

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

**TROKOİDAL FREZELEMEDE İŞLEM  
PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Emin Orhun BAŞTEKELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat KIYAK

Temmuz, 2019

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

**TROKOİDAL FREZELEMEDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

Emin Orhun BAŞTEKELİ tarafından hazırlanan tez çalışması 24.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Murat KIYAK  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Murat KIYAK, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Orhan ÇAKIR, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof.Dr.Ekrem TÜFEKÇİ, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat KIYAK sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Trokoidal Frezelemede İşlem Parametrelerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emin Orhun BAŞTEKELİ

İmza

## TEŞEKKÜR

Çalışmamı yürüttüğüm süre boyunca, tezimi tamamlamamı sağladığı için “Yaratanım”a şükür, değerli görüşleri ile tezime yön veren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat KIYAK’a, deney çalışmalarında desteğini esirgemeyen Sayın Araş. Gör. Uğur EMİROĞLU’na, eşim Buse’ye ve beni yetiştiren aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Emin Orhun BAŞTEKELİ



## İÇİNDEKİLER

---

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| SİMGE LİSTESİ.....                                                       | VI   |
| KISALTMA LİSTESİ.....                                                    | VII  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                       | VIII |
| TABLO LİSTESİ.....                                                       | XII  |
| ÖZET.....                                                                | XIII |
| ABSTRACT.....                                                            | XV   |
| 1 Giriş.....                                                             | 1    |
| 1.1 Literatür Özeti.....                                                 | 13   |
| 1.2 Tezin Amacı.....                                                     | 30   |
| 1.2 Hipotez.....                                                         | 33   |
| 2 Deneye Hazırlık ve Deneyde Kullanılan Ekipmanlar.....                  | 34   |
| 3 Deney Sonuçları.....                                                   | 38   |
| 3.1 Kuvvet-Zaman (F-t) Grafikleri.....                                   | 36   |
| 3.2 Sıcaklık-Zaman (T-t) Grafikleri.....                                 | 59   |
| 3.3 Kuvvet Sıcaklık (F-T) Grafikleri.....                                | 68   |
| 3.4 Takım Aşınması Ve Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri.....                    | 73   |
| 3.5 Prosesler Sonucunda Edinilen Değerler.....                           | 76   |
| 4 Sonuç Ve Öneriler.....                                                 | 79   |
| A Kuvvet Zaman Grafikleri Matlab Kodları.....                            | 84   |
| B Sıcaklık Zaman Grafikleri Matlab Kodları.....                          | 94   |
| C Takım Aşınması -Takım Ucu Koordinatları Grafikleri Matlab Kodları..... | 102  |
| Ç Dinamik Kuvvet Zaman Grafikleri Matlab Kodları.....                    | 104  |

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| D Kuvvet Sıcaklık Grafikleri Matlab Kodları.....     | 106 |
| E Toplam Takımyolu Ve Talaş Hacmi Hesaplamaları..... | 111 |
| Kaynakça.....                                        | 115 |
| Tezden Üretilmiş Yayınlar.....                       | 118 |



## SİMGE LİSTESİ

---

|          |                                                       |
|----------|-------------------------------------------------------|
| $a_p$    | Eksenel Kesme Derinliği                               |
| $a_e$    | Yanal İlerleme                                        |
| $b_w$    | Kanal Genişliği                                       |
| $d$      | Takım Çapı                                            |
| $f_z$    | Maksimum Diş Başına İlerleme                          |
| $F_a$    | Eksenel Kuvvet                                        |
| $F_r$    | Radyal Kuvvet                                         |
| $h_m$    | Ortalama Talaş Kalınlığı                              |
| $N$      | Tezgah Devri                                          |
| $R$      | Trokoid Radyüsü                                       |
| $R_a$    | Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü                  |
| $R_{Sm}$ | Karesel Ortalaması Alınmış Yüzey Pürüzlülük Değerleri |
| $R_z$    | Ortalama Pürüz Yüksekliği                             |
| $R^2$    | Doğruluk Derecesi                                     |
| $Wh$     | Wattsaat(Watthour)                                    |
| $V_c$    | Kesme Hızı                                            |
| $w$      | Temas Açısı                                           |
| $W(S_v)$ | Trokoid Adım                                          |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| CAM     | Bilgisayar Destekli İmalat (Computer Aided Manufacturing)        |
| CNC     | Bilgisayar Kontrollü Nümerik Tezgah (Computer Numerical Control) |
| HRC     | Rockwell C Sertlik Derecesi (Hardness Rockwell C)                |
| JIS SKD | Japon Malzeme Standartları(Japan Material Standards)             |
| MRR     | Talaş Debisi(Material Removal Rate)                              |
| HPC     | Yüksek Performanslı Talaş Kaldırma(High Performance Cutting)     |
| VDM     | Değişken Derinlikli Frezeleme(Variable Depth Milling)            |
| VB      | Takım Aşınması (Tool Wear)                                       |
| BuE     | Yığılma Ağız (Built up Edge)                                     |
| PVD     | Fiziksel Buhar Biriktirme(Physical Vapor Deposition)             |
| TiAlN   | Titanyum Alüminyum Nitrür (Titanium Aluminum Nitride)            |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                   |                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.1</b>  | A.Kenar Frezeleme, B.Yüzey Frezeleme, C. Profil Frezeleme, D. Dişli Frezeleme, E. Delik Frezeleme, F. Havuz Frezeleme, G. Pah Kırma Frezeleme, H. Kanal/Oluk Frezeleme..... | 2  |
| <b>Şekil 1.2</b>  | Plaketlerin Yuvalara Civatalar İle Oturtulduğu Takım Ve Uçların Demonte Edilmiş Görseli.....                                                                                | 3  |
| <b>Şekil 1.3</b>  | Saplı Freze Takımı.....                                                                                                                                                     | 3  |
| <b>Şekil 1.4</b>  | Offset Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                                        | 4  |
| <b>Şekil 1.5</b>  | Raster Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                                        | 5  |
| <b>Şekil 1.6</b>  | Zigzag Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                                        | 5  |
| <b>Şekil 1.7</b>  | Spiral Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                                        | 6  |
| <b>Şekil 1.8</b>  | Radyal Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                                        | 6  |
| <b>Şekil 1.9</b>  | Sabit Z Seviyeli Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                              | 7  |
| <b>Şekil 1.10</b> | Değişken Z Seviyeli Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                           | 7  |
| <b>Şekil 1.11</b> | Modülasyon Destekli Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                           | 8  |
| <b>Şekil 1.12</b> | Helisel Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                                       | 8  |
| <b>Şekil 1.13</b> | Konvansiyonel Ve Trokoidal Frezeleme.....                                                                                                                                   | 9  |
| <b>Şekil 1.14</b> | ap-Kesme Derinliği, ae-İlerleme, w-Temas Açısı Olmak Üzere Konvansiyonel Kanal Frezeleme İle Trokoidal Frezeleme.....                                                       | 10 |
| <b>Şekil 1.15</b> | Trokoidal Frezeleme Esnasında Takımın ve Kaldırılan Talaşın Üstten Görüntüsü.....                                                                                           | 11 |
| <b>Şekil 1.16</b> | Trokoidal Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol.....                                                                                                                     | 11 |
| <b>Şekil 1.17</b> | Standart Trokoidal Frezelemeye Alternatif Takım Yolları.....                                                                                                                | 12 |
| <b>Şekil 1.18</b> | Kardioid ( $\infty$ )Fomunda Trokoidal Frezeleme İşleminde Takımyolu (2B).....                                                                                              | 29 |
| <b>Şekil 1.19</b> | Kardioid ( $\infty$ )Frezeleme İşlemi Sırasında Takım Yolu(3B).....                                                                                                         | 30 |
| <b>Şekil 1.20</b> | Sonsuz ( $\infty$ )Trokoidal Frezeleme İşleminde Takım Yolu(2B).....                                                                                                        | 30 |
| <b>Şekil 1.21</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme İşlemi Sırasında Takım Yolu (3B).....                                                                                               | 31 |
| <b>Şekil 1.22</b> | Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Takım Yolu (2B) .....                                                                                                                | 31 |
| <b>Şekil 1.23</b> | Standart Trokoidal Frezeleme İşlemi Sırasında Takım Yolu (3B).....                                                                                                          | 32 |
| <b>Şekil 2.1</b>  | Deneyde Kullanılan İş Parçası.....                                                                                                                                          | 33 |
| <b>Şekil 2.2</b>  | Deneyde Kullanılan Lazer Termometre.....                                                                                                                                    | 34 |

|                   |                                                                                                                                         |    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.3</b>  | Dinamometrenin İş Parçası Ve Ölçüm Bilgisayarına Bağlanması.....                                                                        | 34 |
| <b>Şekil 2.4</b>  | Dinamometrenin Tezgaha Bağlanan Kısım.....                                                                                              | 35 |
| <b>Şekil 2.5</b>  | Deneyde Kullanılan Takım.....                                                                                                           | 35 |
| <b>Şekil 2.6</b>  | Deneyde Kullanılan Tezgah.....                                                                                                          | 36 |
| <b>Şekil 3.1</b>  | Standart Trokoidal Frezelemeye Ait Bileşke Kuvvet, $F_x$ , $F_y$ Kuvvetleri - Zaman Grafiği.....                                        | 38 |
| <b>Şekil 3.2</b>  | Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet - Zaman Grafiği Kesiti.....                                        | 38 |
| <b>Şekil 3.3</b>  | Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Takıma Etkiyen İlerleme Kuvveti - Zaman Grafiği.....                                             | 39 |
| <b>Şekil 3.4</b>  | Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Takıma Etkiyen Kesme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti.....                                           | 40 |
| <b>Şekil 3.5</b>  | Standart Trokoidal Frezeleme Bileşke Kuvvet-Zaman Grafiği.....                                                                          | 41 |
| <b>Şekil 3.6</b>  | Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Oluşan İlerleme-Zaman Grafiği.....                                                               | 42 |
| <b>Şekil 3.7</b>  | Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Oluşan Dinamik Kuvvetleri Zamana Göre Veren $F_{dinamik}$ Fonksiyonu Grafiği.....                | 43 |
| <b>Şekil 3.8</b>  | Standart Trokoidal Frezeleme İşlemi İçin Oluşturulan Farklı Mertebedeki $F_{dinamik}$ Fonksiyonlarına Ait Hata (Rezidü) Grafikleri..... | 44 |
| <b>Şekil 3.9</b>  | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Farklı Eksenlerde Etkiyen Kuvvetler ve Bileşke Kuvvet-Zaman Grafikleri.....    | 45 |
| <b>Şekil 3.10</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet.....                                                    | 46 |
| <b>Şekil 3.11</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti.....                             | 46 |
| <b>Şekil 3.12</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti.....                                | 47 |
| <b>Şekil 3.13</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvveti-Zaman Grafiği.....                                    | 47 |
| <b>Şekil 3.14</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvveti - Zaman Grafiği Kesiti.....                              | 48 |
| <b>Şekil 3.15</b> | Sonsuz( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet-Zaman Grafiği.....                                       | 49 |
| <b>Şekil 3.16</b> | Sonsuz Trokoidal Frezeleme İşlemine Göre Dinamik Kuvvet Olarak Tabir Edilen Kısma Ait Grafik Ve Uydurulan Eğrilerin Denklemi.....       | 50 |

|                   |                                                                                                                                       |    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.17</b> | Matlab Programına Göre ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiğine Uydurulan Eğrilerin Hata Paylarını Gösteren Tablo..... | 51 |
| <b>Şekil 3.18</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiği Tümü.....                                                              | 51 |
| <b>Şekil 3.19</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet- Zaman Grafiği Kesiti .....                         | 52 |
| <b>Şekil 3.20</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvvet- Zaman Grafiği Kesiti.....                         | 52 |
| <b>Şekil 3.21</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvvet- Zaman Grafiği Kesiti.....                            | 53 |
| <b>Şekil 3.22</b> | Kardioid( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti.....                           | 54 |
| <b>Şekil 3.23</b> | Kardioid( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvvet- Zaman Grafiği Kesiti.....                             | 54 |
| <b>Şekil 3.24</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiğinin Statik Kuvvetleri Ve Dinamik Kuvvetleri.....                        | 56 |
| <b>Şekil 3.25</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme İşleminde Fdinamik(t) Denkleminde Ait Türetilen Fonksiyon.....                              | 57 |
| <b>Şekil 3.26</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme İşleminde Fdinamik(t) Denkleminde Ait Türetilen Fonksiyona Ait Hata Değerleri.....          | 57 |
| <b>Şekil 3.27</b> | Standart Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi.....                                                   | 60 |
| <b>Şekil 3.28</b> | Standart Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi Eğri Uydurma.....                                      | 61 |
| <b>Şekil 3.29</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi.....                                        | 62 |
| <b>Şekil 3.30</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi Eğri Uydurma.....                           | 63 |
| <b>Şekil 3.31</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi.....                                                | 65 |
| <b>Şekil 3.32</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi Eğri Uydurma.....                                   | 66 |
| <b>Şekil 3.33</b> | Standart Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Kuvvet-Sıcaklık Grafikleri.....                                                         | 69 |
| <b>Şekil 3.34</b> | Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Kuvvetlerin Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....                                  | 70 |
| <b>Şekil 3.35</b> | Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Kuvvetlerin Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....                                    | 72 |

|                   |                                                                                                            |    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.36</b> | Bileşke Kuvvet-Sıcaklık (Fbileşke-T) Grafiğinin 5. Mertebeden Fourier Açılımı İle Oluşturulan Grafiği..... | 73 |
| <b>Şekil 3.37</b> | Takım Yollarının Parça Üstünde Oluşturmuş Olduğu Bölgesel Pürüzlülük Değerleri.....                        | 74 |
| <b>Şekil 3.38</b> | ISO 8688'e Göre Takım Aşınmasının Ölçümü.....                                                              | 75 |
| <b>Şekil 3.39</b> | Trokoidal Yönteme Bağlı Takım Aşınması.....                                                                | 76 |



## TABLO LİSTESİ

---

|                  |                                                                                                                                  |    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1</b> | Trokoidal Frezelemenin İncelendiği İngilizce Çalışmaları(2007-2018) ve Bu Çalışmaların Özetleri Ve Bu Çalışmaların Özetleri..... | 28 |
| <b>Tablo 3.1</b> | Takıma Etkiyen Ortalama Kuvvetler Ve Değerleri.....                                                                              | 41 |
| <b>Tablo 3.2</b> | Takıma Etkiyen Ortalama Kuvvetler Ve Değerleri(Sonsuz Trokoidal).....                                                            | 48 |
| <b>Tablo 3.3</b> | Takıma Etkiyen Ortalama Kuvvetler Ve Değerleri Kardiod (∞)Trokoidal Frezeleme.....                                               | 55 |
| <b>Tablo 4.1</b> | Frezeleme Tipleri Ve Değerlendirme.....                                                                                          | 79 |

# **Trokoidal Frezelemede İşlem Parametrelerinin İncelenmesi**

Emin Orhun BAŞTEKELİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat KIYAK

Frezeleme prosesi günümüz imalat endüstrisinde yaygın olarak, özellikle kalıpcılık endüstrisinin ihtiyaç duyduğu karmaşık kalıp yüzey şekillerinin elde edilmesinde oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Daha spesifik örnek vermek gerekirse, kaba frezeleme operasyonları, parçanın işlenme sürecinde ciddi yer kaplamakta ve bu konunun iyileştirilerek sürenin kısaltılması için çeşitli optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu iyileştirme çalışmaları sadece tezgah ve takım kalitesinin iyileştirilmesi ile değil, ayrıca bitmiş parça için en doğru takım yolunun seçilmesi/üretilmesi ile de mümkün olmaktadır. Trokoidal frezeleme adı verilen takım yolu ile parça işleme tekniği ise, günümüzde optimize edilmiş takım yolu tekniklerinin başında gelmektedir ve gün geçtikçe popüleritesi artmaktadır. Konvansiyonel frezeleme metoduna göre takım ömrünü arttıran, işlem süresini oldukça azaltan bu teknik halen daha araştırmacılar tarafından detaylı olarak anlaşılamamış ve araştırılmamıştır. Ancak, bu teknik ile takım yolu seçiminin prodüktiviteyi iyileştirmedeki temel unsur olduğu anlaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında, standart trokoidal frezelemeye alternatif olarak iki yeni takım yolu daha geliştirilmiş ve iş parçası üstünde test edilmiştir. Deney sırasında takım sıcaklıkları, takıma etkiyen kuvvetler, takım aşınması ve bitmiş parçanın yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve standart trokoidal frezeleme ile kıyaslanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Trokoidal frezeleme, takım yolu, takım sıcaklıkları, kesme kuvvetleri, takım aşınması



# **The Investigation of Machining Parameters Effect on Trochoidal Milling**

Emin Orhun BAŞTEKELİ

Mech. Eng. Dept. Manufacturing Process Prog.

Masters Thesis

Thesis Supervisor : Asst.Prof. Dr. Murat KIYAK

The milling process is a widely used method in manufacturing industry, especially in the production of complex engravings such as molds. In particular, rough machining operations have to remove large amounts of material in reduced times. This objective calls for an optimization not only of each element of the manufacturing system (cutting tools, machine tool etc.) but also of their use by selecting the best milling tool path. The method is tried to be made more efficient by trochoidal application. The new term, called trochoidal milling, is getting more attention nowadays, even has an significant importance more then conventional milling since rising the tool life significantly, hasn't been searched enough by researchers. Tool path selection and optimization become a fundamental issue to increase the productivity associated to the process.

In this thesis, two novel approaches to the new modelling of trochoidal milling are proposed. For the maximization of the efficiency in the trochoidal milling operation, a different tool path strategies are examined. In these proposed new

trochoidal milling tool path methods cutting temperatures, and cutting forces are determined. In addition, the correlation is being made between trochoidal curves, temperature and tool wear parameters.

**Key Words** : Trochoidal milling, tool path, tool temperature, cutting forces, tool wear



Frezeleme, freze adını taşıyan ve çevresinde diş denilen bir çok kesme ağızı bulunan takımın kendi eksenini etrafında dönmesi, parçanın ilerleme hareketi yapması ile gerçekleşen bir işlemdir. Frezelemenin temeli, kullanılan takımın çok ağızlı olmasıdır. Frezeleme ile düz yüzeyler, çeşitli kanallar, cepler, şekilli yüzeyler işlenebildiği gibi vida ve dişli çarklar açılır. Frezeleme işlemi freze tezgahı adı verilen tezgahlarda yapılır. Freze tezgahları, takımı taşıyan ve malafa denilen elemanın konumuna göre yatay ve dikey freze olarak ikiye ayrılabilir. Ayrıca frezeleme ve delme işlemlerini yapabilen ve işleme merkezi denilen tezgahlar vardır. Bu tip tezgahlarda takım dönme hareketi ile beraber bağlı bulunduğu kızak sistemi ile aşağı yukarı hareket edebilir [1].

Frezeleme operasyonunda üç temel işlem parametresi bulunmaktadır. Bunlar; iş parçasının yüzey kalitesi, takım aşınması ve takıma gelen kuvvetlerdir. İş parçasının yüzey kalitesi ve hassas toleranslar, iş parçasının yorulma mukavemet değeri açısından son derece önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü ne kadar düşük seviyelerde olursa çatlak ilerlemesi gecikmekte, ayrıca üstüne yapılacak kaplama ve yapıştırıcı katmanlarının o ölçüde başarılı bir birleştirme işlemi gerçekleştirmesini sağlamaktadır.

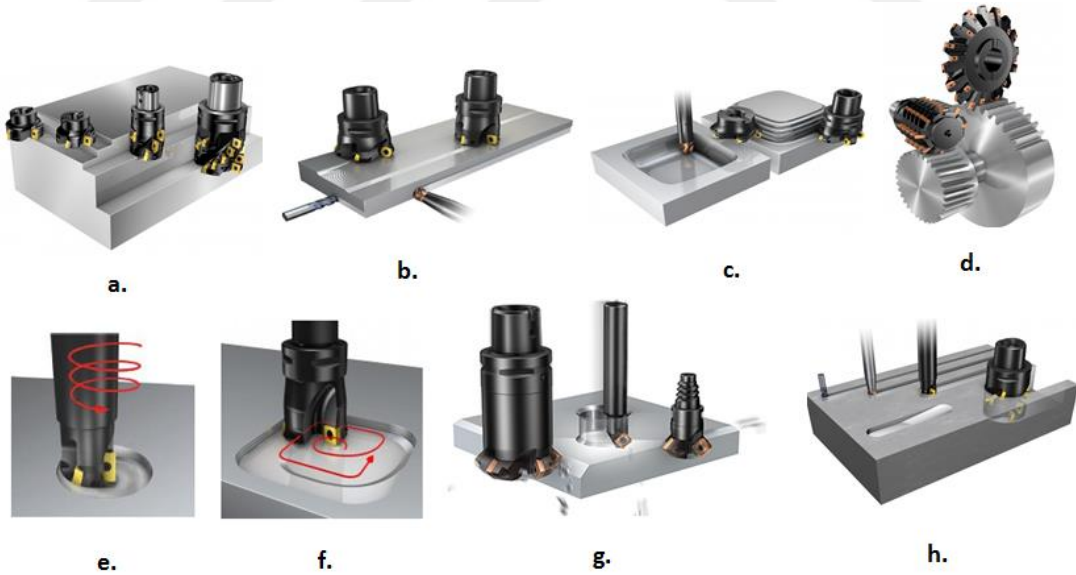
İkinci olarak takım aşınması, parçanın birim imalat maliyetinin belirlenmesinde büyük yer kaplamaktadır. Frezeleme operasyonunda seri üretilen parçaların süre temelinde bir maliyeti bulunmakta, operasyon içinde en fazla süreyi ise takım-iş parçası bağlama süresi kaplamaktadır. Takımın kontrolsüz aşınması, iş parçasının yüzey kalitesinin istenen seviyelerde olmasını engelleyeceğinden, işlem durdurularak takımın değiştirilmesi gerekecektir. Bu durum, ürünün tamamlanma süresini arttıracak ve nihai olarak bitmiş ürünün maliyetleri yukarı çıkacaktır. Dolayısıyla, takımın kontrollü olarak aşınmış olması, hatta mümkün

olmadığı halde hiç aşınmamış olması,talaşlı imalat dünyasında en çok talep edilen parametrelerden birisidir.

Üçüncü olarak, takıma etkiyen kuvvetlerin kontrol edilebilir ve stabil olması istenen faktörlerden birisidir. Takımın titreşimli veya yükse kesme kuvvetleri altında çalışması tercih edilmez. Titreşimli çalışma takımın ömrünün çabuk dolmasına ve takımın kırılmasına sebebiyet verirken,takımın büyük kesme kuvvetleri ile çalışması genellikle, açığa yüksek ısının çıkmasına,böylelikle de takımın çabuk aşınmasına yada tercih edilmeyen yığılma ağız (BuE) oluşumlarına sebebiyet vermektedir.

Frezeleme operasyonunun birçok kategoride değişik tipleri bulunmaktadır. İşlenecek parça geometrisine göre, kesici takımların tipine göre, takımın izlediği kesme yoluna göre çeşitli sınıflandırmalar yapılabilir.

Şekil 1.1’de işlenecek parça geometrisine göre sınıflandırılabilen kenar frezeleme, yüzey frezeleme, profil frezeleme, dişli frezeleme, delik / havuz açma, pah kırma frezeleme, kanal/oluk frezeleme işlemleri görülmektedir.



**Şekil 1.1** A. Kenar Frezeleme, B.Yüzey Frezeleme C. Profil Frezeleme, D. Dişli Frezeleme, E. Delik Frezeleme, F. Havuz Frezeleme, G. Pah Kırma Frezeleme, H. Kanal / Oluk Frezeleme [2]

Freze takımları çok çeşitli olmalarına karşın kabaca sapsız (delikli) ve saplı olmak üzere iki gruba ayrılır. Sapsız olan frezeleme takımları disk veya silindirik formda olabilir. Freze takımlarında, kesme kuvveti hesabı yapımında yöntem olarak çevresinden kesen ve alından kesen olmak üzere iki tip hesaplama yöntemi vardır. Her iki yöntemde kullanılan takımlar silindirik olmakla beraber çevresel frezeleme, kesici uçları çevrede bulunan silindirik freze takımı ile, alın frezeleme ise kesici uçları alın yüzeyinde bulunan alın freze takımları ile gerçekleştirilir[1]. Şekil 1.2’de sapsız takımlarda kullanılan plakelerin yuvalara civatalar ile oturtulduğu takım ve uçların demonte edilmiş görseli görülmektedir. Ayrıca Şekil 1.3’te saplı freze takımına örnek verilmiştir[3,4,5].



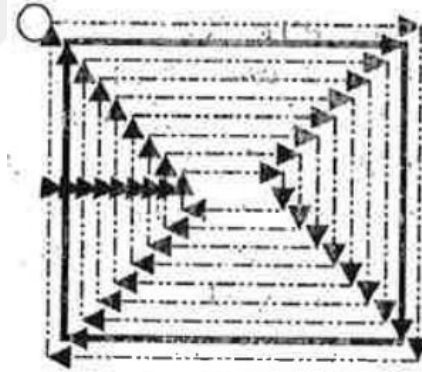
**Şekil 1.2** Plaketlerin Yuvalara Civatalar İle Oturtulduğu Takım Ve Uçların Demonte Edilmiş Görseli [3,4]



**Şekil 1.3** Saplı Freze Takımı [5]

Konvansiyonel frezeleme işlemine alternatif olarak takım yollarına göre frezeleme işlemleri spiral dış (offset) frezeleme, raster frezeleme, zigzag frezeleme, spiral frezeleme, radyal frezeleme, sabit z seviyeli frezeleme, değişken z seviyeli frezeleme, anahtarlama frezeleme, helisel frezeleme ve trokoidal frezeleme olarak sınıflandırılabilir.

Takımın işlenecek bölgeyi, giderek daralan, eğrisel ya da doğrusal zarflar içine alarak, en dış bölgeden işlenecek en iç bölgeye doğru talaş kaldırdığı frezeleme metodunun ismidir. Alternatif takım yolları içinde, en düşük takım ömrünü veren frezeleme metodudur. Takımın düzenli sıklıklarla işlenecek parçanın iç kısmına girmesinin takım üstünde, ilerleme anında yüksek çarpma kuvvetlerine sebep olmasından ve diğer frezeleme metodlarına göre daha fazla yığma ağız oluşumuna (BuE) sebebiyet verdiği için performansının bu şekilde olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 1.4'te offset frezeleme sırasında takımın izlediği yol verilmiştir [6].



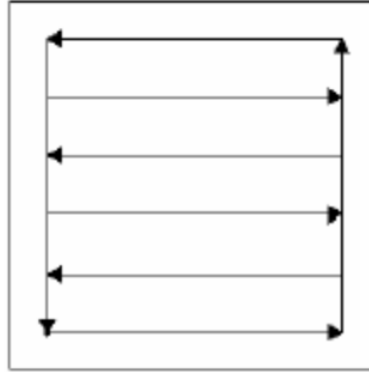
**Şekil 1.4** Offset Frezeleme Esansında Takımın İzlediği Yol [6]

Yapılan araştırmalara göre bu frezeleme metodunda özellikle yüksek kesme hızlarına erişildikçe, takımndaki kesen ağızların, parça ile birim zamandaki temas sıklığı arttığından, artan sıcaklığa bağlı olarak, diğer frezeleme metoldarına göre çok daha hızlı bir biçimde takım aşınması görülmektedir [6].



**Şekil 1.5** Raster Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol [6]

Bu yöntem “merdiven işleme” olarakta bilinmektedir. Kaba frezeleme işlemlerinde olduğu kadar bitirme (finiş) frezeleme işlemlerinde de kullanılmaktadır. Kesme verimliliğinin, süre bazında incelendiği durumlarda, düşük performanslı bir kesme yöntemi olarak kabul edilmekte ve bu takım yolu üstünde çeşitli iyileştirmeler yapılmaktadır. Şekil 1.6’da zigzag frezelemeye ait takım yolu görülmektedir [7].



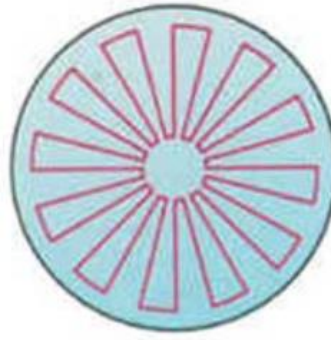
**Şekil 1.6** Zigzag Frezeleme Esnasında Takımın İzlediği Yol [7]

Kesici takımın merkezden dışa doğru kesme hareketini gerçekleştirdiği bu takım yolu daha ziyade yüksek hızlı işleme/frezeleme operasyonlarında tercih edilmektedir. Şekil 1.7 ’de spiral frezelemeye ait takım yolu görülmektedir [7].



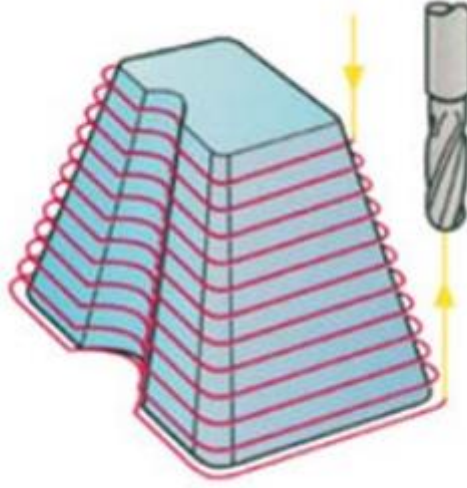
**Şekil 1.7** Spiral frezeleme esnasında takımın izlediği yol [7]

Özellikle kalıp frezeleme operasyonlarında kullanılan bu yöntem, kalıbın belli bir kısmının işlenmesinde kullanılmaktadır. Şekil 1.8’de radyal frezelemeye ait takım yolu görülmektedir [7].



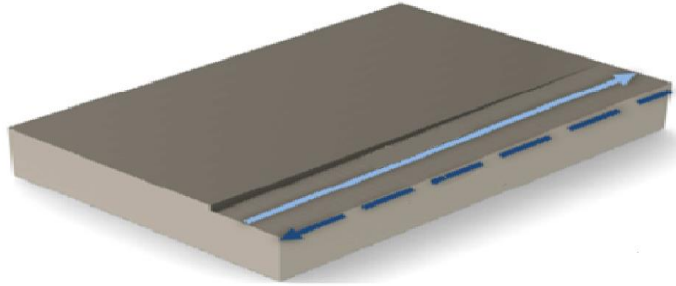
**Şekil 1.8** Radyal frezeleme esnasında takımın izlediği yol [7]

Freze takımı işleyeceği her bir takım yolunu basamaklara ayırdığı kot farkları ile (belirli Z seviyeleri ile) ayırır ve talaş kaldırır. Bu metod ile takıma gelen kesme yükü nispeten kontrol edilir ve hassas dik duvar yüzeyleri elde edilebilir. Şekil 1.9’da Sabit Z seviyeli Frezeleme işlemi görülmektedir [7].



**Şekil 1.9** Sabit Z seviyeli frezeleme esnasında takımın izlediği yol [7]

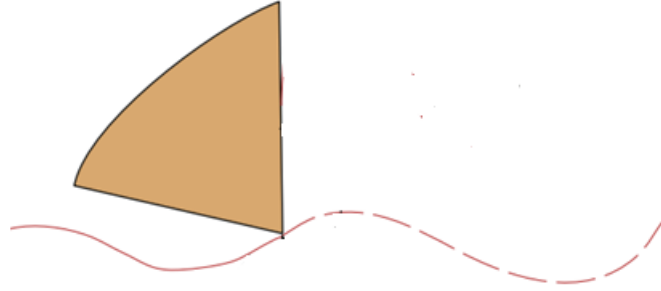
Rampa frezeleme olarak da literatürde geçen bu yöntemde, takımın işleyeceği kanalın projeksiyon alanı aynı kalmakta ancak kanal boyunca kot farkı belirli bir eğim açısı ile sabit olarak değişmektedir. Bu yöntemde kesme derinliği değiştiği için takıma gelen yükler zamana bağlı olarak değişmekte ise bazı çalışmalarda bu yöntemin takımda çentik etkisinden dolayı oluşacak takım hasarının nispeten önüne geçilebildiği vurgulanmıştır. Şekil 1.10'da Değişken Z seviyeli frezeleme operasyonuna ait takım yolu görülmektedir [8].



**Şekil 1.10** Değişken Z seviyeli frezeleme esnasında takımın izlediği yol [8]

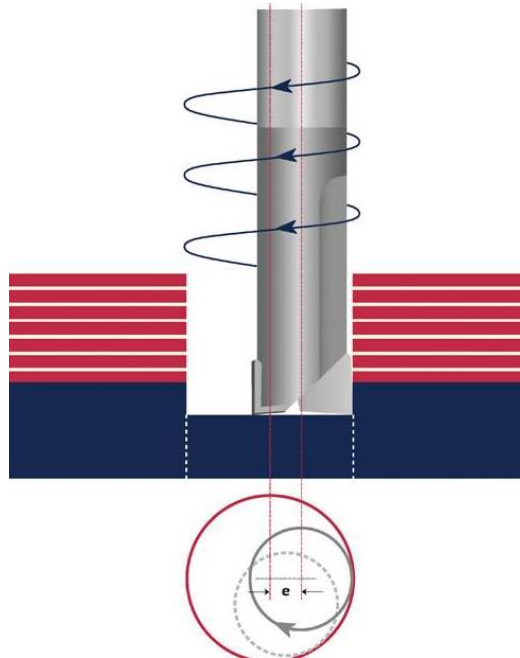
Takımın frezeleme işlemi gerçekleştirdiği yol boyunca Z seviyesinin (dalga boyu) belirli bir frekans aralığında değiştirilerek, takımın sinüsoidal bir yol izleyerek kesme işlemini gerçekleştirdiği takım yolu biçimidir. Bu yöntemin üstünlüğü konvansiyonel ve sürekli kesimin yapıldığı tornalama gibi işlemlerde logritmik olarak artan takım sıcaklığı ve kuvvet değerlerinin %30 civarında düşürülebildiği

yapılan çalışmalarda ortaya atılmıştır [9].Modüle edilmiş frezeleme operasyonunda takımın izlediği yol Şekil 1.11’de verilmiştir.



**Şekil 1.11** Modülasyon destekli frezeleme esnasında takımın izlediği yol [10]

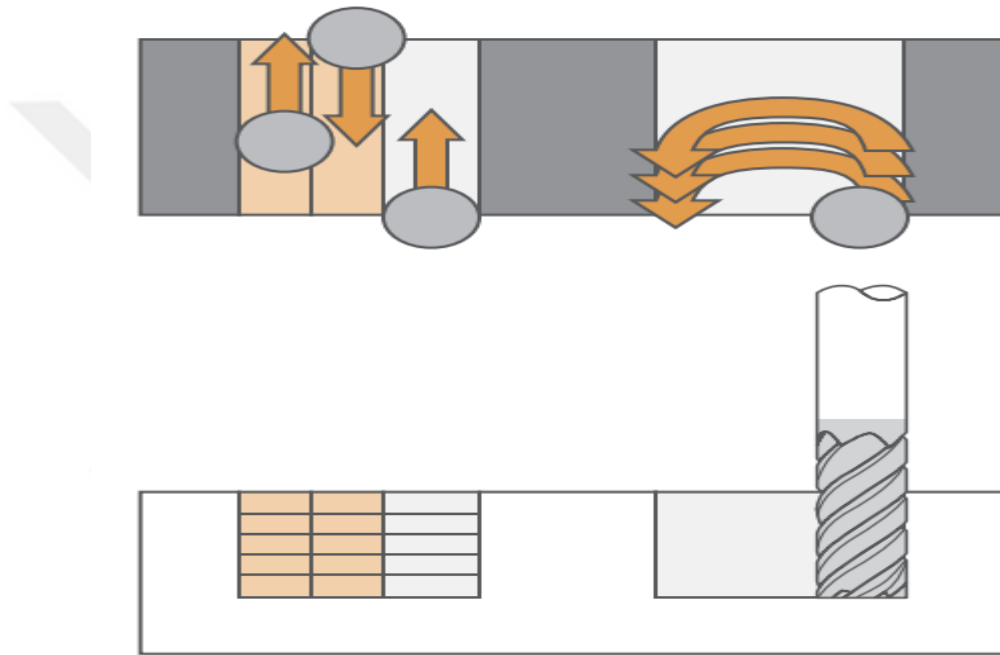
Freze takımının uzayda helis çizerek delik açma işlemi için gerçekleştirdiği prosesin adıdır. Tezgahlar haricinde, taşınabilir robotlar aracılığı ile, robotun iş parçası yakınına monte edilip, takımın tıpkı helisel frezelemedeki gibi kanal açması işlemine “orbital frezeleme” adı verilmektedir. Bu işlemde takıma 3 eksen de kuvvet etkimekte (özellikle iki eksendeki kuvvetlerin sinüsoidal oluşu) ve bu yönüyle trokoidal frezeleme işlemine benzerlik göstermektedir [11,12].



**Şekil 1.12** Helisel frezeleme esnasında takımın izlediği yol [12]

Bu proseslerden günümüzde (takım aşınması, yüzey kalitesi ve takıma etkiyen kesme kuvvetleri bakımından) en olumlu sonuç ve umut verici olan proses trokoidal frezeleme işlemi olduğundan, özellikle son 10 yılda CAM programı ve tezgah üreticileri ürettikleri program ve tezgahları trokoidal frezelemeye adapte olacak şekilde geliştirmişlerdir [13].

Takımın konvansiyonel kanal açma prosesi boyunca izlediği lineer yollar yerine, dairesel olan bir takım yolu takip ederek gerçekleştirdiği talaş kaldırma hareketine trokoidal frezeleme denmektedir.

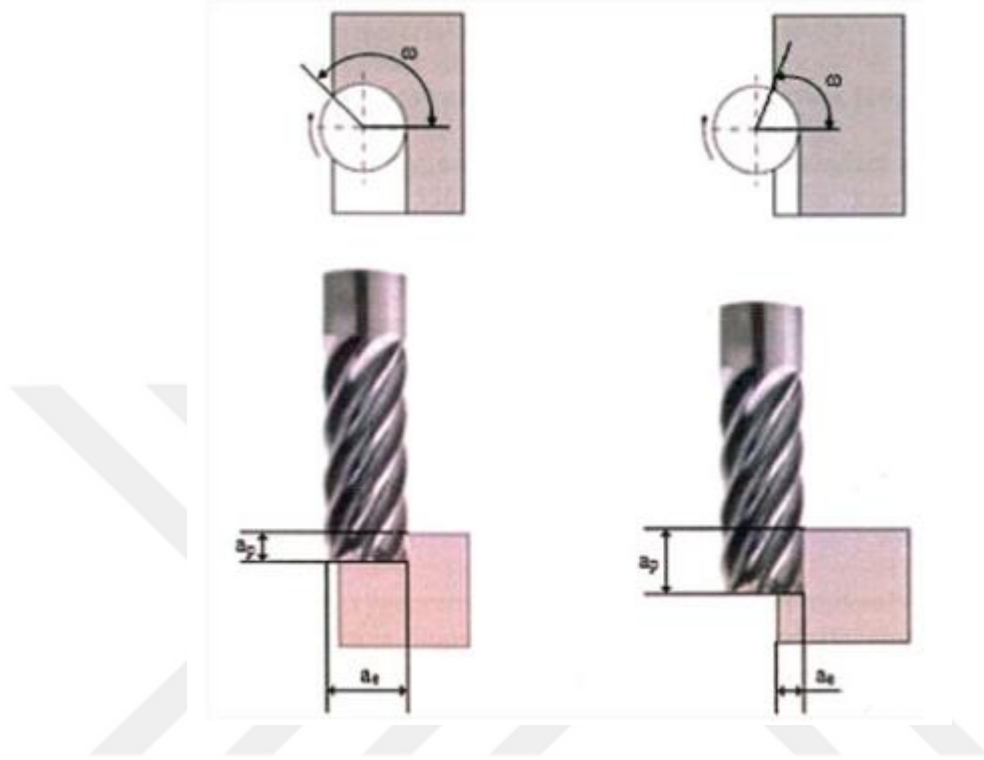


**Şekil 1.13** Konvansiyonel ve trokoidal frezeleme [14]

Konvansiyonel kanal frezeleme işleminde tek pasoda takım boyunun en fazla %20-30 arasındaki bir derinlikte talaş kaldırma işlemi yapılabilirken, trokoidal frezelemede takım boyunun tamamı derinlik miktarı olarak verilebilmektedir. Böylelikle takımın bütün kesici uçlarından faydalanılmakta, bu durum çevrim sürecini oldukça kısaltmaktadır. Bu durum Şekil 1.13'te gösterilmektedir.

Ayrıca trokoidal frezelemenin klasik kanal frezeleme operasyonundan bir diğer farkı bulunmaktadır. Konvansiyonel kanal frezeleme işleminde takım bütün çapı boyunca ve lineer bir biçimde talaş kaldırırken, trokoidal frezelemede takımın

istenilen kanal çapına gre seçilmesi halinde, freze belirli bir temas açısı dahilinde bütün bir kanal genişliği boyunca kesim yapabilmektedir. Bu durum şekil 1.14 'te gösterildiği gibidir[15].



**şekil 1.14**  $a_p$ -kesme derinliği,  $a_e$ -ilerleme,  $w$ -temas açısı olmak üzere konvansiyonel kanal frezeleme ile trokoidal frezeleme [15]

Trokoidal frezelemede, konvansiyonel frezelemeye göre oluşan en büyük farklılıklardan birisi, takımın trokoid hareketi boyunca kaldırılan talaşın kalınlığının sabit olmayışdır. Kaldırılan talaşın ortalama kalınlığını veren formül

$$h_m = f_z \frac{\sqrt{a_e}}{d} \quad (1.1)$$

olarak tanımlanmaktadır[16]. Bu formüle göre

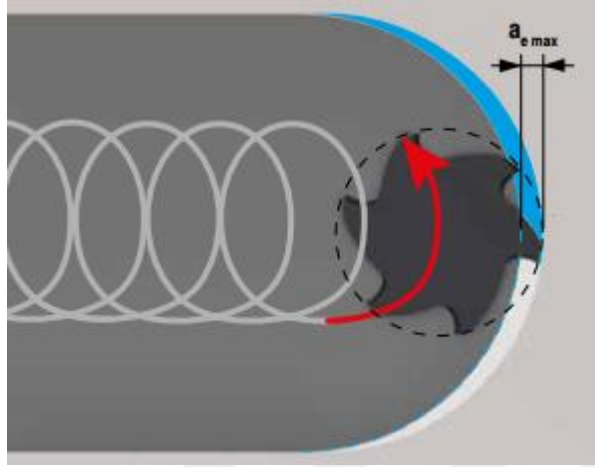
$h_m$ =ortalama talaş kalınlığı

$f_z$ =maksimum diş başına ilerleme

$a_e$ =yanal ilerleme(mm)

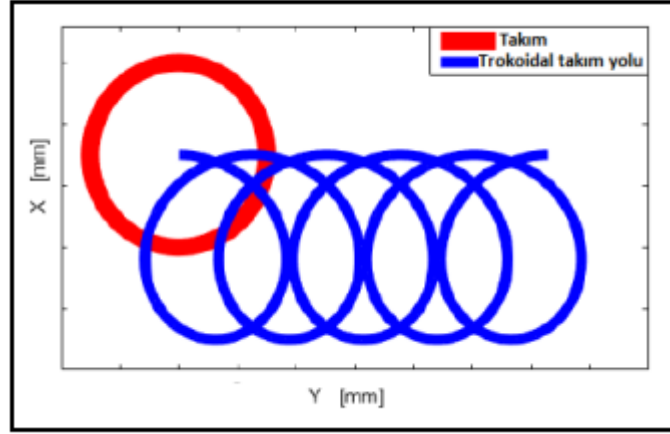
$d$ =takım çapı (mm) dir.

Bu formülün ve parametrelerin daha iyi anlaşılması için trokoidal frezeleme esnasında kaldırılan talaşın kalınlığını veren görüntü Şekil 1.15'te gösterilmiştir.

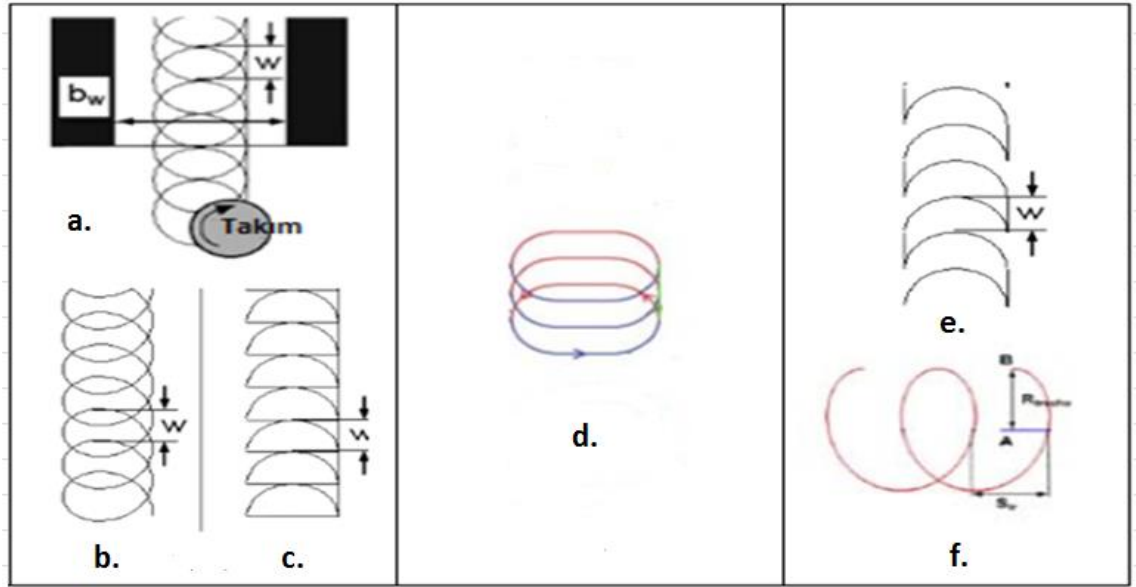


**Şekil 1.15** Trokoidal frezeleme esnasında takımın ve kaldırılan talaşın üstten görüntüsü [16]

Trokoidal frezelemede kullanılan ve standart trokoidal frezeleme olarak CAM programlarında kabul edilen tam çembersel takım yolunun haricinde, yarım çember, çeyrek çember, episikloidal, sarkaç, adım ilerlemeli sarkaç gibi çembersel ve eliptik şekillerde değişik takım yolları üretilmiş, ancak ne yüzey pürüzlülüğü ya da takım aşınması bakımından, ne de takıma etkiyen kesme kuvvetleri bakımından standart çembersel (trokoidal) yol ile kıyaslanabilecek bir başarı elde etmişlerdir[18,19]. Trokoidal frezeleme esnasında takımın izlediği yol Şekil 1.16 da gösterilmiştir. Ayrıca günümüzde standart trokoidal frezelemeye alternatif olabilecek diğer tip trokoidal frezeleme yöntemleri Şekil 1.17'de gösterilmiştir[17].



**Şekil 1.16** Trokoidal frezeleme esnasında takımın izlediği yol [17]



**Şekil 1.17** Standart trokoidal frezelemeye alternatif takım yolları [17,18]

- (a) Standart trokoidal frezeleme ( $b_w$  –kanal genişliği ve  $w$  ( $S_v$ )-trokoidal adım)
- (b) Sikloid trokoidal frezeleme
- (c) Yarı-çembersel trokoidal frezeleme
- (d) Quasi trokoidal frezeleme
- (e) Sarkaç trokoidal
- (f) Herhangi bir trokoidal tipinde takım yolunu tarif etmek için gerekli parametreler trokoid radyüsü ( $R$ ), trokoidal adım( $S_v$ )

Trokoidal frezeleme günümüzde özellikle talaşlı şekillendirilmesi zor kabul edilen sert malzemeler ile talaş kaldırma esnasında yüksek sıcaklıkların oluştuğu nikel bazlı uzay-havacılık sanayii alaşımlarının ve bu karakterde olan değişik tip çeliklerin (örn; östenitik tip paslanmaz çelikler) kaba talaş kaldırma proseslerinde çevrim süresini önemli ölçüde (%50 ve fazlası) kısalttığı için tercih edilmektedir. Bu proseslerin haricinde aynı kesme süresine sahip ancak, daha fazla enerji tasarrufu istenen ya da çok daha az takım aşınmasının istendiği kalıpcılık uygulamaları ile kaba frezeleme uygulamalarının yoğun olarak kullanıldığı proseslerde kullanılabilmektedir[20,21] .

Trokoidal frezeleme konusunda literatüre geçen ilk çalışma Ötkür M. ve Lazoğlu İ. tarafından yayımlanmıştır. Bu çalışmada, takım-iş parçası teması sırasında oluşabilecek kuvvetlerin tahmini için analitik ve nümerik modeller geliştirilmiştir. Bunlara ilave olarak verimlilik artırıcı çalışma olan ‘ikili trokoid takım yolu’ adı verilen yeni bir takım yolu geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, bütün oluşturulan kurgusal modeller önce Unigraphics CAM modülünde simüle edilmiştir. Simülasyonun ardından, kurgusal modeller 3 eksenli CNC tezgahta ve 12 mm çapa, 100 mm toplam boya sahip 25°lik helis açısına sahip 2 kesen ağızlı takımla, Al 7039 bloklar üstünde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm değerleri dinamometre ile ölçülmüş ve veriler ,veri toplama programında bir araya getirilmiştir. Sonuçta ortaya atılan analitik ve nümerik modellerin simülasyon verileri ve gerçekleşme sonucu oluşan veriler ile uyumluluk gösterdiği ortaya çıkmıştır[22].

### **1.1 Literatür Özeti**

Rauch M., Duc E. ve Hascoet J., (2008) takım yolu parametrelerine (malzemenin kesme için dayanım sabiti, takım yarıçapı, trokoid yarıçapı, trokoid temas açısı ve ilerleme değerleri) bağlı olarak maksimum radyal deforme olmamış talaş derinliğini Al 5086 malzeme üstünde hesaplamak için matematik model kurmuştur. Bu model için iki farklı interpolasyon modeli test edilmiş ve proses sabitlerine bağlı olarak optimum trokoidal işlem için bu interpolasyon modelleri

kıyaslanmıştır. Ardından, kurulan bu modellerin gerçek ortamda cep frezeleme işlemi için CNC tezgaha entegrasyonu yapılmıştır. Paralel kinematik zincire sahip CNC tezgahta denenen model için, Al 5086 malzemeden yapılmış blok üstünde 160x100x40 mm ebatlarındaki cep frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Diğer test ise, 100x100x40 mm ebatlarındaki bir cep frezeleme işlemi için seri kinematik zincire sahip CNC tezgahta 20 mm takım çapı ve 5 mm'lik trokoid adımı için gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, trokoidal frezeleme işlemlerinde zamana bağlı olarak kurulan matematik modellerin doğruluğunun yüksek oranda tezgahların sahip olduğu ani ivmelenme kabiliyeti (jerk) değerlerine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır[23].

Ibaraki S., Yamaji I., Matsubara A. (2009) çalışmalarında konvansiyonel frezeleme ve trokoidal frezelemeyi kaba frezeleme operasyonu içinde kıyaslamak için iki farklı test yapmışlardır. Bütün testler, 150x150x60 mm ebatlarında ve JIS SKD 61 japon standartlarında 53 HRC sertliğe sahip kalıp çeliği ile 0,5 bar kesme sıvısı kullanılarak uygulanmıştır.

İlk test içinde düz uçlu freze takımı ( (Al,Ti,S)-N kaplı sinterlenmiş karbür takım 10 mm çapa, 6 kesen ağıza sahip ve 4800 d/dk devirde) ile trokoidal frezeleme işlemi ve yuvarlak uçlu parmak freze takımı ile ( (Al,Ti,S)N kaplamalı sinterlenmiş karbür, 5 mm radyüse ve 2 kesen ağıza sahip-2800 d/dk devirde çalıştırılan) konvansiyonel frezeleme işlemi kıyaslanmıştır. Bu test yapılırken bütün takımların izleyeceği ana güzergah voronoi diyagramı adı verilen matematiksel bir şema referans alınarak hesaplanmıştır.

Ayrıca konvansiyonel frezeleme işlemi, şema sonucunda ortaya çıkan ana güzergahı çevreleyen birbirine paralel ve birbirini çevreleyen takım yollarını takip ederek kesme işlemini gerçekleştirmesi sağlanmıştır. İlk testin sonucunda trokoidal işlemin konvansiyonel işleme göre %21 zaman tasarrufu sağladığı görülmüştür[24].

Szaloki I. ve ark. (2012) trokoidal frezelemenin önemini konvansiyonel frezelemeye göre keşfetmişler ve buna ilaveten 5 değişik tipteki trokoidal frezeleme tipini, konvansiyonel frezeleme metodu ile (1 tanesi sonlu elemanlar

simülasyon ortamında, 4 tane CNC tezgah üstünde olmak üzere) takım üstüne etki eden kuvvetler ( $F_a$ ,  $F_r$ ), talaş debisi (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü ( $R_z$ ) parametreleri cinslerinden kıyaslamışlardır.

Uygulanan 5 farklı trokoid yolu  $w=1.2$  ve  $w=2$  mm için birer defa tekrar edilmiştir. Test aşamasında, 3 Eksen CNC tezgah, 1 adet dinamometre, 160x50x50 mm ebatlarında 40CrMnMo7 malzemesinden yapılmış iş parçası ve trokoidal frezeleme işlemleri için  $60^\circ$  helis açısı, TiAlN kaplama ve 6 kesen ağızdan oluşan sinterkarbür takım kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Microsoft Excel ortamında verilmiştir.

Sonuç olarak, tam trokoidal ve yarı dairesel frezeleme işlemlerinin birbirine benzer sonuç verdikleri ve tam trokoid eğrilerinin modifiye edilmiş olanlara göre en iyi performansı gösterdiği, ancak konvansiyonel kanal frezeleme işlemine göre talaş debisinin daha az ve yüzey pürüzlülüğünün daha fazla olduğu ölçülmüştür. İstisnai olarak çıkan bu veriyi araştırmacı (bu çalışmada takıma etkileyen kuvvetlerin haricinde, diğer parametrelerin konvansiyonel kanal frezeleme işleminde daha başarılı çıkmasını ise) kullanılan takımın trokoidal frezeleme için üretilmiş bir takım olduğundan dolayı meydana geldiğine dikkat çekmektedir[25].

Uhlmann ve ark. (2013) enerji tasarruflu talaşlı imalat sistemleri üstüne çalışma yapmışlar ve çalışmalarında Ti6Al4V malzemesinin kuru trokoidal frezelenmesi ile, soğutma sıvısı kullanılarak yapılan konvansiyonel frezelemesini, proses süresi ve harcanan enerji bazında kıyaslamışlardır.

Çalışma sırasında kullanılan tezgah, maksimum spindle devri 160.000 d/dk olan 5 eksenli CNC tezgah olup, kesici takım olarak 10 mm çapa sahip, TiAlN kaplamalı ve 6 kesen ağızlı sinterlenmiş karbür takım kullanılmıştır.

Sonuç olarak, aynı miktarda kaldırılacak talaş miktarı için, trokoidal frezelemede kullanılması gereken güç miktarı çok az daha fazla (%6) olmasına rağmen, (trokoidal frezelemede soğutma sıvısı kullanılmadığı halde) konvansiyonel

frezelemeye göre Wh cinsinden çekilen enerjinin %15 daha az ve işlem süresinin %35 daha kısa olduğunu göstermişlerdir [21].

Szaloki I. ve ark. (2014) sikloid formundaki trokoidal frezelemenin işlem parametrelerinin, kesme kuvvetlerine ve iş parçası mikro geometrisine (yüzey pürüzlülüğü, salgılar vb.) olan etkilerini deneysel tasarım metodlarıyla (27 bileşenli Taguchi Matrisi oluşturulmuş ancak zaman ve para tasarrufu için yalnızca 6 bileşeni kullanılmıştır) incelemiş ve ampirik bağıntılar elde etmişlerdir. Çalışma sırasında 3 eksenli CNC tezgah kullanılmıştır . Ayrıca kullanılan takım ve iş parçası sırasıyla  $d=12$  mm çapa sahip ve ebatları 160x50x50 mm olan 40CrMnMo7 malzemeden levha formundadır. Kesme işlemi sırasında soğutucu olarak yüksek basınçlı hava kullanılmıştır.

Kuvvet ölçümü için dinamometresi kullanılmış olup yüzey profili ile ilgili bilgileri edinmek için Profilometre kullanılmıştır. Bu çalışma yapılırken ilk olarak trokoidal frezeleme esnasında kullanılacak ve CNC tezgah için en ideal olacak sikloid formunun matematiksel çalışması yapılmıştır. Buna göre, sikloid adımlarının ( $t$ ) geçmiş literatüre bakılarak 0,1 mm ile 0,4 mm arasında olması gerektiği tespit edilmiş ve makinenin prosesi gerçekleştirilmesi sırasında karışıklık yaşanmaması için  $t=0,2$  mm olarak seçilmesi uygun görülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında, oluşturulan 27 bileşenli matristen 6 tanesi test amaçlı alınmış ve üstüne 2 bileşen, kuvvet ölçümü için ortaya atılacak amprik bağıntının kontrolünde kullanılmak üzere eklenmiştir. Yapılan ölçümler ile ortaya koyulan formülün tutarlılığının  $R^2=0.99$  olması dikkat çeken unsurlardan birisi olmuştur. Çalışmanın son aşamasında profilometre ile yapılan ölçümler sonrası elde edilen veriler, trokoidal frezelemede kullanılan işlem parametrelerine bağlı olarak amprik bağıntı şeklinde ifade edilmiştir[18].

Peng F. ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, trokoidal frezeleme sırasında radyal kesme derinliğine bağlı olarak takıma etkiyen kuvvetlerin matematik modelini araştırmışlar ve modelin doğruluğunu gerçek bir deney üstünde test etmişlerdir. İlk olarak, trokoidal frezelemenin CAM programlarındaki kabulünün (tam dairesel-tam trokoidal) deneyde ve simülasyonda kullanılacak trokoid eğrisi

olduğunu varsaymış ve yapılacak bütün dinamik ve kinematik denklemleri bu kabul üstüne oluşturmuşlardır.

Daha sonra elde edilen bu matematik denklemler  $n=1000$  d/dk spindle devri,  $f_z=0.05$  mm/dev diş başına ilerleme  $d=8$  mm takım çapı,  $d_t=6$  mm trokoid çapı ve  $w=4$  mm trokoid adımı olacak şekilde sistemi simüle etmişlerdir. İkinci aşama olarak, sistemi CNC tezgah üstünde gerçekleştirme çalışması yapmışlardır. Bu çalışma sırasında, 58x20x1 mm ebatlarında bir cebi trokoidal frezeleme ile açmışlar ve sonuçları dinamometresi ile ölçüp simülasyon verileri ile kıyaslamışlardır. Sonuç olarak kurulan matematik model ile test verilerinin x ekseninde %85,62, y ekseninde %74,42 ölçüsünde uyumluluk gösterdiğini tespit edip, meydana gelen tutarlılığın oldukça yüksek ve kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir[26].

Polishetty A. ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada ince duvarlı Ti6Al4V malzemesinden yapılan bir parçanın trokoidal işleme kabiliyetini farklı işlem parametrelerine bağlı olarak (trokoidal adım, radyal kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme) incelemişlerdir.

Çalışmada kullanılan iş parçası 150x50x70 mm ebatlarında Ti6Al4V titanyum alaşımı olup, kullanılan tezgah 5 eksenli CNC tezgahıdır. Ayrıca, frezeleme sırasında 4 kesen ağızlı takım kullanılmış olup kesme esnasında içinde 1:10 oranında suyla karışık Fenol-%2,8 barındıran soğutma sıvısı kullanılmıştır. Kesme kuvvetlerinin ölçümü dinamometre ile yapılmış olup, iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ölçümleri 3D Profilometre ile gerçekleştirilmiştir.

Sonuçta deneyi yapılan kişiler tarafından ince cidarlı Ti6Al4V alaşımının trokoidal işlenmesinde bazı önemli hususlar ortaya koyulmuştur. Buna göre kesme kuvvetlerinin şiddeti diş başına ilerleme, kesme hızı ve trokoidal adım miktarı arttıkça artmaktadır ve takım aşınması miktarını azaltmak için (üretim kabiliyetini artırmak için) takımın düşük kesme kuvvetlerine maruz kalması gerekmekte,

dolayısıyla düşük kesme hızlarında düşük trokoid adımı ile çalışılması gerekmektedir.

Ayrıca ince cidarlı bu parçanın işlenmesinde düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşmak için düşük trokoid adımı ile çalışılması gerekmektedir[27].

Pleta A. ve ark. (2015) nikel bazlı süper alaşımlarda parça kalitesi ve takım ömrünü artırmak için alternatif takım yolu geliştirme konusu ile ilgilenmiştir. Bu kapsamda, trokoidal frezeleme, değişken derinlikli/değişken z seviyeli frezeleme ve konvansiyonel frezeleme (end milling) işlemlerini, kaldırılan talaş miktarı/birim takım aşınması (MRR/VB), yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesme kuvvet miktarı cinsinden karşılaştırmışlardır.

Kullanılan tezgah 3-eksenli CNC freze tezgahı olup test ile ilgili veriler piezoelektrik dinamometre ile ölçülmüştür. Ayrıca işlemler sırasında 2 kesen ağızlı sinter karbür takım kullanılmıştır. İşlem çıktıları olarak, konvansiyonel frezelemeye kıyasla trokoidal frezeleme ve değişken derinlikli frezeleme işleminin daha üstün kesme işlemi tipi olduğu görülmüş ve bir takım çıktıları elde edilmiştir. Sonuç olarak, trokoidal frezelemede taguchi metoduna göre, tam parametrelili deneysel tasarım yapıldığında, kuvvet oluşumuna en büyük etkisi olan işlem parametresinin %336 oranı ile eksenel kesme derinliği olduğu tespit edilmiştir.

Bu parametreyi takiben %184 oranı ile ilerleme ve %68 oranı ile kesme hızı parametreleri gelmektedir. Yüzey pürüzlülüğüne olan en büyük etkiyi %88 ile ilerleme, %55 ile eksenel kesme derinliği ve -%8 ile kesme hızı yapmaktadır. MRR/VB oranını en çok etkileyen parametreler ise sırasıyla %273 ile kesme derinliği, %82 ile ilerleme ve %30 ile kesme hızı parametreleridir.

Değişken derinlikli frezelemede ise kuvvet oluşumuna en büyük etkisi olan parametre, %46 ile kesme derinliği, ardından %10 ile kesme hızı ve %8 ile ilerleme parametreleridir. MRR/VB oranında %41 kesme hızı, %36 ilerleme ve %35 eksenel kesme derinliği etkilidir. Yüzey pürüzlülüğünde ise eksenel kesme

derinliğinin %11, kesme hızının %4, ilerlemenin %2 etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, alternatif takım yolu arayışında konvansiyonel frezelemeye göre trokoidal frezelemenin aynı takım aşınması değerine oranla 7 misli daha fazla talaş kaldırabildiği gözlemlense de, çentik şeklinde oluşan takım aşınması trokoidal frezeleme sonucunda takımda oluşmaktadır. Bu etkiyi, yüzey pürüzlülüğü ve MRR/VB etkileri konvansiyonel frezelemeye göre neredeyse aynı olan değişken derinlikli frezeleme tekniğinin ortadan kaldırdığı öne sürülmektedir [28].

Salehi M. ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, takım ucu titreşim miktarı, kesme kuvvetleri ve proses süresi açısından episikloidal ve trokoidal frezlemeyi karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma yapılırken takım yollarının önce matematik modeli kurulmuş, ardından bir CAM programı ve 5-eksenli bir CNC ile testin gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Kuvvetle ilgili ölçümler bir dinamometre vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında episikloidal takım yolu gözlemlenmiş 4 farklı takım yolu oluşturulmuştur. Bunlardan ilki CAM programının oluşturduğu trokoid eğrisi, ikincisi gerçek trokoid eğrisi, diğerleri ise gerçek ortamda oluşturulan ancak parametreleri farklı episikloid eğrileridir. Sonuç olarak, trokoidal frezelemede oluşan takım ucu salınım miktarı, episikloidal frezelemeye göre %10'a kadar daha az bir değer çıkmakta, ancak episikloidal frezelemede işlem süresi trokoidal frezelemeye nazaran %20 daha kısa sürmektedir [19].

Shixiong W. ve ark. (2016) yüksek hızlı talaşlı işleme sırasında takım yolu paralel (contour parallel path) yol ile trokoidal frezelemeyi, iş parçası üzerine cep frezeleme yapmak suretiyle, takıma etkiyen kuvvetler, takım aşınması ve süre cinslerinden kıyaslamışlardır. Kıyas yapılırken oluşturulan modeller sabit çapa sahip trokoid, değişken çapa sahip trokoid ve 2 farklı kontur kalınlığına sahip (0,5 mm ve 1 mm) şeklindedir.

Deney sırasında kullanılan takım  $d=6$  mm çapa sahip, TiAlN kaplı sinterlenmiş karbür olup, takım devri  $8000 d/d_k$ 'dir. Kullanılan tezgah yüksek hızlı işlem kabiliyetine sahip olan CNC tezgah ve kullanılan iş parçası için açılan gravür

100x70 mm ebatlarındadır. Ayrıca iş parçasının malzemesi P20 ve sertliği 36HRC dir.Deneye başlamadan önce ilk olarak, yapılacak trokoidal frezeleme ve takım yolu paralel frezeleme işlemleri için kinematik model ve dinamik kuvvet modeli oluşturulmuştur.

Ardından süreç deney ortamına aktarılmıştır. Deneyde kullanılan takım yolu paralel frezeleme için işlem parametreleri diş başına ilerleme ( $f_z$ )=0.03 mm/z aksenal kesme derinliği ( $a_p$ )=4 mm, radyal kesme derinliği ( $A_c$ )=1 mm'dir.

Trokoidal frezeleme için olan işlem parametreleri sabit yarıçapta ilerleyecek trokoid eğrisi için,Trokoid yarıçapı=1,8 mm, Trokoid adımı (stepover)=0,72 mm, trokoid temas açısı=68° Değişken yarıçapta ilerleyecek trokoid eğrisi için,Başlangıç trokoid yarıçapı=1 mm( artarak devam edecek 2,4 mm'lik çap değerine ulaşana kadar) Trokoid adımı (stepover)=2,4 mm, trokoid eşleşme açısı=69°'dir.

Sonuç olarak, frezeleme sırasında takıma etkiyen ortalama kuvvetler, kontur paralel yollarda (M1, M2) trokoidal frezelemeye kıyasla (M3, M4) en az %100 daha fazla çıkmış, işlem süresi olarak bakıldığında ise kontur paralel yollar takip edilen işlemler, trokoidal frezeleme prosedürü takip edilerek yapılan kesme işleminden %10-30 arası daha kısa sürmüştür [29].

Pleta A.ve Mears L. (2015) yaptıkları çalışmada nikel esaslı bir süper alaşımın (IN-738) trokoidal frezelenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin oluşumu ve takım kırılmasının hangi aşınmaya bağlı ve tam olarak nerede oluştuğunu 3 farklı kesme şartı altında incelemişlerdir. Deney sırasında kullanılan tezgah 3 eksen CNC dik işlem merkezi ve kullanılan takım d=15.875 mm çapa ve 2 kesen ağıza sahip karbür plaketa olup PVD ile TiAlN kaplanmıştır.

Test sırasında kesme sıvısı kullanılmış olup, kuvvet verileri piezoelektrik dinamometre ile ölçülmüş ve bilgisayarda işlenmiştir. Ayrıca deneyler sırasında, iş parçası üstüne birbirinden bağımsız 3 ayrı gravür açılmış olup bunların çapları

sırasıyla 60 mm, 30 mm ve 15 mm'dir. Sonuç olarak dinamometreden 3 farklı bileşeni olan kuvvet görüntüsü elde edilmiştir.

Bu şekilde bakılarak araştırmacıların yaptığı yorum, kesme derinliği değişmediği için  $F_z$  sabit,  $F_x$  ise ilk başta iş parçası duvarını kestiği için negatif bir görünüm almakta, trokoid çemberinin merkezine geldiğinde 0 değerini ve ardından pozitif değer almakta olduğu şeklindeki  $F_y$  ise trokoid çemberinin merkezinde maksimum değerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla  $F_x$ 'in frezeleme yönüne,  $F_y$ 'nin kesici takım ile iş parçasının temas anındaki durumuna (engagement) daha fazla bağlı olabileceğini belirtmişlerdir.

Ayrıca, trokoidal frezelemenin, konvansiyonel frezeleme yöntemine göre olan bir diğer üstünlüğünün takım ömrünün artması olduğu bilinmekteyse de, trokoidal frezeleme sonrası takımların takım aşınması kaynaklı çentik etkisi ile (özellikle süper alaşım işlerken) takım kırılmasına yatkın oldukları tespit edilmiştir. Takımın y-yönünde verdiği sinyalin, takımın kırılmadan önce (kısa bir süre zarfında %40 kuvvet artışı) meydana gelmesi, takımın kırılmak üzere olduğunun bir işareti olduğu anlaşılmıştır [30].

Kowalski M. ve ark. (2016) sert malzemelerin (45-70HRC) trokoidal frezelemesi ile ilgili çalışmışlardır. Bu çalışmada, oluşturdukları 3 farklı trokoid eğrisi ve 2 farklı takım için yüzey pürüzlülüğünün değişimini incelemişlerdir. Kullandıkları iş parçası St 45 (50 HRC), kesici takım uçları 5 kesen ağızlı karbür, 7 kesen ağızlı karbür olup 5 eksen CNC tezgah kullanılmıştır. Trokoid adımı her bir trokoid tipi için sabit ve 1 mm olup, bütün takımlar için diş başı ilerleme  $f_z=0.05$  mm/d, kesme hızı  $V_c=81$  m/dk, kesme derinliği  $a_p=10$  mm olarak sabitlenmiştir. Spindle devri  $n=2570$  d/dk olmakla birlikte takımların ilerleme değerleri 5 kesen ağızlı karbür için  $V_f=771$  mm/dk ve 7 kesen ağızlı karbür için  $V_f=900$  mm/dk olarak ayarlanmıştır.

Sonuç olarak iş parçasının üstüne açılmış gravürün taban ve duvar ortalama pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) ve bunların karesel ortalama pürüzlülük değerleri ( $R_{Sm}$ ) belirlenmiştir. Şekillerden çıkarılan sonuca göre, tam trokoid eğrisine sahip takım yolunun alternatif ve modifiye edilmiş trokoid yollarına göre, her iki takım

için, daha iyi sonuçlar verdiğidir. Bunun sebebi olarak, takımın tam dairesel hareket yapması yani diğer takım yollarında olduğu gibi ani yn değişimlerinin olmamasından ötürü takım üstüne etkiyen kuvvetlerin daha stabil oluşu ve bunu kesme esnasında daha az pürüzlülük değeri olarak kendisini göstermesidir.

Bu sonuç kendisini özellikle duvar bölgelerinde göstermekte taban bölgelerinde nispeten pürüzlülük değerleri aynı kalmaktadır. Ayrıca kullanılan takımın özelliklerinin de yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi göze çarpan bir diğer gerçektir. 7 kesen ağıza ve değişken helis açısına sahip takımın, 5 kesen ağızlı ve sabit helis açısına sahip bir takıma göre çok daha başarılı yüzey pürüzlülüğü değerleri verdiği ortaya çıkmaktadır [14].

Deng Q.ve ark. (2017) alternatif trokoidal takım yolu ile kenar frezelemeyi verimli hale getirmek için çalışma yapmışlardır. Verimlilik parametreleri olarak talaş debisi ve takım üstüne etkiyen kuvvetleri baz almışlar ve oluşturdukları matematik model ve bilgisayar programının kenar frezeleme için otomatik olarak atadığı takım yolunu, deney seti üstünde gerçekleyip kıyaslamışlardır. Oluşturulan matematik modelde, öncelikle trokoidal frezlemeye ait literatür araştırması yapılıp hareketin kinematik denklemleri elde edilmiştir.

Bu denklemin ardından hareketin dinamik denklemi ortaya koyulmuştur. Yeni bir denklem ortaya koyulmadan önce kurulan matematik modeller, 100x40x1 mm ebatlarında olan Al7075 iş parçasında, 3 Eksenli CNC tezgah üstünde ve 3 kesen ağızlı,  $d=5$  mm çapa ve TiAlN kaplamaya sahip Tungsten Karbür takım vasıtasıyla test edilmiştir. Test sonucunda elde edilen takıma etkiyen kuvvet değerleri dinamometre ile ölçülmüş ve bilgisayar ortamına atılarak anlamlı hale getirilmiştir. Yeni kurulan bu matematik modele göre, trokoidal frezelemeyi oluşturan parametrelerden trokoid radyüsü ( $r$ ) ve trokoid adımı ( $c$ ), sistem üstüne etkiyen kuvvet ve trokoid eğrisini belirlemektedir.

Dolayısıyla talaş debisi de doğrudan bu parametrelerden etkilenmektedir. Belirlenecek trokoid radyüsü ( $r$ ), bir algoritmaya göre optimize edilmekte ve akabinde kenar frezeleme işlemi için ortaya çıkacak olan trokoid radyüs değeri ile

hem trokoid eğrisinin uzunluğu kısaltılmakta hem de sisteme etkiyen kuvvetler minimize edilmektedir.

Son aşamada, kurulan bu matematik model ile konvansiyonel köşe frezeleme UG-NX ortamında simüle edilmiş ve konvansiyonel takım yolu, optimize edilmiş trokoid yoluna oranla %18,9 daha fazla çıkmıştır. Ayrıca, kuvvet değerleri de konvansiyonel köşe frezeleme işleminde daha büyük olmaktadır [31].

Pleta A. ve ark. (2017) çalışmalarında CAM programlarındaki tam dairesel olarak kabul edilen trokoidal frezeleme ile matematiksel olarak kabul edilen trokoidal frezeleme kavramlarının birbirinden farklı olduğunu ortaya atmışlar ve bunu doğrulayabilmek adına trokoidal frezelemede kuvvet analizi için kendi geliştirdikleri matematik modeli 2 adet deney seti ile gerçekleştirmişlerdir.

Deneyde 3 Eksen CNC tezgah, Al 7075-T651 iş parçası kullanılmış olup, kesici takım 15.875 mm çapa sahip TiAlN kaplamalı plaklet ile donatılmış freze kafasıdır. Oluşturulan matematik model kesme sabitlerinin yanında sürtünmeye ait sabitler, talaş kalınlığına ve iş mili nutasyon açısal hızına ait parametreler içerdiğinden yeni bir matematik model olarak kabul edilebilir. Sonuç olarak kurulan matematik modelin, gerçekleştirilen 2 deney ile gerçek manada örtüştüğü görülmüştür [32].

Kıyak M. ve Yılmaz C. (2017) yaptıkları çalışmada 42CrMo4 malzemesinden olan iş parçasının üstüne konvansiyonel frezeleme ve trokoidal frezeleme yöntemleriyle kanal açmışlar ve kanal duvarları ile kanal tabanının yüzey pürüzlülük değerlerini ve takımların aşınmasını kıyaslamışlardır. Deney sırasında çapı 10 mm ve 4 kesen ağıza sahip karbür takım kullanılmış olup ,maksimum spindle devri 10.000 d/dk olan 3 eksen CNC tezgah kullanılmıştır. Sonuçta, trokoidal frezelemenin konvansiyonel frezeleme işlemine göre, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından üstünlüğü belirtilmiştir.

Trokoidal frezeleme ile açılan kanalın taban yüzey pürüzlülüğü, konvansiyonel frezeleme işlemi ile elde edilene oranla %40 daha düşüktür. Ayrıca, trokoidal frezeleme sonrası kesici takımın serbest yüzey aşınması, geleneksel frezeleme ile yapılan işleminkine oranla %60 civarında daha düşüktür [16].

Pleta A., Niaki F.A. ve Mears L. (2018) yaptıkları çalışmada, konvansiyonel kanal frezeleme ile trokoidal frezeleme esnasındaki kuvvet oluşumunu açıklayan matematik modellerin içinde kullanılan kesme kuvveti sabitelerinin (eksenel, radyal ve teğetsel) birbirleriyle olan benzerliklerini ortaya çıkarmak için, 2'si trokoidal frezelemeye kalan 5'i konvansiyonel kanal frezelemeye ait olmak üzere toplam 7 set deney yapmışlardır. Deneyler sırasında 5 eksenli CNC tezgah ve 7075-T651 alüminyum alaşımı iş parçası olarak kullanılmıştır. Deney sırasında kuvvet ölçümü için dinamometre kullanılmıştır.

Konvansiyonel kanal frezeleme prosesi boyunca oluşan talaş kalınlığı, takımın her bir turunda sabit kalmaktadır. Bu sebeple, kuvvet oluşumunu açıklayan kesme kuvveti katsayısı proses boyunca sabit bir değer almaktadır. Ancak trokoidal frezeleme esnasında, takımın bir tam tur hareketinde oluşan talaş kalınlığının değeri bir parabol oluşturacak şekilde değişmektedir.

Bu çalışmada yakalanmak istenen olgu, takımın her iki frezeleme deneyi için ilerleme değeri değişken ve takım aşınması ihmal edilmek kaydıyla, talaş oluşumunu etkileyebilecek diğer faktörlerin örneğin rotasyonel (takımın kendi etrafında dönüşü-spindle devri) ve nutasyonel (takımın bir radyüs etrafında gezegensel dönüşü) devrinin, kesme kuvvet katsayısına olan etkisinin incelenmesidir.

Bu sebepten ötürü, trokoidal frezeleme esnasında ortaya çıkan farklı talaş kalınlıklarından, konvansiyonel kanal frezeleme esnasında ortaya çıkan talaş kalınlığı aynı olan talaşın kesilmesi esnasında oluşan kuvvetlerin değerleri özellikle dikkate alınmıştır ve farklı iş mili devirleri için eksenel, radyal ve teğetsel kesme kuvvet sabitelerini radar grafikleri olarak ifade etmişlerdir. Sonuçta, konvansiyonel kanal frezeleme işlemi için kullanılan analitik matematik modellerde ifade edilen kesme kuvvet sabitelerinin, trokoidal frezelemeyi ifade etmek için (bir sabit olarak) kullanılmayacağı ve kesme kuvvet sabiti trokoidal frezeleme işlemi için kullanılsa bile, konvansiyonel frezeleme sonucu elde edilen kesme kuvvet sabitelerine göre çok daha düşük değerde olduğu ortaya çıkmıştır [33].

Amaro P: ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada trokoidal frezelemede kullanılan işlem parametrelerinin değişimi ile takımın aşınma miktarını duplex paslanmaz çelik iş parçası üstünde test etmişlerdir. Test sırasında kullanılan iş parçası GX6CrNiN26-7 ve ebatları 300x300x85 mm olup, Weldon tip tutucuya sahip. değiştirilebilir plakette özelliğine sahip freze takımı kullanılmıştır. Kullanılan plaket, AlTiN kaplamalı tungsten karbürdür.

Aşınma ölçümü ISO 8688-1 standartlarına göre gerçekleştirilmiş olup, ölçümler mikroskop altında yapılmış ve trokoidal takım yolları CAM programı tarafından üretilmiş olan tam dairesel trokoid formudur. Deney sonucunda, ilk üç deneyde düzgün (üniform) kesici ucun kenar aşınması gözlenmiş, son deneyde çok şiddetli ve lokal kenar aşınması olan VB 3 tip aşınma gözlenmiştir.

Bu aşınma türüne ilaveten, yığılma ağız oluşumu kaynaklı çok ince bir adezyon tabakasının oluşmuş olabileceği de deney sonunda elde edilen görsellerden tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, en fazla MRR ve takım ömrüne sahip olan işlem parametrelerinin Test-3 olduğu saptanmıştır. Özetle, trokoidal frezelemede kesme hızının belirli bir pik değere kadar artışı hem kaldırılan talaş miktarını hem de takım ömrünü gözle görülür ölçüde uzatmaktadır.

Ancak, malzeme ve takıma bağlı olarak bu eşik hızın üstüne çıkmak, takım ömrünü nonlineer ve çok hızlı bir biçimde azaltmaktadır. Sonuçta ise ortaya atılan sonsuz trokoid takım yolunun işlenmesi sırasında takıma etkiyen kuvvetler ve sıcaklıklar standart trokoidal işleme göre 2 misline yakın fazla olsa da, yüzey pürüzlülüğü açısından %15 daha başarılı olduğu gözlenmiştir [34].

Sonuç olarak trokoidal frezeleme üstüne 2018 yılına kadar İngilizce literatürde 18 adet çalışma yapılmış ve bütün çalışmalar konvansiyonel kanal frezeleme işlemi ile kıyaslanarak trokoidal frezelemenin ,takıma etkiyen kuvvetler, işlem süresi ve takım aşınması açısından başarısını defalarca kanıtlamıştır. Bu çalışmaların hangi malzeme, hangi kesici takım hangi işlem parametreleri ve ne amaçla yapıldığı ve elde edilen sonuçların listesi Tablo 2.1 de verilmiştir.

**Tablo 2.1** Trokoidal Frezelemenin İncelendiği İngilizce Literatür Çalışmaları  
(2007-2018) Ve Bu Çalışmalarda Yapılanların Özetleri

| Ref<br>·<br>No | İş Parçası<br>Malzeme<br>si | Kesici<br>Takım<br>Türü                                                              | İşlem<br>Parametrele<br>ri                                 | Amaç                                                                                                     | Sonuçlar                                                                                               |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1              | Al 7039                     | 2 Kesen<br>ağızlı<br>Sinterkarbür                                                    | 600 d/dak<br>240 mm/dak                                    | Trokoidal<br>frezeleme<br>için<br>oluşturulan<br>kesme<br>kuvveti<br>sabitlerinin<br>tespiti             | Teorik ve<br>pratik<br>kesme<br>kuvveti<br>değerleri<br>uyumlu                                         |
| 2              | Al 5086                     | D=20 mm                                                                              | Seri ve paralel<br>kinematik<br>zincire sahip<br>tezgahlar | Deforme<br>olmamış talaş<br>kalınlığının<br>trokoid adımı<br>ve yarıçapına<br>bağlı<br>optimizasyon<br>u | Ortaya<br>atılan<br>formüller<br>tezgahları<br>n ani<br>ivmelenme<br>kabiliyetle<br>ri ile<br>orantılı |
| 3              | 53 HRC<br>Takım<br>Çeliği   | (Al,Ti,Si-N)<br>Kaplama 6<br>ve 2 Kesen<br>Ağızlı<br>Sinterkarbür<br>parmak<br>Freze | 4800 d/dak,<br>2800 d/dak                                  | Klasik kanal<br>frezeleme ile<br>trokoidal<br>frezeleme<br>kıyası                                        | Trokoidal<br>yöntem ile<br>%21<br>zaman<br>tasarrufu                                                   |
| 4              | 40CrMnMo<br>7               | TiAlN Kaplı<br>6 Kesen<br>Ağızlı<br>Sinterkarbür<br>Takım                            | Trokoid<br>adım=1.2 ve<br>2 mm olmak<br>üzere 2 adet       | Farklı<br>trokoidal<br>yolların<br>kıyaslanması                                                          | Tam<br>trokoidal<br>yolun<br>modifiye<br>edilenlere<br>göre daha<br>başarılı<br>olduğu                 |

**Tablo 2.1** Trokoidal Frezelemenin İncelendiği İngilizce Literatür Çalışmaları  
(2007-2018) Ve Bu Çalışmalarda Yapılanların Özetleri(Devam)

|   |                                                        |                                                                      |                                                                                                 |                                                                                                       |                                                                              |
|---|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Ti6Al4V                                                | D=10 mm<br>TiAlN kaplı<br>6 kesen<br>ağızlı<br>sinterkarbür<br>takım | Trokoidal<br>işlemin<br>kuru, klasik<br>kanal<br>frezelemede<br>soğutma<br>sıvısı<br>uygulaması | Trokoidal ve<br>klasik<br>frezelemeyi<br>enerji<br>tasarrufu<br>açısından<br>kıyaslamak               | Trokoidal<br>frezeleme<br>%15 enerji<br>ve %35<br>süre<br>tasarruflu         |
| 6 | 40CrMnMo7                                              | D=12 mm                                                              | Sikloid<br>adımları 0,1<br>ile 0,4<br>arasında<br>değişken                                      | Sikloid<br>trokoidal<br>forma ait<br>yüzey<br>pürüzlülüğü<br>denkleminin<br>deneysel<br>yolla tespiti | Amprik<br>bağıntılar<br>elde<br>edilmiştir                                   |
| 7 | 300M Çeliği                                            | D=8 mm                                                               | n=1000<br>d/dak<br>fz=0.05<br>mm/dev,<br>w=4 mm                                                 | Kesme<br>derinliğine<br>bağlı oluşan<br>kuvvetlerin<br>formülasyonu                                   | Teorik ve<br>pratik<br>değerler<br>ort. %80<br>oranında<br>uyumlu            |
| 8 | Ti6Al4V                                                | D=12 4<br>kesenağızlı<br>sinterkarbür                                | Fz=0.025-<br>0.035<br>N=2389-<br>3185<br>Vc=90-120<br>m/dak                                     | İnce cidarlı<br>parçalar için<br>trokoidal<br>işlem<br>parametreleri<br>incelenmesi                   | Düşük<br>trokoid<br>adımı ile<br>ilerlemek<br>takım<br>aşınmasını<br>azaltır |
| 9 | Gama<br>Fazında<br>Sertleştirilmiş<br>Nikel<br>Alaşımı | 2 kesen<br>ağızlı<br>plaketli                                        | Vc=25<br>m/dak                                                                                  | VDM ile<br>Trokoidal<br>metodun<br>kıyası                                                             | Trokoidal<br>çentik<br>etkisine<br>daha<br>duyarlı                           |

**Tablo 2.1** Trokoidal Frezelemenin İncelendiği İngilizce Literatür Çalışmaları (2007-2018) Ve Bu Çalışmalarda Yapılanların Özetleri(Devam)

|    |                        |                                         |                                                              |                                                                                                                   |                                                                                               |
|----|------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 | St 37-2                | 3 kesen<br>ağızlı<br>plaketli           | $V_c=150$<br>d/dak                                           | Episikloidal ile<br>trokoidal metod<br>kıyası                                                                     | Episikloidal<br>daha kısa<br>ancak daha<br>başarısız                                          |
| 11 | P20<br>Çeliği<br>36HRC | TiAlN kaplı<br>d=6 mm<br>sinterkarbür   | $N=8000$<br>d/dak                                            | Kontur paralel<br>talaş kaldırma ile<br>trokoidal<br>frezelemennin<br>cep frezeleme<br>işlemi açısından<br>kıyası | KPY daha<br>kısa ancak<br>daha fazla<br>kuvvet<br>etkisi<br>altında<br>kesim<br>yapmakta      |
| 12 | IN-738                 | 2 kesen<br>ağızlı<br>plaketli           | $V_c=25 -50$<br>m/dak                                        | Trokoidal<br>frezelemede<br>Takım<br>kırılmasının ne<br>zaman<br>oluşacağını<br>tespiti                           | Kuvvet<br>değerleri<br>%40<br>arttığında<br>çentik etkisi<br>kaynaklı<br>kırılma<br>yaşanıyor |
| 13 | St<br>45(HRC<br>50)    | 5 ve 7 kesen<br>ağızlı sinter<br>karbür | $N=2750$<br>d/dak, $V_c=81$<br>m/dak<br>$f_z=0.05$<br>mm/diş | Tam trokoidal ve<br>modifiye<br>trokoidal<br>frezelemeyi yüzey<br>pürüzlülüğü<br>açısından<br>kıyaslamak          | Tam<br>trokoidal<br>daha<br>başarılı                                                          |
| 14 | Al 7075                | 3<br>kesenağızlı<br>tungsten<br>karbür  | $N=3000$<br>d/dak, $f=5$<br>mm/s                             | Köşe frezeleme<br>işlemini klasik ve<br>trokoidal<br>frezeleme<br>açısından<br>kıyaslamak                         | Klasik<br>frezelemede<br>takıma<br>etkiyen<br>kuvvetler<br>daha fazla<br>ve yol daha<br>uzun  |

**Tablo 2.1** Trokoidal Frezelemenin İncelendiği İngilizce Literatür Çalışmaları (2007-2018) Ve Bu Çalışmalarda Yapılanların Özetleri(Devam)

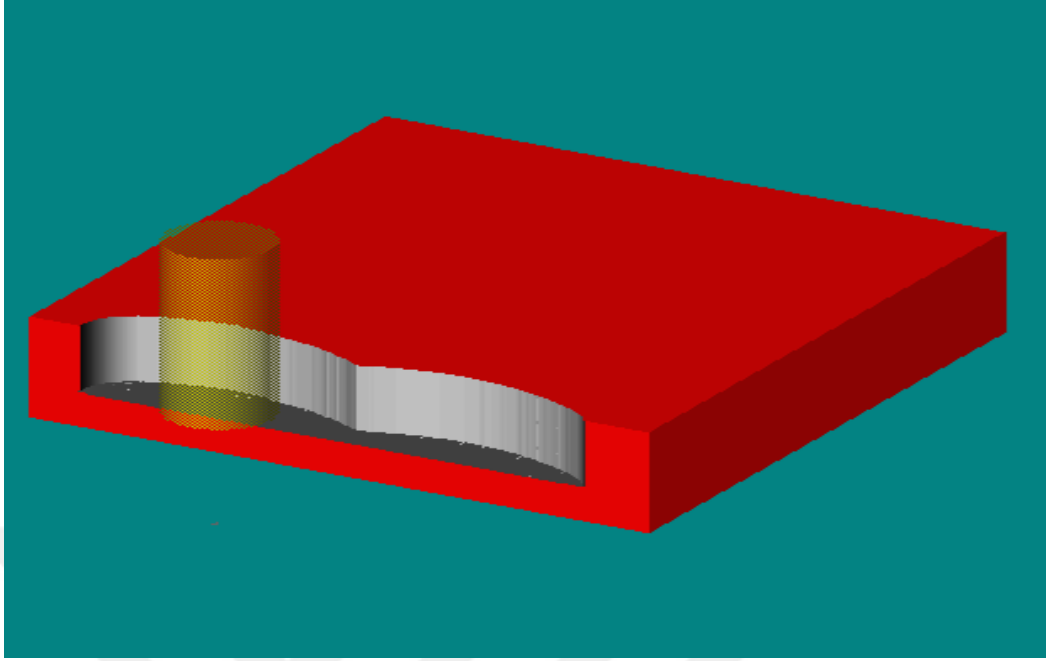
|    |               |                             |                                    |                                                                                                                 |                                                                                                                             |
|----|---------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15 | Al 7075-T651  | 2 kesen ağızlı plaketli     | N=600<br>ve n=300<br>d/dak         | Tam trokoidal frezeleme ile trokoidal frezeleme kavramlarının farklı olduğunu matematiksel olarak ortaya koymak | Trokoidal frezeleme için oluşturulan formüllerin deneysel olarak doğrulanması                                               |
| 16 | 42CrMo4       | 4 kesen ağızlı sinterkarbür | N=3100<br>d/dak<br>Vc=100<br>m/dak | Klasik ve trokoidal kanal frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması tespiti                       | Trokoidal işlem sonrası takım aşınması %60 yüzey pürüzlülüğü %40 daha düşük                                                 |
| 17 | Al 7075-T651  | 2 kesen ağızlı plaketli     | N=300-1450<br>d/dak                | Trokoidal frezeleme için kullanılacak formülleri klasik frezeleme formülleri ile ifade edebilmek                | Klasik kanal frezeleme için kullanılan kesme sabitlerinin trokoidal frezelemeyi tam olarak ifade etmediği ortaya çıkmıştır. |
| 18 | GX6CrNiN 26-7 | Plaketli                    | Vc=120-300<br>m/dak                | Trokoidal frezelemede kesme hızlarına göre takım kıyası                                                         | Düşük kesme hızında takım ömrü artmakta                                                                                     |

## 1.2 Tezin Amacı

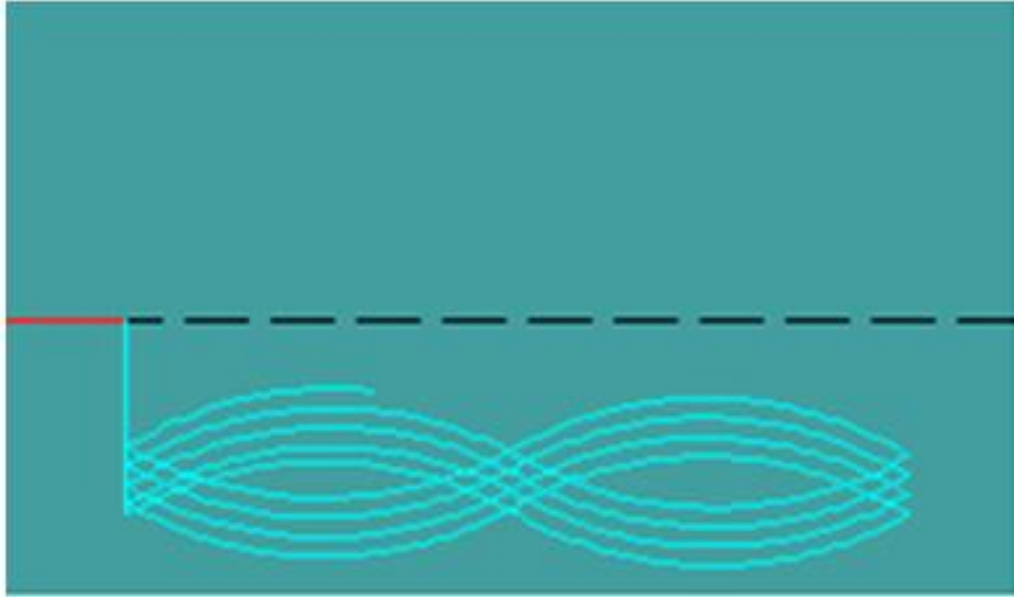
Bu tezde, standart trokoidal frezelemenin, daha önce yapılan literatür araştırması ile, başarısının hangi nedenlerden kaynaklandığı araştırılmış ve izlediği takım yolu gereği takıma etkiyen kuvvetlerin kesen ağızlara (klasik frezelemeye oranla) homojen olarak yayıldığı ve ısınma probleminin oluşmadığı anlaşılmıştır. Isınma probleminin oluşmaması ise takımın bir pasoda izlediği yol gereği, kesme süresinin konvansiyonel kanal frezelemeye göre daha kısa oluşu ve takımın boşa çıktığı anda soğumak için fırsat bulmasından kaynaklanmaktadır. Bu noktalardan hareketle, bu tezde trokoidal frezelemeye alternatif olarak kardiod ve sonsuz eğrileri biçimlerinde iki adet daha trokoidal frezeleme metodu literatürde ilk defa öne sürülmüş ve bu takım yolları boyunca takıma gelen kuvvetler, harcanan kesme enerjisi, takımda oluşan sıcaklık, aşınma miktarları ile parça yüzey kalitesi açısından sonuçlar incelenmiştir. Önerilen takım yolları Şekil 1.19 ve Şekil 1.21 ile, karşılaştırılan trokoidal frezeleme işlemine ait takım yolunun biçimi ise Şekil 1.23'de verilmiştir.



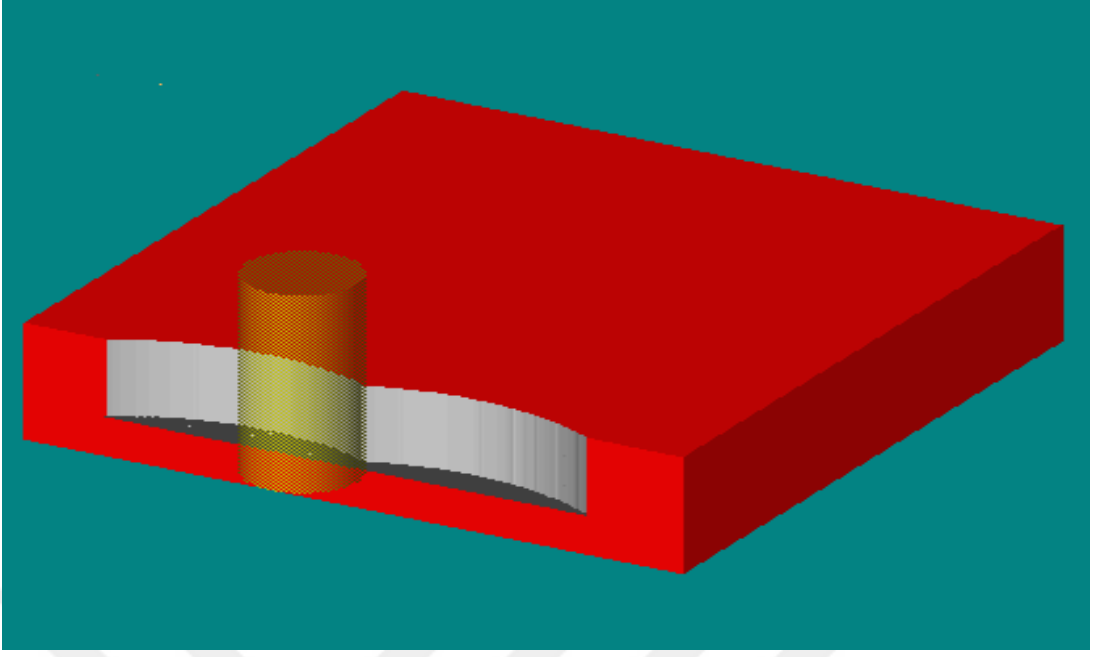
**Şekil 1.18** Kardiod ( $\infty$ ) formunda trokoidal frezeleme işleminde takım yolu (2B)



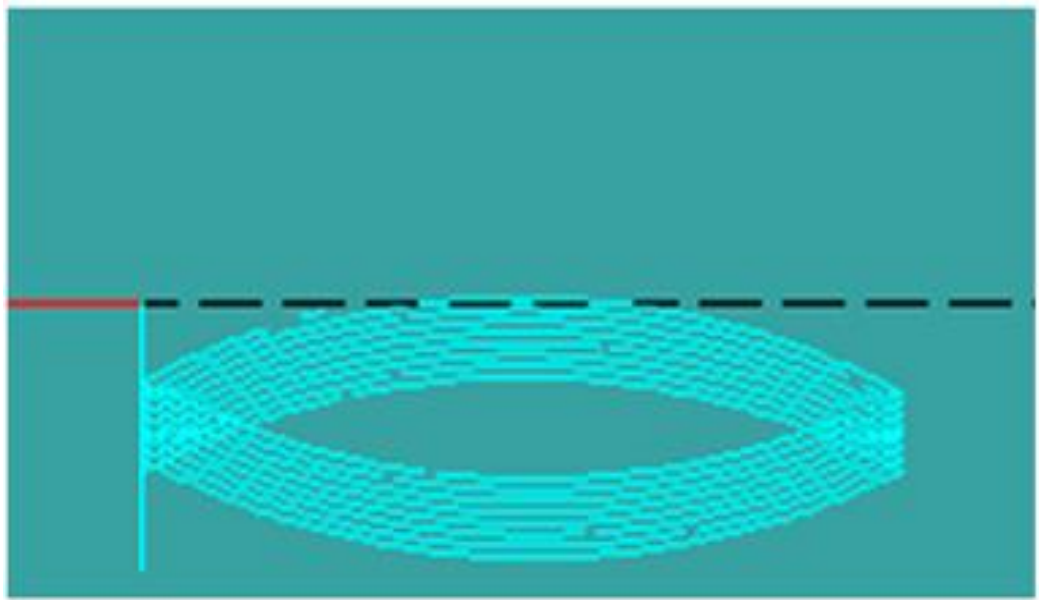
**Şekil 1.19** Kardiod (∞) frezeleme işlemi sırasında takım yolu (3B)



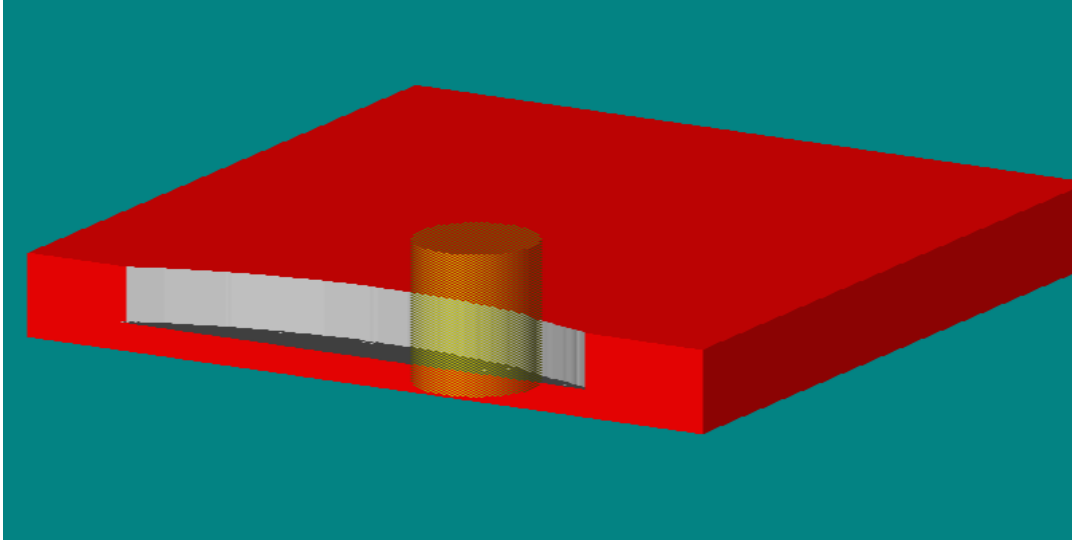
**Şekil 1.20** Sonsuz (∞) trokoidal frezeleme işleminde takım yolu (2B)



**Şekil 1.21** Sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemi sırasında takım yolu (3B)



**Şekil 1.22** Standart trokoidal frezeleme işleminde takım yolu(2B)



**Şekil 1.23** Standart trokoidal frezeleme işlemi sırasında takım yolu(3B)

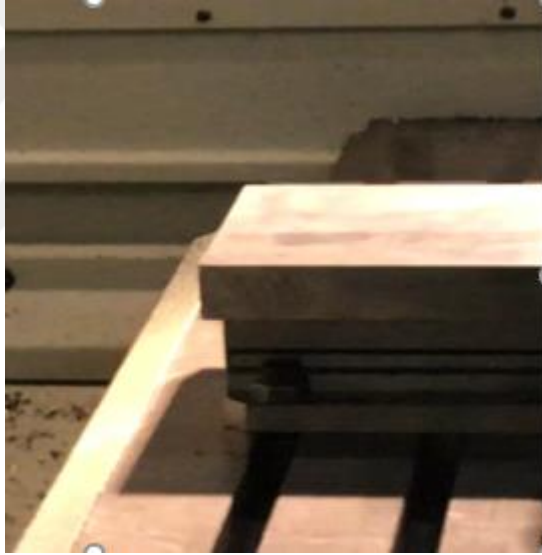
### **1.3 Hipotez**

Bölüm 1.2 de bahsedilen takım yollarının çeşitli işlem parametreleri açısından(enerji verimliliği, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması) standart trokoidal frezeleme işleminden daha üstün bir performans göstermesi beklenmektedir.

## Deneye Hazırlık Ve Deneyde Kullanılan Ekipmanlar

---

Deneyler sırasında, Şekil 2.1’de görülen ebatları 140x170x40 mm olan AISI 1040 levha (iş parçası) dinamometreye ve tezgaha bağlanmıştır. İş parçasında toplam 3 adet olmak üzere 40 mm kanal boyuna, tek seferde 10 mm kanal derinliğine ve 5,5 mm (Standart trokoidal frezeleme için), 5,375mm (Sonsuz trokoidal frezeleme için), 5,125mm (Kardioid trokoidal frezeleme için) boya sahip kanallar açılmıştır.



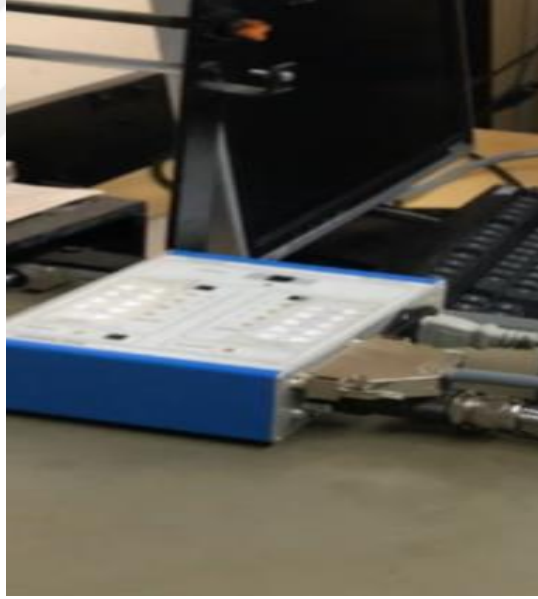
**Şekil 2.1** Deneyde Kullanılan İş Parçası

Bağlanan iş parçasından 0,1 saniye aralıklı olarak dinamometre ile kuvvet (600 saniye boyunca), Şekil 3.2’de görseli verilen lazer sıcaklık ölçüm cihazı ile yine anlık olarak, tüm deney süreleri boyunca, takımın ortalama sıcaklığının ölçümü yapılmıştır. Kuvvet ölçümü KISTLER marka 9252B model piezoelektrik dinamometre ile yapılmış olup sıcaklık ölçümü, OPTRIS marka LT modeli lazer termometre (CT lazer) ile gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçer 1 ms tepki süresine sahip olup 0,1 °C hassasiyete ve -50 +975 °C sıcaklık aralığını ölçme kabiliyetine

sahiptir.Şekil 2.3'te dinamometrenin iş parçası ve ölçüm bilgisayarına bağlanması,Şekil 2.4'te ise dinamometrenin tezgaha bağlanan kısmı görülmektedir.



**Şekil 2.2** Deneyde Kullanılan Lazer Termometre [16]



**Şekil 2.3** Dinamometrenin İş Parçası Ve Ölçüm Bilgisayarına Bağlanması



**Şekil 2.4** Dinamometrenin Tezgaha Bağlanan Kısım

İş parçasının talaşlı işlenmesinde, her bir proses için MTE (Makine Takım Endüstrisi) B00276181000 HSS d10 mm çapında 4 kesen ağza sahip takım kullanılmıştır. Takımın şaft boyu 72 mm ve kesici kenarlarının boyu 22 mm dir. Talaş kaldırma işleminde soğutma sıvısı kullanılmamıştır. Şekil 2.5'te deneyde kullanılan takım görülmektedir.



**Şekil 2.5** Deneyde Kullanılan Takım

Deneyde kullanılan tezgah, FIRST marka MCV 3000 model 3 eksen CNC tezgah olup görseli Şekil 2.6'da belirtildiği gibidir.



**Şekil 2.6** Deneyde Kullanılan Tezgah [35]

Deney sonrası, takım aşınmasını ölçmek amacıyla SOIF marka mikroskop ve hassasiyeti  $1.0 \mu\text{m}$  olan OSM marka oküler mikrometre kullanılmıştır. Kanal tabanının ortalama yüzey pürüzlüğünü (Ra) ölçmek amacıyla Mitutoyo marka SJ-210 model profilometre kullanılmıştır.

Deneye başlamadan hemen önceki adımda, ileriki bölümlerde gerçekleştirilecek hesaplamaları kolaylaştırmak adına 1 pasoda kat edilen takım yolu uzunlukları  $41,88 \text{ mm}$  olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar ve matematiksel formüller Ekler kısmında verilmiştir.

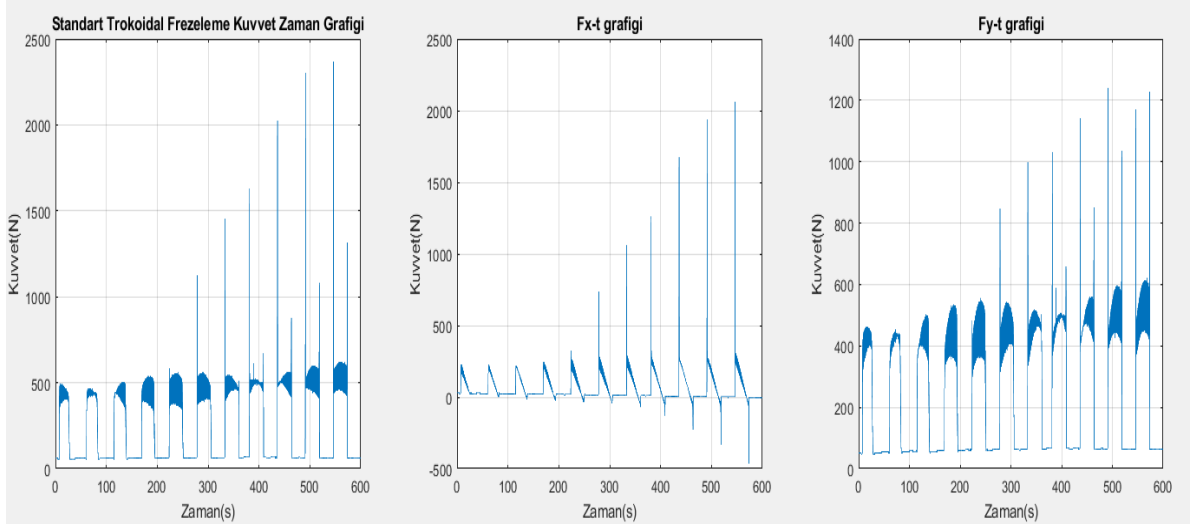
### 3.1 Kuvvet-Zaman (F-t) Grafikleri

Frezeleme işlemi, fasıllı bir kesim işlemi olduğundan, sistemin kuvvet-zaman grafiği dalgalı (sinüsoidal) karakterde olmaktadır. Ancak, bundan sonra yapabileceğimiz tespitleri kolaylaştırmak açısından, kesme kuvvetinin değeri zaten kesim sırasında sabit kaldığından, grafikleri yorumlarken bileşke kuvvet diyagramında kesme kuvvet değerine ait grafikler  $F_{\text{statik}} = F$  doğrusu ve bu doğrunun üstünde değişken karakter sergileyen  $F_{\text{dinamik}}(t) = F(t)$  olarak irdelenip bu fonksiyonların toplamı olarak genel bir kuvvet-zaman grafiğini elde etmemize yarayan fonksiyon olarak yorumlanacaktır.

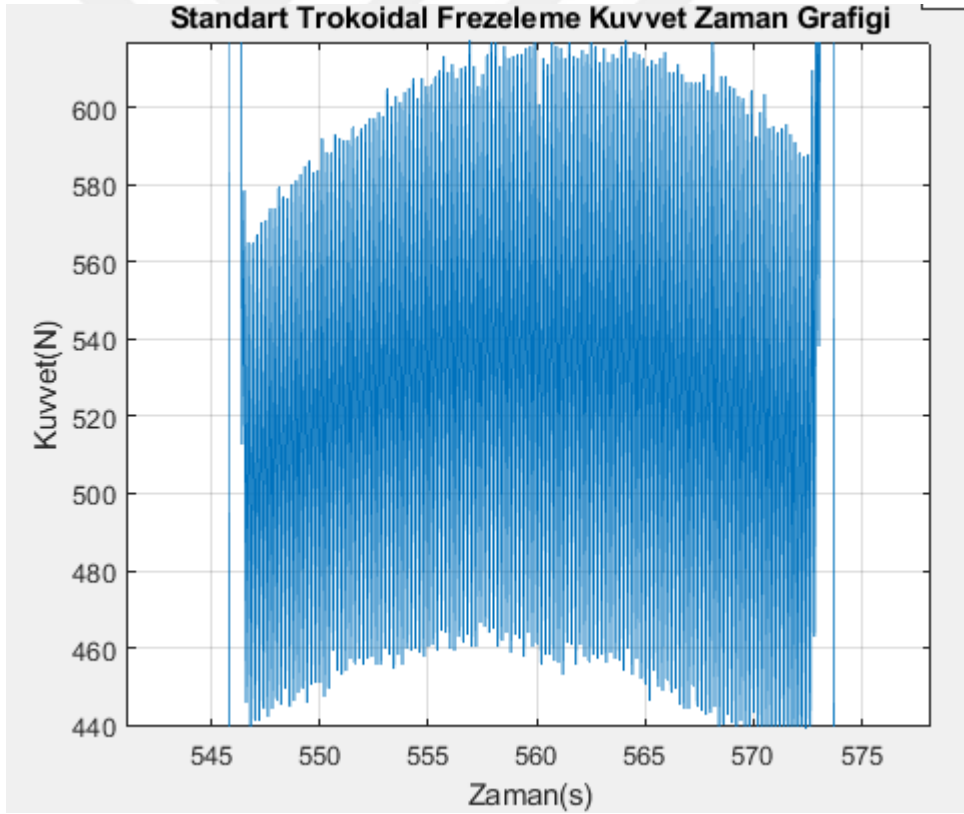
Bu bölümde standart, sonsuz ( $\infty$ ), kardiod ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemlerine ait kuvvet-zaman grafikleri ayrı ayrı çizdirilmiş ve yorumlanmıştır.

#### 3.1.1 Standart Trokoidal Frezeleme Kuvvet-Zaman Grafikleri

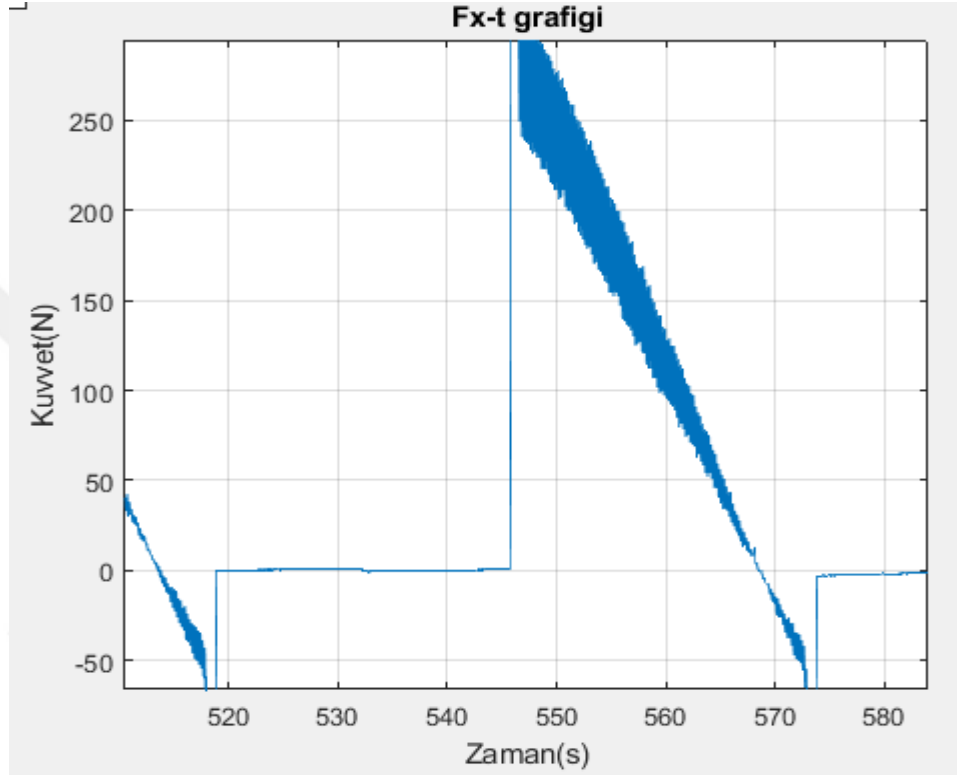
Standart trokoidal frezeleme işlemi esnasında takıma etkiyen kuvvetler dinamometre aracılığı ile ölçülmüş ve veri aktarma sistemi aracılığı ile bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan bu veriler MATLAB ortamında düzenlenip kuvvetlerin zamana bağlı grafikleri Şekil 3.1’de görüldüğü gibi üç farklı diyagramda oluşturulmuştur. Ayrıca, kesme işlemi sırasında kuvvetlerin zamana bağlı değişiminin daha rahat görülebilmesi için her bir grafikten yakınlaştırılmış kesitler alınmıştır. Bu kesitler, bileşke kuvvet-zaman ( $F_{\text{bileşke}}-t$ ), ilerleme kuvveti-zaman ( $F_x-t$ ) ve kesme kuvveti-zaman ( $F_y-t$ ) şeklinde sırasıyla Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’da gösterildiği gibidir. Bu grafiklerin oluşturulmasında kullanılan veriler/kodlar ise Ek-A’da verilmiştir.



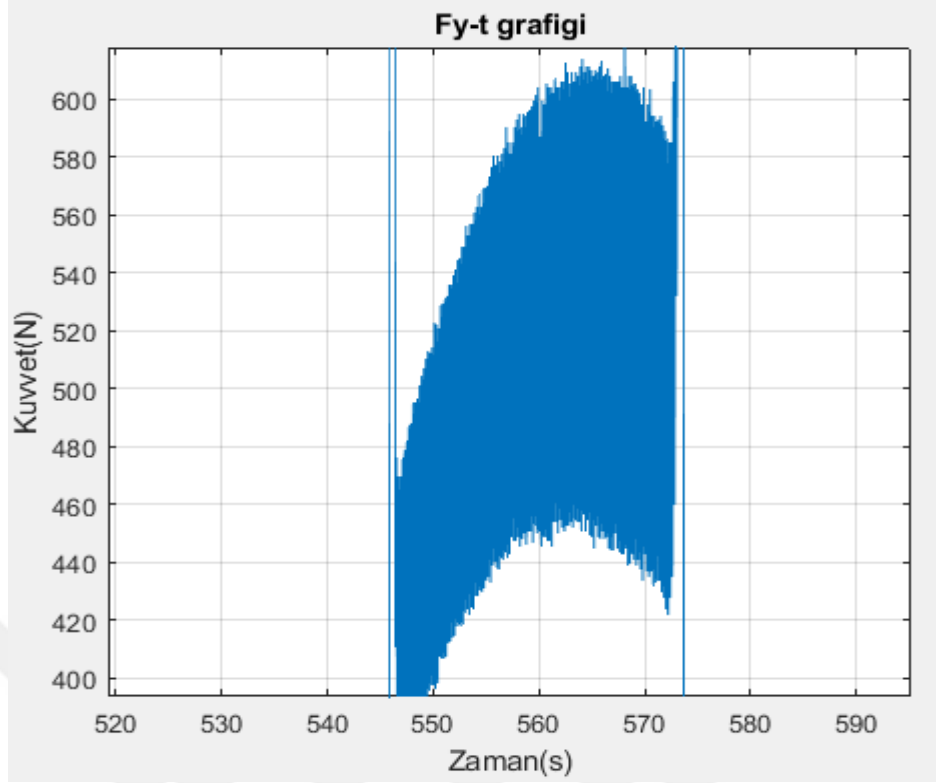
**Şekil 3.1** Standart Trokoidal Frezelemeye Ait Bileşke Kuvvet,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  Kuvvetleri-Zaman Grafiği



**Şekil 3.2** Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti



**Şekil 3.3** Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Takıma Etkiyen İlerleme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti

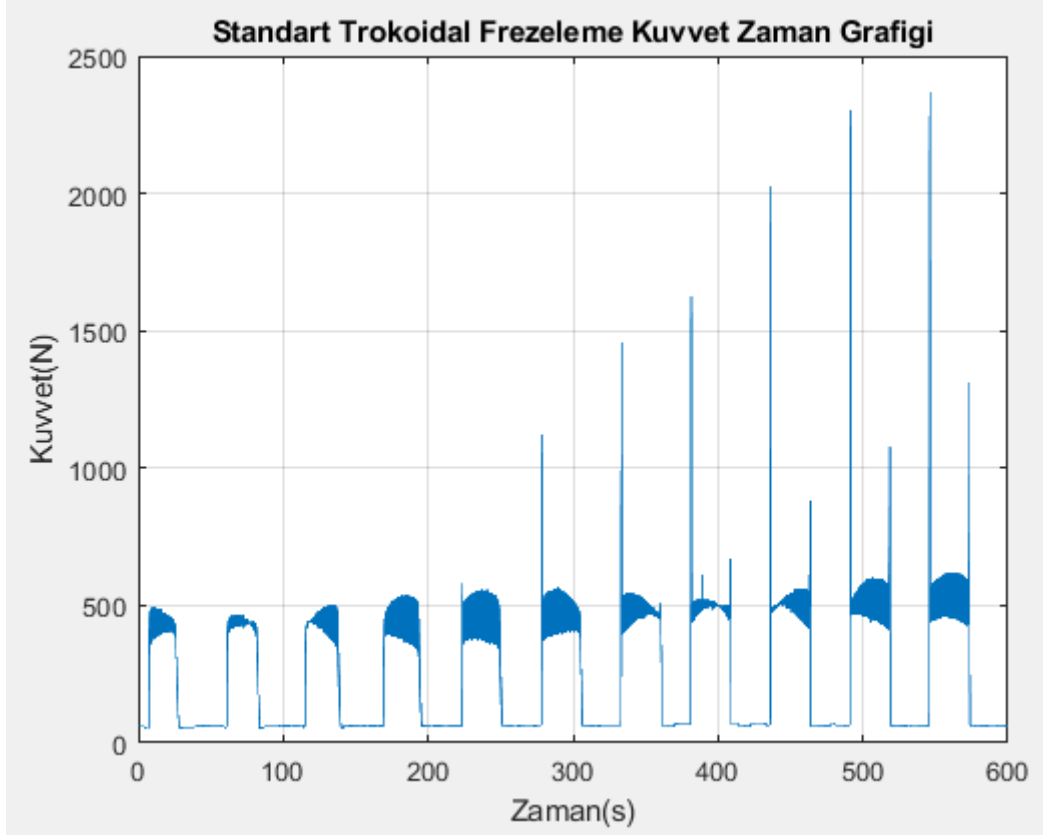


**Şekil 3.4** Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Takıma Etkiyen Kesme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti

Standart trokoidal frezeleme işlemine ait bileşke kuvvet-zaman diyagramı incelendiğinde, kesme rejimi boyunca neredeyse sabit kalan statik bir kesme kuvveti ( $F_{\text{statik}} = 500 \text{ N}$ ) ve kesme işleminin başlangıcında meydana gelen ve statik kuvvete göre çok yüksek değerlerde ilerleyen dinamik bir kuvvet ( $F_{\text{dinamik}}$ ) görülmektedir. Ayrıca, parçanın kesilmeye başladığı andaki  $F_y$  (kesme kuvvetinin) değerinin 400 N olmasına karşın,  $F_x$  (yanal ilerleme kuvveti) kuvvetinin 200 N, yani yarı değerinde olması, ilerleme kuvvetlerinin de kesme kuvvetleri kadar dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

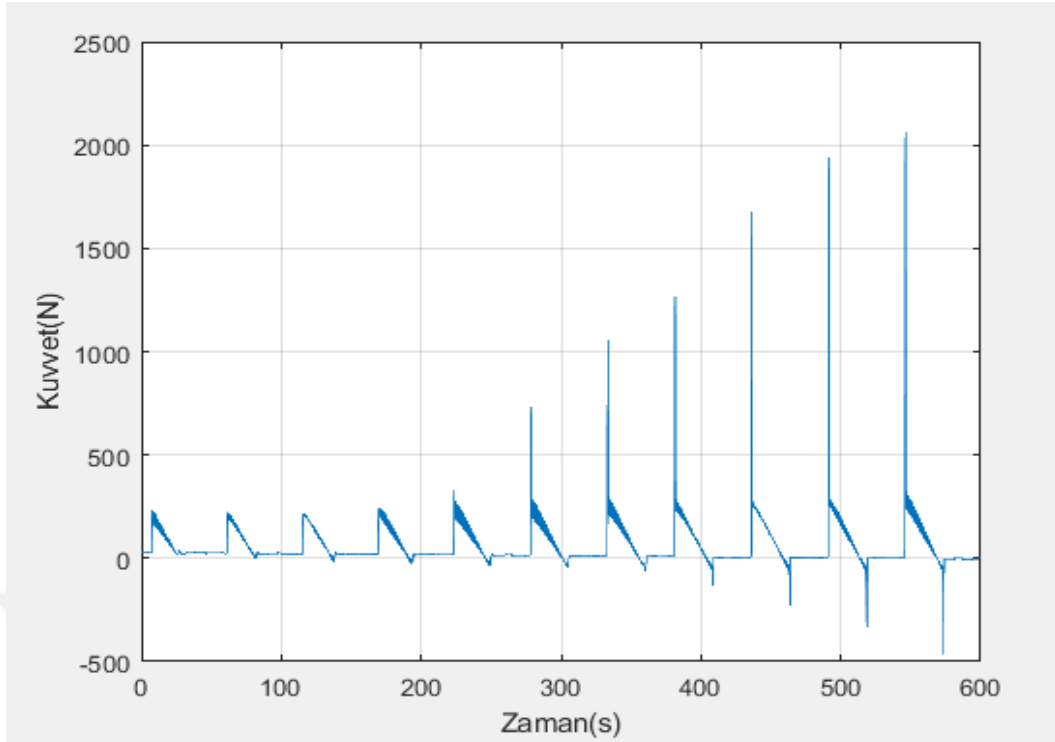
Şekil 3.5’de standart trokoidal frezeleme kuvvet-zaman grafiği ayrı olarak incelendiğinde, 300. saniyeden itibaren anlık dinamik kuvvetlerin belirgin bir hal almaktadır görülmektedir. Bu kuvvetler, önce sadece takım-iş parçası arasındaki kesme prosesinin hemen başında görülürken, 400. saniyeden itibaren takımın iş parçasından ayrıldığı anda da görülmeye başladığı dikkat çekmekte, 0,63 saniye süren bu “anlık” kuvvetlerin, takımla iş parçası arasındaki kesme şartlarının “kuru frezeleme” olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir[36].

Buna göre, arada yağlayıcı barındırmayan kesici uç ve talaş arasında önce yapışma (stick), ardından talaşın belirginleşmesi ve kuvvetin deforme olmamış talaş boyunca yayılmasıyla kayma (slip) faktöründen kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 3.5** Standart Trokoidal Frezeleme Bileşke Kuvvet-Zaman Grafiği

Takıma yanal ilerleme (x) eksenini boyunca etkileyen  $F_x$  kuvvetlerinin karakteristiği “anlık” kuvvetlerin haricinde konvansiyonel talaş kaldırma proseslerine ait aksiyel kuvvetlerin grafikleri ile son derece uyum göstermektedir. Buna göre, “testere dişi” formunda olan bu grafiklerin en tepe noktasına çıkan doğruların diklik derecesi ve formu, kesici ucun helis açısına bağı olarak değişmektedir. Bununla ilgili çalışmalar literatürde [37] kaynağında görülmektedir.



**Şekil 3.6** Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Oluşan İlerleme Kuvveti–Zaman Grafiği

Şekil 3.1’de çizdirilen diyagramlar ışığında, takıma etkiyen ortalama kuvvetler ve N cinsinden değerleri Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

**Tablo 3.1** Takıma Etkiyen Ortalama Kuvvetler Ve Değerleri

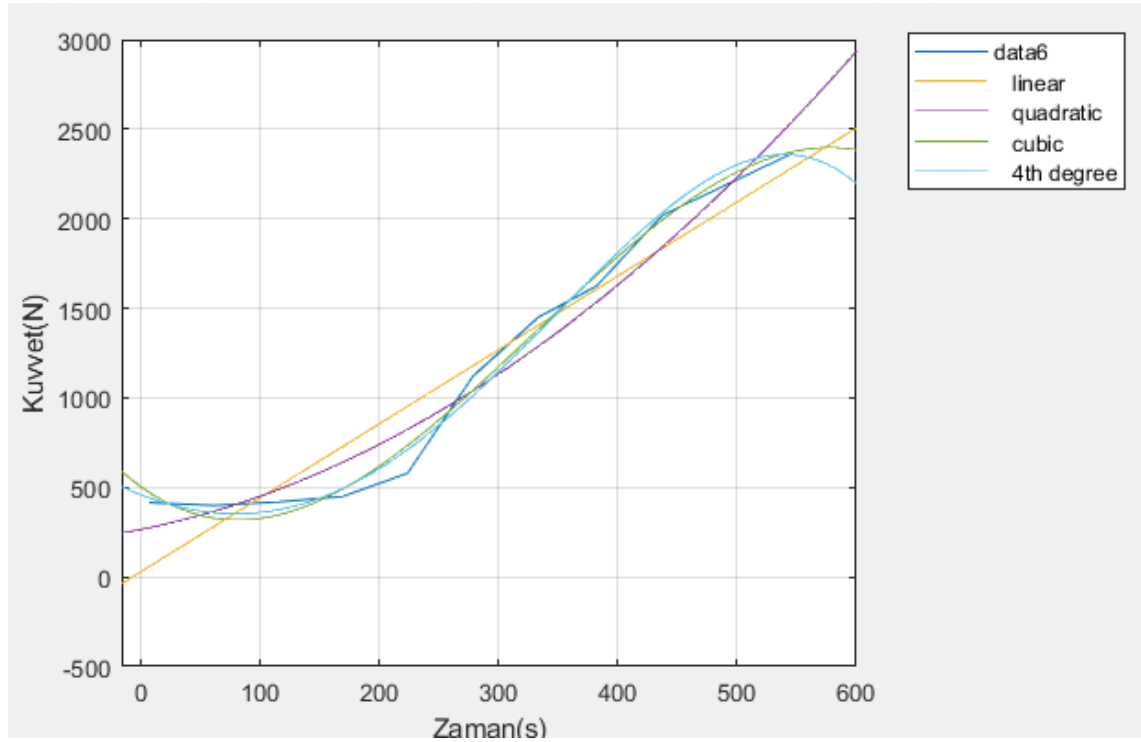
| Takıma etkiyen ortalama kuvvetler                                                             | Birim (N) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Takıma etkiyen ortalama bileşke kesme kuvveti                                                 | 260       |
| Takıma etkiyen ortalama bileşke kuvvet (kesme rejimi boyunca)<br>( $F_{\text{bileşke,ort}}$ ) | 525       |
| Takıma etkiyen ortalama kesme kuvveti ( $F_{y,\text{ort}}$ )                                  | 248       |
| Takıma etkiyen ortalama kesme kuvveti (kesme rejimi boyunca)                                  | 500       |
| Takıma etkiyen ortalama ilerleme kuvveti ( $F_{x,\text{ort}}$ )                               | 60        |
| Takıma etkiyen ortalama ilerleme kuvveti (kesme rejimi boyunca)                               | 150       |

Dinamik değerleri oluşturan zamana bağlı fonksiyon bulunmak istendiğinde, diyagramda görülen ve “parazit” oluşturan noktaların zaman ve kuvvet skalalarından okunması gerekmektedir. Diyagramdaki verilere dayanarak,

Zaman matrisi,  $t = [7,5 \ 61,5 \ 115,5 \ 169 \ 223,4 \ 278 \ 333 \ 382 \ 437 \ 546]$  saniye,

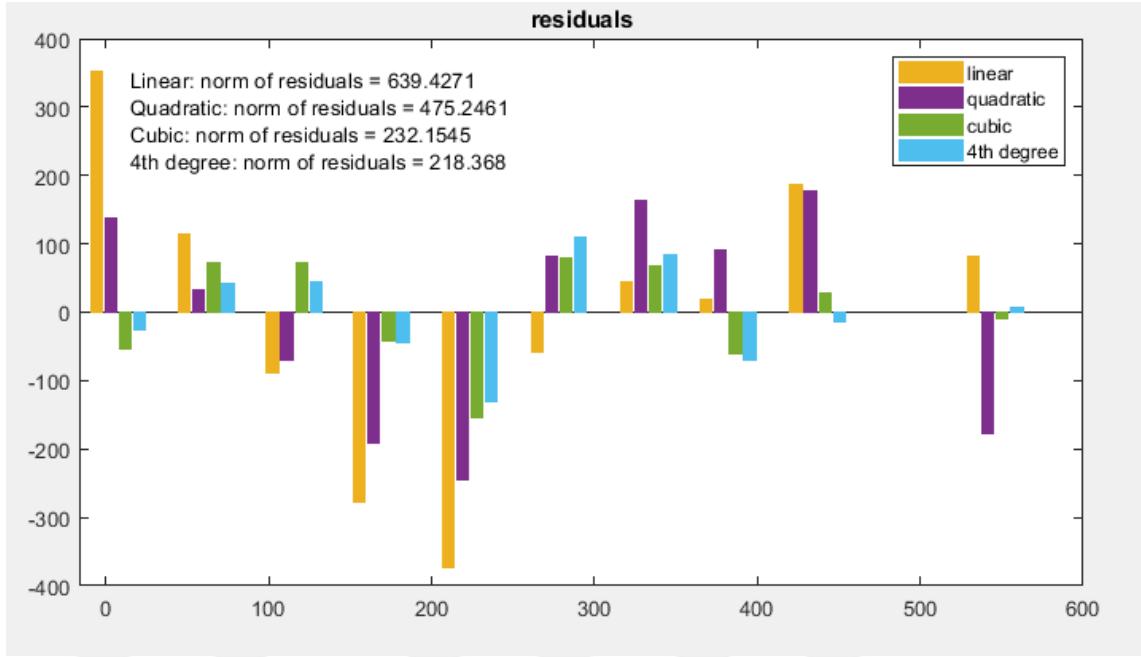
$F_{\text{dinamik}}$  matrisi ise,  $F_{\text{dinamik}} = F(t) = [415 \ 400 \ 420 \ 450 \ 580 \ 1120 \ 1450 \ 1625 \ 2020 \ 2365]$  N olarak okunmaktadır.

Yukarıda belirtilen zaman ve kuvvet matrislerine göre, MATLAB ortamında veriler grafiğe döküldüğünde Şekil 3.7’de görüldüğü gibi çeşitli mertebelerdeki eğriler ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 3.7** Standart Trokoidal Frezeleme İşleminde Oluşan Dinamik Kuvvetleri Zamana Göre Veren  $F_{\text{dinamik}}$  Fonksiyonunun Grafiği

Bilindiği üzere, belirtilen fonksiyonların doğruluk derecelerinin ve/veya hata paylarının bilinmesi sistemin davranışını doğru analiz etmede temel unsur olduğundan, Şekil 3.7’ de standart trokoidal frezeleme işlemi için oluşturulan farklı mertebelerdeki  $F_{\text{dinamik}}$  fonksiyonlarına ait hata grafikleri oluşturulmuştur.



**Şekil 3.8** Standart Trokoidal Frezeleme İşlemi İçin Oluşturulan Farklı Mertebedeki  $F_{\text{dinamik}}$  Fonksiyonlarına Ait Hata (Rezidü) Grafikleri

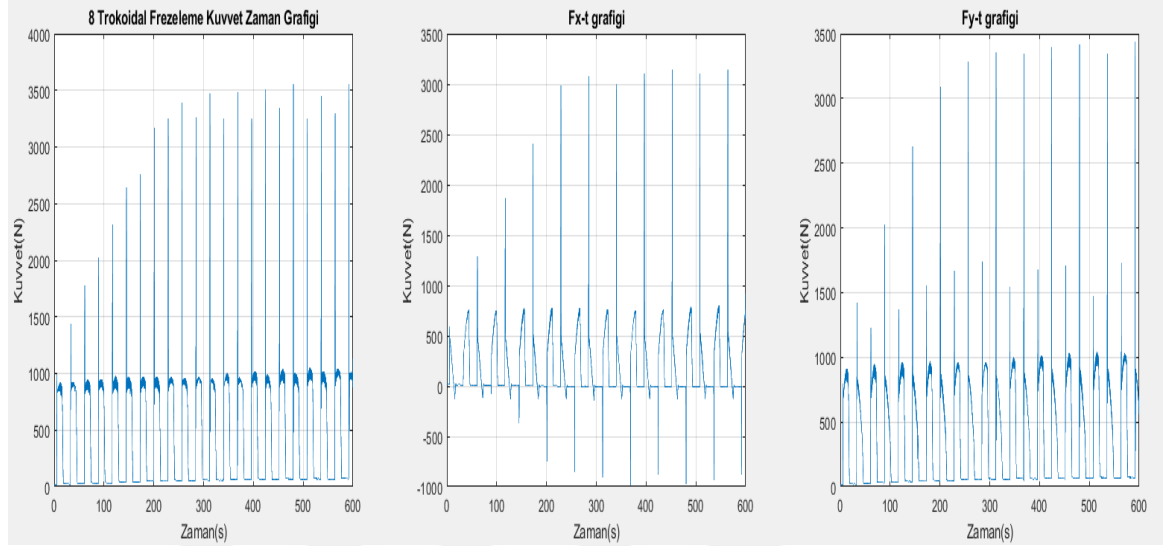
Şekil 3.8'e göre hata payı en düşük denklem 4. dereceden polinom denklemi olduğundan ( $R^2$  değerleri 1., 2., 3., ve 4. derece denklemler için sırasıyla; 0,91, 0,94, 0,98, 0,99), bu kuvvetleri tanımlamak için ;

$F_{\text{dinamik}}(t) = -5,134 \cdot 10^{-8}t^4 + 2,25 \cdot 10^{-5}t^3 + 0,01408t^2 - 2,565t + 458,8$  (1) (N) denklemi seçilmiştir. Ayrıca,  $F_{\text{dinamik}}(t) = 4,127t + 31,02$  (2) ( $R^2 = 0,9175$ ) denklemi ve  $F_{\text{dinamik}}(t) = 0,1052t^{1.581} + 279,5$  (N) ( $R^2 = 0,96$ ) denklemi daha sonraki hesaplamalarda kolaylık olması açısından verilmiştir.

Bu denkleme göre, kesme anında takıma etkiyen  $F_{\text{statik}}$  (kesme rejimi boyunca etkiyen statik kuvvet) ortalama 458 N olmakta ve kuru sürtünme şartları altında oluşan anlık atalet kuvvetleri zamanın bir fonksiyonu olmaktadır. Bileşke kuvvet-zaman grafiğine MATLAB Curve Fitting uygulaması ile 1. mertebeden ve 8. mertebeden Fourier analizi yapıldığında bütün grafik için elde edilen denklemlerin  $R^2$  değerleri sırasıyla 0,62 ve 0,66 olduğu, dolayısıyla bu denklemlerin kullanılmasının takıma etkiyen kuvvetlerin kontrolü açısından faydalı olmadığı görülmüş ve daha basit olan polinom tipi eğri ile elde edilebilecek anlık maksimum atalet kuvvetlerin tespiti gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.2 Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Kuvvet-Zaman Grafikleri

Sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezelemeye ait bileşke kuvvet,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  kuvvetleri-zaman grafikleri Şekil 3.9’da görülmektedir.



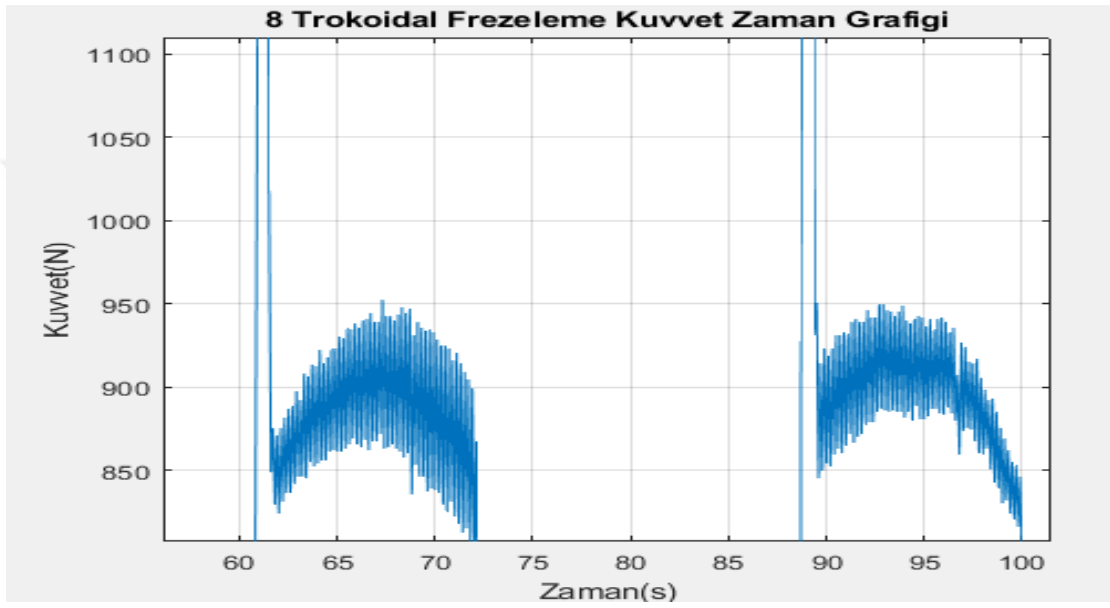
**Şekil 3.9** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Farklı Eksenlerde Etkiyen Kuvvetler Ve Bileşke Kuvvet-Zaman Grafikleri

Bileşke kuvvet-zaman grafiğinde görüldüğü üzere, kesme anında takıma etki eden kuvvetler ortalama 1000 N civarında seyretmektedir. Ayrıca bu kesme işlemi de sabit olarak kabul edilebilecek kesme kuvvetleri ( $F_{statik}$ ) dışında 33. saniyeden itibaren başlayan, 200. saniye itibariyle bir rejime girdiği görülen ve kuru sürtünme şartları etkisiyle oluştuğu düşünülebilecek dinamik kuvvetlerden oluşmaktadır. Bu kısa süreli (0,8 sn) dinamik kuvvetler, rejime oturduğu andan itibaren ortalama kesme kuvvetlerinin 3 katı büyüklüğe erişmekte ve standart trokoidal frezelemede rejime girdiği düşünülen dinamik kuvvetlerden %20 daha fazla (500 N) olmaktadır.

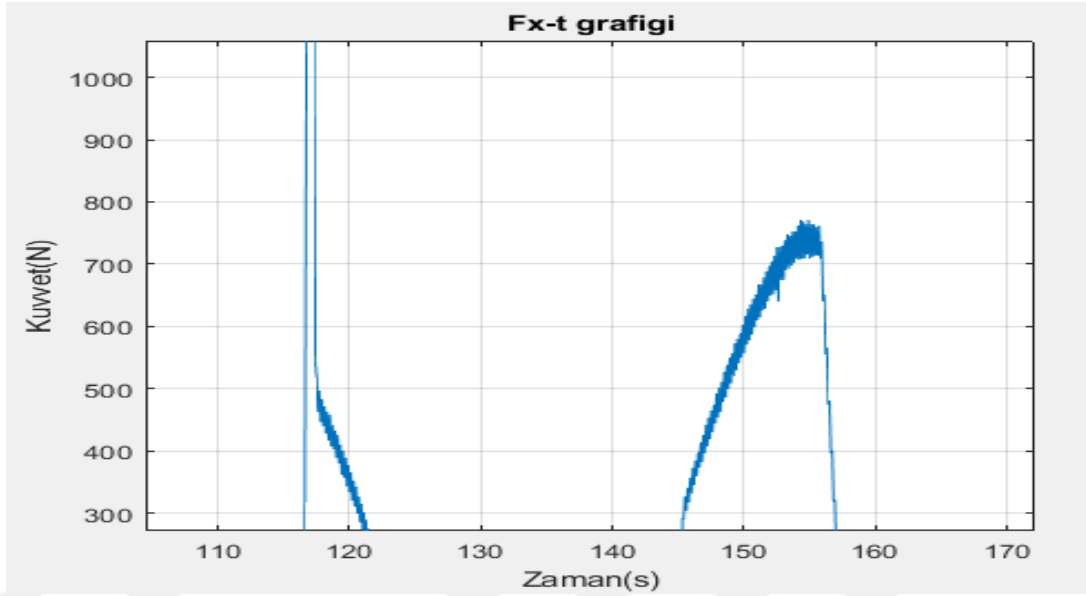
Ayrıca, sonsuz trokoidal frezeleme işleminde, kesme anında takıma etkiyen bileşke kuvvetlerin büyüklüğünün, standart trokoidal frezeleme esnasında takıma etkiyen bileşke kuvvetin yaklaşık 2 misli olduğu Şekil 3.9 ve Şekil 3.1 üstünden kıyaslandığında açıkça görülmektedir. Bunun sebebinin standart trokoidal frezeleme işleminin bir nevi “eş yönlü frezeleme” işlemi gerçekleştirirken, sonsuz

trokoidal frezelemenin kısmen “zıt yönlü frezeleme” hareketi yapması olduğu düşünülmektedir.

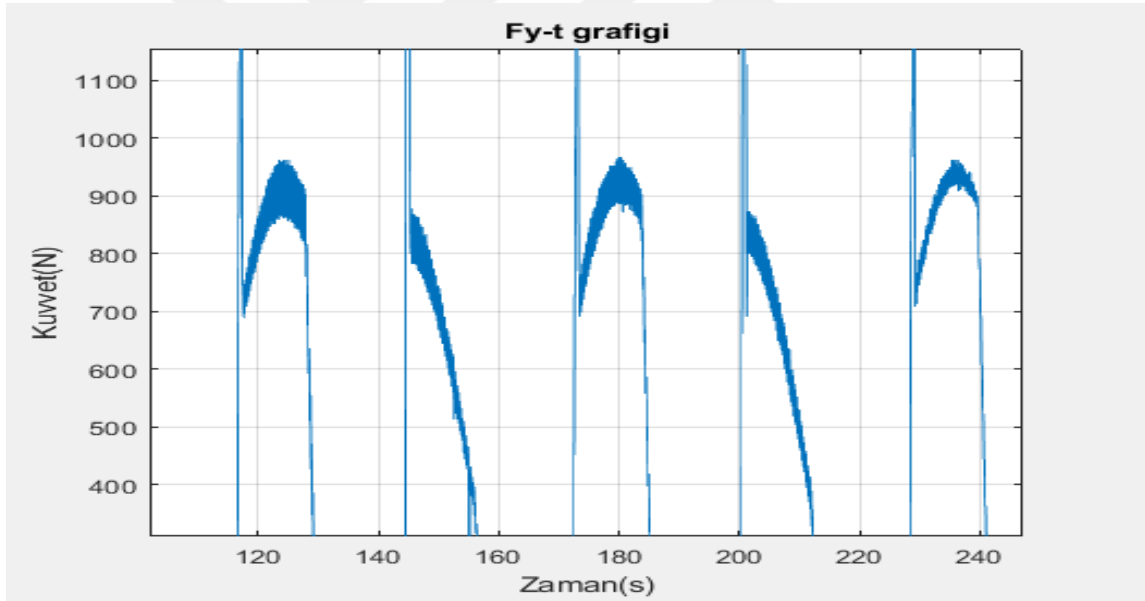
Sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemi sırasında takıma etkiyen kuvvetleri daha iyi anlayabilmek için, oluşturulan her bir grafikten yakın görüntü olarak kesit alınmıştır. Bu kesitler bileşke kuvvet zaman ( $F_{\text{bileşke}}-t$ ), ilerleme kuvveti-zaman ( $F_x-t$ ) ve kesme kuvveti-zaman ( $F_y-t$ ) olarak sırasıyla Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.10** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti



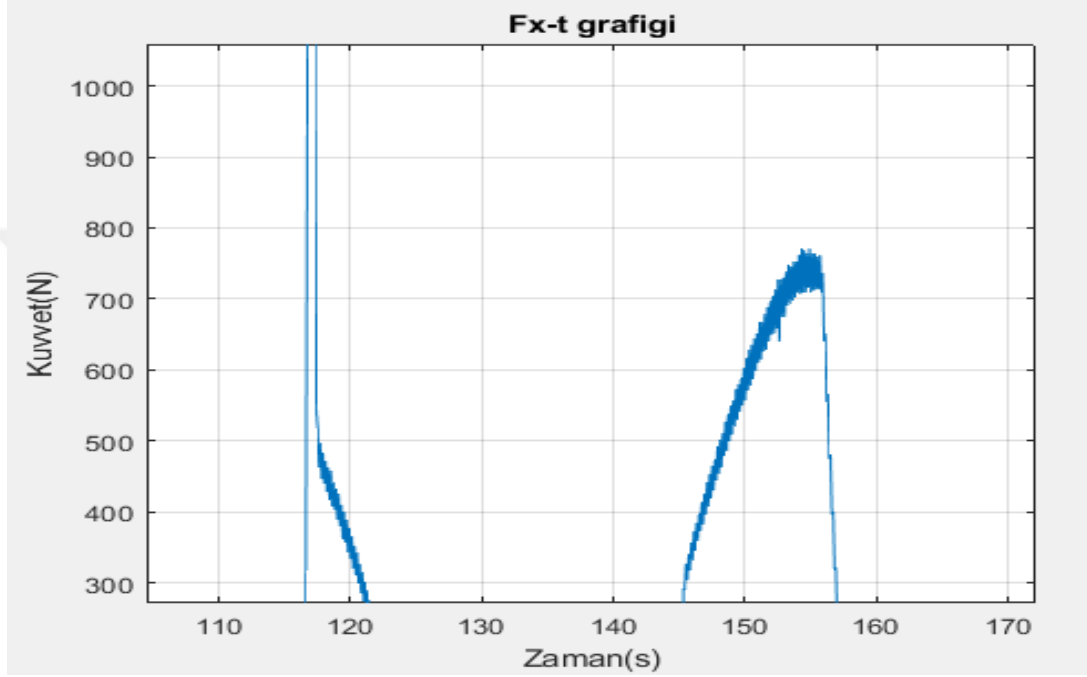
**Şekil 3.11** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti



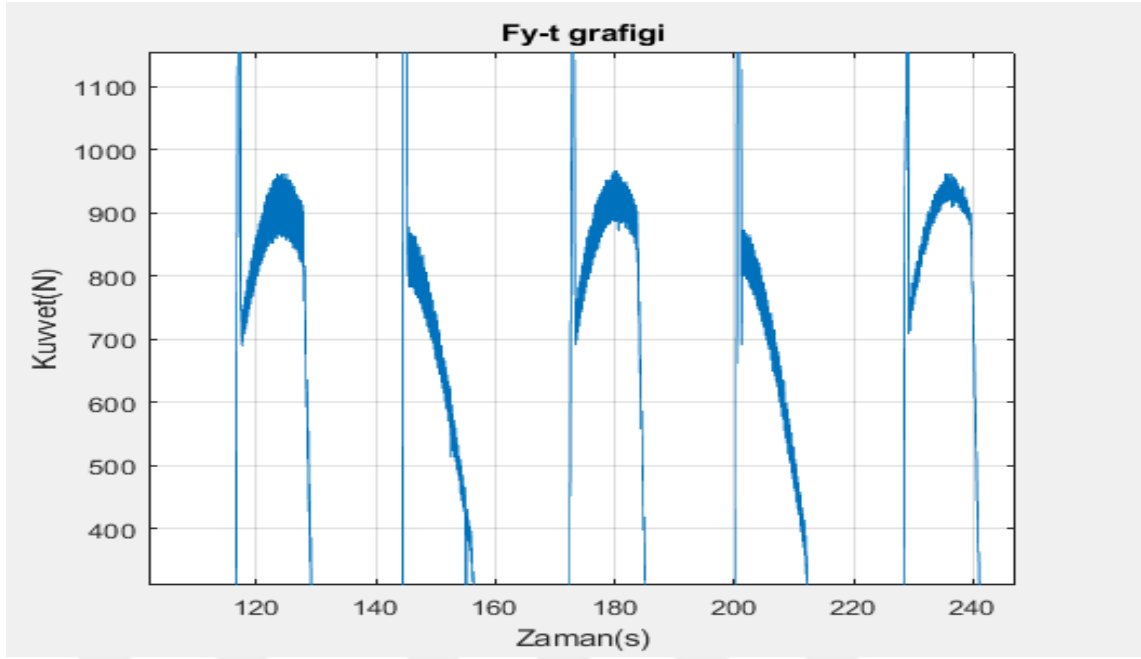
**Şekil 3.12** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti

Bunlara ilave olarak, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'ten görüldüğü üzere, takımın yapmış olduğu kesme hareketinde ikinci kanala ait talaş kaldırma prosesi sırasında oluşan kesme ve ilerleme kuvvetleri sırasıyla 850 N ve 500 N olurken, ikinci kanala ait talaş kaldırma prosesi esnasında kesme ve ilerleme kuvvetleri 800 N ve 750 N

olmuştur. Kısacası kesme kuvvetleri çok küçük miktarda azalırken ilerleme kuvvetleri yarı yarıya artmakta, bu durum kesme işlemi haricinde sürtünme kuvvetlerinin de proses esnasında takıma önemli ölçüde etkidiğini göstermektedir. Bu prosesin, standart trokoidal frezelemeye göre, sürtünme ve kesme kuvvetlerinin yaptıkları iş açısından, daha verimsiz olduğu söylenebilir. Prosese ait grafiksel verilerin sayısal değeri Tablo 3.2 de verilmiştir.



**Şekil 3.13** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvveti-Zaman Grafiği

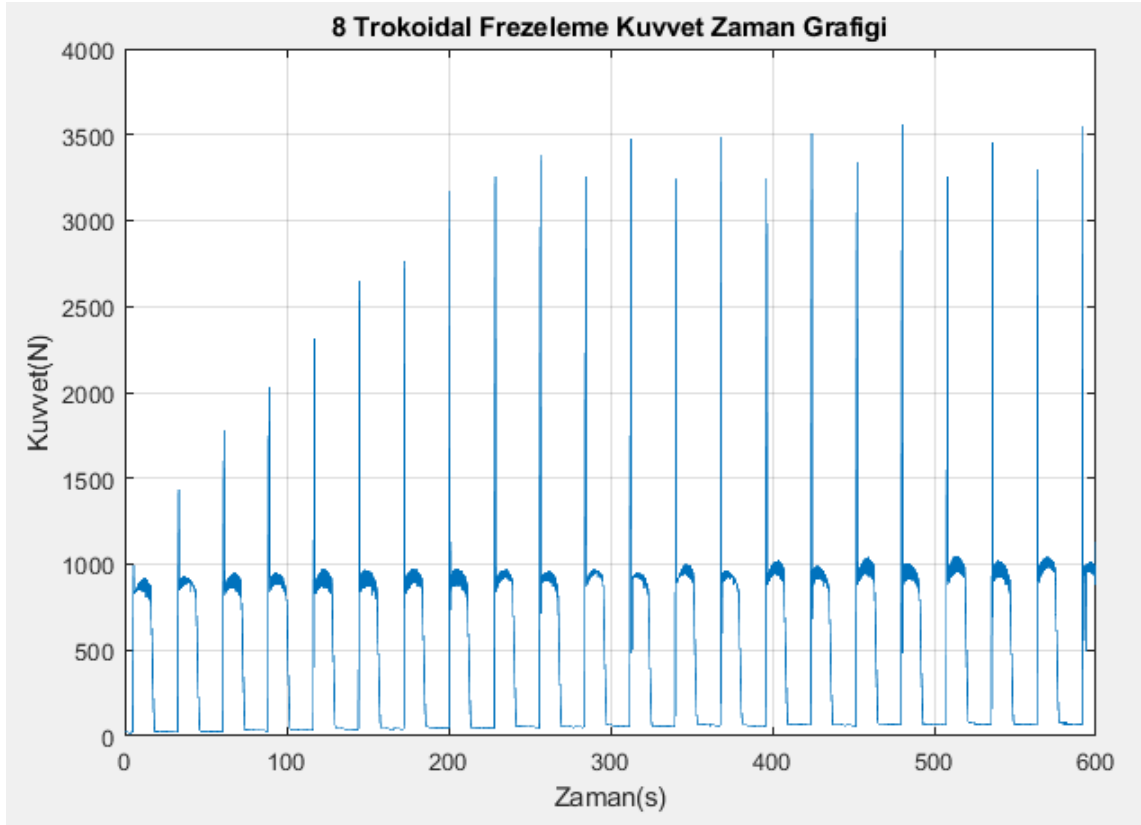


**Şekil 3.14** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvveti-Zaman Grafiği Kesiti

**Tablo 3.2** Takıma Etkiyen Ortalama Kuvvetler Ve Değerleri(Sonsuz Trokoidal)

| Takıma etkiyen ortalama kuvvetler                                                             | Birim (N) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Takıma etkiyen ortalama bileşke kesme kuvveti                                                 | 468       |
| Takıma etkiyen ortalama bileşke kuvvet (kesme rejimi boyunca)<br>( $F_{\text{Bileşke,ort}}$ ) | 900       |
| Takıma etkiyen ortalama kesme kuvveti ( $F_{y,\text{ort}}$ )                                  | 395       |
| Takıma etkiyen ortalama kesme kuvveti (kesme rejimi boyunca)                                  | 737       |
| Takıma etkiyen ortalama ilerleme kuvveti ( $F_{x,\text{ort}}$ )                               | 177       |
| Takıma etkiyen ortalama ilerleme kuvveti (kesme rejimi boyunca)                               | 550       |

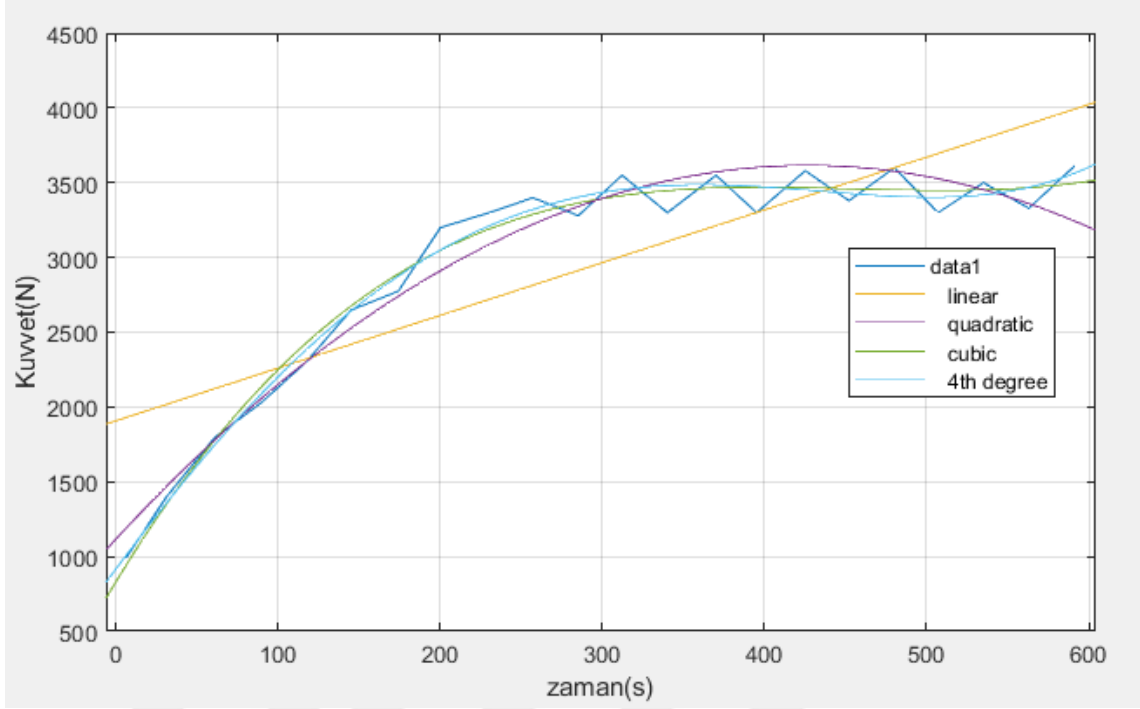
Şekil 3.15'te dinamik kuvvetlere ait sayısal veriler grafik üstünden okunduğunda  $F(t)$ ,  $t$  matrisi oluşturulmuş olacaktır. Bu matrisin grafiği ( $F_{\text{dinamik}}$ ) çizdirilip, oluşan eğriye göre uydurulan denklemler Şekil 3.16'te gösterildiği gibi olmaktadır.



**Şekil 3.15** Sonsuz( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet-Zaman Grafiği

$F(t)=[990 \ 1400 \ 1800 \ 2025 \ 2300 \ 2650 \ 2775 \ 3200 \ 3300 \ 3400 \ 3280 \ 3550 \ 3300 \ 3550 \ 3300 \ 3580 \ 3380 \ 3600 \ 3300 \ 3500 \ 3330 \ 3620 \ ]$

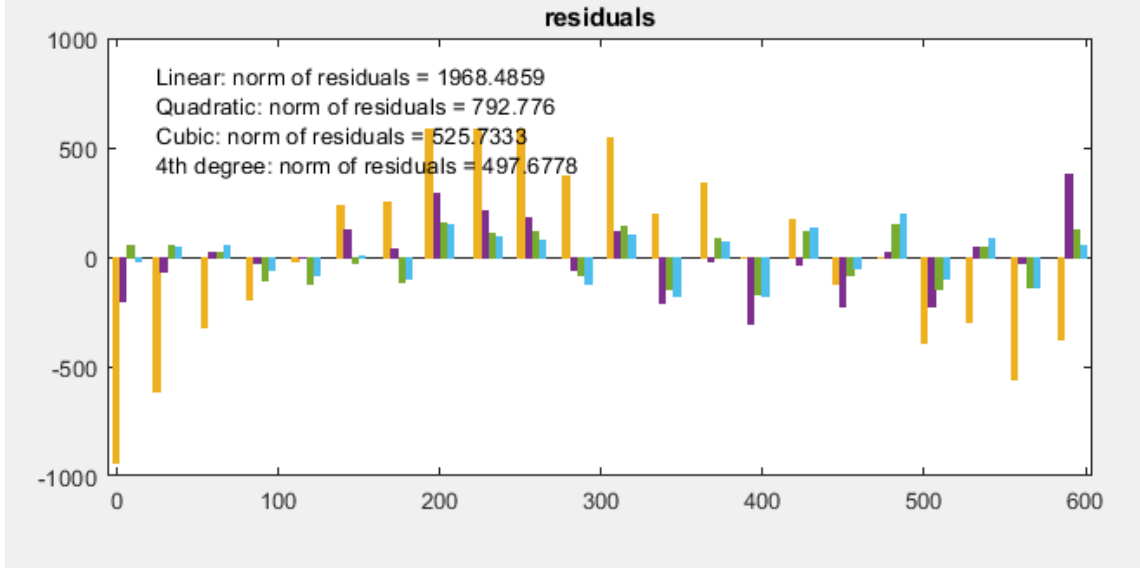
$t=[6 \ 31 \ 61 \ 89 \ 117 \ 145 \ 174 \ 200 \ 230 \ 257 \ 285 \ 312 \ 340 \ 370 \ 395 \ 425 \ 452 \ 480 \ 507 \ 535 \ 563 \ 592]$  şeklinde veri matrisleri grafiğin üstünden okunduğunda ve Matlab programına yerleştirildiğinde Şekil 4.16'daki görsel oluşturulmuştur.



**Şekil 4.16** Sonsuz Trokoidal Frezeleme İşlemine Göre Dinamik Kuvvet Olarak Tabir Edilen Kısma Ait Grafik Ve Uydurulan Eğrilerin Denklemi

$R^2$  değeri 0.98 olan ve bütün eğriler içinde en fazla değere sahip olan,  $F_{\text{dinamik}}(t) = 5,502 \cdot 10^{-8}t^4 + 3,649 \cdot 10^{-5}t^3 - 0,01485t^2 + 14,64t + 920$  (N) şeklinde tespit edilmiştir. Bu denkleme göre, statik kesme kuvvetinin büyüklüğü ( $F_{\text{statik}}$ ) 920 N olmaktadır. Kalan zamana bağlı ifadeler kuru sürtünme şartlarından olduğu tahmin edilen ataletsel kuvvetlerin büyüklüğünü zamana bağlı olarak Newton cinsinden vermektedir. Elbette bu denklem sürekli olmadığı ve zamana bağlı olduğu için tam anlamıyla doğru olmadığı görülmektedir. Hata payının, Şekil 3.17'de görüldüğü üzere, %11 civarında olduğu ve bu süreksiz fonksiyonu tarif eden dalga fonksiyonunun fourier dönüşümünde elde edilen denkleminin  $R^2$  değerinin (en büyük değeri 4. mertebede) 0,70 olduğu görülmüştür.

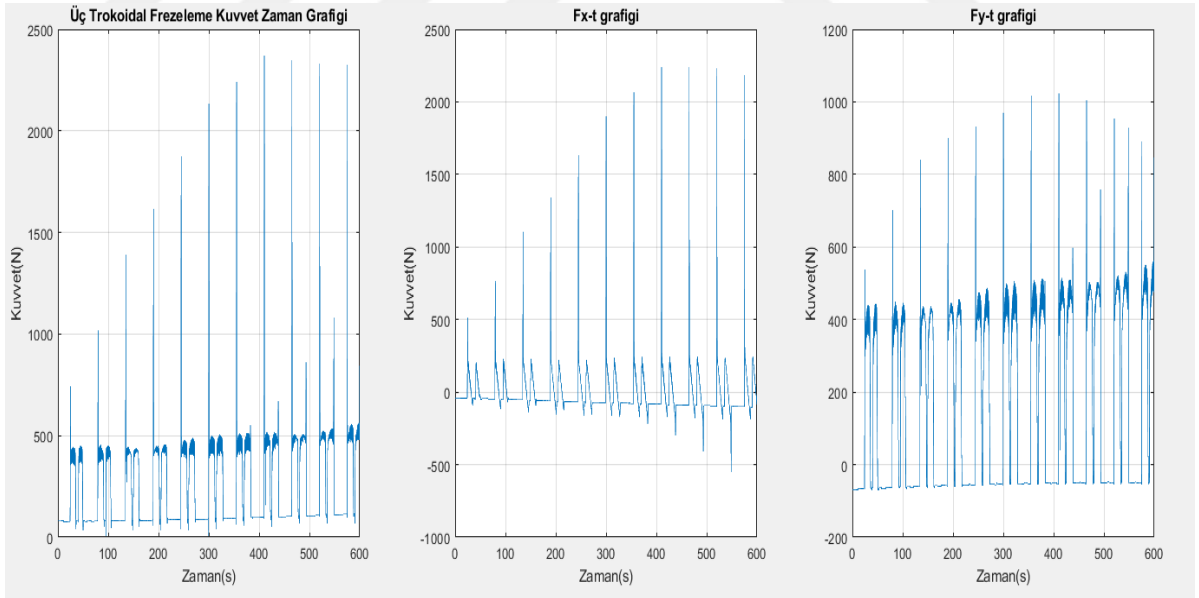
Sonuç olarak sürekli olan fonksiyonun güvenilirliğinin daha fazla olduğu tespit edilmiş ve bu fonksiyonun kullanılmasının daha faydalı olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca,  $R^2 = 0,68$  doğruluğunda olan lineer  $F_{\text{dinamik}}(t) = 3,525t + 1090$  denklemi yerine gelecekteki hesaplarda işlem kolaylığı olacak ve sistemin tarif edilmesini kolaylaştıracak  $R^2 = 0,90$  doğruluğundaki  $F_{\text{dinamik}}(t) = 3675t^{0.1101} - 3705$  (N) denklemi de not edilmiştir.



**Şekil 3.17** Matlab Programına Göre  $\infty$  Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiğine Uydurulan Eğrilerin Hata Paylarını Gösteren Tablo

### 3.1.3 Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Kuvvet-Zaman Grafikleri

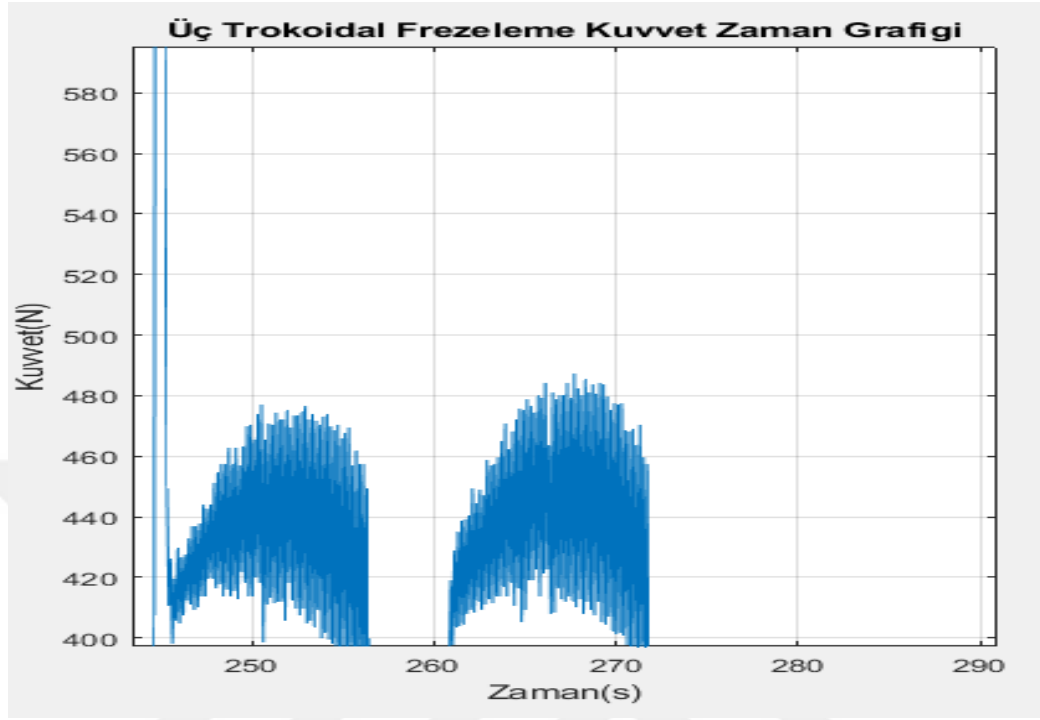
Kardioid ( $\infty$ ) (yada 3 Trokoidal) trokoidal frezelemeye ait bileşke kuvvet,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  kuvvetleri-zaman grafikleri Şekil 'da görülmektedir.



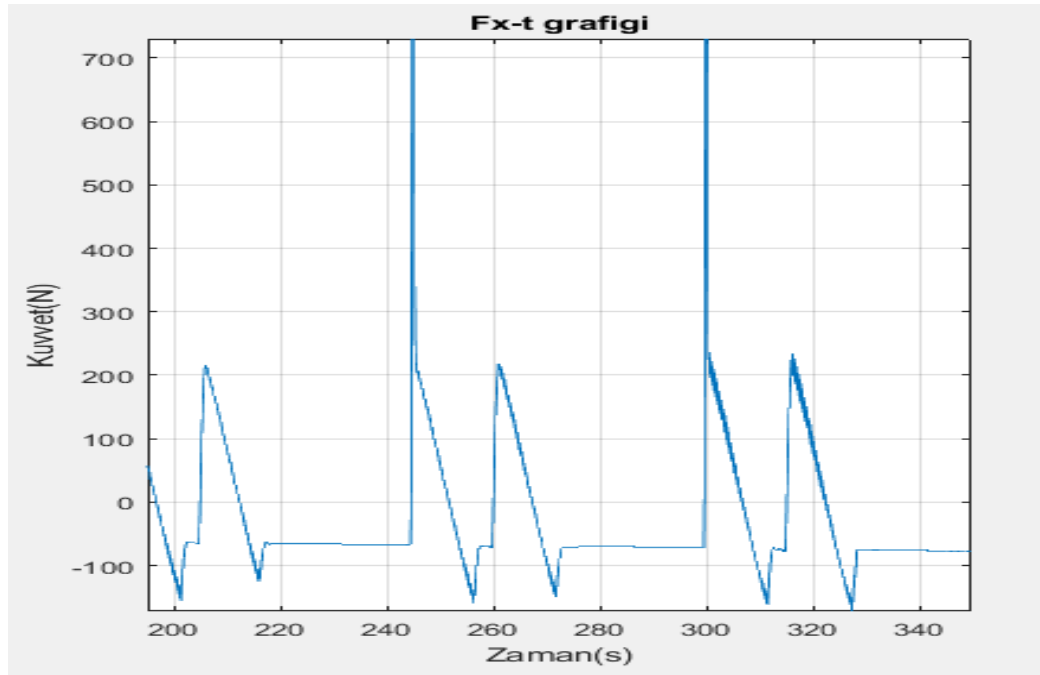
**Şekil 4.18** Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiği Tümü

Kardioid ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemi sırasında takıma etkiyen kuvvetleri daha iyi anlayabilmek için, oluşturulan her bir grafikten yakın görüntü olarak kesit alınmıştır. Bu kesitler bileşke kuvvet zaman ( $F_{\text{bileşke}}-t$ ), ilerleme kuvveti-zaman ( $F_x-$

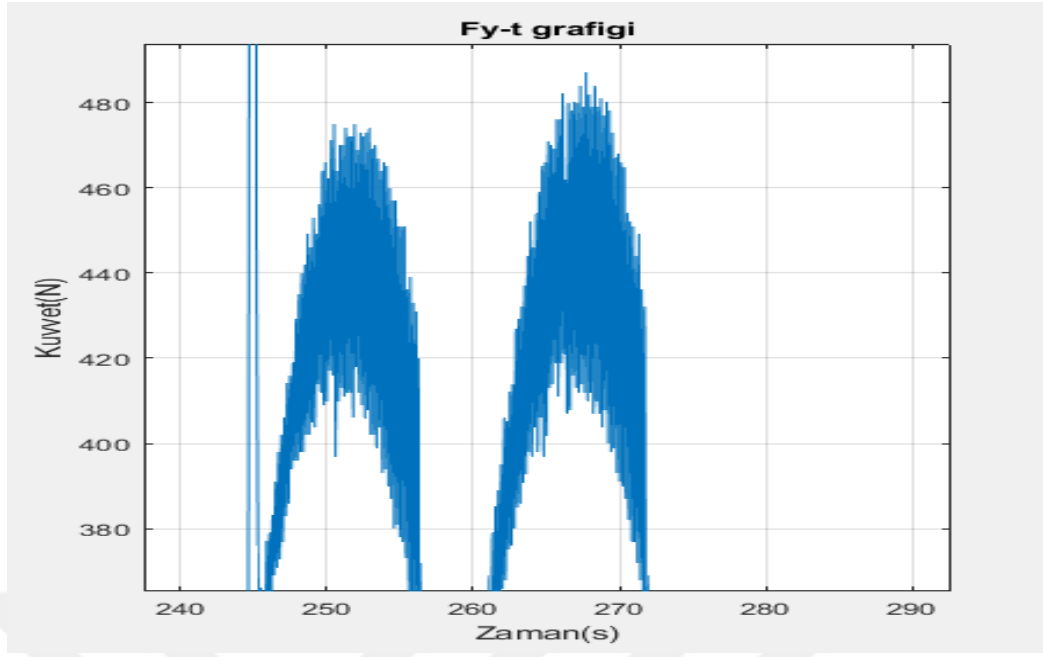
t) ve kesme kuvveti-zaman ( $F_y$ -t) olarak sırasıyla, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.19** Kardiod (∞) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Bileşke Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti

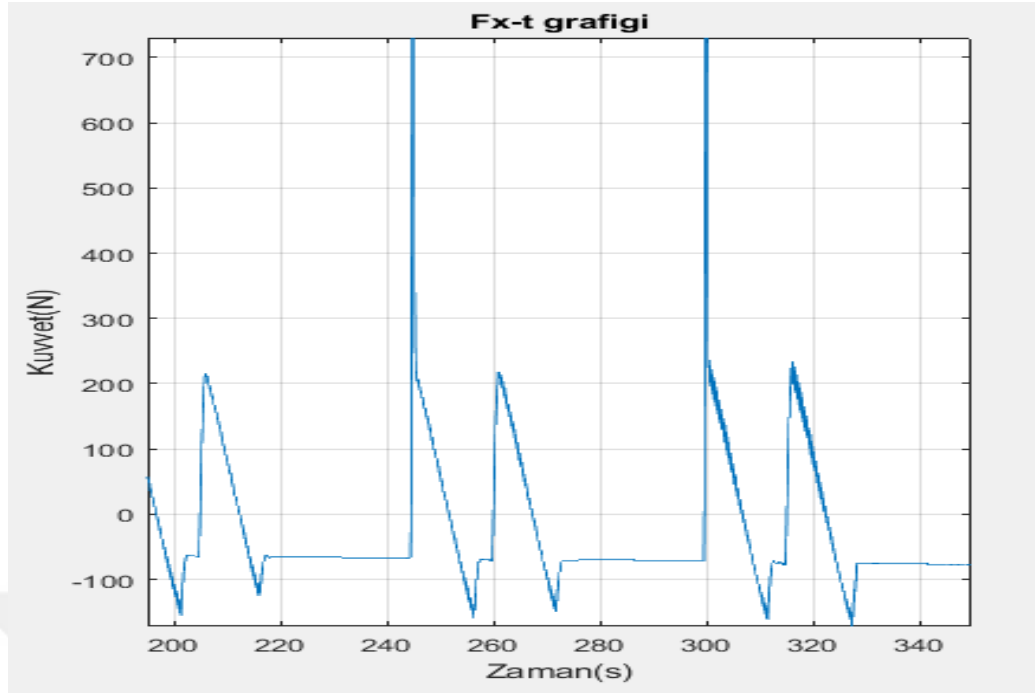


**Şekil 3.20** Kardiod (∞) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti

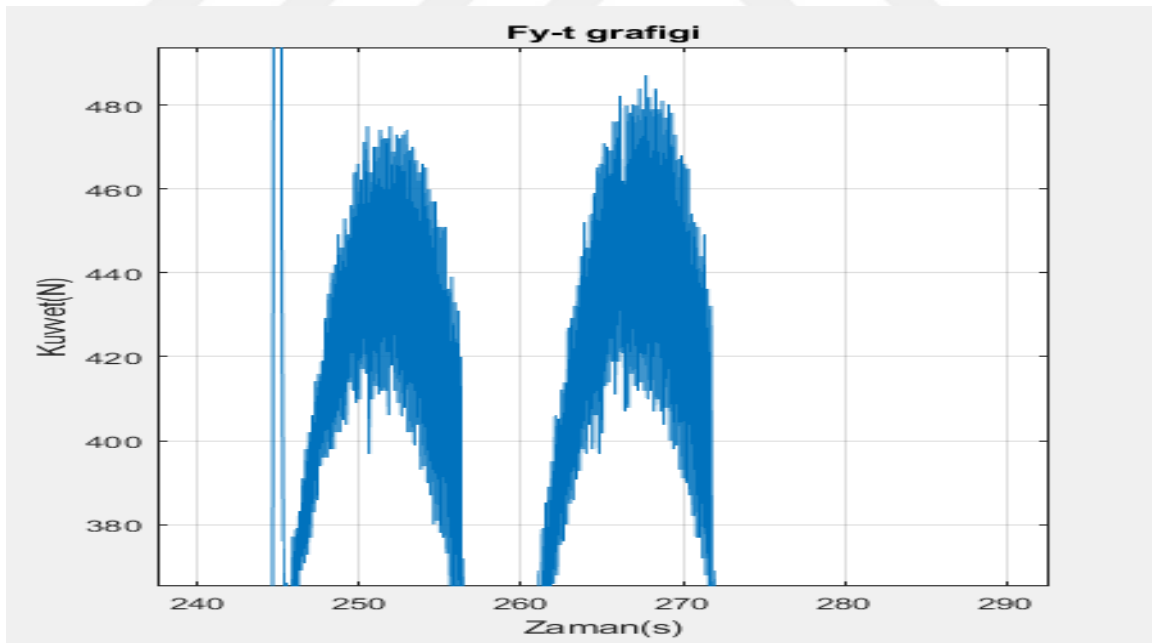


**Şekil 3.21** Kardiod (∞) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti

Şekil 3.18’de görüldüğü üzere, üç trokoidal frezeleme prosesinde takıma kesme anında etkiyen bileşke kuvvet ortalama olarak 400 N olarak seyretmiş, kesme anındaki kesme kuvveti 380 N ve ilerleme kuvveti 100 N civarında olmuştur. Ayrıca ilerleme kuvvetinin ortalama şiddetinin (100 N) ortalama kesme kuvvetinin  $\frac{1}{4}$ ’üne yakın olması takıma etkiyen kuvvetler içinde kesme kuvvetinin en önemli ve büyük paya sahip olduğunu göstermektedir.



**Şekil 3.22** Kardiod (  $\infty$  ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen İlerleme Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti



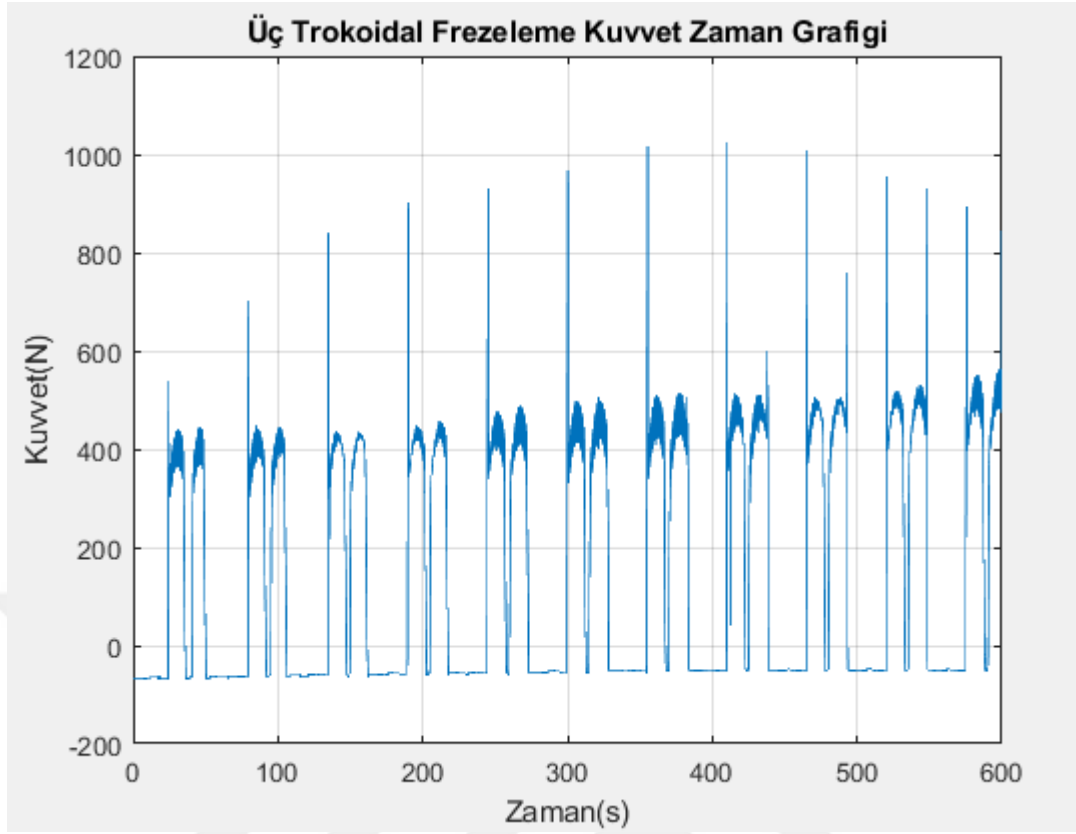
**Şekil 3.23** Kardiod (  $\infty$  ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Takıma Etkiyen Kesme Kuvvet-Zaman Grafiği Kesiti

Şekil 3.25 ve 3.26'dan görüldüğü üzere, standart trokoidal frezeleme esnasında ve  $\infty$  trokoidal frezeleme esnasında hali hazırda görülen ve kuru sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olduğu düşünülen anlık (0.8 sn süresinde) kuvvetler, takımın pasoyu tamamlaması ve iş parçasından çıkması anında da 380. saniyeden itibaren gözle görülür bir belirginliğe erişmeye başlamıştır. Bu belirginlik kendisini hem ilerleme hemde kesme kuvvetlerinde göstermiştir. Şekil 3.18'te görülen bileşke kuvvet-zaman diyagramından okunduğu üzere bu kuvvetler 300. saniye itibariyle bir rejim değerine yerleşmiş (2000N) ve kalan süre zarfında bu değerde bulunmuştur. Bu anlık kuvvet değeri, bileşke kesme kuvvet değerinin 5 misli olmaktadır. Proses verimliliği ile ilgili hesaplamalarda kolaylık olması açısından üç trokoidal frezeleme esnasında takıma etkiyen kuvvetler Tablo 3.3'te verilmiştir.

**Tablo 3.3** takıma etkiyen ortalama kuvvetler ve değerleri(Kardioid ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme)

| Takıma Etkiyen Ortalama Kuvvetler                                                             | Birim (N) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Takıma etkiyen ortalama bileşke kesme kuvveti                                                 | 253       |
| Takıma etkiyen ortalama bileşke kuvvet (kesme rejimi boyunca)<br>( $F_{\text{bileşke,ort}}$ ) | 500       |
| Takıma etkiyen ortalama kesme kuvveti ( $F_{y,\text{ort}}$ )                                  | 160       |
| Takıma etkiyen ortalama kesme kuvveti (kesme rejimi boyunca)                                  | 425       |
| Takıma etkiyen ortalama ilerleme kuvveti ( $F_{x,\text{ort}}$ )                               | 13        |
| Takıma etkiyen ortalama ilerleme kuvveti (kesme rejimi boyunca)                               | 125       |

Şekil 3.24'te görülen grafikten okunduğu üzere, bu dinamik ve anlık kuvvetlerin büyüklükleri ve bunlara karşılık gelen değerler bir matris oluşturacak şekilde düzenlenmiş ve bu noktaların grafikleri Şekil 3.25'de olduğu gibi çizdirilmiştir.



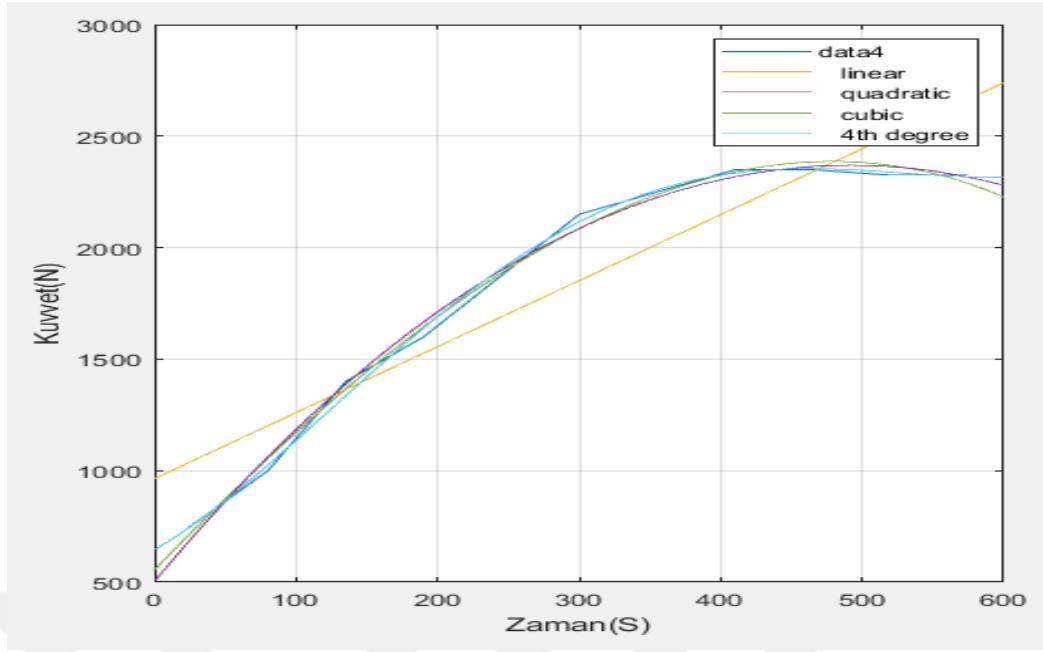
**Şekil 3.24** Kardiod (∞) Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiğinin Statik (Düz Çizgi) Kuvvetleri Ve Dinamik Kuvvetleri (Elips)

Grafik üstünden veriler,

$t = [25 \ 80 \ 135 \ 190 \ 245 \ 300 \ 355 \ 410 \ 465 \ 520 \ 575]$

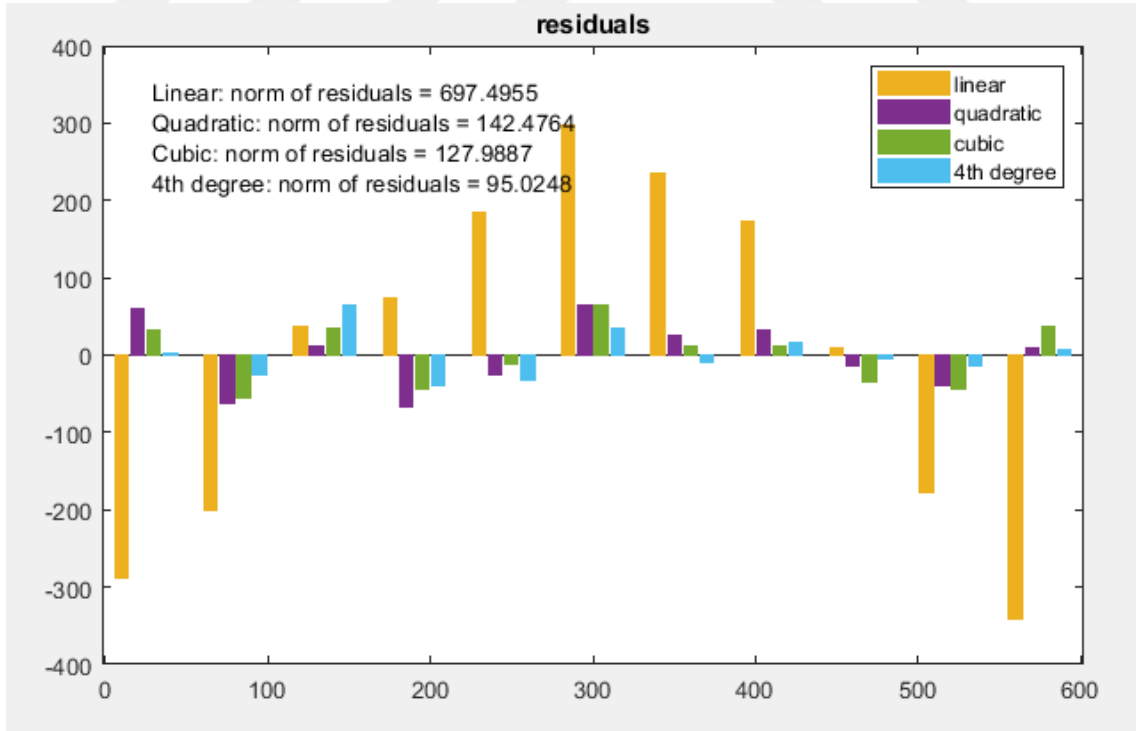
$F_{\text{dinamik}}(t) = [750 \ 1000 \ 1400 \ 1600 \ 1875 \ 2150 \ 2250 \ 2350 \ 2350 \ 2325 \ 2325]$

şeklinde okunur.



**Şekil 3.25** Kardiod (∞) Trokoidal Frezeleme İşleminde  $F_{\text{dinamik}}$  (T) Denklemine Ait Türetilen Fonksiyon

Kardiod (∞) trokoidal frezeleme işleminde  $F_{\text{dinamik}}$  (t) denklemine ait türetilen fonksiyona ait hata değerleri Şekil 3.26’da belirtilmiştir.



**Şekil 4.26** Kardiod (∞) Trokoidal Frezeleme İşleminde  $F_{\text{dinamik}}$  (T) Denklemine Ait Türetilen Fonksiyona Ait Hata Değerleri

Bu yapı için 2. dereceden denklemin seçilmesi hassasiyet ve doğruluk derecesi ( $R^2=0,99$ ) açısından uygun görülmüştür. Bu grafiklerin sonucu bulunan fonksiyon yaklaşık olarak,

$F_{\text{dinamik}}(t) = -0,007706t^2 + 7,582t + 504$  (N) şeklinde olacaktır. Ayrıca ileriki kısımlarda işlem kolaylığı ve öngörülebilirlik açısından  $R^2=0,85$  olan  $F_{\text{dinamik}}(t) = 2,959t + 964,7$  (N) olan lineer denklem ve  $F_{\text{dinamik}}(t) = 665,6t^{0.2543} - 853,9$  ( $R^2=0,9554$ ) not edilmiştir.

Bu denklemin şekil 3.24'ten anlaşılacağı üzere statik kesme kuvvet değeri ( $F_{\text{statik}} = 504$  N ve hata payı %5 olmakla birlikte, denklemin süreksiz olması bu grafiği veren bileşke dalganın fourier analizinin yapılmasına sebebiyet vermiştir. 8 mertebeli fourier açılımının  $R^2$  değerinin 0,64 olarak hesaplanması, türetilen sürekli fonksiyonun takıma gelen kuvvetlerin emniyetliliği açısından analiz sonucunda elde edilen denklemden daha güvenilir sonuç verdiğini göstermektedir.

Bütün takım yolları için kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde bazı ortak noktaların olduğu farkedilmektedir.

İlk olarak, bütün takım yolları için bileşke kuvvet zaman grafikleri incelendiğinde, grafiklerde bulunan ve sabit kesme kuvveti olarak ( $F_{\text{statik}}$ ) tanımladığımız kısım aslında dalgalı bir fonksiyondur ve bu fonksiyonun dalgaboyu standart trokoidal frezeleme işleminden, kardiod ve sonsuz trokoidal frezeleme işlemine geçtikçe artmakta ve genliği (sonsuz trokoidal hariç) değişmemektedir. Standart trokoidal frezelemede her pasoda bir adet dalga tepesi bulunurken, modifiye edilmiş hali olan üç trokoidal frezelemede aynı paso içinde iki dalga tepesi bulunmakta, kısaca "fasıla" sayısı arttıkça dalga tepelerinin sayısı artmaktadır. Bu durum, teorik olarak fasıla sayısını sonsuza götürdükçe elde edilecek grafiğin daha önce  $y = F_{\text{statik}}$  olarak tanımladığımız doğru denklemine yaklaştırmakta ve kesme kuvvetleri sabit bir değere doğru yakınsayacaktır. Bu durumun sabit bir kesme kuvveti altında, takımın ısı etkilere neredeyse hiç etkilenmeden kesme işlemi gerçekleştirebileceği bir prosesin önünü açtığı söylenebilir.

İkinci olarak, bütün grafiklerde bileşke kuvvet, özellikle incelenen kesme sürecinin yarısından itibaren, hem kesme işleminin başlangıcında hemde bitiminde, kesme rejimi boyunca aldığı değerin 2 misli değer almaktadır. Bu derece şiddetli olarak takıma etkidiği düşünülen kuvvetlerin kesme prosesinin %2'si kadar kısa sürede aniden etkimesinin takıma zarar vereceği düşünülmektedir. Bu ani kuvvet dalgalanmalarının, takımın parçaya temas ettiği ilk an takım-iş parçası arası etki eden talaşın sahip olduğu "stick-slip" (yapışma-kayma) olgusundan ya da diğer bir deyimle kuru sürtünme şartlarından olduğu düşünülmektedir. Bu konuyla ilgili çalışmalar kaynakçalar kısmında [36] sayılı referanslarda verilmiş olup, bu olgunun önüne geçebilmek için talaşlı imalat sırasında yağlayıcıların kullanılmasının gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca bu kuvvetler, kesme kuvvetlerinden ziyade, ilerleme kuvvetlerine daha fazla bağlı olduğu incelenen grafiklerden de anlaşılabılır.

Üçüncü olarak, kuvvet zaman grafiklerinde ifade edilen zamana bağlı dinamik kuvvet fonksiyonların 5. ve 6. Dereceden polinom ile tam olarak ifade edilebildiği görülsede, hesaplamalarda kolaylık olması açısından not edilen fonksiyonlarında ortak görülen formun ;

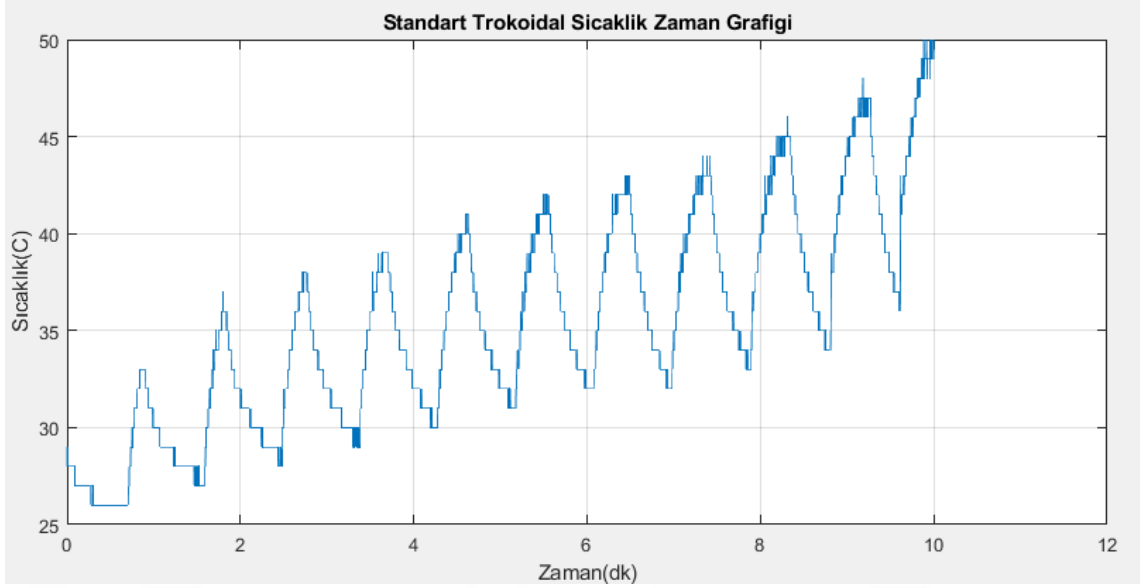
$F_{\text{dinamik}}(t) = a.t^b + c \text{ (N)}$  formunda olduğuda görülmektedir. Kısacası dinamik kuvvetlerin zamana bağlı üstel olarak arttığı görülmektedir.

### **3.2 Sıcaklık-Zaman (T-t) Grafikleri**

Bu bölümde standart trokoidal, sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal ve kardiod ( $\propto$ ) trokoidal frezeleme işlemleri verileri için sıcaklık-zaman grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerin oluşturulmasında kullanılan veriler/kodlar ise Ek-B'de verilmiştir.

#### **3.2.1 Standart Trokoidal Frezeleme Sıcaklık-Zaman Grafikleri**

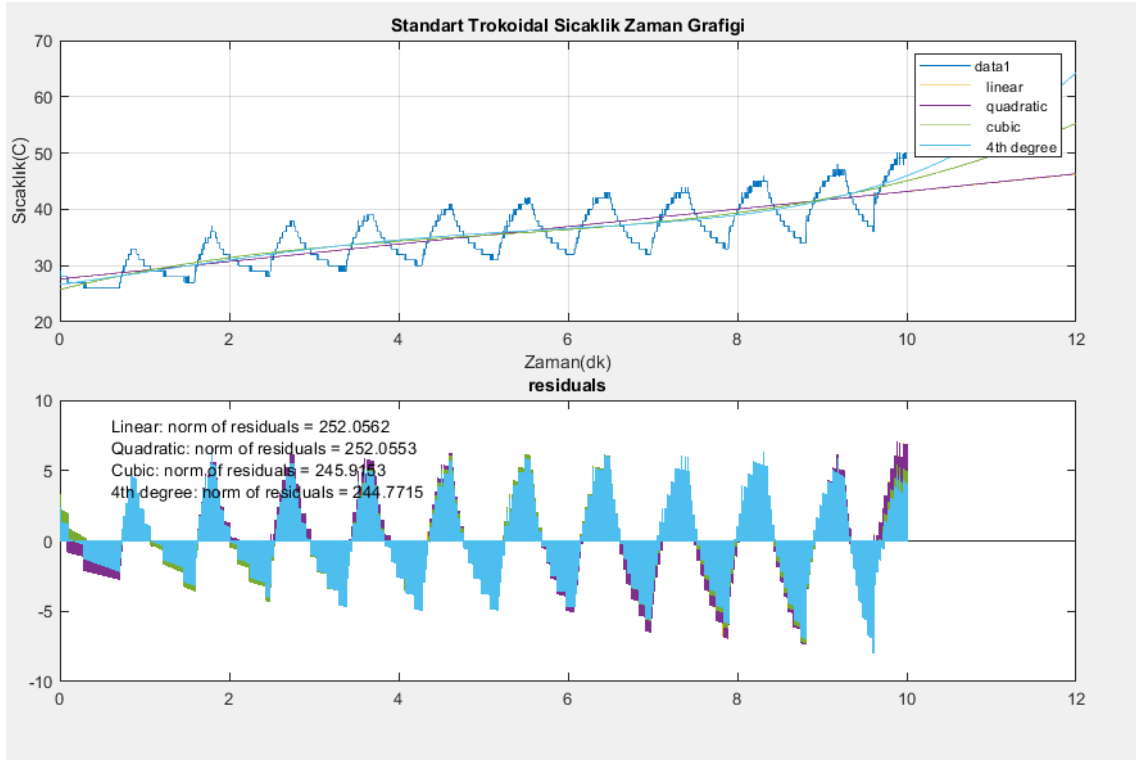
Standart trokoidal frezeleme esnasında oluşan sıcaklığın zamana bağlı değişimi Şekil 3.27 'te belirtilmiştir.



**Şekil 3.27** Standart Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi

Standart trokoidal frezeleme deneyi boyunca, takımın sahip olduğu sıcaklık değerleri lazer termometre aracılığıyla ölçülmüş ve veri toplama ünitesi aracılığı ile kayıt edilmiştir. Ardından toplanan bu verilerin, MATLAB ortamında yazılan program aracılığı ile takımın standart frezeleme esnasında zamana bağlı değişen sıcaklık grafiği çizdirilmiştir. Grafiğin sonunda, olguyu daha iyi analiz edebilmek için Şekil 3.27’te görülen grafiği çeşitli merteye ve hata oranlarında sağlayan denklemleri çıkartılmıştır. Şekil 3.28’te görüldüğü üzere, bu denklemlerin içinde sıcaklığın zamana bağlı değişimini en basit olarak sağlayan ve diğer derecelerdeki denklemlere göre kabuledilebilir hata payına sahip 1. Dereceden denklem olduğu görülmüş ve 60. Sayfada ilgili denklem yazılmıştır.

Şekil 3.26’da verilen standart trokoidal frezeleme esnasında oluşan sıcaklığın zamana bağlı değişimi grafiğinin, ileriki hesaplamalara ait verileri grafikten okunduğu üzere aşağıda verilmiştir.



**Şekil 3.28** Standart Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi Eğri Uydurma

Şekil 3.27’de çizdirilen grafikte görüldüğü üzere, ilk kesme prosesi öncesi ortam sıcaklığı başlangıç sıcaklığının en düşük değeri olup  $T_{s,1}=23^{\circ}\text{C}$ ’dir. İlk kesme prosesi sırasında oluşan sıcaklık ise başlangıç sıcaklığının en yüksek değeri olup grafikten  $T_{s,2} = 33^{\circ}\text{C}$  olarak okunmuştur.

Son kesme prosesi başlamadan takım boşta çalışırken bitiş sıcaklığının en düşük değeri  $T_{s,3}=36^{\circ}\text{C}$ , son kesme prosesi esnasında oluşan sıcaklık ise bitiş sıcaklığının en yüksek değeri olup  $T_{s,4}= 50^{\circ}\text{C}$ ’dir.

Başlangıç sıcaklık değerleri ve bitiş sıcaklık değerlerine bakıldığında, en düşük ve en yüksek sıcaklık arasındaki fark  $10^{\circ}\text{C}$  iken, bitiş sıcaklık değerlerinde bu fark  $14^{\circ}\text{C}$ ’ye ulaşmıştır. Kesme sırasında takımın proses bitene kadar ortalama sıcaklık artışının 12 C olduğu söylenebilir. Proses süresince ortalama takım sıcaklığı  $T_{s,ort} = 35^{\circ}\text{C}$  olarak gözlemlenirken proses süresince oluşan en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla  $T_{s,min} = 23^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{s,max} = 50^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir.

Proses süresince ortalama takım sıcaklığı  $T_{s,ort} = 37,99^{\circ} \text{C}$  olarak gözlemlenirken proses süresince oluşan en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla  $T_{s,min} = 23^{\circ} \text{C}$  ve  $T_{s,max} = 65^{\circ} \text{C}$  olarak belirlenmiştir.

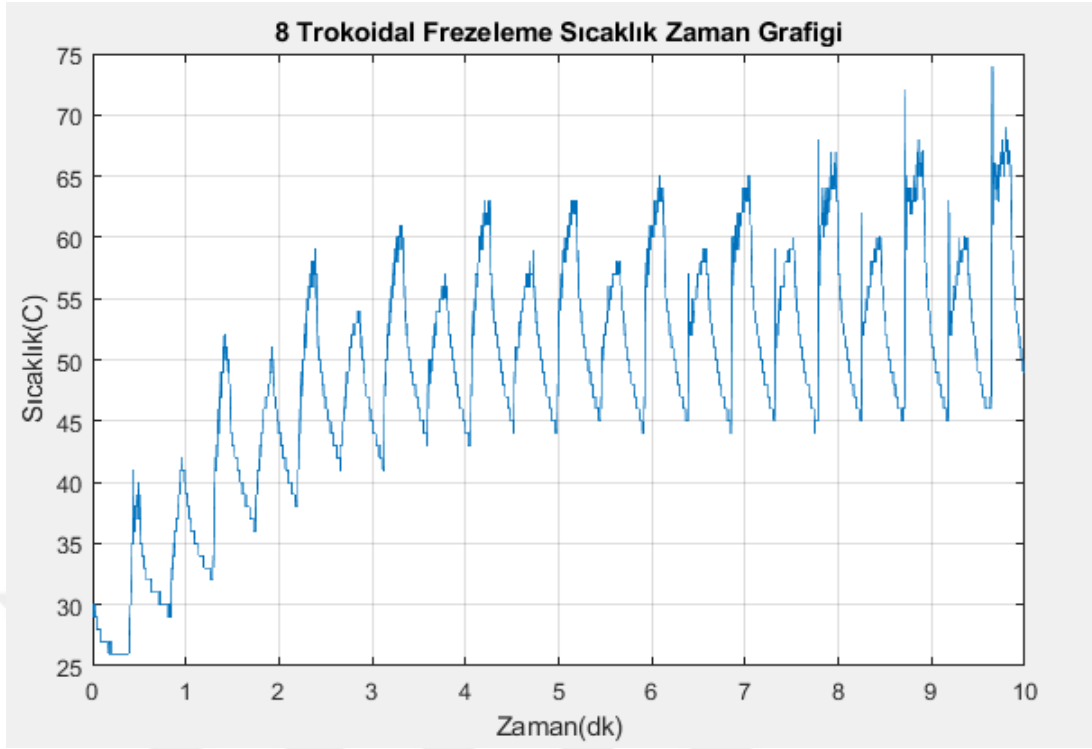
Matlab 'de eğri uydurma uygulamasında Eğri uydurulmak istendiğinde lineer, 2.derece, 3.derece ve 4. derece denklemler için  $R^2$  değerleri sırasıyla; 0,65, 0,66, 0,67, 0,67 olduğundan lineer denklem tercih edilmiştir. Sistem sinüsoidal karakterde olsa bile fourier analizinde elde edilen denklemde  $R^2$  değeri en fazla (8.mertebe) 0,68 olduğundan, lineer denklem tercih edilmiştir.

Sonuç itibariyle, sıcaklığın zamana bağlı statik fonksiyonu, t dakika cinsinden olmak üzere;

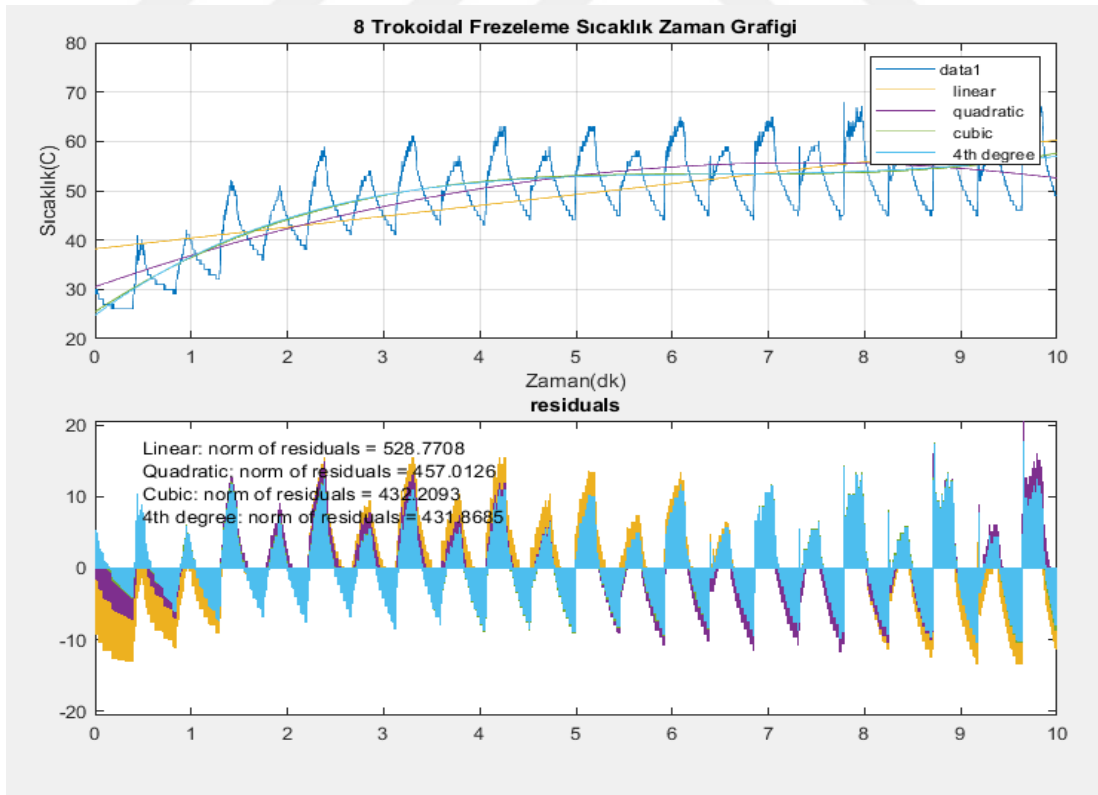
$T_{statik}(t) = 1,55t + 27,62 (^{\circ} \text{C})$  olarak elde edilmiştir.

### **3.2.2 Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Sıcaklık-Zaman Grafikleri**

Sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezelemeye ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3.29'da görüldüğü gibidir.



**Şekil 3.29** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi



**Şekil 3.30** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi Eğri Uydurma

Şekil 3.30' da çizdirilen grafikte görüldüğü üzere, ilk kesme prosesi öncesi ortam sıcaklığı, başlangıç sıcaklığının en düşük değeri olup  $T_{\infty,1}=26^{\circ}\text{C}$ 'dir. İlk kesme prosesi sırasında oluşan sıcaklık ise başlangıç sıcaklığının en yüksek değeri olup grafikten  $T_{\infty,2} = 40^{\circ}\text{C}$  olarak okunmuştur.

Son kesme prosesi başlamadan takım boşta çalışırken bitiş sıcaklığının en düşük değeri  $T_{\infty,3}=46^{\circ}\text{C}$ , son kesme prosesi esnasında oluşan sıcaklık ise bitiş sıcaklığının en yüksek ortalama değeri olup  $T_{\infty,4}= 66^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Başlangıç sıcaklık değerleri ve bitiş sıcaklık değerlerine bakıldığında, en düşük ve en yüksek sıcaklık arasındaki fark  $12^{\circ}\text{C}$  ( $40-28$ ) iken, bitiş sıcaklık değerlerinde bu fark  $24^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmıştır.

Proses süresince ortalama takım sıcaklığı  $T_{\infty,\text{ort}} = 49,23^{\circ}\text{C}$  olarak gözlemlenirken proses süresince oluşan en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla  $T_{\infty,\text{min}} = 26^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{\infty,\text{max}} = 74^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir.

İlk ve son frezeleme işlemlerinde en düşük ve en yüksek noktalar arasındaki sıcaklık farklarına bakıldığında, sırasıyla,  $T_{\infty/2} = T_{\infty,3} - T_{\infty,1} = 14^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{\infty/1} = T_{\infty,4} - T_{\infty,2} = 28^{\circ}\text{C}$  ( $74-46$ ) olarak hesaplanmaktadır.

Sonuç itibarıyla, sıcaklığın zamana bağlı statik fonksiyonu,

$T_{\text{statik}}(t)=0,1014t^3-1,981t^2+12,89t+25,47$  olarak ( $R^2=0,6425$ ) elde edilmiştir. Lineer, 2. derece ve 4. Derece ifadelerin  $R^2$  değerleri sırasıyla; 0,46, 0,60, 0,64 şeklindedir.

Standart ve sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemleri için yapılan deneyler sonucunda, ilk kesme prosesi sırasında oluşan başlangıç sıcaklığının en yüksek değerinin sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemlerinde daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.

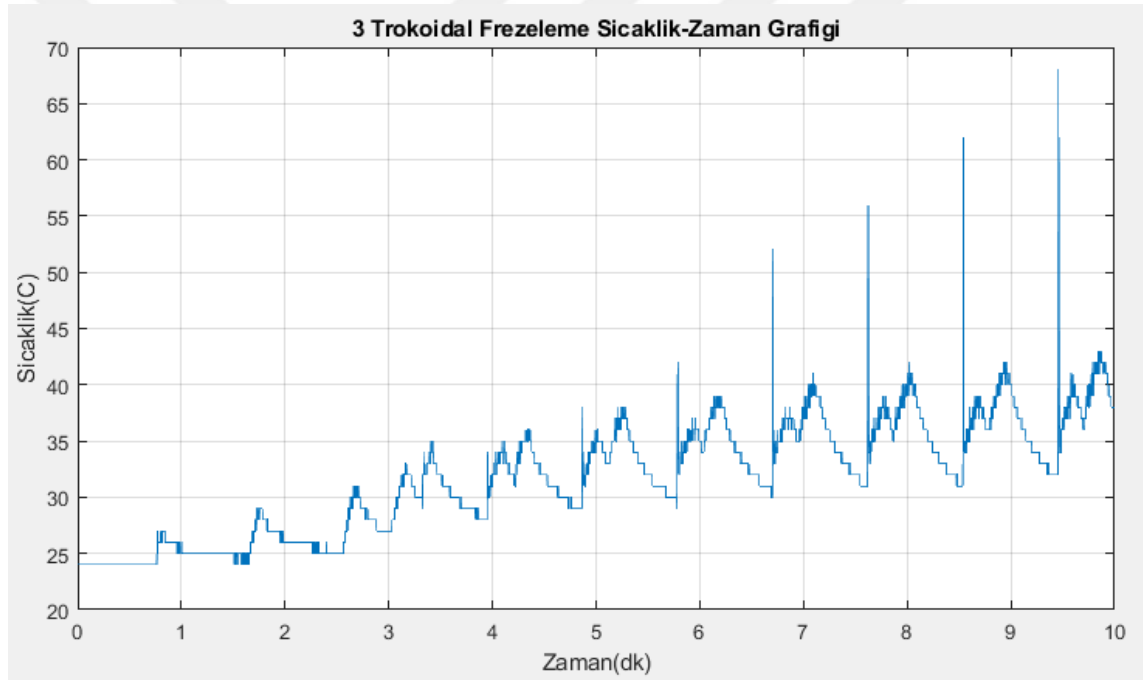
Son kesme proseslerinde en düşük ve en yüksek bitiş sıcaklıklarına bakıldığında ise, başlangıç sıcaklıklarında olduğu gibi, en düşük bitiş sıcaklıkları birbirine yakın değerlerde seyrederken, en yüksek bitiş sıcaklıkları arasındaki fark oldukça fazladır. Standart frezeleme işlemlerinde son kesme prosesinde en yüksek bitiş

sıcaklığının sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezelemeye kıyasla 12°C daha düşük olacağı tahmin edilmektedir.

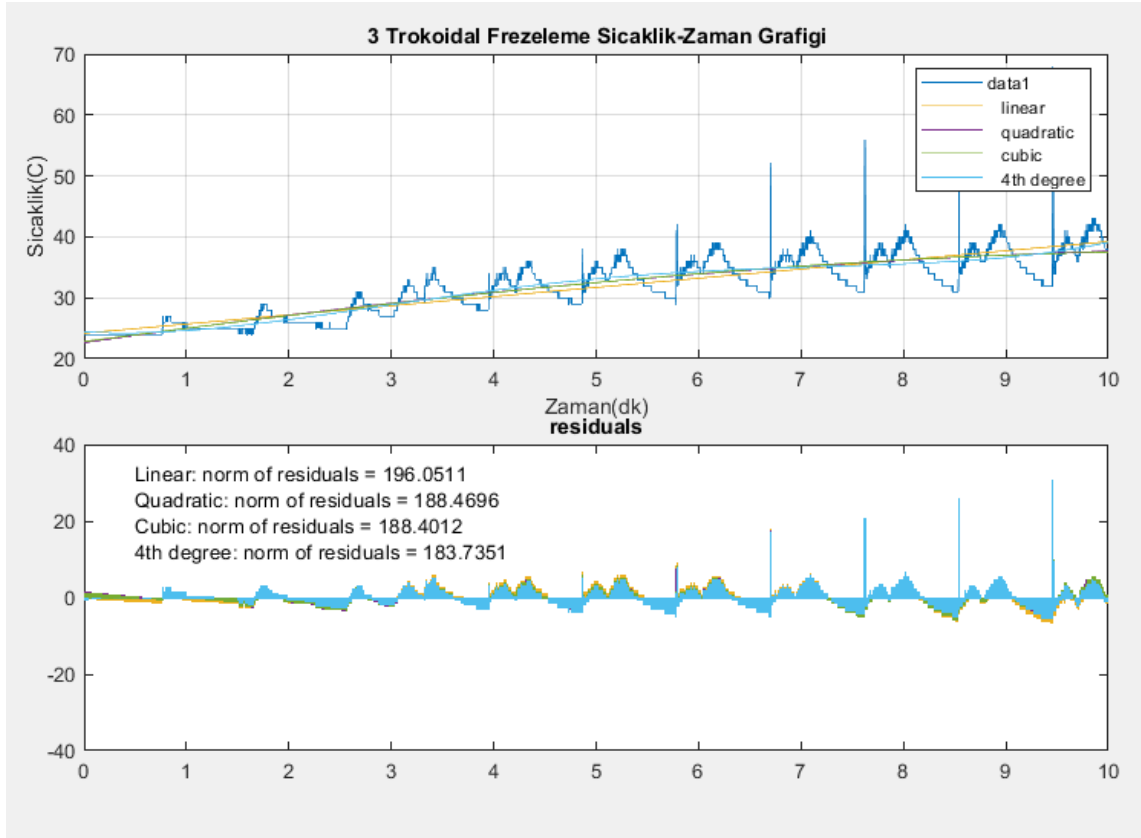
Hem ilk ve son frezeleme işlemlerine, hem proses süresince oluşan sıcaklıklara, hem de ortalama takım sıcaklığına bakıldığında standart frezeleme işlemlerinde bu değerlerin sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemlerine oranla daha düşük olduğu görülmektedir.

### 3.2.3 Kardioid ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Sıcaklık-Zaman Grafikleri

Kardioid ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme deneyine ait deney esnasında oluşan sıcaklığın zamana bağlı değişimi Şekil 3.31’de görüldüğü gibidir.



**Şekil 3.31** Kardioid ( $\infty$ ) Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi



**Şekil 3.32** Kardioid (∞) Frezeleme Esnasında Oluşan Sıcaklığın Zamana Bağlı Değişimi Eğri Uydurma

Şekil 3.31’de çizdirilen grafikte görüldüğü üzere, ilk kesme prosesi öncesi ortam sıcaklığı, başlangıç sıcaklığının en düşük değeri olup  $T_{m1}=24^{\circ}\text{C}$ ’dir. İlk kesme prosesi sırasında oluşan sıcaklık ise başlangıç sıcaklığının en yüksek değeri olup grafikten  $T_{m2} = 27^{\circ}\text{C}$  olarak okunmuştur.

Son kesme prosesi başlamadan takım boşta çalışırken bitiş sıcaklığının en düşük değeri  $T_{m3}=32^{\circ}\text{C}$ , son kesme prosesi esnasında takımın iş parçasına ilk temas ettiği anda oluşan sıcaklık ise bitiş sıcaklığının en yüksek değeri olup  $T_{m4}=68^{\circ}\text{C}$ ’dir. Başlangıç sıcaklık değerleri ve bitiş sıcaklık değerlerine bakıldığında, en düşük ve en yüksek sıcaklık arasındaki fark  $3^{\circ}\text{C}$  iken, bitiş sıcaklık değerlerinde bu fark  $36^{\circ}\text{C}$ ’ye ulaşmıştır.

Proses süresince ortalama takım sıcaklığı  $T_{m\text{ort}} = 31,72^{\circ}\text{C}$  olarak gözlemlenirken proses süresince oluşan en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla  $T_{m\text{min}} = 24^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{m\text{max}} = 68^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir.

İlk ve son frezeleme işlemlerinde en düşük ve en yüksek noktalar arasındaki sıcaklık farklarına bakıldığında, sırasıyla,  $T_{m2} = T_{m3} - T_{m1} = 11.8^{\circ} \text{C}$  ve  $T_{m1} = T_{m4} - T_{m2} = 36^{\circ} \text{C}$  olarak hesaplanmaktadır. Ancak takım, 10 dakika sonunda kesme rejimi esnasında sahip olduğu ortalama sıcaklık değeri yaklaşık  $38^{\circ} \text{C}$  dir.

Sonuç itibariyle, sıcaklığın zamana bağlı statik fonksiyonu,

$T_{\text{statik}}(t) = 1,503t + 24,21$  ( $^{\circ} \text{C}$ ) olarak ( $R^2 = 0,74$ ) belirlenmiştir 2., 3. ve 4. derece denklemlerin  $R^2$  değerleri sırasıyla; 0,76, 0,76, 0,77 şeklinde olduğundan lineer denklemin seçilmesi işlem kolaylığı açısından uygun görülmüştür.

Bütün sıcaklık-zaman grafikleri incelendiğinde dikkat çeken bir takım sonuçlar olmaktadır. Birinci olarak, standart trokoidal frezeleme, kardiod trokoidal frezeleme ve sonsuz trokoidal proseslerinin sahip oldukları başlangıç ve bitiş takım sıcaklıkları arasındaki farklar incelendiğinde sırasıyla 12, 14, 22 derecelik farklar görülmektedir. Buna göre takım ısınması ve bundan dolayı oluşabilecek imalat problemleri açısından en avantajlı sistemin sırasıyla, standart trokoidal, kardiod trokoidal ve sonsuz trokoidal olduğu düşünülebilir. 1-2 derecelik sıcaklık sapmasının sistemler arasında çok fazla fark oluşturmayacağı düşünüldüğünde, (deneydeki kontrol edilemeyecek fiziki parametre sayısının fazlalığından ötürü), standart trokoidal ve onun eş yönlü modifiye edilmiş hali olan kardiod trokoidal frezeleme işleminin aynı mertebede avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak bu takım yollarının bir benzeri olan fakat takım iş parçası arası hareketin zıt yönlü olduğu sonsuz trokoidal frezeleme işleminin diğer takım yollarında oluşan sıcaklıklara nazaran bariz dezavantajlı olduğu görülmektedir.

İkinci olarak kardiod trokoidal ve sonsuz trokoidal frezeleme operasyonlarında her pasoda(kesme rejimleri esnasında) takımın iş parçasına dalma sayısı kadar sıcaklık “tepe değeri”(2 adet) görülürken, trokoidal frezeleme operasyonunda takım bir sefer iş parçasına dalma hareketi gerçekleştirdiği için, her pasoda 1 adet sıcaklık tepesi görülmektedir.

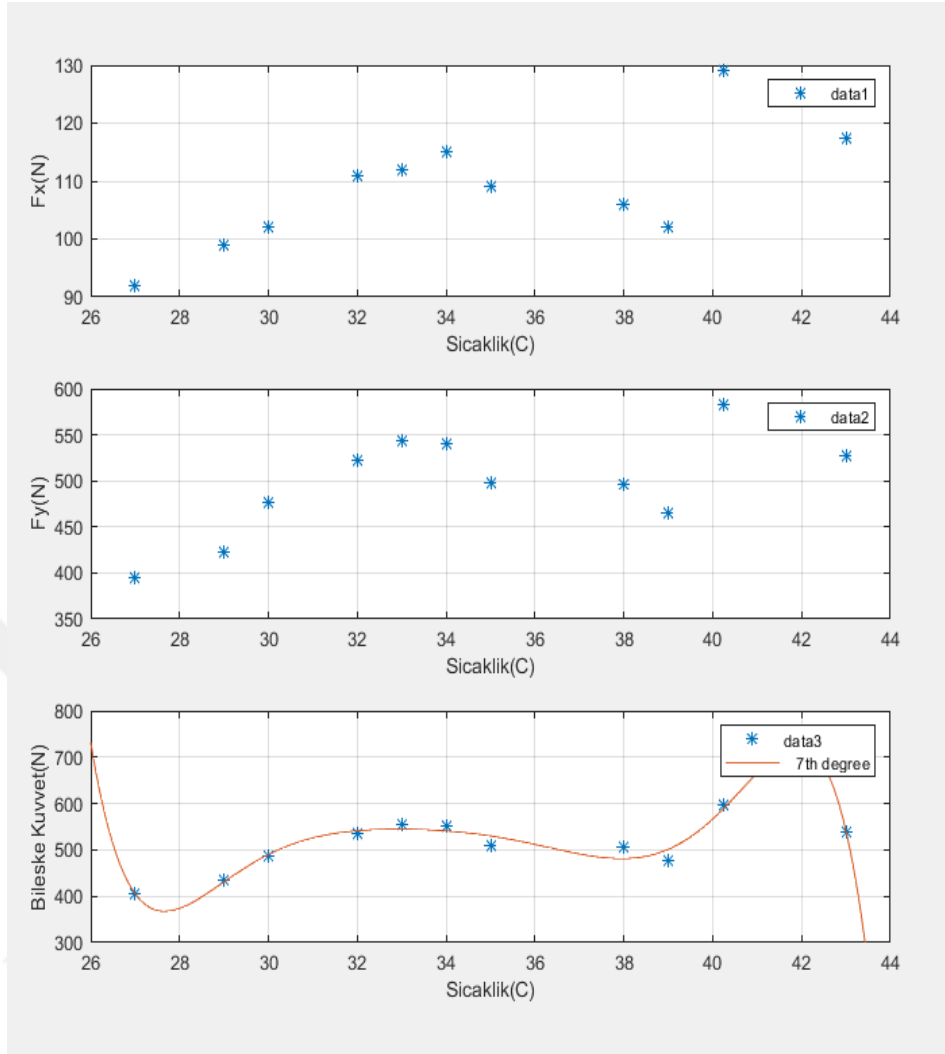
Üçüncü olarak, belirli hata payları ile standart trokoidal ve kardiod trokoidal frezeleme işlemlerinde elde edilen denklemlerin zamana göre türevlerinin birbirine neredeyse eşit olduğu (%2 lik bir fark haricinde) ve lineer olarak

tanımlanabildiği ( $R^2=0,74$ ) görülmüş, ancak sonsuz trokodal frezeleme işleminde denklemin aynı hassasiyet seviyesine erişebilmesi için kesinlikle nonlineer olarak tanımlanması gerektiği ( $R^2=0,64$ ) görülmektedir. Bu durumun, eş yönlü olarak frezeleme yaptığı düşünülen frezeleme metodlarının sıcaklık artışının zaman içinde tek parametreye bağlı olduğu düşünülürken (örn:sürtünme), sonsuz frezeleme gibi zıt yönlü frezeleme yaptığı düşünülen sistemlerin sıcaklık artışının daha kompleks ve birden fazla parametrenin bileşimi olduğu düşünülmüştür.

### **3.3 Kuvvet Sıcaklık (F-T) Grafikleri**

#### **3.3.1 Standart Trokoidal Frezeleme Kuvvet-Sıcaklık Grafikleri**

Standart trokoidal frezeleme esnasında oluşan kuvvetlerin sıcaklık ile ilişkisini anlamak için herbir paso süresinin tam ortasındaki zaman ve bu zamanlara karşılık gelen kuvvet ve sıcaklık değerleri, toplanılan veri ortamından çekilmiş ve matlab ortamında anlamlı grafikler haline getirilmiştir. Bu grafikler Şekil 3.33'deki gibidir. Bu grafiklerin oluşturulmasında kullanılan veriler/kodlar ise Ek-C'de verilmiştir.

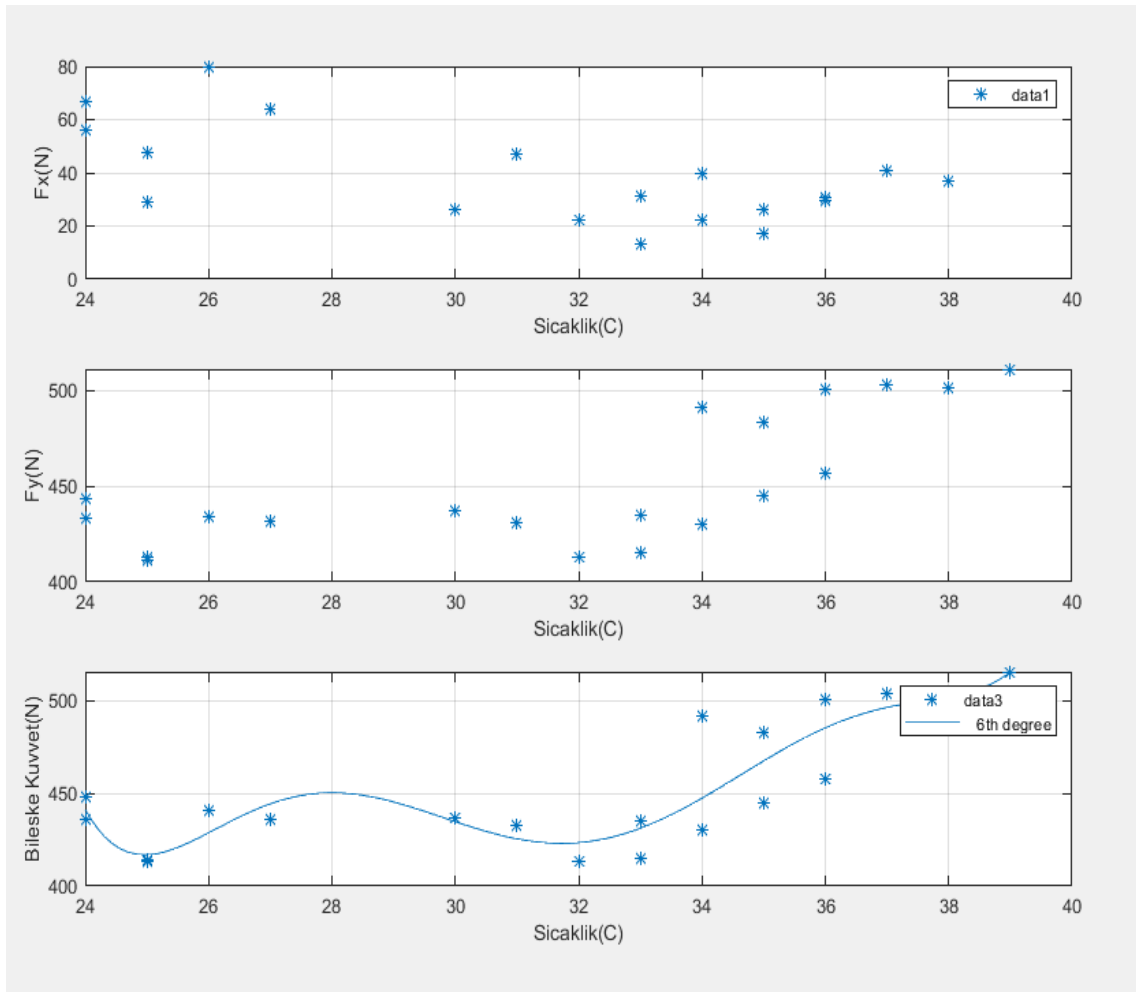


**Şekil 3.33** Standart Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Kuvvet-Sıcaklık Grafikleri

Buna göre standart trokoidal frezeleme esnasında oluşan bileşke kuvvetleri sıcaklıklara bağlı olarak en iyi 7. dereceden uydurulan polinom temsil etmekte ve doğruluk derecesi  $R^2=0,93$  olmaktadır. Ayrıca her bir kuvvet-sıcaklık grafiği için lineer bir grafik oluşturulmak istendiğinde  $F_x-T$ ,  $F_y-T$ ,  $F_{\text{bileşke}}-T$  grafikleri için oluşturulan doğru denklemlerinin sırasıyla hassasiyet dereceleri  $R^2=0,46$ ,  $0,37$  ve  $0,38$  olmaktadır. Bu veriye dayanarak oluşan sıcaklıkların standart trokoidal frezeleme işlemi için ilerleme kuvvetlerine daha çok bağlı olduğu söylenebilir.

### 3.3.2 Kardioid (∞) Trokoidal Frezeleme Kuvvet-Sıcaklık Grafikleri

Kardioid trokoidal frezeleme esnasında oluşan kuvvetlerin sıcaklık ile ilişkisini anlamak için herbir paso süresinin tam ortasındaki zaman değeri ve bu zamanlara karşılık gelen kuvvet ve sıcaklık değerleri, toplanılan veri ortamından çekilmiş ve matlab ortamında anlamlı grafikler haline getirilmiştir. Bu grafikler şekil 4.34'deki gibidir. Bu grafiklerin oluşturulmasında kullanılan veriler ise Ek-A 'da verilmiştir.



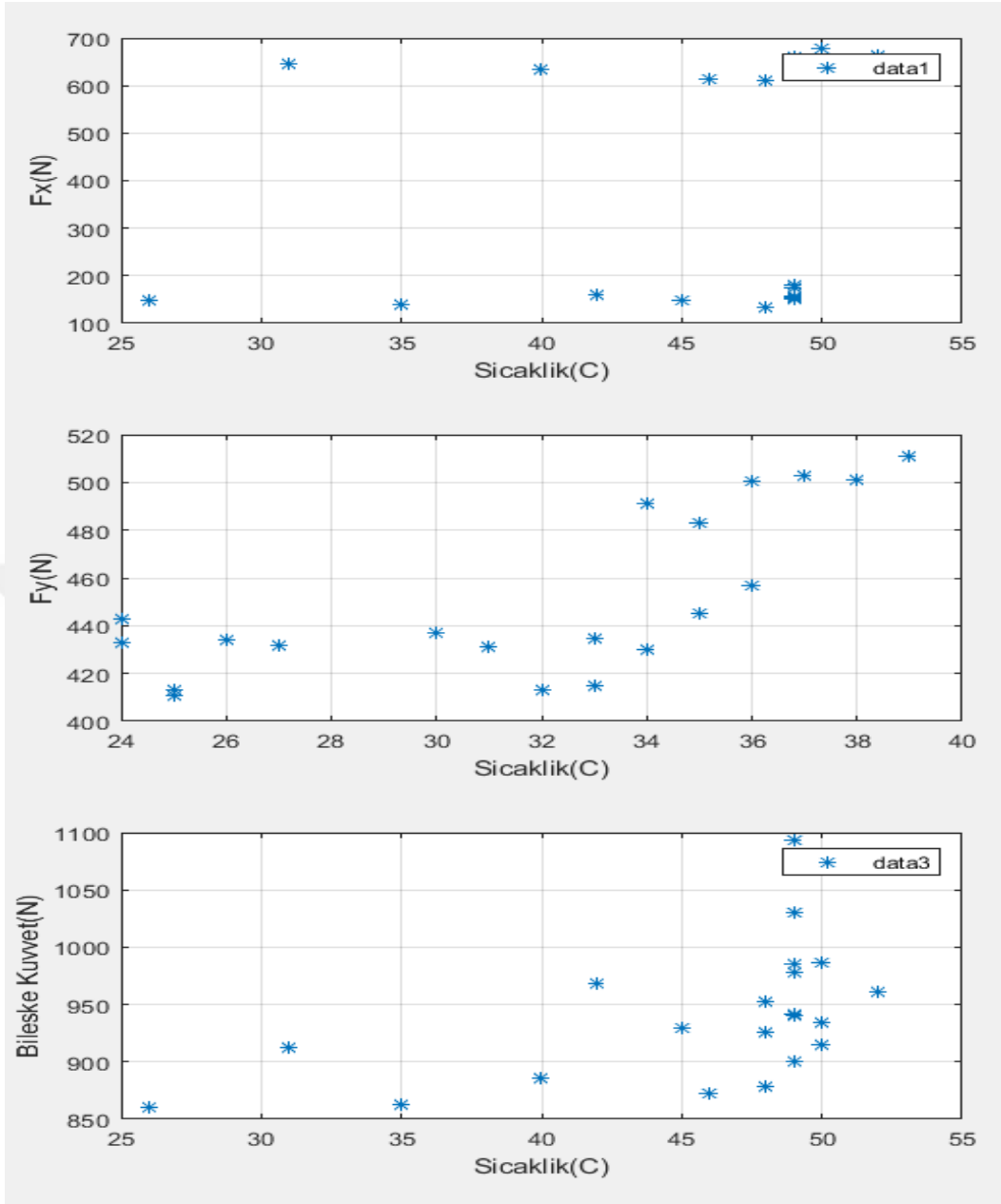
**Şekil 3.34** Kardioid (∞) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Kuvvetlerin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Buna göre kardioid trokoidal frezeleme esnasında oluşan bileşke kuvvetleri sıcaklıklara bağlı olarak en iyi 6. dereceden uydurulan polinom temsil etmekte ve doğruluk derecesi  $R^2=0,78$  olmaktadır.

Ayrıca herbir kuvvet-sıcaklık grafiği için lineer bir grafik oluşturulmak istendiğinde  $F_x-T$ ,  $F_y-T$ ,  $F_{bileşke}-T$  grafikleri için oluşturulan doğru denklemlerinin sırasıyla hassasiyet dereceleri  $R^2=0,17$ ,  $0,50$  ve  $0,46$  olmaktadır. Bu veriye dayanarak oluşan sıcaklıkların kardiod trokoidal frezeleme işlemi için kesme kuvvetlerine daha çok bağlı olduğu söylenebilir.

### **3.3.3 Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Kuvvet-Sıcaklık Grafikleri**

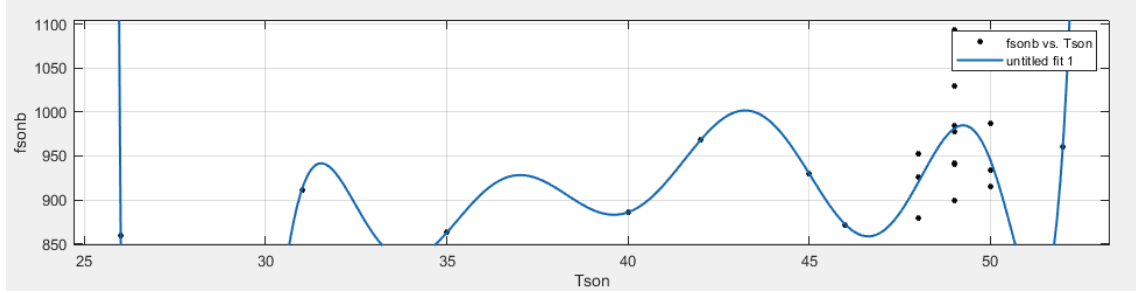
Sonsuz trokoidal frezeleme esnasında oluşan kuvvetlerin sıcaklık ile ilişkisini anlamak için herbir paso süresinin tam ortasındaki zaman değeri ve bu zamanlara karşılık gelen kuvvet ve sıcaklık değerleri, toplanılan veri ortamından çekilmiş ve matlab ortamında anlamlı grafikler haline getirilmiştir. Bu grafikler şekil 3.35'deki gibidir. Bu grafiklerin oluşturulmasında kullanılan veriler ise Ek-A'da verilmiştir.



**Şekil 3.35** Sonsuz ( $\infty$ ) Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Kuvvetlerin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Şekil 3.35’de görüldüğü üzere, diğer trokoidal frezeleme metodlarından farklı olarak sıcaklık değerlerinin sürekli bir dalgalanma göstermesi özellikle,  $F_x$ -T grafiğindeki değerlerin en üst ve en alt noktalarda doğrusal olarak toplanması, sistemin sıcaklığa bağlı ilerleme değişiminin sinüsoidal ya da dalgali olduğunun, ya da bu sistemin aslında birden fazla tipte frezeleme hareketinin bileşkesinin olduğunun göstergesidir. Matlab ortamında grafiğe dökülen veriler, tekrar Matlab ortamında Curve Fitting uygulaması ile analiz edildiğinde bileşke kuvvetin

sıcaklığa bağlı olarak ifadesini hassasiyet payı en yüksek olarak  $R^2=0,53$  olarak 5. mertebeden fourier serisi açılımının verdiği tespit edilmiştir.

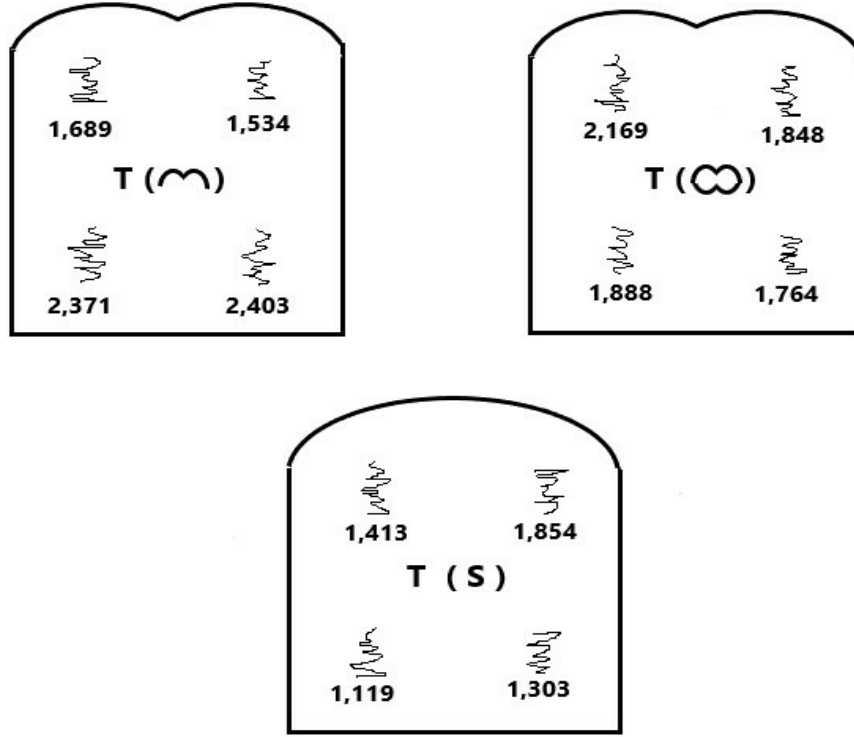


**Şekil 3.36** Bileşke Kuvvet-Sıcaklık ( $F_{\text{bileşke}}-T$ ) Grafiğinin 5. Mertebeden Fourier Açılımı İle Oluşturulan Grafiği

Bütün kuvvet-sıcaklık grafikleri incelendiğinde, kuvvetlerin en az 6. dereceden sıcaklıklara bağımlı olduğu görülmüştür. Bunun anlamı, trokoidal frezeleme proseslerinin hepsi için, aslında takıma etkiyen kuvvetlerin, sıcaklık faktörü ile doğrudan bir bağı olmadığı yani oluşan sıcaklıkların da aslında takımı doğrudan etkilemediğidir.

### 3.4 Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Takım yolunun performansında önemli rol oynayan bir diğer parametre ise parça yüzey kalitesidir. Parça yüzey kalitesi açısından  $\infty$  ve  $\infty$  trokoidal frezeleme birbirine oldukça yakın sonuç vermekte ise de, standart trokoidal frezeleme yeni geliştirilen bu takım yollarına nazaran %30'a yakın farkla daha az yüzey pürüzlülük değerine sahip olmaktadır. Bu durum, standart trokoidal frezelemenin alternatif trokoidal yollara göre ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) açısından halen önem taşıdığını göstermektedir. Bu durum Şekil 3.37'da gösterdiği gibidir.



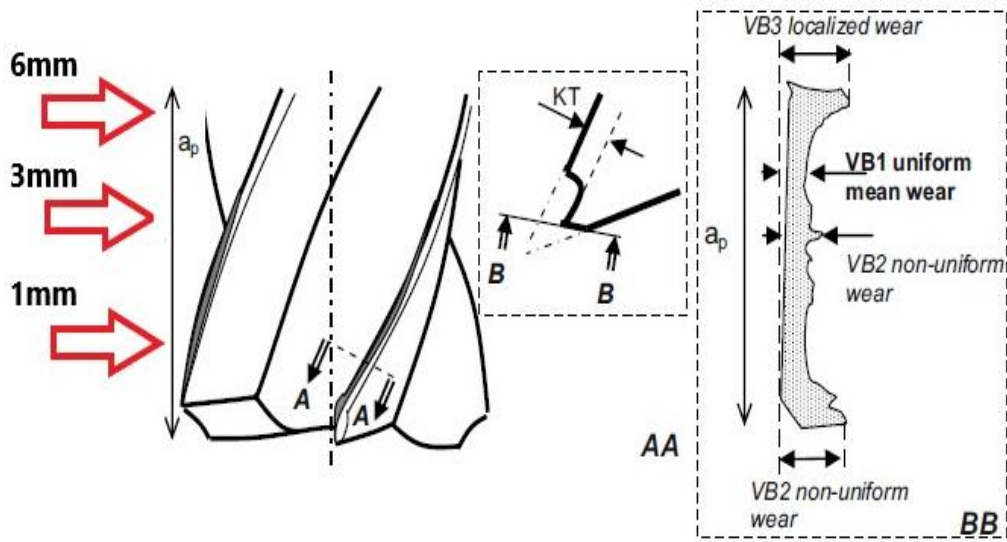
**Şekil 3.37** Takım yollarının parça üstünde oluşturmuş olduğu bölgesel pürüzlülük değerleri

Ayrıca bu şekilde dikkat çeken bir nokta, takımın kesme hareketini sırasıyla soldan sağa ve geriden ileriye doğru hareket ettirdiği düşünülürse, üç trokoidal frezeleme prosesi boyunca yüzey pürüzlülük değerinin giderek daha iyi bir hale geldiğidir. Standart ve sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme esnasında ise yüzey pürüzlülük değerleri gittikçe artmaktadır.

Takım yolları geliştirilirken dikkat edilen bir diğer nokta takım aşınması değeridir. Takım aşınması, takımın ömrünü doğrudan etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Bilindiği üzere fazlasıyla aşınmış ve sağlıklı bir kesme prosesi gerçekleştirmeyen takım, ortaya koyduğu iş parçasına ait yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tolerans değerleri de istenen mertebelerde olmadığı için, genellikle yeni takım ile değiştirilmektedir. Ancak bu değiştirme faslı, imalat süreçlerinde çevrim süresi açısından, süreci oldukça geciktirmekte ve bu durum imalat masrafı olarak bitmiş ürüne yansımaktadır. Dolayısıyla günümüzde, birim kesilen talaş uzunluğu

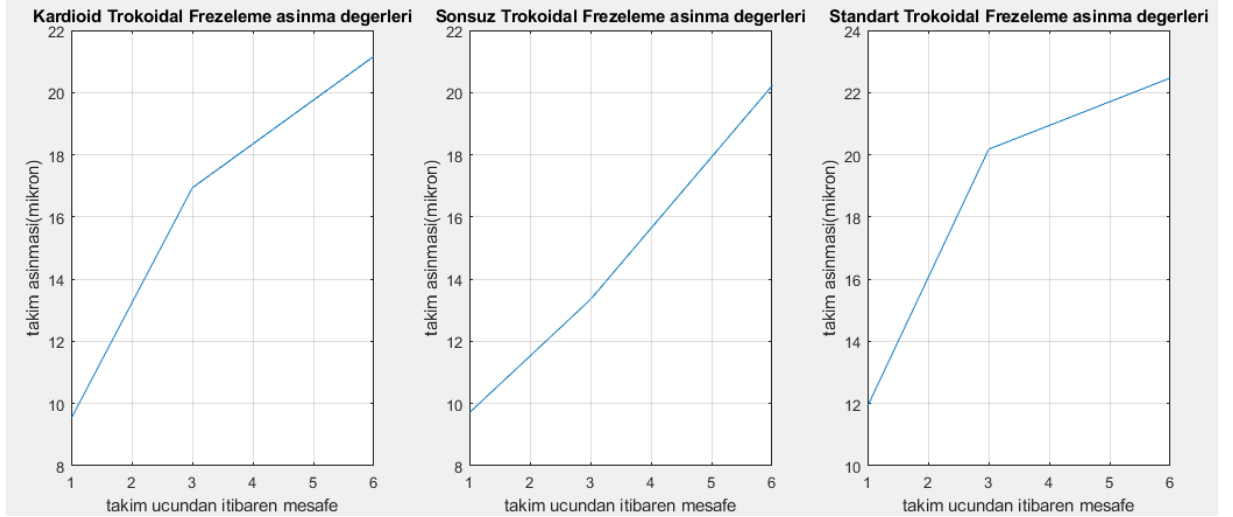
başına takım aşınması değeri en az olan takımyolu çok büyük önem arz etmektedir.

Deneyssel çalışması yapılan bütün takımlar için takımların, aşınması ile ilgili ölçümler Şekil 3.38te gösterilen ISO 8688'e göre VB1 değeri olarak ölçülmüş ve Şekil 3.39'da aşınma değerleri takım ucundan itibaren sayısal olarak gösterilmiştir. Bu grafiklerin oluşturulmasında kullanılan veriler/kodlar ise Ek-D'de verilmiştir.



**Şekil 3.38** ISO 8688'e göre takım aşınmasının ölçümü

Takım aşınma değerleri Şekil 3.39'te gösterildiği gibi olup, sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işlemi ile gerçekleştirilen proses süresince takım, günümüzde ideal kesme metodu olarak kabul edilen standart trokoidal frezelemeden ortalama 2 kat daha az aşınmıştır. Yeni geliştirilen kardiod ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme metodu ise, standart trokoidal frezelemeden ortalama olarak 1,5 kat daha iyi sonuç vermiştir. Bu 3 proses için ortalama takım aşınması değerleri (standart, kardiod ve sonsuz eğrileri için) sırasıyla 18,19, 15,87, 14,42  $\mu\text{m}$  olmaktadır.



**Şekil 3.39** Trokoidal yöntemle bağlı takım aşınması

Bu değerlere göre, sonsuz ( $\infty$ ) trokoidal frezeleme işleminde, takım, sahip olduğu yüksek takım kuvvetleri ve bağlı olarak fazla olan sıcaklık değerlerine rağmen aşınma miktarı son derece az olmaktadır. Aşınma olgusunun, takım sıcaklıkları ve takıma gelen kuvvetlerin yüksekiği ile orantılı olduğu düşünüldüğünde, ortaya atılan bu yeni takım yolunun takım aşınması konusunda yeni bir araştırma konusu açtığı görülmektedir.

### 3.5 Prosesler Sonucunda Edinilen Değerler

#### 3.5.1 Standart Trokoidal Frezeleme İçin

Eksenel Alınan toplam Takım Yolu (Kanal Boyu) = 5,5 mm

Eksenel İlerleme Hızı = 1,5 mm/s

Yanal (Trokoidal) İlerleme (Trokoidal Adım) = 0,5 mm/paso

Kanal Genişliği = 40 mm

Kanal Derinliği = 10 mm

Toplam Paso Sayısı = 11 adet

Kesme Rejimi Boyunca Alınan Yol (1 pasoda) = 41,88 mm

Kesme Rejimi Boyunca Alınan Toplam Yol(Eksenel) = 460,68 mm

Her bir Pasoda Harcanan Süre = 52,9 sn

Her bir Pasoda Takımın Boşta Geçirdiği Süre = 24,9 sn

Her bir Pasoda Takımın Kesim Sırasında Geçirdiği Süre = 28 sn

Toplam İşlem Süresi = 10 dk

Kaldırılan Talaş Miktarı = 2200 mm<sup>3</sup>

Talaş Debisi = 7,142 mm<sup>3</sup>/s

Kesmeye Harcanan Güç = 525 N \* 1,5 mm/s = 0,78 W

Ra-Parça Yüzey Pürüzlülüğü = 1,422 µm

Takım Aşınması Miktarı (ort) = 18,19 µm

### **3.5.2 Sonsuz (∞) Trokoidal Frezeleme İçin**

Eksenel Alınan toplam Takım Yolu (Kanal Boyu) = 5,375 mm

Eksenel İlerleme Hızı = 1,5 mm/s

Yanal(Trokoidal) İlerleme (Trokoidal Adım) = 0,5 mm/paso

Kanal Genişliği = 40 mm

Kanal Derinliği = 10 mm

Toplam Paso Sayısı = 10,75 adet

Kesme Rejimi Boyunca Alınan Eksenel Yol (1 pasoda) = 41,88 mm

Kesme Rejimi Boyunca Alınan Toplam Yol (Eksenel) = 450,21 (41,88\*10,75) mm

Herbir Pasoda Harcanan Süre = 55,81 (10,75 tepecik çifti) sn

Herbir Pasoda Takımın Boşta Geçirdiği Süre = 27,89 sn

Herbir Pasoda Takımın Kesim Sırasında Geçirdiği Süre = 27,92 sn

Toplam İşlem Süresi = 10 dk

Kaldırılan Talaş Miktarı = 2150 mm<sup>3</sup>

Talaş Debisi = 7,163 mm<sup>3</sup>/s

Kesmeye Harcanan Güç =  $900 \text{ N} * 1,5 \text{ mm/s} = 1,35 \text{ W}$

Ra-Parça Yüzey Pürüzlülüğü =  $1,917 \mu\text{m}$

Takım Aşınması Miktarı (ort) =  $14,42 \mu\text{m}$

### **3.5.3 Kardioid (∞) Trokoidal Frezeleme İçin**

Eksenel Alınan toplam Takım Yolu (Kanal Boyu) =  $5,125 \text{ mm}$

Eksenel İlerleme Hızı =  $1,5 \text{ mm/s}$

Yanal(Trokoidal) İlerleme (Trokoidal Adım) =  $0,5 \text{ mm}$

Kanal Genişliği =  $40 \text{ mm}$

Kanal Derinliği =  $10 \text{ mm}$

Toplam Paso Sayısı =  $10,25 \text{ adet}$

Kesme Rejimi Boyunca Alınan Eksenel Yol (1 pasoda) =  $41,88 \text{ mm}$

Kesme Rejimi Boyunca Alınan Toplam Yol (Eksenel) =  $429,27 \text{ mm}$

Herbir Pasoda Harcanan Süre =  $56 \text{ sn}$  (yaklaşık)

Herbir Pasoda Takımın Boşta Geçirdiği Süre =  $31 \text{ sn}$  (yaklaşık)

Herbir Pasoda Takımın Kesim Sırasında Geçirdiği Süre =  $25 \text{ sn}$  (yaklaşık)

Toplam İşlem Süresi =  $10 \text{ dk}$

Kaldırılan Talaş Miktarı =  $2050 \text{ mm}^3$

Talaş Debisi =  $8 \text{ mm}^3/\text{s}$

Kesmeye Harcanan Enerji/Güç =  $500\text{N} * 1,5\text{mm/s} = 0,75 \text{ W}$

Ra-Parça Yüzey Pürüzlülüğü =  $1,999 \mu\text{m}$

Takım Aşınması Miktarı (ort) =  $15,87 \mu\text{m}$

Bu tez çalışmasında kullanılan herbir takım yolu için kuvvet- zaman, kuvvet-sıcaklık ve sıcaklık-zaman grafikleri ve bu grafiklere bağlı formülasyonlar çıkartılmıştır. Bu formüller, tezgahın ve takımın işletme şartları altında durum kontrolünün gerçekleştirilmesi ve bu kontrole bağlı olarak dijital kontrolörler kullanılarak imalatla birim parça üretim süresinin iyileştirilmesi açısından son derece önem arz etmektedir.

**Tablo 4.1** Frezeleme Tipleri ve Değerlendirme

| Takım yolları / Parametreler                                                          | Standart trokoid | Kardioid trokoidal ( $\infty$ ) | Sonsuz( $\infty$ ) trokoidal |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Birim mesafe başına takım aşınması (um/mm)                                            | 0,039            | 0,036                           | 0,032                        |
| Yüzey pürüzlülüğü(um)                                                                 | 1,422            | 1,999                           | 1,917                        |
| Kesme enerjisi verimliliği/Birim talaş hacmi başına düşen enerji (J/mm <sup>3</sup> ) | 0,109            | 0,093                           | 0,188                        |

Takım yollarının göze çarpan parametreleri irdelenirse; sırasıyla, Sonsuz trokoidal yöntem minimum takım aşınması konusunda, kardioid trokoidal yöntem minimum enerji harcanması konusunda ve standart trokoidal yöntem iş parçasında minimum yüzey pürüzlülüğü konularında birbirlerine üstünlük sağlamaktadır.

Kardioid ve sonsuz trokoidal yollarının, standart trokoidal yönteme göre, bir pasodaki işlemi iki fasılda gerçekleştiriyor olması, bu takım yollarının hem birbirlerine yakın yüzey pürüzlülüklerini hemde standart trokoidal ile olan farklarını açıklamaktadır.

Takımın aynı nokta yakınından geçiyor olması malzeme ve kesme şartların da bağlı olarak böyle bir sonuç vermiştir. Standart trokoidal frezelemeye alternatif oluşturan bu iki takım yolunun durumu, benzerlik göstermekte ve yüzey pürüzlülük değerlerinin nispeten fazla çıkmasını sağlamıştır. Bunun sonucu olarakta standart trokoidal frezeleme, yüzey pürüzlülüğü açısından en başarılı sonucu vermektedir.

Sonsuz trokoidal yöntemin izlemiş olduğu bağlı takım-iş parçası hareketi zıt yönlü frezelemeye diğer iki takım yolunun izlediği hareket eş yönlü frezelemeye benzetilebilir. Bunun sonucu olarakta, sonsuz trokoidal frezeleme operasyonu için harcanacak kesme enerjisi diğerlerine göre daha yüksek olacaktır.

Kardioid frezeleme ise trokoidal frezeleme metodunun kesme hareketi anlamında modifiye edilmiş halidir. Yani kesme işlemi sırasında, uzayda aynı kesme yolunu daha küçük radyüsler ile alınmasının (kısacası takımın kesme işlemini standart trokoidal yönteme göre daha endirekt gerçekleştirmesi-takımın parçaya daha az direkt dalması) kesme enerjisi konusundaki verimlilik artışını açıklamaktadır.

Daha önceki çalışmalardan VDM metodu ile standart trokoidal frezeleme karşılaştırılmış, çentik etkisinden kaynaklı takım hassasiyetinin standart trokoidal frezelemede nispeten daha fazla olduğu görülmüştür[8]. Bu noktadan hareketle sonsuz trokoidal frezeleme hareketinin uzayda gerçekleştirdiği kesme-boşta çalışma-kesme-boşta çalışma hareketinin standart trokoidal frezelemede izlenen kesme ve boşta çıkma hareketine göre daha fazla VDM metoduna benzediği çıkartılabilir.

Ayrıca her üç takımın işlem sırasında sahip olduğu düşük sıcaklıklar takımların üstüne etki eden kimyasal korozyon ve aşınma etkilerini önlemekteyse bile, takımların üstüne kesme sırasında etki eden kuvvetler takımların mekanik anlamda yorulmasına sebebiyet vermektedir.

Ancak, sonsuz trokoidal frezeleme esnasında takımın hareket yönüne bir eş bir zıt yönde kesim yapması takımın adeta bir kılıcın iki yüzünün de döverek sertleştirilmesi gibi, takıma etki etmekte ve yapıyı daha sıkı hale getirerek fiziksel etkilerden dolayı oluşacak aşınma ve çatlak etkilerine karşı daha sıkı bir hale getirdiği olgusunu açıklamaktadır.

Sonuç olarak,takım yollarının performanslarını kıyasladığımızda, her bir takım yolunun avantajları bulunmakta, bu durum, talaşlı işlenecek parçalar için prosesin cinsine (kaba yada ince talaş kaldırma işlemine göre alternatif seçenekler vaat etmektedir.

İlk olarak, her endüstride olduğu gibi günümüz imalat endüstrisinde de enerji verimliliği,akıllı tezgahlar ve dijital imalat ile imalatın sürdürülebilir olması tercih edilen yeni akımlardandır. Özellikle emisyonların azaltılması konusunda birçok çalışma yapılmakta ve sınırlama getirilmektedir.

alaşlı imalatın, enerji kaynağı olarak kullandığı elektrik enerjisi ve bunların üretildiği santrallerin emisyon değerlerinin düşürülmek istendiği göz önünde bulundurulursa, kullanılacak enerjiden tasarruf etmenin önemi anlaşılabacaktır. Dolayısıyla bir imalat tesisinin, konvansiyonel talaş kaldırma yöntemi yerine enerji verimliliği yüksek metodları, özellikle de kardiod trokoidal frezeleme metodunu operasyonlarında kullanması, yerinde bir tercih ve güncellenen son teknolojinin uygulanması olacaktır.

İkinci olarak,bitmiş ürün için süre bazında maliyetlerin hergün düşürülmek istendiği günümüzde bilinen bir gerçektir. Bu maliyetlerin düşürülmesi, sadece aşınmaya daha dayanıklı takımların geliştirilmesi yada daha az aşınmaya sebebiyet veren takım yollarının kullanılmasıyla mümkün olmakadır. Dolayısıyla, konvansiyonel frezeleme metodu yerine trokoidal frezelemenin,özellikle de sonsuz trokoidal frezeleme metodunun seri imalat parça üreten tesislerde kullanılması, süre bazında parça maliyetlerini düşürecektir.

Son olarak,bitmiş iş parçasında daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmesi istenmesi halinde standart trokoidal frezelemenin kullanılması,konvansiyonel ve modifiye edilmiş diğer trokoidal frezeleme metoduna göre şimdilik üstünlüğünü korumakta

ve tez çalışmasında görüldüğü üzere taşlama kalitesinde yüzey kalitesi vererek, frezeleme operasyonları sonrasındaki taşlama prosesini ortadan kaldırmaktadır.

Gelecekte yürütülecek çalışmalarda trokoidal frezelemeye alternatif olarak geliştirilecek takım yollarında,araştırmacıların referans alması gereken bazı noktalar olduğu ortaya çıkmıştır ve bu prensiplere göre takım yolu geliştirme çalışmaları yapılmalıdır.

Bu prensiplerden ilki, takım yolu geliştirilirken, takıma kesme kuvvetlerinin düşürülmesi için, trokoidal frezeleme metodu zaten sıcaklık etkilerini büyük oranda filtreleyen bir metod olduğu için, takımın ekstradan soğutulması olgusuna değil,takım ile iş parçası arası sürtünme kaynaklı oluşan bağ kuvvetlerinin yada etkileşimlerin açıklanmasıdır.Bu olgu üstüne yapılacak çalışmalar ve bu olgunun tam anlamıyla açıklanması takımıyollarının geleceğini belirleyecektir.

Takım yolu geliştirilirken referans alınabilecek bir diğer nokta,uzayda sabit bir ivme altında katı bir cismin en hızlı (yada minimum enerji kaybederek ) aldığı yol doğada görülen “zincir eğrisi”(catenary) olgusudur.

Şayet takıma etki eden ortalama kesme kuvvetleri sabit kabul edilirse,takımın ivmesi de sabit olacak, bu durum, takımın parça içinde talaş kaldırarak ilerlerken uzayda minimum kesme enerjisiyle en rahat olarak alacağı yolun zincir eğrisi olabileceği sonucunu ortaya çıkaracaktır.

Ancak bu zincir eğrisinin , eğri karakteri doğada yerçekimi ivmesine göre şekillendiğinden ,ve her takım-iş parçası için farklı bir kesme kuvvet sabitesi oluşacağından bu eğrinin parametrik denklemi takım ve iş parçasına göre değişecek,ksıacası her takım ve iş parçası malzemesine göre ayrı bir trokoidal(yada eğrisel) form olacaktır.

Son olarak,standart trokoidal frezelemenin modifiye edilmiş hali olan kardiod frezelemede görüldüğü gibi aynı yolu “fasıla” sayısı arttırılarak yapılan kesme işlemi, takıma etkiyen kesme kuvvetlerini azaltmaktadır. Takım çapı,iş parçası ebatlarına göre uzayda takımın daha küçük radyüsler ile daha sık kesim yapmasının takımın lehine sonuçlar doğruabileceği de tahmin edilmektedir ki bu durum da araştırmacıların üstüne çalışabileceği ayrı bir konudur.

Elbetteki her bir takım malzemesi geometrisi, kaplaması yada sürecin soğutmalı olup olmadığı proses çevrim sürecini etkileyen çeşitli ve çok önemli parametreler olsa da, deneyde kullanılan iş parçasının orta seviyede işlenebilirliğinin olması, takımın kaplamasız ve işlemin bir soğutma prosesinden bağımsız olarak gerçekleşmesi, bu deneyin, diğer deneyler için genelleme yapılmasada, sonuçlarını bundan sonra gerçekleştirilecek trokoidal freze operasyonları için temel (baz) değer olarak alınabileceği durumunu ortaya çıkarmıştır.

Deney sonuçlarının, proseslerde ortaya koyulan yeni takım yolları ve süreç analizinin çeşitliliği bakımından birer ilk olması açısından, bundan sonra bu alanda yapılacak çalışmalar için yeni birer perspektif olması umulmaktadır.



## Kuvvet Zaman Grafikleri Matlab Kodları

---

### A1- Standart Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiği Matlab Kodu

%bu program standart trokoidal frezeleme esnasında ölçümü yapılan  
%kuvvetlerin Fx,Fy bileşenlerini ve bu bileşenlere bağlı olarak kuvvet  
%zaman grafiklerini vermektedir.

%t süre cinsinden zamani göstermektedir.Kuvvet ölçümleri 0.1 saniye  
%aralıklarla alınmıştır.toplam ölçüm süresi 600 saniyedir.

t=0:0.1:600

%F matrisi Standart trokoidal frezeleme esnasında takıma etikyen Fx,Fy  
kuvvetlerinden oluşan

% ve bu kuvvet kolonlarından oluşan bir kuvvet matrisidir.

F=[28            52

28            52

28            52

27            53

25            55

25            56

24            56

24            56

24            56

24            56

24            56

24            56

24            56

24            56

24            56

25            56

24            56

25            56

25            56

100           195

|     |     |
|-----|-----|
| 133 | 244 |
| 175 | 305 |
| 179 | 306 |
| 205 | 344 |
| 199 | 333 |
| 217 | 358 |
| 207 | 349 |
| 217 | 364 |
| 210 | 358 |
| 220 | 371 |
| 206 | 359 |
| 218 | 374 |
| 206 | 364 |
| 215 | 377 |
| 206 | 369 |
| 214 | 378 |
| 204 | 372 |
| 167 | 427 |
| 163 | 404 |
| 165 | 430 |
| 160 | 403 |
| 164 | 434 |
| 158 | 405 |
| 162 | 433 |
| 159 | 411 |
| 158 | 434 |
| 152 | 403 |
| 158 | 438 |
| 151 | 405 |
| 154 | 438 |
| 148 | 402 |
| 156 | 447 |
| 148 | 406 |
| 151 | 443 |
| 149 | 403 |
| 151 | 451 |

|     |     |
|-----|-----|
| 141 | 406 |
| 150 | 449 |
| 145 | 411 |
| 145 | 450 |
| 135 | 403 |
| 142 | 449 |
| 134 | 406 |
| 144 | 456 |
| 131 | 405 |
| 137 | 453 |
| 126 | 400 |
| 138 | 460 |
| 125 | 401 |
| 133 | 455 |
| 123 | 403 |
| 133 | 459 |
| 121 | 403 |
| 131 | 462 |
| 121 | 408 |
| 128 | 462 |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |
| 22  | 57  |

.....

|    |    |
|----|----|
| 1  | 63 |
| -2 | 63 |
| -1 | 63 |
| -2 | 63 |
| -2 | 63 |
| -1 | 63 |

```
-2      63
-2      63
-1      63
-1      66]
```

```
Fx=F(:,1)
```

```
Fy=F(:,2)
```

```
%takima herbir ekseninde etki eden ortalama kuvvetler Fxort,Fyort
%olmak üzere
```

```
Fxort=mean(Fx)
```

```
Fyort=mean(Fy)
```

```
%Fbileske,Fx,Fy kuvvetlerinin ve takýma kesme esnasýnda etkiyen
%kuvvetlerin bileþkesidir.
```

```
Fbileske=sqrt((Fx.^2)+(Fy.^2))
```

```
plot(t,Fbileske)
```

```
xlabel('Zaman(s)')
```

```
ylabel('Kuvvet(N)')
```

```
grid on
```

```
title('Standart Trokoidal Frezeleme Bileske Kuvvet-Zaman Grafigi')
```

```
Fxort
```

```
Fyort
```

## A2-Sonsuz Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiği Matlab Kodu

```
%bu program 8 trokoidal frezeleme sonucunda takım üstüne etkiyen
ortalama

%kuvvetlerin zamana bagli grafigini ve fonskiyonunu cikartan koddur.

%t saniye cinsinden süre matrisini temsil etmektedir.toplam ölçüm
süresi

%600 sn dir

t=0:0.1:600

F8=[15      15
15      15
15      15
14      15
15      15
15      15
15      15
15      15
15      15
15      15
16      13
15      13
17      14
118     131
229     270
368     462
442     566
563     733
591     798
515     692
477     677
490     677
464     689
475     685
453     697
468     697
446     711
```

|     |     |
|-----|-----|
| 455 | 702 |
| 436 | 722 |
| 447 | 714 |
| 425 | 733 |
| 436 | 722 |
| 417 | 742 |
| 424 | 728 |
| 407 | 755 |
| 413 | 738 |
| 396 | 762 |
| 404 | 748 |
| 386 | 772 |
| 395 | 753 |
| 375 | 786 |
| 381 | 758 |
| 363 | 791 |
| 367 | 767 |
| 352 | 800 |
| 357 | 775 |
| 341 | 812 |
| 345 | 781 |
| 327 | 815 |
| 331 | 782 |
| 318 | 824 |
| 321 | 792 |
| 309 | 835 |
| 306 | 794 |
| 296 | 843 |
| 295 | 801 |
| 282 | 846 |
| 286 | 806 |
| 272 | 855 |
| 268 | 807 |
| 259 | 860 |
| 260 | 814 |
| 246 | 862 |

|     |     |
|-----|-----|
| 245 | 819 |
| 234 | 868 |
| 231 | 817 |
| 222 | 874 |
| 221 | 820 |
| 210 | 883 |
| 208 | 827 |
| 196 | 882 |
| 193 | 823 |
| 185 | 888 |
| 182 | 824 |
| 173 | 894 |
| 169 | 830 |
| 158 | 894 |
| 158 | 830 |
| 147 | 898 |
| 148 | 828 |
| 138 | 910 |
| 132 | 836 |
| 120 | 897 |
| 123 | 838 |
| 110 | 902 |
| 106 | 836 |
| 96  | 906 |
| 93  | 831 |
| 84  | 905 |
| 85  | 834 |
| 71  | 910 |
| 70  | 837 |
| 59  | 902 |
| 61  | 810 |
| 54  | 906 |
| 53  | 835 |
| 37  | 903 |
| 37  | 823 |
| 29  | 904 |

|     |     |
|-----|-----|
| 27  | 822 |
| 14  | 903 |
| 17  | 817 |
| 2   | 904 |
| 5   | 814 |
| -10 | 903 |
| -5  | 813 |

.....

|     |     |
|-----|-----|
| 692 | 727 |
| 648 | 683 |
| 701 | 718 |
| 664 | 679 |
| 704 | 700 |
| 667 | 666 |
| 715 | 695 |
| 673 | 648 |
| 722 | 680 |
| 683 | 642 |
| 735 | 673 |
| 689 | 631 |
| 742 | 661 |
| 694 | 620 |
| 751 | 650 |
| 676 | 570 |
| 755 | 631 |
| 713 | 592 |
| 764 | 623 |
| 713 | 578 |
| 924 | 650 |

]

%F8x,F8y sirasiyla takima etkiyen kuvvetlerin sirasiyla x,y  
%bilesenleri olmak üzere

F8x=F8(:,1)

```
F8y=F8(:,2)
```

```
%F8bileske, takima , 8 trokoidal frezeleme islemi sirasinda etki eden  
Fx,Fy
```

```
%kuvvetlerinin bileskesidir
```

```
F8bileske=sqrt((F8x.^2)+(F8y.^2))
```

```
plot(t,F8bileske)
```

```
xlabel('Zaman(s)')
```

```
ylabel('Kuvvet(N)')
```

```
title('8 Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafigi')
```

```
grid on
```

### A3- Kardioid Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafiği Matlab Kodu

```
%bu program kardioid trokoidal frezeleme esnasinda ölçümü yapılan
%kuvvetlerin Fx,Fy bileşenlerini ve bu bileşenlere bağlı olarak kuvvet
%zaman grafiklerini vermektedir.

%t süre cinsinden zamani göstermektedir.Kuvvet ölçümleri 0.1 saniye
%aralıklarla alınmistir.toplam ölçüm süresi 600 saniyedir.

t=0:0.1:600

%F3 matrisi 3 trokoidal frezeleme esnasinda takima etkiyen Fx,Fy kuvvet
kolonlarini temsil eden ve bu

% kuvvetlerden olusan bir kuvvet matrisidir.

F3=[-40 -68
-40 -68
-40 -68
-40 -68
-40 -68
-40 -68
-40 -68
-40 -68
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-54 -61
-55 -61
-54 -61
-51 -59
242 192
537 407
913 640
```

1003 746  
1104 840  
835 772  
356 453  
226 340  
234 353  
198 320  
226 356  
192 322  
221 366  
185 328  
214 367  
182 338  
206 371  
176 343  
200 379  
168 345  
192 381  
165 350  
186 387  
159 218  
180 391  
154 361  
176 398  
148 366  
167 400  
140 368  
160 403  
136 377  
152 405  
133 381  
143 410  
126 389  
138 413  
115 385  
128 411

110 393  
123 415  
103 396  
114 417  
96 396  
109 427  
87 396  
100 420  
84 403  
94 426  
75 407  
86 431  
68 406  
77 427  
64 412  
69 428  
56 413  
63 431  
50 416  
56 437  
43 420  
46 421  
34 404  
46 434  
29 413  
37 434  
20 418  
26 425  
15 415  
20 429  
8 416  
13 433  
2 417  
6 425  
-5 417  
0 429

-12 419  
-9 427  
-19 416  
-14 424  
-26 417  
-22 423  
-32 412  
-28 429  
-37 418  
-36 423  
-46 415  
-42 420  
.....  
-4 493  
-3 558  
-15 483  
-13 561  
-19 483  
-22 561  
-28 485  
-32 561  
-36 485  
-40 556  
-47 481  
-49 559  
-53 482  
-54 560  
-60 487  
-65 556  
-66 479  
-74 557  
-78 475  
-82 554  
-84 475  
-32 846



```

]
%F3x,F3y sirasiyla 3 trokoidal frezeleme sirasinda takima etkiyen
%bileske kuvvetin x,y bilesenlerini vermektedir.
F3x=F3(:,1)
F3y=F3(:,2)

%Fbileske,Fx,Fy kuvvetlerinin ve takima kesme esnasinda etkiyen
%kuvvetlerin bileskesidir.

F3bileske=sqrt((F3x.^2)+(F3y.^2))

plot(t,F3bileske)
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('Kuvvet(N)')
title('Üç Trokoidal Frezeleme Kuvvet Zaman Grafigi')
grid on

```

# B

## Sıcaklık- Zaman Grafikleri Matlab Kodları

---

### B1- Standart Trokoidal Frezeleme Sıcaklık Zaman Grafiği Matlab Kodu

%Standart trokoidal frezeleme esnasida olusan sicakliklari ,sicaklik zaman  
%grafiginde veren koddur

tbaslangic=0:1:(6001)

%T sicaklik degerlerini celcius cinsinden vermektedir

T=[29

28

29

28

28

29

28

28

28

.....

49

50

49

48

49

48

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

49

50

49

49

48

49

49

49

49

50

49

49

50

49

49

50

49

49

49

49

49

49

49

49

50

49

49

50

50

50

]

```
tbaslangic=tbaslangic/600
```

```
plot(tbaslangic,T)
```

```
xlabel('Zaman(dk)')
```

```
ylabel('Sicaklik(C)')
```

```
title('Standart Trokoidal Sicaklik Zaman Grafigi')
```

```
grid on
```

## B2-Sonsuz Trokoidal Frezeleme Sıcaklık Zaman Grafiği Matlab Kodu

%bu program sonsuz trokoidal frezeleme islemi sırasında takım üstünde oluşan

%sıcaklıkların zamana bağlı değişimini veren koddur.

tbaslangic=0:1:6000

T=[30

30

30

30

29

30

30

30

30

30

29

29

29

29

30

29

29

.....

52

52

52

51

51

51

51

51

51

51

51

51

51

```

51
50
50
50
50
50
50
50
50
50
49
50
49
49
49
49
49
49
49
49
49
49
49]
tbaslangic=tbaslangic/600
plot(tbaslangic,T)
xlabel('Zaman(dk)')
ylabel('Sicaklik(C)')
title('8 Trokoidal Frezeleme Sicaklik Zaman Grafigi')
grid on

```

### B3- Kardiod Trokoidal Frezeleme Sıcaklık Zaman Grafiği Matlab Kodu

%bu program kardiod trokoidal frezeleme esnasında ortaya çıkan sıcakliklari

%zamana bagli ifade eden grafigin yazildigi koddur

tbaslangic=0:1:6000

T=[24

24

24

24

24

24

24

24

24

24

24

24

24

24

24

.....

41

41

41

42

42

41

41

41

41

41

41

41

41

41

41

41

40

40

40

40

40

40

39

40

39

39

39

39

39

39

39

39

39

39

39

39

39

39

39

38

38

38

38

38

38

38

38

38

38

38

```
38
38
38
38
38
38
38]
tbaslangic=tbaslangic/600
plot(tbaslangic,T)
xlabel('Zaman(dk)')
ylabel('Sicaklik(C)')
title('3 Trokoidal Frezeleme Sicaklik-Zaman Grafigi')
grid on
```

## Takım Aşınması –Takım Ucu Koordinatları Grafikleri

### Matlab Kodlari

---

```
%bu program kardioid ,standart,sonsuz trokoidal frezeleme esnasinda takim
ucundan itibaren

%olusan asinma degerlerini mikrometre cinsinden yazar

%kardioid icin
x1=[1 3 6]
y1=[9.528 16.94 21.17]

%sonsuz icin

x2=[1 3 6]
y2=[9.71 13.35 20.22]

%standart icin
x3=[1 3 6]
y3=[11.92 20.18 22.47]

subplot(1,3,1)
plot(x1,y1)
xlabel('takim ucundan itibaren mesafe')
ylabel('takim asinmasi(mikron)')
grid on
title('Kardioid Trokoidal Frezeleme asinma degerleri')

subplot(1,3,2)
plot(x2,y2)
xlabel('takim ucundan itibaren mesafe')
ylabel('takim asinmasi(mikron)')
grid on
title('Sonsuz Trokoidal Frezeleme asinma degerleri')
```

```
subplot(1,3,3)
plot(x3,y3)
xlabel('takim ucundan itibaren mesafe')
ylabel('takim asinmasi(mikron)')
grid on
title('Standart Trokoidal Frezeleme asinma degerleri')
```



## Dinamik Kuvvet- Zaman Grafikleri Matlab Kodları

---

### Ç1- Standart Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Dinamik Kuvvet- Zaman Grafiği Matlab Kodu

```
%Bu program standart trokoidal frezeleme esnasında oluşan dinamik
%kuvvetlere ait kuvvet-zaman grafigini vermektedir.

tdinamik_standart=[7.5 61.5 115.5 169 223.4 278 333 382 437 546]
fdinamik_standart=[415 400 420 450 580 1120 1450 1625 2020 2365]

plot(tdinamik_standart,fdinamik_standart)
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('Kuvvet(N)')
grid on
```

### Ç2- Kardiod Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Dinamik Kuvvet- Zaman Grafiği Matlab Kodu

```
%bu program kardiod(3) trokoidal frezeleme esnasında takima etkiyen
%dinamik kuvvetlerin zamana bağlı grafigini cizdirmektedir

tdinamik_kardiod=[25 80 135 190 245 300 355 410 465 520 575]
fdinamik_kardiod=[750 1000 1400 1600 1875 2150 2250 2350 2350 2325 2325]

plot(tdinamik_kardiod,fdinamik_kardiod)
grid on
xlabel('Zaman(S)')
ylabel('Kuvvet(N)')
```

### Ç3- Sonsuz Trokoidal Frezeleme Esnasında Oluşan Dinamik Kuvvet- Zaman Grafiği Matlab Kodu

```
%bu program sonsuz trokoidal frezeleme ensansında takima gelen dinamik
%kuvvetlerin zamanla degisimini vermektedir.
```

```
tdinamik_sonsuz=[6 31 61 89 117 145 174 200 230 257 285 312 340 370 395 425  
452 480 507 535 563 592]  
  
fdinamik_sonsuz=[990 1400 1800 2025 2300 2650 2775 3200 3300 3400 3280 3550  
3300 3550 3300 3580 3380 3600 3300 3500 3330 3620]  
  
plot(tdinamik_sonsuz,fdinamik_sonsuz)  
xlabel('zaman(s)')  
ylabel('Kuvvet(N)')  
grid on
```



## Kuvvet-Sıcaklık Grafikleri Matlab Kodları

---

### D1- Standart Trokoidal Frezeleme Kuvvet Sıcaklık Grafiği Matlab Kodu

```
%bu program standart trokoidal frezeleme sırasında oluşan kuvvetler ile
%sıcakliklari zamana bagli olarak verir.

%tst, standart trokoidal frezeleme için geçen sürenin matris formu, sn
cinsinden
tst=[17 72.5 127 182 237 292 347 395 450 504.85 559.75]

%fstx, standart trokoidal frezeleme islemi esnasında oluşan kuvvetlerin x
%bileseni
fstx=[92 99 102 111 112 115 109 106 102 129 117.5]
%fsty, standart trokoidal frezeleme islemi esnasında oluşan kuvvetlerin y
%bileseni
fsty=[395 422 477 523 544 540 498 496 465 583 527]
%fstb, standart trokoidal frezeleme islemi esnasında oluşan x ve y
%kuvvetlerinin bileskesi
fstb=[405.57 433.457 487.783 534.649 555.409 552.109 509 507.200 476.055
597.101 539.940]

%Tst, standart trokoidal frezeleme islemi esnasında oluşan
%sıcakliklar, santigrat cinsinden
Tst=[27 29 30 32 33 34 35 38 39 40.25 43]

title('Standart Trokoidal Frezelemede Kuvvet-Sıcaklık-Zaman ilişkisi')

subplot(3,1,1)
plot(Tst,fstx,'*')
xlabel('Sıcaklık(C)')
ylabel('Fx(N)')
grid on
```

```
subplot(3,1,2)
plot(Tst,fsty,'*')
xlabel('Sicaklik(C)')
ylabel('Fy(N)')
grid on
```

```
subplot(3,1,3)
plot(Tst,fstb,'*')
xlabel('Sicaklik(C)')
ylabel('Bileske Kuvvet(N)')
grid on
```



## D2- Kardiod Trokoidal Frezeleme Kuvvet Sıcaklık Grafiği Matlab Kodu

```
%%bu program sonsuz trokoidal frezeleme sirasinda olusan kuvvetler ile
%%sicakliklari zamana bagli olarak verir.

%tson,sonsuz trokoidal frezeleme için geçen sürenin matris formu,sn
cinsinden

tson=[11.7 39.6 67.5 95.5 123.4 151.3 179.25 207.1 235.1 263.05 291 319.05
346.8 374.75 402.7 430.6 458.55 486.5 514.45 542.35 570.3]

%fsonx, sonsuz trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan kuvvetlerin x
%bileseni

fsonx=[148 647 140 633 159 614 149 611 135 624 134 660 153 644 150 636 158
678 175 663.5 181]

%fsony, sonsuz trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan kuvvetlerin y
%bileseni

fsony=[848 643 852 621 955 620 918 632 917 649 944 673 928 677.5 966.5 658
972.5 718 1029 695.5 1014]

%fsonb,sonsuz trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan x ve y
%kuvvetlerinin bileskesi

fsonb=[860 912 863 886 968 872 930 879 926 900 953 942 940 934 978 915 985
987 1093 961 1030 ]

%Tson,sonsuz trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan
%sicakliklar,santigrat cinsinden

Tson=[26 31 35 40 42 46 45 48 48 49 48 49 49 50 49 50 49 50 49 52 49]

title('Sonsuz Trokoidal Frezelemede Kuvvet-Sicaklik-Zaman iliskisi')

subplot(3,1,1)
plot(Tson,fsonx,'*')
xlabel('Sicaklik(C)')
ylabel('Fx(N)')
grid on

subplot(3,1,2)
plot(Tkar,fkary,'*')
xlabel('Sicaklik(C)')
ylabel('Fy(N)')
```

```
grid on

subplot(3,1,3)
plot(Tson,fsonb,'*')
xlabel('Sicaklik(C)')
ylabel('Bileske Kuvvet(N)')
grid on
```



### D3- Sonsuz Trokoidal Frezeleme Kuvvet Sıcaklık Grafiği Matlab Kodu

```
%%bu program Kardiod trokoidal frezeleme sirasinda oluþan kuvvetler ile
%%sicakliklari zamana bagli olarak verir.

%tkar,Kardiod trokoidal frezeleme iþin geþen sürenin matris formu,sn
cinsinden

tkar=[30.3 45.7 85.42 100.37 140.825 155.675 195.9 211.05 251 266.45 306.3
321.6 361.2 376.75 416.275 431.875 471.35 486.925 526.45 541.025]

%fstx, Kardiod trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan kuvvetlerin x
%bileseni

fkarx=[56 67 47.5 80 29 64 26 47 22 31.5 13 40 22 30.5 17 41 26 37 29.5 68]

%fkary, Kardiod trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan kuvvetlerin y
%bileseni

fkary=[433 443 411 434 413 432 437 431 413 434.5 415 491 430 457 445 503
483 501 500.5 511]

%fkarb,Kardiod trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan x ve y
%kuvvetlerinin bileskesi

fkarb=[436 448 413 441 414 436 437 433 413 435 415 492 430 458 445 504 483
502 501 515 ]

%Tkar, Kardiod trokoidal frezeleme islemi esnasinda olusan
%sicakliklar,santigrat cinsinden

Tkar=[24 24 25 26 25 27 30 31 32 33 33 34 34 36 35 37 35 38 36 39]

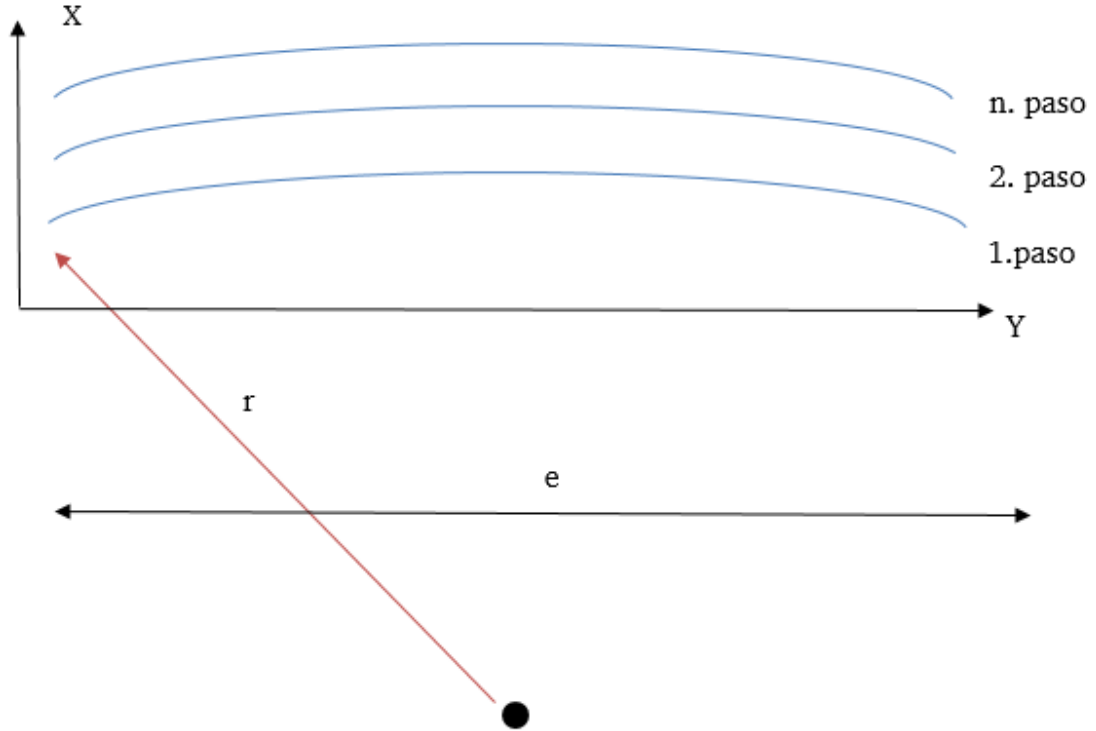
title('Kardiod Trokoidal Frezelemede Kuvvet-Sicaklik-Zaman iliskisi')
subplot(3,1,1)
plot(Tkar,fkarx, '*')
xlabel('Sicaklik(C) ')
ylabel('Fx(N) ')
grid on

subplot(3,1,2)
plot(Tkar,fkary, '*')
xlabel('Sicaklik(C) ')
ylabel('Fy(N) ')
grid on

subplot(3,1,3)
plot(Tkar,fkarb, '*')
xlabel('Sicaklik(C) ')
ylabel('Bileske Kuvvet(N) ')
grid on
```

## Toplam Takım yolu Ve Talaş Hacmi Hesaplamalari

E1 –Frezeleme Tipleri İçin Takımın Uzakda Aldığı Yollar Standart Trokoidal İçin



Takım çapı 10 mm , e =40 mm , r=40 mm olmak üzere, geometrik bağıntılar kullanıldığında

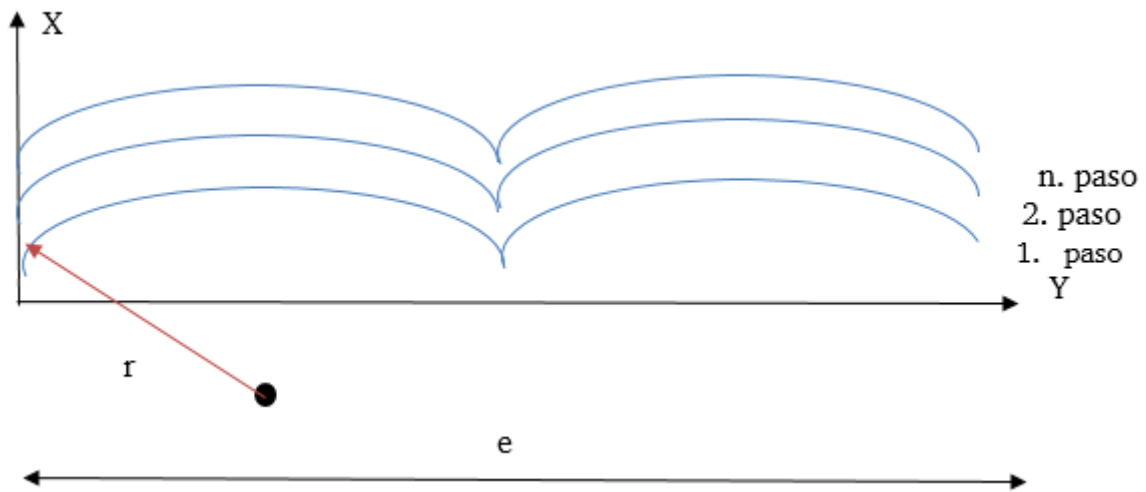
Standart trokoidal frezeleme esnasında takımın tek pasoda aldığı yol ;

$$x = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \alpha}{360}$$

Şeklinde tanımlanmaktadır.Buna göre tanımlanan parametreler formülde yerine yerleştirildiğinde( $\alpha = 60^0$  olmakta) ,standart trokoidal frezeleme sırasında(kesim esnasında) takımın aldığı yol

$x=41.88$  mm olmaktadır.

Kardioid Trokoidal İçin



Takım çapı 10 mm ,  $e=40$  mm,  $r=20$  mm olmak üzere geometrik bağıntılar kullanıldığında

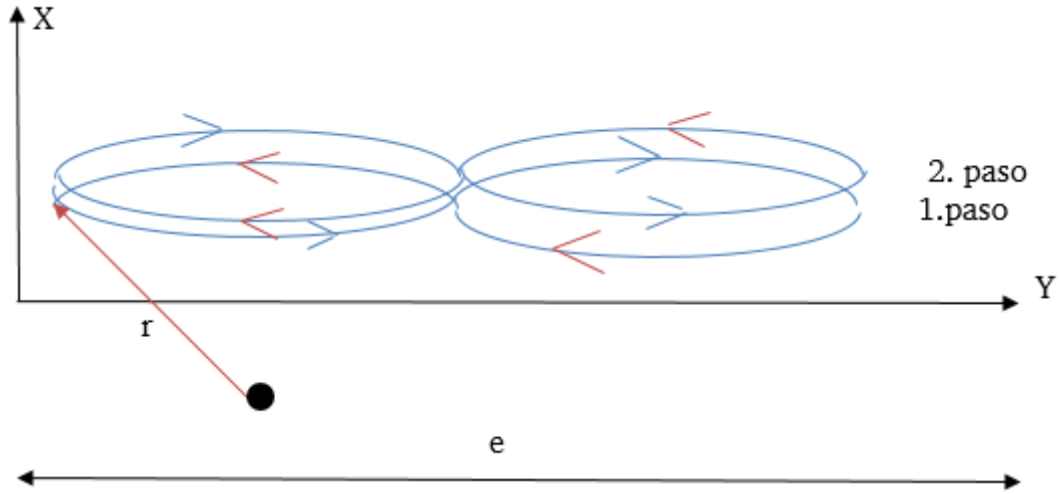
Kardioid trokoidal frezeleme esnasında takımın tek pasoda aldığı yol;

$$x = 2. \left( \frac{2. \pi. r. \alpha}{360} \right)$$

Şeklinde tanımlanmaktadır.Buna göre tanımlanan parametreler formülde yerine yerleştirildiğinde ( $\alpha = 60^0$  olmakta),kardioid frezeleme sırasında(kesim esnasında) takımın aldığı yol

x=41.88 mm olmaktadır.

Sonsuz Trokoidal İçin



Takım çapı 10 mm , e=40 mm, r=20 mm olmak üzere geometrik bağıntılar kullanıldığında

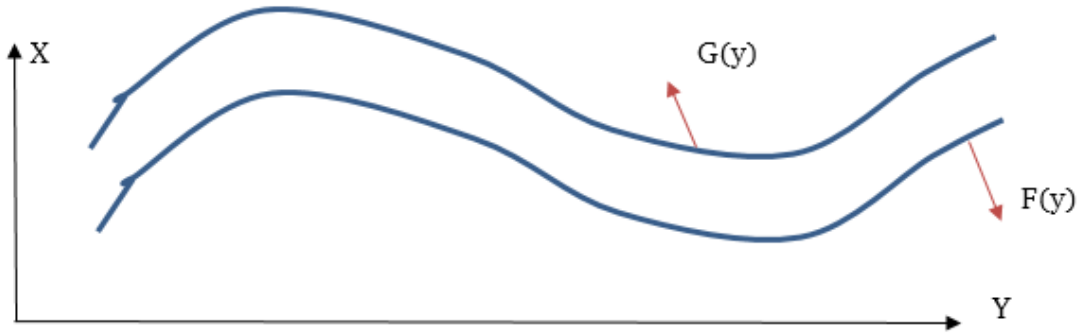
Kardioid trokoidal frezeleme esnasında takımın tek pasoda(kesim esnasında) aldığı yol;

$$x = 2. \left( \frac{2. \pi. r. \alpha}{360} \right)$$

Şeklinde tanımlanmaktadır.Buna göre tanımlanan parametreler formülde yerine yerleştirildiğinde ( $\alpha = 60^0$  olmakta),kardioid frezeleme sırasında takımın aldığı yol

x=41.88 mm olmaktadır.

## E2- Frezeleme Tipleri İçin Kaldırılan Talaş Miktarının Hesabı



Takımın uzayda takip ettiği herhangi bir eğrinin matematiksel tanımı  $F(y)$  olsun. Takım uzayda kesme esnasında periyodik hareketlerle kesme işlemi gerçekleştirdiğinden, bir sonraki pasoda takip ettiği yol  $G(y)$  olarak tanımlansın. Bu iki eğri birbirine eşlenik ancak aralarında sadece belirli bir  $c$  kadar kot farkı bulunmasından ötürü ;

$G(y) = F(y) + c$  şeklinde bir formül ile tanımlanabilmektedir. Bu iki eğrinin arasında kalan alan, kesme işlemi esnasında (kabaca) kaldırılan talaş kalınlığını temsil etmektedir. Matematiksel olarak bu iki eğrinin arasında kalan alan;

$$A = \int_{y_1}^{y_2} [G(y) - F(y)] dy$$

Şeklinde tanımlanabilmektedir. Bu integrasyonun sonucu

$$A = c \cdot (y_2 - y_1)$$

Olarak hesaplanmaktadır. Yani takım uzayda hangi yolu izlerse izlesin (son paso sürecinde kalan eğrisel form ihmal edildiğinde) kaldırılan talaş kalınlığı, kanal genişliği ile kanal boyunun çarpımına eşit olmaktadır. Kaldırılan talaş hacmi için ise kanal derinliği ile de çarpılması gerekmektedir. Sonuçta kanal boyu  $l$ , derinliği  $h$  olan bir kanal için kaldırılan toplam talaş hacmi;

$$V = e \cdot l \cdot h \text{ (mm}^3\text{)}$$

Şeklinde tanımlanmış olacaktır.

## Kaynakça

---

- [1] M.Zeyveli, Frezeleme Operasyonlarında Optimum İşleme Parametrelerinin Bilgisayar İle Seçimi, 1991, sf.1-2.
- [2] [https:// www.sandvik.coromant.com/tr-tr/ knowledge/ milling/ pages/ shouldermilling.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/milling/pages/shouldermilling.aspx).
- [3] [https:// pt.aliexpress.com/item/Jogo-SEET12T3-insert-ferramentas-fresa-rosto-cortador-de-disco-de-corte-de-fresagem-IndevelFMA01/3285645655 . html](https://pt.aliexpress.com/item/Jogo-SEET12T3-insert-ferramentas-fresa-rosto-cortador-de-disco-de-corte-de-fresagem-IndevelFMA01/3285645655.html).
- [4] <http://www.bixgood.com/mall/cutting-tool/9.html>.
- [5] <https://turkish.alibaba.com/f/parmak-freze-nedir.html>.
- [6] C.K.Toh,"Tool life and tool wear during high-speed rough milling using alternative cutter path strategies", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, pp 1295-1304.
- [7] M.Özkan, "Bilgisayar Destekli İmalatta Dalarak Kaba Ve Trokoidal İşleme Algoritmalarının Birleştirilmesi", Sf. 65-62, 55-57, 2010.
- [8] A.Pleta, D.Ulutan, L.Mears,"An Investigation of Alternative Path Planning Strategies for Machining Nickel-Based Superalloys", Procedia Manufacturing, 1, pp.561, 2015
- [9] R.Sun, S.Chandrasekar, J. Leopold, B.J.Mann, Y.Gao," Modelling of tool temperature in modulation-assisted machining", Procedia CIRP 58, pp. 204 –209, 2017
- [10] Kountanya R., "Cutting tool temperatures in interrupted cutting -The effect of feed-direction modulation", Journal of Manufacturing Processes 10, pp. 47– 55
- [11] R.B.D.Pereira, L.C. Brandao, A.P.de Paiva, J.R.Ferreira, J.P.Davim," A review of Helical Milling Process", International Journal of MachineTools& Manufacture 120, pp. 27–48,2017
- [12] [https://www.ptonline.com/articles/orbital-drilling-enables-one-up-assembly \(helical milling\)](https://www.ptonline.com/articles/orbital-drilling-enables-one-up-assembly-helical-milling)

- [13] M.Rauch,E.Duc,J. Hascoet,“Improving Trochoidal Tool Paths Generation And Implementation Using Process Constraints Modelling”, International Journal of Machine Tools &Manufacture, pp. 375–383, 2009
- [14] MoldMaking Technology Magazine,pp. 17-18, 2004
- [15] Kowalski M., Karolczak P., Waszczuk K., Wiśniewska M., (2017), “Influence of the Path type on Selected Technological Effects in the Trochoidal Milling”, Advances in Science and Technology Research Journal 11, 147–153
- [16] WNT MasterTool Solid Carbide Milling Catalog, pp.2-3, 2016
- [17] Kıyak M., Yılmaz C.,”Trochoidal Frezelemede Takım Aşınması Ve Yüzey Kalitesi 8th International Symposium On Machining”,2017
- [18] Szalóki I., Csuka S., Sipos S.,“New Test Results in Cycloid-Forming Trochoidal Milling”, Acta Polytechnica Hungarica 11, No. 2, 2014
- [19] Salehi M., Blum M., Fath B., Akyol T., Haas R., Ovtcharova J., “Epicycloidal Versus Trochoidal Milling-Comparison of Cutting Force, Tool Tip Vibration and Machining Cycle Time”, 7th HPC – CIRP Conference on High Performance Cutting,2016
- [20] Amaro P., Ferreira P., Simões F., “Tool Wear Analysis During Duplex Stainless Steel trochoidal Milling”pp.,2018
- [21] Uhlmann E., Fürstmann P., Rosenau B., Gebhard S., Gerstenberger R., Müller G.,“The Potential of Reducing The Energy Consumption for Machining TiAl6V4 by Using Innovative Metal Cutting Processes”, Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM), Berlin, 2013
- [22] Otkur M, Lazoglu I.,“Trochoidal Milling” , International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 1324–1332, 2007
- [23] Rauch M., Duc E., Hascoet J., “Improving Trochoidal Tool Paths Generation and Implementation Using Process Constraints Modelling”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 375–383, 2009
- [24] Ibaraki S., Yamaji I., Matsubara A.,“On The Removal of Critical Cutting Regions by Trochoidal Grooving”, Precision Engineering 34 467–473, 2010
- [25] Szalóki I., Csuka S., Csesznok S., Sipos S., “Can Trochoidal Milling Be Ideal?”, International GTE Conference Manufacturing, 2012
- [26] Zhang X., Peng F., Qiu F., Yan R., Li B.,“Prediction of Cutting Force in Trochoidal Milling-Based on Radial Depth of Cut” Advanced Materials Research 852, pp.457-462, 2014

- [27] Polishetty A., Goldberg M., Littlefair G., Puttaraju M., Patil P., Kalra A., “A Preliminary Assessment of Machinability of Titanium Alloy Ti6Al4V During Thin Wall Machining Using Trochoidal Milling”, 12th Global Congress on Manufacturing and Management, GCMM, Procedia Engineering 97 pp.357– 364, 2017
- [28] Pleta A., Ulutan D., Mears L., “An Investigation of Alternative Path Planning Strategies for Machining Nickel-Based Superalloys”, Procedia Manufacturing, 1, pp. 556-566, 2015
- [29] Shixiong W., Wei M., Bin L., Chengyong W., “Trochoidal Machining for the High-Speed Milling of Pockets”, Journal of Materials Processing Technology 233, pp.29-43, 2016
- [30] Pleta A., Mears L., “Cutting Force Investigation of Trochoidal Milling in Nickel- Based Superalloy”, Procedia Manufacturing, 5, pp.1348–1356, 2016
- [31] Deng Q., Mo R., Chen Z.C., Chang Z., “A New Approach to Generating Trochoidal Tool Paths for Effective Corner Machining”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95, pp.3001–3012, 2018
- [32] Pleta A., Niaki F.A., Mears L., (2017) “Investigation of Chip Thickness and Force Modelling of Trochoidal Milling”, 45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC Procedia Manufacturing 10, pp. 612–621, 2017
- [33] Pleta A., Niaki F.A., Mears L., A comparative study on the cutting force coefficient identification between trochoidal and slot milling, Procedia Manufacturing 26, pp.570–579, 2018
- [34] Amaro P., Ferreira P., Simões F., “Tool Wear Analysis During Duplex Stainless Steel trochoidal Milling, pp. 2018,
- [35] FIRST VMC 3000 Tezgah Katalogu
- [36] Yan Y., Xu J., Wiercigroch M. , Modelling of regenerative and frictional cutting dynamics, International Journal of Mechanical Sciences 156 pp.86–93, 2019
- [37] Analytical model of milling forces based on time-variant sculptured shear surface, Jiang F., Zhang T., Yan L., International Journal of Mechanical Sciences pp.115-116, pp.,190–201,2016

## Tezden Üretilmiş Yayınlar

---

İletişim Bilgisi: bastekeli@itu.edu.tr

### Konferans Bildirileri

1. M.Kiyak,E.O. Baştekeli, U. Emiroğlu, ‘‘Investigation Of The Heat Generation On The Trochoidal Milling Operations’’ 4<sup>th</sup> International Conference On Advances In Mechanical Engineering Istanbul, 2018

