



**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DIŞLI ÜRETİMDE KUVVET MODELLEMESİ
VE TİTREŞİM ESASLI HATA TESPİTİ**

DOKTORA TEZİ

Habibe GÜRSOY DEMİR

UŞAK, 2019

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DIŐLİ ÜRETİMDE KUVVET MODELLEMESİ VE TİTREŞİM ESASLI
HATA TESPİTİ**

DOKTORA TEZİ

Habibe GÜRSOY DEMİR

HAZİRAN, 2019

UŞAK

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DIŐLİ ÜRETİMDE KUVVET MODELLEMESİ VE TİTREŞİM ESASLI
HATA TESPİTİ**

DOKTORA TEZİ

Habibe GÜRSOY DEMİR

UŞAK, 2019

Habibe Gürsoy Demir tarafından hazırlanan “DİŞLİ ÜRETİMDE KUVVET MODELLEMESİ VE TİTREŞİM ESASLI HATA TESPİTİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsa Yeşilyurt

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT

(Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Prof. Dr. Hasan ÖZTÜRK

(Makine Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi)

Prof. Dr. Zeki KIRAL

(Makine Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi)

Doç. Dr. Gökhan KİPER

(Makine Mühendisliği, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü)

Doç. Dr. Kemal MAZANOĞLU

(Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Tarih: 13.06.2019

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Murat Kemal KARACAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Habibe GÜRSOY DEMİR



DIŐLİ ÜRETİMDE KUVVET MODELLEMESİ VE TİTREŞİM ESASLI

HATA TESPİTİ

(Doktora Tezi)

HABİBE GÜR SOY DEMİR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Talaşlı imalat, başta havacılık, enerji, otomotiv ve medikal olmak üzere endüstride bir çok alanda tercih edilen çok yönlü ve hassas üretim yöntemidir. Talaşlı imalatta kesici takımın yüksek performansla istenilen özelliklerde ve maksimum takım ömründe talaş kaldırması istenmektedir. Talaş kaldırma esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin doğru tahmini, kesme gücünün belirlenmesi, işleme hassasiyetinin geliştirilmesi, tezgah titreşimlerinin belirlenmesi ve iş parçası yüzey kalitesi ve geometrik hassasiyetin sağlanması için son derece önemlidir. Bununla beraber, imalatta kullanılan kesici takımların durumlarının izlenmesi, ürün kalitesini, üretimin sürekliliğini ve verimliliğini arttırmak için oldukça önemlidir.

Bu çalışma modül freze yardımıyla dişli üretimi esnasında oluşan kesme kuvvetinin belirlenmesi ve kesici takımda oluşan lokal hataların titreşim esaslı durum izleme yöntemleriyle tespitine odaklanmıştır. Kesme kuvveti bileşenlerinin doğru belirlenmesi için öncelikle evolvent profile sahip kesici kenar modellemesi yapılmış ve Kienzle yaklaşımı kullanılarak kesme kuvveti bileşenleri doğru şekilde hesaplanmıştır. Ayrıca, kullanılan yöntemin etkinliğini ve doğruluğunu kanıtlamak için farklı kesme koşullarında deneyler yapılmıştır. Sonuçlar kesme kuvveti bileşenlerinin önemli bir doğrulukla tahmin edilebildiğini kanıtlamıştır. Kesici takımın farklı diŐlerinde oluşan lokal hataları tespit etmek amacıyla kesme esnasında oluşan titreşimler ivmemetreler yardımıyla toplanmıştır. Elde edilen titreşimlerinin zaman ve frekans bölgesi incelemelerinin yanında, sürekli dalgacık dönüşümü ve sınıflandırıcı algoritmaları kullanılarak takımdaki lokal hatalar tespit edilmiştir.

Bilim Kodu: 625.01.04

Anahtar Kelimeler: Kesme kuvveti, modül freze, titreşim izleme, dalgacık dönüşümü, sınıflandırma

Sayfa Adedi: 146

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT



**FORCE MODELLING AND VIBRATION BASED FAULT DETECTION
IN GEAR CUTTING
(Doctoral Dissertation)**

Habibe GÜRSOY DEMİR

**UNIVERSITY OF UŞAK
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
May 2019**

ABSTRACT

Machining is a versatile and precise production method which is preferred in many fields of industry, especially in aviation, energy, automotive and medical. In machining, it is desired that cutting tool should be used with high and maximum tool life. Accurate estimation of the cutting force components generated during chip removal is quite critical for the reasons including: cutting power, machining accuracy, machine vibrations, workpiece surface quality and geometric precision. However, monitoring of the condition of the cutting tools used in manufacturing is very important to increase the product quality, production continuity and efficiency.

This study focuses on the determination of the cutting force generated during gear production using gear form cutter, and the determination of the local faults in the cutting tool by vibration based monitoring methods. In order to determine the cutting force components correctly, cutting edge with an involute profile was first generated and the cutting force components were then calculated correctly using the Kienzle approach. In addition, experiments were performed under different cutting conditions to prove the effectiveness and accuracy of the method used. The results proved that the cutting force components can be predicted with high accuracy. In order to determine the local faults in the different teeth of the cutting tool, the vibrations during the cutting were collected using accelerometers. In addition to the time and

frequency domain analysis of the obtained vibrations, local seeded faults to cutting tool were determined by using continuous wavelet transform and classifier algorithms.

ScienceCode: 625.01.04

Keywords: Cutting force, form gear cutter, vibration monitoring, wavelet transform, classification

Number of Page: 146

Supervisor: Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT



TEŞEKKÜR

Doktora alışmam sűresince yardımını, ilgisini, desteğini ve teşvikini bir an olsun esirgemeyen, her zaman yol gösteren değerli hocam, danışmanım Prof. Dr. İsa YEŐİLYURT'a,

Deęerli fikirleri ile doktora çalıřmam sűresince yardımcı olan Prof. Dr. Hasan ZTŲRK ve Doç. Dr. Kemal MAZANOęLU'na,

Sınıflandırma teknikleri ile hata tespiti kısmında bilgisini ve yardımını benden esirgemeyen arkadaşım Dr. Gűrkan KŲŲKYILDIZ'a,

Bu sűre boyunca bana her tűrlű desteęi saęlayan, yanımda olan ve rehberlik yapan eřim Dr. Mehmet Hakan DEMİR'e,

Hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve beni bugűnlere getiren anneme, babama ve her an yanımda olan kardeřim Hande GŲRSOY'a,

Ve tabiki kızım GŲNEŐ'e

Sonsuz teřekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
RESİM LİSTESİ.....	xii
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Literatür İncelemesi.....	3
1.2.1. Kesme Kuvvetlerinin Belirlenmesiyle İlgili Çalışmalar.....	3
1.2.2. Talaşlı İmalatta Titreşim Esaslı Durum İzleme ve Hata Tespiti ile İlgili Çalışmalar	11
1.3. Tezin Amacı ve Hedefleri	16
1.4. Tezin Organizasyonu.....	17
2. TALAŞLI İMALAT	19
2.1. Talaşlı İmalata Giriş	19
2.2. Talaş Kaldırma Teorisi ve Talaş Oluşumu	20
2.3. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler	21
2.3.1. Takım Geometrisi.....	22
2.3.2. Talaş Geometrisi	22
2.3.3. Kesme ve İlerleme hızları	23
2.3.4. Isı Oluşumu, Takım Aşınması ve Takım Ömrü	23
2.3.5. Kesme sıvısı	24
2.3.6. Kesme Kuvvetleri.....	24
2.4. Kesme Kuvvetinin Hesaplanması ve Kesme Modelleri.....	25
2.4.1. Ortogonal (Dik) Kesme Mekanikliği	26
2.4.2. Oblik (Eğik) Kesme Mekanikliği	30
3. TİTREŞİM ESASLI HATA TESPİT YÖNTEMLERİ.....	31

3.1.	Durum İzleme	31
3.2.	Zaman Bölgesi Analizi	31
3.2.1.	Zaman Bölgesi Ortalaması	32
3.2.2.	İstatistiksel Analiz	32
3.3.	Frekans Bölgesi Analizi	33
3.4.	Birleşik Zaman-Frekans Bölgesi Analizi	34
3.5.	Dalgacık Dönüşümü	35
3.5.1.	Sürekli Dalgacık Dönüşümü	37
3.5.2.	Dalgacık Dönüşümünün Uygulanması	42
3.5.3.	Ayrık Dalgacık Dönüşümü	44
3.6.	Sınıflandırma Teknikleri	46
3.7.	Yapay Sinir Ağları	46
3.8.	Destek Vektör Makineleri	49
3.9.	Rastgele Orman Algoritması	53
3.10.	K En Yakın Komşuluk (kNN) Algoritması	55
4.	DENEY DÜZENİĞİNİN KURULMASI	57
4.1.	Deney Düzeniği	57
4.2.	Kesme Kuvvetinin Ölçülmesi	60
4.3.	Titreşim Ölçüm Sistemi	62
5.	KESME KUVVETİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ	64
5.1.	Kesici Takım Diş Profilinin Oluşturulması	64
5.1.1.	Köşe Kısmının Oluşturulması	64
5.1.2.	Kiriş Kısmının Oluşturulması	67
5.2.	Talaş Kalınlığı Hesabı	68
5.3.	Teorik Kesme Kuvveti	69
5.3.1.	Özgül Kesme Kuvveti Hesabı	70
5.3.2.	Talaş Kesiti Hesabı	71
5.3.3.	Kesme Kuvveti Hesabı	72
5.4.	Kesme Kuvvetinin Ölçülmesi	72
5.4.1.	Gerinim ölçer (Straingage) Köprüleri	74
5.5.	Teorik Simülasyon	76
5.6.	Deneysel Sonuçlar	78
6.	KESİCİ TAKIMDA OLUŞAN LOKAL HATALARIN TESPİTİ	86
6.1.	Deneysel Sonuçların Analizi	86
6.2.	Kesici Takım titreşim verilerinin zaman ve frekans bölgesi incelemeleri	88

6.3. Deneysel Verilerin Sürekli Dalgacık Dönüşümüyle İncelenmesi	97
7. KESİCİ TAKIMDA OLUŞAN LOKAL HATA ve DERECELERİN SINIFLANDIRMA TEKNİKLERİ İLE TESPİTİ.....	105
7.1. Giriş	105
7.2. Ön İşlemler	106
7.3. Öznitelik Çıkartma	106
7.4. Sinyal Sınıflandırma.....	109
8. SONUÇLAR	112
8.1. Tezin Hedefleri ve Çıktıları.....	112
8.2. Tezin Sonuçları.....	114
8.3. Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler.....	119
KAYNAKLAR	121
ÖZGEÇMİŞ.....	126

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Ortogonal kesmede talaş oluşumu [44].....	21
Şekil 2.2. Metal kesme proseslerinin geometrileri: a) Ortogonal kesme geometrisi; b) Eğik kesme geometrisi [45]	26
Şekil 2.3. Ortogonal kesme modelinde şekil değiştirme bölgeleri [45]	27
Şekil 2.4. Ortogonal kesme modelinde oluşan kesme kuvvetleri [45].....	28
Şekil 3.1. Örnek dalgacık şekilleri [49].....	36
Şekil 3.2. STFT ve CWT'nin 1Hz merkez frekanslı Morlet dalgacığının reel kısmının karşılaştırılması [47].....	39
Şekil 3.3. Farklı ölçeklerdeki 1 Hz Morlet dalgacıklarının frekans bölgesini gösterimleri [47]	39
Şekil 3.4. Dalgacık dönüşümünün zaman-frekans penceresi	41
Şekil 3.5. Dalgacık Dönüşümü hesaplamasının blok diyagramı.....	43
Şekil 3.6. Yapay sinir ağları hücre yapısı.....	47
Şekil 3.7. Çok katmanlı YSA yapısı	48
Şekil 3.8. Doğrusal ayıraç	49
Şekil 3.9. Çok sayıdaki lineer ayıraç	50
Şekil 3.10. Sınıfları ayıran düzlem ile sınıflar arasındaki uzaklık	51
Şekil 3.11. Örnek Bir karar ağacı yapısı	54
Şekil 4.1. Taşıyıcı kiriş ve dişli taslağı çizimleri	58
Şekil 4.2. Veri toplama sistemi şematik gösterimi.....	63
Şekil 5.1. Kremayer kesici takım parametreleri	65
Şekil 5.2. Dişlinin köşe kısmının oluşturulması [47]	66
Şekil 5.3. Dişin kiriş kısmının oluşturulması [47]	68
Şekil 5.4. Kesme anında oluşan kesme kuvvetleri ve proses parametreleri.....	69
Şekil 5.5. Modül freze çakısının ince disk modeli ve meydana gelen kuvvetlerin gösterimi ..	71
Şekil 5.6. Taşıyıcı kirişe etki eden kesme kuvveti bileşenleri	74
Şekil 5.7. 0.2mm/s ilerleme hızında farklı kesme derinliklerinde oluşan kesme kuvveti bileşenleri	77

Şekil 5.8. 0.3mm/s ilerleme hızında farklı kesme derinliklerinde oluşan kesme kuvveti bileşenleri	78
Şekil 5.9. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 2mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.	79
Şekil 5.10. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 4mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.	80
Şekil 5.11. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 6mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.	80
Şekil 5.12. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 8mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.	81
Şekil 5.13. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 10mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.....	81
Şekil 5.14. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 2mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri	82
Şekil 5.15. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 4mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri	83
Şekil 5.16. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 6mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri	83
Şekil 5.17. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 8mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.	84
Şekil 5.18. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 10mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.....	84
Şekil 6.1. 2.025mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri.....	90
Şekil 6.2. 4.05mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri.....	93
Şekil 6.3. 6.075mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri.....	94
Şekil 6.4. 8.10mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri.....	95
Şekil 6.5. 10.125mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri.....	96
Şekil 6.6. 2.025mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri	99

Şekil 6.7. 4.05mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri	100
Şekil 6.8. 6.075mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri	102
Şekil 6.9. 8.10mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri	103
Şekil 6.10. 10.125mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri	104
Şekil 7.1. Sistem akış şeması	105
Şekil 7.2. Zaman uzayı tabanlı öznitelik dağılımı.....	107
Şekil 7.3. Frekans uzayı tabanlı öznitelik dağılımı	108



RESİM LİSTESİ

<u>Resim</u>	<u>Sayfa</u>
Resim 4.1. Kalıpcı freze tezgahı	58
Resim 4.2. Deneyleer sırasında kullanılan modül freze.....	59
Resim 4.3. Tabla hızı ölçümü için kullanılan enkoder.....	59
Resim 4.4. Kesici takım konumunu belirten sensör.....	60
Resim 4.5. Kesme kuvvetini algılamada kullanılan gerinimölçer konumları	61
Resim 4.6. Kesme işlemleri sırasında kullanılan ivmemetreler	62
Resim 6.1. Kesici takıma uygulanan diş hataları	87
Resim 6.2. Taşlama yardımıyla kesici takıma hata verilmesi	88

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Zaman-frekans analiz metotlarının performanslarının karşılaştırılması [49]	35
Tablo 5.1. Kienzle model proses parametreleri [68]	76
Tablo 5.2 0.2mm/s ilerleme hızı ve farklı kesme derinliklerinde ölçülen ve hesaplanan kesme kuvveti bileşenlerinin tepe değerleri	82
Tablo 5.3. 0.3mm/s ilerleme hızı ve farklı kesme derinliklerinde ölçülen ve hesaplanan kesme kuvveti bileşenlerinin tepe değerleri	85
Tablo 7.1. Kullanılan öznitelik tablosu	108
Tablo7.2. Titreşim verileri için karar tablosu.....	110
Tablo7.3. Belirleyicilik tablosu	110

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
a	Ölçekleme Parametresi
A_s	Kayma Yüzey Alanı
b	Öteleme Parametresi
E	Elastisite Modülü
f	Frekans
f_f	İşlenen Malzeme Faktörü
f_h	İmalat Yöntemi Faktörü
f_s	Soğutma Sıvısı Faktörü
f_v	Hız Faktörü
f_z	Bir Dişe Karşılık Gelen İlerleme
f_λ	Takım Eğim Açısı Faktörü
f_γ	Talaş Açısı Faktörü
F_v	Normal Kuvvet
F_u	Teğetsel Kuvvet
h	Deforme Olmamış Talaş Kalınlığı
k_j	Özgül Kesme Direnci
k_{sh}	Özgül Kesme Kuvveti
m_n	Dişlinin Normal Modülü
M	Eğilme Momenti
R_p	Dişlinin Bölüm Dairesi Yarıçapı
T	Sinyal Periyodu
N	Sinyal Örnek Sayısı
V_f	İlerleme Hızı
z	Kesici Diş Sayısı
α_n	Normal Talaş Açısı
ε	Deformasyon
θ	Kesici Takımın Yuvarlanma Açısı
σ_s	Normal Gerilme
τ_s	Kayma Gerilmesi

Kısaltmalar	Açıklama
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	Bilgisayar Sayımlı Kontrol
CWD	Choi Williams Dönüşümü
CWT	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
DVM	Destek Vektör Makineleri
DWT	Ayrık Dalgacık Dönüşümü
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
HHT	Hilbert Huang Dönüşümü
KKT	Karush Kuhn Tucker
kNN	K en Yakın Komşuluk Algoritması
KŞD	Koni Çekirdekli Dönüşüm
RO	Rastgele Orman Algoritması
STFT	Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü
VMD	Değişken Mod Ayrıştırma
YSA	Yapay Sinir Ağları
WV	Dalgacık Dönüşümü

1. GİRİŞ

Bu bölümde talaşlı imalatta kesme kuvvetinin belirlenmesi ve titreşim esaslı durum izleme teknikleri ile ilgili temel bilgiler verilmekte ve bu konularla ilgili literatürde yapılan çalışmalar özetlenmektedir. Bunlara ek olarak bu tez çalışmasının amacı, hedefleri ve organizasyonu açıklanmaktadır.

1.1. Genel Bilgiler

Talaşlı imalat, başta havacılık, enerji, otomotiv ve medikal sanayiler olmak üzere endüstride birçok alanda tercih edilen çok yönlü ve hassas üretim yöntemidir. Talaşlı imalat, bir malzemeye yüzey, şekil, boyut gibi istenen özellikleri kazandırmak için bir kesici takım ve güç kullanılarak yapılan, iş parçası üzerinden tabaka şeklinde malzeme kaldırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Talaşlı imalatın temelleri tarih öncesi dönemlere kadar uzansa da 1800'lü yılların başında ilk torna tezgahının ve 1800'lü yılların ortalarında ise ilk freze tezgahının geliştirilmesiyle serbest form yüzeye sahip iş parçaları imal edilmeye başlanmıştır ve günümüze kadar gelişerek ve yaygınlaşarak gelmiştir. Talaşlı imalat yöntemlerinde amaç, maksimum kesici takım ömrü, kısa üretim zamanı ve düşük maliyetle, iyi kalitede yüksek üretim miktarı elde etmektir. Talaşlı imalat yöntemleri ile farklı geometri ve boyutlarda parçalar işlenebilmektedir. Endüstride tornalama, frezeleme, taşlama ve delme yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri olup, talaş kaldırmak için kesici takımlar kullanılmaktadır. Talaş kaldırma işlemi sırasında ana parçadan talaş kaldırmak için kesici takıma kesme yönünde etki edecek şekilde kesme kuvveti olarak tanımlanan bir kuvvet uygulanmaktadır. Takıma uygulanan bu kesme kuvveti, talaş oluşumu ve talaş ile takım arasındaki sürtünmelere bağlı olarak talaş kaldırma işlemi süresince değişimler göstermektedir. Kesme kuvvetlerinin tespiti ve analizi, tüm talaşlı imalat yöntemlerinde üretilen iş parçasının kalitesinin artırılması, bununla beraber maliyetinin düşürülmesinde çok büyük bir öneme sahiptir. Kesme kuvvetleri talaşlı imalatta uygulanacak yöntemin seçilmesinde, takım tezgâhlarının, kesici takımların ve gerekli bağlama elemanlarının tasarımında önemli bir etkidir. Kesme sırasında oluşan bu kuvvetlerin doğru belirlenmesi kesme performansını ve birim parça maliyetini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte takım tezgâhının talaş kaldırma sırasında harcadığı enerjinin ve tezgah titreşimlerinin tespit edilmesinde, takım tezgâhının, takımların ve bağlama aparatlarının tasarımında ve boyutlandırılmasında, tezgâh rijitliği, mukavemeti ve

boyutlarının hesaplanmasında, kesme gücü ve buna bağlı olarak tezgah gücü hesaplanmasında kullanılmaktadır. Belirtilen bu sebeplerden dolayı talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin belirlenmesiyle ilgili literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Endüstride hata tespiti için yaygın olarak kullanılan durum izleme yöntemleri sayesinde, hatanın önceden tespit edilmesiyle bu hatanın başka sorunlara yol açması engellenmekte ve buna bağlı olarak büyük maliyet giderlerinin önüne geçilmektedir. Ayrıca gereksiz bakım ve arıza duruşlarının önlenmesi ve planlı hale getirilmesi sağlanmaktadır. Makinelerde hatanın varlığını tespit etmek için çeşitli yöntemler mevcut olmasına rağmen, durum izleme yöntemleri; işitsel-dokunsal-görsel denetim (muayene), performans izleme, termal izleme, aşınma izleme ve titreşim izleme şeklinde beş kategoride gruplandırılabilir. Titreşim izleme, sözü edilen durum izleme yöntemleri arasında en yaygın şekilde kullanılan ve en çok bilgiyi içeren yöntemdir [1]. Makinaların çalışması, genellikle makinenin bir parçasından diğerine iletilen titreşim içeren kuvvetlerin ve hareketlerin oluşumunu içermektedir. Bir hata oluştuğunda, izlenen titreşimin özellikleri değişmektedir. Bu değişimler bükülmüş veya eksantrik mil, yanlış hizalanmış bileşenler, dengesiz bileşenler, hatalı rulmanlar ve dişliler, lokal kesici takım hataları gibi çeşitli hataları tespit etmek için sıkça kullanılmaktadır. İmalat sanayisinde kesici takımların ve kesme işleminin izlenmesi ve hatanın önlenmesi geliştirilmiş kalite ve güvenilirliğe sahip üretimin sürekliliğini sağlamak ve üretim verimliliğini arttırmak için gereklidir. Talaşlı imalatta, kesici takımın yüksek performansla istenilen özelliklerde ve maksimum takım ömründe talaş kaldırması istenmektedir. Takım ömrünün doğru belirlenmesi ürün kalitesini ve üretim miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu amaçla hem ürün kalitesini ve üretim miktarını arttırmak hem de işletme maliyetlerini düşürmek amacıyla durum izleme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Talaşlı imalatta kullanılan durum izleme yöntemleri yüzey pürüzlülüğünü, boyut toleransını ve takım durumunu tanımaya ve izlemeye yardımcı olmaktadır. Durum izleme yöntemleri sayesinde hassas boyutlu ürün üretimi, yüksek performans ve gelişmiş takım tezgahı ömrü sağlanmaktadır. Talaşlı imalatta kesici takımın durumunu belirlemek için sistemden çeşitli algılayıcılar kullanılarak elde edilen titreşim sinyali, kesme kuvveti, akustik emisyon sinyali ve ses sinyali gibi proses parametreleri kullanılmaktadır. Elde edilen bu sinyaller sistemin çalışma durumu hakkında dinamik bilgi içermektedir. Bilgi içeren bu sinyallere zaman bölgesi, frekans bölgesi veya birleşik zaman frekans bölgesi analizleri gibi çeşitli sinyal işleme teknikleri uygulanarak takım durumu tahmin edilmektedir. Literatürde talaşlı imalat yöntemlerinde hata tespiti ve durum izleme yöntemleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır.

1.2. Literatür İncelemesi

Bu çalışmada modül freze ile dişli üretimi esnasında meydana gelen kesme kuvvetinin belirlenmesi ve kesici takımında oluşabilecek lokal diş hatalarının titreşim esaslı durum izleme yöntemleri ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle literatürde var olan çalışmalar incelenmiştir. İlk olarak talaşlı imalatta kesme kuvvetinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesine yönelik çalışmalar incelenmiştir. İkinci olarak ise talaşlı imalatta hata tespiti için kullanılan titreşim esaslı durum izleme yöntemlerini içeren çalışmalar özetlenmiştir.

1.2.1. Kesme Kuvvetlerinin Belirlenmesiyle İlgili Çalışmalar

Talaşlı imalatta kesme esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin doğru tahmini, kesme gücünün belirlenmesi, işleme hassasiyetinin geliştirilmesi, tezgah titreşimlerinin belirlenmesi ve iş parçası yüzey kalitesi ve geometrik hassasiyetin sağlanması için son derece önemlidir. Bunun yanında, kesme kuvvetleri son ürün kalitesini ve hassasiyetini ve bunlara bağlı olarak işleme performansını etkilemektedir [2]. Literatürde kesme kuvvetinin tahmini analitik, numerik ve mekanistik olmak üzere üç ana yaklaşımla incelenmektedir.

Analitik yaklaşımlar, kesme kuvvetleri ile malzemelerin sürtünme, geometri ve mekanik davranışları gibi çeşitli mekaniksel özellikleri arasındaki matematiksel ilişkiyi açıklayan yaklaşımdır, Takım ile iş parçası arasındaki ilişkiye bağlı olarak kesme kuvvetlerini sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak tahmin eden yaklaşım numerik yaklaşım olarak isimlendirilmektedir. Son olarak da deneysel verilerden elde edilen spesifik kesme katsayılarını kullanarak kesme kuvveti ile işlem değişkenleri arasında ilişkiyi kurarak daha kısa sürede kuvvet hesabı yapılmasına olanak sağlayan mekanistik yaklaşımlar mevcuttur [3]. Bu yaklaşımları içeren çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Gonzalo ve arkadaşları [3] yapmış oldukları çalışmada frezeleme esnasında zaman bölgesinde ölçülen ve simule edilen kesme kuvvetinin tanımlanması için doğrusal mekanistik yaklaşımla kesme kuvveti katsayılarının hesaplanmasını önermişlerdir. Sisteme ait denklemler en küçük kareler uydurma yöntemi kullanılarak çözülmüş olup kesme kuvveti katsayıları önerilen anlık kuvvet metodu ile çözülmüştür. Talaş kalınlığının ve kesici takım talaş açısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi önerilen yöntem kullanılarak analiz edilmiştir. Önerilen yöntemle elde edilen kesme kuvveti katsayılarının kesme kuvveti hesabında klasik kuvvet metoduna kıyasla daha etkili olduğu ispatlanmıştır.

Matsumura ve arkadaşları [4] yapmış oldukları çalışmada çevresel frezelemede cam kesme esnasında oluşan kesme kuvvetlerini ve parça yüzey kalitesini etkileyen kesme koşullarını incelemişlerdir. Deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti bileşenleri ve yüzey bütünlüğü incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar karbon çeliğinin frezelenmesi esnasında elde edilen kesme kuvveti değerleri ile kıyaslanmıştır. Bu değerler hem yukarı hem de aşağı frezelemede ölçülüp kıyaslanmıştır. Frezelemede cam kesme esnasında oluşan yüzey bütünlüğünün yukarı frezelemede daha iyi olduğu ve çatlağın aşağı frezelemede daha hızlı ilerlediği sonucuna ulaşmışlardır.

Omara ve arkadaşları [5] yapmış oldukları çalışmada yan frezeleme işlemi esnasında kesme kuvvetlerini hesaplamak ve 3D yüzey topoğrafyası üretmek için zaman bölgesi simülasyonunu kullanan yeni bir teknik önermişlerdir. Önerilen teknikte takım eğilmesi, takım kaçıklığı, yan yüz aşınması, makine-takım-iş parçası dinamiği etkileri dikkate alınarak kesme kuvveti katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca anlık talaş kalınlığını hesaplamak için de yeni bir teknik önerilmiştir. Önerilen yöntem ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topoğrafyasının deneysel sonuçlarla uyum yakaladığı tespit edilmiş olup aynı zamanda bu sonuçlar literatürde var olan simülasyon çalışmalarıyla da doğrulanmıştır.

Lamikiz ve arkadaşları [6] yapmış oldukları çalışmada yuvarlak uçlu kesici takımla yapılan frezeleme işlemi esnasında oluşa kesme kuvveti bileşenleri tahmin eden yarı mekanistik bir model önermişlerdir. Önerilen bu modelde talaş kalınlığı hem işleme yönü hem de parça eğiminin etkisi dikkate alınarak analitik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca kesme kuvvetinin ve anlık pozisyonların ölçülmesini sağlayan analiz aracı geliştirilmiştir. Farklı kesme koşullarında önerilen bu model kullanılarak kesme kuvveti bileşenleri tahmin edilmiştir. Bu değerler, gerçek kesme kuvveti bileşenleri ile kıyaslanmış ve birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Lai ve arkadaşları [7] yapmış oldukları çalışmada mikro ölçekli frezeleme prosesini karakteristiklerine, boyut etkisine, mikro kesici kenar yarıçapına ve minimum talaş kalınlığına odaklanarak derinlemesine incelemişlerdir. Çalışmalarında Johnson-Cook yapısal denklemi formüle edilerek malzeme güçlendirme davranışlarını incelemek için mikro kesici kenar yarıçapı ve iş malzemesinin kırılma davranışı da göz önüne alınarak mikron seviyede sonlu bir eleman modeli geliştirmişlerdir. Oluşturulan modeller ile talaş oluşumu ve mikro ölçekli frezelemenin boyut etkisi, malzeme güçlendirme davranışlarının ve minimum talaş

kalınlığının etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda malzeme güçlendirme davranışlarının, mikro ölçekli işlemenin boyut etkisinin ana nedeni olduğu bulunmuştur ve önerilen yapısal denklemin bu etkinin doğru bir şekilde açıklanması için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Afazov ve arkadaşları [8] yapmış oldukları çalışmada sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanarak takımın yörüngesi ve farklı mikro-frezeleme parametreleri (kesme takımı yarıçapı, ilerleme hızı, iş mili açılma hızı ve oluk sayısı) için kesilmemiş talaş kalınlığı belirleyerek mikro frezeleme kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesi üzerinde durmuşlardır. Geliştirilen sonlu elemanlar modeli ortogonal bir model olup aşınma etkisi dikkate alınarak geliştirilmiştir. AISI 4340 çeliği için farklı kesilmemiş talaş kalınlıklarında (0 - 20 m) ve hızlarda (104.7 - 4723 mm / s) bir dizi sonlu elemanlar analizi yapılmış ve kesme kuvvetleri, kesilmemiş talaş kalınlığı ve kesme hızı arasındaki ilişki doğrusal olmayan bir denklem ile tanımlanmıştır. Farklı besleme hızları ve mil açılma hızları için kesme kuvvetleri hem deneysel hem de teorik olarak araştırılmış ve sonuçların birbirleriyle çok iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Altıntaş ve arkadaşları [9] yapmış oldukları çalışmada piezo eyleyici kurulumu ile kesme kuvveti katsayılarını tespit etmek amacıyla yeni bir dinamik kesme kuvveti modeli tanımlamışlardır. Kesme kuvveti, talaş kalınlığı, kesme hızı ve titreşimlerin hız ve ivme terimleri kullanılarak ifade edilmiştir. Titreşimlere ait hız ve ivme terimleri piezo eyleyici tarafından çalıştırılan takım servosu tarafından üretilmiştir. Önerilen yöntemle elde edilen kesme kuvveti katsayıları, kesme hızının, takım aşınmasının ve titreşimin kesme işlemi üzerindeki tırlama etkisinin analizinde kullanılmıştır.

Araujo ve arkadaşları [10] yapmış oldukları çalışmada diş açma kuvvetlerinin öngörülmesi için mekanik bir model sunmuşlardır ve diş frezelemede kesme mekaniği için uç frezeleme işlemine benzer şekilde fakat modifiye edilmiş kesici kenar geometrisi ile analizler yapmışlardır. Talaş kalınlığı ve kesme kuvveti modelleri, kesici takımın özgün geometrisi göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Geliştirilen model diş frezeleme deneyleri kullanılarak kalibre edilmiş ve hem düz hem de helisel kesici uçlar ile 6061 Alüminyum diş frezelemesi için doğrulanmıştır. Modelin deneysel verileri % 10 hata dahilinde takip ettiğini gözlemlenmiştir. Takım ve diş geometrisinin diş açma prosesi üzerindeki etkileri bu model kullanılarak incelenmiştir. Her kesme kenarı için kavrama açısı artmasına ve kuvvetlerin artan kavrama açısı üzerine dağılmış olmasına bağlı olarak helezon açısı arttıkça tepeden vadiye kuvveti azaldığı gözlemlenmiştir.

Baohai ve arkadaşları [11] yapmış oldukları çalışmada dairesel uç frezeleme işlemi için kesme kuvveti tahmin modelini sunmuşlardır. Çalışmada takım yolu eğriliğinin talaş kalınlığına etkilerinin yanı sıra giriş ve çıkış açılarının etkileri analiz edilmiş ve doğrusal freze işleminin kesme kuvveti modeli daha sonra dairesel freze işlemlerine uyacak şekilde düzeltilmiştir. Dairesel frezeleme işlemi sırasında anlık kesme kuvvetleri önerilen modele göre tahmin edilmiştir. Geliştirilen kesme kuvveti modeli hem doğrusal hem de dairesel uç frezeleme işlemleri için uygulanabilir olduğu vurgulanmış olup yöntemin kullanılabilirliğini doğrulamak için sabit ve değişken radyal derinliğe sahip dairesel uç frezeleme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, ölçülen ve benzetilmiş sonuçların birbiriyle iyi uyduğunu göstermiştir.

Sonawane ve Joshi [12] yapmış oldukları çalışmada süper alaşımların bilyalı uç frezelemede ani kayma açısının öngörüldüğü analitik bir yaklaşım sunmuşlardır. Kesme kuvvetleri Johnson-Cook malzeme modeli uygulanarak iş malzemesinin kesme dayanımının gerilme, gerilme hızı ve sıcaklığa bağlılığı göz önünde bulundurularak tahmin edilmiştir. Kesme kuvvetleri, kesici üzerinde etkiyen kazıma kuvvetlerini dikkate alarak eğik kesme teorisi çerçevesinde hesaplanmaktadır. Önerilen analitik model talaş uzunluğu, genişliği ve kalınlığı dahil olmak üzere kesilmemiş ve kesilmiş talaş boyutlarını belirlenmesinde kullanılmaktadır. Talaş boyutlarının ve kesme kuvvetlerinin deneysel olarak doğrulanması sonucunda oluşturulan modelin sırasıyla %4 ve %1,5'lik bir hatayla tahmin edebildiği belirtilmiştir.

Zaman ve arkadaşları [13] yapmış oldukları çalışmada mikro uç frezelemede kesme işlemini karakterize etmede, takım ömrünü tahmin etmede ve süreci optimize etmede hayati bir rol oynayan kesme kuvvetinin modellenmesine yeni bir analitik yaklaşım geliştirmişlerdir. Deforme olmayan talaş kalınlığı yerine teorik talaş alanını tahmin ederek mikro uç frezede kesme kuvvetini tahmin etmek için yeni bir konsept oluşturulan bu çalışmada analitik yaklaşımda bugüne kadar yapılmayan, eksenel yönde kuvveti göz önüne alarak üç boyutlu bir analitik kesme kuvveti modeli verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kesme kuvvetinin teğet bileşeninin, mikro uç frezelemede kesme derinliğinin takım çapı oranının yüksek olması ve eksenel yönde önemli miktarda kesme kuvvetine yol açması nedeniyle üç boyutlu alana etki ettiği görülmüş ve bu modelde geliştirilen analitik kesme kuvveti ifadelerinin deneysel sonuçlarla %90 oranında uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Sun ve Guo [14] yapmış oldukları çalışmada 5 eksenli frezeleme işlemlerinde anlık kesme kuvvetlerini modellemek için takım hareket analizinin kullanıldığı yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu analizde öncelikle takım kaçıklığı dikkate alınarak talaş kalınlığı modellenmiştir. İkinci olarak kesici kenar belirlenerek kesme kuvveti katsayıları kalibre edilmiştir. Son olarak da ölçülen kesme kuvvetinden takım kaçıklığı parametrelerinin tanımlanması yöntemi önerilmiş ve kesme kuvvetlerini tahmin etmek için kesici takımın bağlı hareketinden yararlanılan mekanistik yöntem uygulanmıştır. Uygulanan yöntemin doğruluğunu kanıtlamak için farklı kesme koşullarında çeşitli doğrulama örnekleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde önerilen yöntemin kesme kuvvetlerini yüksek hassasiyetle tahmin edebildiği görülmüştür.

Tukora ve Szalay [15] yapmış oldukları çalışmada çok eksenli frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti katsayılarını belirlemek için kesme geometrisiyle ilgili herhangi bir kısıtlama içermeyen yeni bir kesme kuvveti modeli sunmuşlardır. Önerilen yöntem kesme kuvveti katsayıları işleme esnasında anlık olarak hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. Önerilen yöntem kullanılarak yapılan doğrulama testleri ile yöntemin anlık katsayıları belirlemede etkili olduğu ve öngörülen kuvvetlerin kademeli olarak gerçek kuvvet değerlerine yaklaştığı tespit edilmiştir.

Tuysuz ve arkadaşları [16] yapmış oldukları çalışmada talaş kalınlığı dağılımı ve kesme mekaniğini kullanarak aksenal ve radyal yöndeki kesme kuvveti bileşenlerini tahmin eden yeni bir yöntem önermişlerdir. Kesici kenarın işlenen malzemeye pozitif veya negatif bir eğim açısıyla girişi, işlenen malzemenin elasto-plastik deformasyonu dikkate alınarak analitik olarak modellenmiştir. Önerilen yöntem 5 eksenli uç frezeleme işleminde serbest yüzey işleme esnasında denenmiş olup, aksenal yönde kesme kuvveti tahmininde başarılı olduğu kanıtlanmıştır.

Srinivasa ve Shunmugam [17] yapmış oldukları çalışmada mikro uç frezeleme işleminde kesme kuvveti katsayılarını tahmin etmek için üst üste binen diş bağlantılarını dikkate alan yeni bir yöntem önermişlerdir. Mikro uç frezeleme işlemini makro uç frezelemeden farklı kılan kenar yarıçapı ve malzeme kuvvetlendirme etkileri önerilen yöntemde kullanılarak kesme kuvveti hesabı yapılmıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemle hesaplanan kesme kuvveti bileşenleri ile deneysel olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenlerinden enine kesme kuvveti %12.29'luk mutlak hata ile besleme kuvveti ise %19.49 oranında mutlak hata ile doğru tahmin edilmiştir.

Lee ve Altıntaş [18] yapmış oldukları çalışmada işlenmesi zor kabul edilen titanyum alaşımın helisel bilyeli uç freze ile işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerini tahmin eden bir metot önermişlerdir. Öncelikle bilyalı freze kesicilerin ve kılcal biçimli sarmal olukların geometrik modellenmesi yapılmıştır. Sonrasında kesme kuvveti bileşenlerini tahmin etmek için öncelikle yan kenar kuvvet bileşenleri modellenmiş ve doğrulama amacıyla farklı hız ve kesme derinliğinde kesme işlemleri tekrarlanmıştır. Sonuç olarak istatistiksel ve örnek zaman bölgesi simülasyon sonuçları incelenmiş ve önerilen yöntemin herhangi bir bilyeli freze geometrisi ve kesim koşulları için kesme kuvvetlerini doğru bir şekilde tahmin edebildiği kanıtlanmıştır.

Szymon [19] yapmış olduğu çalışmada kesme kuvveti bileşenlerini tahmin etmek için kesme koşullarını, yüzey eğim açısını ve kesici takım kaçıklığını dikkate alan bir yaklaşım önermiştir. Bu yaklaşım, çeşitli yüzey eğimli bilyalı frezeleme sırasında anlık kuvvet sinyallerinin bir giriş verisi olarak uygulanmasına dayandırılmıştır. Önerilen yöntem 55NiCrMoV6 çeliğinin frezelenmesi sırasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin tahmininde kullanılmış ve elde edilen sonuçlarda %16'nın altında bir hata oranıyla kuvvet bileşenlerinin doğru tahmin edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Zhu ve Zhang [20] yapmış oldukları çalışmada yüksek hızlı frezelemede kesme kuvvetini büyük ölçüde etkileyen kesici takımdaki eksantiriklik etkisini araştırmışlardır. Takım eksantiriklik etkisine göre şekil değiştirmemiş talaş kalınlığı, dış başına geometrik ilişkilere ve eksenel frezeleme aralıklarına göre tanımlanıp modellenmiştir. Nikel alaşımlarıyla yapılan frezeleme esnasında oluşan kesme kuvvetleri, önerilen yöntem ile elde edilen kuvvet sonuçları ile kıyaslanmış ve eksenel kesme kuvvetinin %1den daha az bir hata ile doğru tahmin edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Rodriguez ve Labarga [21] yapmış oldukları çalışmada mikro frezeleme işlemlerinde takım eksantiriklik etkisi, takım sapması, boyut etkisi ve takımın parçaya giriş ve çıkış açıları faktörlerini dikkate alan analitik bir kuvvet modeli geliştirmişlerdir. Bu faktörler talaş kalınlığının hesaplanmasında kullanılmış ve takımın her pozisyon açısı için lineer denklem sistemi oluşturulmuştur. Önerilen model ile hesaplanan kuvvet bileşenleri ile deneysel olarak ölçülen kuvvet bileşenleri kıyaslanmış ve işlem titreşimlerine rağmen sonuçların son derece uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Wang ve arkadaşları [22] yapmış oldukları çalışmada minimum talaş kalınlığı etkisi, kesici sapması ve mil aşınması göz önünde bulundurularak, bir mikro frezeleme kuvveti modeli ve optimum mikro freze parametrelerini belirleme yöntemi geliştirmişlerdir. Mikro frezeleme kuvveti modeli, talaşlı işleme parametrelerine ve kesici kenarların dönme yörüngesine dayanarak belirlenen anlık yansıtılan kesme alanının ve kesme katsayılarının fonksiyonu olarak türetilmiştir. Kabul edilebilir (emniyetli) bir mikro kesici sapma değeri verildiğinde, maksimum kabul edilebilir kesme kuvveti bilgisayar destekli analiz ile tahmin edilmiştir. Optimum talaşlı işleme parametreleri daha iyi işleme verimliliği ve doğruluğu için geliştirilen kesme kuvveti modeline dayanarak hesaplanmıştır. Kesme kuvveti modelini ve en uygun kesme parametrelerini belirleme yöntemini doğrulamak için mikro freze deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçların model ve yöntemin uygulanabilirliğini ve etkinliğini gösterdiği vurgulanmıştır.

Dimitriou ve Antoniadis [23] yapmış oldukları çalışmada dişli azdırma işleminin gerçekçi ve doğru simülasyonuna odaklanarak, alın ve helisel dişlilerin imalat simülasyonu için üç boyutlu bilgisayar destekli tasarıma dayanan etkili ve olgusal bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmada dişli azdırma kinematiği doğrudan bir dişli boşluğunda uygulanmakta ve her üretici pozisyon penetrasyon hacmini iş parçasına bağlayan bir uzaysal yüzey izi oluşturmaktadır. Geliştirilen HOB3D yazılım programı, ticari bir CAD yazılım paketinin modelleme ve grafik özelliklerini kullanarak, düz ve helisel dişlilerin imalatını hassas bir şekilde simüle etmektedir. Elde edilen üç boyutlu katı geometrik veriler, talaşlar ve dişliler, kesme kuvvetlerinin tahmini, takım gerilmeleri ve aşınma gelişiminin yanı sıra dişli çark işleminin optimizasyonu gibi, daha fazla araştırma için gereken tüm geometrik bilgiyi sağlamaktadır.

Wan ve Zhang [24] yapmış oldukları çalışmada aynı anda kesici/iş parçası sapmalarını ve daldırma açısı değişimini anlık kesilmemiş talaş kalınlığının ve kesme kuvvetlerinin hesaplanmasında birleştiren genel bir yöntem sunmuşlardır. Esnek parçaların frezeleme ile işlenmesinde kesme kuvvetlerinin hesaplanması için önemli olan anlık kesilmemiş talaş kalınlığının hesaplanması için rejenerasyon modeli göz önüne alınıp iki komşu diş yolu merkezi arasındaki relatif pozisyonlara dayanarak yeni bir yöntem sunulmuştur. Geliştirilen yöntemler ile hem kesicinin iş parçasından geçmesi/ayrılması anlık olarak belirlenmekte hem de anlık kesilmemiş talaş kalınlığının ve radyal kesme derinliğinin hesaplanması iteratif olarak yapılmaktadır. Yöntemin geçerliliğini göstermek için, esnek uç frezeleme işlemi sırasında kesme kuvvetinin ve anlık kesilmemiş talaş kalınlığının hem teorik hem de nümerik

örnekler yapılmış ve mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ilerejenerasyon mekanizmasının kısa ömürlü olduğu ve esnek statik frezeleme işleminde birkaç diş periyodundan sonra kaybolacağı vurgulanmıştır.

Ahearne ve Baron [25] yapmış oldukları çalışmada ASTM F75 biyomedikal dereceli kobalt krom molibden (Co-Cr-Mo) alaşımının kesilme prosesi incelemiş ve tam faktörlü, ortogonal kesme deneyinin sonuçlarını sunmuşlardır. Bu deneyler sırasıyla 20 ile 140 μm ve 20 ile 60 m/dak aralığında değişen, deforme olmayan talaş kalınlığının ve kesme hızının bir fonksiyonu olarak kuvvet bileşenlerinin (teğetsel kuvvet ve besleme kuvveti) ölçülmesini içermektedir. Sonuçlar, 20 ve 60 m/dak arasındaki kesme hızlarında deforme olmayan talaş kalınlığı ile kuvvet bileşenlerinde beklenen doğrusal bir artış göstermiştir. Ancak, 40 m/dak ara kesme hızında, hızın sürekli etkisine nazaran süreksiz etkisi olduğunu gösteren 60 μm ile 80 μm arasında bir geçiş olmuştur. Ayrıca sonuçlar aynı zamanda kesme kuvvetleri ve Kienzle denklemlerinin katsayılarının belirlenmesini sağlamaktadır.

Khoshdarregi ve Altıntaş [26] yapmış oldukları çalışmada rastgele diş profillerine ve besleme planlarına sahip çok noktalı kesici uçlarla diş açmada kesme kuvvetlerini öngörmek için geliştirilmiş ve sistematik bir yaklaşım sunmuşlardır. Talaş, kesme kenarı boyunca ayrıklaştırılmış olup değişken efektif eğimli kesme açıları ve talaş kalınlığı dikkate alınarak her eleman için kesme kuvveti katsayıları hesaplanmaktadır. Doğrusal olmayan Kienzle kuvvet modeli, düşük talaş kalınlığı değerlerinde kenar yarıçapının etkisini hesaba katmak için kullanılmıştır. Toplam kesme kuvvetleri, kesici uç koordinat sistemindeki temel kuvvetler çözülerek ve bunların bağlantılı dişler boyunca birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Diş sayısına ve besleme planına bağlı olarak, talaş sınırlarını belirlemek için dört olası vaka incelenmiştir. Çip alanını ayrıklaştırmak için çipin üst ve alt bantları arasında dikine ayrılma çizgileri oluşturmak için sistematik bir arama algoritması önerilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kesme kuvvetlerinin tahminindeki hata, payanda ekinin yan kenar yüzlerinin şiddetli sürtünmesi nedeniyle V-profiline kıyasla daha büyüktür. Deneysel olarak doğrulanan bu geliştirilmiş mekanik modelin özel diş profilleri ve besleme planları olan çok noktalı kesici uçlar için talaş ve kesme yükü dağılımını tahmin etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Korkut ve Boy [27] yapmış oldukları çalışmada AISI 1117 çeliğinin tornalama işlemi sırasında kesme parametrelerine bağlı olarak kesici takımında oluşan kesme kuvvetlerini deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile Kienzle yaklaşımı ile elde edilen teorik sonuçları

karşılaştırmışlardır. Deneyler sırasında beş farklı kesme hızı ve ilerleme miktarı ve iki farklı kesme derinliği kullanılmıştır. Kesme kuvvetlerinin kesme hızı arttıkça azaldığı, ilerleme miktarı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarının, teorik sonuçlar ile benzer eğilimler gösterdiği ve deneyler sonucunda, kesme hızındaki artışla yüzey kalitesinde bir iyileşme, ilerlemedeki artışla birlikte ise yüzey kalitesinde bir kötüleşme eğilimi görüldüğü sonucunu elde etmişlerdir.

Yoon ve Kim [28] yapmış oldukları çalışmada özgül kesme direnci katsayısını dikkate alarak teorik kesme kuvvetinin formüle edilmesi için mekanik kesme kuvveti modeli önermişlerdir. Ayrıca her yönde parmak frezeleme işlemlerinde, özgül kesme direnci değerlerini katsayılar ile çoğaltarak kesilmemiş talaş kalınlıklarını hesaplamışlardır. Basit parmak freze operasyonlarında ölçülen kesme kuvveti ile iş parçasının geometrik şeklini dikkate alınarak teorik kesme kuvveti modelinin verdiği değeri karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak önerilen modelin kesme kuvvet değeri ile gerçek ölçülen kesme kuvveti değerlerinin tutarlılık gösterdiğini ve farklı ve karmaşık koşullardaki başlangıç ve bitiş dalma açısına sahip parmak frezeleme operasyonlarının kesme kuvvetlerinin tahmininde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

1.2.2. Talaşlı İmalatta Titreşim Esaslı Durum İzleme ve Hata Tespiti ile İlgili Çalışmalar

İmalatta kesici takımların ve kesme işleminin izlenmesi ve hatanın önlenmesi geliştirilmiş kalite ve güvenilirliğe sahip üretimin sürekliliğini sağlamak ve üretim verimliliğini arttırmak için gereklidir. Talaşlı imalatta takım kırılması ve takım aşınması sık karşılaşılan hata tipleridir. Takım aşınması ilerlemiş bir arıza olup ya da krater aşınması şeklinde sonuçlanır. Takım aşınmasının erken aşamalarında müdahale yapılmazsa, aşınmış kesici takımların kullanımı düşük işlem kabiliyetine ve ürün kalitesine yol açacaktır. Takım dış kırılması ise bir ya da birden fazla dişin kesme kenarının veya kesici dişin tamamen kırılması olarak tanımlanabilir. Bu tip hata ise ürün kalitesinde ciddi derecede bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle işlemin sürekliliğini ve etkinliğini arttırmak için kesici takım izlemesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde kesici takımdaki hatanın tespiti için, kesme kuvveti, tork, akustik emisyon, kesme sıcaklığı, besleme akımı ve titreşim gibi kesici takım ile ilişkili parametreler ölçülerek yapılan durum izleme ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Kesme hızı, talaş kalınlığı, takım kesme kalitesi gibi kesme parametreleri kesme sırasında meydana gelen titreşimler üzerinde oldukça etkilidir ve takımda oluşabilecek herhangi bir hata

durumunda titreşim özellikleri değişmektedir. Bu değişim de hatanın tespitini ve sınıflandırılmasını mümkün kılmaktadır [29]. Bu sebeple titreşim izleme çok tercih edilen bir yöntem olup literatürde bu konuyla ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Yesilyurt [29] yapmış olduğu çalışmada frezeleme esnasında farklı besleme hızlarında parmak frezeden kaynaklı hatanın tespiti için ortalama değişim frekansının kullanımını önermiştir. Tüm deneyler konvansiyonel freze tezgahında dört kanallı parmak freze kullanılarak yapılmış ve sağlıklı ve hatalı durumlardaki titreşimler elde edilmiştir. Titreşim sinyallerinin frekans bölgesi incelemeleri yapılmış ve sinyalin skalogramının ortalama değişim frekansı hesaplanmıştır. Ortalama değişim frekansının hata miktarı çok küçük dahi olsa, hatanın varlığını tespit etmede çok duyarlı olduğu görülmüştür. Bunun yanında ortalama frekans değişiminin, besleme oranındaki herhangi bir değişime karşı oldukça hassas olduğu ve hasarın ilerlemesini en iyi şekilde yansıttığını tespit etmiştir.

Madhusudana ve arkadaşları [30] yapmış oldukları çalışmada yüzey frezelemede takım hatasını tespit etmek için makine öğrenmesi algoritmalarından karar ağacını tekniğinin kullanımını sunmuşlardır. Bu amaçla kesme esnasında sağlıklı ve hatalı durumlardaki ses sinyalleri elde edilmiştir. Karar ağacı algoritmasında öznitelik olarak ses sinyalinin ayrık dalgacık dönüşümü kullanılmış ve kesici takım hatalarının (yan aşınma, kırılma, ufalama) sınıflandırılma performanslarını incelemiştir. Deneysel sonuçlar kullanılan algoritmanın %81 oranında iyi bir sınıflandırma doğruluğu sağladığını bu sebeple yüzey frezelemede hata tespitinde etkili bir sınıflandırıcı olduğunu kanıtlamıştır.

Boutros ve Liang [31] yapmış oldukları çalışmada talaşlı imalatta ve dönen makinalarda karşılaşılan mekanik hataları teşhis etmek için ayrık zamanlı Hidden Markow modelinin kullanımını önermişlerdir. Önerilen model kesici takım hatalarının (aşınma/kırılma) ve rulman arızalarının (iç bilezik, dış bilezik) teşhisi için kullanılmıştır. Kesici takım hatalarının teşhisinde %95in üzerinde takım durumu doğru tespit edilmiştir. Rulman arızalarında ise hata şiddeti ve hatanın konumu (iç bilezik, dış bilezik) %96 başarıyla doğru tespit edilmiştir.

Lamraoui ve arkadaşları [32] yapmış oldukları çalışmada yüksek hızlı frezelemede takım aşınması ve tırlamayı tespit etmek için titreşim sinyallerine uygulanan bir metot önermişlerdir. Deneylerde kesme işleminde alüminyum alaşımı kullanılmış ve titreşim sinyalleri ivmemetreler yardımıyla toplanmıştır. Hata tespiti için titreşim sinyallerine spektral

korelasyon ve Wigner Ville spektrumu uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda tırlama durumunda enerji azalması gözlemlenmiştir. Wigner Ville spektrumunun takım aşınması ve tırlamanın erken teşhisinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Liu ve arkadaşları [33] yapmış oldukları çalışmada frezelemede tırlamanın teşhisi için Değişken Mod Ayırıştırma (VMD) ve enerji entropisine dayanan yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Frezeleme işleminde tırlama meydana geldiğinde, tırlama frekans bantlarında enerji emilmektedir. Bu sebeple tırlamanın otomatik olarak tespiti için enerji entropisinden yararlanılmıştır. Tırlama bilgisini içeren titreşim sinyalleri simüle edilmiş ve 3 farklı kesme koşulunda deneyler yapılmıştır. Yöntem hem simülasyon sinyallerine hem de deneysel olarak elde edilen sinyallere uygulanmış ve sonuçlar tırlamanın başarılı bir şekilde tespit edildiğini kanıtlamıştır.

Bassiuny ve Li [34] yapmış oldukları çalışmada parmak frezede diş kırılmasından kaynaklı hatanın tespiti için besleme motoru akım sinyallerine Hilbert Huang dönüşümünün (HHT) ve düzgünleştirilmiş doğrusal olmayan bir enerji operatörünün (SNEO) uygulanmasını önermişlerdir. Önerilen algoritmaların performansını gözlemlemek amacıyla CNC Dik İşleme Merkezinde 4 kanallı parmak freze kullanılarak deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, besleme motoru akım sinyallerinin kesme kuvveti ile doğrudan ilişkili olduğunu ve buna bağlı olarak bu yöntemin çeşitli kesim koşullarında doğru ve verimli bir şekilde hatayı tespit edebildiğini göstermektedir.

Cao ve arkadaşları [35] yapmış oldukları çalışmada frezelemede takım kırılmasından kaynaklı hatanın akustik emisyon sinyalleri yoluyla tespiti için kaldırma şemasına ve Mahalanobis mesafesine (MD) dayalı yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde sağlıklı ve hatalı takımlara ait AE sinyalleri birbirine benzememektedir. Dalgacıklara dayalı kaldırma şeması toplanan verileri ayırtmak için kullanılmıştır. Önerilen yöntem dik CNC freze tezgahından elde edilen sinyallere uygulanmış ve yöntemin hatayı başarılı bir şekilde tespit edebildiği görülmüştür.

Madhusudana ve arkadaşları [36] yapmış oldukları çalışmada histogram özellikleri ve K-star algoritması tekniği kullanılarak makine öğrenme yaklaşımına dayalı yüzey frezelemede kesici ucun hata tespitini ele almışlardır. Çelik alaşım 42CrMo4'ün işlenmesi sırasında freze takımının sağlıklı ve farklı hata koşulları altında titreşim sinyalleri kullanılarak histogram özellikleri elde edilmiştir. Çıkarılan tüm özelliklerden göze çarpan özellikleri seçmek için

karar ağacı tekniği kullanılmış olup seçilen bu özellikler K-star algoritması temelli sınıflandırıcıya girdi olarak verilmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak, K-star algoritmasının histogram özellikleriyle %94 ile %96 arasında iyi bir sınıflandırma doğruluğu sağladığı ve frezelemede kesici uç hata tespiti için uygun olduğu belirtilmiştir.

Ghosh ve arkadaşları [37] yapmış oldukları çalışmada takım durumunun izlenmesi için sinir ağı tabanlı bir sensör füzyon modeli geliştirilmişlerdir. Ana kesme kenarının ortalama yanıl aşınmasını tahmin etmek için, kesme kuvvetleri, iş mili titreşimi, iş mili akımı ve ses basıncı seviyesi gibi bir dizi işleme bölgesi sinyalinden elde edilen özellikler birleştirilmiştir. Kesici takımın durum izlenmesi için geçici kayıt için sinyal seviyesi segmentasyonu, özellik alanı filtreleme, uçdeğer kaldırma ve tahmin alanı filtreleme gibi yeni stratejiler önerilmiştir. Çalışmanın sonucunda daha az maliyetli ve kolayca monte edilebilen akım ve gerilim sensörleri, gerçek endüstriyel kesici uç durum izleme için oldukça iyi bir dinamometrenin (kuvvet sensörü) yerine geçebileceği ve birden fazla sensör kullanan teknikler, TCM'nin tek sensörlü benzerlerine göre aşınma tahminini iyileştireceği belirtilmiştir. Elektrik akımı ve ses basıncı seviyesi ölçümlerinin tatmin edici tahmin sonuçları verdiği görülmüştür.

Hsueh ve Yang [38] yapmış oldukları çalışmada yüzey frezelemede takım kırılmasının tahmininde kullanılmak üzere kesme kuvveti sinyalinin özelliğini sınıflandırmak için bir destek vektör makinesi tabanlı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Takım kırılmasından dolayı kesme kuvveti sinyalinin özelliğini çıkarmak için dış başına kesme kuvveti sinyallerinin ortalaması alınmıştır. Bu sinyaller destek vektör makinesi algoritmasının öğrenme sürecinde kullanımı ve bu algoritmanın karar fonksiyonunun çıktısı da takım kırılması olan veya olmayan bir frezeyi tanımlamak için kullanılmıştır. Frezeleme işlemlerinde bu takım kırılma tahmin sisteminin uygulanabilirliğini doğrulamak için deneysel sonuçlar sunulmuş ve bu sonuçlar doğrultusunda geliştirilen yöntemin farklı kesme koşullarında bile frezelemede takım kırılmasının tespiti için yüksek hassasiyet, sağlamlık ve güvenilirlik sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca bir çevrimiçi akıllı sensör sistemi ile gerçek zamanlı kesici takım kopma tespiti için bu yöntemin başarıyla kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Kuljanic ve Sortino [39] yapmış oldukları çalışmada takım aşınmasının insansız işleme sistemlerinde kesme işlemi sırasında çevrimiçi olarak belirlenmesine yardımcı olan ve yüzey frezelemede yeni bir dönen dinamometre kullanılarak deneysel olarak tartışılan bir yöntem geliştirmişlerdir. Takım aşınması tahmini için kesme kuvveti sinyallerinin özellik parametrelerinin basit analizi ile belirlenebilecek takım aşınma göstergeleri kavramı tanıtılmıştır. Dönen dinamometre kullanılarak elde edilen kesme kuvveti sinyallerinin

bozulması, normalize Kesme Kuvveti göstergesi ve Tork-Kuvvet Mesafesi göstergesi gibi takım aşınma göstergeleri uygulanarak çözümlenmiştir. Geliştirilen yöntemin kesici takım dişinin iş parçasının genişliğinden daha büyük olması durumunda, bir diş kesici veya çoklu diş kesici ile yüzey frezelemede takım durumunun izlenmesi için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Painuli ve arkadaşları [40] yapmış oldukları çalışmada verimli yüzey işlemleri için gerekli olan takım sağlığının durumunun izlenmesi için titreşim sinyallerinden yararlanarak sağlıklı ve hatalı durumları tespit eden bir yöntem sunmuşlardır. Titreşim sinyallerinden (iyi ve hatalı koşullar) çıkarılan standart sapma, kurtosis ve çarpıklık gibi tanımlayıcı istatistiksel özelliklerin giriş olarak kullanılarak takım durumunu sınıflandırmak için K-star algoritması üzerinde çalışılmıştır. Sınıflandırma doğruluğundaki istatistiksel özelliklerin cevabı da incelenmiş olup elde edilen sonuçlar doğrultusunda K-star algoritmasının %78 sınıflandırma doğruluğunu elde edebildiği söylenmiştir.

Gangadhar ve arkadaşları [41] yapmış oldukları çalışmada tornalama işleminde ivmemetre kullanılarak elde edilen titreşim sinyallerini kullanarak çevrimiçi takım durumu izleme için makine öğrenme teknikleri tabanlı arıza tespiti yapmışlardır. Yeni ve kullanılmış takım uçları ile yapılan deneyler ile elde edilen titreşim sinyallerinin ortalama, standart hata, kurtosis, mod ve standart sapma gibi istatistiksel özellikleri çıkarılmış ve önemli olan özellikler bir sınıflayıcı olarak da kullanılan J48 algoritması yardımıyla seçilmiştir. Sınıflandırıcıya girdi olarak verilen önemli özellikler ile sınıflamanın doğruluğu incelenmiştir. J48 algoritmasının sonuçları, kesici takımın durumunu sınıflandırmak için kullanılmış ve yapılan deneyler sonucunda tespit doğruluğu %89.38 olarak bulunmuştur.

Palanisamy ve arkadaşları [42] yapmış oldukları çalışmada takım aşınmasını öngörmek için regresyon matematiksel ve yapay sinir ağı (YSA) modelleri olmak üzere iki farklı modele odaklanmışlardır. Kesme aşınması, besleme ve kesme derinliği girdi parametreleri olarak alınırken, frezeleme işlemi sırasında ölçülen çıktı değişkeni olarak ta yan yıpranma alınmıştır. Deney tasarımı tekniğine dayalı takım aşınmasının, karbür kesici kullanılarak AISI 1020 çeliğinde bulunan universal bir freze makinesinde ölçülmesi için deneyler yapılmıştır. Deneysel değerler ile altı regresyon modelini geliştirmek için Sigma yazılımı yardımıyla katsayıları bulunmuştur. Ayrıca deneysel veriler ileri geri beslemeli yapay sinir ağını (YSA) takım aşınmasının tahmininde eğitmek için de kullanılmıştır. Her iki modelin de tahmin ettiği yanıt değerleri, yani regresyon ve YSA değerleri, deneysel değerlerle karşılaştırılmış ve

kestirimci sinir ağı modelinin, eğitilmiş aralıktaki takım yan yıpranması tahminlerini daha başarılı bir şekilde yaptığı belirtilmiştir.

Cho ve arkadaşları [43] yapmış oldukları çalışmada freze işlemi sırasında oluşan anormallikleri tanıma ve bu işlemde düzeltici eylemi başlatma kabiliyeti sağlamak için bir destek vektör makinesi öğrenme algoritması kullanan akıllı bir takım ucu kırılma tespit sistemi önermişlerdir. Sistemde kesme kuvvetlerini ve güç tüketimini kaydetmek için çoklu sensörler kullanılmış olup sistemin performansı, çoklu doğrusal regresyon modeline dayanan alternatif bir algılama sisteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen modelin takım kırılmasının tespiti için sıkı bir eşik değeri ile iyi performans gösterdiği ve eğitim veri setindeki hataların azaltılmasında ve görülmemiş verilerin genelleştirilmesinde geleneksel çoklu regresyon modelinden daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır. Önerilen sistemin, makinenin aksaklık süresini azaltacağı ve bunun da üretim maliyetlerinin düşmesine ve müşteri memnuniyetinin artmasına neden olacağı belirtilmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve Hedefleri

Bölüm 1.2’de frezelemede kesme esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin teorik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesine yönelik çalışmalar ve kesici takımdan kaynaklı hatanın tespiti için kullanılan durum izleme yöntemleri ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Literatürde var olan çalışmalar incelendiğinde kesici takım olarak evolvent profile sahip modül frezenin kullanıldığı çalışmalara bilgin dahilinde karşılaşılmamıştır. Buna ek olarak birleşik zaman frekans bölgesi incelemeleri yardımıyla kesici takım hatalarının tespitine yönelik çalışmalar daha az sayıdadır. Bu çalışmada ise yapılan literatür araştırmasına dayanarak kesici takım olarak modül freze kullanılmıştır ve dişli üretimi sırasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin belirlenmesi ve kesici takımda oluşabilecek lokal diş hatalarının titreşim esaslı durum izleme yöntemleri ile tespit edilmesi amaçlanmaktadır ve ortaya konulan hedefler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Kesme kuvveti bileşenlerinin analitik olarak modellenmesi ve belirlenmesi
- Deneysel olarak kesme kuvveti bileşenlerinin belirlenmesi ve kesici takımdaki lokal hataların titreşim izleme yardımıyla tespit edilmesine olanak sağlayacak bir deney düzeneğinin oluşturulması
- Kesme kuvveti bileşenlerinin deneysel olarak tahmin edilmesi
- Kesici takımın farklı dişlerine uygulanan farklı şiddetteki lokal hataların tespit edilmesi

- Hata tespitinde zaman ve frekans bölgesi incelemeleri, sürekli dalgacık dönüşümü ve sınıflandırma tekniklerinden yararlanılması

1.4. Tezin Organizasyonu

Bu çalışmada modül freze yardımıyla dişli üretimi esnasında meydana gelen kesme kuvvetinin belirlenmesi ve kesici takımda oluşabilecek lokal diş hatalarının titreşim esaslı durum izleme yöntemleri ile tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla;

Bölüm 1’de; tez konusuna temel teşkil edebilecek literatür çalışmaları incelenmiştir. Yapılan çalışmanın amacı ve hedefleri açıklanmıştır.

Bölüm 2’de; Metal kesme, talaş kaldırma ve kesme kuvvetleri ile ilgili temel esaslar detaylandırılmıştır.

Bölüm 3’te; kesici takımda oluşabilecek lokal hatanın tespiti için zaman ve frekans bölgesi incelemeleri ve sürekli dalgacık dönüşümü ile sınıflandırma tekniklerinden yapay sinir ağları (YSA), destek vektör makineleri (DVM), rastgele orman (RO) ve k en yakın komşuluk (KNN) algoritmalarından detaylandırılmıştır.

Bölüm 4’te; modül freze kullanılarak yapılan dişli üretimi sırasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin deneysel olarak belirlenmesi ve meydana gelen titreşimlerin tespit edilmesi amacıyla oluşturulan deney düzeneği ve kullanılan cihaz ve ekipmanlar ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

Bölüm 5’te; modül freze kullanılarak yapılan diş kesimi esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin teorik ve deneysel yaklaşımlarla belirlenmesi anlatılmıştır. Kienzle model esasına göre teorik kesme kuvvetinin hesaplanması ve bununla beraber deneysel olarak deformasyon ölçümünden yararlanılarak kesme kuvvetinin belirlenmesi açıklanmıştır. Teorik ve deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Bölüm 6’da; kesici takım diş kırılmasından kaynaklı hataların titreşim izleme yöntemleri kullanılarak tespit edilmesi sunulmuştur. Kesici takıma 3 farklı hata şiddeti uygulanarak 3 farklı kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri esnasında elde edilen titreşim sinyallerinin zaman ve frekans bölgesi incelemeleri ve sürekli dalgacık dönüşümü kullanılarak hatalar tespit edilmiştir.

Bölüm 7’de; kesici takımında oluşan lokal hataların sınıflandırma teknikleri kullanılarak tespit edilmesi sunulmuştur. Modül freze yardımıyla dişli üretimi esnasında kesici takım diş kırılmasından kaynaklı hatanın tespiti için deneyler sırasında elde edilen titreşim sinyalleri kullanılmıştır. Yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, rastgele orman ve en yakın komşuluk algoritmaları kullanılarak hem hata olup olmadığı hem de eğer varsa hatanın derecesi tespit edilmiştir.

Bölüm 8’de; bu çalışma sonucunda elde edilen genel ve özel sonuçlar detaylandırılmıştır.



2. TALAŞLI İMALAT

Bu bölümde talaşlı imalat yardımıyla kesme işleminin esasları, kesme modelleri ve meydana gelen kesme kuvvetleri hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

2.1. Talaşlı İmalata Giriş

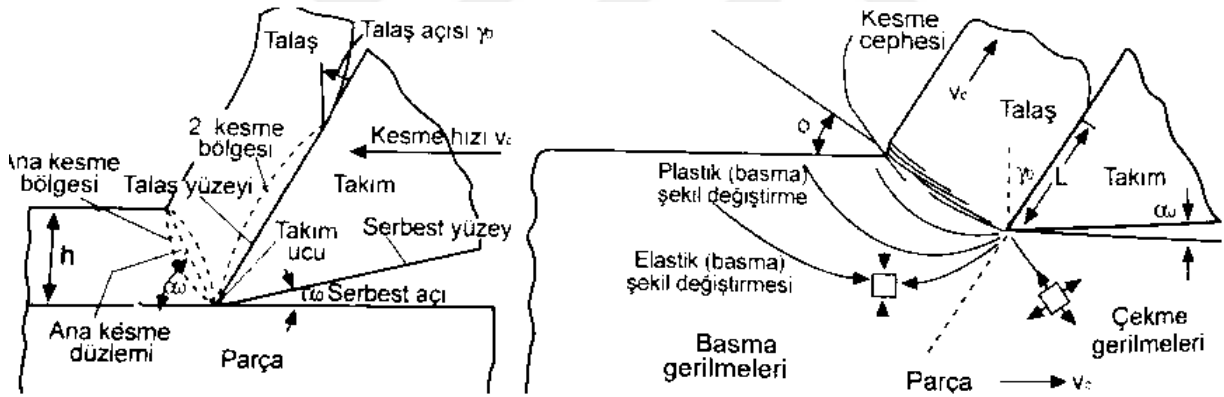
Talaşlı imalat, şekil verilecek olan iş parçası üzerinden kesici takımlar kullanılarak küçük parçacıklar halinde talaş kaldırma işlemidir. Bu işlem birbirinden farklı amaçlar için tasarlanmış olan kesici takımlar yardımıyla tezgâh ismi verilen makineler kullanılarak yapılmaktadır. İmalatta, metal, plastik ve ahşap gibi malzemeler talaşlı olarak işlenerek istenilen şekil ve ölçülerde parça üretimi sağlanmakta olup, bunlara ek olarak delik, vida, diş ve kanalların açılması gibi işlemler içinde talaşlı imalattan yararlanılmaktadır. Kullanılan tezgâhlarda kesici takıma kesme, ilerleme ve yardımcı olmak üzere üç farklı hareket çeşidi verilerek imalat işlemi gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu hareketleri tanımlamak gerekirse, talaş kaldırmak için yapılması gereken harekete kesme hareketi, parçanın boyutları boyunca işlenmesi için yapılması gereken hareket ilerleme hareketi ve son olarak da takımın parçaya göre konumunu ayarlamak için parçanın yaklaşması ve uzaklaşması için yapılması gereken işleme de yardımcı hareket denilmektedir. Bu temel hareketlerden kesme hareketi dönme veya doğrusal olmakla beraber ilerleme ve yardımcı hareketler ise genelde doğrusal hareket şeklinde olmaktadır. Hem kesme hem de ilerleme ve yardımcı hareketleri takım veya parça tarafından yapılması, işlenecek parçanın üzerinden talaş kaldırmada birbirinden farklı yöntemlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu yöntemler temel olarak tornalama, frezeleme, delme, taşlama ve planyalama/vargelleme olarak sıralanabilir. Tornalama işleminde işleme yapılacak olan tezgâhın ayna adı verilen bölümüne bağlanan iş parçası döndürülerek sabit olan kesici ucun dönen parçaya uzaklaştırılıp yakınlaştırılmasıyla yapılmaktadır. Frezeleme işlemi de genel amacı ve işlemleri itibariyle tornalamaya benzese de tornalamadan farklı olarak kesici takım dönmekte olup, işlenecek parça hareketlidir. Delik delme işlemi ise iş parçası üzerine silindirik bir deliğin matkap adı verilen bir takımla yapılması işlemidir. Bu işlem için kullanılan tezgâha matkap tezgâhı adı verilir. Delme işlemi, delik açma işlemi dışında broşlama, havşa yuvası açma ve raybalama gibi çeşitli işlemleri de içermektedir. Bütün bu delme işlemlerinde frezelemeye benzer olarak ana parça sabit durmakta kesici takım dönel hareket yapmaktadır ve dönel hareket yapan kesici ucun doğrusal hareketi yardımıyla

talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Taşlama işleminde ise işlenen parçanın yüzeyi taşlama tezgâhında yüksek hızda dönen kesici taşlara temas ettirilerek düşük derinliklerde talaş kaldırılması yapılmaktadır. Bu işlem parçanın yüzey özelliklerini hassas bir şekilde değiştirmemize imkân sağlamaktadır. Planyalama ve vargelleme işleminde ise doğrusal hareket yapılarak talaş kaldırma yapılır. Planyalama işleminde takım sabit iken parça hareketlidir fakat vargellemede ise tam tersi bir süreç geçerlidir. Bahsedilen tüm bu talaşlı üretim yöntemlerini gerçekleştirmek için imalat sanayinde birçok makine (tezgâh) ve makine parçaları ile birçok kesici takım tasarımları geliştirilmiştir.

2.2. Talaş Kaldırma Teorisi ve Talaş Oluşumu

Talaş kaldırma teorisine bakıldığında, işlenecek malzemenin üzerinden talaşın nasıl kaldırıldığı ve kesici takımın malzemeye göre konumlandığı yerde nasıl bir işlem gerçekleştirdiğinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Öncelikle takım malzemesinin sertliğinin parça malzemesinden daha sert olması koşulu sağlanıp takım işlenecek parça üzerinde yeterli bir kuvvetle bastırılıp hareket ettirildiğinde, takım ucunun temas ettiği metal malzemede öncelikle elastik daha sonra ise plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu şekil değiştirmelerin başlamasıyla kesici takım ucunun temas ettiği metal tabakasında akmalar oluşmaya başlar ve meydana gelen gerilmelerin malzemenin kopma sınırını aşmasıyla talaş olarak adlandırılan bir malzeme tabakası ana parçadan ayrılır. Ayrılan talaş, kesici takımın talaş yüzeyi denilen yüzeyinden akar ve talaşın ana parçadan ayrıldığı yüzeyinde kesme bölgesi oluşur ve bu kesme bölgesi içinde kesme düzlemi denilen düzlemde ayrılır [44]. Talaş kaldırma işlemi oldukça karmaşık bir işlemdir. Bu nedenle, talaş kaldırma teorisi incelenirken, işlemin ortogonal kesme şartlarında gerçekleştiği kabul edilir. Ortogonal kesme özel bir talaş kaldırma şekli olup, bu işlemde kesici kenarla kesme hızı birbirine diktir. Ortogonal kesme modeli birçok geometrik karmaşıklıkları göz ardı etmesine rağmen, talaş kaldırma mekaniğini tanımlamada oldukça yeterlidir. Talaş kaldırma 3 boyutlu bir işlem olmasına rağmen, ortogonal kesme modeli işlemi iki boyutta inceleyerek basitleştirir. Ortogonal kesme modeliyle açıklanan talaş oluşumuyla, gerçekte gözlemlenen talaş oluşumu arasında bazı farklar vardır. Ortogonal kesme modelinde kayma deformasyonunun kayma düzleminde gerçekleştiği kabul edilir. Gerçek takım ve parçaları yansıtan eğik kesme modeli ise 3 boyutlu bir işlemdir. Bu modelde ise talaş oluşumu kalınlığı olmayan bir düzlemde değil, belli bir kalınlığa sahip olan bir bölgede gerçekleşir. Bu bölgeye birincil deformasyon bölgesi denir. Diğer yandan talaş oluşumu sonrasında, talaşla takım arasındaki sürtünme nedeniyle talaş yüzünde bir diğer kayma deformasyonu daha gerçekleşir. Bu deformasyonun

gerçekleştiği bölgeye ikincil deformasyon bölgesi denir. Bu iki bölgeden birincil deformasyon bölgesi plastik şekil değiştirme meydana gelen tabakanın parçadan koptuğu kesme bölgesini ifade etmektedir. İkincil deformasyon bölgesi ise talaş üzerinde takım ile talaş yüzeyinin temas ettiği bölgedir. İkincil deformasyon bölgesinden sonra parçadan ayrılan talaş takım yüzeyiyle de temas etmez. Ortogonal kesme modeli bu bölgedeki deformasyonu gözönüne almamaktadır. Talaş parçadan ayrıldıktan sonra kesici takımın talaş yüzeyi olarak adlandırılan yüzeyinden akar. Burada talaşın parçadan koptuktan sonra aktığı takım yüzey talaş yüzeyi; parçanın işlenmiş yüzeyine bakan takım yüzeyi ise serbest yüzey olarak tanımlanır. Bu yüzeylerin durumu talaş açısı ve serbest açı tarafından belirlenir. Talaş açısı (γ_0), parça ucundan başlayan parçanın işlenmiş yüzeyine dik olan eksen ile takım talaş yüzeyi arasındaki açıdır. Serbest açı (α_0) ise takımın serbest yüzeyi ile parçanın işlenmiş yüzeyi arasındaki açıdır. Bunlara ilave olarak kama açısı (β_0), takımın kesme kısmını fiziksel olarak temsil eden takımın talaş yüzeyi ile serbest yüzey arasındaki açıdır. İfade edilen açılar ve ortogonal kesmede talaş oluşumu Şekil 2.1 de verilmiştir.



Şekil 2.1. Ortogonal kesmede talaş oluşumu [44]

2.3. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler

Talaşlı imalat proseslerinin tümünde yapılan işlemin maliyetinin mümkün olduğunca düşük olması ve işlem sonrası elde edilen ürünün kalite standartlarını sağlaması en önemli gerekliliklerdir. Talaşlı imalat işleminde işleme verimliliğini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır ve bu parametrelerin prosese uygun olarak seçilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu parametreler işleme yöntemine veya yapılacak işleme uygun olarak seçilmediği takdirde kolayca işlenen bir malzemenin işlenmesi oldukça zorlaşabilir. Ayrıca uygun olmayan işleme parametrelerinin seçimi, işlenecek olan iş parçasının yüzey kalitesini bozulması, kesici takımların hızla aşınması veya kırılması, kesme performansının bu nedenle

azalması ve ciddi ölçüde ekonomik kayıplar gibi zararların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple bu faktörlerin tespiti ve bu faktörler dikkate alınarak seçimlerin yapılması talaşlı imalat prosesinin verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Talaş kaldırma işlemini etkileyen bu faktörler aşağıda belirtilmiştir:

- Takım geometrisi.
- Talaş geometrisi.
- Kesme koşulları (kesme hızı, ilerleme hızı, talaş kalınlığı).
- Isı oluşumu, aşınma ve takım ömrü.
- Kesme sıvısı.
- Kesme kuvvetleri.

2.3.1. Takım Geometrisi

Kesici takımlar tek ve çok noktadan kesme işlemi yapanlar olmak üzere başlıca iki gruba ayrılırlar. Her iki kesici takım çeşidi için de teorik olarak talaş oluşum mekanizmaları temelde aynıdır. Takımın kesme kısmının geometrisi talaş kaldırma bakımından çok önemlidir. Takım uç yarıçapı, talaş ve boşluk açıları takım geometrisi incelenirken dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Şekil 2.1'de gösterilen kesici takıma ait açılar geometrinin oluşmasında temel rolü oynar ve talaş kaldırma mekaniğini önemli ölçüde etkilerler. Bu açılardan talaşın parçadan uzaklaşmasını sağlayan talaş açısı (γ_0), takım ucunun parçaya nüfus etmesini sağlayan kama açısı (β_0) ve takımın işlenen yüzeye sürtünmemesini sağlayan serbest açı (α_0) takım geometrisinin belirlenmesinde önemli faktörlerdir. Bu açılar arasında $\gamma_0 + \beta_0 + \alpha_0 = 90^\circ$ bağıntısı vardır [44]. Serbest açı, sürtünmeyi önlemek için verilen bir açı olmakla beraber 4° ile 8° arasındaki açı yeterli olmaktadır. Talaş açısı küçük, kama açısı büyük olduğunda takımın ucu küt olduğundan malzemeye nüfuz etmesi zorlaşmakta buna bağlı olarak kesme kuvveti büyümekte ve ısı oluşumu artmaktadır. Takımın ucu daha kısa sürede bozulur. Ancak bu kesici takım, kuvvetlere ve darbelere karşı daha dayanıklıdır. Tam tersi durumda ise, takım ucu ince olduğundan malzemeye daha kolay nüfuz eder, daha düşük kesme kuvvetinde talaş kaldırılır ve daha büyük kesme hızlarında kullanılabilir. Ancak uç ince olduğundan daha az dayanıklı olup kırılma ihtimali daha yüksektir.

2.3.2. Talaş Geometrisi

Talaşlı imalat işlemi sırasında kesme yüzeyi boyunca işlenen malzemedan ayrılan talaşın boyutları talaş geometrisi olarak ifade edilmektedir. Parçadan ayrılan talaşın boyutlarını belirlemenin zor olmasından dolayı, işlenecek malzeme üzerinde henüz talaşa dönüşmemiş

tabakanın kalınlığı (h) ve genişliği (b) alınır ve buna bağılı olarak talaş kesiti $A = h \cdot b$ formülüyle hesaplanabilmektedir. Ayrıca gerçek talaş kaldırmada talaş boyutları paso miktarı (a) ve ilerleme (f) ile de ifade edilir. Frezelemede farklı olarak talaş kalınlığı h proses sırasında sabit değildir ve sürekli değişim gösterir. Bu nedenle frezeleme işleminde talaş geometrisi belirlenirken ortalama talaş kalınlığı dikkate alınmaktadır.

2.3.3. Kesme ve İlerleme hızları

Kesici takımın işlenecek parça üzerinden talaş kaldırma hızına kesme hızı denir ve kinematik olarak yapılan kesme hareketine bağılı olarak değişmektedir. İlerleme hızı ise kesici takımın bir yüzeyinin işlenmesi sırasında o yüzey boyunca yapmış olduğu hareketin hızı olarak ifade edilmektedir. Talaşlı imalat prosesinde talaş kaldırma işlemi için kesme ve ilerleme hızlarının optimum değerlerinin belirlenmesi kesici takımın ömrü ve talaş kaldırma miktarının dengelenmesi açısından oldukça önemlidir. Çünkü kesme ve ilerleme hızları, kesme sıvısı, iş parçasının ve takımın malzemesi, paso kalınlığı ve takım geometrisi gibi parametreler talaş kaldırma işlemi sırasında sıcaklığın artmasına neden olmakta ve bu da hem işlenen parçada hem de kesici takımda birtakım hataların oluşmasına neden olmaktadır. Kesme hareketi; tornolama, frezeleme, delme ve taşlamada dönme şeklinde olduğunda kesme hızı çevresel hız (V_c) veya dönme hızı (n) olarak ifade edilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \text{ (m/dk)} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte D (mm) kesici takım çapıdır.

İlerleme hızı (V_f) ise $V_f = f \cdot n$ ile ifade edilir. Frezeleme de ise $V_f = f_z \cdot n \cdot z$ formülü geçerlidir. Burada z kesici diş sayısını, f_z ise bir dişe karşılık gelen ilerlemeyi ifade etmektedir.

2.3.4. Isı Oluşumu, Takım Aşınması ve Takım Ömrü

Kesme işlemi sonunda oluşan talaşın işlenen malzemeden ayrılması için gereken enerji ve kesici takım ile talaş ve işlenmiş yüzey arasındaki sürtünmeler talaş kaldırma işlemi sırasında açığa çıkan ısının oluşmasının başlıca nedenleridir. Oluşan ısının bir kısmı prostesten atılan talaş yardımıyla uzaklaştırılırken geriye kalan kısmı işlenen parça ve kesici takıma geçer ve ısınmalarına sebep olur. Kesme hızına bağılı olan kesici takımın sıcaklığı, kesme hızının artmasıyla artar. Sıcaklığın artmasının diğere bir nedeni olan sürtünme, ısı oluşumunun yanında talaş baskısının da etkisiyle kesici takımda bir aşınma meydana gelmesine neden olur. Bunun sonucunda kesici takım zamana bağılı olarak körlenir ve kesme özelliğini kaybeder.

Kesici takımın, izin verilen aşınma değerlerine erişinceye kadar geçen süreye takımın ömrü denir ve takım ömrünün hesaplanması aşınma ve talaşlı imalatın verimliliği açısından oldukça önemlidir.

2.3.5. Kesme sıvısı

Talaş kaldırma sırasında oluşan sürtünme ve talaşın ayrılma enerjisi kaynaklı ısı miktarı kesme sıvıları kullanılarak azaltılmaktadır. Kesme sıvılarının soğutma görevi dışında ayrıca yağlama özelliğine de sahip olmaları, kesme sırasında meydana gelen ıyıyı ve sürtünmeleri azaltır ve daha yüksek kesme hızlarına çıkılarak zamandan tasarruf açısından büyük katkı sağlar.

2.3.6. Kesme Kuvvetleri

Kesme kuvvetlerinin tespiti ve analizi, tüm talaşlı imalat yöntemlerinde üretilen iş parçasının kalitesinin artırılması, bununla beraber maliyetinin düşürülmesinde çok büyük bir öneme sahiptir. Kesme kuvvetleri talaşlı imalatta uygulanacak yöntemin seçilmesinde, takım tezgâhlarının, kesici takımların ve gerekli bağlama elemanlarının tasarımında önemli bir etkindir. Bunlara ek olarak ısı oluşumu, işlenen yüzeyin kalitesi, kesici takımın ömrü ve iş parçasının boyutları üzerinde de oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Kesme sırasında oluşan bu kuvvetlerin belirlenmesi kesme performansını ve birim parça maliyetini doğrudan etkileyen faktörler arasında yer almasına ek olarak aşağıda liste halinde verilen kullanım alanlarından dolayı da talaşlı imalat ile üretim için büyük bir önem arz etmektedir.

Kesme kuvveti,

- Takım tezgâhının talaş kaldırma sırasında harcadığı enerjinin tespit edilmesinde,
- Takım tezgâhının, takımların ve bağlama aparatlarının tasarımında ve boyutlandırılmasında,
- Tezgâh rijitliği, mukavemeti ve boyutlarının hesaplanmasında,
- Kesme gücü ve buna bağlı olarak tezgah gücü hesaplanmasında,
- Kesme kuvvetlerine veya harcanan enerjiye bağlı olarak, talaş kaldırma sırasında optimizasyona dayalı adaptif bir kontrol sistemi oluşturulmasında kullanılmaktadır.

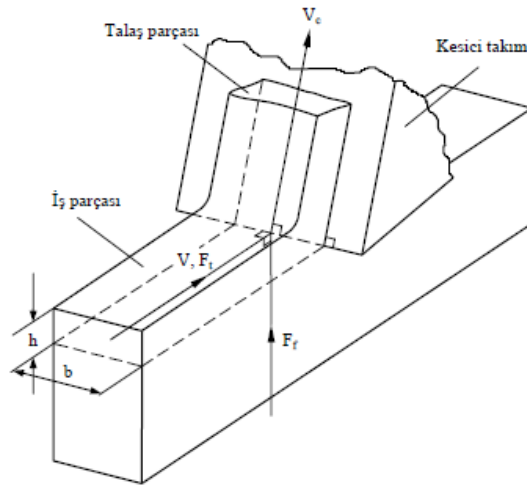
Belirtilen bu sebeplerden dolayı talaş kaldırma işleminde kesme kuvvetlerinin belirlenmesi büyük öneme sahiptir.

2.4. Kesme Kuvvetinin Hesaplanması ve Kesme Modelleri

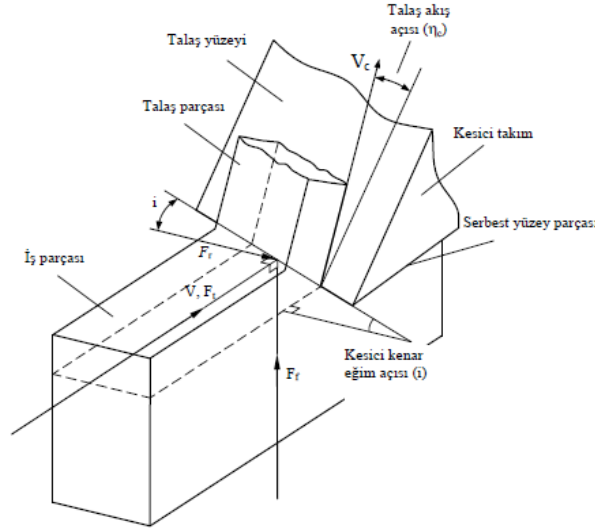
Talaş kaldırma işlemi sırasında ana parçadan talaşı kaldırmak için kesici takıma kesme yönünde etki edecek şekilde kesme kuvveti olarak tanımlanan bir kuvvet uygulanır. Takıma uygulanan bu kesme kuvveti, talaş oluşumu ve talaş ile takım arasındaki sürtünmelere bağlı olarak talaş kaldırma prosesi süresince değişimler göstermektedir.

Talaşlı imalat yöntemlerinde kesme işlemini tanımlayan ortogonal (dik) ve oblik (eğik) olmak üzere iki temel model üzerinde durulmaktadır. Ortogonal ve eğik kesme proseslerinin şematik resimleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Ortogonal kesme modeli, iki boyutlu bir model olup üç boyutlu ve karmaşık geometrilere sahip yaygın kesme işlemlerindeki metal talaş kaldırma mekaniğini belirlemek için öncelik olarak tercih edilen bir modeldir. Eğik kesme işleminde talaşın akış yönünü ve buna bağlı olarak da kesici takımın performansını önemli ölçüde etkileyen kesici takımın kesici kenarı ve kesme hız vektörü arasında bir eğim açısı mevcuttur. Bu eğim açısı 0° ise yapılan kesme işlemi dik kesme olarak adlandırılır. Eğik kesme işleminde normal şartlarda dar bir kayma bölgesinde gerçekleşen kayma işlemi tek bir düzlemde gerçekleştiği, kesici ucun mükemmel derecede sivri olduğu ve takımın boşluk yüzeyi ile işlenen yüzey arasında sürtünmenin olmadığı varsayımları yapılmıştır. Talaş oluşması işlemi sırasındaki iş parçası malzemesinin davranışını, kesici takım geometrisinin önemli elemanlarından biri olan talaş açısı ile kesilen talaş, iş parçası yüzeyi ve kesici takım kesme süresindeki etkileşimlerini belirlemek ve incelemek için dik kesme modelinde literatürde yeterli görülen bir modeldir. Ayrıca bu modelde, talaş oluşumu iş parçasının kesici takımı zorlamasıyla iş parçasının kayma gerilmesinin aşılmasına bağlı olarak meydana gelmektedir ve iş parçasından kesilen bu talaş, kesici takım üzerindeki talaş yüzeyi üzerinden kayarak geçer.



(a)



(b)

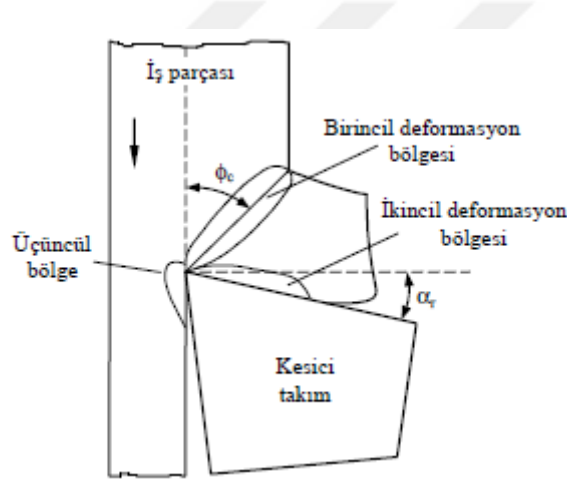
Şekil 2.2. Metal kesme proseslerinin geometrileri: a) Ortogonal kesme geometrisi; b) Eğik kesme geometrisi [45]

2.4.1. Ortogonal (Dik) Kesme Mekaniği

Ortogonal kesme modeli; iki boyutlu bir model olup, kesme işlemi süresince kesici takımın kesme kenarı kesme hızının doğrultusuna diktir. Bu sebeple, kesme kuvvetleri olarak hız ve deforme olmamış talaş kalınlığı doğrultularındaki teğetsel (F_t) ve ilerleme (F_f) kuvvetleri prosese etki etmektedir. Eğik kesme modelinde ise kesici kenar eğim açısı “ i ” derece eğik olduğundan, radyal doğrultuda ek bir kesme kuvveti daha ortaya çıkar ve F_r ile gösterilir.

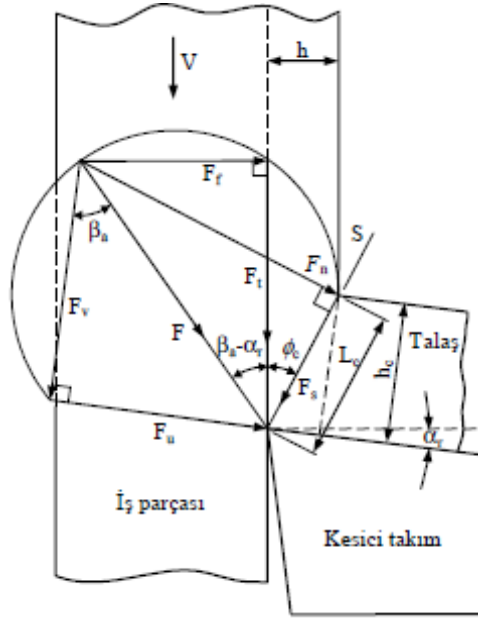
Ortogonal kesme işleminde, b kesme genişliğinde ve h kesme derinliğinde metal talaş işlenen iş parçasından kesilerek ayrılır ve bu kesme işlemi sırasında üç adet şekil değiştirme bölgesi oluşur. Bu bölgeler Şekil 2.3’de gösterilmiştir. İlk bölge olan birincil deformasyon bölgesi,

takım kenarı işlenecek parçaya dalarken kesici takımın malzeme içerisinde hareketiyle oluşan talaş formunun oluşturduğu bölgedir. Malzemenin kesilmesiyle talaşta şekil değişiklikleri meydana gelir ve kesici takımın talaş yüzeyi boyunca hareketiyle ikincil deformasyon bölgesi meydana gelir. Üçüncül bölge ise kesici takımın yan yüzeyindeki sürtünme bölgesinde oluşur. Başlangıçta talaş kesici takımın yüzeyine yapışır ve yapışma bölgesi oluşur. Daha sonra talaşın takım talaş yüzeyinde ilerlediği kayma alanındaki sürtünme gerilmesi malzemenin kayma gerilmesine yaklaşık olarak eşit olur ve talaş yapışma olayı son bulur. Böylece meydana gelen kayma sürtünmesinin etkisiyle kesici takımın talaş yüzeyinde talaş akması olayı başlar. Talaşın takımda ayrılması ile talaş ile takım arası temas kaybolur ve talaş ile takım arasındaki bu temas süresi kesme hızı, işlenen malzeme özellikleri ve takım geometrisine bağlı olarak değişimler göstermektedir.



Şekil 2.3. Ortogonal kesme modelinde şekil değiştirme bölgeleri [45]

Merchant geliştirdiği ortogonal kesme modelinde kayma bölgesinin ince bir düzlem olduğunu varsaymaktadır [46]. Bu model birincil deformasyon bölgesi analizinde kullanılmaktadır. Şekil 2.4’de Merchant’ın önerdiği ortogonal kesme modelindeki kesme kuvvetleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Ortogonal kesme modelinde oluşan kesme kuvvetleri [45]

Ortogonal kesme modelinde kesici kenarda radyüs olmadığı ve keskin bir kenar olduğu, ayrıca deformasyonun kayma düzleminde olduğu varsayılmaktadır. Kayma açısı (ϕ_c), kesme hızı doğrultusu ve kayma düzlemi arasında kalan açı olarak tanımlanır. Bu modelde normal gerilme (σ_s) ve kayma gerilmesinin (τ_s) sabit olduğu varsayılmaktadır. Bununla birlikte kayma düzleminde talaş üzerine uygulanan bileşke kuvveti (F) ile talaş yüzeyinde talaş-takım temas yüzeyi boyunca kesici takıma uygulanan bileşke kuvvetinin birbirleriyle dengede olduğu kabul edilmektedir [44]. Talaş-talaş yüzeyi temas bölgesinde sabit bir sürtünme olduğu varsayılır ve kuvvet dengesine göre F ile gösterilen bileşke kuvvet Eşitlik 2.2’de ifade edilmektedir:

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_f^2} \quad (2.2)$$

2.4.1.1. Birincil deformasyon bölgesi (Kayma Düzlemi)

İş parçasına etki eden bileşke kuvvet ile kesici takıma etki eden bileşke kuvvet (F) birbirlerine eşit kuvvetler olup zıt yönlüdürler [45]. Kayma kuvveti ise bileşke kuvvetin kayma düzlemi üzerindeki bileşkesi olup (F_s) ile gösterilmektedir. Şekil 2.4’de gösterilen ortogonal kesme modelindeki geometriye göre bu kayma kuvveti Eşitlik (2.3) ile bulunmaktadır [44].

$$F_s = F \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) \quad (2.3)$$

Bu Eşitlikte β_a ve α_r sırasıyla kesici takım talaş yüzeyi ve hareket eden talaş arasındaki ortalama sürtünme açısını ve kesici takım talaş açısını ifade etmektedir. Bileşke kuvvetin bir fonksiyonu olarak bulunan bu kayma kuvveti, ilerleme ve teğetsel kuvvetlerinin birer fonksiyonu olarak Eşitlik (2.4) kullanılarak da bulunabilir.

$$F_s = F_t \cos \phi_c - F_f \sin \phi_c \quad (2.4)$$

Şekil 2.4'de görülen geometrik bağlantılar kullanılarak kayma düzleminde etki eden normal kuvvet, Eşitlikler (2.5) ve (2.6) ile kolayca elde edilmektedir.

$$F_n = F \sin(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) \quad (2.5)$$

$$F_n = F_t \sin \phi_c + F_f \cos \phi_c \quad (2.6)$$

Kayma düzleminde meydana gelen kayma gerilmesi (τ_s) üniform gerilme dağılımı varsayımı ile Eşitlik (2.7)'deki eşitlik kullanılarak kayma kuvvetinin yüzey alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır.

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.7)$$

Kayma düzlemindeki normal gerilme (σ_s) ise Eşitlik (2.8)'deki eşitlik yardımıyla bulunmaktadır.

$$\sigma_s = \frac{F_n}{A_s} \quad (2.8)$$

Burada A_s kayma yüzey alanını ifade etmektedir ve bu alan Eşitlik (2.9)'daki formül ile elde edilmektedir.

$$A_s = b \frac{h}{\sin \phi_c} \quad (2.9)$$

2.4.1.2. İkincil deformasyon bölgesi

Şekil 2.4'deki geometriden görüldüğü üzere kesme kuvveti (F), kesici takım talaş yüzeyinde normal kuvvet (F_v) ve talaşın akmasına karşı koyan sürtünme kuvvetine eşit olan teğetsel kuvvet (F_u) olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Normal kuvvet (F_v) ve teğetsel kuvvet (F_u), Eşitlik (2.10) ve (2.11) kullanılarak hesaplanmaktadır [46].

$$F_v = F_t \cos \alpha_r - F_f \sin \alpha_r \quad (2.10)$$

$$F_u = F_t \sin \alpha_r - F_f \cos \alpha_r \quad (2.11)$$

2.4.2. Oblik (Eğik) Kesme Mekanikliği

Talaşlı işleme proseslerinin birçoğu üç boyutlu kesici takım geometrilerini içerdiğinden kesme işlemi eğiktir [45]. Eğik kesme mekaniğinde normal düzlem ile kesici kenar arasında (i) ile gösterilen dar bir eğim açısı bulunmaktadır.

Eğik kesme mekaniğinde hız ve kuvvet denge eşitlikleri için normal düzlem (P_n) adı verilen yeni bir düzlem tanımı yapılmıştır [45]. Bu düzlem kesici kenara normal ve kesme hızına paralel olup düzlemsel şekil değiştirme kayma deformasyonu, yan yayılma olmadan gerçekleştiğinden kesici kenara dik ve kesme hızına paralel olan tüm normal düzlemlerde kayma ve talaş hareketleri aynı olmaktadır. Buna bağlı olarak kesme (V), kayma (V_s) ve talaş hızları (V_c) kesici kenara dik ve hız düzlemine (P_v) ise paralel veya normal düzlemle (P_n) kesişim halinde olmaktadır.

Ortogonal kesme modelinde bileşke kesme kuvveti (F), kayma ve talaş-talaş yüzeyi temas bölgesinde etki eden kuvvetlerle aynı düzlemde olup üçüncü bir doğrultuda yani normal düzleme dik herhangi bir kesme kuvveti oluşmamaktadır. Eğik kesme prosesinde bu modele ek olarak kesme hızı belirli bir eğim açısına (i) sahiptir ve bu sebepten ötürü hem kayma, sürtünme ve talaş akışı doğrultuları hem de bileşke kesme kuvveti vektörleri Kartezyen koordinatında x , y ve z doğrultularında bileşkelere sahiptirler. Şekil 2.2'den görüldüğü üzere x eksenini kesici kenara dik ve kesilen yüzey üzerinde olan doğrultuyu, y eksenini ise kesici kenarla aynı doğrultuyu ve z eksenini de bu iki doğrultuya dik olan yönü göstermektedir. Eğik kesme işleminde bu üç doğrultuda da kuvvetler oluşmakta olup, kayma düzlemi, x - y düzlemi olan kesilen yüzey, talaş yüzeyi ve normal düzlem (P_n) mekaniğin analizinde dikkatle incelenmesi gereken düzlemlerdir. Talaş ve talaş yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti talaş akış doğrultusu ile aynı doğrultudadır. Talaş yüzeyindeki normal vektör ve z eksenini arasındaki açı normal talaş açısı (α_n) olarak tanımlanmıştır. Talaş yüzeyindeki sürtünme kuvveti (F_u) ve talaş yüzeyine etkiyen normal kuvvet (F_v) sürtünme açısı (β_a) ile birlikte bileşke kesme kuvvetini (F) oluşturur. Normal kuvvet (F_v) ve teğetsel kuvvet (F_u), Eşitlikler (2.12) ve (2.13) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_u = F \sin \beta_a = F \frac{\sin \theta_f}{\sin \eta_c} \longrightarrow \sin \theta_f = \sin \beta_a \sin \eta_c \quad (2.12)$$

$$F_u = F_v \tan \beta_a = \frac{\tan(\theta_n + \alpha_n)}{\cos \eta_c} \longrightarrow \tan(\theta_n + \alpha_n) = \tan \beta_a \tan \eta_c \quad (2.13)$$

3. TİTREŞİM ESASLI HATA TESPİT YÖNTEMLERİ

Bu bölümde titreşim esaslı durum izleme yöntemlerinde kullanılan ve bu çalışmada hata tespit aşamasında yararlanılan zaman, frekans ve birleşik zaman-frekans bölgesi analizleri ve tahmin edici algoritma olarak tanımlanan sınıflandırma teknikleri ile ilgili genel bilgi verilecektir. Bu çalışmada kesici takımdan kaynaklı hatanın tespiti için zaman ve frekans bölgesi incelemeleri ve sürekli dalgacık dönüşümü ile sınıflandırma tekniklerinden yapay sinir ağları (YSA), destek vektör makineleri (DVM), rastgele orman (RO) ve k en yakın komşuluk (kNN) algoritmalarından yararlanılmıştır.

3.1. Durum İzleme

Durum izleme yöntemleri endüstride verimin ve üretimin artırılması amacıyla kullanılmaktadır. Durum izlemede temel amaç, üretimi ve performansı etkileyebilecek faktörleri algılayıcılar kullanarak tespit etmek ve bu tespitlere bağlı olarak gerekli düzenlemeleri gerçekleştirme ve üretim kaybını minimuma indirmektir. Sanayide hata tespiti için yaygın olarak kullanılan durum izleme yöntemleri sayesinde, hatanın önceden tespit edilmesiyle bu hatanın başka sorunlara yol açması engellenmekte ve buna bağlı olarak büyük maliyet giderlerinin önüne geçilmektedir. Ayrıca gereksiz bakım ve arıza duruşlarının önlenmesi ve planlı hale getirilmesi sağlanmaktadır. Titreşim esaslı durum izleme yöntemleri de endüstride hata tespitinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yöntemlerde titreşim sinyaline ait bilgiler kullanılarak hatanın önceden tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Bu bilgiler titreşim sinyalinin zaman bölgesi, frekans bölgesi ya da birleşik zaman-frekans bölgesi analizlerinden elde edilmektedir. İlerleyen bölümlerde bahsi geçen analizlerle ilgili genel bilgiler verilecektir.

3.2. Zaman Bölgesi Analizi

Sinyale ait zaman bölgesi analizi, endüstride hem hatanın hem de hata seviyesinin tespitinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Zaman bölgesindeki sinyalin analizinde tepe değeri, sinyalin enerjisi, istatistiksel özellikler ve modülasyon gibi özellikleri içeren titreşim parametrelerinin belirlenmesiyle sinyalden bilgi elde edilmektedir. Bu parametrelerden

istatistiksel özellikler ve zaman bölgesi ortalamaları, genellikle talaşlı imalatta hata tespitinde temel olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan zaman bölgesi ortalaması ve istatistiksel parametreler aşağıda kısaca açıklanmaktadır [47].

3.2.1. Zaman Bölgesi Ortalaması

Bir titreşim sinyalinin zaman ortalaması, titreşim verileri içerisindeki rastgele bileşenleri azaltmak ve özellik içeren bileşenleri kuvvetlendirmek amacıyla kullanılan güçlü bir yöntemdir. Eğer bir hata, sinyalin belli konumlarında benzer etkiyi gösterirse, sinyalin ortalamasını almak hatanın tespit edilip analiz edilmesinde daha etkili olmaktadır. Ortalama sinyal aşağıda verilen eşitlik kullanılarak elde edilmektedir:

$$x_{ort} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t + nT) \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte T ve N sırasıyla ortalaması alınan sinyalin periyodunu ve sinyalin örnek sayısını ifade etmektedir.

3.2.2. İstatistiksel Analiz

Yüksek titreşim seviyelerinde çalışan sistemlerde meydana gelen arızada oluşan belirtilerin titreşim sinyali içerisindeki gelişim oranı düşükse sinyalde meydana gelen değişikliklerden net bir şekilde arızayı tespit etmek mümkün olmayabilir [47]. Yer değiştirme, hızlanma, gerilme, basınç vb. gibi özelliklerin gelecek zamanlar için önceden tahmin edilebildiği durumlarda sistem deterministik (belirleyici) olarak adlandırılmaktadır. Fakat birçok gerçek sistem meydana gelecek olan durumların önceden tahmin edilemediği özellikler içermektedir. Bu tip sistemlere rastgele sistemler denir ve bu sistemlerin özellikleri kesin olarak tahmin edilemediğinden istatistiksel özellikler kullanılarak tahminler gerçekleştirilir. Tahmin edilen bu özellikler hata tespitinde verimli sonuçlar vermektedir. Yaygın olarak kullanılan istatistiksel özellikler ortalama değer, RMS (etkin değer), tepeden-tepeye değer, maksimum ve minimum değer ve kurtosis (basıklık) olup aşağıda kısaca açıklanmaktadır [47].

RMS değeri; sinyal anlık değerlerinin karelerinin ortalamasının karekökü olarak tanımlanır ve Eşitlik (3.2) ile ifade edilmektedir:

$$rms = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikteki $x(t)$ ve T sırasıyla analiz edilen zaman sinyalini ve bu sinyalin periyodunu ifade etmektedir.

Tepeden tepeye değer (P_p); sinyalin maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark olarak tanımlanır ve Eşitlik (3.2) ile ifade edilmektedir:

$$P_p = \max(x) - \min(x) \quad (3.3)$$

Ortalama değer (\bar{x}); sinyalin anlık değerlerinin bir periyottaki ortalaması olarak tanımlanır ve Eşitlik (3.4) ile ifade edilmektedir:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3.4)$$

Kurtosis (K_r); (basıklık) bir dağılım yüksekliğinin normal dağılım yüksekliğinden ne kadar saptığının ölçüsüdür [48].

$$K_r = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - \bar{x}]^4 dt}{rms^4} \quad (3.5)$$

3.3. Frekans Bölgesi Analizi

Frekans bölgesi analizinde, titreşim genliği frekansa karşı temsil edilir. Fourier analizi, sinyali zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüştüren bir yöntemdir ve sinyalin spektral içeriğini belirlemek için kullanılır. Bir sistemin titreşim cevabı, sistemi oluşturan parçalar ve çalışma parametreleri (yük, hız) tarafından belirlenir. Bu sebepten dolayı her sistemin titreşim cevabı o sisteme özgüdür ve çalışma kuvvetleri ve hızı değişmiyorsa titreşim seviyesi de değişmez. Bu nedenle hatasız durumda elde edilen titreşim spektrumuna makinanın imzası denir. Eğer makina içerisinde bir hata (arıza) meydana gelirse, makina titreşimleri ve dolayısıyla spektrumu da değişir. Bir sistemin hasarlı durumdaki frekans spektrumu ile sağlıklı durumdaki referans frekans spektrumu karşılaştırılarak sistemde meydana gelen hata tespit edilebilir.

Frekans bölgesi analizi hata tespitine temel teşkil etmesinin yanında, modülasyonlar ve harmonik içerik gibi bazı temel sinyal özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu özellikler zaman bölgesi analizinde kolayca belirlenemez. $x(t)$ sinyaline ait Fourier dönüşümü Eşitlik (3.6)'da verilmektedir:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte f ve $X(f)$ sırasıyla frekansı ve sinyalin Fourier dönüşümünü ifade etmektedir. Ters Fourier dönüşümü, sinyalin Fourier dönüşümünden orijinal sinyali elde etmek için kullanılmakta olup matematiksel ifadesi Eşitlik (3.7)'de verilmiştir.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.7)$$

Belirli bir f frekans değerinde bir sinyalin birim frekans başına spektral yoğunluğu $|X(f)|^2$ ile belirlenir ve frekans bölgesindeki toplam sinyal enerjisi de spektral yoğunluk fonksiyonunun tüm frekanslar üzerinde toplanmasıyla hesaplanabilir. Parseval teoremine göre [47], hem zaman hem de frekans bölgelerinde hesaplanan toplam enerji birbirine eşittir ve Eşitlik (3.8) ile ifade edilir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (3.8)$$

3.4. Birleşik Zaman-Frekans Bölgesi Analizi

Durum izleme ve arıza tespiti, sistemlerin emniyetli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Orijinal sinyalleri basit ve etkili dönüşümler uygulayarak bilgi edinilecek hale getiren sinyal analizi, durum izleme ve arıza tespiti için kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Sinyalin içerdiği önemli bilgiler sinyal işleme teknikleri kullanılarak ortaya çıkartılmakta ve arıza tespiti için kullanılabilir hale getirilmektedir. Arıza tespiti için sıkça kullanılan yöntemlerden biri olan Hızlı Fourier Dönüşümü gibi birçok yöntem literatürde bulunmaktadır. Eğer sinyalin frekans içeriği zamanla değişmiyorsa yani sinyal kararlı ise Hızlı Fourier Dönüşümü hata tespiti için yeterli olabilmektedir. Ancak sinyalin frekans içeriği zamanla değişiyorsa yani sinyal kararsız ise Fourier dönüşümü tek başına sinyal özelliklerini belirlemede yetersiz kalmaktadır. Diğer bir ifadeyle, dinamik bir sinyalin analizinin sadece frekans bölgesinde veya zaman bölgesinde yapılması, sinyal içerisindeki ani değişimlerin tahmininde yetersiz gelmektedir. Genellikle, durağan olmayan sinyal bileşenleri sistem arızaları hakkında faydalı bilgiler içerir ve dolayısıyla, bu sinyallerin ortaya çıkartılması arıza tespiti için büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple özellikle dinamik sinyallerin analizinde kullanılmak üzere, sinyalin frekans ve zaman bilgilerini aynı anda elde etmeyi sağlayan farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Wigner-Ville Dönüşümü (WVD), Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT), Choi Williams Dönüşümü (CWD), Koni Çekirdekli

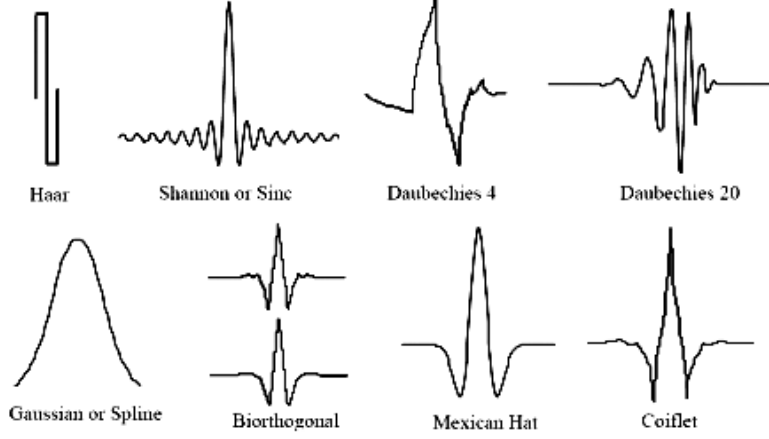
Dönüşüm (KŞD) ve Dalgacık (Wavelet) dönüşümü (WT) bu algoritmalara örnek olarak verilebilir. Sözü edilen bu birleşik zaman-frekans bölgesi analiz metotlarının performans karşılaştırmaları Tablo (3.1)'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Zaman-frekans analiz metotlarının performanslarının karşılaştırılması [49]

Metot	Çözünürlük	Parazit Bileşen	İşlem Hız
WT	Düşük frekanslı bileşenler için iyi frekans çözünürlüğü ve düşük zaman çözünürlüğü; yüksek frekans bileşenleri için düşük frekans çözünürlüğü ve iyi zaman çözünürlüğü	Hayır	Hızlı
STFT	Pencere işlevine bağlı olarak, iyi zaman veya frekans çözünürlüğü	Hayır	WT'ye göre yavaş
WVD	İyi zaman ve frekans çözünürlüğü	Güçlü parazit bileşenler	STFT'ye göre yavaş
CWD	İyi zaman ve frekans çözünürlüğü	WVD'e göre zayıf ve kontrol edilebilir parazit bileşenler	Çok yavaş
KŞD	İyi zaman ve frekans çözünürlüğü	CWD'ye göre daha zayıf parazit bileşenler	Çok yavaş

3.5. Dalgacık Dönüşümü

Dalgacıklar kararsız bir sinyalin ayrıştırılmasına imkan veren matematiksel fonksiyonlardır. Dalgacıklar, dalgacık dönüşümünün çekirdeğini oluştururlar ve sinyalin zamana göre değişimini, ya zaman-frekans ya da zaman-ölçek bölgesine dönüştürürler. Dalgacık dönüşümünün en önemli avantajı ise farklı zaman ve farklı frekanslarda, farklı çözünürlük sağlamasıdır. Dalgacık dönüşümünün çekirdeğini oluşturan dalgacıklar, durağan olmayan sinyalleri analiz etmek için kullanılan, farklı frekans bileşenlerine sahip osilasyonlu fonksiyonlardır. Bir fonksiyonun dalgacık olabilmesi için süresinin sınırlı ve ortalama değerinin sıfır olması koşulları sağlanmalıdır. Bu sebeple dalgacık fonksiyonu genlik ekseninin pozitif ve negatif yönlerinde salınım yapar ve bu salınım zaman ekseninde zaman ilerledikçe sifira oturarak sona ermektedir. Yaygın olarak kullanılan dalgacık fonksiyonları Haar, Shamon veya Sinc, Daubechies, Gauss, Morlet, Meksika şapkası ve Coiflet dalgacıklarıdır ve Şekil 3.1'de gösterilmişlerdir.



Şekil 3.1. Örnek dalgacık şekilleri [49]

Dalgacık dönüşümünde pencereleme görevini ana dalgacık fonksiyonu üstlenmektedir. Bu ana dalgacık fonksiyonu dönüşüm işlemi süresince hem ölçeklenip hem de ötelenmektedir. Ölçekleme dalganın genişletilip daraltılmasına, öteleme ise zaman ekseninde dalganın kaydırılmasına karşılık gelmektedir [50]. Dalgacık dönüşümünde pencereleme görevini üstlenen dalgacık fonksiyonun genişliğinin sürekli değişmesi, hem zaman hem de frekans bölgesinde çözünürlüğü arttırmaktadır. Dalgacık dönüşümde ölçekleme parametresi frekans ile ilişkili olup düşük frekansların ayırt edilmesinde büyük ölçek, yüksek frekansların ayırt edilmesinde ise küçük ölçekler kullanılmaktadır. Öteleme parametresi ise pencerenin kaydırılması işlemi olarak tanımlanır. Dalgacık dönüşümünde ana dalgacık fonksiyonu seçildikten sonra sinyalin başlangıç noktasına konumlandırılır ve kapladığı bu kısım için dönüşüm yapılır. Sonrasında sinyal sonuna kadar bu dalgacık fonksiyonu kaydırılarak bütün sinyalin dalgacık dönüşümü tamamlanır. Kısaca, ana dalgacığın genişletilip sıkıştırılarak şeklini değiştiren parametre ölçekleme parametresi, kaydırma işlemi ile konumunu değiştiren parametre ise öteleme parametresi olarak açıklanabilir.

Dalgacık dönüşümünün kullanımı 1980'lerin başında Morlet ve arkadaşları tarafından sismik verileri değerlendirmek için kullanılmış olup o zamandan itibaren çeşitli dalgacık dönüşümü türleri geliştirilmiştir ve farklı uygulamalarda kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümleri sürekli ve ayrık dalgacık dönüşümleri olarak iki tipte incelenmektedir. Sürekli dalgacık dönüşümü (CWT) kuantum mekaniği, sismik jeofizik, EEG, tahribatsız muayene ve yorulma analizinin yapıldığı veri analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalgacık dönüşümünün diğer bir çeşidi ise ayrık dalgacık dönüşümüdür (DWT) ve bu dönüşüm hesaplamalı olarak çok verimli iyi bir sıkıştırma ve ayırıştırma özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, görüntü sıkıştırma, ses

çıkarma, sayısal entegrasyon ve görüntü tanıma dahil hemen hemen tüm teknik alanlara uygulanmıştır [51].

3.5.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümü, pencerelenmiş Fourier dönüşümüne benzemekle beraber, en büyük farkı yüksek ve alçak frekans bileşenlerini en iyi biçimde analiz edebilecek şekilde farklı büyüklükte pencerelere ayrılmış olmasıdır. Sürekli dalgacık dönüşümünde, ölçekleme ve öteleme parametreleri gerçek sayılar uzayı boyunca sürekli olarak değişmektedir. Dalgacık dönüşümde kullanılan ana dalgacık fonksiyonu $h(t)$, aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir:

$$h_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{t}{a}\right) \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte $h_a(t)$ ölçekleme parametresi a ($a>0$) ile analiz dalgacığının genişletilmiş formunu göstermektedir. Genişletilmiş dalgacık fonksiyonu $a^{-1/2}$ faktörü ile normalize edilir ve böylece ana dalgacık fonksiyonu ile aynı enerjiye sahip olması sağlanmaktadır. Ana dalgacık fonksiyonu $h(t)$ ve farklı ölçeklerdeki dalgacık ailesi geleneksel olarak sıfır civarında merkezlendiğinden ve ayrıca çok hızlı bir şekilde sönümlendiği için dalgacıklar zamanda b kadar ötelenmektedir.

$$h_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.10)$$

Bu eşitlikte $h_{b,a}(t)$ genişletilmiş ve ötelenmiş dalgacık fonksiyonunu, b öteleme parametresini ifade etmektedir. Dalgacık dönüşümü, $x(t)$ sinyali ile dalgacık fonksiyonu arasındaki belirli bir a derecesinde ve b süresi boyunca benzerliği ölçmektedir. a ölçekleme parametresinin seçimi dalgacık fonksiyonunun genişliğini belirlemektedir. a 'nın büyük değerleri için $h_{b,a}(t)$ düşük frekanslı dalgacık fonksiyonları haline gelir ve zamanda yayılım gösterir. Bunun tam tersi olarak a 'nın küçük değerleri için bu fonksiyon yüksek frekanslı dalgacık fonksiyonları haline gelir ve zamanda daralma gösterir. Hızlı sönümlenmesinin dahil edilmesiyle iyi lokalizasyon imkanı sağlar. $x(t)$ sinyalinin sürekli dalgacık dönüşümü aşağıdaki eşitlikte elde edilmektedir:

$$SDD_x(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.11)$$

Dalgacık dönüşümünün diğer bir önemli özelliği de tersinir olmasıdır. Bu, orjinal sinyal $x(t)$ 'nin $SDD_x(b, a)$ değerlerinden yeniden yapılandırılabilceği anlamına gelir. Bu işlem için, ana dalgacık fonksiyonunun Fourier dönüşümü belirli bir koşula tabidir. Kabul edilebilirlik koşulu olarak bilinen bu temel kural aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$C_h = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 \frac{df}{|f|} < \infty \quad (3.12)$$

Burada $H(f)$ ana dalgacık fonksiyonunun Fourier dönüşümüdür. Bu koşulda amaç $f \leq 0$ 'a giderken $H(f)$ dönüşümünün de hızla sıfıra yaklaşmasını sağlamaktır. Bu nedenle dalgacık dönüşümü kararlı durum bileşenine sahip değildir. Ana dalgacık fonksiyonu yukarıda tanımlanan kabul edilebilirlik koşulunu sağladığında $x(t)$ sinyali aşağıda belirtilen eşitlikle tekrar oluşturulabilir [52]:

$$x(t) = \frac{1}{C_h} \iint CWT_x(b, a) \frac{1}{\sqrt{a}} h^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \frac{da db}{a^2} \quad (3.13)$$

Sürekli dalgacık dönüşümünde öncelikli olarak dalgacığın seçilmesi gerekmektedir. Matematiksel olarak, dalgacık dönüşümü dalgacıklarının seçiminde esneklik sunmaktadır. Bu çalışmada dalgacık dönüşümde sıkça tercih edilen dalgacıklardan biri olan Morlet dalgacığı kullanılmıştır. Morlet dalgacığının zaman ve frekans bölgesinde Eşitlik 3.14 ve 3.15'te ifade edilmektedir [47].

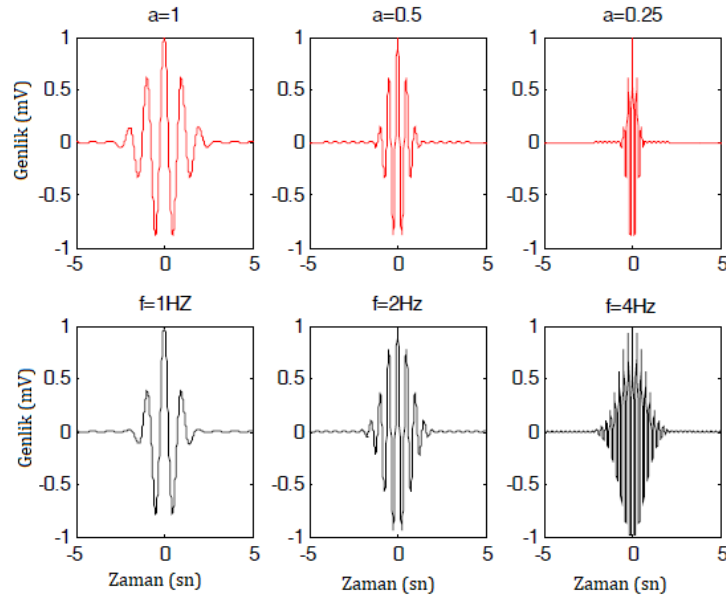
$$h(t) = e^{j2\pi f_0 t} e^{-t^2/2} \quad (3.14)$$

$$H(f) = \sqrt{2\pi} e^{(-2\pi^2(f-f_0)^2)} \quad (3.15)$$

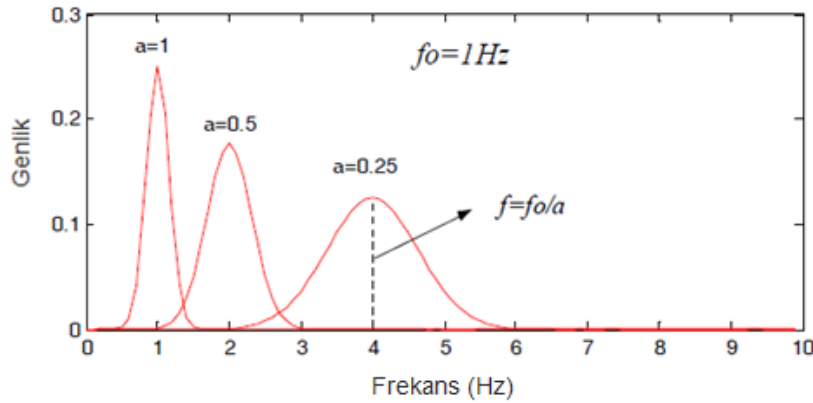
Bu eşitliklerde f_0 dalgacık merkezi frekansını simgelemektedir. Morlet dalgacığı her durumda uygulanabilir bir formda değildir. Ancak dalgacık merkez frekansının uygun seçilmesi halinde ($f_0 \geq 0.875$) pratik olarak uygulanabilir hale gelmektedir [53].

Dalgacıkların bant genişliği, merkez frekanslarıyla orantılı bir şekilde değişmektedir ve ölçeklemeden ters biçimde etkilenmektedir. Bu durum yukarıda sözü edilen sabit çözünürlüklü zaman-frekans bölgesi tekniklerine göre daha iyi bir zaman lokalizasyonu sağlanmaktadır. Ölçek azaldıkça, dalgacıklar zamanla daha kompakt hale gelir ve dönüşümün zaman çözünürlüğünü iyileştirir, ancak frekans çözünürlüğü belirsizlik ilkesine göre bozulur [47].

Şekil 3.2 ve 3.3'te Morlet dalgacığının merkez frekansı arttığında, dalgacık dönüşümünün yüksek frekanslarda hassasiyeti arttığı görülmektedir.



Şekil 3.2. CWT'de 1Hz merkez frekanslı Morlet dalgacığının reel kısmının ve STFT pencere fonksiyonunun karşılaştırılması [47]



Şekil 3.3. Farklı ölçeklerdeki 1 Hz Morlet dalgacıklarının frekans bölgesini gösterimleri [47]

3.5.1.1. Dalgacık Dönüşümü ile Zaman-Frekans Analizi

Önceki bölümde, hızlı bir şekilde sifıra giden dalgacıkların hem zaman hem de frekans açısından iyi lokalize edildiği ve bu nedenle pencere fonksiyonu olarak kullanılacakları açıklanmıştır. Merkezi t_h , ve yarıçapı, Δ_{ht} olan pencere fonksiyonu aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilmektedir [47].

$$t_h = \frac{1}{\|h\|_2^2} \int_{-\infty}^{\infty} t |h(t)|^2 dt \quad (3.16)$$

$$\Delta_{ht} = \frac{1}{\|h\|_2^2} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (t - t_h)^2 |h(t)|^2 dt \right\}^{1/2} \quad (3.17)$$

Dalgacık fonksiyonu zaman sinyalinde b konumuna getirildiğinde, $x(t)$ sinyalinin dalgacık dönüşümü Eşitlik 3.18'deki gibi ifade edilen bir zaman penceresi içinde kısıtlanır [47].

$$(b + at_h - a\Delta_{ht}, b + at_h + a\Delta_{ht}) \quad (3.18)$$

Bu eşitlikte dalgacık $b + at_h$ 'da konumlandırılmıştır ve $2a\Delta_{ht}$ genişliğine sahiptir. Dalgacık dönüşümü, sinyali belirli bir frekans aralığında eşzamanlı olarak analiz etmektedir. Bu analiz Eşitlik 3.19 ile verilen frekans bölgesindeki dalgacık dönüşümü eşitliğiyle kolayca kanıtlanabilmektedir.

$$SDD_{x,X}(b, a) = \langle x(t), h_{b,a}(t) \rangle = \langle X(f), H_{b,a}(f) \rangle \quad (3.19)$$

Bu eşitlikte $\langle \cdot \rangle$ iç çarpımı göstermektedir ve $X(f)$ ve $H_{b,a}(f)$ ifadeleri de sırasıyla sinyalin Fourier dönüşümlerini ve dalgacık ana fonksiyonunu temsil etmektedir. $H_{b,a}(f)$ parametresi Eşitlik 3.20'de verilen dalgacık temel fonksiyonunun Fourier dönüşümünün alınmasıyla hesaplanabilir:

$$H_{b,a}(f) = \sqrt{a} e^{-j2\pi j b} H(af) \quad (3.20)$$

Burada $H(af)$ genişleyen dalgacığın Fourier dönüşümünü ifade etmektedir. $X(f)$ ve $H_{b,a}(f)$ Eşitlik 3.19'da yerine konulursa frekans bölgesinde $SDD_x(b, a)$ Eşitlik (3.21) ile elde edilir.

$$SDD_x(b, a) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) H^*(af) e^{j2\pi j b} df \quad (3.21)$$

Eğer $H(f)$ aynı zamanda frekans alanındaki bir pencere işlevi ise, merkezi f_h ve yarıçapı Δ_{hf} Eşitlik (3.16) ve Eşitlik (3.17) kullanılarak hesaplanabilir. Eğer $H(af)$ ana dalgacığın merkez frekansı Eşitlik (3.22) ile ifade edilir.

$$H^*(af) = \eta_a \left(a \left(f - \frac{f_h}{a} \right) \right) \quad (3.22)$$

Bu eşitlikteki f_h/a ifadesi dalgacık penceresi frekans bölgesinde merkezlendiğindeki frekans olan merkez frekansı olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik (3.21) referans alınarak dalgacık penceresinin frekans bölgesinde bir Δ_{hf}/a yarıçapına sahip olduğu ve dolayısıyla

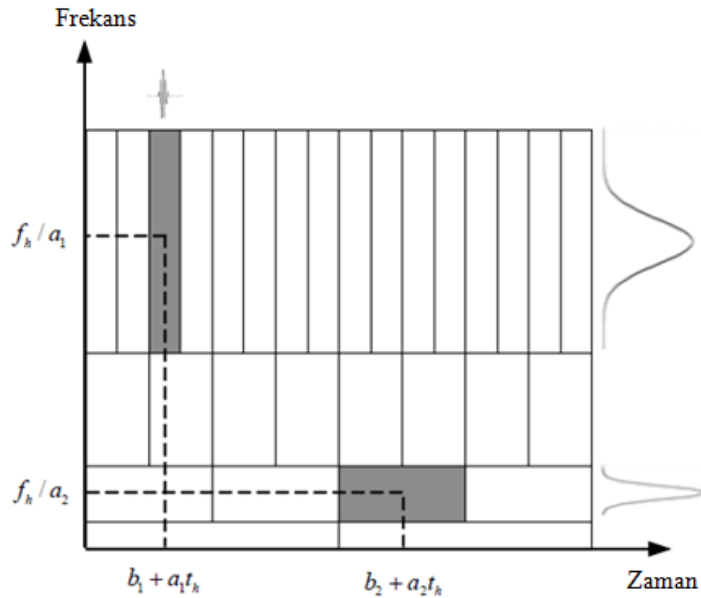
Eşitlik(3.16) tarafından verilen dalgacık dönüşümü, $X(f)$ 'in yerel bilgisini Eşitlik 3.23'te verilen bir frekans penceresi ile sınırlandırılmış olarak vermektedir.

$$\left(\frac{f_h}{a} - \frac{\Delta_{hf}}{a}, \frac{f_h}{a} + \frac{\Delta_{hf}}{a}\right) \quad (3.23)$$

Eşitlik (3.23), frekans penceresinin $2\Delta_{hf}/a$ genişliğe sahip olduğunu belirtir ve bu da genişlemenin büyük değerleri için çok kompakt (yoğun) hale gelir. Eşitlikler (3.18) ve (3.23) dikkate alındığında, sürekli dalgacık dönüşümü tarafından değerlendirilen $x(t)$ 'nin bilgileri, her bir genişleme ve öteleme değeri çifti için iki boyutlu bir esnek zaman-frekans penceresi içinde sınırlandırılmaktadır.

$$(b + at_h - a\Delta_{ht}, b + at_h + a\Delta_{ht}) \times \left(\frac{f_h}{a} - \frac{\Delta_{hf}}{a}, \frac{f_h}{a} + \frac{\Delta_{hf}}{a}\right) \quad (3.24)$$

Eşitlik (3.24) 'ten $SDD_x(b, a)$ 'nın değişen bir zaman frekans çözünürlüğüne sahip olan $x(t)$ sinyalinin zaman-frekans analizini sunduğu sonucuna varılabilir. Pencere, a 'nın küçük değerleri için zaman bölgesinde otomatik olarak daralır (veya frekans alanında genişler) ve bunun tersi de geçerlidir. Her ne kadar analiz penceresinin genişliği hem zaman hem de frekans bölgesinde genişlemeyle daralır ya da genişlerse de zaman-frekans penceresinin alanı her zaman sabittir ve Şekil 3.4'te gösterildiği gibi $4\Delta_{ht}\Delta_{hf}$ 'ye eşittir.



Şekil 3.4. Dalgacık dönüşümünün zaman-frekans penceresi

3.5.1.2. Dalgacık Dönüşümünün Özellikleri

Dalgacık dönüşümü, titreşim sinyali gösterimi için arzu edilen bir takım özelliklere sahiptir ve bunların çoğu literatürde kapsamlı şekilde incelenmiştir. Bu bölümde sürekli dalgacık dönüşümünün bazı önemli özellikleri özetlenmiştir.

Zaman ve Frekans Bölgelerinde Lokalizasyon: Eşitlik (3.11) ile verilen dalgacık dönüşümü lokal değildir ve bu nedenle, belirli bir zamanda ve genişlemedeki dalgacık dönüşümü katsayısı, tüm zaman durumları için analiz edilen sinyale bağlıdır. Dalgacık penceresinin merkezi $(b+at_h)$ konumundaysa, Eşitlik (3.24)'e göre dönüşüm $2a\Delta_{ht}$ 'lik bir zaman aralığında sınırlandırılır. Bu nedenle dalgacık dönüşümünün zaman lokalizasyonu genişleme parametresinin değerine bağlıdır ve iyi bir zaman lokalizasyonu kısa süreli sinyallerin gösterilmesini sağlar.

Belirli bir genişleme değeri için, frekans bölgesinde karşılık gelen dalgacık penceresi, $2\Delta_{hf}/a$ frekans penceresi genişliğiyle f_h/a 'da yer alır. Zaman bölgesinde olduğu gibi, frekans bölgesindeki pencere konumu ve genişliği, genişlemenin değerine bağlıdır. Sonuç olarak dalgacık dönüşümü, frekans bölgesinde f_h/a dalgacık merkez frekansı etrafında bir $2\Delta_{hf}/a$ frekans aralığı içinde sınırlandırılır. Bir dalgacık dönüşümünün iyi frekans lokalizasyonu, düşük frekanslı sinyal bileşenlerinin çözülmesini sağlar.

Doğrusallık: Doğrusal olmayan zaman-frekans bölgesi yöntemlerinin aksine, sürekli dalgacık dönüşümü analiz edilen sinyalin doğrusal ayrışmasına neden olur. Bu sebeple, hedef sinyalin yorumlanmasını azaltacak herhangi bir titreşim girişimine (parazite) neden olmamaktadır.

Sinyal Enerjisinin Korunması: Sinyal enerjisi, sürekli dalgacık dönüşümü ile korunur. Bu da, sinyal enerjisinin sürekli dalgacık dönüşüm katsayılarından hesaplanabileceği anlamına gelmektedir.

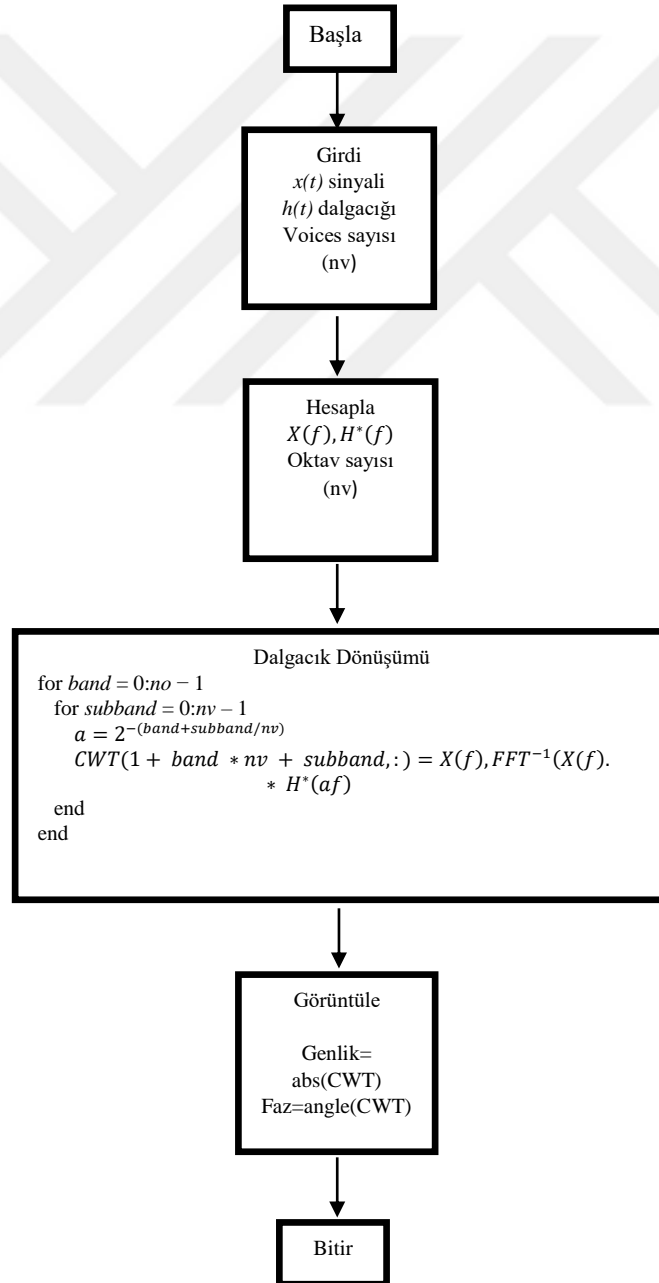
$$E_w = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{c_h} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{CWT_x(b,a)}{a^2} \right|^2 da db \quad (3.25)$$

3.5.2. Dalgacık Dönüşümünün Uygulanması

Dalgacık dönüşümü zaman bölgesinde ya da frekans bölgesinde gerçekleştirilen bir dönüşümdür. Dönüşümün zaman bölgesi hesaplaması, Eşitlik (3.12)'nin ayrık versiyonunun doğrudan uygulanmasıyla elde edilir. Zaman bölgesi hesaplamasının bir konvolüsyon işlemi olmasından dolayı, gerçekleştirilen dalgacık dönüşümü daha yüksek bir hesaplama yükü

meydana getirmektedir. Buna karşın frekans bölgesi ifadesi göz önüne alındığında dalgacık dönüşümünün hızlı bir şekilde hesaplanması basit çarpma işlemleriyle sağlanabilmektedir.

MATLAB programında yazılan kod ile yapılan dalgacık dönüşümünün, hızlı hesaplama prosedürüne ait akış şeması Şekil 3.4'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Bu prosedürde hesaplama her oktavin eşit şekilde seslere bölündüğü oktav bandı analizine dayanır. Dalgacık hesaplamasında kullanılan oktav sayısı, veri zaman kaydının uzunluğu tarafından belirlenmesine rağmen ses sayısının seçimi, dönüşümün istenen frekans çözünürlüğüne bağlıdır ve ses sayısı büyüdükçe, frekans çözünürlüğü daha iyi hale gelmektedir. Şekil 3.5'deki akış şemasında, “abs(CWT)” ve “angle(CWT)” ifadeleri sırasıyla dönüşümün genliğini ve fazını belirtmektedir.



Şekil 3.5. Dalgacık Dönüşümü hesaplamasının blok diyagramı

3.5.3. Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Son zamanlarda, sinyallerde ve görüntülerde bulunan gürültüyü gidermek için ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) kullanımına büyük ilgi gösterilmektedir. DWT, farklı frekans bantlarındaki sonlu uzunluklu bir zaman bölgesi sinyalinin genel yaklaşımına ve detay bilgisine ulaşmada ardışık ayrıştırma yoluyla farklı çözünürlüklerde analiz eden bir toplu yöntemdir [54].

3.5.3.1. Ayrık Dalgacık Dönüşümü Teorisi

Eğer Eşitlik (3.11)'de diydik ölçek $a_j = 2^j$ ve öteleme $b_{j,k} = k2^j$ olarak seçilirse eşitlik (3.28) elde edilir.

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * \psi_{j,k}(t) dt \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.28)$$

Bu durumda ölçeklenmiş ve ötelenmiş ana dalgacık aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilebilir.

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (3.29)$$

Dalgacık katsayıları (veya detay katsayıları) $d_{j,k}$ orijinal sinyalin zaman-frekans haritası olarak alınır. Dalgacık $\psi(t)$ ve ölçekleme fonksiyonları $\psi_{j,k}(t)$ arasındaki ilişki açısından bakıldığında ise

$$|\hat{\Phi}(\omega)|^2 = \sum_{j=-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}(2^j \omega)| \quad (3.30)$$

Eşitliği elde edilmektedir. Ayrık dalgacık fonksiyonuna karşılık gelen ayrık ölçekleme fonksiyonu Eşitlik (3.31) şeklinde olmaktadır.

$$\Phi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (3.31)$$

.Bu ölçekleme fonksiyonu sinyali örneklemek için kullanılmaktadır ve örneklenen değerler de ölçeklendirme katsayıları ya da yaklaşım katsayıları, $c_{j,k}$ olarak adlandırılmaktadır. Bu ölçeklendirme katsayıları Eşitlik (3.32) ile ifade edilmektedir.

$$c_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) * \Phi_{j,k}(t) dt \quad (3.32)$$

Bu eşitlikteki j alt indisi 1'den büyük olduğunda ($j > 1$), ölçeklendirme katsayıları ve dalgacık katsayıları aşağıdaki eşitlikler ile belirlenmektedir.

$$c_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i - 2k) c_{j,k} \quad (3.33)$$

$$d_{j+1,k} = \sum_{-\infty}^{\infty} g(i - 2k)c_{j,k} \quad (3.34)$$

Bu eşitliklerdeki g ve h terimleri dalgacık fonksiyonu $\psi(t)$ ve ölçekleme fonksiyonu $\phi(t)$ kullanılarak hesaplanan yüksek geçiren ve alçak geçiren filtreleri ifade etmektedir. $c_{j+1,k}$ ve $d_{j+1,k}$ katsayıları da $(j - 1)$ ölçeklendirme katsayısının yüksek ve alçak frekanslardaki ayrıştırılmasını temsil etmektedir. Dalgacıklarla ilgili tartışmalar türlerinin ilk ve en basiti olan Haar dalgacık ile başlar. Haar dalgacık sürekli değildir ve bir adım fonksiyonuna benzemektedir. Haar dalgacık fonksiyonu;

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 0.5 \\ -1, & 0.5 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.35)$$

Bu dalgacık fonksiyonuna karşılık gelen ölçekleme fonksiyonu ise aşağıdaki eşitlikte verilmektedir:

$$\phi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.36)$$

3.5.3.2. *Dalgacığı Gürültüden Arındırma*

Çoğu gürültü giderme yöntemi aslında zaman serilerindeki gürültü içeriği hakkında bilgi gerektirir. Dalgacık dönüşümü yardımıyla gürültü arındırma işleminde ise sinyalin gürültü içeriğinin bilinmesine gerek yoktur. Bunun nedeni dalgacık dönüşümünün (WT) ilk önce sinyale uygulanması ve daha sonra belirli bir büyüklüğün altındaki tüm katsayıların atılmasıdır [55]. Bu teknik, ayrıştırılan dalgacık katsayılarının bir kısmının sinyal ortalamalarına karşılık geldiği ve diğerlerinin orijinal sinyal üzerindeki detaylarla ilişkili olduğu temeline dayanmaktadır [56].

Dalgacık gürültü arındırma yaklaşımı, bir sinyaldeki rastgele olmayan değişikliklerin az sayıdaki nispeten büyük katsayılarla tutulurken rastgele hataların tüm katsayılar üzerinde mevcut olduğu gözlemine dayanmaktadır. Sonuç olarak, dalgacık bölgesinde bir doğrusal olmayan eşikleme (daralma) fonksiyonu, gürültü katsayıları sıfıra düşme eğilimindeyken, temelde yatan (öncelikli) sinyali temsil eden birkaç daha büyük katsayıyı tutma eğilimindedir.

Pratik olarak, dalgacık gürültüden ayırma yöntemi, ayrık dalgacık dönüşümünü orijinal gürültülü verilere uygulamayı, detay katsayılarını eşiklemeyi ve ardından zaman-bölgesi gürültüsüz verileri elde etmek için eşiklenmiş katsayıları ters çevirmeyi içermektedir. Eşik

değeri λ , Stein'in tarafsız risk tahmini (SURE) veya Evrensel eşik veya Heuristic prensipler kullanılarak hesaplanır ve “sert” ve “yumuşak” olmak üzere iki eşikleme olarak kullanılmaktadır. Sert eşiklemede, λ eşik değerinin altındaki tüm dalgacık katsayıları sıfıra gitmesi için zorlanır. Matematiksel olarak, dalgacık katsayıları w için, hem sert hem de yumuşak eşikleme prosedürleri aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir:

Sert-Eşikleme:

$$\hat{w} = \begin{cases} w & |w| > \lambda \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.37)$$

Yumuşak Eşikleme:

$$\hat{w} = \begin{cases} w - \lambda, & |w| > \lambda \\ w + \lambda, & |w| < -\lambda \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.38)$$

3.6. Sınıflandırma Teknikleri

Sınıflandırma teknikleri tahmin edici algoritma olarak tanımlanmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise sınıflandırma tekniklerinden yapay sinir ağları (YSA), destek vektör makineleri (DVM), rastgele orman (RO) ve k en yakın komşu (kNN) algoritmaları kullanılmıştır. Bu tekniklere ait genel bilgiler aşağıda açıklanmaktadır.

3.7. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, insan sinir sisteminin öğrenme yöntemine benzer şekilde geliştirilmiş bir öğrenme algoritmasıdır. Yapay sinir ağları ilk olarak 1943 yılında Mc Culloch ve Walter Pitts tarafından modellenmiştir [57]. YSA'lar da insan sinir sistemi gibi nöronlardan oluşmaktadır. Tıpkı insan sinir sisteminde olduğu gibi bu nöronlar da birbirlerine direk bağlanabileceği gibi karmaşık şekillerde de bağlanabilmektedir. İnsan sinir sisteminde bulunan nöronlar gibi YSA'daki nöronların da çok sayıda girişi ve tek bir çıkışı bulunmaktadır. Nöronlara gelen her bir girişin ağırlıkları farklı olmaktadır. Girişlerden farklı olarak da bazı nöronlara besleme (bias) ea eklenmektedir. Genel olarak nöronun çıkışı Eşitlik (3.39)'daki gibi elde edilmektedir.

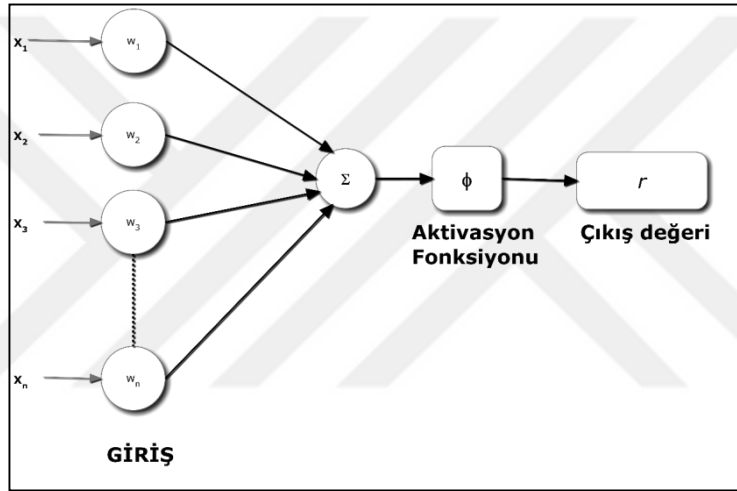
$$r = \sum_{i=1}^N w_i \times x_i + b \quad (3.39)$$

Eğer nöronda besleme bulunmazsa nöron b değeri sıfır olmaktadır. Eşitlik (3.39)'da bulunan N giriş sayısını, w her bir girişin ağırlığı, x giriş değerini ve b besleme değerini

göstermektedir. Bu nöronun çıkış değeri elde etmek için ise Eşitlik (3.40) kullanılarak elde edilen toplam bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilmiştir. Nöronun çıkış elde etmek için kullanılan aktivasyon fonksiyonunu ϕ ile gösterirsek nöronun çıkışı eşitlik (3.40)'daki gibi elde edilmektedir.

$$y = \phi(r) = \phi\left(\sum_{i=1}^N w_i \times x_i + b\right) \quad (3.40)$$

Çıkış elde etmek için kullanılan aktivasyon fonksiyonu problemin yapısına uygun olarak farklı şekillerde olabilmektedir. Bu fonksiyonlardan bazıları sigmoid fonksiyon, eşik fonksiyonu veya hiperbolik tanjant fonksiyonlarıdır. Belirtilen nöron yapısı Şekil 3.6'de



verilmiştir.

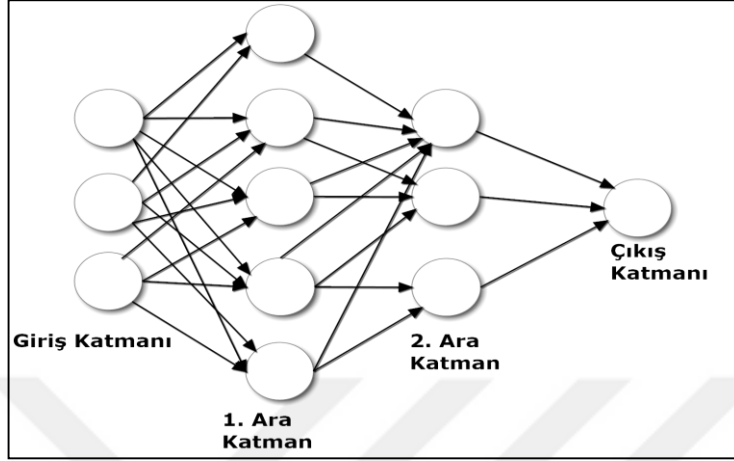
Şekil 3.6. Yapay sinir ağları hücre yapısı

Bir nöronun çıkışı farklı katmanlardaki nöronların girişi olmaktadır. Bu sayede birçok farklı katman kullanılarak oluşturulan YSA yapısının çıkışı hesaplanabilmektedir. Bu şekilde çok katmanlı bir yapay sinir ağı modeli oluşturulur [58]. Örnek çok katmanlı YSA yapısı Şekil 3.7'de verilmiştir.

Hücrenin çıkışı her zaman istenilen değeri vermeyebilir. Bu nedenle hücredeki ağırlıkların değiştirilmesi gerekmektedir. Bu ağırlıkların değiştirilmesi işlemi yapay sinir ağlarında öğrenme işlemidir. Yapay sinir ağlarında öğrenme için birçok farklı algoritma kullanılmıştır. Geri yayılım algoritması da bu algoritmaların başında yer almaktadır. Geri yayılım

algoritmasında bir hücreden elde edilen çıkış değeri y_i ile ve hücreden asıl elde edilmesi istenen değer d_i ile gösterildiğinde i . nörondaki hata Eşitlik (3.41)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_i = d_i - y_i \quad (3.41)$$



Şekil 3.7. Çok katmanlı YSA yapısı

Geri yayılım algoritmasının amacı ise her bir hücredeki yer alan hataların karesel toplamı olan maliyet fonksiyonunu minimum yapmaktır. Minimum yapılması istenen maliyet fonksiyonu Eşitlik (3.42)'deki gibi elde edilir.

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (e_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_i (d_i - y_i)^2 \quad (3.42)$$

Bu maliyet fonksiyonun minimum amaçla delta kuralı kullanılmaktadır. Delta kuralı çıkışta oluşan hata nedeniyle ağırlıklardaki değişimi ifade etmektedir. Buradaki delta değeri nörona kullanılan aktivasyon fonksiyonunun türevidir. Bir nöron için delta değeri ile yeni ağırlık değerleri sırasıyla Eşitlik (3.43) ve Eşitlik (3.44) 'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\delta_i = \varphi'(y_i) \times e_i \quad (3.43)$$

$$w_i^* = w_i + \delta \times x_i \quad (3.44)$$

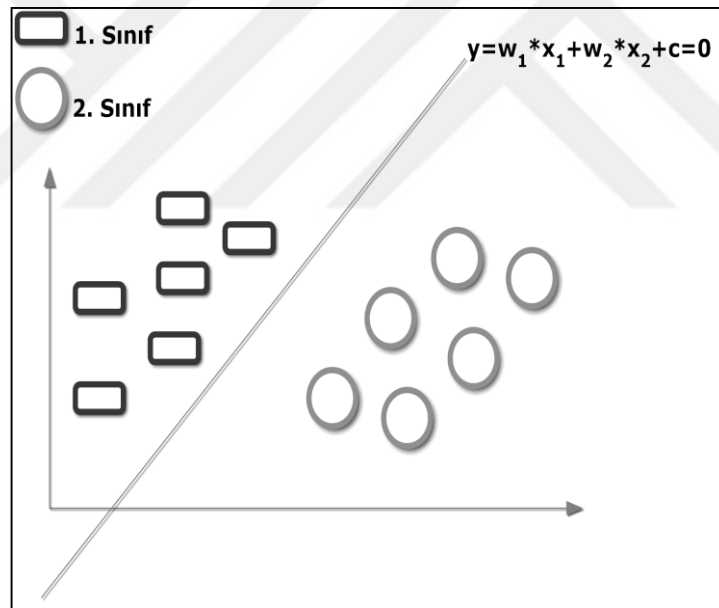
Görüldüğü gibi delta kuralının uygulanması sırasında ağırlık öğrenmesi hızına bir etki bulunmamaktadır ve bu nedenle ağırlık öğrenmesi yavaş olabilmektedir. Bu nedenle bir öğrenme katsayısı Eşitlik (3.44)'e yerleştirilmiştir. Bu sayede öğrenme işlemi kademeli olarak gerçekleştirilmiş ve bu işlem kademeli (gradyent) azalış işlemi olarak adlandırılmıştır. Hücredeki ağırlıkların hesaplanması için kullanılan son Eşitlik (3.45)'deki gibidir.

$$w_i^* = \eta + \delta \times x_i \quad (3.45)$$

Geri yayılım algoritmasında her bir yineleme işleminde ileri yayılım yapılarak çıkışlar elde edilir ve hata değerleri için tekrar geri yayılım yapılır. Bu işlem maliyet fonksiyonu minimum değeri alana kadar devam etmektedir.

3.8. Destek Vektör Makineleri

Destek vektör makineleri (DVM) Vapnik tarafından örüntü tanıma ve sınıflandırma işlemlerini yapabilmek amacıyla 1995 yılında geliştirilen bir öğreticili sınıflandırma algoritmasıdır [59]. DVM'lerin temelleri istatistiksel öğrenme teorisi ve yapısal risk minimizasyonuna dayanmaktadır. Destek vektör makinelerinin amacı sınıflandırma işlemi için bir hiperdüzlem yardımıyla iki sınıfı birbirinden ayırmak için en uygun fonksiyonu tahmin etmektir. Veriler sınıflandırılırken birden çok düzlem elde edilebileceğinden, destek vektör makinelerinin amacı gerekli olan en uygun hiperdüzlemin elde edilmesidir.



Şekil 3.8. Doğrusal ayıraç

İki boyutlu uzayda bu destek vektörü bir doğrudur ve denklemini de bir doğru denklemini olup Eşitlik (3.46)'deki gibi yazılır.

$$x_2 = mx_1 + c \quad (3.46)$$

Bu eşitlik, eşitlik (3.47)'deki gibi tekrar düzenlenebilir.

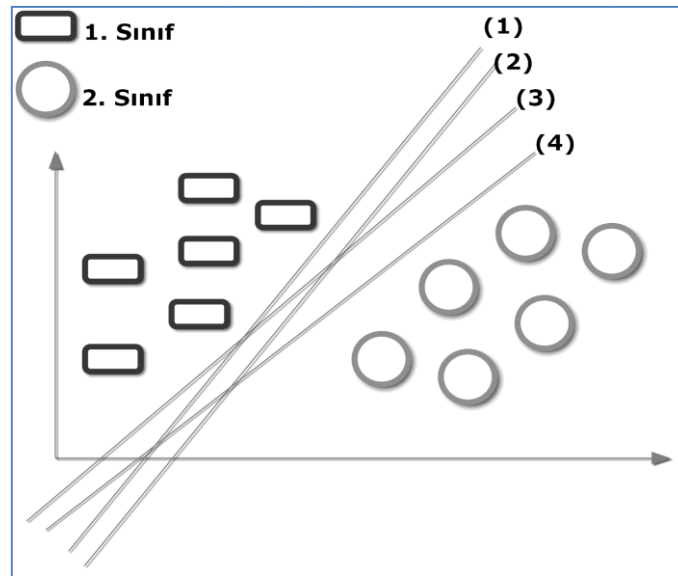
$$f(x) = w_1x_1 + w_2x_2 - c \quad (3.47)$$

Eğer sınıflar lineer olarak ayrılabilirse iki boyut için elde edilen vektör Şekil 3.8'da görüldüğü gibi lineer ayıraç olarak da tanımlanmaktadır ve aşağıdaki eşitlikteki gibi açıklanabilmektedir. Eşitlik (3.47) çok boyutlu uzaylar için Eşitlik (3.48)'deki gibi ifade edilebilir.

$$f(x) = W^T x - c = 0 \quad (3.48)$$

Elde edilen hiperdüzlemin boyutu bölünmek istenen uzayın boyutundan 1 eksik olmaktadır. Bu nedenle aslında hiperdüzlem iki boyutlu uzay için bir doğru, üçboyutlu uzay için bir düzlem ve çok boyutlu uzay için bir hiperdüzlem olarak adlandırılmaktadır. Ede edilen hiperdüzlem $W^T x > c$ ve $W^T x < c$ olmak üzere uzayı iki parçaya bölmektedir. Buradaki W vektörü hiperdüzlemin oryantasyonunu (eksen ile yapılan açığı) belirlerken, c sabiti ise hiperdüzlemin pozisyonunu belirlemektedir.

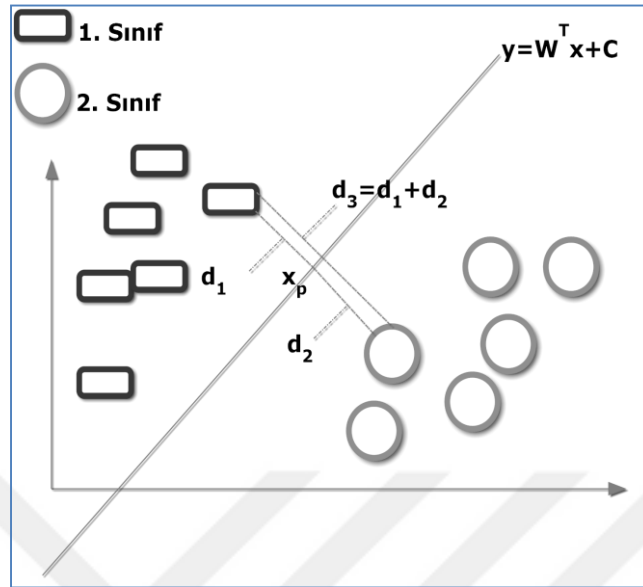
Fakat Şekil 3.9'de de gösterildiği gibi iki sınıfı ayıran sonsuz sayıda doğru (düzlem) bulunmaktadır. Destek vektör makineleri ise bu düzlemler arasında bir optimizasyon yaparak en uygununu bulur.



Şekil 3.9. Çok sayıda lineer ayıraç

Bu amaçla da destek vektör makinelerinin iki sınıfı arasındaki uzaklığı maksimum yapacak hiperdüzlemi bulmalıdır. Bu amaçla düzlem üzerindeki x_p noktasından sınıfların düzleme en yakın olan noktaya olan vektörün dik uzaklığına bakılmaktadır. Bu dik uzaklığı maksimum

yapacak olan düzlem en iyi düzlem olarak seçilmektedir. Bu düzlemi çevreleyen vektörlere ise destek vektörlere denmektedir.



Şekil 3.10. Sınıfları ayıran düzlem ile sınıflar arasındaki uzaklık

En uygun hiperdüzlem Şekil 3.10'da verildiği gibi elde edilen destek vektörlerinin ortasında yer almaktadır. Bu nedenle d_1 ve d_2 uzaklıkları birbirine eşittir. Bu nedenle d_3 uzaklığı $d=2/||w||$ olarak hesaplanabilmektedir. Buradaki sınırlar arasındaki maksimum uzaklığın elde edilebilmesi için $||w||^2$ fonksiyonunun minimize edilmesi gerekmektedir. Buradaki d_3 'ün maksimize edilmesini amaçlayan optimizasyon problemi, farklı bir şekle dönüştürülerek bir minimizasyon problemine çevrilmiştir. Minimum çözümünün bulunması istenen amaç fonksiyonu Eşitlik (3.49)'da verilmiştir.

$$\text{Amaç fonksiyonu} = \frac{1}{2} \text{Min} ||w||^2 \quad (3.49)$$

Yukarıda verilen amaç fonksiyonu incelendiğine bu fonksiyonun doğrusal bir fonksiyon olmadığı anlaşılmaktadır. Doğrusal olmayan modellerde ise en iyi çözümün Karush Kuhn Tucker (KKT) şartlarının sağlanması gerekmektedir [60,61]. KKT koşullarının dört farklı şartı bulunmaktadır. Bu şartlardan ilki amaç fonksiyonunun gradiyenti ile kısıt fonksiyonlarının gradiyentlerinin her kısıt için tanımlanmış parametlerle çarpımlarının toplamı sifıra eşit olmalıdır. İlk KKT şartının genel matematiksel olarak ifadesi Eşitlik (3.50)'de verilmiştir.

$$\Delta f(x^*) + \sum_{j=1}^m \mu_j + \Delta g_j(x^*) + \sum_{j=1}^r \lambda_j + \Delta h_j(x^*) = 0 \quad (3.50)$$

Bu denklemde yer alan g ve h fonksiyonları ise kısıt fonksiyonlarıdır. İkinci bir şart olarak bulunan çözüm alacağı değerlerde tamamlayıcı koşulları yerine getirmelidir. İkinci KKT şartının genel olarak matematiksel ifadesi de Eşitlik (3.51)'deki gibi verilmiştir.

$$x^*(\Delta f(x^*) + \sum_{j=1}^r \lambda_j + \Delta h_j(x^*))=0 \quad (3.51)$$

Üçüncü bir şart olarak ise bulunan çözümler, kısıt fonksiyonları ile belirlenen bütün kısıtlara uymalıdır. Örnek olarak verilen g ve h fonksiyonları için kısıtlar Eşitlik (3.52)'deki gibi tanımlanabilmektedir.

$$\begin{cases} g_j(x^*) = 0, j = 1 \dots m \\ h_j(x^*) = \in 0, j = 1 \dots r \end{cases} \quad (3.52)$$

KKT koşullarının son şartı olarak ise çözümler problemde verilen kısıtlar için elde edilen çarpanlardan verilen ek şartların sağlanması gerekmektedir. Son şartın ifadesi de Eşitlik (3.53)'deki gibi verilmiştir.

$$\begin{cases} \lambda_j h_j(x^*) \\ \lambda_j \in 0, j = 1 \dots r \end{cases} \quad j = 1..r \quad (3.53)$$

DVM'lerin çözümünde kullanılan tek kısıt fonksiyonu bulunmaktadır ve Eşitlik (3.54)'deki gibi verilmiştir.

$$\text{Kısıt fonksiyonu} = y = (wx + b) \geq 1 \quad (3.54)$$

DVM'ler için kullanılan amaç fonksiyonu ve kısıtlar göz önüne alındığında bu problemin çözümünde kullanılan Lagrange fonksiyonu Eşitlik (3.55)'deki gibi verilmiştir.

$$L_p(w, b, a) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n a_i [y_i(wx_i) + b] + \sum_{i=1}^n a_i \quad (3.55)$$

Kullanılan Lagrange fonksiyonu Cortes, Vapnik ve daha sonra Burges'in çalışmaları ile elde edilmiştir. Bu eşitliklerde her bir a_i Lagrange çarpanlarıdır. L_p , Lagrange çarpanlarını en büyükleyen, w ağırlık vektörü ve b sabitini en küçükleyen bir fonksiyondur. Eşitlik (3.55)'deki model, Eşitlik (3.55)'de verilen kısıt altında çözüldüğünde, her bir eğitim verisi için bir tane Lagrange çarpanı elde edilir. Lagrange çarpanları içerisinde sıfırdan büyük değer alanlar vektörler de destek vektörleri olarak adlandırmıştır [62]. Bu vektörler sınırların üzerinde yer alan vektörlerdir.

3.9. Rastgele Orman Algoritması

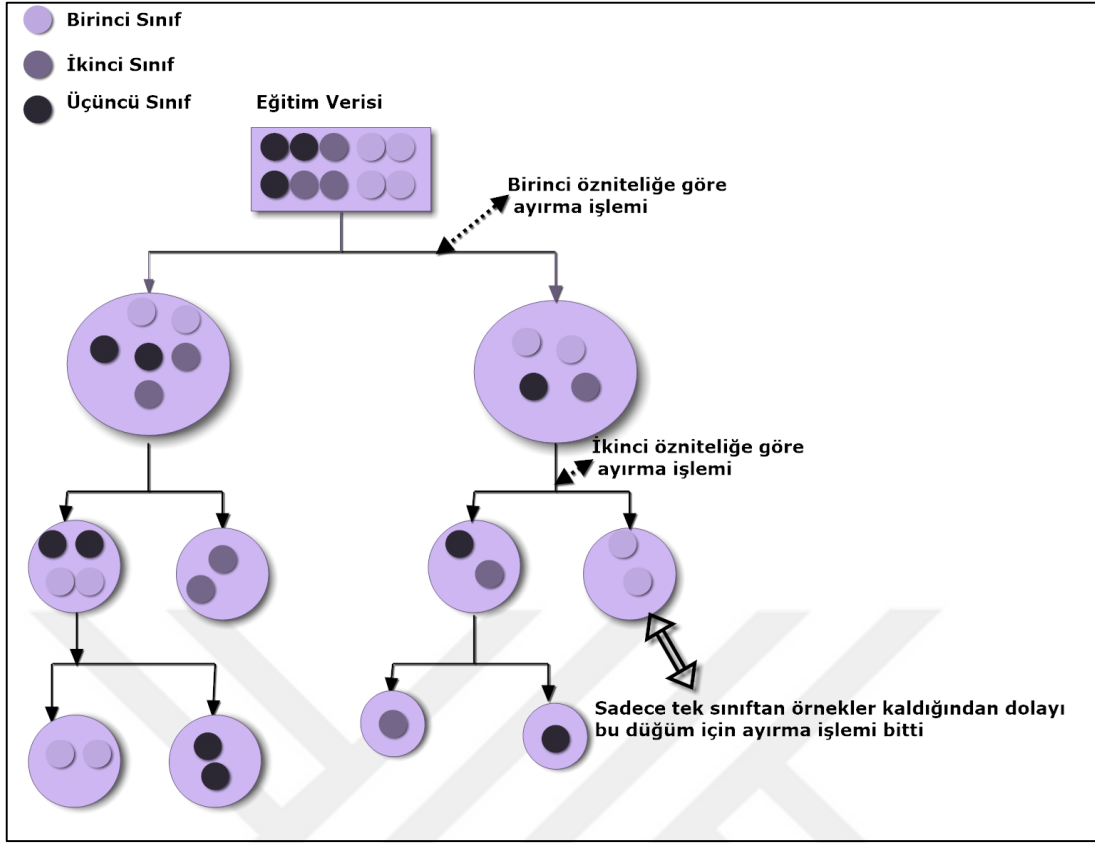
Rastgele Orman (RO) algoritması birden çok karar ağaçlarının bir araya gelmesiyle oluşturulan öğreticili bir makine öğrenme algoritmasıdır. RO algoritmasının temelini oluşturan karar ağaçları ilk olarak 1963 yılında Morgan ve Sonquist tarafından önerildikten sonra 1984 yılında Breiman tarafından önerilen regresyon ve sınıflandırma ağaçları (CART) algoritması ile sınıflandırma işleminde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [63,64].

Bir karar ağacı oluşturulurken kullanılan veri seti sadece bir sınıftan oluşan veriler kalasıya kadar düğümlere bölünür. Bu düğümlerin her biri bir dal olarak isimlendirilmektedir. Bu düğümlere bölmek için ise iki tane kriter kullanılmaktadır. Bu kriterler regresyon kriteri ve gini indeksidir. Bu kriterler sırasıyla Eşitlik (3.56) ve Eşitlik (3.57)'deki gibi tanımlanabilmektedir.

$$RSS = \sum_{sol}(y_i - y_l)^2 + \sum_{sağ}(y_i - y_r)^2 \quad (3.56)$$

$$Gini = N_l \sum_{k=1}^K p_{kl}(1 - p_{kl}) + N_r \sum_{k=1}^M p_{kr}(1 - p_{kr}) \quad (3.57)$$

Eşitlik (3.56)'da yer alan y_l ve y_r değerleri sırasıyla sol ve sağ düğümlerde yer alan verilerin ortalamasını oluşturmaktadır. Eşitlik (3.57)'de yer alan N_l ve N_r değerleri sırasıyla sağ düğümden ve sol düğümden yer alan elemanların sayılarını verirken, p_{kl} ve p_{kr} değerleri de sırasıyla sağ ve sol taraftaki sınıfların oranını göstermektedir. Verilen eğitim verisi kullanılarak üç sınıf için yapılan örnek bir ayırma işlemi ve elde edilen ağaç yapısı aşağıdaki Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Örnek Bir karar ağacı yapısı

Bir ağaç için oluşturulan bu yapının en büyük dezavantajı ise veri setine bağlı olmasıdır. Veri seti değiştiğinde bu yapıda oluşacak değişikliklerden dolayı tek bir ağaç yapısı sınıflandırma işlemlerinde yeterli olmamaktadır. Bu nedenle tek bir ağaç yerine birçok ağacın bir araya gelmesinden bir yapı oluşturulur. Bu yapıya orman adı verilmektedir. RO algoritmasında ise eğitim verisinden rastgele olarak seçilen birçok farklı alt uzay oluşturulmaktadır. N adet örnekten oluşan bir veri seti Eşitlik (3.57)'deki gibi düşünüldüğünde rastgele oluşturulan alt uzaylar Eşitlik (3.58)'deki gibi olmaktadır.

$$S = \begin{bmatrix} f_{A1} & f_{B1} & f_{C1} & \cdot & \cdot & C_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{AN} & f_{BN} & f_{CN} & \cdot & \cdot & C_N \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Eşitlik (3.58)'deki f_{A1} ifadesi birinci örneğin A özneliğini gösterirken, f_{BN} ifadesi N . örneğin B özneliğini göstermektedir. Bu denklemde yer alan C değerleri ise o örneğin ait olduğu sınıfı göstermektedir. N adet örnekten rastgele olarak seçilen M adet örneğin denklemi de Eşitlik (3.59)'daki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}
S_1 &= \begin{bmatrix} f_{A12} & f_{B12} & f_{C12} & \cdot & \cdot & C_{12} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{A20} & f_{B20} & f_{C20} & \cdot & \cdot & C_{20} \end{bmatrix}, \\
S_2 &= \begin{bmatrix} f_{A2} & f_{B2} & f_{C2} & \cdot & \cdot & C_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{A8} & f_{B8} & f_{C8} & \cdot & \cdot & C_8 \end{bmatrix}, \\
&\quad \quad \quad M \\
S_M &= \begin{bmatrix} f_{A4} & f_{B4} & f_{C4} & \cdot & \cdot & C_4 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{A9} & f_{B9} & f_{C9} & \cdot & \cdot & C_9 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.59}$$

Yukarıdaki belirtilen M adet alt uzay rastgele olarak seçilmiştir. Ne kadar rastgele olarak seçilirse örnekler arasındaki korelasyon azalacağından sonuç da o kadar doğru olmaktadır. Her bir alt veri kümesinden oluşturulan ağaçların sonucu T_i ile gösterildiğinde RO algoritmasının sonucu Eşitlik (3.60) ile hesaplanmaktadır.

$$RO = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M T_i \tag{3.60}$$

Eşitlik (3.60)'tan de anlaşılacağı gibi RO sonucu rastgele olarak oluşturulan ağaçlarının sonuçlarının ortalamasıdır. Tek bir ağaçtan elde edilen sınıflandırıcı güçlü bir sınıflandırıcı olmazken, bu şekilde bir orman yapısı kullanılarak elde edilen sınıflandırıcı güçlü bir sınıflandırıcı olmaktadır. Tek ağaç yapısının en büyük dezavantajı olan veri kümesinin değişiminden etkilenmesi durumu, bu sayede elimine edilmiştir.

3.10. K En Yakın Komşuluk (kNN) Algoritması

Bu algoritma, 1967 yılında Cover ve Hart tarafından önerilen ve denetimli öğrenme adı verilen örnek veri noktalarının mevcut olduğu bir algoritma olup yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem en yakın komşuların k değerine göre belirlendiği bir karar aşaması içermektedir. KNN algoritmasında eğitim süreci yoktur. Yöntemin gerçekleştirilmesi kolaydır ve analitik olarak izlenebilir.

KNN algoritması, öğrenme algoritmalarının en temel örnek tabanlı algoritmaların başında gelmektedir. Bu algoritmalarda, eğitim setinde tutulan veriler öğrenme işlemine dayalı olarak gerçekleştirilmektedir. Karşılaştığımız yeni örneklerin, elimizde olan eğitim setindeki örnekler ile benzerliği ölçülüp ona göre sınıflandırılmaktadırlar. kNN algoritmasında, eğitim setindeki örnekler n boyutlu sayısal nitelikler ile belirtilmektedir. Her örnek n boyutlu uzayda bir noktayı temsil edecek biçimde tüm eğitim örnekleri n boyutlu bir örnek uzayında tutulur. Bilinmeyen bir örnek ile karşılaşıldığında, eğitim setinden ilgili örneğe en yakın k tane örnek belirlenerek, yeni örneğin sınıf etiketi, k en yakın komşusunun sınıf etiketlerinin çoğunluk oylamasına göre atanır [64].

KNN algoritmasının performansını etkileyen en önemli parametreler uzaklık ölçütü, komşu sayısı (k) ve ağırlıklandırma. Aşağıda bu parametreler açıklanmaktadır.

Öklid uzaklığı, sınıflandırma ve kümeleme algoritmalarında en sık kullanılan uzaklık ölçütüdür. Öklid uzaklığı, iki nokta arasındaki doğrusal uzaklık olup herhangi iki nokta, P ve Q arasındaki Öklid uzaklığı $P=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ve $Q=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ olmak üzere, Eşitlik 3.61'e göre hesaplanır [65].

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.61)$$

Öklid uzaklığı, K-ortalama kümeleme algoritması, temel kNN algoritması gibi sınıflandırma ve kümeleme algoritmalarında, mesafe hesabı için kullanılan temel uzaklık ölçütüdür. kNN algoritmasında, komşu sayısı (k) parametresinin değerine dayalı olarak sınıflandırma yapılmaktadır. Sınıflandırma sürecinde, k=1 için, sadece en yakın komşunun bulunduğu sınıfa atanırken, k sayısı örnek sayısına yaklaştıkça veri setinde yer alan tüm veriler dikkate alınmakta ve bu duruma göre seçim yapılmaktadır.

4. DENEY DÜZENEĞİNİN KURULMASI

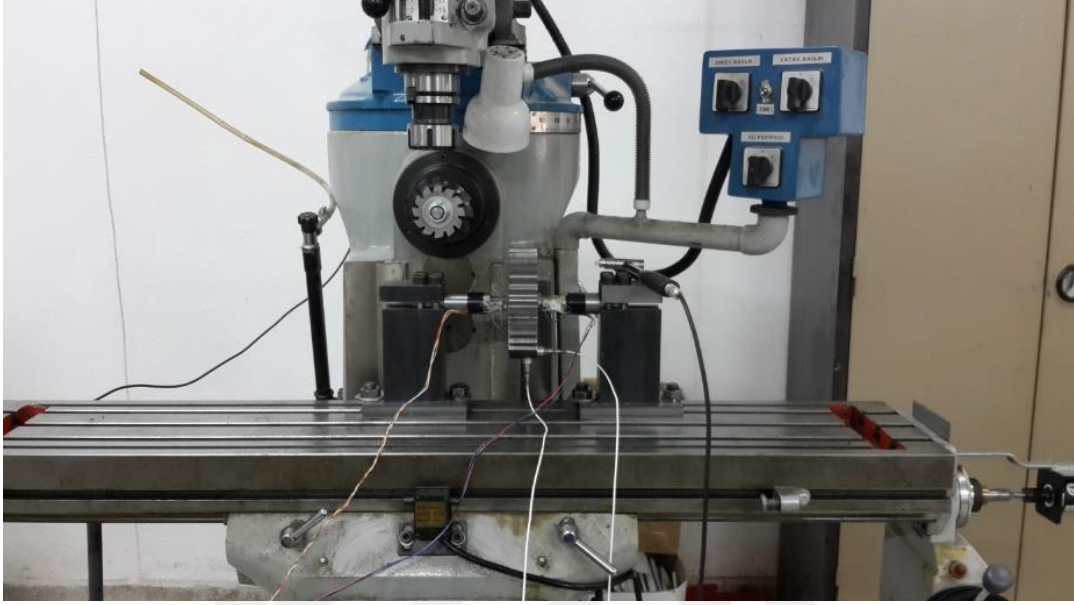
Bu bölümde modül freze yardımıyla dişli üretimi esnasında meydana gelen kesme kuvvetinin belirlenmesi ve kesici takımında oluşabilecek lokal diş hatalarının titreşim esaslı durum izleme yöntemleri ile tespit edilmesi için oluşturulan deney düzeneği ve kullanılan cihaz ve ekipmanlar ile ilgili detaylar verilecektir.

4.1. Deney Düzeneği

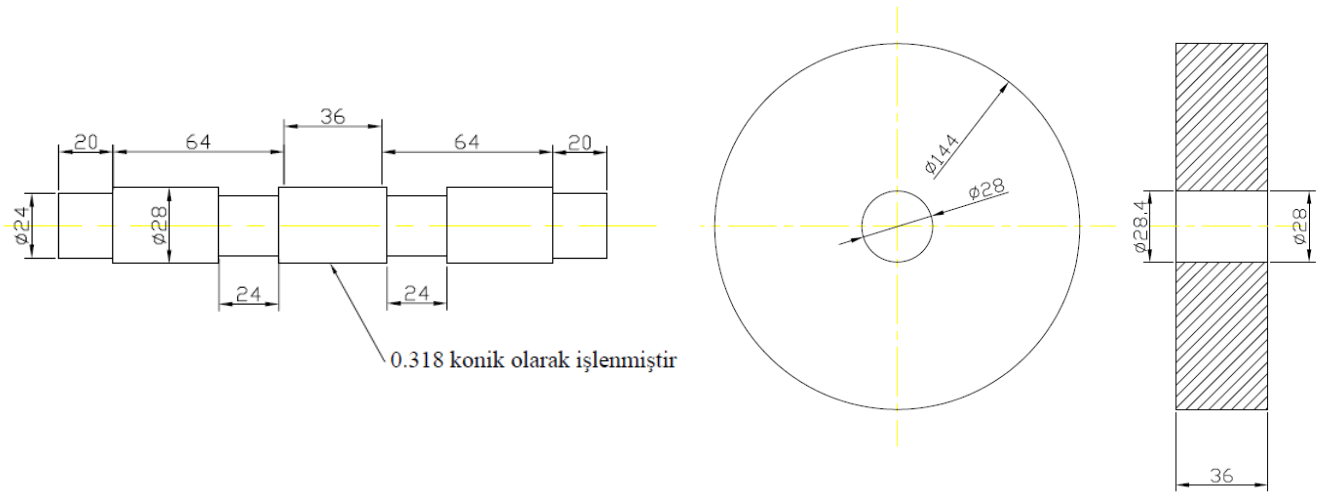
Bütün deneyler Resim 4.1'de görülen kalıpcı freze tezgahı üzerinde yapılmış olup, kesme işlemleri C45 imalat çeliğinden üretilen dişli taslağı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dişli taslağı özel olarak dizayn edilen ve iki ucundan sabitlenmiş, efektif boyu 164mm ve çapı 28mm olan imalat çeliğinden yapılmış olan taşıyıcı kirişe tutturulmuştur. Taşıyıcı kiriş ve dişli taslağına ait boyutları gösteren çizimler Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Dişli taslağı göbeği ve kirişin orta kısmı 0.318° konik olarak işlenmesi dişli taslağının taşıyıcı üzerine sürtünme esaslı konik yüzey teması yardımıyla tutturulmasına olanak sağlamıştır. Taşıyıcı kiriş tezgah tablasına iki adet destek parça yardımıyla katı biçimde bağlanmıştır. Taşıyıcı kiriş üzerine hem gerinim ölçerleri (gerinimölçer'leri) uygun bir biçimde tutturmak, hem de gerinimölçer köprüsünün duyarlılığını arttırmak amacıyla, her birinin kesit alanı $24\text{mm} \times 14.5\text{mm}$ olan iki adet dikdörtgenel bölge kirişin orta noktasına göre simetrik biçimde işlenmiştir. Gerinimölçer tutturma noktalarında oluşan gerilme genliklerinin (simetriden dolayı) birbirlerine eşit olmalarını sağlamak için kesme işlemi süresince dişli taslağı taşıyıcı kirişin ortasına monte edilmiştir.

Kesici takım olarak Resim 4.2'de gösterilen yüksek hız çeliğinden üretilmiş modül freze kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takım 4.5mm normal modüle, 90mm çapa ve üzerinde 12 tane kesici ağıza sahip olup, diş sayısı 26-34 arasında olan dişli çarkların üretimi için uygundur. Kesici takım, dönme eksenini yatayda olacak şekilde freze tezgahına tutturulmuştur. Normal modülü 4.5mm olan dişli çarkın diş yüksekliği 10.125mm ($2.25 \times m_n$)dir. 10.125mm diş yüksekliğini bir defada oluşturmak, hem takım ömrü hem de aşırı kesme kuvveti oluşturmasından dolayı zordur. Bu nedenlerden dolayı, bir diş boşluğu, her biri 2.025mm takım daldırması olacak şekilde 5 kademede üretilmiştir. Ayrıca kesme

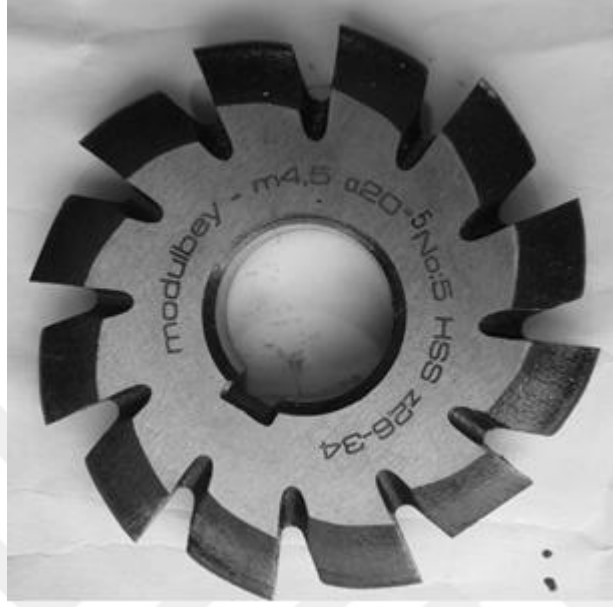
işlemi sırasında meydana gelen ısının zararlı etkilerini azaltmak ve verimi yükseltmek amacıyla soğutma sıvısı kullanılmıştır.



Resim 4.1. Kalıpcı freze tezgahı



Şekil 4.1. Taşıyıcı kiriş ve dişli taslağı çizimleri



Resim 4.2. Deneyler sırasında kullanılan modül freze

Tabla ilerleme hızını tespit etmek amacıyla Resim 4.3’de gösterilen ve çözünürlüğü 500 pik/devir olan enkoder, adımı 5mm olan tabla miline bağlanmıştır. Enkoder sinyalinin Fourier dönüşümü alınarak tabla ilerleme hızı frekans (Hz) cinsinden aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\text{ilerleme hızı (Hz)} = \frac{\text{tabla hızı (mm/sn)}}{\text{tabla mili adımı (mm)}} \times \text{enkoder çözünürlüğü (pulse/devir)} \quad (4.1)$$



Resim 4.3. Tabla hızı ölçümü için kullanılan enkoder

Periyodik olarak değişim gösteren olayların incelenmesinde, toplanan verilerin güvenilirliğini arttırmak, titreşimler içerisindeki rastgele bileşenleri azaltmak ve durum bildiren bileşenleri güçlendirmek amacıyla titreşimlerin belirli bir oluşum periyodu dikkate alınarak ortalamasının alınması oldukça önemlidir. Kesme işleminde meydana gelen çoğu olaylar (eksantriklik ve kesici takımın sahip olduğu kompozit hatalar gibi) kendilerini kesici takımın dönme periyodunda tekrar ederler. Deneyler sırasında elde edilen gerinimölçer ve titreşim sinyallerinin kesici takımın dönme periyoduna göre ortalamasını elde edebilmek için kesici takımın her devrinde bir pik üreten bir hall-effect sensörü kullanılmıştır ve bu sensör, Resim 4.4'te gösterildiği gibi kesici takımın tutturulduğu fener mili tarafından uyarılmaktadır.



Resim 4.4. Kesici takım konumunu belirten sensör

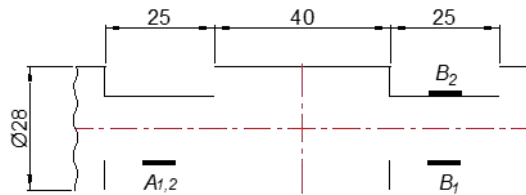
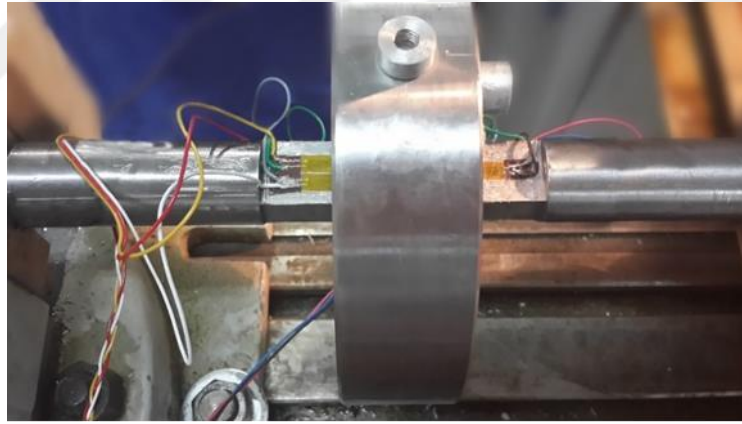
4.2. Kesme Kuvvetinin Ölçülmesi

Talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetinin doğru belirlenmesi, bölüm 2’de ifade edilen sebeplerden dolayı son derece önemlidir. Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetlerini ölçmek için Bölüm 1.2.1’de de ifade edildiği gibi birçok çalışma yapılmıştır. Özetlemek gerekirse, kesme tipinden bağımsız olarak kesme kuvvetlerinin ölçülmesinin temelde iki kategoride toplandığı görülmektedir.

Birinci kategoride adaptif ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır ve genelde kesici takıma güç veren motorun harcadığı elektriksel değerlerin (motor gücü/akımı gibi) izlenmesi esasına dayanır [66]. İkinci kategoride ise iş parçası veya kesici takım üzerine yerleştirilen gerilim ölçerler, yük hücreleri ve dinamometreler gibi algılayıcılar ve dönüştürücüler yardımıyla kuvvet ölçümü yapılmaktadır. Kullanılan bu kuvvet dönüştürücüleri, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan kuvvet ve yük ölçme sensörlerini içermektedir. Kullanıldıkları alanlara göre hassasiyetlerinde değişimler gözlenen bu algılayıcıların yük

hücresi, kuvvet dönüştürücüsü, dinamometre, yük reseptörü ve kuvvet transdüseri olarak adlandırılan daha basit yapıdan daha karmaşık yapıya kadar olan çeşitleri bulunmaktadır. Bu ölçüm elemanları hassasiyetlerine göre küçük terazilerden kantarlara kadar birçok uygulamada ve özellikle çok hassas ölçümlerin gerektiği çalışmalarda sıklıkla kullanılırlar. Bu cihazlar genellikle uygulanan yük karşısında elastik deformasyona uğrayan bir yay elemanın ya da metal şeritlerden ve bu şekil değişikliğini dijital veya analog olarak kullanıcıya göstermeye yarayan bir gösterge elemanından oluşmaktadır.

Bu çalışmada ise kesme esnasında meydana gelen radyal ve teğetsel kesme kuvveti bileşenlerini ölçmek için deformasyon ölçümünden yararlanılmıştır. Bu amaçla taşıyıcı kiriş üzerinde oluşturulan dikdörtgen kesitli alanlara gerinim ölçerler yapıştırılmış olup, konumları Resim 4.5'te gösterilmektedir. Bu şekilde gösterilen A ve B noktaları kirişin orta noktasının önünde ve arkasında 27mm uzaklıkta konumlandırılan gerinim ölçer'lerin yerini temsil etmektedir. Kesme kuvvetinin normal ve teğetsel bileşenlerini algılamak için her birinin nominal direnci 120Ω olan dört adet gerinim ölçer kullanılmıştır ve her biri yarım köprü olacak biçimde iki adet Wheatstone köprüsü oluşturulmuştur.



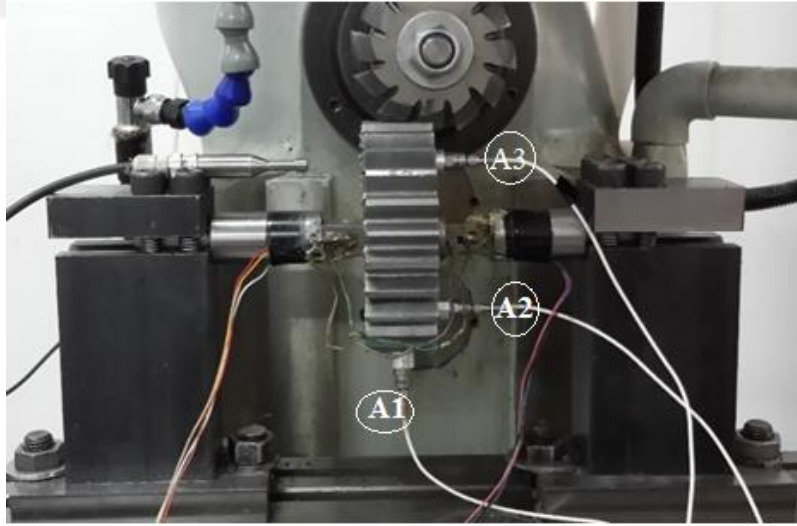
Resim 4.5. Kesme kuvvetini algılamada kullanılan gerinim ölçer konumları

Bilindiği üzere gerinim ölçer bir zorlamaya maruz kaldığında bünyesinde meydana gelen deformasyonla orantılı direnç değişimi sergiler. Zorlama sonucu oluşan deformasyon ile meydana gelen direnç değişimi Wheatstone köprüsü oluşturularak tahmin edilmektedir.

Ortam değişmelerinden etkilenen sensörler genel olarak zayıf ve küçük elektriksel işaretler üretirler. Bu işaretlerin işlenebilmesi için belli bir seviyeye çıkarılması gerekmektedir. Gerinim ölçer çıktı sinyallerini güçlendirerek (genliğini arttırmak) daha anlamlı ve yine işlenebilir bir hale dönüştürmek amacıyla IOtech firması tarafından üretilen DBK16 isimli gerinim ölçer sinyal güçlendirme ünitesi kullanılmıştır.

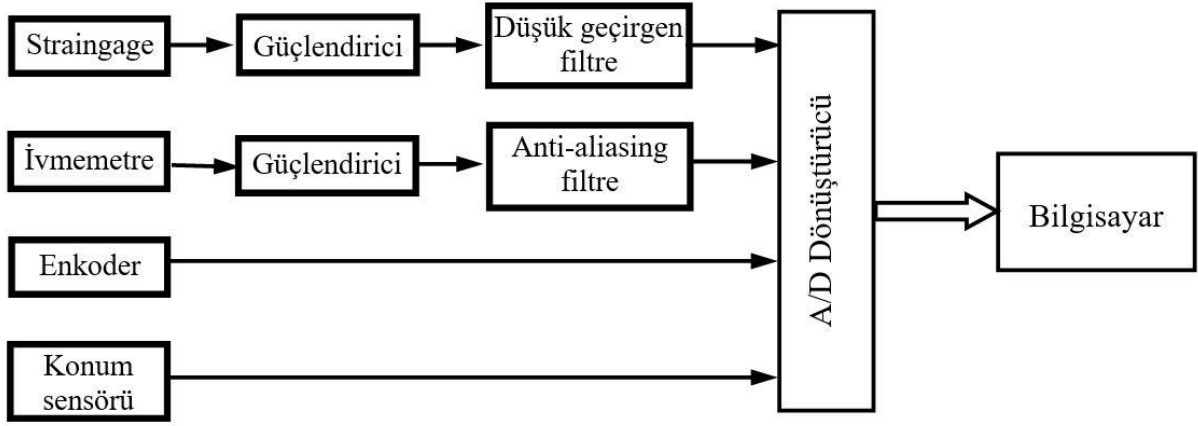
4.3. Titreşim Ölçüm Sistemi

Modül freze yardımıyla diş kesimi esnasında meydana gelen titreşimleri izlemek amacıyla Resim 4.6'da gösterilen 3 adet Dytran 3200B6 şok ivmemetresi kullanılmıştır. Bu ivmemetreler kesme esnasında radyal ve teğetsel yönde oluşan titreşim genliklerini ölçmek için A1, A2 ve A3 noktalarına monte edilmiştir. A1 noktasına monte edilen ivmemetrenin algılama doğrultusu radyal (taşıyıcı kirişe dik) yöndedir. Diğer taraftan A2 ve A3 noktalarına tutturulan ivmemetreler ise taşıyıcı kiriş eksenine paralel ve dişli merkezine göre simetrik olacak biçimde konumlandırılmışlardır. Kullanılan ivmemetrelerin maruz kalabileceği maksimum ivme değeri 2500g, duyarlılığı 2mV/g olup rezonans frekansı 100kHz'dir. İvmemetre çıktılarını güçlendirmek ve anti-aliasing filtreleme işlemi için IOtech firması tarafından üretilen DBK4 isimli dinamik sinyal güçlendirme devresi kullanılmıştır.



Resim 4.6. Kesme işlemi sırasında kullanılan ivmemetreler

Kesme işlemi sırasında ivmemetre, gerinim ölçer köprüsü, enkoder ve pozisyon sensöründen alınan sinyallerin tümü birbirleriyle eş zamanlı ve eş uzunlukta algılanmışlardır. IOtech firması tarafından üretilen DaqBoard2000 isimli devre yardımıyla bütün sinyaller dijital hale dönüştürülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Veri toplama sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Veri toplama sistemi şematik gösterimi

5. KESME KUVVETİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Bu bölümde modül freze yardımıyla diş kesimi esnasında meydana gelen kesme kuvvetinin teorik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi sunulmaktadır. Teorik kesme kuvvetinin hesaplanması ve bununla beraber deneysel olarak kesme kuvvetinin belirlenmesi açıklanmıştır. Teorik ve deneysel olarak elde edilen kesme kuvvetleri sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır.

5.1. Kesici Takım Diş Profilinin Oluşturulması

Bu çalışmada kesici takım olarak modül freze kullanılmıştır. Modül freze çakıları standart dişli çark profillerini açmak için kullanılır ve bu çakılar açılacak diş sayısı ve modülü bakımından standartlaştırılmışlardır. Diş profilleri diş sayılarına göre değiştiği için, aynı modüle sahip freze çakısının farklı olan her numarası farklı sayıdaki dişlerin açılmasında kullanılır.

Kesme kuvvetinin doğru ve hassas olarak tahmin edilmesi için oluşturulan kesici takım profilinin doğru modellenmesi son derece önemlidir. Modül freze çakısıyla imal edilmiş diş profilleri tam bir evolvent eğrisi olmamakla beraber, teorik kesme kuvveti hesaplamasında modül freze kesici ağız profili evolvent eğrisi olarak kabul edilmiştir. Kullanılan modül frezenin profili, kesme işlemi sonunda oluşan diş boşluğu ile aynı profile sahiptir. Bu sebeple öncelikle bir diş profilinin oluşturulma teorisi anlatılmıştır. Diş profili, köşe ve giriş kısmı olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Köşe kısmı, kesici takımın uç kısmıyla oluşturulurken, giriş kısmı ise evolvent diş yüzeyi ile oluşmaktadır.

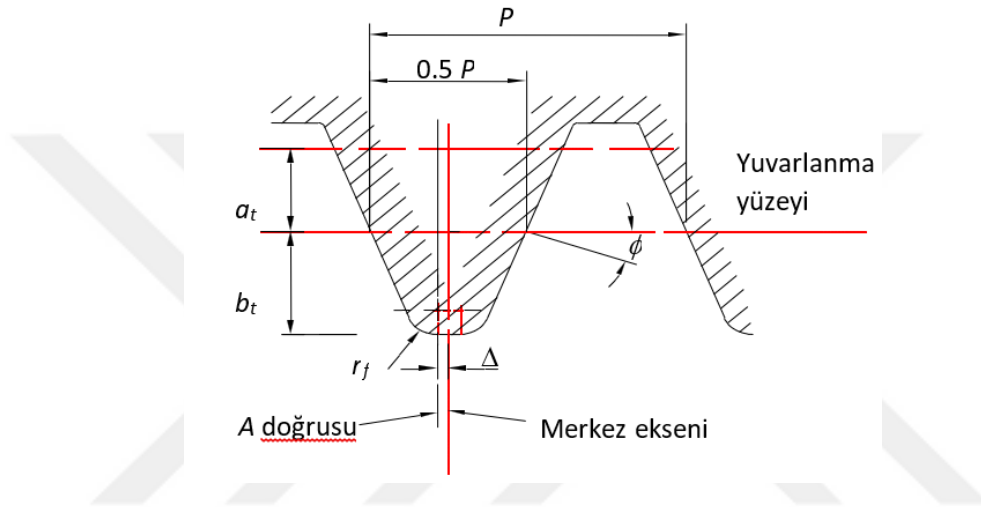
5.1.1. Köşe Kısmının Oluşturulması

Azdırma kesici takım yardımıyla dişli üretimi en yaygın kullanılan üretim metotlarından birisidir. Azdırma takımı, tek bir kramayer profilinin helis eğrisi boyunca yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Şekil 5.1'de kramayer kesici takımın kesiti gösterilmektedir. Kramayer kesici takım bölüm dairesi üzerinde yuvarlandığında, kramayer kesici takımının uç kısmı dişli çarkın köşe kısmını oluşturmaktadır. Burada a_t diş ucu, b_t diş dibi, ϕ kavrama(basınç) açısı, P adım

ve r_f ise uç yarıçapıdır. Şekilde de görüldüğü gibi uç yarıçapının merkezine yerleşen A doğrusu ile merkez eksen arasındaki Δ kadar bir mesafe vardır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir [47].

$$\Delta = \frac{m_n \pi}{4} - (b_t - r_f) \tan(\phi) - \frac{r_f}{\cos(\phi)} \quad (5.1)$$

Burada m_n dişlinin normal modülünü simgelemektedir ve aynı zamanda kremayer kesici takımın diş ucuna eşittir.

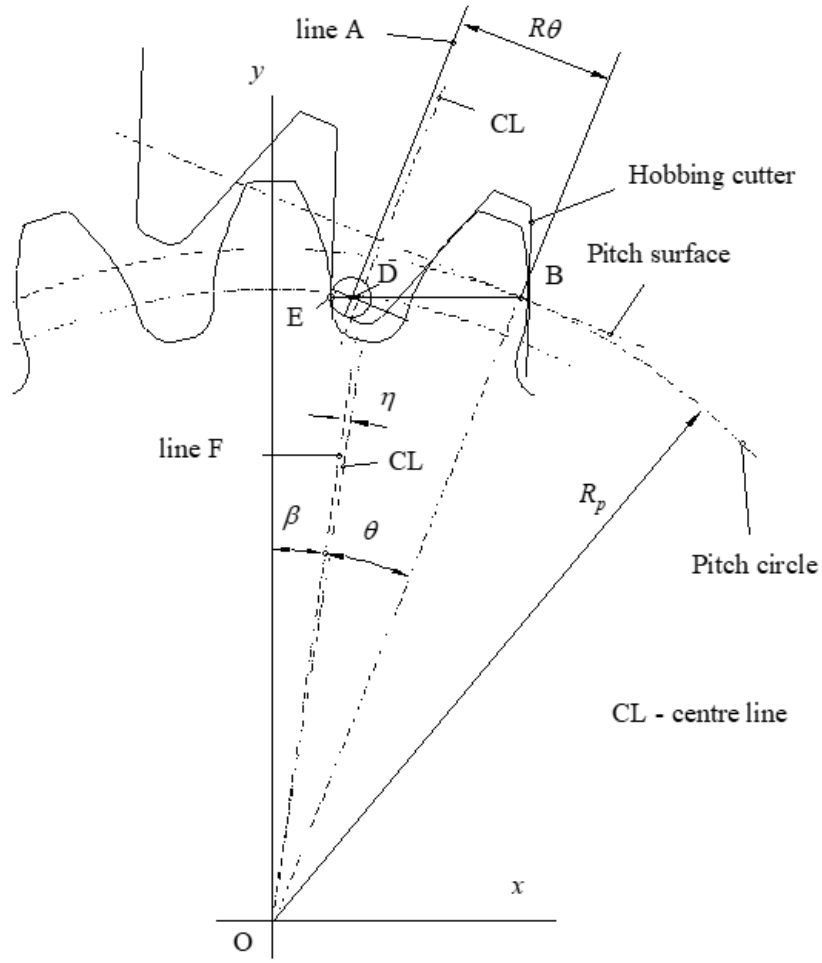


Şekil 5.1. Kremayer kesici takım parametreleri

Şekil 5.2'de dişin köşe kısmının oluşturulması gösterilmektedir. Kesici takım diş boşluğuyla eşleştiğinde ve bu boşluğa yerleştiğinde, diş boşluğunun merkez eksenine kesici takımın merkez eksenine ile çakışır ve buna bağlı olarak kesici takım üzerindeki A doğrusu, boşluktaki F doğrusu ile çakışır. Bu çakışma sonucu diş boşluğunun merkez eksenine ile arasında η açısı oluşmaktadır. Oluşan η açısı (radyan) aşağıdaki eşitlikte tanımlanmıştır.

$$\eta = \frac{\Delta}{R_p} \quad (5.2)$$

Burada R_p dişlinin bölüm dairesi yarıçapıdır. Kesici takımın yuvarlanma yüzeyi dişlinin bölüm dairesi üzerinde yuvarlanmasıyla diş profilinin köşe kısmı kesici takımın uç kısmıyla oluşmaya başlar.



Şekil 5.2. Dişlinin köşe kısmının oluşturulması [47]

Köşe kısmının oluşumu sırasında temas noktasının (E noktası), yani dişin köşe profilinin koordinatları aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir [67].

$$x_E = x_D - \frac{r_f}{\sqrt{(b_t - r_f)^2 + (R_p \theta)^2}} [(b_t - r_f) \sin(\beta + \theta) + R_p \theta \cos(\beta + \theta)] \quad (5.3)$$

$$y_E = y_D + \frac{r_f}{\sqrt{(b_t - r_f)^2 + (R_p \theta)^2}} [R_p \theta \sin(\beta + \theta) - (b_t - r_f) \cos(\beta + \theta)] \quad (5.4)$$

Burada x_D ve y_D kesici takımın uç yarıçapının merkezi olan D noktasının koordinatlarını ifade eder. x_D ve y_D sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmıştır.

$$x_D = (R_p - b + r_f) \sin(\beta + \theta) - R_p \theta \cos(\beta + \theta) \quad (5.5)$$

$$y_D = (R_p - b + r_f) \cos(\beta + \theta) + R_p \theta \sin(\beta + \theta) \quad (5.6)$$

Burada θ kesici takımın yuvarlanma açısı, β ise diş boşluğunun merkezinden geçen y-ekseni ile F doğrusu arasındaki açıdır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$\beta = \frac{\pi}{N} - \eta \quad (5.7)$$

Burada N diş sayısıdır. Eğer dişli çarkta herhangi bir profil ötelemesi yoksa, köşe kısmının temel dairesi ile temasa geldiği yer köşe kısmının bitiş noktasıdır. Köşe kısmının koordinatlarını tanımlayan tüm denklemler, dişlinin temel dairesine kadar geçerlidir.

5.1.2. Kiriş Kısmının Oluşturulması

Kramayer kesici takım bölüm dairesi üzerinde yuvarlandığında, kramayer kesici takımının uç kısmı dişli çarkın köşe kısmını oluştururken, yanak kısımları ise dişli çarkın kiriş kısmını oluşturmaktadır. Dişin kiriş kısmı temel dairesi ile diş üstü çapı arasında kalan kısımdır ve evolvent eğriden oluşur. Evolvent eğri basitçe Şekil 5.3'teki gibi ρ_i doğrusunun dişlinin temel dairesi üzerinde yuvarlanması sonucu uç noktasının yaptığı izdir. Evolvent eğrinin yarıçapı (veya ρ_i doğrusunun uzunluğu) b noktasından başlayıp θ_i açısına bağlı olarak t noktasında maksimum olur. Eğrinin yarıçapı p noktasında $a_i b$ yayının uzunluğuna eşit olup, aynı zamanda temel dairesine a_i noktasında teğettir. θ_i (rad) yuvarlanma açısı aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\theta_i = \sqrt{\left(\frac{R_i}{R_b}\right)^2 - 1} \quad R_b \leq R_i \leq R_t \quad (5.8)$$

Burada R_b dişli çarkın diş dibi yarıçapıdır. Evolvent eğriyi oluşturan i noktasının koordinatları ise aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir.

$$x_i = R_i \cos(\theta_{st} + \alpha_i) \quad (5.9)$$

$$y_i = R_i \sin(\theta_{st} + \alpha_i) \quad (5.10)$$

Burada θ_{st} , θ_i yuvarlanma açısı sıfır olduğunda x eksenine ile i noktasının konum vektörü arasındaki açıdır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

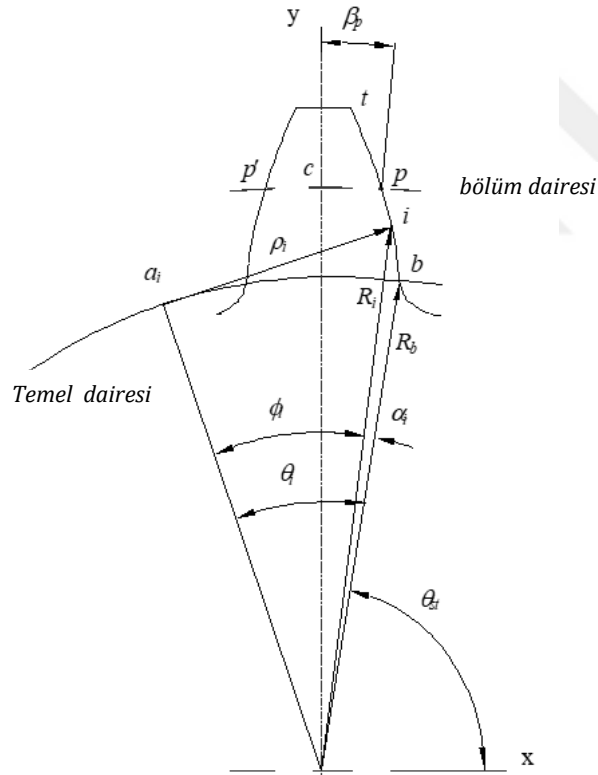
$$\theta_{st} = \frac{\pi}{2} - \beta_p - \alpha_p \quad (5.11)$$

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi β_p noktası ile p noktası çakıştığı anda y eksenini ile i konum vektörü arasındaki açıdır. Benzer olarak α_p açısı, i noktası ile p noktası çakıştığı anda evolvent eğrinin başladığı yerdeki doğru ile i konum vektörü arasındaki açıdır.

Diş profilinin oluşumu esnasında, kesici takımın yuvarlanma yüzeyi, dişlinin yuvarlanma dairesi üzerinde yuvarlanır. Böylece dişlinin çevresel adımı ile kesici takımın adımı birbirine eşit olur ve dişlinin bölüm dairesi üzerindeki pp' yay uzunluğu, adımın yarısına eşit olur. β_p açısı aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$\beta_p = \frac{m_n \pi}{4R_p} \quad (5.12)$$

Buraya kadar tam bir diş profilini oluşturmak için gerekli olan tüm eşitlikler ifade edilmiştir.



Şekil 5.3. Dişin giriş kısmının oluşturulması [47]

5.2. Talaş Kalınlığı Hesabı

Frezelemede çok ağızlı kesici takımlar kullanılmaktadır ve kesme ağzını temsil eden diş, takım devrinin belirli bir kısmında talaş kaldırır. Kaldırılan talaş kalınlığı Şekil 5.4'de

görüldüğü gibi kesme kenarı boyunca değişmektedir. Kesici takımda bir diş başına ilerleme f_z ve yaklaşma açısı Ω ise talaş kalınlığı aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [44].

$$h(\Omega) = f_z \sin \Omega \quad (5.13)$$

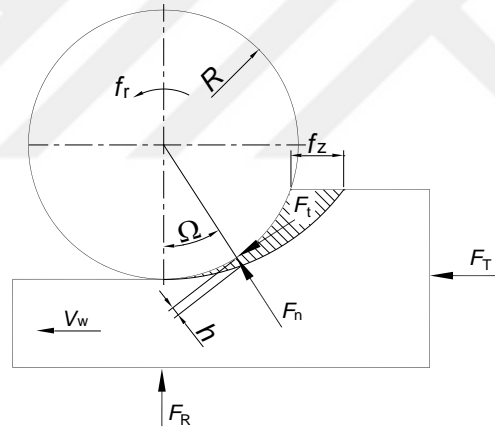
Burada h anlık teorik talaş kalınlığını simgelemektedir. Kesici takım üzerindeki her bir diş iş parçası ile Ω açısı süresince temasta kalır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\cos \Omega = \frac{R-d}{R} \quad (5.14)$$

Burada R ve d sırasıyla kesici takım yarıçapını ve kesme derinliğini ifade eder. Her bir diş başına düşen ilerleme f_z , ilerleme hızı, diş sayısı, dönü hızı gibi kesme şartlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$f_z = \frac{V_w}{Z f_r} \quad (5.15)$$

Burada V_w iş parçasının ilerleme hızını, Z kesici takım üzerindeki toplam diş sayısını ve f_r ise Hz cinsinden kesici takımın dönü hızını ifade eder.



Şekil 5.4. Kesme anında oluşan kesme kuvvetleri ve proses parametreleri

5.3. Teorik Kesme Kuvveti

Frezelemede dik kesme esnasında meydana gelen kesme kuvveti, Şekil 5.4’de görüldüğü gibi kesme hızına teğet olan teğetsel kesme kuvveti F_T ve kesme hızına dik olan normal kesme kuvveti F_n olarak iki bileşenden oluşur. Bu çalışmada frezeleme esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin tahmini için sıkça kullanılan Kienzle Model kullanılmıştır. Kienzle’ye göre kesme kuvveti hesabı, talaş kesiti ile işlenen malzemenin özgül kesme direncinin çarpımı esasına dayanır ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır [68,69].

$$F = Ak_j = bhk_j \quad (5.16)$$

Bu eşitlikte A talaş kesitini, k_j özgül kesme kuvvetini, b talaş genişliğini, h ise anlık talaş kalınlığını simgelemektedir.

5.3.1. Özgül Kesme Kuvveti Hesabı

Birim alandaki malzemeyi kaldırmak için gerekli olan kesme kuvveti olarak tanımlanan özgül kesme direnci, esas kesme kuvvetine doğrudan etki eden faktördür. Özgül kesme kuvveti, k_j , çeşitli faktörlere bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [68,69].

$$k_j = k_{sh} f_h f_\lambda f_\gamma f_s f_v f_f \quad (5.17)$$

Burada k_{sh} özgül kesme kuvvetini, f_h imalat yöntemi faktörünü, f_λ takım eğim açısı faktörünü, f_γ talaş açısı faktörünü, f_s soğutma sıvısı faktörünü, f_v hız faktörünü ve f_f işlenen malzeme faktörünü simgelemektedir. Bu faktörler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Özgül kesme kuvveti

Malzeme ve talaş kalınlığına bağlı olan özgül kesme kuvveti aşağıdaki eşitlikte hesaplanmaktadır.

$$k_{sh} = \frac{k_{11}}{h^m} \quad (5.18)$$

Burada k_{11} , 1mm^2 kesit alana sahip talaşın özgül kesme kuvvetini ifade eder. m ise işlenen malzemenin k_{11} değeri ile h değeri arasındaki logaritmik ilişkiyi gösteren eğrinin karakteristik eğimidir ve malzemenin cinsine göre değişir.

Talaş açısı Faktörü

DeneySEL olarak elde edilmiş olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$f_\gamma = \frac{C - 1.5\gamma}{100} \quad (5.19)$$

Burada γ takımın efektif talaş açısı ve C talaş açısı sabitidir. C değerleri çelik için 109, döküm ve benzeri diğer malzemeler için 103 olarak alınmaktadır. Talaş açısı çelik için 6, dökme demir için 2'dir [69].

Takım eğim açısı faktörü

Eğim açısının etkisini gösteren bir faktör olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

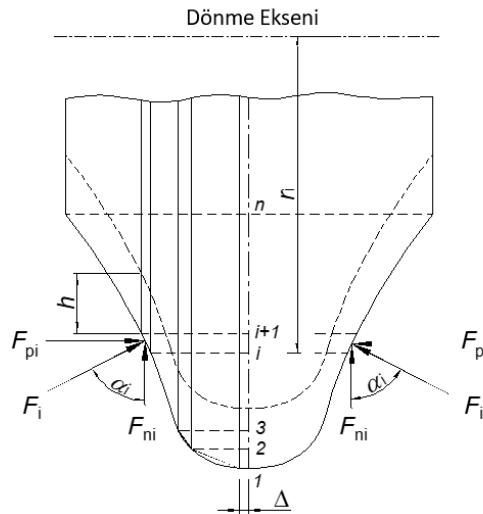
$$f_{\Delta} = \frac{96-1.5\Delta}{100} \quad (5.20)$$

Burada Δ eğim açısı olup pratikte en çok kullanılan eğim açısı $\Delta = -4$ derecedir. İmalat yöntemi faktörü, soğutma sıvısı faktörü, hız faktörü ve işlenen malzeme faktörü parametreleri deneysel olarak elde edilmiş olup, değerleri tablolardan elde edilmektedir [69].

5.3.2. Talaş Kesiti Hesabı

Bölüm 5.1 de modül freze çakısının kesici ağız profili evolvent olarak modellenmiş ve kesici ağız profilini veren denklemler verilmiştir. Modül freze çakısının kesici ağız profili oldukça kompleks bir yapıya sahip olduğundan, talaş kesitinin ve dolayısıyla oluşan kesme kuvvetlerinin direkt olarak hesaplanabilmesi oldukça zordur. Bu sebepten dolayı ve kesme kuvveti hesaplamalarına temel teşkil etmesi açısından; modül freze çakısı Şekil 5.5'te gösterildiği gibi kesici takımın dönme eksenine dik olarak konumlandırılmış çok sayıda ince disklerin birleşmesinden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu işlem için modül freze kesici ağız yüksekliği boyunca n eşit parçaya bölünmüştür. Kesici takımın merkez eksenine dik bölüntü noktalarından kesici kenarlara kadar merkez eksenine dik doğrular çizilmiştir. Bu işlem tamamlandığında kesici takım, farklı kalınlıklarda $2n$ sayıda ince diske ayrılmış olur. i 'ninci ince diske ait kesici kenar, i ve $i+1$ bölüntülerinin evolvent eğriyi kestiği noktaların birleştirilmesiyle düz bir doğru olarak oluşturulur. Bu doğrunun (kesici kenarın) uzunluğu L_i , eğim açısı α_i ve dönme eksenine uzaklığı r_i dir. i 'ninci ince diske ait talaş genişliği, b_i aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$b_i = L_i \cos \alpha_i \quad (5.21)$$



Şekil 5.5. Modül freze çakısının ince disk modeli ve meydana gelen kuvvetlerin gösterimi

5.3.3. Kesme Kuvveti Hesabı

Kienzle model esasına göre kesme kuvveti hesabı, talaş kesiti ile işlenen malzemenin özgül kesme direncinin çarpımına eşittir. Özgül kesme direncinin hesaplanması bir önceki bölümde anlatılmıştır. Kesme kuvveti hesabında diğer önemli parametre olan talaş kesitinin doğru hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Talaş kesiti dikkate alındığında kesme kuvveti aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır [69].

$$F_j = k_j b h^{1-m_j} \quad (5.22)$$

Burada h teorik olarak hesaplanan anlık talaş kalınlığını, b kesme genişliğini, k_j özgül kesme kuvvetini ve m_j Kienzle denkleminin üssünü simgeler [69].

Şekil 5.5'de gösterildiği gibi, i 'nci diske ait kenarın ortasına etki ettiği varsayılan kesme kuvveti, F_c ve F_t olarak iki ana kuvvet bileşenine ayrılır. Burada F_c kesme hızı yönünde meydana gelen ve kesme momenti oluşumuna neden olan teğetsel bileşeni ifade eder. Toplam teğetsel kesme kuvveti ise tüm kesici kenarlara ait kuvvetlerin toplanmasıyla bulunur ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$F_t(\Omega) = 2 \sum_{i=1}^n k_t b_i h^{1-m_t} \quad (5.23)$$

Bunun aksine, diğer bileşen olan reaksiyon kuvveti F_i , hem kesici kenara hem de kesme hızı yönüne diktir bu sebeple kesme momenti oluşumuna katkısı yoktur. Reaksiyon kuvveti F_i , F_{pi} ve F_{ni} olarak 2 bileşene ayrılabilir ve F_{pi} bileşenleri pasif bileşenler olup, simetriden dolayı birbirlerini yok ederler. Bunun aksine herbir ince diske etkileyen normal bileşenlerin toplamı ise toplam kesme kuvvetinin normal bileşenini oluşturur ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F_n(\Omega) = 2 \sum_{i=1}^n k_n b_i \cos \alpha_i h^{1-m_n} \quad (5.24)$$

5.4. Kesme Kuvvetinin Ölçülmesi

Modül freze yardımıyla diş kesimi esnasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin belirlenebilmesi için deformasyon ölçümünden faydalanılmıştır. Bu amaçla dişli taslağı, özel olarak imal edilen ve her iki ucundan ankastre olarak sabitlenen taşıyıcı parçanın tam orta noktasına tutturulmuştur. Kesme işlemi sırasında taşıyıcı kirişin boy eksenine Resim 4.1 de gösterildiği gibi besleme yönüne paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır (taşıyıcı kiriş özellikleri Bölüm 4.1'de verilmektedir). Kesme kuvveti etkisiyle ortaya çıkan deformasyonları algılamak amacıyla, taşıyıcı kirişe tutturulmuş ve Resim 4.5'de gösterilen gerinim ölçerler

yardımla her biri yarım köprü olarak tasarlanmış iki adet Wheatstone köprüsü oluşturulmuştur.

Kesme işlemi sırasında taşıyıcı kirişe etki eden kesme kuvveti bileşenleri Şekil 5.6 da şematik olarak gösterilmiştir. Buradaki dişli taslağına etkileyen kesme kuvveti, besleme yönünde (F_T) ve buna dik (radyal) yönde (F_R) olmak üzere iki bileşene ayrılmıştır. Radyal bileşen F_R kirişi basitçe eğmeye zorlamasına rağmen, eksenel kuvvet F_T kirişi aynı anda hem eğmeye hem de çekiye (veya basıya) zorlamaktadır. Şekil 5.6 da gösterilen A ve B noktaları, kirişin orta noktasının önünde ve arkasında 27mm uzaklıkta konumlandırılan gerinim ölçerlerin yerini temsil etmektedir. Kesme işlemi süresince, A ve B noktalarında oluşan deformasyonlar süperpozisyon esasına göre hesaplanmaktadır. Bu noktalardaki F_T ve F_R bileşenlerinin neden olduğu eğilme momentlerinin genlikleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanır:

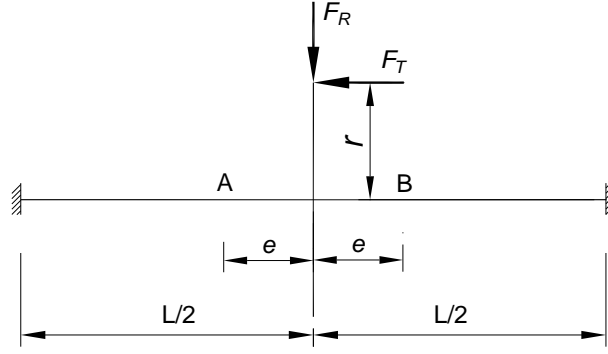
$$M_R = \frac{F_R}{2} \left(\frac{L}{4} - e \right) \quad (5.25)$$

$$M_T = \frac{F_T r}{2} \left(1 - \frac{3}{L} e \right) \quad (5.26)$$

Burada L taşıyıcı kirişin efektif uzunluğunu, e gerinim ölçerlerin kirişin orta noktasından olan uzaklığını, ve r ise F_T kuvvetinin taşıyıcı kirişin nötr eksenine olan minimum mesafesini simgeler. Eğilme momenti kesit alanda normal gerilme oluşturur ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\sigma = \frac{M}{I_w} = E\varepsilon \quad (5.27)$$

Burada M eğilme momentini, I_w kesitin direnç momentini, E elastisite modülünü ve ε ise deformasyonu simgeler. Bununla beraber, F_T kuvveti taşıyıcı kiriş boyunca çekme ve basma gerilmelerine neden olur ve A_c kesit alan olmak üzere bu gerilme aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:



Şekil 5.6. Taşıyıcı kirişe etki eden kesme kuvveti bileşenleri

$$\sigma_a = \frac{F_T/2}{A_c} = E\varepsilon_a \quad (5.28)$$

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, taşıyıcı üzerinde F_T kuvvetinin bası gerilmesi oluşturduğu noktaya iki adet gerinim ölçer tutturulmasına rağmen ($A_{1,2}$ konumu), çekme gerilmesinin oluştuğu alt ve üst yüzeylere birer tane gerinim ölçer tutturulmuştur ($B_{1,2}$ konumları). A ve B noktalarında oluşan toplam gerilme ifadeleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır:

$$\sigma_A = \sigma_R + \sigma_T - \sigma_a = E(\varepsilon_R + \varepsilon_T - \varepsilon_a) \quad (5.29)$$

$$\sigma_{B_1} = \sigma_R - \sigma_T + \sigma_a = E(\varepsilon_R - \varepsilon_T + \varepsilon_a) \quad (5.30)$$

$$\sigma_{B_2} = -\sigma_R + \sigma_T + \sigma_a = E(-\varepsilon_R + \varepsilon_T + \varepsilon_a) \quad (5.31)$$

Burada σ_R ve σ_T sırasıyla F_R ve F_T kuvvetlerinin neden olduğu eğilme gerilmelerini, ε_R , ε_T ve ε_a ise sırasıyla σ_R , σ_T ve σ_a gerilmeleri sebebiyle oluşan deformasyonlardır.

5.4.1. Gerinim ölçer (Straingage) Köprüleri

Bilindiği üzere gerinim ölçer bir zorlamaya maruz kaldığında bünyesinde meydana gelen deformasyonla orantılı bir direnç değişimi sergiler. Zorlama sonucu oluşan deformasyon ile meydana gelen direnç değişimi arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmektedir.

$$\frac{\Delta R}{R} = F\varepsilon \quad (5.32)$$

Burada F gage faktörünü (oransal sabit), ΔR direnç değişimini ve R ise gerinim ölçerin nominal direncini ifade eder. Wheatstone köprü çıkıtısı V_0 ile köprü besleme voltajı V_E arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\frac{V_0}{V_E} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.33)$$

Her bir köprü konfigürasyonunda meydana gelen deformasyonlar, nominal direnci 120Ω olan gerinim ölçerler kullanılarak ölçülmüştür. Birinci köprü için A_1 ve B_1 noktalarına yerleştirilen gerinim ölçerler kullanılmıştır. Bu gerinim ölçer konfigürasyonu için elde edilen köprü çıktısı V_0 ile köprü besleme voltajı V_E arasındaki ilişki, 5.32 ve 5.33 no'lu eşitlikler kullanılarak gerekli basitleştirmeler yapıldıktan sonra deformasyonlar cinsinden aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir:

$$\left(\frac{V_0}{V_E}\right)_1 = \frac{F}{2}(\varepsilon_T - \varepsilon_a) \quad (5.34)$$

Benzer biçimde A_2 ve B_2 noktalarına yerleştirilen gerinim ölçerlerden elde edilen voltaj oranları 5.32 ve 5.33 no'lu eşitlikler kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\left(\frac{V_0}{V_E}\right)_2 = \frac{F}{2}(\varepsilon_R - \varepsilon_a) \quad (5.35)$$

ε_R , ε_T ve ε_a ifadeleri 5.34 ve 5.35'nolu eşitliklerde yerine yazıldığında, teğetsel ve radyal kesme kuvveti bileşenleri voltaj oranları cinsinden aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$F_T = \frac{2}{F(C_1 - C_2)} \left(\frac{V_0}{V_E}\right)_1 \quad (5.36)$$

$$F_R = \frac{2}{FC_3} \left[\left(\frac{V_0}{V_E}\right)_2 + \frac{C_2}{C_1 - C_2} \left(\frac{V_0}{V_E}\right)_1 \right] \quad (5.37)$$

Burada $(\cdot)_{1,2}$ köprü numaralarını, C_i ($i=1,2,3..$) meydana gelen gerilme ile kesme kuvveti bileşenleri arasındaki ilişkiyi ifade eden sabitler olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$C_1 = \frac{r \left(1 - \frac{3b}{L}\right)}{2EI_c} \quad C_2 = \frac{1}{2EI} \quad C_3 = \frac{L - b}{2EI_c} \quad (5.38)$$

5.36 ve 5.37'nolu eşitlikler, iş parçasına X ve Y yönlerinde etkiyen kesme kuvveti bileşenlerini ifade eder. Elde edilen bu reaksiyon kuvvetleri, aşağıdaki eşitlik kullanılarak Şekil 5.4'te gösterilen takım ucuna etkiyen kesme kuvveti bileşenlerine dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_t \\ F_n \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

5.5. Teorik Simülasyon

Modül freze yardımıyla dişli kesimi sırasında oluşan kesme kuvvetlerini önerilen yaklaşımla doğru bir biçimde tahmin etmek amacıyla bir kesme işlemi yapılmıştır. Bu dişli çarkın diş yüksekliği 10.125mm olmasına rağmen, kesme derinliği 2.025mm tutularak tam diş formu 5 kademeli kesimle oluşturulmuştur. Teorik kesme kuvveti hesabında deneyler sırasında kesici takım olarak kullanılan normal modülü 4.5mm, çapı 90 mm, 12 kesici ağıza sahip ve dönme hızı 123.7 dev/dk olan form freze özellikleri kullanılmıştır. Bununla birlikte Kienzle model esasına göre yapılan kesme kuvveti hesabında iş parçası olarak C45 malzeme özellikleri kullanılmış olup, kullanılan proses parametreleri tablo 5.1’de verilmiştir.

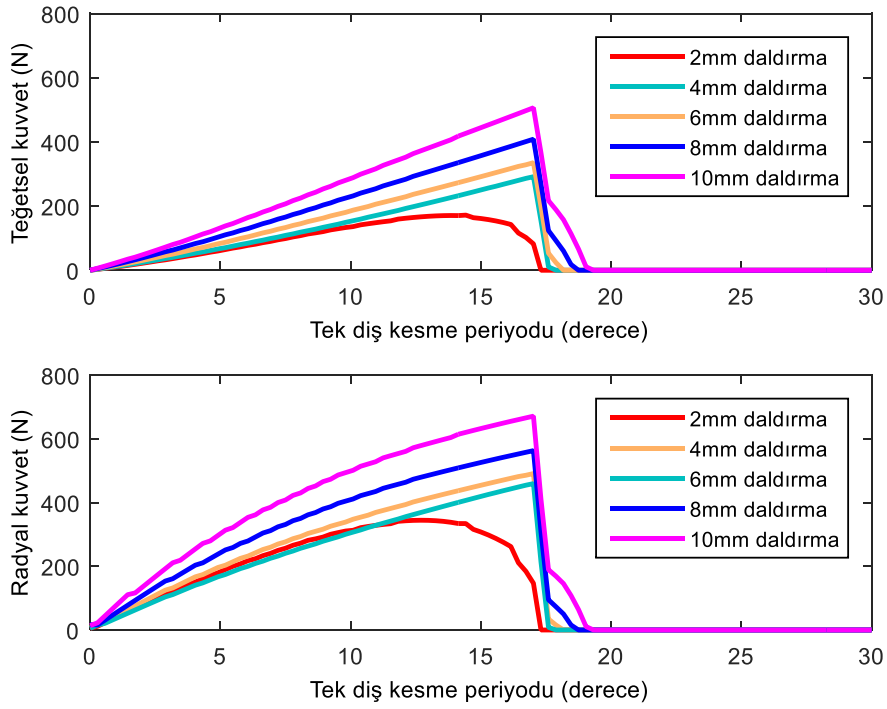
Tablo 5.1. Kienzle model proses parametreleri [68]

k_j (teğetsel)	1584 N/mm^2
m_j (teğetsel)	0.25
k_j (normal)	364 N/mm^2
m_j (normal)	0.73
f_h	1.2
f_λ	1.0
f_γ	1.09
f_s	0.9
f_v	1.18
f_f	1.05

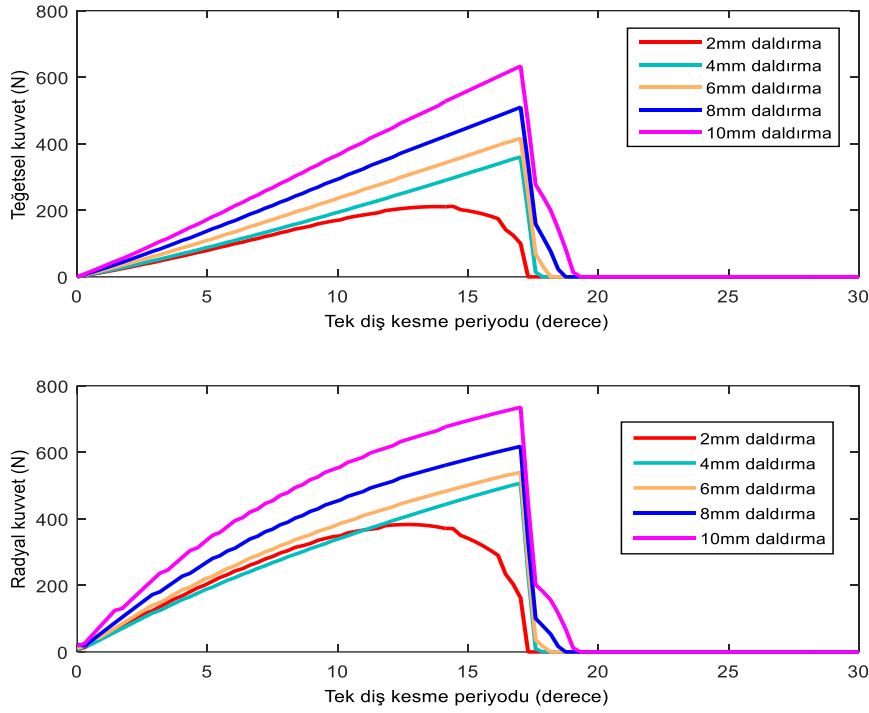
Kesme kuvvetini hesaplamak için öncelikli olarak teorik talaş genişliğinin hesaplanması gerekmektedir. Bu sebeple Bölüm 5.1’de verilen eşitlikler kullanılarak kesici kenara ait evolvent eğri oluşturulmuştur. Sonrasında modül freze kesici ağzı, diş yüksekliği boyunca 100 eşit parçaya bölünerek her bir ince diske ait kesici kenar genişliği hesaplanmıştır. Sonuç olarak 5.36 ve 5.37 nolu eşitlikler kullanılarak teorik kesme kuvveti, Kienzle model esasına dayanarak ilerleme hızı ve kesme derinliği parametrelerine bağlı olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.7’de 0.2mm/s ilerleme hızında ve farklı kesme derinliklerinde radyal ve aksel yönlere oluşan kesme kuvveti bileşenleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere birinci

kesim (2mm daldırma) için kesme kuvveti genlikleri kesici takım pozisyonunun 13° 'ye kadar düzenli olarak artmakta, 17° civarında genlik değeri maksimuma ulaşmış sonrasında hızlı bir şekilde sifira düşmektedir. Diğer kesme derinliklerinde, kesme kuvveti genlikleri kesme derinliğine bağlı olarak artmaktadır. Aynı zamanda kesme derinliği arttıkça tek dişe ait kesme periyodunun da kısmen genişlediği görülmektedir. 0.2mm/s ilerleme hızında radyal ve aksel yönde oluşan kesme kuvveti genlikleri Tablo 5.2'de verilmiştir. 0.3mm/s ilerleme hızında ve farklı kesme derinliklerinde oluşan kesme kuvveti bileşenleri Şekil 5.8'de gösterilmektedir. 0.3mm/s ilerleme hızındaki kesme kuvveti bileşenlerinin 0.2mm/s ilerleme hızındaki kesme kuvveti bileşenlerine benzer tavır sergilediği görülmekte olup, aynı kesici takım pozisyonunda daha yüksek kesme kuvveti genlikleri oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.7. 0.2mm kesme hızında farklı kesme derinliklerinde oluşan kesme kuvveti bileşenleri

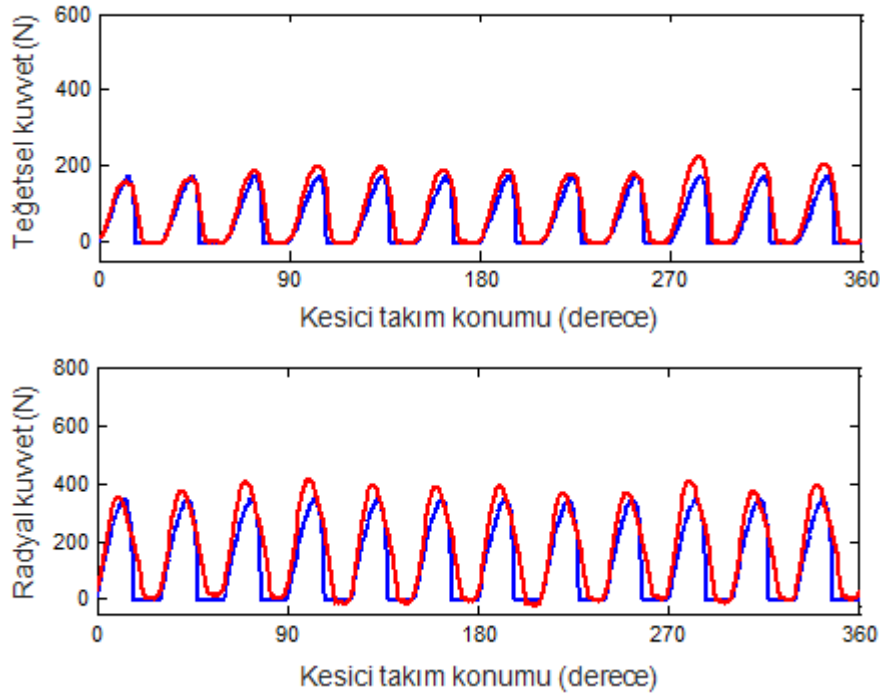


Şekil 5.8. 0.3mm kesme hızında farklı kesme derinliklerinde oluşan kesme kuvveti bileşenleri

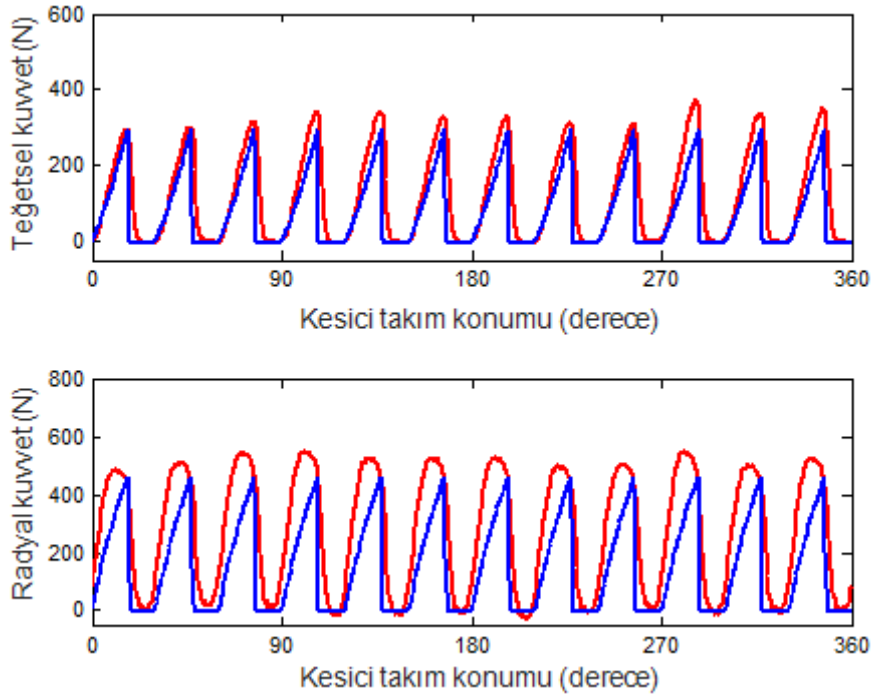
5.6. Deneysel Sonuçlar

Bütün deneyler Şekil 4.1'de gösterilen kalıpcı freze tezgahı kullanılarak, C45 imalat çeliğinden yapılmış olan dişli taslağı üzerinde modül freze kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesici takım 4.5mm normal modüle, 12 kesici ağıza sahip olup 26-34 diş sayısına sahip dişli çarkların üretimi için uygundur. Oluşturulan dişli çarkın diş yüksekliği 10.125mm olmasına rağmen, bu diş yüksekliği kesme derinliği sabit tutularak 5 kademeli kesimle tam olarak oluşturulmuştur. Kesme işlemleri 0.2mm/sn ve 0.3mm/sn olmak üzere iki farklı ilerleme hızında yapılmıştır. Elde edilen sinyallerin kesici takım pozisyonuna göre ortalamalarını oluşturabilmek amacıyla kesici takımın her devrinde bir pik üreten bir pozisyon sinyali kullanılmıştır. Veri toplama esnasında örtüşmenin (aliasing) önüne geçmek amacıyla, gerinimölçer sinyallerine 1kHz köşe frekansına sahip düşük geçirgenlikli filtreleme uygulanmış, kesici takım dönme hızı 123.75dev/dak olarak sabitlenmiş (24.75Hz temel kesme frekansı) ve bütün sinyaller 10 kHz'de örneklenmiştir. Veri toplama esnasında rastgele sinyal bileşenlerini azaltmak ve kararlı bileşenleri güçlendirmek amacıyla her bir kesme işlemi sırasında oluşan köprü gerilimleri kesici takımın 96 devri boyunca sürekli toplandıktan sonra pozisyon sinyaline göre tek bir kesici takım devrine (4848 örnek noktasına sahip) indirgenmiştir.

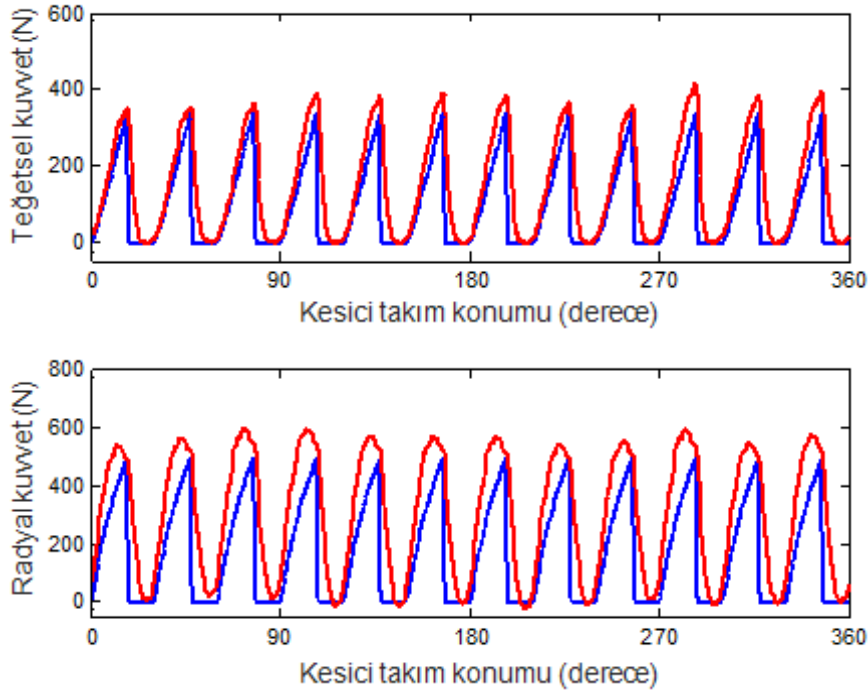
Şekiller 5.9-5.13'te 0.2mm/s ilerleme hızında, modül freze yardımıyla yapılan diş kesimi esnasında oluşan teorik ve deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti bileşenleri gösterilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi, kesici ağızlar iş parçasına her temas ettiğinde, kesme kuvveti bileşenleri bir dalgalanma göstermektedir. Deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde her bir dişe ait kuvvet genlikleri takım konumuna bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu değişimlerin takımda veya hareket milinde muhtemel küçük miktardaki eksantriklik veya kesici takımın sahip olduğu kompozit hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun aksine teorik kesme kuvvetinin hesaplanmasında bu tip hatalar dikkate alınmadığından kesme kuvveti genlikleri takım konumuna göre değişim göstermemektedir. Deneysel sonuçlardaki kuvvet değerleri muhtemel hatalardan etkilendiğinden 12 dişe ait maksimum kesme kuvveti değerlerinin ortalaması alınmıştır. Teorik ve deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti bileşenlerine ait genlik değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Hem tabloda hem de şekillerde kesme kuvveti bileşenlerinin kesme derinliğine bağlı olarak artış sergilediği görülmektedir. Teorik olarak elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçların uyumlu olması, kullanılan teorik modelin doğruluğunu teyit etmektedir.



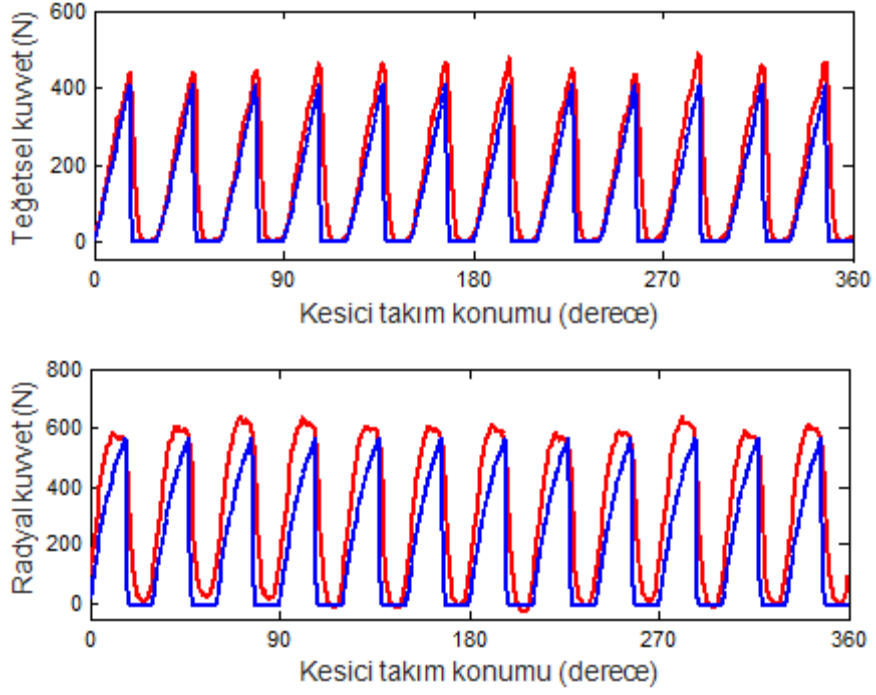
Şekil 5.9. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 2mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.



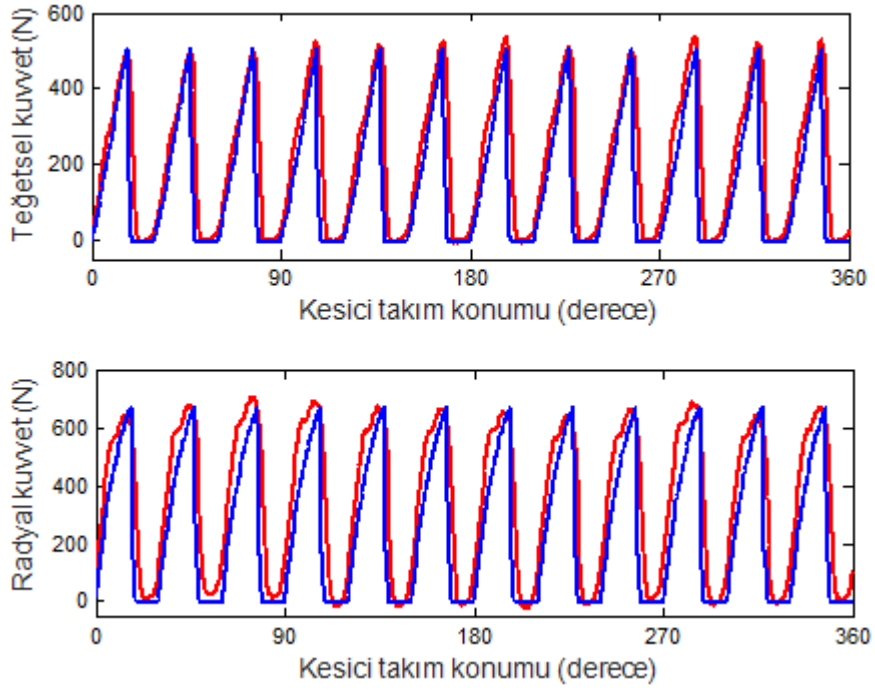
Şekil 5.10. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 4mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.



Şekil 5.11. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 6mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.



Şekil 5.12. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 8mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.

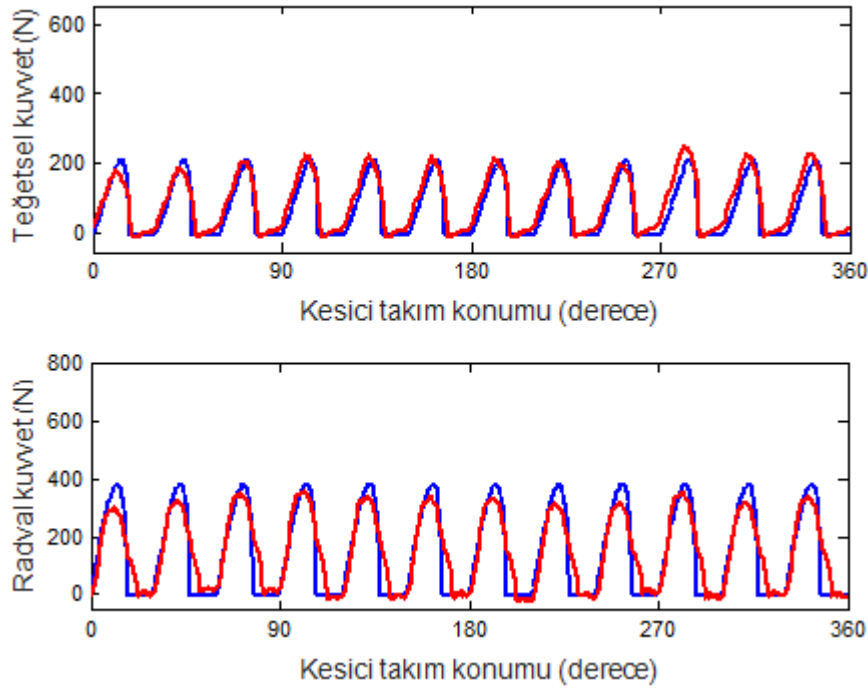


Şekil 5.13. 0.2mm/s ilerleme hızı ve 10mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri

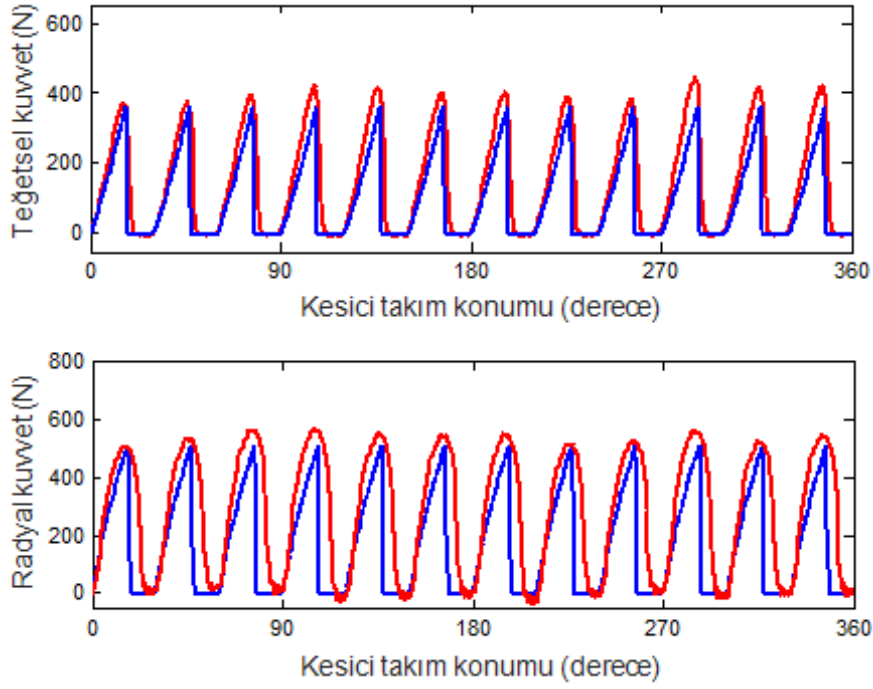
Tablo 5.2 0.2mm/s ilerleme hızı ve farklı kesme derinliklerinde ölçülen ve hesaplanan kesme kuvveti bileşenlerinin tepe değerleri

Kesme derinliği (mm)	Teğetsel kuvvet(N)			Radyal kuvvet (N)		
	Teorik	Deneysel	% Fark	Teorik	Deneysel	% Fark
2	171	190	% 10	345	386	% 10.6
4	291	326	% 10.7	460	520	% 11
6	335	375	% 10.6	491	565	% 13
8	408	457	% 10.7	562	607	% 7
10	506	515	% 1.7	671	670	% 1.8

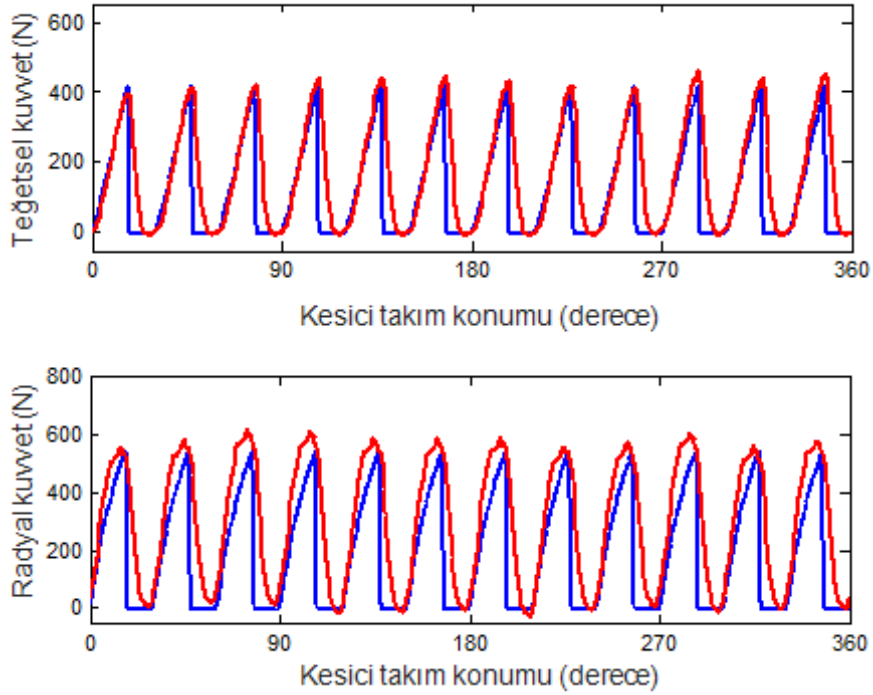
Şekil 5.14-5.18'de 0.3mm/sn ilerleme hızında teorik ve deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti bileşenleri görülmektedir. Kesme kuvveti bileşenlerinin 0.2mm/sn ilerleme hızında elde edilenlerle benzer olduğu görülmekte olup, takımın aynı açısal konumunda 0.2mm/sn kesme hızında elde edilenlere göre daha büyük değerlere erişmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi teorik ve deneysel kesme kuvveti bileşenlerinin birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmekte olup, buda uygulanan teorik modelin doğruluğu teyit edilmektedir. Farklı kesme derinliklerinde elde edilen kesme kuvveti değerleri Tablo 5.3'de verilmektedir.



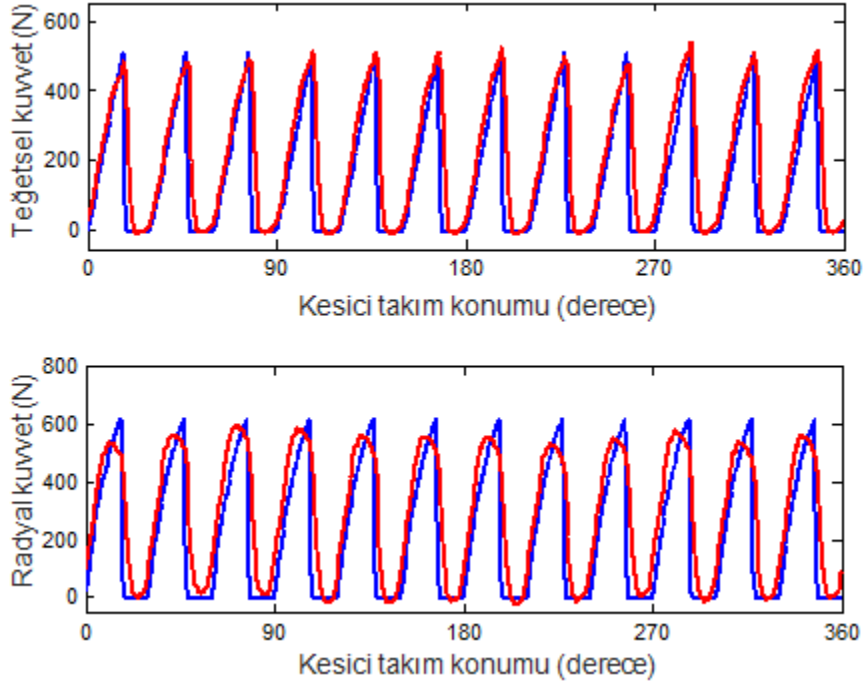
Şekil 5.14. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 2mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri



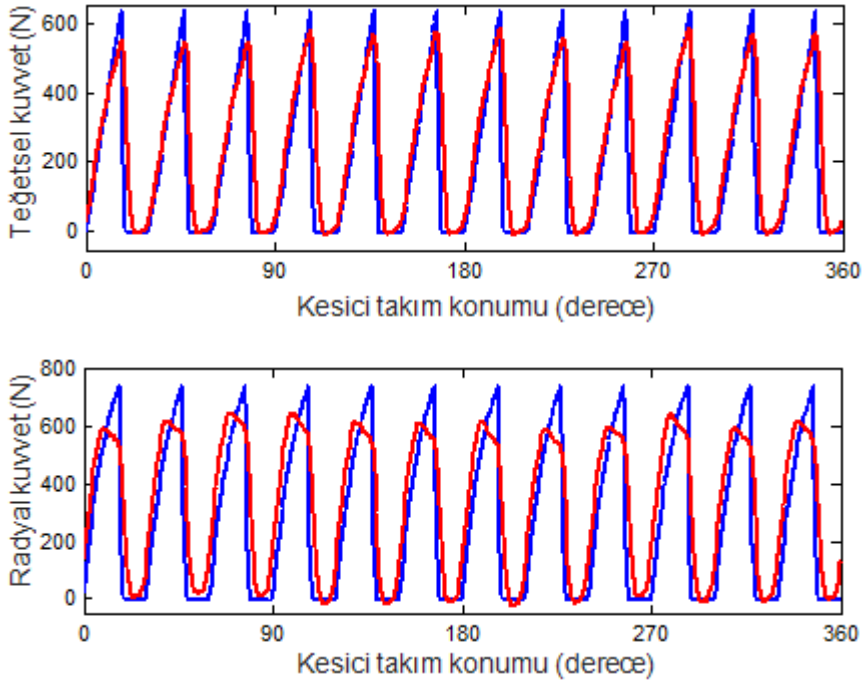
Şekil 5.15. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 4mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri



Şekil 5.16. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 6mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri



Şekil 5.17. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 8mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.



Şekil 5.18. 0.3mm/s ilerleme hızı ve 10mm kesme derinliğinde ölçülen (kırmızı) ve hesaplanan (mavi) kesme kuvveti bileşenleri.

Tablo 5.3. 0.3mm/s ilerleme hızı ve farklı kesme derinliklerinde ölçülen ve hesaplanan kesme kuvveti bileşenlerinin tepe değerleri

Kesme derinliği (mm)	Teğetsel kuvvet(N)			Radyal kuvvet (N)		
	Teorik	Deneysel	% Fark	Teorik	Deneysel	% Fark
2	210	214	% 1.8	382	332	% 15
4	360	401	% 10.2	507	541	% 6.2
6	416	426	% 2.3	540	581	% 7
8	510	502	% 1.5	617	559	% 10.7
10	633	561	% 12	735	615	% 19

6. KESİCİ TAKIMDA OLUŞAN LOKAL HATALARIN TESPİTİ

Bu bölümde kesici takımda oluşan lokal hataların titreşim izleme yöntemleri kullanılarak tespit edilmesi ile ilgili bilgi verilecektir. Modül freze yardımıyla dişli üretimi esnasında kesici takım diş kırılmasından kaynaklı hataların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Kesici takıma 3 farklı hata uygulanarak 3 farklı kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri esnasında elde edilen titreşim sinyallerinin zaman, frekans ve zaman-frekans değişimleri kullanılarak hatalar tespit edilmiştir.

6.1. Deneysel Sonuçların Analizi

Deneyler esnasında kesici takım olarak Resim 6.1’de gösterilen yüksek hız çeliğinden yapılmış modül freze kullanılmıştır. Kesici takım 4.5mm normal modüle, 90mm çapa ve üzerinde 12 tane kesici ağıza sahip olup, 26-34 diş sayısına sahip dişli çarkların üretimi için uygundur. Kesici takımın dönme eksenini yatayda olacak şekilde konumlandırılmıştır. 4.5mm modüle sahip dişli çarkın diş yüksekliği 10.125mm ($2.25 \cdot m_n$) olmasına rağmen, diş profili kesici takımın kademeli olarak daldırılmasıyla (her kademede kesme derinliği 2.025mm olacak şekilde) 5 kademede üretilmiştir. Deneyler esnasında kesici takımın devir sayısı 124 dev/dak olarak seçilmiştir. Kesme işlemi esnasında kesici takımla iş parçası arasında oluşan sürtünmeyi azaltmak, kesilen talaşları kesme bölgesinden uzaklaştırmak ve kesici takımın ömrünü iyileştirmek adına kesme bölgesi bor yağı ile oluşturulan soğutma sıvısıyla beslenmiştir.

Lokal hatalar kesici takımın iki farklı dişine uygulanmış olup, bunlar pozisyon sinyaline göre 5. ve 9. dişe gelecek şekilde takım tezgah miline bağlanmıştır. Uygulanan hatalar Resim 6.2’de gösterildiği gibi kesici dişlerin uç kısımlarının taşlanmasıyla oluşturulmuştur. Titreşim izleme yardımıyla kesici takıma uygulanan hataların tespit edilmesi için 3 farklı kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Birinci hata durumunda seçilen dişlerin kesici ağız yükseklikleri diş ucundan itibaren 0.5mm ve 1.0mm olacak şekilde azaltılmıştır ve Resim 6.1’de gösterilmiştir. İkinci hata durumunda söz konusu dişlere uygulanan hata miktarları 1.0mm artırılmıştır. (kesici ağız yüksekliğindeki azalma miktarı 1.5mm ve 2.0mm olacak şekilde). Son hata da ise

hata miktarları ikinci denemeye paralel biçimde tekrar 1.0mm arttırılmıştır. ((kesici ağız yüksekliğindeki azalma miktarları 2.5mm ve 3.0mm).

Kesme işlemi sırasında oluşan titreşimler ivmemetreler yardımıyla 10.0kHz örnekleme hızında toplanmıştır. Olası örtüşme (aliasing) problemlerinin önüne geçmek amacıyla titreşim sinyalleri 1.0kHz üst köşe frekanslı anti-aliasing filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Her bir kesme işleminde elde edilen titreşim verileri, her biri 60000 veri olacak şekilde (yaklaşık 12 kesici takım devrini içeren) 7 veri bloğu olarak toplanmıştır. Titreşim verileri içerisindeki rastgele bileşenleri azaltmak ve özellik içeren bileşenleri kuvvetlendirmek amacıyla pozisyon sinyali dikkate alınarak elde edilen 7 veri bloğunun ortalaması elde edilmiştir. Sonrasında elde edilen ortalama sinyallerden, 4 kesici takım devrini içerecek şekilde (19392 örnek) tekrar ortalama sinyal oluşturulmuştur.



Resim 6.1. Kesici takıma uygulanan diş hataları



Resim 6.2. Taşlama yardımıyla kesici takıma hata verilmesi

6.2. Kesici Takım titreşim verilerinin zaman ve frekans bölgesi incelemeleri

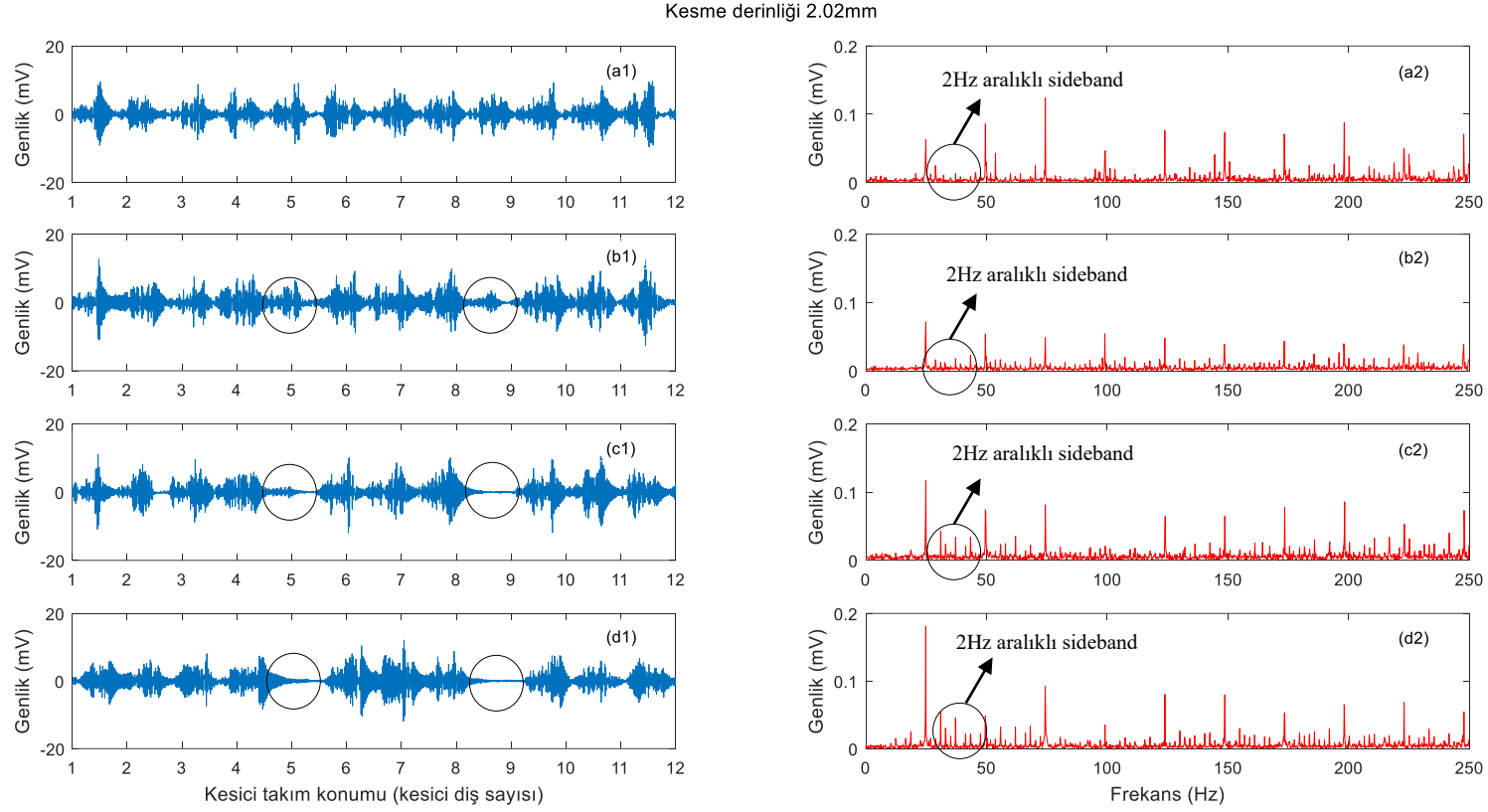
Kesme işlemi sırasında sağlıklı ve hatalı durumlarda elde edilen titreşimlerin zamana göre değişimlerini göstermek için, kesici takımın bir devrini kapsayacak şekilde ortalama sinyalin ilk 4848 örnek noktası kullanılmıştır. Buna karşılık bu titreşimlerin frekansa göre değişimleri ise 0.17Hz frekans çözünürlüğü oluşacak şekilde (yukarıda sözü edilen 7 veri bloğunun ortalaması dikkate alınarak) gösterilmiştir.

Şekil 6.1'de 2.02mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin zamana ve frekansa göre değişimleri gösterilmektedir. Hatasız kesici takımın oluşturduğu titreşimlerin zaman davranışı gözönüne alındığında, kesici takımın bir devrini içeren kesme süresince 12 adet lokal değişimlerin olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi ise kesici takım üzerinde 12 adet kesici dişin bulunması ve herbir kesici dişin malzemeye teması sırasında söz konusu lokal değişimlerin oluşmasıdır. Kesici takımın sahip olduğu kompozit hatalardan dolayı (eksantriklik, kesici dişlerin birbirleriyle olan profil farklılıkları gibi) meydana gelen lokal değişimler genel olarak az veya çok birbirlerinden farklılık göstermektedir. Söz konusu farklılıklar farklı kesme derinliklerinde de benzer biçimde gözlemlenmektedir.

Şekil 6.1 (b1), (c1) ve (d1) 'de farklı hata durumunda oluşan titreşimlerin değişimleri gösterilmektedir. Birinci hata durumunda, hatalı diş konumlarında (5. ve 9. diş) meydana gelen titreşim genliklerinin hata miktarı ile benzer biçimde azaldığı gözlemlenmektedir. İkinci hata durumunda ise 5. diş konumunda oluşan titreşimlerin genliği birinci hata durumuna göre daha da azalmış olup 9. diş pozisyonunda ise kesici takım iş parçasına temas etmediğinden dolayı titreşim oluşmadığı görülmektedir. Son hata durumunda ise kesici dişlere uygulanan hata miktarları (5. dişteki diş yüksekliği azalması 2.5mm ve benzer biçimde 9. dişteki azalma

3.0mm) kesme derinliğinden fazla olduğundan bu dişler iş parçası ile temas etmemekte ve bu konumlarda titreşim oluşmamaktadır.





Şekil 6.1. 2.025mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri

Şekil 6.1 (a2), (b2), (c2) ve (d2)'de yukarıda sözü edilen hatasız ve hatalı takım titreşimlerinin 250Hz'e kadar (yaklaşık 10×kesme frekansı) gösterilmektedir. Frekans değişimlerinden de görüldüğü gibi 25Hz ve katlarında etkin frekans tepeleri gözlemlenmektedir. Hata miktarı arttıkça temel kesme frekansında oluşan tepe genliğinin hata miktarıyla arttığı gözlemlenmektedir. Buna ek olarak kesme frekansı ve harmonikleri etrafında yaklaşık 2.0Hz aralıklarla dizilmiş çok sayıda yanbant aktiviteleri gözlemlenmektedir ve bu yanbant aktivitelerinin genliğinin hata miktarıyla benzer biçimde artış sergilemektedir.

Şekil 6.1'de 4.05mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin zamana ve frekansa göre değişimleri gösterilmektedir. Genel olarak 4.05mm kesme derinliğinde elde edilen titreşimlerin genlikleri 2.02mm kesme derinliğinde elde edilen titreşimlerin genliklerine göre artış sergilemektedir. Bunun sebebi ise kesme derinliği arttıkça meydana gelen kesme kuvvetinin de artış göstermesidir (Bölüm 5.6'da gösterilmiştir). Şekil 6.4(b1)'de gösterilen birinci hata titreşimleri dikkate alındığında, 4.05mm kesme derinliğinde oluşan hatanın belirtilerinin 2.02mm'dekine göre zayıfladığı gözlemlenmektedir. Hatta 5. diş konumunda tekrar genlik azalması şeklinde oluşması beklenen hata belirtisi gözlemlenmemektedir. 9. diş konumundaki büyük hatanın belirtisi ise hatasız duruma göre genlik azalması şeklinde kendini göstermektedir. Benzer biçimde Şekil 6.4 (c1) ve (d1)'de gösterilen titreşim biçimleri üzerinde kesici takıma uygulanan hata miktarları daha büyük olduğundan, hata belirtileri de kendisini genlik azalması olarak net bir biçimde göstermektedir.

Şekil 6.1 (a2), (b2), (c2) ve (d2)'de 4.05mm kesme derinliğinde elde edilen hatasız ve hatalı takım titreşimlerinin frekansa göre değişimleri gösterilmektedir. Kesme derinliğinin artması titreşim genliklerinin artmasına neden olmaktadır. Bu artışlar kesme frekansı ve harmoniklerinde oluşan tepe değerlerinin artmasına neden olmaktadır. 2.02mm kesme derinliğine benzer biçimde, hata miktarı arttıkça kesme frekansı ve harmonikleri etrafında gözlenen 2.0Hz aralıklarla dizilmiş olan yanbant aktivitelerinin genliklerinde özellikle düşük frekans bölgelerinde bir artışa neden olduğu görülmektedir.

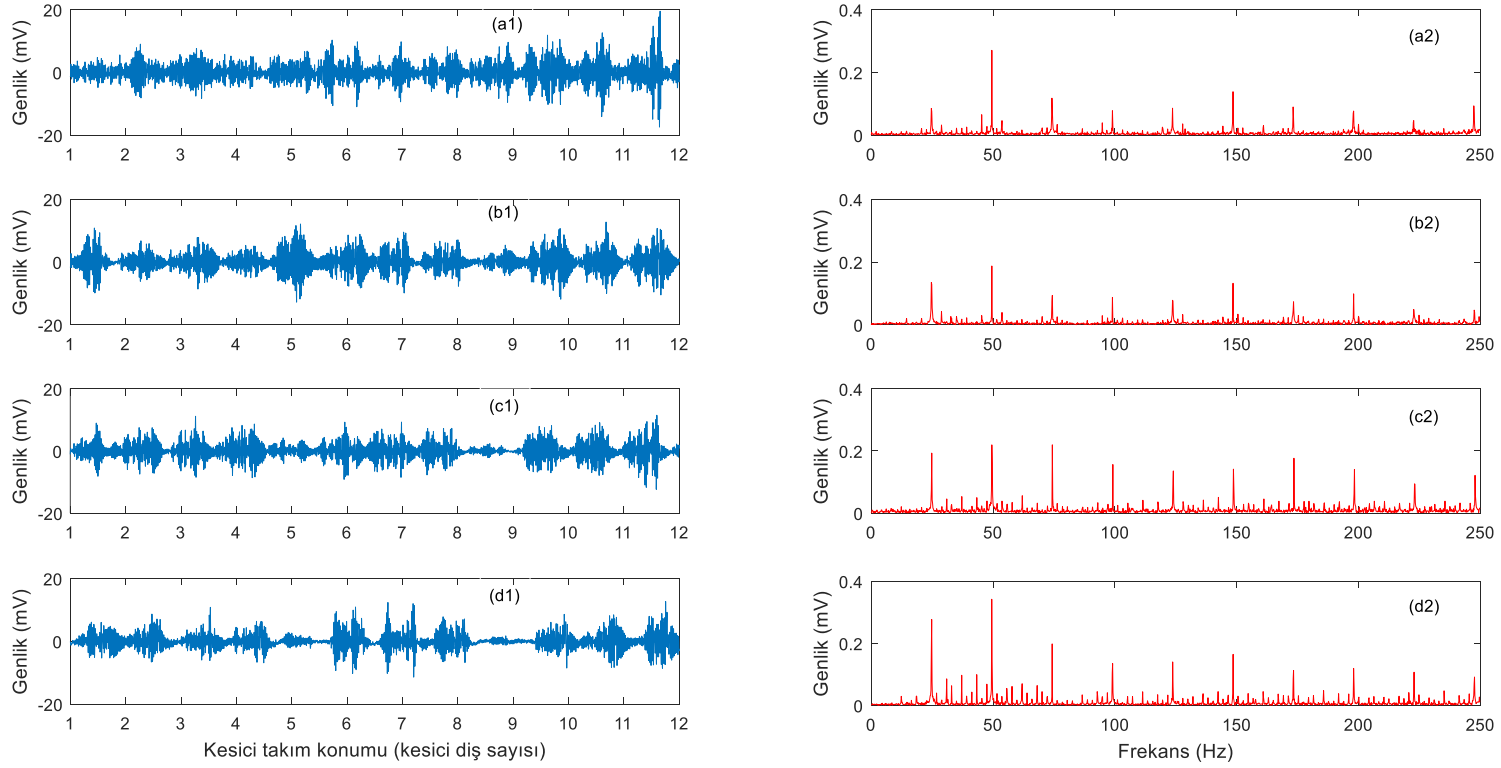
Şekil 6.3 – 6.5'de sırasıyla 6.07mm, 8.10mm ve 10.12mm kesme derinliklerinde hatasız ve hatalı durumlar için elde edilen titreşim biçimleri ve spektrumları verilmektedir. Bu şekillerden de gözlemlendiği gibi hatanın varlığı titreşim biçimleri üzerinde net olarak görülmemektedir. Frekans spektrumlarından görüldüğü gibi kesme derinliği arttıkça kesme

frekanslarında oluşan tepe değerleri de artmaktadır. Bunun aksine kesme derinliği arttıķa meydana gelen yanbant aktivitelerinin genliklerinde fazla artış gözlemlenmemektedir.

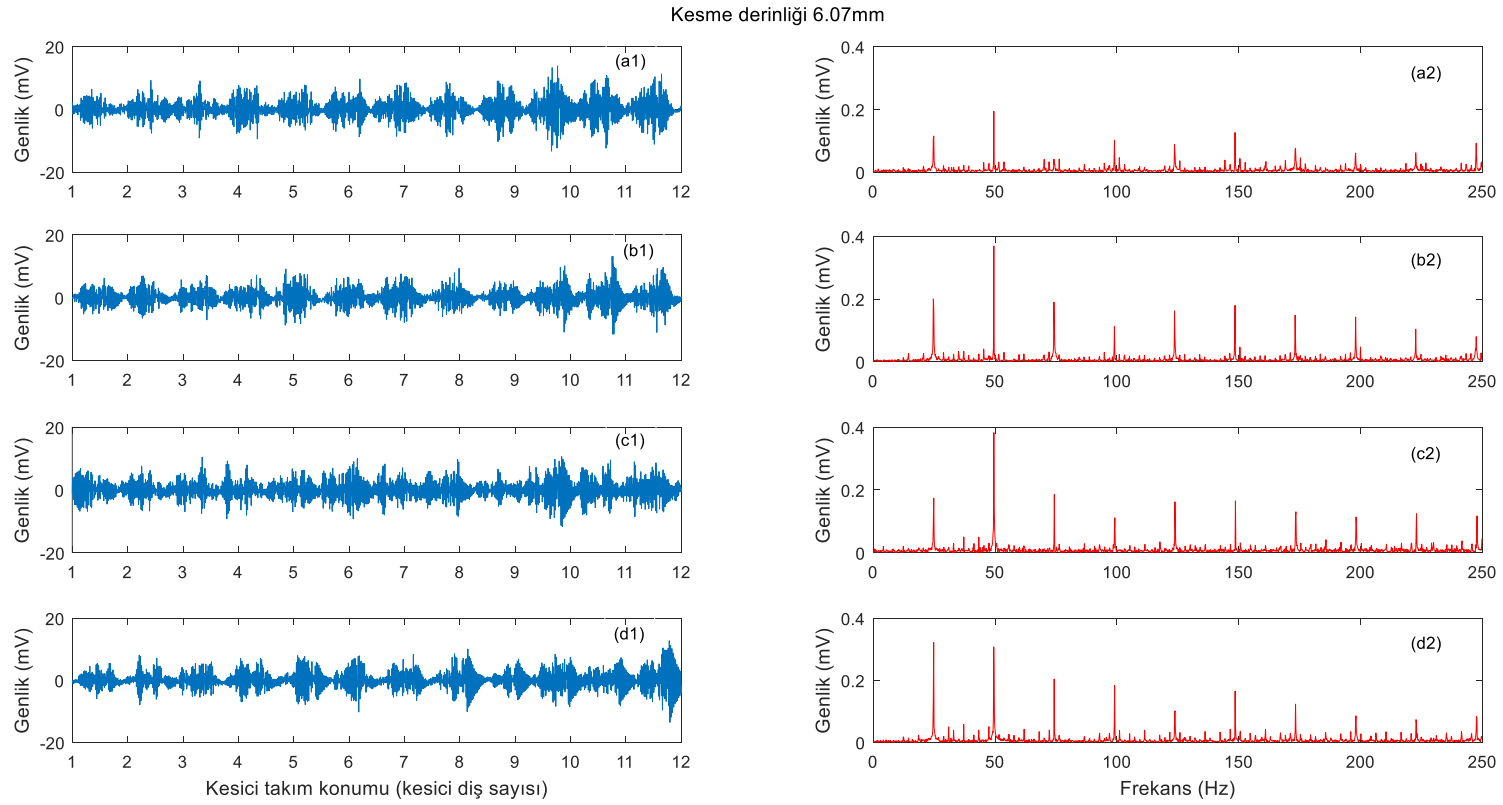




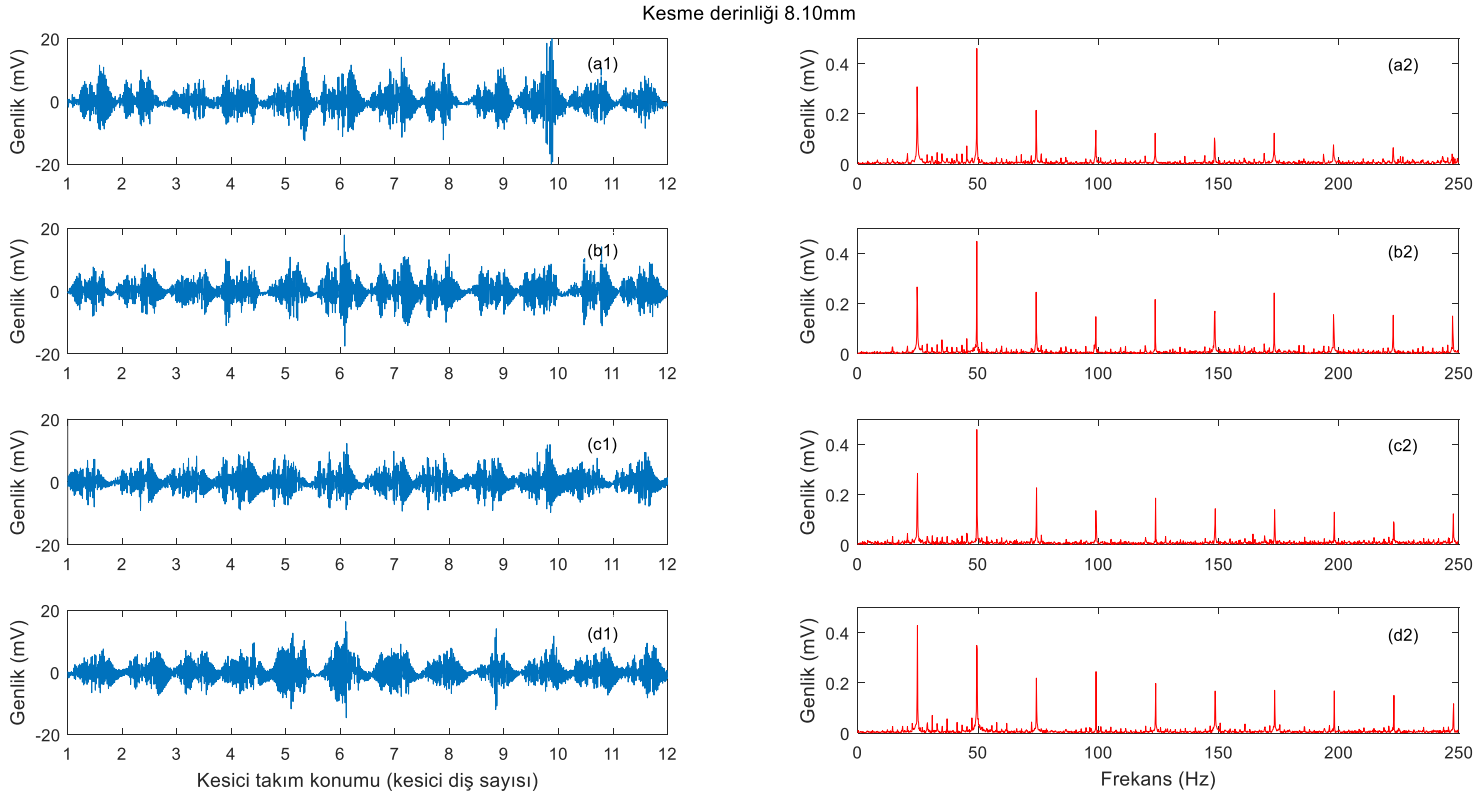
Kesme derinliği 4.05mm



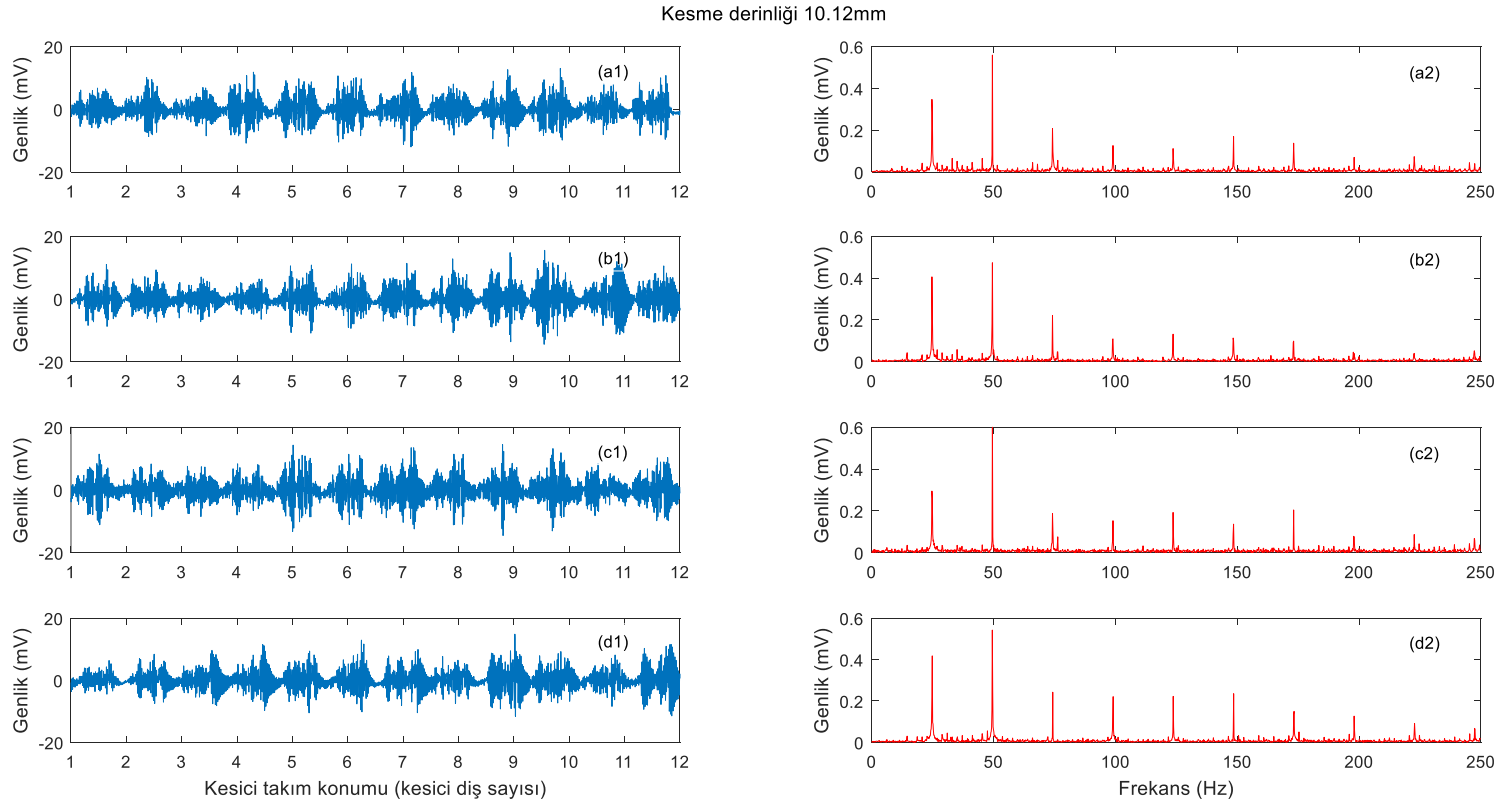
şekil 6.2. 4.05mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İKinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bđlgesi gđsterimleri



Şekil 6.3. 6.075mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri



Şekil 6.4. 8.10mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri



Şekil 6.5. 10.125mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin zaman ve frekans bölgesi gösterimleri

Yukarıdaki açıklamaların ışığında kesme derinliği kesici takımlarda lokal hataların tespit edilebilirliği üzerinde etkilidir ve kesme derinliği arttıkça hata tespiti güçleşmektedir. Frekans bölgesinde ise kesme derinliğindeki artış genel olarak kesme frekansları ve harmoniklerinin genliklerini arttırmaktadır. Meydana gelen yanbant aktivitelerinin genliklerindeki değişim hata tespitiyle ilişkilidir.

6.3. Deneysel Verilerin Sürekli Dalgacık Dönüşümüyle İncelenmesi

Sürekli dalgacık dönüşümü için, ortalaması alınan titreşim sinyallerinin ilk 16384 örnek noktası kullanılmıştır. Sürekli dalgacık dönüşümünün görsellenmesi sırasında elde edilen dönüşüm matrisinin 4949 ile 9696 sütunları arasındaki veriler (1 kesici takım devrini temsil edecek şekilde) kullanılmıştır. Morlet ana dalgacığının örnekleme frekansı 10kHz olarak seçilmiştir. Bunun yanında düşük frekans bölgesindeki detayları daha net biçimde görsellemek amacıyla ana dalgacık merkez frekansı $f_0 = 1Hz$ olarak seçilmiştir (bölüm 3.5.1'de anlatılmıştır). Dalgacık dönüşümü sonuçları 0-250Hz aralığını içerecek şekilde (yaklaşık 10 kesme frekansına kadar) 3 boyutlu olarak gösterilmiştir.

Şekil 6.6'da 2.025mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri gösterilmektedir. Bölüm 6.2'de hatasız kesici takımın 1 devri süresince peş peşe gelen 12 adet lokal değişim olduğu gözlemlenmişti. Şekil 6.8(a)'da gösterilen hatasız kesici takım titreşiminin sürekli dalgacık dönüşümüne bakıldığında, kesici dişlerin malzemeye teması esnasında oluşan lokal değişimler kendilerini bu noktalarda frekans eksenini boyunca yayılmış enerji olarak göstermektedir. Frekans eksenini boyunca oluşan her bir enerji yayılımının birbirlerinden farklı genlikte olması ise kesici takımın sahip olduğu kompozit hatalardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.6(b)'de birinci hata durumunda oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterilmektedir. Hatasız ve birinci hata durumlarını gösteren sürekli dalgacık dönüşümleri karşılaştırıldığında, hatanın varlığı 5. ve 9. diş konumlarında enerji azalması olarak kendisini göstermektedir. Meydana gelen enerji azalmasının hata miktarıyla ilişkili olduğu da görülmektedir. Şekil 6.6(c) ve (d)'de ikinci ve son hata durumlarına ait sürekli dalgacık dönüşümleri gösterilmektedir. Bu durumlarda hata miktarının artmasından dolayı hatalı diş konumlarında hemen hemen hiç enerjinin oluşmadığı net bir şekilde görülmektedir.

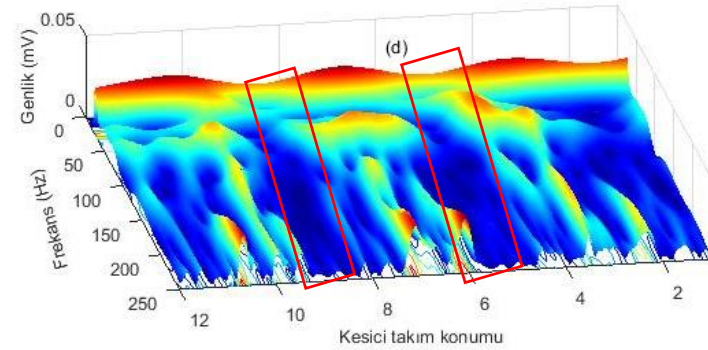
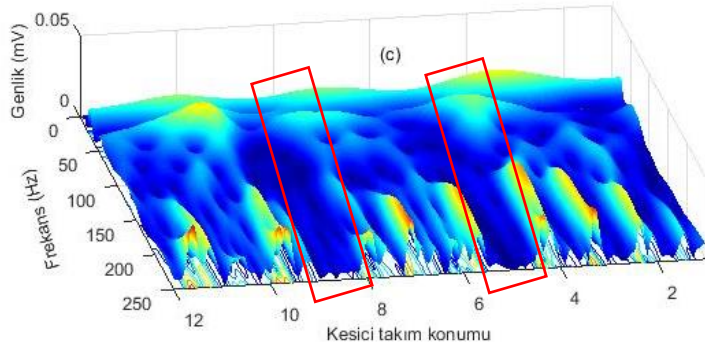
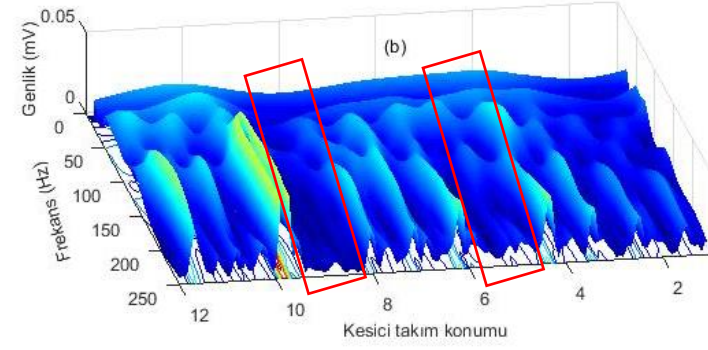
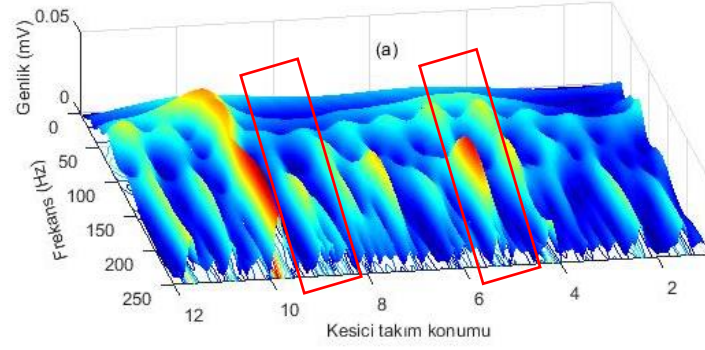
Şekil 6.7'de 4.05mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri gösterilmektedir. 2.02mm ve 4.05mm kesme

derinliklerinde elde edilen titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri kıyaslandığında göze çarpan önemli belirtilerden bir tanesi, kesme derinliği arttıkça kesici diş temasından dolayı oluşan enerji yayılımlarının daha kararlı olmasıdır. Birinci hata durumunda oluşan sürekli dalgacık dönüşümü dikkate alındığında küçük diş hatasının (5. diş konumu) varlığı enerji azalması olarak yansımamıştır. Buna karşılık 9. diş konumundaki büyük diş hatası enerji azalması şeklinde kendini göstermektedir. İkinci ve son hata durumlarında ise 5. ve 9. diş konumlarındaki hatalar enerji azalması olarak kendini göstermektedir.



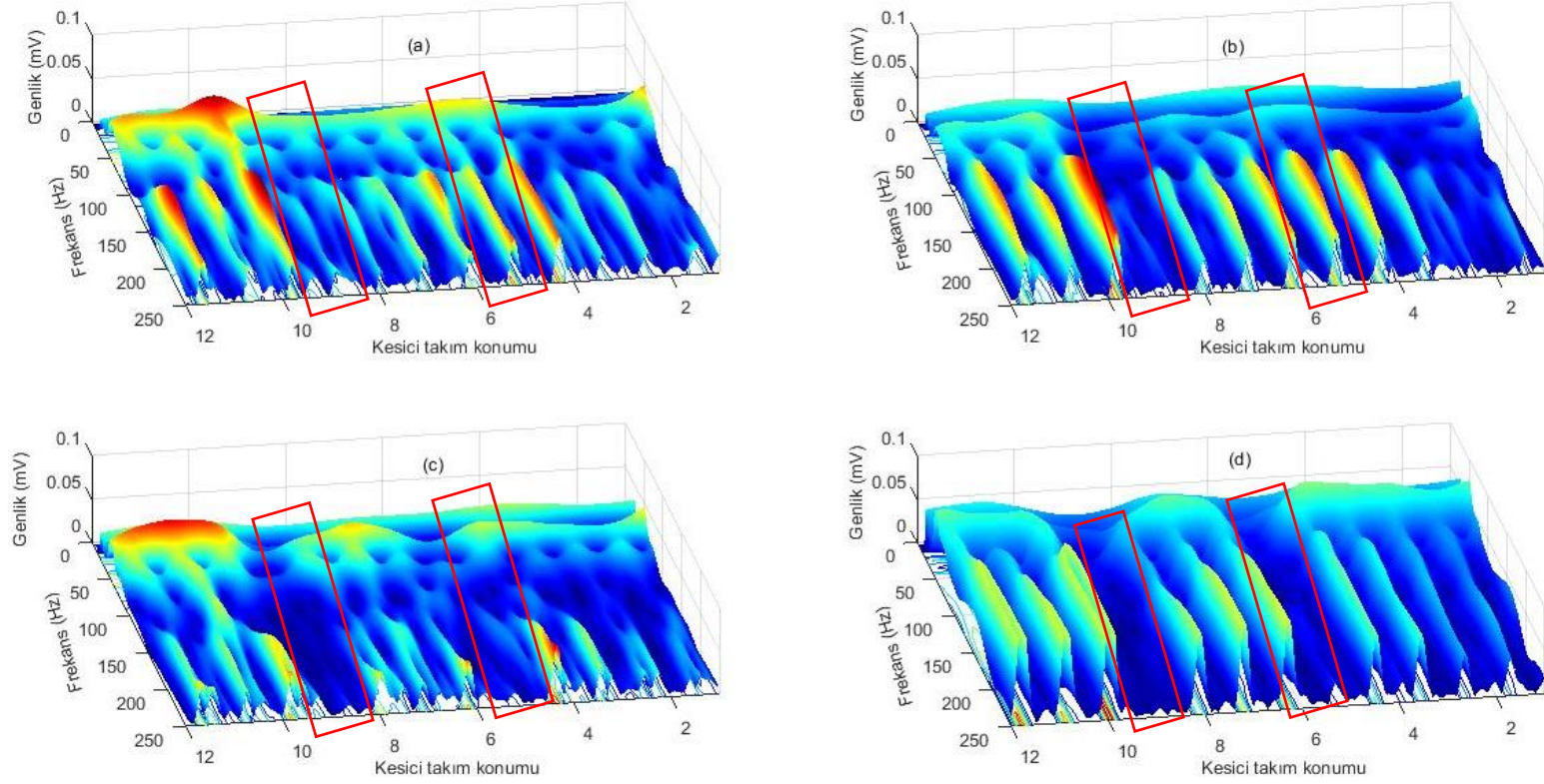


Kesme derinliği 2.02mm



Şekil 6.6. 2.025mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri

Kesme derinliği 4.05mm

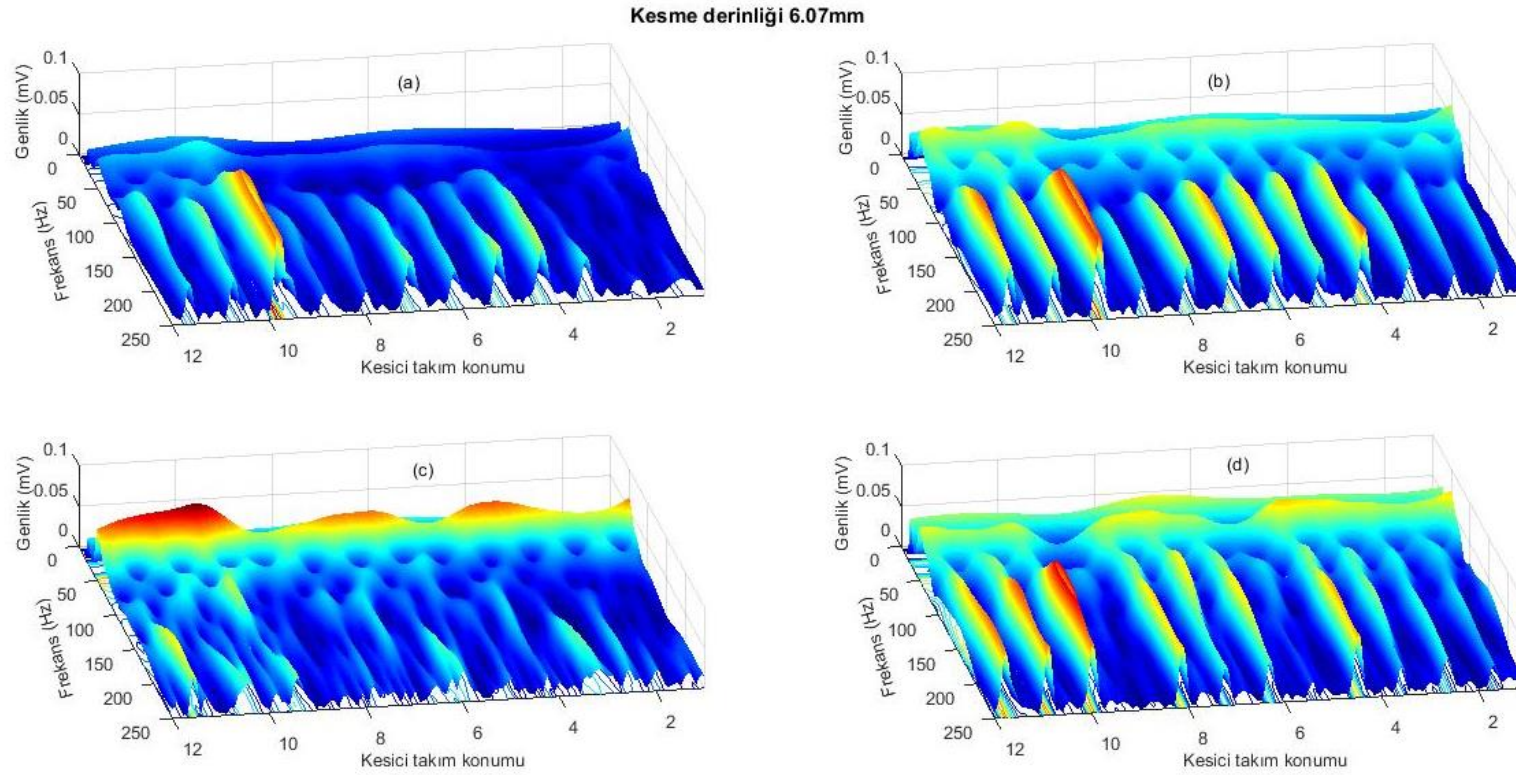


Şekil 6.7. 4.05mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri

Şekil 6.8’de 6.075mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri gösterilmektedir. Hatasız ve birinci hata durumları kıyaslandığında hata belirtileri net olarak gözlemlenmemektedir. Benzer biçimde ikinci hata durumunda 1.5mm diş yüksekliği azalması şeklinde uygulanan hatanın belirtisi de gözlemlenmemektedir. Buna karşın 2mm diş yüksekliği azalması olarak uygulanan hatanın belirtisi, 9. diş konumunda kendisini göstermektedir. Son hata durumunda (diş yüksekliklerinde 2.5mm ve 3.0mm azalma) ise hata belirtileri net olarak gözlemlenmektedir.

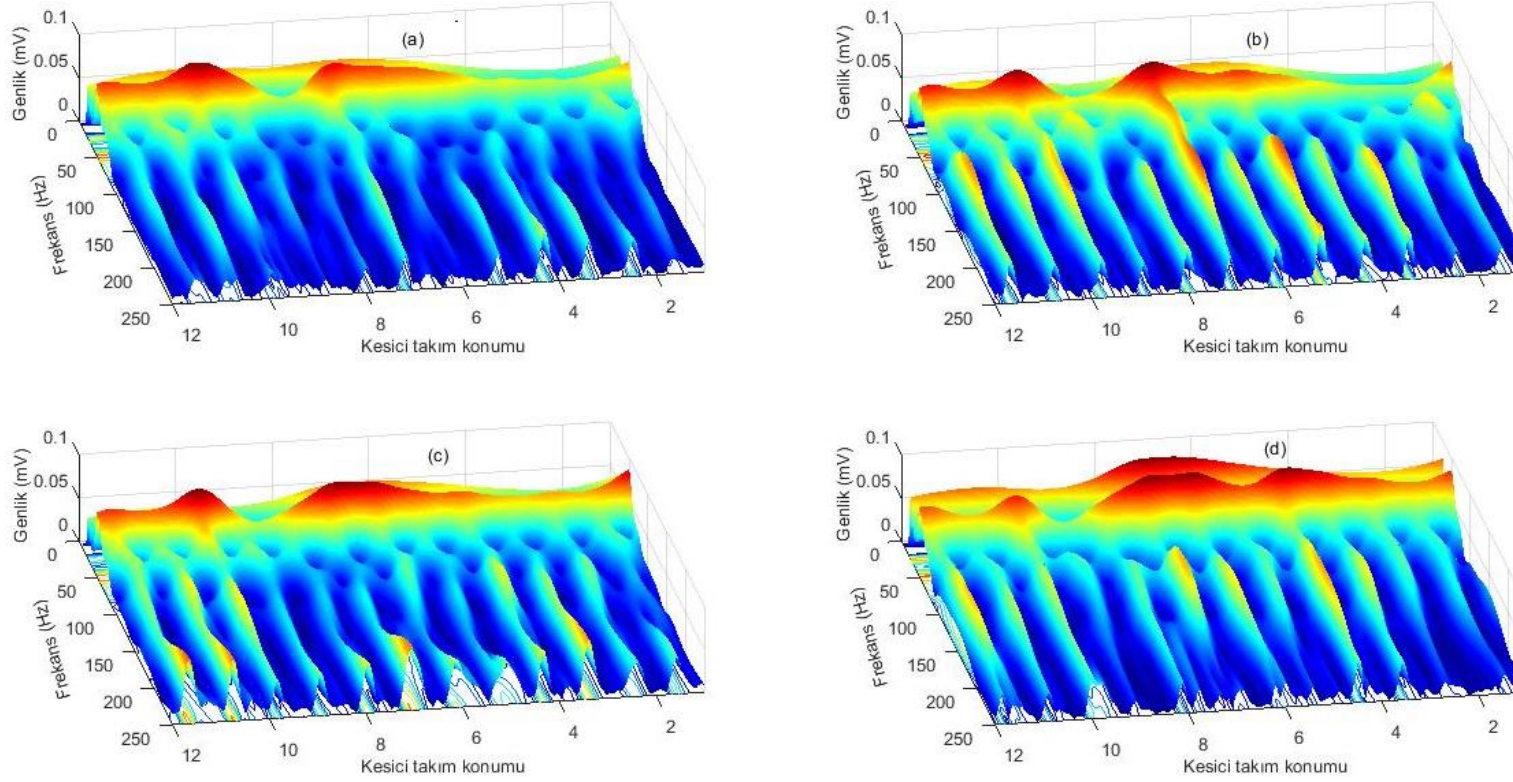
Şekil 6.9 ve 6.10’da 8.10mm ve 10.125mm kesme derinliklerinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri gösterilmektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere hatanın varlığına dair ikna edici net bir belirti gözlemlenmemektedir.

Yukarıdaki açıklamalardan kesme derinliğinin, hem titreşimlerin kararlılığı hemde hata tespiti üzerinde etkisinin büyük olduğu anlaşılmaktadır. Bölüm 6.2’de bahsedildiği gibi, zaman dalga biçimi üzerinde hata belirtileri 4.05mm derinliğe kadar gözlemlenebilirken, sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla bu belirtiler 6.07mm kesme derinliğinde kendini net olarak yansıtmaktadır.



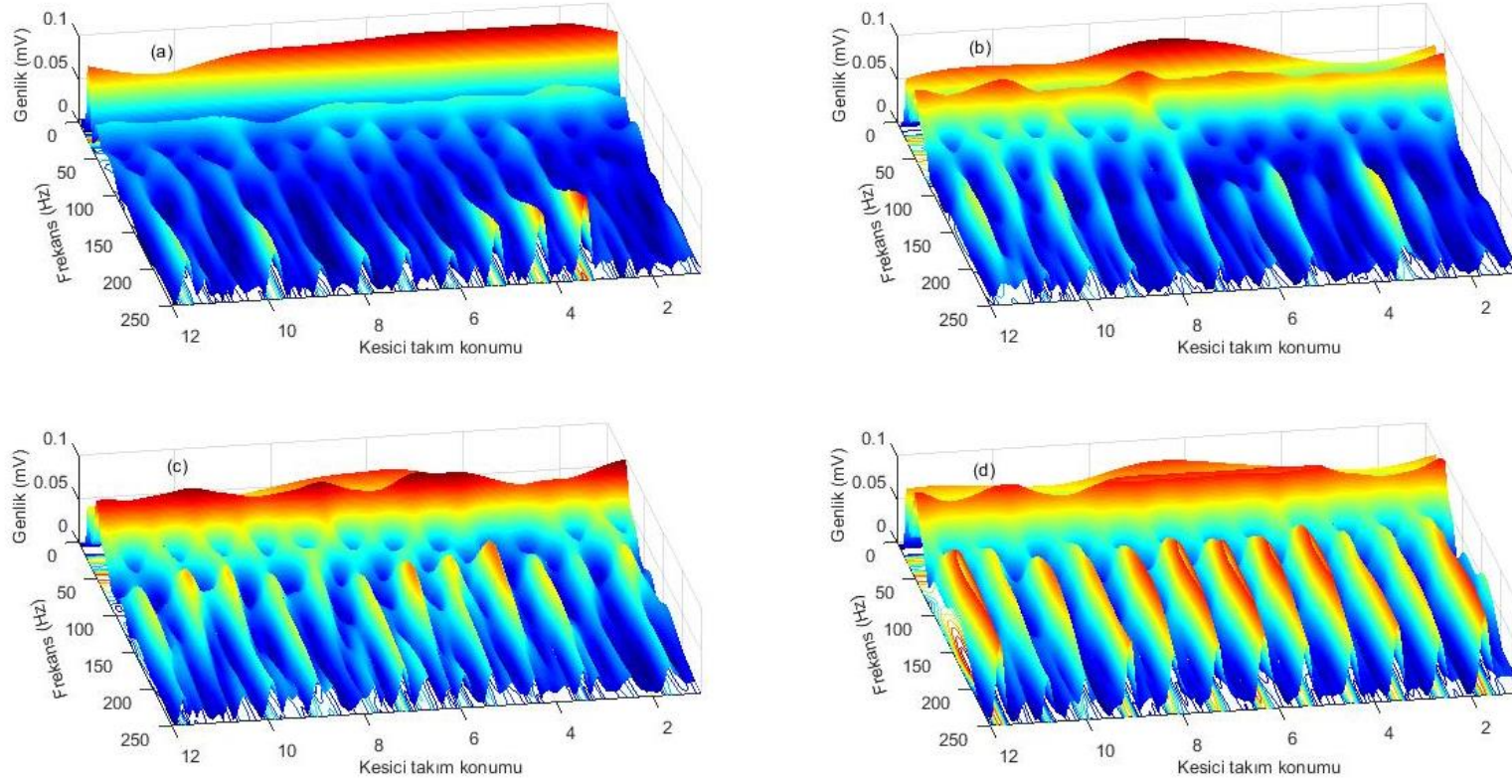
Şekil 6.8. 6.075mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri

Kesme derinliği 8.10mm



Şekil 6.9. 8.10mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri

Kesme derinliği 10.12mm



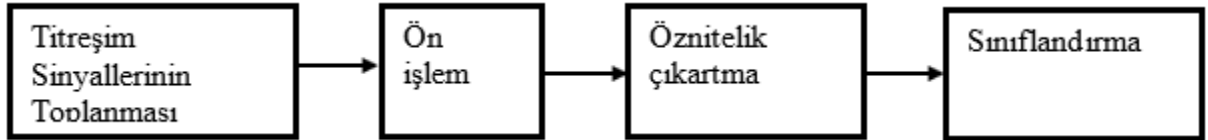
Şekil 6.10. 10.125mm kesme derinliğinde (a) Hatasız, (b) Birinci hata, (c) İkinci hata ve (d) Son hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü gösterimleri

7. KESİCİ TAKIMDA OLUŞAN LOKAL HATA ve DERECELERİN SINIFLANDIRMA TEKNİKLERİ İLE TESPİTİ

Bu bölümde kesici takımında oluşan lokal hataların sınıflandırma teknikleri kullanılarak tespit edilmesiyle ilgili bilgi verilecektir. Modül freze yardımıyla dişli üretimi esnasında kesici takım diş kırılmasından kaynaklı hatanın olup olmadığı ve varsa derecesinin tespiti için yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, rastgele orman ve en yakın komşuluk sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Her bir algoritma çeşitli performans kriterleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

7.1. Giriş

Bu çalışmada kesici takım diş kırılmasından kaynaklı lokal hatanın tespit edilmesinde sınıflandırma teknikleri kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan tekniklerin genel akış şeması Şekil 7.1’de verilmiştir. Genellikle sinyal işleme algoritmalarında filtreleme işlemleri ön işlemler olarak adlandırılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında da öncelikle deneyler sırasında elde edilen titreşim sinyalleri gürültüleri engellemek amaçlı olarak bir alçak geçiren filtreden geçirilmiştir. Filtreleme işinden sonra ise öznitelik çıkartma ve sınıflandırma işlemleri sırasıyla uygulanmaktadır.



Şekil 7.1. Sistem akış şeması

Bu çalışmada deneyler esnasında kesici takım olarak yüksek hız çeliğinden yapılmış modül freze kullanılmıştır. Kesici takımın iki farklı dişine (5. ve 9. diş) lokal hatalar uygulanmış ve Kesici takımında 3 farklı hata oluşturulmuştur. Birinci hata durumunda seçilen dişlerin kesici ağız yükseklikleri diş ucundan itibaren 0.5mm ve 1.0mm olacak şekilde azaltılmıştır. İkinci hata durumunda söz konusu dişlere uygulanan hata miktarları kesici ağız yüksekliğinde 1.5mm ve 2.0mm olacak şekilde azaltılmıştır. Son hatada ise hata miktarları kesici ağız yüksekliğinde 2.5mm ve 3.0mm azalma olacak şekilde oluşturulmuştur. Kesme işlemi sırasında oluşan titreşimler radyal ve teğetsel yönlerde konumlandırılan ivmemetreler yardımıyla toplanmıştır. Deneyler esnasında titreşim sinyallerinin elde edilmesiyle ilgili detaylı bilgi bölüm 6.1’de anlatılmıştır.

7.2. Ön İşlemler

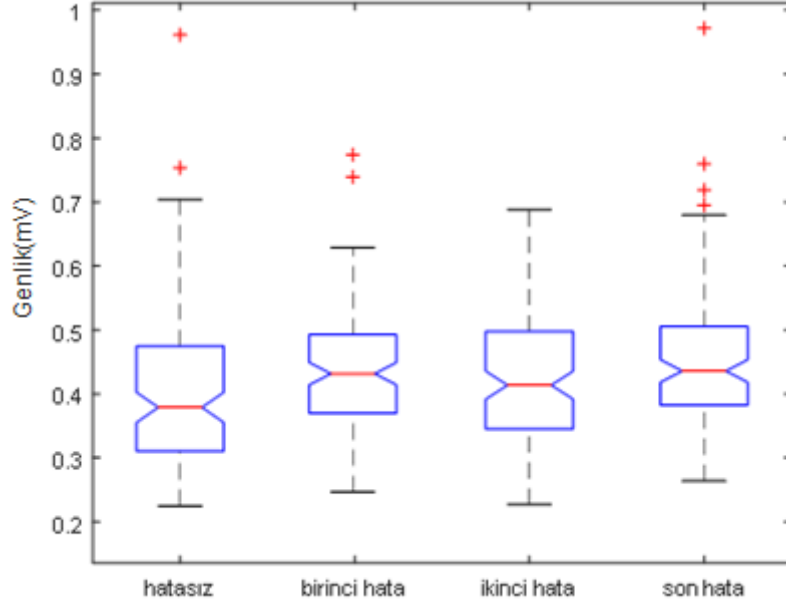
Ön işlemler birçok sinyal işleme operasyonlarında ilk işlem olarak sinyale uygulanmaktadır. Bu sayede deney düzeneğinden genellikle gürültülü olarak elde edilen ham sinyallerin gürültü giderimi sağlanmaktadır. Bu çalışmada da titreşim sinyallerindeki gürültünün giderimi için tüm sinyallere 2000Hz kesim frekansına sahip bir alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Deney düzeneğinden elde edilen hatasız titreşim sinyalinin ham hali ile tasarlanan filtre ile filtrelenmiş hali Şekil 7.2’de verilmiştir.

7.3. Öznitelik Çıkartma

Öznitelik çıkartma genellikle sinyalin bütünü yerine sinyali daha küçük boyutlarda ifade edebilecek bir boyuta indirgeme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu sayede sinyal işleme algoritmalarında sinyalin tamamı yerine, çıkartılan öznitelikler kullanılarak sinyal ifade edilmektedir. Böylelikle hesapsal yükte ciddi bir azalma yaşanırken aynı zamanda da sinyal işleme algoritmalarının performansı artmaktadır. Bu nedenle sinyali ifade edebilecek en iyi özneliğin belirlenmesi gerekmektedir.

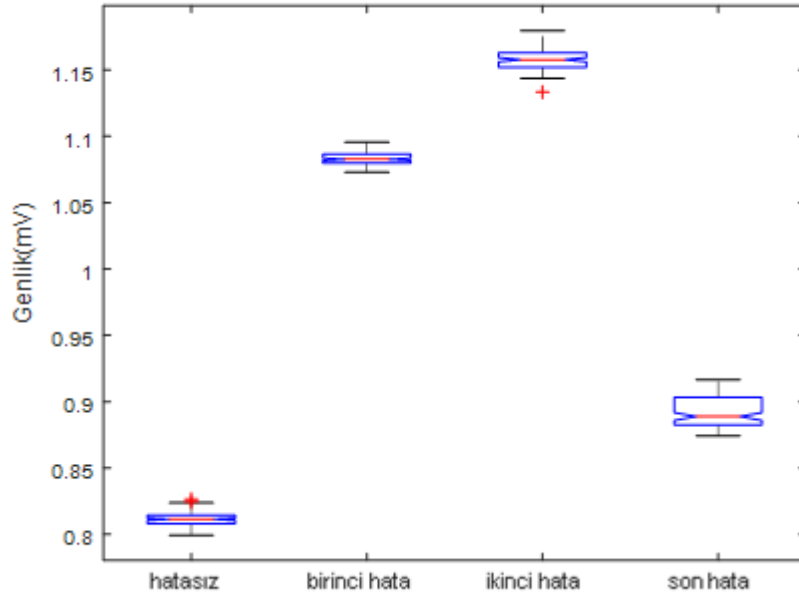
Bir sinyali ifade edebilmek için birçok farklı öznitelik kullanılabilir. Kullanılacak olan öznitelik değerleri genellikle sinyalin yapısına göre değişmektedir. Bu öznitelikler zaman uzayı tabanlı öznitelikler olabileceği gibi zaman uzayından elde edilen öznitelikler yetersiz kaldığında, sınıflandırma doğruluğunu arttırmak amacıyla frekans uzayı tabanlı öznitelikler başta olmak üzere Hilbert Huang dönüşümü tabanlı, dalgacık dönüşümü tabanlı farklı öznitelikler de kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kesici takımında oluşan lokal hatanın tespitinde radyal ve teğetsel yönlerde yerleştirilmiş olan ivmemetrelerden elde edilen titreşim sinyallerinden öznitelik çıkarma işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada zaman uzayından çıkartılan öznitelikler her 3 ivmemetreden elde edilen titreşim sinyaline ait ortalama ve medyan değerleridir. Her bir hata tipi için elde edilen zaman uzayı tabanlı öznitelikleri dağılımları Şekil 7.3’te verilmiştir.



Şekil 7.2. Zaman uzayı tabanlı öznitelik dağılım (ortalama değer)

Şekilden de görülebileceği üzere hata arttığında sinyalin ortalama değerinde yükselme gözlenmektedir. Fakat yine Şekil 7.3 incelendiğinde sinyallerin sadece zaman uzayı tabanlı öznitelikler kullanılarak birbirinden net bir şekilde ayırt edilemediği gözlenmiştir. Bu amaçla bilgisayar ortamında yapılan analizler sonucunda zaman tabanlı özniteliklere ek olarak, frekans uzayı ve dalgacık tabanlı öznitelikler de öznitelik vektörüne eklenmiştir. Radyal ivmemetre verisinin frekans uzayındaki değerleri ayrık Fourier dönüşümü kullanılarak elde edilmiştir. Her bir hata tipi için elde edilen frekans uzayı tabanlı öznitelikleri dağılımları Şekil 7.4’te verilmiştir.



Şekil 7.3. Frekans uzayı tabanlı öznelik dağılımı (Fourier dönüşümü)

Şekilden de görülebileceği gibi radyal ivmemetreye ait titreşim sinyalinin Fourier dönüşümü hata tiplerini birbirinden net bir şekilde ayırmak için kullanılabilir. Şekil 7.3’de zaman uzayı tabanlı özneliklerin hata tespitinde kullanılabilir olsa da net bir şekilde ayırt edilemediği, Şekil 7.4’de gösterilen frekans uzayı tabanlı öznelikte ise hataların birbirinden net bir şekilde ayırt edilebildiği gösterilmiştir. Bu çalışmada sınıflandırma işleminde kullanılan öznelikler Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1. Kullanılan öznelik tablosu

Öznelik Adı	Radyal ivmemetre (A1)	Teğetsel ivmemetre (A2)	Teğetsel ivmemetre (A3)
Ortalama değer	+	+	+
Ortanca değer	+	-	+
Fourier dönüşümü	+	-	-
Ayrık Dalgacık Dönüşümü	+	-	-

Literatürde sınıflandırma algoritmalarının performansları genellikle iki performans ölçütü kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu performans ölçütleri, duyarlılık ve belirleyicilik, Eşitlik (7.1) ve Eşitlik (7.2)’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$Duyarluluk = \frac{TP}{(TP+FN)} \quad (7.1)$$

$$Belirleyicilik = \frac{TN}{(TN+FP)} \quad (7.2)$$

Eşitlik (7.1)'de yer alan değişkenlerden TP değeri, bir sınıfa sınıflandırıcı tarafından doğru bir şekilde atanan elemanların sayısıdır. FN ise ilgili sınıfa sınıflandırıcı tarafından yanlış atanan elemanların toplamıdır. TN değeri ise sınıflandırıcı tarafından ilgili sınıf haricinde kalan diğer sınıflara doğru bir şekilde atanan elemanlarının toplamıdır. FP değeri ise gerçekte ilgili sınıf olmadığı halde, sınıflandırıcı tarafından o sınıfa atanan elemanların toplamıdır.

7.4. Sinyal Sınıflandırma

Literatürde, araştırmacılar karmaşık problemlerde sınıflandırma performansını karşılaştırmak ve geliştirmek için çeşitli sınıflayıcılar uygulamışlardır [70]. Bu çalışmada, kesici takımın kaynaklı lokal hatanın tespit edilmesi amacıyla YSA, DVM, RO ve K en yakın komşu (kNN) sınıflandırıcıları kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri 0.2mm/sn tabla ilerleme hızında ve 10.0kHz örnekleme hızında toplanmıştır. 0.2mm/sn tabla ilerleme hızında, her biri 60000 veri olacak şekilde (yaklaşık 12kesici takım devrini içeren) 10 veri bloğu olarak toplanmıştır. 60000 veri içeren titreşim sinyali, kesici takımın bir devrini kapsayacak şekilde 4848 örnek noktasını içeren 12 adet zaman penceresine bölünmüştür. 0.2mm/sn'lik tabla ilerleme hızında kesme işlemi sırasında 10 veri bloğu toplandığından bu titreşim verileri kullanılarak oluşturulan veri setinde 120 örnek bulunmaktadır. Hata tespiti için kullanılan sınıflandırma tekniklerinin tümünde verilerin %50'si eğitim, kalan % 50'si ise test aşamasında kullanılmıştır. Sınıflandırıcılardan elde edilen karar tablosu Tablo 7.2'de verilmiştir. Tablo 7.2'de verilen karar tablosu dikkate alındığında sağlıklı ve hatalı kesici takımlar için YSA, DVM, RO ve kNN olmak üzere bütün sınıflandırıcıların eşitlik 7.1 kullanılarak ortalama belirleyicik değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 7.3'de verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken sınıflandırılmayan örnekler FN olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen sınıflandırıcı sonuçlarının daha güvenilir olması için, sınıflandırma algoritmaları 10 defa çalıştırılmış ve sınıflandırıcıların elde ettiği sonuçların ortalamaları tabloya eklenmiştir.

Tablo 7.2. Titreşim verileri için karar tablosu

Gerçek Tahmin \ Sınıflandırıcı	Sınıflandırıcı	Hatasız	Birinci Hata	İkinci Hata	Son Hata
Hatasız	YSA	60	0	0	0
	DVM	55	5	0	0
	RO	59	1	0	0
	kNN	57	2	0	1
Birinci Hata	YSA	1	59	0	0
	DVM	0	54	6	0
	RO	0	60	0	0
	kNN	0	60	0	0
İkinci Hata	YSA	0	1	59	0
	DVM	0	0	59	1
	RO	0	5	55	0
	kNN	1	0	57	2
Son Hata	YSA	0	0	3	57
	DVM	0	0	0	60
	RO	0	0	1	59
	kNN	1	0	4	55

Tablo 7.3. Belirleyicilik tablosu

Sınıflandırıcı	Hatasız	Birinci Hata	İkinci Hata	Son Hata
YSA	0.99	0.99	0.98	1
DVM	1	0.97	0.96	0.99
RO	1	0,96	0,99	1
kNN	0.98	0.98	0.97	0.98

Yukarıdaki tablolardan da görülebileceği gibi seçilen sınıflandırıcılar içerisinde ilk aşamada sağlıklı (hatasız) örneğin tespiti yapılmıştır. Bu alanda YSA'nın diğer sınıflandırıcılardan daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Birinci hataya sahip örneklerin diğer örneklerden ayrılması anlamında ise, RO ve KNN algoritmaları diğer algoritmalarından daha iyi sonuç elde edilmektedir. İkinci hataya sahip örneklerin diğer örneklerden ayrılması anlamında ise, YSA ve DVM algoritmaları diğer algoritmalarından daha iyi sonuç elde edilmektedir. Son hatada ise DVM algoritması ile diğer algoritmalara kıyasla daha iyi sonuç elde edilmiştir.

Genel olarak geliştirilen sınıflandırma algoritmaların hatalı kesici takımı %100 doğrulukla tespit edebildiği gözlenmiştir. Ayrıca yine geliştirilen sınıflandırıcılar sadece hatalı olup olmadığını değil aynı zamanda hatanın seviyesi de tespit edilmeye çalışılmıştır. Tablodan da

inceleneceği gibi geliştirilen algoritmalar %99 doğrulukla bu örnekleri birbirinden ayırt edebildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde, geliştirilen sınıflandırma algoritmalarının çok başarılı performans gösterdiği söylenebilir. Bu performans hem sınıflandırıcıların başarılı bir şekilde çalıştığını göstermekle beraber aynı zamanda seçilen özneliklerin sinyalleri ne kadar başarılı bir şekilde tanımladığı da göstermektedir.



8. SONUÇLAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında modül freze ile kesme esnasında oluşan kesme kuvvetinin belirlenmesi ve kesici takımındaki lokal hatanın tespit edilmesiyle ilgili elde edilen sonuçlar açıklanmıştır.

8.1. Tezin Hedefleri ve Çıktıları

Bu çalışmada modül freze yardımıyla dişli üretimi esnasında meydana gelen kesme kuvvetinin belirlenmesi ve kesici takımda oluşabilecek lokal diş hatalarının titreşim esaslı durum izleme yöntemleri ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, frezelemede kesme esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesine ve kesici takımda diş kırığından kaynaklı lokal hatanın sinyal işleme teknikleri ile tespitine odaklanmıştır. Özetle tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibidir:

- Amaç 1: Kesme kuvveti bileşenlerinin analitik olarak modellenmesi ve belirlenmesi.
- Amaç 2: Deneysel olarak kesme kuvveti bileşenlerinin belirlenmesi ve kesici takımındaki lokal hataların titreşim izleme yardımıyla tespit edilmesine olanak sağlayacak bir deney düzeneğinin oluşturulması.
- Amaç 3: Kesme kuvveti bileşenlerinin deneysel olarak tahmin edilmesi.
- Amaç 4: Kesici takımın farklı dişlerine uygulanan farklı şiddetteki lokal hataların tespit edilmesi.
- Amaç 5: Hata tespitinde zaman ve frekans bölgesi incelemeleri, sürekli dalgacık dönüşümü ve sınıflandırma tekniklerinden yararlanılması.

Bu çalışma kapsamında hedeflenen tüm basamaklar yerine getirilmiş olup, bu hedeflere ulaşmak için yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Frezeleme esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin doğru ve hassas olarak tahmininin yapılması için analitik ve deneysel yöntemler kullanılmıştır. Kesme kuvveti bileşenleri analitik olarak Kienzle Model yaklaşımıyla hesaplanmış, deneysel olarak ise deformasyon ölçümünden yararlanılarak tahmin edilmiştir. Kienzle'ye göre kesme kuvveti hesabı, talaş kesiti ile işlenen malzemenin özgül kesme direncinin çarpımı esasına dayanmaktadır. Bu sebeple kesme kuvveti hesabının doğru ve hassas yapılabilmesi için talaş kesitinin doğru

hesaplanması gereklidir. Talaş kesitinin doğru hesaplanması için de öncelikle kesici takım profilinin doğru modellenmesi gereklidir. Bu çalışmada kesici takım olarak modül freze tercih edilmiştir. Modül freze kullanılarak imal edilmiş diş profilleri tam bir evolvent eğrisi olmamakla beraber, teorik kesme kuvveti hesaplamasında modül freze kesici ağız profili evolvent eğrisi olarak kabul edilmiş ve bu şekilde modellenmiştir. Kesme kuvveti bileşenleri önerilen yaklaşımla doğru bir biçimde tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Kesme kuvveti bileşenlerinin deneysel olarak belirlenmesinde deformasyon ölçümünden faydalanılmıştır.

Tüm deneyler kalıpcı freze tezgahı üzerinde yapılmış olup, kesme işlemleri C45 imalat çeliğinden üretilen dişli taslağı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dişli taslağı özel olarak tasarlanan ve iki ucundan sabitlenmiş, imalat çeliğinden yapılmış olan taşıyıcı bir kirişe tutturulmuştur. Taşıyıcı kiriş tezgah tablasına iki adet destek parça yardımıyla katı biçimde bağlanmıştır. Taşıyıcı kiriş üzerine simetrik olarak yerleştirilen gerinim ölçerler yardımıyla her biri yarım köprü olarak tasarlanmış iki adet Wheatstone köprüsü oluşturulmuştur. Kesme kuvveti etkisiyle ortaya çıkan deformasyonlar gerinim ölçerler yardımıyla algılanmış ve radyal ve teğetsel yönde oluşan kesme kuvveti bileşenleri tahmin edilmiştir. Teorik ve deneysel olarak elde edilen kesme kuvvetleri sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Kesici takımda oluşan lokal diş hatalarının titreşim esaslı durum izleme yöntemleri ile tespit edilmesi için de sinyal işleme teknikleri ve sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Kesici takımın iki farklı dişine (5. ve 9. diş) lokal hatalar uygulanmış ve kesici takımda 3 farklı hata şiddeti oluşturulmuştur. Birinci hata durumunda seçilen dişlerin kesici ağız yükseklikleri diş ucundan itibaren 0.5mm ve 1.0mm olacak şekilde azaltılmıştır. İkinci hata durumunda aynı dişlere uygulanan hata miktarları kesici ağız yüksekliğinde 1.5mm ve 2.0mm olacak şekilde azaltılmıştır. Son hatada ise hata miktarları kesici ağız yüksekliğinde 2.5mm ve 3.0mm azalma olacak şekilde oluşturulmuştur. Kesme işlemi sırasında oluşan titreşimler radyal ve teğetsel yönlerde konumlandırılan ivmemetreler yardımıyla toplanmıştır. Hatanın tespit edilmesi için elde edilen titreşim sinyallerinin zaman ve frekans bölgesi incelemeleri ve sürekli dalgacık dönüşümünden yararlanılmıştır. Buna ek olarak oluşan lokal hataların tespiti için sınıflandırma tekniklerinden de yararlanılmıştır. Bu çalışmada çok seviyeli bir sınıflandırma algoritması geliştirilmiş olup bu algoritma sayesinde hem hata olup olmadığı hem de eğer varsa hatanın derecesi tespit edilmiştir. Bu amaçla yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, rastgele orman ve en yakın komşuluk algoritmaları kullanılmıştır. Her bir algoritma çeşitli performans kriterleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

8.2. Tezin Sonuçları

Modül freze kullanılarak yapılan kesme işlemi esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenleri teorik ve deneysel olarak belirlenmiştir. Teorik kesme kuvveti bileşenleri Kienzle model esasına göre hesaplanmıştır. Teorik kesme kuvveti hesabı için, deneyler sırasında kullanılan normal modülü 4.5mm, çapı 90 mm, 12 kesici ağıza sahip ve dönme hızı 123.7 dev/dk olan modül freze özellikleri ve iş parçası olarak C45 malzeme özellikleri kullanılmıştır. Oluşturulan dişli çarkın diş yüksekliği 10.125mm olmasına rağmen, kesme derinliği 2.025mm tutularak tam diş formu 5 kademeli kesimle oluşturulmuştur. Kesme kuvvetini hesaplamak için öncelikli olarak teorik talaş genişliğinin hesaplanması gerekmektedir. Bu sebeple Bölüm 5.1'de verilen eşitlikler kullanılarak kesici kenara ait evolvent eğri oluşturulmuştur. Sonrasında modül freze kesici ağzı, diş yüksekliği boyunca 100 eşit parçaya bölünerek her bir ince diske ait kesici kenar genişliği ve bunlara bağlı olarak kesme kuvveti bileşenleri hesaplanmıştır (Bölüm 5.3). 0.2mm/s ve 0.3mm/s ilerleme hızlarında ve farklı kesme derinliklerinde (2mm, 4mm, 6mm, 8mm ve 10mm) radyal ve aksel yönlerde oluşan kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde (Şekil 5.7) birinci kesim (2mm daldırma) için kesme kuvveti genlikleri kesici takım pozisyonunun 13° olmasına kadar düzenli olarak artmakta, 17° civarında genlik değeri maksimuma ulaşmış sonrasında hızlı bir şekilde sifira düşmektedir. Diğer kesme derinliklerinde, kesme kuvveti genlikleri kesme derinliğine bağlı olarak artmaktadır. Aynı zamanda kesme derinliği arttıkça tek dişe ait kesme periyodunun da kısmen genişlediği görülmektedir. 0.3mm/s ilerleme hızındaki kesme kuvveti bileşenlerinin (Şekil 5.8) 0.2mm/s ilerleme hızındaki kesme kuvveti bileşenlerine benzer davranış sergilediği görülmekte olup, aynı kesici takım pozisyonunda daha yüksek kesme kuvveti genlikleri olduğu görülmektedir.

Deneysel olarak kesme kuvveti bileşenlerini belirlemek için deformasyon ölçümünden yararlanılmıştır. Yapılan tüm deneyler kalıpcı freze tezgahı üzerinde yapılmış olup, kesme işlemleri C45 imalat çeliğinden üretilen dişli taslağı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dişli taslağı özel olarak dizayn edilen ve iki ucundan sabitlenmiş, imalat çeliğinden yapılmış olan taşıyıcı kirişe tutturulmuştur. Dişli taslağı göbeği ve kirişin orta kısmının 0.318° konik olarak işlenmesi, dişli taslağının taşıyıcı üzerine sürtünme esaslı konik yüzey teması yardımıyla tutturulmasına olanak sağlamıştır. Taşıyıcı kiriş tezgah tablasına iki adet destek parça yardımıyla katı biçimde bağlanmıştır (Şekil 4.1). Taşıyıcı kiriş üzerine hem gerinim ölçerleri uygun bir biçimde tutturmak, hem de gerinim ölçer köprüsünün duyarlılığını arttırmak amacıyla, her birinin kesit alanı $24\text{mm} \times 14.5\text{mm}$ olan iki adet dikdörtgenel bölge kirişin orta

noktasına göre simetrik biçimde işlenmiştir. Kesici takım olarak yüksek hız çeliğinden üretilmiş modül freze kullanılmıştır. Kesici takım, dönme eksenini yatayda olacak şekilde freze tezgahına tutturulmuştur. Oluşturulan dişli çarkın diş yüksekliği 10.125mm olmasına rağmen, bu diş yüksekliği kesme derinliği sabit tutularak 5 kademeli kesimle tam olarak oluşturulmuştur. Kesme işlemleri 0.2mm/s ve 0.3mm/s olmak üzere iki farklı ilerleme hızında yapılmıştır. Elde edilen sinyallerin kesici takım pozisyonuna göre ortalamalarını oluşturabilmek amacıyla kesici takımın her devrinde bir pik üreten bir pozisyon sinyali kullanılmıştır. Kesici takım dönme hızı 123.75 dev/dak olarak sabitlemiş (24.75Hz temel kesme frekansı) ve bütün sinyaller 10kHz'de örneklendirilmiştir. Veri toplama esnasında rastgele sinyal bileşenlerini azaltmak ve kararlı bileşenleri güçlendirmek amacıyla her bir kesme işlemi sırasında oluşan köprü gerilimleri kesici takımın 96 devri boyunca sürekli toplandıktan sonra pozisyon sinyaline göre tek bir kesici takım devrine (4848 örnek noktasına sahip) indirgenmiştir. 0.2mm/s ilerleme hızında, modül freze yardımıyla yapılan diş kesimi esnasında deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde (Şekil 5.9-5.13) kesme kuvveti bileşenlerinin kesme derinliğine bağlı olarak artış sergilediği görülmüştür. Ancak her bir dişe ait kuvvet genliklerinin takım konumuna bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu değişimlerin takımda veya hareket milinde muhtemel küçük miktardaki eksantriklik veya kesici takımın sahip olduğu kompozit hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Teorik olarak elde edilen sonuçlarda ise bu tip hatalar dikkate alınmadığından kesme kuvveti genlikleri takım konumuna göre değişim göstermemektedir. Deneysel sonuçlardaki kuvvet değerleri muhtemel hatalardan etkilendiğinden 12 dişe ait maksimum kesme kuvveti değerlerinin ortalaması alınmıştır. Teorik olarak elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar kıyaslanmış ve uyumlu oldukları görülmüştür. Bu durum kullanılan teorik modelin doğruluğunu teyit etmektedir. 0.3mm/s ilerleme hızında deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde (Şekil 5.14-5.18) kesme kuvveti bileşenlerinin 0.2mm/s ilerleme hızında elde edilenlerle benzer olduğu görülmüş, takımın aynı açılarda 0.2mm/s kesme hızında elde edilenlere göre daha büyük değerlere eriştiği anlaşılmıştır. 0.2mm/s kesme hızına benzer şekilde teorik ve deneysel kesme kuvveti bileşenlerinin birbirleriyle kıyaslandığında sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında kesici takımın diş kırılmasından kaynaklı lokal hatalar titreşim esaslı durum izleme yöntemleri ile tespit edilmiştir. Yukarıda bahsedildiği gibi lokal hatalar kesici takımın 5. ve 9. dişine gelecek şekilde iki farklı dişe uygulanmış olup, uygulanan hatalar kesici dişlerin uç kısımlarının taşlanmasıyla oluşturulmuştur (Resim 6.1-6.2). Kesme

işlemi sırasında oluşan titreşimler dişli taslağı üzerine konumlandırılan ivmemetreler yardımıyla toplanmıştır. Titreşim verileri içerisindeki rastgele bileşenleri azaltmak ve özellik içeren bileşenleri kuvvetlendirmek amacıyla pozisyon sinyali dikkate alınarak elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır. Kesme işlemi sırasında sağlıklı ve hatalı durumlarda elde edilen titreşimlerin zamana göre değişimlerini göstermek için, kesici takımın bir devrini kapsayacak şekilde ortalama sinyalin ilk 4848 örnek noktası kullanılmıştır. Buna karşılık bu titreşimlerin frekansa göre değişimleri ise 0.17Hz frekans çözünürlüğü oluşacak şekilde gösterilmiştir. Hatasız kesici takımın oluşturduğu titreşimlerin zaman davranışı göz önüne alındığında, kesici takımın bir devrini içeren kesme süresince 12 adet lokal değişimlerin olduğu (kesici takım üzerinde 12 adet kesici dişin bulunması) ancak kesici takımın sahip olduğu kompozit hatalardan dolayı (eksantriklik, kesici dişlerin birbirleriyle olan profil farklılıkları gibi) meydana gelen lokal değişimlerin genel olarak az veya çok birbirlerinden farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Söz konusu farklılıklar farklı kesme derinliklerinde de benzer biçimde gözlemlenmiştir.

Farklı hata durumunda oluşan titreşimlerin değişimleri incelendiğinde birinci hata durumunda, hatalı diş konumlarında (5. ve 9. diş) meydana gelen titreşim genliklerinin hata miktarı ile benzer biçimde azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.1). İkinci hata durumunda ise 5. diş konumunda oluşan titreşimlerin genliği birinci hata durumuna göre daha da azalmış olup 9. diş pozisyonunda ise kesici takım iş parçasına temas etmediğinden dolayı titreşim oluşmadığı görülmüştür. Son hata durumunda ise kesici dişlere uygulanan hata miktarları (5. dişteki diş yüksekliği azalması 2.5mm ve benzer biçimde 9. dişteki azalma 3.0mm) kesme derinliğinden fazla olduğundan bu dişlerin iş parçası ile teması söz konusu olmadığından bu konumlarda titreşim oluşmadığı tespit edilmiştir. Frekans bölgesi incelemelerinde hatasız ve hatalı takım titreşimlerinin 250Hz'e kadar (yaklaşık 10×kesme frekansı) olan frekans değişimleri gösterilmiştir. Frekans değişimlerinden 25Hz ve katlarında etkin frekans tepeleri olduğu, hata miktarı arttıkça temel kesme frekansında oluşan tepe genliğinin hata miktarıyla arttığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten kesme frekansı ve harmonikleri etrafında yaklaşık 2.0Hz aralıklarla dizilmiş çok sayıda yanbant aktiviteleri gözlemlenmiş ve bu yanbant aktivitelerinin genliği hata miktarıyla benzer biçimde artış sergilediği tespit edilmiştir. 4.05mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin zamana ve frekansa göre değişimleri incelendiğinde (Şekil 6.2) kesme derinliği arttıkça meydana gelen kesme kuvvetinin de artış göstermesinden dolayı genel olarak 4.05mm kesme derinliğinde elde edilen titreşimlerin genlikleri 2.02mm kesme derinliğinde elde edilen

titreşimlerin genliklerine göre artış sergilemiştir. Birinci hata titreşimleri dikkate alındığında, 4.05mm kesme derinliğinde oluşan hatanın belirtilerinin 2.02mm'dekine göre zayıfladığı gözlemlenmiştir. Hatta 5. diş konumunda genlik azalması şeklinde oluşması beklenen hiç hata belirtisi gözlemlenmemiş ve 9. diş konumundaki büyük hatanın belirtisi ise hatasız duruma göre genlik azalması şeklinde kendini gösterdiği tespit edilmiştir. Kesici takıma uygulanan hata miktarları arttıkça, hata belirtileri de kendisini genlik azalması olarak net bir biçimde gösterdiği gözlemlenmiştir. 4.05mm kesme derinliğinde elde edilen hatasız ve hatalı takım titreşimlerinin frekansa göre değişimleri incelendiğinde kesme derinliğinin artmasının titreşim genliklerinin artmasına neden olduğu anlaşılmıştır. Bu artışlar kesme frekansı ve harmoniklerinde oluşan tepe değerlerinin artmasına neden olmaktadır. 2.02mm kesme derinliğine benzer biçimde, hata miktarı arttıkça kesme frekansı ve harmonikleri etrafında gözlenen 2.0Hz aralıklarla dizilmiş olan yanbant aktivitelerinin genliklerinde özellikle düşük frekans bölgelerinde bir artışa neden olduğu görülmüştür. 6.075mm, 8.10mm ve 10.125mm kesme derinliklerinde hatasız ve hatalı durumlar için elde edilen titreşim biçimleri ve spektrumları incelendiğinde hatanın varlığının titreşim biçimleri üzerinde net olarak görülmediği tespit edilmiştir. Frekans spektrumlarından ise kesme derinliği arttıkça kesme frekanslarında oluşan tepe değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bunun aksine kesme derinliği arttıkça meydana gelen yanbant aktivitelerinin genliklerinde fazla artış gözlemlenmemiştir (Şekil 6.3-6.5).

Ortalaması alınan titreşim sinyallerine sürekli dalgacık dönüşümü uygulanmıştır. Sürekli dalgacık dönüşümünün görselleştirilmesi sırasında 1 kesici takım devrini temsil eden 4848 veri kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümü sonuçları 0-250Hz aralığını içerecek şekilde (yaklaşık 10 kesme frekansına kadar) 3 boyutlu olarak gösterilmiştir. 2.02mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri incelendiğinde (Şekil 6.6) kesici takımın 1 devri süresince peş peşe gelen 12 adet lokal değişim olduğu gözlemlenmiştir. Hatasız kesici takım titreşiminin sürekli dalgacık dönüşümüne bakıldığında, kesici dişlerin malzemeyle teması esnasında oluşan lokal değişimlerin kendilerini bu noktalarda frekans eksenini boyunca yayılmış enerji olarak gösterdiği gözlemlenmiştir. Kesici takımın sahip olduğu kompozit hatalardan dolayı frekans eksenini boyunca oluşan her bir enerji yayılımının birbirlerinden farklı genlikte olduğu gözlemlenmiştir. Birinci hata durumunda oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümü incelendiğinde hatanın varlığının 5. ve 9. diş konumlarında enerji azalması olarak kendisini gösterdiği tespit edilmiştir. Meydana gelen enerji azalmasının hata miktarıyla ilişkili olduğu

da görülmüştür. İkinci ve son hata durumlarına ait sürekli dalgacık dönüşümleri incelendiğinde bu durumlarda hata miktarının artmasından dolayı hatalı dış konumlarında hemen hemen hiç enerjinin oluşmadığı net bir şekilde gözlemlenmiştir. 4.05mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri incelendiğinde (Şekil 6.7) kesme derinliği arttıkça kesici dış temasından dolayı oluşan enerji yayılımlarının daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Birinci hata durumunda oluşan sürekli dalgacık dönüşümü dikkate alındığında küçük dış hatasının (5. dış konumu) varlığı enerji azalması olarak yansımamıştır. Buna karşılık 9. dış konumundaki büyük dış hatası enerji azalması şeklinde kendini göstermiştir. İkinci ve son hata durumlarında ise 5. ve 9. dış konumlarındaki hatalar enerji azalması olarak kendini göstermiştir. 6.07mm kesme derinliğinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri incelendiğinde (Şekil 6.8) birinci hata durumunda hata belirtileri net olarak gözlemlenememiştir. Benzer biçimde ikinci hata durumunda 1.5mm dış yüksekliği azalması şeklinde uygulanan hatanın belirtisi de gözlemlenememiştir. Buna karşın 2mm dış yüksekliği azalması olarak uygulanan hatanın belirtisi, 9. dış konumunda tespit edilmiştir. Son hata durumunda (dış yüksekliklerinde 2.5mm ve 3.0mm azalma) ise hata belirtileri enerji azalması şeklinde net olarak gözlemlenmiştir. 8.10mm ve 10.12mm kesme derinliklerinde hatasız ve farklı hata durumlarında oluşan titreşimlerin sürekli dalgacık dönüşümleri incelendiğinde (Şekil 6.9-6.10) hatanın varlığına dair ikna edici net bir belirti gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak kesme derinliğinin, hem titreşimlerin kararlılığı hem de hata tespiti üzerinde etkisinin büyük olduğu anlaşılmıştır. Kesme derinliği arttıkça hata tespitinin güçleştiği gözlemlenmiştir. Zaman dalga biçimi üzerinde hata belirtileri 4.05mm derinliğe kadar gözlemlenebilirken, sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla bu belirtilerin 6.075mm kesme derinliğinde kendini net olarak yansıttığı tespit edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında kesici takımın dış kırılmasından kaynaklı lokal hataların tespit edilmesi amacıyla zaman, frekans ve birleşik zaman frekans bölgesi incelemelerinin yanında sınıflandırma teknikleri de kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sınıflandırma algoritmaları sayesinde hem hata olup olmadığı hem de eğer varsa hatanın derecesi tespit edilmiştir. Sınıflandırma algoritması olarak yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, rastgele orman ve en yakın komşu algoritmaları kullanılmıştır. Sınıflandırma işleminde birincil olarak kullanılan titreşim sinyallerini gürültüden arındırmak amacıyla alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Sonrasında sinyalin bütünü yerine sinyali daha küçük boyutlarda ifade edebilmek için öznelik çıkarma işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada zaman uzayı tabanlı

öznitelik olarak titreşim sinyallerinin ortalama ve ortanca değerleri, frekans uzayı tabanlı öznitelik olarak radyal ivmemetreye ait titreşim sinyalinin Fourier dönüşümü, dalgacık dönüşümü tabanlı öznitelik olarak radyal ivmemetreye ait titreşim sinyalinin ayrık dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. 60000 veri içeren titreşim sinyali, kesici takımın bir devrini kapsayacak şekilde 4848 örnek noktasını içeren 12 adet zaman penceresine bölünmüştür. 0.2mm/s'lik tabla ilerleme hızında kesme işlemi sırasında 10 veri bloğu toplandığından bu titreşim verileri kullanılarak oluşturulan veri setinde 120 örnek bulunmaktadır. Hata tespiti için kullanılan sınıflandırma tekniklerinin tümünde verilerin %50'si eğitim, kalan % 50'si ise test aşamasında kullanılmıştır. Elde edilen sınıflandırıcı sonuçlarının daha güvenilir olması için, sınıflandırma algoritmaları 10 defa çalıştırılmış ve sınıflandırıcıların elde ettiği sonuçların ortalamaları verilmiştir. Kullanılan tüm algoritmalar için ortalama belirleyicilik değerleri hesaplanmıştır. Seçilen sınıflandırıcılara ait kararlılık tabloları ve belirleyicilik değerleri kıyaslanmıştır (Tablo 7.2-7.3). Sınıflandırıcılar içerisinde ilk aşamada hatasız örneğin tespiti gelmektedir. Bu alanda YSA'nın diğer sınıflandırıcılardan daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Birinci hataya sahip örneklerin diğer örneklerden ayrılması anlamında ise, RO ve KNN algoritmaları diğer algoritmalarından daha iyi sonuç elde edilmiştir. İkinci hataya sahip örneklerin diğer örneklerden ayrılması anlamında ise, YSA ve DVM algoritmaları ile diğer algoritmalarından daha iyi sonuç elde edilmiştir. Son hatada ise DVM algoritması ile diğer algoritmalarla kıyasla daha iyi sonuç elde edilmiştir. Genel olarak geliştirilen sınıflandırma algoritmalarının hatalı kesici takımı %100 doğrulukla tespit edebildiği gözlenmiştir. Ayrıca yine geliştirilen sınıflandırıcılar sadece hatalı olup olmadığını değil aynı zamanda hatanın seviyesi de tespit edilmeye çalışılmıştır. Belirleyicilik tablolarından inceleneceği gibi geliştirilen algoritmaların %99 doğrulukla bu örnekleri birbirinden ayırt edebildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde, geliştirilen sınıflandırma algoritmalarının çok başarılı performans gösterdiği söylenebilir. Bu performans sınıflandırıcıların başarılı bir şekilde çalıştığını göstermekle beraber aynı zamanda seçilen özniteliklerin sinyalleri ne kadar başarılı bir şekilde tanımladığını da göstermiştir.

8.3. Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler

- Yapılan çalışmada diş oluşumu modül freze yardımıyla yapılmıştır. Bu yöntem freze tezgahında her türlü dış dişli üretimine, dişlilerin yedeklerinin üretimine imkan vermekle beraber seri üretime uygun değildir. Seri üretimle diş kesimi genellikle azdırma kesici takımı kullanılarak yapılmaktadır. Dolayısıyla sonraki çalışmalar

azdırma takımı kullanılması durumunda oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin modellenmesi ve hesaplanması konularına odaklanmalıdır.

- Yapılan çalışmada kesici takımdaki lokal hatalar kesme sırasında oluşan titreşimlerin incelenmesi esasına dayanmaktadır. Kesici takımdaki lokal hatanın tespiti için kesme kuvveti bileşenlerinin değişimlerinin de incelenmesi önerilmektedir.
- Takım aşınmaları üretim esnasında sıkça karşılaşılan bir problemdir. Takım aşınması erken safhada tespit edilemezse, yüzey kalitesinin kötüleşmesine meydana gelen titreşim, ısı, güç tüketiminin ve gürültü değerlerinin artmasına ve takım ömrünün hızla azalmasına neden olur. Sonraki çalışmalarda kesme esnasında aşınma şartları oluşturulup, takım üzerindeki aşınma belirtilerinin titreşim, gürültü ve kesme kuvveti değerlerinin izlenmesiyle erken tespiti faydalı olacaktır.
- Düz ve helis dişli üretimlerinde kesme parametreleri (kesme derinliği, talaş genişliği, talaş yükü) işlem süresince değişmemektedir. Dolayısıyla kesme işlemi kararlı bir sistem olarak kabul edilebilir. Bunun aksine, konik dişli üretiminde ise kesme işlemi süresince sözü edilen kesme parametreleri değişmektedir. Dolayısıyla meydana gelen titreşimler, gürültü ve kesme kuvveti değerleri de kesme süresince değişim gösterecektir ve hatanın tespit edilebilirliğini zorlaştıracaktır. Sonraki çalışmalarda konik dişli üretimde titreşim esaslı hata tespiti çalışmalarının yapılması faydalı olacaktır.
- Kesici takımdaki lokal hatanın tespiti için birleşik zaman frekans bölgesi analizlerinden doğrusal bir dönüşüm olan sürekli dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Bu yöntemin düşük frekanslarda zaman ve yüksek frekanslarda frekans lokalizasyonu oldukça kötüdür. Sinyal işleme uygulamalarında doğrusal olmayan çok farklı birleşik zaman-frekans bölgesi dönüşümleri (Wigner-Ville, Choi-Williams ve Anlık Güç Spektrumu) kullanılmaktadır. Dişli üretimi esnasındaki lokal hataların tespiti için bu yöntemlerin denenmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Rao, S. S., 2003, “Mechanical Vibrations 4nd Edition”, *Pearson Education*.
- [2] Gradisek J., Kalveram M., Weinert K., 2004, “ Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill ”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44: 401–414.
- [3] Gonzalo O., Beristain J., Jauregi H., Sanz C., 2010, “A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50 : 765–774.
- [4] Matsumuraa T., Aristimuno P., Gandaria E., Arrazola P.,2013, “ Cutting process in glass peripheral milling”, *Journal of Materials Processing Technology*, 213 : 1523– 1531.
- [5] Omara O.E.E.K. , El-Wardany T., Ng E., Elbestawia M.A, 2007, “An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 1263–1275.
- [6] Lamikiz A., Lo’pez de Lacalle L.N, Sa’nchez J.A., Salgado M.A., 2004, “Cutting force estimation in sculptured surface milling” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44: 1511–1526.
- [7] Lai X., Lia H., Lia C., Lina Z., Nib J., 2008, “Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 1–14.
- [8] Afazov S.M., Ratchev S.M., Segal J., 2010, “Modelling and simulation of micro-milling cutting forces “, *Journal of Materials Processing Technology*, 210: 2154–2162.
- [9] Altintas Y., Eynian M., Onozuka H., 2008, “ Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57: 371–374.
- [10] Araujoa A.C., Silveira J.L., Jun M., Kapoor S., DeVor R., 2006, “A model for thread milling cutting forces”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46: 2057–2065.
- [11] Baohai W., Xue Y., Ming L., Ge G., 2013, Cutting force prediction for circular end milling process”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(4): 1057–1063.
- [12] Sonawane H.A., Joshi S.S., 2010, “Analytical modeling of chip geometry and cutting forces in helical ball end milling of superalloy Inconel 718”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3: 204–217.
- [13] Zaman M.T., Kumar A. S., Rahman M., Sreeram S., 2006, “A three-dimensional analytical cutting force model for micro end milling operation”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 353–366.
- [14] Sun Y., Guo O., 2011, “Numerical simulation and prediction of cutting forces in five-axis milling processes with cutter run-out”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51: 806–815.

- [15] Tukora B., Szalay T., 2011, "Real-time determination of cutting force coefficients without cutting geometry restriction", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51: 871–879.
- [16] Tuysuz O., Yusuf Altintas Y., Feng Y., 2013, "Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 66: 66–81.
- [17] Srinivasa Y.V., Shunmugam M.S., 2013, "Mechanistic model for prediction of cutting forces in micro end-milling and experimental comparison", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 67:18–27.
- [18] Lee P., Altıntaş Y., 1996, "Prediction of ball end milling forces from orthogonal cutting data", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(9): 1059-1072.
- [19] Wojciechowski S., 2015, "The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 89: 110–123.
- [20] Zhu K., Zhang Y., 2017, "Modeling of the instantaneous milling force per tooth with tool run-out effect in high speed ball-end milling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 118–119: 37–48.
- [21] Rodríguez P., Labarga J.E., 2013, "A new model for the prediction of cutting forces in micro-end-milling operations", *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 261–268.
- [22] Wang S., Chen D., Jang M., Tsooj S., 2012, "Development of micro milling force model and cutting parameter optimization", *Transactions of nonferrous metal society of china*, 22: 851–858.
- [23] Dimitriou V., Antoniadis A., 2009, "CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears", *Int J Adv Manuf Technol*, 41:347–357.
- [24] Wan M. · Zhang W.H., 2006, "Calculations of chip thickness and cutting forces in flexible end milling", *Int J Adv Manuf Technol* 29: 637–647.
- [25] Ahearne E, Baron S., 2017, "Fundamental mechanisms in orthogonal cutting of medical grade cobalt chromium alloy (ASTM F75)", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 17: 1755-1758 .
- [26] Khoshdarregi M.Z., Altintas Y., 2015 "Generalized Modeling of chip geometry and cutting Forces in multi-point thread turning" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.08.005>.
- [27] Erkorkmaz K., Katz A., Hosseinkhani Y. Plakhotnik D., Stautner M., Fathy I., 2016, "Chip geometry and cutting forces in gear shaping" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65: 133–136.
- [28] Yoon M.C., Kim Y.G., 2004, "Cutting dynamic force modelling of end milling operation", *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156: 1383–1389.

- [29] Yesilyurt I., 2006, “End mill breakage detection using mean frequency analysis of scalogram”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3): 450-458.
- [30] Madhusudana C. K., Kumar H., Narendranath S., 2018, “Fault Diagnosis of Face Milling Tool using Decision Tree and Sound Signal”, *Materials Today Proceedings* 5: 12035–12044.
- [31] Boutros T., Liang M., 2011, “Detection and diagnosis of bearing and cutting tool faults using hidden Markov models”, *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 : 2102–2124.
- [32] Lamraoui M. , Thomas M., El Badaoui M., 2014, “Cyclostationarity approach for monitoring chatter and tool wear in high speed milling”, *Mechanical Systems and Signal Processing* 44: 177–198.
- [33] Liu C., Zhu L., Ni C., 2018, “Chatter detection in milling process based on VMD and energy entropy”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 105 :169–182.
- [34] Bassiunya A.M., Li X., 2007, “Flute breakage detection during end milling using Hilbert–Huang transform and smoothed nonlinear energy operator”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 1011–1020.
- [35] Cao H., Chena X., Zia Y. , Dinga F. , Chena H. , Tan J. , Hea Z., 2008, “End milling tool breakage detection using lifting scheme and Mahalanobis distance”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 141–151.
- [36] Madhusudana C.K., Kumar H., Narendranath S., 2016, “Condition monitoring of face milling tool using K-star algorithm and histogram features of vibration signal”, *International Journal Engineering Science and Technology*, 19: 1543–1551.
- [37] Ghosha N., Ravib Y.B., Patrac A., Mukhopadhyay S., Pauld S., Mohantyd A.R., Chattopadhyayd A.B. 2007, “Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21:466–479.
- [38] Hsueh Y., Yang C., 2008, “Prediction of tool breakage in face milling using support vector machine”, *Int J Adv Manuf Technol*, 37:872–880.
- [39] Kuljanic E., Sortino M., 2005, “ TWEM, a method based on cutting forces—monitoring tool wear in face milling”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 29–34.
- [40] Painuli S., Elangovan M., Sugumaran V., 2014, “Tool condition monitoring using K-star algorithm” *Expert Systems with Applications*, 41: 2638–2643.
- [41] Kumar H., Narendranath S., Sugumaran V., 2014, “Fault Diagnosis of Single Point Cutting Tool through Vibration Signal Using Decision Tree Algorithm” *Procedia Materials Science*, 5:1434 – 1441.
- [42] Bermingham M.J., Palanisamy S., Dargusch M., 2012, “Understanding the tool wear mechanism during thermally assisted machining Ti-6Al-4V”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 62:76–87.

- [43] Lee H., Cho H., Kwon J., 2010, "Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill", *Powder Technology*, 198: 364–372.
- [44] Akkurt M., 2012, "Talaş Kaldırma Bilimi ve Teknolojisi CNC Takım Tezgahları ve Üretim Otomasyonu", *Birsen yayınevi*, 120-140.
- [45] Aydın M., 2014, "Parmak freze takımı ile talas kaldırmada kesme kuvvetleri ve boyut hatalarının kesme kuvveti dağılımı metodu ile analizi", *Kocaeli Üni Fen Bilimleri Enstitüsü*, 50-52.
- [46] Altıntaş Y., 2012, "Manufacturing Automation", *Cambridge University Press*.
- [47] Yesilyurt İ., 1997, "Gearbox fault detection and severity assessment using vibration analysis", *University of Manchester*.
- [48] Zan H., 2018, "Normal ve patolojik kalp ses kayıtlarının zaman-frekans tabanlı otomatik sınıflandırılması", *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- [49] Ozturk H., 2006, "Gearbox health monitoring and fault detection using vibration analysis" *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- [50] Arı N., Özen S., Çolak Ö.H., 2008, "Dalgacık Teorisi", *Palme Yayıncılık*.
- [51] Mertins, A., 1999, "Signal analysis wavelets, filter banks, time-frequency transform and applications". *John Wiley & Sons*.
- [52] Chui, C.K., 1992, "An introduction to wavelets: wavelet analysis and its applications, vol. I.", *Boston: Academic Press*.
- [53] Heneghan C., Khanna, S.M., & Flock, A. 1994, " Investigation the nonlinear dynamics of cellular motion in the inner ear using the short-time Fourier and continuous wavelet transform", *IEEE Trans Signal Process*, 42(12), 3335–3351.
- [54] Ionescu, A.P., Jutten, C., Aminian, K., Najafi, B., & Robert, Ph., 2002, " Wavelet denoising for highly noisy source separation", *Circuit and System, ISCAS IEEE International Symposium*, (1): 201-214.
- [55] Meyer, Y., 1993, "Wavelets: algorithms and applications", *Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- [56] Roy, N. & Ganguli, R., 2005, "Helicopter rotor blade frequency evolution with damage growth and signal processing", *Journal of Sound and Vibration*, 283, 821–851
- [57] Warren M., Walter H. P., 1943, " A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(1), 115-133.
- [58] Hao Z., Huaicheng Y., Congzhi H., Mengling W., "Guaranteed Cost Filtering for Discrete-time Multi-layer Neural Networks with Time-varying Delays and Unideal Measurements", *Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation*, Ningbo, Çin, 12-15 Ağustos 2016.

- [59] Corinna C., Vladimir V., 1995, "Support-Vector Networks", *Journal of Machine Learning*, 20(1), 273-297.
- [60] Kuhn H. W., Tucker A. W., "Nonlinear programming", *Proceedings of 2nd Berkeley Symposium*, Berkeley, California, ABD, 31 Temmuz-12 Ağustos 1950.
- [61] Karush W., 1939, "Minima of Functions of Several Variables with Inequalities as Side Constraint"s, Chicago Üniversitesi, Matematik Bölümü, Chicago, Illinois.
- [62] Steve G., 1998, "Support Vector Machines for Classification and Regression", *University of Southampton*, (1606): 1-52,
- [63] James N. M., John A. S., 1963, "Problems in the Analysis of Survey Data and a Proposal", *Journal of the American Statistical Association*, **58**(302), 415-434.
- [64] Han, J. and Kamber, M., 2006, "Data mining: concepts and techniques", *Morgan Kaufmann Publishers*, Burlington.
- [65] Kresse, W., Danko, D.M., 2012, "Handbook of Geographic Information", *Springer-Verlag, Berlin*.
- [66] Turgut Y., Korkut İ., 2009, "Talaşlı İmalatta Kesme Kuvveti Ölçme Sistemleri", 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye
- [67] Coleman, W., 1968, "Bevel and Hypoid Gear Surface Durability: Pitting and Scuffing", *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, 182(3): 191-204.
- [68] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F., 2008, "Zerspantechnik", Berlin, Germany: Vieweg+Teubner Verlag.
- [69] Grote, K.H.; Antonsson, E.K., 2009, "Handbook of Mechanical Engineering", Springer Heidelberg, Germany.
- [70] Kannan R. M., Ramesh N. N., Sai M. P., Mithun M., 2012, "Gest-BOT – A highly convenient locomotivesolution for the elderly and physically challenged", *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*, Seattle, USA, 21-24 Ekim 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı: GÜRSOY DEMİR, Habibe
Uyruğu: T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri: 30.05.1986, Uşak
Medeni Hali: Evli
Telefon: 0 (507) 708 80 47
E-posta: habibe.gursoydemir@iste.edu.tr

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet Tarihi

Doktora	Uşak Üni. / Makina Müh. Böl. ABD	2019
Yüksek Lisans	Uşak Üni. / Makina Müh. Böl. ABD	2011
Lisans	Kocaeli Üni. / Mekatronik Müh. Böl.	2009
Lise	Uşak Fen Lisesi	2004

İş Deneyimi

Uşak Üniversitesi	Araştırma Görevlisi	10.2009-04.2018
İskenderun Teknik Üniversitesi	Öğretim Görevlisi	04.2018-

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca