machine, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 45(15), 1669–1680.
- Brown M, M'Saoubi R, Crawford P, Mantle A, McGourlay J, Ghadbeigi H, 2022, On Deformation Characterisation Of Machined Surfaces And Machining-Induced White Layers In A Milled Titanium Alloy, Journal Of Materials Processing Technology, 299, 117378.
- Budak E, 1994, Mechanics And Dynamics Of Milling Thin Walled Structures, Diss. University Of British Columbia, 284.
- Budak E, 2006, Analytical Models For High Performance Milling. Part II: Process Dynamics And Stability, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 46(12–13), 1489–1499.
- Budak E, Tunç L T, Alan S, Özgüven H N, 2012, Prediction Of Workpiece Dynamics And Its Effects On Chatter Stability In Milling, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61(1), 339–342.

- Buğdaycı A R, Önal A, Yalçın B, 2023, Taguchi Approach On Stress-Displacement Analyses In The Mounted Type Chassis Of Agricultural Sprayer Machine, *Türk Doğa Ve Fen Dergisi*, 12(3), 78–85.
- Bull S, Bhat D, Staia M, 2003, Properties And Performance Of Commercial TiCN Coatings. Part 2: Tribological Performance, *Surface And Coatings Technology*, 163–164, 507–514.
- Burek J, Plodzien M, Zylka L, Sulkowicz P, 2019, High-Performance End Milling Of Aluminum Alloy: Influence Of Different Serrated Cutting Edge Tool Shapes On The Cutting Force, *Advances In Production Engineering And Management*, 14(4), 494–506.
- Cagan S C, Venkatesh B, Buldum B B, 2020, Investigation Of Surface Roughness And Chip Morphology Of Aluminum Alloy In Dry And Minimum Quantity Lubrication Machining, *Materials Today: Proceedings*, 27, 1122–1126.
- 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, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 51(1), 43–53.
- Campos F De O, Mougo A L, Araujo A C, 2017, Study Of The Cutting Forces On Micromilling Of An Aluminum Alloy, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 39(4), 1289–1296.
- Cao H, Lei Y, He Z, 2013, Chatter Identification In End Milling Process Using Wavelet Packets And Hilbert-Huang Transform, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 69, 11–19.
- Cao H, Yue Y, Chen X, Zhang X, 2018, Chatter Detection Based On Synchrosqueezing Transform And Statistical Indicators In Milling Process, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1–4), 961–972.
- Cao H, Zhou K, Chen X, 2015, Chatter Identification In End Milling Process Based On EEMD And Nonlinear Dimensionless Indicators, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 92, 52–59.
- Cerutti X, Mocellin K, 2016, Influence Of The Machining Sequence On The Residual Stress Redistribution And Machining Quality: Analysis And Improvement Using

- Numerical Simulations, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1–4), 489–503.
- Chae J, Park S S, Freiheit T, 2006, Investigation Of Micro-Cutting Operations, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 46(3–4), 313–332.
- Chao Y, Qi L, Xiao Y, Luo J, Zhou J, 2012, Manufacturing Of Micro Thin-Walled Metal Parts By Micro-Droplet Deposition, *Journal Of Materials Processing Technology*, 212(2), 484–491.
- Che-Haron C ., 2001, Tool Life And Surface Integrity In Turning Titanium Alloy, *Journal Of Materials Processing Technology*, 118(1–3), 231–237.
- Chen C, Chen F, Yang Y, Zhang H, 2021, Study On Appearance And Mechanical Behavior Of Additively Manufacturing Of Ti–6Al–4V Alloy By Using Cold Metal Transfer, *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 35, 250–258.
- Chen N, Li H N, Wu J, Li Z, Li L, Liu G, He N, 2021, Advances In Micro Milling: From Tool Fabrication To Process Outcomes, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 160, 103670.
- Chen P, Li X, He X, Cai Y, Zhao H, Ding H, 2021, Research On Force Control Based On Sim2Real Transfer For Stiffness Of Thin-Walled Parts, *Journal Of Mechanical Engineering*, 57(17), 53.
- Chen W, Lou P, Chen H, 2009, Active Compensation Methods Of Machining Deformation Of Thin-Walled Parts, *Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica*, 30(3), 570–576.
- Chen Y W, Huang Y F, Wu K T, Hwang S J, Lee H H, 2020, Cutting Force Validation And Volumetric Errors Compensation Of Thin Workpieces With Sensory Tool Holder, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 108(1–2), 299–312.
- Chen Y, Wang T, Zhang G, 2020, Research On Parameter Optimization Of Micro-Milling Al7075 Based On Edge-Size-Effect, *Micromachines*, 11(2), 197.
- Cheng D J, Xu F, Xu S-H, Zhang C Y, Zhang S W, Kim S-J, 2020, Minimization Of Surface Roughness And Machining Deformation In Milling Of Al Alloy Thin-

- Walled Parts, *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 21(9), 1597–1613.
- Cieciela K, Zaleski K, 2022, Milling Of Three Types Of Thin-Walled Elements Made Of Polymer Composite And Titanium And Aluminum Alloys Used In The Aviation Industry, *Materials*, 15(17).
- Cui C H, Zhu Z Q, Chen Z T, Li Y M, 2024, Surface Integrity And Fatigue Life Of GH4169 By Combined Process Of Milling, Grinding, And Polishing, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 238(13), 1914–1923.
- Dang X B, Wan M, Yang Y, Zhang W H, 2019, Efficient Prediction Of Varying Dynamic Characteristics In Thin-Wall Milling Using Freedom And Mode Reduction Methods, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 150, 202–216.
- Dang X B, Wan M, Zhang W H, Yang Y, 2021, Chatter Analysis And Mitigation Of Milling Of The Pocket-Shaped Thin-Walled Workpieces With Viscous Fluid, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 194, 106214.
- Dang X B, Wan M, Zhang W H, Yang Y, 2022, Stability Analysis Of The Milling Process Of The Thin Floor Structures, *Mechanical Systems And Signal Processing*, 165, 108311.
- Danish M, Aslantas K, Hascelik A, Rubaiee S, Gupta M K, Yildirim M B, Ahmed A, Mahfous A, Mahfouz A Bin, 2022, An Experimental Investigations On Effects Of Cooling/Lubrication Conditions In Micro Milling Of Additively Manufactured Inconel 718, *Tribology International*, 173, 107620.
- Davim J P, 2011, *Modern Machining Technology A Practical Guide* (August).
- De Paiva Silva G, De Oliveira D, Malcher L, 2023, Numerical Study Of The Minimum Uncut Chip Thickness In Micro-Machining Of Inconel 718 Based On Johnson–Cook Isothermal Model, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 127(5–6), 2707–2721.
- De Pasquale G, 2021, Additive Manufacturing Of Micro-Electro-Mechanical Systems (Mems), *Micromachines*, 12(11).

- De Souza A F, Berkenbrock E, Diniz A E, Rodrigues A R, 2015, Influences Of The Tool Path Strategy On The Machining Force When Milling Free Form Geometries With A Ball-End Cutting Tool, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 37(2), 675–687.
- Del Sol I, Rivero A, De Lacalle L N L, Gamez A J, 2019, Thin-Wall Machining Of Light Alloys: A Review Of Models And Industrial Approaches, *Materials*, 12(12).
- Denis S, Archambault P, Gautier E, Simon A, Beck G, 2002, Prediction Of Residual Stress And Distortion Of Ferrous And Non-Ferrous Metals: Current Status And Future Developments, *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 11(1), 92–102.
- Dhanorker A, Ozel T, 2008, Meso/Micro Scale Milling For Micro-Manufacturing, *International Journal Of Mechatronics And Manufacturing Systems*, 1(1), 23.
- Dib M H M, Duduch J G, Jasinevicius R G, 2018, Minimum Chip Thickness Determination By Means Of Cutting Force Signal In Micro Endmilling, *Precision Engineering*, 51, 244–262.
- Ding L, Zhang X, Richard Liu C, 2014, Dislocation Density And Grain Size Evolution In The Machining Of Al6061-T6 Alloys, *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, 136(4)
- Ding S, Yang D C H, Han Z, 2004, Flow Line Machining Of Turbine Blades, *International Conference On Intelligent Mechatronics And Automation, Proceedings*, 140–145.
- Ding S, Yang D C H, Han Z, 2005, Boundary-Conformed Machining Of Turbine Blades, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 219(3), 255–263.
- Ding Y, Zhu L, 2018, Investigation On Chatter Stability Of Thin-Walled Parts Considering Its Flexibility Based On Finite Element Analysis, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3173–3187.
- Dong H, Ji Y, Wang X, Bi Q, 2021, Stability Analysis Of Thin-Walled Parts End Milling Considering Cutting Depth Regeneration Effect, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 113(11–12), 3319–3328.

- Dornfeld D, Min S, Takeuchi Y, 2006, Recent Advances In Mechanical Micromachining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55(2), 745–768.
- Duan Z, Li C, Ding W, Zhang Y, Yang M, Gao T, Cao H, Xu X, Wang D, Mao C, Li H N, Kumar G M, Said Z, Debnath S, Jamil M, Ali H M, 2021, Milling Force Model For Aviation Aluminum Alloy: Academic Insight And Perspective Analysis, Chinese Journal Of Mechanical Engineering (English Edition), 34(1)
- Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, Larrouquère D, Zerrouki V, Vigneau J, 2004, A Review Of Developments Towards Dry And High Speed Machining Of Inconel 718 Alloy, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 44(4), 439–456.
- Duong T H, Chul K H, Yoon L D, 2012, Study On The Effect Of Rake Angle On Cutting Forces In Ultra-Precision Machining, Key Engineering Materials, 516, 551–556.
- El-Wardany T I, Kishawy H A, Elbestawi M A, 2000, Surface Integrity Of Die Material In High Speed Hard Machining, Part 2: Microhardness Variations And Residual Stresses, Journal Of Manufacturing Science And Engineering, 122(4), 632–641.
- Elbestawi M A A, Sagherian R, 1991, Dynamic Modeling For The Prediction Of Surface Errors In The Milling Of Thin-Walled Sections, Journal Of Materials Processing Technology, 25(2), 215–228.
- Erçetin A, Aslantas K, Özgün Ö, 2020, Micro-End Milling Of Biomedical Tz54 Magnesium Alloy Produced Through Powder Metallurgy, Machining Science And Technology, 24(6), 924–947.
- Ercetin A, Aslantaş K, Özgün Ö, Perçin M, Chandrashekarappa M P G, 2023, Optimization Of Machining Parameters To Minimize Cutting Forces And Surface Roughness In Micro-Milling Of Mg13Sn Alloy, Micromachines, 14(8).
- Fang Z Z, Wang X, Ryu T, Hwang K S, Sohn H Y, 2009, Synthesis, Sintering, And Mechanical Properties Of Nanocrystalline Cemented Tungsten Carbide – A Review, International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials, 27(2), 288–299.
- Fathi M, Heyhat M M, Zabetian Targhi M, Bigham S, 2023, Porous-Fin Microchannel Heat Sinks For Future Micro-Electronics Cooling, International Journal Of Heat And Mass Transfer, 202, 123662.

- Fei J, Lin B, Xiao J, Ding M, Yan S, Zhang X, Zhang J, 2018, Investigation Of Moving Fixture On Deformation Suppression During Milling Process Of Thin-Walled Structures, *Journal Of Manufacturing Processes*, 32, 403–411.
- Friedrich C R, Vasile M J, 1996, Development Of The Micromilling Process For High-Aspect-Ratio Microstructures, *Journal Of Microelectromechanical Systems*, 5(1), 33–38.
- Fu M W, Wang J L, 2021, Size Effects In Multi-Scale Materials Processing And Manufacturing, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture* (C. 167)
- Fu W-E, Cohen P H, Ruud C O, 2009, Experimental Investigation Of The Machining Induced Residual Stress Tensor Under Mechanical Loading, *Journal Of Manufacturing Processes*, 11(2), 88–96.
- Gao H, Zhang Y, Wu Q, Song J, 2017, An Analytical Model For Predicting The Machining Deformation Of A Plate Blank Considers Biaxial Initial Residual Stresses, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1–4), 1473–1486.
- Gao T, Zhang Y, Li C, Wang Y, Chen Y, An Q, Zhang S, Li H N, Cao H, Ali H M, Zhou Z, Sharma S, 2022, Fiber-Reinforced Composites In Milling And Grinding: Machining Bottlenecks And Advanced Strategies, *Frontiers Of Mechanical Engineering*, 17(2), 24.
- Gao X, Cheng X, Ling S, Zheng G, Li Y, Liu H, 2022, Research On Optimization Of Micro-Milling Process For Curved Thin Wall Structure, *Precision Engineering*, 73, 296–312.
- Gao Y Y, Ma J W, Jia Z Y, Wang F J, Si L K, Song D N, 2016, Tool Path Planning And Machining Deformation Compensation In High-Speed Milling For Difficult-To-Machine Material Thin-Walled Parts With Curved Surface, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9–12), 1757–1767.
- Ge G, Xiao Y, Feng X, Du Z, 2022, An Efficient Prediction Method For The Dynamic Deformation Of Thin-Walled Parts In Flank Milling, *Computer-Aided Design*, 152, 103401.
- Gologlu C, Sakarya N, 2008, The Effects Of Cutter Path Strategies On Surface Roughness

- Of Pocket Milling Of 1.2738 Steel Based On Taguchi Method, *Journal Of Materials Processing Technology*, 206(1–3), 7–15.
- Groover, P. M, 2013, *Fundamentals Of Modern Manufacturing Material, Processes, And Systems*, Thomson Digital And Pronted, Quad Graphics.
- Grossi N, Scippa A, Venturini G, Campatelli G, 2020, Process Parameters Optimization Of Thin-Wall Machining For Wire Arc Additive Manufactured Parts, *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(21), 1–13.
- Guo M, Jiang X, Ye Y, Ding Z, Zhang Z, 2019, Investigation Of Redistribution Mechanism Of Residual Stress During Multi-Process Milling Of Thin-Walled Parts, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 103(1–4), 1459–1466.
- Gürbüz H, 2012, AISI 316L Çeliğın İşlenmesinde Kesici Takım Geometrisi Ve Kaplama Tiplerinin Yüzey Bütünlüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi*.
- Ha N S, Lu G, 2020, Thin-Walled Corrugated Structures: A Review Of Crashworthiness Designs And Energy Absorption Characteristics, *Thin-Walled Structures*, 157, 106995.
- Habibi M, Kilic Z M, Altintas Y, 2021, Minimizing Flute Engagement To Adjust Tool Orientation For Reducing Surface Errors In Five-Axis Ball End Milling Operations, *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, 143(2).
- Han J, Ma R, Kong L, Hao X, Chen N, Li L, He N, 2022, Investigation On Chip Formation Mechanism Of High-Aspect-Ratio Micro-Milled Structures, *Journal Of Manufacturing Processes*, 80, 743–753.
- Hao Y, Liu Y, 2017, Analysis Of Milling Surface Roughness Prediction For Thin-Walled Parts With Curved Surface, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5–8), 2289–2297.
- Hascelik A, Aslantas K, 2025, Minimisation Of Micro-Wall Deformation Through Variable Feed Rate Technique In Micro-Milling Operations, *Journal Of Manufacturing Processes*, 149, 770–784.
- Hasçelik A, Aslantaş K, 2023, Examination Of Deformation In Thin-Walled Structures

- Processed By Micro-Milling Method, *Journal Of Materials And Mechatronics*: A, 4(1), 134–146.
- Herranz S, Campa F J, De Lacalle L N L L, 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, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 219(11), 789–801.
- Hiken A, 2017, The Evolution Of The Composite Fuselage - A Manufacturing Perspective, *SAE International Journal Of Aerospace*, 10(2), 2017-01–2154.
- HOFF N, 1966, Kasım 29, Thin Shells In Aerospace Structures, 3rd Annual Meeting.
- Huang X, Sun J, Li J, Han X, Xiong Q, 2013, An Experimental Investigation Of Residual Stresses In High-Speed End Milling 7050-T7451 Aluminum Alloy, *Advances In Mechanical Engineering*.
- Inspektor A, Salvador P A, 2014, Architecture Of PVD Coatings For Metalcutting Applications: A Review, *Surface And Coatings Technology*, 257, 138–153.
- Isaev A, Grechishnikov V, Pivkin P, Mihail K, Ilyuhin Y, Vorotnikov A, 2016, Machining Of Thin-Walled Parts Produced By Additive Manufacturing Technologies, *Procedia CIRP*, 41, 1023–1026.
- Ismail F, Ziaei R, 2002, Chatter Suppression In Five-Axis Machining Of Flexible Parts, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 42(1), 115–122.
- Izamshah R A R, Mo J P T, Ding S, 2011, Finite Element Analysis Of Machining Thin-Wall Parts, *Key Engineering Materials*, 458, 283–288.
- Izamshah R, Mo J P T, Ding S, 2012, Hybrid Deflection Prediction On Machining Thin-Wall Monolithic Aerospace Components, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 226(4), 592–605.
- Izamshah R, Yuhazri M Y Y, Hadzley M, Amran M, Subramonian S, Ali M A, Sivarao S, Amran M, Subramonian S, 2013, Effects Of End Mill Helix Angle On Accuracy For Machining Thin-Rib Aerospace Component, *Applied Mechanics And Materials*,

315, 773–777.

- Izamshah R, Zulhairi M, Kasim M S, Hadzley M, Amran M, Amri M, Sivaraos, 2014, Cutter Path Strategies For Shoulder Milling Of Thin Deflecting Walls, *Advanced Materials Research*, 903, 175–180.
- Jain A, Bajpai V, 2020, Introduction To High-Speed Machining (HSM), *High-Speed Machining* (Ss. 1–25).
- Jarosz K, Löschner P, Nieslony P, Krolczyk G, 2017, Optimization Of CNC Face Milling Process Of Al-6061-T6 Aluminum Alloy *Journal Of Machine Engineering* 17(1), 69-77.
- Jawahir I S, Brinksmeier E, M'Saoubi R, Aspinwall D K, Outeiro J C, Meyer D, Umbrello D, Jayal A D, 2011, Surface Integrity In Material Removal Processes: Recent Advances, *CIRP Annals*, 60(2), 603–626.
- Jiang X, Li B, Zuo X, Yang J, 2013, Processing Parameters Optimization On Control Of Residual Stresses And Distortion During High-Speed Milling Of Thin-Walled Workpiece, *Key Engineering Materials*, 531–532, 118–121.
- Jiang X, Wang Y, Ding Z, Li H, 2017, An Approach To Predict The Distortion Of Thin-Walled Parts Affected By Residual Stress During The Milling Process, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9–12), 4203–4216.
- 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, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1–4), 877–892.
- Jomaa W, Songmene V, Bocher P, 2014, Surface Finish And Residual Stresses Induced By Orthogonal Dry Machining Of AA7075-T651, *Materials*, 7(3), 1603–1624.
- Joshi S N, Bolar G, 2021, Influence Of End Mill Geometry On Milling Force And Surface Integrity While Machining Low Rigidity Parts, *Journal Of The Institution Of Engineers (India): Series C*, 102(6), 1503–1511.
- Kafkas F, Gürbüz H, Şeker U, 2022, AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Takım Geometrisi Ve İşleme Parametrelerinin Yüzey Bütünlüğü Özelliklerine

- Etkisinin Taguchi Yöntemi İle Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 10(3), 391–407.
- Kahya M, Ozbayoglu M, Unver H O, 2021, Precision And Energy-Efficient Ball-End Milling Of Ti6Al4V Turbine Blades Using Particle Swarm Optimization, International Journal Of Computer Integrated Manufacturing, 34(2), 110–133.
- Kai Cheng, 2009, Machining Dynamics: Fundamentals, Applications And Practices.
- Kalpajian S, Schmid S, Sekar V, 2021, Manufacturing Engineering And Technology In SI Units, Pearson Education Centre.
- Kang K, Su S, Yu B, Sun Z, Hu S, Wang Z, Zhao C, Wu L, Luo G, Wei R, 2025, The Review And Prospect Of Tool Coating Technology, The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 137(7–8), 3107–3139.
- Karakılınç U, Ergene B, Yalçın B, Aslantaş K, Erçetin A, 2023, Comparative Analysis Of Minimum Chip Thickness, Surface Quality And Burr Formation In Micro-Milling Of Wrought And Selective Laser Melted Ti64, Micromachines, 14(6), 1160.
- Kaynak Y, Gharibi A, 2019, Cryogenic Machining Of Titanium Ti-5553 Alloy, Journal Of Manufacturing Science And Engineering, 141(4).
- Khan M A, Jaffery S H I, Khan M A, Faraz M I, Mufti S, 2023, Multi-Objective Optimization Of Micro-Milling Titanium Alloy Ti-3Al-2.5V (Grade 9) Using Taguchi-Grey Relation Integrated Approach, Metals, 13(8).
- Khan M G, Fartaj A, 2012, A Review On Microchannel Heat Exchangers And Potential Applications, Archives Of Thermodynamics, 33(4), 23–40.
- Khandagale P, Bhakar G, Kartik V, Joshi S S, 2018, Modelling Time-Domain Vibratory Deflection Response Of Thin-Walled Cantilever Workpieces During Flank Milling, Journal Of Manufacturing Processes, 33, 278–290.
- Khanghah S P, Boozarpour M, Lotfi M, Teimouri R, 2015, Optimization Of Micro-Milling Parameters Regarding Burr Size Minimization Via RSM And Simulated Annealing Algorithm, Transactions Of The Indian Institute Of Metals, 68(5), 897–910.
- Krajewska-Śpiewak J, Józef G, Piekoszewski W, Stachura K, 2018, Identification Of

- Residual Stresses In A Surface Layer Of Ti6AL4V And Inconel 718 After Process Of Peripheral Milling, *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 25(1).
- Kuczmaszewski J, Łogin W, Pieśko P, Zagórski I, 2018, State Of Residual Stresses After The Process Of Milling Selected Aluminium Alloys, *Advances In Science And Technology Research Journal*, 12(1), 63–73.
- Kuczmaszewski J, Pieśko P, Zawada-Michałowska M, 2016a, Analysis Of Cutting Speed Influence On The Deformation Of Thin-Walled Elements Made Of Aluminium Alloy EN AW-2024 After Milling, *Mechanik*, 8–9, 1066–1067.
- Kuczmaszewski J, Pieśko P, Zawada-Michałowska M, 2016b, Surface Roughness Of Thin-Walled Components Made Of Aluminium Alloy En Aw-2024 Following Different Milling Strategies, *Advances In Science And Technology Research Journal*, 10(30), 150–158.
- Kuczmaszewski J, Pieśko P, Zawada-Michałowska M, 2017, Influence Of Milling Strategies Of Thin-Walled Elements On Effectiveness Of Their Manufacturing, *Procedia Engineering*, 182, 381–386.
- Kuo C H, Lin Z Y, 2021, Optimizing The High-Performance Milling Of Thin Aluminum Alloy Plates Using The Taguchi Method, *Metals*, 11(10).
- Kuram E, 2016, İnce Cidarlı Parçaların Mikro Frezelenmesinde Talaş Kaldırma Yolunun Takım Aşınması, Kuvvetler Ve Parça Kalitesi Üzerindeki Etkisi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C Tasarım Ve Teknoloji*, 4(4), 293–298.
- Kurpiel S, Cudok B, Zagórski K, Cieślík J, Skrzypkowski K, Brostow W, 2023, Influence Of Tools And Cutting Strategy On Milling Conditions And Quality Of Horizontal Thin-Wall Structures Of Titanium Alloy Ti6Al4V, *Sensors*, 23(24), 9905.
- Kurpiel S, Zagórski K, Cieślík J, Skrzypkowski K, 2023, Investigation Of Selected Surface Topography Parameters And Deformation During Milling Of Vertical Thin-Walled Structures From Titanium Alloy Ti6Al4V, *Materials*, 16(8).
- Kurpiel S, Zagórski K, Cieślík J, Skrzypkowski K, Tuleshov A, 2024, Evaluation Of The Surface Topography And Deformation Of Vertical Thin-Wall Milled Samples From The Nickel Alloy Inconel 625, *Materials*, 17(2), 295.

- Langi E, Zhao L G, Jamshidi P, Attallah M M, Silberschmidt V V, Willcock H, Vogt F, 2021, Microstructural And Mechanical Characterization Of Thin-Walled Tube Manufactured With Selective Laser Melting For Stent Application, *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30(1), 696–710.
- Lassila A A, Svensson D, Wang W, Andersson T, 2024, Numerical Evaluation Of Cutting Strategies For Thin-Walled Parts, *Scientific Reports*, 14(1), 1459.
- Lazoglu I, Mamedov A, 2016, Deformation Of Thin Parts In Micromilling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), 117–120.
- Leite W O, Rubio J C C, Tejero J, Mata F, Hanafi I, 2015, A Comparison Of Milling Cutting Path Strategies For Aluminium 6262-T6 Alloys Fabrication, *Manufacturing Engineering: New Research*, 77–90.
- Li B, Gao H, Deng H, Pan H, Wang B, 2019, Investigation On The Influence Of The Equivalent Bending Stiffness Of The Thin-Walled Parts On The Machining Deformation, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5–8), 1171–1182.
- Li B, Jiang X, Yang J, Liang S Y, 2015, Effects Of Depth Of Cut On The Redistribution Of Residual Stress And Distortion During The Milling Of Thin-Walled Part, *Journal Of Materials Processing Technology*, 216, 223–233.
- Li B, Tian X, Zhang M, 2022, Modeling And Multi-Objective Optimization Method Of Machine Tool Energy Consumption Considering Tool Wear, *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing - Green Technology*, 9(1), 127–141.
- Li G, Li N, Wen C, Ding S, 2018, Investigation And Modeling Of Flank Wear Process Of Different PCD Tools In Cutting Titanium Alloy Ti6Al4V, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1–4), 719–733.
- Li H, Lai X, Li C, Lin Z, Miao J, Ni J, 2008, Development Of Meso-Scale Milling Machine Tool And Its Performance Analysis, *Frontiers Of Mechanical Engineering In China*, 3(1), 59–65.
- Li L, He N, Xu J H, 2004, Experimental Study On High Speed Milling Of Ti Alloys, *Materials Science Forum*, 471–472, 414–417.

- Li P, Liu Y, Gong Y, Li L, Liu K, Sun Y, 2018, New Deformation Prediction Of Micro Thin-Walled Structures By Iterative FEM, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5–8), 2027–2040.
- 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).
- Li T, Peng B, Wu W, Wang P, Wang Z, Zhu Y, 2024, Minimum Cutting Thickness Prediction Model For Micro-Milling Machining And Experimental Study Of Feconicrmn High-Entropy Alloy Machining, *Precision Engineering*, 89, 338–348.
- 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*, 2015.
- Li Y, Cheng X, Ling S, Zheng G, 2021, On-Line Compensation For Micromilling Of High-Aspect-Ratio Straight Thin Walls, *Micromachines*, 12(6), 603.
- Li Y, Ding F, Wang D, Tian W, Zhou J, 2024, Predicting The Dynamic Parameters For Milling Thin-Walled Blades With A Neural Network, *Journal Of Manufacturing And Materials Processing*, 8(2), 43.
- Liang S Y, Su J-C, 2007, Residual Stress Modeling In Orthogonal Machining, *CIRP Annals*, 56(1), 65–68.
- Liao Z, La Monaca A, Murray J, Speidel A, Ushmaev D, Clare A, Axinte D, M'Saoubi R, 2021, Surface Integrity In Metal Machining - Part I: Fundamentals Of Surface Characteristics And Formation Mechanisms, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 162, 103687.
- Lin Y C, Qian S-S, Chen X-M, Wang J-Q, Li X-H, Yang H, 2020, Influences Of Feed Rate And Wall Thickness Reduction On The Microstructures Of Thin-Walled Hastelloy C-276 Cylindrical Parts During Staggered Spinning, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9–10), 3809–3821.
- Liu D, Li C, Dong L, Qin A, Zhang Y, Yang M, Gao T, Wang X, Liu M, Cui X, Ali H M, Sharma S, 2024, Kinematics And Improved Surface Roughness Model In Milling, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 131(5–

- 6), 2087–2108.
- Liu M, Zhang L, Wang P, Chang Y, 2015, Experimental Investigation On Local Buckling Behaviors Of Stiffened Closed-Section Thin-Walled Aluminum Alloy Columns Under Compression, *Thin-Walled Structures*, 94, 188–198.
- Liu X, Devor R E, Kapoor S G, Ehmann K F, 2004, The Mechanics Of Machining At The Microscale: Assessment Of The Current State Of The Science, *Journal Of Manufacturing Science And Engineering* 126(4), 666–678.
- Liu Y, Li P, Liu K, Zhang Y, 2017, Micro Milling Of Copper Thin Wall Structure, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1–4), 405–412.
- Llanos I, Agirre A, Urreta H, Thepsonthi T, Özel T, 2014, Micromilling High Aspect Ratio Features Using Tungsten Carbide Tools, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 228(11), 1350–1358.
- Loehe J, Zaeh M F, Roesch O, 2012, In-Process Deformation Measurement Of Thin-Walled Workpieces, *Procedia CIRP*, 1, 546–551.
- López De Lacalle L N, Lamikiz A, Sánchez J A, Salgado M A, 2007, Toolpath Selection Based On The Minimum Deflection Cutting Forces In The Programming Of Complex Surfaces Milling, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 47(2), 388–400.
- Lu L X, Sun J, Li Y L, Li J F, 2017, A Theoretical Model For Load Prediction In Rolling Correction Process Of Thin-Walled Aeronautic Parts, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9–12), 4121–4131.
- Lu X, Chiumenti M, Cervera M, Slimani M, Gonzalez I, 2023, Recoater-Induced Distortions And Build Failures In Selective Laser Melting Of Thin-Walled Ti6Al4V Parts, *Journal Of Manufacturing And Materials Processing*, 7(2), 64.
- Lu X, Wang F R, Xue L, Feng Y, Liang S Y, 2019, Investigation Of Material Removal Rate And Surface Roughness Using Multi-Objective Optimization For Micro-Milling Of Inconel 718, *Industrial Lubrication And Tribology*, 71(6), 787–794.
- Lukic D, Cep R, Vukman J, Antic A, Djurdjev M, Milosevic M, 2020, Multi-Criteria

- Selection Of The Optimal Parameters For High-Speed Machining Of Aluminum Alloy Al7075 Thin-Walled Parts, *Metals*, 10(12), 1570.
- Luo X, Yang L, Cui Y, 2023, Microneedles: Materials, Fabrication, And Biomedical Applications, *Biomedical Microdevices*, 25(3), 20.
- Lyu W, Liu Z, Song Q, Ren X, Wang B, Cai Y, 2023, Modelling And Prediction Of Surface Topography On Machined Slot Side Wall With Single-Pass End Milling, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 124(3–4), 1095–1113.
- Ma J, Liu Y, Zhao Y, Jiao F, Gao G, Xiang D, Zhang D, Zhao B, Pang X, 2025, A Novel Analytical Model For Predicting The Thin-Walled Workpiece Deformation Considering The Effect Of Residual Stress Accumulation And Redistribution In Layer By Layer Milling, *Journal Of Manufacturing Processes*, 141, 1444–1462.
- Ma J W, Zhang N, Chen S Y, Su W W, Hu G Q, 2018, Deformation Analysing For Thin-Walled Parts Based On Analysis Of Single-Tooth Or Multi-Tooth Milling, *International Journal Of Machining And Machinability Of Materials*, 20(6), 575.
- Madariaga A, Esnaola J A, Arrazola P J, Ruiz-Hervias J, Muñoz P, Ostolaza K, 2015, Stability Of Machining Induced Residual Stresses In Inconel 718 Under Quasi-Static Loading At Room Temperature, *Materials Science And Engineering: A*, 620, 129–139.
- Mahmud A, Mayer J R R, Baron L, 2015, Determining The Minimum Clamping Force By Cutting Force Simulation In Aerospace Fuselage Pocket Machining, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9–12), 1751–1758.
- Mañé I, Gagnol V, Bouzgarrou B C, Ray P, 2008, Stability-Based Spindle Speed Control During Flexible Workpiece High-Speed Milling, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 48(2), 184–194.
- Manoukian O S, Arul M R, Rudraiah S, Kalajzic I, Kumbar S G, 2019, Aligned Microchannel Polymer-Nanotube Composites For Peripheral Nerve Regeneration: Small Molecule Drug Delivery, *Journal Of Controlled Release*, 296(September 2018), 54–67.

- Maranhão C, Paulo Davim J, 2010, Finite Element Modelling Of Machining Of AISI 316 Steel: Numerical Simulation And Experimental Validation, *Simulation Modelling Practice And Theory*, 18(2), 139–156.
- Martan J, Beneš P, 2012, Thermal Properties Of Cutting Tool Coatings At High Temperatures, *Thermochimica Acta*, 539, 51–55.
- Masoudi S, Amini S, Saeidi E, Eslami-Chalander H, 2015, Effect Of Machining-Induced Residual Stress On The Distortion Of Thin-Walled Parts, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1–4), 597–608.
- Megson T H G, 2016, *Aircraft Structures For Engineering Students* (Steve Merken (Ed.); Sixth).
- Mejbel M K, Abdullah I T, Nabil Khadim Taieh, 2022, Thin Wall Manufacturing Improvement Using Novel Simultaneous Double-Sided Cutter Milling Technique, *International Journal Of Automotive And Mechanical Engineering*, 19(1), 6519–6529.
- Meng X, Zhang K, Guo X, Wang C, Sun L, 2021, Preparation Of Micro-Textures On Cemented Carbide Substrate Surface By Plasma-Assisted Laser Machining To Enhance The PVD Tool Coatings Adhesion, *Journal Of Materials Processing Technology*, 288, 116870.
- 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, *Measurement*, 58, 416–428.
- Mohammadpour M, Razfar M R, Jalili Saffar R, 2010, Numerical Investigating The Effect Of Machining Parameters On Residual Stresses In Orthogonal Cutting, *Simulation Modelling Practice And Theory*, 18(3), 378–389.
- Muhammad B B, Wan M, Liu Y, Yuan H, 2018, Active Damping Of Milling Vibration Using Operational Amplifier Circuit, *Chinese Journal Of Mechanical Engineering (English Edition)*, 31(1).
- Munoa J, Sanz-Calle M, Dombovari Z, Iglesias A, Pena-Barrio J, Stepan G, 2020, Tuneable Clamping Table For Chatter Avoidance In Thin-Walled Part Milling, *CIRP Annals*, 69(1), 313–316.

- Muñoz-Sánchez A, Miguélez H, Canteli J A, Cantero J L, 2009, The Influence Of Tool Wear In Surface Integrity When Machining Austenitic Stainless Steel, DYMAT 2009 - 9th International Conferences On The Mechanical And Physical Behaviour Of Materials Under Dynamic Loading, 2, 1823–1829.
- Ning F, Cong W, 2020, Ultrasonic Vibration-Assisted (UV-A) Manufacturing Processes: State Of The Art And Future Perspectives, Journal Of Manufacturing Processes, 51, 174–190.
- Niu Z, Jiao F, Cheng K, 2018, An Innovative Investigation On Chip Formation Mechanisms In Micro-Milling Using Natural Diamond And Tungsten Carbide Tools, Journal Of Manufacturing Processes, 31, 382–394.
- Osarogiagbon E, Hall R, Zhou L, Cafolla J, Davis C, 2024, Electromagnetic (EM) Sensor Measurement For Residual Stress Characterisation In Welded Steel Plates, Nondestructive Testing And Evaluation, 39(2), 293–309.
- Outeiro J C, Umbrello D, M'Saoubi R, 2006, Experimental And Numerical Modelling Of The Residual Stresses Induced In Orthogonal Cutting Of AISI 316L Steel, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 46(14), 1786–1794.
- Ozcelik B, Bayramoglu M, 2006, The Statistical Modeling Of Surface Roughness In High-Speed Flat End Milling, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 46(12–13), 1395–1402.
- Özel T, Karpaz Y, 2005, Predictive Modeling Of Surface Roughness And Tool Wear In Hard Turning Using Regression And Neural Networks, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 45(4–5), 467–479.
- Ozoegwu C, Eberhard P, 2024, A Literature Review On Prediction Methods For Forced Responses And Associated Surface Form/Location Errors In Milling, Journal Of Vibration Engineering And Technologies, 12(4), 5905–5934.
- Park S S, Malekian M, 2009, Mechanistic Modeling And Accurate Measurement Of Micro End Milling Forces, CIRP Annals, 58(1), 49–52.
- Patel K, Liu G, Shah S R, Özel T, 2020, Effect Of Micro-Textured Tool Parameters On Forces, Stresses, Wear Rate, And Variable Friction In Titanium Alloy Machining, Journal Of Manufacturing Science And Engineering, 142(2).

- Pawade R S, Joshi S S, Brahmankar P K, 2008, Effect Of Machining Parameters And Cutting Edge Geometry On Surface Integrity Of High-Speed Turned Inconel 718, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 48(1), 15–28.
- Pinar A M, Filiz S, Ünlü B S, 2016, A Comparison Of Cooling Methods In The Pocket Milling Of AA5083-H36 Alloy Via Taguchi Method, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9–12), 1431–1440.
- Pitjarnit S, Vichiansan N, Leksakul K, 2025, Innovative Approach To Graphene Film Synthesis: Factorial Design In PECVD Experiments, *Journal Of Engineering And Technological Sciences*, 57(1), 78–92.
- Polzer A, Dufkova K, Pokorny P, 2015, On The Modern CNC Milling With A Compensation Of Cutting Tools And Thin-Walled Workpiec Deflections, *Journal Of Machine Engineering*, 15(3), 41–49.
- Qi S, Yan S, Xu J, Sun Y, 2025, Predictive Modeling Of Deformation Induced By Residual Stress For Thin-Walled Parts In Double-Sided Alternating Precision Turning, *Journal Of Manufacturing Processes*, 146, 19–29.
- Qin G, Wang H, Lin F, Sun S, Guo Y, Wu T, Wu Z, 2020, A New Approach To Deformation Control Of Aeronautical Monolithic Components Of Aluminum Alloy Plates Based On Stress Inverse And Stress Evaluation, *Scientia Sinica Technologica*, 50(1), 85–102.
- Qu D, Wang B, Peng Z, 2017, The Influence Of Processing Parameters On Surface Characteristics In Micro-Milling Thin-Walled Slot On Elgiloy, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5–8), 2843–2852.
- Qu S, Zhao J, Wang T, 2017, Experimental Study And Machining Parameter Optimization In Milling Thin-Walled Plates Based On NSGA-II, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5–8), 2399–2409.
- Rafey Khan A, Nisar S, Shah A, Khan M A, Khan S Z, Sheikh M A, 2017, Reducing Machining Distortion In AA 6061 Alloy Through Re-Heating Technique, *Materials Science And Technology*, 33(6), 731–737.
- Ramanaiah B V, Manikanta B, Ravi Sankar M, Malhotra M, Gajrani K, 2018, Experimental Study Of Deflection And Surface Roughness In Thin Wall Machining

- Of Aluminum Alloy, *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3745–3754.
- Ramesh Udhayakumar A, Satish Kumar S, 2022, Multiobjective Optimization Of Electric Discharge Machining Of An Al–Sicp Composite Using The Taguchi–PCA Method As Well As The Firefly And Cuckoo Search Algorithms, *Transactions Of The Canadian Society For Mechanical Engineering*, 46(2), 503–523.
- Ranjan Soren T, Kumar R, Panigrahi I, Kumar Sahoo A, Panda A, Kumar Das R, 2019, Machinability Behavior Of Aluminium Alloys: A Brief Study, *Materials Today: Proceedings*, 18, 5069–5075.
- Ratchev S, Liu S, Becker A A, 2005, Error Compensation Strategy In Milling Flexible Thin-Wall Parts, *Journal Of Materials Processing Technology*, 162–163, 673–681.
- Rech J, Moisan A, 2003, Surface Integrity In Finish Hard Turning Of Case-Hardened Steels, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 43(5), 543–550.
- Ren R, Ma X, Yue H, Yang F, Lu Y, 2024, Stiffness Enhancement Methods For Thin-Walled Aircraft Structures: A Review, *Thin-Walled Structures*, 201, 111995.
- Ren S, Long X, Meng G, 2018, Dynamics And Stability Of Milling Thin Walled Pocket Structure, *Journal Of Sound And Vibration*, 429, 325–347.
- 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, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5–8), 1617–1634.
- Rohde J, Jeppsson A, 2000, Literature Review Of Heat Treatment Simulations With Respect To Phase Transformation, Residual Stresses And Distortion, *Scandinavian Journal Of Metallurgy*, 29(2), 47–62.
- Roy R, Surace C, Gherlone M, 2024, Full-Field Deformation Reconstruction Of Beams Using The Inverse Finite Element Method: Application To Thin-Walled Structures, *Thin-Walled Structures*, 200, 111907.
- Rusinek R, Zaleski K, 2016, Dynamics Of Thin-Walled Element Milling Expressed By Recurrence Analysis, *Meccanica*, 51(6), 1275–1286.
- S J S, P S, Praveen J A, D S R, 2024, Effect Of Edge Radius On Forces, Tool Wear And

- Surface Integrity Under Edge Radius Dominated Tool-Chip Contact Conditions, Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture, 238(1–2), 302–314.
- Saber W I A, Al-Askar A A, Ghoneem K M, 2023, Exclusive Biosynthesis Of Pullulan Using Taguchi's Approach And Decision Tree Learning Algorithm By A Novel Endophytic *Aureobasidium Pullulans* Strain, *Polymers*, 15(6), 1419.
- Saha S, Bandyopadhyay P P, 2024, Non-Destructive Measurement Of MUCT In Micro-Milling Using Surface Topography Generated By Bi-Planer Size Effects, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 275, 109332.
- Sahoo P, Patra K, Szalay T, Dyakonov A A, 2020, Determination Of Minimum Uncut Chip Thickness And Size Effects In Micro-Milling Of P-20 Die Steel Using Surface Quality And Process Signal Parameters, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11–12), 4675–4691.
- Sahu N K, Andhare A B, 2017, Modelling And Multiobjective Optimization For Productivity Improvement In High Speed Milling Of Ti–6Al–4V Using RSM And GA, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 39(12), 5069–5085.
- Saini S, Ahuja I S, Sharma V S, 2011, The Effect Of Cutting Parameters On Surface Integrity In Hard Turning, *Applied Mechanics And Materials*, 110–116, 751–757.
- Samuel A U, Araoyinbo A O, Elewa R R, Biodun M B, 2021, Effect Of Machining Of Aluminium Alloys With Emphasis On Aluminium 6061 Alloy – A Review, *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1107(1), 012157.
- Santos M C, Machado A R, Sales W F, Barrozo M A S, Ezugwu E O, 2016, Machining Of Aluminum Alloys: A Review, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9–12), 3067–3080.
- Scheider I, Brocks W, 2009, Residual Strength Prediction Of A Complex Structure Using Crack Extension Analyses, *Engineering Fracture Mechanics*, 76(1), 149–163.
- Schmitz T L, Donalson R R, 2000, Predicting High-Speed Machining Dynamics By Substructure Analysis, *CIRP Annals*, 49(1), 303–308.

- Schmitz T L, Honeycutt A, 2017, Analytical Solutions For Fixed-Free Beam Dynamics In Thin Rib Machining, *Journal Of Manufacturing Processes*, 30, 41–50.
- Schulze V, Autenrieth H, Deuchert M, Weule H, 2010, Investigation Of Surface Near Residual Stress States After Micro-Cutting By Finite Element Simulation, *CIRP Annals*, 59(1), 117–120.
- Schwach D W, Guo Y B, 2005, Feasibility Of Producing Optimal Surface Integrity By Process Design In Hard Turning, *Materials Science And Engineering: A*, 395(1–2), 116–123.
- Seenath A A, Sarhan A A D, 2024, A State-Of-The-Art Review On Cutting Tool Materials And Coatings In Enhancing The Tool Performance In Machining The Superior Nickel-Based Superalloys, *Arabian Journal For Science And Engineering*, 49(8), 10203–10236.
- Seguy S, Campa F J, Lacalle L N L De, Arnaud L, Dessein G, Aramendi G, 2008, Toolpath Dependent Stability Lobes For The Milling Of Thin-Walled Parts, *International Journal Of Machining And Machinability Of Materials*, 4(4), 377.
- Seguy S, Dessein G, Arnaud L, 2008, Surface Roughness Variation Of Thin Wall Milling, Related To Modal Interactions, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 48(3–4), 261–274.
- Sharman A R C, Hughes J I, Ridgway K, 2004, Workpiece Surface Integrity And Tool Life Issues When Turning Inconel 718<sup>TM</sup> Nickel Based Superalloy, *Machining Science And Technology*, 8(3), 399–414.
- Si-Meng L, Xiao-Dong S, Xiao-Bo G, Dou W, 2017, Simulation Of The Deformation Caused By The Machining Cutting Force On Thin-Walled Deep Cavity Parts, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9–12), 3503–3517.
- Silveira M L, De Oliveira D A, Santos A J Dos, De Faria P E, Abrão A M, 2023, Assessment Of The Surface Integrity Of AISI H13 Tool Steel After Milling With Carbide And Cermet Inserts, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 125(7–8), 3135–3148.
- Singh A, Agrawal A, 2015, Investigation Of Surface Residual Stress Distribution In

- Deformation Machining Process For Aluminum Alloy, *Journal Of Materials Processing Technology*, 225, 195–202.
- Singh A, Agrawal A, 2016, Comparison Of Deforming Forces, Residual Stresses And Geometrical Accuracy Of Deformation Machining With Conventional Bending And Forming, *Journal Of Materials Processing Technology*, 234, 259–271.
- Smith S, Wilhelm R, Dutterer B, Cherukuri H, Goel G, 2012, Sacrificial Structure Preforms For Thin Part Machining, *CIRP Annals*, 61(1), 379–382.
- Song K H, Lim D W, Park J Y, Ha S J, Yoon G S, 2020, Investigation On Influence Of Hybrid Nozzle Of Cryomql On Tool Wear, Cutting Force, And Cutting Temperature In Milling Of Titanium Alloys, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 110(7–8), 2093–2103.
- Sredanovic B, Cica D, Borojevic S, Tesic S, Kramar D, 2024, Optimization Of Superalloy Inconel 718 Micro-Milling Process By Combined Taguchi And Multi-Criteria Decision Making Method, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 46(7).
- Sun J, Zhao J, Huang Z, Yan K, Shen X, Xing J, Gao Y, Jian Y, Yang H, Li B, 2020, A Review On Binderless Tungsten Carbide: Development And Application, *Nano-Micro Letters*, 12(1), 13.
- Sun Q, Zhou J, Li P, 2022, Simulations And Experiments On The Micro-Milling Process Of A Thin-Walled Structure Of Al6061-T6, *Materials*, 15(10).
- Sun X, Cheng K, 2010, Micro-/Nano-Machining Through Mechanical Cutting, *Micro-Manufacturing Engineering And Technology* (Ss. 24–38).
- Sun Y, Zheng M, Jiang S, Zhan D, Wang R, 2023, A State-Of-The-Art Review On Chatter Stability In Machining Thin-Walled Parts, *Machines*, 11(3), 359.
- Sun Z, To S, Zhang S, Zhang G, 2018, Theoretical And Experimental Investigation Into Non-Uniformity Of Surface Generation In Micro-Milling, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 140, 313–324.
- Tang A J, Ma H L, Liu Z Q, 2013, Elastic-Plastic Deformation Of Milling Thin Wall Part, *Applied Mechanics And Materials*, 345, 321–324.

- Tang M, Cheng X, Li Y, Zheng G, Liu H, Dong R, 2023, Experimental Study Of A New Micromilling Process For Vortex Curved Thin Walls, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 126(5–6), 2595–2605.
- Tang M, Cheng X, Zheng G, Liu H, Li X, Liu J, 2024, Micromilling Of High-Aspect-Ratio Ceramic Thin Walls With Customized Micro PCD End Mills, *Ceramics International*, 50(7), 11167–11178.
- Tang Z T, Yu T, Xu L Q, Liu Z Q, 2013, Machining Deformation Prediction For Frame Components Considering Multifactor Coupling Effects, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1–4), 187–196.
- Tee C A, Yang Z, Yin L, Wu Y, Han J, Lee E H, 2019, Improved Zonal Chondrocyte Production Protocol Integrating Size-Based Inertial Spiral Microchannel Separation And Dynamic Microcarrier Culture For Clinical Application, *Biomaterials*, 220, 119409.
- Thevenot V, Arnaud L, Dessein G, Cazenave–Larroche G, 2006, Influence Of Material Removal On The Dynamic Behavior Of Thin-Walled Structures In Peripheral Milling, *Machining Science And Technology*, 10(3), 275–287.
- Tian W, Ren J, Wang D, Zhang B, 2018, Optimization Of Non-Uniform Allowance Process Of Thin-Walled Parts Based On Eigenvalue Sensitivity, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5–8), 2101–2116.
- Tlhabadira I, Daniyan I A, Machaka R, Machio C, Masu L, Vanstaden L R, 2019, Modelling And Optimization Of Surface Roughness During AISI P20 Milling Process Using Taguchi Method, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9–12), 3707–3718.
- Tong J, Zhao J, Chen P, Zhao B, 2020, Effect Of Ultrasonic Elliptical Vibration Turning On The Microscopic Morphology Of Aluminum Alloy Surface, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 106(3–4), 1397–1407.
- Torabi A R, Habibi R, 2016, Investigation Of Ductile Rupture In U-Notched Al 6061-T6 Plates Under Mixed Mode Loading, *Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures*, 39(5), 551–565.
- Tsai J-S, Liao C-L, 1999, Finite-Element Modeling Of Static Surface Errors In The

- Peripheral Milling Of Thin-Walled Workpieces, *Journal Of Materials Processing Technology*, 94(2–3), 235–246.
- Ucun İ, 2013, Inconel 718 Malzemesinin Mikro İşlenebilirliği Ve Kaplama Malzemesinin Etkisinin Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Ulutan D, Arisoy Y M, Özel T, Mears L, 2014, Empirical Modeling Of Residual Stress Profile In Machining Nickel-Based Superalloys Using The Sinusoidal Decay Function, *Procedia CIRP*, 13, 365–370.
- Ulutan D, Ozel T, 2011, Machining Induced Surface Integrity In Titanium And Nickel Alloys: A Review, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 51(3), 250–280.
- Umbrello D, 2011, Influence Of Material Microstructure Changes On Surface Integrity In Hard Machining Of AISI 52100 Steel, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 54(9–12), 887–898.
- Uriarte L, Azcárate S, Herrero A, Lopez De Lacalle L N, Lamikiz A, 2008, Mechanistic Modelling Of The Micro End Milling Operation, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 222(1), 23–33.
- Vairavan H, Abdullah A B, 2017, Die-Punch Alignment And Its Effect On The Thinning Pattern In The Square-Shaped Deep Drawing Of Aluminium Alloy, *International Journal Of Materials And Product Technology*, 54(1/2/3), 147.
- Vakondios D, Kyratsis P, Yaldiz S, Antoniadis A, 2012, Influence Of Milling Strategy On The Surface Roughness In Ball End Milling Of The Aluminum Alloy Al7075-T6, *Measurement*, 45(6), 1480–1488.
- Varghese V, Ramesh M R, Chakradhar D, 2019, Influence Of Deep Cryogenic Treatment On Performance Of Cemented Carbide (WC-Co) Inserts During Dry End Milling Of Maraging Steel, *Journal Of Manufacturing Processes*, 37, 242–250.
- Vogler M P, Devor R E, Kapoor S G, 2004, On The Modeling And Analysis Of Machining Performance In Micro-Endmilling, Part I: Surface Generation, *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, 126(4), 685–694.
- Vopát T, Peterka J, Šimna V, Kuruc M, 2015, The Influence Of Different Types Of Copy

- Milling On The Surface Roughness And Tool Life Of End Mills, *Procedia Engineering*, 100, 868–876.
- Vukman J, Lukić D, Milosevic M, Borojevic S, Antic A, Đurđev M, 2016, Fundamentals Of The Optimisation Of Machining Process Planning For The Thin-Walled Aluminium Parts, *Journal Of Production Engineering*, 19(2), 53–56.
- Wan M, Dang X-B, Zhang W-H, Yang Y, 2018, Optimization And Improvement Of Stable Processing Condition By Attaching Additional Masses For Milling Of Thin-Walled Workpiece, *Mechanical Systems And Signal Processing*, 103, 196–215.
- Wan M, Ma Y-C, Feng J, Zhang W-H, 2016, Study Of Static And Dynamic Ploughing Mechanisms By Establishing Generalized Model With Static Milling Forces, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 114, 120–131.
- Wan M, Pan W-J, Zhang W-H, Ma Y-C, Yang Y, 2014, A Unified Instantaneous Cutting Force Model For Flat End Mills With Variable Geometries, *Journal Of Materials Processing Technology*, 214(3), 641–650.
- 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, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 48(12–13), 1366–1374.
- Wan N, He Q, Jiang Y, Zhou H, Fu B, 2023, Numerical And Experimental Investigation Of The Influence Of The Machining Parameters On Residual Stress Distribution Of Internal Thread Cold Extrusion, *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 40, 142–154.
- Wang F, Cheng X, Zheng G M, Yang X H, Guo Q J, Sun Q L, 2019, Study Of Micromilling Parameters And Processes For Thin Wall Fabrications, *Precision Engineering*, 56, 246–254.
- Wang F, Pang Q, Luo S, Sun L, 2025, Effect Of Cryogenic Cooling On Milling Vibration Of Thin-Walled Titanium Alloy Parts, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 138(3–4), 1523–1533.
- Wang F, Wang Y, 2019, Investigate On Effect Of Cryogenic Cooling On Oxidation Wear Of WC-Co Carbide Tool Milling Titanium Alloy, *Machining Science And Technology*, 23(6), 906–924.

- Wang F, Wang Y, 2022, Effect Of Cryogenic Cooling On Deformation Of Milled Thin-Walled Titanium Alloy Parts, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 122(9–10), 3683–3692.
- Wang F, Wang Y, 2023, Milling Performance Of Cryogenic Cooled Titanium Alloy Thin-Walled Parts Based On Cantilever Sheet, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 128(5–6), 2261–2270.
- Wang G, Liu Z, Ai X, Huang W, Niu J, 2018, Effect Of Cutting Parameters On Strain Hardening Of Nickel–Titanium Shape Memory Alloy, *Smart Materials And Structures*, 27(7), 075027.
- 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, *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 16(5), 1011–1019.
- Wang J, Ibaraki S, Matsubara A, 2017, A Cutting Sequence Optimization Algorithm To Reduce The Workpiece Deformation In Thin-Wall Machining, *Precision Engineering*, 50, 506–514.
- Wang L, Huang H, West R W, Li H, Du J, 2018, A Model Of Deformation Of Thin-Wall Surface Parts During Milling Machining Process, *Journal Of Central South University*, 25(5), 1107–1115.
- Wang L, Yue C, Ma W, Liu X, Li C, Liang S Y, 2025, Prediction Of Residual Stress And Deflection In Multi-Process Milling Of Large Thin-Walled Components With Initial Bulk Residual Stress, *Measurement*, 247, 116814.
- Wang X, Song Q, Liu Z, 2021, Dynamic Model And Stability Prediction Of Thin-Walled Component Milling With Multi-Modes Coupling Effect, *Journal Of Materials Processing Technology*, 288, 116869.
- Wang Z H, Yuan J T, Liu T T, Huang J, Qiao L, 2015, Study On Surface Roughness In High-Speed Milling Of AlMn1Cu Using Factorial Design And Partial Least Square Regression, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9–12), 1783–1792.
- Wei Y, Wang X W, 2007, Computer Simulation And Experimental Study Of Machining Deflection Due To Original Residual Stress Of Aerospace Thin-Walled Parts, *The*

- International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 33(3–4), 260–265.
- Weicheng G, Yong Z, Xiaohui J, Ning Y, Kun W, Xiao L, 2021, Improvement Of Stiffness During Milling Thin-Walled Workpiece Based On Mechanical/Magnetorheological Composite Clamping, Journal Of Manufacturing Processes, 68, 1047–1059.
- 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.
- Wojciechowski S, Krajewska-Śpiewak J, Maruda R W, Krolczyk G M, Nieslony P, Wieczorowski M, Gawlik J, 2023, Study On Ploughing Phenomena In Tool Flank Face – Workpiece Interface Including Tool Wear Effect During Ball-End Milling, Tribology International, 181, 108313.
- Wojciechowski S, Mrozek K, 2017, Mechanical And Technological Aspects Of Micro Ball End Milling With Various Tool Inclinations, International Journal Of Mechanical Sciences, 134, 424–435.
- Wu D, Yao C, Zhang D, 2018, Surface Characterization And Fatigue Evaluation In GH4169 Superalloy : Comparing Results After Finish Turning; Shot Peening And Surface Polishing Treatments, International Journal Of Fatigue, 113, 222–235.
- Wu D, Zheng Y, Liang J, Wang H, 2025, Flexible Fixture Designs And Accuracy Improvements For The Adaptive Machining Of Near-Net-Shaped Blades, Journal Of Manufacturing Processes, 143, 188–204.
- Wu G, Li G, Pan W, Raja I, Wang X, Ding S, 2021, A State-Of-Art Review On Chatter And Geometric Errors In Thin-Wall Machining Processes, Journal Of Manufacturing Processes, 68, 454–480.
- Wu G, Li G, Pan W, Wang X, Ding S, 2020, A Prediction Model For The Milling Of Thin-Wall Parts Considering Thermal-Mechanical Coupling And Tool Wear, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 107(11–12), 4645–4659.
- Wu G, Pan W, Wang X, Mo J, Ding S, 2018, Chatter And Deformation In Machining Thin-Walled Flexible Components, IOP Conference Series: Materials Science And

Engineering, 423(1).

- Wu X, Chen Z, Ke W, Jiang F, Zhao M, Li L, Shen J, Zhu L, 2023, Investigation On Surface Quality In Micro Milling Of Additive Manufactured Ti6Al4V Titanium Alloy, *Journal Of Manufacturing Processes*, 101, 446–457.
- Wu X, Liu L, Du M, Shen J, Jiang F, Li Y, Lin Y, 2020, Experimental Study On The Minimum Undeformed Chip Thickness Based On Effective Rake Angle In Micro Milling, *Micromachines*, 11(10), 924.
- Wu Y, Wang K, Zheng G, Lv B, He Y, 2020, Experimental And Simulation Study On Chatter Stability Region Of Integral Impeller With Non-Uniform Allowance, *Science Progress*, 103(3).
- Xiang J, Yi J, 2021, Deformation Mechanism In Wax Supported Milling Of Thin-Walled Structures Based On Milling Forces Stability, *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 32, 356–369.
- Xiao M, Sato K, Karube S, Soutome T, 2003, The Effect Of Tool Nose Radius In Ultrasonic Vibration Cutting Of Hard Metal, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 43(13), 1375–1382.
- Xu J, Xu L, Li Y, Sun Y, 2020, Shape-Adaptive CNC Milling For Complex Contours On Deformed Thin-Walled Revolution Surface Parts, *Journal Of Manufacturing Processes*, 59, 760–771.
- Yalçın B, Yüksel A, Aslantaş K, Der O, Ercetin A, 2023, Optimization Of Micro-Drilling Of Laminated Aluminum Composite Panel (Al-PE) Using Taguchi Orthogonal Array Design, *Materials*, 16(13).
- Yang D, Liu Z, 2015, Surface Plastic Deformation And Surface Topography Prediction In Peripheral Milling With Variable Pitch End Mill, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 91, 43–53.
- Yang Z, Zhu L, Zhang G, Ni C, Lin B, 2020, Review Of Ultrasonic Vibration-Assisted Machining In Advanced Materials, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 156, 103594.
- Yarin L, Musyak A, Hetsroni G, 2009, Fluid Flow, Heat Transfer And Boiling In Micro-

Channels, Berlin.

- 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, *Thin-Walled Structures*, 144, 106329.
- Yin Q, Liu Z, Wang B, Song Q, Cai Y, 2020, Recent Progress Of Machinability And Surface Integrity For Mechanical Machining Inconel 718: A Review, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 109(1–2), 215–245.
- You Z, Gao H, Guo L, Liu Y, Li J, Li C, 2022, Machine Vision Based Adaptive Online Condition Monitoring For Milling Cutter Under Spindle Rotation, *Mechanical Systems And Signal Processing*, 171(10), 108904.
- Yu H, Zheng M, Zhang W, Nie W, Bian T, 2022, Optimal Design Of Helical Flute Of Irregular Tooth End Milling Cutter Based On Particle Swarm Optimization Algorithm, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science*, 236(7), 3323–3339.
- Yuan Y, Zhang H T, Wu Y, Zhu T, Ding H, 2017, Bayesian Learning-Based Model-Predictive Vibration Control For Thin-Walled Workpiece Machining Processes, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 22(1), 509–520.
- Yue C, Gao H, Liu X, Liang S Y, 2018, Part Functionality Alterations Induced By Changes Of Surface Integrity In Metal Milling Process: A Review, *Applied Sciences*, 8(12), 2550.
- Zariatin D L, Kiswanto G, Ko T J, 2017, Investigation Of The Micro-Milling Process Of Thin-Wall Features Of Aluminum Alloy 1100, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5–8), 2625–2637.
- Zawada-Michałowska M, Kuczmazewski J, Legutko S, Pieśko P, 2020, Techniques For Thin-Walled Element Milling With Respect To Minimising Post-Machining Deformations, *Materials*, 13(21), 4723.
- Zawada-Michałowska M, Pieśko P, Jóźwik J, Legutko S, Kukielka L, 2021, A Comparison Of The Geometrical Accuracy Of Thin-Walled Elements Made Of Different Aluminum Alloys, *Materials*, 14(23).

- Zawada-Michałowska M, Pieśko P, Mrówka-Nowotnik G, Nowotnik A, Legutko S, 2024, Effect Of The Technological Parameters Of Milling On Residual Stress In The Surface Layer Of Thin-Walled Plates, *Materials*, 17(5), 1193.
- Zeelanbasha N Basha, Senthil V, Senthil Kumar B R, 2018, An Integrated Approach Of RSM And MOGA For The Prediction Of Temperature Rise And Surface Roughness In The End Milling Of Al 6061-T6, *Transactions Of FAMENA*, 42(3), 115–128.
- Zeng H H, Yan R, Peng F Y, Zhou L, Deng B, 2017, An Investigation Of Residual Stresses In Micro-End-Milling Considering Sequential Cuts Effect, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9–12), 3619–3634.
- Zhang D, Denkena B, Gümmer C, 2012, Effects Of DLC And ZrN Coatings On The Performance Of Micro-Milling Tools, *Surface And Coatings Technology*, 213, 155–162.
- Zhang L, Li S, Li L, Wei C, Pan P, Wang J, Wan Y, Peng C, Hao X, 2024, Study On The Influence Of PCD Micro Milling Tool Edge Radius On The Surface Quality Of Deep And Narrow Grooves, *Journal Of Manufacturing Processes*, 131, 1–11.
- Zhang S, Zhou Y, Zhang H, Xiong Z, To S, 2019, Advances In Ultra-Precision Machining Of Micro-Structured Functional Surfaces And Their Typical Applications, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 142, 16–41.
- Zhang Y, Chen Z, Wu W, Xu C, 2024, Focused Ion Beam (FIB) Prepared Microtextured Microneedle Array Capable Of Delivering Drugs Through Punctured Skin, *Scientific Reports*, 14(1), 31489.
- Zhang Z, Li H, Liu X, Zhang W, Meng G, 2018, Chatter Mitigation For The Milling Of Thin-Walled Workpiece, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 138–139, 262–271.
- Zhao B, Ding W, Shan Z, Wang J, Yao C, Zhao Z, Liu J, Xiao S, Ding Y, Tang X, Wang X, Wang Y, Wang X, 2023, Collaborative Manufacturing Technologies Of Structure Shape And Surface Integrity For Complex Thin-Walled Components Of Aero-Engine: Status, Challenge And Tendency, *Chinese Journal Of Aeronautics*, 36(7), 1–24.

- Zhao X, Zheng L, Shi M, Wang Y, 2022, Unified Model Towards Service-Oriented Continuous-Discrete Hybrid Adaptive Milling System For Thin-Walled Parts Driven By In-Process Data, *IFAC-Papersonline*, 55(10), 2156–2161.
- Zhao Z, Wang S, Wang Z, Liu N, Wang S, Ma C, Yang B, 2020, Interference- And Chatter-Free Cutter Posture Optimization Towards Minimal Surface Roughness In Five-Axis Machining, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 171, 105395.
- Zhong Q, Ding H, Gao B, He Z, Gu Z, 2019, Advances Of Microfluidics In Biomedical Engineering, *Advanced Materials Technologies*, 4(6), 1–27.
- Zhou J, Yi J, Yi F, Xiang J, Wang Z, Wang J, 2021, Experimental Study On Micromilling Deformation Control Of Micro-Thin Wall Based On The Optimal Tool Path, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 43(5), 238.
- Zhou Y, Gu Y, Lin J, Zhao H, Liu S, Xu Z, Yu H, Fu X, 2022, Finite Element Analysis And Experimental Study On The Cutting Mechanism Of Sicp/Al Composites By Ultrasonic Vibration-Assisted Cutting, *Ceramics International*, 48(23), 35406–35421.
- Zhu F, Zhao X, Wang C, Li C, Lu C, Zhang C, 2024, A Data And Mechanism Hybrid Driven Cutting Parameter Optimization Method Considering The Machine Tool And Coolant Condition Flexibility, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 133(3–4), 1349–1363.

## İnternet Kaynakları

- 1- <https://waykenrm.com/blogs/cnc-cutting-vs-laser-cutting-which-process-is-better-for-you/> , 07.05.2025
- 2- <https://waykenrm.com/blogs/aerospace-parts-manufacturing/> , 07.05.2025
- 3- <https://www.openmind-tech.com/en/cam/5-axis-milling/impeller-blisk/> , 07.05.2025
- 4- <https://dermaldepot.co/products/jbp-nano-cannula-23g> , 11.10.2024
- 5- <https://www.trumony.com/Micro-Channel-Heat-Exchanger-Air-Cooler-Thin-Wall-Aluminum-Flat-Tube-Extrusion-pd48019630.html> , 11.10.2024
- 6- <https://easioncnc.en.made-in-china.com/product/DFwASYQECdpk/China-High-Quality-5-Axis-CNC-Milling-Billet-Aluminum-6061-7075-Aerospace-Structural-Components-Aircraft-Wing-Rib.html> , 12.05.2025



Yayınları (SCI ve diğer) :

SCIE’de taranan makaleler:

Hascelik A, Aslantas K, 2025, Minimisation of Micro-wall Deformation Through Variable Feed Rate Technique in Micro-milling Operations, Journal of Manufacturing Processes, 149, 770-784.

Hascelik A., Aslantas K., Yalçın, B, 2025, Optimization of Cutting Parameters to Minimize Wall Deformation in Micro-Milling of Thin-Wall Geometries, Micromachines 16(3), 310.

Aslantas K, Hasçelik A, Erçetin A, Danish M, Alatrushi L K H, Rubaiee S, Mahfouz A B, 2024, Effect of Cutting Conditions on Tool Wear And Wear Mechanism in Micro-Milling of Additively Manufactured Titanium Alloy, Tribology International, 193, 109340.

Aslantas K, Hascelik A, Çiçek A, 2022, Performance Evaluation of DLC and NCD Coatings in Micro-milling of Al7075-T6 Alloy, Journal of Manufacturing Processes 81, 976-990.

Danish M, Aslantas K, Hascelik A, Rubaiee S, Gupta M K, Yildirim M B, Ahmed A, Mahfouz A B, 2022, An Experimental Investigations on Effects of Cooling /lubrication Conditions in Micro Milling of Additively Manufactured Inconel 718, Tribology International, 173, 107620.

Hascelik A, Aslantas K, 2022, Determination of Cutting Force Coefficients with Mechanistic and Numerical Modelling in Micro Turning Process, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37(1), 235-246.

Aslantas K, Danish M, Hascelik A, Mia M, Gupta M, Ginta T, Ijaz H, 2020, Investigations on Surface Roughness and Tool Wear Characteristics in Micro-Turning of Ti-6Al-4V Alloy, Materials 13 (13), 2998.

#### Uluslararası Bildiriler:

Hascelik A, Aslantas K, Ahmed W, 2024, Exploring Sustainable Micro Milling: Investigating Size Effects on Surface Roughness for Renewable Energy Potential, Materials Research Proceedings, Renewable Energy: Generation and Application – (ICREGA) 43, 132-139.

Hascelik A, Aslantas K, Danish M, 2022, Eklemeli İmalat Teknoloji ile Üretilmiş Inconel 718 ve Ti6Al4V 'nin Mikro Frezelenmesinde Kesme Koşullarının Araştırılması, 19. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi (UMTİK), 591, Kapadokya, 31 Ağustos-3 Eylül.

Aslantaş K, Hasçelik A, 2019, Mikro Tornalama İşleminde Kesme Kuvvetlerinin Mekanistik Modellenmesi, 10. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTIS), Antalya, 7-9 Kasım.

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

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

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

#### Diğer Yayınları:

Hascelik A, 2025, Başlıca Mikro Mekanik İşleme Yöntemleri: Mikro Tornalama, Mikro Frezeleme, Mikro Delik Delme, Makine Mühendisliği Alanında Uluslararası Araştırmalar-II, Eğitim Yayınevi Kitap Bölümü, 1-10.

Hascelik A, Aslantas K, 2023, Examination of Deformation in Thin-Walled Structures Processed by Micro-Milling Method, Journal of Materials and Mechatronics: A 4(1), 134-146.

Hasçelik A, Aslantaş K, 2021, Mikro Tornalama İşleminde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi, Journal of Materials and Mechatronics: A 2(1), 13-25.

Hasçelik A, 2021, Tersine Mühendisliğin Makine Mühendisliği Alanındaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme, Journal of Characterization 1(özel), 42-53.

Hasçelik A, 2019, Mikro Tornalama İşleminde Takım Geometri Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 119s, Afyon.

Projeleri :

Yürütücü - Mikro Frezeleme İşleminde Değişken İlerleme Hızı ve Farklı Kesme Stratejileri Uygulanarak İnce Duvar Geometrisindeki Deformasyon Miktarının Azaltılması, 2022, Tübitak 1002 Hızlı Destek, Proje No:122M223 - tamamlandı.

Danışman - Portatif Presli Çakma Cıvata Monte Etme Prototipi Tasarımı ve Üretimi, 2025, Tübitak 2209-B, Proje No:1139B412402241 - devam ediyor.

Danışman - Yenilenebilir Enerji Kaynaklarıyla ve Atık Isı ile Çalışan Stirling Motoruyla Elektrik Üretimi, 2023, Tübitak 2209-B, Proje No:1139B412300852 - tamamlandı.

Danışman - İnce Duvarlı Yapıların Mikro Frezelenmesinde Duvar Yüksekliği ve Kalınlığının Deformasyona Etkisi, 2023, Tübitak 2209-A, Proje No:1919B012309499 - tamamlandı.

Araştırmacı - İnce Duvarlı Yapıların Mikro Frezelenmesinde Kesme Parametreleri Ve Kesme Stratejisi Etkisinin Araştırılması, 2022, AKÜ BAP, Proje No:22.Fen.Bil.22 - tamamlandı.