



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**CNC TAKIM TEZGÂHLARINDA KESİCİ TAKIM KIRILMA VE AŞINMA
DURUMLARININ UYGUN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet GÖLLÜ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**CNC TAKIM TEZGÂHLARINDA KESİCİ TAKIM KIRILMA VE AŞINMA
DURUMLARININ UYGUN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet GÖLLÜ
(22434981002)
ORCID: 0000-0003-3080-6913**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Danışman: Doç. Dr. Gökay BAYRAK
ORCID: 0000-0002-5136-0829**

TEMMUZ 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 22434981002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet GÖLLÜ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “CNC TAKIM TEZGÂHLARINDA KESİCİ TAKIM KIRILMA VE AŞINMA DURUMLARININ UYGUN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE TESPİTİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Gökay BAYRAK**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ali UYSAL**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Alper YILMAZ
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 10.07.2025
Savunma Tarihi : 13.06.2025



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Üniversite-Sanayi İşbirliği Destekleme Programı (TÜBİTAK 1501) kapsamında 3230341 numaralı ve “CNC TAKIM TEZGÂHLARINDA KESİCİ TAKIM KIRILMA VE AŞINMA DURUMLARININ AKILLI YÖNTEMLERLE TESPİTİ VE SINIFLANDIRILMASI” isimli proje ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Mehmet GÖLLÜ

İmzası:



Bu tezimi, hayatımın her anında yanımda olan, sabırları, duaları ve sevgileriyle beni destekleyen kıymetli aileme ve en büyük motivasyon kaynağım, yoldaşım, dostum, değerli eşime ithaf ediyorum.



Eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, CNC takım tezgâhlarında kullanılan kesici takımların kırılma ve aşınma durumlarının uygun sinyal işleme yöntemleri ile tespiti üzerine yapılmıştır. Geliştirilen yöntem, üretim süreçlerinde karşılaşılan duruş sürelerini en aza indirmeyi, verimliliği artırmayı ve takım ömrünü daha etkin yönetmeyi amaçlamaktadır.

Bu süreçte bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, değerli katkılarını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Gökay BAYRAK'a ve süreç boyunca yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Alper YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans sürecim boyunca hem akademik hem de sektörel anlamda bana destek veren ve çalışma ortamı sağlayan ERBAB OTOMAT AR-GE Merkezi'ne, özellikle bu projenin gerçekleşmesinde emeği geçen tüm ekip arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Bana her zaman destek olan, sabrıyla ve duasıyla yanımda bulunan aileme ve eşime; bu süreçte motivasyon kaynağım olan tüm dostlarıma da minnettarım.

Son olarak, bu çalışmanın savunma ve otomotiv sanayisi başta olmak üzere üretim sektörüne katkı sağlamasını ve gelecekte yapılacak akademik çalışmalara da bir temel oluşturmasını temenni ederim.

Temmuz 2025

Mehmet GÖLLÜ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Literatür Araştırması	1
1.3 Tezin Yapısı	7
2. KESİCİ TAKIMLARDA AŞINMA VE KIRILMA	8
2.1 CNC Tezgâhlar ve Kesici Takımlar	8
2.2 Kesici Takım Aşınması ve Kırılma Mekanizmaları.....	11
3. KESİCİ TAKIM AŞINMA VE KIRILMA ANALİZİ İÇİN TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ	14
3.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü (Continuous Wavelet Transform, CWT)	14
3.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü (Discrete Wavelet Transform, DWT)	15
3.3 Dalga Paket Dönüşümü (Wavelet Packet Transform, WPT)	17
3.4 Ortalama Kare Kök (Root Mean Square, RMS) ve Normalizasyon Yöntemi ..	17
3.5 Bozulmamış Dalgacık Dönüşümü (Undecimated Wavelet Transform , UWT) ..	20
3.5.1 UWT temel özellikler ve avantajlar	22
4. GELİŞTİRİLEN UYGULAMA SİSTEMİ.....	23
4.1 Kullanılan Sensörler ve Veri Toplama Cihazları	26
4.2 MATLAB ile Veri Analizi	30
4.3 Gerçek Zamanlı İzleme ve Anomali Tespiti	34
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	41
5.1 Gerçek Zamanlı Analizler	41
5.1.1 RMS değer analizi.....	41
5.1.2 Önerilen UWT ve RMS hibrit yöntemi.....	43
5.1.3 CWT+RMS	48
5.1.4 DWT+RMS	49
5.1.5 Karşılaştırmalı analiz	50
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	52
6.1 Çalışmanın Uygulama Alanı	53
6.2 Öneriler ve Gelecek Çalışmalar	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ.....	56

KISALTMALAR

AE	: Akustik Emisyon
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
CNN	: Convolutional Neural Network
CWT	: Continuous Wavelet Transform (Sürekli Dalgacık Dönüşümü)
DD	: Dalgacık Dönüşümü
DWT	: Discrete Wavelet Transform (Ayrık Dalgacık Dönüşümü)
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
HSS	: High-Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
LabVIEW	: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LSTM	: Long Short-Term Memory
MATLAB	: Matrix Laboratory
PCD	: Polycrystalline Diamond (Polikristalin Elmas)
PM	: Predictive Maintenance
RBF	: Radial Basis Function
ResNet	: Residual Network
RMS	: Root Mean Square (Kök Ortalama Kare)
RBF	: Radial Basis Function
TCM	: Tool Condition Monitoring (Takım Durumu İzleme)
UWT	: Undecimated Wavelet Transform

SEMBOLLER

g	: Yerçekimi ivmesi ($\sim 9.81 \text{ m/s}^2$)
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)
fs	: Örnekleme frekansı (Hz)
N	: Sinyal Uzunluğu
x(t)	: Sinyal
r(t)	: Artık terim
z(t)	: Zaman fonksiyonu
$\phi(t)$	: Zaman fonksiyonu için değişen faz
W(a,b)	: Dalgacık dönüşümü
$\psi(t)$	: Dalgacık fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Literatürdeki çalışmaların sınıflandırılması	2
Çizelge 1.2: Kesici takım kırılmalarında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması	6
Çizelge 4.1: Yapılan çalışma ile ilgili parametreler	26
Çizelge 4.2: Üretim sayacı ve kesici takım durumu göstergesi arayüzü	38
Çizelge 5.1: Analiz yöntemlerinin karşılaştırılması	51
Çizelge 6.1: Önerilen tezin literatür ile karşılaştırılması	53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Tez çalışmasında kullanılan karbür alaşımlı kesici takım.....	9
Şekil 2.2: Uygulamanın yapıldığı endüstriyel sahadaki CNC tezgâh.....	10
Şekil 2.3: (a)Kullanılmamış kesici takım (b)Aşınmış kesici takım.....	12
Şekil 2.4: Kırılmış bir takım görseli	13
Şekil 3.1: WPT ile 3 seviyeli ayrıştırma için ağaç diyagramı	16
Şekil 3.2: Kesici takım aşınma ve kırılma tespiti için önerilen yöntemin genel akış şeması.....	20
Şekil 4.1: Test sisteminde genel prensip şeması.....	23
Şekil 4.2: Çalışmaların gerçekleştirildiği alan.....	24
Şekil 4.3: Titreşim sensörünün tezgâh üzerinde konumu.....	25
Şekil 4.4: Sinus apollo kartın bağlantı şeması	28
Şekil 4.5: USB-6210 DAQ kartı ile oluşturulan sistemin bağlantı şeması.....	29
Şekil 4.6: Tez çalışmasında kullanılan sensör ve veri okuma kartları.....	29
Şekil 4.7: MATLAB’de veri okuma kodu yazımı yapılırken ekran görüntüsü	30
Şekil 4.8: MATLAB arayüzünde zaman-frekans analizi ekran görüntüsü.....	31
Şekil 4.9: MATLAB arayüzünde öznitelik çıkarımı yapılırken ekran görüntüsü	32
Şekil 4.10: Titreşim verilerinin veri seti olarak depolanması.....	33
Şekil 4.11: LabVIEW ortamında geliştirilen arayüzünün genel görünümü	35
Şekil 4.12: Kesici takım izleme arayüzü: parametre giriş ekranı	36
Şekil 4.13: Parça bazlı titreşim verilerinin grafiksel gösterimi	36
Şekil 4.14: Üretim sayacı ve kesici takım durumu göstergesi arayüzü	37
Şekil 5.1: Matkap kırılma anının RMS Yöntemi ile tespiti	42
Şekil 5.2: Takım aşınma seviyesi RMS uygulaması analizi.....	43
Şekil 5.3: UWT 1. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.....	44
Şekil 5.4: UWT 2. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.....	45
Şekil 5.5: UWT 3. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.....	47
Şekil 5.6: UWT 4. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.....	48
Şekil 5.7: CWT+RMS yöntemi analiz sonucu	49

CNC TAKIM TEZGÂHLARINDA KESİCİ TAKIM KIRILMA VE AŞINMA DURUMLARININ UYGUN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE TESPİTİ

ÖZET

Talaşlı imalat, otomotiv ve savunma sanayi gibi yüksek hassasiyet ve süreklilik gerektiren sektörlerde, üretim süreçlerinin kesintisiz devam edebilmesi; CNC takım tezgâhlarında kullanılan kesici takımların aşınma ve kırılma gibi arıza durumlarının erken tespiti ile doğrudan ilişkilidir. Bu arıza durumları yalnızca üretim kalitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda duruş sürelerinin artmasına ve işletme maliyetlerinde ciddi artışlara neden olmaktadır. Literatürde, kesici takım durumunu izlemek amacıyla farklı yöntemler geliştirilmiş olsa da, birçok yöntemin gerçek zamanlı sistemlere entegrasyonu zorlu olmakta ve sınırlı doğruluk oranlarıyla çalışmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada; kesici takım aşınmasının ve kırılma eğiliminin etkin bir şekilde tespit edilebilmesi amacıyla Undecimated Wavelet Transform (UWT) ve Root Mean Square (RMS) yöntemlerinin bir araya getirildiği yenilikçi bir hibrit analiz yaklaşımı önerilmiştir.

Deneysel çalışmalar, gerçek fabrika ortamında CNC kayar otomat tezgâhında gerçekleştirilmiş ve Dytran 3055D2 model titreşim sensörü ile Sinus Apollo veri toplama kartı kullanılarak 40 kHz örnekleme frekansı ile titreşim verileri elde edilmiştir. UWT yöntemi ile sinyalin zamansal-frekans bileşenleri seviyelendirilerek ayrıştırılmış; ardından, detay katsayıları üzerinden RMS değerleri hesaplanarak her parça için hibrit bir skor oluşturulmuştur. Bu skorlara eşik değer analizi uygulanmış ve 0.8 olarak belirlenen eşik değer üzerine çıkan parçalar takımın aşınma sürecinde kritik noktaya ulaştığını göstermiştir. Sistem, bu eşiği art arda geçen 2-3 parça tespit ettiğinde otomatik olarak takım değişimi sinyali üretmiş ve takım kırılmadan müdahale edilmesi sağlanmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, önerilen UWT+RMS hibrit yöntemi, özellikle 2 seviyeli UWT ayrıştırması ile en tutarlı ve belirgin sonuçları vermiştir. Yöntem, takım aşınmasının erken evrelerini başarıyla izleyerek, hem üretim sürekliliğinin sağlanmasına hem de takımın bileme işlemi sonrası tekrar kullanımına imkân tanımıştır. Ayrıca, yöntemin gerçek zamanlı izleme sistemlerine kolayca entegre edilebilmesini mümkün kılmıştır. Bu yönüyle, önerilen yöntem, hem üretim sahasında uygulanabilir hem de donanım açısından verimli bir izleme çözümü sunmaktadır.

Bu çalışma ile birlikte, literatürde genellikle ayrı ayrı kullanılan UWT ve RMS analiz teknikleri ilk kez birlikte bir hibrit yapı içerisinde değerlendirilmiş ve üretim hattında çalışan bir sistem üzerinde başarıyla test edilmiştir. Yöntem, kesici takım aşınma ve kırılma süreçlerini yalnızca tespit etmekle kalmayıp, bu süreçlere zamanında müdahale edilmesini sağlayarak takım ömrünü uzatma, bakım maliyetlerini azaltma ve hurda oranını düşürme gibi somut faydalar sunmuştur. Geliştirilen sistem, yalın bir yapıda olmasına rağmen yüksek doğrulukla çalışan,

düşük işlem yüküne sahip ve gerçek üretim ortamlarında uygulanabilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, sistemin farklı takım tipleri ve iş parçası malzemeleriyle test edilmesi, çoklu sensör entegrasyonu ile daha bütüncül bir yapıya kavuşturulması ve örüntü tanıma tabanlı yöntemlerle kestirimci bakım fonksiyonlarının güçlendirilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Kesici takım aşınması, Kestirimci Bakım, Dalgacık dönüşümü, , Otomatik arıza tespiti, CNC takım tezgâhları



DETECTION OF CUTTING TOOL BREAKAGE AND WEAR IN CNC MACHINE TOOLS WITH APPROPRIATE SIGNAL PROCESSING METHODS

SUMMARY

In industries such as machining, automotive, and defense, which require high precision and continuity, the ability to maintain uninterrupted production processes is directly related to the early detection of faults such as wear and breakage in cutting tools used in CNC machine tools. These failure conditions not only reduce production quality but also lead to increased downtime and significant increases in operating costs. While various methods have been developed in the literature to monitor cutting tool condition, many of these methods are challenging to integrate into real-time systems and operate with limited accuracy rates. In this context, this study proposes an innovative hybrid analysis approach that combines the Undecimated Wavelet Transform (UWT) and Root Mean Square (RMS) methods to effectively detect cutting tool wear and fracture tendency.

Experimental studies were conducted in a real factory environment on a CNC sliding automatic lathe, and vibration data was obtained using a Dytran 3055D2 vibration sensor and a Sinus Apollo data acquisition card at a sampling frequency of 40 kHz. The UWT method was used to separate the temporal-frequency components of the signal by leveling them; then, RMS values were calculated based on the detail coefficients to create a hybrid score for each part. Threshold value analysis was applied to these scores, and parts exceeding the threshold value of 0.8 indicated that the tool had reached a critical point in the wear process. When the system detected 2-3 parts consecutively exceeding this threshold, it automatically generated a tool change signal, enabling intervention before tool breakage.

The analyses revealed that the proposed UWT+RMS hybrid method, particularly with two-level UWT decomposition, yielded the most consistent and distinct results. The method successfully monitored the early stages of tool wear, enabling both production continuity and the reuse of the tool after sharpening. Additionally, the method can be easily integrated into real-time monitoring systems. In this regard, the proposed method is both applicable in the production field and provides an efficient monitoring solution in terms of hardware.

With this study, UWT and RMS analysis techniques, which are typically used separately in the literature, were evaluated together for the first time in a hybrid structure and successfully tested on a system operating on a production line. The method not only detects cutting tool wear and breakage processes but also enables timely intervention in these processes, offering concrete benefits such as extending tool life, reducing maintenance costs, and lowering scrap rates. Despite its simple structure, the developed system stands out as a solution that operates with high accuracy, has a low processing load, and is applicable in real production environments.

Future studies aim to test the system with different tool types and workpiece materials, integrate multiple sensors to achieve a more comprehensive structure, and enhance predictive maintenance functions using pattern recognition-based methods.

Keywords: Cutting tool wear, Predictive Maintenance, Wavelet transform, Automatic fault detection, CNC machines

.



1. GİRİŞ

Talaşlı imalat sanayinde kullanılan Computer Numerical Control (CNC) takım tezgâhlarında, üretim süreçlerinin verimli ve kesintisiz sürdürülebilmesi için kesici takım sağlığı kritik bir öneme sahiptir. Aşınmış ya da kırılmış bir takım, hem iş parçasında hatalara yol açmakta hem de makine sistemine zarar vererek ciddi üretim kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, kesici takım durumunun izlenmesi ve olası arızaların önceden tespit edilmesi, hem kalite hem de maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, titreşim verileri üzerinden kesici takım aşınma ve kırılma durumlarının akıllı yöntemlerle tespit edilmesi amaçlanmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, CNC takım tezgâhlarında kullanılan kesici takımların aşınma ve kırılma durumlarının gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukla tespit edilebileceği bir izleme sistemi geliştirmektir. Bu doğrultuda, Dytran 3055D2 titreşim sensörü ile elde edilen yüksek frekanslı veriler, Undecimated Wavelet Transform (UWT) yöntemi ile ayrıştırılarak sinyal detay bileşenleri analiz edilmiştir. Elde edilen detaylardan hesaplanan Root Mean Square (RMS) değerleri ile bir hibrit skor oluşturulmuş, bu skorlar takım durumunu belirlemede kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, geliştirilen yöntem literatürdeki geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmış ve endüstriyel uygulamalar için uygunluğu değerlendirilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Endüstride üretim süreçlerinin otomasyonunda kritik bir role sahip olan CNC takım tezgâhları, yüksek hassasiyet ve verimlilikle çalışarak üretim maliyetlerini düşürme ve kaliteyi artırma konusunda önemli katkılar sunmaktadır. Bu makinelerde kullanılan kesici takımlar, üretim sürecinin verimli bir şekilde devam etmesi için

hayati öneme sahiptir. Ancak, kesici takımlarda meydana gelen kırılma ve aşınma gibi arızalar, beklenmeyen üretim duruşlarına, ürün kalitesinde bozulmalara ve işletmeler için ciddi maddi kayıplara yol açabilmektedir. Ayrıca, bu tür arızalar, müşteri memnuniyetsizliğine ve işletmenin prestij kaybına neden olma riski taşımaktadır. Bu tür sorunların önüne geçebilmek için, geleneksel periyodik bakım yöntemlerinden daha etkili olan kestirimci bakım yaklaşımlarının kullanılması büyük önem taşımaktadır.

Kestirimci bakım, kesici takımın gerçek zamanlı durum verilerini analiz ederek potansiyel arızaları önceden tespit etmeyi ve gerekli önlemleri zamanında almayı mümkün kılmaktadır. Bu sayede, arızalar meydana gelmeden müdahale edilerek üretim duruşları önlenir ve takım ömrü uzatılır.

Literatürde, kesici takım aşınma/kırılması tespiti ile ilgili çalışmalar aşağıdaki gibi temel sınıflar altında incelenebilir:

- Geleneksel yöntemler etkin değer ölçümü (RMS)
- Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD),
- Doğrudan izleme yöntemleri,
- Sinyal analizi-tabanlı yöntemler (titreşim, kesme kuvvetleri, akım, güç tüketimi gibi sinyallerin analizi),
- Makine öğrenmesi tabanlı yöntemler.

Takım aşınması ile yapılan bu gruplandırma temel analiz – çalışma yöntemlerini göstermektedir. Literatür çalışmaların gruplandırılıp sınıflandırılması Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1: Literatürdeki çalışmaların sınıflandırılması [1].

Kategori	Alt Yöntem / Uygulama	İlgili Literatür / Açıklama
Geleneksel Yöntemler	- RMS (Root Mean Square) - FFT (Fast Fourier Transform)	Temel zaman ve frekans analizi yöntemleri
Doğrudan İzleme Yöntemleri	Görsel veya sensöre dayalı fiziksel doğrudan gözlem	Yapay görme sensörleri [2] Yüzey görüntü işleme [3]

Çizelge 1.1(devamı): Literatürdeki çalışmaların sınıflandırılması[1].

Kategori	Alt Yöntem / Uygulama	İlgili Literatür / Açıklama
Sinyal Tabanlı Yöntemler	- Titreşim analizi - Kesme kuvvetleri - Akım / Güç tüketimi analizi	Delmede sinyal analizi [4,5] AE sensörleri [6] Rezonans ölçümleri [7]
Makine Öğrenmesi Yöntemleri	- Yapay Sinir Ağları (ANN) - Destek Vektör Makineleri (SVM) - Derin Öğrenme (CNN, LSTM, ResNet)	Yapay sinir ağları [8] HFD + CNN [9] ResNet-LSTM [10]
Dalgacık Tabanlı Yöntemler	- DWT, CWT, UWT - Zaman-frekans analizleri	Dalgacık dönüşümleri [11-15] Hibrit yöntemler [tez önerisi]
Sensör Füzyonu	MEMS, AE, sıcaklık vb. çoklu sensör verilerinin birleştirilmesi	AE çoklu montaj [16] Füzyon mimarileri [5,17]
Veri İşleme & RUL Tahmini	- Kalan faydalı ömür (Remaining Useful Life) - Performans metrik analizi	RUL tahmini [10] Veri yoğunluklu derin analiz [18]

Yapılan çalışmaların kapsamlı analizi ve son 30 yılda elde edilen önemli akademik bulgular ışığında, takım durum izleme ile ilgili yayınların sayısı giderek artmakta ve bu alandaki araştırmalar, endüstriyel uygulamalarda önemli iyileştirmeler sunmaktadır [19]. Takım durumu izlemenin temel prensipleri, anahtar teknolojileri ve endüstriyel uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar, sensör teknolojilerinin, sinyal işleme algoritmalarının ve yapay zekâ modellerinin takım aşınması ve kırılması izleme konularında nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir [20,21]. Özellikle, gelişmiş sinyal analiz tekniklerinin uygulanması [3,22], sensör füzyon teknolojilerinin geliştirilmesi [23,24], hata tespit ve izleme alanında son yenilikleri sunmaktadır. Ayrıca, derin öğrenme metodolojilerinin ve dalgacık dönüşümlerinin uygulamaları [25,26], imalat süreçlerinde büyük veri bağlamında yeni fırsatlar keşfetmek için kullanılmaktadır .

Doğrudan izleme yöntemlerinde kesici takımın aşınma durumu optik, lazer veya ultrasonik cihazlarla ölçümler sonucunda tespit edilmeye çalışılır. Ancak bu yöntemler, iş parçası yapısı ve soğutma sıvılarının tıkanması gibi faktörler nedeniyle zorluklar içerebilir ve gerçek zamanlı uygulamalar için uygun olmayabilir [27,28]. Dolaylı izleme yöntemleri ise, kesme kuvvetleri [29,30], titreşim [31,32], akustik emisyon (AE) [33,34], ses [35] ve akım [36,37] gibi fiziksel sinyalleri kullanarak takımın durumunu izler ve gerçek zamanlı olarak yürütülmesi kolay ve kabul edilebilir doğruluk sağladığından, takım aşınmasının izlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemler arasında yer alır [38].

Sinyal analizi-tabanlı bir yöntem öneren ve S-dönüşümü kullanılan bir çalışmada [4] titreşim sinyalleri analiz edilmiş ve arıza frekansı bileşenleri belirlenmiştir. Yöntemin güçlü gürültü direnci ve demodülasyon yeteneği olduğu kanıtlanmıştır. S-dönüşümü gerçekleştirildikten sonra maksimum basıklığa sahip olan vektör, arıza frekansı bileşenini belirlemek için kullanılmaktadır ve HFD ile ana frekans tespit edilmektedir. Yöntemin performansı, farklı çalışma koşullarında HFD ile değerlendirilmiştir. Benzer bir çalışmada [5], Titreşim rezonansları ölçümü üzerine yapılan tümleşik bir metodoloji önerilmiş olup, zaman alanı spektrumunu ve Hilbert-Huang Dönüşümü enerji spektrumu kullanılarak titreşim analizi yapılmıştır. Sonuçlar, çalışma yapılan ölçümlerin önemli rezonans olaylarına neden olduğunu göstermektedir. Özellikle, düşük frekanslı bileşen (2–5 Hz) kırıların ivme tepkisini arttırmaktadır.

Bilinen ve uygulanan mevcut yöntemlere ek olarak, bilim insanları CNC takım tezgâhlarındaki takım aşınmasını analiz etmek için akım, güç, titreşim ve kuvvet sensörlerinin yanı sıra diğer sensör sinyalleri üzerinde de çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda, işleme sürecinde sergilenen takım sıcaklıkları incelenmiş [11] ve takım stres analizleri gerçekleştirilmiştir [12]. CNC takım tezgâhlarının işleme sürecinin takibi için sinyal özelliği çıkarma, veri filtreleme, veri normalleştirme ve veri birleştirme aşamalarını içeren birçok sensörlü birleştirme çerçevesi oluşturulan bir çalışmada [13], olasılık tahmini ve otokorelasyon katsayısı analizinin bir kombinasyonu kullanılarak, akustik emisyon sensörlerinin farklı montaj konumlarından alınan sinyalleri bütünleştirilmiş ve analiz edilmiştir.

Son yıllarda kesici takım aşınma/kırılma tespitinde, farklı yapay zekâ-tabanlı yöntemler önerilmektedir. Bir çalışmada [9], rulman teşhisinde düşük doğruluk ve yavaş teşhis hızına alternatif olarak Hızlı Fourier dönüşümü(HFD) ve Convolutional Neural Network (CNN) tabanlı yeni bir arıza teşhis yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, sinyal gürültüsünün adaptif tekniklerle azaltılması, HFD ile elde edilen özelliklerin görüntü kodlamasına dönüştürülmesi ve CNN modeli ile arıza teşhisinin yapılmasını içermektedir. Sonuçlar, yöntemin yüksek teşhis doğruluğu, hızlı işlem süresi ve genelleme yeteneği ile arızalı sinyalleri etkili şekilde sınıflandırdığını göstermektedir. Benzer bir çalışmada [10], titreşim, akım ve kesme kuvveti sinyalleri toplanmış ve bu sinyallerden özellik çıkarımı yapılmıştır. Residual Network (ResNet) ve Long Short-Term Memory (LSTM)

modelleri karşılaştırılmış ve ResNet-LSTM kombinasyonunun tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Bu model sayesinde, sinyal özelliklerinin çıkarılması ve adaptif gürültü azaltma yetenekleri kullanılarak %98,25'lik bir doğruluk oranı ve 0,0085 mm'lik ortalama tahmin hatası elde edilmiştir. Tornalama işlemi sırasında kesici takımın ilerleyen aşınması ve olası kırılmalarının tahmini amacıyla akustik emisyon (AE) ve kesme kuvveti sinyalleri kullanılarak gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada farklı kesme hızları, ilerleme hızları ve takım tipleri kullanılarak toplam 27 deney gerçekleştirilmiştir. AE, kesme kuvvetleri ve sıcaklık ölçümleri alınmıştır [15].

Ayrıca son yıllarda, kesici takım aşınma ve kırılma tespiti için makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin kullanımı da yaygınlaşmıştır. Bir çalışmada, AE sinyalleri kullanılarak takım aşınmasının kestirimi için rastgele orman (RF) regresyon modeli önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, AE verisinin takım durumu hakkında önemli bilgiler sunduğunu göstermiştir [39]. Diğer bir çalışmada, torna işlemi sırasında titreşim sensörlerinden elde edilen ivme verileri analiz edilerek, çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarıyla takımın köşe aşınma durumu başarıyla sınıflandırılmıştır [40]. Başka bir çalışmada, frezeleme işlemi sırasında iş mili akımı ölçülmüş ve bu elektriksel veriler, LSTM temelli bir derin öğrenme ağı ile analiz edilerek takım durumu izlenmiştir [41]. Benzer bir çalışmada, kesme kuvveti sinyallerinden elde edilen veriler, dalgacık dönüşüm tekniği ile görselleştirilerek CNN ile analiz edilmiş ve takım aşınma durumu %88 doğrulukla sınıflandırılmıştır [42].

Literatür incelendiğinde, son yıllarda CNC tezgâhlarında kullanılan kestirimci bakım yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların hızla arttığı görülmektedir. Çizelge 1.2'de literatürdeki mevcut yöntemlerin bir karşılaştırması gösterilmektedir. Gerçek zamanlı kesici takım aşınması tespiti için öne çıkan yöntemler arasında sinyal analizi, makine öğrenimi modelleri ve yapay görme teknikleri yer almaktadır. Sinyal analizi, akustik emisyon, titreşim ve akım sensörlerinden alınan verilerin işlenmesiyle takım aşınmasının izlenmesini sağlar. Makine öğrenimi modelleri, kestirimci bakımda yüksek doğruluk sunarken maliyet etkinliği de sağlamaktadır. Yapay görme teknikleri ise CNC tezgâhlarında yüzey kalitesi ölçümü ve aşınma analizi için kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar arasında, özellikle dalgacık dönüşümü (DD) tabanlı sinyal analiz yöntemleri, hata frekanslarını doğru

bir şekilde izole etme, gürültüyü filtreleme ve yüksek çözünürlüklü zaman-frekans analizi sunma yetenekleriyle daha üstün bir performans sergilemektedir. Bu çalışmada, Undecimated Wavelet Transform (UWT) yöntemi kullanılmıştır. UWT yöntemi, alt örnekleme adımını ortadan kaldırarak tüm ayrıştırma seviyelerinde zamansal çözünürlüğü korur ve bu sayede durağan olmayan sinyallerde daha hassas hata tespiti sağlar. Bu özelliği, titreşim sinyallerindeki küçük değişimleri yakalamada oldukça etkili hale getirirken, gürültüye karşı daha dayanıklı olması sayesinde endüstriyel uygulamalarda yüksek doğruluk gerektiren durumlar için üstün bir seçimdir.

Çizelge 1.2: Kesici takım kırılmalarında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması.

Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Titreşim analizi [31,32]	Hatalı durumlara özgü frekans bileşenleri net biçimde belirlenebilir. Farklı sistemlerde rahatlıkla uygulanabilecek bir yöntemdir.	Ölçüm doğruluğu için yüksek hassasiyetli titreşim sensörleri gereklidir. Sensörün yerleşimi sonuçların güvenilirliği açısından oldukça önemlidir.
Akustik Emisyon (AE) Analizi [33]	Takımın kırılma ya da aşınma gibi durumları çok erken safhalarda algılanabilir. İnce detayların ölçümüne olanak tanıyan hassas bir yöntemdir.	Alınan sinyallerin doğru analiz edilmesi ciddi uzmanlık bilgisi gerektirir. Ortamda bulunan gürültülerden kolaylıkla etkilenebilir.
Kesme Kuvveti Analizi [29,30]	Kesme sırasında oluşan değişiklikler anlık olarak takip edilebilir. Süreçteki mekanik farklılıklar hızlıca tespit edilebilir.	Büyük miktarda veriyi kısa sürede işleyebilecek sistemlere ihtiyaç duyulur.
Sinyal İşleme Yöntemleri [25]	Ölçüm sinyallerindeki parazit ve bozulmalar azaltılabilir. Farklı arıza türleri sinyal bazında birbirinden ayrıştırılabilir.	Uygulama süreci karmaşık analiz adımları içerebilir. Etkili sonuçlar için algoritmaların iyi optimize edilmesi gerekir.
Makine Öğrenimi ve Hibrit Modeller [26]	Tahminlerde yüksek başarı oranı sağlayabilir. Dışsal gürültü etkilerine karşı daha dirençli çalışır.	Modelin başarılı olması için geniş ve kaliteli veri kümelerine ihtiyaç duyulur. Uygulamaya alınması yüksek maliyetli ve teknik altyapı gerektirebilir.

Bu çalışmada, titreşim sensörleri kullanarak takım kırılması ve aşınmasının erken tespiti için UWT tabanlı bir izleme sistemi önerilmektedir. Çalışmanın temel amacı, titreşim sensörlerinden elde edilen çeşitli durum verilerinin analiz edilmesi ve gruplandırılması yoluyla takım durumunun izlenmesidir. Önerilen sistem, takım kırılması ve aşınması arasındaki temel farklılıkları dikkate alarak, takım kırılmasının erken tespiti ve önlenmesi konusunda bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

1.3 Tezin Yapısı

Bu tez toplam beş ana bölümden oluşmakta olup, her bir bölüm, çalışmanın kapsamını sistematik bir şekilde ortaya koyacak biçimde düzenlenmiştir.

Birinci bölüm, giriş kısmını içermektedir. Bu bölümde çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmış, konu ile ilgili mevcut literatür incelenmiş ve tezin genel yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Bu sayede okuyucuya çalışmanın genel çerçevesi sunulmuştur.

İkinci bölümde çalışmanın teorik altyapısı ele alınmıştır. CNC takım tezgâhları ve bu makinelerde kullanılan kesici takımlar hakkında temel bilgiler verilmiş, kesici takım aşınması ve kırılma mekanizmaları detaylandırılmıştır. Ayrıca dalgacık dönüşüm yöntemlerinden olan UWT, CWT ve DWT tekniklerinin yanı sıra, titreşim verilerinin analizinde kullanılan RMS yöntemi ve normalizasyon süreci hakkında teorik bilgiler sunulmuştur.

Üçüncü bölüm, deneysel çalışmalara ayrılmıştır. Bu bölümde test düzeneği ve ölçüm sistemi, kullanılan sensörler ve veri toplama cihazları tanıtılmıştır. Ayrıca MATLAB, ortamında gerçekleştirilen veri analiz süreci ve Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) yazılımı ile geliştirilen kullanıcı arayüzü detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde analiz ve kullanılan yöntemler yer almaktadır. Bu kapsamda, gerçek zamanlı RMS değer analizleri ile birlikte UWT+RMS, CWT+RMS ve DWT+RMS hibrit yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece takımın kırılıp kırılmadığına dair karar destek sisteminin oluşturulması sağlanmıştır.

Beşinci ve son bölümde, elde edilen bulgular ve analiz sonuçları değerlendirilmiş, geliştirilen yöntemin uygulama alanlarına katkıları ortaya konmuştur. Ayrıca çalışmanın güçlü yönleri, sınırlılıkları ve gelecekte yapılabilecek benzer araştırmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. KESİCİ TAKIMLARDA AŞINMA VE KIRILMA

CNC takım tezgâhları, yüksek hassasiyet ve otomasyon kabiliyeti ile modern imalat sanayisinin vazgeçilmez unsurları arasında yer almaktadır. Bu sistemlerde kullanılan kesici takımlar, iş parçasına şekil vermek amacıyla sürekli yüksek hız ve kuvvet altında çalıştıklarından zamanla aşınma ve kırılma gibi çeşitli arızalarla karşı karşıya kalmaktadır. Takım aşınması, genellikle kademeli olarak gelişirken; takım kırılması ani ve beklenmedik şekilde gerçekleşerek üretim sürecini ciddi biçimde sekteye uğratabilir.

2.1 CNC Tezgâhlar ve Kesici Takımlar

Bilgisayar destekli sayısal kontrol (CNC - Computer Numerical Control) sistemleri, modern imalat sanayisinin temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir. CNC tezgâhlar, karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek hassasiyetle ve tekrarlanabilirlik özelliği ile üretilmesini sağlar. Bu makineler, takım yollarını ve kesme parametrelerini bilgisayar kontrollü olarak yönlendiren otomatik sistemler sayesinde üretim süreçlerinde verimlilik, kalite ve esneklik kazandırır.

CNC tezgâhlar; torna, freze, dik işleme merkezi, delik delme, taşlama ve elektro erozyon gibi farklı türlerde sınıflandırılmaktadır. Bu tezgâhların başlıca avantajları arasında; manuel operatör hatalarını minimize etmesi, üretim süresini kısaltması, standart parça kalitesi sağlaması ve çoklu eksenlerde işlem yapabilmesi yer almaktadır. Otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve medikal gibi hassas üretim gerektiren sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

CNC tezgâhlarda kullanılan kesici takımlar, iş parçası üzerinden talaş kaldırmak suretiyle şekil veren en kritik bileşenlerdir. Kesici takımlar, işlenen malzemenin türüne, istenen yüzey kalitesine ve operasyonun türüne göre farklı şekil, kaplama ve malzeme özelliklerine sahiptir. En yaygın kullanılan kesici takım malzemeleri arasında yüksek hızlı çelikler (HSS-High Speed Steel) ve sert metal (karbür),

seramikler yer almaktadır [43]. Şekil 2.1’de tez çalışmasında kullanılan karbür alaşımlı kesici takım gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Tez çalışmasında kullanılan karbür alaşımlı kesici takım.

Kesici takımların geometrisi (rake açısı, uç yarıçapı, talaş kırıcı vb.) ve kesme kenarlarının durumu, işleme kalitesini ve takım ömrünü doğrudan etkilemektedir [44]. Takımların aşınması veya kırılması, iş parçasında hatalara ve üretim kayıplarına neden olabilir. Bu nedenle, kesici takımın izlenmesi ve durumunun analiz edilmesi, hem ekonomik hem de teknik açıdan büyük önem taşımaktadır.

CNC tezgâhlarda gerçekleştirilen talaşlı imalat sürecinde, takım-malzeme etkileşimi sırasında yüksek sıcaklıklar, titreşimler ve kesme kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Bu etkileşimler, takım aşınmasının yanı sıra, takımda mikroyapısal değişikliklere ve kırılmalara yol açabilir. Takım değişimi zamanlamasının doğru yapılabilmesi için bu etkilerin sürekli izlenmesi ve analiz edilmesi gereklidir. Son yıllarda, bu amaçla çeşitli sensör teknolojileri (titreşim, kuvvet, sıcaklık) ve sinyal işleme yöntemleri kullanılarak takım sağlığını izlemeye yönelik sistemler geliştirilmektedir [45].

Bu tez kapsamında, CNC torna tezgâhlarında kullanılan karbür uçlu kesici takımların aşınma ve kırılma durumları titreşim verileri aracılığıyla analiz

edilmiştir. Kesici takım takibi için önerilen yöntem, tezgâhın gerçek üretim şartlarına uygun şekilde geliştirilmiş ve gerçek zamanlı olarak elde edilen sonuçlar detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Şekil 2.2’de kesici takım kırılmalarının tespiti için uygulamanın yapıldığı endüstriyel sahadaki CNC tezgâh gösterilmiştir.

Tez kapsamında kullanılan CNC tezgâhları, Bursa Hasanağa Organize Sanayi Bölgesi’nde faaliyet gösteren Erbab Otomat fabrikasında üretim hattında yer alan CNC kayar otomat tezgâhtır. Bu makine, 3 eksenle parça işleyebilme kapasitesine sahiptir. Üretimde ağırlıklı olarak paslanmaz çelik hammadde tercih edilmektedir. Bunun temel nedeni, bu hammaddenin kesici takımını diğer malzemelere göre daha fazla zorlamasıdır. Bu bağlamda, tez çalışmasında da paslanmaz çelikten üretilen ve seri üretimde yer alan bir parça tercih edilmiştir.

Çalışma boyunca veriler, sürekli olarak aynı parça üzerinden toplanmış ve analizler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Parça ya da hammadde değişikliği, kesme sürecindeki titreşim karakteristiklerini doğrudan etkileyebileceğinden, veri güvenilirliği ve analiz tutarlılığı açısından bu yaklaşım benimsenmiştir. Ayrıca, tüm veriler aynı ortam ve çalışma koşullarında kaydedilmiştir.



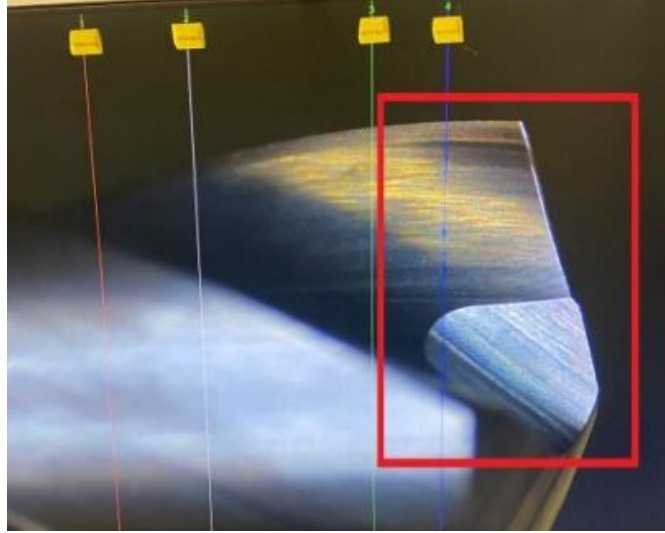
Şekil 2.2: Uygulamanın yapıldığı endüstriyel sahadaki CNC tezgâh.

2.2 Kesici Takım Aşınması ve Kırılma Mekanizmaları

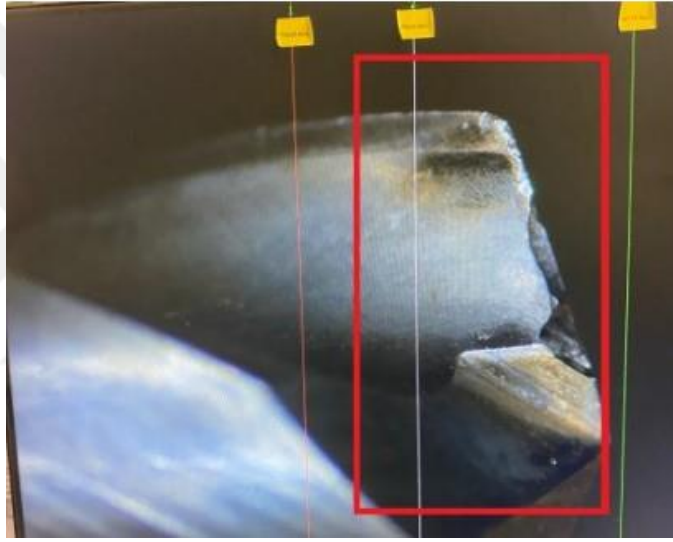
Kesici takım aşınması ve kırılması, CNC tezgâhlarında kullanılan takımların verimliliğini ve işleme kalitesini etkileyen kritik faktörlerdir. Bu olaylar, takım ömrünü kısaltır, üretim maliyetlerini artırır ve nihai ürün kalitesini olumsuz yönde etkiler. Aşınma ve kırılma, kesici takımın iş parçası ile etkileşimde bulunduğu süreçlerde çeşitli fiziksel ve kimyasal faktörlerden kaynaklanmaktadır.

Kesici takım aşınması, takımın kullanım süresi boyunca kesme kenarlarının mekanik olarak yıpranması veya kimyasal reaksiyonlar sonucu bozulmasıdır. Aşınma, takımın işleme kapasitesinin azalmasına ve iş parçasında hataların oluşmasına yol açar. Şekil 2.3'te kullanılmamış sıfır kesici takım ve aşınmış kesici takım yer almaktadır. Takım aşınması çeşitli biçimlerde görülebilir ve aşınma mekanizmaları genellikle aşağıdaki başlıklarda sınıflandırılır: [46]

- **Yüzey Aşınması:** Bu tip aşınma, kesici takımın kesme kenarlarında malzeme kaybı ile oluşur. Kesme sırasında, takımın iş parçası ile temas ettiği yüzeyde sürtünme ve ısınma nedeniyle malzeme kaybı meydana gelir. Bu durum, takımın kesme kapasitesini zamanla azaltır ve nihai ürün kalitesinde bozulmalar yaratabilir [47].
- **Talaş Kırılması:** Çoğunlukla yüksek sıcaklıklar nedeniyle takımın yüzeyinde mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar zamanla büyüyerek takımın kesici kenarından talaş koparmaya neden olur. Bu tip aşınma, özellikle sert malzemelerin işlendiği durumlarda yaygın olarak görülür [47].
- **Yüksek Sıcaklık Aşınması:** Kesme işlemi sırasında takım ve iş parçası arasında yüksek sıcaklıklar meydana gelir. Bu yüksek sıcaklıklar, takımın yapısal özelliklerini değiştirerek kesici kenarın bozulmasına yol açabilir. Ayrıca, takım malzemesinin mekanik özelliklerinin zayıflaması sonucu daha fazla aşınma meydana gelir [48].
- **Kimyasal Aşınma:** Kesme işlemi sırasında takım ve iş parçası arasında kimyasal reaksiyonlar gerçekleşebilir. Özellikle düşük kalite malzemelerde, takımın yüzeyi oksitlenebilir veya kimyasal bileşikler oluşturabilir. Bu reaksiyonlar, takımın dayanıklılığını azaltarak aşınma hızını artırır [49].



(a) Kullanılmamış kesici takım.



(b) Aşınmış kesici takım.

Şekil 2.3: (a) Kullanılmamış kesici takım, (b) Aşınmış kesici takım.

Kesici takım kırılması, takımın ani ve kalıcı bir şekilde kopmasıdır. Bu durum, takımın kesme işlemi sırasında iş parçasına aşırı kuvvet uygulaması sonucu meydana gelir. Kırılma, üretim sürecinde ciddi aksamalara ve makine arızalarına neden olabilir. Kırılma mekanizmaları genellikle aşağıdaki faktörlerden kaynaklanır:

- Kesme Kuvveti ve Momentlerinin Aşırı Artışı: CNC tezgâhlarında kesme işlemi sırasında takım üzerine uygulanan kuvvetler genellikle statiktir. Ancak, belirli durumlarda bu kuvvetler artarak takımın dayanma kapasitesini aşabilir. Takımın üzerinde oluşan anlık aşırı yükler, kırılmaya neden olabilir [50].

- Titreşim ve Darbe Etkileri: CNC tezgâhlarında, özellikle yüksek hızda yapılan işlemlerde, takım ve iş parçası arasındaki etkileşimler titreşimlere neden olabilir. Bu titreşimler, takımı sürekli olarak aşırı yüklere maruz bırakır ve zamanla takımın kırılmasına yol açar. Bu durum, özellikle takımların mekanik hatalardan dolayı zayıfladığı yerlerde daha belirgin hale gelir [49].
- Termal Gerilmeler: Kesme sırasında takımda aşırı ısınmalar meydana gelir ve bu ısınmalar, takımın yüzeyinde genellikle yüksek gerilmeler oluşturur. Eğer bu gerilmeler kritik seviyelere ulaşırsa, takımın kırılmasına neden olabilir. Bu tür kırılmalar genellikle soğutma sıvısının yetersiz olduğu veya kesme hızının çok yüksek olduğu durumlarda görülür [51].
- Takım Tasarımının Zayıflığı: Kesici takımların geometrik tasarımı, kırılma olasılığını doğrudan etkileyebilir. Özellikle zayıf veya hatalı tasarlanmış takımlar, yüksek kesme kuvvetleri ve titreşimler nedeniyle daha kolay kırılabilir. Bu nedenle, takımın uç kısmı, rengi ve dayanıklılığı da kırılma ihtimalini etkileyen faktörlerdir [52].

Şekil 2.4'te kırılmış bir kesici takım görülmektedir.



Şekil 2.4: Kırılmış bir takım görseli.

3. KESİCİ TAKIM AŞINMA VE KIRILMA ANALİZİ İÇİN TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ

Takım aşınmasının izlenmesinde yaygın olarak başvurulmuş yöntemlerden biri Kök Ortalama Kare (RMS) yöntemidir. Bu yöntem, sinyal genliğini değerlendirme açısından sıklıkla tercih edilmekte olup, temel bir analiz aracı olarak kullanılmaktadır. Ancak RMS, sinyal içerisindeki ani değişimleri veya geçici olayları tespit etmede sınırlı bir performansa sahiptir. Bu eksikliği gidermek ve analiz doğruluğunu artırmak adına, UWT ve RMS ile birlikte normalizasyon yöntemi önerilmektedir. UWT, geleneksel Ayrık Dalgacık Dönüşümünden (DWT) farklı olarak alt örnekleme yapmaz ve tüm ölçeklerde zamansal çözünürlüğü koruyarak sinyal bilgilerini tam olarak muhafaza eder. Bu bölümde ilk olarak RMS yönteminin matematiksel altyapısı sunulmuş , ardından UWT'nin temel denklemleriyle birlikte sağladığı avantajlara değinilerek takım aşınmasının tespitindeki teorik üstünlükleri ortaya konulmuştur.

3.1 Continuous Wavelet Transform (Sürekli Dalgacık Dönüşümü, CWT)

Continuous Wavelet Transform (CWT), bir sinyalin zaman-frekans düzleminde sürekli olarak analiz edilmesini sağlayan güçlü bir sinyal işleme yöntemidir. Bu yöntem, özellikle zamanla değişen frekans içeriğine sahip sinyallerin lokal özelliklerini incelemek için uygundur.

CWT'de, dalgacık fonksiyonu sinyalin tamamı boyunca süreksiz değil, sürekli olarak kaydırılır ve ölçeklenir. Bu sayede sinyalin her noktasında farklı frekans bileşenlerinin katkısı gözlemlenebilir. Sürekli kaydırma ve ölçekleme işlemi, sinyalin yüksek çözünürlüklü bir zaman-frekans haritasının (scalogram) elde edilmesini sağlar.

$x(t)$ şeklinde verilen bir sinyalin CWT'si Denklem 3.1'deki gibi tanımlanır:

$$CWT(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (3.1)$$

burada, s ölçek parametresi ve τ zamanda kaydırma parametresidir.

CWT, sinyalin yüksek frekans bileşenlerini küçük ölçeklerde, düşük frekans bileşenlerini ise büyük ölçeklerde analiz eder [53].

CWT yönteminin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Zaman-frekans düzleminde yüksek çözünürlük sağlar.
- Sinyalin tüm detaylarını yakalayabilecek kapsamlı analiz imkânı sunar.
- Kayma değişmezliği vardır, sinyaldeki konumsal farklılıklar analizi bozmaz.

CWT yönteminin dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Aşırı belirlenmiş (redundant) bir temsil üretir, bu da yüksek hesaplama maliyetine neden olur.
- Tüm ölçek ve kayma değerleri sürekli hesaplandığından dolayı CWT, diğer dalgacık yöntemlerine göre daha fazla bellek ve işlem gücü gerektirir.
- Özellikle büyük veri setlerinde uygulanması zaman alıcıdır.

3.2 Discrete Wavelet Transform (Ayrık Dalgacık Dönüşümü, DWT)

Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT), bir sinyali farklı frekans bileşenlerine ayırmak ve bu bileşenleri zaman bilgisiyle birlikte analiz etmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. CWT'nin aksine, DWT'de ölçekleme ve kaydırma işlemleri ayrık (kesikli) değerlerde yapılır. Bu sayede hem hesaplama maliyeti düşürülür hem de verimli veri temsili sağlanır.

DWT, sinyali tekrar eden filtreleme işlemleri ile yüksek frekans (detay) ve düşük frekans (yaklaşım) bileşenlerine ayırır. Bu işlem, çok seviyeli ayrıştırma (multi-level decomposition) ile tekrarlanarak sinyalin farklı çözünürlüklerdeki temsili oluşturur.

$x(t)$ şeklinde verilen bir sinyalin DWT'si Denklem 3.2 ve Denklem 3.3'teki gibi tanımlanır [54]:

$$A_j[n] = \sum_k h[k - 2n] A_{j-1}[k] \quad (3.2)$$

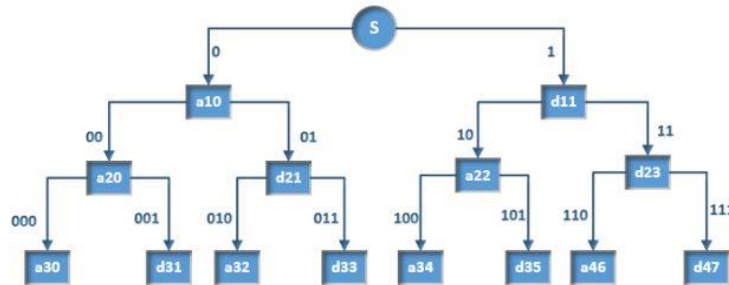
$$D_j[n] = \sum_k g[k - 2n] A_{j-1}[k] \quad (3.3)$$

Burada, $A_j[n]$ yaklaşım katsayıları, $D_j[n]$ detay katsayıları, $h[k]$ düşük geçiren filtre katsayıları ve $g[k]$ yüksek geçiren filtre katsayılarıdır.

3.3 WPT (Wavelet Packet Transform) Yöntemi

Bu tez çalışmasında kesici takımın durumunu belirlemek amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Önceki alt bölümlerde yer verilen RMS, entropy gibi öznitelik çıkarım teknikleri ve dalgacık tabanlı analizler, titreşim sinyalleri üzerinden takım aşınma ve kırılma tespitine yönelik olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımlara ek olarak, farklı bir fiziksel büyüklük olan akım sinyalleri kullanılarak yapılan analizler de tezin kapsamına dahil edilmiştir. Bu noktada, özellikle sinyalin zaman-frekans çözümlemesini etkili biçimde yapabilen Wavelet Packet Transform (WPT) yöntemi de incelenmiştir.

WPT, sinyalleri farklı frekans bantlarında daha ayrıntılı biçimde ayrıştırabilen gelişmiş bir dönüşüm tekniğidir. Klasik dalgacık dönüşümlerinin aksine, yalnızca detay katsayıları değil aynı zamanda yaklaşık katsayıları da ayrıştırarak yüksek çözünürlüklü bir spektral analiz sunar. Bu yönüyle, özellikle gürültülü ortamlarda çalışan CNC tezgâhlarından elde edilen verilerin daha sağlıklı analiz edilmesine olanak sağlar. Şekil 3.1’de WPT ile 3 seviyeli ayrıştırma için ağaç diyagramına yer verilmiştir.



Şekil 3.1: WPT ile 3 seviyeli ayrıştırma için ağaç diyagramı

Bu kapsamda yapılan çalışmada, bir CNC tezgâhının ilgili eksen boyunca çalışan trafoya ait akım sinyalleri alınmış, bu sinyaller WPT yöntemi ile analiz edilmiştir. Ayırıştırılan sinyal bileşenlerinden elde edilen bilgiler kullanılarak kesici takımın sağlam ya da kırık durumda olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım, sadece titreşim temelli analizlerle sınırlı kalmayan, farklı veri türlerinden de anlamlı bilgi çıkarabilen bütüncül bir izleme sistemine katkı sunmaktadır [56].

3.4 Root Mean Square (Ortalama Kare Kök,RMS) ve Normalizasyon Yöntemi

Titreşim sinyallerinden elde edilen RMS değeri, kestirimci bakım ve takım durumunun izlenmesinde önemli bilgiler sunar. Bu değer, sinyalin genlik özelliklerini temsil eder ve belirli bir pencere içerisinde $x_i[n]$ örneklerine sahip sinyal için Denklem 3.4 ile hesaplanır [55]:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n]^2} \quad (3.4)$$

Burada, RMS değeri sinyalin ortalama enerji seviyesini temsil ederek takım aşınması, kırılması gibi anomalilere duyarlılık sağlamaktadır. RMS yöntemi, özellikle düşük frekanslı ve durağan sinyallerin analizinde etkili bir ölçüm yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ancak, geçici olayları, ani değişimleri ve arıza frekanslarını algılamada sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle, özellikle zamanla değişkenlik gösteren (durağan olmayan) titreşim sinyallerinin incelenmesinde, UWT gibi zaman-frekans temelli analiz yöntemleri daha uygun ve güçlü bir alternatif oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, takım aşınmasını belirlemek amacıyla UWT tabanlı bir analiz yöntemi kullanılarak, CWT ve DWT ile karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Çalışmada takım sağlığının belirlenmesi amacıyla sinyal J = 4 seviyeli UWT ile ayrıştırılmış ve her seviyeye karşılık gelen detay katsayıları elde edilmiştir. Yapılan ampirik testlerde 4 seviyeli ayrıştırmanın yeterli olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen ayrıştırma sonucunda elde edilen detay katsayıları, Denklem 3.5 ile formüle edilebilir:

$$W_j(x[n]) = \{d_1[n], d_2[n], d_3[n], d_4[n]\} \quad (3.5)$$

Burada $d_j[n]$, j. seviyedeki detay katsayılarını ifade etmektedir. Her seviyedeki enerji değeri ise Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır:

$$E_j = \sum_n |d_j[n]|^2 \quad (3.6)$$

Bu işlem sonucunda, her i. pencereye karşılık gelen enerji vektörü oluşturulmuş ve sinyalin zamansal dinamikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Detay katsayılarının enerjisi, sinyaldeki lokal değişimlerin belirlenmesi açısından kritik bir role sahiptir. Özellikle takım aşınmasına bağlı mikro-vibrasyonların tespiti açısından etkin bir yöntem sunmakta olup, bu çalışmada takım sağlığının değerlendirilmesinde temel parametrelerden biri olarak kullanılmıştır.

Veri analiz aşamasında, öncelikle sinyallerin RMS değerleri hesaplanmaktadır. Burada, RMS değeri, sinyalin genel titreşim enerjisini temsil etmektedir. RMS değerlerinin hesaplamasından sonra, sinyal daha ayrıntılı analiz için UWT yöntemi kullanılarak dalgacık tipi 'db4' ile dört farklı seviyede detay bileşenlerine ayrılır: $\{d_1[n], d_2[n], d_3[n], d_4[n]\}$. Sonrasında, her bir seviyedeki enerji değeri hesaplanmaktadır. Analiz edilen RMS ve detay katsayısı enerjileri, daha doğru bir değerlendirme yapılabilmesi için 0-1 aralığında normalize edilir. Bu işlem, değerler arasında ölçek farklarını ortadan kaldırır ve karşılaştırmaları daha anlamlı hale getirir. RMS ve değeri için normalizasyon işlemi Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'deki şekilde gerçekleştirilmiştir:

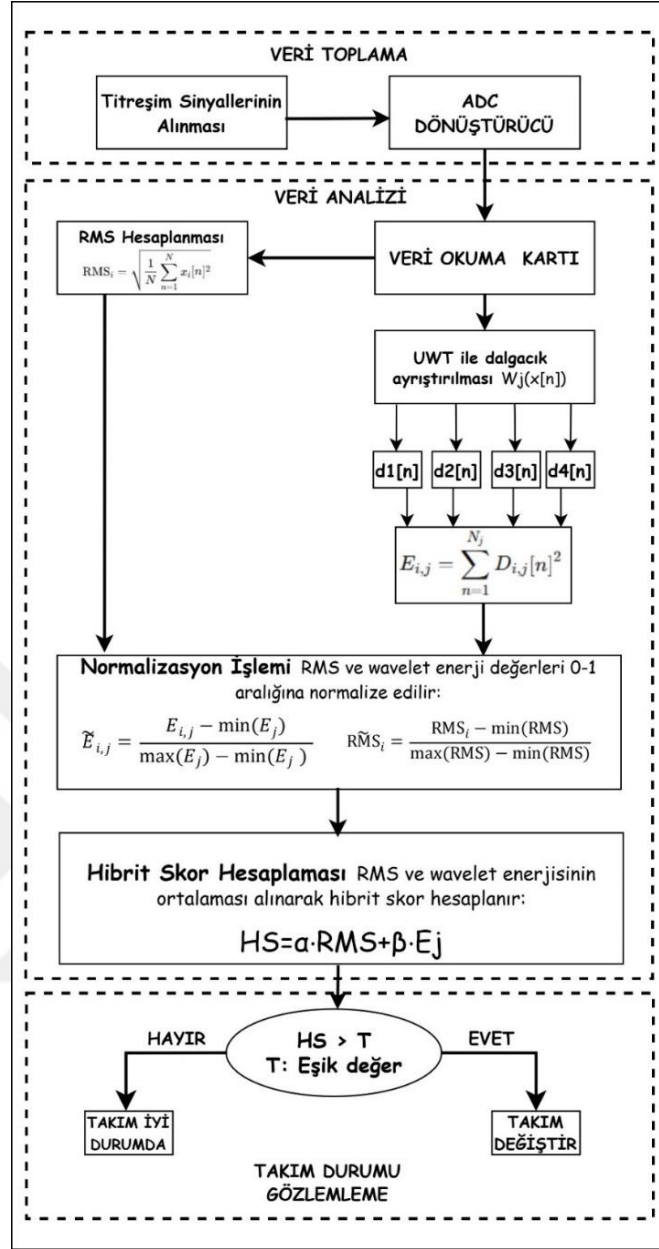
$$RMS_i = \frac{RMS_i - \min(RMS)}{\max(RMS) - \min(RMS)} \quad (3.7)$$

$$E_{ij} = \frac{E_{ij} - \min(E_j)}{\max(E_j) - \min(E_j)} \quad (3.8)$$

Normalize edilen RMS ve UWT detay katsayıları enerjileri, belirlenen ağırlık katsayıları (α ve β) kullanılarak Denklem 3.9'daki hibrit skor (HS) formülüyle birleştirilir:

$$HS = \alpha \cdot RMS + \beta \cdot E_j \quad (3.9)$$

Bu hesaplama hem RMS hem de UWT katsayılarının enerjilerinin etkisini dikkate alarak takımın genel durumunu yansıtan tek bir skor üretir. Burada α ve β katsayıları, her iki ölçümün önem derecesini belirlemek için deneysel olarak seçilir. Hesaplanan hibrit skor, önceden belirlenmiş bir eşik değeri (T) ile karşılaştırılır. Eğer $HS > T$ ise takımın aşınmış olduğu ve değiştirilmesi gerektiği sonucuna varılır. Ancak $HS < T$ ise takımın iyi durumda olduğu değerlendirilir. Bu karar süreci, takım değişiminin zamanında gerçekleştirilmesini sağlar ve takımın kırılma riski en aza indirilir. Bu yöntem sayesinde, takım kırılmadan önce aşınma tespit edilerek üretim sürecindeki aksaklıkların önüne geçilir. Bu hem üretim sürekliliğini sağlamakta hem de bakım ve değiştirme maliyetlerini azaltmaktadır. Ayrıca, sistemin otomatik analiz yapabilmesi, insan hatasını minimize ederek daha güvenilir sonuçlar sunar. Şekil 3.2’de kesici takım aşınma ve kırılma tespiti için önerilen yöntemin genel akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Kesici takım aşınma ve kırılma tespiti için önerilen yöntemin genel akış şeması.

3.5 Undecimated Wavelet Transform (UWT)

UWT, zaman-frekans analizinde kullanılan gelişmiş bir sinyal işleme yöntemidir. Bu dönüşüm, özellikle doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyallerin analizinde güçlü bir araç olarak öne çıkar. UWT, sinyali farklı frekans bileşenlerine ayırarak zaman eksenindeki lokal değişimleri detaylı bir biçimde ortaya koyar ve sinyaldeki ani değişimlerin izlenebilmesini sağlar. Bu yönüyle, mühendislik alanlarında titreşim, akustik, biyomedikal ve yapay zekâ tabanlı arıza tespiti uygulamalarında yaygın şekilde tercih edilmektedir.

UWT'nin temel prensibi, klasik ayrık dalgacık dönüşümünden (DWT) farklı olarak, her çözümleme seviyesinde sinyalin alt örneklemeden (downsampling) analiz edilmesini sağlamasıdır. Bu yöntemde sinyalin orijinal boyutu korunur ve her seviyede aynı uzunlukta ayrıştırma (detay) ve yaklaşık katsayılar (approximation coefficients) elde edilir. UWT, bu özelliği sayesinde zaman ekseninde kayma değişmezliği (shift-invariance) sağlar. Bu sayede sinyaldeki küçük zaman kaymaları analiz sonuçlarını bozmaz [15].

Dalgacık dönüşümü, temelde bir sinyali yüksek geçiren (detail extraction) ve alçak geçiren (trend extraction) filtre çiftleri ile ayrıştırma prensibine dayanır. Bu filtreleme işlemi her seviyede tekrarlanarak sinyalin farklı frekans bileşenlerine ulaşılır.

UWT, klasik çok çözünürlüklü analiz (Multiresolution Analysis) yapısını kullanır. Bir sinyalin UWT ile dönüşümü, ölçeklenmiş ve kaydırılmış dalgacık fonksiyonları kullanılarak hesaplanır. Denklem 3.10 ve Denklem 3.11'de UWT'nin temel matematiksel ifadeleri verilmiştir: [15]

Yaklaşık (Approximation) Katsayılar:

$$A_j[n] = \sum_k h_j[k]. A_{j-1}[n - k] \quad (3.10)$$

Detay Katsayılar:

$$D_j[n] = \sum_k g_j[k]. A_{j-1}[n - k] \quad (3.11)$$

Burada:

- $A_j[n]$: j. seviyedeki yaklaşık katsayılarıdır,
- $D_j[n]$: j. seviyedeki detay katsayılarıdır,
- $h_j[k]$: ölçekleme filtresi (alçak geçiren filtre) ve
- $g_j[k]$: dalgacık filtresi (yüksek geçiren filtre) olarak tanımlanır.

Her çözümleme seviyesinde h_j ve g_j filtreleri orijinal dalgacık filtresinden türetilir ve $2^{(j-1)}$ oranında uzatılarak uygulanır. Bu sayede sinyal üzerinde herhangi bir alt örnekleme yapılmadan işlem gerçekleştirilir.

UWT, klasik DWT’de olduğu gibi sinyalin enerji dağılımını gösteren detay katsayıları üretir. Ancak her seviyede sinyalin tüm uzunluğunu korur. Bu da sinyalin her noktasına ait bilgi kaybını önler.

3.5.1 UWT temel özellikler ve avantajlar

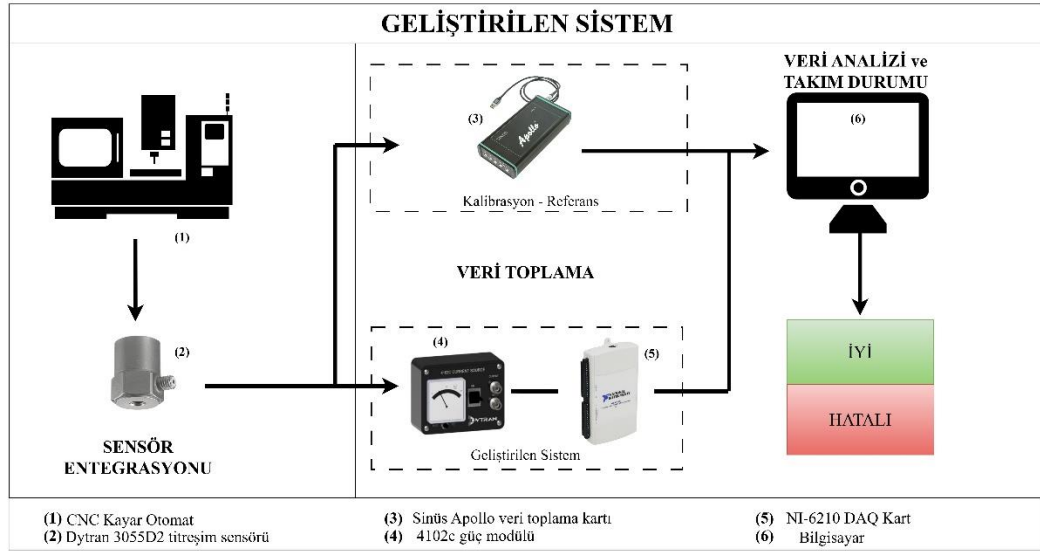
Zaman Kayma Değişmezliği (Shift-Invariance) özelliği sayesinde UWT, sinyaldeki küçük zaman kaymalarına karşı duyarsızdır; bu durum gerçek zamanlı sistemlerde güvenilir hata tespiti için büyük avantaj sağlar. UWT, alt örnekleme (downsampling) yapmadığı için sinyalin boyutu sabit kalır ve tam uzunlukta katsayılar elde edilir. Bu da özellikle yüksek zaman çözünürlüğü gerektiren uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. Ayrıca UWT, çok seviyeli analiz imkânı sunarak sinyali farklı frekans bileşenlerine ayırır ve bu sayede farklı ölçeklerde detaylı inceleme yapılabilir. Aşırı belirlenmiş (redundant) yapısı sayesinde elde edilen veri miktarı artar ve bu durum analiz hassasiyetini artırırken, aynı zamanda hesaplama yükünü ve bellek ihtiyacını da artırabilir. Tüm bu özellikler bir araya geldiğinde, UWT hem zamansal hem frekansal çözünürlük açısından üstün bir analiz yöntemi olarak öne çıkar.

UWT, sinyal işleme alanında geniş bir uygulama yelpazesine sahip etkili bir analiz yöntemidir. Mekanik arıza tespitinde; rulman, dişli ve kesici takım gibi elemanlardaki arızaların belirlenmesinde özellikle titreşim verileri üzerinden yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyomedikal sinyal işleme alanında ise EEG ve EKG gibi biyolojik sinyallerin analizinde nöbet, kalp ritmi bozuklukları ve diğer fizyolojik anomalilerin tespiti için önemli katkılar sunmaktadır. Görüntü işleme uygulamalarında, gürültü giderme, sıkıştırma ve kenar belirleme gibi işlemlerde detay seviyelerinin etkili şekilde ayrıştırılmasını sağlar. Ses ve akustik analizde de konuşma sinyalleri ile müzik verilerinin çözümlemesinde tercih edilmekte olup, zaman serisi analizinde ise finansal verilerden çevresel ölçümlere kadar çok boyutlu veri setinin analizinde başarıyla uygulanmaktadır.

Bu tez kapsamında UWT yöntemi kullanılarak CNC takım tezgâhlarında kullanılan kesici takımların titreşim verileri üzerinde uygulanmış, elde edilen detay katsayıları üzerinden takımın durumuna ilişkin çıkarımlar yapılmıştır. UWT sayesinde takım aşınması ve kırılma belirtileri zaman ekseninde yüksek doğrulukla izlenmiştir.

4. GELİŞTİRİLEN UYGULAMA SİSTEMİ

Bu bölümde, takım aşınması ve kırılma durumlarının belirlenmesine yönelik olarak yürütülen deneysel çalışmalara yer verilmektedir. Çalışmalar, gerçek üretim koşullarında, otomotiv sektörüne yönelik parça üretimi yapan kayar otomat CNC tezgâhlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de geliştirilen uygulamanın genel prensip şeması verilmiştir. Deneysel düzeneğin amacı, kesici takım üzerindeki titreşim davranışlarını hassas biçimde kaydederek bu veriler üzerinden kestirimci analiz yapmaktır.

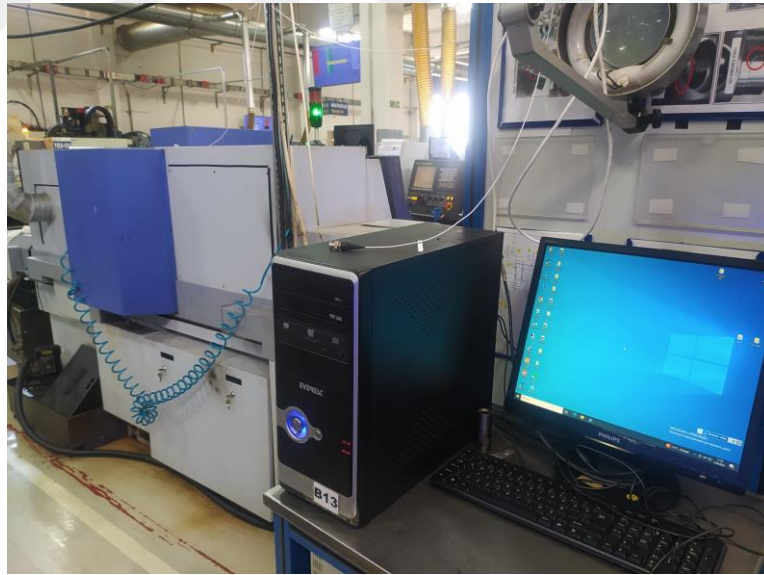


Şekil 4.1: Test sistemi genel prensip şeması.

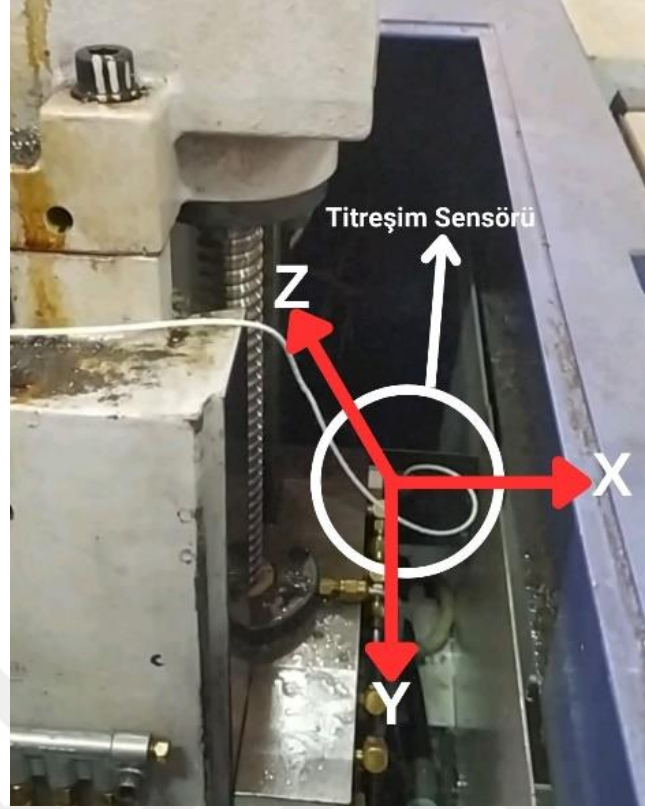
CNC Kayar Otomat (1) üzerinde yer alan Dytran 3055D2 titreşim sensörü (2), takımın çalışması sırasında oluşan titreşim verilerini algılar. Bu sinyaller, 4102c güç modülü (4) ile beslenerek Sinüs Apollo veri toplama kartı (3) yardımıyla kalibrasyon ve referans için değerlendirilir. Toplanan veriler, NI-6210 DAQ kartı (5) aracılığıyla bilgisayara (6) aktarılır. Burada geliştirilen analiz yazılımı ile veriler işlenir ve takımın durumu “İyi” veya “Hatalı” olarak sınıflandırılarak kullanıcıya bildirilir. Böylece operatör, takım durumunu gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve gerekli müdahaleleri zamanında gerçekleştirebilir. Bu sistem, gerçek zamanlı izleme ve kestirimci bakım uygulamaları için kullanılabilir yapıdadır.

Bu çalışmada kullanılan sistem, CNC tezgâhında gerçekleşen işleme süreci sırasında kesici takımın durumunu izlemeye yönelik bir titreşim tabanlı analiz yaklaşımına dayanmaktadır. İlk olarak, CNC tezgâhına entegre edilen Dytran 3055D2 titreşim sensörü, matkabın kesme anındaki titreşim verilerini toplar. Bu analog sinyaller, Sinus Apollo veri okuma kartı aracılığıyla dijital formata dönüştürülerek analiz bilgisayarına aktarılır. Bilgisayarda gerçekleştirilen sinyal işleme ve öznitelik çıkarımı işlemleri sonucunda, her işleme sürecine ait veriler analiz edilerek takımın durumu belirlenir. Test Düzeneği ve Ölçüm Sistemi

Deneysel sistem, Erbab Otomat fabrikasının üretim hatlarında CNC kayar otomat tipi makineler üzerine kurulmuştur. Bu sistemde temel amaç, kesici takım aşınması ve kırılması gibi durumları titreşim verileri aracılığıyla analiz edebilmektir. Titreşim verilerinin kaydedilebilmesi amacıyla, tezgâhın Z ekseninde yer alan “boynuz” (spindle) bölümüne piezoelektrik tabanlı bir titreşim sensörü monte edilmiştir. Şekil 4.2’de, deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği ve verilerin elde edildiği sistemin, makine üzerine kurulu hali yer almaktadır. Şekil 4.3’te ise titreşim sensörünün konumlandırılması yer almaktadır.



Şekil 4.2: Çalışmaların gerçekleştirildiği fabrika sahası



Şekil 4.3: Titreşim sensörünün tezgâh üzerindeki konumu.

Titreşim sensörü, CNC torna tezgâhının Z ekseninde yer alan boynuz (gövde) kısmına monte edilmiştir. Her ne kadar sensör Z eksenine konumlandırılmış olsa da, kesici takım x ekseninde talaş kaldırma işlemi gerçekleştirdiğinden, sensör bu işlem sırasında oluşan titreşimleri x eksenindeki takım hareketlerinden etkilenerek kaydetmektedir. Bu nedenle sensör, kesici takımın işlem anındaki titreşim verilerini etkin bir şekilde toplayabilmektedir.

Kesici takımın çalışma süreci ile veri kaydının senkronize edilmesi için ayrıca bir optik sensör kullanılmıştır. Bu sensör, takımın işleme sürecine başladığı anda veri kaydını otomatik olarak başlatmakta ve işlem tamamlandığında kaydı sonlandırmaktadır. Böylece sistem, yalnızca işleme sırasında oluşan titreşim verilerini hedef alacak şekilde yapılandırılmıştır.

Çizelge 4.1’de yapılan çalışma ile ilgili parametrelere yer verilmiştir.

Çizelge 4.1: Yapılan çalışma ile ilgili parametreler.

Hammadde cinsi	Parçanın matkap boyu	Matkap çapı	CNC tezgâh devir hızı	CNC tezgâh ilerleme hızı	Kesici takım çalışma süresi
Paslanmaz	38 mm	Q8,1 mm	1600 rpm	%6	40 sn

Veri toplama süreci için iki farklı sistem entegre edilmiştir. Sinus Apollo veri okuma kartı, kalibrasyon ve karşılaştırmalı analizlerde kullanılmış; yüksek doğruluklu sinyal işleme yeteneği sayesinde referans ölçümler elde edilmiştir. Bunun yanında, özgün arayüz ve uygulama geliştirme çalışmaları için NI USB-6210 marka veri toplama kartı tercih edilmiştir. Tezgâhın yakınına kurulan bilgisayar ve veri işleme sistemi ile tüm veri akışı organize şekilde kontrol edilmiştir.

İşlemeye tabi tutulan hammadde olarak paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Bu malzeme, kesici takımı yüksek oranda zorlamakta ve dolayısıyla aşınma ve kırılma gibi kritik durumların daha kısa sürede gözlemlenmesini sağlamaktadır. Bu tercih, deneysel verilerin anlamlılığı ve çeşitliliği açısından katkı sağlamıştır.

4.1 Kullanılan Sensörler ve Veri Toplama Cihazları

Deneysel sistemde iki temel sensör tipi kullanılmıştır:

Titreşim Sensörü: Sistemde kullanılan sensör, Dytran 3055D2 marka piezoelektrik tipi bir sensördür. Bu sensör yüksek frekans tepkisine (genellikle 10 kHz'in üzeri), geniş dinamik aralığa (tipik ± 50 g), düşük gürültü seviyesine ve yüksek hassasiyete sahiptir. CNC tezgâhının Z eksenindeki iş mili bölümüne sağlam bir şekilde monte edilerek sinyal kaybı minimize edilmiştir. Sensör çıkışları analog olarak elde edilmekte ve sinyal kalitesi, uygun sinyal koşullandırıcılarla desteklenmektedir.

Optik Sensör: Takımın devreye giriş ve çıkış anlarını algılamak için kullanılan GRL18S-P1351 M18 sensör, reflektörlü tip fotoelektrik bir sensör olup takımın hareketini algılayabilmek ve titreşim sensöründen sürekli aynı zamanlarda senkronize şekilde veri alınmasında bir tetikleme sinyali oluşturabilmek için kullanılmıştır. Böylece, veri alımı sadece takım işleme yaparken aktif hâle gelmektedir.

Veri toplama donanımları ise şu şekildedir:

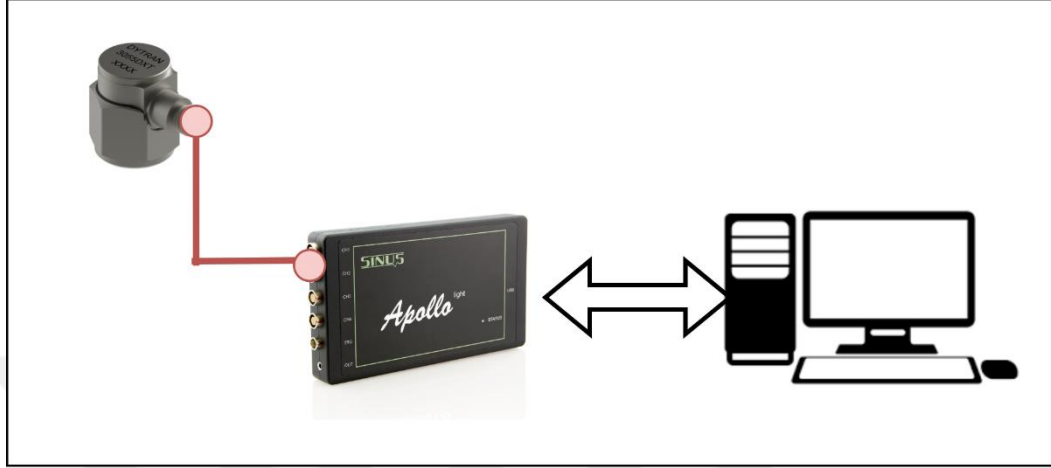
Sinus Apollo Veri Toplama Kartı: Yüksek çözünürlükte veri kaydı yapabilen SINUS ApolloLight_72 kartı, özellikle titreşim ve yapısal dinamik analiz uygulamaları için geliştirilmiş hassas bir veri toplama sistemidir. 24-bit ADC çözünürlüğe sahip olan bu kart, 20 kHz'e kadar geniş bant genişliği (isteğe bağlı olarak 80 kHz'e kadar yükseltilebilir) ve $<3 \mu V(A)$ seviyesinde düşük ADC gürültü seviyesi ile dikkat çekmektedir. Yüksek örnekleme hızı ve geniş dinamik aralığı (110 dB), sistemin yüksek hassasiyetli ölçümler yapmasına olanak tanımaktadır. Uluslararası ölçüm standartlarına uygunluğu sayesinde, referans ölçümler ve endüstriyel seviye analizlerde güvenle kullanılabilir.

National Instruments (NI) Veri Toplama Kartı: NI USB-6210 marka veri toplama kartı, 16-bit çözünürlükte 250 kS/s toplam örnekleme hızı ve 16 analog giriş kanalı ile laboratuvar ve saha ortamlarında sıkça tercih edilmektedir. Veri toplama süreci Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) arayüzü üzerinden yönetilmiştir. Bu sayede hem gerçek zamanlı görselleştirme hem de veriye müdahale imkânı sağlanmıştır. Ayrıca, kartın dijital giriş-çıkış pinleri optik sensör ile tetikleme işlemleri için kullanılmıştır.

Dytran 4102C Güç Modülü: Bu modül, piezoelektrik (IEPE tipi) sensörlerin güvenilir şekilde çalışabilmesi için gerekli olan sabit akım beslemesini sağlar. Her biri bağımsız olan üç kanal üzerinden sensörlere yaklaşık 2 mA sabit akım ve +18 VDC sabit gerilim ile enerji sağlar. Böylece birden fazla sensörün eş zamanlı olarak çalıştırılması mümkün olurken, veri bütünlüğü ve ölçüm kararlılığı korunmaktadır. Düşük bant genişliği gürültüsü ($\sim 60 \mu V$ RMS) sayesinde hassas sinyal elde edilmesini destekler ve bu yönüyle sistemin ölçüm doğruluğuna önemli katkı sağlar.

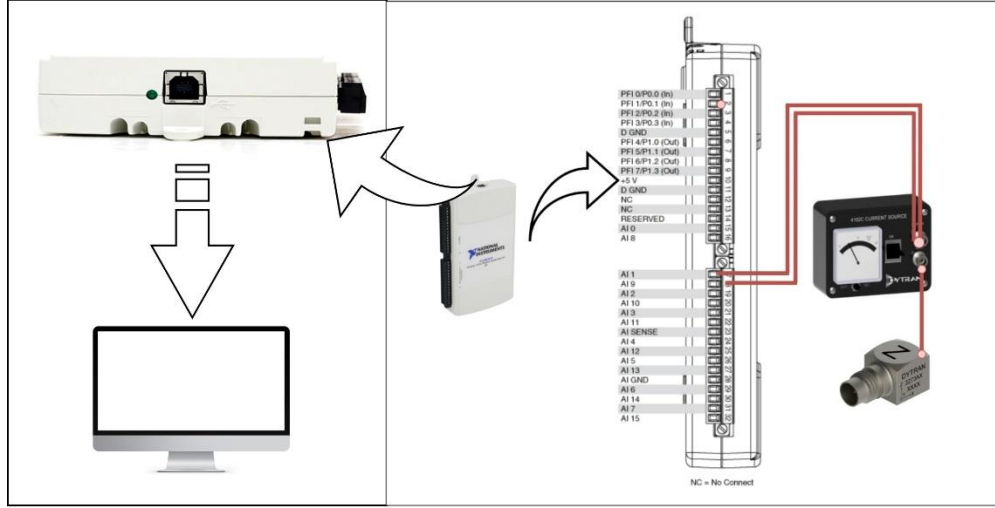
Şekil 4.4'te, uluslararası standartlara sahip olan Sinus Apollo veri toplama kartı ile oluşturulmuş veri toplama sisteminin genel bağlantı şeması sunulmuştur. Tez çalışmasının ilk aşamalarında bu kart ile gerçekleştirilen uygulamalar, izlenecek yöntemlerin belirlenmesinde ve sistem mimarisinin şekillenmesinde önemli bir yol gösterici olmuştur. Sistemde, Sinus Apollo veri kartı, piezoelektrik tabanlı titreşim sensörünü doğrudan besleyebilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle harici bir güç modülüne ihtiyaç duyulmadan, titreşim sensörünün sinyal çıkışı doğrudan kartın CH1 kanalına bağlanmıştır. Bu yapı sayesinde sensör verileri doğrudan sayısallaştırılarak analiz bilgisayarına aktarılabilmektedir. Böylece sinyalin işlenmesi

ve sınıflandırma öncesi öznitelik çıkarımı için gerekli veriler hızlı ve güvenilir bir şekilde elde edilebilmektedir. Sistemin hazır yazılım arayüzü sayesinde kullanıcı, temel analiz işlemlerini kolayca gerçekleştirebilmektedir. Bu da prototip geliştirme sürecini önemli ölçüde hızlandırmaktadır.



Şekil 4.4: Sinus Apollo veri toplama kartı genel bağlantı şeması.

Şekil 4.5'te ise benzer bir veri toplama mantığıyla çalışan ancak kullanıcıya kendi arayüzünü geliştirme imkânı tanıyan NI USB-6210 marka veri toplama kartı ile oluşturulan sistemin bağlantı şeması yer almaktadır. Bu yapı sayesinde, daha esnek ve özelleştirilebilir bir analiz ortamı sağlanmıştır. Sistemin veri toplama altyapısında, Analog Input 1+ (17. pin) ve Analog Input 1- (18. pin) uçları kullanılarak bağlantı yapılmıştır. Bu pinler, Dytran 4102C güç modülünün çıkış (output) ucuna bağlanmıştır, bu sayede sensörden gelen analog sinyaller DAQ kartına iletilmiştir. Dytran 4102C modülünün sensör pininden ise ivmeölçer tipi titreşim sensörüne bağlantı yapılmıştır. Güç modülü, hem sensöre gerekli beslemeyi sağlamakta hem de sinyalin güvenli biçimde DAQ kartına aktarılmasına aracılık etmektedir. NI USB-6210 marka veri toplama kartı, ± 10 V analog giriş aralığında sinyalleri 250 kS/s (kilo örnek/saniye) toplam örnekleme hızıyla dijitalleştirerek analiz bilgisayarına aktarmaktadır. Bu hız, çok kanallı ölçümlerde kanal sayısına bölünerek dağıtılır (örneğin 2 kanalda 125 kS/s). Yüksek çözünürlüklü ve güvenilir veri aktarımı sayesinde, gerçek zamanlı sinyal izleme ve analiz uygulamaları için uygundur. Bu sayede, sensörden elde edilen titreşim verileri uygun biçimde kaydedilmiş, sinyal işleme ve öznitelik çıkarımı süreçleri için kullanılabilir hâle getirilmiştir. Şekil 4.6'da ise tez çalışmasında kullanılan sensör ve veri okuma kartlarının fotoğrafları gösterilmiştir.



Şekil 4.5: NI USB-6210 kartı ile oluşturulan sistemin bağlantı şeması



Şekil 4.6: Tez çalışmasında kullanılan sensör ve veri okuma kartları.

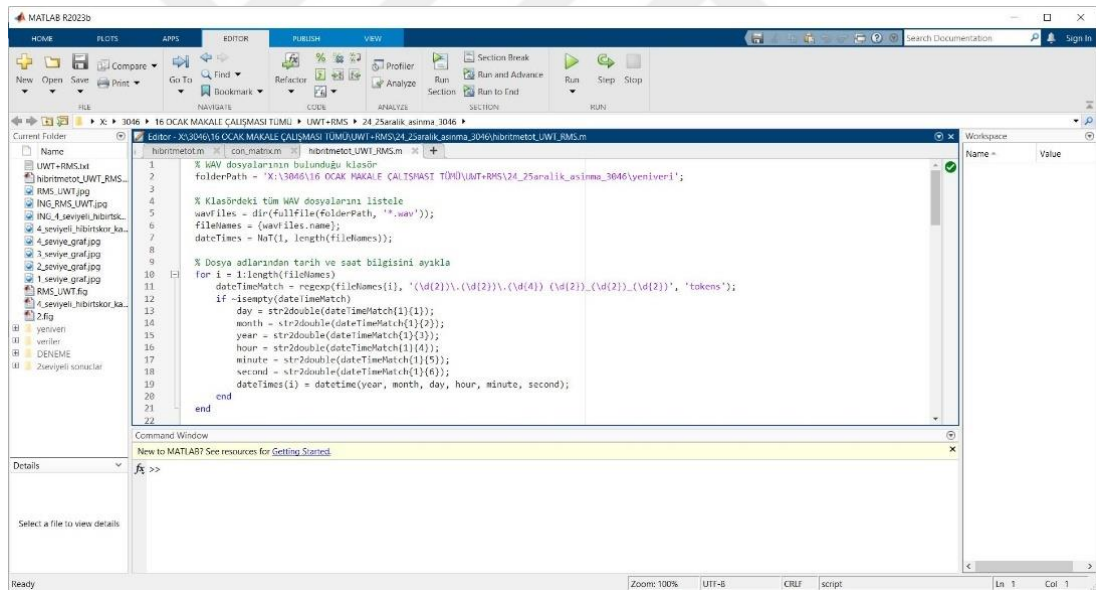
Bu sensör ve donanımların birlikte kullanımı, hem zaman hem de frekans çözünürlüğü açısından güçlü bir veri elde edilmesini sağlamış ve analizlerin güvenilirliğini artırmıştır.

4.2 MATLAB ile Veri Analizi

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen tüm titreşim verileri, Waveform Audio File Format (.wav) uzantısıyla kaydedilmiştir. Bu veri formatı, yüksek çözünürlüklü analog sinyal bilgilerini dijital ortamda koruyarak, sinyal işleme uygulamaları için önemli bir avantaj sunmaktadır. Veri analiz süreci, MATLAB ortamında gerçekleştirilmiş ve sinyal işleme işlemlerinde MATLAB'in güçlü fonksiyonları ve araçlarından yararlanılmıştır.

Veri analizinde izlenen temel adımlar şu şekilde özetlenebilir:

Veri Okuma: İlk olarak, deneysel düzende elde edilen her bir işlem çevrimine ait .wav dosyaları MATLAB ortamına aktarılmıştır. `audioread()` fonksiyonu kullanılarak ses dosyaları sinyal vektörlerine dönüştürülmüş ve eş zamanlı olarak örnekleme frekansı bilgisi elde edilmiştir. Şekil 4.7'de MATLAB'de oluşturulan veri okuma koduna ait bir ekran görüntüsü yer almaktadır.



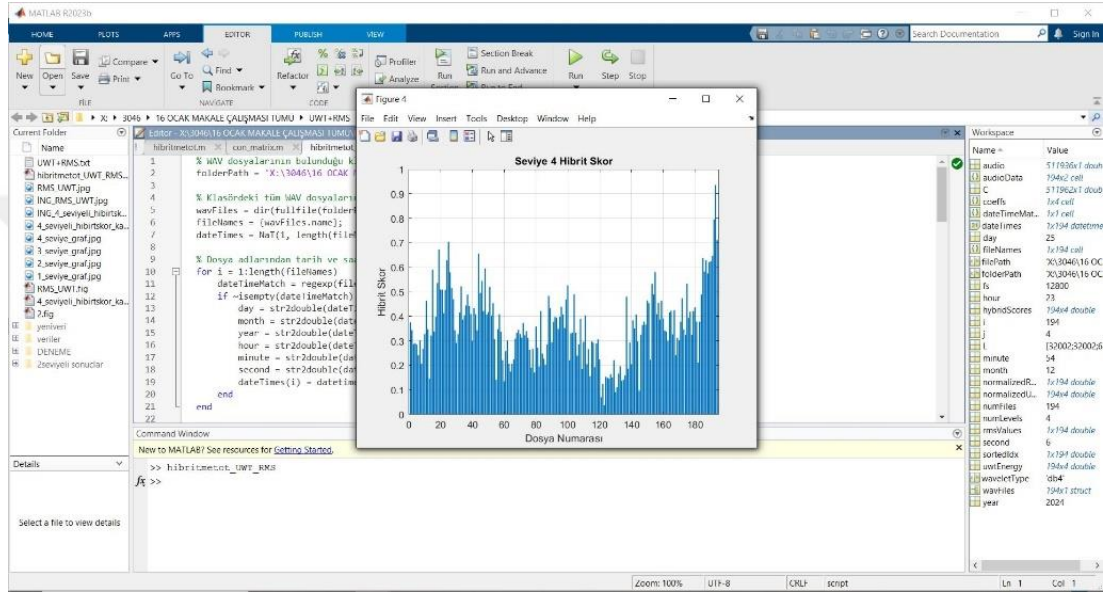
Şekil 4.7: MATLAB'de oluşturulan veri okuma işlemine ait kod parçası

Sinyal Görselleştirme: Ham verilerin genel karakteristiklerini anlamak amacıyla zaman domeninde sinyal grafikleri oluşturulmuş ve sinyalin durağanlığı, periyodikliği gibi özellikler incelenmiştir. Bu aşama, anomali içeren veya hatalı kayıtları tespit etmek açısından önemli olmuştur.

Önişleme ve Gürültü Azaltma: Kaydedilen sinyallerin analiz öncesinde filtreleme teknikleri ile temizlenmesi sağlanmıştır. Gerekliğinde yüksek-geçiren veya band

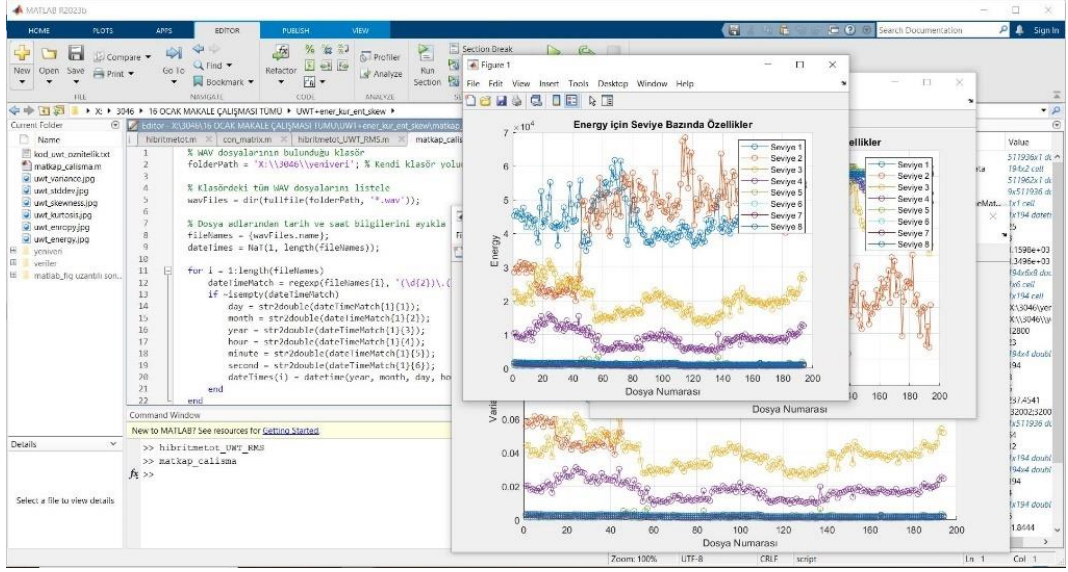
geçiren filtreler uygulanarak sinyaldeki düşük frekanslı sapmalar ve sistematik gürültüler bastırılmıştır.

Zaman-Frekans Analizi: Takım aşınması ve kırılması gibi olayların belirlenebilmesi için sinyaller üzerinde zaman-frekans analiz yöntemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda özellikle UWT, CWT ve DWT yöntemleri ile sinyaller çok seviyeli detaylara ayrılmış ve geçici olaylar analiz edilmiştir. Şekil 4.8’de MATLAB’de gerçekleştirilen zaman-frekans analizi gösterilmiştir.



Şekil 4.8: MATLAB’de gerçekleştirilen zaman-frekans analizi.

Özellik (Öznitelik) Çıkarımı: Her bir işlem çevrimi için elde edilen sinyal kesitlerinden enerji, entropi, varyans, RMS, çarpıklık (skewness), basıklık (kurtosis) gibi öznitelikler hesaplanmış ve veri setine dahil edilmiştir. Şekil 4.9’da MATLAB’de gerçekleştirilen öznitelik çıkarma işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9: MATLAB’de gerçekleştirilen öznetelik çıkarma işlemleri.

Veri Seti Oluşturulması: Bu tez kapsamında, CNC takım tezgâhlarında kullanılan matkap uçlarının aşınma ve kırılma durumlarının tespiti amacıyla titreşim sinyallerine dayalı bir veri seti oluşturulmuştur. Veri toplama süreci, Erbab Otomat fabrikasında bulunan bir CNC tezgâhta gerçek üretim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Veri seti oluşturulurken aşağıdaki yöntem ve koşullar dikkate alınmıştır:

Veri Formatı ve Kaydı: Titreşim verileri, Dytran 3055D2 piezoelektrik sensör ve NI USB-6210 veri toplama kartı ile 40 kHz örnekleme frekansında ölçülmüş ve her işlem için .wav uzantılı ses dosyaları olarak kaydedilmiştir. Ortalama her bir .wav dosyası yaklaşık 2 MB boyutundadır ve bir parça işleme süresine denk gelen yaklaşık 40 saniyelik titreşim verisini içermektedir.

Veri Toplama Süresi ve Miktarı: Tez kapsamında yaklaşık 1500'den fazla ham veri dosyası toplanmıştır. Bu veriler, farklı kesici takım ömürlerinin farklı aşamalarında elde edilmiştir. Örneğin, bir matkabın 100 parça işleme süresince, yaklaşık 80–90 parça verisi sorunsuz şekilde kayıt altına alınabilmektedir. Toplam veri toplama süreci yaklaşık 2 ay sürmüştür.

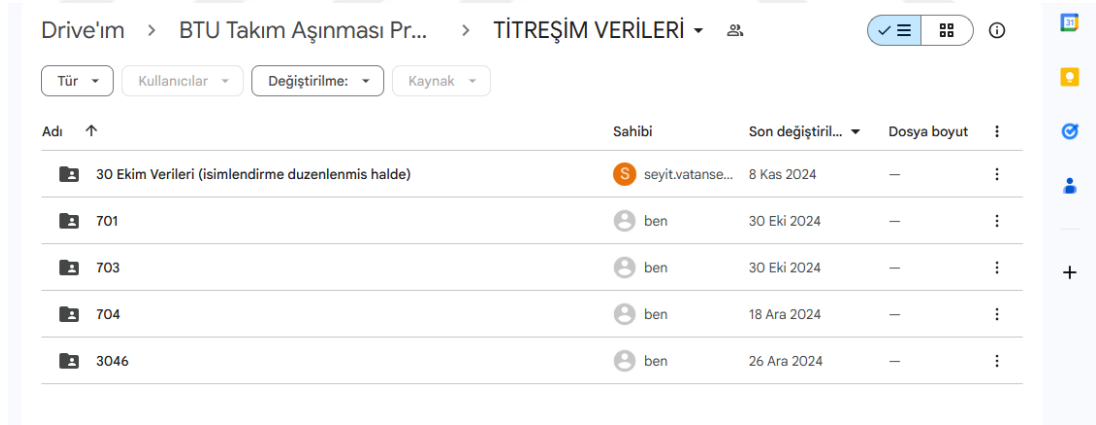
Veri Etiketleme: Tüm veriler, sahada çalışan operatörlerin gözlemleri, takım değişim geçmişi ve işlenen parça kalitesi dikkate alınarak; “yeni”, “aşınmış” ve “kırık” olmak üzere üç sınıfa ayrılarak etiketlenmiştir. Böylece, sınıflandırma algoritmalarında kullanılmak üzere hazır ve dengeli bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Veri İçeriği ve İşleme Bölgesi Seçimi: Bu çalışmada özellikle çap 8 matkap işlemi hedeflenmiş ve yalnızca bu işlem sırasında oluşan titreşim verileri analiz edilmiştir. Bu tercih, takım kırılma ve aşınma problemlerinin en sık görüldüğü süreç olması ve işlem sırasında takımın en fazla zorlandığı aşamalardan biri olmasından kaynaklanmaktadır.

İlgili Zaman Aralığı Seçimi: 40 saniyelik toplam veri içerisinde matkabın aktif olarak kesme yaptığı süre belirlenmiş ve yalnızca bu bölüm veri analizine dahil edilmiştir. Bu sayede sistemin sadece kesici takımın malzeme ile temas ettiği ve aşınmanın başladığı bölgeye odaklanması sağlanmıştır.

Bu yapı sayesinde oluşturulan veri seti, sadece işlevsel değil aynı zamanda literatürdeki birçok çalışmaya göre saha gerçekliğine daha uygun bir yapıda hazırlanmış, analiz ve modelleme için güvenilir bir temel oluşturmuştur.

Şekil 4.10’de, alınan titreşim verilerinin sistemli bir şekilde bulut tabanlı veri depolama sistemi üzerinde veri seti hâlinde saklandığı ve sıralandığı görülmektedir. Veri toplama süreci, dört farklı parça üzerinde gerçekleştirilmiş olup, her bir parça için elde edilen sinyaller ayrı klasörlerde düzenlenmiştir.



Adı	Sahibi	Son değiştirilme...	Dosya boyut
30 Ekim Verileri (isimlendirme duzenlenmis halde)	seyit.vatanse...	8 Kas 2024	—
701	ben	30 Eki 2024	—
703	ben	30 Eki 2024	—
704	ben	18 Ara 2024	—
3046	ben	26 Ara 2024	—

Şekil 4.10 : Titreşim verilerinin kaydedilmesi ve veri setinin oluşturulması.

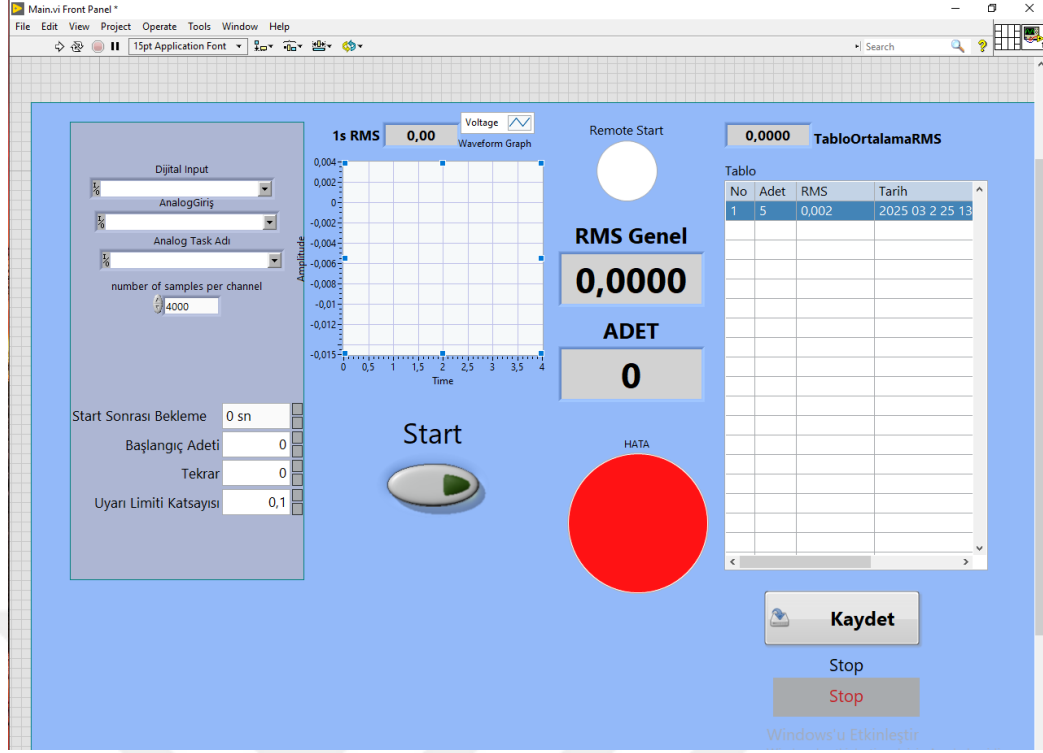
Bu analiz süreci sayesinde, MATLAB ortamı kullanılarak sinyalin zaman ve frekans boyutlarında ayrıntılı incelenmesi sağlanmış, takım sağlığına dair erken teşhis yapılabilecek öznitelikler başarıyla çıkarılmıştır. MATLAB’ın sunduğu esnek yapı, karmaşık dalgacık dönüşümleri ve çok katmanlı analizleri uygulamak için ideal bir ortam sunmuş, bu da çalışmanın doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmıştır.

4.3 Gerçek Zamanlı İzleme ve Anomali Tespiti

Bu çalışmada, elde edilen titreşim verilerinin izlenmesi, analiz edilmesi ve yorumlanması süreçlerinde kullanıcı dostu bir ortam oluşturmak amacıyla LabVIEW platformu kullanılarak özel bir arayüz geliştirilmiştir. LabVIEW, grafik tabanlı programlama dili olan G dili sayesinde görsel nesnelerle kod yazmayı mümkün kılarak, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanım kolaylığı, gerçek zamanlı veri akışını işleyebilme kabiliyeti ve modüler yapısı, bu çalışmada LabVIEW yazılımını arayüz geliştirme için ideal bir tercih haline getirmiştir.

Geliştirilen arayüz, tamamen tez çalışmasına özel olarak tasarlanmış ve farklı parçalar için özelleştirilebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Kullanıcı, arayüz üzerinden işlenen parçanın türünü belirleyebilmekte ve her parça tipi için ayrı eşik değerleri tanımlayabilmektedir. Bu sayede, kesici takım aşınmasının durumu her parçaya özel eşik seviyelerine göre değerlendirilmektedir.

Şekil 4.11’de, LabVIEW ortamında geliştirilen kullanıcı arayüzünün genel görünümüne yer verilmiştir. Bu arayüz aracılığıyla veri toplama ve analiz süreci etkileşimli bir biçimde yönetilebilmektedir. Şekil 4.12, sistem henüz çalıştırılmadan önceki sistemin ilk durumunu ve tüm işlevsel bileşenleri bir arada gösteren genel bir ekran görünümüdür. Çalışma anına ait detaylı işleyiş ve veriler diğer şekillerde ayrıntılı olarak sunulmaktadır.



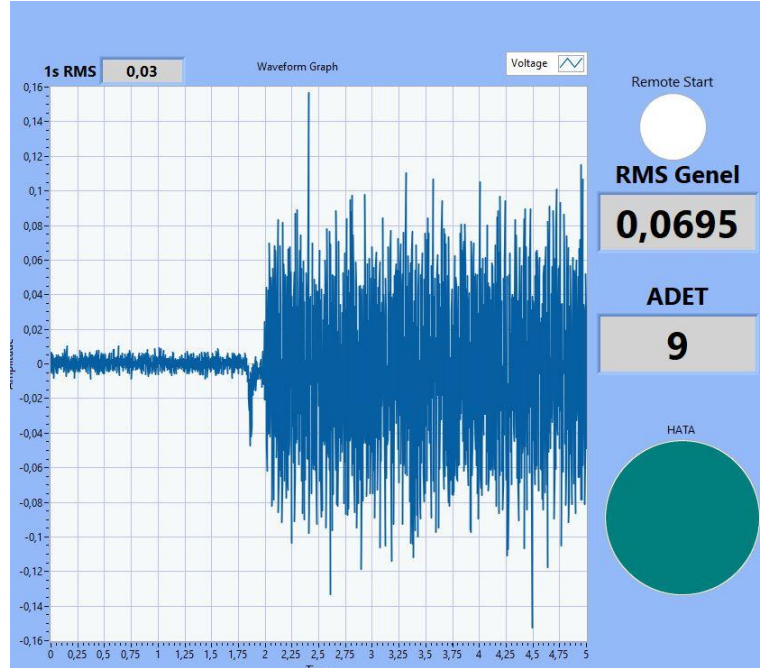
Şekil 4.11: LabVIEW ortamında geliştirilen kullanıcı arayüzünün genel görünümü.

Şekil 4.12’te ise, arayüz üzerinde tanımlı olan portların ve oluşturulan görevlerin (task) seçilebildiği bölüm yer almaktadır. Aynı zamanda, kesici takımın işleme süresinin girildiği alan da bu bölümde bulunmaktadır. CNC tezgâhlarından gelen sinyal doğrultusunda, parça işlenmeye başladığı anda sistem belirlenen gecikme süresine göre (örneğin kaçınıcı saniyede işleme başlandığı bilgisi girilerek) sadece kesici takıma ait titreşim verilerini kaydetmeye başlamaktadır. Bu zamanlama, parçanın türüne göre kullanıcı tarafından manuel olarak ayarlanabilmektedir.

Ayrıca, sistemin başlangıcında üretimi tamamlanan parçaların sayısının girildiği bir alan da, arayüzde yer almaktadır. Bu sayede, sistem başlatılmadan önce üretilmiş parçalar dikkate alınarak analizlerin doğruluğu artırılmaktadır. Bunun yanı sıra, kullanılan hammadde ve parça türüne uygun olacak şekilde kullanıcı tarafından belirlenebilen uyarı limiti katsayısı da yine bu ekran üzerinden girilebilmektedir. Bu katsayı, her parçaya özgü hibrit skorların varyasyonuna göre belirlenmekte ve normalizasyon yöntemi ile uyarlanarak aşırı değişkenlik gösteren parçalara esneklik tanımaktadır.

Şekil 4.12: Kesici takım izleme arayüzü ve parametre giriş ekranı.

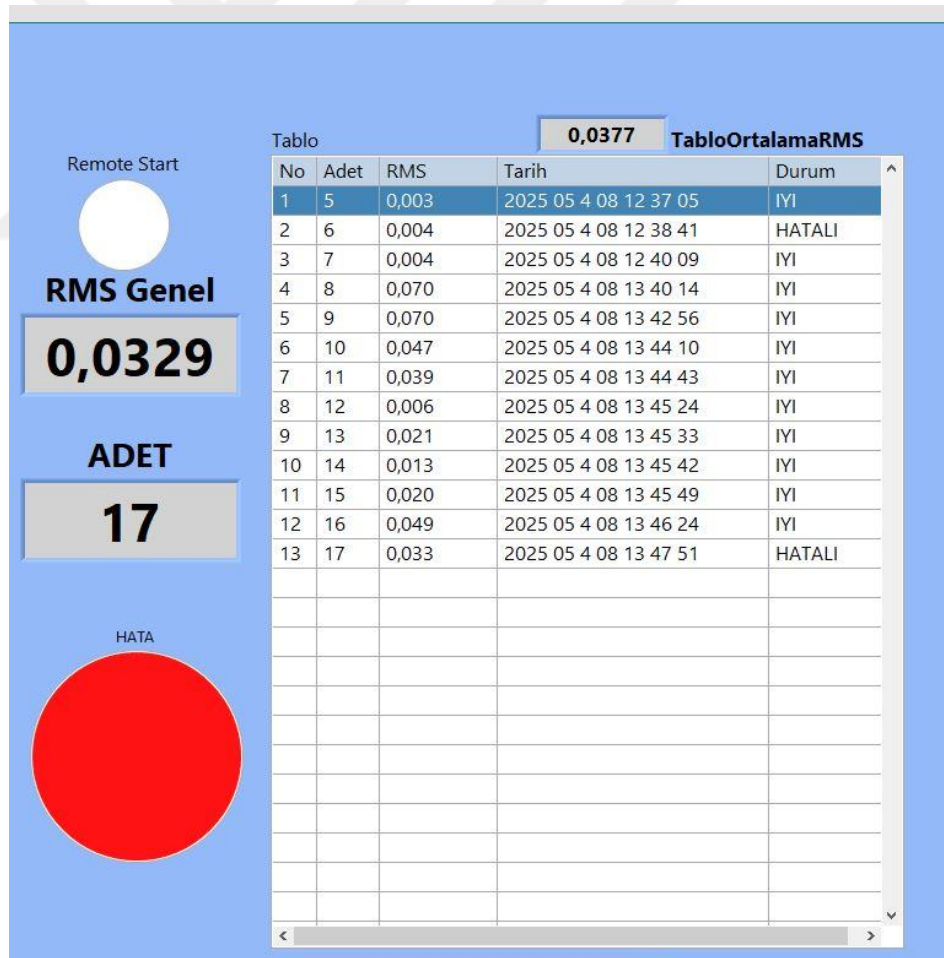
Şekil 4.13'te, her bir parçaya ait titreşim verilerinin grafiksel olarak çizdirildiği görülmektedir. Bu grafikler, analiz sürecinde parçaların titreşim davranışlarının görsel olarak izlenmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 4.13: Parça bazlı titreşim verilerinin grafiksel gösterimi.

Şekil 4.14'te ise her parçaya ait hibrit skorların yazdırıldığı ve sistemin kaç adet parça ürettiğini gösteren bir sayaç yer almaktadır. Her bir işlenmiş parçaya ait analiz sonuçları tablo hâlinde sunulmuştur. Oluşturulan bu tabloda; parçanın üretim sırası, üretim tarih ve saati, ilgili parça için hesaplanan hibrit skor (UWT + RMS değeri) ve kesici takımın durumu ("iyi" veya "hatalı") bilgileri yer almaktadır. Bu bilgiler sayesinde takımın zaman içerisindeki aşınma süreci takip edilebilir hâle gelmiştir.

Bu yapı ile hem kestirimci bakım için operatörlere erken uyarı sağlanmış, hem de kesici takımın bileme işlemine alınması için doğru zamanlama belirlenebilmiştir. Ayrıca, arayüzde yer alan gösterge sayesinde sistem gerçek zamanlı olarak kesici takım durumunu göstermektedir. Kesici takımın aşırı aşındığı veya kırıldığı durumlarda gösterge kırmızı renkte, normal çalışmada ise yeşil renkte yanarak kullanıcıya anlık bilgi sunmaktadır.



Şekil 4.14: Üretim sayacı ve kesici takım durumu göstergesi arayüzü.

Takım durumu sınıflandırması, hibrit skor değerine dayalı olarak yapılmıştır. Hibrit skor, UWT yöntemiyle ayrıştırılan detay katsayılarının RMS (Root Mean Square) değeriyle birleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Elde edilen bu skorlar, zaman serisi içerisinde kritik bir eşik değere göre değerlendirilmiştir.

Eşik Değer Belirleme: Yapılan saha gözlemleri, operatör deneyimleri ve veri analizleri sonucunda 0.8 değeri, kritik eşik seviyesi olarak belirlenmiştir. Bu değer, kesici takımın "çok aşınmış" veya "kırılma eşiğinde" olduğu durumu temsil etmektedir. Belirlenen bu eşik değer üzerinde ardışık olarak 2 ila 3 parça tespit edildiğinde, takımın değiştirilmesi önerilmektedir. Bu değer, hem yanlış alarm oranını azaltmakta hem de sistemin müdahale zamanını optimize etmektedir.

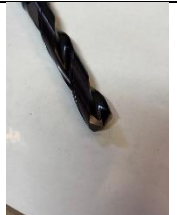
Takım Durumu Sınıflandırması: Parça verileri, hibrit skor değerlerine göre dört farklı kategoriye ayrılmıştır:

- 0.4: Az Aşınmış → Takım durumu iyi.
- 0.4 – 0.6: Orta Aşınmış → İzlenmeli, aşınma ilerliyor.
- 0.6 – 0.8: Çok Aşınmış → Kırılmaya yaklaşan durum, bakım önerilir.
- 0.8 ve üzeri: Kırık veya Kritik Aşınma → Takım değiştirilmeli.

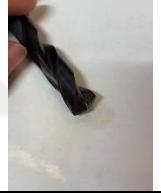
Bu sınıflandırma sayesinde her bir parçanın işlenme sürecinde kesici takımın hangi aşamada olduğu net şekilde takip edilmiş ve aşınma-kırılma süreçleri sistematik biçimde analiz edilmiştir.

Çizelge 4.2’de bir kesici takımın işlediği parçaların durumunu gösteren bir tablo yer almaktadır.

Çizelge 4.2: Üretim sayacı ve kesici takım durumu göstergesi arayüzü.

İşlenen parçanın numarası	Kesici Takım Durumu	RMS Eşik Değeri(g)	Parça İşleme Durumu	CNC Tezgâh Uyarı Sinyali(OK- Tezgâh çalışıyor NOK- Tezgâh durma sinyali)	Takım Görseli
1 . Parça	Az Aşınmış	0,3	Uygun	OK	

Çizelge 4.2(devamı): Üretim sayacı ve kesici takım durumu göstergesi arayüzü.

İşlenen parçanın numarası	Kesici Takım Durumu	RMS Eşik Değeri(g)	Parça İşleme Durumu	CNC Tezgâh Uyarı Sinyali(OK- Tezgâh çalışıyor NOK- Tezgâh durma sinyali)	Takım Görseli
50 . Parça	Az Aşınmış	0,4	Uygun	OK	--
120 . Parça	Orta Aşınmış	0,6	Uygun	OK	--
180 . Parça	Orta Aşınmış	0,6	Uygun	OK	
240. Parça	Çok Aşınmış	0,8	Uygun Değil	NOK	
290 . Parça	Kırık veya Kritik Aşınma	0,8	Uygun Değil	NOK	---

Geliştirilen bu arayüz, sadece üretim sürecini izlemekle kalmayıp, kesici takımın aşınma/kırılma durumlarını gerçek zamanlı olarak analiz eden ve kullanıcıya anlık uyarı verebilen bir yapıya sahiptir. Böylece, takım kırılmadan önce müdahale edilebilmekte, plansız duruş süreleri azaltılmakta ve üretim sürekliliği sağlanmaktadır. Ayrıca, arayüzün farklı parça türlerine göre eşik değeri belirleyebilme, üretim sayımı yapabilme ve her parçanın hibrit skoruna göre sınıflandırma yapabilme gibi özellikleri sayesinde, kullanıcılar farklı üretim koşullarında sistemi kolayca adapte edebilmektedir.

Bu sayede:

- Bakım maliyetleri azalmakta,
- Takım ömrü uzatılmakta,
- Operatör bağımlılığı azaltılmakta,
- Hatalı üretim riski düşürülmekte ve
- Endüstri 4.0 hedefleri doğrultusunda dijital üretim takibi mümkün hâle gelmektedir.

Tüm bu unsurlar, sistemin endüstriyel sahada uygulanabilirliğini ve sürdürülebilirliğini güçlendirmekte, üretim hattında kalite ve verimliliğin artırılmasına somut katkılar sunmaktadır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, kesici takım aşınması ve kırılması durumlarının tespitine yönelik olarak gerçekleştirilen veri analizleri ve uygulanan yöntemler detaylandırılmıştır. Deneysel veriler üzerinden yapılan sayısal analizler, hem geleneksel hem de zaman-frekans tabanlı hibrit yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, sinyal işleme temelli yöntemlerle takım sağlığına ilişkin kestirimci yorumlar yapılmış ve sistemin performansı artırılmıştır.

5.1 Gerçek Zamanlı Analizler

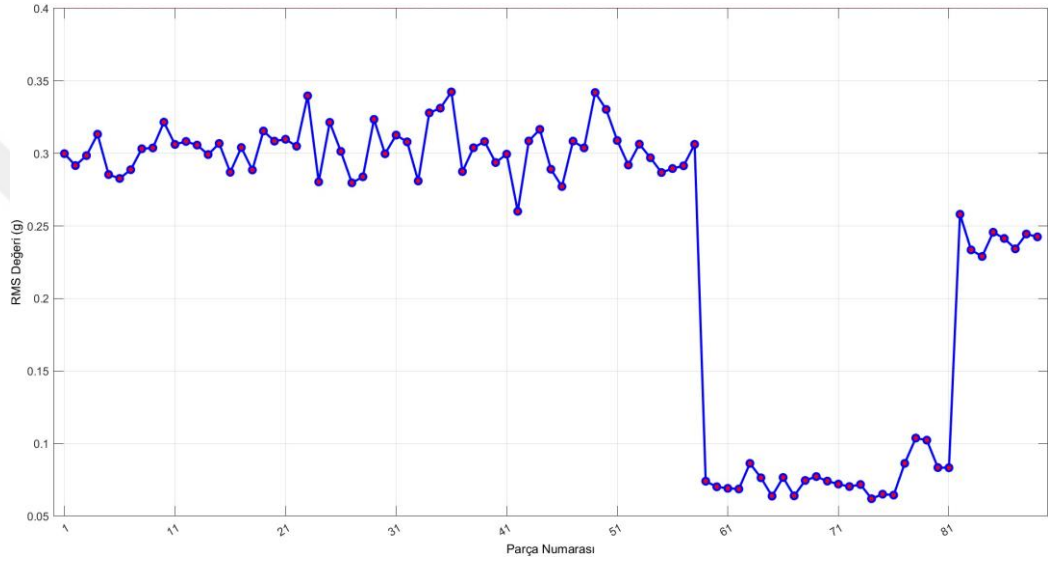
Kesici takımın işleme sırasında maruz kaldığı titreşim sinyalleri, gerçek zamanlı olarak analiz edilerek anlık durumu belirlemek amacıyla çeşitli yöntemlerle değerlendirilmiştir. Bu analizlerde, RMS gibi temel istatistiksel yaklaşımlara ek olarak UWT, CWT ve DWT gibi dalgacık dönüşüm tabanlı yöntemler ile zamansal ve frekansal içerik bir arada incelenmiştir. Böylece takımın aşınma ya da kırılma durumu süreç boyunca anlık olarak izlenmiş ve olası anormallikler erkenden tespit edilmiştir.

5.1.1 RMS Değer Analizi

Gerçek zamanlı analiz kapsamında, her bir işlenmiş parçaya ait titreşim verileri RMS yöntemiyle değerlendirilmiştir. “.wav” formatındaki ses dosyaları, isimlerinde yer alan tarih ve saat bilgilerine göre sıralanarak analiz için kronolojik düzene getirilmiştir. Bu dosyaların her biri için toplam RMS değeri hesaplanmış ve zaman eksenine göre görselleştirilmiştir.

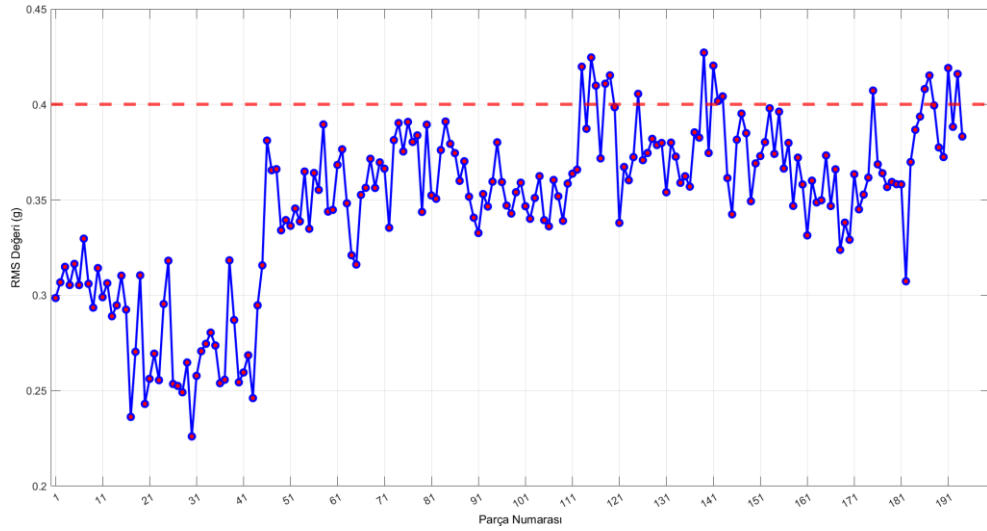
Analiz sonuçları, takımın kırılma anının ve sonrası sürecin açık bir şekilde tespit edilebildiğini göstermektedir. Özellikle belirli bir parça numarasından sonra RMS değerlerinde ani bir düşüş gözlenmiş, bu da takımın kırıldığını işaret etmiştir. Takım sağlıklı çalışırken RMS seviyeleri kararlı bir seyir izlerken, kırılma anında değerin aniden düşmesi sistemin bu olayı doğru şekilde algılayabildiğini kanıtlamaktadır.

Geleneksel olarak, operatörler takım kırılmalarını çoğunlukla görsel kontrolle fark etmektedir. Bu da geç müdahalelere ve hatalı üretimin devamına neden olabilmektedir. Oysa RMS tabanlı bu sistem sayesinde, kırılma durumunda anlık uyarı verilerek süreç hızlıca durdurulabilir ve üretim güvenliği artırılmış olur. Şekil 5.1’de RMS değeri hesaplanarak yapılan analiz gösterilmiştir. Burada 58. parçaya kadar kesici takım normal çalışmış ancak bu noktada ani kırılma yaşanmıştır. RMS değerlerin açık bir şekilde düştüğü görülmektedir. 81. parçadan sonra yeni bir matkap ucu takılarak tezgâh çalışmasına devam edilmiştir.



Şekil 5.1: Matkap kırılma anının RMS yöntemi ile tespiti.

Ancak RMS yöntemi yalnızca kırılma sonrası belirgin değişimi yakalayabilmektedir. Bu nedenle, kırılma öncesi aşınma durumunu erken tespit etmekte yetersiz kalabilir. Bu durum hatalı parçaların önüne geçse de, takım kırılmalarını önlemek için daha gelişmiş, sürekli izleme yapabilen yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 5.2’de takım aşınması tespiti için kullanılan RMS yönteminin grafiği yer almaktadır. Alınan bu sonuca göre sağlıklı bir eşik seviyesi belirlenemediği açıkça görülmektedir.



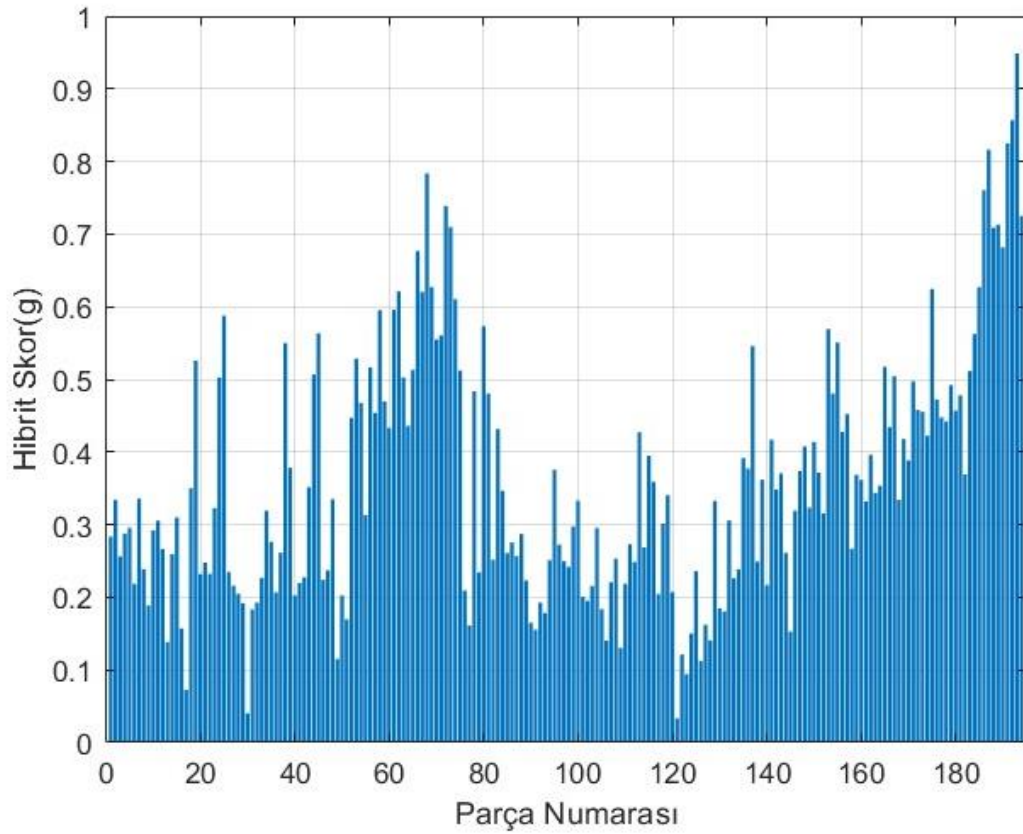
Şekil 5.2: Takım aşınma seviyesi RMS uygulaması analizi.

5.1.2 Önerilen UWT ve RMS Hibrit Yöntemi

Bu çalışmada, UWT yöntemi ile RMS değerleri birleştirilerek hibrit bir analiz yöntemi geliştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 2 seviyeli analiz, aşınmanın ilerleyişini en net ve kararlı şekilde yansıtan sonuçları vermiştir.

1 seviyeli analiz, aşınma sinyallerini yeterince ayırt edememiş; 3 ve 4 seviyeli analizlerde ise aşırı ayrıştırma nedeniyle sinyalde dalgalanmalar artmış ve yorumlama güçleşmiştir. Bu da bilgi fazlalığının karar verme sürecinde belirsizlik yaratabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, sistemin kararlılığı açısından 2 seviyeli UWT + RMS yöntemi en uygun seviye olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.3'te, UWT 1. seviye detay katsayısı kullanılarak elde edilen UWT+RMS hibrit skorlarının değişimi gösterilmektedir. Grafikte parçalar ilerledikçe bazı dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bu dalgalanmalar yorumlama açısından belirsizlik oluşturmuştur. Özellikle parçaların üretim sırasındaki hibrit skor değerlerinin net bir artış trendi sergilememesi, bu seviyedeki detay katsayısının sistemin aşınma tespit performansı açısından yetersiz kaldığını göstermektedir.

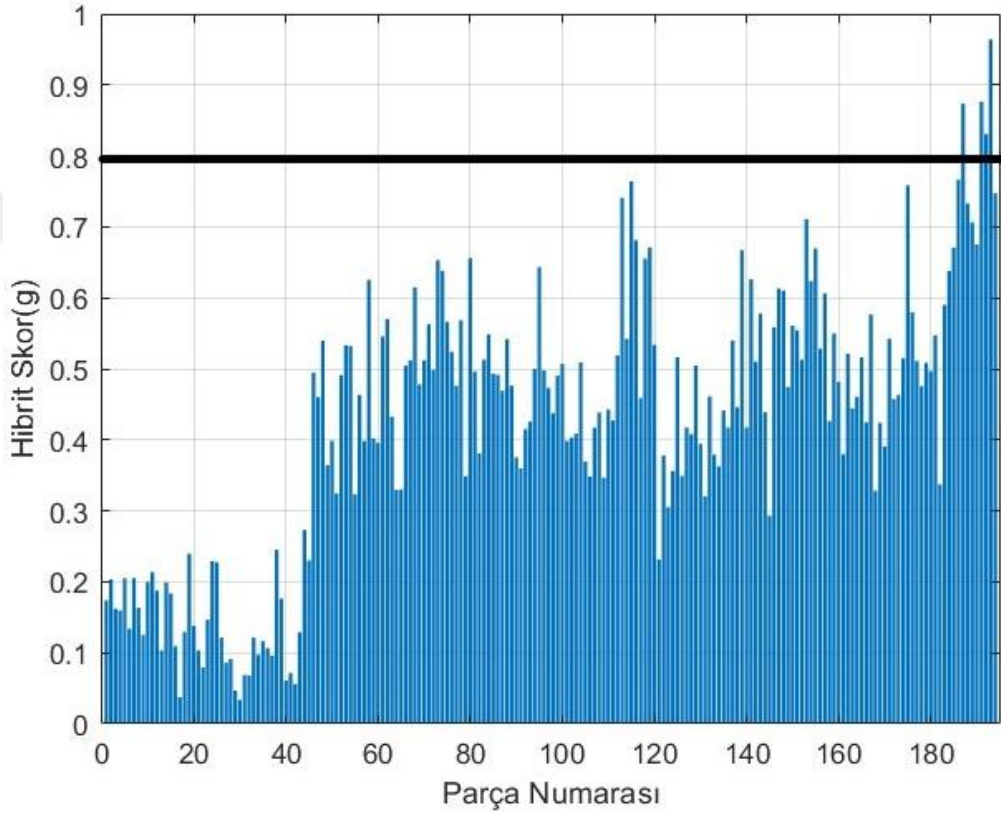


Şekil 5.3: UWT 1. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.

Şekil 5.4'te ise UWT 2. seviye detay katsayısı ile elde edilen hibrit skor grafiği sunulmuştur. Bu grafik, sistemin beklenen davranışını en iyi şekilde yansıtan sonuçlardan biri olmuştur. Özellikle 180. parçadan sonra hibrit skorların belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu artış eğilimi, kesici takımında aşınmanın kritik seviyeye ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Grafik üzerinde tanımlanan eşik değeri (0.8) ile birlikte, bu seviye aşıldığında sistemin planlı bakım sürecine geçmesini sağlayacak güvenilir bir referans elde edilmiştir. 45 parçalık üretim sonrası hibrit skor değerlerinde yükseliş başlamış ve bu artış takım aşınması ile ilişkilendirilmiştir. Üretim ilerledikçe, skor değerleri belirgin şekilde artmış ve 180. parça sonrasında kritik aşınma seviyesine ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Kritik eşik değeri 0.8 olarak tanımlanmıştır. Bu eşik değeri, sistemin eğitim aşamasında toplanan veriler ve hibrit skorların normalizasyon sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerde, 0.8 üzerinde hibrit skor değerine sahip parçaların büyük çoğunluğunda kesici takımında belirgin aşınma veya kırılma bulguları gözlemlenmiştir. Ayrıca bu sınır, yanlış alarm oranını düşük tutarken

doğru tespit oranını yüksek seviyede koruyacak şekilde optimize edilmiştir. Dolayısıyla 0.8 değeri, sistemin güvenilirliği ile sahadaki gözlemler arasındaki dengeyi sağlayan en uygun eşik olarak seçilmiştir ve bu seviyeye ulaşan parçalar tespit edildiğinde planlı bakım sürecine geçilmiştir. Böylece, takım kırılmadan önce müdahale edilerek takımın bileme işlemine alınması ve yeniden kullanılması sağlanmıştır. Bu yöntemle hem takım ömrü uzatılmış hem de üretim sürekliliği sağlanarak bakım maliyetleri azaltılmıştır.



Şekil 5.4: UWT 2. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.

Eşik değeri olarak belirlenen 0.8 g ivme seviyesi, çalışmadaki deneysel ve ampirik incelemeler ve saha operatörlerinin gözlemleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu değer, kesici takımın aşınma sürecine girdiği ve kırılma öncesi yüksek düzeyde titreşim üretmeye başladığı kritik eşik olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kesici takımın aşınma ve kırılma durumlarının doğru şekilde izlenebilmesi amacıyla, takımın çalıştığı koşullara ilişkin tüm kesme parametreleri sabit tutulmuştur. Kullanılan CNC takım tezgâhı üzerinde yapılan işlemlerde;

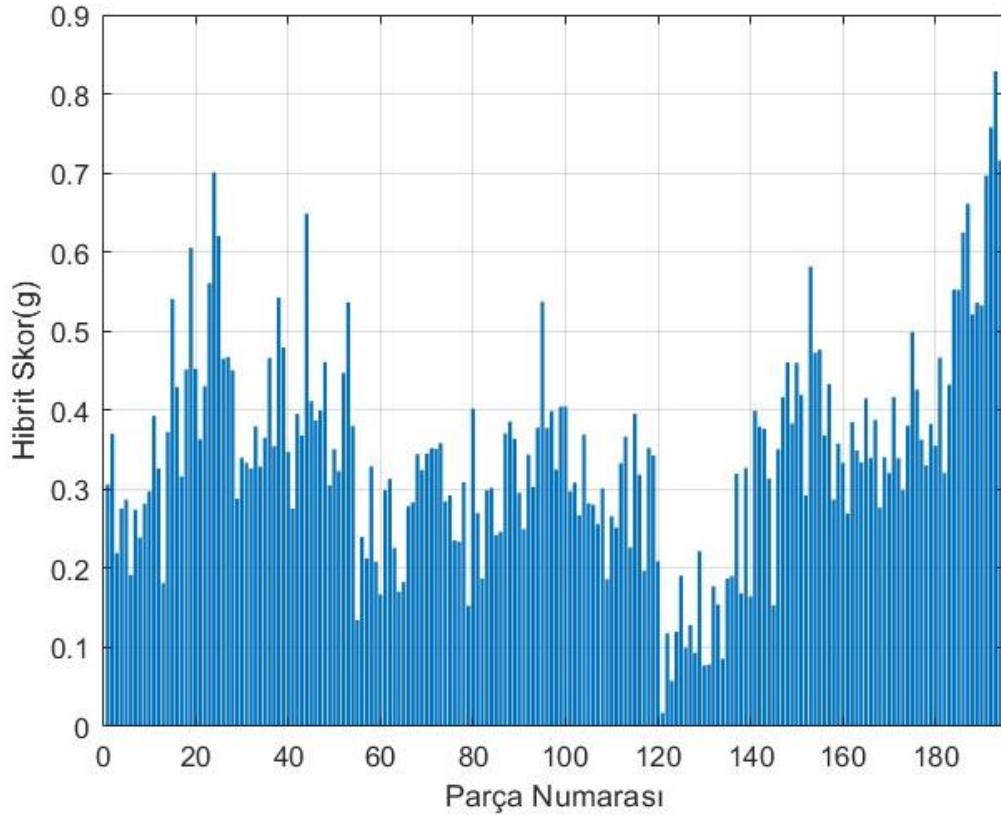
- İş parçası olarak paslanmaz çelik malzeme tercih edilmiş,
- Matkap çapı Q8.1 mm, matkap boyu ise 38 mm olarak belirlenmiştir.

- CNC tezgâh devir hızı 1600 rpm,
- İlerleme hızı %6 oranında sabitlenmiş,
- Kesici takımın işleme süresi ise her parça için yaklaşık 40 saniye olarak gerçekleşmiştir.

Bu parametreler, 4. Bölüm'deki Çizelge 4.1'de ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Özellikle eşik değer (0.8) gibi kritik analiz kriterleri, bu sabit parametreler altında elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Çünkü devir hızı, kesme derinliği, ilerleme hızı ve malzeme türü gibi faktörler, titreşim sinyallerini ve dolayısıyla elde edilen analiz sonuçlarını doğrudan etkileyebilmektedir.

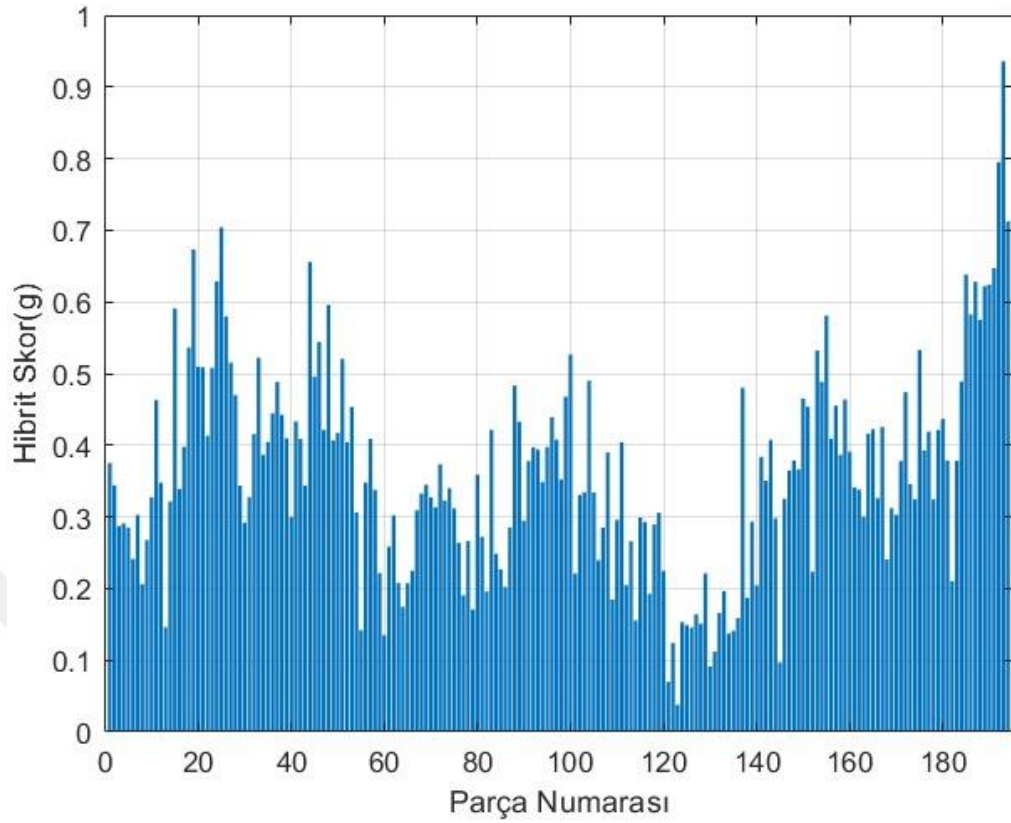
Bu nedenle, analizlerin güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini sağlamak için, tüm veri toplama süreci boyunca bu kesme parametreleri sabit tutulmuştur.

Şekil 5.5'te sunulan UWT 3. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları ise yine yorumlama açısından bazı zorluklar barındırmaktadır. Skor değerleri arasında tutarsız dalgalanmalar oluşmuş ve sonlara doğru net bir yükseliş eğilimi oluşmamıştır. Bu nedenle, bu seviyedeki detay katsayısı da sistemin aşınma tespit kabiliyeti açısından yetersiz bulunmuş ve önerilen seviyeler arasında yer almamıştır.



Şekil 5.5: UWT 3. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.

Şekil 5.6’da yer alan UWT 4. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skor grafiği ise 3. seviyeye kıyasla daha tutarlı bir sonuç vermiştir. Ancak genel olarak 2. seviyeye göre daha fazla dalgalanma içermesi ve aşınma eğiliminin net olarak ayırt edilememesi nedeniyle, sistemin güvenilirliği açısından ikinci seviye detay katsayısı en uygun seviye olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.6: UWT 4. seviye detay katsayılı UWT+RMS hibrit skorları.

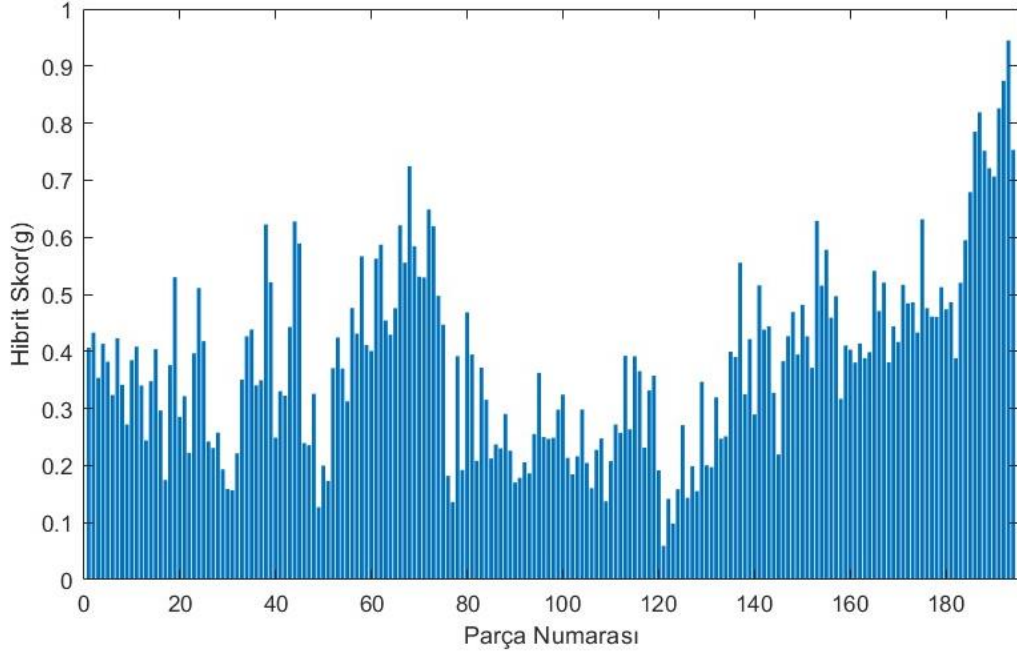
5.1.3 CWT+RMS Hibrit Yöntemi

CWT yöntemi ile RMS değerlerinin birleşimi, sinyalin zaman-frekans çözünürlüğünü artırarak takım durumunu analiz etme imkânı sunmuştur. Ancak elde edilen sonuçlar, UWT + RMS yöntemine kıyasla daha az kararlı ve net olmuştur. Buna rağmen UWT + RMS yöntemine en yakın ve anlamlı sonuçları CWT + RMS yöntemi sağlamıştır.

Şekil 5.7’de, CWT + RMS yönteminin uygulandığı analiz sonuçları sunulmuştur. Bu yöntemle elde edilen hibrit skorlar, genel eğilim bakımından UWT+RMS yöntemine oldukça yakın ve anlamlı bir dağılım göstermiştir. Özellikle analiz edilen parçaların üretim sürecinin başlarında belirli seviyede dalgalanmalar gözlemlenmiş olsa da, parçalar ilerledikçe –özellikle 180. parçadan sonra– hibrit skorların istikrarlı bir şekilde yükseldiği tespit edilmiştir.

Bu yükseliş eğilimi, kesici takımda ilerleyen aşınmayı başarılı biçimde yansıtmakta; dolayısıyla CWT+RMS yöntemi, takım durumunun izlenmesi ve kritik noktaların tespiti açısından güvenilir bir alternatif olarak

değerlendirilmektedir. Elde edilen bu sonuç, sürekli dalgacık dönüşümünün zaman-frekans çözünürlüğü açısından sağladığı avantaj sayesinde, titreşim sinyallerindeki ince değişimlerin daha belirgin hale getirilebildiğini göstermektedir.



Şekil 5.7: CWT+RMS hibrit yöntemi analiz sonucu.

5.1.4 DWT+RMS Hibrit Yöntemi

Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT), çok seviyeli sinyal ayrıştırımlarında her bir seviyede sinyal boyutunu yarıya indirerek çalışmaktadır. Bu işlem, örneğin 1024 örnek uzunluğunda bir sinyalde DWT uygulandığında, birinci seviyede 512, ikinci seviyede 256, üçüncü seviyede ise 128 örnek uzunluğunda detay katsayıları üretmektedir. Yani sinyalin her seviyede boyu değişmekte, zaman çözünürlüğü azalırken frekans çözünürlüğü artmaktadır.

Bu durum, özellikle RMS gibi sabit uzunlukta sinyaller üzerinden hesaplanan skaler özniteliklerle birlikte kullanılmak istendiğinde önemli bir problem ortaya çıkarmaktadır. Çünkü RMS, sabit uzunluktaki bir sinyali tek bir skalar değere indirgerken; DWT, her seviye için farklı boyutlarda çoklu katsayılar üretmektedir. Bu da seviyeler arası doğrudan karşılaştırma, normalizasyon veya eşik değer belirleme işlemlerinde boyut uyumsuzluklarına neden olmaktadır. Örneğin elimizde 1024 örnek uzunluğunda bir titreşim sinyali varken, bu sinyal için RMS doğrudan tek bir skalar değer olarak hesaplanabilir. Ancak aynı sinyale DWT

uygulandığında, 3. seviye detay katsayılarının uzunluğu yalnızca 128 olacaktır. Bu durumda, 1024 örneklilik sinyale ait tek bir RMS değeri ile 128 örnekli bir detay katsayısı arasında doğrudan matematiksel bir ilişki kurmak mümkün değildir. Bu, özellikle normalizasyon gibi tüm seviyelere aynı ölçeklemeyi uygulamak gerektiğinde ciddi bir uyumsuzluk yaratmaktadır.

Bu nedenle, tez kapsamında yapılan analizlerde DWT ile RMS normalizasyonunun birlikte kullanılmasının teknik olarak tutarsız sonuçlara yol açtığı görülmüş ve bu kombinasyon yöntem dışı bırakılmıştır. Bunun yerine Undecimated Wavelet Transform (UWT) gibi sinyal boyutunu koruyan yaklaşımlar tercih edilmiştir.

5.1.5 Karşılaştırmalı Analiz

Yapılan analizler sonucunda, önerilen UWT + RMS tabanlı hibrit yöntemle en yakın ve anlamlı sonuçların CWT + RMS hibrit yöntemiyle elde edildiği görülmüştür. Şekil 5.7’de sunulan CWT + RMS analiz grafiği incelendiğinde, eşik değer üzerindeki skorların belirginliği dikkat çekmekte ve bu durum, yöntemin takım kırılmalarını tespit etmede güçlü bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Ancak UWT yöntemi, ani sinyal değişimlerini daha kararlı biçimde analiz ederek gürültü etkilerini en aza indirmekte ve daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. CWT yöntemi ise sürekli dönüşüm yapması nedeniyle işlem yükünü artırmakta, bu da büyük veri setleriyle çalışırken analiz süresini uzatmakta ve daha fazla işlem yüküne neden olmaktadır. Bu durum, özellikle gerçek zamanlı izleme sistemlerinde verimliliği olumsuz etkileyebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan üç yöntem UWT + RMS hibrit yöntemi, CWT + RMS hibrit yöntemi ve klasik RMS analizi, Çizelge 5.1’de kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, %95 gibi yüksek bir doğruluk oranına sahip olan UWT + RMS hibrit yöntemi, düşük işlem yüküyle birlikte en etkin ve sürdürülebilir çözüm olarak öne çıkmıştır. CWT + RMS hibrit yöntemi ise yüksek doğruluğa rağmen yüksek işlem yükü nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda bazı sınırlamalar barındırmaktadır. Geleneksel RMS yöntemi basit uygulanabilirliğine karşın, hata tespitinde gecikmelere neden olabilmekte ve doğruluk oranı daha düşük kalmaktadır.

Sonuç olarak, kesici takım durumunun izlenmesi ve kırılma öncesi etkin tespitler için UWT + RMS hibrit yöntemi; hem endüstriyel uygulamalar hem de üretim süreçlerinin sürekliliği açısından en uygun yaklaşım olarak önerilmektedir.

Çizelge 5.1: Tez çalışmasında gerçekleştirilen yöntemlerin performanslarının karşılaştırılması.

Yöntem	Gerçek Zamanlı Uygunluk	Hatalı Parça Üretimi Önleme	Endüstriyel Uygulanabilirlik	Maliyet	Sürdürülebilirlik
Önerilen Yöntem (UWT+RMS)	Yüksek	Etkili	Kolay	Orta	Yüksek
CWT + RMS	Düşük	Etkili	Orta	Yüksek	Orta
Geleneksel RMS Ölçümü	Yüksek	Kısmen Etkili	Kolay	Düşük	Orta

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, CNC takım tezgâhlarında kullanılan matkap uçlarının aşınma ve kırılma durumlarının erken tespiti amacıyla, titreşim verilerine dayalı, hibrit bir analiz yaklaşımı geliştirilmiştir.

Bu amaçla, Undecimated Wavelet Transform (UWT) yöntemiyle elde edilen çok seviyeli sinyal detay katsayıları üzerinden Root Mean Square (RMS) öznitelikleri hesaplanarak hibrit bir skor oluşturulmuştur. Bu hibrit yöntem sayesinde, sinyalin hem enerji içeriği hem de zaman-frekans değişimleri hassas bir şekilde analiz edilebilmiştir. Elde edilen skor üzerinden belirlenen 0.8g eşik değeri, takımın aşınma durumuna geçtiği ve kırılma riskinin arttığı kritik noktaların doğru tespitini sağlamıştır. Böylece, kırılma gerçekleşmeden takım değişimi önerilmiş, hurda oranı azalmış, diğer takım ve ekipmanların zarar görmesi engellenmiş ve üretim sürekliliği korunmuştur.

Literatür taramalarında, UWT ve RMS yöntemlerinin birbirinden bağımsız şekilde kullanıldığı örnekler bulunmasına karşın, bu iki yöntemin birlikte hibrit yapıda kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yönüyle önerilen yaklaşım, literatüre yenilikçi bir katkı sunmakta ve takım durumu izleme sistemlerinde önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Önerilen sistem, sadece akademik değil aynı zamanda endüstriyel uygulama açısından da güçlü bir çözüm sunmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen sistem:

- Gerçek zamanlı olarak çalışmakta,
- Operatör müdahalesine gerek duymadan takım durumunu tespit edebilmekte,
- Endüstri 4.0 çerçevesinde akıllı bakım ve kestirimci üretim yönetimi uygulamalarına doğrudan entegre edilebilecek düzeyde pratiklik sunmaktadır.

Sonuç olarak bu tezde geliştirilen UWT + RMS tabanlı hibrit yöntem, düşük işlem yükü ve sistematik eşik yönetimi ile hem literatürdeki hem de uygulamadaki mevcut yöntemlerin ötesine geçmiştir. Çizelge 6.1, önerilen sistemin literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı analizini sunmakta ve çalışmanın özgünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.1: Önerilen tezin literatür ile karşılaştırılması.

<i>Referans</i>	<i>Veri Türü</i>	<i>Yöntem</i>	<i>Amaç</i>	<i>Artı / Eksi Yönler</i>
[57]	Mil Akım Sinyalleri	CNN-AD (Derin Anomali Tespiti)	Takım Kırılması Algılama	Dengesiz veri sorunu, genellenebilirlik sınırlı
[58]	Sıcaklık Sinyalleri	Derin Öğrenme	Takım Aşınması Tahmini	Gerçek zamanlı değil, karar destek yetersiz
[59]	Akım	ICSSVM (Gelişmiş SVM)	Takım Kırılması İzleme	Belirsizlik kuantifikasyonu yok, veri dengesizliği
[60]	Titreşim	SVM-RFE	Takım Aşınması/Kırılması Tanıma	Farklı kesme koşulları test edilmemiş
[10]	Titreşim + Akım + Kuvvet	ResNet-LSTM	Takım Kırılması İzleme	Sıcaklık etkisi dikkate alınmamış, üretim genellemesi eksik
[61]	Akustik Emisyon (AE)	TKEO + HHT	Takım Aşınması Tahmini	Gerçek zamanlı izleme zayıf, erken uyarı belirsiz
[62]	Eddy Akım Sensörleri	Açısal Örneklem + Mekanik Model	Takım Kırılması ve Aşınma Tanıma	Genelleme yok, veri dengesizliği
<i>Önerilen Tez</i>	<i>Titreşim</i>	<i>UWT + RMS (Hibrit)</i>	<i>Takım Aşınması ve Kırılması Tespiti</i>	<i>Gerçek zamanlı, yenilikçi yöntem, endüstriyel sahaya uyumluluk</i>

6.1 Çalışmanın Uygulama Alanı

Bu çalışmanın çıktıları, özellikle talaşlı imalat sektöründe faaliyet gösteren üretim tesisleri için yüksek öneme sahiptir. CNC tezgâhlarında kullanılan kesici takımların ani kırılmaları veya aşınmaları, hem ürün kalitesini hem de makine performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu bağlamda geliştirilen model:

- Otomotiv, savunma sanayi ve havacılık gibi hassas üretim gerektiren sektörlerde,
- Takım tezgâhları üzerine entegre edilerek kestirimci bakım sistemleri oluşturulmasında,
- Gerçek zamanlı takım izleme sistemlerinin temel yapısı olarak,
- Ar-Ge birimlerinde, yeni kesici takım tasarımlarının performans analizinde

etkin şekilde kullanılabilir.

Modelin donanımsal olarak CNC tezgâhlara gömülü sensör sistemleriyle desteklenmesi halinde, üretim süreçlerinin otonom hale gelmesine büyük katkı sağlayacaktır.

6.2 Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada elde edilen başarılı sonuçlar, daha ileri araştırmalar için sağlam bir temel sunmaktadır. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar için bazı öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Farklı sensör verilerinin entegrasyonu: Titreşim verilerine ek olarak, akım, ses, sıcaklık gibi diğer fiziksel parametrelerin de dahil edilmesi ile modelin doğruluğu artırılabilir.
- Eşik değerlerin otomatik belirlenmesi: Eşik değerler, hem literatürde daha önce önerilen pratik sınırlar hem de saha gözlemleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Özellikle RMS değerlerinin zamanla artış eğilimi, operatör gözlemleriyle paralel bir şekilde analiz edilmiş ve 0.8 g değeri, takımın aşınmadan kırılmaya geçiş yaptığı kritik noktayı temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Bu eşik, kırılma öncesinde belirgin titreşim artışlarının gözlemlendiği değer olarak seçilmiştir. Ancak bu değer, deneysel ve gözlemlere dayalı olarak belirlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, daha dinamik ve uyarlanabilir bir sistem kurmak amacıyla Genetik algoritmalar, Parçacık sürü optimizasyonu, Grid search, Bayesian optimizasyon gibi optimizasyon teknikleri kullanılarak eşik değerlerinin otomatik olarak belirlenmesi mümkün olabilir. Böyle bir yaklaşım, farklı takım tipleri, malzeme türleri veya kesme parametreleri

altında sistemin performansını daha da iyileştirebilir ve geliştirilebilirlik kabiliyetini artırabilir.

- Gerçek zamanlı sistem geliştirme: Bu tezde geliştirilen algoritmaların gömülü sistemler üzerinde çalışacak şekilde optimize edilerek, gerçek zamanlı çalışan prototip bir izleme sistemi tasarlanabilir.
- Farklı kesici takım tiplerinin analizi: Bu çalışmada matkap uçları temel alınmıştır. Gelecekte freze, torna ve diğer kesici takımlar için benzer analizler yapılabilir.
- Derin öğrenme uygulamaları: Özellikle büyük veri setleriyle çalışıldığında, derin öğrenme algoritmalarının uygulanması ile daha yüksek doğruluklar elde edilebilir.
- Uzun vadeli kestirimci bakım: Model, sadece mevcut durum tespitiyle sınırlı kalmayıp, ileride meydana gelebilecek kırılmalar için zaman tahmini (remaining useful life) yapacak şekilde geliştirilebilir.

Bu öneriler doğrultusunda ilerlenerek, takım izleme sistemleri daha bütüncül, akıllı ve otonom hale getirilebilir. Böylece, üretim süreçlerinde kalite artışı ve bakım maliyetlerinde düşüş sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Wszolek, G., Czop P., Sloniewski J., Dođruřoz H.**, “Vibration monitoring of CNC machinery using MEMS sensors”, *Journal of Vibroengineering* 22 (3), 735-750, 2019.
- [2] **Myress A.**, “Active vibration control for a CNC milling machine, proceedings of the institution of mechanical engineers”, *Journal of Mechanical Engineering Science* 228(2), 230-245, 2013.
- [3] **M.S.H. Bhuiyan, I.A. Choudhury, M. Dahari, Y. Nukman, S.Z. Dawal**, Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring, *Measurement* 92 (2016) 208–217. X. Li et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 176 (2022) 103882.
- [4] **Yi, J., Tan, H., Yan, J., Chen, X. (2024).** Adaptive rotating machinery fault diagnosis method using MKIST, *Measurement Science and Technology*, 35(4), 045010.
- [5] **Liu, X., Wu, H., Zhao, S., Yang, X. (2024).** Experimental analysis of rotating bridge structural responses to existing railway train loads via time–frequency and Hilbert–Huang transform energy spectral analysis, *Scientific Reports*, 14(1), 8385.
- [6] **Li, X., et al. (2022).**Systematic review on tool breakage monitoring techniques in machining operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 176, 103882.
- [7] **Liu, S.-H., Luo, B.-C., Kao, Y.-C., Feng, G.-H. (2024).** Study on the combination of virtual machine tools and wearable vibration devices for operators experiencing cutting forces in the milling process, *Scientific Reports*, 14(1), 8843.
- [8] **Ragai, I., Abdalla, A. S., Abdeltawab, H., Qian, F., Ma, J. (2022).**Toward smart manufacturing: Analysis and classification of cutting parameters and energy consumption patterns in turning processes, *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 626–635.
- [9] **Cui, K., Liu, M., Meng, Y. (2024).** A new fault diagnosis of rolling bearing on FFT image coding and L-CNN, *Measurement Science and Technology*, 35(7), 076108.
- [10] **Wang, K., Wang, A., Wu, L., Xie, G. (2024).** Machine Tool Wear Prediction Technology Based on Multi-Sensor Information Fusion, *Sensors*, 24, 2652. <https://doi.org/10.3390/s24082652>
- [11] **Rizal, M.; Ghani, J.A.; Nuawi, M.Z.; Haron, C.H.** Cutting tool wear classification and detection using multi-sensor signals and Mahalanobis-Taguchi System. *Wear* 2017, 376, 1759–1765.

- [12] Ghani, J.A.; Rizal, M.; Nuawi, M.Z.; Ghazali, M.J.; Haron, C.H. Monitoring online cutting tool wear using low-cost technique and user-friendly GUI. *Wear* 2011, 271, 2619–2624.
- [13] Duro, J.A.; Padget, J.A.; Bowen, C.R.; Kim, H.A.; Nassehi, A. Multi-sensor data fusion framework for CNC machining monitoring. *Mech. Syst. Signal. Process.* 2016, 66, 505–520.
- [14] Golilarz, NA, Demirel, H. (2017, Eylül). Yumuşak eşikleme tekniği ile azaltılmamış dalgacık dönüşümü (UWT) kullanılarak görüntü gürültü giderme. 2017 9. Uluslararası Hesaplamalı Zeka ve İletişim Ağları Konferansı (CICN) (s. 16-19). IEEE.
- [15] Yılmaz, A. Bayrak, G. (2019). PV tabanlı mikro şebekeler için gerçek zamanlı UWT tabanlı akıllı arıza tespit yöntemi. *Elektrik Güç Sistemleri Araştırması* , 177 , 105984.
- [16] Arash Ebrahimi Araghizad, machine learning-based modeling and monitoring of machining processes and tool wear, *Sabancı University* July 2024.
- [17] Mustafa Kuntoğlu, Tornalamada Akustik Emisyon ve Kesme Kuvveti Sinyalleri Kullanarak Takım Kırılması ve İlerleyen Takım Aşınmasının Tahmin Edilmesi, *Yüksek Lisan Tezi, Selçuk Üniversitesi Haziran 2016*.
- [18] G. Wang, Y. Yang, Z. Li, Force sensor-based tool condition monitoring using a heterogeneous ensemble learning model, *Sensors* 14 (2014) 21588–21602.
- [19] C.H. Jun, S.H. Suh, Statistical tool breakage detection schemes based on vibration signals in NC milling, *Int. J. Mach. Tool Manufact.* 39 (1999) 1733–1746.
- [20] Z. Lei, Q. Zhu, Y. Zhou, B. Sun, W. Sun, X. Pan, A GAPSO-enhanced extreme learning machine method for tool wear estimation in milling processes based on vibration signals, *Int. J. Precision Eng. Manuf. Green Technol.* 8 (2021) 745–759.
- [21] Y. Fu, Y. Zhang, H. Gao, T. Mao, H. Zhou, R. Sun, D. Li, Automatic feature constructing from vibration signals for machining state monitoring, *J. Intell. Manuf.* 30 (2019) 995–1008.
- [22] Q. Ren, M. Balazinski, L. Baron, K. Jemielniak, R. Botez, S. Achiche, Type-2 fuzzy tool condition monitoring system based on acoustic emission in micromilling, *Inf. Sci.* 255 (2014) 121–134.
- [23] Q. Ren, L. Baron, M. Balazinski, R. Botez, P. Bigras, Tool wear assessment based on type-2 fuzzy uncertainty estimation on acoustic emission, *Appl. Soft Comput.* 31 (2015) 14–24.
- [24] A. Kothuru, S.P. Nooka, R. Liu, Application of audible sound signals for tool wear monitoring using machine learning techniques in end milling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 95 (2017) 3797–3808.
- [25] X. Li, Detection of tool flute breakage in end milling using feed-motor current signatures, *IEEE ASME Trans. Mechatron.* 6 (2001) 491–498.

- [26] **Y. Zhou, W. Sun**, Tool wear condition monitoring in milling process based on current sensors, *IEEE Access* 8 (2020) 95491–95502.
- [27] **Bai, Lele, et al.** "Real-time tool breakage monitoring based on dimensionless indicators under time-varying cutting conditions." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 81 (2023): 102502.
- [28] **G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Konig**, " R. Teti, Tool condition monitoring (TCM)—the status of research and industrial application, *CIRP Ann.* 44 (1995) 541–567.
- [29] **R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld**, Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Ann.* 59 (2010) 717–739.
- [30] **J.V. Abellan-Nebot, F.R. Subiron**, " A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 47 (2010) 237–257.
- [31] **A.G. Rehorn, J. Jiang, P.E. Orban**, State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 26 (2005) 693–710
- [32] **E. Jantunen**, A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling, *Int. J. Mach. Tool Manufact.* 42 (2002) 997–1010.
- [33] **A. Siddhpura, R. Paurobally**, A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 65 (2013) 371–393.
- [34] **Y. Zhou, W. Xue**, Review of tool condition monitoring methods in milling processes, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 96 (2018) 2509–2523.
- [35] **B. Sick**, On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research, *Mech. Syst. Signal Process.* 16 (2002) 487–546.
- [36] **K. Zhu, Y.S. Wong, G.S. Hong**, Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: a review and some new results, *Int. J. Mach. Tool Manufact.* 49 (2009) 537–553.
- [37] **R. Zhao, R. Yan, Z. Chen, K. Mao, P. Wang, R.X. Gao**, Deep learning and its applications to machine health monitoring, *Mech. Syst. Signal Process.* 115 (2019) 213–237.
- [38] **G. Serin, B. Sener, A.M. Ozbayoglu, H.O. Unver**, Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 109 (2020) 953–974.
- [39] **Ferrando Chacón, J.L., et al.** (2021). A Novel Machine Learning-Based Methodology for Tool Wear Prediction Using Acoustic Emission Signals. *Sensors*, 21(17), 5984.
- [40] **Tabaszewski, M., et al.** (2022). Machine Learning Approaches for Monitoring of Tool Wear during Grey Cast-Iron Turning. *Materials*, 15(12), 4359.
- [41] **Turšič, N., & Klančnik, S.** (2024). Tool Condition Monitoring Using Machine Tool Spindle Current and Long Short-Term Memory Neural Network Model Analysis. *Sensors*, 24(8), 2490.

- [42] Zhang, Y., et al. (2023). Tool Wear Condition Monitoring Method Based on Deep Learning with Force Signals. *Sensors*, 23(10), 4595.
- [43] Ayparçası, Z. (2014). Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matriksli kompozit malzemelerin işlenebilirliği.
- [44] Sarıdemir, S., & Çakmak, S. (2016). AISI 4140 Çeliğinin İşlenmesinde Kesici Uç Geometrisinin Talaş Kırmaya Ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 4(2), 765-771.
- [45] Caron Engineering. (n.d.). Tool wear condition monitoring systems for CNC machining. *Caron Engineering*. <https://www.caroneng.com/tool-wear-condition-monitoring-systems/>
- [46] Pul, M. Şeker, U. (2014). Metal MatrisliKompozitlerinYırtılma İlerleme Oranının Kesici Takımı Aşınma Davranışlarına Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 17(3), 99-106.
- [47] Karayel, B., & Nalbant, M. (2014). Ç4140 malzemesinin tornalanmasında ilerleme, kesme hızı ve kesici takımın yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve aşınmaya etkileri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(3), 301–315.
- [48] Atakök, G. (2008). CNC tornada talaş kaldırma işlemlerinde talaş kırıcı geometrisinin işlenebilirliğe etkilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. *Marmara Üniversitesi. ProQuest Dissertations & Theses Global*.
- [49] Usta, M., Kayır, Y. (2017). GGG40 Malzemesinin CNC Torna Tezgâhında Karbür Matkaplarla Delinmesinde Sıcaklık ve Delme Kuvvetlerin Araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(Ek (Suppl.) 1), 231-238.
- [50] Tekaslan, Ö., Gezer, N., Şeker, U. (2008). CNC TORNA TEZGÂHINDA AISI 304 ÇELİKLERİN İŞLENEMESİNDE OPTİMUM YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜ SAĞLAYACAK KESME PARAMETRELERİNİN TESPİTİ. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University(016)*, 97-104.
- [51] Öztürk, H. O. (2019). Tezgâh gövdesi için mineral kompozit malzemesinin mekanik ve titreşim özelliklerinin deneysel incelenmesi (*Master's thesis, Sakarya Üniversitesi (Turkey)*).
- [52] Çaydaş, U., Hasçalık, A. (2004). CNC TEL EROZYON TEZGÂHLARINDA FARKLI MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (006), 201-214.
- [53] Bozdoğan, M. (2012). Cnc freze tezgâhında havuz işlemede takım yolu ve kesme parametrelerinin yüzey kalitesine etkilerinin incelenmesi (*Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)*).
- [54] Oruç, B. (2013). Sürekli dalgacık dönüşümü kullanılarak manyetik kaynakların yatay konumlarının ve derinliklerinin belirlenmesi. *Yerbilimleri*, 34(3), 141–168.

- [55] **Meral, T.** (2009). Veri analizinde dalgacık teorisinin etkinliği [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik Anabilim Dalı]. *YÖK Ulusal Tez Merkezi*. https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/417378/yokAcikBilim_10010888.pdf?isAllowed=y&sequence=-1
- [56] **Göllü, M., Yılmaz, A., Bayrak, G.** (2023). Analysis of cutter wear conditions in CNC machine tools with wavelet packet transform. *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2023)*, 1–5. <http://www.eleco.org.tr/ELECO2023/eleco2023-papers/74.pdf>
- [57] **Li, X., Liu, Z., & Zhang, Y.** (2020). Tool breakage detection using convolutional neural network based on spindle current signals in milling process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(3), 605–618. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01445-5>
- [58] **He, Z., Wang, Y., Zhang, Y., & Li, X.** (2021). Deep learning-based tool wear prediction using temperature signals in milling process. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.014>
- [59] **Xu, Z., Zhang, Y., & Liang, S. Y.** (2018). Incremental cost-sensitive support vector machine for tool condition monitoring. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.021>
- [60] **Yang, J., Chen, W., & Li, Y.** (2019). A support vector machine based tool condition monitoring method for high-speed turning process. *Measurement*, 131, 586–595. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.082>
- [61] **Hassan, A., Al-Ghamdi, A., & Al-Ahmari, A.** (2018). Tool wear monitoring using acoustic emission and Hilbert–Huang transform in turning process. *Measurement*, 121, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.009>
- [62] **Ritou, M., Garnier, S., Furet, B., & Hascoet, J.Y.** (2014). Tool condition monitoring in milling based on eddy current sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 965–974. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5989-6>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet GÖLLÜ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2025, Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Anabilim Dalı, Elektrik – Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- ERBAB OTOMAT / Proje Mühendisi / 2023-2024
- ERBAB OTOMAT / AR-GE Yöneticisi / 2024-

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Göllü, M., Yılmaz, A., Bayrak, G.** (2023). Analysis of cutter wear conditions in CNC machine tools with wavelet packet transform. Elektrik-Elektronik *Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2023)*, 1–5. <http://www.eleco.org.tr/ELECO2023/eleco2023-papers/74.pdf>