KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SENSÖR VE KARAR ENTEGRASYONU İLE FREZELEME İŞLEMLERİ İÇİN ÇEVRİMİÇİ BİR TAKIM DURUM GÖZLEM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Bülent KAYA

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Cüneyt OYSU

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SENSÖR VE KARAR ENTEGRASYONU İLE, FREZELEME İŞLEMLERİ İÇİN ÇEVRİMİÇİ BİR TAKIM DURUM GÖZLEM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Bülent KAYA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 29 Haziran 2009

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cüneyt OYSU
(.....)

Üye
Prof. Dr. İbrahim UZMAN
(.....)

Üye
Doç. Dr. Fehmi Erzincanlı
(.....)

Üye
Doç. Dr. Hüseyin M. Ertunç
(.....)

Üye
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali Arslan
(.....)

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ

Günümüz modern imalat endüstrisi, sert rekabet koşullar nedeniyle, insansız imalat sistemlerinin gelişimini talep etmektedir. Talaşlı imalat endüstrisinde, insansız bir imalat sistemi için en önemli adım, Takım Durum Gözlem (TDG) sistemlerinin geliştirilmesidir. Bu tez çalışması, talaşlı imalat endüstrisinde vazgeçilmez bir yere sahip olan frezeleme işlemi için güvenilir bir TDG sistemin geliştirilmesinde etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Sunulan yaklaşımla, çeşitli sensörler ve karar algoritmaları belli bir hiyerarşik yapı altında birleştirilerek, güvenilir çevrim-içi bir TDG sistemin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

Çalışma sürecinde ihtiyaç duyduğum, imkân, cesaret, fikir alışverişi gibi birçok konuda destekleyen -başta danışmanım Doç. Dr. Cüneyt Oysu olmak üzere- tüm hocalarıma;

Doç. Dr. Hüseyin M. Ertunç, Prof. İbrahim Uzman, Doç. Dr. Fehmi Erzincanlı, Yrd. Doç. Dr. İlyas Kandemir, Yrd. Doç. Dr. M. Ali Aslan, Prof. Dr. E. Murat Esin, Uzman Araştırman Dr. Serdar Sevik' e…

ve arkadaşlarıma;

Mehmet Ermurat, Alaattin M. Kaya, Selahattin Uysal, Dr. Cenk Çelik, Dr. A. Necati Özsezen, Ali Çavdar, Ahmet Berkay, Hasan Öktem, Özgür Karacasu' ya…

ayrıca eşim Şule, anne ve babama…

sonsuz teşekkürler…

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER LİSTESİ iv
TABLOLAR LİSTESİ vii
SEMBOLLER viii
ÖZET x
İNGİLİZCE ÖZET xi
1. GİRİŞ 1
2. TAKIM DURUMU GÖZLEM SİSTEMLERİ 4
2.1. Doğrudan Takım Aşınma Ölçümü 5
2.1.1. Makina görme sistemleri 5
2.1.2. Radyoaktif emisyon ölçümü 6
2.1.3. İş parçası ölçülerinin kontrolü 6
2.1.4. Elektrik direncinin ölçümü 7
2.1.5. Takım geometrisinin temas ile kontrolü 7
2.2. Dolaylı Takım Aşınma Ölçümü 7
2.2.1. Kesme kuvvetlerinin ölçümü 8
2.2.2. Akustik emisyon (AE) ölçümü 9
2.2.3. Motor yükünün ölçümü 10
2.2.4. Sıcaklık ölçümü 11
2.2.5. Titreşim ölçümü 12
2.3. Literatürde Frezeleme İşlemi İçin Geliştirilen TDG Sistemleri 13
3. FREZELEME İŞLEMİ, KESİCİ TAKIM VE AŞINMASI 18
3.1. Kesici Takım Geometrisi 20
3.1.1. Giriş açısı 21
3.1.2. Eksenel talaş açısı 22
3.1.3. Radyal talaş açısı 24
3.1.4. Boşluk açıları 25
3.2. Kesici Takım Aşınma Mekanizmaları 27
3.3. Kesici Takımda Aşınma Biçimleri 28
3.3.1. Serbest yüzey aşınması 28
3.3.2. Krater aşınması 30
3.3.3. Çentik aşınması 30
3.3.4. Talaş yığılması 31
3.4. Takım Ömrü Kriterleri 32
4. ÇEVRİMİÇİ TAKIM DURUMU GÖZLEM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN MALZEME VE YÖNTEMLER 34
4.1. Çevrimiçi TDG Sistemi İçin Planlama ve Uygulama 34
4.1.1. Taguchi tabanlı deneysel tasarım 34
4.1.2. İş parçası ve kesici takım 35
4.1.3. Frezeleme deneyleri ve ölçüm enstrümanları 37

4.2. Çevrimiçi TDG Sistemi İçin Veri Toplama ve Analizi 40
4.2.1. Veri toplama 40
4.2.2. Öznitelik çıkarma 45
4.3. Çevrimiçi TDG Sisteminde Kullanılan Karar Verme Algoritmaları 46
4.3.1. Saklı Markov model 47
4.3.2. Destek vektör makinası 54
4.3.2.1. Doğrusal destek vektör makinaları 54
4.3.2.2. Doğrusal olmayan destek vektör makinaları 61
4.3.2.3. Çoklu sınıflandırmalı destek vektör makinaları 63
4.3.3. Yapay sinir ağı 64
5. ÇEVRİMİÇİ TDG SİSTEMİNDE BULGULAR VE ANALİZLER 68
5.1. Takım Aşınmasında Kesme Koşullarının Etkisi 68
5.2. Aşınma ile sensör sinyallerinin ilişkisi 73
5.2.1. Aşınma ile kesme kuvvetleri ve tork ilişkisi 74
5.2.2. Aşınma ile titreşim ve akustik emisyon sinyalleri arasındaki ilişki 82
5.3. Saklı Markov Model ile geliştirilen TDG Sistemi ve Performansı 92
5.4. DVM model ile geliştirilen TDG sistemi ve performansı 98
5.5. YSA ile geliştirilen Çevrimiçi TDG Sistemi ve Performansı 103
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 109
KAYNAKLAR 115
EKLER 124
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 132
ÖZGEÇMİŞ 133

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: Dört komponentli dinamometre (Kistler 9123C1111)..... 9
Şekil 2.2: Kayma modlu akselerometre (PCB) [50] 13
Şekil 3.1: Yukarı yönlü frezeleme (a) , Aşağı Yönlü frezeleme (b) 19
Şekil 3.2: Giriş açısı 21
Şekil 3.3: Pozitif talaş açısı 23
Şekil 3.4: Negatif talaş açısı..... 23
Şekil 3.5: Radyal talaş açısı a pozitif, b negatif radyal talaş açısı 25
Şekil 3.6: Birincil ve ikincil boşluk açılar..... 26
Şekil 3.7: Serbest yüzey aşınma süreci. 29
Şekil 3.8: Çalışmada Inconel 718 frezelenmesinde gözlenen talaş yığılması..... 31
Şekil 3.9: Yanal ve krater aşınma tipleri [75] 32
Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan takım gövdesi ve özellikleri [85] 36
Şekil 4.2: Çalışmada kullanılan uç ve özellikleri [85] 37
Şekil 4.3: Deneysel kurulum ve kullanılan CNC tezgah 38
Şekil 4.4: X yönündeki sürücü için yerleştirilen akım yük ölçeri..... 39
Şekil 4.5: Maksimum serbest yüzey aşınmasına örnek (Vc=100m/min, a_e =0.3mm, Sz=0.06mm)..... 40
Şekil 4.6: Örnek dinamometre sinyalleri, (Fx, Fy, Fz, Mz),..... 42
Şekil 4.7: Örnek akselerometre sinyalleri, (Vx, Vy, Vz),..... 42
Şekil 4.8: Örnek akustik emisyon sinyalleri, (AE, AErms),..... 42
Şekil 4.9: Deney kurulumu, dinamometre sayaç çentiği..... 43
Şekil 4.10: Dinamometre sayaç ve eşzamanlı tork (Mz) sinyali..... 44
Şekil 4.11: Orijinal tork (Mz) sinyali (a), idealleştirilen tork (Mz) sinyali (b)..... 45
Şekil 4.12: Üç durumlu bir Markov zincirine örnek..... 47
Şekil 4.13: Ayırma düzlemleri, (b) geniş marj, tercih edilen sınıflandırma [95]..... 55
Şekil 4.14: Optimum ayırıcı hiperdüzlem ve destek vektörleri 56
Şekil 4.15: Doğrusal DVM için verinin doğrusal olarak ayrılamama durumu..... 59
Şekil 4.16: Verinin doğrusal olarak ayrılabildiği bir uzaya taşınması [97] 62
Şekil 4.17: Basit bir YSA mimarisi (McCulloch-Pits nöronu) 65
Şekil 5.1: Deney 1 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 69
Şekil 5.2: Deney 2 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 69
Şekil 5.3: Deney 3 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 69
Şekil 5.4: Deney 4 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 70
Şekil 5.5: Deney 5 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 70
Şekil 5.6: Deney 6 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 70
Şekil 5.7: Deney 7 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 71
Şekil 5.8: Deney 8 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 71
Şekil 5.9: Deney 9 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği..... 71
Şekil 5.10: Takım aşınmasına ait SG oranı..... 72
Şekil 5.11: Deney 1 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 74
Şekil 5.12: Deney 1 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 74

Şekil 5.13: Deney 2 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 75
Şekil 5.14: Deney 2 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 75
Şekil 5.15: Deney 3 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 75
Şekil 5.16: Deney 3 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 76
Şekil 5.17: Deney 4 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 76
Şekil 5.18: Deney 4 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 76
Şekil 5.19: Deney 5 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 77
Şekil 5.20: Deney 5 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 77
Şekil 5.21: Deney 6 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 77
Şekil 5.22: Deney 6 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 78
Şekil 5.23: Deney 7 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 78
Şekil 5.24: Deney 7 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 78
Şekil 5.25: Deney 8 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 79
Şekil 5.26: Deney 8 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 79
Şekil 5.27: Deney 9 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği 79
Şekil 5.28: Deney 9 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği..... 80
Şekil 5.29: Deney 1 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi 82
Şekil 5.30: Deney 1 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi..... 82
Şekil 5.31: Deney 2 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi 83
Şekil 5.32: Deney 2 koşulları için (AE) ve aşınma (VB) değişimi..... 83
Şekil 5.33: Deney 3 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi 83
Şekil 5.34: Deney 3 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi..... 84
Şekil 5.35: Deney 4 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi 84
Şekil 5.36: Deney 4 koşulları için AE aşınma (VB) değişimi grafiği..... 84
Şekil 5.37: Deney 5 koşulları için Vx, Vy, Vz aşınma (VB) değişimi grafiği..... 85
Şekil 5.38: Deney 5 koşulları için AE aşınma (VB) değişimi grafiği..... 85
Şekil 5.39: Deney 6 koşulları için Vx, Vy, Vz aşınma (VB) değişimi grafiği..... 85
Şekil 5.40 : Deney 6 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi..... 86
Şekil 5.41: Deney 7 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi 86
Şekil 5.42: Deney 7 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi..... 86
Şekil 5.43: Deney 8 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi 87
Şekil 5.44: Deney 8 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi..... 87
Şekil 5.45: Deney 9 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi 87
Şekil 5.46: Deney 9 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi..... 88
Şekil 5.47: Vx sinyali FFT analizi (Keskin ve Aşınmış Durum)..... 89
Şekil 5.48: Seçilen lokal frekans aralığındaki maksimum güç genliği 89
Şekil 5.49: VB=51 µm ~ VB=543 µm aralığında, 1359 Hz üzerindeki değişim..... 90
Şekil 5.50: Deney 1 koşulları için Vx sinyalinde, 1359 Hz üzerinde aşınma-güç değişimi 91
Şekil 5.51: Deney 9 koşulları için, Vx sinyalinde 249 Hz üzerinde aşınma-güç değişimi 91
Şekil 5.52: Deney 1 koşulları için, AE sinyalinde 99 Hz üzerinde aşınma-güç değişimi 92
Şekil 5.53: SMM kurulumunda uygulanan prosedür..... 93
Şekil 5.54: Deney 1 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri..... 94
Şekil 5.55: Deney 2 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri..... 94
Şekil 5.56: Deney 3 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri..... 95
Şekil 5.57: Deney 4 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri..... 95
Şekil 5.58: Deney 5 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri..... 95

Şekil 5.59: Deney 6 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri 96
Şekil 5.60**:** Deney 7 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri..... 96
Şekil 5.61: Deney 8 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri 96
Şekil 5.62: Deney 9 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri 97
Şekil 5.63: Deneylerde aşınmaya karşılık gelen olasılık değerleri 97
Şekil 5.64: DVM modelin kurulmasında kullanılan keşifsel arama algoritması 100
Şekil 5.65: Doğrusal DVM model için, başarı oranları (1<C<100 ve iterasyon=5) 101
Şekil 5.66: DVM modelin test performansı 102
Şekil 5.67: DVM hata oranının sınıflandırılması 102
Şekil 5.68: TDG sistemi için kullanılan YSA model mimarisi..... 104
Şekil 5.69: Gerçek aşınma değeri (VB) ile tahmini değer (VB_{pr}) karşılaştırması ... 107
Şekil 5.70: YSA performansının değerlendirilmesi 108
Şekil 6.1: Hiyerarşik global karar modeli mimarisi 113

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4.1: Taguchi deney tasarımı, faktörler ve seviyeler 35
Tablo 4.2: Inconel 718 kimyasal ve fiziksel özellikleri 36
Tablo 5.1: Deneyde kullanılan 9 ayrı kesme koşulu 68
Tablo 5.2: Takım ömrü için varyans analizi 73
Tablo 5.3: Aşınma (VB) çoklu regresyon modelleri ve parametrelerin etkisi. 81
Tablo 5.4: DVM sınıflandırılması için aşınma seviye kodları ve anlamları 98
Tablo 5.5: Test aşamasında kullanılan veriler ve aşınma tahmini 106
Tablo 5.6: Çalışmada en yüksek performansı veren YSA mimarisi ve özellikleri .. 107

SEMBOLLER

Vc	: kesme hızı (m/dak)
t_l	: takım ömrü (dak)
C	: Taylor takım aşınma sabiti
VB	: Serbest yüzey aşınması,
R_a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Sz	: Diş başına ilerleme (mm/diş)
a_r	: Radyal kesme derinliği (mm)
a_e	: Eksenel kesme derinliği (mm)
HRC	: Rockwell C Sertlik Ölçeği
F(x,y,z)	: 3 ana eksendeki kesme kuvvetleri (N)
Mz	: Tork (Nm)
V(x,y,z)	: 3 ana eksendeki titreşim
AE_{rms}	: Efektif (ortalama) akustik emisyonu
N	: Markov modelde durum sayısı
S	: Durumlar kümesi
M	: Gözlem sembolleri
Q	: Olası durum kümesi
V	: Olası gözlem kümesi
A	: Durum geçiş olasılık dağılımı
B	: Markov gözlem geçiş olasılık dağılımı
π	: Başlangıç durum olasılık vektörü
λ	: Saklı Markov model
w	: Yüzey normali
y_i	: Sınıf etiketleri
x_i	: Girdi verileri
$H_{(1,2)}$	: Alt düzlem(ler)
L_P	: İlkel Lagrange ifadesi
L_D	: Dual Lagrange ifadesi
C	: DVM kapasite katsayısı
ξ	: esneklik değişkeni;
μ_i	: Lagrange parametresi
α_i	: Lagrange çarpanı
$K(.)$	: Çekirdek Fonksiyonu
γ	: Radyal çekirdek fonksiyon parametresi
b	: Yapay sinir ağı eşik katsayısı
w	: Yapay sinir ağı ağırlık katsayı vektörü
$f(n)$	: aktivasyon fonksiyonu

Kısaltmalar

TDG	: Takım Durumu Gözlem
CNC	: Bilgisayar kontrollü nümerik
TSE	: Türk Standartlar Enstitüsü
ISO	: International Organization for Standardization
AE	: Akustik Emisyon
CBN	: Kübik Boron Nitrit
NI	: National Instruments
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
AR	: Otoregresif Modeli (Auto Regression)
ARMA	: Otoregresif Hareketli Ortalamalar Modeli (Auto Regression Moving Average)
LPC	: Lineer Öngörücülü Kodlama (Linear Predictive Coding)
SM	: Saklı Markov
SMM	: Saklı Markov Model
DV	: Destek Vektör
DVM	: Destek Vektör Makinası
RBF	: Radyal Bazlı Çekirdek Fonksiyon
KKT	: Karush-Kuhn-Tucker
YS	: Yapay Sinir
YSA	: Yapay Sinir Ağı
RMS	: Root Mean Square
LIBSVM	: A Library for Support Vector Machines
CAM	: Computer Aided Manufacturing
CLDATA	: Cutter Location Data
MRE	: Ortalama Bağıl Hata (Mean relative error)
R^2	: Mutlak değişim yüzdesi (Absolute fraction of variance)

SENSÖR VE KARAR ENTEGRASYONU İLE FREZELEME İŞLEMLERİ İÇİN ÇEVRİMİÇİ BİR TAKIM DURUM GÖZLEM SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Bülent KAYA

Anahtar Kelimeler: Takım Aşıması, Frezeleme, Çevrimiçi Takım Durumu Gözlem, Yapay Sinir Ağı, Destek Vektör Makinası, Saklı Markov Model

Özet: Modern imalat sistemlerinde, yüksek kalitede üretim ve kesici aşınması nedeniyle takım tezgâhlarını arızalardan korumak için Takım Durum Gözlem (TDG) sisteminin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle hassas imalat süreçlerinde işlenen yüzeyin kalitesi takımın durumu ile ilişkilidir. Bu nedenle günümüzde çevrimiçi Takım Durumu Gözlem (TDG) sistemlerine artan oranda endüstriyel bir talep vardır. Çevrimiçi TDG sistemleri, bir dizi sensör, sinyal işleme ara yüzü ve karar verici modelden oluşan bütünleşik bir sistemdir.

Bu çalışmada verimli ve etkili bir strateji sunularak, frezeleme işlemi için çevrimiçi bir TDG sistemi geliştirilmiştir. Çevrimiçi TDG sisteminin geliştirilmesi sürecinde, kesme kuvvetleri, tork, üç eksende titreşim ve akustik emisyon sinyallerinin analizi yapılmış ve kullanılmıştır. TDG sisteminin karar verme safhasında ise üç farklı karar verme modeli; Yapay Sinir Ağı (YSA), Destek Vektör Makinası (DVM) ve Saklı Markov Model (SMM) kullanılmıştır. Ayrıca bunların tahmin performansları sunulmuştur. Tahmin performanslarına göre sunulan modeller, güvenilir çevrimiçi bir TDG sistemi için, hiyerarşik global bir karar modeli altında birleştirilmiştir. Önerilen global hiyerarşik karar modeli güvenilir ve düşük maliyetiyle yönlendirmeli makine öğrenme algoritmalarına uyarlanabilir.

AN ONLINE TOOL CONDITION MONITORING SYSTEM DEVELOPMENT FOR MILLING PROCESSES USING SENSOR AND DECISION INTEGRATION

Bülent KAYA

Keywords: Tool Wear, Milling, Online Tool Condition Monitoring, Artificial Neural Network, Support Vector Machine, Hidden Markov Model

Abstract: In a modern machining system, a tool condition monitoring system is necessary to obtain higher quality production and to prevent the downtime of machine tools due to catastrophic tool failures. Especially in precision machining processes surface quality of the manufactured part can be related to the conditions of the cutting tools. This increases industrial interest for online Tool Condition Monitoring (TCM) systems. Online Tool Condition Monitoring (TCM) systems are integrated systems composed of sensors, signal processing interface and intelligent decision making models.

In this study, an effective and efficient strategy was presented for developing an online TCM system for milling processes. At the development stage of online TCM system, cutting forces, torque, vibrations at 3 principal axis and acoustic emission signals were analyzed and used. At decision making stage, 3 different decision models namely; Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machines (SVM) and Hidden Markov Model (HMM) were employed. Their estimating performances are also presented. According to estimating performances, presented decision making models fused under a hierarchical global decision model (HGDM) for a reliable online TCM system. Presented HGDM strategy offers a reliable and low cost solution to be adapted on supervised machine learning algorithms.

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok endüstriyel uygulamada geleneksel takım tezgâhları yerlerini bilgisayar kontrollü (CNC) tezgâhlara bırakmıştır. Endüstri için CNC tezgâh kullanımı, daha az eleman ile daha verimli ve kaliteli üretim anlamına gelmektedir. Çeşitli avantajları nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılan bu tür tezgâhların, yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu ve rekabetçi piyasa koşulları nedeniyle bir an bile boşta kalması düşünülemez. Dolayısıyla günümüz modern imalat endüstrisi bir adım daha ilerisinde "insansız" imalat sistemini beklemektedir. Talaşlı imalat endüstrisinde insanız bir imalat sistemi geliştirmek için en önemli adım ise, güvenilir bir Takım Durumu Gözlem (TDG) sisteminin geliştirilmesidir.

Herhangi bir anda gerçekleşen şu üç durum için kesici takım fonksiyonelliğinin gözlenmesi ve uygun bir eylemin belirlenmesi gerekir [1];

- Kesici takımdaki kırılma, şekil bozukluğu veya belirlenen kritik bir limiti aşacak boyuttaki fiziksel bir bozulma olduğunda kesici takım hemen bir yenisi ile değiştirilmelidir.
- Ürünün ölçüsel açıdan belirlenen toleranslar dışına takım aşınması nedeniyle çıkması. Ölçüsel doğruluğun bozulduğu bu durumlarda kesici takım boyu tekrar ayarlanmalıdır.
- Ürünün yüzey kalitesinin belirlenen toleransların dışına çıkarak kabul edilmeyecek bir sınıra ulaşması. Yine bu durumda da takımın bir yenisi ile değiştirilmesi gerekmektedir.

Dolayısıyla bir TDG sistemi geliştirilme safhası, yukarıda bahsi geçen her bir durum için ayrı bir yaklaşım içermektedir. Yukarıda bahsi geçen eylemlere göre bir TDG sistemin geliştirilmesi safhasında iki farklı yaklaşım sunulmaktadır;

- Takımın keskin ve aşınmış (kırılmış) iki durumu temel alınarak yapılan ve tezgâh veya iş parçasına gelebilecek herhangi bir zararı önceden görerek tespit eden TDG sistemleri,
- Takımın herhangi bir zaman ve herhangi bir koşul için aşınma değerini anlık takip ederek, yüzey kalitesini ve ölçüsel doğruluğu belirlenen toleranslar içinde tutmaya çalışan TDG sistemleri.

Kesici takımın herhangi bir anda fonksiyonelliğini kaybetmeye başlamış olması, öncelikle üretilen parçanın yüzey ve ölçü kalitesinin bozulması olarak karşımıza çıkacaktır. Metal kesme işlemi esasen kesilen malzeme yüzeyinden talaşın koparılarak uzaklaştırılması işlemidir. Dolayısıyla işlenen parçanın kalitesi, bu koparma nedeniyle oluşan yüzey deformasyonunun az veya çok olmasına bağlı olarak değişecektir. Takım aşınmasına bağlı olarak artan, büyük kesme kuvvetleri aynı zamanda kötü bir yüzey kalitesinin de göstergesidir [2]. Kötü bir yüzey kalitesi ise işlenen parçanın, kayma, yağlama, korozyon direnci, yorulma, kırılma gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden takım aşınmasının tahmini sadece makina ve iş parçasının korunması için değil, üretilen parçalarda ölçüsel bütünlük ve daha iyi bir performans ile bakım ömrünün uzaması için gereklidir.

Maalesef henüz endüstride uygulanan güvenilir bir takım durumu gözlemleme (TDG) sistemi geliştirilememiştir. Endüstride CNC tezgâh operatörleri, takım aşınmasına dolaylı olarak, tecrübeleri doğrultusunda metal kesme işlemi esnasında çıkan sese bakarak ve doğrudan kesici takımı görsel olarak denetleyerek karar vermektedir. Bu yüzden günümüz insansız imalat sistemleri güvenilir çevrimiçi TDG sistemlerini talep etmektedir. Çevrimiçi TDG sistemleri, takım aşınmasını veya kırılmasını kesme işlemi sürerken tespit eden sistemlerdir.

Çevrimiçi bir TDG sistemi oluşturmak için, CNC tezgâh ile bütünleştirilmiş çeşitli yüksek hassasiyette sensör ve etkin bir matematik model gereklidir. Literatürde çevrimiçi TDG sistemlerinin geliştirilmesinde, dinamometre, akselerometre, akustik emisyon, optik ve akım yükü ölçeri gibi çeşitli sensörlerin kullanıldığı göze çarpmaktadır. Literatürde bu sensörleri içeren çoğu çevrimiçi TDG sistem çalışmalarının, torna [3-19] veya delik delme [20-25] gibi sürekli kesme işlemleri

üzerinde uygulandığı görülmektedir. Ancak, frezeleme işleminde, kesici üzerindeki birden fazla kesici ağızın fasılalı bir şekilde ardı ardına malzemeye girip çıkması nedeniyle takım aşınma gidişatı farklıdır. Frezeleme işlemi için bir diğer önemli problem ise kullanılan sensörlerin konumunun tespitidir. Kesici ve iş parçasının birbirlerine göre bağıl hareketleri, iş parçası ile kesici arasına sensörlerin yerleştirilmesini engellemektedir [26]. Bahsi geçen bu problemlerden dolayı, literatürde torna üzerinde geliştirilen TDG sistemlerinin frezeleme gibi yarı fasılalı veya taşlama gibi tam fasılalı talaş kaldırma işlemleri için tatmin edici bir şekilde işleyeceğinin garanti edilemeyeceği [27] ile ifade edilmiştir.

Dolayısıyla bu çalışma, çevrimiçi TDG sistemi geliştirilmesinde çeşitli zorlukların gözlendiği frezeleme prosesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çevrimiçi bir TDG sistemi geliştirilmesi için, rotasyonel tip dinamometre ile üç eksende kuvvet ve tork, akselerometre ile üç eksende titreşim ve ayrıca akustik emisyon sensörü vasıtasıyla kesme işlemi esnasında akustik emisyon sinyalleri eşzamanlı olarak toplanmıştır. Geliştirilen TDG sistemi, aşınma mekanizmasının karmaşık bir şekilde işlediği, özel kullanım alanlarına sahip bir malzeme olan Inconel 718 üzerinde uygulanmıştır. Gerek zaman ve gerekse frekans alanında incelenen sinyallerden uygun istatistiksel öznitelikler çıkarılmıştır. Elde edilen veriler, veri ve sensör füzyonu uygulanarak, Yapay Sinir Ağı (YSA), Destek Vektör Makinası (DVM) ve Saklı Markov Model (SMM) olmak üzere üç farklı karar modeli ile çevrimiçi bir TDG sistemin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Bu modellerin performanslarının değerlendirilmesi ile, sonuçta tüm karar modellerinin avantajlarını belirli bir hiyerarşik yapı altında toplayan global karar modeli oluşturularak, frezeleme işlemi için güvenilir çevrimiçi TDG sistemi yaklaşımı sunulmuştur.

2. TAKIM DURUMU GÖZLEM SİSTEMLERİ

Talaşlı imalat sektörünün geleneksel manüel kontrollü tezgâh kullanımından bilgisayar nümerik kontrollü (CNC) tezgâh kullanımına kayması ile Takım Durumu Gözlem (TDG) sistemlerine olan ilgi, önemli miktarda artmıştır. Güvenilir çevrimiçi bir TDG sistemi ile takım aşınmasından kaynaklanan imalat aksaklıkları önlenebilir. Böylece düşen verim ve ekonomik kayıplar engellenerek, takım ömrünün olabildiğince optimum kullanımı sağlanır.

Takım aşınması yavaş yavaş gelişerek takımın ömrünü tayin edebileceği gibi beklenmeyen bir zamanda oluşarak aniden takımın ömrünü tamamlamasına neden olabilir. Yavaş ve düzenli gelişen takım aşınmaları, takımın ömrünü tamamlamasına yakın bir sürede yüzey kalitesinin bozulmasına neden olur. Buna karşılık, aniden gelişen takım aşınmalarında ise, yüzey kalitesinden ziyade ölçüsel toleranslardan sapma ön plana çıkmaktadır. İşleme parametrelerine, işlenen malzeme ve kesici uca göre değişen bu aşınma kriterleri yine TDG sistemlerinde farklı yaklaşımların uygulanması gereğini doğurur. Aşınma tipi ne olursa olsun geliştirilecek çevrimiçi bir TDG sistemi için sensör kullanımı hayati bir önem kazanmaktadır.

Ciddi bir endüstriyel problem olan takım aşınmasının tahmini ve kesici takımın optimal bir sürede değişimi, çevrimdışı olarak 1960'lı yıllardan itibaren deneysel Taylor takım ömrü veya kesme koşulları tabanlı doğrusal olmayan istatistiksel yöntemler kullanılarak [28-34] çalışılmaya başlanmıştır. Ancak kesme işlemi, esasen sadece ön tanımlı kesme koşulları ile tanımlanamayacak kadar karmaşıktır. Metal kesme işleminde, belirlenen kesme koşullarının haricinde düşünülmesi gereken ve ancak kesme anında ortaya çıkarak aşınma gidişatını etkileyen, malzeme içyapısı, sıcaklık, titreşim, aşınma oluşum mekanizması gibi, önceden tanımlanması oldukça zor birçok faktör bulunmaktadır. Bu nedenle, 1980'lerden itibaren çeşitli tipte sensör desteğiyle birlikte çevrimiçi TDG sistemlerinin araştırılmasına yoğun bir şekilde girilmiştir.

Takım aşınmasının gözlenmesi, ölçüm yöntemlerine göre doğrudan ve dolaylı olmak üzere 2 kategoride değerlendirilebilir. Bu bölümde takım aşınma ölçüm yöntemleri ve literatürde sunulan takım durumu gözlem sistemlerinden bahsedilmektedir.

2.1. Doğrudan Takım Aşınma Ölçümü

Doğrudan takım aşınması gözlemine dayalı bir TDG sisteminde, takım aşınması gerçekte olduğu gibi niceliksel olarak ölçülebilir. Genellikle çevrim dışı olarak uygulanan doğrudan takım aşınması yöntemlerinden bazıları (optik, radyoaktif, elektrik direnç ölçümü gibi) çevrimiçi olarak uyarlanabilmektedir [35].

2.1.1. Makina görme sistemleri

Takım aşınması, kesici takım kenarlarında çeşitli şekillerde gelişen bir deformasyon olduğundan, keskin haldeki takımla arasındaki fark optik olarak gözlenebilir. Bir (veya iki) kamera, mikroskobik lens ve uygun bir aydınlatma ile kesici kenardan alınan dijital görüntü, çeşitli görüntü işleme yöntemleri [36] (Canny kenar algılama, Hough transformasyonu, ışık yansıtma oranı, gri seviye histogramı, interaktif segmentasyon, filtreleme, şablon karşılaştırma, vb.) ile analiz edilerek takımın aşınma durumu kontrol edilebilir.

Matsushima [37] tarafından bir TV kamerası ile gerçekleştirilen ilk çalışmadan sonra, günümüzde görüntü sensörlerinin (CCD) uygun fiyat, artan kapasite ve gerçek zamanlı görüntü işleme sistemlerinin geliştirilmesi ile takım durumu gözlemiyle ilgili çeşitli çalışmaların laboratuar ortamında uygulanması sağlanılmıştır [38].

Doğrudan optik ölçme metodunda, ortalama bir CCD kameranın 20ms için resim yakaladığı düşünüldüğünde, kesici takımın frezeleme işleminde olduğu gibi kendi ekseninde dönüşü önemli bir problemdir. Weis [39] frezede gerçekleştirdiği çalışmasında, 4 ağızlı takma uçlu bir freze takımı için serbest yüzey aşınmasını çeşitli kenar belirleme algoritmaları ile tahmin etse de, ancak 4,82 m/s gibi çok düşük kesme hızları için uygulayabilmiştir.

Kesme anında soğutma sıvısının kullanımı ve talaş yığılması nedeniyle kesici kenarın görüntülenememesi makina görüntü sistemlerinin kullanımını çevrimiçi bir TDG sistemi için zorlaştırmaktadır.

2.1.2. Radyoaktif emisyon ölçümü

Radyoaktivitenin sensör olarak kullanıldığı bu sıra dışı yöntemle doğrudan takım aşınmasını gözlemek mümkündür [40-42] . Yöntemde, bir miktar radyoaktif materyal kesicinin kesme kenarlarına yerleştirilir, kesme anında aşınan radyoaktif takım malzemesi talaşa karışacaktır. Talaşa karışan bu radyoaktif malzemenin miktarı, aşınmanın derecelendirilmesinde kullanılır.

Çevrimiçi olarak talaş toplama problemi ve radyoaktivitenin çevre ve insan sağlığına zararı düşünüldüğünde bu yöntem sadece laboratuar ortamında uygulanan bir yöntem olarak kalmıştır.

2.1.3. İş parçası ölçülerinin kontrolü

Kesici takım aşındıkça, iş parçasından beklenenden daha az talaş kaldırır ve dolayısıyla iş parçası ölçülerinde sapma meydana gelir. Bu prensiple, belirgin tekrarlanan işler için takım aşınması, hedeflenen bir geometrinin kontrol edilmesi ile tespit edilebilir. Bu işlem, karmaşık geometrilerin şekillendirildiği frezeleme işlemleri için CNC ile bütünleşmiş lazer veya dokunmatik problar yardımıyla uygulanabilir. Ancak geometrik ölçülerin belli aralıklarla kontrol edilmesi gerekliliğinden dolayı bu yaklaşım çevrimiçi değildir.

Bahsi geçen prensibin çevrimiçi uygulaması ise, takım tarafına yerleştirilen bir referans nokta ile işlenen yüzey arasındaki mesafenin çeşitli tipteki yakınlık (proksimiti) sensörü vasıtasıyla ölçülmesi ile sağlanır [43,44]. Ancak, kesmeden kaynaklanan termal etkiyle takım boyu uzayabilir veya kuvvet etkisi ile (burulma) takım boyu kısalabilir. Yine kesilen yüzeydeki düzensizlikler, “çatır” etkisi ölçülen mesafeyi etkileyecektir. Kesme şartlarında kullanılan soğutma sıvısı ve ortamda biriken talaş ölçümler için gürültü verici etkenlerdir.

Dolayısıyla, geometrik sapmaların nedenini tam olarak takım aşınmasına bağlamak doğru bir yaklaşım değildir. Ayrıca geometrik hatalardan, takım aşınması tipleri ve sınıflandırılması çıkarılamamaktadır.

2.1.4. Elektrik direncinin ölçümü

Kesici takımın aşınmasıyla takım ile iş parçası arasındaki temas yüzeyi artar. Dolayısıyla elektrik akımının geçtiği bu alanda direnç giderek azalacaktır. Akımdaki bu direnç değişimi ölçülerek takım aşınması seviyesi belirlenebilir. Elektrik direnç ölçümü kolay uygulanabilir bir yöntem olarak görünse de, pratikte elektrik direncinin, takım aşınması haricinde kesmenin doğasında bulunan, sıcaklık, kesme kuvvetleri ve plastik deformasyon gibi ortam şartlarından da etkilenmesi nedeniyle güvenli sonuçlar vermemektedir [45].

2.1.5. Takım geometrisinin temas ile kontrolü

Temas ölçümü başka bir doğrudan takım aşınma ölçme yöntemidir. Bu yöntemde, takımın kesici kenar veya yüzeyinin profili, uygun bir prob (uç) ile yine kesicinin profiline uygun bir yol üzerinde temas ettirilerek kontrol edilir. Böylelikle keskin durumdaki takım ile aşınan takım arasındaki sapma ortaya çıkarılır [46]. Temas profilinin ölçümü kolay ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ancak temas ölçümünde kullanılan uç ve taşıyıcı sistemin rijitlikle birlikte, doğru konumlanabilir olması ve temas ucundan kaynaklanabilecek aşınmanın engellenmesi gerekir. Bu yöntem kesme anında kullanılmadığından ancak çevrim dışı olarak uygulanabilir.

2.2. Dolaylı Takım Aşınma Ölçümü

Doğrudan takım aşınması ölçüm sistemlerinin en büyük dezavantajı çevrimiçi olacak şekilde endüstride kullanımının olmamasıdır. Bunun için endüstriyel ve akademik çalışmalarda günümüzde yaygın olarak dolaylı takım durum gözlem sistemlerinin geliştirilmesi araştırılmaktadır. Dolaylı takım aşınma ölçümü, çok çeşitli sensörlerin kullanımını gerektiren bir yaklaşımdır. Çevrimiçi TDG sistemleri için dolaylı takım aşınma ölçümünde yaklaşım, takım aşınması ile ilişki sağlayan herhangi bir

parametrenin ölçülmesidir. Ancak, ölçülebilen bu parametreler takım aşınması haricindeki diğer koşullardan da etkilenebildiklerinden, çevrimiçi TDG sistemlerinin güvenilirliğinin sorgulanmasına neden olmaktadır.

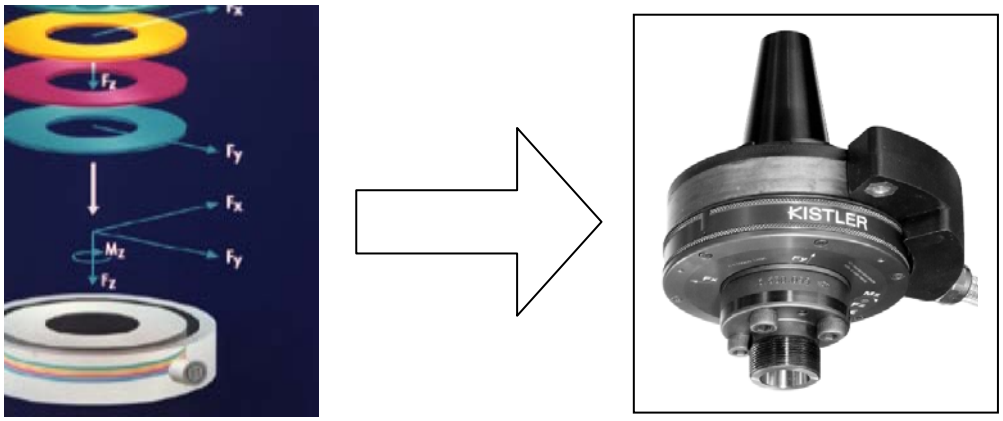
2.2.1. Kesme kuvvetlerinin ölçümü

Kesme esnasında kuvvetler genellikle dolaylı olarak, belirli bir yüzey üzerine etkiyen basınç, gerilme veya çok küçük uzamaların (yer değiştirmelerin) ölçümü ile elde edilir. Dolayısıyla bu şekilde sınıflandırılabilecek kuvvet ölçüm sistemleri piezo elektrik ve gergi ölçer (strain gauge) tabanlı olmak üzere yük hücresi veya dinamometre olarak adlandırılırlar. Çeşitli tipteki dinamometreler vasıtasıyla kuvvet ölçümü gerçekleştirilebilirse de, günümüzde ticari kuvvet ölçüm sistemlerinde son derece hızlı gerçekleşen metal kesme işlemleri için piezo elektrik quartz yük transdüserlerinin kullanıldığı dinamometreler tercih edilmektedir.

Tek kristalli quartz, Rochelle tuzu ve baryum titanat gibi bilinen piezoelektrik metaller, mekanik bir kuvvetle karşılaştıklarında elektriksel bir yük oluştururlar.

Piezoelektrik kristal sensörleri laboratuar ortamında olduğu kadar endüstride de ölçüm yapmaya uygundur. Ölçüm limitleri oldukça geniştir ve oldukça yüksek yüklere dayanabilirler. Buna karşılık sensörlerin boyutları oldukça küçüktür ve ölçüm yapılacak çevrede çok az yere ihtiyaç duyarlar. Ayrıca bu tür sensörler geniş bir sıcaklığı aralığında çalıştırılabilirler ve çalışma sıcaklıkları 350 °C’ ye kadar yükselebilir [47].

Şekil 2.1 ile bu çalışmada kullanılan çok elemanlı bir dinamometre gösterilmektedir. Şekle göre, dinamometre üzerine etki eden kuvvet dört transduser disk üzerine aynı genlik ve yönde transfer edilir. Böylelikle üç ana eksende kuvvet ve ayrıca tork ölçümü için yerleştirilen her bir transduser disk maruz kaldığı yükle orantılı elektriksel bir gerilim üretir.



Şekil 2.1: Dört komponentli dinamometre (Kistler 9123C1111)

Kesme kuvvetlerinin ölçümündeki en önemli dezavantaj, ölçüm sisteminin çok çeşitli kesme koşullarına duyarlı olmasından kaynaklanır. Metal kesme proseslerinde meydana çıkan kuvvetler, iş parçası ve takım malzemesi, takım geometrisi, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve genişliği, takım aşınması ve soğutma sıvısı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Dinamometre maliyetinin yüksek oluşu, özellikle frezeleme işlemlerinde tabla tipi dinamometre kullanımının iş parçası boyutlarını sınırlandırması ve iş parçası bağlama zorlukları, pratikte kuvvet ölçümünün kullanılmasını zorlaştıran faktörlerdendir.

2.2.2. Akustik emisyon (AE) ölçümü

Akustik emisyon (AE), bir malzemede oluşan çatlak yayınımı veya malzeme deformasyonundan kaynaklanan elastik dalgaları tanımlayan bir olgudur. Mekanik yüklerin etkisiyle, malzeme içinde küçük bir yüzeyin yer değişimi sebebiyle oluşan hızlı bir enerji yayılımı gerilim dalgaları olarak AE oluşumuna neden olur. Metal kesme işlemlerinde, birincil kayma bölgesi, talaş ile takım ve takım iş parçası temas alanı, talaş kırılması ve çarpmaları, çentiklenme ve takım kırılması, AE oluşumunu meydana getiren temel kaynakladır. Kesme işlemlerinde yayılan AE kulakla duyulacak mertebelere ulaşılabilse de, çoğunlukla bu kaynaklardan etkilenen AE çok daha düşük genliklerde ve yoğunluktadır. Genellikle 100 kHz ile 1 MHz arasındaki

geniş bir frekans bandında gözlenen AE, yine düşük genliklere sahip olması nedeniyle piezoelektrik malzemeden üretilen çok hassas sensörlerle algılanabilir.

AE, elastik enerjinin aniden serbest kaldığı yerde bir katı içinde oluşmaktadır. Akustik dalga emisyonunun bu özelliği, mikrofon ile ses algılamaktan çok daha üstündür. AE sensörünün sağladığı bu üstünlük, metal kesme işlemlerinde su veya hava soğutma ile fener mili çalışması gibi çevreden kaynaklanan gürültülerin doğal olarak, veri toplarken filtrelenmesini sağlar. AE sensörünün çok hassas oluşu, küçük yapısı, hafifliği ile bir veya birden fazla sensörün tezgah üzerine rahatlıkla yerleştirilebilmesi diğer avantajlarıdır.

AE sensörleri, kullanılan ortamdaki sıcaklık, ön-gerilme gibi faktörlerden rahatlıkla etkilenebilirler ve dolayısıyla zaman içinde yeniden kalibrasyon gerektirirler. Ayrıca AE sensörün sunduğu yüksek hassasiyet ile çalışacak ve veri toplamada 1 MHz gibi bir frekans için örnekleme yapabilecek veri toplama sistemleri pahalıdır. Ancak bu çalışmada kullanıldığı üzere, çeşitli tip AE sensörü, amplifikatör ve bağdaştırıcısı yardımıyla sabit zamanlı entegre RMS çevirici modüle sahiptir. Bu modül sayesinde ayarlanabilir zaman aralıkları ile donanımdan sinyalin RMS değeri elde edilerek daha düşük oranlarda örnekleme gerçekleştirilebilir.

2.2.3. Motor yükünün ölçümü

Voltaj, akım, direnç, empedans gibi elektriksel karakteristikler kolay ve ucuzca ölçülebilir ve tezgâh durumu hakkında bilgi verebilir. Voltaj ölçümü, bir kalibrasyon faktörü ile akım veya direnç gibi çeşitli niteliklere dönüştürülebildiğinden elektriksel karakteristiğin çıkarılmasında kullanılan en yaygın araçtır. Akım yükü veya Hall-etki sensörü olarak adlandırılan sensör, bir kablonun içinden geçen akımı algılayarak, bu akım oranına göre gerilim üretir. Bu mantıkla, kesme esnasında aşınan takım, tahrik motorlarının daha çok elektriksel yük çekmesine neden olacağından, aşınma ile elektriksel karakteristikler üzerinden bir ilişki kurulabilir.

Fener mili ve tabla eksen motorlarının yükü genellikle, sisteme kolayca yerleştirilebilen, Hall etki sensörü ile algılanabilir. Ancak tezgâhta tahriki sağlayan

bu motorların büyük kütleleri düşünüldüğünde, elde edilen sinyal belirli bir band genişliğinde işe yarayacaktır [48,49]. Günümüzde CNC adaptif kontrol sistem tasarımlarında da kullanılan motor yükü, özellikle agresif kesme koşulları için kullanılabilir bir özelliktir.

2.2.4. Sıcaklık ölçümü

Metal kesme işlemlerinde, sıcaklık ölçümü, tıpkı kesme kuvvetleri gibi, proses kontrolü için deneysel araştırmalarda kullanılan temel niteliklerden biridir. Kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı, kesme bölgesinde önemli bir miktarda ısı meydana çıkar. Talaş kaldırma işlemlerinde, sıcaklıkla kesici ömrü arasında kuvvetli bir ilişki bulunur.

Kesme sıcaklığı kesici takım aşınma oranına etki ederken, ortaya çıkan enerjinin ısıya dönüşen kısmının iş parçasına geçmesiyle, iş parçasında çarpılma ve yorulmaya, yüzey dayanımının ve düzgünlüğünün bozulmasına neden olur.

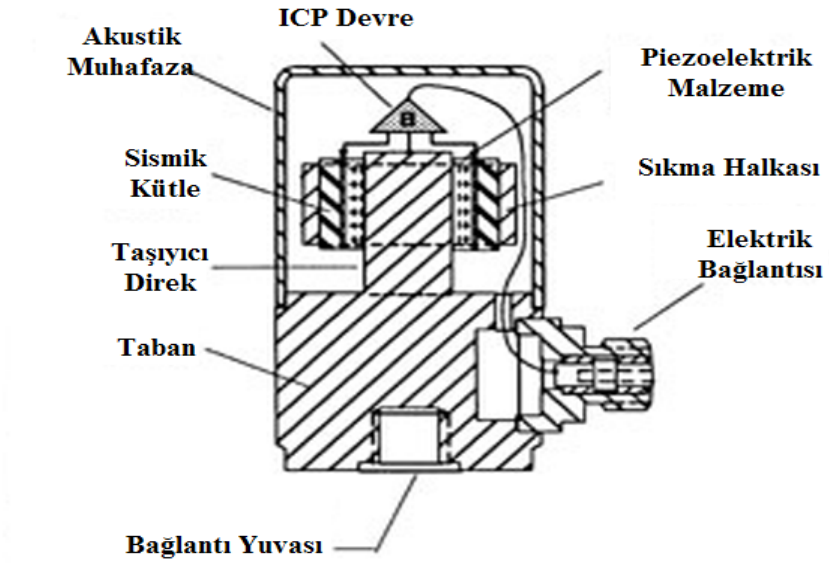
Sıcaklık ölçümünde kullanılan termistör, termokupl gibi kolaylıkla ulaşılabilir algılayıcılar, çoğu talaş kaldırma işleminde karşılaşılabilecek sıcaklık aralıklarında dolaylı olarak ölçüm yapmaktadır. Örneğin, belirli sıcaklıklarda renk değiştiren özel işlemlerden geçirilmiş malzemeler, iş parçası üzerinde ulaşılan maksimum sıcaklığı göstermekte kullanılmaktadır. Yine, iş parçası, talaş ve takım üzerinde çıkan yüksek sıcaklıklardaki radyasyon seviyesinin algılanması, temassız bir başka dolaylı sıcaklık ölçme yöntemidir. Bununla birlikte en yaygın ve ucuz sıcaklık ölçümü termokupl algılayıcılar kullanılarak yapılmaktadır. Ancak güvenilir bir şekilde, gerek iş parçası takım arayüzünde ve gerekse sıcaklık dağılımı için yoğunlaşılan noktalarda sıcaklık ölçümü oldukça iddialı ustalık gerektiren bir iştir. Termokuplun yerleştirilmesi taşlama ve frezeleme işlemleri gibi belirgin işlemler için, sinyalin dönen fener milinden alınması gerekliliğinden dolayı oldukça güçtür. Kesme bölgesinde çok küçük bir alanda oluşan yüksek sıcaklığın ölçümü için termokuplun olabildiğince yakın konumlanması gereksinimi bir başka yerleştirme güçlüğü nedenidir. Bu problemleri aşmak için kullanılabilecek temassız sıcaklık yöntemleri ise oldukça pahalıdır. Ayrıca bu tür temassız sensörlerin kullanımında, talaş ve soğutma sıvısı

gibi çevre faktörlerinin etkisi nedeniyle, kesmenin gerçekleştiği asıl noktaya odaklanılmakta güçlükle karşılaşılır.

2.2.5. Titreşim ölçümü

Titreşim, takım aşınması, fener mili dengesizliği veya yatak arızaları gibi çeşitli kaynaklar nedeniyle oluşabilir. Titreşimin asıl kaynağına aldırmadan, titreşim seviyesi algılanarak hata durumları ayıklanabilir ve düzeltilebilir. Tezgâhın çeşitli bölgelerine yerleştirilen akselerometreler, herhangi bir doğrultuda ve çok yüksek frekanslardaki titreşimli hareketi algılayabilmektedir. Üstelik bu tip sensörlerin kullanımında, yüksek frekanslı titreşim sinyallerinin genellikle tezgâh gövdesi üzerinden transferi söz konusu olduğundan, sensörün belirgin bir noktaya yerleştirilmesine gerek yoktur. Ancak yine bu tip sensörün kullanılmasında hesaba katılması gereken nokta, sensörün başka diğer titreşim kaynaklarına olan hassasiyetidir. Örneğin, sensörün sıcaklığındaki değişim TDG sistemi için yanlış bir sinyal üretebilir. Yine, takım aşınmasının belirlendiği aynı frekans aralıklarının, çevredeki başka kaynaklar tarafından da oluşturulabilecek olması, TDG sisteminin yanlış karar vermesine neden olur. Dolayısıyla mümkün olduğu kadarıyla, aşınmayı tanımlayan sinyalin gürültülü ham sinyal içinden çıkarılması, TDG sistemini karmaşıklaştıran, kaçınılması gereken bir durumdur.

Bu çalışmada, 3 eksen (PCB 356A31) ve tek eksende (PCB 353B11) titreşim ölçümü sağlayan iki farklı tip akselerometre kullanılmıştır. Kuru kesme nedeniyle malzeme sıcaklığının sensörü etkilememesi için kayma modlu (shear mode) akselerometre kullanılmıştır. Şekil 2.2 ile gösterildiği üzere kayma modundaki bir akselerometrede ivmelenme esnasında, kütleler algılayıcı kristaller üzerinde kayma gerilmesine neden olur. Algılayıcı kristallerin sensör tabanı ve çevresinden izole edilmiş olması, ısı geçişlerini engelleyerek, geniş bir aralıkta ölçüm hassasiyetinin sürdürülmesini sağlar.



Şekil 2.2: Kayma modlu akselerometre (PCB) [50]

2.3. Literatürde Frezeleme İşlemi İçin Geliştirilen TDG Sistemleri

Çevrimiçi bir TDG sistemi oluşturmak için, CNC tezgâh ile bütünleştirilmiş çeşitli yüksek hassasiyette sensör ve etkin bir matematik model kullanımı gereklidir. Literatürde çevrimiçi TDG sistemlerinin geliştirilmesinde, dinamometre, akselerometre, akustik emisyon, optik ve akım yükü ölçeri gibi çeşitli sensörlerin kullanıldığı göze çarpmaktadır.

Frezeleme işleminde kesici üzerindeki birden fazla kesme ağzının fasılalı bir şekilde ardı ardına malzemeye girip çıkması nedeniyle takım aşınması eğilimi torna ve delik delme işlemlerine göre farklıdır. Frezeleme işlemi için bir diğer önemli problem ise kullanılan sensörlerin konumunun tespitidir. Kesicinin ve iş parçasının birbirlerine göre bağıl hareketleri, iş parçası ile kesici arasında sensörlerin yerleştirilmesini engellemektedir [26]. Bahsi geçen bu problemlerden dolayı, literatürde torna ve delik delme prosesleri üzerinde geliştirilen TDG sistemlerinin, frezeleme gibi yarı fasılalı veya taşlama gibi tam fasılalı talaş kaldırma işlemleri için tatmin edici bir şekilde işleyeceği garanti edilemez [27].

Çevrimiçi TDG sistemlerinin frezeleme işlemine uygulanmasında göze çarpan literatür araştırması şu şekildedir;

Sağlam [45], üniversal bir freze tezgâhında gerçekleştirdiği çalışmasında, periyodik olarak kesme kuvvetlerini tabla tipi bir dinamometre ile ölçerken aynı zamanda karşılık gelen serbest yüzey aşınması (VB) ve yüzey pürüzlülük değerlerini (Ra) kaydetti. Geri yayınımlı, çok katmanlı bir yapay sinir ağı (YSA) modeli ile geliştirdiği takım durumu izleme sisteminde, kesme hızı, talaş derinliği, düşey ve ilerleme yönündeki kesme kuvvetleri YSA model için girdi olarak vermiştir. YSA model çıktısı olarak serbest yüzey aşınması (VB) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri kullanılmış ve takım aşınması %77 ve yüzey pürüzlülüğü ise %79 başarı ile tahmin edilmiştir.

Inasaki [51] çalışmasında, torna, frezeleme ve taşlama işlemlerinde akustik emisyon (AE) sensörünü, takım aşınması ve talaş tipini belirlemede kullandı. Standart sapma, çarpıklık, basıklık (kurtosis) ve güç spekturumu oranını kullanarak, tornalama için talaş tipinin sürekli veya süreksiz oluşunu ayırt etmiştir. Tornalama işlemine benzer şekilde, AE sinyalinin güç spekturumu analizinde, 13.75 Hz ve 55.5 Hz olmak üzere belirlenen iki harmoniğin, genlik tepe değerlerinin birbirine oranını, keskin ile aşınmış takımı ayırt etmek için kullanılmıştır.

Altıntaş [52], genel frezeleme işlemleri için kesme kuvvetleri ve bir zaman serisi model kullanarak çevrimiçi bir takım durumu gözlem sistemi geliştirmiştir. Öncelikle kesme esnasında oluşan kuvvetlerin tanımlayıcı elemanları frezelemenin temel mekaniği kullanılarak ayrıştırılırken, geriye kalan kuvvet sinyali birinci dereceden adaptif otoregresif zaman serisi filtresi ile izlendi. Çalışmada geliştirilen algoritmanın hızlı cevap verme süresi nedeniyle, takımın her bir dönüşü için aşınıp aşınmadığını karar veren pratikte uygulanabilir bir TDG sistemi geliştirilmiştir.

Tansel ve McLaughlin [53] frezeleme işlemlerinde takım kırılmasına yoğunlaştıkları çalışmasında, kesme kuvvetleri ve tork sinyallerini kullanarak, takımın her bir dönüşü için zaman serisi tabanlı bir takım durumu gözlem sistemi geliştirdi. Çalışmada, her bir kesici ağız için izlenen sinyal karakteristiklerinin çeşitli

varyasyonları değerlendirilerek, takımın kırılması tespit edildi. Önerilen bu teknikte, deneysel verilerle algoritma test edilmiş ve test edilen tüm koşullar için takım kırılması başarıyla tahmin edilmiştir.

Orhan ve diğ. [54], titreşim ile serbest yüzey aşınması arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmada, iş parçası tarafında frezeleme yönünde yerleştirdikleri bir akselerometre ile değiştirilebilir CBN uçlu bir takımla 35 HRc sertliğinde AISI D3 iş çeliği frezelerken oluşan titreşim verilerini topladı. Çalışmada, her 10. kesme aralığı için toplanan veriler ile takım aşınması arttıkça titreşim genliğininde arttığı gözlemlenmiştir. Frekans bölgesi analizinde, spektrum grafiğinde titreşim enerjisinin iki ana band üzerinde (30.3-90.9 Hz ile 757.5-939.3 Hz) yoğunlaştığını tespit edildi. Çalışmada titreşim genliğinin belirgin olarak ancak aşınmanın 160 μm seviyesine ulaştıktan sonra arttığı vurgulanmıştır.

Kim ve Klamecki [55], frezeleme işleminde takım aşınmasını inceledikleri çalışmada fener mili burulma titreşimini, yine fener miline yerleştirilen optik tabanlı lazer dopler kullandı. Frekans bölgesinde yaptıkları analizde spektral güç ile takım aşınması arasındaki uyumlu ilişkiyi sundukları çalışmada, fener mili burulma titreşimini doğal frekans titreşimi ve zorlanmış titreşim (forced vibration) olmak üzere iki sınıfa ayırdılar. Yapılan çeşitli deneysel çalışmalardan sonra fener miline ait zorlanmış frekansa ait spektral gücün aşınma ile orantılı olarak arttığı ancak doğal frekans harmoniklerine ait spektral gücün ise aşınma ile ilişkisi olmadığı gözlenmiştir.

Matsushima ve diğ. [56], takım kırılmasını, fener mili akımını analiz ederek tespit eden bir sistem geliştirmiştir. Çalışmada fener mili motor akımı için otoregresif bir zaman serisi model uygulandı. Buna göre, takımın bir adım önceki her bir dönüşünde ölçülen gerçek akım değerleri zaman serisi için bir girdi olacak şekilde bir sonraki akım değerinin tahmininde kullanıldı. Gerçek akım değeri ile tahmini değer arasındaki kalan değer daha sonra takımın kırılmasını yakalayan bir gösterge olarak kullanıldı.

Benzer şekilde Lee ve diğ. [57] , tabla eksenlerinin alternatif akım motorlarının çektiği akım yükünü gözlemledikleri çalışmalarında, geliştirdikleri birinci derecede otoregresif bir model vasıtasıyla, gerçek akım değeri ile tahmini akım değerini karşılaştırarak, aradaki farkı bir eşik değeri olarak takımın kırılmasını algılamada kullanmışlardır. Çalışmada ayrıca geliştirilen takım durumu gözlem sisteminin kesici takım salgısına karşı olabildiğince duyarsızlaştırılması için, her bir takma ucun bir diğerine göre karşılaştırmasını yapan bir sistem sunulmuştur.

Stein ve Wang [58], alternatif akım fener mili motorunun güç tüketimini, kesme esnasındaki torkun belirlenebileceği bir sensör gibi kullanma potansiyelini araştırdıkları çalışmalarında, fener mili motorunun elektrik tüketimi ile uygulanan tork değerleri arasındaki ilişkiyi sunan bir model geliştirdi. Sunulan bu modele göre fener mili elektrik tüketimi ile statik ve dinamik tork değerleri arasında lineer bir ilişkinin varlığı ortaya konuldu. Çalışmada vurgulanan bir diğer nokta ise, fener mili titreşiminin tork tahmininde etkisinin olmadığıdır.

Wilcox ve diğ. [59], akustik emisyon ve kesme kuvvetlerini kullandıkları çalışmalarında, serbest yüzey, krater ve çentik aşınması gibi çeşitli aşınma tiplerinden kaynaklanan takma uç takım geometrisindeki değişimleri incelediler. Aşınmaya ait geometrilerin yapay olarak oluşturulduğu bu çalışmada, 2 farklı koşul için frezeleme deneyinde tabla tipi bir dinamometre ve iş parçası tarafına bağlanan akustik emisyon sensörünü kullandılar. Çalışmada serbest yüzey aşınması ile akustik emisyon ve kesme kuvvetleri arasında kuvvetli bir ilişki bulunurken, çentik, kenar ve krater aşınma tiplerinin ise akustik emisyon ile ilişkisinin daha kompleks olduğu vurgulanmıştır.

Shao ve diğ. [60] çeşitli kesme koşullarda gerçekleştirdikleri yüzey frezeleme işlemleri için, aşınmayı dikkate alan bir güç modeli sundular. Geliştirdikleri analitik güç modeli simülasyonu ile kesme anında topladıkları güç sinyallerini, ölçülen aşınma değerleri ile mukayese ettiler. Takım aşınması tahmininde, geliştirdikleri simulasyon modelin, toplanan anlık sinyale göre daha iyi performans sergilediğini vurguladılar.

Srinivasa ve diğ. [61], yüzey frezeleme işlemlerinde aşınma modellenmesi için iş parçası tarafına yerleştirdikleri akustik emisyon sensör sinyallerini, kesme koşulları ve yüzey pürüzlülük değerlerini kullandılar. Girdi olarak kullandıkları bu verilerle, kaynak tahsis ağ (resource allocation network-RAN) ve ileri yönlü geri yayılmalı çok katmanlı mimariye sahip iki YSA model kullanarak, modelleri karşılaştırdılar. Sonuç olarak çok katmanlı ileri yönlü geri yayınımlı ağın aşınma tahmininde çok daha güvenilir ve doğru sonuç verdiğini vurgulamışlardır.

Danko ve diğ.[62], frezeleme işlemleri için takım aşınmasının tahmininde, kesme kuvvetleri, akustik emisyon ve tabla tahrik motorlarının çektiği akımı kullandılar. Zaman alanındaki 5 öznitelik ile birlikte frekans alanındaki Fourier katsayıları ile Radyal bazlı bir yapay sinir ağı eğitilerek, takım aşınması kümelenen üç seviyede tahmin edilmiştir.

Pan F ve Hope A. D.[63], kesme kuvvetleri, akustik emisyon ve akselerometre ve akım yük sinyallerini kullanarak çoklu sensör entegrasyonuna dayalı bir TDG sistemi sundular. Çeşitli aşınma seviyesini sınıflandırdıkları çalışmada, hem zaman hemde frekans alanındaki istatistiksel öznitelikleri kullanarak, bulanık (fuzzy) destekli ileri yönlü geri yayılmalı bir yapay sinir ağını eğiterek takım durumunu gözleyen bir sistem geliştirmişlerdir.

Bhattacharyya P. Ve diğ.[64], sundukları çalışmada yüzey frezeleme işleminde takım aşınması tahmini için, fener mili akım yükü ve voltaj sinyallerini kullandılar. Sinyaller için unsur uzayı filtreleme (feature space filtering) yöntemini kullanarak, takım aşınmasını çoklu lineer regresyon model ile tahmin edebildikleri bir sistem sundular.

Sıralanan bu çalışmalara literatürde her geçen gün bir yenisinin eklendiği göze çarpmaktadır. Bu durum, takım durumu gözlem sistemi geliştirilmesinin günümüzde halen çözülemeyen bir problem olarak güncelliğini koruduğuna işaret etmektedir.

3. FREZELEME İŞLEMİ, KESİCİ TAKIM VE AŞINMASI

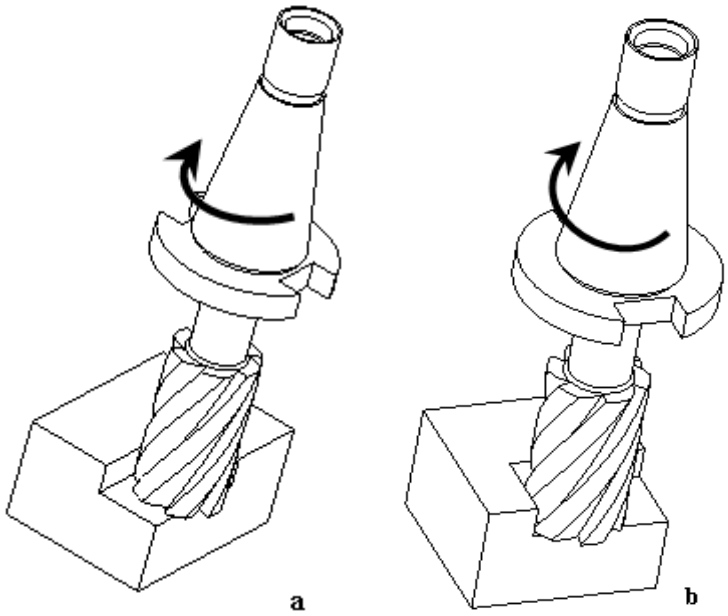
Frezeleme, tornalama ve delik delme gibi temel ve vazgeçilmez bir metal kesme prosesidir. Freze tezgâhları çok yönlü ve verimli makinalardır. Bu verimliliğin en önemli nedeni, çoğu frezeleme kesici takımında birden fazla kesici kenar (ağız) bulunmasından kaynaklanır. Frezelemede kesme hızı, çok ağızlı bir kesicinin dönme hareketine karşılık altındaki iş parçasının dönen kesici eksenine dik olarak doğrusal hareket ettirilmesi ile elde edilir. Kesicinin kendi ekseni etrafında dönme hareketi nedeniyle kesici kenarların kesme esnasında her an için değişmesi, frezeleme işlemini tornalama işlemine göre daha karmaşıklaştırır. Bu fasılalı hareket nedeniyle talaş kalınlığı ve kesici kenar üzerindeki kuvvetlerde sürekli değişmektedir.

Temel bir işleme prosesi olan frezeleme prosesinin en önemli dezavantajı çok fazla serbestlik derecesinde, karmaşık ve zor ayarlara sahip olmasıdır. Bu yüzden uygun rijit fikstür kullanılmadığı durumlarda torna ve taşlama gibi operasyonlara göre ölçüsel kesinlik azalır [65]. Yine diğer proseslere göre pahalı olan takım maliyetleri, esnekliği ve verimliliği etkileyen faktörlerdir.

İlk freze tezgâhı 1800'lü yılların başında tasarlanmış ve, 1980 öncesi yıllara kadar konstrüksiyonunda çok ciddi bir değişiklik yapılmamıştır. Günümüzde, vidalı mil tahrikli sistemler yerine rulmanlı mil tahrik sistemleri kullanılmasıyla daha rijit ve ölçüsel doğruluk sağlayan konstrüksiyonlar sunulmuştur. Kontrol açısından ise daha önce var olan ancak çok zor uygulanabilen eksenlerin eş zamanlı hareket yeteneği arttırılmıştır. Böylelikle freze tezgâhları, eğrisel serbest form kompleks takım yollarının çok eksende rahatlıkla uygulandığı, günümüz kalıp endüstrisinin vazgeçemediği önemli bir noktaya ulaşmıştır.

Frezeme işlemleri kontur, düzlem yüzey, profil ve kavite çıkarma gibi eksenel simetrinin olmadığı temel işlemler yanında türbin kanatçıkları gibi çok kompleks geometrilerinde üretilmesinde kullanılır.

Frezeleme işlemini karmaşıklaştıran bir başka olgu, takımın iki farklı tipte hareket serbestliğinde sahip olmasından kaynaklanır. Şekil 3.1 (a) ile gösterildiği üzere, yukarı yönlü frezelemede takımın dönme yönü ile ilerleme zıt yönde, aşağı yönlü frezeleme de ise (Şekil 3.1 b) takımın dönüş yönü, iş parçası tablasının hareketi ile aynı yönlüdür.



Şekil 3.1: Yukarı yönlü frezeleme (a) , Aşağı Yönlü frezeleme (b)

Yukarı yönlü frezelemede kesici diş malzemeden talaşı giderek artan bir talaş formu ile kaldırır. Kesici kenar, kesme başlangıcında hiç talaş kaldırmazken, kesme işleminin ilerleyen sürecinde maksimum talaş kalınlığına çıkacaktır. Talaş kaldırma işlemi, başlangıçta kayma, daha sonraları talaşı yığma ve ardından da talaşı koparma süreci ile tamamlanmış olur. Bu tür kesme tipi, bazı malzemelerde pekleşme ve çatıra neden olabilir ve dolayısıyla takım aşınma tipini etkileyen bir faktördür.

Aşağı yönlü frezeleme de ise kesici diş, kesme başlangıcında maksimum talaş kalınlığı ile başlayıp kesme sonunda, talaşın koptuğu an esnasında sıfıra iner. Dolayısıyla kesme kuvvetleri maksimumdan başlayarak düşme seyri gösterir.

Bu iki farklı tip frezelemenin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır [66];

- Aşağı yönlü frezeleme, çatır ve titreşim oluşumuna daha az meyilli olduğundan daha iyi yüzey kalitesi sağlamak için nihai işlemede tercih edilir. Artan talaş açılarında daha az güç harcanmasını sağlar. Ancak rijit olmayan tezgâhlarda uygulandığında aşırı yüklenmelerde takım tutucusu ve hatta fener mili zarar görebilir.

- Yukarı yönlü frezelemede ise, kesici takım ağızlarındaki yüklerin yavaş yavaş artması ve kesicinin birden iş parçasına dalmaması nedeniyle daha güvenli ve vuruntusuz bir kesme işlemi gerçekleştirilir. Kesicide talaş yığılması daha az gözlenir ve kesici curuflu kirli yüzeylerden etkilenmez.

3.1. Kesici Takım Geometrisi

Metal kesme işlemlerinde kesici takım, kayma nedeniyle oluşan yerdeğiştirmeden (dislokasyon) faydalanarak, iş parçasından talaş kaldırır. Uzun ve makul bir sürede kesme işleminin devam edebilmesi için, takımlar kestikleri malzemeden daha sert yapılırlar ve çoğu kez, çeşitli performans arttırıcı malzemelerle kesici ağızları kaplanır. Bunun yanı sıra kesici takım, gerek sürtünmeleri azaltmak ve gerekse mekanik dayanımı arttırmak açısından prosese göre özel bir geometrik tasarıma sahip olmalıdır.

Bir frezeleme takımının tasarım kriteri çoğu açıdan ortogonal kesme takımına göre benzerlikler gösterir. Ancak temeldeki bu benzerlikle birlikte, frezelemede her bir dönüşte aralıklarla kesme işleminin gerçekleştirilmesinden dolayı ekstra bir dizi geometrik özelliklerin takıma eklenmesi gerekir.

Özellikle frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar çok çeşitli şekillerde ve her biri ayrı açı ve geometridedir. Çok çeşitli tipteki bu kesiciler yine düzlem, kontur, profil, eğrisel yüzey frezeleme gibi birbirinden farklı işlemleri gerçekleştirmek maksadıyla kullanılmaktadır. Dolayısıyla burada esas amaç, en uygun talaş formunu

yakalayarak, en etkin şekilde talaşın iş parçasından koparılarak uzaklaştırılmasını sağlamaktır.

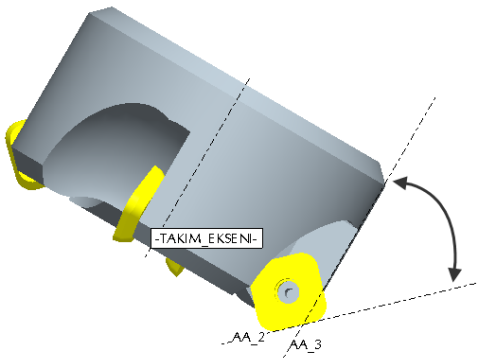
Etkin ve verimli bir işleme için uygun takım geometrisinin seçimi, özellikle çok çeşitli takım üreticisinin farklı çözümler sunduğu günümüzde, karar vermesi zor kritik bir faktördür. Takım seçimini etkileyen değişkenler şu şekilde sıralanabilir [67]

- Takım çapı
- Takım malzemesi ve kaplaması
- Takımın sağ veya sol helis açısı
- Talaş, giriş ve boşluk açıları gibi kesiciye ait geometriler
- Takımın ağız (kesici kenar) sayısı
- Takımın tutucuya bağlanma şekli

Kesici takım imalatçısının tasarımına göre çok çeşitli geometriler üretilebilirse de ISO 3002-1 ile bir kesici takımın sahip olması gereken temel geometri ve toleransları standartlaştırılmıştır.

3.1.1. Giriş açısı

Giriş veya yaklaşma açısı, kesicinin serbest yüzey kenarı ile merkezinden geçen eksen arasındaki açıdır. Bu açı ile kesici takma uç tepesinin takım ekseni paralelliğinden ne kadar eğimle saptığı tanımlanır [68].



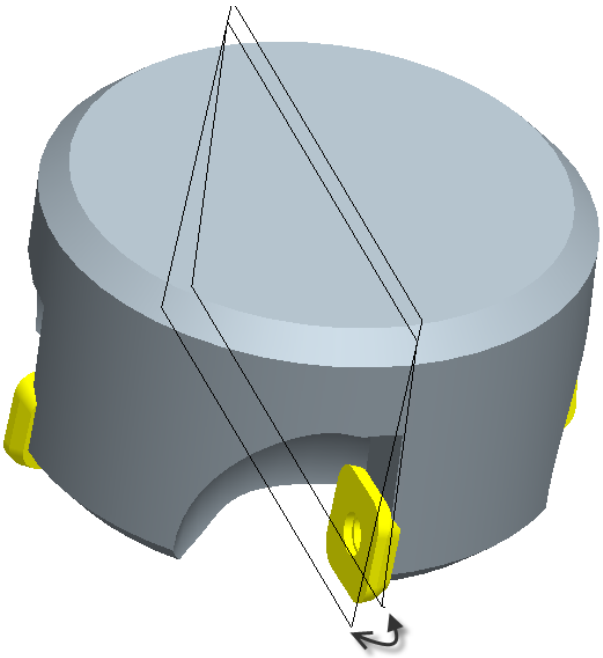
Şekil 3.2: Giriş açısı

Genel frezeleme işlemlerinde bu açı 0° ile 45° arasında değişir. Örneğin yüzey frezeleme takımlarında genellikle 15° seçilir. Giriş açısı, talaş kalınlılığını ve dolayısıyla kesme kuvvetlerini etkiler. Aynı kesme derinliği için, giriş açısı arttıkça, talaş kalınlığı azalır ve uzar. Geniş bir giriş açısında, kesme işlemi için gereken yük, kesici takımın kesme kenarındaki daha uzun bir çizgiye yayılır ve dolayısıyla daha düzgün bir kesim sağlar. Bu yüzden yüksek yüzey kalitesi için nihai kesme işlemlerinde giriş açısı olabildiğince büyük tutulmalıdır. Artan giriş açısı kesme hızının artmasını sağlar ancak diğer taraftan kesme derinliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca artan giriş açısı kesme anında eksenel kuvvetlerin artmasına neden olurken aynı zamanda radyal kuvvetlerin azalmasını sağlar. Uygun bir giriş açısı takımın malzemeye giriş ve çıkışında, kesici kenar üzerindeki şokları azaltması nedeniyle daha yumuşak bir kesim sağlanır. Dolayısıyla kesme anındaki yükün azalması nedeniyle, geniş giriş açısının seçimi kesme anındaki titreşimlerinde azalmasına neden olur.

Giriş açısı 45° seçildiğinde kesme ucu en mukavim durumdadır. Bu durumda ise eksenel kuvvetler ile radyal kuvvetler neredeyse eksenel kuvvetlere eşit olarak ağır ve agresif kesme koşullarında kullanılır [68].

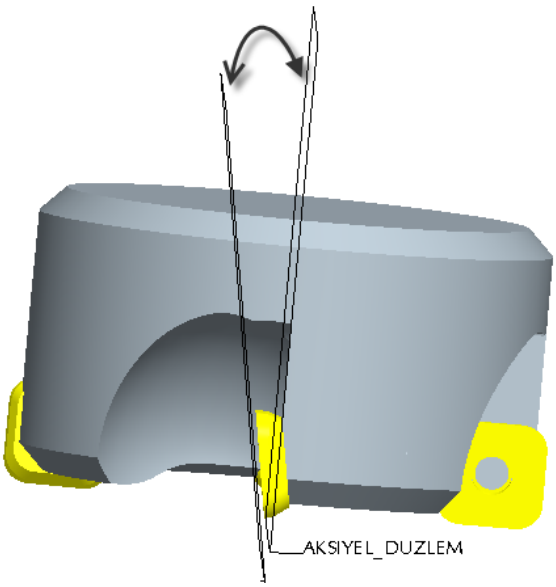
3.1.2. Eksenel talaş açısı

Kesicide eksenel talaş açısı, kesici takım yüzeyinden geçen bir teğet ile kesici ekseni arasında kesme düzlemine dik olan ve takım ekseninden geçen bir düzlemden bakıldığında görünen açıdır. Bu açıyla takma uç kesme yüzeyinin, kesici eksenine göre öne veya arkaya doğru kaç derece eğimle yerleştirileceği tanımlanır. Kesici takımın, takım eksenel düzlemine göre öne veya arkaya doğru eğimle yerleştirilmesi, pozitif veya negatif talaş açısı olarak sınıflandırılır [68].



Şekil 3.3: Pozitif talaş açısı

Pozitif talaş açısında, kesici takma ucu eksenel düzleme göre geriye yaslanmıştır. Pozitif talaş açılı bir kesme işleminde, kesici kenar parçadan kepçeleyerek talaşı koparır [68]. Şekil 3.3 ile gösterildiği üzere, pozitif talaş açısında kesme noktası, kesicinin en uzak noktasında, kesme düzleminin önünde, parça yüzeyi ile ilk temas eden noktadır.



Şekil 3.4: Negatif talaş açısı

Şekil 3.4 ile gösterildiği üzere negatif eksenel talaş açısı, kesme anında çıkan talaşı tekrar kestiği yüzey üzerine sıvamaya çalışır. Negatif eksenel kesme açısında, kesme noktası, talaş kaldırma anında takma ucun son bölümüdür.

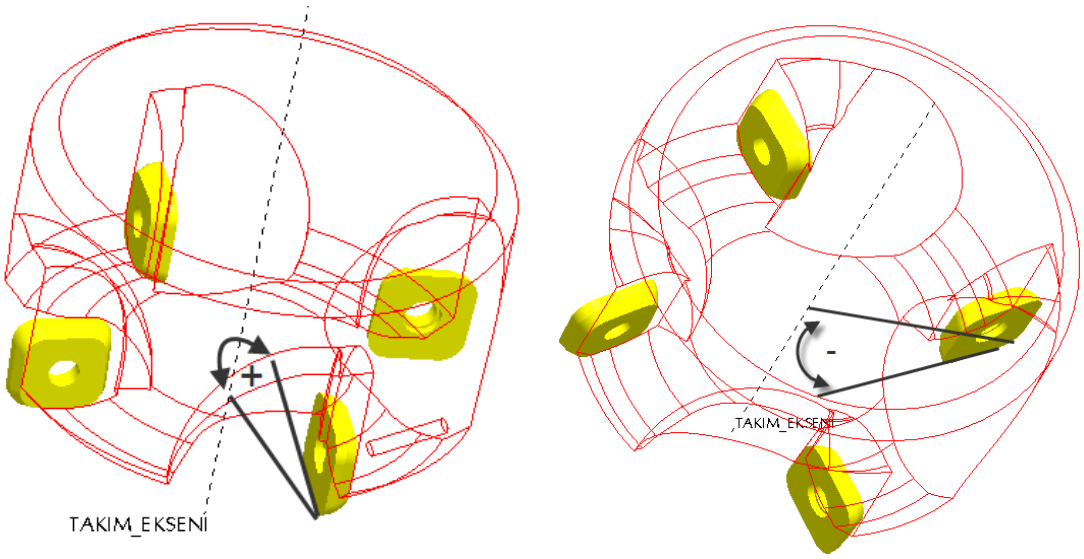
Eksenel talaş açısı, üretici firmanın isteği doğrultusunda -20 ile 20 derece arasında değişen açı aralığında seçilebilmektedir. Eksenel talaş açısının negatif veya pozitif seçilmesi frezeleme işlemi performansını etkilemektedir. Pozitif eksenel talaş açısı, kesici kenarın mukavemetini düşürür ancak daha hızlı talaş kaldırılmasına izin verir. Diğer taraftan, negatif eksenel talaş açısı, kesici kenar üzerine sağladığı ekstra mukavemet nedeniyle daha fazla talaş derinliğinde talaş kaldırılmasına olanak sağlar. Ancak bu durum, kesme anında daha fazla güç gereksinimine neden olur.

Eksenel talaş açısı talaşın akış yönünü ve özellikle eksenel yöndeki kesme kuvvetine etki eden bir faktördür.

3.1.3. Radyal talaş açısı

Şekil 3.5 ile gösterildiği üzere, radyal talaş açısı, kesici takımın altından kesme düzlemine paralel bir düzlemden bakıldığında kolayca görünen bir açıdır. Radyal düzleme göre bakıldığında bu açı, takımın merkezinden geçen ve kesme noktasına teğet durumdaki yarıçap çizgisi ile talaş yüzeyi arasındaki açıdır [68].

Pozitif radyal talaş açısı, Şekil 3.5-a ile gösterilmiştir. Pozitif radyal talaş açısında kesici takım, kesme anında kaldırdığı talaşı takımın merkezine doğru sürükler. Talaş kaldırma işleminde ilk temas noktası, kesme düzlemindeki en uzak noktadır. Kesmenin sona erdiği nokta ise kesici yönünden geride kalacak şekilde arkaya yaslanmıştır.



Şekil 3.5: Radyal talaş açısı a pozitif, b negatif radyal talaş açısı

Negatif radyal talaş açısında ise, Şekil 3.5-b ile gösterildiği üzere, kaldırılan talaş kesicinin etrafına yönlendirilecek şekildedir. Kesmenin sona erdiği temas noktası kesme yönünden ileride olacak şekilde konumlandırılmıştır [68].

Üretici firmalara bağlı olarak, radyal talaş açısı genellikle -20 ile +20 derece arasındaki açılarda değişir. Eksenel talaş açısında olduğu gibi kesme performansı, açının pozitif veya negatif olması ile değişim gösterir. Pozitif radyal talaş açısı kesici kenarın mukavemetini zayıflatırken ancak diğer taraftan kesme için en az güç tüketimini sağlar. Negatif radyal talaş açısı kesme kenarlarında yüksek dayanımla birlikte, talaşın kesici ağızlardan da uzaklaştırılmasını sağlar. Ancak bu geometri ile kesme için gereken güç artacaktır.

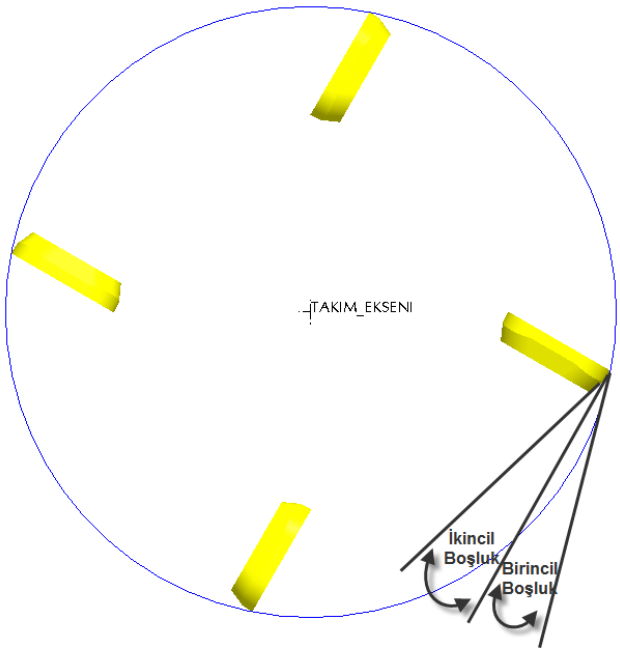
3.1.4. Boşluk açıları

Boşluk veya serbestlik açıları, kesici etrafında yanal yüzeyi oluşturan ve çevreleyen gerek sürtünmenin azaltılması ve gerekse talaşın rahatça boşaltılmasını sağlayan açılarıdır. Üretici firmanın tasarımına göre birbirini takip eden minimum iki tip boşluk açısı kesicinin formunu oluşturur.

Şekil 3.6 ile gösterildiği üzere birincil boşluk açı, kesici kenarı hemen ardından takip eden dar bir alandaki küçük açıdır. İkincil boşluk yüzey açısı ise, birincil serbest

açıyı hemen takip eder ve bu açıya nazaran daha geniş ölçektedir. Bazı takma uçlu takım geometrilerinde birincil ve ikincil boşluk açılar aynı olduğundan sıklıkla bu iki açı birbiri ile karıştırılır [68].

Birincil ve ikincil boşluk açılar yine kesme kenarına bakış açısına göre radyal ve eksenel olarak ikiye yarılır.



Şekil 3.6: Birincil ve ikincil boşluk açılar

Şekil 3.6 ile gösterildiği üzere, negatif birincil ve ikincil boşluk açıları, kesicinin kesme işlemini tamamlamasının hemen ardından iş parçasına çarpacağından sadece pozitif olabilir. Üreticiye bağlı olarak 3 ile 30 derece arasında değişen açılarla üretilen kesicilerde genellikle, birincil boşluk açı için 5 – 9 derece, ikincil boşluk açı için 14 – 17 derece seçilir. En ideali olabildiğince küçük açılara sahip olan takımları kullanmaktır. Daha geniş açılar kesici kenarların zayıflamasına neden olurken, çatır gibi istenmeyen kesme koşullarını tetikleyebilir. Bu yüzden kesimi zor, sert malzemeler ve özellikle küçük çaplı takımlar için boşluk açılarının küçük olması gerekir.

3.2. Kesici Takım Aşınma Mekanizmaları

Kesici takımdaki aşınmaya neden olan başlıca deformasyon mekanizmaları, atrisyon, abrasyon, difüzyon, adhezyon ve plastik deformasyon olmak üzere 5 sınıfta toplanabilir [69-72]. Takımın değişik biçimlerde aşınmasına neden olan tüm bu aşınma mekanizmaları ise şu şekilde izah edilebilir;

Atrisyon aşınması, mikroskobik parçaların takımdan koparak ayrılması nedeniyle oluşmaktadır. Düşük ve orta hızlarda, çatır etkisi ile oluşabilecek bu aşınma mekanizmasına takım malzemesindeki yetersiz tokluk sebep olmaktadır. Özellikle titreşimli ve seri darbeli talaş kaldırma işlemlerinde, sıcaklığında etkisiyle kritik bir periyodik yüklenmenin ardından takım malzemesi termal olarak yorulur ve bu yorulma etkisiyle oluşan çatlaklar mikroskobik boyutta küçük parçaların koparak kesiciden ayrılmasına neden olur [69].

Abrazyon aşınması, yumuşak iş parçası malzemesinden gelen karbür, oksitler ve nitritler gibi takım malzemesinden daha sert küçük partiküllerin zaman içinde takımı mikro sabanlama ve penatrasyon ile aşındırması ile gerçekleşmektedir.

Difüzyon aşınmasında, iş parçası ve takım malzemesi arasındaki metal metale temas ve 700 C^o ila 900 C^o arasındaki yüksek sıcaklık etkisiyle metal ve karbon atomlarının iş parçası, takım ve talaşa karşılıklı olarak geçişi nedeniyle takım malzemesi yapısal değişime uğrayarak yumuşar. İşleme esnasında oluşan sıcaklıklar, yapıdaki çözünebilirlik ve kesme koşulları difüzyon aşınmasını belirleyen temel faktörlerdir. Özellikle yüksek sıcaklıkların etkisiyle, metal ve kesicideki karbon atomları yer değiştirebilir, akan talaş ile uzaklaşabilir veya iş parçası atomları kesici yüzey katmanları ile reaksiyona girerek kesicinin zayıflamasına neden olabilir [72].

Adezyon aşınması olarak adlandırılan aşınma mekanizmasının nedeni, kesme esnasında takım üzerine iş parçasının kaynak etkisiyle yapışarak birikmesi ve sonrasında oluşan yığıntının kırılarak kopmasıdır. Metal kesmede görülebilecek bu tür yığılmalar sürtünme mekanizmasının bir parçasıdır ve kırıldıklarında, küçük

parçalar halinde takım malzemesinin koparak talaş veya yeni oluşan yüzeye geçmesini sağlayarak talaş yüzeyi ve serbest yüzeydeki aşınmayı tetikler.

Plastik deformasyon*;* kesme esmasında ortaya çıkabilecek aşırı sıcaklık ve basınç nedeniyle takımın talaş yüzeyinde, talaşla temas eden kesici burun kısmın aşağı doğru meyletmesiyle oluşan şekil bozukluğudur. Takım ile talaş arasındaki temas alanı üzerinde oluşan yüksek statik basma gerilmeleri takım tarafından desteklenemeyip elastik sınırın aşılmasıyla, kesme kenarlarında plastik deformasyon oluşur.

3.3. Kesici Takımda Aşınma Biçimleri

Önceki bölümde bahsi geçen aşınma mekanizmalarının etkisi ile takım üzerinde çok çeşitli aşınma biçimleri meydana gelmektedir. Bu aşınma biçimlerinin incelenmesi ile kesme koşullarının iyileştirilmesine ve takım ömrüne yönelik ipuçları elde edilir. Bu bölümde takım üzerinde oluşan en belirgin aşınma biçimleri tanıtılmaktadır.

3.3.1. Serbest yüzey aşınması

Serbest yüzey aşınması takımın yan yüzeyi ile iş parçası arasındaki temastan kaynaklanan sürtünme etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Bu temas nedeniyle, serbest yüzey takım aşınması tedricen yan yüzey üzerinde düzenli olarak gelişir. Serbest yüzey aşınmasının düzenli ve kademeli olarak gelişmesi diğer aşınma tiplerine nispeten daha uzun takım ömrü sağladığı için tercih edilen bir aşınma türüdür. Serbest yüzey aşınması kolay ölçülebilirliği ile takım ömrünün tayinini kolaylaştırdığından geliştirilecek bir TDG sistemi için en çok istenen aşınma tipidir.

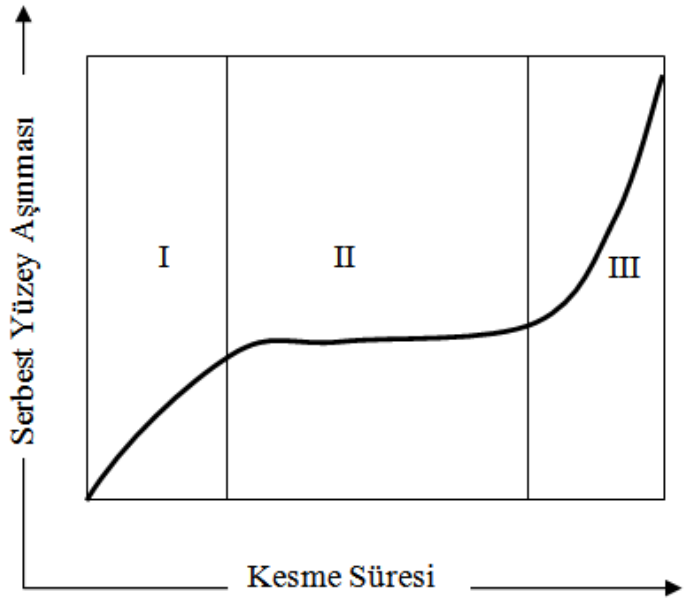
20. yüzyıl başlarında, F. W. Taylor, deneysel gözleme dayalı, özellikle serbest yüzey aşınmasını tanımlayan bir aşınma modeli geliştirmiştir. Taylor aşınma denklemi olarak bilinen bu denklem [73];

$$V_c t_l^n = C \tag{3.1}$$

şeklindedir.

(3.1) ile verilen denklem ile kesme hızı (V_c) ile t_l ile verilen takım ömrü arasındaki ilişki formülüze edilmiştir. Yine Taylor eşitliğinde bulunan *C* ve *n* deneysel olarak tanımlanan sabitlerdir. Belirtilen bu sabitler tornalama, delik delme ve frezeleme işlemine göre değişiklik gösterir. Dolayısıyla, prosesten bağımsız varsayılan katsayılar, modelin güvenilirliğini düşürür.

Şekil 3.7. ile gösterildiği üzere, serbest yüzey aşınmaları zamana bağlı olarak farklı şekilde gelişen S şeklinde bir eğri üzerinde genellikle üç farklı alanda ifade edilir.



Şekil 3.7: Serbest yüzey aşınma süreci.

S eğrisi üzerinde gösterilen I. bölgede takım aşınması en hızlıdır çünkü takım yanal yüzeyi ile iş parçası arasında sürtünme boşluğu minimum seviyededir. Bu bölge içinde kesici takım temas noktasından başlayacak şekilde nispeten daha hızlı aşınır ve ölçülebilecek bir aşınma alanı bırakır. II. Bölgede aşınma sabit bir oranda ve yine tahmin edilebilir şekilde gelişir. II. Bölge aynı zamanda takım ömrü açısından en geniş alanı kapsamaktadır. Bu alanda geçirilen uzun bir süre takımı ömrünün de optimize edildiğinin göstergesidir. Elbette aşınmaya devam eden kesici sonunda III. bölge içine girer. Bu bölgede kesme esnasında ısı ve kuvvetlerde aşırı bir artış ve buna bağlı olarak aşınmada da artış gözlenir. Sonunda, kesme kuvvetleri öyle bir

noktaya ulaşır ki, kesicinin mukavemet sınırlarını da aşarak kesicinin kırılarak kullanılamaz hale gelmesine neden olur. Dolayısıyla geliştirilecek TDG sisteminin takım bu bölgeye girmeden önce uyarı vermesi beklenir.

3.3.2. Krater aşınması

Krater aşınması, takım sıcaklığının en yüksek olduğu talaş yüzeyi üzerinde meydana gelen çökme formundaki aşınma biçimidir. Krater aşınması süresince artan sıcaklıklar nedeniyle, sıcak talaş ve talaş yüzeyi arasında kimyasal bozulma gerçekleşir. Bu kimyasal etkileşim nedeniyle, takım malzemesinden talaş içine karbon atomlarının geçişi ve çözünmesi söz konusu olur. Bu durumda, talaş yüzeyi üzerinde akmaya devam eden talaş, kaybedilen karbon nedeniyle sertliğini kaybeden takımı kolay bir şekilde aşındıracaktır. Krater aşınması oluşmaya başladıktan sonra sıcaklık hızla yükselirken, difüzyon artar ve yine bu etki ile krater aşınması hızla büyüyerek takım kırılana kadar devam eder.

Krater aşınması talaş yüzeyinin açısını sürekli değiştirir. Bu değişiklilik nedeniyle kesme kuvvetlerinde yer yer düşmeler de gözlenebilir [74]. Ancak krater aşınması takımın zayıflamasına neden olduğundan, her an değişen kesici kenar geometrisi ile orantılı artan kuvvet etkisi, takımı hızla kırılma aşamasına götürür.

3.3.3. Çentik aşınması

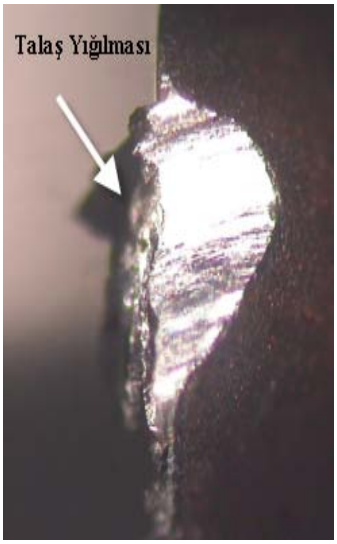
Çentik aşınması, paso derinliği hattında kesici kenar üzerinde oluşan oluk şeklindeki aşınmadır. Çentik aşınması, takımın serbest yüzeylerini ve talaş yüzeyini etkileyebilir. Başta adezyon ve oksidasyon gibi mekaniksel ve kimyasal aşınma mekanizması ile çentiklenme sürecinde, iş parçasının sert yüzeyi, kesiciyi kenardan aşındırır. Kullanılan bir soğutucunun neden olduğu veya takım ile atmosfer arasındaki kimyasal reaksiyon veya korozyon nedeniyle oluşan oksidasyon da çentik aşınmasına neden olur [69].

Çentik aşınması, aşınma direnci zayıf takımların oksidasyonu, aşırı mekanik kuvvetler veya yanlış takım geometrisi seçimi nedeniyle oluşmaktadır. Daha iyi

kalite takım seçimi, problemin çözümü olarak takım imalatçıları tarafından tavsiye edilse de, bu çalışmada da kullanıldığı üzere nikel bazlı işlendiğinde pekleşebilen çeşitli süper alaşımları uzun süre sorunsuz kesmek için henüz geliştirilmiş bir takım yoktur. Mevcut takım teknolojisi nedeniyle, bu tür süper alaşımların kesiminde ve dolayısıyla bu çalışmada da yer yer karşılaşılan bir aşınma biçimi olarak gözlenmiştir.

3.3.4. Talaş yığılması

Kesme koşullarının tetiklediği yüksek sıcaklıklar ve basınçlar kesicileri çok değişik şekillerde etkileyebilir. Şekil 3.8 ile verildiği üzere, talaş yığılması olarak adlandırılan problem, iş parçası malzemesinin takımın serbest ve talaş yüzeyine kaynak yapmasıdır.



Şekil 3.8: Çalışmada Inconel 718 frezelenmesinde gözlenen talaş yığılması.

Kesme esnasında oluşan çok yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle bir kısım talaş takımın kesici ucuna sıvanır. Talaş yığılması, kesme anında takımın gerçekte aşınmadan körelmiş gibi davranmasına neden olabilir. Bir diğer etkisi ise, talaş yığılması yırtıldığı zaman kötü yüzey kalitesi ve kesme kenarında tanecik kopmasına yol açmasıdır [70].

3.4. Takım Ömrü Kriterleri

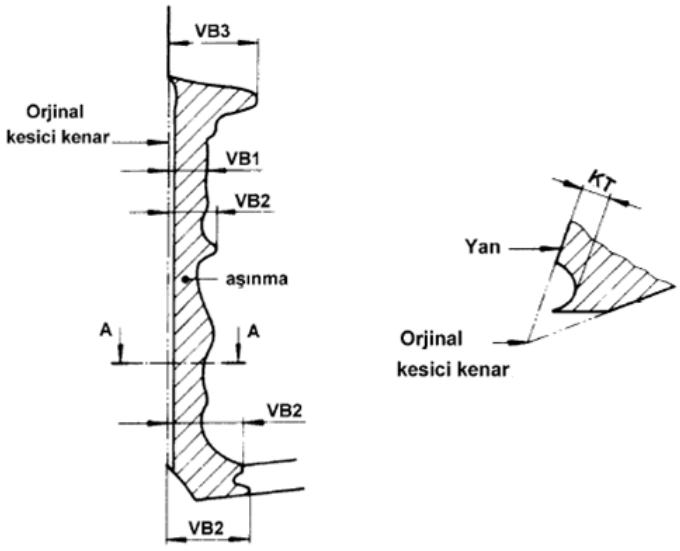
Önceki bölümlerde bahsi geçtiği üzere takım her ne sebeple aşınmış olursa olsun, aşınma arttıkça yüzey kalitesi veya ölçüsel kesinlikte sapmalar olacaktır. Ancak takımın yan yüzeyinde gözlenen serbest yüzey aşınması (VB) ile takımın talaş yüzeyi üzerinde gözlenen krater aşınması takım ömrünü belirleyen baskın aşınma tipleridir.

Şekil 3.9 ile gösterildiği üzere, tipik bir serbest yüzey aşınması (VB) ise 3 ana bölgede sınıflandırılabilir [75];

- Düzenli yan aşınma (VB 1): serbest yüzey üzerinde düzenli bir dağılım gösteren ve sabit bir genişlikteki aşınma bölgesi,

- Düzensiz yan aşınma (VB 2)**:** serbest yüzey üzerinde şekilsiz bir genişlikte gelişen takım burnuna yakın oluklu aşınma tipi

- Bölgesel yan aşınma (VB 3): genelde kesme derinliği hattında, öncü kesici kenar üzerindeki belirli bölgelerde yoğunlaşan abartılı yan aşınma biçimi



Şekil 3.9: Yanal ve krater aşınma tipleri [75]

Krater aşınması ise, Şekil 3.9 ile gösterildiği üzere KT ile ifade edilmiştir.

Standartta takım ömür kriteri olarak, belirli takım aşınma tiplerine göre önceden belirlenmiş birer sayısal değer tanımlanmıştır. Belirli bir yan aşınma (VB) genişliği en yaygın kullanılan kriter olarak, takım ömrü sonu

- Düzenli aşınma için: tüm kesici ağızlarda ortalama 0,3 mm
- Bölgesel aşınma: herhangi bir ağız için en fazla 0,5 mm

olacak şekilde TS ISO 8688-2 standardında tavsiye edilmiştir [75].

Her ne kadar ISO standartlarında genel itibariyle takım ömür kriterleri belirlenmiş olsa da, evrensel kabul görmüş tek bir takım ömrü kriteri yoktur. Bunun nedeni, endüstriyel uygulamalarda takım ömrü kriterinin, üretim amaçlarına göre belirlenmesidir. Üretici, imalattaki toleranslara göre takım ömrü için herhangi bir aşınma tipindeki maksimum kabul edilebilir seviyedeki aşımayı limit olarak kabul edecektir.

4. ÇEVRİMİÇİ TAKIM DURUMU GÖZLEM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN MALZEME VE YÖNTEMLER

Çevrimiçi bir TDG sistem, bir dizi sensör, sinyal işleme ara yüzü ve karar verici modelden oluşan bütünleşik bir sistemdir. Dolayısıyla bu çalışmada, çevrimiçi bir TDG sistemin tasarım sürecinde, başlıca sıralanan şu üç aşama gerçekleştirilmiştir;

- Planlama ve uygulama,
- Veri toplama ve analizi (sinyal işleme, istatistik öznitelik çıkarma),
- Karar verme,

Tezin bu bölümünde, geliştirilen çevrimiçi TDG sistemi için bahsi geçen bu üç ana safhanın kapsamı hakkında bilgi verilmektedir.

4.1. Çevrimiçi TDG Sistemi İçin Planlama ve Uygulama

TDG sistemi geliştiriminde bu aşama, deneysel tasarım, yapılan işlem ve dolayısıyla tezgâh tipinin seçimi ve ilgili ölçüm enstrümanlarının kullanılmasını kapsamaktadır.

4.1.1. Taguchi tabanlı deneysel tasarım

Bu çalışmada, deneysel tasarım için Taguchi'nin sunduğu deneysel tasarım planı kullanılmıştır. Taguchi metodu ile, deney faktörleri, bunların etkileşimi ve cevapları arasındaki ilişki analiz edilmektedir.

Taguchi'nin sunduğu, günümüzde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlayan bu istatistiksel yöntem, geleneksel deney tasarımlarına göre daha az sayıda ve aynı güvenilirlikte deneysel tasarım imkânı sunmaktadır. Deneysel tasarımın yanı sıra Taguchi metodu ile faktörler ve bunlara karşılık gelen cevaplara göre proses optimizasyonu yapmak ta mümkündür [76].

Çalışmanın deneysel tasarımında, Minitap [77] istatistiksel analiz yazılımı yardımıyla, standart bir Taguchi deney tasarımı (L9 - 3^3) oluşturulmuştur. Buna göre, Tablo 4.1 ile verilen 3 seviyede, 9 ayrı kesme deneyi koşulu belirlenmiştir.

Kesme koşullarının belirlenmesinde, radyal kesme derinliği (a_r) 1mm olacak şekilde sabit tutularak, kesme hızı (Vc), diş başına ilerleme (Sz) ve eksenel kesme derinliği (a_e) parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 4.1: Taguchi deney tasarımı, faktörler ve seviyeler

Faktörler ve Seviyeler			
Faktörler	Seviyeler		
	1	2	3
V_c, Kesme hızı (m/dak)	50	75	100
S_z, diş başı ilerleme (mm/diş)	0,06	0,09	0,12
a_e, eksenel kesme derinliği (mm)	0,3	0,45	0,6
a_r- radyal kesme derinliği (mm)	1	1	1

4.1.2. İş parçası ve kesici takım

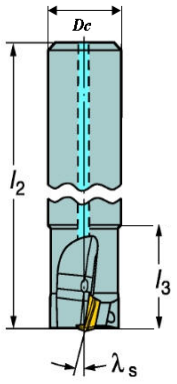
Çevrim-içi TDG sistemi geliştirilmesi için yapılan çalışmada, endüstride çok önemli bir yere sahip olan Inconel 718 malzemesi kullanılmıştır. Nikel bazlı Inconel 718 gibi süper alaşımlar, genellikle 650 C° ve üzeri çalışma sıcaklıklarında yüksek dayanım sağladıklarından dolayı, endüstriyel gaz türbinleri, uzay araçları, roket motorları, nükleer reaktörler, denizaltılar, buhar üretim ve petrokimya makinaları gibi çok çeşitli alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [78]. Elbette süper alaşımların sahip olduğu üstün mekaniksel özellikler, talaş kaldırma esnasında karşımıza bir dezavantaj olarak çıkar. Bu tür malzemeler, kesilmesi zor birer alaşım olarak sıradan kesicilerle kesilemeyeceği gibi, kesici takım ömürlerini de oldukça kısaltırlar. Dolayısıyla bu özel malzemenin işlenebilirliği ve buna ait takım aşınması, literatürde çok çeşitli çalışmalarla incelenmektedir [78-84].

Çalışmanın deney safhasında Tablo 4.2 ile kimyasal ve fiziksel özellikleri verilen, 70 x 62 x 70mm ebatlarında ortalama 41 HRC sertlikteki Inconel 718 blok malzeme kesilmiştir.

Tablo 4.2: Inconel 718 kimyasal ve fiziksel özellikleri

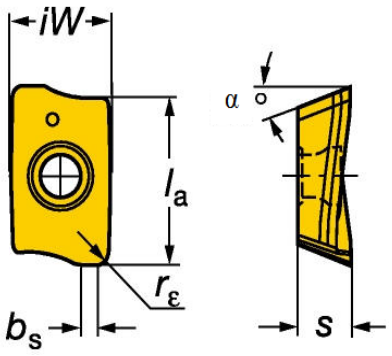
Element	İçerik (%)
Ni+ Co	50-55
Cr	17-21
Nb+Ta	4.75-5.5
Mo	2.8-3.3
Ti	0.65-1.15
Al	0.2-0.8
Fe	Denge
Fiziksel özellikler	
Yoğunluk	8.19g/cm^3
Ergime noktası	1336 C°
Elastik modülü	204.9 kN/mm^2

Süper alaşım kesimi için, özellikleri Şekil 4.1 ile verilen 16 mm çaplı kesici gövdesine, üretici firma tarafından önerilen ve özellikleri Şekil 4.2 ile verilen 9 adet değiştirilebilir takma uç Sandvik [85] kesicisi takılarak, deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir.



Parametre	***Değer***
Çap ***Dc***	16 mm
Takım boyu l_2	100mm
Ağız Uzunluğu l_3	25 mm
Talaş Açısı λ_s	13.43°
Ağırlık	0.238 kg
Kod	R390-016A16-11L

Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan takım gövdesi ve özellikleri [85]



Parametre	*Değer*
Ağırlık	0.0023 kg
iW	6.8 mm
S	3.59 mm
b_s	1.2mm
r_ε	0.8mm
α	21
Kod	R390-11 T3 08M-PL 1030

Şekil 4.2: Çalışmada kullanılan uç ve özellikleri [85]

4.1.3. Frezeleme deneyleri ve ölçüm enstrümanları

Deneysel çalışma için, döner tabla tip 5 eksen Deckel-Maho DMU 60P (Şekil 4.3) CNC tezgah kullanılmıştır. Frezeleme deneylerinde, Tablo 4.1 ile verilen kesme koşulları için, ProEngineer Wilfire 2.0 [86] yazılımı kullanılarak, düzlemsel ve aşağı yönlü takım yolu (CAM) stratejisi tercih edilmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmında, çeşitli tipte birden fazla sensör kullanılarak, çoklu sensör entegrasyon (sensör füzyon) tekniği uygulanması amaçlanmıştır. Deneylerde kesme esnasında üç eksende kuvvet ve tork ölçümü için özellikleri EK-A ve EK-B ile verilen rotasyonel tip dinamometre (Kistler Corporation, RCD-Model 9123C1111) kullanıldı. Tabla tipi dinamometrelerden farklı olarak, rotasyonel tip dinamometre, çok eksenli tezgâhlarda eksen hareketlerinden ve iş parçası ya da fikstürden kaynaklanan bağlama problemlerinden bağımsız, kuvvet ve tork ölçümü sağlaması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda da kolaylıkla kullanılabilmektedir.



Şekil 4.3: Deneysel kurulum ve kullanılan CNC tezgah

Kesme esnasında titreşim verilerinin ölçümü için başlangıçta, iş parçası tarafına yerleştirilen 3 eksen PCB Triaxial akselerometre (model 356A31-EK-C) ile kesici takım tarafında fener mili üzerine yerleştirilen tek eksen PCB akselerometre (model 353B11) olmak üzere 2 farklı akselerometre kullanıldı. Ancak özellikle en agresif kesme koşulunda yapılan kesme testlerinde, tezgah fener mili tarafına yerleştirilen yüksek hassasiyetli akselerometrenin kesme işlemine duyarlı olmadığı, sadece fener mili yataklarının gürültüsünü algılandığı gözlendiğinden, çalışmada deneysel kurulum içinde kullanılamamıştır.

Çalışmada ayrıca kesme anındaki akustik emisyonu ölçmek amacıyla, iş parçası tarafına, yüksek hassasiyet ve 100-400 kHz arasında geniş bir frekans aralığında çalışan akustik emisyon (AE) (Kistler 8152B2 –EK-D) sensörü yerleştirilmiştir. AE sensöründen gelen sinyaller 5125B1 bağdaştırıcısı (EK-E) vasıtasıyla veri toplama kartına aktarılmıştır.

Çalışmada başlangıçta kullanılması düşünülen bir diğer sensör ise, kesme yönü olan tezgahın X yönündeki tabla tahrik motoru ile fener milinin çektiği akım yükünü

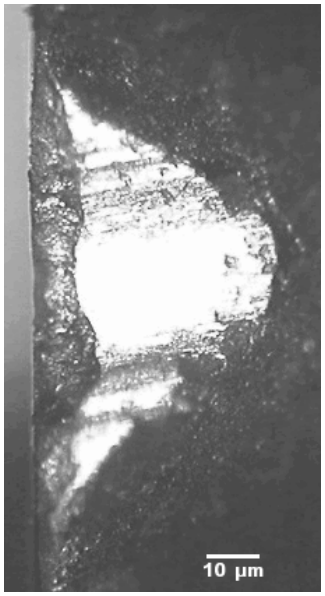
ölçmek maksadıyla yerleştirilen Hall-etki sensörüdür (Şekil 4.4). Ancak veri toplama esnasında tüm diğer sensörlerden gelen sinyalleri etkileyecek şekilde sinyallerde gürültü oluşturduğundan, bu sensör de çalışmada kullanılmamıştır.



Şekil 4.4: X yönündeki sürücü için yerleştirilen akım yük ölçeri

Böylelikle çalışmada, ölçülen her bir takım serbest yüzeyindeki makismum aşınma değerine karşılık gelen, üç eksen kuvvet ve tork, üç eksen akselerometre ile akustik emisyon sinyalleri toplanmıştır. Serbest yüzey aşınması (VB) ölçümleri, deney koşullarına bağlı olarak değişen takım ömürlerine göre gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ISO 8688-2 standardında tavsiye edilen 0.5 mm limiti, takım ömrü kriteri olarak kabul edilmiştir.

Serbest yüzey aşınma seviyeleri, 50X büyültme ölçeği ile Nikon Eclipse L150 mikroskop yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Maksimum serbest yüzey aşınmasına örnek (Vc=100m/min, a_e =0.3mm, Sz=0.06mm)

Inconel 718 malzemesinin frezelenmesi esnasında, takım serbest yüzeyi üzerindeki aşımanın düzensiz ve belirli bir bölgede yoğunlaşan abartılı bir biçimde geliştiği gözlenmiştir. Dolayısıyla, TS ISO 8688-2 ile tanımlanan "bölgesel yan aşınma (VB3)" tanımı deneylerde karşılaşılan dominant aşınma biçimidir. Bunun yanı sıra, deney esnasında çentik ve krater aşınması ile yer yer çeşitli aşınma ölçüm evrelerinde talaş yığılması da (Şekil 3.8) gözlenmiştir.

4.2. Çevrimiçi TDG Sistemi İçin Veri Toplama ve Analizi

Çevrimiçi TDG sisteminin en önemli aşamasının sensörlerden oluştuğu düşünülürse, veri toplama safhası, geliştirilecek olan TDG sisteminin belkemiğini oluşturacaktır. Ayrıca bu safhada, toplanan karmaşık sensör sinyalleri ön işlemlerden geçirilerek, sinyalin öznitelik vektörünün belirlenmesi sağlanır.

4.2.1. Veri toplama

Dinamometre, akselerometre ve akustik emisyon sensörlerinden gelen, 10 ayrı kanaldaki analog sinyal, National Instruments 6229 PCI [87] veri toplama kartı ile iki farklı, National Instruments BNC 2110 ve SCB 68 [87] bağlantı bloğu vasıtasıyla

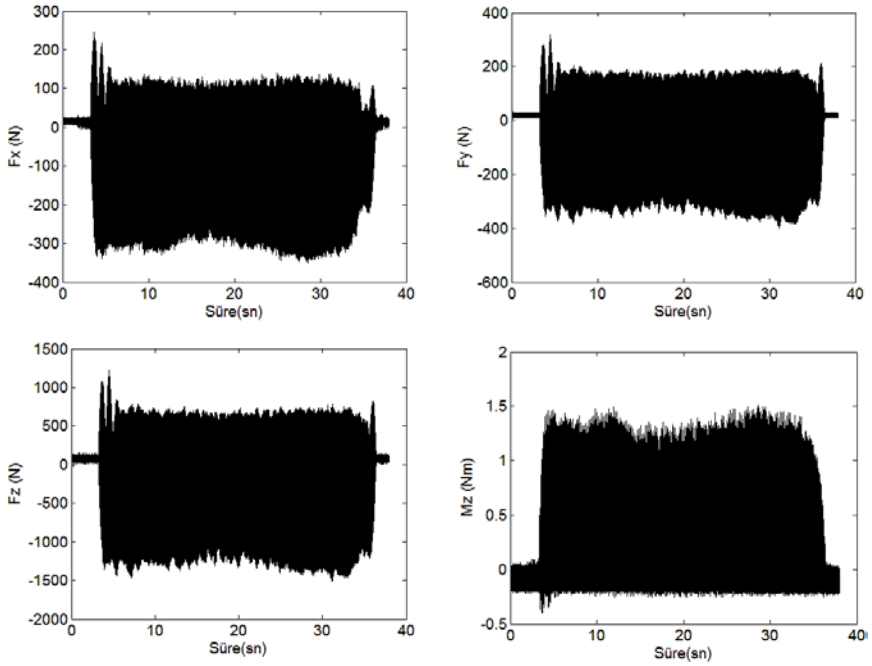
MATLAB DAQ Toolbox v2.9 [88] ile geliştirilen bir yazılımla 15 K/sn örnekleme oranı kullanılarak diferansiyel olarak toplanmıştır.

Frezeleme işlemlerine bağlı olarak, veri toplama kartının tetiklenme (trigger) prosedürleri ve veri toplama süresi uygulamadan uygulamaya değişiklik gösterebilir. Dolayısıyla bu konuda üç ayrı prensipten söz edilebilir;

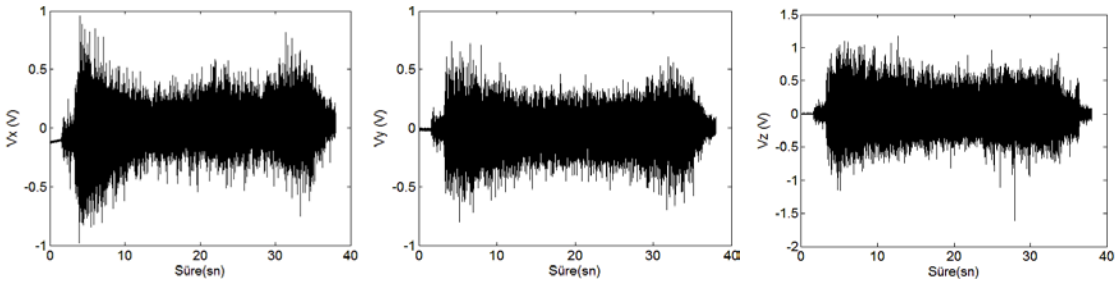
1) Kesme uzunluğuna göre belirlenen tetikleme
2) Dönme devrine göre yapılan tetikleme
3) Toplam veri toplama süresinin sınırlandırıldığı sabit süreli tetikleme.

Çalışmada birçok frezeleme işlemlerinden biri olan yüzey frezeleme işlemi uygulanmış, dolayısıyla veri toplamanın ve işlemenin otomatikleştirilmesi açısından çeşitli avantajlar sunan, kesme uzunluğuna göre veri toplanması yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu yaklaşıma göre kesici takımın parçaya girip kesmeye başladığı andan, kesmeyi bitirdiği süreye kadar olan kısım tetiklenme için kullanılarak veri toplanmıştır. Böyle bir yaklaşımla veri toplama kartı dışarıdan bir tetikleme ile veri toplamaya başlarken, yine harici bir tetikleme ile donanımsal olarak veri toplama süresi sınırlandırılabilir. Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 ile verilen çeşitli sensör sinyallerine bakıldığında, takımın parçaya girip kesmeye başladığı ve iş parçasından çıkışının net olarak ayırt edilebildiği bir kesme pasosu süresini içermektedir.

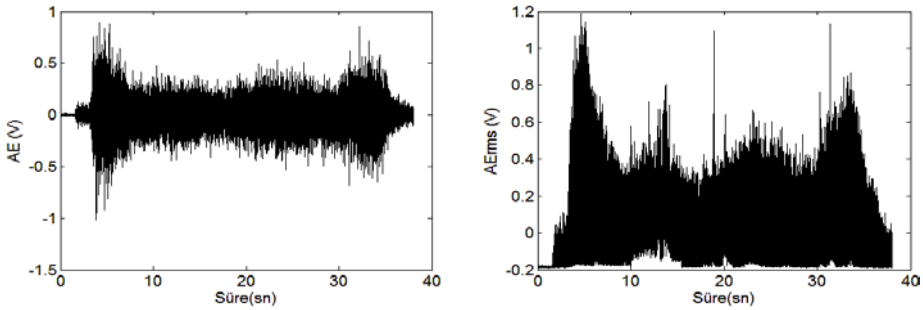
9 adet deneyde, toplamda 170 takım aşınma seviyesi ve bu duruma ait, üç eksen kuvvet ve tork, üç eksen akselerometre ile Akustik Emisyon sinyalleri eş zamanlı olarak toplanmıştır. Şekil 4.5 ile gösterilen aşınma durumu seviyesi için toplanan dinamometre verileri (kesme kuvvetleri ve tork – Fx, Fy, Fz, Mz) Şekil 4.6 ile, üç eksen akselerometre verileri (Vx, Vy, Vz) Şekil 4.7 ile ve akustik emisyon sensöründen elde edilen sinyaller (AE ve AErms) Şekil 4.8 ile örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Örnek dinamometre sinyalleri, (Fx, Fy, Fz, Mz),



Şekil 4.7: Örnek akselerometre sinyalleri, (Vx, Vy, Vz),



Şekil 4.8: Örnek akustik emisyon sinyalleri, (AE, AErms),

Şekil 4.8 ile verildiği üzere, AE sensöründen iki farklı sinyal (AE ve AErms) elde edilmektedir. AE sensörü 100-900 kHz gibi geniş bir frekans aralığında çalışabilmektedir. Ancak bu yüksek frekansları karşılayacak veri toplama sisteminin maliyet yüksekliği nedeniyle, çalışmada yine bu sensörden elde edilen ortalama AE

(efektif–AErms) sinyali kullanılmıştır. Şekil 4.8 ile verilen AE sinyali, bağdaştırıcıya entegre bir RMS hesaplayıcı vasıtasıyla, AErms sinyaline çevrilerek, sensörünün örnekleme açısından daha makul düzeylerde kullanılması sağlanılmıştır.

Çalışma sinyal toplama ve sinyal işleme süreci açısından değerlendirildiğinde, lokal ve global olmak üzere iki farklı yaklaşım incelenebilir. Lokal değerlendirmede tüm kesme işlemi boyunca toplanan sinyal yerine bu sinyalin belirli bir sürelik kısmı (örneğin bir devirlik süre) analize tabi tutulur.

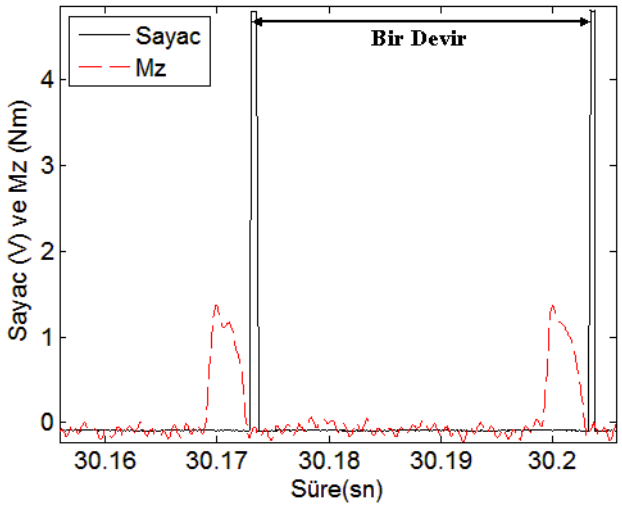
Şekil 4.9 ile verilen dinamometre üzerinde işaretli çentik, statöre yerleştirilen bir alıcı vasıtasıyla algılanabildiğinden, bu çentik ile kesme ucu hizalandığında kesici pozisyonu veya devir bilgileri lokal değerlendirmeler için kullanılabilir. Deneyler süresince, takım kesici kenarı ile sayaç çentiği dinamometrenin Y ekseni üzerinde hizalanmıştır.



Şekil 4.9: Deney kurulumu, dinamometre sayaç çentiği

Şekil 4.9 ile gösterilen sayaç çentiği mantığına benzer olarak literatürde yakınlık (proksimiti) sensörü, devir bilgisini çıkarmak maksadıyla kullanılmaktadır.

Dinamometre üzerindeki bu özellik ile, Şekil 4.10'da örnek olarak gösterilen Mz sinyaline benzer şekilde, devir başına elde edilen diğer sinyaller ayrıştırılarak, istatistiksel öznitelik çıkarma işlemine tabi tutulabilir.



Şekil 4.10: Dinamometre sayaç ve eşzamanlı tork (Mz) sinyali

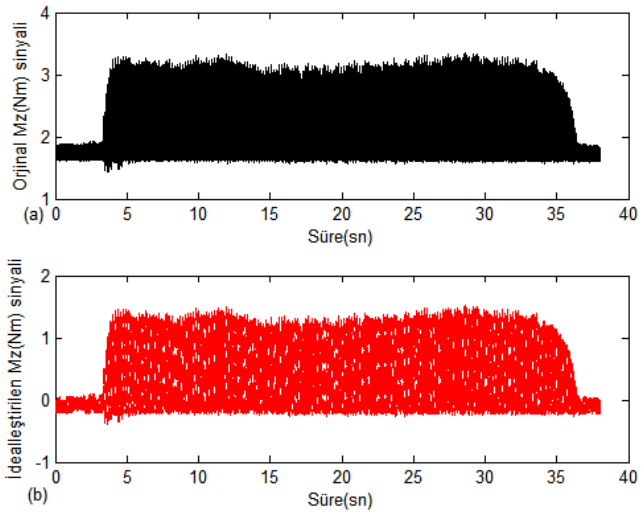
Ancak literatürde bir devir için uygulanan lokal analiz yönteminin, TDG sistemlerinde kullanılabilmesi, genellikle donanıma bağlı bir takım mahsurlarının giderilmesine bağlıdır. Bu kısıtlamalar,

- sinyal toplama esnasında, devir başına tetikleme prosedüründe süre kayması, nedeniyle, devrin tam olarak yakalanamaması
- sinyalde herhangi bir nedenden dolayı, anlık tepe değerlerinin oluşması,
- sinyalde olası orijinden sapma (kaymaların) gözlenmesi

şeklinde sıralanabilir. Donanımsal bu tür kısıtlamalara ek olarak, devir başına değerlendirmeler üniversal bir çözüm sunmadığından bu çalışmada global değerlendirme yaklaşımı kullanılmıştır.

Global değerlendirmede, takımın iş parçasını kesmeye başladığı andan, iş parçasından çıktığı yani kesmenin bittiği ana kadar toplanan sinyal dikkate alınarak, öznitelik vektörünün oluşturulmasında kullanılmıştır.

Şekil 4.11(a) ile örnek bir sinyal üzerinde gösterildiği üzere, gerçekte birçok etken dolayısıyla sensörlerden alınan sinyal, orijin ekseninden kaymaktadır.



Şekil 4.11: Orijinal tork (Mz) sinyali (a), idealleştirilen tork (Mz) sinyali (b)

Deney esnasında çoğu zaman karşılaşılan bu durum, özellikle zaman ve istatistiksel alanda yapılan analizler ile doğru tahminler yapılmasını engelleyecektir.

Global yaklaşımda bu problemin çözümü için, sunulan yöntem basittir. Şekil 4.11(b) ile gösterildiği üzere, sensörlerden gelen tüm sinyaller, orijine göre bir öteleme ile sapma kompanzasyonu yapılarak idealleştirilebilir.

4.2.2. Öznitelik çıkarma

Çoğu zaman sensörlerden toplanan sinyaller çeşitli analiz yöntemleri ile incelemek için çok geniş hacme sahiptir. Ayrıca toplanan sinyaller bu kadar büyük hacimle orantılı anlamlı bilgi taşımayabilirler. Toplanan sinyallerin geniş bir ölçüte sahipken işlenerek, sinyali ifade eden anlamlı daha düşük boyutlara indirgenmesine istatistiksel öznitelik çıkarma işlemi denilmektedir.

Literatüre [89] bakıldığında aşınma süreci için öznitelik çıkarma işleminin sıralan dört ana kısımda toplandığını görmekteyiz;

- Zaman alanı: sinyalin maksimum, minimum gibi belli zaman aralıklarındaki değerleri,
- Frekans alanı: sinyalin, toplam güç, farklı spektral bantlardaki güç gibi Fourier dönüşümü yardımıyla bulunan katsayılar,
- İstatistiksel alanda: ortalama, varyans, çarpıklık, kurtosis, medyan gibi istatistiksel öznitelikler, ayrıca zaman serileri, otoregrasyon veya otoregresif hareketli ortalamalar model (AR-ARMA) katsayıları, lineer öngörücülü kodlama (Linear Predictive Coding - LPC) katsayıları gibi parametrik modellemeye ait bir takım sabitler,
- Zaman-frekans alanında, dalgacık (Wavelet) dönüşümü katsayıları, S dönüşümü katsayıları.

Hangi öznitelik çıkarma yöntemi kullanılırsa kullanılsın amaç her zaman aşınma ile ilişkiyi vurgulayan en uygun özniteliğin seçimi olacaktır. Bu amaca göre, çalışmada hem zaman bölgesi ve hem de frekans bölgesinde analizler yapılarak sensörlerden elde edilen sinyallerden istatistiksel öznitelikler çıkarılmıştır. Ancak aşınma için, zaman ve istatistiksel alandaki analizler, frekans alanındaki analizlere göre düşük hesap maliyeti ile yüksek hız ve güvenilirlik sunduğundan [90], bu çalışmada mümkün olduğunca zaman ve istatistiksel alan özniteliklerinin kullanılması tercih edilmiştir.

4.3. Çevrimiçi TDG Sisteminde Kullanılan Karar Verme Algoritmaları

Takım durumunun tahmini, çevrimiçi TDG sisteminin son basamağında yer alır. Bu safhada, sensörlerden alınan verilere göre çıkarılan uygun istatistiksel öznitelikler kullanılarak bir karar verilir. Böylelikle, aşınma durumu güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmelidir.

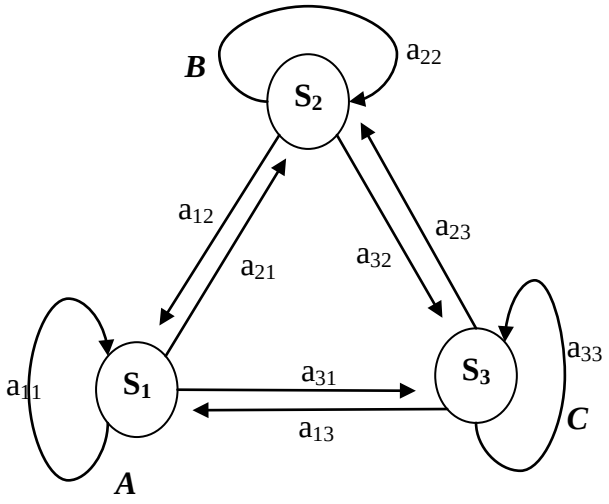
Bu çalışmada, birbirinden farklı sensör ve yine birbirinden farklı istatistiksel öznitelik unsurları kullanılarak aşınma durumuna karar veren 3 farklı karar modeli

uygulanmıştır. Bu başlık altında, kullanılan karar algoritmalarının teorileri anlatılmaktadır.

4.3.1. Saklı Markov model

Saklı Markov Model (SMM), eğitim, pazarlama, sağlık hizmetleri, finans, hedef tanımlama, ses tanıma, bilgisayar ağları gibi birbirinden farklı birçok alanda başarıyla uygulanmaktadır. Özellikle günümüz karmaşık ses tanıma yazılımlarında başarıyla kullanılan temel algoritma olarak tanınan Saklı Markov (SM) Modellerin yaygın olarak kullanımı, Baum [91] ve arkadaşlarının 1960 ve 1970 li yıllarda ses tanıma üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalar üzerine başlamıştır.

SMM sonlu bir dizi durum ve her bir durumun birbiri ile bir olasılık dağılımı ile bağlandığı, Markov zincirinin özel bir halidir. Markov zinciri, bir dizi durum ve bu durumların birbirine geçiş olasılıkları ile bağlandığı, belirli değerler üreten rastgele bir sürecin tanımıdır. Farklı zaman aralıklarında zinciri ifade eden sistem, bu durumlardan biri üzerindedir. Sistemdeki her bir durumun birbirine geçişi yani durum değişikliği ise bir olasılık değerle ilişkilendirilir. Her bir durum ise yine bir çıktı (cevap) ile ilişkilidir. Markov özelliğini taşıyan bu süreçte, durum geçiş olasılıkları geçmiş durum olasılıklarına değil, sadece mevcut durum geçiş olasılıklarına bağlıdır.



Şekil 4.12: Üç durumlu bir Markov zincirine örnek

Üç durumlu basit bir Markov zinciri Şekil 4.12 ile verilmiştir. Markov prosesinde, S_1, S_2 ve S_3 durumları ve (a_{ij}) ise bu durumlar arasındaki geçiş olasılıklarını temsil ederken, A, B ve C ile gösterilenler ise gözlemleri temsil etmektedir.

Şekil 4.12 ile verilen süreçlerin modellenmesinde kullanılan Markov zinciri analitik olarak, herhangi bir (t=0,1,2…) anda ve bu zamana denk gelen tüm belirli durumlar (q_t) için şu şekilde yazılabilir [92];

$$P(q_{t+1} = S_{t+1} | q_t = S_t , q_{t-1} = S_{t-1} , \ldots, q_1 = S_1 , q_0 = S_0) =$$
$$P (q_{t+1} = S_{t+1} | q_t = S_t) \qquad (4.1)$$

(4.1) ile verilen birinci dereceden Markov zincirine göre, t+1 zamanındaki durumun olasılık dağılımı, (t(S_t)) anında gerçekleşen duruma bağlıdır.

Süreksiz veya sürekli olabilecek gözlem olasılıklarını oluşturmakta SM modelin yeteneği, aynı zamanda süreç içinde SM modelin herhangi olası durum gözlemini oluşturma kabiliyetini sunmaktadır.

Yukarda verilen Markov zinciri şeklindeki durumlar arası geçişler, geçiş olasılıkları adı verilen bir dizi olasılık ile sağlanır. Dolayısıyla, ilişkili olasılık dağılımına bağlı olarak, belirli bir durum için bir sonuç veya gözlem oluşturulabilir. SM modelde durumlar doğrudan gözlemlenebilir değildir. Ancak, modelde belirlenen herhangi bir durum için, belirli bir olasılık değerini veren gözlemlenebilir bir cevap üretilir. Saklı Markov model belirli bir sonuç veren proses hakkında tahmin yürütürken, gerçekte proses altında gerçekleşmekte olan prosedürlere bakılmaksızın, sadece gözlemlere bakılır. Süreçte sadece çıktı gözlenebilirken, durum saklı kalır ve bu yüzden süreç "Saklı" Markov Model olarak adlandırılmıştır.

Saklı Markov Model şu parametreleri ile karakterize edilir [91,93,94];

- *N*, modeldeki durum sayısı;her bir durum S={S_1,S_2,…,S_N} ile ifade edilir.
- *M*, gözlem sembolleri sayısı, eğer gözlemler kümesi sürekli ise *M* sonsuz olacaktır.
- Q = { q_0, q_1,…,q_{N-1} } olası durum kümesi ,
- V ={ v_0, v_1,…,v_{M-1} } olası gözlem kümesi,
- A= $\{a_{ij}\}$ Durum geçiş olasılık dağılımı; *i, j,* = 0, 1, …, *N*-1 olmak üzere;

$$p(q_{t+1} = j \,|\, q_t = i) \tag{4.2}$$

(4.2) ifadesinde, p durum geçiş olasılığı olarak, *t* anında ve *i* durumunda belirlenen t+1 anında *j* durumunda olma olasılığıdır. q_t ise, *t* anındaki durumu gösteren bir değişkendir. Markov zinciri kabullerine göre durum geçiş olasılık dağılımı (a_{ij}) zamandan (*t*) bağımsızdır ve;

i, j, = 0, 1, …, *N*-1 için, $a_{ij} \geq 0$ (4.3)

$$\sum_{j=0}^{N-1} a_{ij} = 1 \tag{4.4}$$

A matrisi $N \times N$ boyutludur.

- B= $\{b_j(k)\}$, durum *j* için, gözlem geçiş olasılık dağılımı. Herhangi *t* anındaki bir gözlemin O_t, verilen *j* durumuna göre koşullu olasılık dağılımı;

$$b_j(k) = p(o_t = V_k \,|\, q_t = j)$$

ise, burada p, durum j için, V_k gözlemlenme olasılığıdır. Bu durumda

$b_j(k) \geq 0$ olmak üzere

$$\begin{cases} 0 \leq j \leq N-1 \\ 0 \leq k \leq M-1 \\ 0 \leq j \leq N-1 \end{cases} \quad \text{koşulları için} \tag{4.5}$$

$$\sum_{k=0}^{M-1} b_j\,(k) = 1 \tag{4.6}$$

olacak şekilde stokastik kısıtlamaların sağlanması gerekir.

o $\pi = \{\pi_i\}$, başlangıç durum olasılık vektörüdür.

$$\pi_i = p(q_0 = i) \tag{4.7}$$

burada $i = 0,1,\ldots,N-1$ olmak üzere, π_i , deney başlangıcındaki (t=0) anı için i durumunda olma olasılığıdır.

O = (O_0, O_1,…,O_{T-1}) gözlem sırası ise, T (t = 0, 1,…, T-1) gözlem sayısıdır ve Q =(q_0, q_1,…,q_{T-1}) ile verilen, N^T olası durum dizisi söz konusudur.

Buraya kadar verilen açıklamalara göre, bir SM model daha sade bir notasyonda; $\lambda = (A, B, \pi)$, üçlüsü ile ifade edilir.

Bir SM model için;

- Değerlendirme
- Çözüm
- Öğrenme

olmak üzere başlıca 3 temel problem söz konusudur [91-94];

"Değerlendirme problemi", verilen bir gözlem dizisi (O = (O_0, O_1,…,O_{T-1})) ve SM ($\lambda = (A, B, \pi)$) modele göre, gözlemlerin olasılıklarının bulunması ($P(O|\lambda)$) safhasını kapsar.

Bu problemin çözümünde en sade ve anlaşılır yöntem, sabit bir durum sırasına göre $P(O|Q, \lambda)$ değeri hesaplanarak, $P(Q|\lambda)$ ile çarpımından sonra tüm olası durumlarla ($tüm_Q = q_0, q_1, \dots, q_{T-1}$) toplamaktır;

$$P = (O|\lambda) = \sum_{tüm_Q} P(O|Q, \lambda)\, P(Q|\lambda) \tag{4.8}$$

(4.8) eşitliği ile verilen algoritmada, çarpma işlemlerinden kaynaklanan hesap maliyetinin yüksek olması nedeniyle, literatürde [93] bu hesaplamaları en aza indiren ve ileri-geri hesaplama prosedürü olarak adlandırılan çözüm yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

"Çözüm problemi", verilen belirli bir model (λ) ve bir gözlem sırası (O = (O_0, O_1,…,O_{T-1})) için, en yüksek ihtimalli durum sırasının (Q = (q_0, q_1,…,q_{T-1})) bulunmasıdır. Bu problemin çözümünde birçok alternatif yöntem uygulanabilirse de, günümüzde en yaygın kabul gören yöntem 1967 yılında Andrew J. Viterbi tarafından sunulan Viterbi algoritmasıdır.

Problemin çözümündeki mantık ise, P(O,Q|λ) olasılığını maksimize eden en uygun Q değerinin hesaplatılmasıdır,

$$\delta_t(i) = max_{q_1, q_2, \dots, q_{t-1}}\, P\,[\, q_1, q_2, \dots, q_t = i, o_1 o_2 \dots o_t | \lambda] \tag{4.9}$$

Viterbi algoritması 4 aşamada gerçekleşitirilir;

1. Ön değer atama*:*

$1 \le i \le N$ için

$$\delta_1(i) = \pi_i b_i(O_1) \tag{4.10}$$

$$\psi_1(i) = 0 \tag{4.11}$$

Burada, δ_1 , t=1 anındaki ilk gözlem sembolü için (O_1) olasılığı ve ψ ise, her bir zaman için en uygun durumun saklandığı değişkeni ifade etmektedir.

2. Özyineleme:

$$\begin{cases} 2 \leq t \leq T \\ 1 \leq j \leq N \end{cases} \quad \text{için} \quad \delta_t(j) = max_{1 \leq i \leq N} \left[\delta_{t-1}(i) a_{ij}\right] b_j(O_t) \tag{4.12}$$

(4.12) ile verilen ifade de $\delta_t(j)$, t anında j durumundaki gözlem için maksimum olasılık değerini verirken, $\psi_t(j)$ değişkeni ile, $\delta_t(j)$ değişkenini her bir iterasyon için maksimize eden argumanlar saklanır:

$$\begin{cases} 2 \leq t \leq T \\ 1 \leq j \leq N \end{cases} \quad \text{için} \quad \psi_t(j) = argmax_{1 \leq j \leq N}[\delta_{t-1}(i) a_{ij}] \tag{4.13}$$

3. Sonlandırma:

$$P^* = max_{1 \leq i \leq N}[\delta_t(i)] \tag{4.14}$$

$$q_T^* = argmax_{1 \leq j \leq N}[\delta_t(i)] \tag{4.15}$$

Burada, P^*, i durumunda sonlandırılan, $\delta_t(i)$ değişkeninin maksimum olasılılığını ve q_T^* ise en uygun çözüm yolunu verir.

4. Geri izleme:

$$t = T-1, T-2, \ldots 1 \quad \text{için} \quad \delta_t^* = \psi_{t+1}(q_{t+1}^*) \tag{4.16}$$

Bir kere q^* hesaplandıktan sonra tüm durum dizisi, son durumdan ilk duruma kadar geriye doğru, ψ_t değişkeni ile saklanan argumanlar vasıtasıyla yeniden elde edilecektir.

"Öğrenme problemi", olarak adlandırılan problem, gözlem dizisinin olasılığının ($P(O|\lambda)$) maksimize edilmesi için, en uygun SM model parametrelerinin ($\lambda = (A, B, \pi)$) ayarlanması sürecini kapsar. Analitik olarak çözümü bulunmayan bu problem için literatürde, Baum-Welch ve gradyan tabanlı çeşitli iteratif çözümler sunulmuştur [93].

Literatürde çözüm için yaygın kullanılan Baum–Welch algoritmasına göre, bir SM modelin parametrelerinin (A, B, π) iteratif olarak güncellenmesi ve geliştirilmesi için başlıca iki değişkenin tanımlanması gerekir. İlk değişken olan $\xi_t(i,j)$, t anında S_i ve t+1 anında S_j durumunda olma olasılığını veren, SMM durum geçiş olasılığı olarak adlandırılan değişkendir.

$$\xi_t(i,j) = P\big(q_t = S_i, q_{t+1} = S_j \big| O, \lambda\big). \tag{4.17}$$

Durum olasılığı olarak adlandırılan ikinci değişken $\gamma_t(i)$ ise, verilen bir gözlem dizisine (O = (O_0, O_1,…,$O_{T\text{-}1}$)) ve bir modele (λ) göre, t anında S_i durumunda bulunma olasığını gösterir:

$$\gamma_t(i) = \sum_{j=1}^{N} \xi_t(i,j), \qquad 1 \le i \le N, \qquad 1 \le t \le T \tag{4.18}$$

Bu noktadan sonra Baum-Welch algoritmasında yeniden değerlendirme formulleri olarak bilinen sıralanan şu formüller vasıtasıyla SMM parametrelerinin güncellenmesi sağlanır:

$$\bar{\pi}_i = \gamma_1(i) \qquad\qquad 1 \le i \le N \tag{4.19}$$

$$\bar{a}_{ij} = \sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i,j) \Big/ \sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i) \qquad 1 \le i \le N, 1 \le j \le N \tag{4.20}$$

$$\bar{b}_j(k) = \sum_{\substack{t=1 \\ O_t = V_k}}^{T} \gamma_t(j) \Big/ \sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(j) \qquad 1 \le j \le N, 1 \le k \le M \tag{4.21}$$

Bu çalışmada SMM, tork (Mz) sinyali ile eğitilerek, aşınmanın tahmininde kullanılmış ve performansı ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

4.3.2. Destek vektör makinası

Bu çalışmada, geliştirilen çevrimiçi TDG sistem için kullanılan bir başka model ise destek vektör makinası (DVM) algoritmasıdır. DV makinaları yönlendirmeli öğretim yöntemlerinden biri olarak hem sınıflandırma ve hem de regresyon tabanlı fonksiyonel modelleme için kullanılabilir. DVM ilk olarak 1970' li yılların sonunda Viladimir Vapnik tarafından tanıtılan istatistiksel öğrenme teorisi üzerine inşa edilen bir makine öğrenme algoritmasıdır. İlk DVM algoritması lineer sınıflandırıcı bir çekirdek ile ikili sınıflandırmayı destekleyecek şekilde tanıtılmıştır. Son 10 yılda ise DV makinaları doğrusal ve doğrusal olmayan verileri sınıflamada çeşitli çekirdek fonksiyon eklemeleri ile artan bir kapasiteye kavuşarak, özellikle çok büyük boyutlu verilerin sınıflandırılmasında kullanılır hale gelmiştir.

Sınıflandırma problemlerinin çözümünde kullanılan DV makinaları, doğrusal ve doğrusal olmayan DVM olmak üzere başlıca iki kısıma ayrılmaktadır.

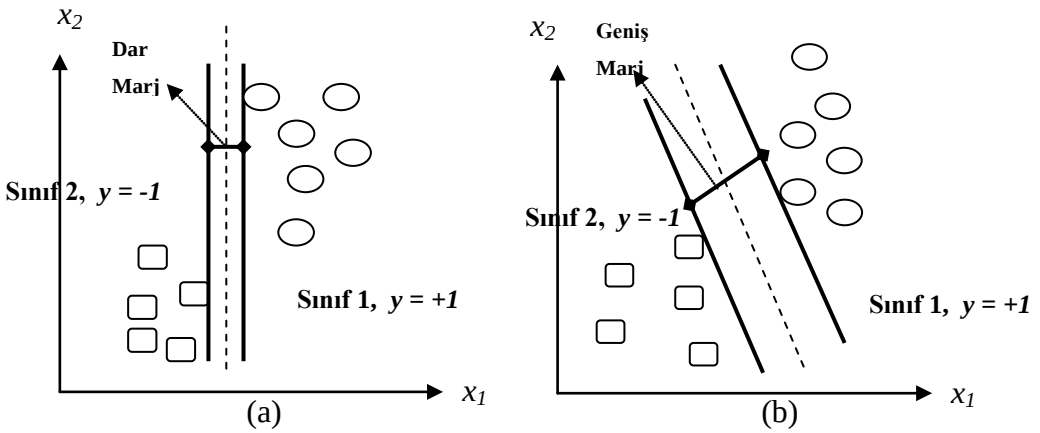
4.3.2.1. Doğrusal destek vektör makinaları

Bir sınıflandırma problemi için doğrusal olarak ayrılabilir bir veri dizisi olduğu varsayıldığında;

$$\begin{cases} x_i \in \mathbb{R}^d \\ y_i \in \{+1, -1\} \end{cases} \qquad (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_l, y_l) \tag{4.22}$$

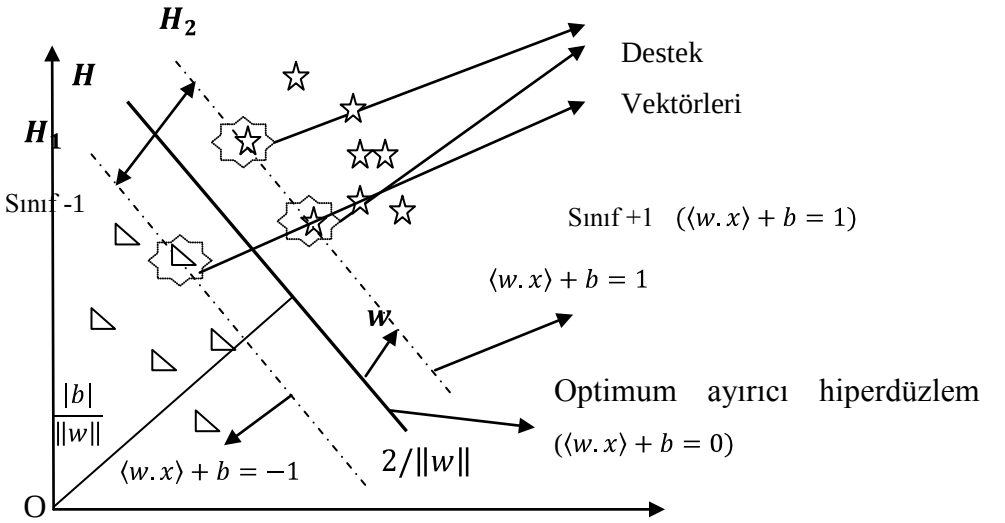
amaç, bu veri dizisine göre en uygun karar fonksiyonunu bularak, eğitim dizisinden farklı verilen bir başka veri dizisini en doğru şekilde iki sınıfa ayırmaktır. DVM algoritmasında, ayırıcı bir düzlem olarak kullanılan bir hiperdüzlem vasıtasıyla, veri dizisi iki farklı gruba ayrılır. DV makinaları için temel nokta belirlenen bu ayırıcı hiperdüzlemin, ayrıştırılan iki sınıfa eşit mesafede (marj) olmasını sağlayacak, optimum hiperdüzlemin araştırılmasıdır.

Doğrusal olarak ayrılabilen bir veri dizisinde, sınıflandırmayı sağlayacak farklı birçok hiperdüzlemin bulunması en uygun ayırma hiperdüzleminin bulunmasını gerektirecek bir dizi seçim prosedürü uygulanmasını gerektirecektir.



Şekil 4.13: Ayırma düzlemleri, (b) geniş marj, tercih edilen sınıflandırma [95]

Verileri iki sınıfa ayırma işleminde kullanılacak hiperdüzlemin seçiminde minimum sınıflandırma hatasını sağlamak için en uygun ayırma hiperdüzleminin bulunması gerekir. Dolayısıyla DVM algoritması, doğrusal olarak ayrılabilen durumlar için en uygun seçim kriteri olan marjın maksimum olduğu (örneğin Şekil 4.13 b) ayrışma hiperdüzlemini araştırır.



Şekil 4.14: Optimum ayırıcı hiperdüzlem ve destek vektörleri

Şekil 4.14 ile verildiği üzere, veri dizisini pozitif ve negatif olmak üzere etiketleyerek ayıran hiperdüzlemler olduğu varsayıldığında, hiper düzlem üzerindeki herhangi bir nokta olan *x* noktası karar fonksiyonundaki $d(x, w, b)$ [96];

$$d(x, w, b) = \langle w\,.x\rangle + b = w^T x + b = \sum_{i=1}^{l} w_i\, x_i \tag{4.23}$$

eşitliğini sağlayacaktır. Burada w hiperdüzleme normal olacak şekilde hiperdüzlemin doğrultusunu ayarlamakta kullanılan ağırlık vektörüdür. Skaler bir eşik değeri olan b ise, hiperdüzlemi kendisine paralel olacak şekilde ötelemeyi sağlar [97]. Dolayısıyla DVM algoritmasının eğitim sürecinde, bir karar fonksiyonunun parametreleri olan $w = [w_1\, w_2\, \ldots w_N]^T$ ve b bulunmalıdır.

Şekil 4.14 ile gösterildiği üzere, tüm eğitim veri setinin iki sınıfa ayrılmasında sıralanan şu kısıtlamaların sağlanıldığı düşünüldüğünde;

$$y_i = +1\ için\ x_i\,.w^T + b \geq 1 \tag{4.24}$$

$$y_i = -1\ için\ x_i\,.w^T + b \leq -1 \tag{4.25}$$

$i = 1,2, \ldots, N$ için aşağıdaki şekilde formülüze edilir [98].

$$y_i(x_i.w^T + b) - 1 \geq 0 \tag{4.26}$$

Karar fonksiyonundaki parametreler (w, b) vasıtasıyla bir x noktası ile hiperdüzlem arasındaki mesafe:

$$d(x; w, b) = \frac{|w.x + b|}{\|w\|} \tag{4.27}$$

olarak tanımlanır, böylelikle hiperdüzlem üzerindeki bütün noktalardan sadece biri orijine minimum uzaklıkta olacak şekilde optimum ayırıcı hiperdüzlem orijine;

$$d_{min} = \frac{|b|}{\|w\|} \tag{4.28}$$

uzaklıktadır . Şekil 4.14 ile gösterilen, H_1 ile tanımlı, $x_i.w^T + b = -1$ eşitliğini sağlayan alt hiperdüzlemle orijin arasındaki mesafe $|-1 - b|/\|w\|$ ve H_2 ile tanımlı $x_i.w^T + b = +1$ eşitliğini sağlayan alt hiperdüzlemi ile orijin arasındaki mesafe $|1 - b|/\|w\|$ olacaktır [98-100]. Optimum ayırıcı hiperdüzlem H ve alt düzlemler H_1 ve H_2 birbirlerine paralel ve bahsi geçen koşullar nedeniyle, H_1 ve H_2 düzlemleri arasındaki mesafe $2/\|w\|$ kadardır. Marj olarak gösterilen bu mesafe içinde sınıflandırılacak veri örnekleri yer almaz ve alt düzlem üzerinde bulunan veri noktaları ise Destek Vektörleri (DV) olarak adlandırılmaktadır. Optimum ayırma hiperdüzleminin bulunması ise marjın $(2/\|w\|)$ maksimize edilmelidir. Bu işleme denk olarak:

$$f(x) = \frac{\|w\|^2}{2} \tag{4.29}$$

(4.29) eşitliğindeki fonksiyonun minimize edilmesi için:

$$g_i(x) = y_i(w^T x_i + b) - 1 \geq 0, \quad \forall i \tag{4.30}$$

(4.30) ile verilen kısıtlama fonksiyonu kullanılır. İkinci dereceden optimizasyon problemine işaret eden bu problemin çözümünde, çözümü kolaylaştırmak amacıyla Langrange formülasyonu uygulanır [98-100]:

$$L_P = \frac{1}{2}\|w\|^2 - \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\, y_i(w^T x_i + b) + \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \tag{4.31}$$

(4.31) ifadesinde bulunan α_i değerleri, eğitim örneklerinin Langrange çarpanları olarak adlandırılır ve pozitiftir ($\alpha_i \geq 0$). Langrange fonksiyonu (4.31), w, b parametrelerine göre minimize edilirken, $\alpha_i \geq 0$ kısıtlama kriterine uygun olacak şekilde α_i dikkate alınarak maksimize edilir. Literatürde Wolfe dual problemi olarak bilinen bu durum, doğrusal veya doğrusal olmayan sınıflandırma ve regresyon DVM modelleri için kolaylıkla genelleştirilebilmesi nedeniyle önemli çözüm avantajları sunmaktadır. (4.31) ile verilen ifadeye benzer şekilde, kısıtlamalı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan Karush-Kuhn-Tucker (KKT) koşulları uygulanırsa:

$$\frac{\partial L_P}{\partial w} = w - \sum_i \alpha_i y_i x_i = 0 \tag{4.32}$$

$$\frac{\partial L_P}{\partial b} = -\sum_i \alpha_i y_i = 0 \tag{4.33}$$

ifadeleri elde edilir.

Bahsi geçen KKT koşullarının ve dolayısıyla DVM probleminin çözümünün bulunması dual problemin formülasyonu ile sağlanır:

$$L_D = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2}\sum_i \sum_j \alpha_i\, \alpha_j y_i y_j x_i^T x_j \tag{4.34}$$

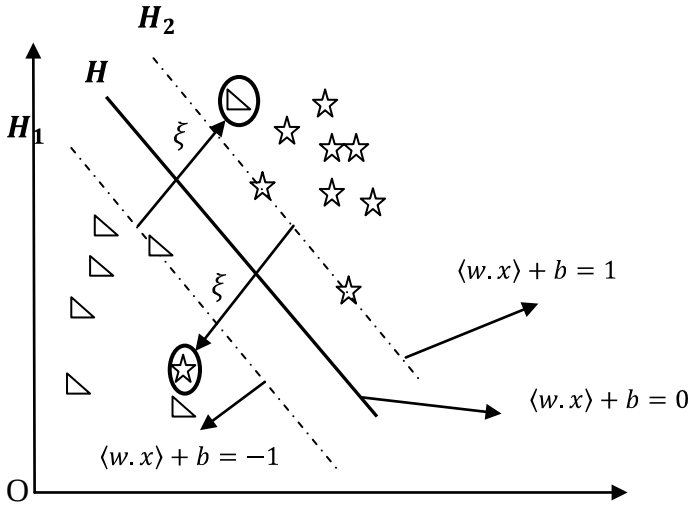
(4.34) ile verilen ifadenin maksimizasyonunda kullanılan kısıtlamalar ise:

$$\alpha_i \geq 0 \text{ ve } \forall i \tag{4.35}$$

$$\sum_i \alpha_i y_i = 0 \tag{4.36}$$

şeklindedir [95,99]. Bu kısıtlamalar ile (4.34) ifadesinin maksimizasyonu, ikinci dereceden bir optimizasyon probleminin çözümü ile gerçekleştirilir. DVM çözümünde, $\alpha_i = 0$ eşitliğini sağlayan çarpan katsayıları ihmal edilirken, $(\alpha_i > 0)$ pozitif değerli çarpanlar, H_1 ve H_2 alt düzlem üzerinde yer alan destek vektörleri olacaktır.

Buraya kadar bahsedilen kısımda, tüm DVM algoritmasının temel felsefesini oluşturan, doğrusal olarak ayrılabilen bir veri dizisi için uygun teori sunulmuştur. Ancak, Şekil 4.15 ile sunulduğu üzere gerçek hayatta karşılaşılan birçok problemde sınıflandırma işlemi bu kadar kesin şekilde uygulanamayabilir.



Şekil 4.15: Doğrusal DVM için verinin doğrusal olarak ayrılamama durumu

Şekil 4.15 ile gösterilen, verinin doğrusal olarak ayrılamadığı durumlarda, DVM algoritmasındaki optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan kısıtlamaları sağlayan uygun bir hiperdüzlem hesaplanamaz. Cortes ve Vapnik [101], bu özel durumda çözümsüzlüğü gidermek amacıyla DVM algoritmasına, ξ, "esneklik" olarak

adlandırılan bir değişken eklediler. Bu değişkenle birlikte, verilerin doğru tarafta sınıflandırılması ve kısıtlamaların belirli bir dereceye kadar esnetilerek çözüme gidilmesi sağlandı. Serbestlik değişkeninin eklenmesi ile DVM algoritması için kısıtlamalar güncellenecek olursa [95]:

$$\forall i, \quad \xi_i \geq 0 \; için, \qquad y_i[w^T x_i + b] \geq 1 - \xi_i \tag{4.37}$$

şeklinde olacaktır. Daha önce anlatılan noktalar dikkate alındığında, (4.29) ile verilen fonksiyona benzer şekilde amaç fonksiyonu güncellenerek, (4.37) ile verilen kısıtlamalara göre minimize edilmelidir.

$$\frac{\|w\|^2}{2} + \mathrm{C} \sum_{\mathrm{i}} \xi_{\mathrm{i}} \tag{4.38}$$

(4.38) ile verilen amaç fonksiyonundaki C (kapasite) katsayısı, Lagrange çarpanlarının maksimum değerini sınırlayan değişkendir. C, kullanıcı tarafından artırılıp azaltılarak sınıflandırma hatasını azaltmak için ayarlanabilen bir parametredir. Bu bilgilere göre Lagrange formülasyonu şu şekilde güncellenir [98-100]:

$$L_P = \frac{1}{2}\|w\|^2 + \mathrm{C} \sum_{\mathrm{i}} \xi_{\mathrm{i}} - \sum_{\mathrm{i}} \alpha_{\mathrm{i}} \left[y_i(w^T x_i + b) - 1 + \xi_{\mathrm{i}}\right] - \sum_{\mathrm{i}} \mu_{\mathrm{i}} \xi_i \tag{4.39}$$

(4.39) ile verilen formülasyonda, μ_{i} parametresi ξ_i değerinin pozitif olmasını sağlayan Lagrange çarpanıdır. Karuch-Kuhn-Tucker koşulları fonksiyon için yazılacak olursa:

$$\frac{\partial L_P}{\partial w} = w - \sum_i \alpha_i y_i x_i = 0 \tag{4.40}$$

$$\frac{\partial L_P}{\partial b} = -\sum_i \alpha_i y_i = 0 \tag{4.41}$$

$$\frac{\partial L_P}{\partial \xi_i} = \mathrm{C} - \alpha_i - \mu_\mathrm{i} = 0 \tag{4.42}$$

ifadeleri elde edilecektir. Bu noktadan sonra ifadelerin Lagrange fonksiyonunda yerine koyulması ile elde edilen dual problemin, pozitif α_i çarpan parametresine göre maksimizasyonu sağlanarak en uygun ayırma düzlemi bulunur [95].

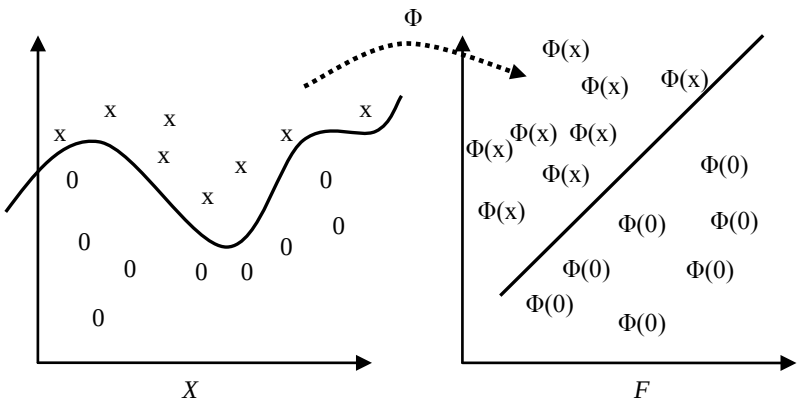
$$L_D = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2}\sum_i \sum_j \alpha_i \, \alpha_j y_i y_j x_i^T x_j \tag{4.43}$$

$$C \geq \alpha_i \geq 0, \quad \forall \mathrm{i} \tag{4.44}$$

(4.43) ifadesinin maksimizasyonunda (4.44) ifadesindeki kısıtlamalar kullanılarak çözüme ulaşılır.

4.3.2.2.Doğrusal olmayan destek vektör makinaları

Buraya kadar bahsi geçen DVM teorisi, bir dizi verinin lineer sınıflandırıcı fonksiyonlar kullanılarak uygun gruplar içinde sınıflandırmasını kapsamaktadır. Ancak çoğu mühendislik uygulamalarında sınıflandırma problemleri çok daha karmaşıktır ve dolayısıyla çözüm için lineer fonksiyonlardan çok daha kapsamlı fonksiyonlara ihtiyaç duyarlar. Bu ihtiyacı karşılamak maksadıyla, 1995 yılında Vapnik ve Cortes tarafından sunulan geliştirilmiş DVM mantığı ile verilerin farklı bir uzaya taşınarak doğrusal olmayan unsurlarla birlikte adreslenmesi ve burada yine lineer sınıflandırıcı ile sınıflandırılması mümkün olmuştur.



Şekil 4.16: Verinin doğrusal olarak ayrılabildiği bir uzaya taşınması [97]

Şekil 4.16 ile gösterildiği üzere, kullanılan bir çekirdek fonksiyon yardımıyla veri farklı bir *F* uzayına taşınarak sınıflandırılacaktır,

$$\Phi: X \rightarrow F \tag{4.45}$$

DVM eğitimi esnasında F uzayına çekirdek fonksiyon ile taşınan verinin $\langle \Phi(x_i).\Phi(x_j)\rangle$ formundaki iç çarpımları kullanılacaktır. Lineer durum DVM eğitiminde kullanılan $\langle x_i.x_j\rangle$ iç çarpım ifadelerinin yerine $\langle \Phi(x_i).\Phi(x_j)\rangle$ formu yazılacak olursa, çok boyutlu bir uzay için DVM sınıflandırması gerçekleştirilir [97].

Dolayısıyla daha önce (4.43) ifadesi ile verilen dual problemde, (4.46) ifadesi ile verilen *K* çekirdek fonksiyonu yerine yazılacaktır [95].

$$K(x_i, x_j) = \langle \Phi(x_i).\Phi(x_j)\rangle \tag{4.46}$$

$$L_D = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2}\sum_i \sum_j \alpha_i\, \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \tag{4.47}$$

(4.47) ile verilen ifade, lineer DVM teorisinin aynı kısıtlama ve çözüm prosedürleri ile çözülebileceğinden, burada önemli olan *K* çekirdek fonksiyonunun

kullanılmasıdır. Eşik değer b ise genellikle çekirdek fonksiyon içinde yer aldığından doğrusal olmayan bir DVM için karar fonksiyonu;

$$d(x) = \sum_{s=1}^{N} y_s \alpha_s K(x, x_s) \tag{4.48}$$

şeklinde yazılabilir. (4.48) ifadesinde N destek vektörlerin sayısı ve x ise destek vektörleridir.

DV makinaları çözüm odaklı çok çeşitli çekirdek fonksiyonun kullanımına imkân sağladıklarından oldukça esnek bir yapıya sahiptirler. Literatürde çok çeşitli çekirdek fonksiyonlar tanıtılsa da, başlıca sıralanan üç tip çekirdek fonksiyon yaygın olarak kullanılmaktadır;

- Doğrusal çekirdek $K(x_i, x_j) = x_i^T x_j$ (4.49)
- Polinom çekirdek $K(x_i, x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d, \quad \gamma > 0$ (4.50)
- Radyal tabanlı çekirdek $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \qquad \gamma > 0$ (4.51)

İfadelerde verilen r, d ve γ terimleri, çekirdek fonksiyonun parametreleridir.

4.3.2.3. Çoklu sınıflandırmalı destek vektör makinaları

Aslında DVM algoritması sadece ikili sınıflandırma problemlerinin çözümünde kullanılabilmektedir. Ancak, takım aşınmasını gözlemi gibi, endüstriyel çoğu problemde ikili sınıflandırmadan çok daha kapsamlı sınıflandırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin bu çalışmada öncelikle k-ortalamalar kümeleme algoritmasına göre kümelenerek 5 ayrı sınıfta kodlanan aşınma değerleri için DVM modeli kurulmuştur. Dolayısıyla böyle bir ihtiyacı karşılamak için, DVM algoritmasının çoklu sınıflandırma yapabilmesini sağlayan çeşitli yöntemler literatürde sunulsa da, bu konu günümüzde hala araştırılmaktadır.

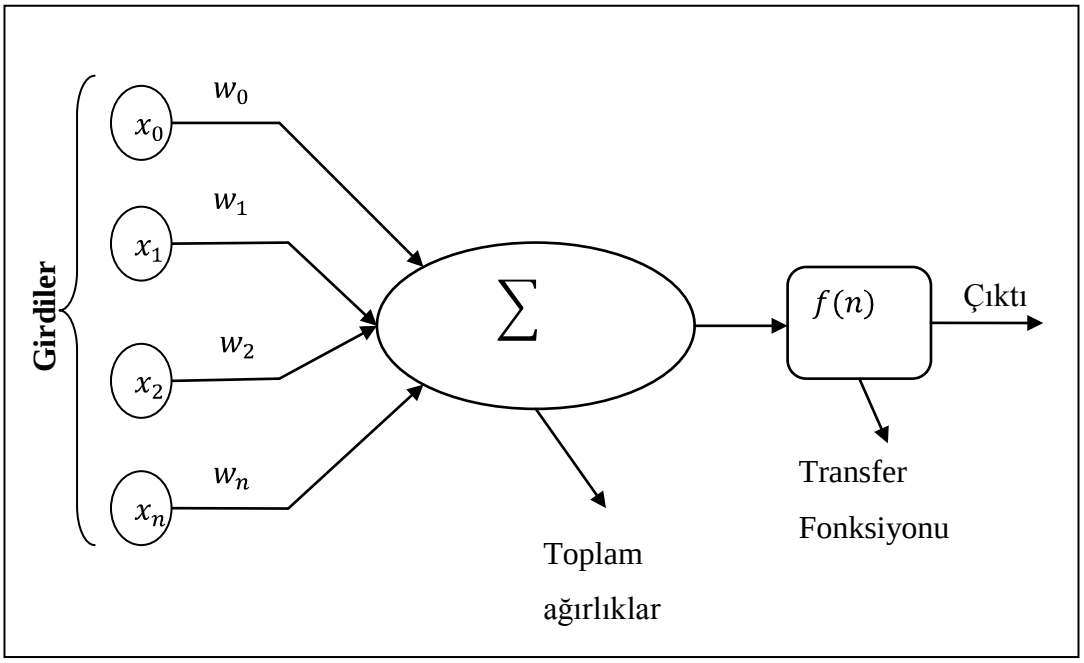
Hsu ve Lin [102] tarafından yapılan çalışmada, DVM için kullanılan mevcut çoklu sınıflandırma algoritmaları tanıtılmış ve bunların performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına paralel olarak, takım aşınması sınıflandırmasında oldukça iyi bir performans sergileyen, "bire karşı bir" algoritması tercih edilmiştir.

Çalışmada çoklu DVM sınıflandırma için kullanılan "bire karşı bir" algoritmasında, n sınıflı bir problem olduğu düşünülürse, sadece n sınıftan ikisini sınıflandırarak olası tüm ikili sınıflandırmalar için n(n-1)/2 DVM eğitilir. Böylelikle test aşamasında sınıflandırılacak örnek, ikişerli sınıflandırıcılardan baskın çıkan sınıfa dâhil edilerek çoklu sınıflandırma gerçekleştirilir.

4.3.3. Yapay sinir ağı

Yapay sinir ağları (YSA) esasen, biyolojik sinir sisteminin benzetimine dayalı matematiksel bir yöntemdir. 1940'lı yılların başlarında ilk olarak McCulloch ve yardımcıları tarafından tanıtılmıştır [103]. Yapay sinir ağları eğrisel eşleştirme yapısı nedeniyle yüksek bir esnekliğe sahiptir ve bu özellikleri nedeniyle çoğu sistemin modellenmesinde kolaylıkla kullanılabilir. Şekil 4.17 ile verildiği üzere, ilk bakışta basit bir yapıya sahip olan YSA, esneklik ve gücünü, toplam işlem yükünü paylaşan birçok elemanın (nöronun) ortak çalışarak bir problemi parçalarına ayırması ile çözüm üretmesinden almaktadır.

Günümüzde YSA uygulamaları teorik olarak izahı zor problemlerin modellenmesinde kullanılan popüler bir yöntemdir. YSA ile, takım aşınması gibi birçok parametrenin anlaşılmaz biçimde etkilediği ve dolayısıyla analitik model oluşturmanın çok zor olduğu gerçek süreçleri modellemek mümkündür.



Şekil 4.17: Basit bir YSA mimarisi (McCulloch-Pits nöronu)

Günümüzde oldukça yaygın bilinen teorisine göre kısaca YSA, birden çok katmanda, birbirine bağlanan nöron olarak adlandırılan bir takım düğüm noktalarından oluşmaktadır. Şekil 4.17 ile verilen basit bir YSA mimarisine göre, ağın sol tarafında girdiler vektörü, ağ işlemcileri olan nöronlar yardımıyla doğrusal olmayan transformasyonla sağ taraftaki çıktı (sonuç) vektörüne dönüştürülmektedir.

Ağ mimarisinde, her bir nöron ağırlıklandırılmış bir dizi girdiyi kullanır. Eşik katsayısı ile ağırlıklandırılmış bu girdi verileri şu formül ile hesaplanır [104];

$$n = \sum_{i=1}^{p} w_i x_i + b \tag{4.52}$$

Burada p eleman sayısı, w_i ise x_i olarak ifade edilen girdi verilerinin ağırlık katsayısıdır. Eşik değeri ise b ile ifade edilmiştir. Nörondaki saklanan bilgi, eşik ve bir dizi ağırlık katsayısından ibarettir.

Daha sonra nöron bu bilgileri kullanarak bir cevap olarak çıktı verir. Bu amaçla, bir eşik değeri ile ağırlıklandırılmış girdilerin toplamı *f* ile ifade edilen bir aktivasyon fonksiyonu vasıtasıyla işlenir ve çıktı hesaplanır;

$$f(n) = f(\sum_{i=1}^{p} w_i x_i + b) \tag{4.53}$$

Biyolojik nöron sisteminin benzetimi yapılan YSA' da, tıpkı bir nöronun üzerinde biriken elektriksel yükü anında iletmesi gibi, formülde nöron girdisi örneğin *n* değerinin yeterince büyük olduğu bir durumda uyarılmış olur. Bu aktivasyonu sağlayan birçok fonksiyondan başlıcası, eşik fonksiyonu, sigmoid fonksiyon ve hiperbolik tanjant fonksiyon olarak sayılabilir.

YSA'lar yönlendirmeli ve yönlendirmesiz olmak üzere iki şekilde eğitilebilirler. YSA'ların yönlendirmeli eğitiminde problemden elde edilen bir dizi eğitim verisi kullanılır. Bu tür ağ yapısında, geriye yayılma algoritması ile genellikle ortalama kare farkları ile ölçülen hata miktarı minimize edilerek, YSA ağırlıkları sistematik olarak güncellenebilir. Dolayısıyla yönlendirmeli ağ yapısına sahip YSA'lar doğrusal olmayan problemlerde tahmin ve sınıflandırma açısında yüksek performans sağladıklarından yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada YSA kullanılarak, ileri yönlü geri yayılma mimarisine sahip bir ağ yapısı ile TDG sistemi oluşturulmuş ve performansı ileri bölümlerde değerlendirilmiştir. Ancak YSA'nın önemli dezavantajlarının sunulduğu [105-108] çalışmalar temel alındığında, sadece YSA kullanılarak geliştirilen TDG sistemlerine şu sıralanan olumsuzluklar yansıyabilecektir;

- YS ağlarının eğitilmesi ve testi için yeterli genişlikte veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla TDG sistemleri için, daha fazla deneyi gerektireceğinden maliyet arttırıcı bir unsurdur.

- Uygun ağ yapısının belirlenmesi genellikle deneme yanılma yöntemiyle gerçekleştirildiğinden TDG sisteminin modellenmesi açısından hesap maliyeti artacaktır.
- Gizli katmandaki nöron ve kullanılan katman sayısının çok büyük olması hesaplama yükünü çok fazla arttırmaktadır.
- YSA eğitiminde yakalanan mükemmel performans, eğitimde kullanılmayan test verisi için YSA modelin iyi bir performans sağlayacağını garanti etmez.
- Basit modelleme yapılarına göre uygulaması zor ve karmaşık olabilmektedir.
- Diğer istatistiksel yöntemlere göre kesin bir model oluşturmaz ve parametre tahminlerini vermez.
- Hatalı öğrenmeye ve ezberlemeye eğilimlidir.
- Özellikle ileri yönlü geri yayılma mimarisine sahip YS ağları, ağırlık değerlerinin ilk değer atamasına duyarlıdırlar ve aynı ağ yapısı ve aynı eğitim verisi kullanılsa bile farklı tahmin değerleri (çıktı) verebilirler.

Özetle, sıralanan bu dezavantajlar ve Bukkapatnam ve diğ.' in [107] sunduklarına paralel olarak, mevcut yapay sinir ağları son derece karmaşık, hesap maliyeti oldukça yüksek ve tahminde yakınsamaları garanti etmemektedir. Dolayısıyla YSA tahminleri mutlaka ek karar algoritmaları ile onaylanmalı ve desteklenmelidir.

5. ÇEVRİMİÇİ TDG SİSTEMİNDE BULGULAR VE ANALİZLER

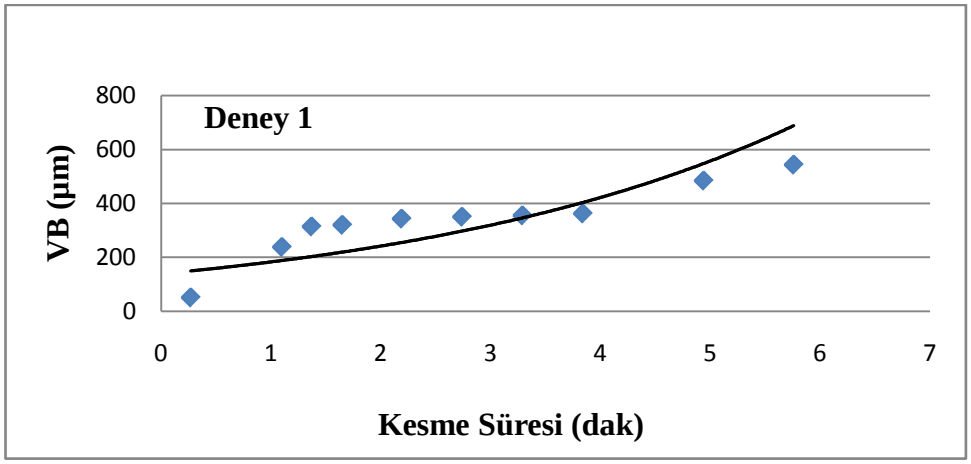
Taguchi deneysel tasarımına göre yapılan ve aşağıda Tablo 5.1 ile verilen koşullara göre, 9 ayrı kesme deneyinden toplamda 170 aşınma durumu için ölçüm yapılarak üç eksen kuvvet, tork, 3 eksen akselerometre ve akustik emisyon sinyal verileri toplanmıştır.

Tablo 5.1: Deneyde kullanılan 9 ayrı kesme koşulu

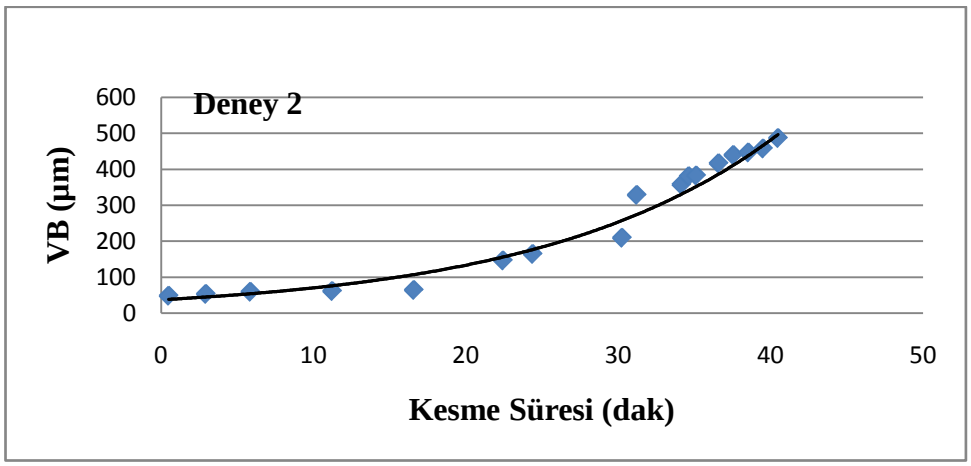
Etiket	Kesme Derinliği (a_e)	Kesme Hızı (Vc)	Diş Başına İlerleme (Sz)
Deney 1	0,6	100	0,12
Deney 2	0,6	75	0,09
Deney 3	0,6	50	0,06
Deney 4	0,45	100	0,09
Deney 5	0,45	75	0,06
Deney 6	0,45	50	0,12
Deney 7	0,3	100	0,06
Deney 8	0,3	75	0,12
Deney 9	0,3	50	0,09

5.1. Takım Aşınmasında Kesme Koşullarının Etkisi

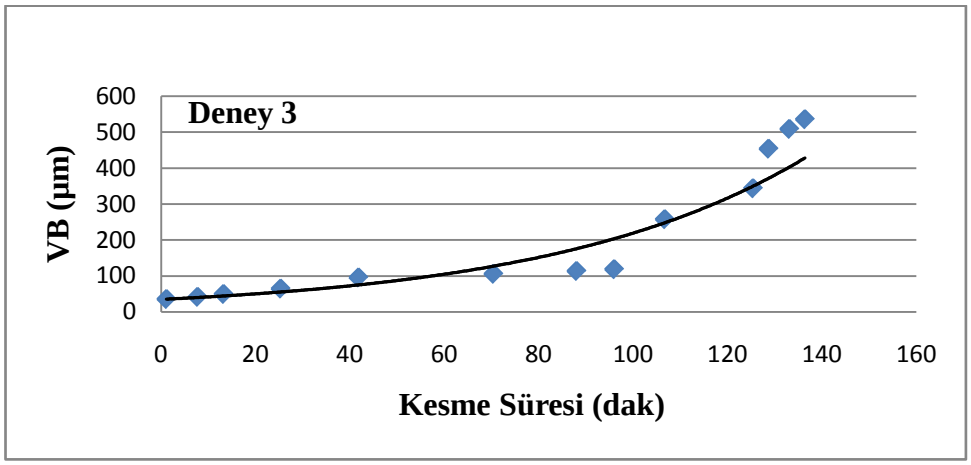
Tablo 5.1 ile verilen koşullarda gerçekleştirilen deneylerin ölçüm sonuçlarına göre, takım serbest yüzey aşınmasının (VB) kesme süresine göre değişim grafikleri, Şekil 5.1 ile Şekil 5.9 arasında verilmiştir.



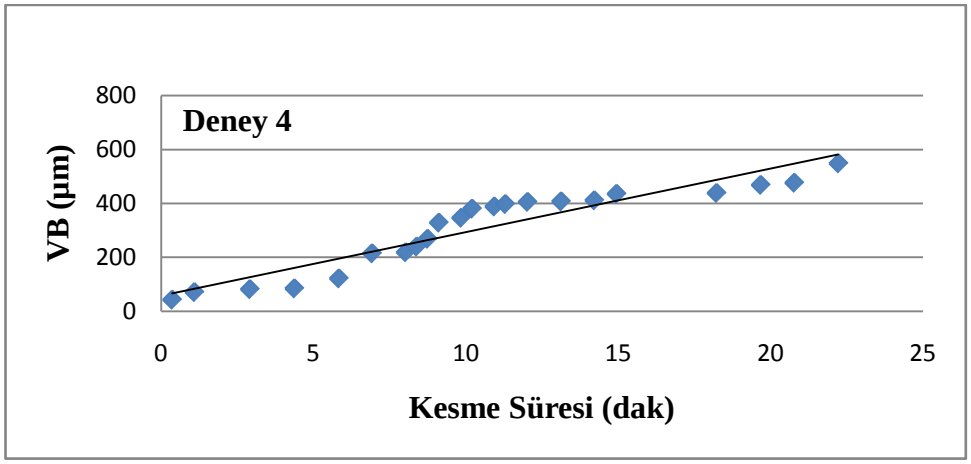
Şekil 5.1: Deney 1 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



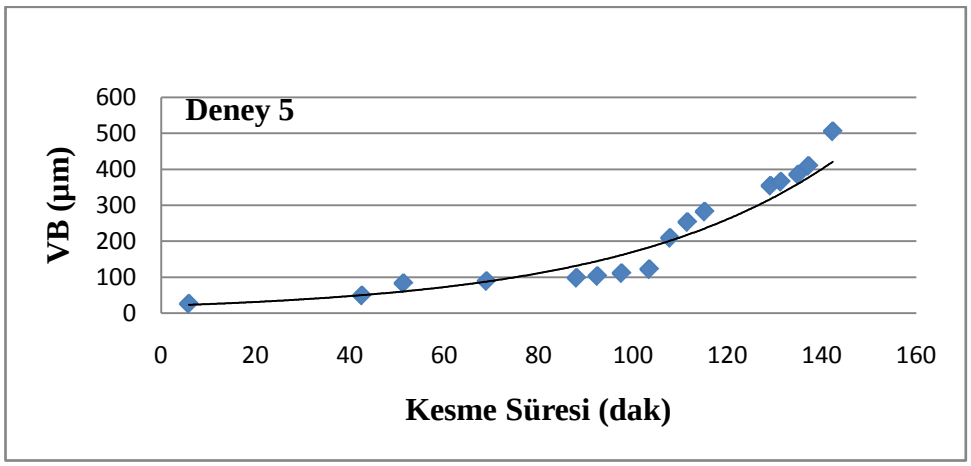
Şekil 5.2: Deney 2 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



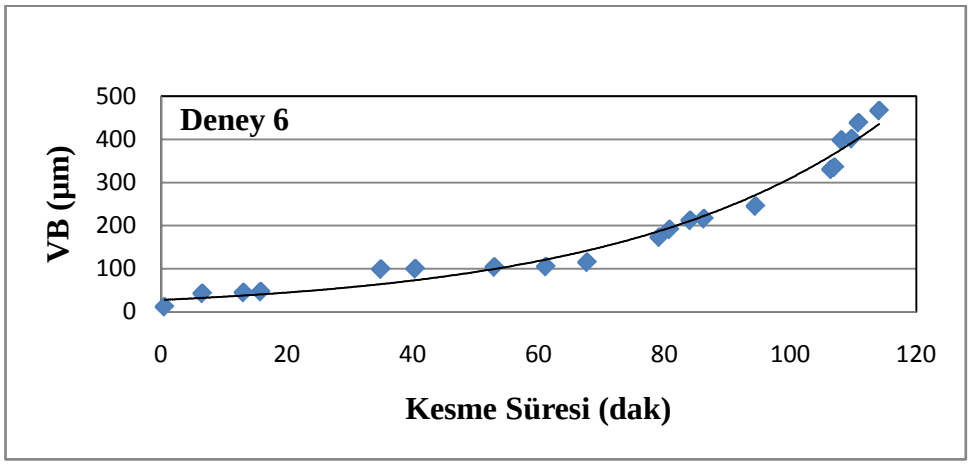
Şekil 5.3: Deney 3 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



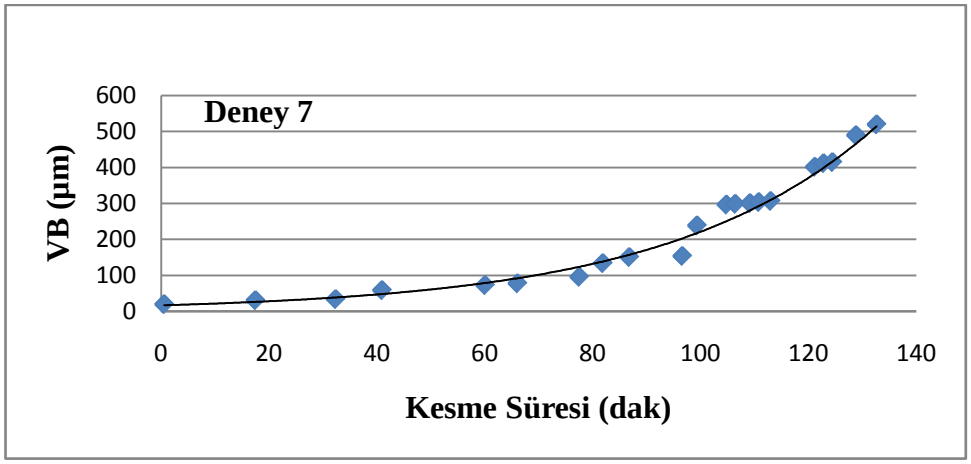
Şekil 5.4: Deney 4 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



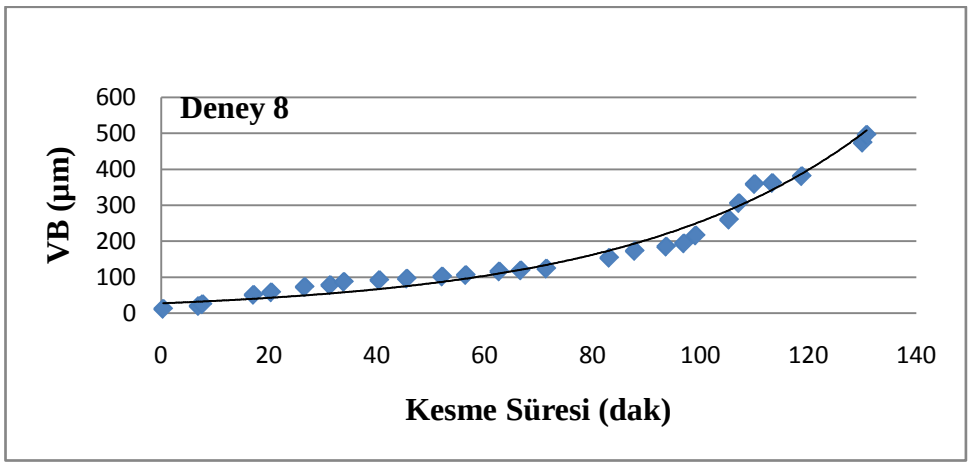
Şekil 5.5: Deney 5 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



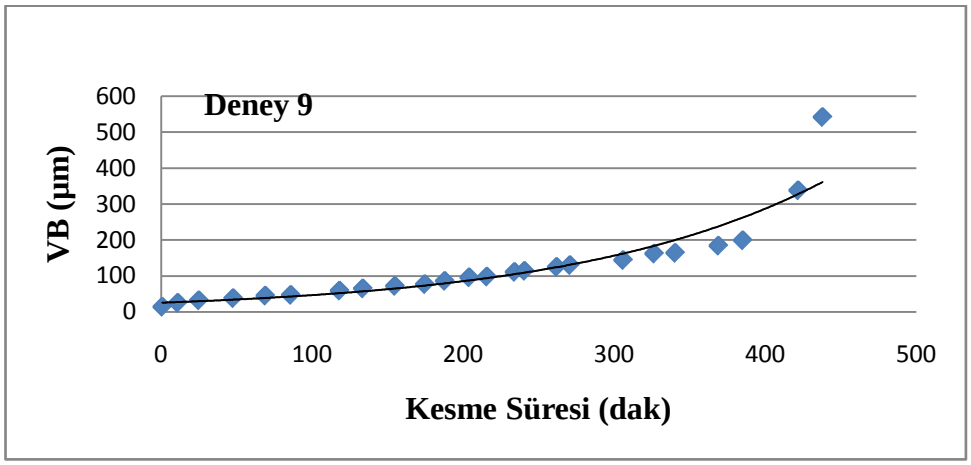
Şekil 5.6: Deney 6 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



Şekil 5.7: Deney 7 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



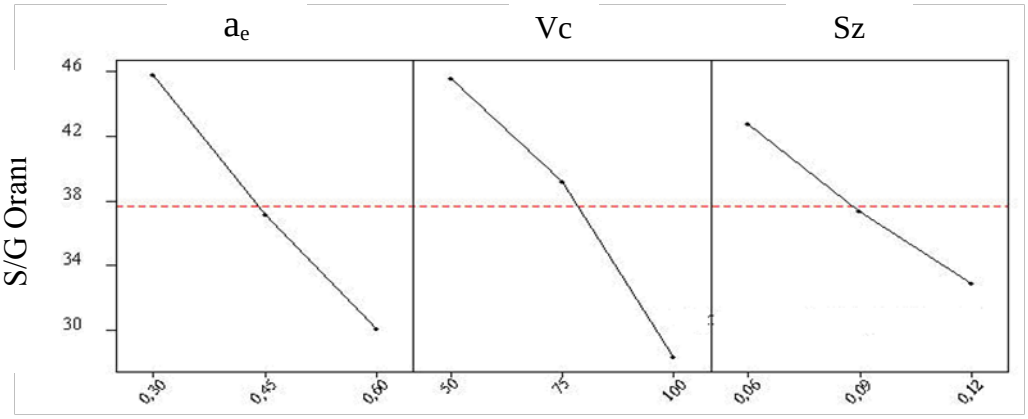
Şekil 5.8: Deney 8 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği



Şekil 5.9: Deney 9 koşulları için kesme süresi- aşınma (VB) grafiği

Şekil 5.1 ile Şekil 5.9 arasında verilen grafiklerde göre, kesme süresi ilerledikçe, takım serbest yüzey aşınması (VB), kademeli olarak artmaktadır. Verilen eğrilere göre, her bir koşul kendine has bir eğilim gösterse de, genelde tüm koşullar için, aşınma ile kesme süresi arasında üstel bir fonksiyon ile yüksek korelasyon gözlenmektedir.

Kesme koşullarının takım ömrüne etkisi ise, Şekil 5.10 ile verilen Taguchi ve Tablo 5.2 ile verilen varyans analizi ile sunulmuştur. Şekil 5.10, takım aşınmasına ait sinyal-gürültü (S/G) oranının temel etkilerini göstermektedir.



Şekil 5.10: Takım aşınmasına ait SG oranı

Taguchi algoritmasına göre gerçekleştirilen analizde, maksimum seviyedeki en agresif koşul olan Deney 1 koşulunda gerçekleştirilen deneyde, minimum takım ömrü gözlenmiştir. Bu durum Şekil 5.10 ile gösterilen Taguchi analizine uygun gözükmektedir. Ayrıca yine Şekil 5.10 ile verilen Taguchi analiz sonuçlarına göre, minimum seviyedeki koşullar için (a_e=0,3mm, Vc=50m/dak, Sz=0,06mm) takım ömrünün maksimum olması gerektiği sonucu çıkarılabilir.

Tablo 5.2 de ise, kesme koşullarının takım ömrüne olan etkilerini değerlendirmek için varyans analizi verilmiştir. Tablo 5.2 ile verilen *P* değerleri, ilgili her bir faktörün istatistiksel olarak önemini göstermektedir.

Tablo 5.2: Takım ömrü için varyans analizi

Kaynak	*Karelerin Toplamı*	*Df*	*Ortalama (Kareler)*	*F-Oranı*	*P-Değeri*
Faktörler					
a_e	49573,0	2	24786,5	2,62	0,2763
Vc	48676,8	2	24338,4	2,57	0,2800
Sz	10476,7	2	5238,37	0,55	0,6437
Kalan	18925,4	2	9462,72		

Varyans analizine göre, *P* değerlerinin 0 değerine yakınlığı, ilgili faktörün önemini (etkisini) arttırmaktadır. Tablo 5.2 de yapılan analize göre, *P* değerleri 0,1 den büyük olduğu için kesme koşullardan hiçbiri %90 kesinlik seviyesinde modele etki etmemektedir. Ancak, Tablo 5.2 ye göre, *P* değerleri dikkate alındığında, kesme derinliği (a_e) başta olmak üzere kesme hızının (Vc) takım ömrüne etkisinin daha fazla olduğu gözükmektedir.

5.2. Aşınma ile sensör sinyallerinin ilişkisi

Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 ile gösterilen örnek sinyallere benzer şekilde, her bir kesme koşulu için, çeşitli aralıklardaki aşınma seviyelerine denk gelecek şekilde 15 K/sn örnekleme oranı ile toplanan sinyaller, sayısal olarak değerlendirmek için geniş bir hacme sahiptir. Dolayısıyla, takım aşınması gibi, gerçek hayat problemlerinden elde edilen sayısallaştırılmış sinyallerden aşınma ile ilgili anlamlı bilgilerin çıkarılması yani öznitelik çıkarma işlemine tabi tutulması gerekir.

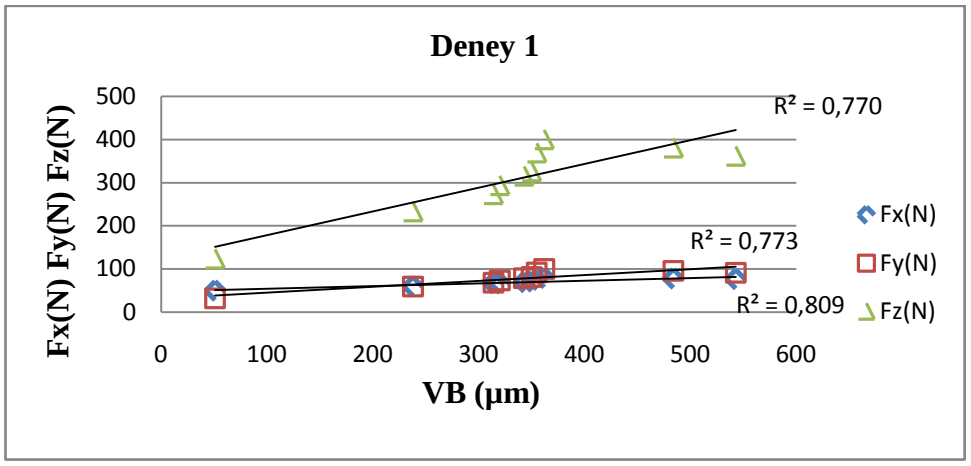
Aşınma ile tüm sensör sinyalleri arasındaki ilişki incelenirken, istatistiksel öznitelik çıkarmada, (5.1) ifadesine göre sinyalin ortalama (RMS) değerleri hesaplatılarak, bu değerlere göre analizleri sunulmuştur.

$$f(Sinyal)_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{i=1}^{n}(Sinyal_i)^2} \tag{5.1}$$

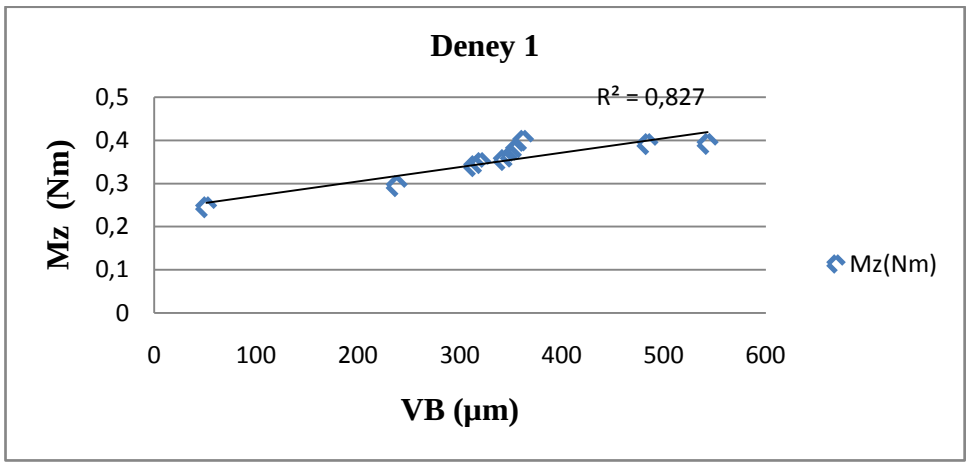
(5.1) ifadesinde n, her bir girdi sinyalde bulunan toplam veriyi ifade etmektedir.

5.2.1. Aşınma ile kesme kuvvetleri ve tork ilişkisi

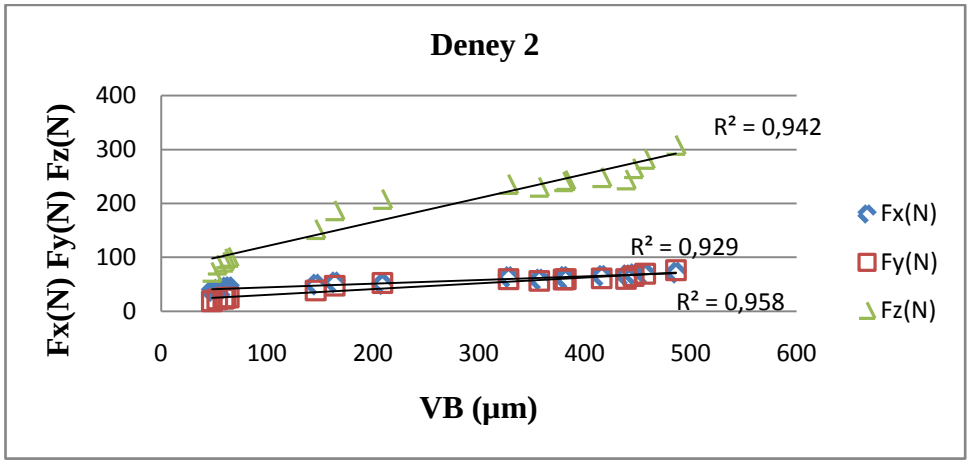
Tablo 5.1 ile verilen 9 deneye göre, sırasıyla kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) ve torkun (Mz), takım aşınmasına (VB) göre değişim grafiği Şekil 5.11~ Şekil 5.35 arasında gösterilmektedir.



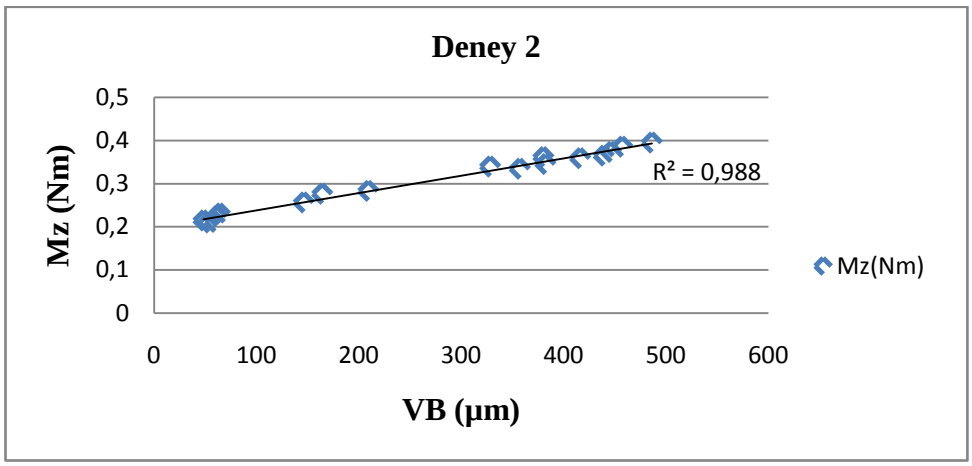
Şekil 5.11: Deney 1 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



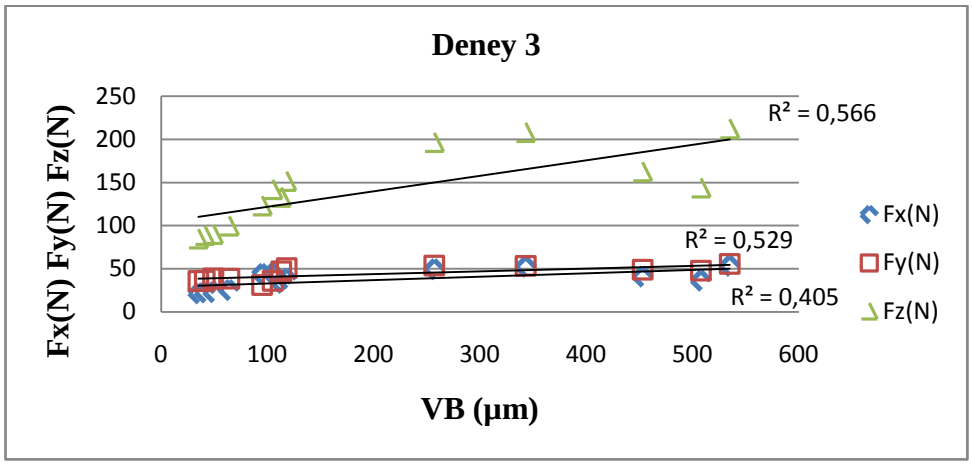
Şekil 5.12: Deney 1 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



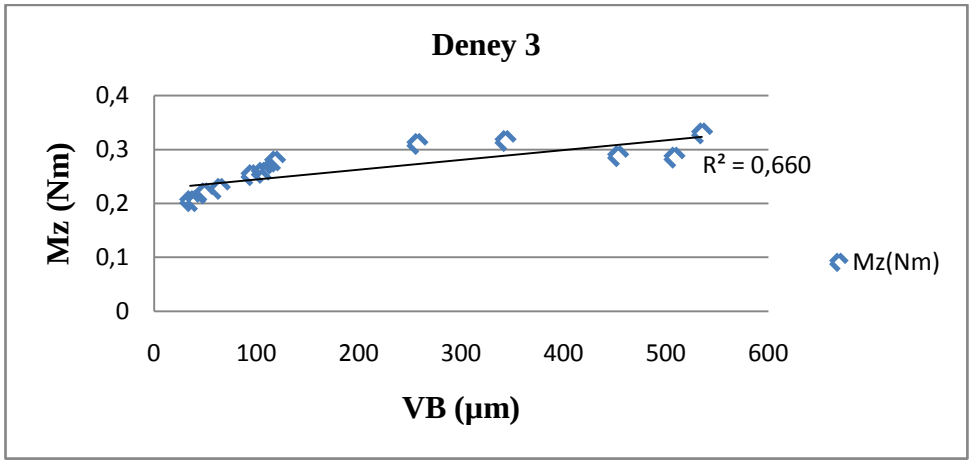
Şekil 5.13: Deney 2 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



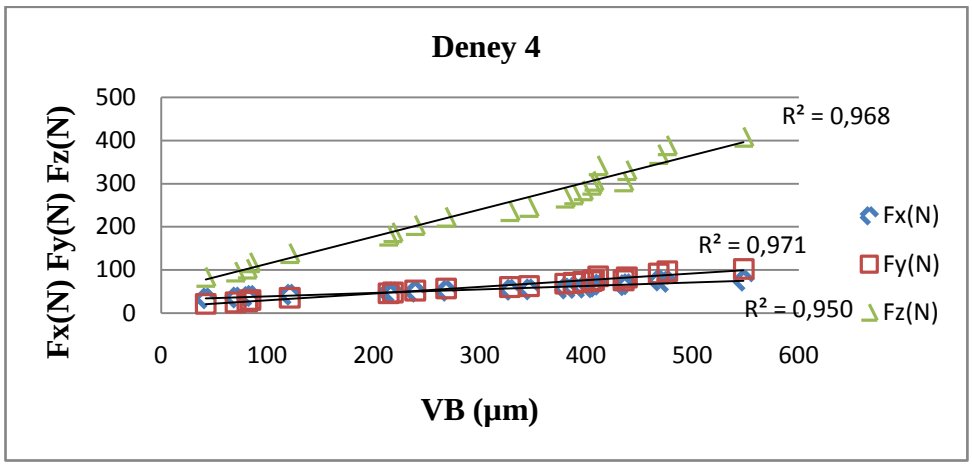
Şekil 5.14: Deney 2 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



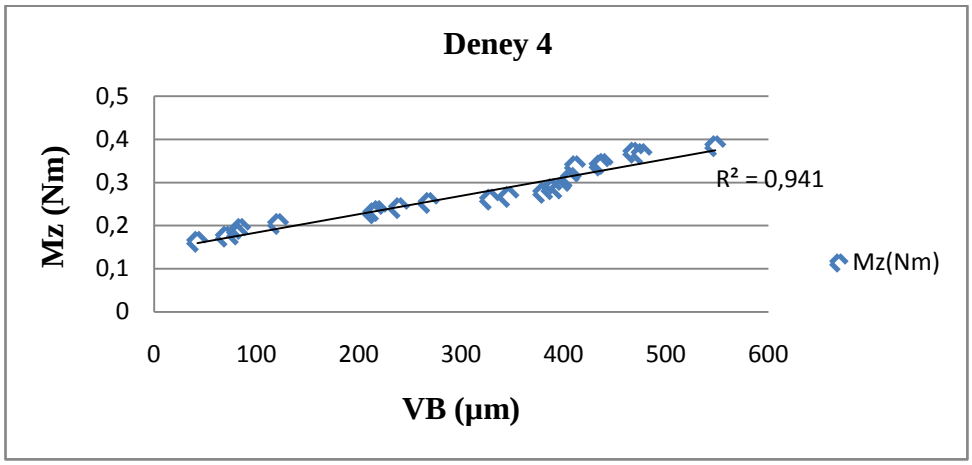
Şekil 5.15: Deney 3 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



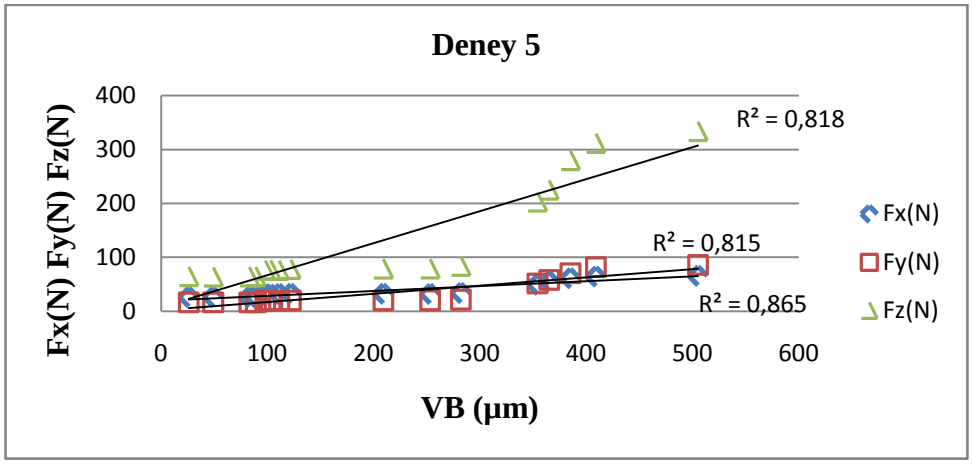
Şekil 5.16: Deney 3 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



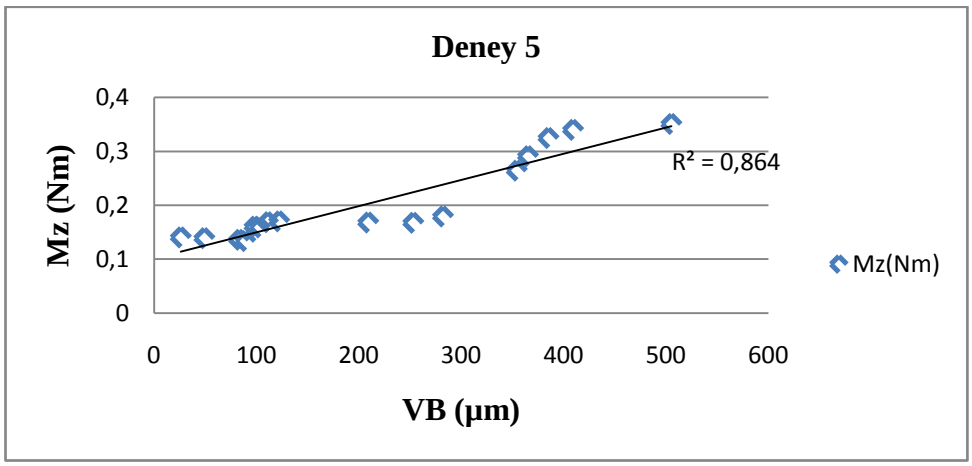
Şekil 5.17: Deney 4 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



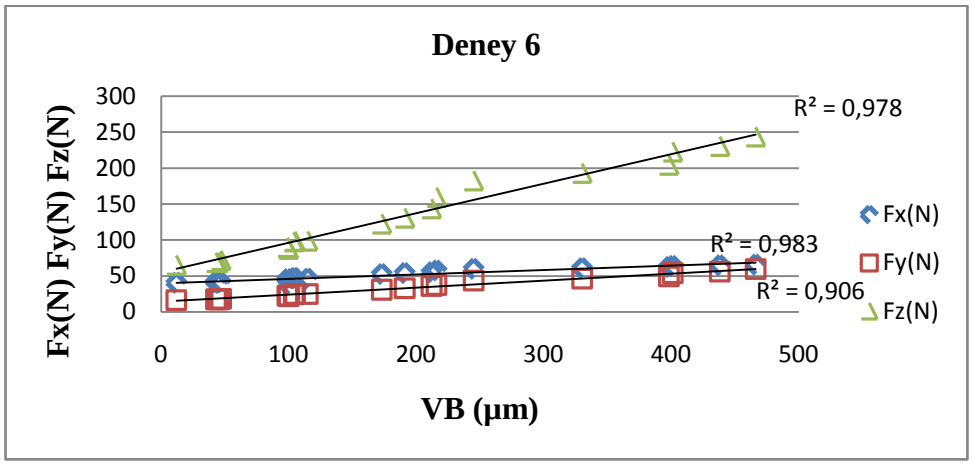
Şekil 5.18: Deney 4 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



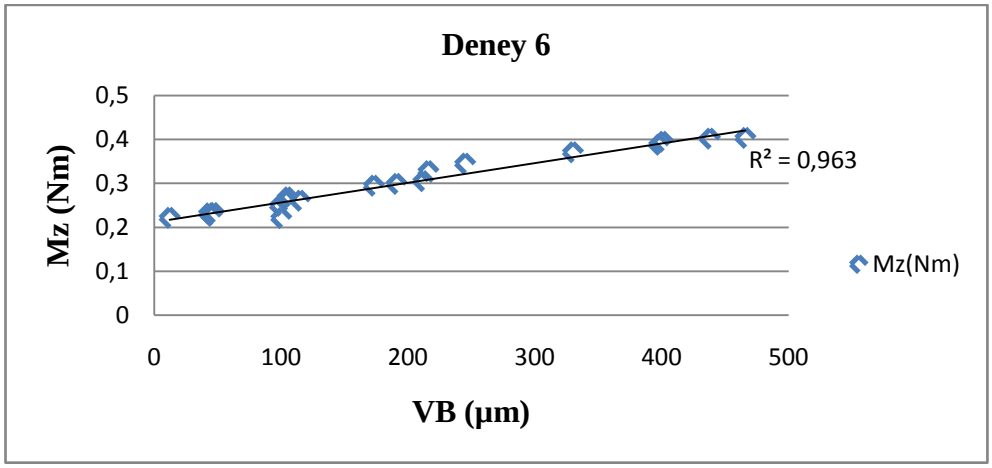
Şekil 5.19: Deney 5 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



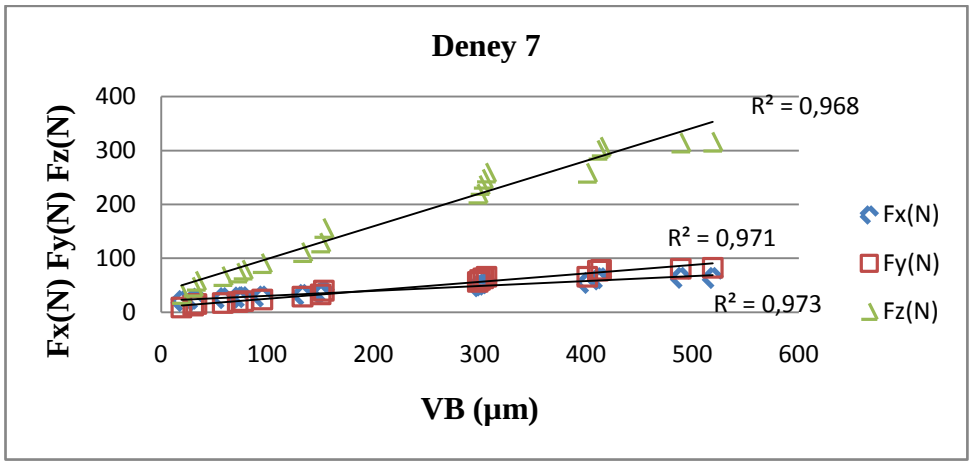
Şekil 5.20: Deney 5 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



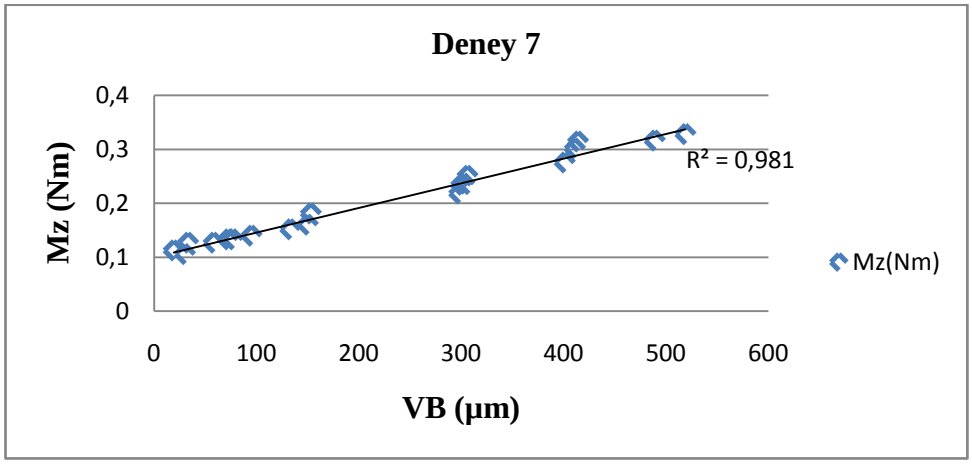
Şekil 5.21: Deney 6 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



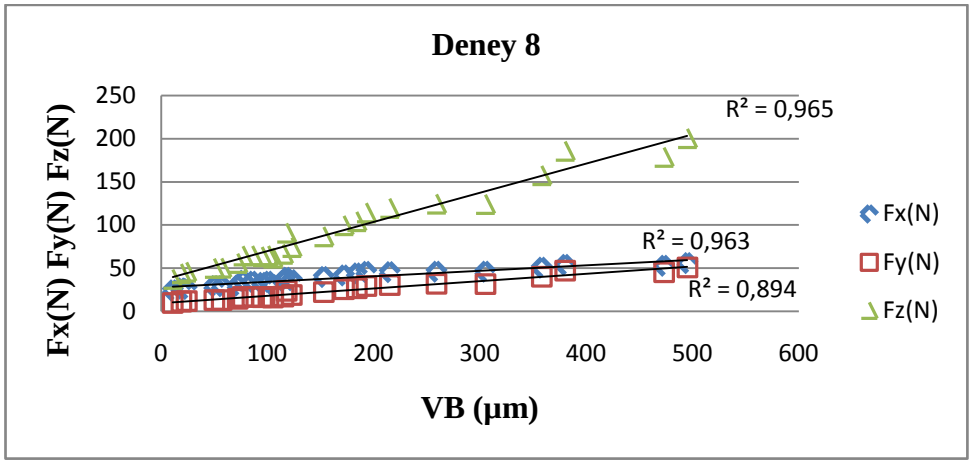
Şekil 5.22: Deney 6 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



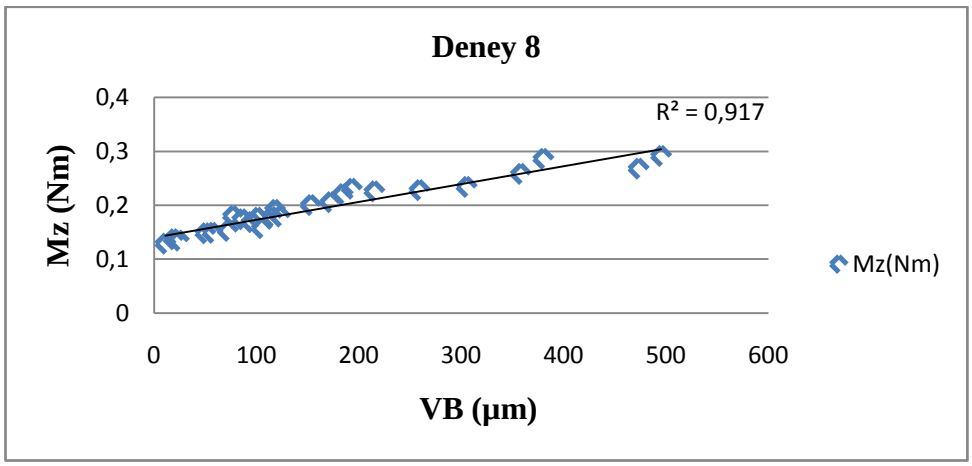
Şekil 5.23: Deney 7 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



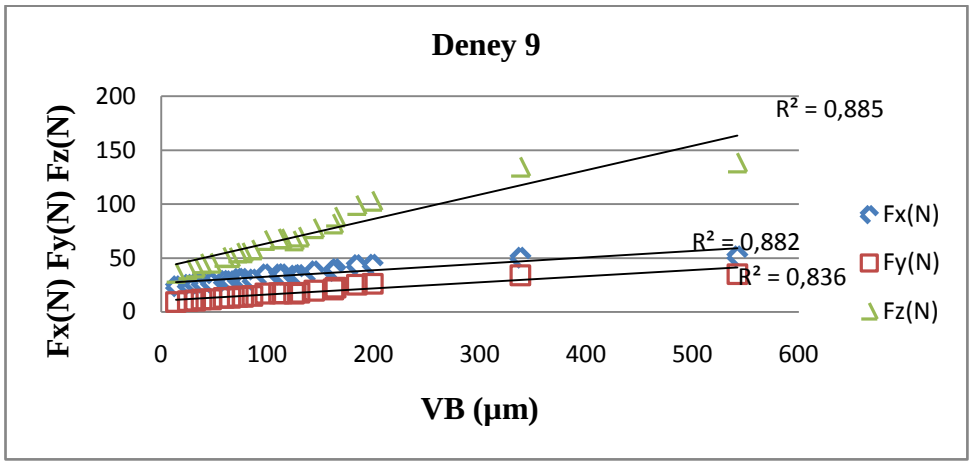
Şekil 5.24: Deney 7 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



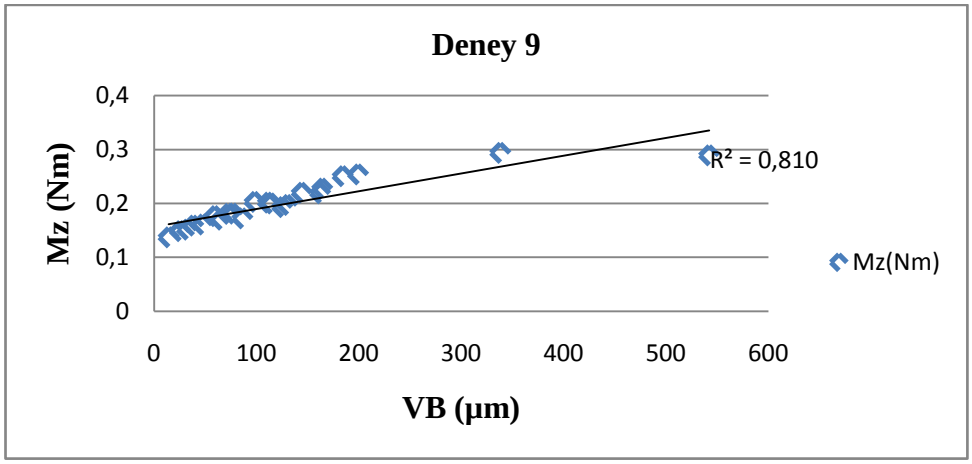
Şekil 5.25: Deney 8 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



Şekil 5.26: Deney 8 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği



Şekil 5.27: Deney 9 koşulları için aşınma, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) grafiği



Şekil 5.28: Deney 9 koşulları için aşınma, tork (Mz) grafiği

Şekil 5.11~ Şekil 5.28 arasında verilen grafiklerde, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) ile torkun (Mz) artan takım aşınması ile yine artan bir eğilimle değiştiği görülmektedir. Ancak özellikle Deney 1, Deney 2 ve Deney 3 koşullarında yapılan deneylerde belirgin olarak Fz ve Mz sinyallerinin takım ömrü boyunca yer yer RMS değerlerinde gerilemeler olduğu göze çarpmaktadır. Burada takım ömründe etkisi olan diğer aşınma biçimleri olan krater ve çentik aşınmasının kesme kuvvetlerinde azalmaya neden olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni krater aşınmasının kesicinin talaş açısını değiştirmesinden kaynaklanır [74]. Ancak, daha farklı aşınma mekanizmalarının baskın çıkması veya aşınmanın yeterince büyümesi nedeniyle kısa süreliğine gözlenen bu düşme eğilimi tekrar artmakta ve hızlı bir şekilde bir önceki aşınma seviyesine yükselmektedir.

Tüm grafikler incelendiğinde, kesme kuvvetleri ve tork sinyalleri ile takım aşınması arasında belirgin bir ilişkinin olduğu gözlenmektedir. Ancak gerçekte hangi sinyalin ne ölçüde takım aşınmasına etkisi olduğunu grafiklerden çıkarmak zor olabilir. Takım aşınmasına duyarlılık derecesinin analiz etmek için grafiklerde verilen tüm deneyler için ayrı ayrı çoklu regresyon modelleri sunulmuştur.

Tablo 5.3 ile 9 deney için yapılan regresyon analizi verilmektedir. Regresyon analizleri Statgraphics [109] istatik analiz programı yardımıyla yapılmıştır.

Tablo 5.3: Aşınma (VB) çoklu regresyon modelleri ve parametrelerin etkisi.

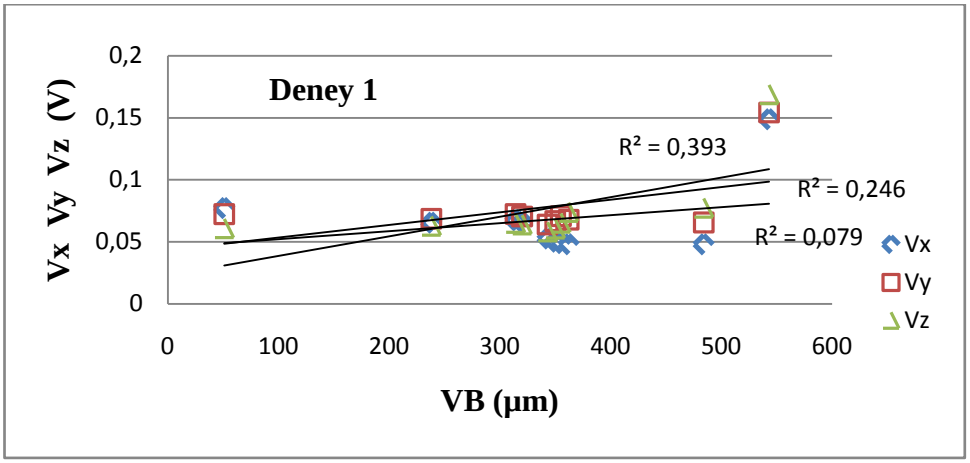
Deney No	**P(Fx)**	**P(Fy)**	**P(Fz)**	**P(Mz)**	**Aşınma için (VB) Regresyon Modeller**
1	0.5749	0.094	0.08	**0.0743**	V_B = -1292.45 - 15.1179*Fx + 105.757*Fy - 28.6968*Fz + 9580.53*Mz
2	0.7462	**0.029**	0.0335	0.0418	V_B = -373.157 + 0.943379*Fx - 27.7651*Fy + 7.21062*Fz + 1719.16*Mz
3	0.0035	0.005	0.0307	**0.0008**	V_B = -1150.79 - 70.8646*Fx - 64.1144*Fy + 12.725*Fz + 19027.1*Mz
4	0.2788	**0.042**	0.0914	0.2456	V_B = -125.193 - 7.91111*Fx + 41.0096*Fy - 8.82789*Fz + 1852.34*Mz
5	0.9154	0.907	0.922	**0.7526**	V_B = -346.037 + 4.90275*Fx – 3.22894*Fy - 0.73974*Fz + 2827.04*Mz
6	0.0022	**0.0006**	0.0157	0.0075	V_B = -156.781 - 8.12565*Fx + 25.2045*Fy - 4.11581*Fz + 1632.16*Mz
7	0.3069	0.274	0.5322	**0.0906**	V_B = 27.6786 - 12.4752*Fx + 19.983*Fy - 2.85648*Fz + 1615.35*Mz
8	0.0456	0.0002	**0.0001**	0.0462	V_B = -19.8345 + 13.6579*Fx - 207.341*Fy + 55.767*Fz - 3269.95*Mz
9	0.3578	0.012	**0.0041**	0.0291	V_B = 107.942 + 14.0236*Fx - 241.665*Fy + 67.7145*Fz - 4661.52*Mz

Tablo 5.3 ile sunulan çoklu regresyon modellerinde, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) ve tork (Mz) değerleri, tanımlayıcı bağımsız değişken olarak, serbest yüzey aşınması (VB) ise tahmin edilen bağımlı değişken olacak şekilde analiz gerçekleştirilmiştir.

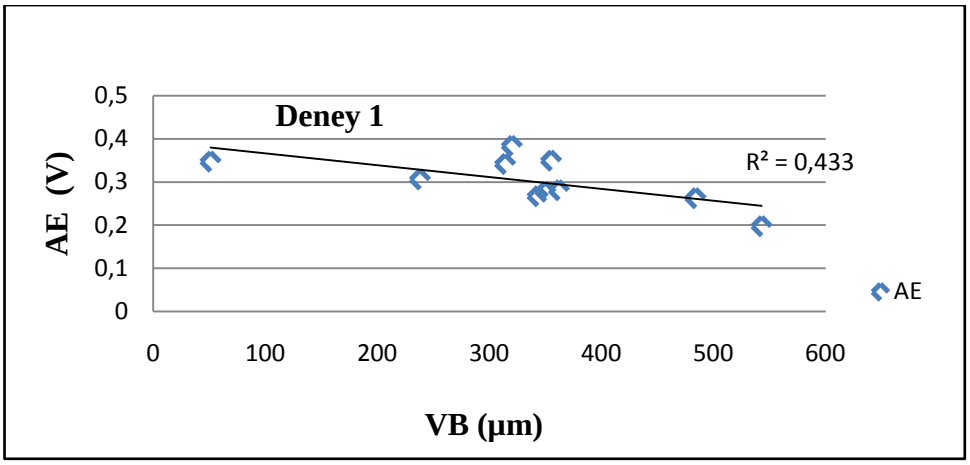
Tablo 5.3 ile verilen tüm çoklu regresyon modellerinin R^2 model korelâsyonları %90 üzerindedir ve yine %95 kesinlik sınırı için tüm modellerin P değerleri 0,01 den küçük olarak hesaplanmıştır. Tablo 5.3 ile verilen P değerlerinin dağılım yoğunluğuna göre tork (Mz) sinyalinin baskın olarak diğer kesme kuvvetlerine (Fx, Fy, Fz) göre maksimum serbest yüzey aşınması (VB) tahmininde daha etkili olduğu görülmektedir.

5.2.2. Aşınma ile titreşim ve akustik emisyon sinyalleri arasındaki ilişki

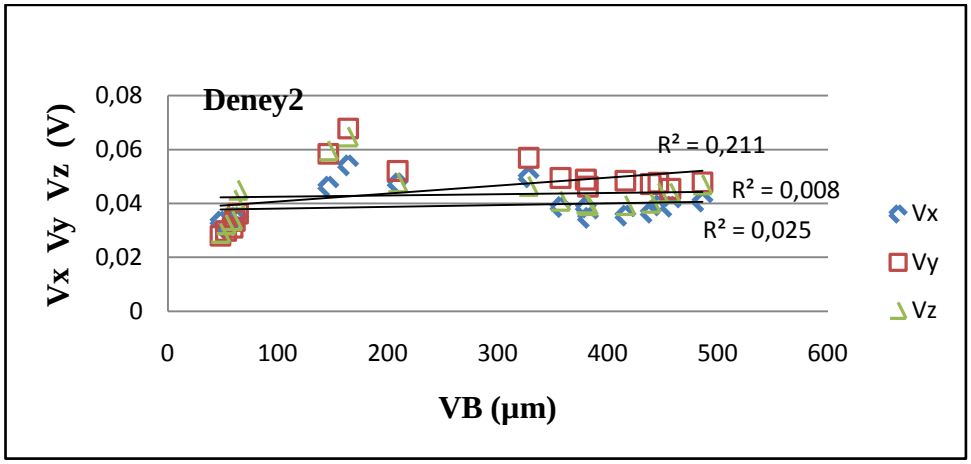
9 farklı koşula göre yapılan takım aşınma deneyi sonucunda üç eksen akselerometre ve akustik emisyon sinyallerinin RMS değerleri ile aşınma arasındaki ilişki Şekil 5.29 ~ Şekil 5.46 arasında verilen grafiklerde sunulmuştur.



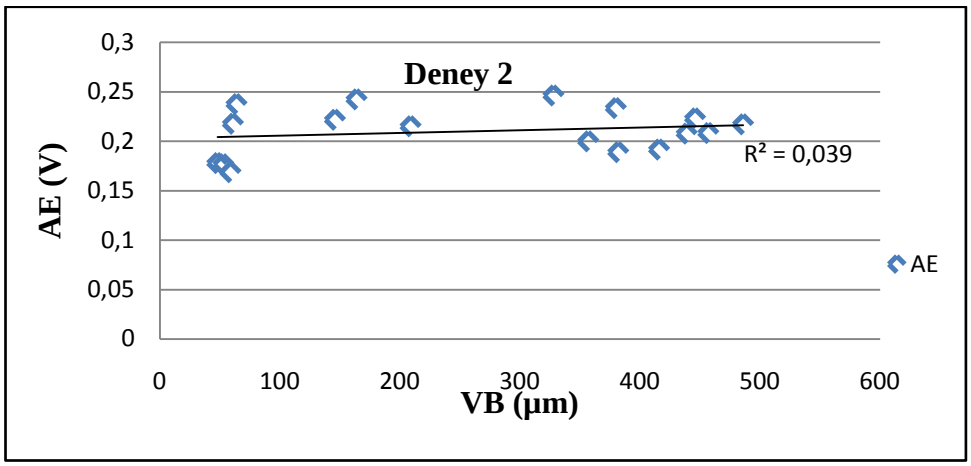
Şekil 5.29: Deney 1 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi



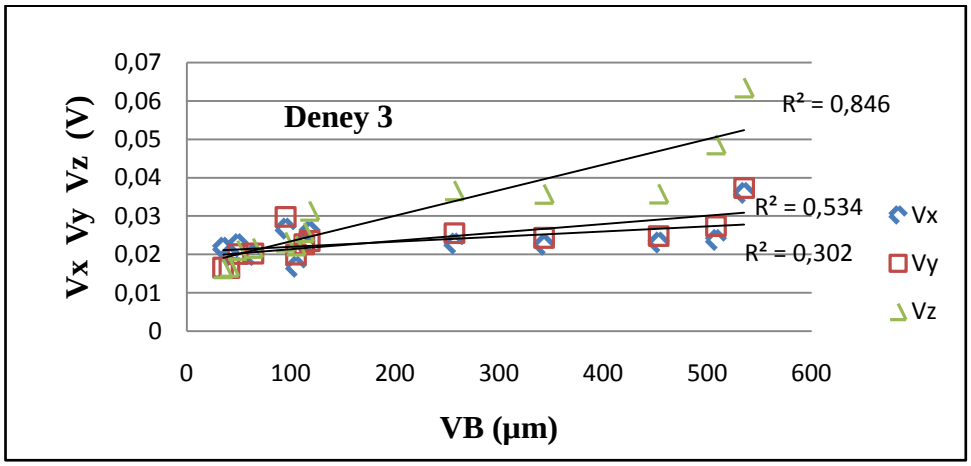
Şekil 5.30: Deney 1 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi



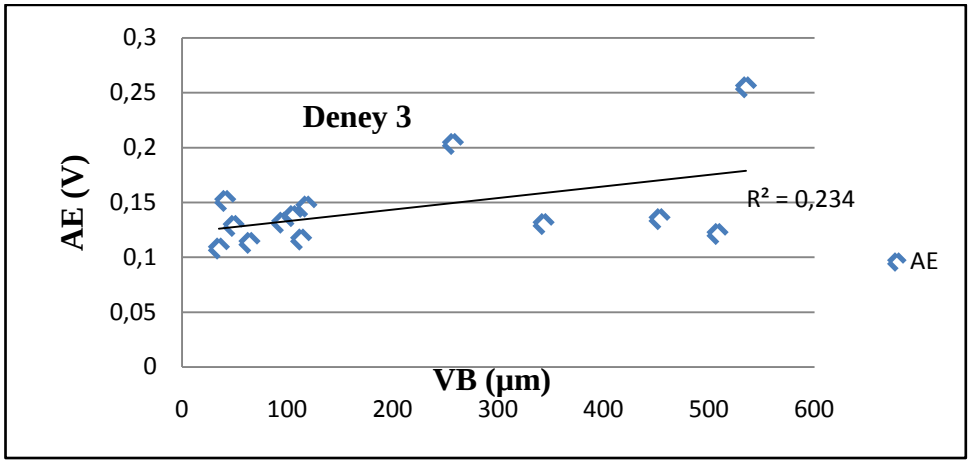
Şekil 5.31: Deney 2 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi



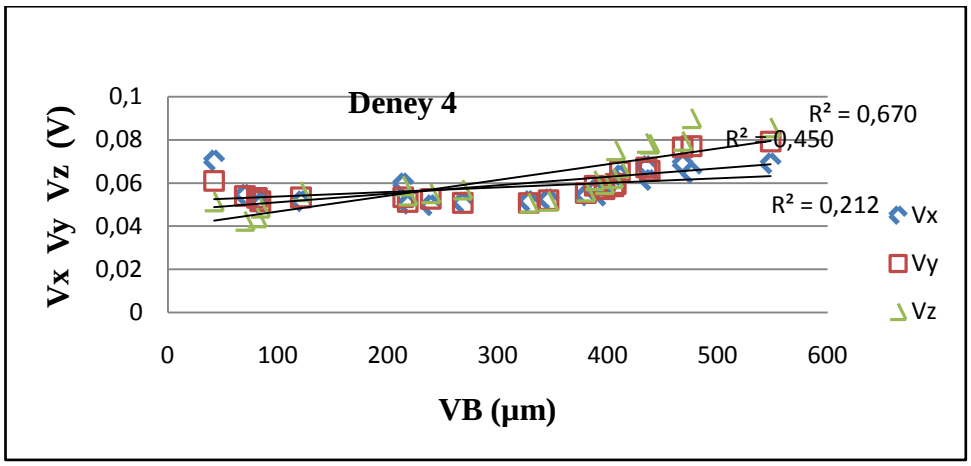
Şekil 5.32: Deney 2 koşulları için (AE) ve aşınma (VB) değişimi



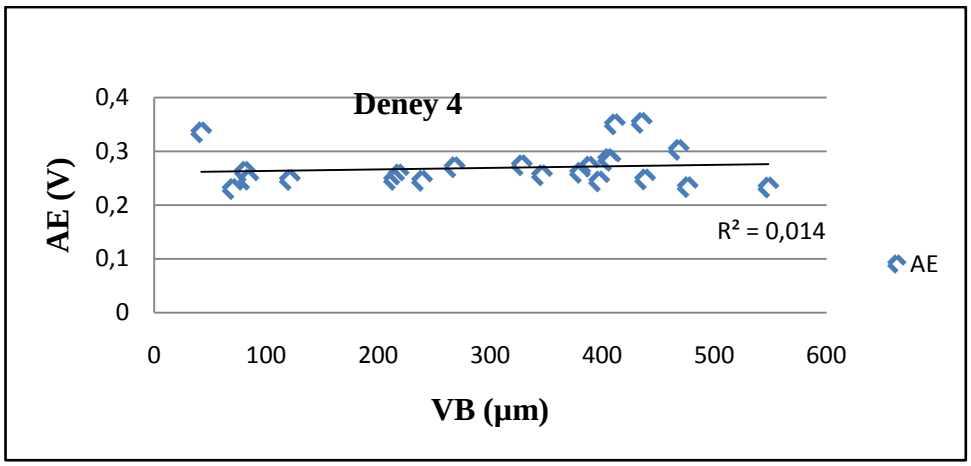
Şekil 5.33: Deney 3 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi



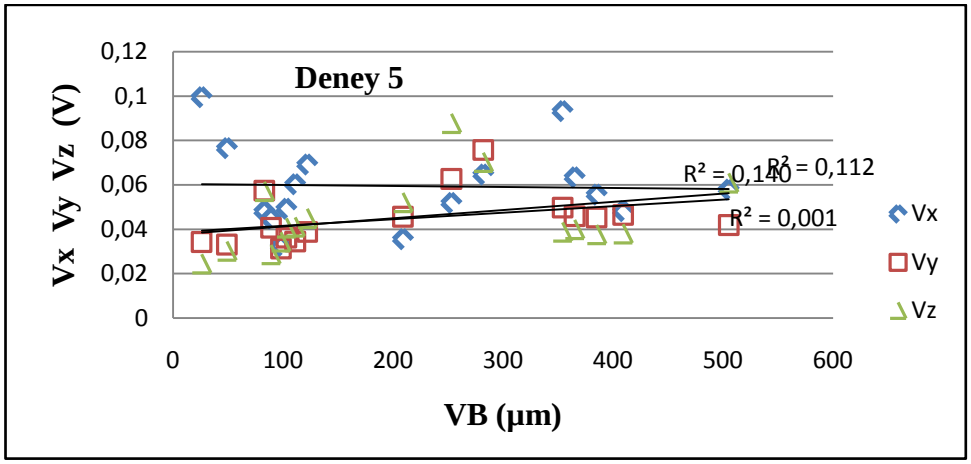
Şekil 5.34: Deney 3 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi



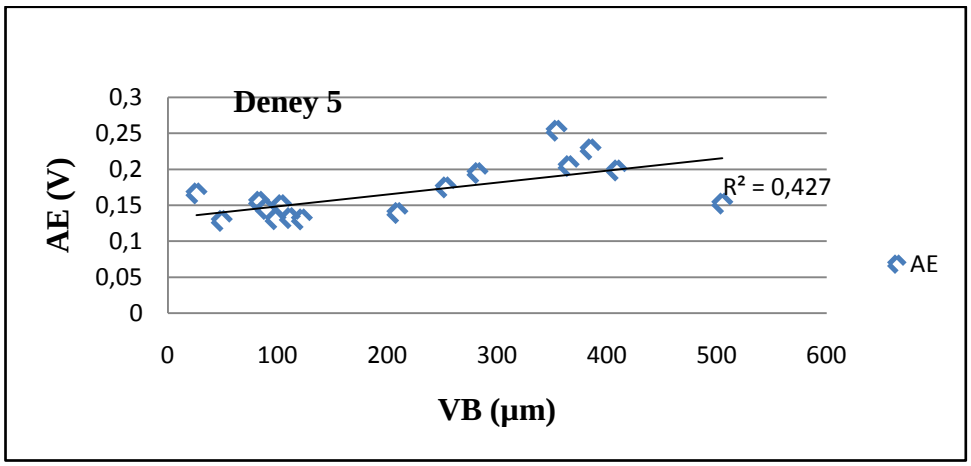
Şekil 5.35: Deney 4 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi



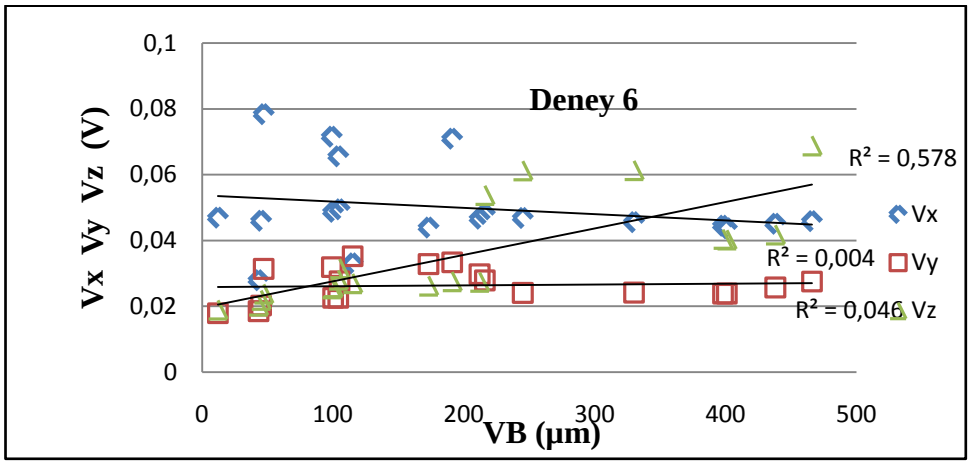
Şekil 5.36: Deney 4 koşulları için AE aşınma (VB) değişimi grafiği



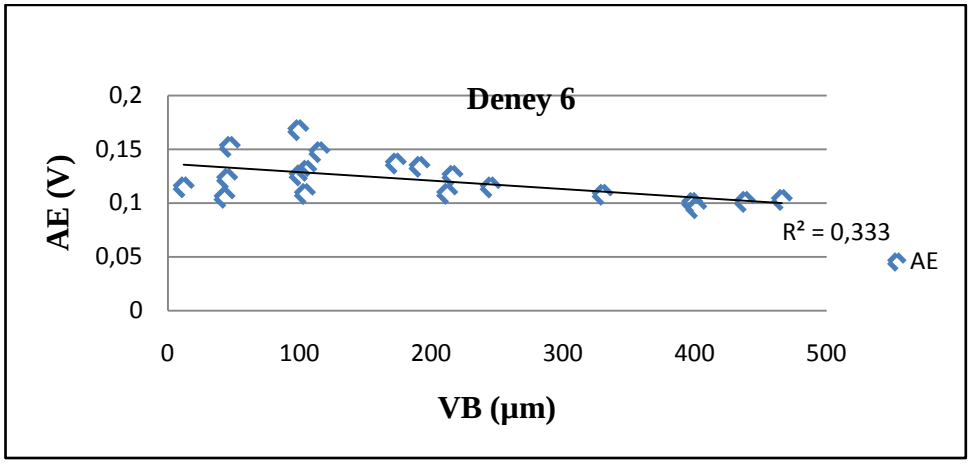
Şekil 5.37: Deney 5 koşulları için Vx, Vy, Vz aşınma (VB) değişimi grafiği



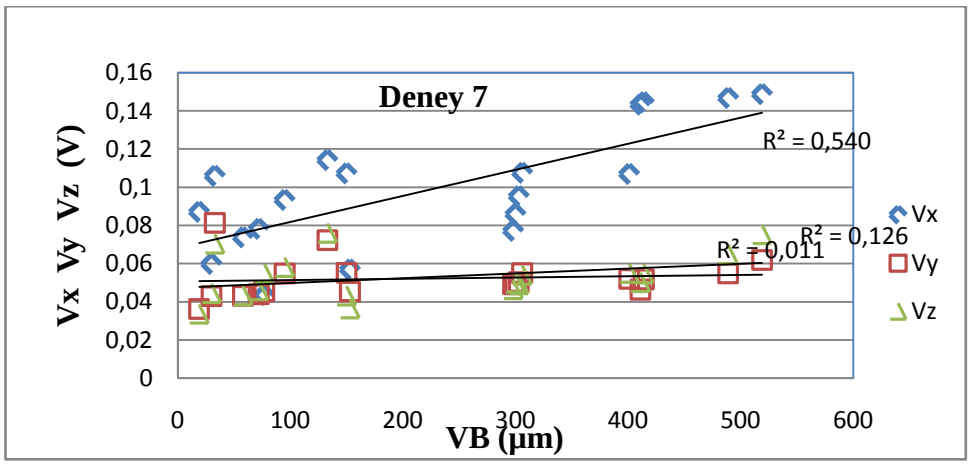
Şekil 5.38: Deney 5 koşulları için AE aşınma (VB) değişimi grafiği



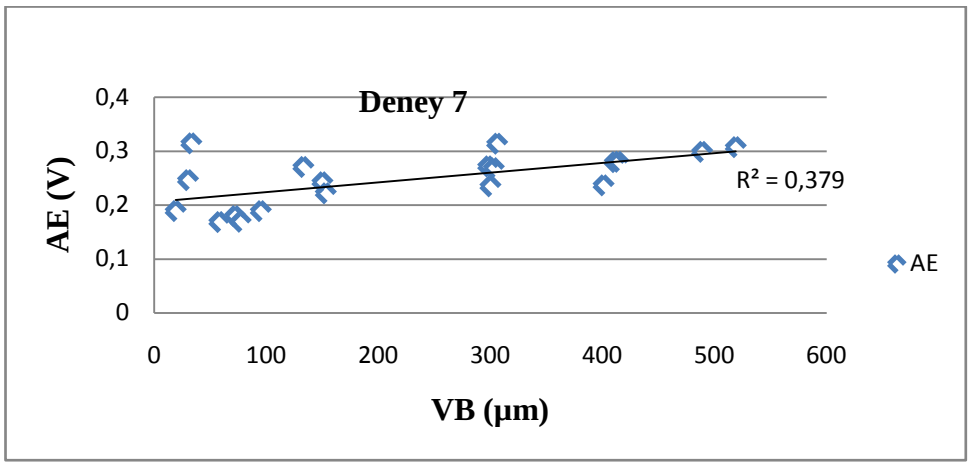
Şekil 5.39: Deney 6 koşulları için Vx, Vy, Vz aşınma (VB) değişimi grafiği



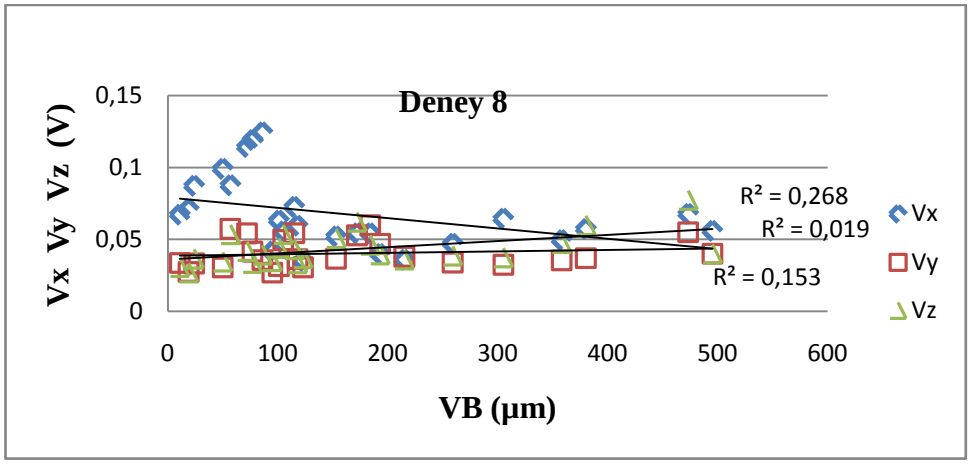
Şekil 5.40 : Deney 6 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi



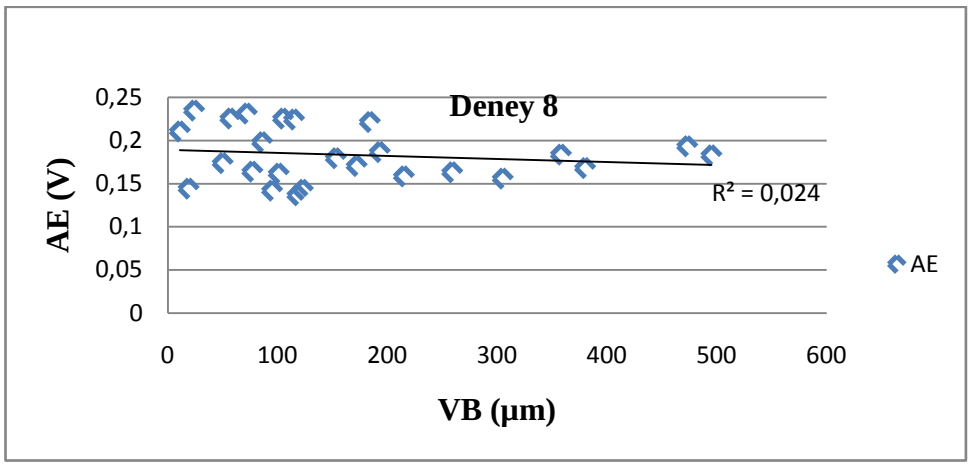
Şekil 5.41: Deney 7 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi



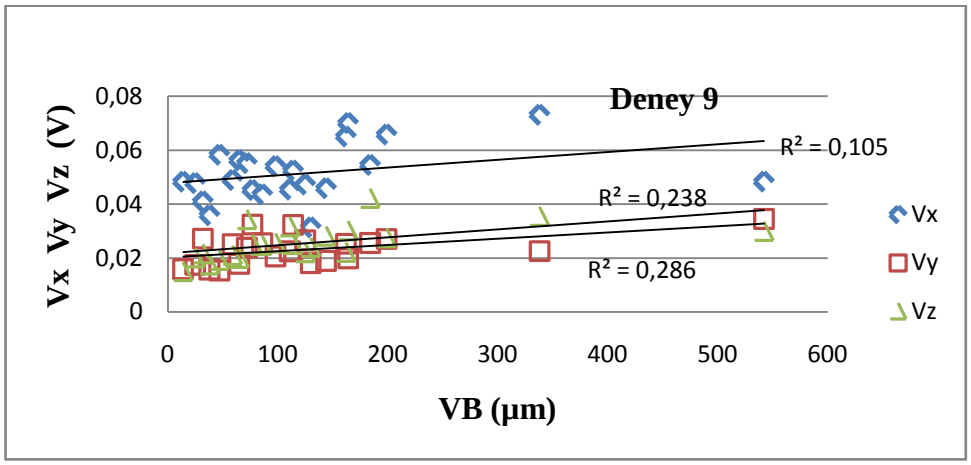
Şekil 5.42: Deney 7 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi



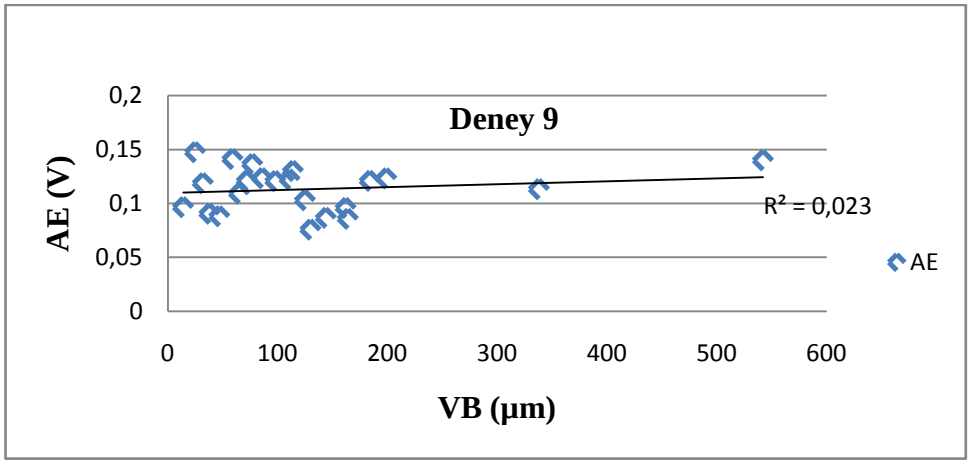
Şekil 5.43: Deney 8 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi



Şekil 5.44: Deney 8 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi



Şekil 5.45: Deney 9 koşulları için Vx, Vy, Vz ve aşınma (VB) değişimi

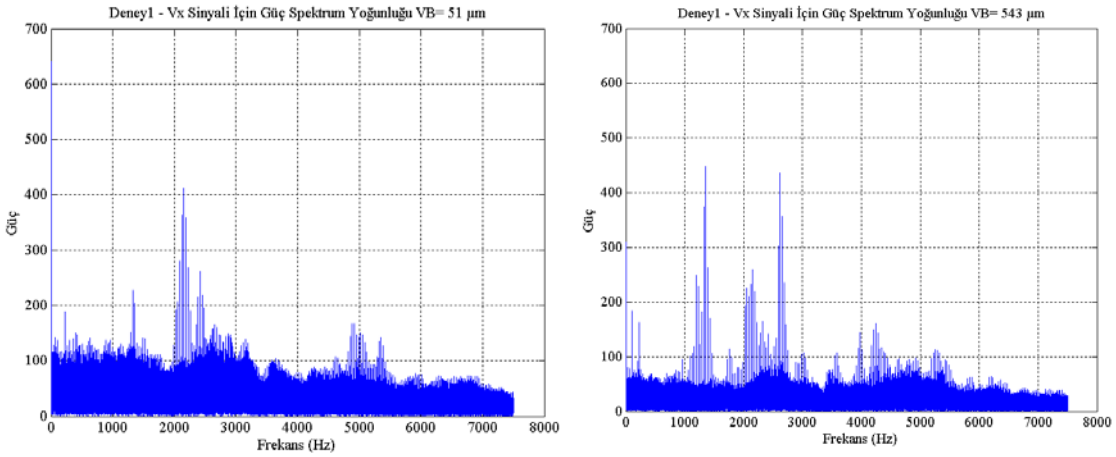


Şekil 5.46: Deney 9 koşulları için AE ve aşınma (VB) değişimi

Şekil 5.29 ~ Şekil 5.46 arasında verilen grafiklere dikkat edildiğinde akustik emisyon (AE) ile kesme doğrultusundaki titreşim (Vx) sinyalinin, farklı genliklerde ancak genelde benzer eğilim sergilediği gözlenmektedir.

Şekil 5.29 ~ Şekil 5.46 arasında gösterilen grafiklerde, gerek titreşim ve gerekse akustik emisyon sinyallerinin istatistiksel alanda aşınma ile belirgin bir ilişkiyi (korelasyonu) yakalamadığı gözlenmektedir. Dolayısıyla, istatistiksel alanda incelenen akselerometre ve akustik emisyon sinyalleri, frekans alanında da analizleri yapılarak aşınma ile ilişkisi incelenmiştir. Bunun için, Matlab R2007a yazılımının içerdiği hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritması kullanılarak frekans analizleri yapılmıştır.

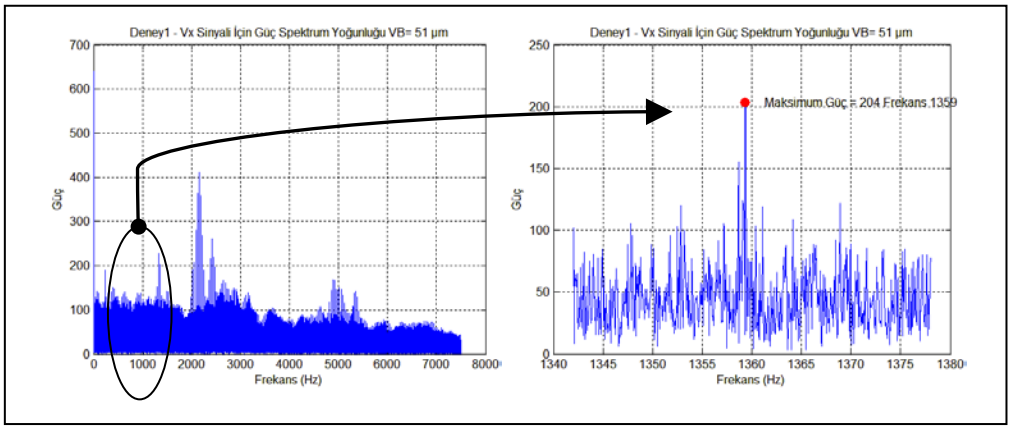
Şekil 5.47 ile Deney 1 koşulu için, kesme yönüyle aynı doğrultulu Vx sinyalinin, takımın keskin ve aşınmış durumdaki frekans dağılımları verilmiştir. Şekil 5.47, keskin ve aşınmış takım için frekans ve güç (genlik) eksenlerinden oluşan bir spektral güç yoğunluğu grafiğidir.



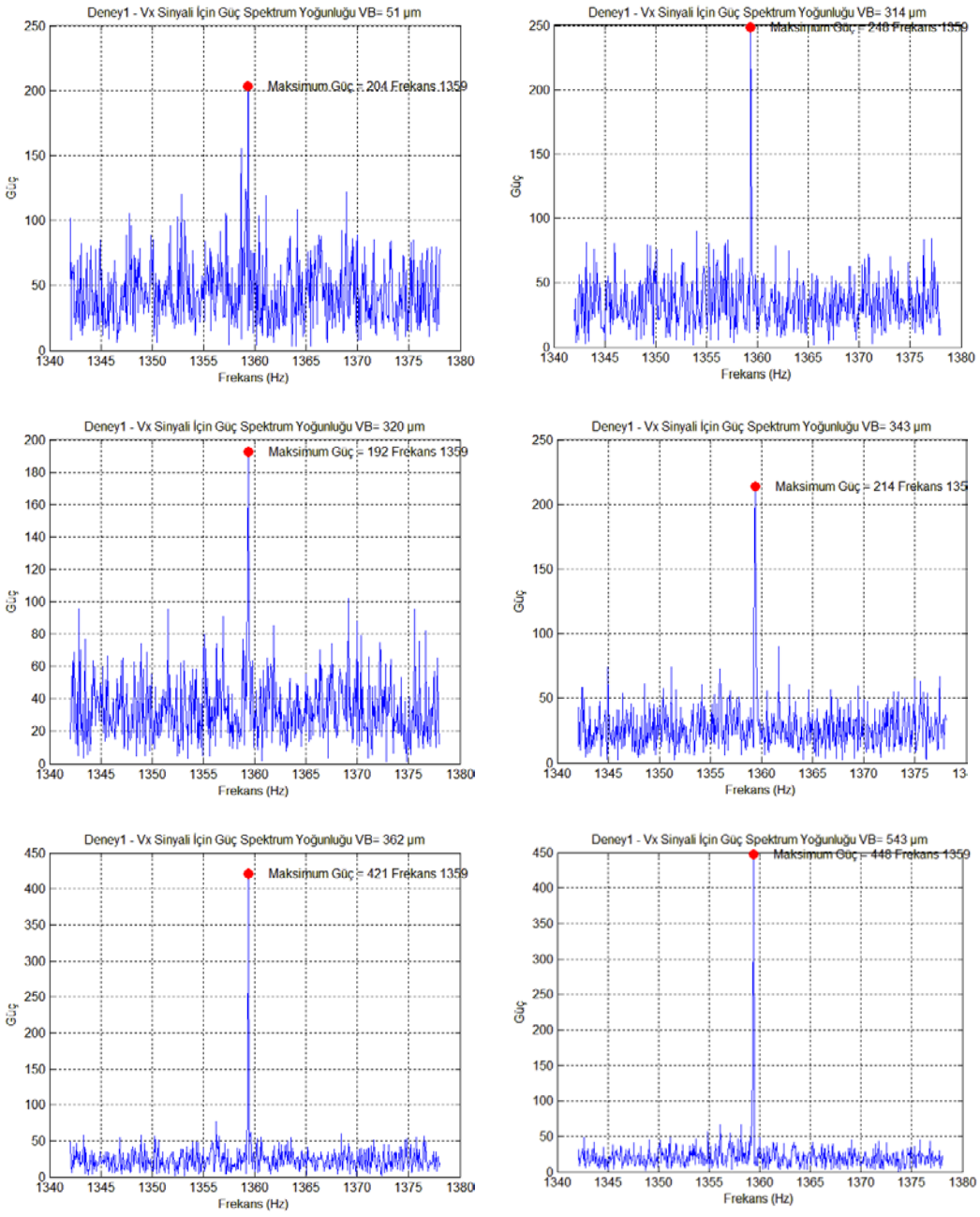
Şekil 5.47: Vx sinyali FFT analizi (Keskin ve Aşınmış Durum)

Şekil 5.47 ile görüldüğü üzere, sinyaller oldukça karmaşık, zamandan bağımsız frekans komponentleri ile dönme devri ve harmoniklerini içeren frekans dağılımına sahiptir. Benzer şekilde, Vy ve Vz akselerometre sinyalleri frekans analizinde ayrıştırılması ve analiz edilmesi zor frekans komponentleri içermektedir.

Frekans analizinde tüm sinyal dikkate alındığında, aşınma ile ilişkinin değerlendirilmesi açısından bir çok belirsizlikler içerdiğinden, sinyallerin analizi için lokal bir analiz yaklaşımı sunulmuştur. Bu yaklaşıma göre, Şekil 5.48 ile verilen karmaşık frekans yumağından seçilen bir frekans aralığındaki, belirli bir frekans komponentinin aşınmaya göre sergilediği genlikteki değişimler incelenmiştir.

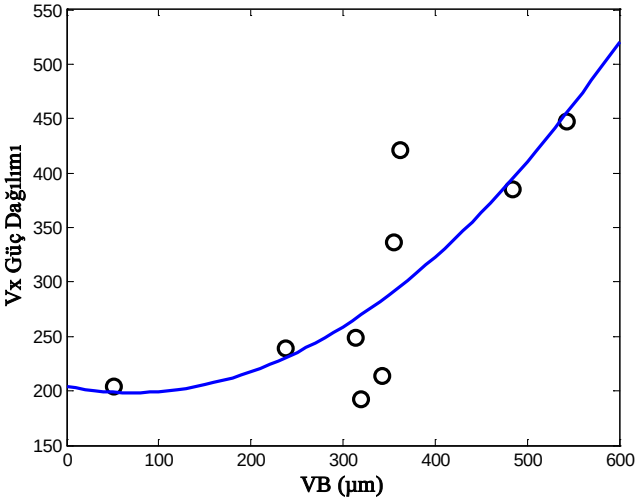


Şekil 5.48: Seçilen lokal frekans aralığındaki maksimum güç genliği



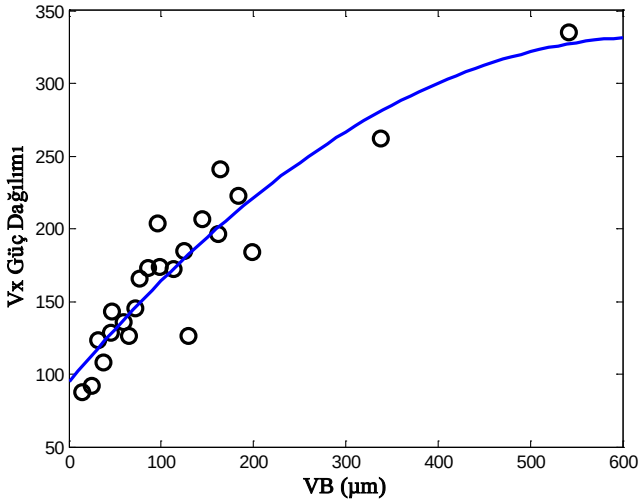
Şekil 5.49: VB=51 µm ~ VB=543 µm aralığında, 1359 Hz üzerindeki değişim

Şekil 5.49 ile Deney 1 koşullarında yapılan aşınma deneyinde, aşınmanın takımın keskin halinden (VB=51 µm), aşınmış durumuna (VB=543 µm) kadar, lokal frekans için seçilen bölgede, maksimum genliği üzerinde taşıyan 1359 Hz frekansına denk gelen güç genliklerindeki değişim süreci gösterilmiştir. Şekil 5.50 ile gösterilen bu değişim süreci, keskin takım ile aşınmış takım durumunu kesin olarak ayırt edebilecek artan bir eğilim göstermektedir.



Şekil 5.50: Deney 1 koşulları için Vx sinyalinde, 1359 Hz üzerinde aşınma-güç değişimi

Benzer şekilde bir diğer örnekte, Deney 9 koşullarında Vx sinyali için, 245-253 Hz lokal frekans aralığı seçilmiştir. Bu frekans aralığında, maksimum gücü barındıran 249 Hz üzerinde, aşınma sürecine göre güç genlik değişimi Şekil 5.51 ile verildiği üzere yine artan bir eğilim sergilemektedir.

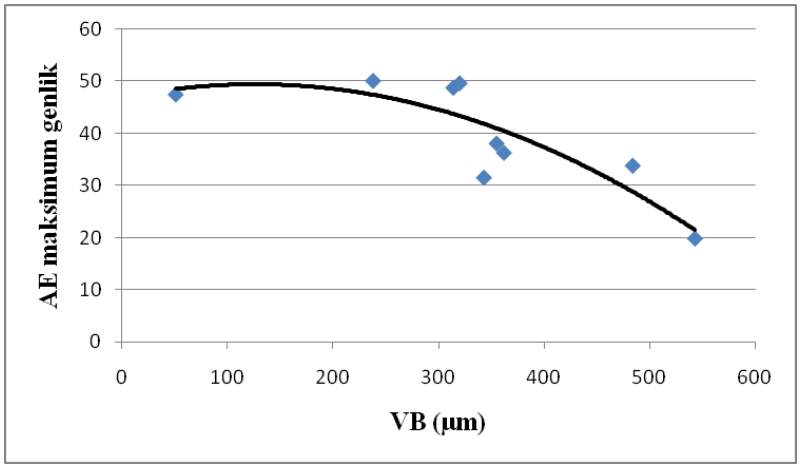


Şekil 5.51: Deney 9 koşulları için, Vx sinyalinde 249 Hz üzerinde aşınma-güç değişimi

Yine istatistiksel alanda titreşim sinyallerine benzer şekilde aşınma ile ilişkilendirilemeyen akustik emisyon (AE) sinyali, bahsedilen yaklaşımla frekans alanında incelenmiştir.

Deney 1 koşulları için, seçilen lokal frekans aralığında 99 Hz üzerinde, takım aşınıncaya kadar olan süreçte yapılan analizlerle, Şekil 5.52 ile gösterilen aşınma-güç

dağılımı eğrisi elde edilmiştir. Şekil 5.52 ile gösterilen grafiğe dikkat edildiğinde, AE sinyali, Şekil 5.50 ile verilen Vx sinyali eğiliminin tersine, artan aşınma ile maksimum güç genliğinde düşüşün gözlendiği bir eğilim sergilemektedir.



Şekil 5.52: Deney 1 koşulları için, AE sinyalinde 99 Hz üzerinde aşınma-güç değişimi

Benzer şekilde tüm diğer deney koşulları ve bunların aşınma süreçleri için, lokal frekans alanları araştırılabilir. Böylelikle, üç eksen titreşim (Vx, Vy, Vz) ve Akustik emisyon (AE) sinyalleri ve bunların belirli frekans aralıklarındaki maksimum genlikleri ile aşınma arasında iyi korelasyon gösterecek ilişkiler bulunabilir. Ancak sunulan bu yaklaşım, belirlenen deneysel tasarım alanı içinde üniversal bir çözüm sunmaktan uzaktır. Fakat özellikle, diğer sensörlere göre ucuz olan akselerometre sensörü bu yöntemle, üreticinin belirlediği tek ve en uygun kesme koşulu için, iyi irdelenerek seçilen bir frekans aralığında verimli çalışabilir. Bu çalışmanın esas amacı olabildiğince üniversal bir model sunmak olduğundan, çeşitli ipuçları içeren bu analiz yaklaşımı ileri bölümlerde sunulan modeller içinde kullanılamamıştır.

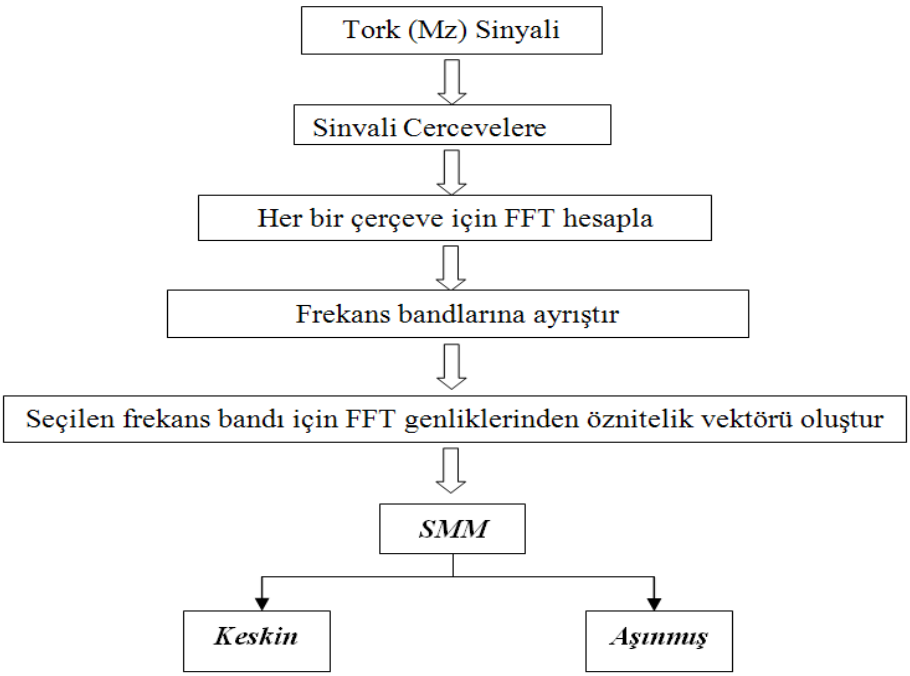
5.3. Saklı Markov Model ile geliştirilen TDG Sistemi ve Performansı

Çalışmada aşınma için Saklı Markov Model (SMM) kullanımı en az deney sayısı ile düşük hesap maliyetini sağlamıştır. SMM kurulumunda, yapılan istatistiksel analiz sonuçlarına göre aşınma ile yüksek korelasyon gösteren tork (Mz) sinyali kullanılmıştır. Tork (Mz) sinyali düşük maliyetlerle temin edilebilir. Tork (Mz) sinyali, fener miline veya takım tutucusuna entegre tork sensörleri ile elde

edilebileceği gibi, yine fener milinin çektiği akıma göre [58] dolaylı yoldan hesaplanabilmektedir.

Çalışmada, SM model kurulumunda; durumlar kümesi takımın keskin ve aşınmış, gözlemler kümesi ise, tork (Mz) sinyali olacak şekilde N ve M belirlenmiştir. Verilen bir gözleme (sinyale) göre SM modelin olası takım durumu hakkında bilgi vermesi bu şekilde sağlanmıştır.

SMM kurgusunun eğitim safhasında, ham haldeki sinyal bir takım ön işlemlerden geçirilerek kullanılabilir. Çok çeşitli yaklaşımlarla gerçekleştirilebilen bu süreç için, ses tanıma çalışmalarına benzer olarak, tork (Mz) sinyali üzerinde Ertunç' un [110] tanıttığı Şekil 5.53 ile verilen prosedür uygulanmıştır.

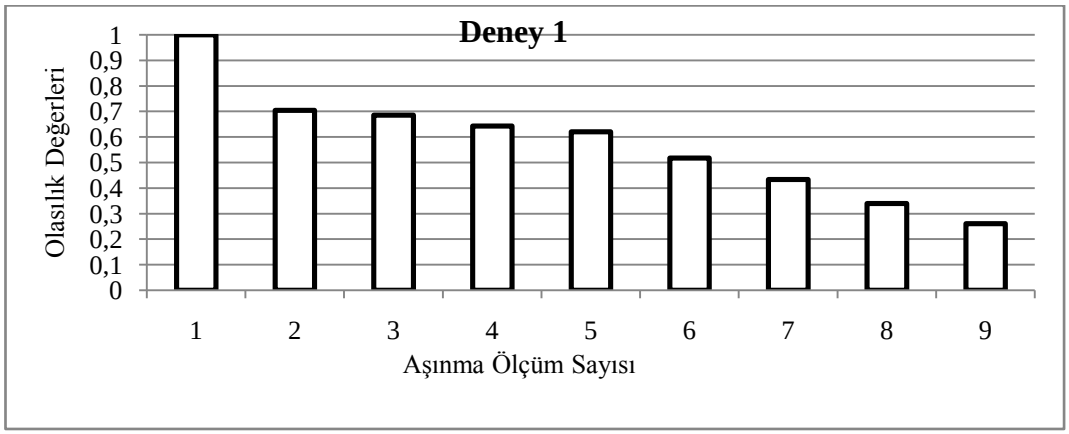


Şekil 5.53: SMM kurulumunda uygulanan prosedür

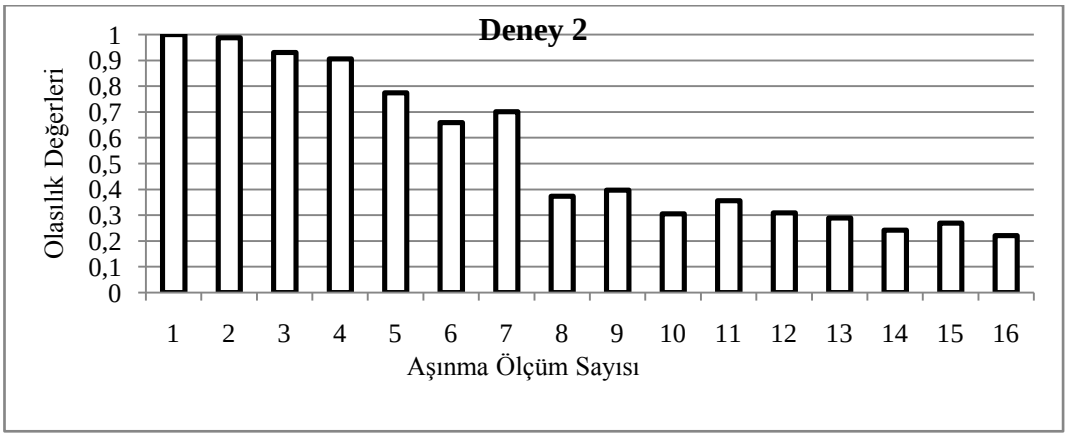
Buna göre, Tablo 4.1 ile verilen deney koşullarında her bir deney için, keskin ve aşınmış olacak şekilde takımın başlıca iki durumunu tespit etmeye yönelik bir SMM kurulmuştur. Bunun için her bir deney başlangıcındaki takımın keskin olduğu tek bir pasodaki Mz sinyali ile SMM eğitilmiştir. Bunu takip eden süreçte, takım aşınıncaya kadar ölçülen tüm diğer aşınma seviyelerindeki sinyaller ise sadece model performansının testi için kullanılmıştır.

Takımın keskin haline göre eğitilen SM model, eğitiminde tanıtılan keskin haldeki Mz sinyali ile aşınıncaya kadar olan safhadaki diğer sinyalleri mukayese ederek, sinyal benzerliğine göre olasılık değerler üretir.

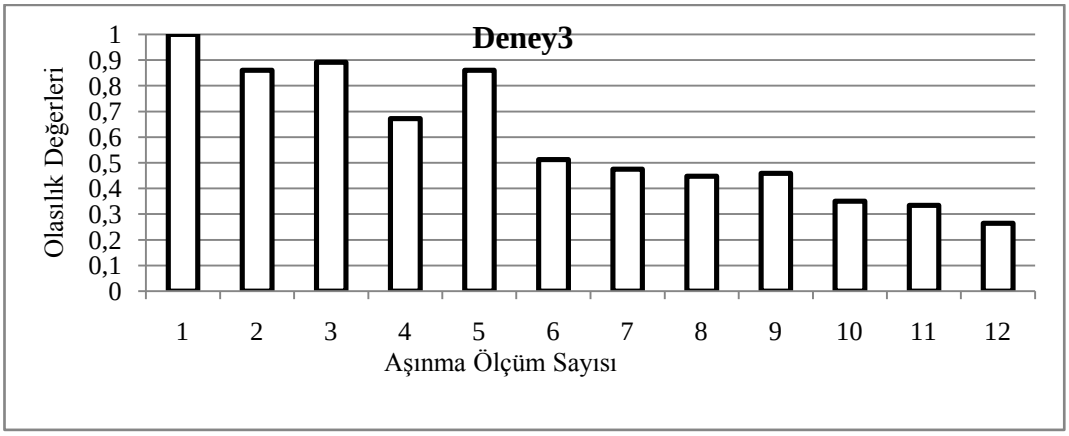
Şekil 5.54~Şekil 5.62 arasında verilen şekillerle, 9 ayrı kesme koşulu için aşınma süreçlerine göre, SM modelin oluşturduğu olasılık değerleri verilmiştir.



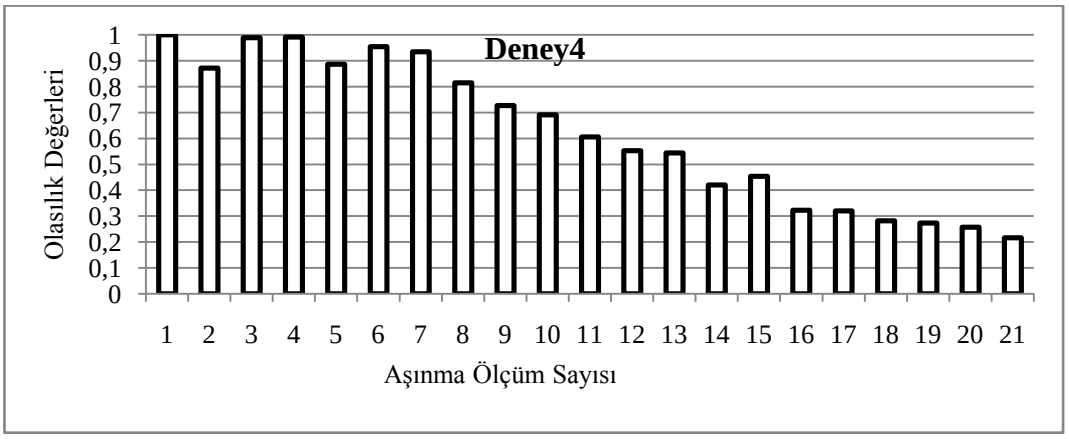
Şekil 5.54: Deney 1 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



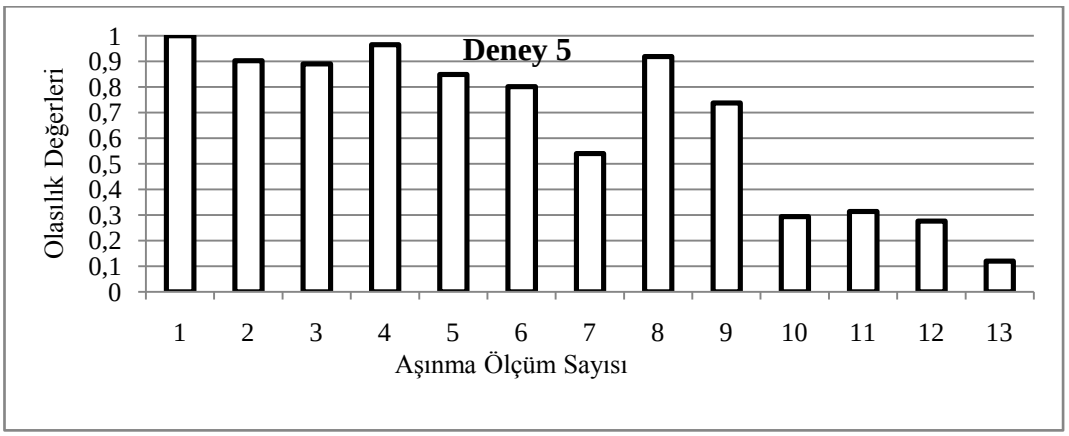
Şekil 5.55: Deney 2 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



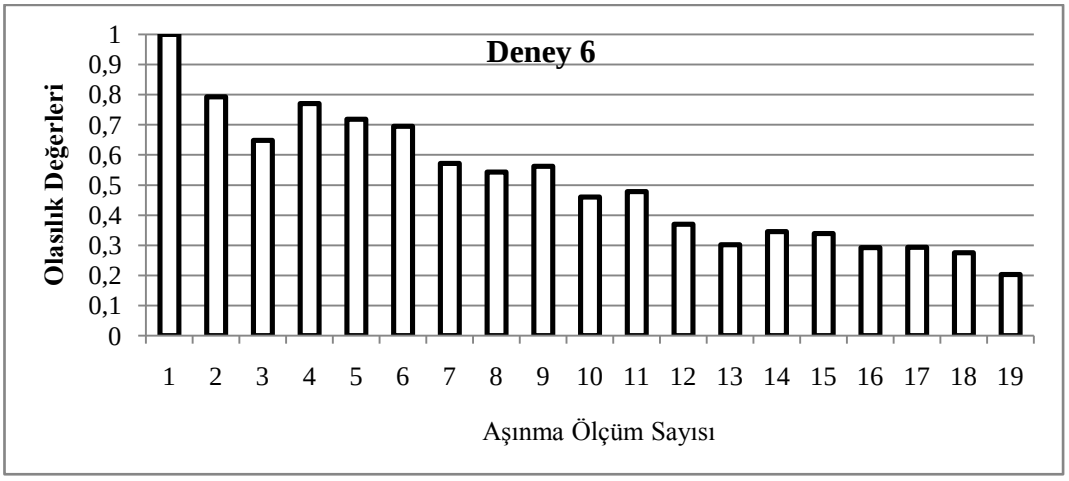
Şekil 5.56: Deney 3 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



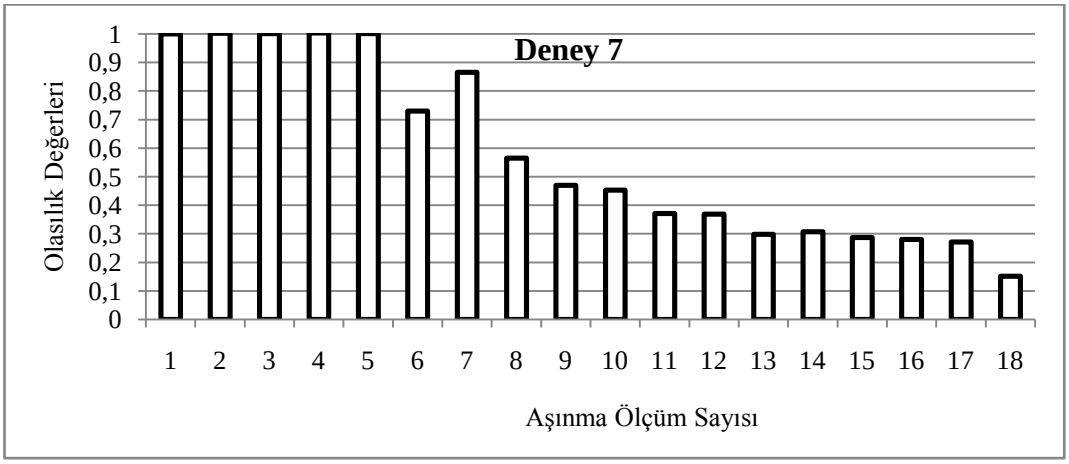
Şekil 5.57: Deney 4 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



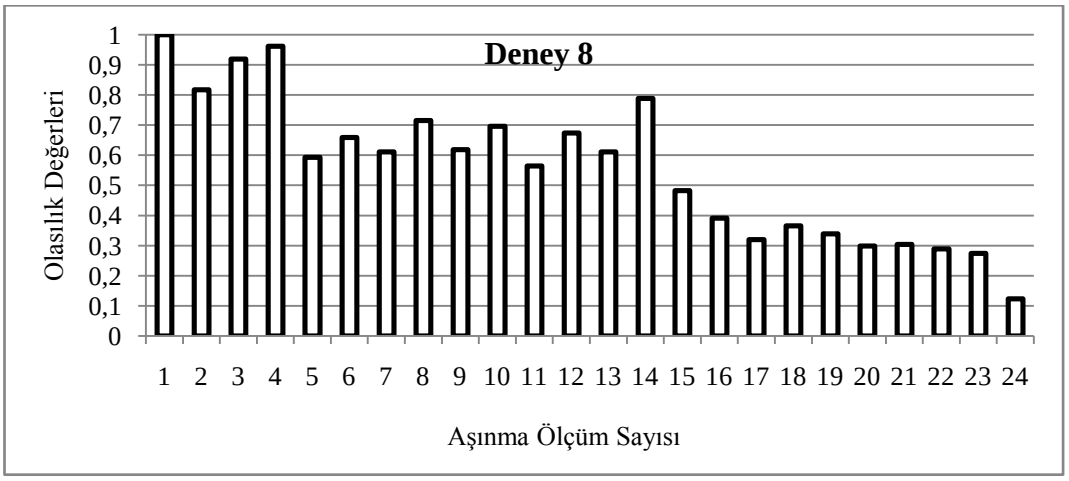
Şekil 5.58: Deney 5 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



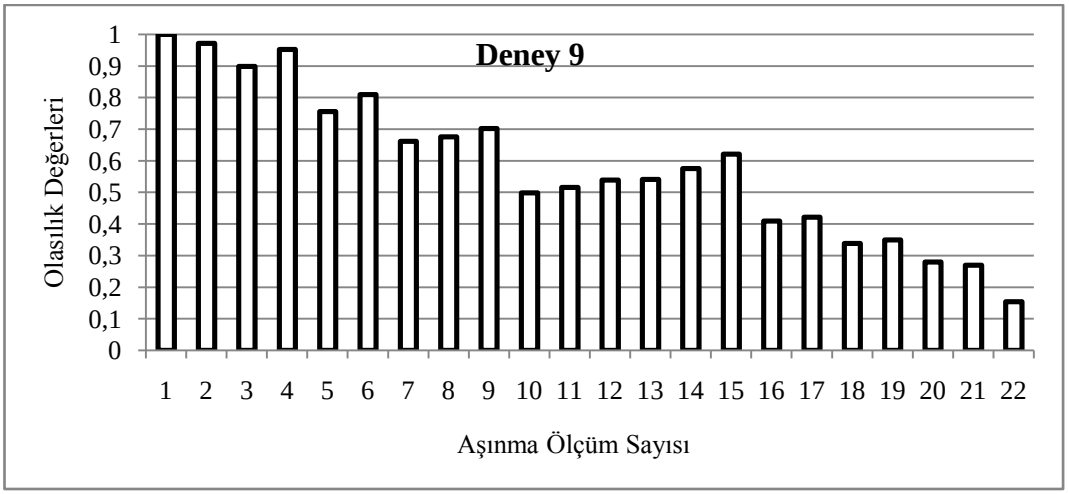
Şekil 5.59: Deney 6 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



Şekil 5.60**:** Deney 7 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



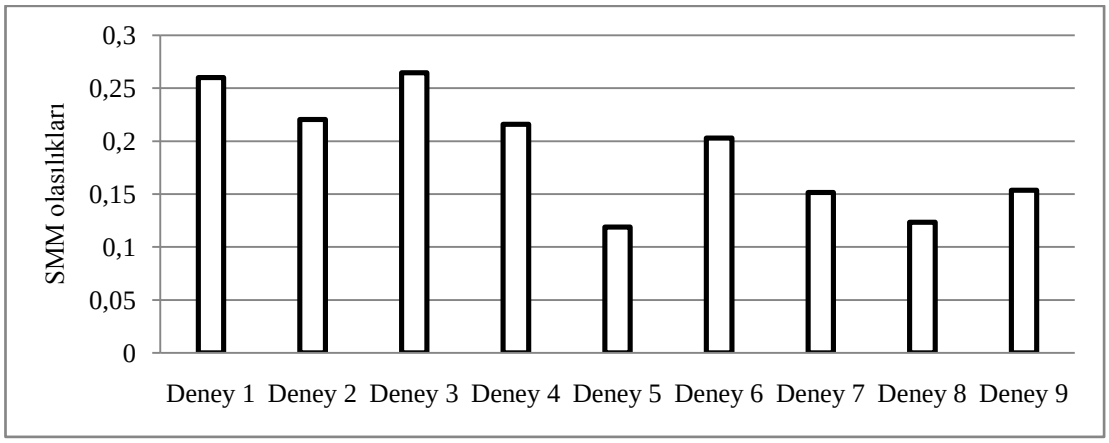
Şekil 5.61: Deney 8 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri



Şekil 5.62: Deney 9 koşulları için, kesici aşınmasına göre olasılık değerleri

Şekil 5.54~Şekil 5.62 arasında verilen histogramlara bakıldığında, takım aşındıkça olasılık değerlerinde belirgin düşmelerin olduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla bu düşüş eğilimi analiz edildiğinde, aşınma halini ayırt eden, etkili ve güvenilir bir TDG sistemi geliştirilebilir.

Eğer aşınma ölçümleri, "keskin, çalışabilir, aşınmış" olmak üzere 3 ana seviyede kümelenecek olursa, Şekil 5.54~Şekil 5.62 arasında gösterilen histogramlarda SM modelin "çalışabilir" sınıflandırmasındaki başarısının düşük olduğu gözlenebilir. Ancak sadece "aşınmış" sınıflandırması için; Şekil 5.54~Şekil 5.62 arasında verilen histogramlarda, SM modelin ürettiği takım ömrünü belirleyen tam aşınma halindeki aşınma seviyeleri için olasılık değerlerine odaklanılması gerekir.



Şekil 5.63: Deneylerde aşınmaya karşılık gelen olasılık değerleri

Şekil 5.63 ile verilen histogram özetle tüm deney koşulları için, takımların aşınmış kabul edildiği seviyedeki tork sinyallerine göre SMM ile üretilen olasılık değerlerini vermektedir. göre, historam üzerinde belirlenecek bir olasılıksal eşik değeri, takım ömrü tahmininde kullanılabilir.

Takım ömrü için eşik değer belirlerken Şekil 5.63 incelendiğinde, deney koşullarında SM modelin ürettiği en yüksek olasılık değer limit olarak seçilecektir. Dolayısıyla, diğer deney koşullarına göre, takımın ömrünü tamamladığı en yüksek olasılık değerin üretildiği Deney 3 koşulu dikkate alındığında, $P \leq 0{,}265$ koşulu, çevrimiçi TDG sistemi için aşınmayı ayırt eden bir limit olarak belirlenmiştir.

5.4. DVM model ile geliştirilen TDG sistemi ve performansı

Sınıflandırma amacıyla DVM modelin kurulmasında öncelikle aşınma (VB) ölçüm değerleri k-ortalamalar kümeleme algoritması ile 5 ana kümede toplanmıştır. Böylelikle aşınma seviyeleri için Tablo 5.4 ile verildiği üzere, K, KÇ, Ç, AÇ, A, olmak üzere 5 ayrı seviye için kodlama yapılması sağlanmıştır.

Tablo 5.4: DVM sınıflandırılması için aşınma seviye kodları ve anlamları

Numerik Kod	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***
Kod	K	KÇ	Ç	AÇ	A
Anlamı	Keskin	Keskin&Çalışabilir	Çalışabilir	Aşınmış& Çalışabilir	Aşınmış

LIBSVM [111] kütüphanesi yardımıyla, DVM tabanlı TDG sistemin geliştirilmesinde dinamometre ve akustik emisyon sensör sinyalleri kullanılarak çoklu sensör ve çoklu data entegrasyonu uygulanmıştır.

Sınıflandırma problemlerinde karşılaşılan en büyük sorun, öğrenme için seçilecek olan öznitelik vektörünün belirlenmesidir. Sınıflandırma problemlerinde birbiri ile hiçbir ilişkisi (korelasyonu) bulunmayan özniteliklerin seçimi daha iyi bir sınıflandırma performansının yakalanmasını sağlayabilir. Dolayısıyla bu çalışmada

takım aşınmasının sınıflandırılması için tüm sensörlerden elde edilen sinyallere ait çok çeşitli istatistiksel öznitelikler kullanılarak DVM modelin oluşturulması gerçekleştirilmiştir.

DVM modelin eğitiminde iki parametre kısıtlayıcı olarak seçilmiştir:

1. Her bir kümeden (aşıma seviye kodu için) en fazla bir üye seçerek en az eğitim verisi seçilmesi,
2. Bu eğitim verisine göre en yüksek doğrulukta sınıflandırma yapacak DVM modeli ve dolayısıyla öznitelik vektörünün bulunması

Genel olarak bir sınıflandırma problemi için ikinci kısıtlama oldukça zor ve zaman alıcı bir süreçtir. Çalışmada bu problemi aşmak için, gerek DVM eğitiminde kullanılacak en uygun özniteliklerin seçiminde, gerekse DVM başarısını etkileyen parametrelerin bulunmasında keşifsel (heuristic) arama yaklaşımı kullanılmıştır.

Bilgisayar biliminde keşifsel arama algoritmaları, bir problemin çözümü için en uygun sonucu vermeyen ancak, birçok pratik uygulama için kabul edilebilir çözüme ulaştıran algoritmalardır.

Keşifsel arama prosedürünün uygulanmasında ilk adım, rastgele doğrusal bir DVM üzerinde sınıflandırma başarısını arttıran öznitelik vektörlerinin araştırılmasıdır.
Bu amaçla, lineer bir DVM ve rastgele seçilen C=10 parametre değeri referans kabul edilmiştir. Rastgele belirlenen bu DVM model, başlangıçta tüm sensörlere ait sinyallerin öznitelikleri ile eğitilerek test edilmiş ve %27 oranında düşük bir sınıflandırma başarısı sağlamıştır.

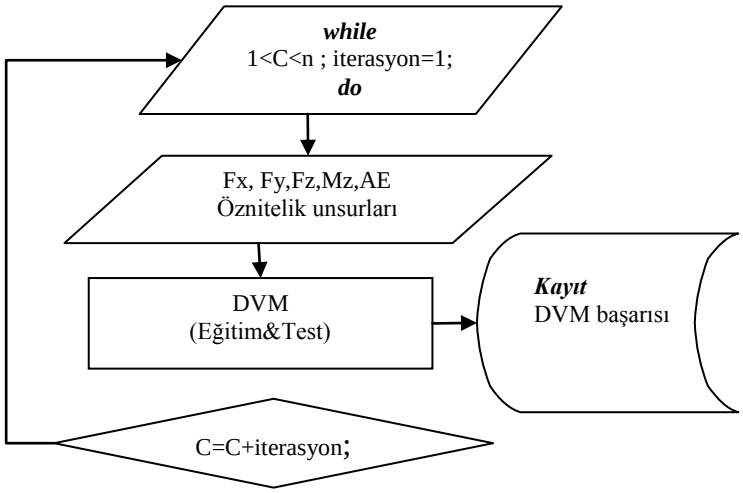
Bu noktadan sonra, referans alınan DVM modeli için, keşifsel arama algoritması ile modelin başarısını arttıracak olan istatistiksel özniteliklerin seçimi araştırılmıştır. Bunun için, belirlenen DVM modelin eğitiminde kullanılan öznitelikler, keşifsel arama prosedürü ile araştırılmış ve sonunda en yüksek başarıyı sağlayan öznitelik vektörü, daha kapsamlı bir DVM modelinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

Keşifsel arama prosedürü ile, Fx, Fy, Fz ve Mz sinyallerinin, ortalama, standart sapma, çarpıklık, kürtosis, RMS, medyan, maksimum ve minimum değerleri ile AErms sinyalinin 10. dereceden doğrusal öngörücü kodlama (Linear Predictive Coding- LPC) modelinin 4 katsayısı olmak üzere toplamda 36 ayrı istatistiksel öznitelik vektörü, olası en iyi sınıflandırmayı yapacak DVM modelin kurulması için seçilmiştir. Ancak, uygulanan keşifsel arama yaklaşımı, akselerometre sensöründen elde edilen tüm öznitelikleri eleyerek bu başarıyı sağlamıştır.

Buna göre her bir kümeden rasgele seçilen en az bir girdi ile toplamda 45 aşınma seviyesindeki veri, DVM modelinin eğitimi için seçilmiştir.

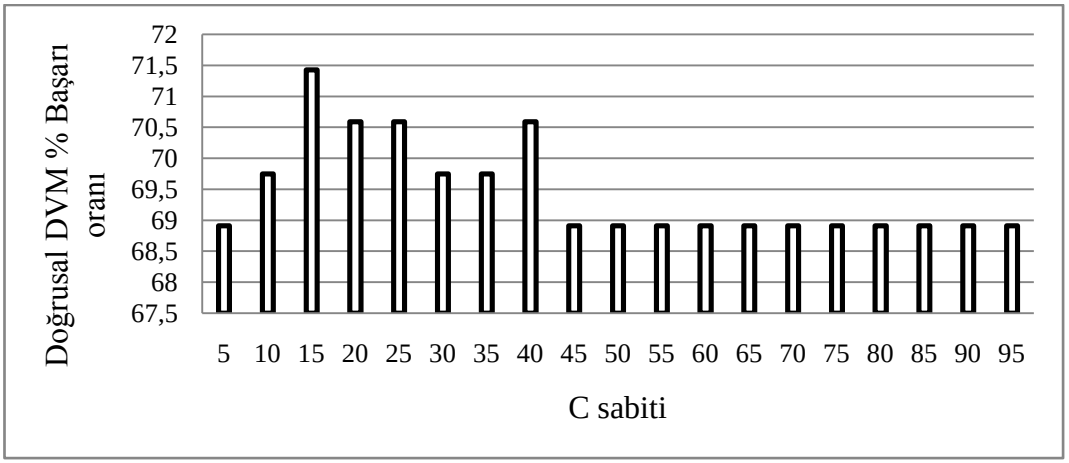
Öznitelik vektörü seçiminde sonra, daha yüksek bir sınıflandırma başarısı için kapsamlı DVM modellerinin araştırılması yapılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan DVM algoritmaları ile çok çeşitli çekirdek fonksiyonlarından başlıca ikisi olan doğrusal ve radyal bazlı çekirdek fonksiyonları (RBF) kullanılarak en yüksek başarıyı sağlayan DVM modeli araştırılmıştır.

En uygun modelin belirlenmesinde, kullanılan çekirdek fonksiyon tipine göre DVM parametrelerinin seçimi çok önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla en yüksek sınıflandırma başarısı için, çekirdek fonksiyon tiplerine göre ilgili DVM parametrelerinin belirlenmesinde yine keşifsel arama prosedürü kullanılmıştır.



Şekil 5.64: DVM modelin kurulmasında kullanılan keşifsel arama algoritması

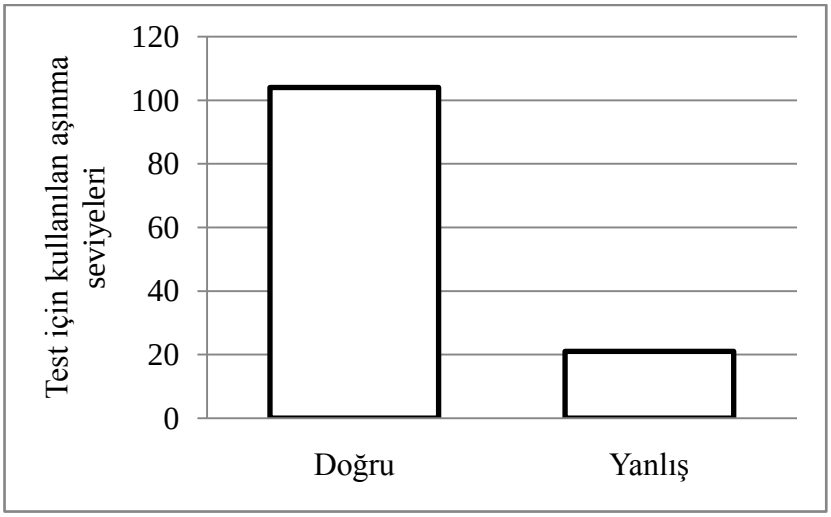
Şekil 5.64 ile verilen algoritma ile kullanıcının belirlediği limitler içinde, seçilen DVM tipine göre parametreler (C ve γ) belirlenen bir iterasyon ile arttırılır. Buna göre, her bir DVM parametresi için, modeller eğitim verisi ile eğitilir ve hemen ardından test verisi ile test edilerek sınıflandırma kaydedilir.



Şekil 5.65: Doğrusal DVM model için, başarı oranları (1<C<100 ve iterasyon=5)

Şekil 5.65 ile verilen grafikte, doğrusal en uygun bir DVM modelin seçiminde uygulanan keşifsel arama prosedürünün sonuçları görülmektedir. Buna göre, belirlenen 1<C<100 aralığı için C değeri, iterasyon değeri 5 olacak şekilde arttırılarak, DVM güncellenmekte ve sonuçta elde edilen modelin sınıflandırma başarısı kaydedilmektedir. Şekil 5.65 ile verilen grafikte dikkat edilirse, C sabitinin 10 ile 20 arasında olduğu değerler yüksek sınıflandırma başarının yakalandığı limitlerdir. Dolayısıyla bu limitler içinde daha küçük iterasyonlarla DVM başarısı yükseltilebilecektir.

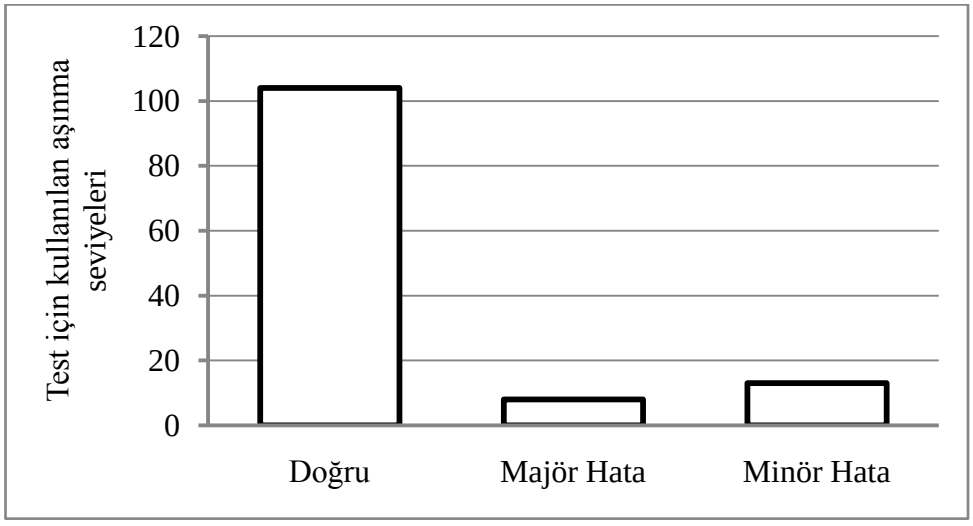
Bu prosedür vasıtasıyla gerçekleştirilen araştırma sonucunda, en düşük hata oranı, radyal bazlı çekirdek fonksiyonlu bir DVM modeli ile yakalanmıştır. C sabitinin 25 ve γ radyal çekirdek fonksiyon parametresinin 0,3 olarak bulunduğu modelde, 41 destek vektörü bulunmaktadır. Kurulan model, test aşamasında kullanılan 125 aşınma seviyesini, %83 oranla doğru bir şekilde sınıflandırarak, tatminkâr bir başarı sunmuştur. Şekil 5.66 ile 125 test verisi için sınıflandırma hata oranını gösteren histogram verilmiştir.



Şekil 5.66: DVM modelin test performansı

Takım aşınması sınıflandırılmasında, Şekil 5.66 ile verilen histogramdaki yanlış sınıflandırılan bölgenin analizi ile DVM sınıflandırma başarısı bir seviye daha arttırılabilir. Takım aşınması için sınıflandırma hatasını, majör ve minör hata olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Majör hata gerçekte aşınmamış bir takımı, "aşındı" (kod 5 veya A) olarak gösteren kritik hatadır. Minör hata ise daha alt seviyedeki sınıfların birbiri alanına geçerek, sınıflandırma hatası yapmasıdır. Buna göre, tespit edilen 8 kritik hatanın ayrıştırılması ile sınıflandırma hatası Şekil 5.67 ile verildiği gibi güncellenebilir.



Şekil 5.67: DVM hata oranının sınıflandırılması

Şekil 5.67 ile gösterilen grafikte minör sınıflandırma hatasının, bir sonraki aşınma seviyesine ulaşıldığında doğru sınıflandırılabilme ihtimalinin yüksek olduğu varsayımıyla, DVM modelin aşınma için, gerçekte hata oranının daha düşük çıkacağı söylenebilir.

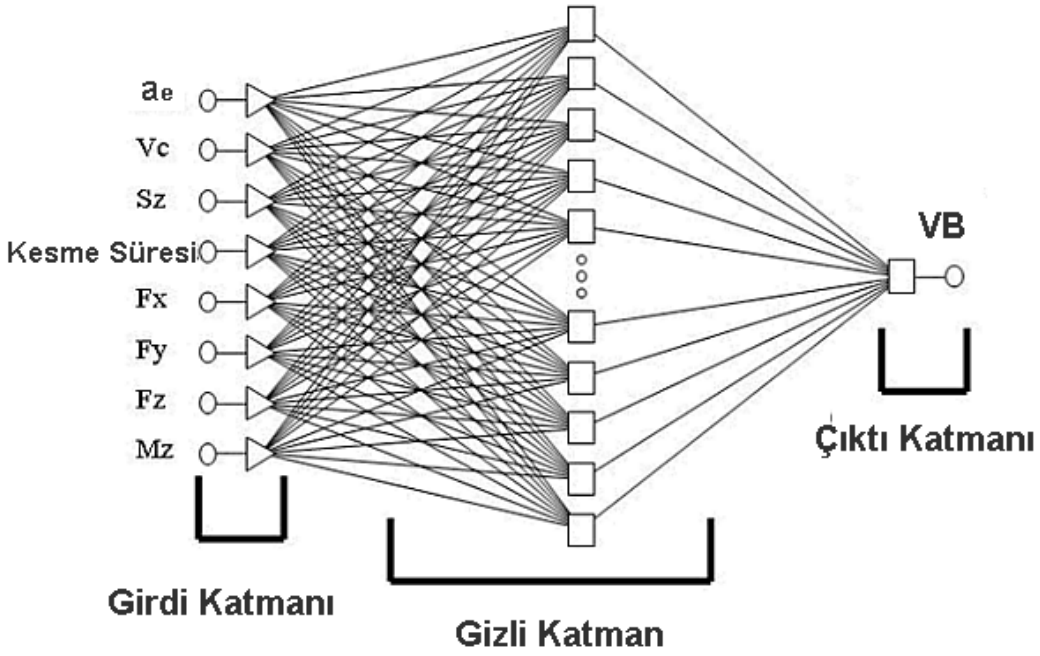
5.5. YSA ile geliştirilen Çevrimiçi TDG Sistemi ve Performansı

YSA'nın, TDG sistemine uygulanmasında 9 deney koşulundan elde edilen, 170 aşınma seviyesinde mikroskop vasıtasıyla ölçülen aşınma (VB) değerleri kullanılmıştır. YSA modeli oluşturmak için, EK-H ile verilen veriler, öğretme ve test verisi olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Böylelikle, rastgele seçilen tüm verinin %85'i (145 gözlem) YSA eğitimine, geri kalan %15 ise (25 gözlem) ise ayrılarak YSA model performansının test edilmesi için kullanılmıştır.

YSA modelin girdileri, çoklu regresyon analizlerinde sergilediği yüksek ilişki nedeniyle seçilen, kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) ile torkun (Mz) RMS değerleri ve bunlara ek olarak, kesim süresi, kesme koşullarıdır. YSA modelinin çıktısı ise takım serbest yüzeyi üzerindeki maksimum aşınma (VB) değeridir.

Çevrim içi sistemde, kesme koşuları, yazılımının ürettiği (CAM), takım yolu kesme dosyasından (CLDATA) veya tezgâh kontrol kodlarından (G kod) çıkarılabilir. Benzer şekilde, kesme süresi ise her bir paso için veri toplama anında, başlama ve bitiş tetikleme süresi arasındaki farktan çıkarılabilir.

YSA modelin performansı kullanılan katman ve nöronların sayısından etkilenmektedir. Gerekli olan katman ve nöron sayısını verecek kesin bir yöntem veya algoritmanın bulunmaması YSA'nın önemli dezavantajlarındandır. Dolayısıyla çoğu YSA kullanılan çalışmaya benzer şekilde, takım aşınması tahminindeki performans kriterleri değerlendirilerek, deneme yanılma yöntemi ile optimum YSA model mimarisi araştırılmıştır. Buna göre bulunan en uygun YSA yapısı, Şekil 5.68 ile verilen mimari olarak sunulmuştur.



Şekil 5.68: TDG sistemi için kullanılan YSA model mimarisi

Bu mimariye göre girdi katmanındaki nöron sayısı ile girdi sayısı aynıdır. Gizli katmanda ise 12 nöron bulunmaktadır. Çıktı katmanında ise tek bir çıktı olarak VB tahmin edilmektedir.

Gizli katmanda bulunan aktivasyon (transfer) fonksiyonu, YSA model başarısını etkileyen bir diğer faktördür. Uygulanan ağ yapısında, deneme yanılma ile birçok transfer fonksiyonu arasından en yüksek performansı göstererek seçilen, hiperbolik tanjant fonksiyon kullanılmıştır;

$$f(n) = \frac{e^{n} - e^{-n}}{e^{n} + e^{-n}} \tag{5.2}$$

(5.3) ile verilen ifade vasıtasıyla, girdi ve çıktı verilerinin [-1 1] aralığında olacak şekilde ölçeklendirilmesi sağlanmıştır,

$$p_n = \frac{p - \min(p)}{\max(p) - \min(p)} - 1 \tag{5.3}$$

(5.3) ile verilen eşitlikte, p_n, p ile ifade edilen verinin dönüştürülmüş halidir.
YSA performansının ölçülmesinde, sıralanan (5.4) ve (5.5) ifadelerinde verilen ortalama bağıl hata (Mean Relative Error- MRE) ve mutlak değişim yüzdesi (absolute fraction of variance - R^2) hesaplatılarak, kullanılmıştır.

$$MRE(\%) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|100\frac{(a_i - p_i)}{a_i}\right| \tag{5.4}$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(a_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} p_i^2}\right) \tag{5.5}$$

(5.4) ve (5.5) ile verilen ifadelerde, a_i gerçek değer, p_i tahmin edilen çıktı değeri, N ise YSA testi için ayrılan örnek sayısıdır.

Matlab Neural Network Toolbox [88] vasıtasıyla, ortalama bağıl hata (MRE) ve mutlak değişim yüzdesinin (R^2) kriter olarak kullanıldığı bir prosedür uygulanarak, en düşük ortalama bağıl hata ile en yüksek mutlak değişim yüzdesi değerini veren en uygun model, deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

En uygun YSA mimarisinin seçiminde 170 veri içinden, Tablo 5.5 ile verilen test için rastgele seçilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 5.5 ile verilen YSA modelin çıktı parametresi olan VB_{pr} tahmininde, en iyi performans, 3 katmanlı ileri beslemeli geri yayılmalı bir YSA modelin eğitimi ile yakalanmıştır. YSA modelin eğitiminde, Broyden, Fletcher, Goldfarb and Shanno (BFGS), eğim düşümü (gradient descent) ve Levenberg–Marquardt olmak üzere 3 farklı geri yayılım algoritması kullanılmıştır. En iyi performans ise Levenberg–Marquardt geri yayılım algoritması ile yakalanmıştır.

Tablo 5.5: Test aşamasında kullanılan veriler ve aşınma tahmini

a_e	Vc	Sz	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)	Mz(Nm)	Kesme süresi (dak)	VB(µm)	VBpr (µm)
0.6	100	0.12	68.97	78.645	315.72	0.35404	2.19	343	331
0.6	100	0.12	75.924	90.929	361.87	0.39128	5.76	543	514
0.6	75	0.09	50.063	52.436	207.88	0.28319	30.24	209	210
0.6	75	0.09	66.561	59.671	244	0.36491	37.55	439	419
0.6	50	0.06	33.617	46.934	133.13	0.26242	88	113	123
0.45	100	0.09	54.042	59.996	235.97	0.25984	9.11	328	307
0.45	100	0.09	54.934	62.457	245.61	0.26599	9.84	346	326
0.45	100	0.09	61.477	76.146	306.13	0.31028	13.12	407	388
0.45	100	0.09	66.029	85.092	342	0.33727	14.21	411	389
0.45	100	0.09	72.445	96.93	388.34	0.36541	20.77	476	498
0.45	75	0.06	30.849	19.548	77.149	0.15856	92.4	103	108
0.45	75	0.06	64.232	81.766	311.37	0.33941	137.13	409	450
0.3	100	0.06	41.76	44.756	175.84	0.19281	99.34	238	189
0.3	100	0.06	49.719	59.921	235.88	0.23384	109.17	300	307
0.3	100	0.06	63.695	80.791	314.67	0.31566	128.82	489	464
0.3	75	0.12	35.232	16.323	64.439	0.1798	31.33	77	84
0.3	75	0.12	32.917	16.027	63.486	0.16854	45.54	95	97
0.3	75	0.12	38.667	23.389	90.874	0.1912	66.67	118	128
0.3	75	0.12	53.585	46.906	185.79	0.28573	118.77	380	412
0.3	75	0.12	55.645	50.542	200.47	0.29096	130.8	495	490
0.3	50	0.09	27.153	11.39	45.048	0.15852	47.67	38	36
0.3	50	0.09	27.203	11.201	44.292	0.16572	68.93	45	44
0.3	50	0.09	33.629	16.748	66.252	0.1929	261.8	125	128
0.3	50	0.09	39.634	22.297	88.274	0.22734	340.27	164	169
0.3	50	0.09	43.338	24.979	99.028	0.2503	368.87	184	186

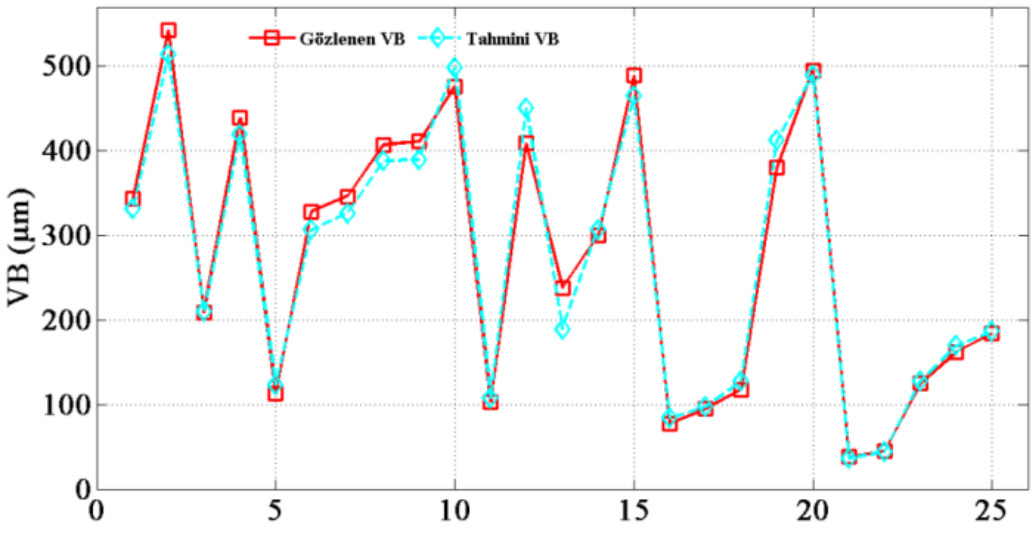
Belirlenen kriterlere göre, deneme yanılma prosedürü vasıtasıyla seçilen en yüksek performansa sahip YSA model mimarisi ve özellikleri Tablo 5.6 ile özetlenmiştir.

Tablo 5.6: Çalışmada en yüksek performansı veren YSA mimarisi ve özellikleri

Girdi düğüm sayısı	8
Gizli katman düğüm sayısı	12
Çıktı düğüm sayısı	1
Öğrenme metodu	Yönlendirmeli öğrenme
Algoritma	Levenberg–Marquardt
Öğrenmede kullanılan örnek sayısı	145
Kullanılan öğrenme parametresi	0.5
İterasyon sayısı	5000
Aktivasyon (transfer) fonksiyonu	Hiperbolik tanjant

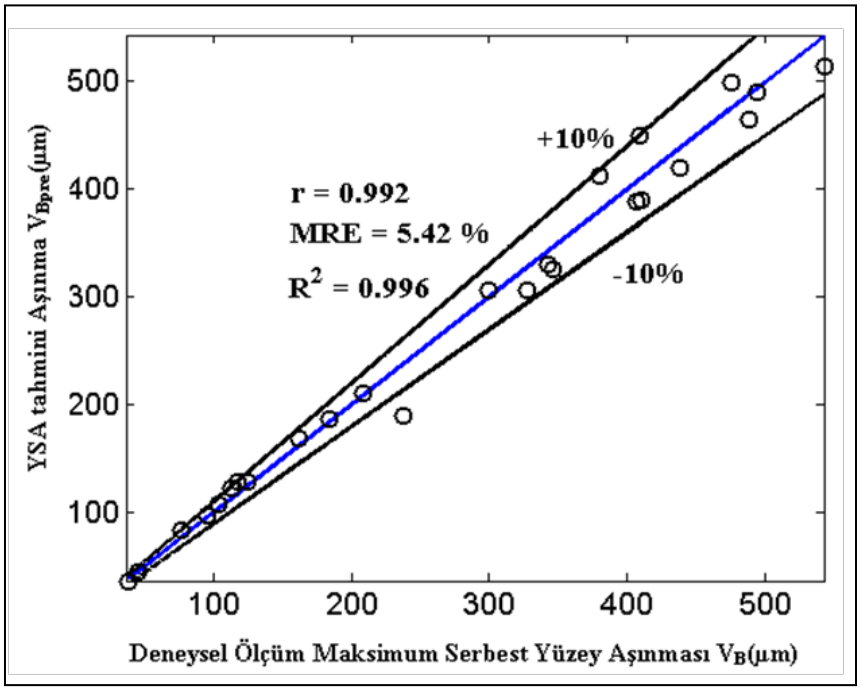
Bu performans kriterlerine göre Tablo 5.5 ile verilen YSA girdilerine karşılık çıktı (VB_{pr}) tahmin edilmiş ve bu tahminler ile gerçekte gözlenen (ölçülen) aşınma değerleri (VB) mukayese edilmiştir.

Şekil 5.69 ile gösterilen grafikte, 25 test verisi için gerçek değer ile YSA tahmin değerleri karşılaştırılarak, YSA performansı sunulmuştur.



Şekil 5.69: Gerçek aşınma değeri (VB) ile tahmini değer (VB_{pr}) karşılaştırması

Şekil 5.70 ile gösterilen grafikte ise, belirlenen ±%10 barajına göre, korelasyon katsayısı 0.992 gibi yüksek bir değerde hesaplatılmıştır.



Şekil 5.70: YSA performansının değerlendirilmesi

Şekil 5.70 ile verilen grafikte düz çizgi, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mükemmel uyumun göstergesidir. Bir diğer gösterge olan, ortalama bağıl hata (MRE) ise %5.42 gibi düşük bir seviyede hesaplanarak, oldukça iyi bir performans yakalanmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, endüstride önemli bir problem olan takım aşınmasının çevrimiçi olarak gözlenmesi konusunu ele almaktadır. Bu konuda çözüm olarak sunulan materyal ve yöntemler ile bunların analizlerinden çıkan sonuçlar ve öneriler bu bölüm altında sunulmaktadır.

Tez çalışmasının birinci ayağını oluşturan uygulama safhasında, CNC işleme merkezinde gerçekleştirilen deneylerde, Inconel 718 malzeme belirlenen 9 ayrı kesme koşulunda kesilmiştir. Bu koşulların aşınmaya etkisi araştırıldığında, kesme derinliği (a_e) başta olmak üzere kesme hızının (Vc) takım ömrüne etkisinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Deneysel çalışma esnasında takım üzerindeki aşınmanın, ilgili standart ile tanımı yapılan, "bölgesel yan aşınma" tipi olduğu gözlenmiştir. Standart ile verilen "herhangi bir ağız için en fazla 0,5 mm" kriteri, takım ömrü olarak kabul edilmiştir.

Çalışmanın uygulama safhasında sensör füzyonu amaçlanmış, dolayısıyla dinamometre, akselerometre, akustik emisyon, akım yük ölçeri gibi çok çeşitli sensörler kullanılmıştır. Ancak, veri toplama esnasında diğer sensörlerden gelen sinyalleri bozması nedeniyle akım yükü sensörü kullanılamamıştır. Bu durum, sensör füzyon uygulamalarında çeşitli sensör sinyallerinin birbirine girişim yaparak gürültü oluşturabileceği ve eşzamanlı veri toplanmasında problemlerle karşılaşılabileceğine işaret etmektedir.

Özellikle frezeleme işlemi için geliştirilecek çevrimiçi bir TDG sisteminde, sensör konumları, uygun veri toplanması açısından çok önemlidir. Çalışma da, takımın iş parçasına göre bağıl hareketinden kaynaklanabilecek problemlerin önüne geçmek için, başlangıçta akselerometre ve akustik emisyon sensörü, -takım tarafında- fener mili üzerine yerleştirilmiş ancak kesme işlemine duyarlı sinyaller toplanamamıştır.

Dolayısıyla sensörler, literatürde sunulan bazı çalışmaların aksine ancak iş parçası tarafına yerleştirilerek kesme işlemine duyarlılıkları sağlanabilmiştir.

Aşınmanın kesme kuvvetleri ve tork üzerine etkisi incelendiğinde ise, genelde tüm kesme koşulları için aşınma arttıkça bu sinyallerin genliklerininde artma eğilimi gösterdiği gözlenmiştir. Ancak bazı kesme koşulları için bu eğilimin karmaşıklaştığı ve özellikle belirgin olarak takım eksenindeki Fz sinyali genliğinde, ilerleyen aşınmaya seviyelerine rağmen gerilemelerin olduğu gözlenmiştir. Bu durum çentiklenme ve krater aşınması etkisi ile düzensiz gelişen aşınmanın, talaş açısını değiştirdiğini işaret etmektedir. Talaş akışını rahatlatan geometrilere ulaşıldığında, kuvvetlerde kısa sürelik düşmeler söz konusu olmaktadır. Bu karmaşık eğilim, elbette makine öğrenmesi algoritmalarının başarısını etkileyen bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Üç eksendeki (Vx, Vy, Vz) akselerometre sinyalleri ile aşınma arasındaki ilişki zaman alanında incelendiğinde, koşuldan koşula oldukça değişen, kaotik bir davranış gözlenmiştir. Benzer eğilim, akustik emisyon sensör sinyali içinde geçerlidir. İstatistik alanda karşılaşılan bu karmaşıklığın temelde nedeni, frezeleme işleminde kesici takımın ve dolayısıyla kesme işleminin sensörlere göre sürekli olarak yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Zaman ve istatistiksel alanda olduğu gibi, akselerometre ve akustik emisyon sinyallerinin, frekans alanında gerçekleştirilen analizleri ile aşınma arasında yine anlaşılması zor ve kaotik bir ilişki gözlenmiştir. Frekans alanında karşılaşılan bu problem ise frezeleme işleminde takımın kendi ekseni etrafında dönerek, iş parçasından fasılalı olarak talaş kaldırmasından kaynaklanmaktadır. Ancak yine de örnek olarak akselerometre ve AE sinyali için belirli frekans aralığında yakalanan genliğin değişimi ile aşınma arasında nispeten kullanılabilir bir ilişki sunulmuştur. Bu yöntem sabit kesme koşulları için kabul edilebilir olsa da, üniversal bir çözüm olarak sunulamayacağından, aşınmanın modellenmesinde kullanılmamıştır.

Bir çevrimiçi TDG sisteminin en önemli üçüncü ayağı olan aşınmanın tahmini safhasında, Saklı Markov Model (SMM), Destek Vektör Makinası (DVM) ve Yapay

Sinir Ağı (YSA) algoritmaları kullanılarak, aşınma modellenmiştir. Buna göre çıkarılan genel sonuçlar ise şu şekilde sıralanabilir;

Çalışma da, "keskin" ve "aşınmış" olacak şekilde takımın başlıca iki durumunu tespit etmeye yönelik bir SMM sunulmuştur. Bunun için her bir deney başlangıcındaki, keskin haldeki takıma ait tork (Mz) sinyali ile SMM eğitilmiştir. Takım ömrünü belirleyen seviyeye kadar ölçülen tüm diğer aşınma safhalarındaki Mz sinyalleri ise sadece SM modelin testi için kullanılmıştır. Model test sonuçlarına göre, takım aşındıkça olasılık değerlerininde belirgin bir şekilde düştüğü gözlenmiştir. Buna göre, $P \leq 0{,}26$ olasılık koşulu, takım ömrünü gösteren bir eşik değer olarak sunulmuştur. Eğitim için en az veriye ihtiyaç duyması, tekrar eğitim ve cevap verme süresinin düşüklüğü nedeniyle çevrimiçi TDG sistemlerinde SMM kullanımı önemli avantajları barındırmaktadır.

Çalışmada kullanılan bir başka karar modeli olan Destek Vektör Makinası (DVM), takım durumunu 5 ana seviyede sınıflandırmak için kullanılmıştır. DVM modelin eğitiminde, Fx, Fy, Fz ve Mz sinyallerinin, ortalama, standart sapma, çarpıklık, kürtosis, RMS, medyan, maksimum ve minimum değerleri ile akustik emisyon (AE) RMS sinyalinin 10. dereceden doğrusal öngörücü kodlama (linear predictive coding) modelinin 4 katsayısı olmak üzere, 36 öznitelik kullanılmıştır. DVM modelin eğitiminde, deney maliyetini düşürmek amacıyla sadece her bir sınıfı temsil eden girdi ile toplamda 45 x 36 boyutlu bir matris eğitim için kullanılmıştır. Keşifsel arama prosedürü ile birçok DVM model içinden, %83 sınıflandırma başarısının yakalandığı, C sabitinin 25 veγ radyal çekirdek genişlik parametresinin 0,3 olduğu radyal tabanlı bir DVM seçilmiştir. Gerek DVM eğitiminde kullanılan özniteliklerin, gerekse DVM tip ve parametrelerinin seçiminde keşifsel arama algoritması kullanıldığından, çalışma da sunulan sınıflandırma başarısı en yüksek başarı olmayabilir. Ancak minimum eğitim verisi ile yakalanan bu başarı, kabul edilebilir düzeyde görüldüğü için keşifsel arama sonlandırılmıştır. Ayrıca sunulan, "majör" ve "minör" hata ayrıştırma yöntemiyle kritik hata ayrıştırılarak, elde edilen başarı oranı yükseltilmiştir.

Literatürde aşınma için kullanılan birçok çalışmada olduğu gibi, bu çalışma için kullanılan YSA modelin oldukça başarılı bir performans sergilediği gözlendi. YSA modeli kurmak için kullanılan veri, öğretme ve test verisi olmak üzere ikiye ayrıldı. Sunulan YSA modelin öznitelik girdileri, kesme süresi, kesme koşulları, kesme kuvvetleri ve torkun RMS değerleridir. Çalışmada, aşınma (VB) değerini %5.42 gibi düşük bir ortalama hata ile tahmin eden, ileri beslemeli geri yayılma algoritması ile üç katmanda, olası en uygun YSA model mimarisi tanıtılmıştır.

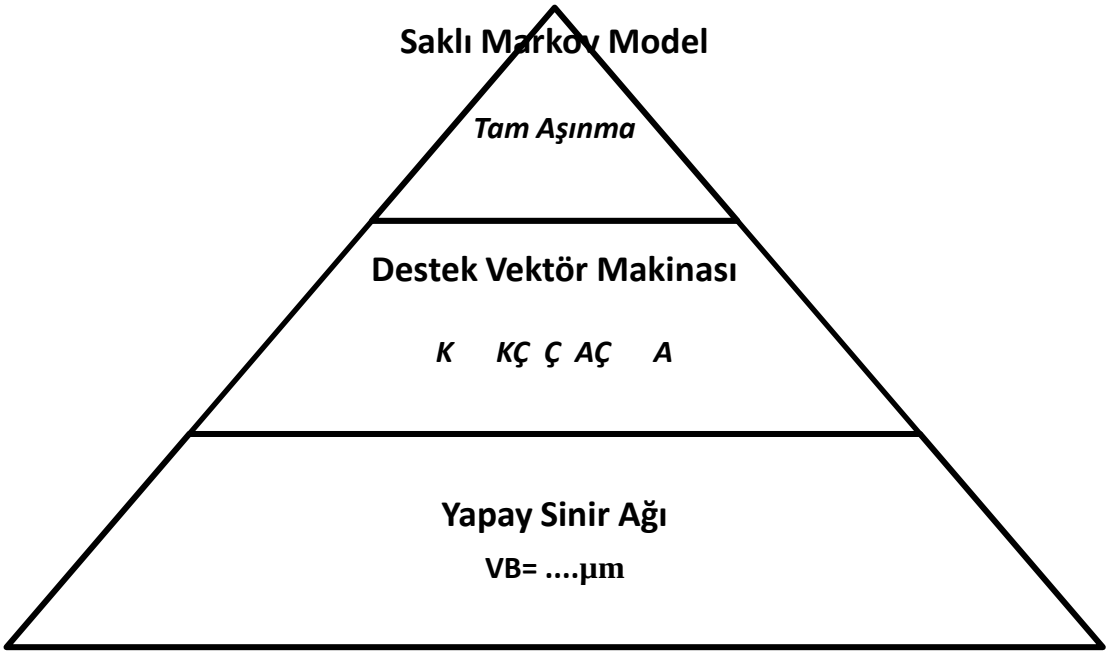
Ancak, literatürde benzer çalışmalarda olduğu gibi bu tez çalışmasında da kullanılan YSA modelin yüksek performansının, kesme koşulları ve süresi gibi operatör kontrolünde kolaylıkla değiştirilebilir parametrelere bağlı olması, modelin endüstriyel uygulamalar için kullanımını zorlaştırıcı bir etkendir. Aşınma durumuna karşılık gelen kesme süresi, kesme koşullarına bağlı olduğu gibi, her aşınma deneyinde karşılaşılabilecek sapma (tekrarlanabilirlik) hatasıyla da değişebilir. Bu olumsuzluklara ek olarak, YSA'ların literatürde sıralanan bir dizi dezavantajı nedeniyle, çevrimiçi TDG sistemleri için YSA, tek başına güvenilir bir karar modeli olarak görülmemiştir.

Dolayısıyla sunulan bu genel sonuçlardan özetle, çevrimiçi TDG sistemin, güvenilir kontrol ve uzman sistemlerine uygulanabilmesi için model entegrasyonuna dayalı alternatif bir yöntem önerilmektedir. Önerilen karar model entegrasyonu ile tüm modellerin avantajlı yönleri bir havuzda birleştirilerek, güvenilir çevrimiçi TDG sistemlerin tasarımı gerçekleştirilebilir.

Çoklu karar entegrasyon modelinin oluşturulmasında, karar modelleri birbirini tamamlayacak nitelikte, belirli seçim kriterlerine göre belirlenmiştir. Böylelikle, çoklu model entegrasyonu ile oluşturulan global karar entegrasyon modelinde, yukarıdan aşağıya uygulanan hiyerarşi ile takım durumu ile ilgili en güvenilir kararın verilmesi sağlanır.

Önerilen global karar modeli için hiyerarşi, şu seçim kriterlerine göre sağlanmıştır;

- Güvenilirlik
- Düşük maliyet (az deney sayısı, düşük hesap maliyeti)
- Hız
- Yeni koşullara uyum, yeniden öğretilebilirliğe yatkınlık.



Şekil 6.1: Hiyerarşik global karar modeli mimarisi

Seçim kriterleri dikkate alındığında, Şekil 6.1 ile verilen global karar modelinin en üst seviyesinde, en az deney, en düşük maliyet ve en yüksek hızda güvenilir karar vermesi ile SMM yer alacaktır. Ancak piramidin bu aşamasında sadece takımın aşınmış haline karar verilmektedir. Daha detaylı bilgi ise, bir alt basamak bulunan, hızlı ve güvenilir ancak daha maliyetli bir yöntem olan Destek Vektör Makinası (DVM) tarafından sağlanmaktadır. Bu basamakta, takımın 5 farklı durumuna (Keskin – KeskinÇalışabilir – Çalışabilir – AşınmışÇalışabilir - Aşınmış) karar verilmektedir. Piramidin en alt basamağında ise güvenilirliği, üstteki karar modellerine bağlanan Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli yer almaktadır. Böylelikle YSA ile tahmin edilen takım aşınma miktarının (VB) doğruluğu, üst seviyedeki modellerle karşılaştırılarak, onaylanacaktır.

Önerilen hiyerarşik global karar modeli, takım durumu tahmininin güvenilirliğini arttırmasının yanı sıra en az eğitim maliyeti ile kendi kendini eğiten bir TDG sistemin oluşturulmasına da imkân tanımaktadır. Bu yaklaşım için anahtar rolü SMM üstlenmektedir. Buna göre, her bir koşul için takımın sadece keskin hali ile eğitilen SMM, belirlenen takım ömrü kriterine göre olasılık değerler üretecektir. Önemli olan, SM modelin eğitimi sonucunda, takım ömrünü belirleyecek olasılıksal bir eşik değer belirlenmesidir. Bir kere takım ömrü için bu eşik değer belirlendikten sonra, takım ömrünü tamamlayıncaya kadar gözlenen aşınma seviyelerine denk gelen kesim süreleri, DVM ve YSA modellerin kurulması için kullanılabilir. Böylelikle takım aşınması ölçülmeden, takım ömrünü süre olarak tahmin eden çevrimiçi bir TDG sistemi geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Liu p. H. and Jardıne A.K. S., "Optimal tool replacement based on the surface roughness in finish machining", ***IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*** 9, 223-239 , (1998)

2. Pawade, RS., Joshi, SS., Brahmankar PK. and Rahman, M. "An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718". ***Journal of Materials Processing Technology***, doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.04.049, (2007)

3. Q. Liu, Y. Altintas "On-line monitoring of flank wear in turning with multilayered feed-forward neural network" ***International Journal of Machine Tools & Manufacture*** vol. 39, 1945–1959, (1999)

4. Scheffer, C. and Heyns, Ps**.,** An industrial tool wear monitoring system for interrupted turning. ***Mechanical Systems and Signal Processing***, 18, 1219–1242, (2004)

5. Scheffer, C., Kratz, H., Heyns, PS. And Klocke, F**.** Development of a tool wear-monitoring system for hard turning, ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, , 43, 973–985, (2003)

6. Chungchoo, C. and Saini, D**.** A computer algorithm for flank and crater wear estimation in CNC turning operations**.** ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, , 42, 1465–1477, (2002)

7. Ravindra Hv., Srinivasa, YG. and Krishnamurthy**,** R**.,** "Acoustic emission signals for tool wear identification.", ***Wear***, 212, 78-84, (1997)

8. Zawada-Tomkiewicz, A**.,** "Classifying the wear of turning tools with neural Networks"., ***Journal of Materials Processing Technology***, 109, 300-304, (2001)

9. **Balazinski, M., Czogala, E., Jemielnaik, K. and Leski, J.,** Tool condition monitoring using artificial intelligent methods. *Engineering Application of Artificial Intelligence,* 15, 73–80, (2002)

10. Ghasempoor, A., Jeswiet, J. and Moore, TN., "Real-time implementation of on-line tool condition monitoring in turning." ***International, Journal of Machine Tools and Manufacture***, ,39, 1883–1902, (1999)

11. Bahr, B., Motavalli, S., and Arfi, T**.,** "Sensor fusion for monitoring machine tool conditions", ***International Journal of Computer Integrated Manufacturing,*** 10-5, 314-323, (1979)

12. Szecsi, T**.**, "Automatic cutting-tool condition monitoring on CNC lathes." ***Journal of Materials Processing Technology***, 77, 64–69, (1998)

13. Li., X., "Real-time tool wear condition monitoring in turning**." *International Journal of Production Research*** , 39-5, 981-992, (2001)

14. Liu, Q., and Altintas, Y**.,** "On-line monitoring of flank wear in turning with multilayered feed-forward neural network", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture*** , vol 39, pp 1945–1959, (1999)

15. Dimla, D.E., and Lister, P.M**.,"** On-line metal cutting tool condition monitoring I: force and vibration analysis.", ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, vol 40, 739–768, (2000)

16. Dimla, D.E., and Lister, P.M, "Online metal cutting tool condition monitoring II: tool state classification using multi-layer perceptron neural networks." ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 40, 769–781, (2000)

17. Kuo R.J. "Multi-sensor integration for on-line monitoring tool wear estimation through artificial neural networks and fuzzy neural network." ***Eng Appl Artif Intell*** , 13:249–261, (2000)

18. Sharma, V. S., Sharma, S. K., and Sharma, A. K**.,** "An approach for condition monitoring of a turning tool." ***Proc. ImechE Vol. 221 Part B: J. Engineering Manufacture***, Volume 221, Number 4, (2007)

19. Chungchoo, C., and Saini D**.,** "On-line tool wear estimation in CNC turning operations using fuzzy neural network model." ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 42, 29–40, (2002)

20. M. Pugazhendi, R. Krishnamurthy, "Condition monitoring of drill process using a telemetry system", ***Journal of Materials Processing Technology***, Volume 28, Issues 1-2, , Pages 67-73, (1991)

21. A. Noori-Khajavia , R. Komanduria, "Frequency and time domain analyses of sensor signals in drillingnext term—II. Investigation on some problems associated with sensor integration" ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, Volume 35, Issue 6, Pages 795-815, (1995)

22. Aliustaoglu C., Ertunc H. M.and Ocak H. "Tool Wear Next Term Condition Monitoring Using a Sensor Fusion Model Based on Fuzzy İnference System" ***Mechanical Systems and Signal Processing***,Volume 23, Issue 2, Pages 539-546 , February (2009)

23. A.D. Dornfeld, M.F. DeVeries, "Drill wear and fracture monitoring using acoustic emission", ***CIRP STC C Meeting***, Paris, (1992)

24. Rodolfo E. H., , Rodolfo H, H., Agustín J. and Ramón G. “An optimal fuzzy control system in a network environment based on simulated annealing. An application to a drillingnext term process”, ***Applied Soft Computing*** ,Volume 9, Issue 3, Pages 889-895, (2009)

25. Messaoud A., Weihs C. “Monitoring a Deep Hole Drilling Next Term Process By Nonlinear Time Series Modeling”, ***Journal of Sound and Vibration,*** Volume 321, Issues 3-5, 10, Pages 620-630, (2009)

26. James, L.C., and Tzeng, T.C., “Multimilling-Insert Wear Assessment Using Non-Linear Vırtual Sensor, Tıme-Frequency Dıstrıbutıon And Neural Networks.” ***Mechanical Systems and Signal Processing*** , 14-6, 945-957, (2000)

27. Ghosh, N., Ravi, Y.B., Patra, A., Mukhopadhyayc, S., Paul, S., Mohanty, A.R., and Chattopadhyay, A.B., “Estimation of Tool Wear During CNC Milling Using Neural Network-Based Sensor Fusion.”, ***Mechanical Systems and Signal Processing,*** 21, 466–479, (2007)

28. Taha, H. A., “A policy to determine the optimal cycle length for a cutting tool.”, ***The Journal of Industrial Engineering*** 17, (3) 157-62 , (1966)

29. Pandıt, D. M., & Sheıkh, A. K.,. Probability and optimal replacement via coefficient of variation. Journal of Mechanical Design, 102, 761-8, (1980)

30. La C., U., Noto L. D., S., and Passannantı, A., “Optimal tool replacement policies with penalty cost for unforeseen tool failure.”, ***International Journal of Machine Tool Design Research,*** 23, 237-43, (1983)

31. K. Danai, A.G. Ulsoy, “A dynamic state model for on-line tool wear estimation in turning”, ***Journal of Engineering for Industry***, Transaction of ASME 109 396–399, (1987)

32. Zhou, C , Chandra, J., & Wysk, R.,. “Optimal cutting tool replacement based on tool wear status.”, ***International Journal of Production Research*** 28, 1357-67, (1990)

33. Bıllatos, S. B., Bayoumı, A. E., & Kendall, L. A., “A statistical wear model for certain tool materials with applications to machining.”, ***Wear*** 112, 257-71, (1986)

34. Palanisamy P, Rajendran I, Shanmugasundaram S. “Prediction of Tool Wear Using Regression and ANN Models in End-Milling Operation.”, ***Int J Adv Manuf Technol*** , 37:29–41, DOI 10.1007/s00170-007-0948-5, (2008)

35. El Gomayel, J., and Bregger, K. “On-Line Tool Wear Sensing for Turning Operations.” ***Journal of Engineering for Industry***. volume 108, n 1, pp. 44-47, (1986)

36. Kurada S., Bradley C., “A review of machine vision sensors for tool condition monitoring” ***Computers in Industry***, 34, 55-72, (1997)

37. K. Matsushima, T. Kawabata, T. Sata, “recognition and control of the morphology of tool failuries ”, ***Annals of CIRP*** 28(1), 43-47, (1979)

38. W.H. Wang, G.S. Hong, Y.S. Wong, “Flank wear measurement by a threshold independent method with sub-pixel accuracy”, ***International Journal of Machine Tools & Manufacture,*** 46, 199–207, (2006)

39. Weis W. “Tool Wear Measurement on Basis of Optical Sensors, Vision Systems and Neuronal Networks (Application Milling)” WESCON/93, 134-138, San Francisco, CA, USA, (1993)

40. K. Uehara, “New attempts for short time tool-life testing”,***Annals of CIRP*** ,22 23-24 (1973)

41. N.H. Cook and K.. Subramanian, “Micro-isotope tool wear sensor”, ***Annals of CIRP***, vol. 27(l), 73-78, (1978)

42. Smith G.T, “Advanced Machining, The Handbook Of Cutting Technology” ***Springer, Berlin,*** (1989)

43. H. Takeyama, Y. Doi, T. Mitsoka and H. Sekiguchi,” Sensors of tool life for optimisation of machining”, ***Proceedings of Eighth International Machine Tool Design and Research Conference*** 191-208 (1967)

44. T.H. Stoferle and B. Bellmann, “Continuous measuring of flank wear”, ***Proceedings of Sixteenth Inrernarional Machine Tool Design and Research Conference*** 573-578 (1975).

45. Sağlam H., “Frezelemede Yapay Sinir Ağları Kullanarak Çok Elemanlı Kuvvet Ölçümlerine Dayalı Takım Durumu İzleme”, ***Selçuk Üniversitesi***, FBE, Doktora Tez, (2000)

46. Born, D. K., and Goodman, W. A. “An empirical survey on the influence of machining parameters on tool wear in diamond turning of large single-crystal silicon optics.” ***Precision Engineering***. vol 25, pp. 247-257, (2001)

47. Committe, “Guide to the measurement of the force”, ***the institute of measurment and control,*** ISBN 0 904457 28 1, London, (1998)

48. Stein, J. L. and K.C. Shin, 1986, “Current monitoring of field controlled DC spindle drives,” ***ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control***, Vol. 108, pp. 289, (1995)

49. Altintas, Y., , “Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurements,” ***ASME J. of Engineering for Industry***, Vol. 114,pp. 386–392, (1992)

50. http://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.php. (**Ziyaret tarihi 10-11-2008**).

51. Inasaki I., "Application of Acoustic Emission Sensor For Monitoring Machining Processes", ***Ultrasonics***, 273-281, 36, (1998)

52. **Altintas Y. , "**In-Process Detection Of Tool Breakages Using Time Series Monitoring of Cutting Forces**", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,*** Volume 28, Issue 2, Pages 157-172, (1988)

53. Tansel I.N.,McLaughlin C., "Detection of tool breakage in milling operations-The time series analysis approach", ***International Journal of Machine Tools and Manufacture,*** Volume 33, Issue 4, Pages 531-544, (1993)

54. Orhan S., Er O. A., Camuşcu N., Aslan E. "Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness", ***NDT&E International 40*** , 121–126, (2007)

55. S. Kim and B.E. Klamecki, "Milling cutter wear monitoring using spindle shaft vibration", ***Journal of Manuf Sciences Engineering ASME***, vol 119, pp. 118–119 (1997)

56. K. Matsushima, K. Bertok, and T. Sata, "In process detection of tool breakage by monitoring the spindle current of a machine tool," ***ASME J.Meas. Contr. Batch Manuf.***, pp. 145–154, (1982)

57. J. M. Lee, D. K. Choi, and C. N. Chu, "Real time tool breakage monitoring for NC milling process," ***Annals CIRP***, vol. 44, no. 1, pp. 59–62, (1995)

58. J.L. Stein, C.H. Wang, "Analysis of power monitoring on AC induction drive systems", ***ASME J. of Dynamic Systems Measurement and Control***, 112, pp 239–248 (1990)

59. Wilcox S. J., Reuben R. L., Souquet P., "The use of cutting force and acoustic emission signals for the monitoring of tool insert geometry during rough face milling", ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, Volume 37, Issue 4, Pages 481-494, (1997)

60. Shao H, Wang HL, Zhao XM, "A cutting power model for tool wear monitoring in milling." ***Int J Mach Tools Manuf.***, 44:1503–1509, (2004)

61. Srinivasa Pai P, Nagabhushana TN, Ramakrishna Rao P.K., "Tool wear estimation using resource allocation network." ***Int J. Mach Tools Manuf***, vol 41, 673–685, (2001)

62. Brezak D, Udiljak T, Mihoci K, Majetic D, Novakovic B, Kasac J. "Tool wear monitoring using radial basis function neural network.", ***IEEE T. Neural Network*** 1/04:1859–1862, (2004)

63. Pan F , Hope A. D, "Intellıgent Cuttıng Tool Condıtıon Monıtorıng Based On a Hybrıd Pattern Recognıtıon Archıtecture", ***Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics***, Kunming, 12-15 July (2008)

64. Bhattacharyya P.; Sengupta D. ; Mukhopadhyay S.; Chattopadhyay A. B., "On-line tool condition monitoring in face milling using current and power signals", ***International Journal of Production Research***, Volume 46, Issue 4, pages 1187 – 1201, (2008)

65. http://www.efunda.com/processes/machining/mill.cfm, (**Ziyaret Tarihi** 10-09-2008)

66. Youssef Helmi A., El-Hofy Hassan, "Machining Technology: Machine Tools and Operations",Sayfa 83-84, ***CRC Press***, (2008)

67. http://mfg.eng.rpi.edu/gmp/pdf/toolgeo.pdf , (**Ziyaret Tarihi 14-09-2008**)

68. http://www.toolingu.com, (**Ziyaret Tarihi 14-09-2008**)

69. Zeren M. , "İleri Kesici Takım Malzemeleri Ders Notları", ***KOU Üniversitesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği***, Şubat (2005)

70. Sandvik Koromat Katalog, ***Frezeleme-Pratik Öneriler***, Sayfa A254, (2006)

71. Özdemır U., Erten M., "Talaslı Imalat Sırasında Kesici Takımda Meydana Gelen Hasar Mekanızmaları Ve Takım Hasarını Azaltma Yöntemleri", ***Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi***, Ocak, Cilt 1 Sayı 1 (37-50), (2003)

72. G.S. Hong, M. Rahman, Y.S. Wong, "Tool Condition Monitoring in Manufacturing Systems Using Neural Networks", ***Computer-Aided Design, Engineering, And Manufacturing Systems Techniques And Applications***, Vol. 7, December 12, (2000)

73. Taylor, F.W., "On the art of cutting tools", ***Trans. ASME***, 28, (1907)

74. Chungchoo, C., and Saini D., "On-Line Tool Wear Estimation İn CNC Turning Operations Using Fuzzy Neural Network Model." ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 42, 29–40, (2002)

75. TS ISO 8688-2 "***Frezelemede Takım Ömrü Deneyi – Bölüm 2: Parmak Frezeleme*** " Nisan (2006)

76. Taguchi, G., "Quality Engineering in Production Systems", ***McGraw-Hill***, NY, (1989)

77. Minitap User Manual , www.minitap.com, (**Ziyaret tarihi 14-09-2008**)

78. Ezugwu EO, Wanga ZM, Machadop AR. “The machinability of nickel-based alloys: a review.” ***Journal of Material Processing Technology***, 86 (1–3), 1–16, (1998)

79. Alauddin M, El-Baradie MA, Hashmi MSJ “End-milling machinability of Inconel 718”, ***Int J Eng Manuf*** , 210:11–23, (1996)

80. Jawaid A, Koksal S, Sharif S., “Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy”. ***Journal of Material Processing Technology,*** 116:2–9 3,(2001)

81. Ezugwu EO, Tang S.H. “Surface abuse when machining cast iron G-17 and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools.”, ***Journal of Material Processing Technology,*** 55:63–69 13, (1995)

82. Nalbant M., Altın A. and Gökkaya H., “The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys.” ***Materials & Design***, Volume 28, Issue 4, Pages 1334-1338, (2007)

83. Altin A., Nalbant M. and Taskesen A., “The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools.” ***Materials & Design***, Volume 28, Issue 9, Pages 2518-2522, (2007)

84. Alauddin M., El-Baradie M.A, Hasmi M.S.J.,”Optimization of surface finish in end milling Inconel 718.”, ***Journal of Material Processing Technology,*** 56:54–65, (1996)

85. www.sandvik.com (**Ziyaret tarihi: 5 Ocak 2008**)

86. www.ptc.com (**Ziyaret tarihi: 5 Eylül 2008**)

87. www.ni.com (**Ziyaret tarihi: 01 Şubat 2008**)

88. MathWorks Incorporation, MATLAB User Manual ***MathWorks Incorporation, Natick, MA.,*** (2006)

89. Sick, B., “On-line and Indirect Tool Wear Monitoring in Turning with Artificial Neural Networks: A Review of More Than A Decade of Research,” ***Mechanical Systems and Signal Processing***, 16(4), 487-546, (2002)

90. Moore T., Reif Z. “Detection of Tool Breakage using Vibration Data.” ***Proceedings of North American Manufaturing Research Conference (13th NAMRC),*** SME Transactions on Manufacturing Engineering, pp 45-50, May 19-22, (1992)

91. Rabiner R. L., "A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition," ***Proceedings of the IEEE***, 77 (2), p. 257–286, February (1989)

92. Winston, Wayne L., “Operations Research, Applications and Algorithms” ***Duxbury Press-ITP California***, Sayfa 964-965, (ISBN 0-534-20971-8), (1994)

93. Rabiner R. L., Juang B. H., “An Introduction to Hidden Markov Models”, ***IEEE ASSP Magazıne***, January, (1986)

94. Steeb. H.W, Hardy Y., Stoop R., “The Nonlineer Workbook 3rd Edition”, ***World Scientific, Danvers USA***, sayfa (478-487), (2005)

95. Kecman V. "Learning and Soft Computing - Support Vector Machines, Neural Networks, Fuzzy Logic Systems", ***The MIT Press, Cambridge, MA***, Sayfa(149-165,173), (2001)

96. Lovell B.C. , Walder C. J., “Support Vector Machines for Business Applications”, Business Applications and Computational Intelligence,K Voges, and N. Pope (Editörler), ***Idea Group,*** (Sayfa. 267-290), (2006)

97. Chen N., Lu W., Yang J., Li G., “Support Vector Machine In Chemistry”, ***World Scientific Publishing Company,*** Sayfa (25,42) , September 30, (2004)

98. J. C. Burges, “A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition”, ***Data Mining and Knowledge Discovery***, vol. 2, no. 2, Sayfa 121-167, (1998)

99. Ivanciuc O., “Applications of Support Vector Machines in Chemistry.” ***Reviews in Computational Chemistry***, Volume 23, sayfa 291-400, (2007)

100. Demirci A.D. “Destek Vektör Makinaları İle Karakter Tanıma”, Yüksek Lisans Tezi, ***Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E***., sayfa 3-10, (2007)

101. Cortes, C. and V. Vapnik, “Support-vector network” ***Machine Learning,*** Vol 20, 273-297, (1995)

102. C.-W. Hsu and C.-J. Lin. “A comparison of methods for multi-class support vector machines” , **IEEE Transactions on Neural Networks**, Vol 13, 415-425, (2002)

103. Perlovsky, L.I, “Neural Networks and Intellect”, ***Oxford University Press***, 2001.

104. Haykin, S., “Neural Networks: a Comprehensive Foundation.” ***New Jersey: McMillan***, 1994.

105. Yazıcı A. C., Ögüs E., Ankaralı S., Canan Sinan,C Dr. Handan, Ankaralı, Akkuş Z. “Yapay Sinir Ağlarına Genel Bakış”, ***Türkiye Klinikleri J. Med. Sci***., 27:65-71 (2007)

106. Erdik T. and Şen Z."Prediction of Tool Wear Using Regression and ANN Models in End-Milling Operation a Critical Review", ***Int J Adv Manuf Technol*** DOI 10.1007/s00170-008-1758-0, 9 September, (2008)

107. Bukkapatnam, STS, Kumara, SRT and Lakhtakia, A., "Fractal estimation of flank wear in turning.", ***ASME J. Dyn. Syst. Meas. Cont***., 122 , pp. 89-94, (2000)

108. Hall. L. D, "Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion" ISBN 0-89006-558-6, ***Artech House Boston London***, Sayfa 155, (1992)

109. Statgraphics V15 User manual, (2008)

110. Ertunc H. M., "Techniquies for Tool Wear Condition Monitoring in Drilling Operations", Doktora Tezi, Case Western University, (1999)

111. Chang C.C., Lin C.-J., LIBSVM : a library for support vector machines, Software available at http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm (**Ziyaret tarihi: 12 haziran 2008**)

EKLER

EK-A

Technical Data

Dynamometer Type 9123C...

Speed		1/min	max. 10 000
Range 1 FSO	F_x, F_y	kN	–5 ... 5 **
			–3 ... 3 ***
	F_z	kN	–20 ... 20
	M_z	Nm	–200 ... 200
Range 2 FSO (switchable)	F_x, F_y	N	–500 ... 500
	F_z	kN	–2 ... 2
	M_z	Nm	–20 ... 20
Overload range 1		%	20
Threshold	F_x, F_y	N	<1
	F_z	N	<4
	M_z	Nm	<0,04
Sensitivity (Range 1)	F_x, F_y	mV/N	≈2
	F_z	mV/N	≈0,5
	M_z	mV/Nm	≈50
Linearity		%FSO	≤±1
Hysteresis		%FSO	≤1
Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2
	$F_z \rightarrow F_{x,y}$	%	≤±3
	$F_{x,y} \rightarrow F_z$	%	≤±3
	$M_z \rightarrow F_z$	1 N/Ncm	≤±0,01
Natural frequency Type 9123Cxx11 measured without telemetry	f_n	kHz	≈2,0

EK-B

Operating temperature range		°C	0 … 60
Coolant pressure		bar	≤70
Degree of protection			IP67
Weight Type 9123C1111		kg	≈3

** Force application point on the top plate area

*** Force application point 100 mm above top plate area

Stator and Multichannel Signal Conditioner Type 5221B1 and Type 5223B...

Ratio range 1 / range 2			10
Number of channels			5
Number of ranges per channel			2
Cut-off frequency per channel	f_{cutoff}	kHz	1,0
Sampling rate per channel		kHz	7,8
Resolution/tolerance		bit/%	12/±0,025
Signal output (FSO)		V	±10
Output connector (analog signal)			5 x BNC neg. 15 pin D-Sub

Operating temperature range	°C	0 … 60
Power supply	V/AC	230/115
(switchable)	%	+15/–22
	Hz	48 … 62
Power consumption	VA	≈30
Dimensions		
(DIN 41494, part 5)		
Width	TE	63
Height of instrument	HE	4
Height of plug-in	HE	3
With case	mm	340x187x280
Weight Type 5223B...	kg	8
Interface		RS-232C
for remote control		
Zero point identification		
(only Type 5223B2)		
Signal output	V	+5
Output connector		BNC neg.

Zoom (window amplifier):
The zoom decouples the output signal of an optional channel and amplifies the signal by a factor 10.

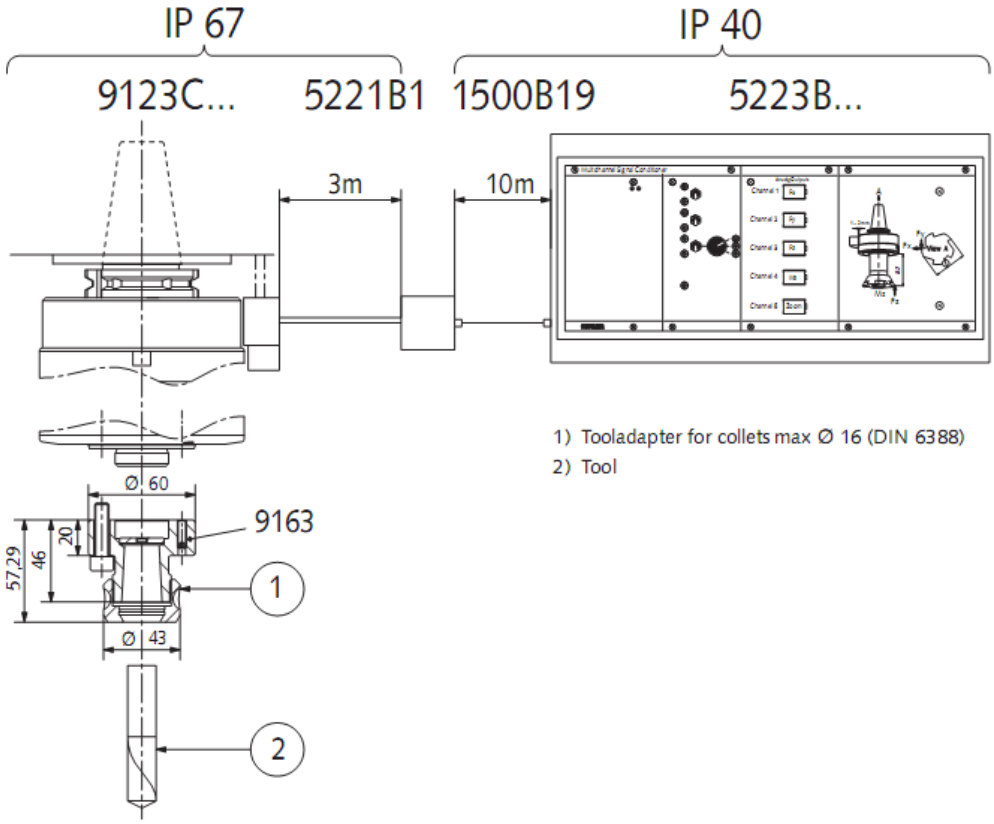
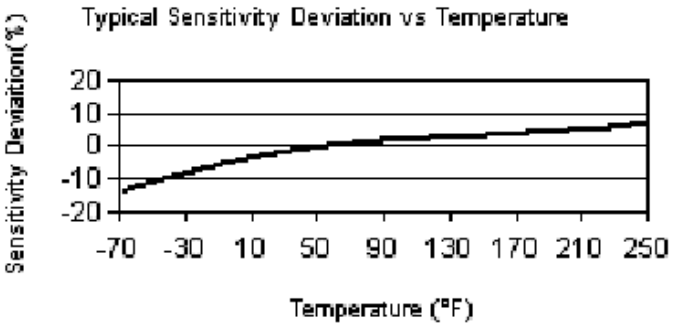


Fig. 1: Rotating cutting force measuring system

EK-C

Model 356A31

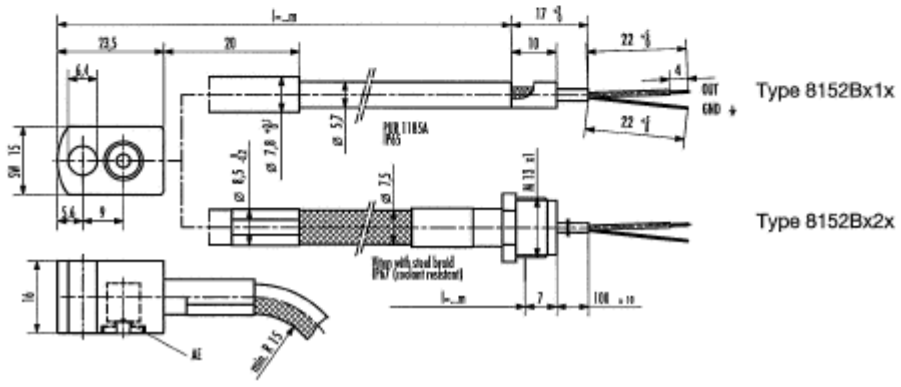
Performance	**ENGLISH**	**SI**
Sensitivity (±10 %)	10 mV/g	1.02 mV/(m/s²)
Measurement Range	±500 g pk	±4905 m/s² pk
Frequency Range (±5 %) (Y- & Z-axis)	1.0 to 10000 Hz	1.0 to 10000 Hz
Frequency Range (±5 %) (X-axis)	1.0 to 7000 Hz	1.0 to 7000 Hz
Resonant Frequency	≥70 kHz	≥70 kHz
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	0.002 g rms	0.02 m/s² rms
Non-Linearity	≤1 %	≤1 %
Transverse Sensitivity	≤5 %	≤5 %
Environmental		
Overload Limit (Shock)	±5000 g pk	±49050 m/s² pk
Temperature Range (Operating)	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C
Temperature Response	See Graph	See Graph
Electrical		
Excitation Voltage	22 to 30 VDC	22 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	≤100 ohm	≤100 ohm
Output Bias Voltage	7 to 15 VDC	7 to 15 VDC
Discharge Time Constant	0.2 to 1.5 sec	0.2 to 1.5 sec
Settling Time (within 10% of bias)	<5 sec	<5 sec
Spectral Noise (1 Hz)	1000 µg/√Hz	9180 (µm/s²)/√Hz
Spectral Noise (10 Hz)	200 µg/√Hz	1962 (µm/s²)/√Hz
Spectral Noise (100 Hz)	50 µg/√Hz	491 (µm/s²)/√Hz
Spectral Noise (1 kHz)	25 µg/√Hz	245.3 (µm/s²)/√Hz
Physical		
Sensing Element	Ceramic	Ceramic
Sensing Geometry	Shear	Shear
Housing Material	Titanium	Titanium
Sealing	Hermetic	Hermetic
Size (Height x Length x Width)	0.45 in x 0.45 in x 0.45 in	11.4 mm x 11.4 mm x 11.4 mm
Weight (without cable)	0.16 oz	4.5 gm
Electrical Connector	8-36 4-Pin	8-36 4-Pin
Electrical Connection Position	Side	Side
Mounting	Adhesive	Adhesive



EK-D

		8152B1	8152B2
Frequency range (±10 dB)	kHz	50 ... 400	100 ... 900
Sensitivity**	$dB_{ref\ 1V/(m/s)}$	57	48
Operating temperature range	°C	–40 ... 60	
Mass	g	29	
Ground insulation	MΩ	>1	
Overload shock 0,5 ms pulse 0,2 ms pulse	*g*	2000	
Overload vibration	g	±1000	
Supply			
Constant current	mA	3 ... 6	
Voltage (Coupler)	V DC	5 ... 36	
Output			
Voltage (full range)	V	±2	
Quiescent voltage	V DC	2,5	
Current	mA	2	
Impedance	Ω	10	
Case material		Stainless steel	

** Average sensitivity to surface waves (Rayleigh waves)



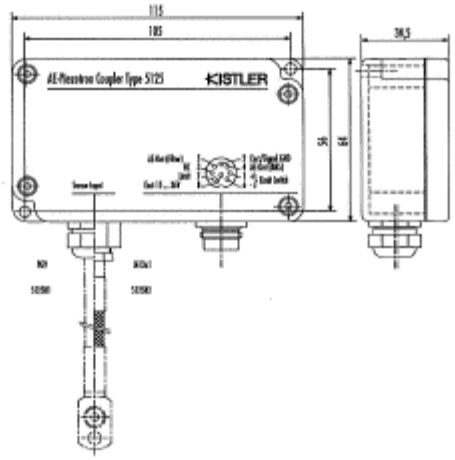
EK-E

Input

Supply current for Piezotron sensor	mA	=4,3
Signal processing		
Gain Range 1x		10
Range 10 x		100
Error	%	±5
Frequency range (without filter)		
–5 %	kHz	15 ... 1000
–3 dB	kHz	5 ... 1700
Low-pass filter (standard)		
2-pole Butterworth	dB/dec	–40
Cut-off frequency (–3 dB)	kHz	50

Output AE-Out (Filter)

Voltage	V	±5
Current	mA	<±5
Resistance	Ω	50
Zero point error	mV	<±20
Interference signal	mV_{pp}	<10



EK-H

No	a_e	Vc	Sz	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)	Mz(Nm)	Kesme Süresi (dak)	VB (µm)
1	0,6	100	0,12	49,285	31,616	124,04	0,24464	0,27	51
3	0,6	100	0,12	66,617	67,793	272,96	0,33985	1,37	314
5	0,6	100	0,12	68,97	78,645	315,72	0,35404	2,19	343
7	0,6	100	0,12	74,345	92,264	369,46	0,37803	3,29	355
9	0,6	100	0,12	77,488	95,372	380,89	0,39084	4,94	484
11	0,6	75	0,09	37,072	18,485	72,898	0,21478	0,49	48
13	0,6	75	0,09	40,375	23,23	91,579	0,21151	5,85	59
15	0,6	75	0,09	44,272	25,501	100,57	0,23093	16,58	64
17	0,6	75	0,09	53,282	47,266	186,86	0,27663	24,38	164
19	0,6	75	0,09	63,141	59,397	235,57	0,33958	31,21	328
21	0,6	75	0,09	63,461	58,768	240,7	0,36133	34,62	380
23	0,6	75	0,09	65,353	60,839	248,24	0,35886	36,58	416
25	0,6	75	0,09	68,473	64,999	264,89	0,37335	38,53	446
27	0,6	75	0,09	71,326	76,09	308,01	0,39509	40,48	486
29	0,6	50	0,06	22,457	35,933	88,791	0,20406	7,7	41
31	0,6	50	0,06	25,199	38,335	99,717	0,22682	25,3	64
33	0,6	50	0,06	44,501	35,823	142	0,25664	70,4	105
35	0,6	50	0,06	38,186	50,612	151,53	0,27747	95,98	118
37	0,6	50	0,06	52,346	53,102	208,26	0,31556	125,4	343
39	0,6	50	0,06	36,182	47,624	143,88	0,28475	133,1	508
41	0,45	100	0,09	34,101	21,379	83,862	0,16222	0,36	42
43	0,45	100	0,09	37,324	26,261	102,96	0,17923	2,91	81
45	0,45	100	0,09	42,657	35,404	138,82	0,20343	5,83	121
47	0,45	100	0,09	48,001	47,667	187,22	0,23346	8,02	218
49	0,45	100	0,09	51,643	56,679	222,91	0,25211	8,74	268
51	0,45	100	0,09	54,934	62,457	245,61	0,26599	9,84	346
53	0,45	100	0,09	58,417	69,684	274,64	0,28396	10,93	388

No	a_e	Vc	Sz	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)	Mz(Nm)	Kesme Süresi (dak)	VB (µm)
55	0,45	100	0,09	59,956	73,768	297	0,30324	12,02	405
57	0,45	100	0,09	66,029	85,092	342	0,33727	14,21	411
59	0,45	100	0,09	66,904	82,316	330,75	0,34252	18,22	438
61	0,45	100	0,09	72,445	96,93	388,34	0,36541	20,77	476
63	0,45	75	0,06	26,156	16,393	64,768	0,14012	5,87	26
65	0,45	75	0,06	26,287	16,317	64,391	0,13567	51,33	83
67	0,45	75	0,06	30,959	19,415	76,634	0,16013	88	98
69	0,45	75	0,06	32,144	19,371	76,442	0,16829	97,53	111
71	0,45	75	0,06	32,401	19,981	78,846	0,16768	107,8	209
73	0,45	75	0,06	33,802	21,257	83,916	0,17882	115,13	282
75	0,45	75	0,06	55,206	57,895	225	0,29062	131,27	365
77	0,45	75	0,06	64,232	81,766	311,37	0,33941	137,13	409
79	0,45	50	0,12	40,47	16,52	65,392	0,22187	0,55	12
81	0,45	50	0,12	40,367	17,474	69,132	0,22637	13,1	45
83	0,45	50	0,12	45,599	22,788	90,017	0,24915	34,93	99
85	0,45	50	0,12	46,693	24,723	97,855	0,26023	52,95	104
87	0,45	50	0,12	46,328	24,966	98,824	0,26073	67,68	115
89	0,45	50	0,12	54,056	32,988	130,82	0,29884	80,78	191
91	0,45	50	0,12	57,673	37,568	159,43	0,3278	86,24	216
93	0,45	50	0,12	60,817	46,367	193,09	0,37061	106,44	330
95	0,45	50	0,12	62,629	49,246	204,27	0,38773	108,08	398
97	0,45	50	0,12	64,95	56,095	230,5	0,40154	110,8	438
99	0,3	100	0,06	20,826	8,5018	33,563	0,11223	0,55	19
101	0,3	100	0,06	25,154	14,868	58,145	0,12652	32,34	33
103	0,3	100	0,06	27,371	18,795	73,406	0,13273	60,04	72
105	0,3	100	0,06	29,109	23,277	90,903	0,13947	77,51	95
107	0,3	100	0,06	34,105	32,954	129,17	0,15996	86,79	150
109	0,3	100	0,06	41,76	44,756	175,84	0,19281	99,34	238
111	0,3	100	0,06	48,058	55,929	220	0,21774	106,44	298

No	a_e	Vc	Sz	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)	Mz(Nm)	Kesme Süresi (dak)	VB (µm)
113	0,3	100	0,06	51,07	62,97	247,48	0,23602	110,8	303
115	0,3	100	0,06	54,304	65,637	258,59	0,27513	121,18	401
117	0,3	100	0,06	62,919	78,965	307,17	0,31387	124,45	414
119	0,3	100	0,06	63,391	82,398	316,24	0,32754	132,64	519
121	0,3	75	0,12	26,356	11,089	43,761	0,13673	6,92	19
123	0,3	75	0,12	28,995	12,663	50,029	0,14785	17,12	50
125	0,3	75	0,12	29,617	14,106	55,781	0,1522	26,6	72
127	0,3	75	0,12	34,28	16,376	64,67	0,17375	33,88	86
129	0,3	75	0,12	32,917	16,027	63,486	0,16854	45,54	95
131	0,3	75	0,12	30,204	15,672	61,931	0,15725	56,47	105
133	0,3	75	0,12	38,667	23,389	90,874	0,1912	66,67	118
135	0,3	75	0,12	39,633	21,959	86,648	0,20007	83,07	153
137	0,3	75	0,12	43,786	26,41	104,19	0,2204	93,63	184
139	0,3	75	0,12	45,243	30,292	119,59	0,22545	99,1	215
141	0,3	75	0,12	45,775	31,4	124,13	0,23372	107,11	305
143	0,3	75	0,12	51,58	46,082	181,18	0,26604	113,31	361
145	0,3	75	0,12	52,568	45,095	178,74	0,26752	130,07	473
147	0,3	50	0,09	23,802	9,1244	36,238	0,13671	0,73	14
149	0,3	50	0,09	25,707	10,392	41,158	0,15099	24,93	32
151	0,3	50	0,09	27,203	11,201	44,292	0,16572	68,93	45
153	0,3	50	0,09	28,803	12,906	51,004	0,1761	118,07	59
155	0,3	50	0,09	30,589	13,93	55,08	0,1803	154,73	72
157	0,3	50	0,09	29,997	14,638	57,861	0,17196	187,73	86
159	0,3	50	0,09	35,931	19,16	74,429	0,20204	215,6	98
161	0,3	50	0,09	34,813	17,218	68,117	0,19966	240,53	114
163	0,3	50	0,09	34,218	17,638	69,799	0,19686	270,6	130
165	0,3	50	0,09	37,972	20,685	81,893	0,21862	326,33	162
167	0,3	50	0,09	43,338	24,979	99,028	0,2503	368,87	184
169	0,3	50	0,09	50,198	33,809	134,51	0,29364	421,67	338

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Kaya B., Berkay A., Erzincanlı F., "Robot Assisted Tiling of Glass Mosaics with Image Processing", ***Industrial Robot: An International Journal***, Vol 32, pp 338-392 , (2005)

Kaya B., Kayabası O., Senalp Z., "Fatigue Analysis of Hard Tool Design of An Automobile Mold", ***Proceedings of 1st International Symposium on Mechanical Engineering, Cappadocia***, University of Niğde , (2004).

Kaya B., Oysu C., Esin M. E., "Development of the Customized Software for a 5 Axis CNC Machine Tool", ***Proceedings of 1st International Symposium on Mechanical Engineering, Cappadocia***, University of Niğde, (2004).

Bickraj K. L., Kaya B., Yapici A., Li M., Tansel I.N., Ozcelik B., "Inspection of Chatter Damage in End Milling Operations by Using Wavelet Transformations", ***Fiftth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'2007)***, Tampico, Mexico, 29 May-1 June (2007).

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Kayseri' de doğdu. İlk ve orta eğitimini Kayseri'de tamamladı. 1989-1994 yılları arasında Kayseri Arif Molu Anadolu Teknik Lisesinden mezun oldu. 1994-1998 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi bölümünden mezun oldu. 1999-2002 yılları arasında, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Tasarım ve İmalat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1999 yılından bu yana Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup, evli ve iki çocuk babasıdır.