

Mehmet Ali GÜVENÇ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARALIK 2021



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DOKTORA
TEZİ**

**TORNALAMA SÜREÇLERİNDE
AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ,
YAPAY ZEKA UYGULAMALARI
VE NESNELERİN İNTERNETİ
UYGULAMALARI**

Mehmet Ali GÜVENÇ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ARALIK 2021





**TORNALAMA SÜREÇLERİNDE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ, YAPAY
ZEKA UYGULAMALARI VE NESNELERİN İNTERNETİ
UYGULAMALARI**

Mehmet Ali GÜVENÇ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2021

Mehmet Ali GÜVENÇ tarafından hazırlanan “TORNALAMA SÜREÇLERİNDE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ, YAPAY ZEKA UYGULAMALARI VE NESNELERİN İNTERNETİ UYGULAMALARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Selçuk MISTIKOGLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mete KALYONCU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, Necmettin Erbakan Üniversitesi,

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 15/12/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Ali GÜVENÇ

15/12/2021

TORNALAMA SÜREÇLERİNDE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ, YAPAY ZEKA
UYGULAMALARI VE NESNELERİN İNTERNETİ UYGULAMALARI
(Doktora Tezi)

Mehmet Ali GÜVENÇ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Son yıllarda sensör teknolojileri, haberleşme platformları, siber fiziksel sistemler, depolama teknolojileri ve internet uygulamalarının gelişimi ile yüksek kaliteye ve düşük maliyete sahip, rekabetçi ürünler üretebilmenin yolu açılmıştır. “Endüstri 4.0” olarak adlandırılan bu süreçte, Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zeka uygulamaları, öğrenen robotlar, siber fiziksel sistemler, büyük veri ve analizi, bulut teknolojileri, üç boyutlu yazıcılar, simülasyon-dijital ikiz teknolojilerinin üretime entegre edilmesi ile akıllı imalata geçilmiştir. Bu tez çalışmasında; akıllı imalat uygulamalarından yola çıkarak talaşlı imalatta önemli bir proses olan tornalama için yüksek kalitede ürün elde edilmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamında öncelikle, S235JR çeliği için tornalama işlemi yapılmış ve Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli ve Çoklu Lineer Regresyon Modeli kullanılarak, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım ucu sıcaklığının en iyi değerleri için kesme parametreleri tahmininde bulunulmuştur. Tahmin çalışmalarının diğer ayağında AA6013 Al alaşımının kuru tornalanması sırasında takım titreşimlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için PSO, ACO ve GA metasezgisel algoritmalar ile eğitilen ANFIS kullanılmıştır. İkinci olarak, AA6013 için yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi arasındaki ilişkiler irdelenmiştir. Kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili hızı gibi kesme parametrelerinin takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Belirlenen kesme parametreleri, takım ömrü ve en iyi ürün kalitesi için optimize edilmiştir. Üçüncü olarak, endüstriyel IoT kavramı çerçevesinde, tornalama esnasında takım üzerinden üç eksen ivme verisi toplanmış ve frekansın istenmeyen düzeylere ulaşması durumunda kullanıcıya SMS yolu ile bilgi veren bir durum izleme/görüntüleme sistemi tasarlanmıştır. Son olarak, tornalama prosesi için istenmeyen bir durum olan tırlamanın azaltılması ve giderilmesi adına kayan kipli kontrol tabanlı bir aktif titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Ti6Al4V’ın tornalanması esnasında takım üzerinden üç eksenli ivme verileri toplanmıştır. Toplanan ham verinin kontrolde kullanılabilmesi için FIR filtrelemesi, FFT analizleri ve matematiksel modele uyarlayabilmek için integrali alınmıştır. Aktif titreşim kontrolü uygulamasının ardından tırlamanın %85 oranında azaldığı görülmüştür. Aktif kontrol sonrası elde edilen grafiğin genliğinin oluşturduğu yüzey kalitesi gerçek imalat sonucundan alınan verilerle karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Endüstri 4.0, tornalama, aktif titreşim kontrolü, nesnelerin interneti (IoT), yapay zeka teknikleri, taguchi

Sayfa Adedi : 119

Danışman : Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

ACTIVE VIBRATION CONTROL, ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS
AND INTERNET OF THINGS APPLICATIONS IN TURNING PROCESSES
(Ph. D. Thesis)

Mehmet Ali GÜVENÇ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

December 2021

ABSTRACT

In recent years, with the development of sensor technologies, communication platforms, cyber-physical systems, storage technologies and internet applications, the way to produce competitive products with high quality and low cost has been opened. In this process called "Industry 4.0", smart manufacturing has been started by integrating the Internet of Things (IoT), artificial intelligence applications, learning robots, cyber-physical systems, big data and analysis, cloud technologies, three-dimensional printers, simulation-digital twin technologies into production. In this thesis study; Based on smart manufacturing practices, it is aimed to obtain high quality products for turning, which is an important process in machining. Within the scope of the thesis, firstly, turning process was performed for S235JR steel and cutting parameters were estimated for the best values of surface roughness and cutting tool tip temperature by using Artificial Neural Network (ANN) model and Multiple Linear Regression Model. In the other part of the estimation studies, ANFIS trained with PSO, ACO and GA metaheuristic algorithms was used to predict tool vibrations and surface roughness during dry turning of AA6013 Al alloy. Secondly, the relationships between surface roughness and tool vibration are investigated for AA6013. The effects of cutting parameters such as depth of cut, feed rate and spindle speed on tool vibration and surface roughness were investigated. The specified cutting parameters are optimized for tool life and best product quality. Third, within the framework of the industrial IoT concept, three axes acceleration data were collected from the tool during turning and a status monitoring/display system was designed to inform the user via SMS in case the frequency reaches undesirable levels. Finally, an active vibration control based on sliding mode control has been implemented in order to reduce and eliminate chatter, which is an undesirable situation for the turning process. In the study, three-axis acceleration data were collected from the tool during the turning of Ti6Al4V. In order to use the collected raw data in control, FIR filtering, FFT analysis and integration were taken in order to adapt it to the mathematical model. After the application of active vibration control, it was observed that chattering was reduced by 85%. The surface quality formed by the amplitude of the graph obtained after the active control was compared and verified with the data obtained from the actual production result.

Key Words : Industry 4.0, active vibration control, internet of things, artificial intelligence, taguchi
Page Number : 119
Supervisor : Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmanın yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında bana yol gösteren, her türlü bilimsel ve manevi desteğini esirgemeyen, akademik hayatımda kendimi şanslı hissettiren, çok değerli danışmanım Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU'na,

Çalışmam süresince destek olan ve tez izleme komitesinde fikirleriyle çalışmalarına destek olan sayın Prof. Dr. Ahmet YAPICI ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER'e ve tez savunma jürisinde yer alan hocalarıma,

Akademik hayatımda her zaman önemli bir yeri olan ve fikirleriyle yolumu aydınlatan sayın Prof. Dr. Mete KALYONCU ve sayın Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI'ya,

Yaptığım araştırmalar ve tez çalışmalarım boyunca sorularıma cevap alabildiğim, fikir alışverişinde bulunduğum sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ'e, sayın Öğr. Gör. Mustafa ÇAKIR'a, değerli mesai arkadaşlarıma, meslektaşlarıma ve dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim,

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesine, Makine Mühendisliği Bölümüne ve mesai arkadaşlarıma,

Akademik ve iş hayatıma giriş yaptığım Aydınlar Yedek Parça A.Ş. ailesi ve Aydınlar Yedek Parça A.Ş. Ar-Ge merkezine,

Hayatım boyunca her türlü desteğiyle yanımda olan, bana doğru yolu gösteren, bu günlere gelmemde en büyük katkıyı sağlayan, haklarını asla ödeyemeyeceğim, başta canım babam Musa ve annem Fadimeana GÜVENÇ'e, değerlilerim, canım kardeşlerim Şule, Sümeyye ve Murat'a,

Hayatımın her alanında olduğu gibi tez çalışmamı hazırlarken de her aşamada bana destek olan, bana inandığını sonuna kadar hissettiren, her zaman iyi ki var dediğim sevgili eşim Melisa GÜVENÇ'e,

En derin teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	8
2.1. Tornalamada Kesme Parametreleri Tahmini.....	8
2.2. Tornalamada İmalat Optimizasyonu Çalışmaları.....	15
2.3. Tornalamada Aktif Titreşim Kontrolü	19
2.4. Tornalamada Durum İzleme-Görüntüleme	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	30
3.1.1. AA6013.....	30
3.1.1. S235JR.....	31
3.1.1. Ti6Al4V	31
3.2. Veri Toplama	32
3.3. Verilerin İşlenmesi ve Analizi	35
3.3.1. Verilerin filtrelenmesi.....	35
3.3.2. İvme verilerinin integrali	37
3.3.3. Hızlı fourier dönüşümü (FFT)	38
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	40
3.5. İmalatta Titreşim Çalışmaları ve Talaşlı İmalatta Aktif Titreşim Kontrolü	41
3.5.1 Titreşimin sınıflandırılması.....	43
3.5.2. Titreşim kontrol sistemleri.....	43
3.5.3. Talaşlı imalatta titreşim	44
3.5.4. Tırlama titreşimi	46
3.5.5. Tırlama titreşiminin aktif kontrolü	46
3.5.6. Kayan kipli kontrol (KKK).....	48
3.6. Yapay Zeka Teknikleri.....	50
3.6.1. Yapay sinir ağları.....	50
3.6.2. Geri yayımlı sinir ağları (GYSA)	54
3.6.3. Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS).....	55
3.6.4. Metasezgisel algoritmalar	55
3.6.5. Çoklu lineer regresyon analizi (ÇLRA).....	59
3.7. Taguchi ve Varyans Analizi.....	60
3.8. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve İmalata Uyarlanması	63

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	67
4.1. Talaşlı İmalatta Parametre Tahmini	67
4.1.1. YSA ve ÇLRM tabanlı tahmin	67
4.1.2. ANFIS ve metasezgisel algoritmalar tabanlı	73
4.2. Optimizasyon	80
4.3. Aktif Titreşim Kontrolü	86
4.3.1. Tornalamada kesme ve matematiksel model	86
4.3.2. Verilerin toplanması, analizi ve aktif titreşim kontrolü.....	88
4.4. Talaşlı İmalatta İot ve Durum İzleme	96
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	100
5.1. Kesme Parametreleri Tahmini.....	100
5.2. Optimizasyon ve Varyans Sonuçları.....	101
5.3. Aktif Titreşim Kontrolü	102
5.4. İot ve Durum İzleme	103
KAYNAKLAR.....	104

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. AA6013 için kimyasal bileşim tablosu (%).....	30
Çizelge 3.2. AA6013 Mekanik özellikleri	30
Çizelge 3.3. S235JR için kimyasal bileşim tablosu (%)	31
Çizelge 3.4. S235JR Mekanik özellikleri	31
Çizelge 3.5. Ti6Al4V için kimyasal bileşim tablosu (%)	32
Çizelge 3.6. Ti6Al4V Mekanik özellikleri	32
Çizelge 3.7. Veri toplama cihazı teknik özellikleri.....	33
Çizelge 3.8. Tornalama Parametreleri ve Seviyeleri	62
Çizelge 4.1. Yüzey pürüzlülüğü sınıfları	68
Çizelge 4.2. YSA ve ÇLRM performans kriterleri	70
Çizelge 4.3. Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması.....	74
Çizelge 4.4. ACO Parametreleri	75
Çizelge 4.5. GA Parametreleri	77
Çizelge 4.6. PSO Parametreleri	78
Çizelge 4.7. Tornalama parametreleri ve belirlenen seviyeler	80
Çizelge 4.8. Taguchi L9' un Ortogonal Dizi-Tam Faktörlü Tasarımı.....	81
Çizelge 4.9. Deney sonuçları ve S/N oranları.....	81
Çizelge 4.10. Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Titreşimi için S/N Oranları.....	82
Çizelge 4.11. Ra ve Acc için ANOVA sonuçları.....	83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Endüstrinin Gelişimi ve Endüstri 4.0.....	2
Şekil 1.2. Akıllı imalat için şematik gösterim.....	4
Şekil 3.1. Dewesoft Veri Toplama Cihazı	32
Şekil 3.2. ESP32 Mikrodenetleyici Platformu	34
Şekil 3.3. ADXL-345 ivmeölçer	34
Şekil 3.4. MEMS tipi ivmeölçer	35
Şekil 3.5. Ses verisi için filtreleme örneği	35
Şekil 3.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	41
Şekil 3.7. Titreşim yapan sistemin basit gösterimi	42
Şekil 3.8. Çok serbestlik dereceli sistem örneği	42
Şekil 3.9. Titreşim kontrol sistemlerinin şematik gösterimi	44
Şekil 3.10. Tornalamada bir serbestlik dereceli sistemin modellemesi	45
Şekil 3.11. Tırlamanın imal edilen parçaya verdiği zarar (Banaz 2018)	46
Şekil 3.12. Aktif Kontrol Akış Şeması	48
Şekil 3.13. KKK Sistem Blok Şeması	50
Şekil 3.14. Sinir hücresinin şematik görünümü	51
Şekil 3.15. Yapay nöron modelinin şematik görünümü	52
Şekil 3.16. a) İleri beslemeli YSA'nın ağ yapısı b) Geribeslemeli YSA'nın ağ yapısı..	53
Şekil 3.17. İki girişli ve tek çıkışlı temel ANFIS yapısı	55
Şekil 3.18. ACO'nun akış şeması	57
Şekil 3.19. GA akış şeması	58
Şekil 3.21. YSA Ağ Modeli.....	60
Şekil 3.22. IoT' nin temel işlevleri	64
Şekil 3.23. IoT uygulaması şematik gösterimi.....	66
Şekil 4.1. Tornalama sonrası iş parçası.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Tornalama esnasında alınan görüntü	68
Şekil 4.3. Takım sıcaklığı ölçümü	69
Şekil 4.4. ÇLRM (Yüzey Pürüzlülüğü) dağılım grafiği	71
Şekil 4.5. ÇLRM (Takım Sıcaklığı) dağılım grafiği.....	71
Şekil 4.6. YSA (Yüzey Pürüzlülüğü) dağılım grafiği.....	72
Şekil 4.7. YSA (Takım Sıcaklığı) dağılım grafiği	72
Şekil 4.8. Yüzey Pürüzlülüğü için Model Sonuçları.....	73
Şekil 4.9. Takım Sıcaklığı için Model Başarı Sonuçları.....	73
Şekil 4.10. Acc için ÇLRM Algoritması Eğitim ve Test Sonuçları.....	75
Şekil 4.11. Ra için ÇLRM Algoritmasının Eğitim ve Test Sonuçları	75
Şekil 4.12. Acc için ACO Algoritması Eğitim ve Test Sonuçları	76
Şekil 4.13. Ra için ACO Algoritmasının Eğitim ve Test Sonuçları	76
Şekil 4.14. Acc için GA Algoritması Eğitim ve Test Sonuçları	77
Şekil 4.16. Acc için PSO Algoritması Eğitim ve Test Sonuçları.....	79
Şekil 4.17. Ra için PSO Algoritmasının Eğitim ve Test Sonuçları	79
Şekil 4.18. İşleme parametrelerinin ortalama S/N oranı üzerine etkisi a) Ra b) Acc	83
Şekil 4.19. Ra ve Acc için lineer regresyon sonuçları	84
Şekil 4.20. Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi üzerine ilerleme hızı ve dalma derinliğinin etkisi	85
Şekil 4.21. Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi üzerine iş mili dönme hızı ve dalma derinliğinin etkisi	85
Şekil 4.22. Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi üzerine iş mili dönme hızı ve dalma derinliğinin etkisi	85
Şekil 4.23. Tornalamada sistemin modellenmesi	86
Şekil 4.24. Kontrol sistemi blok diyagramı	88
Şekil 4.25. Titreşim Ölçümü Deney seti.....	89
Şekil 4.26. Eksen için ham ivme verisi.....	90
Şekil 4.27. FFT analiz sonuçları	91

Şekil	Sayfa
Şekil 4.28. Kontrol edilmemiş 20 sn'lik deplasman verisi	92
Şekil 4.29. Aktif kontrol sonrası oluşan deplasman verisi.....	92
Şekil 4.30. Ti6Al4V iş parçası için tornalama sonrası görüntü	93
Şekil 4.31. Kontrollü ve kontrolsüz durumlarda elde edilen veriler.....	94
Şekil 4.32. Eyleyici tepki kuvveti grafiği	95
Şekil 4.33. Kontrol öncesi deplasman verisi için FFT sonuçları	95
Şekil 4.34. Kontrol sonrası deplasman verisi için FFT sonuçları	96
Şekil 4.35. Elektronik devre şeması.....	97
Şekil 4.36. RemoteXY ara yüz geliştirme ortamına ait görüntü.....	98
Şekil 4.37. RemoteXY ara yüz geliştirme ortamına ait ikinci sayfa görüntüsü.....	98
Şekil 4.38. Bulut servisini kullanmak için kullanılan iletişim portları ve token.....	99
Şekil 4.39. ESP32 ve ADXL345 ile 3 eksen veri toplama yazılımına ait algoritma	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Al	Alüminyum
J	Joule
C	Karbon
Cr	Krom
Fe	Demir
gr	gram
Hz	Hertz (Frekans)
m	Metre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Azot
N	Newton
Ni	Nikel
O	Oksijen
P	Fosfor
Ra	Pürüzlülük parametresi(Aritmetik ortalama)
Rz	Pürüzlülük parametresi(en büyük yükseklik)
s	Saniye
S	Kükürt
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
Zn	Çinko

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif Akım
ACO	Karıncı Kolonisi Optimizasyonu
ANFIS	Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi
ÇLRM	Çoklu Lineer Regresyon Modeli
DC	Doğru Akım
DEAR	Taguchi Veri Zarflama Analizi
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
GA	Genetik Algoritma
IoT	Nesnelerin İnterneti
IIoT	Endüstriyel Nesnelerin İnterneti
IoMT	Üretim Nesnelerinin İnterneti
KKK	Kayan Kipli Kontrol
NVH	Ses, Titreşim ve Sertlik
PSD	Güç Spektral Yoğunluğu
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
Ra, Rz	Yüzey Pürüzlülüğü
RF	Radyo Frekansı
RFID	Kablosuz Frekans Tanım Sistemi
SFS	Siber Fiziksel Sistemler
S/N	Sinyal/Gürültü
UART	Evrensel Asenkron Alıcı/Verici
Wi-Fi	Kablosuz Sensör Ağı
YSA	Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

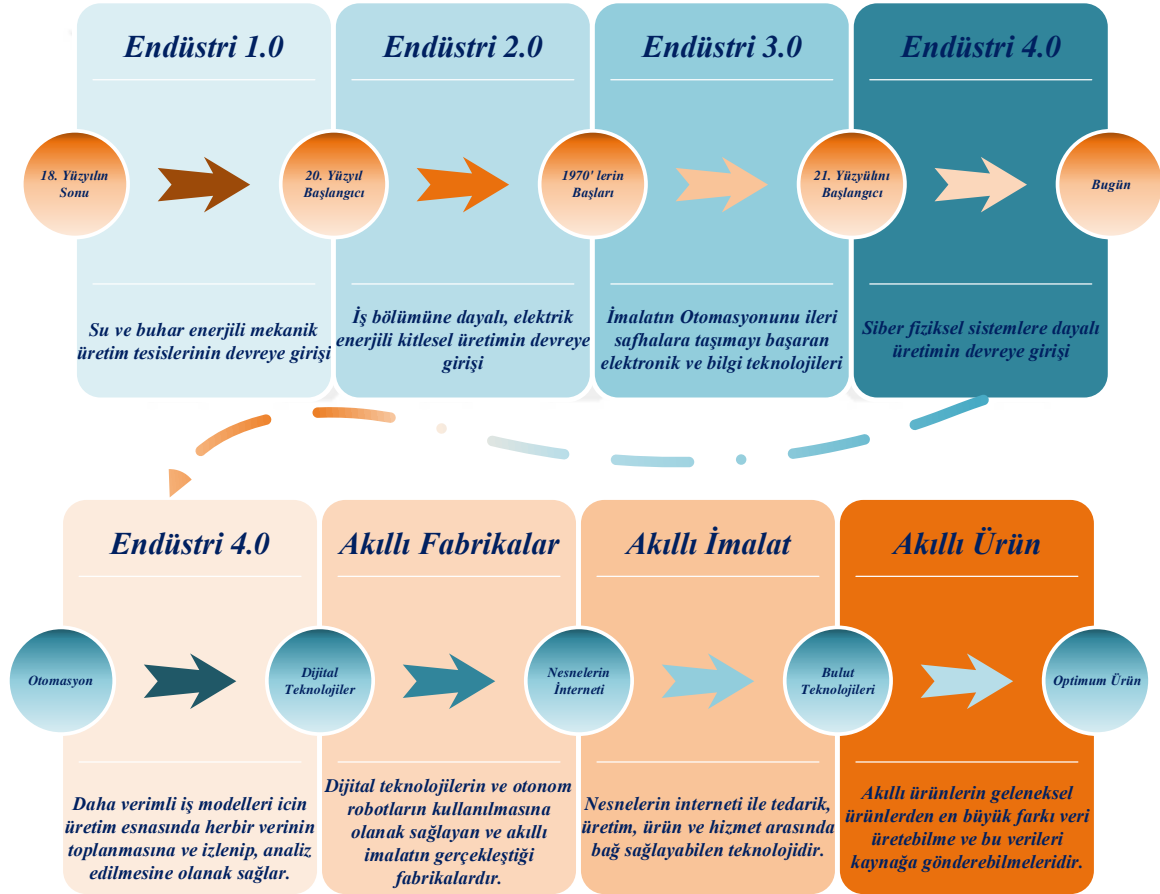
İnsanlığın varoluşundan ve medeniyetin doğuşundan bu yana mühendislikte ve teknolojiye yaşanan ilerlemeler, insan toplumunun gelişimine önderlik etmiştir. Teknikte yaşanan ilerlemeler, toplumların sosyoekonomik ve kültürel yapısını etkilemiş ve birbirleri ile etkileşim kurup bilgi alışverişi yapan ekosistemleri oluşturmuştur. Bununla birlikte, medeniyetler arasındaki bu etkileşim de tekniğin gelişimine ve yayılmasına ivme kazandırmıştır.

Etkileşimin artmasıyla küreselleşen dünya nüfusundaki hızlı artış, ticaretin gelişmesi, insanların ihtiyaçları ve konfor gereksinimleri, üretimin ve üretim teknolojilerinin değerinin artırılması gerekliliğini ortaya çıkarmış ve bu gereklilik, sanayi devrimlerini zorunlu kılmıştır. İlk olarak 1760'lı yıllarda James Watt'ın buhar makinesini icadı ile İngiltere'de başlayan Birinci Sanayi Devrimi 1830'lara kadar diğer ülkelere yayılmıştır. İnsan ve hayvan gücünün yerini buhar ve kömürle çalışan makinelerin aldığı Birinci Sanayi Devrimi aynı zamanda insanlık tarihi için de yeni bir çağ olarak görülmektedir (Thoben, Wiesner ve Wuest, 2017).

Birinci Sanayi Devrimi sürecinde makineleşmeler artmış ve teknolojinin gelişimi hız kazanmış ve teknolojiye yaşanan gelişmeler; İkinci Sanayi Devriminin önünü açmıştır. 19. yüzyılda elektriğin keşfedilmesiyle başlayan ve aynı zamanda teknolojik devrim olarak da bilinen İkinci Sanayi Devrimi, makineleşmelerin ve üretimin artmasına olanak tanımıştır. Seri üretimin başladığı dönem olarak bilinen bu yıllarda taşıma dolayısı ile ham madde tedariki kolaylaşmış ve ürünlerin yeni pazarlara ulaşımı artmıştır. İkinci Sanayi devrimi, günümüzün lokomotif sektörlerinden olan otomotiv sanayisinin de temellerinin atıldığı dönem olarak bilinmektedir.

Elektronik ve otomasyon uygulamalarının gelişmesiyle 1970'li yıllarda endüstride yeni bir devir olarak görülen Üçüncü Sanayi Devrimi başlamış olup bu yıllarda analog ve mekanik sistemlerden dijital sistemlere geçiş sağlanmıştır. Bilgisayar ve iletişim teknolojisinin temellerinin atıldığı bu yıllarda seri üretim oldukça hızlanmış ve insan gücüne olan ihtiyaç asgariye indirilmiştir.

Son yıllarda siber fiziksel sistemler, depolama teknolojileri ve internet uygulamalarının gelişimi ile yüksek kaliteye ve düşük maliyete sahip, rekabetçi ürünler üretebilmenin yolu açılmıştır (Thoben ve diğerleri, 2017). Dördüncü sanayi devrimi olarak görülen ve “Endüstri 4.0” olarak adlandırılan bu süreçte, nesnelerin ve makinelerin internet ve iletişiminin sağlanması, seri üretimin hızlandırılması, veri ve bilgi alışverişinin sağlanması, ham madde, kaynak ve enerji tüketiminin azaltılması, üretim sürecine robotların dahil edilmesi ve otonom kontrolleri, iş sağlığı ve güvenliğinin artırılması ve entegre edilmesi hedeflenmektedir (Gilchrist, 2016). Sanayi devrimleri ve Endüstri 4.0’ın önemli adımlarının yer aldığı görsel Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Endüstrinin gelişimi ve Endüstri 4.0

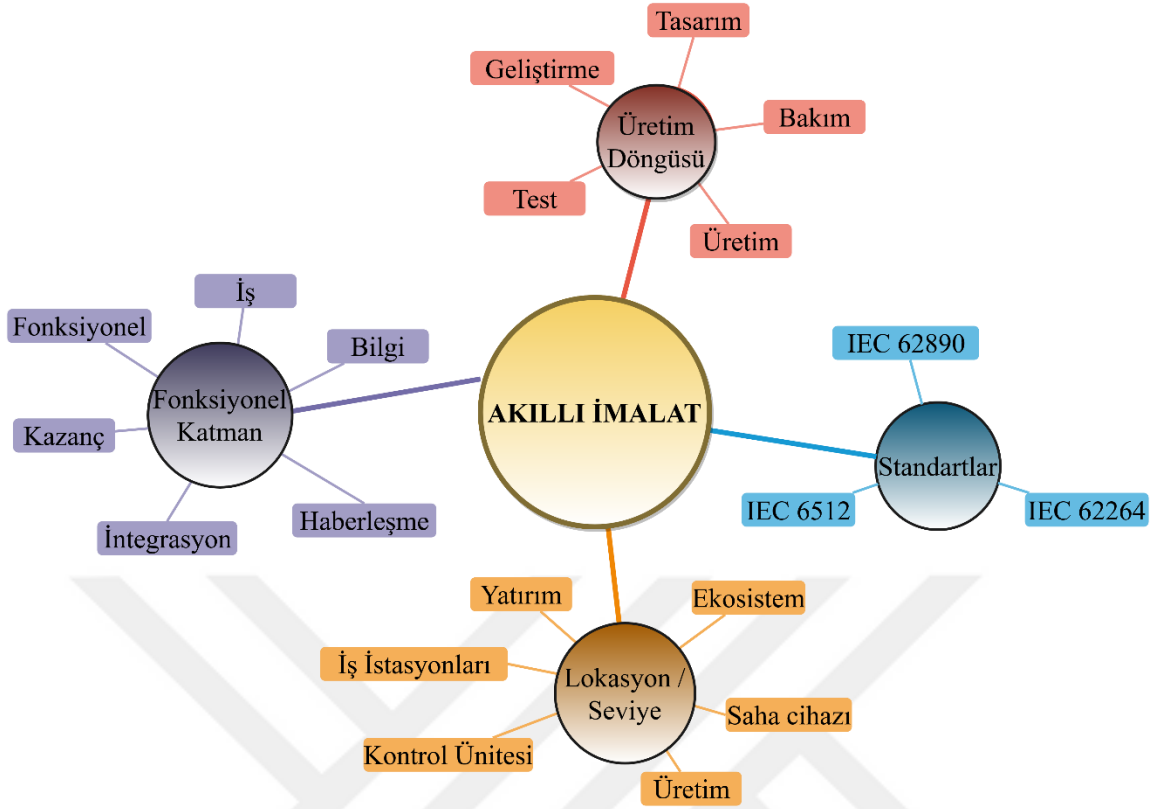
İlk kez 2011 yılında Almanya'nın Hannover şehrinde gündeme gelen Endüstri 4.0, akıllı fabrikaların dikey ve yatay olarak entegre üretim sistemlerine sahip olmasını ve Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramının üretime sokulmasıyla üretim verimliliğinin, üretim kalitesinin, üretim süresinin ve maliyetlerin istenen değerlere ulaşmasını hedeflemektedir. Bu süreçte, birbirleri ile etkileşim kurabilen esnek makineler, karanlık fabrikalarda gerçekleştirilen seri üretime olanak sağlar. Akıllı makineler aracılığıyla üretimde bilgi alışverişi sağlanır ve

üretim süreçleri kendi kendine belirlenir. Üretim esnasında; akıllı sensörlerden gelen veriler, süreç boyunca toplanır ve gerekli kararların alınabilmesi için bulut merkezinde depolanır. Bu sürecin gerçekleşebilmesi için, makinelerin, depolama sistemlerinin ve yardımcı ekipman/programlar gibi unsurların birbirleri ile bilgi paylaşabilmeleri ve bağımsız olarak kontrol edilebilmeleri gerekmektedir (Vogel ve Hess, 2016).

Akıllı fabrikalarda; fiziksel mekanizmaların, makinelerin veya sistemlerin, bilgisayar tabanlı algoritmalar tarafından kontrol edildiği veya izlendiği sistemlere Siber Fiziksel Sistemler (SFS) ismi verilmiştir. Endüstri 4.0 kapsamında SFS üzerine yapılan Ar-Ge faaliyetleri sonucunda akıllı imalat yöntemlerinin temelleri atılmıştır (Guo, Lu, Gao ve Cao, 2018). Akıllı imalat uygulamaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Nesnelerin İnterneti (IoT)
- Yapay Zeka Uygulamaları
- Öğrenen Robotlar
- Siber Fiziksel Sistemler
- Büyük Veri ve Analizi
- Bulut Teknolojileri
- Üç Boyutlu Yazıcılar
- Simülasyon-Dijital İkiz

Akıllı imalat uygulamaları; kaynak kullanımını azaltma, yalın üretim gerçekleştirme, üretim hızını ve verimliliğini artırma, hatalı ürün miktarını azaltma, üretim sürecini kısaltma, müşteri taleplerine hızlı cevap verme, denetim ve kontrol süreçlerini kısaltma, insan-makine etkileşimini azaltma, üretim sürecinde hızlı ve doğru kararların alınması, üretim sürecine gerçek tabanlı müdahale etme, arızaların önceden tespit edilmesi ve önlenmesi ve en önemlisi üreticinin rekabet gücünü artırması yönleri ile hemen hemen her sektörde kullanım alanına sahiptir. Akıllı imalat uygulamaları için üretim döngüsü, fonksiyonel katman, seviye ve kullanılan standartların ele alındığı şematik gösterim Şekil 1.2'de verilmiştir (Guo ve diğerleri, 2018; Preez ve Oosthuizen, 2019; Yang, Kumara, Bukkapatnam ve Tsung, 2019).



Şekil 1.2. Akıllı imalat için şematik gösterim

Son yıllarda, akıllı imalat uygulamaları, bu olumlu yanları ile talaşlı imalatta da geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Talaşlı imalatta kaliteyi artırmak, üretim esnasında oluşan titreşimlerin (tırlama) azaltılması ve kontrol altına alınması ile mümkündür. Talaşlı imalatta en yaygın kullanılan yöntemler arasında bulunan tornalama, frezeleme, taşlama ve kesmede de işleme esnasında oluşan tırlamalar büyük önem arz etmekte olup maliyeti ve ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir (Hoe, Reddy, Lee ve Debnath, 2018; Guvenc, Bilgic, Mistikoglu, 2021).

Talaşlı imalat esnasında oluşan titreşimler, kesici takımın ömrünün erken tamamlanmasına, iş parçası üzerinde istenenin dışında yüzey pürüzlülüğü oluşmasına, makine parçalarının zarar görmesine sebebiyet verebilmektedir. Talaşlı imalatta oluşan tırlama, üretim verimliliğini azaltan klasik bir sorun olmakla birlikte operatörün sıklıkla karşılaştığı ve sebebi tam olarak belli olmadığı için bir şekilde kontrol altına alınması gereken bir problemdir (Siddhpura ve Paurobally, 2018; Munoa, Beudaert, Dombovari, Altintas, Budak, Brecher ve Stepan, 2016b).

Neredeyse tüm talaşlı imalat proseslerinde görülen tırlama titreşimleri, takım ile iş parçası arasında görülür ve ürün yüzey kalitesi, gürültü ve takım aşınması üzerine olumsuz etkiler bırakır. Araştırmacılar tarafından, ürünün daha iyi yüzey kalitesine sahip olması ve takım ömrünün artırılması için kesme işleminde tırlama oluşumunun önlenmesi adına titreşimi tespit etmek, azaltmak ve kontrol altına almak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler arasında imalat parametrelerinin ürün birbirleri üzerine etkilerinin belirlenmesi, en iyi ürün kalitesi için üretim parametrelerinin tahmin edilmesi, imalat parametrelerinin optimizasyonu, talaşlı imalat işleminin izlenmesi, tırlamanın algılanması, işleme esnasında kontrol edilmesi ve gerekli olduğu durumlarda operatöre bilgiler verilmesi yer almaktadır (Kolhe, Rahane ve Galhe, 2016; Susanto, Yamada, Tanaka, handoka ve Subhan, 2020).

Tornalama, talaşlı imalatın en çok kullanılan yöntemlerinden bir tanesi olup tornalama esnasından oluşan tırlamanın belirlenmesi, tahmini ve kontrol edilmesi ile alakalı yapılan birçok çalışma mevcuttur. Tornalama için belirlenen üretim parametrelerinin kullanılması durumunda yüzey kalitesinin ne olacağını tahmin edilmesi ve en uygun işleme parametrelerinin belirlenmesi üretimde oluşabilecek titreşimleri azaltmada kullanılan en önemli uygulamalar arasında şüphesiz yapay zeka tabanlı algoritmalar yer almaktadır. Yapay zeka teknikleri, yüksek doğruluk, kolay uygulama ve her alana uyarlanabilirliği ile talaşlı imalatta takım titreşimlerinin azaltılması ve kalitenin artırılabilmesi için artan bir ivme ile kullanılmaktadır (Abouelatta ve Madl, 2001; Al Shayea, Abdullah, Noman, Kaid ve Nasr, 2020).

Tornalama prosesinde, optimum maliyetle yüksek kaliteye ulaşmak için takım malzemesi, iş parçasının malzemesi ve boyu, iş parçasının dönüş hızı, dalma derinliği, ilerleme hızı, kesici uç profili ve kesici takım uzunluğu gibi birçok parametrenin optimizasyonu ve tahmini için YZT kullanılmaktadır. Tornalama prosesinde kullanılan en önemli yapay zeka teknikleri arasında; Yapay Sinir Ağları (YSA), Bulanık Mantık Meta-Sezgisel Algoritmalar, Dalgacık, Makine Öğrenimi, Hibrit Sistemler, ANFIS, Sezgisel-YSA ve Sezgisel-Bulanık yer almaktadır. Ayrıca bazı çalışmalarda; bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan ampirik modelleme tekniklerinin popüler yapay zeka teknikleriyle birlikte kullanıldığı görülmektedir. Buna ek olarak; Taguchi ve ANOVA yöntemi, istenen sonuçları elde etmede deneysel tasarım ve parametre optimizasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır (Al Shayea ve diğerleri, 2020; Dahbi, Ezzine ve Moussami, 2017; Eren, Guvenc ve Mistikoglu, 2021).

Tornalama esnasında oluşan tırlamaların uygun eleman seçimleri ile pasif olarak sönümlenmesi geçtiğimiz yıllarda çalışılan ve verim alınan bir yöntemdir. Ancak teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha yüksek ürün kalitesini elde edebilmek için farklı metotlar ile aktif kontrol uygulamalarına eğilim artmıştır. Tornalamada aktif titreşim kontrolü uygulamalarında; işleme esnasında oluşan titreşimlerin doğru bir şekilde ölçülmesi, ölçülen verilerin filtrelenmesi/analizi ve oluşan titreşimi sönümleyebilecek düzeyde bir dış etki kuvveti oluşturulması aşamaları mevcuttur. Tornalama esnasında oluşan titreşim yüksek frekans ve düşük genliğe sahip olduğu için aktif titreşim kontrolünde kullanılan ivmeölçer sensörlerin, veri toplama cihazlarının ve aktüatörlerin yüksek hız ve hassasiyete sahip olması gerekmektedir (Alujevic, Cakmak, Wolf ve Jokic, 2018; Jang ve Tarn, 1999; Guvenc ve diğerleri, 2021; Ogun ve Micheal, 2017; Tuma, Simek, Sluta ve Los, 2013; Wang ve Cheuk, 2018).

Aktif kontrol uygulamalarında; tepki kuvveti oluşturmak için, doğrulukları kanıtlanan piezo ve elektromanyetik tabanlı aktüatörler kullanılmaktadır. Bunların yanında, akıllı malzemeler de yaygın bir kullanıma sahiptir. Akıllı sıvılar olarak tanımlanan ER ve MR tabanlı sistemler ise genellikle yarı aktif uygulamalarda kullanılmaktadır (Ikegama, Takagi, Inoue ve Jikuya, 2017; Akdagli, Guney ve Karaboga, 2006). Talaşlı imalatta ve özellikle tornalama prosesinde gerçekleştirilen aktif titreşim kontrolü ile tırlamanın azaltılması ile alakalı yapılan bilimsel çalışmalar önceki çalışmalar bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Bu tez çalışması dört farklı amaç doğrultusunda gerçekleşmiştir:

Birinci amaç: Tornalama için yüzey pürüzlülüğü (Ra/Aritmetik Ortalama Sapma) ve işleme sonrası takım uç sıcaklığı (°C) değerlerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. YSA modeli ve ÇLRM kullanılarak, tornalama işleminin en önemli kalite kriterleri arasında yer alan yüzey kalitesi ve kesici takım ucu sıcaklığının en iyi değerleri için kesme parametreleri tahmininde bulunulmuştur. Oluşturulan yapay zeka tabanlı modeller sayesinde kesme parametrelerinin ürün kalitesi üzerine etkisi ortaya konmuş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

İkinci amaç: Tornalama esnasında, yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi arasındaki ilişkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Buna ek olarak kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili hızı gibi kesme parametrelerinin takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Tornalama işleminin ardından, kesme parametreleri, takım ömrü ve en

iyi ürün kalitesi için optimize edilmiştir. Taguchi Yöntemi kullanılarak optimum parametre kombinasyonu geliştirilmiştir.

Üçüncü amaç: Tornalamada ürün kalitesini, takım ömrünü ve üretkenliği olumsuz yönde etkileyen tırlamanın üretim esnasında azaltılması için aktif titreşim kontrolü gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda işleme esnasında takım üzerinden üç eksenli ivme verisi toplanmış, toplanan veriler filtrelenmiş, deplasman verisi için çift integral alınmış, Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Dönüşümü/FFT) yöntemi ile analizleri gerçekleştirilmiş ve oluşturulan matematiksel model yardımı ile tornalamada aktif titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü amaç: Endüstriyel IoT kavramı çerçevesinde, tornalama esnasında takım üzerinden üç eksen ivme verisi toplanmış ve frekansın istenmeyen düzeylere ulaşması durumunda kullanıcıya SMS yolu ile bilgi veren bir durum izleme/görüntüleme sistemi tasarlanması amaçlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Önceki çalışmalar incelendiğinde, imalatta ürün kalitesini artırmak ve maliyeti düşürebilmek adına farklı yöntemler ve uygulamalar olduğu görülmüştür. Bu bölüm, imalat süreçlerindeki son ürün kalitesini artırabilmek adına çeşitli yaklaşımlar içermektedir. Bunlar tahmin, optimizasyon, aktif titreşim kontrolü ve nesnelere interneti yöntemi ile durum izleme/görüntüleme olmak üzere dört ana başlıkta gerçekleştirilmiştir. Deneylere ışık tutması ve çalışmalara derinlik kazandırabilmesi adına gerçekleştirilen ve aşağıda detaylı olarak verilen basılı çalışmalar, tezin yol haritasını oluşturmuştur.

2.1. Tornalamada Kesme Parametreleri Tahmini

Küreselleşen dünyada, insanların ihtiyaçları ve konfor gereksinimleri, üretim teknolojilerinin geliştirilmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Talaşlı imalat yöntemleri, üretim teknolojileri arasında büyük bir paya sahiptir. Talaşlı imalat sürecinde üreticilerin dikkat ettiği en önemli konu ürünün düşük maliyette ve yüksek kalitede üretilebilmesidir. Talaşlı imalat teknolojisinde ürün kalitesini ve maliyetleri etkileyen önemli konulardan biri yüzey pürüzlülüğüdür (Childs, 2000; Davim, 2008). Bu nedenle imalatçılar, üretim maliyetini düşürmek için yüzey pürüzlülük değerlerinin tahmini ve optimizasyonu bunun yanında en iyi yüzey pürüzlülüğünü elde edebilmek için seçilmesi gereken üretim parametrelerinin ne olması gerektiği gibi önemli konulara dikkat çekmektedir (Harun, 2010; Markopoulos, Manolacos ve Vaxevanidis, 2008; Zain, Haron ve Sharif, 2010).

Günümüzde, talaşlı imalat için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en yaygın olanı tornalama işlemidir. Tornalama işleminde doğrudan yüzey pürüzlülüğünü etkileyen takım titreşimini etkileyen birçok faktör vardır (Childs, 2000; Koyee ve diğerleri, 2014; Tasdemir, 2018). Bu faktörlerden bazıları; kesme kuvvetleri, kesme parametreleri, kesici takım kalitesi vb. En önemli faktörler, kesme derinliği, dönüş hızı, ilerleme hızı gibi kesme parametreleridir. Doğru kesim parametreleri seçimi, mümkün olan en kısa sürede yüksek kaliteli ürünler elde etmemizi sağlayacaktır (Deshpande, Andhare ve Padole, 2019).

En doğru parametrelerin tahmininde kullanılan yapay zeka; bir bilgisayarın, bilgisayar altyapısına sahip bir bilgisayarın veya bilgisayar kontrolüne sahip bir bilgisayarın, akıl yürütme, anlam oluşturma, genelleme yapma ve geçmiş deneyimlerden öğrenme gibi daha

yüksek zihinsel işlevlerle ilgili görevleri yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Medsker, 1996). İnsan beyni ve bilgisayarları karşılaştırdığımızda, insan beyninin üstünlüğünün temeli, tecrübe ile verinin konumuna göre problem veya problemleri analiz edebilmesidir. Yapay Zeka bu noktada devreye giriyor ve bilgisayar sistemlerine belirli insan yetenekleri kazandırıyor. Bu yeteneklerle, insan gibi daha önce edindiği deneyimlerle öğrenme ve karar verme gibi beceriler kazanarak bilgisayar sistemlerini ve makineleri modellemektedir (Kalogirou, 2003; Kalogirou, 2007). Yapay Zeka teknolojisi, daha önce insan gücü gerektiren süreçleri veya görevleri otomatikleştirerek kurumsal performansı ve üretkenliği artırır. Yapay Zeka ayrıca hiçbir insanın ulaşamayacağı bir ölçekte verileri anlamlandırabilir (Kao ve Shih, 2008). Bu özellik, muazzam ticari faydalar sağlayabilir. Yapay zeka teknikleri çeşitli alanlarda ve uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır ve kullanımları giderek artmaktadır (Raza ve Khosravi, 2015; Liu, 2018; Mellit, 2008; Li, Hou, Yu, Lu ve Yang, 2017; Mat, 2017; Ezziane, 2006). Bu artış imalat sektöründe ve özellikle talaşlı imalat uygulamalarında da görülmektedir. Ayrıntılı literatür çalışmaları sonucunda talaşlı imalat uygulamalarında öne çıkan yapay zeka yöntemlerinin Yapay Sinir Ağları(YSA), Fuzzy Logic(FL), Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi(ANFIS), Machine Learning(ML), metasezgisel ve hibrit yöntemler olduğu dikkat çekmektedir. Bu yöntemler birbirinin yerine kullanılabilmelerinin yanı sıra birbirlerine göre avantaj veya dezavantajları olduğu için farklı amaçlar için de tercih edilmektedir.

Talaşlı imalatın en çok yoğun kullanılan yöntemleri arasında yer alan tornalama işleminde ürün kalitesinin ve verimliliğinin artırılması üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Ritesh ve arkadaşları sertlik aralığı 45-70 HRC olan malzemelerde ki tornalama işlemini incelemişlerdir. Çünkü geçmişte yapılan araştırmalar ve deneyler sonucunda takım aşınmasının veya aşınan takımın geç değiştirilmesi zamanda ve üretimde ciddi sorunlar ortaya koymuştur. Yaptıkları çalışma ile sertleşmiş çeliği tornalarken işlenecek malzemeye üç eksenli (dikey yönde) piezoelektrik titreşim sinyalleri göndermişler ve açığa çıkan titreşim sinyallerini ölçerek takımlarda meydana gelen aşınmayı izlemişlerdir. Gözlem neticesinde, meydana gelen titreşim sinyallerini ölçmek için regresyon analizi ve matlab aracılığı ile bir yapay sinir ağı matematiksel modeli ortaya çıkarmışlardır. Çalışmanın nihayetinde, yapay sinir ağı modelinin takım aşınmasının önlenmesine ciddi anlamda yardımcı olacağını görmüşlerdir (Upase ve Ambhore, 2020).

İşleme ekipmanlarının hassasiyetini artırdıktan sonra, arka planda üretim kalitesini destekleyen ve üretim parametrelerini optimize eden yeni tekniklere eğilim artmıştır. Genel olarak, tornalama işleminde takım ömrünü etkileyen titreşim, tırlamaları ve ayrıca ürün kalitesini doğrudan etkileyen yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek gereklidir (Grzesik, 2017). Tornalama sırasında takım titreşimini ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok parametre vardır (Dahbi, Ezzine ve EL Moussami, 2017; Harun, 2010). Bu parametrelerin ürünü hangi düzeyde etkilediğini ve optimum işleme parametrelerinin nasıl bulunduğunu bulmak kolay değildir. Çünkü bu parametreler birbirini etkilemektedir (Dahbi ve diğerleri, 2017; Kuntoğlu, Aslan, Pimenov ve Giasin, 2020).

Guang-Jun ve arkadaşları yakın zamanda talaşlı imalatta kullanımı ciddi anlamda artan tornalama işleminde sertleştirilmiş çeliğin işlenmesini çalışmışlardır. Çalışmalarında kesme titreşimini baz alarak kesme ve ilerleme hızı, köşe radüsü, kesme derinliği ve iş parçası sertliği parametrelerini kullanmışlardır. Elde edilen titreşim verilerini modelde toplayarak bir yapay sinir ağı modeli oluşturmuşlardır. Deney verileri sonucunda modelin tahmin doğruluğunu kanıtlamışlar ve sonuçlarında %10'dan daha az hata bulmuşlardır. Bu da onlara sertleşmiş çeliklerde titreşim genliğinin tornalama işlemini iyileştirmek için doğru bir parametre seçimi olduğunu ispatlamıştır (Chen, Hour, Yan, Guo ve Han, 2020).

Talaşlı imalat esnasında oluşan titreşimler; düşük yüzey kalitesi, operatöre zarar verebilecek düzeyde gürültüye sebebiyet vermesi, takım tezgâhı bileşenlerine zarar vermesi, takım ömrüne zarar vermesi ve seri imalatı engellemesi gibi dezavantajları beraberinde getirmektedir (Davim, 2008). Bu titreşimlerin esas sebebi; kesme esnasında takım ile iş parçası arasında meydana gelen dinamik etkileşim olarak görülmektedir ve kesme kuvvetini oluşturan parametrelere müdahale edilerek bir miktar kontrol altına alınabilmektedir (Budak 2000).

Günümüzde operasyonel parametrelerin tahmini ve optimizasyonu için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. En yaygın kullanılan yöntemler Yapay Zeka Teknikleri (Wenden, 1981), Bulanık Mantık, Makine Öğrenimi (Goldberg ve Holland, 1988), Yapay Arı Kolonisi Algoritmaları (Karaboga ve Basturk, 2007), Karınca Kolonisi Algoritmaları (Dorigo ve Di Caro, 1999), Genetik Algoritmalar (Laouissi ve diğerleri, 2019) ve Taguchi Yöntemidir (Abbas, Pimenov, Erdakov, Taha ve Rayas, 2018; Güvenç, Çakır ve Mıstıkoğlu, 2019). Deneysel tasarım, mühendislik dünyasında üretim sürecini iyileştirmek için önemli bir

araçtır (Kanca, Demir ve Çavdar, 2016). Doğru deneysel tasarım sayesinde proses verimliliğindeki iyileşme, varyansların azalması ve istenen değere daha doğru üretim imkanı artmaktadır (Demir, 2021). Taguchi yöntemi, deneysel tasarım ve optimizasyon için yaygın olarak kullanılmaktadır. Taguchi yönteminin havacılık, otomotiv, enerji, imalat gibi birçok sektördeki uygulamalarını görmek mümkündür (Bagci, 2016).

Titreşimin temel olarak; bir sistemin referans noktasına veya denge konumuna göre yapmış olduğu tekrarlı hareketler olarak tanımlanmaktadır. Titreşim iki ana grupta incelenmektedir. Bunlar; serbest titreşim ve zorlanmış titreşimdir (Bottega, 2006). Serbest titreşim, bir sistemin üzerinde hiçbir kuvvet olmaksızın başlangıçta uygulanan bir kuvvet veya hareket nedeniyle yaptığı salınım hareketidir ve sönüm olmaması durumunda harmonik olarak sürekli aynı hareketleri yapmaktadır. Zorlanmış titreşim ise dış kuvvetlerin etkisi altında olan sistemin titreşimidir (Rao, 2017).

Günümüzde operasyonel parametrelerin tahmini ve optimizasyonu için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. En yaygın kullanılan yöntemler Yapay Zeka Teknikleri (Wenden, 1981), Bulanık Mantık, Makine Öğrenimi (Goldberg ve Holland, 1988), Yapay Arı Kolonisi Algoritmaları (Karaboga ve Basturk, 2007), Karınca Kolonisi Algoritmaları (Dorigo ve Di Caro, 1999), Genetik Algoritmalar (Laouissi ve diğerleri, 2019) ve Taguchi Yöntemidir (Abbas ve diğerleri, 2018; Güvenç, Çakır ve diğerleri, 2019). Deneysel tasarım, mühendislik dünyasında üretim sürecini iyileştirmek için önemli bir araçtır. Doğru deneysel tasarım sayesinde proses verimliliğindeki iyileşme, varyansların azalması ve istenen değere daha doğru üretim imkanı artmaktadır. Taguchi yöntemi, deneysel tasarım ve optimizasyon için yaygın olarak kullanılmaktadır. Taguchi yönteminin havacılık, otomotiv, enerji, imalat gibi birçok sektördeki uygulamalarını görmek mümkündür (Bagci, 2016).

Son yıllarda, havacılık ve otomotiv endüstrisindeki hızlı gelişmeler, kalıplama endüstrisinin ve işleme teknolojilerinin gelişmesine büyük katkı sağlamıştır. Bu süreçte daha güvenilir, kararlı, hassas ve gelişmiş otomasyon sistemleriyle donatılmış talaşlı imalat sektöre tanıtılmıştır (Childs, 2000; Wenden, 1981a; Preacher ve Rucker, 2003). İşleme ekipmanlarının belirli bir seviyeye yükseltilmesinden sonra, arka planda üretim kalitesini destekleyen ve üretim parametrelerini optimize eden Yapay Zeka (AI) tekniklerine olan eğilim artmıştır (Akkuş, 2010; Markopoulos, Manolakos ve Vaxevanidis, 2008; Zain, Haron ve Sharif, 2010).

Tornalama sürecinde, yüzey pürüzlülüğünü ve takım sıcaklığını etkileyen en önemli parametreler kesme derinliği, mil dönme hızı ve ilerleme hızıdır. En iyi yüzey kalitesini elde etmek ve aynı zamanda maliyeti optimum seviyede tutabilmek için en uygun işleme parametrelerinin birbiri üzerindeki etkisi dikkate alınarak seçilmesi gerekmektedir.

Lu, yüzey kalitesini ve işlenmiş iş parçasının yüzey kalitesini tahmin etmek için radyal temel işlevi sinir ağını kullanan çok sayıda kontrol edilemeyen faktör olduğunu vurguladı (Lu, 2008). Abouelatta ve Madl, kesme parametreleri ve takım titreşimlerinin işlevleri olarak 4 farklı modelle yüzey pürüzlülüğü parametrelerini tahmin etmek için ticari yazılım paketleri ile yüzey pürüzlülüğü ve kesme titreşimi parametrelerini topladı ve analiz etti (Abouelatta ve Mádl, 2001). Öztürk ve arkadaşları, kesim parametrelerini optimize etmek için sezgisel optimizasyon yöntemi olarak arılar algoritmasını kullandılar (Öztürk, Kalyoncu ve Ünüvar, 2018). Bazı araştırmacılar, YSA ile kompozit malzemelerin uç frezelemede yüzey pürüzlülüğünü ve sınırlandırmayı tahmin etmek için yanıt yüzey metodolojisi önerdi (Raj, Perumal ve Ramu, 2012) ve vektör regresyonunu (Jurkovic, 2018; Mia ve Dhar, 2019) yüksek hızda destekledi dönüm süreci. Singh ve Rao, yaptıkları çalışmada takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini ve kesme koşullarının etkisini araştırmışlardır (Singh ve Rao, 2005).

Panda ve diğerleri sertleşmiş çeliğin tornalanması ve çeliğin işleme teknolojisi ile ilgili yaptığı çalışmada titreşim sinyallerinin ve yüzey pürüzlülüğünün takım aşınmasında ki önemini araştırmışlardır. Bu çalışmada takım durumu izleme çalışmasının sert parçayı tornalamada etkili bir yöntem olacağını belirtmişlerdir. Belirttikleri yöntem ile sert parçanın tornalanmasında parça yüzeyinin aşınmasının ve parça yüzeyinin pürüzlülüğünün çevrim içi tahminini incelemişlerdir. Kullandıkları MTCVD çok katmanlı kaplamalı uç (TiN/TiCN/Al₂O₃) ve AISI 52100 çelik (55±1HRC) ile işleme parametrelerini ve titreşim sinyallerini dikkate alarak tahmin modeli geliştirmişlerdir. Modeli geliştirirken (MLR ve MQR) Pearson korelasyon katsayısını incelemişler ve incelenen katsayının doğruluğunu tespit ettikten sonra yüzey aşınmasında ki ilerlemeyi en çok radyal yönde titreşim genliği, kesme derinliği ve kesme hızı ile takip etmişlerdir. MQR modelinde hata yüzdesi çok düşük olması ve takip edilen parametrelerin titreşim sinyali için önemli olması elde edilen yanıtlar için çok iyi bir öngöründe bulunmalarını sağlamıştır. Bu durumda kullanılan modellemenin etkili ve çevrim içi tahmin işleme parametrelerinin çıktılarını tahmin etmek için güvenilir olduğunu göstermiştir (Panda, Sahoo, Panigrahi ve Rout, 2020).

Ultrasonik titreşim destekli tornalama işlemi için kesme kuvvetinin oluşum mekanizması, kesme kuvvetinin bileşimi ve ayrışması için çalışmalar yapan Yingshuai ve arkadaşları, Ultrasonik titreşim destekli tornalama mekanizmasına göre, ultrasonik titreşim destekli tornalama kesme kuvveti modeli oluşturmuşlardır. 304 östenitik paslanmaz çeliğin yapısını inceleyen ekip yaptıkları kontrast deneylerde teknolojik parametreler ile kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi, regresyon analizini ve varyans analizini ultrasonik titreşimler olmadan incelemişlerdir. Teknolojik parametreler ile kesme kuvveti arasındaki ilişkinin kolay bir şekilde kontrol edildiğinin görülmesi üzerine incelenen yapının işlenmesi hususunda yüksek kalite ve yüksek verim elde edildiğini belirtmişlerdir (Xu, Zhang, Zhu, Zang ve Chen, 2020).

Adel ve arkadaşları bir tornalama işleminde yapılacak işlemin nasıl daha iyi ve verimli olabileceği üzerine çalışmalar yapmışlardır. İşlem esnasında toplam karın artırılması için ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliği gibi parametrelerin değerlerinin ve üretkenliklerinin artırılmasını ve bütün bileşenler için toplam üretim maliyetinin düşürülmesini gerektiğini vurgulamışlardır. İşlem yapılacak parçaya aşırı titreşim verilmesi sonucunda yüzey kalitesinin bozularak takım ömrünü azalmasına bu nedenle de üretim verimliliğinin düşmesine sebep olacağını belirtmişlerdir. Çalışmalarında AISI 1040 çeliğinden üretilmiş bir parça kullanmışlar ve ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliği parametrelerini incelemek için deney yapmışlardır. Deneylerinde istatistiksel araçlar kullanmışlardır. Minimum titreşim ile talaş frekansı koşulunu elde edebilmek için varyans analizi, regresyon ve optimizasyon tekniklerini kullanmışlar ve böylece optimize ederek yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini gözlemlemişlerdir (Al-Shayea ve diğerleri, 2020).

Havacılık, otomobil sanayisi, rulman ve kalıp endüstrilerde yaygın olarak kullanılmakta olan sertleştirilmiş çelikleri inceleyen Nitin ve arkadaşları bu tarz çeliklerin işlenmesinin çok zor olduğunu belirtmişlerdir. Bu tür malzemelerin tornalanması esnasında kesici takımın üzerinde ağır mekanik yük oluştuğunu ve bundan dolayı tornalama işlemi boyunca titreşimler oluştuğunu ifade etmişlerdir. Titreşimlerin işlem yapılan parçanın yüzey kalitesini ve takım ömrünü azaltarak daha fazla takım aşınmasına neden olduğunu söylemişlerdir. Bu nedenle indüklenmesi yapılan titreşimlerin ölçülmesi ve tahminini yapılmasının çok önem arz ettiğine değinmişlerdir. Yapacakları tahminlerde matematiksel bir modelleme oluşturarak kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi değişkenlik gösteren işlem parametrelerinde titreşim ivmesini ve yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmişlerdir. Yaptıkları deneylerde kompozit dönüştürülebilir tasarım yöntemi

kullanmışlar ayrıca deneylerinde regresyon analizini kullanarak regresyon matematiksel modelleri geliştirmişlerdir. Matlab kullanarak YSA modeli ortaya çıkarmışlar ve tahminleri kabul edilebilir sapmalarla elde etmişlerdir. Yaptıkları araştırmalar ve deneyler sonucunda YSA tahminlerinin regresyon vb. gibi analizlerden daha doğru sonuç aldığını görmüşlerdir (Ambhore, Kamble ve Chinchankar, 2020).

Kesme parametrelerinde kesici takımın oluşturduğu titreşimler üzerine çalışmalar yapan Rupam ve arkadaşları tornalama işleminde kesici takımın oluşturduğu titreşimlerin ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliğine olan etkisini incelemişlerdir. Regresyon Analizi, ANOVA, Yapay Sinir Ağı ve Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak matematiksel modelleme ortaya çıkarmışlardır. Modelde titreşimlerin tahmin edilen değerlerini karşılaştıran bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda kesici takımın oluşturduğu titreşimi en fazla etkileyen parametrelerin sırasıyla kesme derinliği, ilerleme hızı ve kesme hızı olduğunu görmüşlerdir. Bu durumda analizler ve tahminler sonucunda titreşim değerleri arasında yüzde sapmanın en az Yapay Sinir Ağı modelinde olduğunu sunmuşlardır (Das ve Hazarika, 2019).

Yogesh ve arkadaşları yaptığı çalışmada Inconel 718'in karbür uçlarla tornalanmasında kesme kuvveti, ses ve titreşimin yanı sıra kesme parametreleri de kullanarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında tahmin modelleri oluşturarak regresyon analizini geliştirmişlerdir. Analiz esnasında kesme parametreleri, kuvvet ve titreşim değerleriyle birlikte yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmeye çalışmışlardır. İşlem sırasında ortaya çıkan sesin ve titreşim kullanımı ile ilgili özellikle Inconel 718 gibi kesilmesi zor malzemeler için daha önce hiçbir açıklama belirtilmediğini vurguladılar. Yaptıkları yöntem ile Inconel 718 gibi işlem yapılması zor malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün azalması hususunda yararlı olabileceğini belirttiler (Deshpande, Andhare ve Sahu, 2017).

Yogesh ve diğerleri talaşlı imalatta önem arz eden tornalamada Inconel 718'i kesme parametreleri, kuvveti, ses ve titreşimi kullanarak parça yüzeyinin pürüzlülüğünü tahmin etmek amacıyla Yapay Sinir Ağları modeli oluşturmuşlardır. Kriyojenik anlamda işlenmemiş ve işlenmiş kesici uç takımları kullanarak çeşitli tepkileri ölçmüşlerdir. Elde ettikleri tepki sonuçları daha önce oluşturdukları Yapay Sinir Ağları modellemesinde girdi olarak kullandılar. Yapay sinir ağları ile geliştirdikleri bu modelleme ile yüzey

pürüzlülüğünü %98 oranında doğru tahmin ettikleri ortaya çıkmıştır (Deshpande, Andhore ve Padole, 2019).

2.2. Tornalamada İmalat Optimizasyonu Çalışmaları

Üreticiler; imalat kalitesini artırmaya yönelik makine ekipmanlarının kalitesi ve çalışma hassasiyetini artırmaya yönelmişler ve büyük oranda başarı elde etmişlerdir. Ürün kalitesinin belli bir seviyeye ulaşmasının ardından, arka planda üretim kalitesini destekleyen ve üretim parametrelerini optimize eden yeni tekniklere yönelim artmıştır (Kumar, Divya ve Davim, 2018). Talaşlı imalat işleminde nihai ürün kalitesi için en önemli değerlendirme kriteri olarak görülen yüzey pürüzlülüğünün mümkün olduğunca azaltılması, işleme titreşimi ve tırlamanın sonlandırılması veya azaltılmasına bağlıdır. Talaşlı imalat esnasında takım titreşimini ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok işleme parametresi mevcuttur. Bu işleme parametrelerinin hangisinin daha önemli olduğunu ve titreşimi hangi düzeyde etkilediğinin tespiti ve optimum işleme parametrelerini nasıl bulduğunu bulmak çok kolay değildir. Bunun en büyük sebebi bu işleme parametrelerinin birbirlerini etkilemesidir (Kumar, Zindani ve Davim, 2018).

Günümüzde operasyonel parametrelerin optimizasyonu için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. En yaygın kullanılanları; Isıl İşlem Algoritması, Tabu Araştırma Algoritması ve Taguchi Optimizasyonu gibi klasik optimizasyon yöntemlerinin yanı sıra Genetik Algoritma, Karınca Koloni Algoritması, Yapay Bağışıklık Algoritması, Diferansiyel Gelişim Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Yapay Arı Koloni Algoritması gibi sezgisel optimizasyon yöntemleridir (Bullock, Luccioni, Pham, Lam ve Oroz, 2020; Pham ve Kalyoncu, 2009; Pham ve Karaboga, 2000). Deneysel tasarım, mühendislik dünyasında üretim sürecini iyileştirmek için önemli bir araçtır. Doğru deneysel tasarım sayesinde proses verimliliğindeki iyileşme, varyansların azalması ve istenen değere daha doğru üretim imkanı artmaktadır. Taguchi yöntemi, deneysel tasarım ve optimizasyon için yaygın olarak kullanılmaktadır. Taguchi yönteminin havacılık, otomotiv, enerji, imalat gibi birçok sektördeki uygulamalarını görmek mümkündür (Semioshkina ve Voigt, 2006; Thamizhmanii, Sapparudin ve Hasan, 2007).

Kolhe ve arkadaşları talaşlı imalatta tornalama işleminde sonuca etki eden değişkenler üzerinde çalışma yapmışlardır. Bu değişkenlerin işlem sırasında takım tezgahının davranışı,

kesici takımın ömrü, kesici takımın ortaya çıkardığı titreşim ve işlenecek parçanın boyutsal hassasiyeti olarak belirlemişlerdir. Bu değişkenlerin kesme ve ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme parametrelerinden etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Analiz esnasında CNC torna kesici takımlarında FFT analizörü kullanarak ivme ölçer yardımıyla kesici takım titreşim sinyallerini ölçmüşlerdir. Daha sonra bu deneylerini doğruluğunu arttırmak amacıyla Taguchi L9 deneysel tasarım yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda; varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi ile modellerini doğrulamışlardır (Kolhe, Rahane ve Galhe, 2016).

Taguchi yöntemi ile deneylerin ve analizlerin artık çok daha kolay ve hızlı yapılabildiğini hepimiz çok iyi biliyoruz. Thi-Bich ve arkadaşları da SKD11 çeliğinin ısı destekli frezeleme sırasında yüzey pürüzlülüğünü ve kesici takımın meydana çıkardığı titreşimleri incelemek için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Deneylerinde kesme ve ilerleme hızı, kesme derinliği ve yüksek sıcaklık altındaki desteklerin kesme parametreleri çıktılarını değerlendirdiler. Hem minimum düzeyde yüzey pürüzlülüğü hem de titreşim genliği kesme işleminin çok daha iyi olacağını tahmin ediyorlardı ve bu sonuçla yola çıkarak optimum kontrol parametleri; $V_c=280$ m/dak, $f=230$ mm/dak, $T=400^\circ$ C olarak elde ettiler (Mac, Long ve Nguyen, 2020).

Talaşlı imalatta kullanılan tornalama işleminde amaç elde edilen ürünün en iyi kalite ve verimde olmasıdır. İşlem sonucunda nihai ürünün kabul edilemez olmasına neden olabilecek bir çok parametre mevcuttur. Bunlar; kesme parametreleri, iş parçası yüzeyinin sertliği ve pürüzlülüğüdür. Mohammad Ilham birçok makale ve dergilerden derlediği bu yazısında kesme ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ve titreşimler üzerinde ki etkisini açıklamıştır. Açıklamalarında Taguchi yöntemini kullanmıştır. Bu yöntemin parça, deneysel süre ve üretim maliyetinin ciddi anlamda düşürdüğünü ortaya çıkarılmıştır (Ilham, Suparjon ve Sanjiwani, 2020).

Thamizhmanii ve arkadaşları bu araştırma ile optimum kesme koşullarının analizini elde etmeye odaklanmışlardır. SCM440 alaşımlı çeliğin Taguchi yöntemi ile tornalanmasında en düşük yüzey pürüzlülüğünü elde etmeyi amaçlamışlardır. Taguchi yöntemi kullanılarak 18 deney tasarlamışlar ve deneylerin sonuçlarını varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile kontrol etmişlerdir. Bütün sonuçları topladıklarında ise Taguchi yönteminin kesme derinliği ve daha

düşük yüzey pürüzlülüğü üretmede önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Thamizhmanii, Saparudin ve Hasan, 2007).

Bu çalışmada, 4340 Alaşımli Çelik malzeme için CNC tornalamasında kavrama incelemesi yapan Nwoke ve arkadaşları, CNC tornalamadaki kavrama ve kritik kesme koşulunun çalışmasını, iyi tasarlanmış üç faktörlü üç seviyeli bir deney ve % 99,5'e varan doğrulukla tahmin edilebilen regresyon modelleri aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar ile ortaya çıkardıkları modelde Sinyal/Gürültü (S/N) oranının kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği parametrelerine bağlı oldukları belirtmişlerdir. Artan ilerleme hızlarının ve kesme derinliğinin kavrama için titreşim frekansında artışa neden olacağını göstermişlerdir. Ayrıca yüksek kesme hızları ise titreşim frekansı üzerinde zayıflatıcı etkilere sahip olduğu görülmüştür. Veriler bir araya toplandığında kavrama titreşim frekansı için elde edilen optimum girdi parametreleri ile kaliteli ve verimli üretim işlemleri geliştirileceğini belirtmişlerdir (Okokpujie, Salawu, Nwoke, Okonkwo, Ohijeagbon ve Okokpujie, 2018).

Nguyen ve Muthuramalingam 2020 yılında yaptıkları çalışmada, silikon çeliğin işlenmesi prosesinde daha iyi sonuçlar alabilmek optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, Taguchi-Veri Zarflama Analizi (DEAR) tabanlı çoklu silikon çeliğin düşük seviyede işlenmesi için optimum kombinasyonda proses parametrelerini elde etmek için kriter karar verme önerilmiştir. Deneysel araştırmalardan, optimum proses parametreleri kombinasyonu, işleme prosesinde seçilen parametreler arasında I (6A), Ton (50 μ s), Toff (25 μ s) ve F (256 Hz) olarak bulunmuştur. Yıkamanın önemi nedeniyle ultrasonik titreşim destekli EDM işleminde titreşim frekansı daha baskın bir faktöre sahiptir. Daha yüksek mikro sertlik ve daha düşük mikro çatlaklar ile daha iyi yüzey topografyası elde edilmesi mümkündür (Huu Phan ve Muthuramalingam, 2020).

Herhangi bir malzemenin işlenmesi veya tornalanması sırasında titreşimler malzemenin ömrünü belirlemede çok önemli bir rol oynamaktadır. Titreşimlerin büyüklük ivmesi doğrudan kesme kuvvetleriyle orantılıdır. Diğer bir anlatımla eğer ivmeyi ölçebilirsek takımın talaşlı imalat işlenmesi sırasında ortaya çıkardığı bir kuvvet elde edebiliriz. Shankar ve arkadaşları bu çalışmada ADXL335 ivmeölçer kullanarak titreşimleri ölçmüşlerdir. Bu ivmeölçer, Arduino vasıtasıyla bilgisayar ara yüzüne aktarılmıştır. Ölçülen değerler ile daha sonrasında işlem süreci optimize edilmiştir. İşleme sırasında, daha düşük hızlanma

değerlerine sahip olunmasıyla daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü, ne kadar az ise kriterinin geçerliliğinin o kadar fazla olacaktır. Çalışmada takım tipi, kesme derinliği ve ilerleme dikkate alınarak değerlerin optimize olabilmesi için üç faktörlü L18 ortogonal dizisi ile Taguchi analizi kullanılarak bir deney yapılır (Shankar, Chand, Rao ve Sai, 2018).

Herhangi bir makinenin işleme özelliklerini anlamının yolu en iyi malzemeyi seçmektir. Mevcut çalışmada B. Singaravel ve T.Selvaraj proses parametrelerinin kesici takım titreşimi üzerindeki etkisini Taguchi yöntemi kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Sinyal-Gürültü oranı (S / N) ve Varyans Analizi (ANOVA) yapılarak optimum proses parametreleri seviyesini ve önemli parametreleri belirlemişlerdir. Kesici takımlarda titreşim analizinin etkisinde baz alarak, 215 m/dak kesme hızı, 0,07 mm / dev ilerleme hızı ve 0,5 mm'lik kesme derinliği, işlem parametrelerini hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar Taguchi yöntemi ile doğrulanmıştır (Singaravel ve Selvaraj, 2016).

Uç frezeleme sırasındaki titreşim yıkıcı bir etkiye neden olur. Zayıf yüzey kalitesi oluşturur, takım aşınmasını hızlandırır ve takım ömrünü azaltmaktadır. Uç frezeleme işlemi sırasında azaltılmış titreşim genliği çok büyük bir öneme sahiptir. Sivasakthivel ve arkadaşları çalışmalarında L25 Taguchi ortogonal tasarımı modellemişlerdir. Çalışmalarını yüksek hızlı çelik uç freze bıçağıyla alüminyum Al 6063 üzerinde gerçekleştirmişler ve ivme genliğini hızlı Fourier dönüşüm analizörü kullanılarak ölçmüşlerdir. Titreşim genliği için kaydedilen çevrimiçi sinyaller ivmeölçer tarafından iki konumda toplanmış ve biri iş miline sabitlenmiş ve diğeri ise iş parçası fikstürüne sabitlenmiştir. Optimum seviyeleri belirlemek için sinyal-gürültü oranı ve varyans analizi kullanılmışlardır. Her iki yanıtı da dikkate alarak işlem hesaplaması yaptıklarında bahsi geçen parametrelerin optimize olduğunu belirtmişlerdir (Sivasakthivel ve diğerleri, 2013).

Swain ve diğerleri düşük karbonlu çeliklerin kuru tornalaması sırasında meydana gelen titreşimlerin ürün kalitesini ve verimliliğini ciddi bir şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Bu titreşimler özellikle büyük çaplı endüstrilerde büyük bir sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle titreşimi azaltmak ve daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için bazı çalışmalar yapılmaktadır. Samarjit Swain ve arkadaşları kaplamalı karbür uç ve Taguchi L9 ortogonal deney tasarımını dikkate alarak bir çalışma yapmıştır. Yaptıkları çalışmada kesme hızını maksimumlarda tutarak titreşim genliği artmışlardır. Titreşimin maksimum seviyesinde ve

kesme derinliğinin artışıyla birlikte bir yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelmiştir. Genlik ile ilgili olarak kesme derinliği ve kesme hızının en baskın kesme parametresi olduğu ortaya çıkmışlardır. Elde ettikleri verilerin analizi ile kullanan çoklu yanıtlar için en uygun parametreleri bulmuşlardır (Swain, Chatterjee, Panigrani ve Sahoo, 2018).

2.3. Tornalamada Aktif Titreşim Kontrolü

Günümüzde talaşlı imalat ile üretimde meydana gelen titreşimleri elemine etmek için kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı imalat esnasında oluşan titreşimlerin tespit edilmesinin ardından frekans ve genliğe uygun yay ve sönüm elemanı tasarımı gerçekleştirilmesidir (Grzesik, 2017).

Kesici takım üzerinde meydana gelen ve sürekli artan titreşim değerlerini ölçmek için yapılan bir çalışmada Jang ve Tarng, piezo-elektrik sensörler kullanmışlar ve kesici takımda meydana gelen kontrollü ve kontrolsüz titreşim frekanslarını ölçmüş ve karşılaştırmışlardır. Kontrollü titreşim frekans değerlerinin kontrolsüz titreşim frekans değerlerinden %90 daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada, aktif kontrol ile kesici takımda meydana gelen titreşimlerin %90 kadar azaltılabileceğini belirtmişlerdir (Jang ve Tarng, 1999).

Aktif sistemlerde en çok kullanılan teknolojiler piezoelektrik ve sağlam olduğunu kanıtlayan elektromanyetik aktüatörlerdir (Neugebauer, Denkena ve Wegener, 2007; Sims, Bayly ve Young, 2005). Akıllı malzemeler ve akışkanlar da titreşim sönümlenme uygulamalarında görülen yöntemler arasında yer almaktadır. Bu tür uygulamalar genellikle yarı aktif uygulamalardır ve uygulamada dışardan bir kuvvet uygulanması söz konusu değildir (Preumont, 2011).

Bu yöntem imalat esnasında doğan titreşimlerin tamamını elemine edemediği için yeni yöntemler arayışı içine girilmiş ve aktif titreşim sönümlenme metodu en uygun yöntem olarak görülmüştür. Bu yöntemde imalat esnasında oluşan titreşimlerin tespiti için titreşim ölçüm sensörleri kullanılmaktadır. Sensörden gelen bilgiler kontrolcüye gönderilmekte ve kontrolcüden çıkan bilgiler doğrultusunda eyleyicilere titreşimi yenecek tepkiyi oluşturabilmesi adına bilgi gönderilmektedir.

Chengezhe ve arkadaşları bu çalışmada geleneksel dişli işleme yöntemlerinin sarmal dişli işleme yönteminde büyük dişliler için uygun olmadığı ve sarmal dişlide yüzey frezeleme yönteminin en uygun yöntem olduğu belirtilmiştir. Bu yöntemin aynı zamanda maliyeti düşürdüğü iddia edilmiştir. Kullanılan hızlı sinüs süpürme programı analiz yöntemiyle yüzey frezeleme sisteminin kesme titreşimi üç farklı X, Y, Z yönünde boşluğu saptandı. Yapılacak olan bu analizle gelecekte yapılacak olan çalışmanın temelleri atılmış olacaktır (Jin, Guo ve Gao, 2017).

Rejeneratif kavrama titreşimi, ürün kalitesini ve üretim miktarını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu problemten yola çıkılarak yapılan çalışmada, Ma ve arkadaşları, problemi önlemesi adına farklı bir yol önermişlerdir. Kullanılan yöntemde dinamik çıkış geri sürgülü yüzeyi ile rahatsızlık tahmini arasında denge kurulmaya çalışılmış ve deney başarılı olmuştur. Kavrama gürültüsünün azaltılmaya çalışılmasıyla deney öncesi belirledikleri hipotezin doğru olduğu kanıtlanmıştır (Ma ve diğerleri, 2017a).

Zhen Wang ve arkadaşları hâlihazırda yüzen bir salda yapılan deneyle geri besleme döngüsü ve ivmeölçere atalet aktüatörü bağlanmış ve bu deneyle aktif titreşim kontrolü amaçlanmıştır. Yapılan deneyde minimum güç iletimi kuralı esas alınarak atalet aktüatörü için en iyi montaj pozisyonunun hangisi olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney sonucunda en iyi yolun otomatik kontrol sistemi olduğu söylenmiştir (Wang ve Mak, 2018).

Alujevic ve diğerleri yaptıkları çalışma ile iki serbestlik derecesi ilkesi bazında mekanik bir düzende pasif-aktif olarak çalışan titreşim şemaları üzerinde denenmiştir. Çalışmanın yapıma amacı, basit düzeyde saydam maddelerle var olan titreşim kontrol sistemlerinin kabiliyetlerinin ve sınırlarının ne olduğunu saptamaktır. Yapılan çalışmada alt kritik titreşim izalasyon problemleri görülmüş olup bu problem zayıf istikrar marjlarıyla ilişkilendirilmiştir. Çalışmanın katkısı akış eylemsizliği bağlamında anlaşılır bir şekilde ifade edilmiştir (Alujevic ve diğerleri, 2018).

Gaz türbini çarklarının yan frezelemesinde kullanılan büyük eksenel kesme derinliği, kuvvetli kavrama titreşimi titreşimlerine ve yüksek kesme kuvvetlerine sebep olduğu ilkesinden yola çıkılarak yapılan E. Budak bu çalışmada, değişken adımlı kesicilerin esnek bileşenlerinin frezelenmesinde kavrama titreşimini bastırdığı ileri sürülmüştür. Çalışmada değişken adımlı kesiciler için yeni bir yöntem tasarlanmıştır. Kullanılan freze kuvvet

modelleri ve uyarlama güç kontrolleri durağanlığı ölçmüş hangisinin daha uygun olacağını çeşitli örneklendirmelerle göstermiştir (Budak, 2000).

Makalelerinde mekatronik sistemlerdeki en son gelişmeleri derleyen Neugebauer ve arkadaşları metal kesme ve şekillendirme bağlamında inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Örnek olarak sunulan statik, dinamik ve termal hataların hassas olarak konumlandırılmasına ek olarak Mekatronik Bileşenler verilmiştir. Yapılan çalışmada manyetik ve elektro hidrolik aktüatörlere özellikle vurgu yapılmıştır. Makalenin sonucu mevcut olarak karşılaşılan üretim sistemlerindeki engellerle sonuçlanmıştır (Neugebauer ve diğerleri, 2007).

Yasuhiro ve arkadaşları parça ömrünün uzun olması adına kavrama titreşimlerinin aynı zamanda talaşlı üretim içinde önemli olduğunu vurgulamışlardır. Yapılan bu çalışmada masaüstü boyutlu torna makinesinde kavrama titreşimlerinin bastırılması için üç yüz test yapılmıştır. Çıkan sonuç ise bant sınırlı çalışan kontrollü yapıda dişlinin aşınmasını önlemiştir (Kakinuma, Enamoto, Hirano ve Ohnishi, 2014).

Ağır frezeleme işlemlerinde, tezgahın yapısından kaynaklanan kavrama titreşimlerinin engelini ortadan kaldırmak ve verimliliği arttırmak istenirse pasif-aktif damperler eklenmelidir. Jokin Munua ve arkadaşları bu çalışmayla birlikte bu dezavantajları kaldırmak için tezgah üzerine kurulacak ivme ölçer kullanılacak ve durağanlık ya da artış bu deneyle gösterilecektir (Munua ve diğerleri, 2015).

Zaeh ve arkadaşları bu çalışmada, makine dinamiklerinin otomatik olarak açıklanmasını ve aynı aktüatör ve titreşim sensöründen yararlanılarak kontrolörün otomatik şekilde ayarlanmasını içermektedir. Çalışmada önerilen yöntem, basit ve gelişmiş farklı kontrolörler ile deneysel bir yaklaşımla incelenmiştir ve bu da tıkrıtlardan arındırılmış malzeme çıkarma oranlarında bariz bir şekilde artış gözlemlenmiştir (Zaeh, Kleinwort, Fagerer ve Altintas, 2017).

Ikegame ve arkadaşları sensörsüz bir elektromanyetik dönüştürücünün parametrelerini tespit etmek için bir yöntem önermişlerdir. Önermiş oldukları yöntem, elektromanyetik dönüştürücünün ölçülen kısmını kullanmaktır. Bunu yaparken normalden farklı olarak konum, hız veya ivme sensörleri ihtiyaç dışı kalmıştır. Önerilen tespit yönteminin ve modellerin geçerliliği, önerilen modellerin parametre tespiti ve titreşim kontrol

kabiliyetlerini üç farklı geleneksel modelle karşılaştırarak deney yoluyla açıklanmıştır (Ikegame, Takagi, Inoue ve Jikuya, 2017).

Yeni geliştirilen damper ile viskoelastik dört elementli bir modelle simüle edilmiştir. Yapılan modelin doğrusal olmaması sebebiyle, model için devinimli bir zaman alanı hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Kotaro Mori ve arkadaşları bu yöntem ile damperin takım tezgahı üstündeki etkisinin miktarını tahmin etmemizde yardımcı olur. Örnek gösterilen modelden yola çıkılarak, kullanılması istenilen damper sistemi, deneme yanılma yoluyla takım tezgahındaki damper alanını ayarlamaya gerek kalmadan kalan titreşimi azaltmak için birbirinden farklı takım tezgahları üzerinde kullanılabilir (Mori, Kono, Yamaji ve Matsubara, 2017).

Olejarova ve arkadaşları bu çalışmada daha önce yapılmış malzemelerin frezelenmesi ve işlenmeleri konusunda yapılmış olan çalışmaların değerlendirildiği bir rapordur. Rapor üç farklı kesici dönme yönünde titreşim yönünün tespitinin analizini yapmıştır. Ele alınan diğer konular ivmenin zaman seyri, titreşim sinyalinin tanımlamaları, kesme derinliği, dönme frekansı gibi parametreler etrafında incelenmiştir (Olejárová, Dobransky, Svetik ve Pituk, 2017).

Bu makalede farklı delme parametreleri olan iş mili hızı, sarmal açısı ve besleme hızı gibi nin yüzey pürüzlülüğü, yan aşınma ve matkap titreşim hızının ivmesi üzerindeki etkisi yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılarak araştıran M.Balaji ve arkadaşları, matkap ucundaki titreşiminin sinyal ölçümü Acousto optik emisyon (AOE) için bir lazer Doppler Vibrometresi (LDV) yapılmıştır. Ölçülen sinyaller farklı sinyallere dönüştürülmüştür. Deneysel bulgular, yüzey pürüzlülüğü, yan aşınma ve matkap titreşim hızının artması parametreleri belirlemek için yanıt yüzey metodolojisi (RSM) yardımıyla analiz edilmiştir (Balaji, Rao, Rao ve Murthy, 2018).

Manyetoreolojik (MR) elastomerlere dayalı aktif titreşim yalıtım platformunu bu çalışmada açıklamaktadır. Valery P. ve arkadaşları bu çalışmanın amacı en önemli aktif damper parametrelerinin deneysel çalışmalarının sonuçlarını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak en önemli parametreleri başlangıç akımı, adım için geçici zaman, titreşim yer değiştirme genliğinin iletim katsayısı olarak bulgulanmıştır (Mikhailov ve Bazinenkov, 2017).

Yüksek rotorların en büyük sorunlarından olan rotor kararsızlığı kaymalı rulmanlar tarafından desteklenir. Bu sorun bağlamında yapılan bu araştırmada Jiri Tuma ve arkadaşları çalışmanın amacını shaft yatağı çalışma hızı aralığını genişletmek için pek çok alternatif yöntem olmasına karşın piezoaktörler yardımıyla aktif titreşim kontrolü sadece kağıt üzerinde kalmasını önlemektir. Yapılan deney çalışmasıyla Piezoaktörler tarafından üretilen ve sinyaller üzerinde hareket eden kuvvet, proximity prob çıkış noktasından elde edilen hata sinyallerine göre kontrol edildiği görülmüştür. Yapılan deneyden elde edilen sonuç aktif titreşim kontrolü çalışma hızı aralığını büyük ölçüde genişlettiği görülmüştür (Tuma ve diğerleri, 2013).

Kavrama titreşimleri verimli üretkenliğin önündeki büyük bir engeldir. Bu engel bağlamında sayısız araştırma yapılmıştır. M. Siddhpura ve arkadaşları bu çalışmada kavrama titreşimlerinin tornalama işleminin gerçekleştirmek için kavram titreşim durağanlığının tahmini ve tespitinin kontrolü bağlamında alanda yapılan çalışmalara göz atmışlardır. Göz atılan çalışmaların sonucunda en iyi-faydalı yöntemin tespitini yapmak adına farklı kavrama titreşimi teknikleri ve kavrama titreşimi tahminleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar sayesinde kavrama titreşimi-araç yıpranmalarındaki durumlar arasında teorik temellerle ilişkilendirmeler yapılmıştır (Siddhpura ve Paurobally, 2012).

Yüzey oluşumunu etkileyen en önemli etmenlerden birisi olan UPM (Ultra hassa işlemede titreşim) fiziksel bir terimdir. Zhang ve arkadaşları pasif titreşimi merkezine alarak UPM özellikleri ve titreşimin yüzeyde meydana getirdiği etkileri ortaya koyan çalışmalardan en güncel olanlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda araştırmacıların karşılaştığı engeller ve yeni yapılacak olan araştırmalara tavsiye verir nitelikte bir çalışma olmuştur. Çalışmanın sonucunda UPM'de titreşimin etkilediği yüzey kalitesini daha iyi hale getirmek için aktif titreşim yönteminin kullanılabilmesi öngörülmüştür (Zhang ve diğerleri, 2015).

Sürekli değişen kesme kuvveti, frezeleme işlemlerinde, işleme kalitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Weijian Huang ve arkadaşları ele alınan silindirik uç frezeler için yeni bir kesme kuvveti modeli ortaya atmış, uç frezeyi dairesel yönü boyunca ayırdığı görmüşlerdir. Kesme kuvveti tahminini daha basit hale getirmek ve modele bağlı dalgalanmanın tahmini bağlamında analitik bir endeks oluşturulmuştur. Önerilen endekse göre eksenel kesme derinliğinin kesme kuvveti ve dalgalanma üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Analitik

endeksin çalışma öncesi yapılan tahminleri freze deneyleri ile doğrulanmıştır (Huang ve diğerleri, 2016).

Kesici bir alet üzerinde yapılan deneyde piezoelektrik aktüatörü aktif titreşim damperi gibi hareket ettirilmiştir. Yapılan bu deneyle Jang ve arkadaşları aktüatör rezonansı, atalet kütlelerini üzerinde boyutunu ve konumunu ayarlayarak titreşim şiddetini düşürmede azaltıcı bir etkiye sahip olduğu göstermişlerdir. Çalışmanın sonucu deneysel yöntemin sonuçları yardımıyla açıklamıştır (Jang ve Tarng, 1999).

Döner ahşap rendelemede sorun yaratan iki etken zorla yapısal titreşim ve kesici takım yanlışlığıdır. Bu iki olumsuz etken ele alınarak bu etkenlerin rendelenmiş ahşap yüzey üzerindeki olumsuz etkilerini telafi etmek adına bir kontrol mekanizmasını ele almıştır. Çözüm önerisi olarak ileri sürülen teknik gerçek zamanlı değişimine dayanan optimum doğrusal karesel Gauss izleme kontrolcüsü ve aktif titreşim yöntemleri düşünülmüştür. Philipss S. Ogun ve arkadaşları tekniğin pratik olarak denenmesiyle olumlu sonuçlar elde edilmiş makinenin dinamik performansı ve yüzey kalitesinde artış gözlemlenmiştir (Ogun ve Jackson, 2017).

Xingwu Zhang ve arkadaşları kavrama titreşiminin olumsuz etkilerini azaltmak adına yapılan bu deneyde basit bir model kurularak aktif kontrol kuvveti ile frezeleme dinamik denklemleri arasındaki bağıntı doğrusal zaman değişimi bağlamında incelemiştir. Kurulan modelde pertürbasyon modellemesi ve frezeleme parametreleri belirlenip analizi yapılmıştır. Pertürbasyon modellerine dayanarak, kontrol algoritması oluşturulmuştur. Modelin denenmesi sonucunda oluşturulan algoritmayla kavrama gürültüsünü büyük ölçüde bastırması ve çalışma sonuçlarının olumlu olduğu gözlemlenmiştir (Zhang ve diğerleri, 2019).

Kavrama titreşimlerinin olumsuz etkilerini azaltma adına deneysel bir yöntemle standart kontrol parametrelerinin ve ek hızlanma geri besleme kontrolcüsünün makinenin frekans tepkisi gözlemleyen Oier Franco ve arkadaşları elektronik olarak daha önceden hazırlanan raf ve pinyon üzerinde deney gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarla, dinamik sistem üzerindeki açık-kapalı döngü frekans fonksiyonları ölçülmüş, çoklu giriş-çıkış sisteminin kontrol yapısını temsil eden doğrusal kesirli sonuçlar kullanılarak hesaplanmıştır (Iker Mancisidor, Sevillano, Barcena, Franco, Munoa, Lacalle, 2019).

Suresh ve arkadaşları PID kontrol cihazı ile iki derecelik bir serbestlik modeli geliştirmek amacıyla yapılan bu çalışma tornalama ile işleminde gürültüyü büyük ölçüde azaltmayı amaçlamıştır. Deney için oluşturulan sistemin bölümleri iş parçası alt sistemi ve bir kesme aleti alt sistemi ve sistem modelinden oluşmaktadır. İşlem için yay ve damper olarak etkili kesme sertliği ve etkili kesme sönümlemesi kullanılmıştır. Deney çıktıları matlab uygulaması yardımıyla bulunmuştur (Suresh Prabhu, Prathipa ve Shanmugasundaram, 2016).

Munoa ve arkadaşları tarafından kavrama titreşiminin parça yüzeyini zedelemesinden yola çıkarak kavrama gürültüsünün azaltmanın alternatif teknikleri incelenmiştir. Tasarım ve kontrol yaklaşımlarına sahip süreç çözüm önerileri, kesme işlemini durağan hale getirmek için etmek için mevcut yöntemlerin görünürlüğüne sağlamak için bir araya getirilmiştir. Her tekniğin geçtiği yol, çalışmadaki en önemli kilometre parçalarını ve buna karşılık gelen endüstriyel uygulamaları göz önünde bulundurularak gösterilmektedir. Farklı kavrama titreşimleri ortaya çıkaran teknikler göz önüne alınarak her biri için ayrı bir çözüm önerisi önerilmiştir (Munoa ve diğerleri, 2016a).

2.4. Tornalamada Durum İzleme-Görüntüleme

Akıllı ve ileri imalat teknolojilerinin gelişiminde önemli bir paya sahip olan Nesnelerin İnterneti-Internet of Things (IoT) çalışmalarının uygulama alanı gün geçtikçe daha da artmaktadır. Temelinde sensörler, yazılımlar ve diğer fiziksel nesnelerin arasında internet bağlantısı yardımı ile haberleşme ve veri alışverişi sağlayan sistemler olarak da tanımlanan IoT, ‘Gerçek Zamanlı Durum İzleme’ ye de olanak sağlamaktadır (Cheng ve diğerleri, 2016). 4. Endüstri devriminin gerçekleşebilmesi için önemli bir evre olarak görülen IoT; akıllı ev, yaşlı bakımı, tıp ve hasta bakımı, taşıma, bina ve ev otomasyonları, tarım, enerji yönetimi, şehir planlama, askeri uygulamalar, ürün dijitalleştirme, mimarlık ve çevre izleme gibi birçok alanda kullanılmasının yanı sıra Endüstriyel IoT (IIoT) adı ile imalat sektöründe de önemli bir paya sahip olmaya başlamıştır (Thoben ve diğerleri., 2017).

Günümüzde teknoloji gerçek anlamda gelişmiştir hatta bu teknolojilerden en önemlisi yapay zeka diyebiliriz. Yapay zeka dediğimiz kavram, sayısal bir zeka örneği olarak tanımlanır. Teknoloji alanında yapay zekanın yeri büyüktür nedeni ise veriler yardımıyla,

programlanmaya gerek kalamadan verilen görevi öğrenip kendini geliştirebilmesidir (Yang ve diğerleri, 2019).

Kim ve arkadaşları yazdıkları makalede yapay zeka kullanımıyla ürün üretiminde kalite ve verimliliğin olumlu sonuçlarının neler olduğunu göstermektedir. Akıllı işleme yöntemi ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışma yapay zekaların çalışırken algoritmaların nasıl kullanıldığına dair bir inceleme yapmış ve bu çalışmanın sonuçlarını okuyucularıyla paylaşmıştır (Kim ve diğerleri, 2018).

Hızla gelişen modern imalat teknolojileri ve bununla birlikte hızla büyüyen endüstrisi, yaşanan sistem karmaşıklığıyla başa çıkmak, bilgilerin şeffaflığını ve görünürlüğünü artırmak, üretimde kaliteyi ve verimliliği arttırmak, üretim performansını iyileştirmek ve açık küresel pazarda rekabet avantajları sağlamak için Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri analitiği, bulut bilişim ve siber güvenlik gibi yeni teknolojilere ciddi anlamda yatırım yapıyor (Yang ve diğerleri, 2019).

Bir montajda kullanılan üretim parçalarının durum takibi ivmeölçer ve radyo frekansı ile tanımlama (RFID) yardımıyla yapılır. Durum takibi genel anlamıyla parçanın ömrü, aşınma oranı vb. bilgileri veri tabanına işler. Muhammed Nabeel ve arkadaşları çalışmalarında RFID yardımıyla veri tabanına kaydedilen bilgilerin verimlilik ve parça kalitesinin nasıl yükseltilebileceğine dair bilgi vermek amacıyla yazılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntem titreşim yardımıyla parçanın kalitesini ve aşınma oranını takip etmektir. Sonuç olarak kaydedilen veriler yardımıyla parçaların durum takibi yapılabilmüş ve parçalara müdahale zamanında yapılabilmüşür (Nabeel, 2019).

İnternetin bilgisayar, tablet ve cep telefonu bir çok ağlarından insan ağlarına, akıllı ve bağlantılı üretim ağlarının (örneğin, malzemeler, sensörler, ekipman, insanlar, ürünler ve tedarik zinciri) en son çağına evrimini tartışır hale geldik (Harja, Prakosa, Martawirya, Nurhadi, Januartha, 2019). Li ve arkadaşları üretimde para tasarrufu ve güvenli üretim yapmak adına makine ekipmanlarının düzenli takibinin yapılmasının önemi üzerinde durmuşlardır. Çalışmanın amacı hem para tasarrufu sağlayacak hem de güvenli bir şekilde üretim yapmak adına makine parçalarının takibinin önemini vurgulamaktır. Çalışmada kullanılan yöntem dar bant nesnelerin interneti yöntemiyle parçalarının takip edilmesini ön görmüştür. Konuyla ilgili ufak bir deney yapılmış normal ve bıçak dengesizliği koşullarında

küçük bir soğutucu yardımıyla doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucu, parça takibinde önerilen yöntemin başarılı olduğu, güç tasarrufu sağlandığını ve sistemin uzun süre çalıştığını yapılan deneyle kanıtlamıştır (Li ve diğerleri, 2020).

Taşınabilir teknolojik aletlerin çoğunda hareket takibi için ivmeölçer bulunur. Bu çalışmada Ivar Koene ve arkadaşları Memsio (MEMS) çok yönlü kablosuz ivmeölçerini tanıtmak amaçla yazılmıştır. MEMS sayesinde farklı hareketler saptanabilir. Yapılan bu çalışmayla MEMS ivmeölçeri internet tarayıcı üzerinden çalıştırılmış bağlandığı telefonun takibini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlarla uzaktan takibin işlevselliği üzerine bulunan verilen paylaşılmıştır (Koene, Klar ve Viitala, 2020).

Yeni nesil akıllı üretim dediğimiz şey aslında üretim işletmelerini sanal işletmelerle bütünleştiren bir siber-fiziksel sistemdir. Çok büyük ölçüde, siber-fiziksel sistemlerin tam olarak potansiyeliyle birlikte gerçekleştirmek, veriye dayalı mühendislik yenilikleri için Üretim Nesnelerinin İnternetinde (IoMT) yeni metodolojilerin geliştirilmesiyle mümkün olacaktır (Yang ve diğerleri, 2019).

Seri üretimde servo baskı ve bilgisayar teknolojilerinden faydalanılarak metal şekillendirmede yeni bir fikir ortaya atılmıştır. Min Yang bu çalışmasında metal şekillendirme alanındaki girişimleri inceleyip değerlendirmektedir. İncelemeyi yaparken kullanacağı yöntem servo pres ve internetlerin nesnesinde faydalanmıştır. Çalışmanın sonucu servo pres ve internetlerin nesnesinin uygulama alanlarını görüp incelenmesi olmuştur (Cheng ve diğerleri, 2016).

Sanal bir üretim ağı geliştirmek için IoT ve bulut bilişimden yararlanan yeni bir çerçeve yaratılmaktadır. Yapılan araştırmalar ve çalışmalar neticesinde işletmeler için büyük önem taşıyan IoT siber güvenlik konularının yanı sıra akıllı fabrikanın geleceği içinde dünya çapında hükümetler tarafından belirlenen IoT ve akıllı üretim politikaları genişletilmektedir (Yang ve diğerleri, 2019).

Bulut üretimi, tıpkı nesnelerin interneti ve RFID gibi üretim kaynaklarının nasıl kullanılabilmesine dair bir hizmet paylaşımı uygulamasıdır. Bu makale bulut üretimi, internetlerin nesnesi ve RFID teknolojilerinin araç takibinde neden ve nasıl kullanıldığını açıklamak için yazılmıştır. Bulut üretimi olan bir mağaza katına internet nesneleri cihazı

yerleştirilmiş ve makine verileri yakalanmıştır. Çalışmanın sonucunda, bulut üretimi sistemi yakalanan veriler yardımıyla tasarlanıp geliştirilmiştir (Zhong, Wang ve Xu, 2017).

Çeşitli endüstrilerdeki kurumlar/kuruluşlar daha verimli çalışmak, daha iyi ve kaliteli müşteri hizmeti sunmak, karar vermeyi mekanizması oluşturmak ve geliştirmek, yapılan işin değerini ve kalitesini artırmak ve son dönemlerde en önemli konulardan olan müşterileri daha iyi anlamak için IoT teknolojisini ciddi bir oranda kullanmaktadır (Zhong ve diğerleri, 2017).

Makine öğrenme günümüzde oldukça popülerdir. Perez ve diğerleri makine algoritmalarını öğrenerek nasıl çalıştıklarına dair çıkarım yapmak üzerine bir araştırma makalesi yapmışlardır. Makalenin alanına yaptığı katkı makine çalışmasını detaylı bir şekilde öğrenilmesi ve makinelerin insan hayatını nasıl kolaylaştırdığını göstermek olmuştur (Preez ve Oosthuizen, 2019).

Nesnelerin sistemi algıladığı, nesnelerin haberleştiği, verilerinin kayıt alındığı, hedefin doğru adrese yönlendirebildiği vb. yetenekleri nedeniyle birbiriyle iletişim halinde olması, hızla büyüyen teknoloji ile birlikte çok uzun bir zamandır hayatımızdadır (Iluore, Mamudu Onose ve Emetere, 2020).

Endüstri 4.0 hedeflerine ulaşmak için yazılan bu çalışma aynı zamanda otomatik sanal metroloji teknolojisinin uygulama alanı bulduğu, hatasız gelişmiş üretim bulutu (AMCoT) adlı bir yapı oluşturmayı planlamıştır. Otomatik sanal metroloji, endüstri 4.0 ile birlikte uygulama alanı bulması hedefine ulaşmak için endüstri 4.1 çağı yaşanmaktadır. Bu çalışmayla gelişmiş üretim bulutunun endüstri 4.1'nin tekerlek işleme özdevim uygulamasıyla uygulanmıştır (Cheng ve diğerleri, 2016).

Karma model tahmin yöntemi içerisinde veriye dayalı bir model ve dijital ikiz sistemini içerir, işleme araçlarında parçaların durum tahmini yapılması adına bu sistem bu çalışmada kullanılmıştır. Çalışmanın amacı imalat makinelerinde kestirici bakım için karma modelin çalışma üzerindeki etkilerini göstermektir. Model yapılırken veri analitiğinin 5D dijital ikiz modeli tanıtılmış ve daha sonra derin öğrenme tekniği ile parçaların durumu hakkında tahmin yürütülmüştür. Freze tezgahında denenen model titreşimleri kullanarak takım aşınma tahmininde bulunan dijital ikiz modeli sunulmuştur (Qiao, Wang, Ye ve Gao, 2019).

CNC araştırmacıları, sanal makine, kablosuz üretim ve bulut üretimi gibi yeni nesil çalışmalara odaklanmıştır. Bu çalışmalar üretimde verimliliği arttırmak ve maliyeti düşürmek adına önemlidir. Bu çalışmada veri değerlendirme modülü olan veri tabanı tasarlanmıştır. Çalışmada akıllı üretim süreci merkezli bir çalışmanın cnc araştırmacıları tarafından ele alınıp incelenmiştir. Uygulama verimliliğin iyi olduğu, çevreci parametreleri ön plana çıktığı karbon oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak akıllı üretim sistemi çerçevesinde hizmet temelli bir çalışma sunmaktadır (Li ve diğerleri, 2015).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. AA6013

Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında; iş parçası olarak, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan, 36 mm çapında (D), 150 mm uzunluğunda (L) ve 124 HB sertliğinde AA6013 alüminyum alaşımlı malzeme kullanılmaktadır. İş parçasının boyutları, ISO 3685 standardında L/D'nin 10'dan küçük olması gerekliliği ile seçilmiştir (Ambhore ve diğerleri 2020). 6XXX serisine bağlı Al-Mg-Si alaşım grubunda yer alan AA6013 Alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanabilme, yüksek korozyon direnci, yüksek kaynaklanabilmeleri ve kolay şekillendirilebilmeleri sayesinde imalat sanayinin vazgeçilmez malzemesi konumundadır (Zeid, 2019; Babu ve diğerleri, 2009; Çam ve diğerleri, 2008; Etyemez, 2019; Kotsiantis, 2007). AA6013 iş parçasının kimyasal bileşim bileşimi ve mekanik özellikleri sırası ile Çizelge 3.1' ve Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. AA6013 için kimyasal bileşim tablosu (%)

Fe	Si	Cr	Mn	Zn	Cu	Ti	Diğer
0,5	0,72	0,1	0,48	0,28	0,85	0,08	0,18

Çizelge 3. 2. AA6013 Mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	2,71
Özgül ısı (J/(g x K))	2,8
Isı iletkenliği (W/(m x K))	164
Elastikiyet modülü (KN/mm ²)	31
Poisson oranı	N.A.
Çekme mukavemeti Mpa	470
Akma mukavemeti Mpa	235
Uzama %	5

3.1.1. S235JR

YSA ve ÇLRM modeli kullanılarak yapılan parametre tahmini çalışmalarında alaşımsız yapı çeliği olarak da bilinen S235JR kaliteye sahip karbon çeliği kullanılmıştır. Yüksek korozyon direncine sahip bu çelik türü, makine imalatının yanı sıra raylı sistem araçları, petrokimya, elektrik, gıda ve gemi inşaatı gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bilgic, Guvenc, Cakir, Mistikoglu, 2019; Llumà, Gras, Mesa, Mascarell ve Rodriguez, 2020; Tabacaru, Axinte ve Musca, 2016). S235JR için kimyasal bileşim oranları ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’ de verilmiştir.

Çizelge 3. 3. S235JR için kimyasal bileşim tablosu (%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0,17	0,3	0,3	0,05	0,05	Kalan

Çizelge 3. 4. S235JR Mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	7,7
Özgül ısı (J/(g x K))	0,47
Isı iletkenliği (W/(m x K))	42,7
Elastikiyet modülü (KN/mm ²)	210
Poisson oranı	0,3
Çekme mukavemeti Mpa	392
Akma mukavemeti Mpa	379
Uzama %	7

3.1.1. Ti6Al4V

Aktif titreşim kontrolü ve IoT çalışmalarında iş parçası olarak kullanılan Ti6Al4V (Titanium Grade 5) Ti alaşımı, düşük özgül ağırlığı ve yüksek mekanik özellikleri sayesinde askeri ekipmanlar, donanma, koruma, havacılık-uzay, tıbbi teknoloji, ultrasonik gibi geniş yelpazede kullanım alanına sahiptir (Delijaicov, Yakabu, Macedo, Resende, ve Batalha, 2018; Li ve diğerleri, 2019). Ti alaşımları genellikle faz dönüşümlerine göre rağbet seçilmekte olup Ti6Al4V alaşımı α/β grubuna girmektedir. Bu alaşım, Ti alaşımları arasında genellikle uçak iniş takımları, gaz türbinleri, implant uygulamalarında görülmektedir. Ti6Al4V alaşım sıklıkla döküm, dövme ve talaşlı imalat yöntemleriyle imal edilmesinin

yanında toz metalürjisi ile de üretildiğini görmek mümkündür (Singh, Kartik, and Singh, 2015). Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6' de verilmiştir.

Çizelge 3. 5. Ti6Al4V için kimyasal bileşim tablosu (%)

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
5,5-6,5	3,5-4,5	0,08	0,25	0,13	0,03	0,012	Kalan

Çizelge 3. 6. Ti6Al4V Mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	4,45
Özgül ısı (J/(g x K))	0,56
Isı iletkenliği (W/(m x K))	7,1
Elastikiyet modülü (KN/mm ²)	114
Termal uzama (10 ⁻⁶ /K)	8,9
Çekme mukavemeti Mpa	892
Verim limiti Mpa	828
Uzama %	10

3.2. Veri Toplama

Tez kapsamında Ti6V4Al alaşımının tornalanması esnasında oluşan titreşim verilerinin toplanması esnek, modüler, genişletilebilir ve güvenli bir çalışma ortamı sunan Dewesoft/SIRIUS ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). SIRIUS' un en büyük özelliği, ölçüm işlemi esnasında sıklıkla karşılaşılan hataları önleyen, kullanımı basit ve kullanıcı dostu veri işleme yazılıma sahip bir cihaz olmasıdır.



Şekil 3.1. Dewesoft veri toplama cihazı

Veri toplama sistemi, toplam 8 kanala sahip olup DC (Doğru Akım) veya AC (Alternatif Akım) beslemeye uygundur, CAN BUS ve ethernet girişi mevcuttur. Veri toplama sistemi, bilgisayar ile USB veya EtherCAT üzerinden bağlantı sağlayabilir. Windows'a uygun çalışır ve özgün yazılımı ile veri toplama esnasında veya sonrasında verilere müdahaleye olanak sağlar. Yüksek yalıtkan özelliği sayesinde; sistemin aşırı voltajdan zarar görmesini ve veri içerisinde görülebilecek parazitleri(çivi, veri kayması vs) önlenmiş olur. Tek bir kanaldan veya aynı anda sekiz farklı kanaldan veri toplanabilir. Her bir kanal için 3 dijital kanal ve döngü sayacı mevcuttur. Böylelikle periyot, hassas frekans, açı ve görev çevrimi gibi ölçümler hassas şekilde yapılabilmektedir. $\pm 10V$ sinyal çıkışı ile kontrol cihazı olarak da kullanıma müsaittir. Her bir kanal için 200 kHz örneklemeye sahip olup istenilen aralıkta veri toplama ve istenen matematiksel formüle bağlı olarak eşzamanlı görüntüleme ve kaydetme özelliğine sahiptir. DewesoftX yazılımı arayüzü, hızlı fourier dönüşümü (FFT/Fast Fourier Transform), güç spektral yoğunluğu analizleri (PSD/Power Spectral Density), oktav analizleri, yorulma analizleri, rainflow yöntemi ile çevrim sayma, rotor balans kontrolleri, motor yanma analizleri, istatistiksel analizler ve NVH (Noise, Vibration ve Harshness) analizleri gibi çalışmalara olanak sağlamaktadır. SIRIUS veri toplama cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.7' de verilmiştir.

Çizelge 3. 7. Veri toplama cihazı teknik özellikleri

Dewesoft Sirius STGM

8 kanallı STGM (Voltaj, Strain, Potansiyometre, Akım, CAN BUS)

Her kanal için voltaj, ICP ve köprü modları

Strain gage için çeyrek, yarım ve tam köprü

Strain gage için shunt kalibrasyonu

2x24-bit çözünürlük

200 kHz örnekleme frekansı

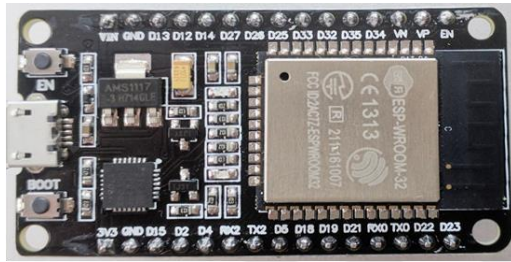
100 kHz bant genişliği

160 dB dinamik aralık

TEDS teknolojisi

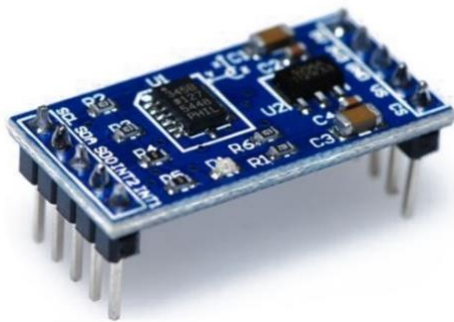
ESP32 mikrodenetleyici platformu, ultra düşük güç tüketimi olan ve 40 nm teknolojisi ile tasarlanmış kart üzerinde 2,4 GHz Wi-Fi ve Bluetooth gibi kablosuz, SPI (Serial Peripheral Interface), Entegre Devre (I²C), Evrensel Asenkron Alıcı/Verici (UART) gibi kablolu

haberleşme bağlantıları sağlayabilen birleşik bir yongadır (Espressif, 2019). Çift çekirdeğe sahip olan ve 80 MHz ile 240 MHz aralığına kadar ayarlanabilen saat frekansına sahip bir mikrodenetleyicidir (Espressif, 2019). Harcadığı ultra düşük güç, sağladığı RF (Radyo Frekans) performansı ve güvenilirliği ile çok çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. ESP32 mikrodenetleyicisi; mobil (Maier, Sharp ve Vagapov, 2017), giyilebilir elektronik (Kodali, Yerroju ve Yogi, 2019) ve nesnelerin interneti (Kurniawan, 2019) uygulamaları için tasarlanmış olup sahip olduğu son teknoloji özelliklere göre ucuz bir platformdur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. ESP32 mikrodenetleyici platformu

ADXL345, 13 bit ile yüksek çözünürlüğe sahip, ± 16 g'ye kadar ölçüme izin verebilen, az yer kaplayan ve ince, 3 eksenli ve uygun fiyatlı bir ivmeölçerdir. İvmeölçerin dijital ivme verilerine bir SPI veya I²C dijital haberleşme protokolleri üzerinden mikrodenetleyici platformu vasıtasıyla erişilebilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. ADXL-345 ivmeölçer

Takım tezgahı üzerine gelen 3 eksenli ivme verilerini toplayabilmek için MEMS tipi PCB/3713B1130G marka ivme ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.4). İvmeölçer, ± 30 g ölçüm aralığına sahip olup parazit verilere ve dışardan gelebilecek etkilere karşı zarar görmemesi için titanyum kaplamayla üretilmiştir. İvme ölçer, 1 kHz'e kadar ölçüm frekansına sahiptir.



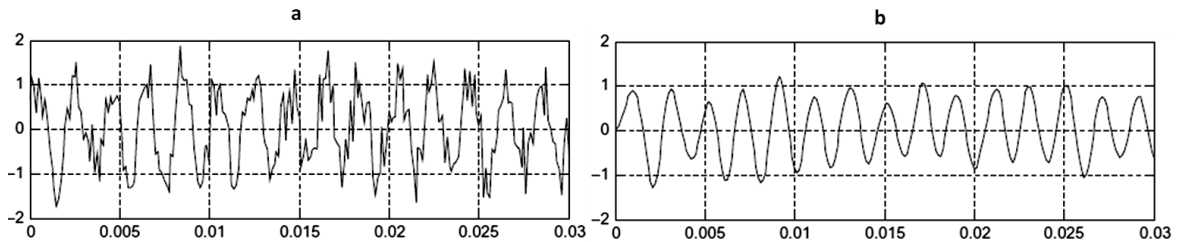
Şekil 3.4. MEMS tipi ivmeölçer

3.3. Verilerin İşlenmesi ve Analizi

Toplanan ham veri, istenen sonuca ulaşmak veya kontrol uygulamalarında kullanmak için yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle veri işleme çalışmaları; sinyallerin yeniden hesaplanması, filtrelenmesi, sinyal istatistiklerinin ortaya koyulması ve nihayetinde istenen sonuca ulaşılması adına önemli bir adımdır.

3.3.1. Verilerin filtrelenmesi

Sistemden toplanan ham verilerin kullanılabilmesi için sinyallerin temizlenmesi ve analiz edilmesi büyük önem arz etmektedir. Sinyal işleme çalışmalarının en temel uygulamalarından olan filtreleme, belirli frekansların azaltılması veya artırılması, sinyal genliğinin azaltılması veya artırılması, istenmeyen sinyallerin temizlenmesi ve analiz edilmesi gibi farklı amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Sistemden toplanan ham ses verisi (a) ve filtreleme sonrası son durum (b) Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Ses verisi için filtreleme örneği

Filtreler, istenmeyen frekans içeriğini azaltarak bir zaman alanı sinyalini koşullandırmak için de kullanılabilir. Aktif kontrol uygulamalarında, filtreleme işlemleri genellikle bir bozukluğu ortadan kaldırmak veya bir fiziksel sistemin tepkisini modellemek için kullanılmaktadır.

Günümüzde kullanılan pek çok filtre çeşidi olmakla birlikte en yaygın olanları; düşük frekanslardaki tekrarlamaları kaldırmak için kullanılan ‘Yüksek Geçiren’, sistem çalışma frekansına göre belirli bir değerin üzerinde kalanları zayıflatmak veya kaldırmak için kullanılan ‘Alçak Geçiren’, belirlenen bant içerisini kabul edip diğerlerini elimine eden ‘Bant Geçiren’ ve belirlenen frekans bandı içerisinde kalan verileri ortadan kaldırmada kullanılan ‘Bant Durduran’ filtreleridir (Roy, 2020; Tan ve Jiang, 2005).

Mikroelektronik ve diğer dijital ekipman teknolojilerindeki artış, sinyal işlemede dijital yöntemlere olan yönelimi de beraberinde getirmiştir. Dijital sinyal işleme, makine ve imalat, radar ve sonar sistemler, konuşma ve iletişim sinyalleri, jeofizik gibi birçok alanda kullanım alanına sahiptir. Dijital filtreler yüksek doğruluğa sahip olması, eşleştirme sorunu yaşamaması, çok çeşitli filtreleme yöntemlerini gerçekleştirebilmesi yönleriyle birçok avantaja sahiptir.

Sinyal işlemede kullanılan iki tip dijital filtreleme yöntemi vardır. Bunlar FIR (Finite Impulse Response) ve IIR (Infinite Impulse Response) filtreleridir. IIR filtreleme yöntemi, FIR yöntemine göre daha az sayıda işlem gerektirdiği için yüksek frekansa sahip sistemler için daha uygundur. IIR filtrelemesinde gecikme frekans büyüklüğüne bağlı olarak değişse de FIR filtrelemesinde gecikme sürekli sabittir. FIR için kullanılan başlıca pencereleme yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- Chebyshev: Geniş geçiş bandına sahip olmakla birlikte durdurma bandında düşük dalgalanma miktarına sahiptir.
- Hanning: Durdurma bandında büyük dalgalanmaya sahip olmasına karşın en dar geçiş bandı sahiptir.
- Hamming: Hanning yöntemine göre daha küçük dalgalanması vardır ve kısmen dar geçiş bölgesine sahiptir.
- Kaiser: Durdurma bölgesinde genlik dalgalanması küçüktür, genlik dalgalanması Chebyshev’ e göre daha düşüktür.
- Rectangular: Çok büyük dalgalanma miktarına sahiptir.

IIR için kullanılan başlıca pencereleme yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- Butterworth: Geniş geçiş bölgesine sahiptir tepkiler düzdür.

- Inverse Chebyshev: Butterworth filtresine göre daha küçük bir genişliğe sahiptir. Herhangi bir uygulama için Butterworth filtresine karşı tercih edilebilir. En büyük dezavantajı durdurma bandındaki dalgalanmadır.
- Chebyshev: Geçirme bandında dalgalanma olabilir, ancak Ters Chebyshev'den daha dik bir düşüş vardır.
- Cauer: Geçiş bölgesi diğerlerine göre daha dardır. Dezavantajı hem durdurma hem de geçirmedeki dalgalanmadır. Bazen Eliptik filtre denir.
- Bessel: Frekans çok düzgün olmasına karşın filtrede gecikme yaşayabilir. Geçirme ve durdurma bölgesinde eğimli genliğe sahiptir.

Aktif kontrol uygulamalarında hem IIR hem de FIR uygulamalarını görmek mümkündür. FIR ve IIR için kullanılan genel bağıntılar Eş. 3.1 ve 3.2 de detaylı olarak verilmiştir. Denklemde n zaman alanındaki giriş sinyalini,

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a(k)x(n-k) \quad (3.1)$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a(k)x(n-k) + \sum_{j=0}^P b(j)y(n-j) \quad (3.2)$$

Bu seriler: – $X(n)$ – Zamanda giriş serisini, $x(0), x(1), x(2), x(n)$ ' e kadar. Giriş sinyalinin zaman alanındaki veri noktalarının toplam sayısı “ n ” olarak ifade edilmektedir. – $A(k)$ – Filtre “ a ” olarak isimlendirilen seriyle, FIR filtre olarak tanımlanmaktadır, IIR filtre için “ a ” ve “ b ” etiketli serilerle ifade edilir.” N ” ve “ P ” sırasıyla “mertebe” ve “bağlantı sayısı” olarak da ifade edilen, filtrelerdeki toplam terim sayılarıdır. Örneğin, FIR filtresi $k=0$ ila $k=N$ arasında gerçekleştirilir. – $Y(n)$ – Çıkış zaman sinyali, $y(0), y(1), y(2), \dots$

3.3.2. İvme verilerinin integrali

Sistemden toplanan verilerin direk olarak kullanılması pek mümkün değildir. Özellikle hassas kontrol uygulamalarında toplanan ivme verisinin modelde kullanılabilmesi için ivme verisinin deplasman verisine çevrilmesi ile daha doğru sonuçlar verebilmektedir. İvme verisinin konum verisine çevrilmesi için kullanılan en önemli yöntem integral alma işlemidir. Güncel uygulamalarda; sistemden toplanan veriye integral işlemi uygulamanın birçok amacı vardır: bunlardan bazıları ölçülen hızdan gidilen mesafeyi elde etmek, ölçülen güçten enerjiyi elde etmek ve ölçülen ivmeden konumu hesaplamaktır (Tan ve Jiang, 2005).

Çift integrasyon, esas olarak ivmeden yer değiştirmeyi doğrudan indirgemek etmek için kullanışlıdır. Bu nedenle dinamik sinyaller için kullanmak için. Çıkış birimimiz sn * sn ile çarpılacaktır. Bu nedenle, düşük frekansları ve DC' yi filtreleme seçeneğini tekrar seçmemiz gerekiyor, ancak çift entegrasyon ikinci dereceden filtreye benzer olduğu için dikkatli olmak gerekmektedir. İvme verisinden konum verisine geçiş için kullanılan genel integral formülü denklem Q ve W de verilmiştir. Bağıntıda, a ivmeyi, v hızı ve x konumu ifade etmekte olup Eş. 3.3 ivmeden hıza integrali, Eş. 3.4 hızdan konuma integrali ifade etmektedir (Ortega, Frossard, Kovačević, Moura ve Vanderghenst, 2017; Tinin, 2018).

$$v(t)=\int a(t)dt+C1 \quad (3.3)$$

$$x(t)=\int v(t)dt+C2 \quad (3.4)$$

İşleme esnasında toplanan üç eksenli ivme verileri, DewesoftX yazılımı ara yüzünde düzenlenmiş ve aktif kontrol uygulamalarında girdi olarak verilebilmesi için iki defa integrali alınarak deplasman verisine çevrilmiştir. Daha sonra, deplasman verileri gerçek şartlarda veri toplanan nokta ile aynı noktadan kontrol modelimize girdi olarak verilmiş ve modelin 10 sn boyunca işleme esnasındaki kontrolü sağlanmıştır.

3.3.3. Hızlı fourier dönüşümü (FFT)

Fransız matematikçi Jean-Baptiste Joseph Fourier tarafından geliştirilen Fourier dönüşümü, herhangi bir fonksiyonun sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamı olarak yazılabileceğini ve integral kullanılarak sinüs ve kosinüs dalgalarının genliğinin belirlenebileceğini savunmaktadır (Fourier 1878). Fourier dönüşümü için kullanılan temel bağıntı Eş. 3.5 de verilmiştir. Denklemden; $S_x(f)$, frekans alanında Fourier dönüşümünün çıktısını, $x(t)$ zamana bağlı fonksiyonu ve $2\pi f$ radyan cinsinden frekansı ifade etmektedir (Mo, Su, Kang, Chen, Chang ve Liu, 2018).

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

Fourier Dönüşümünün birçok uygulaması olmakla beraber günümüzde yaygın olarak Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü (DFT) ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılmaktadır. Arkasındaki verimli algoritmalar sayesinde, sinyal işleme, sistemlerinin analizi ve tasarımı, doğrusal filtreleme, korelasyon analizi ve spektrum analizi gibi birçok uygulamada önemli

bir rol oynayan DFT, herhangi bir zaman aralığında gerçekleştirilebilmektedir. $X(k)$ zaman dizisini, $x(m)$ frekans dizisini, k frekans numarasını, N örnek sayısını ifade etmek üzere DFT için genel bağıntı Eş. 3.6'de verilmiştir (Tan ve Jiang, 2005).

$$x(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi km}{N}} \quad (3.6)$$

DFT hesabı için gerçekleştirilmek zorunda kalınan işlem sayısı örnek sayısına bağlı olarak artış göstermektedir. Bu artış sonuca ulaşmayı geciktirdiği için istenmeyen bir durumdur. İşlem sayısını azaltmak ve sonuca ulaşmayı kolaylaştırmak adına Cooley ve Tukey 1965 yılında bazı algoritmalar geliştirmişler ve bu algoritmaların tamamına Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) ismini vermişlerdir (Maslen ve Rockmore, 2003).

DFT matrislerini daha seyrek matrislere ayırarak hedefe ulaşmaya çalışan FFT algoritmaları, günümüzde titreşim analizi, ses mühendisliği, görüntü işleme gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu algoritmaların işlem sayısını azaltmak için temelde kullandığı özellikler temel fonksiyonun periyodik olması ve simetri özelliğidir. Genel amacı bir zaman fonksiyonunu bir frekans fonksiyonuna dönüştürmek olan ve matematiksel bir yöntemdir. Zaman alanından frekans alanına dönüşüm olarak tanımlanır (Bekele, 2016).

FFT herhangi bir sinyaldeki yüksek frekans değerlerini belirlemek için kullanılabilir. Bu frekanslar istenmeyen gürültü veya titreşime sebebiyet verebilmektedir. FFT analizi, yataklar ve dişliler gibi sürekli hareket halindeki makine elemanların titreşim durumunun gözlemlenmesi ve arıza tespitinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçak, havacılık ve otomotiv sanayisinde de önemli bir konuma sahip olan FFT analizleri, zaman bloğunda ikinin katları (512, 1024, 2048) örnek kullanılarak gerçekleştirilir (Upase ve Ambhore, 2020).

FFT için genel bağıntı Eş. 3.7 ve 3.8' de detaylı olarak verilmiş olup k sırası gelen frekans elemanını, N örnek sayısını, i karekök (-1) değerini, $x()$ örneklenmiş sinyal verisini, n işlenmeyi bekleyen sıradaki örneğin indisini temsil etmektedir.

$$\sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-jn} \omega_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (3.7)$$

$$Xk = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-i*(2\pi*k*n/N)} \quad (3.8)$$

Tez kapsamında; tormalama işlemi esnasında oluşan titreşim hakkında bilgi edinebilmek adına, toplanan ivme verileri için FFT analizi gerçekleştirilmiş ve irdelenmiştir. Böylelikle; işleme esnasında sistemin çalışma frekansı, doğal frekans aralığı ve veri toplamada örnekleme sayısının ne olması gerektiği hususunda bilgi edinilmiştir.

3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Talaşlı imalat sırasında malzeme, kesici takım, kesme parametreleri, tezgah gücü ve bunların yanında fiziksel, kimyasal ve ısı artışı gibi etkiler iş parçası yüzeyinde istenmeyen izlere sebebiyet verir. Yüzey pürüzlülüğü olarak tanımlanan bu durum, nominal yüzey çizgisinin etrafında oluşan düzensiz sapsmalardır (Gold ve Helmreich, 2017; Şeremet, 2019).

Talaşlı imalat sürecinde (tormalama, frezeleme, taşlama vb.), ürün kalitesini değerlendirmede önemli bir yere sahip olan yüzey pürüzlülüğünün, azaltılması ve dolayısı ile ürün kalitesinin artırılması üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri günden güne artmaktadır. Faaliyetlerin temelinde farklı yöntemler kullanılarak optimizasyon ve tahmin çalışmaları yer almaktadır (Şeremet, 2019).

İşlenen ürün üzerindeki yüzey pürüzlülüğü sürtünme, aşınma, korozyon ve yorulma dayanımının düşmesi gibi olumsuz sonuçları beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle, birbiriyle sürtünerek çalışan yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin mümkün mertebe azaltılması gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün diğer dezavantajları da çalışma esnasında oluşabilecek gürültülü ve hızlı yıpranmadır. Yüzey hassasiyeti çalışma esnasındaki uyumu ve makinenin verimini etkileyen önemli bir parametredir (Pegues, Roach, Williamson ve Shamsaei, 2018; Yang ve diğerleri, 2017).

Tez kapsamında; Yüzey pürüzlülüğü, TIME-Portable Surface Poughness Tester (TR100) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm cihazı ve ölçüm esnasında alınan bir görsel Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Her deney için üç farklı ölçüm yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü verileri Ra (μ)

cinsinden ölçülmüştür. Üç farklı noktadan alınan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin aritmetik ortalamaları kaydedilmiştir.



Şekil 3.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

3.5. İmalatta Titreşim Çalışmaları ve Talaşlı İmalatta Aktif Titreşim Kontrolü

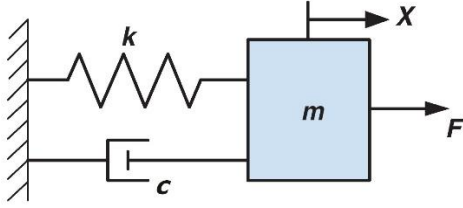
İnsanlığın üretimde ve sanayide kullanmak için makineleri icat etmeye ve bu makineleri motorlar aracılığıyla çalıştırmaya başlamasından sonra titreşim probleminin azaltılması veya sönmülmesi önem kazanmıştır. Titreşimi sönmüleme ve azaltma yöntemlerinin makine tasarımının bir parçası haline gelmesiyle, titreşimlerin doğru bir şekilde ölçülmesi de fazlasıyla önem kazanmıştır.

Gerçekte titreşimden kaçınmak kolay değildir. Genellikle küçük ve önemsiz görülen titreşimler, sistemdeki parçalarının frekansında zorlama yaparak daha kötü sonuçlara sebep olabilmektedir. Bazı durumlarda da mekanik titreşimler istenilen bir durumdur. Örneğin, beton sıkıştırıcılarda, taş delme makinelerinde titreşimin meydana getirdiği enerji kullanılır.

Titreşim, basit bir ifadeyle bir sistemin denge konumu etrafındaki salınımlarıdır. Titreşime örnek gösterilecek en basit sistem bir yayın ucuna bağlanmış bir ağırlıktır. Sistem, denge konumundan uzaklaştırılıp daha sonra serbest bırakılırsa, denge konumu etrafında salınımlar yapacaktır. Sistemin yaptığı bu salınımlara serbest titreşim denilir. Kısaca, serbest titreşimler

sistemin, hiçbir dış kuvvet etkisinde olmadan sadece başlangıç koşulları ile yaptığı titreşimlerdir (Rao, 2017).

Titreşim üzerine yapılacak çalışmalarındaki en önemli nokta, oluşan titreşimlerin düzgün bir şekilde tanımlanabilmesidir. Şekil 3.7’de titreşim yapan bir sistemin basit bir gösterimi yer almaktadır.

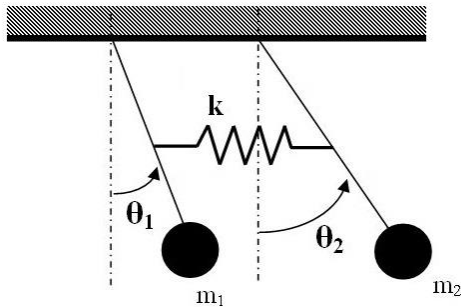


Şekil 3.7. Titreşim yapan sistemin basit gösterimi

Burada m sistemin toplam kütlesi, k yay katsayısı, c sistemin sönüm katsayısıdır. x ise, sistemin denge konumuna göre yer değiştirmesini göstermektedir.

Serbestlik Derecesi

Sistemdeki her bir parçanın herhangi bir zamandaki konumlarını tanımlayabilmek için gerekli olan minimum bağımsız koordinat sayısını, serbestlik derecesi ifade edilmektedir. Sistemlerin titreşimleri birden fazla doğrultuda gerçekleşebilmektedir. Eğer sistem, tek şekilde titreşmeye şartlandırılırsa veya sistemin kütlelerinin yerini ifade etmek için tek değişkene ihtiyaç varsa, tek serbestlik dereceli sistem denir. Şekil 1’deki sistemde kütlelerin konumu sadece x ile ifade edilebilir, dolayısıyla sistem tek serbestlik derecelidir. Konumlarını ifade etmek için, n adet bağımsız koordinat gerektiren sistemlere n serbestlik dereceli sistemler denir. Şekil 3.8’de çok serbestlik dereceli bir sistem gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Çok serbestlik dereceli sistem örneği

3.5.1 Titreşimin sınıflandırılması

Titreşim problemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

Sönümlü ve sönümsüz titreşimler:

Bir sistemde sürtünme vb. dirençler sebebi ile enerji kaybına neden olacak bir etken bulunmuyorsa titreşim sönümsüz olarak adlandırılır. Kısaca titreşim sürekli ise sönümsüzdür. Titreşimin sürekli olmadığı, sürtünme vb. dirençlerin bulunduğu durumlarda ise sistem sönümlü olarak adlandırılır. Basitçe ifade edersek titreşim sona eriyorsa sistem sönümlüdür. Örnek vermek gerekirse bir yere sabitlendikten sonra çekilip bırakılan bir telin titreşimi sönümlüdür. Otomobillerin sahip olduğu titreşimler yay ve amortisörler tarafından emildiği için sönümlüdür.

Serbest ve zorlanmış titreşimler:

Eğer sistem hiçbir dış kuvvet etkisinde olmadan sadece başlangıç koşulları neticesinde titreşiyor ise serbest titreşim adı verilir. Eğer sistem dış etkenler sayesinde titreşiyor ise zorlanmış titreşim adı verilir.

3.5.2. Titreşim kontrol sistemleri

Titreşim kontrolü çalışmaları temel olarak üç başlık altında toplanmaktadır. Bunlar; pasif, aktif ve yarı aktif kontrol sistemleri ile titreşim sönümleme veya azaltma işlemleridir.

Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif Kontrol Sistemleri titreşim şiddetinin azaltılması ve sönümün artırılması için kullanılır. Pasif kontrol sistemlerinde dışarıdan bir enerjiye ihtiyaç yoktur. Kontrol sistemleri arasında ekonomik olması ve iyi koruma sağlaması pasif kontrol sistemlerini avantajlı hale getirmektedir.

Pasif kontrol sistemlerin geliştirilmesinin bir sınıra ulaşması ile aktif kontrol sistemleri üzerine son zamanlarda hem endüstriyel hem de akademik birçok çalışma yapılmıştır. Teknolojinin gelişmesi ile karmaşık parçalar veya yapılar da aktif titreşim kontrolü uygulamaları için uygun adaylar haline gelmiştir.

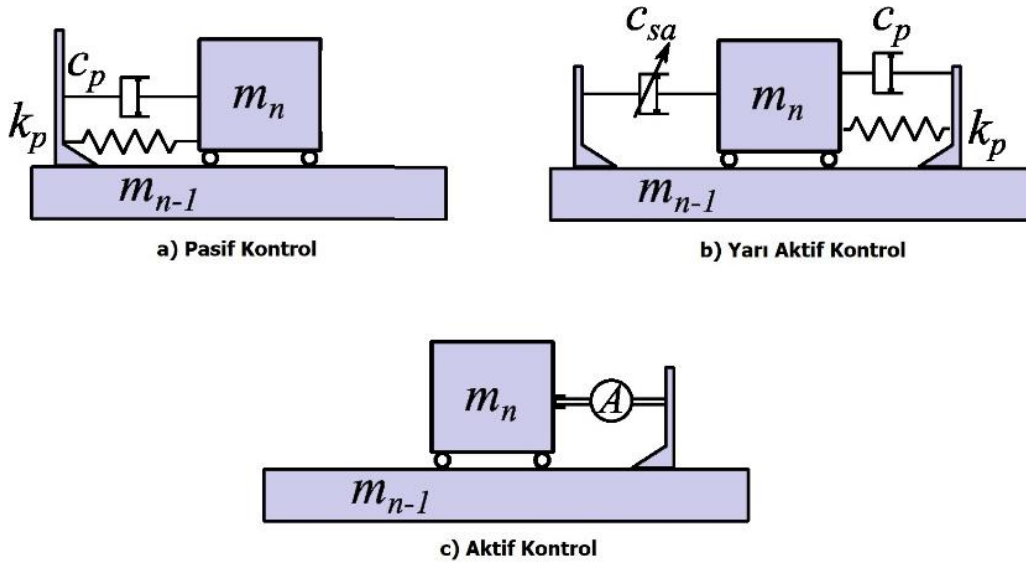
Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmalar uzun yıllara dayanmaktadır. Aktif kontrolün amacı, makineye gelecek olan dinamik yükün, dış güç kaynağı tarafından aktif edilen aktüatörler sayesinde önceden tahmini ve buna karşı koyucu kuvvetlerin üretilmesi ile malzemenin korunmasıdır.

Aktif kontrol sistemlerini, kısa sürelerde karşı koyucu kuvvetler oluşturarak titreşim üreten sisteme veren sistemler olarak adlandırabiliriz. Aktif kontrol sistemlerinin çalışması için sistem bir güç kaynağına ihtiyaç duyar. Gelişmiş sistemler olması ile zaten tasarım maliyeti yüksek olan aktif kontrol sistemleri için dış güç kaynakları da maliyet artışı anlamına gelmektedir.

Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Pasif ve aktif kontrol sistemlerinin dezavantajlarını gidermek ve performanslarını artırmak için Yarı Aktif Kontrol Sistemleri kullanılmaktadır. Yarı aktif kontrol sistemlerinde dış enerji ihtiyacı daha azdır ve pasif kontrol sistemlerine göre daha gelişmiştir. Yapılan çalışmalarda ve uygulamalarda yarı aktif kontrol sistemleri de aktif kontrol sistemleri kadar başarılı olmaktadır. Şekil 3.9'da kontrol sistemleri için şematik gösterimler yer almaktadır.

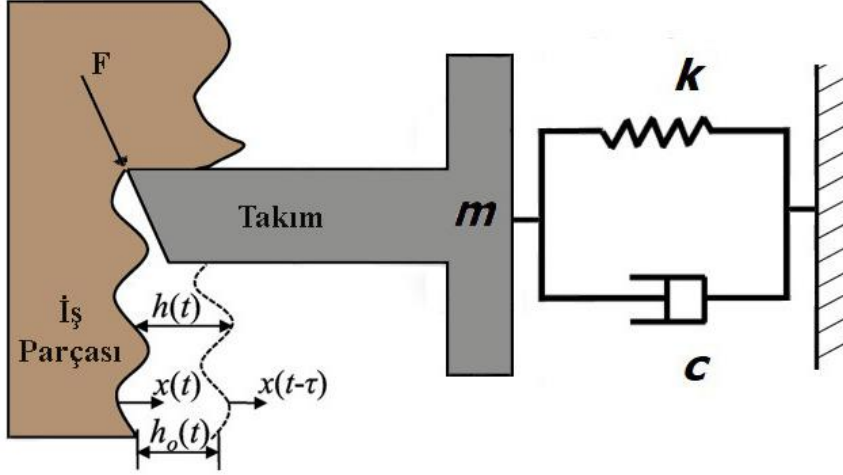


Şekil 3.9. Titreşim kontrol sistemlerinin şematik gösterimi

3.5.3. Talaşlı imalatta titreşim

Tornalama ve talaşlı imalat, sanayinin birçok alanda ihtiyaç duyduğu talaşlı imalat konusunda istenilen ve amaçlanan yüzey ve ölçülerde son şekillendirmenin yapıldığı

vazgeçilemez bir imalat yöntemidir. Bu sayede havacılık, otomotiv, gemi, enerji ve daha birçok alanda ihtiyaç duyulan parçaların ve ürünlerin farklı tornalama yöntemleriyle imalatı oldukça ekonomik bir şekilde sağlanabilmektedir (Hoe ve diğerleri, 2018; Mancisidor, Rafael, Tokin ve Ainhoa, 2013; Susanto ve diğerleri, 2020).



Şekil 3.10. Tornalamada bir serbestlik dereceli sistemin modellemesi

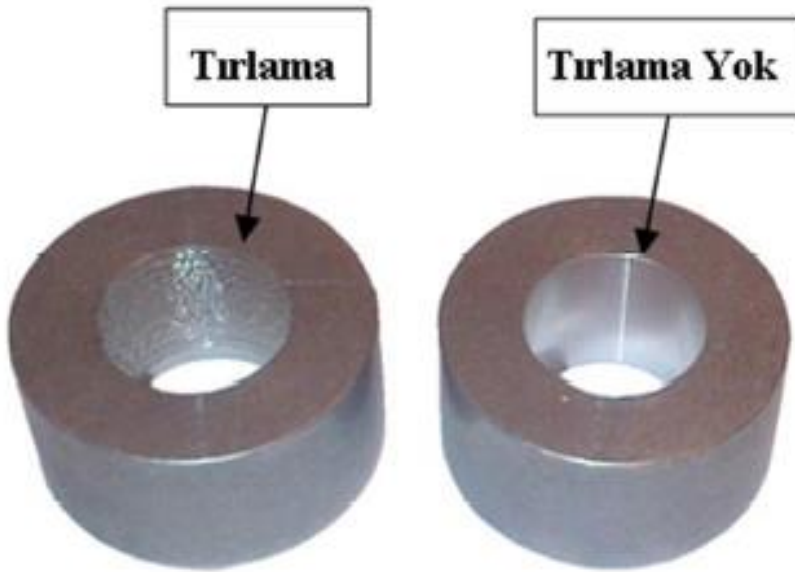
Talaşlı imalatta, kendiliğinden oluşan ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki çeşit titreşim mevcuttur. Bu titreşimler yüzey kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır. Ayrıca takım ve tezgâhın aşınmasına sebep olup ve ömürlerini kısaltırlar. Zorlanmış titreşim, tezgâhın mekanik hareketleri sonucu ortaya çıkan bir titreşimdir. Kendiliğinden oluşan titreşim ise talaş kaldırmadan dolayı, tezgâhtan ve dış etkenlerden ayrı olarak oluşur. Bu titreşime aynı zamanda tırlama titreşimi denilmektedir (Arriaza, Tumurkhuaygc ve Kim, 2018; Khasawneh, Munch ve Perea, 2018).

Zorlanmış titreşim genellikle tezgâhın kısımlarında, yani dişli, rulman, fener mili gibi ekipmanlardan kaynaklanmaktadır ve titreşimin sebebi kolayca belirlenip, titreşim giderilebilir. Kendiliğinden doğan titreşimler ise sürtünme kuvvetinin değişkenliği ve talaş kesitinde ve takım geometrisindeki değişmelerden dolayı meydana gelmektedir. Ancak kendiliğinden doğan titreşimler kompleks yapısından dolayı hala tam olarak anlaşılammıştır ve talaşlı imalat için en zararlı titreşimdir. Talaşlı imalat uygulamalarında sürekli olarak karşılaşılan bu titreşimlerden, kaliteden ve verimlilikten ödün vermeden kaçınmak gerekmektedir (Yan ve Al-Jumaily, 2005).

3.5.4. Tırlama titreşimi

Tırlama titreşimlerinin anlaşılması için mekanik titreşimlerin iyi derecede bilinmesi gerektirmektedir. Bir sistemin denge konumu etrafındaki salınımlara mekanik titreşim denir. Çoğunlukla titreşim, istenmeyen bir durumdur (Eynian, Magnevall, Cedergren, Wretland ve Lundblad, 2018; Susanto ve diğerleri, 2020). Tırlama titreşimi, özellikle düşük hassasiyet, kesici takımlardaki aşınmalar ve takım tezgahının ömrünün kısalması gibi üretimi kısıtlayan sorunlara sebep olmaktadır. Tırlama titreşimleri yüzünden talaş kalınlığındaki değişimler fazlalır ve bu durum sesle birlikte işlenen yüzey üzerindeki izler ile kolaylıkla fark edilebilir (Berezvai, Bachrathy ve Stepan, 2018; Thamizhmanii ve diğerleri, 2007).

Tırlama titreşimi tornalama, frezeleme, delik delme gibi temel talaşlı imalat yöntemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesini engelleyen önemli bir etmendir. Tırlama, düşük yüzey kalitesi, yüksek ses, takım ömrünün azalması, üretkenliğin düşmesi, toleranslara uyumsuzluk, malzeme ve enerji sarfiyatı gibi sorunlara sebep olmaktadır. Şekil 3.11. tırlamanın ürün kalitesi üzerine etkisini ifade etmektedir.



Şekil 3.11. Tırlamanın imal edilen parçaya verdiği zarar (Banaz, 2018)

3.5.5. Tırlama titreşiminin aktif kontrolü

Tırlamanın sönümlenmesi, talaşlı imalat çalışmalarında üzerinde çok çalışılması gereken bir sorundur. Tırlamanın sönümlenmesi ve kontrolüne duyulan ihtiyaç, sanayideki yüksek üretkenlik, yüksek doğruluk ve daha düşük maliyetler için oluşan baskıdan dolayı çok

fazladır. Tırlamanın sönümlenmesi için genellikle pasif kontrol ve aktif kontrol sistemleri tercih edilir (Munoa ve diğerleri, 2016a; Zhang ve diğerleri, 2019).

Pasif Kontrol: Burada amaç, sistemin davranışını değiştirerek tırlamayı sönümlemektir. Bu da ancak tezgâh tasarımını iyileştirerek ya da ekstra enerjiyi sönümleyen ek araçlar kullanılarak sağlanabilir. Sürtünme tamponları, kütle tamponları ve ayarlanmış tamponlar bu ek araçlara örnek gösterilebilir.

Aktif Kontrol: İsminden de anlaşılacağı gibi, tırlama titreşimlerini algılayıp çok kısa sürelerde karşı koyucu kuvvetler üreterek ya da prosesteki gerekli değişikliği yaparak titreşimleri sönümleyen sistemlerdir. Bazı çalışmalarda, presenin hızı, ilerlemesi ve talaş derinliği değiştirilerek tırlama önlenmiştir.

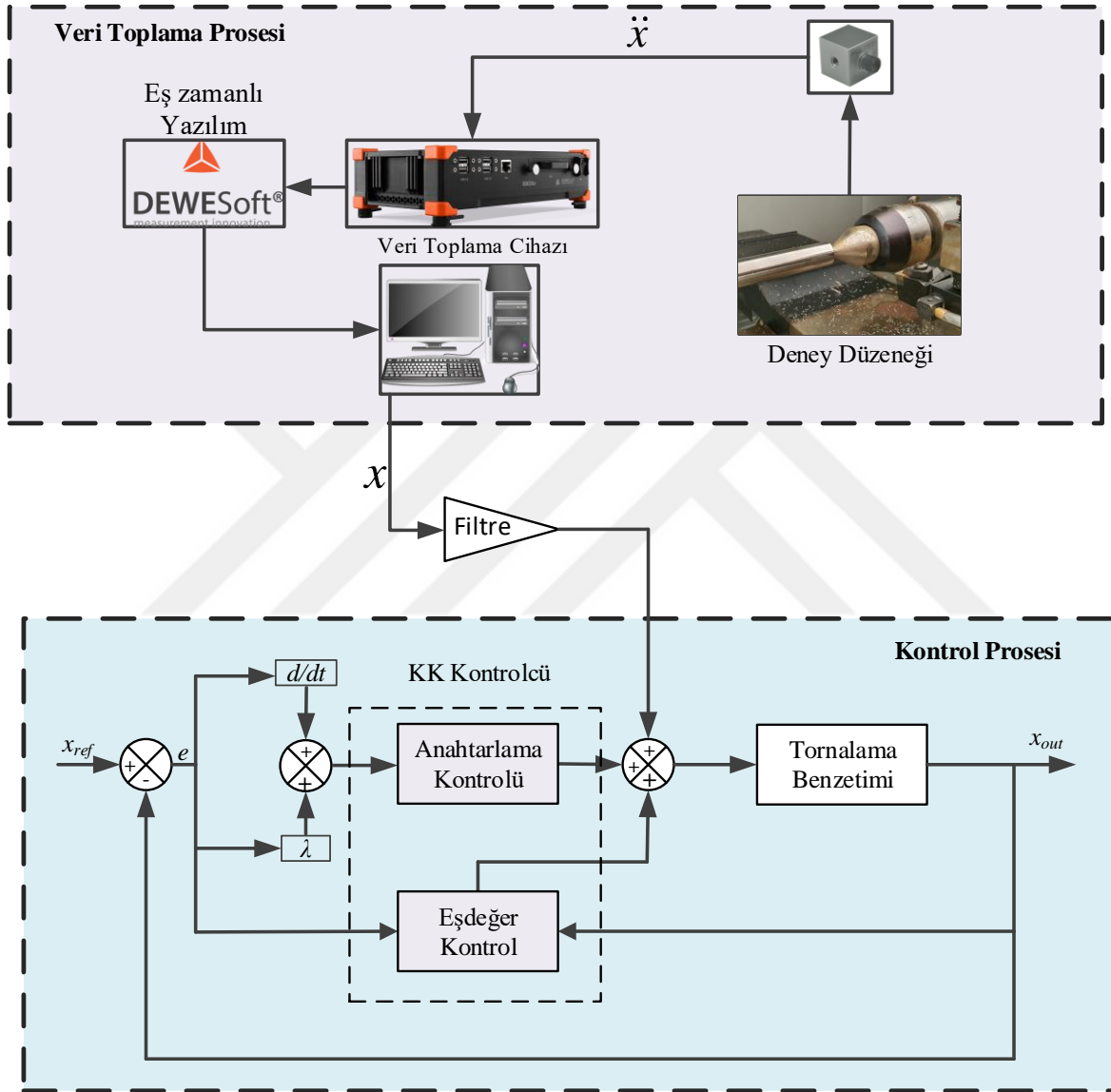
Aktif kontrol sistemi olarak “geciktirilmiş geri besleme” kontrol titreşim sönümleyicilerin kullanılması da başka bir yöntemdir. Holm-Hansen (1994), geri besleme kontrolü sağlamak için bir geciktirilmiş rezonatör kullanmıştır ve bu sayede gerçek zamanlı kontrol, geniş frekans aralığı, yüksek sönümleme ve sistem basitliği sağlamıştır.

Tırlama titreşimini sönümlemede kullanılan bir diğer yöntem ise, akıllı malzemeler adı verilen ve mekanik kuvvetin diğer enerji şekillerine çevrilmesini sağlayan ve bu sayede sönümleme yapılan tekniklerdir.

Takım tezgâhın tasarım modeline ihtiyaç duyulmaması ve kullanılan ekipmanların gücünün, tornalamada ortaya çıkan enerjilere karşı koyabilecek kadar büyük olması talaşlı imalatta kullanılan aktif kontrol sistemlerinin avantajlarından. Ancak sistemin ikincil bir enerji kaynağı gerekliliği ve bu sebeple sistemin toplam titreşim dalgalarını artması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca gelişmiş bir yazılım ve donanım ihtiyacı olmasından dolayı maliyetli sistemlerdir. Karışık yazılım ve donanım ihtiyaçlarından dolayı aynı zamanda uygulaması daha zordur. Bu sebeple avantajları fazla olmasına rağmen, pasif yöntemlerin ucuzluğu ve kolay uygulanabilirliği endüstride pasif yöntemlerin daha çok kullanılmasına sebep olmaktadır.

Tez kapsamında aktif titreşim kontrolü çalışmalarında, Quantum marka torna tezgâhı ve iş parçası olarak Ø28 mm X 250 mm boyutlarında Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılarak belirlenen kesme parametrelerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler; 0,1 mm dalma derinliğinde, 0.3 mm/dev ilerleme hızında ve 1000 d/dk mil dönüş hızında gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada; 3 eksenli PCB marka endüstriyel bir ivmeölçer ve Dewesoft/Sirius veri toplama cihazı yardımıyla kater üzerinde oluşan titreşimler X, Y ve Z olmak üzere 3 farklı eksen için toplanmış ve değerlendirilmiştir. İvmeölçer kater üzerine herhangi bir sönüm elemanı kullanılmadan katı olarak sabitlenmiştir. Aktif kontrol uygulaması için kullanılan akış şeması Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Aktif kontrol akış şeması

3.5.6. Kayan kipli kontrol (KKK)

PID kontrol yöntemi birçok avantajlı yönleri sebebiyle endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Ancak, modeli bulunmayan dinamik sistemlere, değişken parametrelere ve bozucu etkilere karşı yetersiz kalabilmektedir. PID'nin yetersiz kaldığı durumlarda bozucu

etkileri ve belirsizlikleri ortadan kaldıran Kayan Kipli Kontrol (SMC) yöntemi kullanılmaktadır (Nguyen, 1988).

Son yıllarda birçok alanda uygulanma imkanı bulan ve doğrusal olmayan kontrol yöntemleri arasında yer alan SMC özellikle yüksek hızlı kontrol ihtiyaçlarını karşılayabilmesi yönüyle tercih edilmektedir. SMC'nin en büyük avantajları arasında sistemin dinamik davranışının değiştirilebilmesi, sistemin derecesinin indirgenebilmesi ve bozucu etkileri en aza indirmesi bulunmaktadır.

Kayma ve ulaşma aşamalarından oluşan kayan mod kontrolünde sırasıyla eşdeğer ve anahtarlama kuralları gerçekleştirilmelidir (Upase ve Ambhore, 2020). Kayan mod kontrolünün en büyük dezavantajlarından biri olan çatırtı sorununun üstesinden gelmek için tanh, sgn vb. birçok fonksiyon kullanılmaktadır (Nguyen, 1988; Aydın ve Çoban, 2021). Kayan mod kontrolünde $u(t)$ kontrol girişini bulmak için $e(t)$ izleme hatası Eş. 3.9'daki gibi tanımlanabilir.

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (3.9)$$

Eş. 3.9'da $e(t)$ izleme hatası, $r(t)$ komut sinyali ve $x(t)$ ölçülen sinyaldir. Kayan yüzey fonksiyonu Eş. 3.10'daki gibi ifade edilebilir.

$$s(t) = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t) \quad (3.10)$$

$n = 2$ olduğu varsayılırsa, Eş. 3.11 elde edilir.

$$\dot{s}(t) = \lambda \dot{e}(t) + \ddot{e}(t) \quad (3.11)$$

Bu eşitlikte e yerine $r-x$ koyarak, Eş. 3.12 elde edilir.

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{r} - A\dot{x} - Bx + Cu \quad (3.12)$$

Eşdeğer kontrol (u_{eq}) ve anahtarlama kontrolünün (u_{sw}) toplamı olan kontrol girişi $u(t)$, Eş. 3.13'de verilmiştir.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (3.13)$$

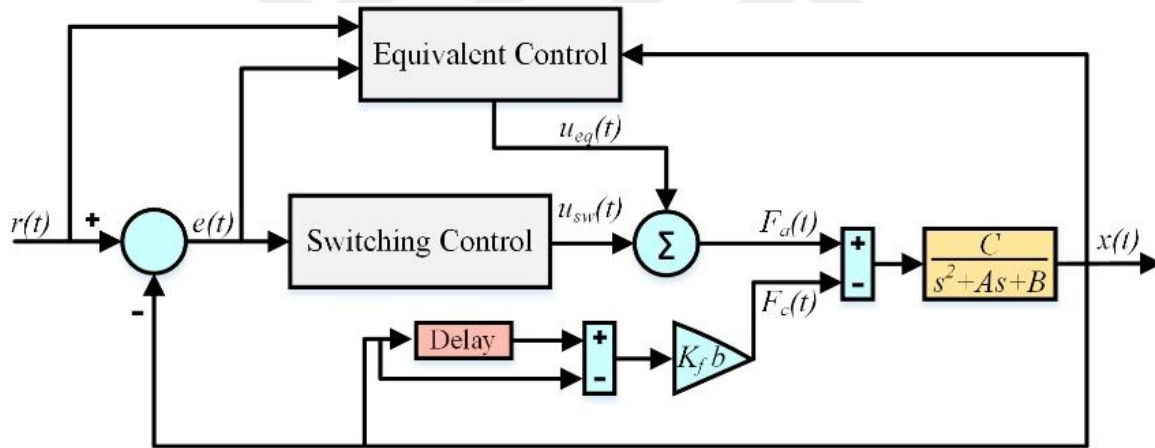
Kayan kipli kontrolcünün doğası gereği, $s=0$ olması beklenir. Eğer Eş. 3.13 $s=0$ için düzenlenirse, u_{eq} Eş. 3.14 olarak ifade edilebilir.

$$u_{eq} = \frac{1}{C}(-\lambda\dot{e}(t) - \ddot{r}(t) + A\dot{x}(t) + Bx(t)) \quad (3.14)$$

$k_{sw}=0.5$ ve $\Omega=0.1$ ile anahtarlama fonksiyonu, u_{sw} Eş. 3.15'deki gibi ifade edilebilir.

$$u_{sw}(t) = k_{sw} \tanh(s(t)\Omega) \quad (3.15)$$

Kesici takımdan alınan ivme verileri tornalama işleminde geri besleme bilgisi olarak kullanılmıştır. Hızlanma verileri yardımıyla aktüatör için gerekli tepki kuvveti hesaplanır. Kontrol için kullanılan kapalı döngü Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



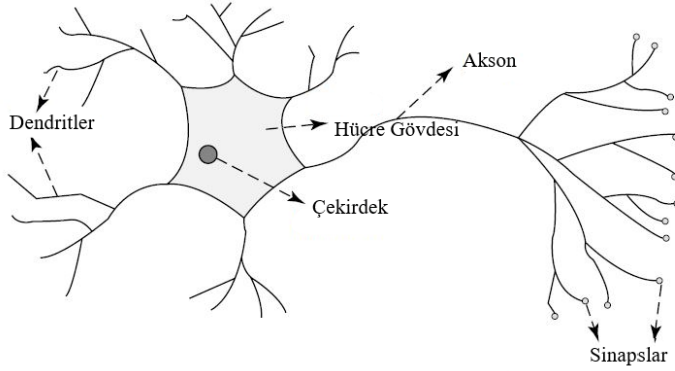
Şekil 3.13. KKK sistem blok şeması

3.6. Yapay Zeka Teknikleri

3.6.1. Yapay sinir ağları

İnsan beyni, insanların başarılı olduğu bilişsel, algısal ve kontrol görevlerinde başarılı olabilecek devasa sinir ağlarının varlığının kanıtını sağlar. Beyin, bilişimsel olarak zorlayıcı algısal eylemler (örn. Yüzlerin tanınması, konuşma) ve kontrol aktiviteleri (örn. Vücut hareketleri ve vücut fonksiyonları) yeteneğine sahiptir. Beynin avantajı, büyük paralellliği etkili bir şekilde kullanması, oldukça paralel hesaplama yapısı ve kesin olmayan bilgi işleme kabiliyetidir. İnsan beyni, birbirine bağlı 10 milyardan fazla nörondan oluşan bir

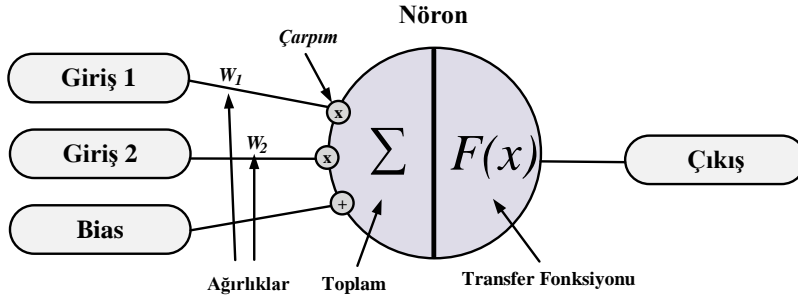
koleksiyondur (Abraham, 2011). Her nöron, bilgi almak, işlemek ve iletmek için biyokimyasal reaksiyonları kullanan bir hücredir ve şematik gösterimi Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Sinir hücresinin şematik görünümü

Dendrit adı verilen ağaç benzeri sinir lifi ağları, hücre çekirdeğinin bulunduğu hücre gövdesine veya soma'ya bağlanır. Hücre gövdesinden uzanan, akson adı verilen, sonunda iplikçiklere ve alt şeritlere dallanan ve sinaptik terminaller veya sinapslar yoluyla diğer nöronlara bağlanan tek bir uzun lifdir. Tüm dendritlerden gelen birleşik sinyal yeterince güçlüyse, nöron "ateşlenir" ve akson adı verilen bir yol boyunca bir çıkış sinyali üretir. Akson, dendritlerde bulunan sinapslar (elektrik sinyallerinin akışını kontrol eden bir nörotransmitter sıvısı içeren bağlantılar) aracılığıyla diğer nöronların binlerce dendritine (giriş yolları) ayrılır ve bağlanır. Sinapslar boyunca "sinyallerin iletimi, doğası gereği elektro-kimyasaldır ve sinyallerin büyüklükleri, sinaptik bağlantıların sinaptik güçlerine bağlıdır. Sinaptik bir bağlantının gücü veya iletkenliği (direncin tersi), beyin olarak değiştirilir "öğrenir". Başka bir deyişle, sinapslar beynin temel "hafıza birimleri" dir (Jain ve Mao 1996).

Yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir sistemlerinin matematiksel modellerinin genellemeleri olarak geliştirilmiştir. 1943 yılında McCulloch ve Pitts tarafından basitleştirilmiş nöronların kullanılmasının ardından sinir ağlarına (bağlantısal modeller veya paralel dağıtılmış işleme olarak da bilinir) ilk ilgi ortaya çıkmıştır (Abraham, 2011; McCulloch ve Pitts, 1943).



Şekil 3.15. Yapay nöron modelinin şematik görünümü

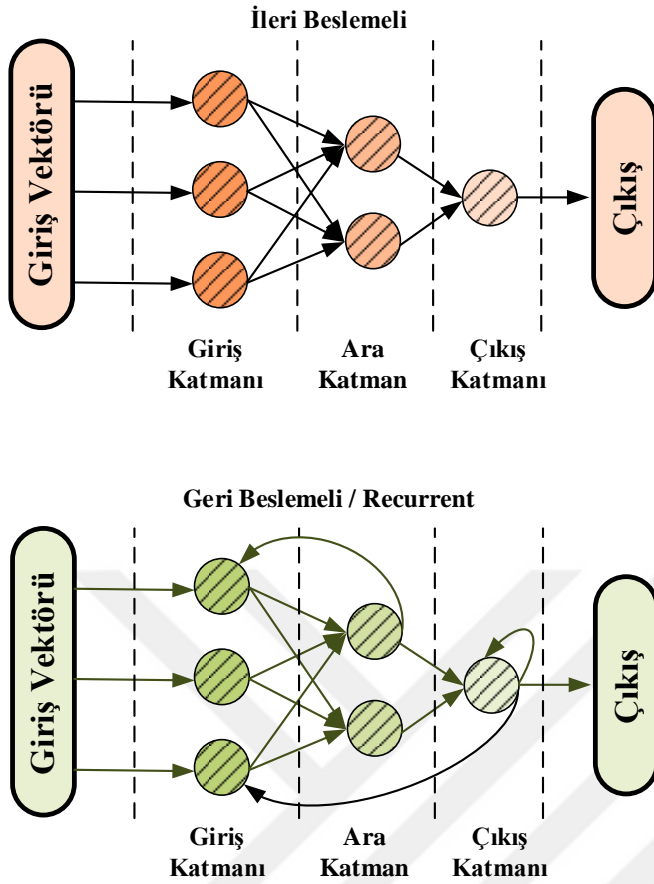
Şematik görünümü Şekil 3.14’de sunulan sinir ağlarının temel işlem elemanlarına yapay nöronlar veya düğümler adı verilir. Nöronun basit anlamdaki bir matematiksel modelinde sinapsların etkisi bağlantılı olduğu giriş sinyallerinin etkisini simgeleyen eden ağırlıklar ile temsil edilir. nöronlar tarafından sergilenen doğrusal olmayan karakteristik, bir transfer fonksiyonu ile temsil edilir. Nöron etkisi daha sonra transfer fonksiyonu ile dönüştürülen giriş sinyalleri ile ağırlıkların çarpılması sayesinde elde edilir. Yapay bir nöronda öğrenme işlemi ise, belirlenen öğrenme algoritmasına göre ağırlıkların ayarlanmasıyla gerçekleştirilir (Jain ve Mao, 1996). Yapay nöron modelinin şematik gösterimi Şekil 3.15’de yer almaktadır. Bu durumun formülize edilmek istenirse Eş. 3.9 elde edilir.

$$y(k) = F(\sum_{i=0}^m x_i \cdot w_i + b) \quad (3.9)$$

Burada,

- x_i , 0’dan m’ye kadar giden k zamanındaki giriş değeri,
- w_i , 0’dan m’ye kadar giden k zamanındaki ağırlık değeri,
- b değeri bias,
- F transfer fonksiyonu,
- $y(k)$ k zamanındaki çıkış değeridir.

Yapay sinir ağlarının temel mimarisi üç katmandan oluşur ve bunlar: girdi, gizli ve çıktı katmanları olarak isimlendirilir. İleri beslemeli ağlarda, sinyal akışı girişten çıktı birimlerine doğrudur. Veri işleme birden çok (katman) birimi kapsayabilir, ancak hiçbir geri besleme bağlantısı mevcut değildir. Tekrarlayan ağlar (Recurrent) ise geri besleme bağlantıları içerir. İleri beslemeli ağların aksine, ağın dinamik özellikleri önemlidir. Sadece o anki bilgilere değil geçmiş zamandaki bilgilere de ihtiyaç duyar. İki farklı yapının görünümüleri daha açıklayıcı olması için Şekil 3.16’da sunulmuştur.



Şekil 3.16. a) İleri beslemeli YSA'nın ağ yapısı b) Geribeslemeli YSA'nın ağ yapısı

Bir sinir ağı, bir dizi girişin uygulanması istenen çıktı setini üretecek şekilde yapılandırılmalıdır. Bağlantıların gücünü ayarlamak için çeşitli yöntemler mevcuttur. En sık kullanılan yol, sinir ağını besleyerek, kalıpları öğretmek ve bazı öğrenme kurallarına göre ağırlıklarını değiştirmesine izin vererek eğitmektir. Sinir ağlarındaki öğrenme durumları üç farklı sınıfa ayrılabilir. Bunlar denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenmedir. Denetimli öğrenmede, çıktı katmanında her bir düğüm için bir tane olmak üzere bir dizi istenen yanıtla birlikte girişlerde bir girdi vektörü sunulur. Bir ileri geçiş yapılır ve çıktı katmanındaki her düğüm için istenen ve gerçek yanıt arasındaki hatalar veya tutarsızlıklar bulunur. Bunlar daha sonra geçerli öğrenme kuralına göre ağdaki ağırlık değişikliklerini belirlemek için kullanılır. Denetlenen terimi, bireysel çıktı düğümlerinde istenen sinyallerin harici bir öğretmen tarafından sağlanmasından kaynaklanır. Bu tekniğin en iyi bilinen örnekleri, geri yayılım algoritmasında, delta kuralında ve algılayıcı kuralında ortaya çıkar. Denetimsiz öğrenmede (veya kendi kendine organizasyonda), bir çıktı birimi, girdi içindeki kalıp kümelerine yanıt vermek üzere eğitilir. Bu paradigmanda, sistemin girdi popülasyonunun istatistiksel olarak göze çarpan özelliklerini keşfetmesi beklenir. Denetimli öğrenme paradigmasının aksine, modellerin sınıflandırılacağı önceden belirlenmiş bir

kategori kümesi yoktur; daha ziyade, sistem, girdi uyarılarının kendi temsilini geliştirmelidir. Pekiştirmeli öğrenme, sayısal bir ödül sinyalinin en üst düzeye çıkarmak için ne yapılacağını, durumların eylemlerle nasıl eşleştirileceğini öğrenmektir (Abraham, 2011; Berner, 1996; Gershenson, 2009). Bu tez kapsamında denetimli öğrenme algoritmalarından geri yayımlı öğrenme tipinden faydalanılmıştır.

3.6.2. Geri yayımlı sinir ağları (GYSA)

Geri yayımlı sinir ağları, geri yayılım algoritması eğitime dayanan çok katmanlı bir ileri beslemeli ağ türüdür. Eğitim sırasında, ağ çok sayıda giriş modeli ile sunulur. Deneysel çıktılar daha sonra sinir ağı çıktı nöronlarıyla karşılaştırılır. Deneysel ve sinir ağı yanıt arasındaki hata, ağlar arası bağlantıların ağırlıklarını güncellemek için kullanılır. Bu güncelleme, her desen sunumundan sonra gerçekleştirilir. Tüm desen seti boyunca yapılan bir işlem, bir epoch olarak adlandırılır. Tatmin edici derecede küçük bir hata üretilinceye kadar eğitim süreci birçok epoch boyunca devam eder. Test aşamasında, giriş modelleri ise farklı bir set kullanılır. Sinir ağı çıktıları yine bir dizi deneysel çıktıyla karşılaştırılır. Bu hata, ağların genelleme yeteneğini değerlendirmek için kullanılır. Genellikle, eğitim seti ve / veya mimarisinin bu noktada değerlendirilmesi gerekir. GYSA, sinir ağlarının ağırlıklarını güncellemek için en yaygın kullanılanıdır (Xu ve diğerleri, 2017; Yildirim ve Eski, 2010). Giriş katmanı ile gizli katman arasındaki ağırlıklar şu şekilde güncellenir:

$$\Delta W_{ij}(t) = -\eta \frac{\partial E_2(t)}{\partial W_{ij}(t)} \alpha W_{ij}(t-1) \quad (3.10)$$

Gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki ağırlıklar aşağıdaki denklemde güncellenir:

$$\Delta W_{jk}(t) = -\eta \frac{\partial E_1(t)}{\partial W_{jk}(t)} \alpha W_{jk}(t-1) \quad (3.11)$$

η öğrenme hızıdır ve α momentum terimidir. $E_2(t)$, gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki yayılma hatasıdır. $E_1(t)$, deneysel ve sinir ağı çıkış sinyalleri arasındaki hatadır.

Geri yayılım sinir ağının temel avantajları şunlardır:

- Matematiksel teori, üç katmanlı bir sinir ağının herhangi bir doğrusal olmayan sürekli işlevi rastlantısal bir hassasiyetle yaklaştırabildiğini kanıtlamıştır, bu da onu karmaşık problemlerin iç mekanizmasını ortaya çıkarmak için uygun kılar.

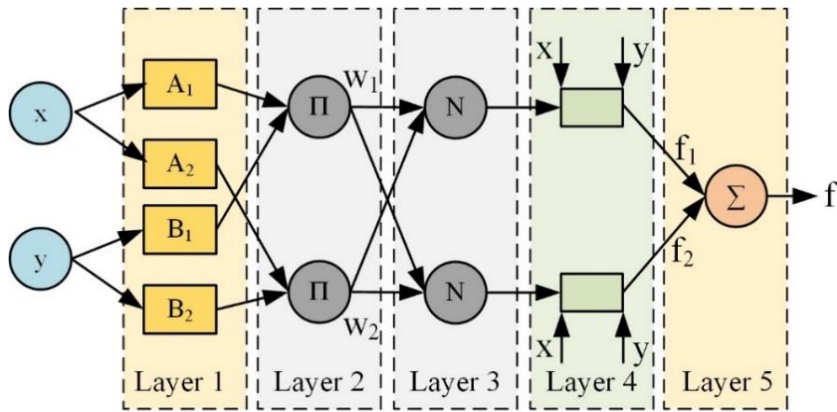
- Güçlü bir kendi kendine uyarlanabilir öğrenme yeteneğine sahiptir ve ağların ağırlıklarına göre uyarlanabilir öğrenme içerikleri çıkarır.
- Hata toleransı yeteneği nedeniyle, yerel veriler zarar görse bile çıktı sonuçları etkilenmez.

Geri yayılım sinir ağının ana dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Yerel minimizasyon problemi her çıktı sonucunu farklı kılar.
- Yavaş yakınsama hızına sahiptir.
- Farklı yapı seçimleri sonuçları farklı kılar (Abraham, 2011).

3.6.3. Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)

ANFIS, yapay sinir ağı (YSA) sistemi ve bulanık çıkarım sisteminin birleşimine dayanan hibrit bir AI algoritmasıdır (Siddhpura ve Paurobally, 2012). 1990'ların başında Jang tarafından geliştirildi ve doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesinde ve kaotik zaman serilerinin tahmin edilmesinde kullanıldı (Bilgic ve Mert, 2021). ANFIS operasyonunda girdiden çıktıya kadar beş ana süreç aşaması vardır. Bunlar sırasıyla girdi bulanıklaştırma (katman 1), bulanık operatörler (katman 2), uygulama yöntemi (katman 3), tüm çıktıların toplanması (katman 4) ve durulaştırmadır (katman 5) (Jang 1991). Bu katmanlar Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. İki girişli ve tek çıkışlı temel ANFIS yapısı

3.6.4. Metasezgisel algoritmalar

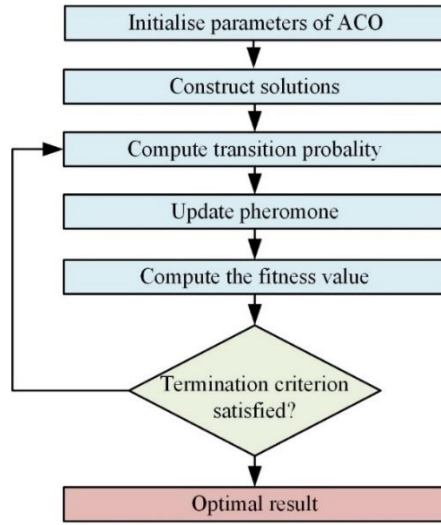
Herhangi bir problemin farklı olası çözümleri arasında en iyi sonucu bulmaya optimizasyon denir. Problemlerin çözümünde birçok optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Optimizasyon algoritmaları genel olarak sezgisel ve matematiksel optimizasyon

algoritmaları olmak üzere ikiye ayrılır. Matematiksel optimizasyon algoritmaları tüm çözüm kümesini tarayarak çözmeyi amaçlarken, sezgisel optimizasyon algoritmaları çözüm kümesine sezgisel olarak yaklaşır ve en iyi veya en iyiye en yakın çözüme ulaşmayı amaçlar. Matematiksel optimizasyon algoritmalarının büyük bir çözüm kümesine sahip problemlerde kullanılması maliyetlidir. Bu tür problemlerin çözümünde sezgisel optimizasyon algoritmaları daha avantajlıdır ve daha çok tercih edilir. Bir optimizasyon algoritmasının herhangi bir problem veya test fonksiyonu üzerinde başarılı olması beklenemez. Bu nedenle hangi tür problemin hangi algoritma ile daha iyi çözüldüğünün belirlenmesi gerekmektedir. Günümüzde temel sezgisel yöntemlerin etkin bir şekilde kullanılması sonucunda meta-sezgisel olarak adlandırılan algoritmalar geliştirilmiştir. Üst düzey buluşsal yaklaşım, çözüm uzayında olasılığa dayalı ancak kasıtlı mantık aramaları gerçekleştiren yöntemleri içerir. Bu yöntemler, her adımda oluşturulan çözüm kümesine dayalı olarak yeni çözümler oluşturur. Böylece arama uzayının en uygununa en yakın noktalarda aramalar yapılarak yerel en iyi nokta seçiminden kurtularak en uygun çözüme ulaşılmaya çalışılır. Ayrıca, akıllıca formüle edilmiş bir amaç fonksiyonuna ihtiyaç vardır (Çelik, Yıldız ve Karadeniz, 2019). 1975 yılında literatüre giren Genetik Algoritma (GA) yönteminin tanıtılmasıyla (Koyee, Heisel, Eisseler ve Schmauder, 2014) birçok yeni yöntem önerilmiş ve her geçen gün yeni algoritmalar eklenmektedir. Literatürde kanıtlanmış ve sıklıkla kullanılan algoritmalarından bazıları, Dağılım Araması (SS) (Pinto, Crepaldi ve Nagona, 2018), Simüle Edilmiş Tavlama (SA) (Riahi, Khorramizadeh ve Hakim, 2017), Tabu Araması (TS) (El-Naggar, AlRashidi, AlHajri ve Othman, 2012), Yapay immune sistemi (AIS) (Hatata, Osman ve Aladl, 2018), Karınca Kolonisi Algoritması (ACO) (Mokhtari ve Rekioua, 2018), Diferansiyel Evrim (DE) (Vivekanandan ve Srیمان, 2017), Çok Amaçlı GA (MOGA) (İmran, Pambudi ve Farooq, 2017), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) (Ye, Yin, Gong ve Zhou, 2017), Emperyalist Rekabetçi Algoritma (ICA) (Al Dossary ve Nasrabadi, 2016), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) (Upendar ve Gupta, 2010), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (ABC)' dir (Tayarani, Yao ve Xu, 2015).

Karınca kolonisi optimizasyonu (ACO)

Bir meta-sezgisel AI optimizasyon algoritması olan ACO, Dorigo ve diğerleri tarafından 1991 yılında tanıtıldı (Paul, Azeem ve Ghosh, 2015). Algoritma tanıtıldığından beri çeşitli versiyonlar geliştirilmiş ve farklı optimizasyon problemlerine uygulanmıştır (Fidanova, 2021). Karıncalar yuvaları ile besin kaynağı arasındaki en kısa mesafeyi bulma ve kullanma

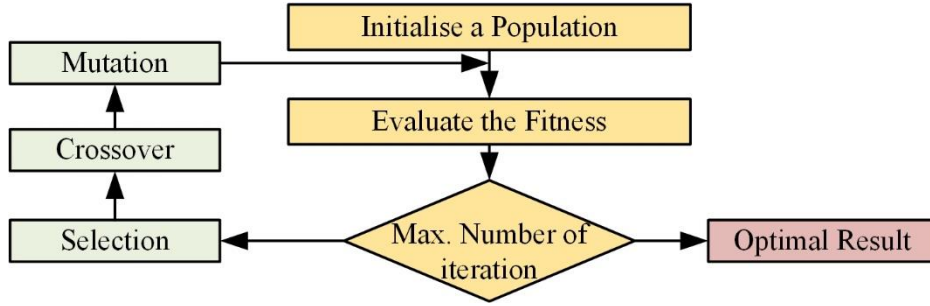
yeteneğine sahiptir ve karıncaların iyi bir görüşü yoktur. Bir besin kaynağı varsa diğer karıncalarla iletişim feromon adı verilen kimyasal bir madde ile sağlanır. Bir birey, salınan feromon miktarına bağlı olarak yolunu belirler. Karıncaların yol boyunca eşit hızda hareket ettiği ve eşit miktarda feromon saldığı varsayılmaktadır. En iyi yolda hızla biriken feromon, karıncaların bu yoldan geçmesini sağlayacaktır (Cakir, Oral ve Aydın, 2011). Gerçek karıncaların davranışlarını modelleyen ACO'nun algoritma akış şeması Şekil 3.18'de gösterilmektedir.



Şekil 3.18. ACO'nun akış şeması

Genetik algoritmalar (GA)

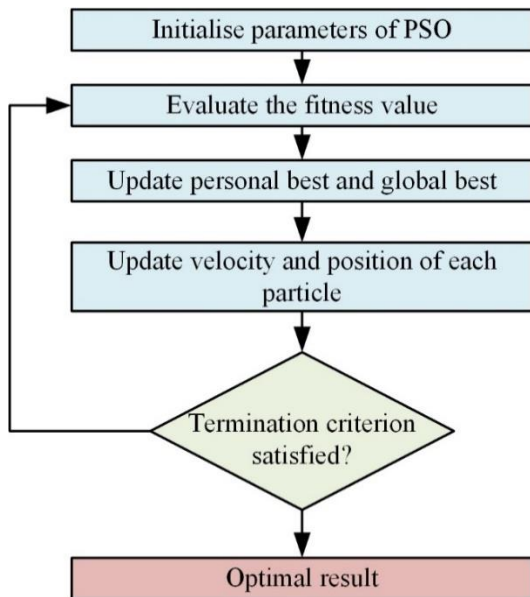
Günümüzün karmaşık ve zor sorunları, hızlı ve kolay çözümler sunan yeni çözüm yöntemlerinin aranmasına neden olmuştur. Darwin'in evrim mekanizması temelinde geliştirilen GA, çok boyutlu optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan hesaplama stratejileri arasında popülerliğini korumaktadır (Akdagli ve diğerleri, 2006). Hangi çözümün kendisi için en iyi olduğunu belirleyen bir uygunluk fonksiyonu kullanır. Ayrıca yeni çözümler üretmek için çaprazlama ve mutasyon gibi operatörlere ihtiyaç duyar (Eren, Guvenc ve Mistikoglu, 2021; Kanca, Eyercioglu, Gunen ve Demir, 2019). GA'nın akış şeması Şekil 3.19'de gösterilmiştir.



Şekil 3.19. GA akış şeması

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

PSO, 1995 yılında Eberhart ve Kennedy tarafından kuş sürülerinin davranışlarından esinlenilerek oluşturulmuş, genetik algoritma benzeri ve popülasyon tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır (Wahid, Masood, Khan, Siddiquee, Badruddin ve Algahtani, 2019). Bu algoritmanın temelinde, sürünün çözüm kümesini ve bireysel parçacıkları (çözümleri) temsil eden bir sürü vardır. Her parçacık, önceki deneyimleri kullanarak konumunu sürüdeki en iyi yerel konuma ayarlar. Diğer parçacıklar, hareketlerini sürünün en uygun yerel konumuna göre günceller. Bu yaklaşma hızı rastgele bir durumdur ve genellikle parçacıklar yeni hareketlerinde öncekinden daha iyi bir konumdadır. Bu süreç hedefe ulaşılan kadar devam eder. PSO algoritmasının akış şeması Şekil 3.20'da gösterilmektedir.



Şekil 3.20. PSO akış şeması

3.6.5. Çoklu lineer regresyon analizi (ÇLRA)

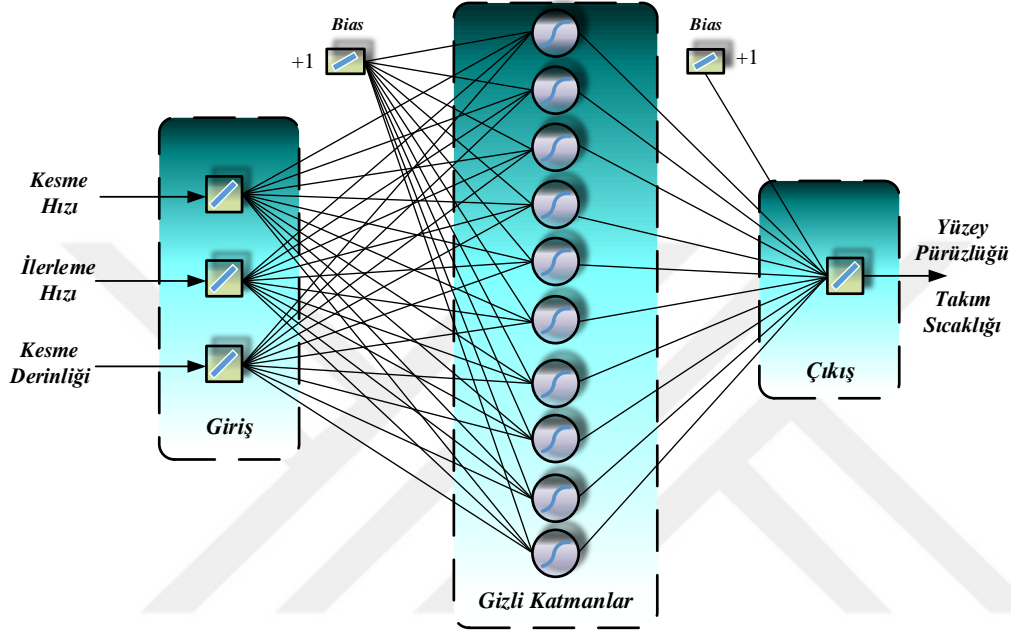
Çoğu mühendislik problemi, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin belirlenmesini içerir. Regresyon analizi, bu alandaki bilim adamlarının her zaman ilgisini çeken istatistiksel araçlardan biridir. Genel olarak regresyon modelleri, modellerin verilere uydurulması süreci olarak düşünülebilir. Regresyon modellerinin spesifik bir biçimi olan doğrusal bir regresyon modelinde, doğrusal tahmin fonksiyonları verileri modellemek için kullanılır ve çıktı parametreleri verilerden tahmin edilir. Basit doğrusal regresyonda, bağımlı bir değişkenin değerini tahmin etmek için tek bir bağımsız değişken kullanılır. Çoklu doğrusal regresyonda, bir bağımlı değişkenin değerini tahmin etmek için iki veya daha fazla bağımsız değişken kullanılır. İkisi arasındaki fark, bağımsız değişkenlerin sayısıdır. Her iki durumda da yalnızca tek bir bağımlı değişken vardır. Regresyon analizinin birçok uygulamasında, birden fazla girdi değişkeninin dahil edildiğini ve bunun da "çoklu lineer regresyon" fonksiyonuna sahip olmaya yol açacağını belirtmek gerekir. Bu durumda ÇLRM'de, gözlemlenen verilere doğrusal bir denklem uydurarak iki veya daha fazla giriş değişkeni arasındaki korelasyonu değerlendirilir. Çoklu lineer regresyon, verilerin özetlenmesinin yanı sıra değişkenler arasındaki ilişkinin araştırılmasını içerir (Khademi, Akbari, Jamal ve Nikoo, 2017; Sadrmomtazi, Sobhani ve Mirgozar, 2013). Çoklu doğrusal regresyon modelinin genel formu Eş. 3.12'de verilmiştir.

$$\hat{Y} = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j X_j \quad (3.12)$$

Bu denklemde \hat{Y} model modelin çıktısıdır, X_j 'ler modelin bağımsız girdi değişkenleridir ve $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ kısmi regresyon katsayılarıdır. Parametreler, modelin çıktısı ve eğitim veri setindeki çıktısı arasında en fazla benzerliğe yol açacak şekilde eğitilir. Bu nedenle, her veri noktasından regresyon denkleminin dikey sapmalarının karelerinin toplamını en aza indiren tek bir optimizasyon modeli kullanılır. Bir veri noktası tam olarak uyan çizgi üzerinde yer alıyorsa, dikey sapma sifıra eşit olur (Fausett, 2006).

Tez kapsamında yapılan tahmin çalışmaları için üniversal torna tezgâhında HSS (Yüksek Hız Çeliği) kesici takım ile farklı kesme hızları, ilerleme hızları ve kesme derinliği değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, S235JR kaliteye sahip, 35 mm çaplı silindirik malzeme tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Tornalama esnasında yüzey pürüzlülüğü ve takım sıcaklığı verileri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler Yapay Sinir Ağları (YSA) ve

Çoklu Lineer Regresyon Modeli (ÇLRM) eğitimi için kullanılmıştır. YSA ve ÇLRM modellerinin eğitiminin tamamlanmasının ardından; yüzey pürüzlülüğü ve takım sıcaklığı, 12 farklı deney seti kullanılarak tahmin edilmiştir. Elde edilen tahmin verileri çeşitli performans kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan YSA modeli Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21. YSA ağ modeli

3.7. Taguchi ve Varyans Analizi

Japon bilim adamı Geneuchi Taguchi 1970’li yıllarda ürün kalitesini artırmaya yönelik çalışmalara başlamış ve en iyi yöntemin ürün tasarımı ve imalatı esnasında parametrelerin doğru seçilmesi gerektiği kararına varmıştır. Bu amaç doğrultusunda mühendislik deney sürecini optimize etmek için yeni yöntemler geliştirmeye başlamıştır. Taguchi’nin çalışmalarının nihayetinde 1978 yılında geliştirdiği ve kendi isminin verildiği, tasarımda ve imalatla kullanılabilir ve sistem tasarımı, parametre tasarımı, tolerans tasarımı olmak üzere üç süreçte gerçekleştirilebilen bir yöntem geliştirmiştir.

Taguchi yönteminin en temel amacı kontrol edilemeyen koşullar veya üretim parametreleri altında güvenilir ve sağlam sistemler tasarlamak ve yüksek kaliteye sahip ürünler üretebilmektir (Taguchi, 1978). Taguchi yöntemi, ürünü ve birbirlerini etkileyen birden fazla parametre olması durumunda tercih edilmektedir. Kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen

değişkenlerin ürün kalitesine olan etkilerinin birlikte tespit edilebildiği en etkili yöntemlerden birisidir. Taguchi yöntemini kullanarak birçok değişkenin ürün üzerindeki etkisini daha az maliyetle ve daha kısa sürede araştırmak mümkündür (Kivak, 2014).

Deneysel tasarım, mühendislik dünyasında üretim sürecini iyileştirmek için önemli bir araçtır. Doğru deneysel tasarım, proses verimliliğinde iyileşme, varyansların azalması ve istenen ürün kalitesine ulaşma imkanı artırmaktadır. Taguchi yöntemi, deneysel tasarım ve optimizasyon için yaygın olarak kullanılmaktadır. Taguchi yönteminin uygulamalarını havacılık, otomotiv, enerji ve imalat başta olmak üzere birçok sektörde görmek mümkündür.

Taguchi yönteminin geleneksel uygulamalardan farklı, benzersiz ve güçlü bir kalite geliştirme tekniği olmasıdır. Çevre, makine aşınması ve diğer dış faktörlerin günlük ve mevsimsel değişikliklerine karşı "sağlam" veya duyarsız üretim sistemleri geliştirdi. Kalite mühendisliğine yönelik Taguchi yaklaşımı, kaliteyi iyileştirmenin ana yolu olarak varyasyonu en aza indirmeye büyük önem vermektedir. Dış koşullardan etkilenmeyen ürün ve süreçler tasarlamak ve bunu geliştirme ve tasarım aşamasında deneysel tasarım kullanarak inşa etmektir. Yöntem, ana değişkenlerin ve etkileşimlerin minimum sayıda denemede araştırılmasını sağlayan bir dizi tablo içerir. Taguchi Yöntemi, insanların ortak hedefi belirlemesini kolaylaştıracak olan Temel İşlevsellik fikrini kullanır, çünkü durumdan duruma değişmeyecektir ve geniş çapta ve sık değişen durumlar için sağlam bir standart sağlayabilir. Taguchi Metodu'nun, ortaya çıkan insan odaklı kalite değerlendirme yaklaşımlarıyla da çok uyumlu olduğu belirtilmektedir.

Proses parametrelerinin optimizasyonu, prosesin kalitesi, üretkenliği ve maliyet yönleri üzerinde büyük kontrole sahip olmak için yapılır. Çevrimdışı kalite kontrol, nispeten düşük bir maliyetle ürün kalitesini iyileştirmek için etkili bir yaklaşım olarak kabul edilir. Proses parametrelerinin işleme prosesi üzerindeki etkisini incelemek için varyans analizi (ANOVA) kullanılır. Yaklaşım, performans özelliklerini incelemek için Taguchi yöntemine dayanmaktadır, sinyal-gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmaktadır.

Taguchi yöntemi;

- Faktörlerin ve etkileşimlerin belirlenmesi,
- Her faktörün seviyelerinin belirlenmesi,

- Uygun ortogonal matrisin seçimi,
- Faktörlerin ve etkileşimlerin ortogonal matrislerin sütunlarına aktarılması,
- Deneilerin yapılması,
- Verilerin analizi / optimum seviyelerin belirlenmesi ve
- Doğrulanması olmak üzere yedi adımını içermektedir (Chen ve Kurniawan, 2014; Kolhe ve diğerleri, 2016; Rao ve diğerleri, 2004; Semioshkina ve Voigt, 2006; Sivasakthivel ve diğerleri, 2013).

Talaşlı imalat teknolojilerinde ürün kalitesi değerlendirilirken dikkate alınan en önemli kriterlerden biri yüzey pürüzlülüğü olarak görülmektedir. İşlenen parçanın istenen yüzey pürüzlülüğüne ulaşması için takım titreşiminin minimum seviyelere düşürülmesi gerekir. İşleme sürecinde yüzey pürüzlülüğünü ve titreşimi etkileyen en önemli parametreler kesme derinliği, ilerleme hızı, dönüş hızı, takım aşınması ve çıkıntı gibi kesme parametreleridir. Daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmek için bu önemli parametrelerin optimize edilmesi gerekir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada öncelikle yüzey pürüzlülüğü ile takım titreşimi arasındaki ilişkinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun yanında kesme derinliği, ilerleme hızı, iş mili hızı gibi kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi ve en iyi ürün kalitesi için tüm parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Taguchi Yöntemi kullanılarak geliştirilen optimum parametre kombinasyonu, deneysel testler yardımıyla doğrulanmıştır.

Tez kapsamında kontrol faktörleri, kesme derinliği (a), ilerleme hızı (f), dönme hızı (v) olmak üzere üç parametre olarak seçildi. Bu üç kesme parametresi ve seviyeleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3. 8. Tornalama parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme Derinliği (mm)	A	1	0,5	0,3
İlerleme Hızı (mm/s)	B	0,3	0,25	0,2
Dönme Hızı (rpm)	C	1200	800	540

Tornalama deneyleri, üç kesme derinliğinde (1, 0,5, 0,3 mm), üç ilerleme hızında (0,3, 0,25, 0,2 mm / s) ve üç iş mili hızında (1200, 800, 540 rpm) gerçekleştirildi.

3.8. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve İmalata Uyarlanması

Modern toplumun sürdürülebilirliğinin sağlanmasında önemli unsurlardan bir tanesi olan üretim sektöründe yaşanan teknolojik gelişmeler, üretimin ve ürünlerin karmaşıklığını da beraberinde getirmiştir. Bu karmaşıklık, geleneksel imalat sistemleri ve bunlarla ilgili yönetim yaklaşımlarının iyileştirilmesi zorunluluğunu ortaya koymuştur. Nesnelerin İnterneti (IoT), bu bağlamda üretim esnasında verilerin gerçek zamanlı toplanması, depo edilmesi ve iletilmesini sağlayarak üretim kalitesini ve verimliliğini eş zamanlı artırma hususunda üreticilerin işlerini kolaylaştırmış ve akıllı üretim sistemlerinin gelişimine yardımcı olmuştur.

Endüstri 4.0 ve akıllı üretimin önemli unsurlarından bir tanesi olan ve ilk kez 2009 yılında Kevin Ashton (Kevin Asthon, 2010) tarafından kullanılan Nesnelerin İnterneti (IoT) için nesne kavramı; sensörler, izleme ve görüntüleme cihazları, veri analiz sistemleri, veri depolama alanları, biochipler veya erişim düzeneklerinin tamamını kapsamaktadır. Amacı, iş ve üretim süreçlerini izlemek, müşteri ilişkilerini ve deneyimini geliştirmek, zamandan ve paradan tasarruf ederek rekabet gücünü artırmak, çalışan verimliliğini artırmak, imalatta kalite kontrol çalışmalarını gerçek zamanlı yapmak üretim kalitesini artırmaya yönelik haberleşme ağını kurmak olan IoT' nin kullanımı ile firmaların zaman tasarrufu ve dolayısı ile karlılık oranları önemli ölçüde artmıştır. IoT beş ana işlevi yerine getirebilme yetisine sahiptir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. IoT' nin temel işlevleri

İletişim teknolojileri yardımı ile şirketlerin karar mekanizmalarını hızlandıran ve önerilerde bulunarak verileri izleyen, toplayan ve analiz ederek bilgilendirme yapan cihaz ağı olarak tanımlanan IoT'ye güncel teknolojik gelişmelerin verdiği destekle hemen hemen her sektörde kullanım alanına sahip hale gelmiştir. Bunlar temel manada:

- Akıllı ev ve akıllı fabrika uygulamaları,
- Sağlık uygulamaları,
- Akıllı hayvancılık uygulamaları,
- Akıllı çevre ve atık yönetimi uygulamaları,
- Hasta takip sistemi,
- Lojistik,
- Giyilebilir uygulama,
- Trafik uygulamaları,
- Araç takip sistemleri,
- Alarm sistemleri,
- Üretim kontrolü ve endüstriyel uygulamalardır.

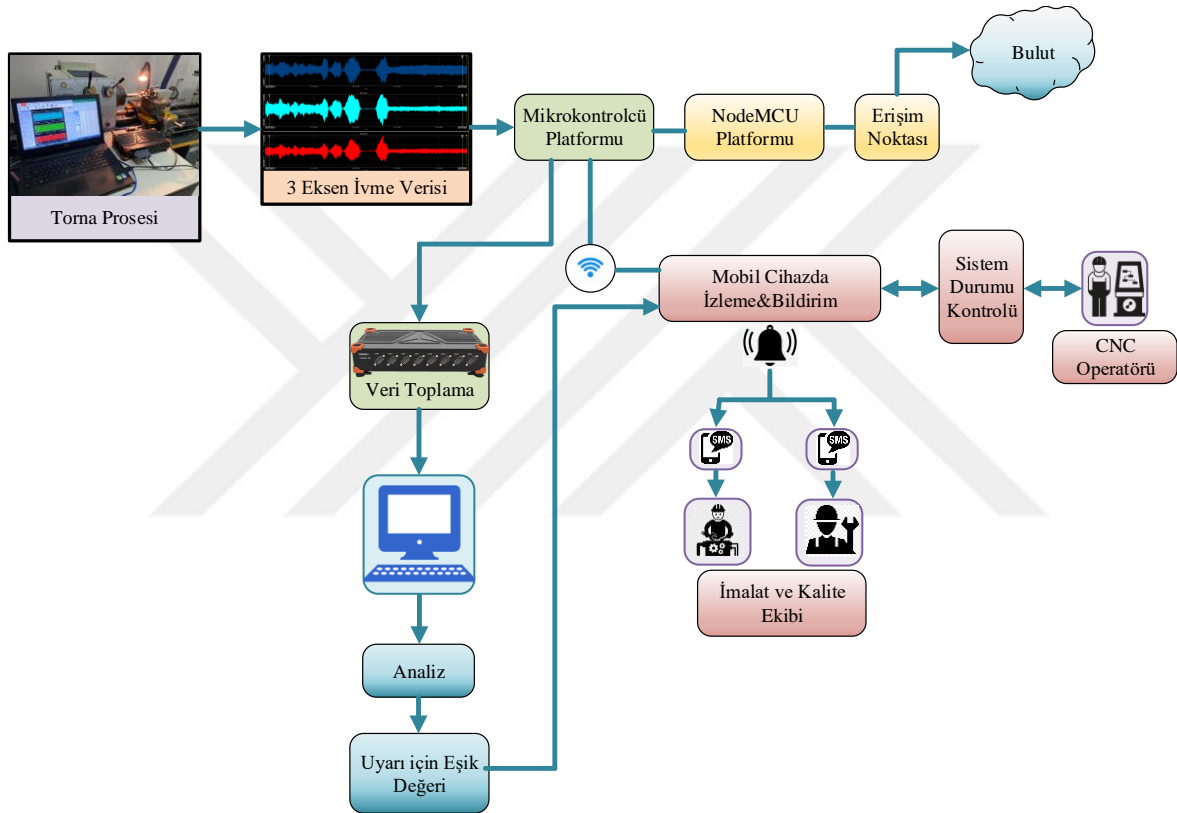
IoT çalışmalarında ve hizmetlerin içeriğinde yaygın olarak dört teknoloji kullanılmaktadır. Bunlar; Radyo Frekans Tanıma Sistemi (RFID) olarak isimlendirilen ve temassız bir şekilde cisimleri tanımlamada kullanılan uygulamalardır (Teixeira, Pereira, Wong, Nogueira ve Oliveira, 2019). İkincisi, kablosuz sensör ağı (Wi-Fi) (Ahmad, Cuomo, Wu ve Jeon, 2019) olarak bilinen, fiziksel ve çevresel (hareket, gürültü, titreşim, ses basınç vb.) ve çevresel olayları sensörler aracılığı ile izlemede kullanılan sistemlerdir. Üçüncüsü, genellikle iş ve üretim süreçlerini yazımlara dönüştürmede kullanılan Ara Katman Yazılımları (Middleware) (Pauget ve Dammak, 2019). Dördüncüsü, bilgisayar ve internete bağlı benzeri cihazlardan verileri depolayan ve gerekli olması durumunda kullanıcılar ile paylaşan Bulut Bilişimi Teknolojisi (cloud computing)'dir (Pauget ve Dammak, 2019).

IoT çalışmalarında haberleşme için pek çok platform kullanılmakla birlikte en yaygın kullanılanları; Fieldbus, Modbus, Uart, Profibus, As-i, Canbus, Rs, Devicenet, Controlnet, Hart, Ethernet ve PLC sistemleridir. Haberleşmenin sağlanabilmesi için ise Ethernet, WiFi, RF ve GSM gibi iletişim araçlarına ihtiyaçları vardır. Bu bileşenler ve platformların yardımı ile makineler ve internete bağlı cihazlar arasında iletişim sağlanabilmektedir (Guo ve diğerleri, 2018; Koene ve diğerleri, 2020; Nabeel ve diğerleri, 2019; Yang, 2018).

IoT uygulamaları sosyal yaşantıda olduğu gibi endüstriyel alanda da kolaylıklar sağlamaktadır. Endüstriyel ortamlarda kullanılan ve “Endüstriyel Nesnelerin İnterneti” (IIoT) olarak adlandırılan çözümler, günümüzde yeni nesil akıllı fabrikalarda operasyonel verimliliği artırmayı amaçlayan yenilikçi ve son derece güvenilir sistemlerin geliştirilmesine imkan tanımıştır (Khuntia, Rueda ve Meijden, 2017). Periyodik bakımların yanı sıra sürekli kontrol işlemlerini gerçekleştiren IIoT sistemleri, makine arızalarında ve ürün kalitesinde yaşanacak sorunlarda oluşturacağı uyarı sistemi ile firmaya büyük avantajlar sağlamaktadır.

Veri toplama, iletme, depolama ve işlemede de kolaylıklar sağlayan IioT’de buluta iletilen verilerin boyutu oldukça yüksektir (Li ve diğerleri, 2017). Literatürde büyük veri olarak adlandırılan bu verilerin işlenmesi için genellikle yapay zeka teknikleri kullanılmaktadır (Li ve diğerleri, 2018). Yapay zeka tekniklerinin kullanımı ile verilerin işlenmesi ve analizinin gerçekleşme süresi yüksek oranda azalmıştır (Nabeel ve diğerleri, 2019; Sivarajah ve diğerleri, 2017).

Talaşlı imalat esnasında oluşan titreşimlerin üç eksen den toplanması için oluşturulan elektronik devrede, bir adet ADXL-345 ivmeölçer ve bir adet ESP32 mikrodenetleyicisi yer almaktadır. ADXL-345sensöründen elde edilen ivme verileri ESP32 mikrodenetleyici platformu aracılığı ile UART bağlantısı ile dizüstü bilgisayar ortamındaki Microsoft Excel ara yüzüne aktarılmıştır. Aynı zamanda kullanılan ESP32 mikrodenetleyici platformu sayesinde Wi-Fi kablosuz bağlantısı ile mobil cihaza aktarılabilmektedir. Tez kapsamında gerçekleştirilen IoT uygulamasının akış şeması ve işleyişi Şekil 3.23’de verilmiştir.



Şekil 3.23. IoT uygulaması şematik gösterimi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Talaşlı İmalatta Parametre Tahmini

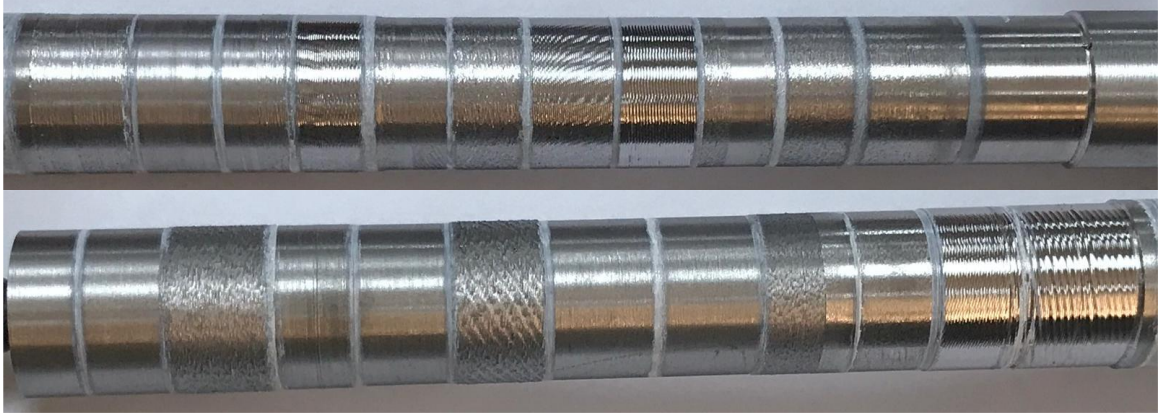
Farklı amaçlar için kullanılabilen yapay zeka tekniklerindeki gelişmeler, birçok farklı endüstriyel uygulamada kullanılmasını sağlamıştır. Bunlar, esas olarak endüstriyel uygulamalarda birden fazla parametrenin etkisi altında karmaşık sistemlerin modellenmesi, tanımlanması, optimizasyonu, tahmini ve kontrolü için kullanılır. AI tekniklerinin artan doğruluğu ile son yıllarda talaşlı imalatta ve özellikle tornalama konusunda da geniş bir uygulama alanı elde etmiştir.

Tez kapsamında yapılan tahmin çalışmaları iki farklı yönde ilerlemiştir. Bunlardan ilki Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Çoklu Lineer Regresyon Modeli (ÇLRM) kullanılarak gerçekleştirilen tahmin çalışması ikincisi ise ANFIS-ACO, ANFIS-GA, ANFIS-PSO ve ÇLRM'nin kullanılması ile gerçekleştirilen tahmin çalışmalarıdır.

4.1.1. YSA ve ÇLRM tabanlı tahmin

Bu çalışmada, üniversal torna tezgâhında HSS (Yüksek Hız Çeliği) kesici takım ile farklı kesme hızları, ilerleme hızları ve kesme derinliği değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, S235JR kaliteye sahip, 35 mm çaplı silindirik malzeme tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Tornalama esnasında yüzey pürüzlülüğü ve takım sıcaklığı verileri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Çoklu Lineer Regresyon Modeli (ÇLRM) eğitimi için kullanılmıştır. YSA ve ÇLRM modellerinin eğitiminin tamamlanmasının ardından; yüzey pürüzlülüğü ve takım sıcaklığı 12 farklı deney seti kullanılarak tahmin edilmiştir. Elde edilen tahmin verileri çeşitli performans kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

Yüzey pürüzlülük ve kesici takım sıcaklık değerleri 48 farklı test sonucundan elde edilmiştir. Her bir deney kombinasyonu için numune üzerinde işleme gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deney sonrası ölçülmüştür. Kullanılan numunelerin işleme sonrası görüntüsü Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

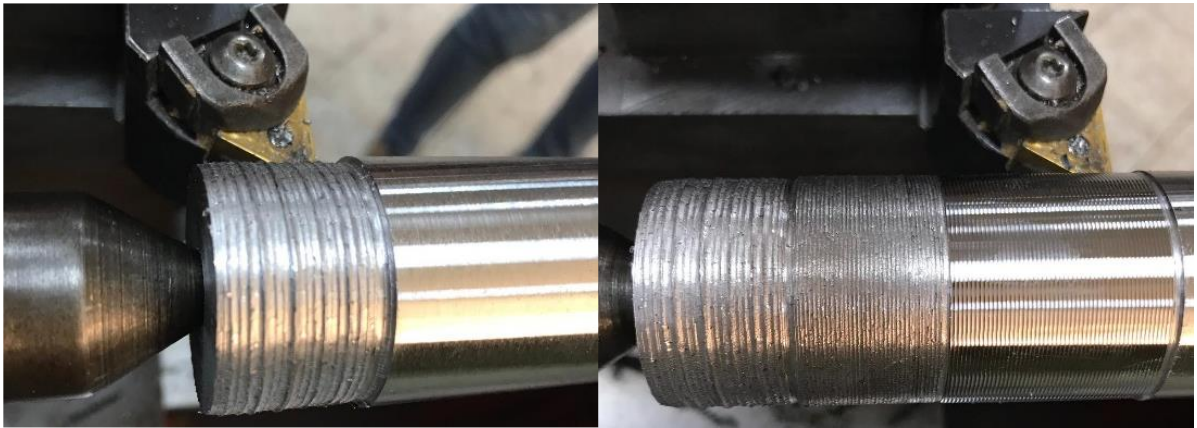


Şekil 4.1. Tornalama sonrası iş parçası

Yüzey pürüzlülük sınıfını belirlemek için kullanılan mastar takımının özellikleri Çizelge 4.1'de verilen değerlere göre sınıflandırılmıştır. Tornalama sonrası iş parçasında oluşan yüzey pürüzlülüğü görüntüleri Şekil 4.2'de sunulmuştur.

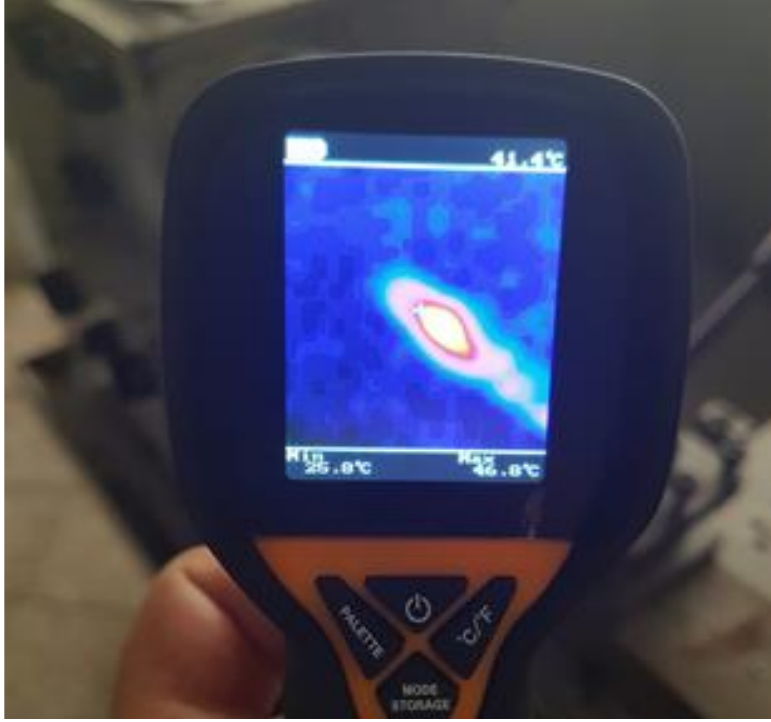
Çizelge 4. 1. Yüzey pürüzlülüğü sınıfları

Sınıf	Ra (μm)	Rz (μm)
N6	0,8-32	3,2-128
N7	1,6-63	6,1-244
N8	3,2-125	12,2-488
N9	6,3-250	23,7-950
N10	12,5-500	47,5-1900
N11	25-1000	95-3800



Şekil 4.2. Tornalama esnasında alınan görüntü

Talaş kaldırma esnasında yüksek sıcaklıklar oluşabilmektedir. Oluşan bu sıcaklık, gerek takım ömrüne gerek yüzey pürüzlülüğü ve iş parçası iş yapısına olumsuz etkiler bırakarak ürün kalitesini bozabilmektedir. Bu yüzden işleme esnasında oluşan sıcaklığın belli bir seviyenin altında tutulması gerekmektedir. İşleme esnasında takım sıcaklığını ölçümünün bir görseli Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Takım sıcaklığı ölçümü

Gerçekleştirilen 48 deneyden 36' sı 370, 540, 800 ve 1200 d/dk dönüş hızı, 0,3, 0,5 ve 1 mm/dev ilerleme hızı ve 0,5, 1 ve 1,5 mm dalma derinliği parametrelerinin farklı kombinasyonları kullanılarak elde edildi. Toplanan 36 veri YSA ve ÇLRM için eğitim ve test verisi olarak kullanılmıştır. Daha sonra YSA ve ÇLRM' nin daha önce görmediği değerler için yüzey pürüzlülük sınıfı ve kesici takım sıcaklık değerleri tahmin edilmiştir. Yüzey pürüzlülük sınıfı (P) ve kesici takım sıcaklığı (T) parametreleri için hesaplanan ağırlıklar ve ilgili bağıntılar Eş. 4.1 ve 4.2'de gösterilmektedir.

$$P = 5,7165 - v.0,0061 + f.3,5075 + d.0,4257 \quad (4.1)$$

$$T = 29,362 + v.0,0032 + f.1,4189 + d.6,503 \quad (4.2)$$

Denklemlerde v kesme hızı, f ilerleme hızı ve d kesme derinliğidir. YSA modelinde, ağ yapısı olarak ileri beslemeli geri yayılım ağ yapısı kullanılmıştır. Gizli ve çıktı katmanları

için tangent-sigmoid transfer fonksiyonunun kullanıldığı ağ yapısında eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt eğitim algoritması kullanılmıştır.

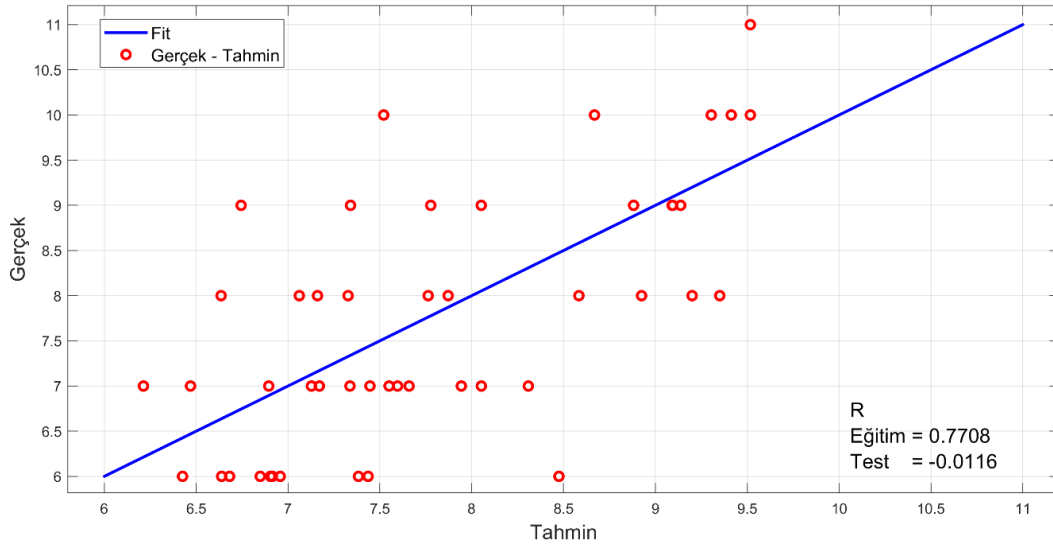
Eğitim, gizli bir katman için ara nöron sayısı birer birer artırılarak tekrarlandı. MSE değeri dikkate alınarak ara nöron sayısı belirlendi. Yüzey pürüzlülüğü sınıfı için 44 ara nöron kullanılırken, takım ucu sıcaklığının tahmini için 31 ara nöron seçilmiştir.

Çizelge 4. 2. YSA ve ÇLRM performans kriterleri

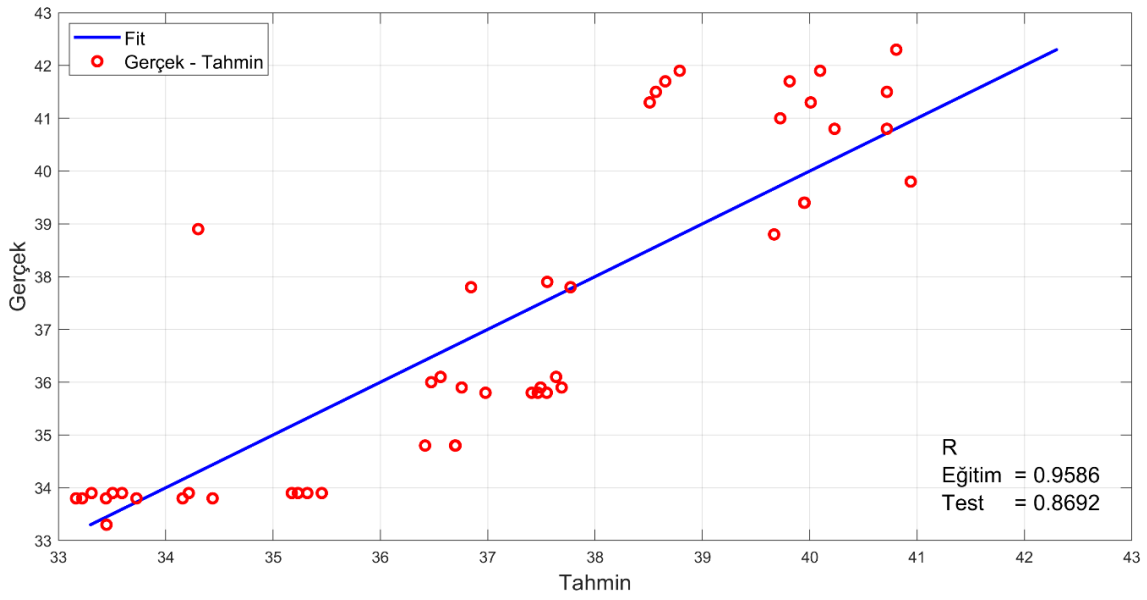
Kesici Takım Sıcaklığı						
	Eğitim		Test		Tüm Veri	
	ANN	ÇLRM	ANN	ÇLRM	ANN	ÇLRM
MSE	1,0611	1,1994	0,0186	4,2618	0,8006	2,3400
MAE	0,5219	1,0008	0,0847	1,8641	0,4126	1,2166
RMSE	1,0301	1,3036	0,1374	2,0664	0,8947	1,5297
R	0,8889	0,8100	0,9986	0,8228	0,9189	0,7555
Yüzey Pürüzlülüğü						
	Eğitim		Test		Tüm Veri	
	ANN	ÇLRM	ANN	ÇLRM	ANN	ÇLRM
MSE	0,1484	0,7693	0,0529	1,8960	0,1245	1,0510
MAE	0,2566	0,7059	0,1863	1,2388	0,2390	0,8391
RMSE	0,3852	0,8771	0,2300	1,3770	0,3528	1,0252
R	0,9228	0,5941	0,9825	0,0001	0,9320	0,4276

Eğitim sonucunda her iki modelde de 12 adet veri seti kullanılmış ve ağa ait veriler girilerek tahmin işlemi yapılmıştır. ÇLRM ve YSA modelinden elde edilen test, eğitim ve tüm veriler için performans kriterleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

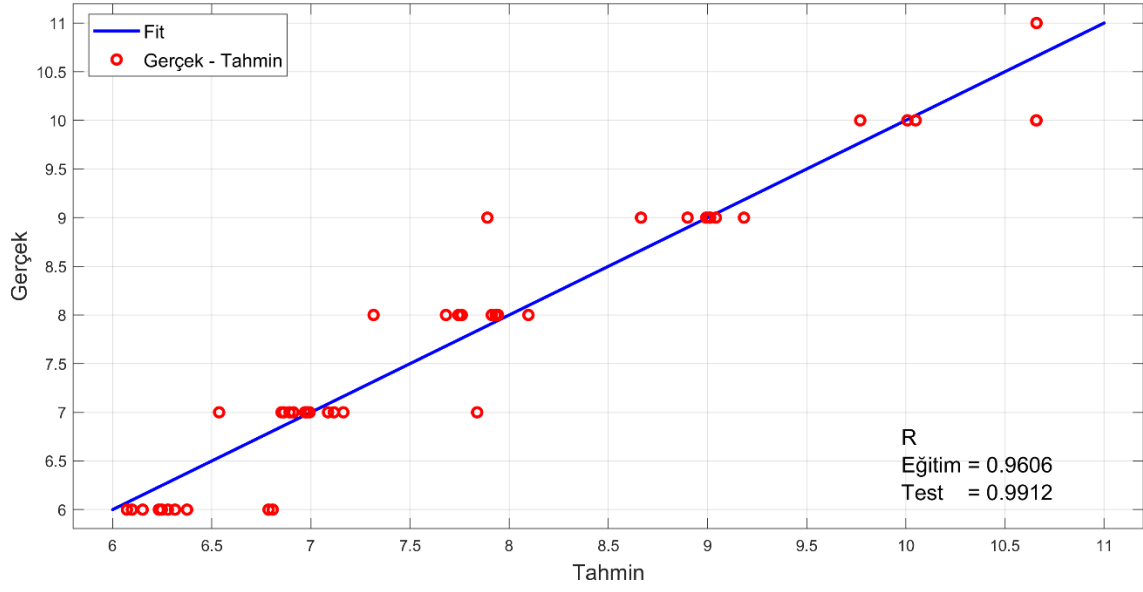
Eğitim ve test sürecinin dağılım grafikleri Şekil 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7’de gösterilmiştir. Modellerin başarısını net bir şekilde görebilmek için yüzey pürüzlülük sınıfı ve takım sıcaklığı Şekil 4.8 ve 4.9’de grafikler halinde sunulmuştur.



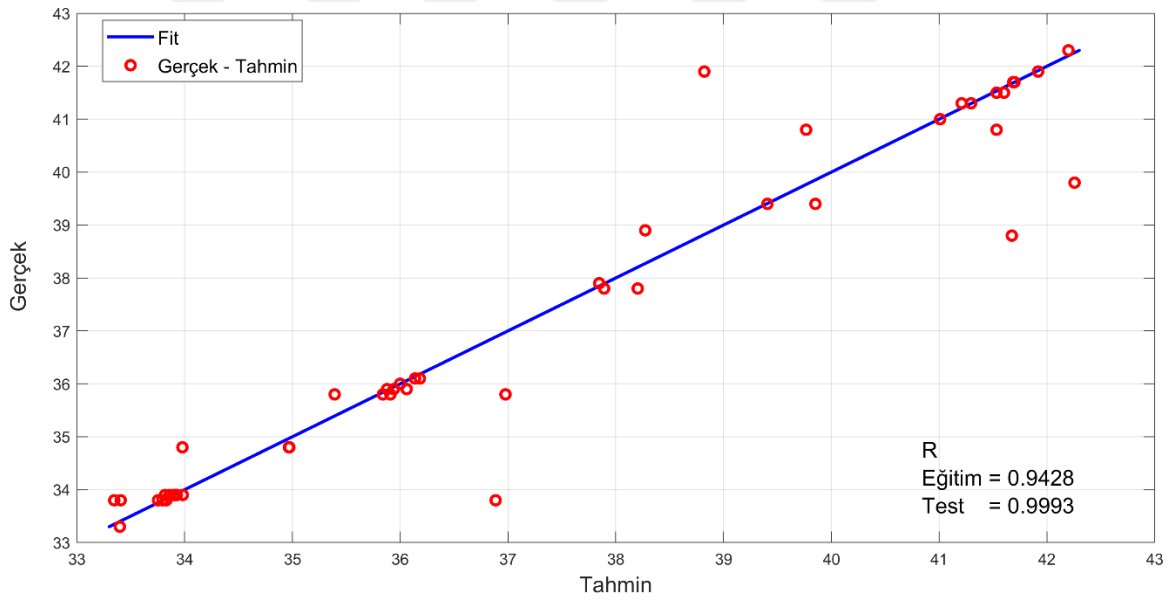
Şekil 4.4. ÇLRM (Yüzey Pürüzlülüğü) dağılım grafiği



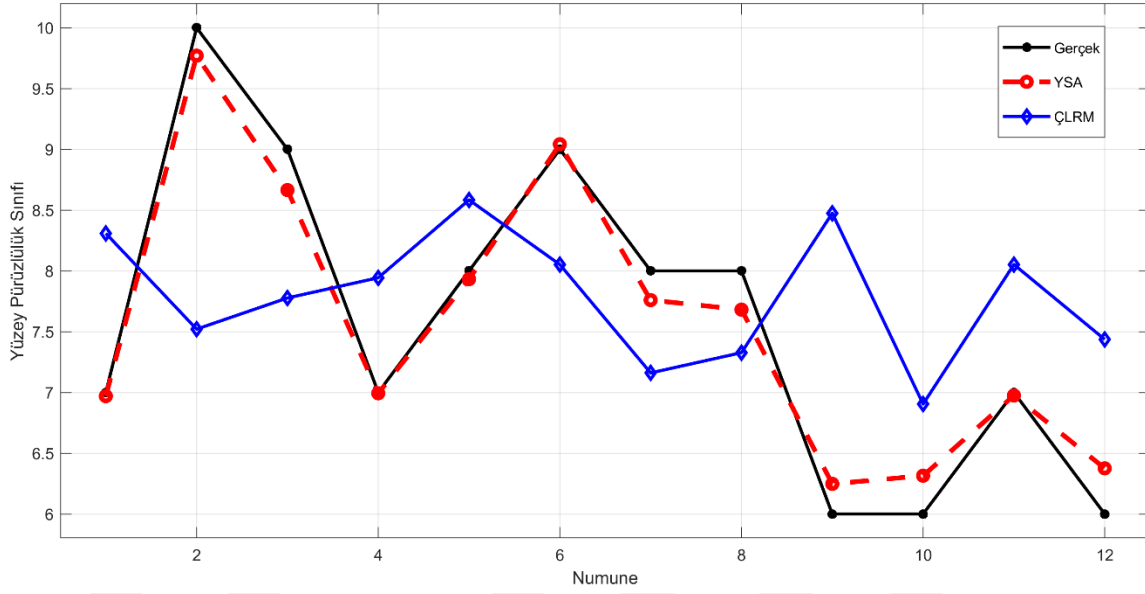
Şekil 4.5. ÇLRM (Takım Sıcaklığı) dağılım grafiği



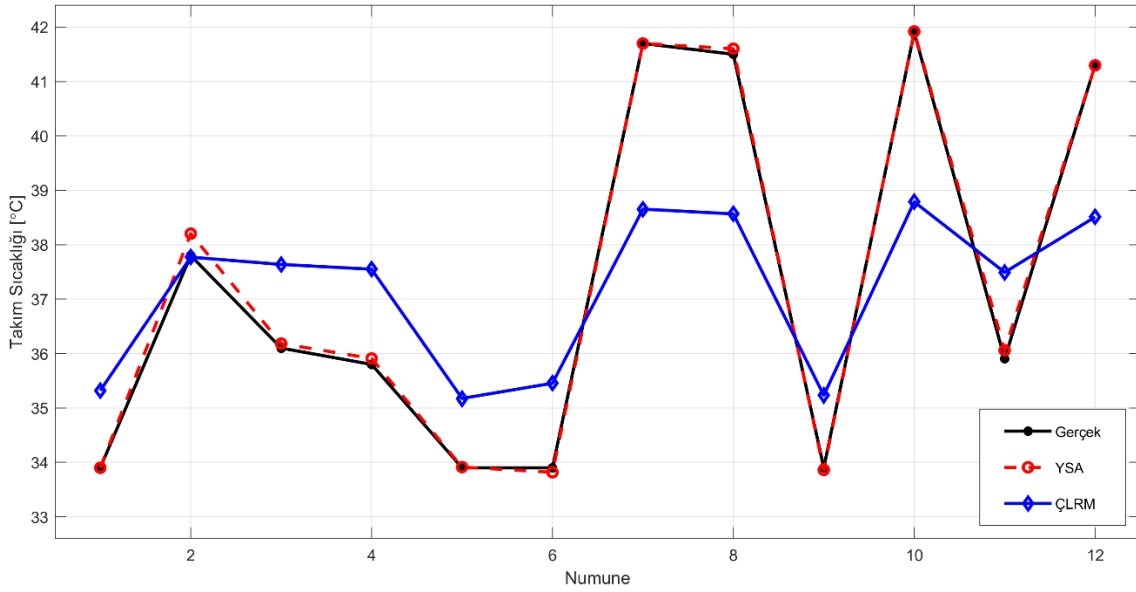
Şekil 4.6. YSA (Yüzey Pürüzlülüğü) dağılım grafiği



Şekil 4.7. YSA (Takım Sıcaklığı) dağılım grafiği



Şekil 4.8. Yüzey Pürüzlülüğü için Model Sonuçları



Şekil 4.9. Takım Sıcaklığı için Model Başarı Sonuçları

4.1.2. ANFIS ve metasezgisel algoritmalar tabanlı

Bu bölümde, AA6013 alüminyum alaşımının tornalanması sırasında Ra ve Acc tahmininde ANFIS-ACO, ANFIS-GA, ANFIS-PSO ve ÇLRM'nin performansı değerlendirilmektedir. Değerlendirmelerin ardından ANFIS için en uygun entegrasyon algoritması belirlendi. Çizelge 4.3'te ACC ve RA tahmini için oluşturulan ÇLRM, ACO, GA ve PSO tabanlı ANFIS modelinin sonuçları detaylı olarak verilmiştir. Ortalama Kare Hata (MSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve R kriterlerine göre yapılan değerlendirmeler, eğitim ve test sonuçlarını içerir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların literatürdeki bilgilerle uyumlu olduğu görülmektedir (Kakinuma ve diğerleri, 2014; Sevim, Bilgic, Cansiz, Ozturk ve Atis, 2021; Yang ve diğerleri, 2020).

Çizelge 4. 3. Tahmin modellerinin karşılaştırılması

		MSE		MAE		R	
		Train	Test	Train	Test	Train	Test
Acc	ÇLRM	0,068847	0,083466	0,217571	0,241197	0,725249	0,726901
	ACO	0,066702	0,078225	0,217374	0,23551	0,720807	0,761294
	GA	0,030968	0,025861	0,15536	0,146241	0,892455	0,946903
	PSO	0,031444	0,049664	0,139707	0,162712	0,883234	0,88679
Ra	ÇLRM	0,044783	0,049864	0,174726	0,193745	0,755374	0,8244
	ACO	0,042983	0,053632	0,167134	0,196744	0,758745	0,810425
	GA	0,025824	0,034109	0,123148	0,144264	0,876478	0,911402
	PSO	0,020494	0,031704	0,109358	0,13957	0,894505	0,916647

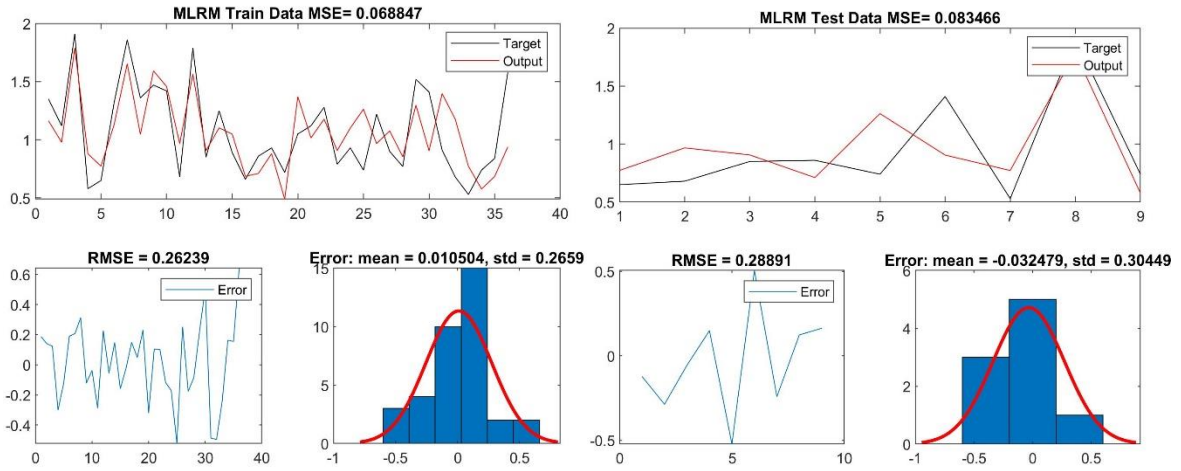
Çoklu Doğrusal Regresyon Modelinin Tahmini

Bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi en iyi şekilde tahmin etmek için kullanılan ÇLRM yönteminde model bazı hipotezler üzerine kuruludur (Panda ve diğerleri, 2020). ÇLRM denklemi, 45 deneyden oluşan veri setinin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Eş. 4.1 ve 4.2, Acc ve Ra'nın çoklu doğrusal regresyon modelini ifade eder.

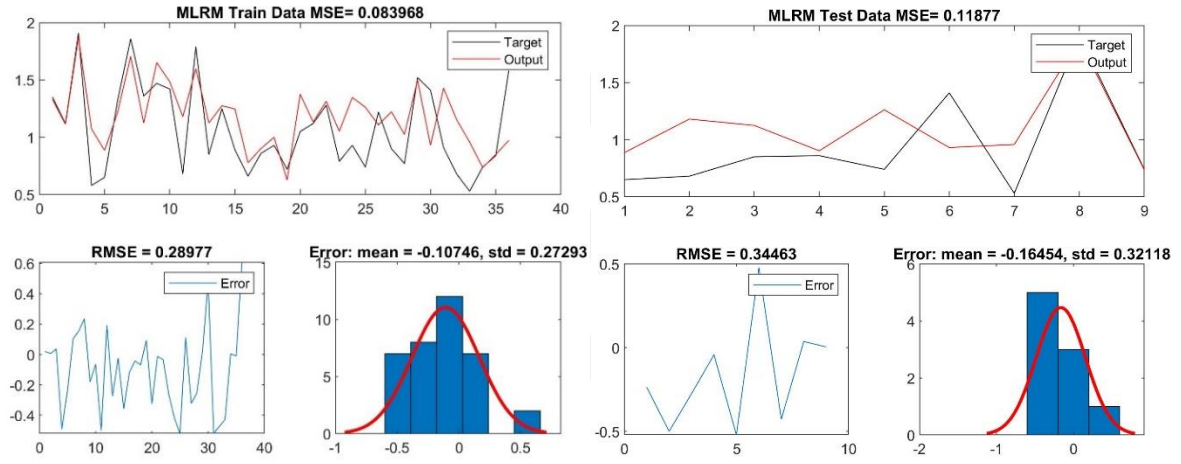
$$Acc = -0,76545 + 0,9794b + 3,9016f + 0,00033v \quad (4.1)$$

$$Ra = -0,7130 + 0,7515b + 4,4461f + 0,00041v \quad (4.2)$$

ÇLRM test sonuçlarına göre MSE, MAE ve R değerleri sırasıyla 0.083, 0.241 ve 0.726 olarak bulundu. Acc tahmini için oluşturulan ÇLRM'den elde edilen test sonuçlarının bu yazıda incelenen diğer optimizasyon yöntemlerine göre daha düşük doğruluğa sahip olduğu gözlemlenmiştir. ÇLRM, Ra tahmininde Acc tahmininden daha doğru sonuçlar veriyor gibi görünse de, GA, PSO ve ACO ile karşılaştırıldığında daha az doğru olduğu bulunmuştur. ÇLRM'nin Ra tahmininden elde edilen sonuçlarının MSE, MAE ve R için sırasıyla 0,049, 0,193 ve 0,824 olduğu görülmektedir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11, Ra ve Acc tahmini için ÇLRM modelinin sonuçlarını göstermektedir. Literatürden elde edilen bilgilere göre ÇLRM'nin birçok uygulamada metasezgisel yöntemlere göre daha düşük doğrulukta çalışabildiği görülmektedir (Eberhart ve Kennedy 1995; Panda ve diğerleri, 2020).



Şekil 4.10. Acc için ÇLRM Algoritması Eğitim ve Test Sonuçları



Şekil 4.11. Ra için ÇLRM Algoritmasının Eğitim ve Test Sonuçları

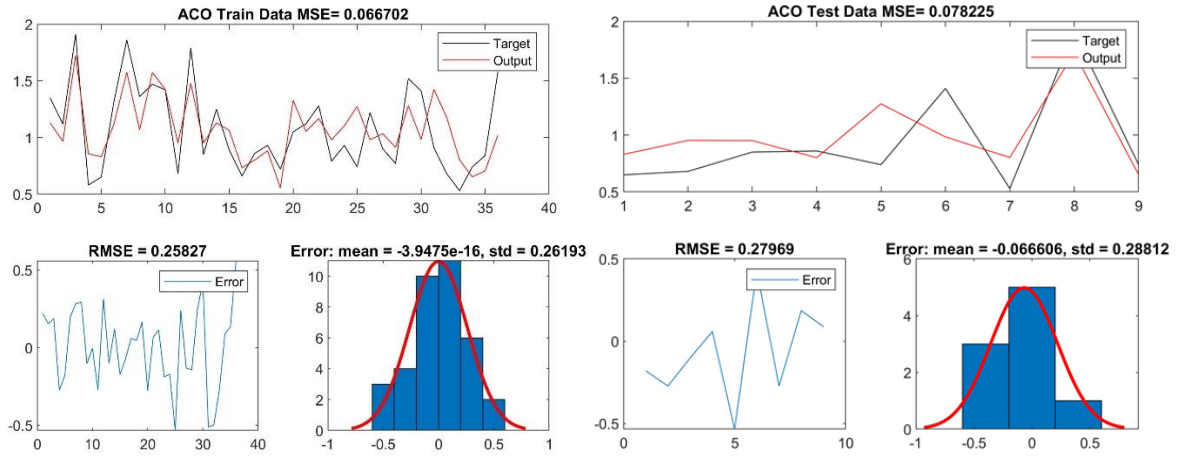
ACO Tabanlı ANFIS Tahmini

En çok kullanılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları arasında yer alan ACO, herhangi bir alana uyarlanabilmektedir. ACO eğitiminde kullanılan ana parametreler Çizelge 4.4'de sunulmuştur.

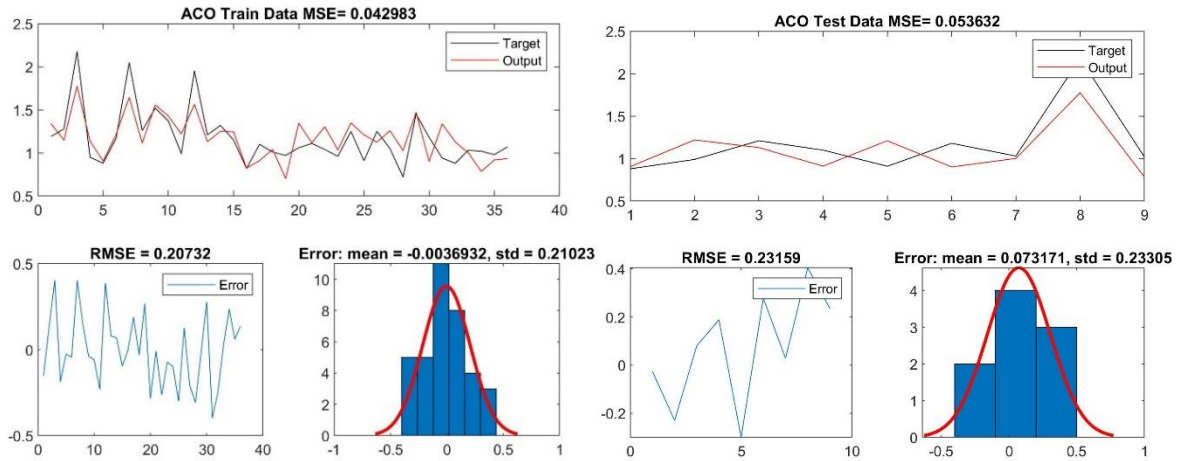
Çizelge 4.4. ACO parametreleri

Parameter	Value
Maksimum iterasyon	1000
Populasyon büyüklüğü	30
Yoğunlaştırma faktörü	0,4
Sapma-Mesafe oranı	1

ACO tabanlı modelin Acc için MSE, MAE ve R sonuçları sırasıyla 0,078, 0,235 ve 0,761 olarak bulunmuştur. Acc için ANFIS-ACO entegrasyonu ÇLRM'den daha iyi olmasına karşın GA ve PSO'nun altında kalmıştır. ACO modeli, Ra tahmini için MSE, MAE ve R değerlendirme kriterlerinde sırasıyla 0,053, 0,196 ve 0,810 sonuçlarını verdi. Şekil 4.12 ve 4.13, sırasıyla Acc ve Ra tahmini için ACO modelinin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.12. Acc için ACO Algoritması Eğitim ve Test Sonuçları



Şekil 4.13. Ra için ACO Algoritmasının Eğitim ve Test Sonuçları

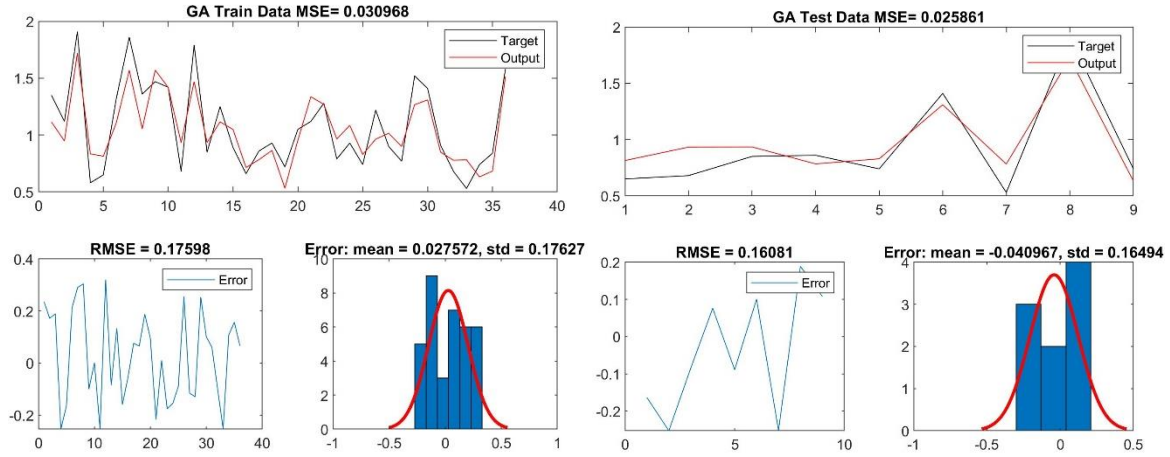
GA Tabanlı ANFIS Tahmini

Herhangi bir probleme çözüm aramakla ilgilenen GA, en iyi noktayı bulmaya çalışan bir algoritmadır. ANFIS gibi bir tahmin modelinin optimizasyonunun yanı sıra üretim parametrelerinin optimizasyonunda da kullanılabilir. GA eğitiminde kullanılan ana parametreler Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

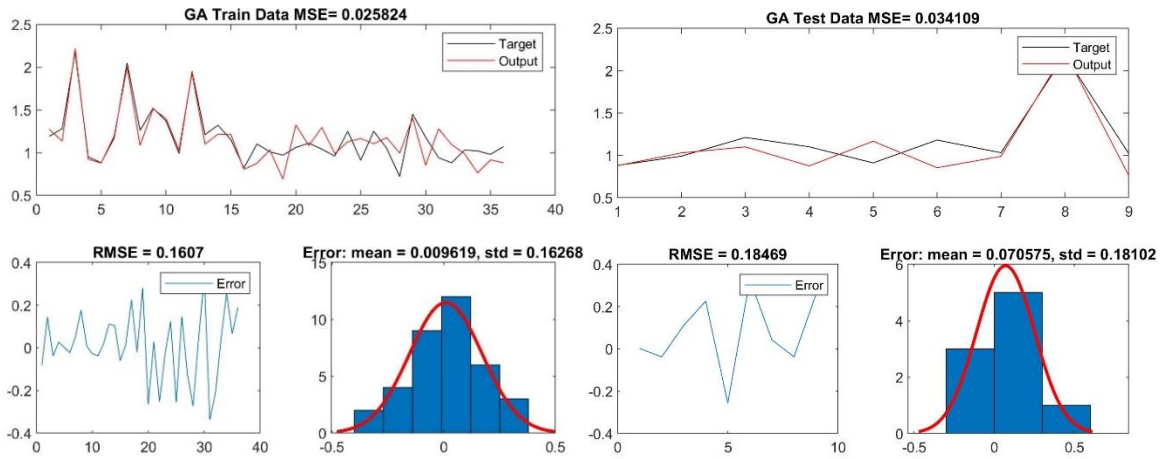
Çizelge 4.5. GA parametreleri

Parameter	Value
Maks. iterasyon	1000
Popülasyon Büyüklüğü	100
Crossover percentage	0,7
Mutation percentage	0,5
Gamma	0,2
Mutation rate	0,1
Beta	8

GA-ANFIS modeli, MSE, MAE ve R kriterleri için sırasıyla 0,025, 0,146 ve 0,946 sonuç ile Acc tahmininde en başarılı sonuçları vermiştir. Ra tahmininde MSE, MAE ve R kriterleri için sırasıyla 0,034, 0,144 ve 0,911 sonuçları ile PSO'dan sonra ikinci başarılı model olmuştur. Şekil 4.14 ve 4.15, sırasıyla Acc ve Ra tahmini için ACO modelinin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.14. Acc için GA Algorithması Eğitim ve Test Sonuçları



Şekil 4.15. Ra için GA Algoritmasının Eğitim ve Test Sonuçları

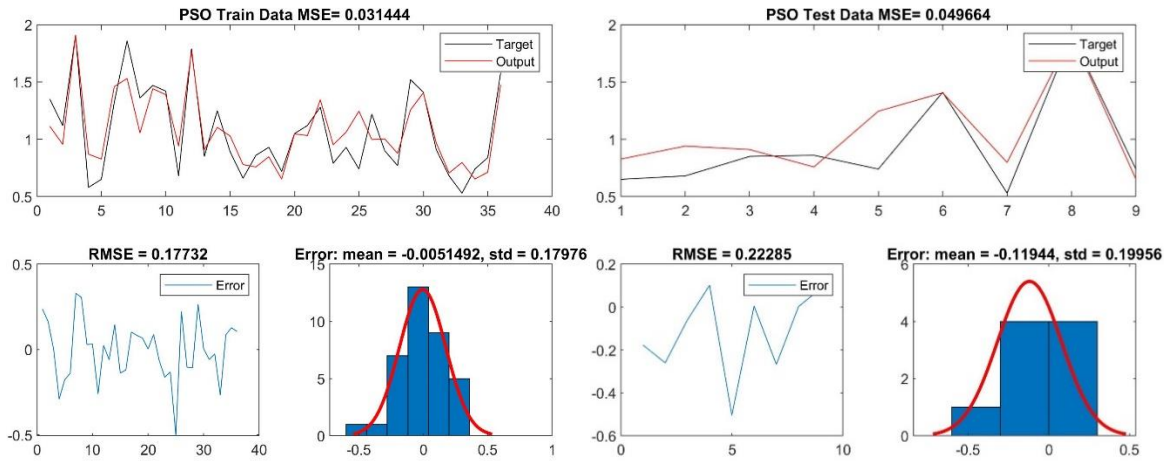
PSO Tabanlı ANFIS Tahmini

Sürü davranışlarından esinlenen PSO, literatürde sıklıkla kullanılan kanıtlanmış bir metasezgisel algoritmadır. PSO eğitiminde kullanılan ana parametreler Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

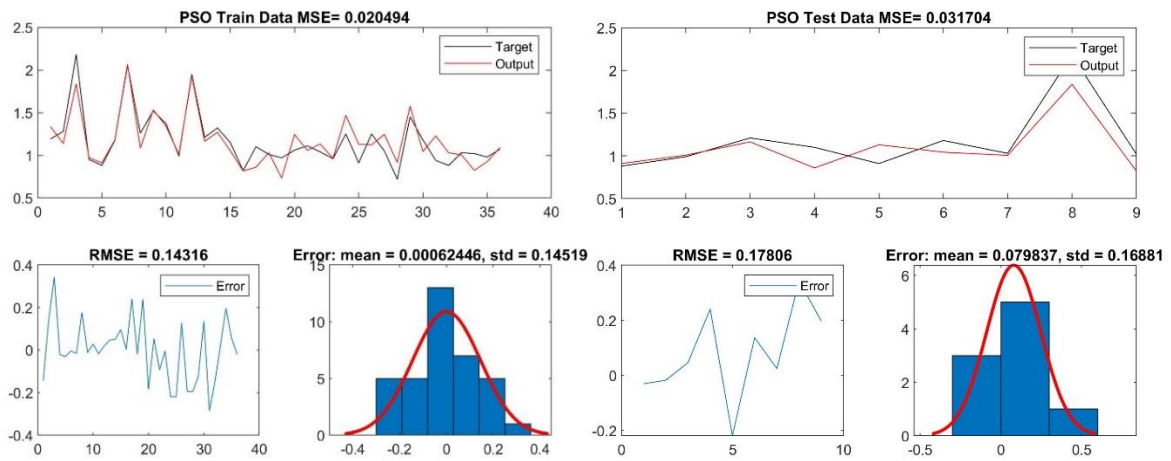
Çizelge 4.6. PSO parametreleri

Parameter	Value
Maximum iteration	1000
Size of Population	40
Inertia weight	1
Inertia Weight Damping Rate	0,99
c1 (Personal learning coefficient)	1
c2 (Global learning coefficient)	2

PSO tabanlı modelin Acc için MSE, MAE ve R sonuçları sırasıyla 0,049, 0,162 ve 0,886 olarak bulundu. PSO-ANFIS modeli, MSE, MAE ve R kriterleri için sırasıyla 0,031, 0,139 ve 0,916 sonuç ile Ra tahmininde en başarılı sonuçları vermiştir. Acc ve Ra tahmini için PSO-ANFIS modelinin sonuçları, sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17'da gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Acc için PSO Algoritması Eğitim ve Test Sonuçları



Şekil 4.17. Ra için PSO Algoritmasının Eğitim ve Test Sonuçları

Takım Titreşimi ve Yüzey Pürüzlülüğü Arasındaki Sayısal Yaklaşım

Tornalama işleminde simülasyon çalışmaları ile yapılan modeller yardımıyla kesme parametreleri seçilebilir. Kesme parametrelerinin seçiminde sadece yüzey pürüzlülüğünün dikkate alınması sonuçlarda önemli sapmalara neden olabilir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra takım titreşimi de dikkate alınmalıdır. Titreşim seviyesindeki artışlar da dönüş sırasında tırlamaya neden olabilir. Çalışmanın bu bölümünde, yüzey pürüzlülüğü ile takım titreşimleri arasında sayısal bir ilişki kurulmuştur (Mert, Bilgic, Yağlı ve Koç, 2020). Eş. 4.3, takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi sunar.

$$\text{Acc} = A \times (\text{Ra}) + B / (\text{Ra}) + C \quad (4.3)$$

Sayısal sonuç ile model sonuçları arasında A, B ve C katsayıları belirlenirken ε ile ifade edilen ve Eş. 4.4 tanımlanmıştır.

$$\varepsilon = Ra_{\text{model}} - Ra_{\text{numerik}} \quad (4.4)$$

Model sonuçlarından alınan 1920 verisi için toplam hatanın hesaplandığı bir S değeri tanımlanır (Eş. 4.5).

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (4.5)$$

Toplam hatayı en aza indirmek için A, B ve C katsayıları GA ile optimize edilmiştir. Bu bölümde önerilen yaklaşımla 0,2 kesme derinliği, 0,3 ilerleme hızı ve 800 rpm dönüş hızı ile optimum yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Optimizasyon

Taguchi yöntemi genellikle ürünü etkileyen birden fazla parametre olduğunda kullanılır. Kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen değişkenlerin ürün kalitesi üzerine etkilerinin birlikte tespit edilebildiği en etkili yöntemlerden birisidir. Taguchi yöntemini kullanarak birçok değişkenin ürün üzerindeki etkisini daha az maliyetle ve daha kısa sürede araştırmak mümkündür (Zeçiri, Alkan, Kaya ve Toros, 2018).

Taguchi yönteminin başarıya ulaşabilmesi için faktörlerin ve etkileşimlerin belirlenmesi, her faktörün seviyelerinin belirlenmesi, uygun ortogonal matrisin seçimi, faktörlerin ve etkileşimlerin ortogonal matrislerin sütunlarına aktarılması, deneylerin yapılması, verilerin analizi, optimum seviyelerin belirlenmesi ve doğrulanması adımlarının gerçekleşmesi gerekmektedir (Kumar, Zindani ve Davim, 2018). Kontrol faktörleri, kesme derinliği (a), ilerleme hızı (f), iş mili dönme hızı (v) olmak üzere üç parametre olarak seçilmiştir. Bu üç kesme parametresi ve seviyeleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Tornalama parametreleri ve belirlenen seviyeler

Parametreler	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme Derinliği (mm)	A	1	0,5	0,3
İlerleme Hızı (mm/s)	B	0,3	0,25	0,2
Dönme Hızı (d/dk)	C	1200	800	540

Optimizasyon sonucunda başarılı sonuçlar elde edebilmek için varyansların azaltılması önemli bir kriterdir. Taguchi deney tasarımında performans kriteri olarak Sinyal/Gürültü oranı (S/N oranı) kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmasındaki amaç, takım titreşimini ve yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için en uygun üretim parametrelerinin belirlenebilmesidir. Bu nedenle, “küçük olan daha iyidir (smaller the better)” kriteri kullanılmıştır (Eş. 4.6.).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{Y^2}{n} \right) \quad (4.6)$$

Çalışmada, Taguchi' nin L9 ortogonal dizisi tam faktöryel deneysel tasarımı seçilmiştir. Tasarlanan dizi Çizelge 4.8'te verilmiştir.

Çizelge 4.8. Taguchi L9' un Ortogonal Dizi-Tam Faktörlü Tasarımı

Deney No	Faktör A	Faktör B	Faktör C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Taguchi, kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen değişkenlerin ürün kalitesine olan etkilerinin birlikte tespit edilebildiği en etkili yöntemlerden birisidir. Çizelge 4.9, her kontrol faktörünün her seviyesi için yanıt değişkeninin (takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü) S/N oranını göstermektedir.

Çizelge 4.9. Deney sonuçları ve S/N oranları

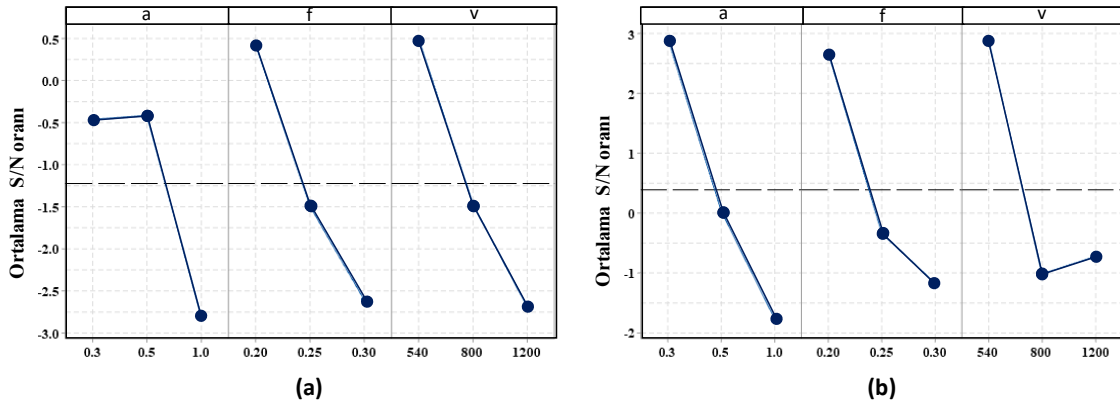
Deney No.	Dalma Derinliği (mm) a	İlerleme Hızı (mm/s) f	Dönme Hızı (d/dk) v	Yüz. Pür. (µm) Ra	S/N Oranı (db) Ra	Titreşim (m/s ²) Acc	S/N Oranı (db) Acc
1	1	0,3	1200	2,18	-6,769	1,91	-5,620
2	1	0,25	800	1,37	-2,734	1,42	-3,045
3	1	0,2	540	0,88	1,110	0,68	3,349
4	0,5	0,3	800	1,19	-1,510	1,35	-2,606
5	0,5	0,25	540	1,01	-0,086	0,93	0,630
6	0,5	0,2	1200	0,96	0,354	0,79	2,047
7	0,3	0,3	540	0,95	0,445	0,58	4,731
8	0,3	0,25	1200	1,21	-1,655	0,85	1,411
9	0,3	0,2	800	1,02	-0,172	0,74	2,615

Deneyden alınan sonuçlar doğrultusunda, takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü verileri Çizelge 4.10’da verilmiştir. S/N oranları, takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğünün “daha küçük olanı daha iyidir” kriteri doğrultusunda Eş. 4.6 kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.10. Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Titreşimi için S/N Oranları

Seviye	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			Takım Titreşimi (Acc)		
	a	f	v	a	f	v
1	-0,4607	0,431	0,4898	2,91948	2,67088	2,90387
2	-0,4143	-1,4922	-1,4725	0,02371	-0,3346	-1,01236
3	-2,7977	-2,6115	-2,6901	-1,7722	-1,1653	-0,72053
Delta	2,3835	3,0425	3,1799	4,69168	3,83618	3,91623

Tornalama için önemli parametrelerin kademeleri kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili hızı olarak derecelendirilmiş ve optimizasyonun ardından bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerine etkisi, Çizelge 4.10’un grafik formu olan Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. İşleme parametrelerinin ortalama S/N oranı üzerine etkisi a) Ra b) Acc

Varyans analizi, sonucu daha fazla etkileyen önemli giriş parametrelerini görmek için oluşturulur (Dobrzański, Domagaa ve Silva, 2007). Varyans analizi tablosu, takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü için % 95 doğruluk ile hazırlanmıştır. Kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili dönme hızının analizi için ANOVA arayüzü kullanılmıştır. ANOVA analizi sonuçları Çizelge 4.11’de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4. 11. Ra ve Acc için ANOVA sonuçları

Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)					
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Hataların Karekökü	F Value	% Faktör
a	2	0,3529	0,17643	1,84	27,562
f	2	0,3553	0,17763	1,85	27,749
v	2	0,3801	0,19003	1,98	29,686
Hata	2	0,1922	0,0961	-	15,011
Toplam	8	1,2804	-	-	100
Takım Titreşimi (Acc)					
a	2	0,5644	0,28218	4,53	36,697
f	2	0,4496	0,22481	3,61	29,233
v	2	0,3993	0,19964	3,2	25,962
Hata	2	0,1247	0,06234	-	8,108
Toplam	8	1,538	-	-	100

Tablonun son sütunu, her bir parametrenin performans üzerindeki etki derecesini yüzdesel olarak ifade etmektedir. a, f ve v'nin yüzey pürüzlülüğü üzerine etki yüzdesi çizelge 4.4'da

gösterildiği gibi %27,562, %27,749, %29,686 olarak elde edilmiştir. Tüm parametrelerin etki yüzdesi birbirine yakın olmasına rağmen yüzey pürüzlülüğü için en önemli faktör olarak mil dönüş hızı olarak bulunmuştur. a , f ve v ' nin takım titreşimi üzerindeki etki yüzdesi Çizelge 4.11'da gösterildiği gibi %36,697, %29,233, %25,962 olarak elde edilmiştir. Varyans analizleri neticesinde takım titreşimi için en önemli faktörün kesme derinliği olduğu sonucuna varılmıştır.

Deneysel ve tahmin edilen sonuçlar arasındaki ilişkileri tahmin etmede kullanılan istatistiksel yöntemlerden birisi regresyon analizidir (Yahya, Ding ve Qin, 2016). Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiye odaklanır (Olejárová ve diğerleri, 2017). Takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü için ANOVA kullanılarak tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğünün regresyon denklemlerini elde etmek için doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi için oluşturulan regresyon bağıntıları sırasıyla Eş. 4.7 ve 4.8 de verilmiştir.

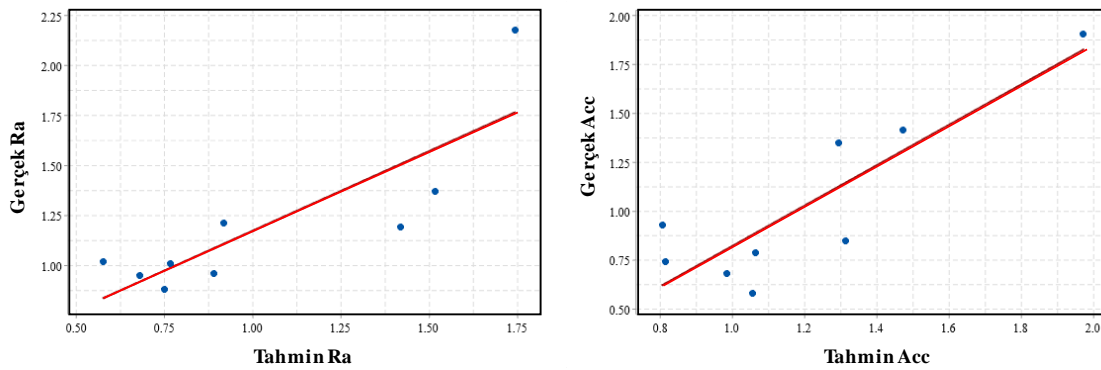
$$Ra^* = 1,197 - 0,137 a_{0,3} - 0,143 a_{0,5} + 0,280 a_{1,0} - 0,243 f_{0,20} \quad (4.7)$$

$$+ 0,000 f_{0,25} + 0,243 f_{0,30} - 0,250 v_{540} - 0,003 v_{800} + 0,253 v_{1200}$$

$$Acc^* = 1,0278 - 0,304 a_{0,3} - 0,004 a_{0,5} + 0,309 a_{1,0} - 0,291 f_{0,20} \quad (4.8)$$

$$+ 0,039 f_{0,25} + 0,252 f_{0,30} - 0,298 v_{540} + 0,142 v_{800} + 0,156 v_{1200}$$

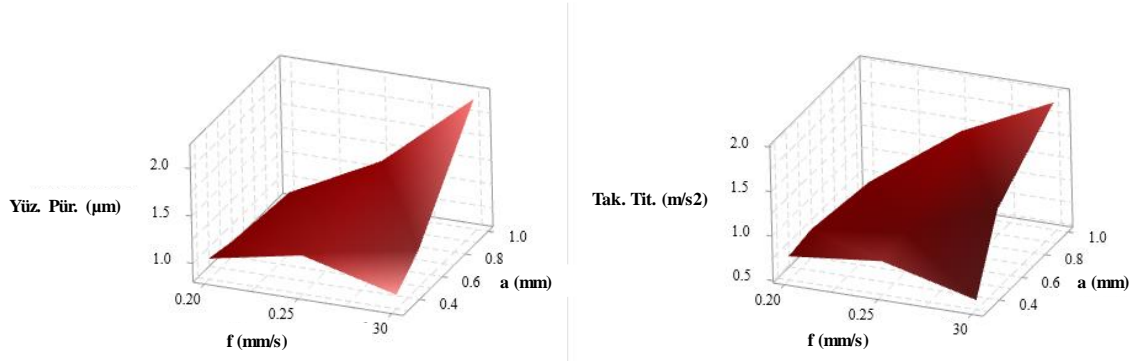
Regresyon denklemlerinin nihayetinde, yüzey pürüzlülüğü için R2 değeri % 84,99 ve takım titreşimi için % 91,89 olarak bulunmuştur. Gerçek deney sonuçları ve tahmin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.19'de verilmiştir.



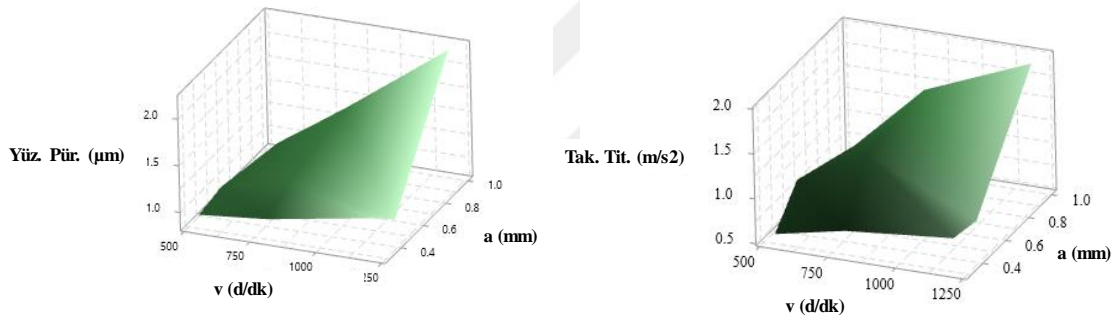
Şekil 4.19. Ra ve Acc için lineer regresyon sonuçları

Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de, yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi için kesme parametrelerinin ikili etkileri sırası ile kesme derinliğine ve ilerleme hızına, kesme

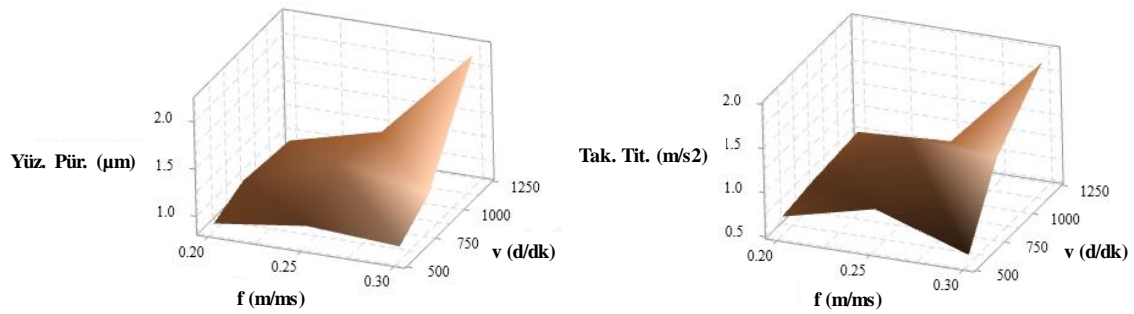
derinliğine ve iş mili dönme hızına, ilerleme hızı ve iş mili dönme hızına bağlı olarak sırasıyla verilmiştir. Yüzey grafiklerinden de görüldüğü üzere her bir ikili parametre için takım titreşim ve yüzey pürüzlülüğü davranışı birbirine çok benzerdir. Bu durum, takım titreşiminin yüzey pürüzlülüğü üzerine doğrudan etki ettiğinin bir göstergesidir.



Şekil 4.20. Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi üzerine ilerleme hızı ve dalma derinliğinin etkisi



Şekil 4.21. Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi üzerine iş mili dönme hızı ve dalma derinliğinin etkisi



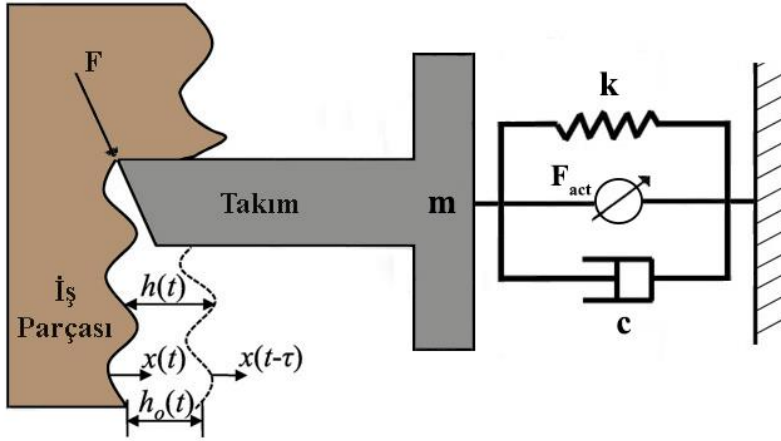
Şekil 4.22. Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi üzerine iş mili dönme hızı ve dalma derinliğinin etkisi

4.3. Aktif Titreşim Kontrolü

4.3.1. Tornalamada kesme ve matematiksel model

Tornalama esnasında kendiliğinden doğan titreşimler olarak görülen tırlama titreşimleri işleme kuvvetleri, talaş kesiti ve takım geometrisindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Tırlama titreşimleri kompleks yapısından ötürü makinenin Tornalama esnasında oluşan kesme kuvvetleri, kesici takım ve iş parçası sisteminin yapısal modlarından birini harekete geçirerek iş parçası üzerinde dalgalı yüzey oluşumuna sebebiyet verir. Tırlamanın tanımlanabilmesi ve kontrol altına alınabilmesi için sistem elemanlarının tanınması büyük önem arz etmektedir.

Tez kapsamında yapılan aktif titreşim kontrolü uygulaması için sistem modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Tornalama esnasında oluşan tırlamanın mekanizması Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Burada m , k , c takım parametreleri olup sırası ile kütle, yay sabiti ve sönüm katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 4.23. Tornalamada sistemin modellenmesi

Talaşın zamana bağlı matematiksel ifadesi Eş. 4.9’da gösterilmektedir. Eşitlikte, kesme noktasının bir önceki devirdeki konumuna göre zamanla yer değişimi $x(t) - x(t - \tau)$ olarak ifade edilmekte olup h_s kesilmemiş talaş kalınlığıdır. Eş. 4.9, N dev/dk cinsinden iş milinin dönüş hızını ifade etmek suretiyle $\tau = 60/N$ olarak tanımlanmıştır.

$$h(t) = h_s - x(t) + x(t - \tau) \quad (4.9)$$

Tornalama esnasında sistem davranışını ifade eden diferansiyel Eş. 4.10'da kesme kuvveti F_c olarak tanımlanmış olup b dalma derinliğini, K_f spesifik kesme katsayısı olup malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

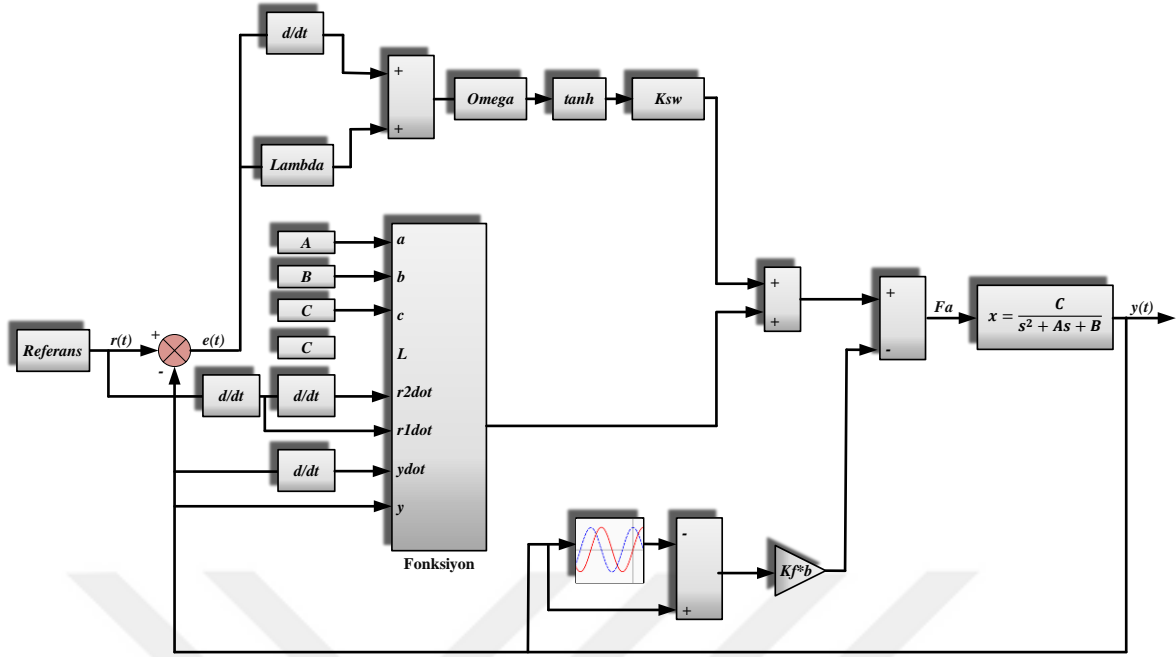
$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_c(t) \equiv K_f b(h_s - x(t) + x(t - \tau)) \quad (4.10)$$

Aktif kontrol uygulamalarında takım titreşimini istenen düzeyde tutabilmek için dışardan bir eyleyici kuvveti gereklidir. Şekil 1'de ifade edildiği gibi eyleyici kuvveti, takıma etki gösterecek şekilde kurgulanmıştır. Aktüatör kuvvetinin sisteme eklenmesi durumunda matematiksel model Eş. 4.11'deki gibi olacaktır. F_{act} , aktüatör tarafından üretilen etki kuvvetini ifade etmektedir.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = K_f b(h_s - x(t) + x(t - \tau)) + F_{act}(t) \quad (4.11)$$

Gerçek şartları sağlamak için kullanılan proses parametreleri: kütle (m) = 2,5 kg, sertlik (k) = 2×10^8 N/m, sönüm (c) = 1340 Ns/m ve kesme katsayısı (K_f) = 2000 N/m². Kesici takım için kuvvet ve yer değiştirme arasındaki transfer fonksiyonu $\mathcal{O}(s)$ olarak tanımlanırsa Eş. 4.12 elde edilir. Kapalı çevrim geri besleme kontrol stratejisine uyarlanan Şekil 2'deki sisteme F_{act} 'in eklenmesi ile sistemimizin genel transfer fonksiyonu Eş. 4.11'deki gibi elde edilmektedir.

Tornalama prosesinde geri besleme bilgisi olarak kesici takım üzerinden alınan ivme verisi kullanılmıştır. İvme verisi yardımı ile F_{act} için gerekli kuvvet tepki kuvveti hesaplanmıştır. Kontrol için kullanılan kapalı çevrim Şekil 4.24'de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Kontrol sistemi blok diyagramı

Kesici takım için kuvvet ve yer değiştirme arasındaki transfer fonksiyonu $\phi(s)$ olarak tanımlanacak olursa Eş. 4.12 elde edilir. Kapalı çevrim geri beslemeli kontrol stratejisi için uyarlanan Şekil 4.23 için F_{act} sisteme eklenmesi ile sistemimizin genel transfer fonksiyonu Eş. 4.13'deki gibi ve sistem transfer fonksiyonu Eş. 4.14'deki gibi elde edilir.

$$x(s) = \phi(s)(F_c(s) + F_{act}(s)) \quad (4.12)$$

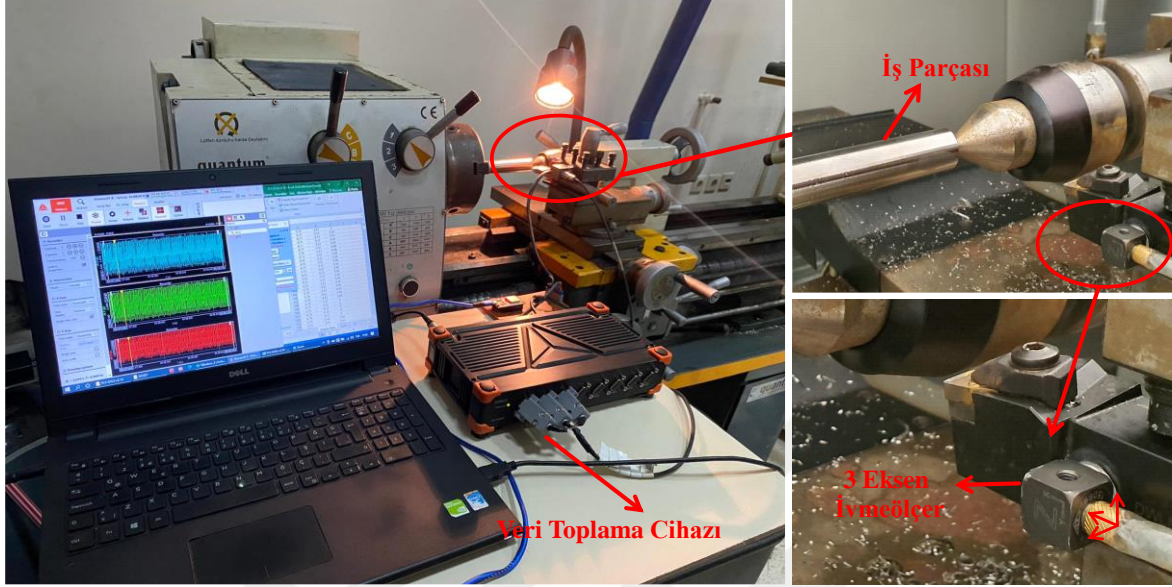
$$x(s) = \phi(s)(K_f b(h_s + x(s)(e^{-sr} - 1)) + F_{act}(s)) \quad (4.13)$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (4.14)$$

4.3.2. Verilerin Toplanması, Analizi ve Aktif Titreşim Kontrolü

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda Quantum marka torna tezgâhı ve iş parçası olarak Ø28 mm X 250 mm boyutlarında Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşım için belirlenen işleme parametreleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney setinin görüntüsü Şekil 4.25'de yer almaktadır (Guvenc ve diğerleri, 2021). Yapılan deneyler 0,1 mm dalma

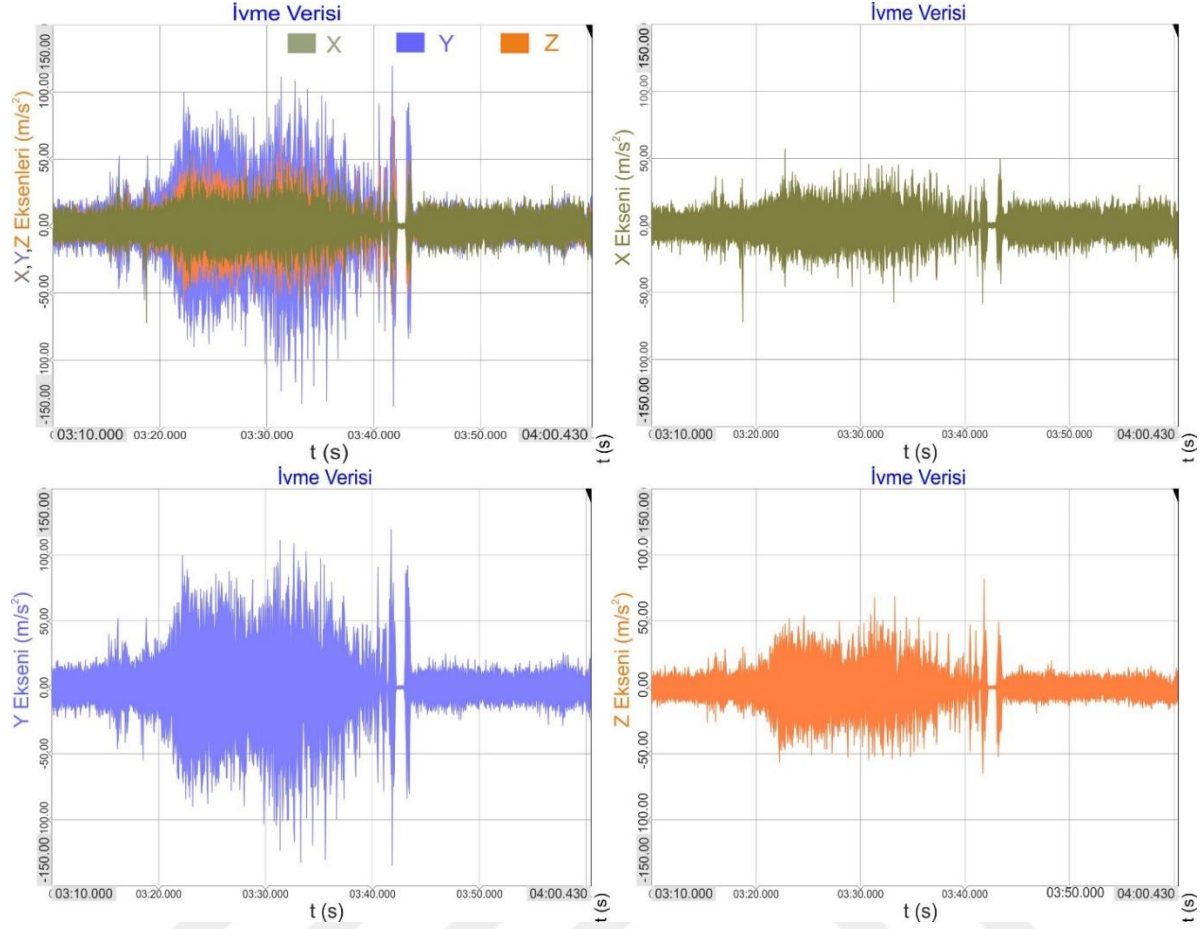
derinliğinde, 0.3 mm/dev ilerleme hızında ve 1200 d/dk mil dönüş hızında Tungsten Carbide kesme ucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.25. Titreşim ölçümü deney seti

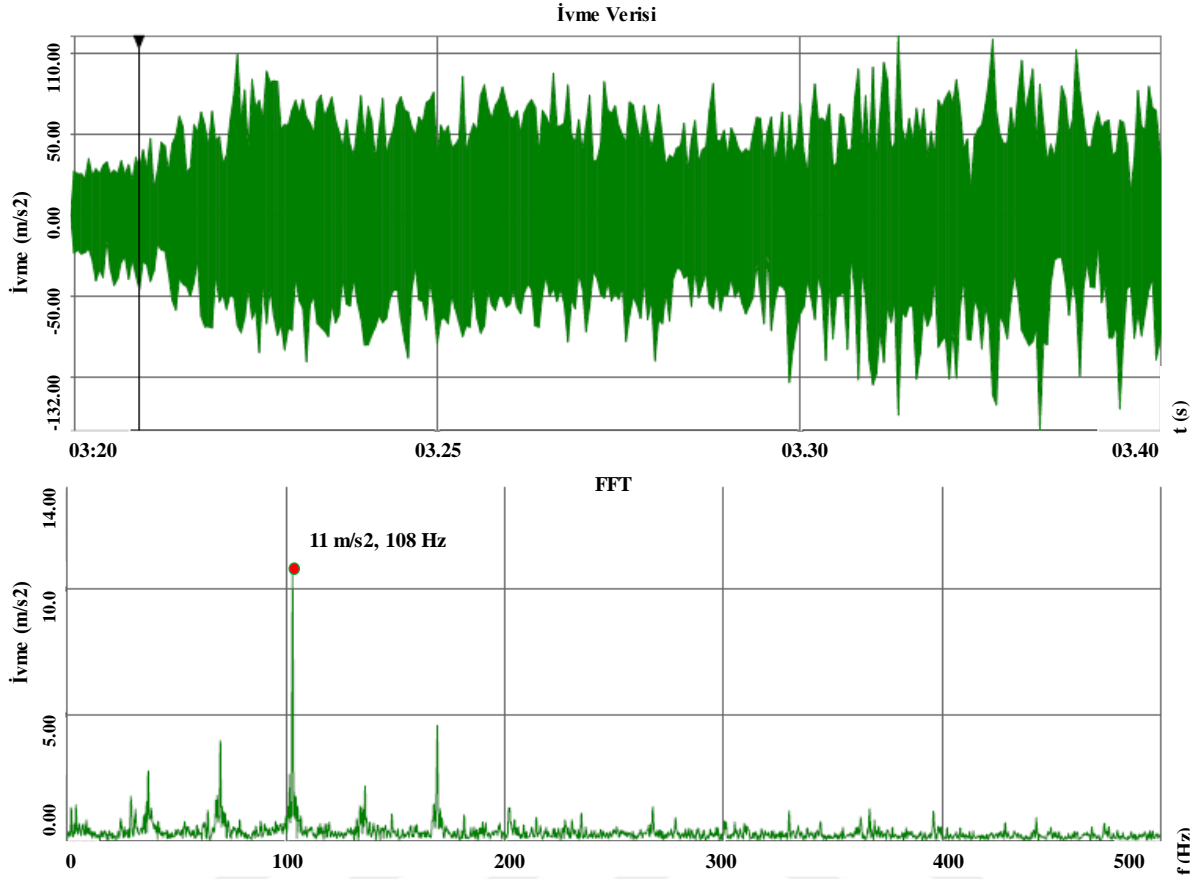
Kontrol temel manada; elektriksel veya mekanik olarak, istenen değer ve ölçülen değer arasındaki fark olan hata fonksiyonunu hesaplamak ve ardından bu hata payını sıfıra yaklaştırmaya çalışmaktır. Kapalı çevrim geri beslemeli kontrol stratejisinde, geri besleme sayesinde girişteki sinyal artırılıp azaltılarak istenen değer elde edilmeye çalışılır. Bu tür uygulamalar özellikle matematiksel olarak karmaşık sistemler için oldukça kullanışlıdır (Merrit 1965).

Deneylerde kapsamında; 3 eksenli PCB marka endüstriyel bir ivmeölçer ve Dewesoft/Sirius veri toplama cihazı yardımıyla kater üzerinde oluşan titreşimler X, Y ve Z olmak üzere 3 farklı eksen için toplanmış ve değerlendirilmiştir. İvmeölçer kater üzerine herhangi bir sönüm elemanı kullanılmadan katı olarak sabitlenmiştir. İşleme esnasında toplanan 3 eksenli ham ivme verilerinin bir görseli Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26. Eksen için ham ivme verisi

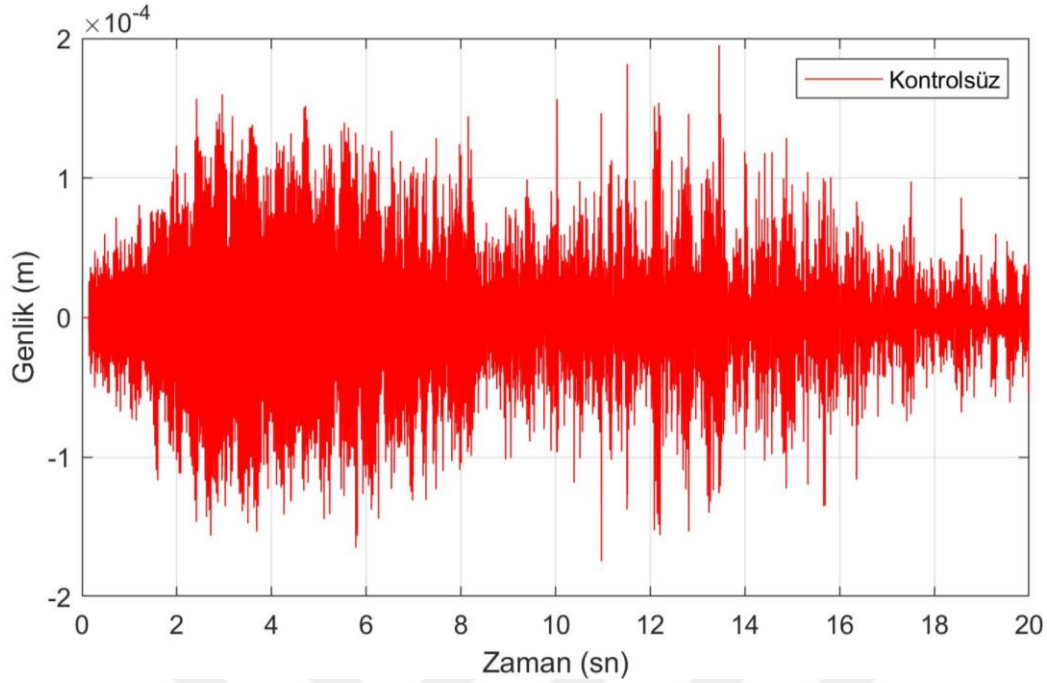
Aktif kontrol uygulaması için tornalama esnasında toplanan verilerden 20 sn'lik bir veri seti seçilmiş ve veriler için filtreleme, integral ve FFT analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de toplanan ham ivme verisi ve FFT analizi sonuçları verilmiştir. Toplanan verilerin genlik değerleri pozitif yönde 110 m/s^2 ve negatif yönde -132 m/s^2 arasında değişmekte olup veri toplama hızı saniyede 2000 (2000 s/sn) örnek alacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Sistemin çalışma frekanslarının belirlenebilmesi adına toplanan titreşim verileri öncelikle Hızlı Fourier Dönüşümüne (Fast Fourier Transform/FFT) tabi tutulmuş ve kritik frekans değerleri belirlenmiştir. FFT analizi sonrası 110 Hz 'in kritik frekans değeri olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer literatürde görülen tırlama titreşimi aralığında olup Munoa'nın 2016 yılında yaptığı ve tırlama titreşimlerinin aralığından da (20-200 Hz) bahsettiği çalışmasını doğrular niteliktedir (Munoa ve diğerleri, 2016b). FFT analiz sonucu Şekil 4.27'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 4.27. FFT analiz sonuçları

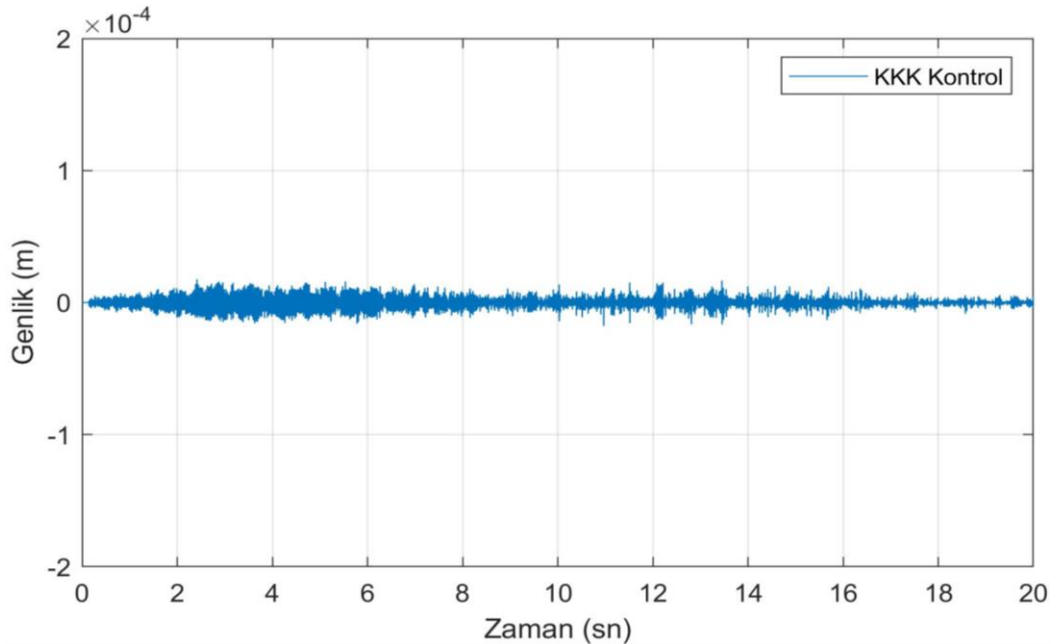
Sistemden toplanan ham verilerin kullanılabilmesi için sinyallerin temizlenmesi ve analiz edilmesi büyük önem arz etmektedir. Aktif kontrol uygulamalarında genellikle IIR veya FIR filtreleri kullanılmaktadır (Teti, Jemielniak, O'Donnell ve Dornfeld, 2010). Toplanan ivme verileri içerisinde bulunan parazit verilerin temizlenmesi ve kontrolde kullanılacak temiz bir veri setinin elde edilmesi için FIR filtrelemesi yöntemi kullanılmıştır.

İşleme esnasında toplanan üç eksenli ivme verileri, DewesoftX yazılımı ara yüzünde düzenlenmiş ve aktif kontrol uygulamalarında girdi olarak verilebilmesi için iki defa integrali alınarak deplasman verisine çevrilmiştir. Kontrol uygulamasında kullanılan 20 sn'lik veri seti Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28. Kontrol edilmemiş 20 sn'lik deplasman verisi

Daha sonra, deplasman verileri gerçek şartlarda veri toplanan nokta ile aynı noktadan kontrol modelimize girdi olarak verilmiş ve modelin 20 sn boyunca işleme esnasındaki kontrolü sağlanmıştır. Aktif kontrol sonrası elde edilen deplasman grafiği Şekil 4.29'de verilmiştir.



Şekil 4.29. Aktif kontrol sonrası oluşan deplasman verisi

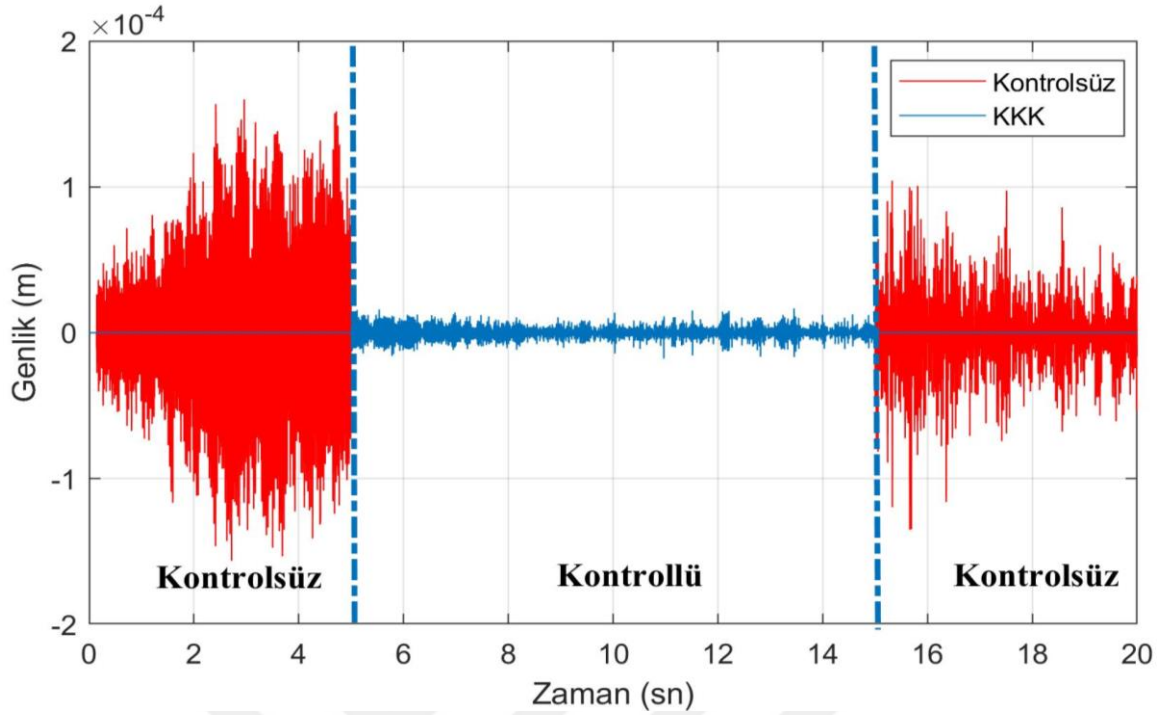
Kontrol öncesi deplasman verileri 250-350 μm yoğunluğunda iken kontrol sonrası 50-100 μm yoğunluğunda olduğu görülmüştür. Aradaki bu ciddi fark işleme esnasında yüksek

kaliteli ürün elde etmemize olanak sağlayacaktır. Daha önceki yapılan çalışmalardan edinilen bilgilere göre tırlama titreşimleri ortalama 200-300 μm deplasman genliğinde gerçekleşmektedir (Grzesik 2017; I. Mancisidor ve diğerleri, 2019; Mancisidor ve diğerleri, 2013; Munoa ve diğerleri, 2016b). Şekil 4.30'de normal işleme durumunu ve tırlama oluşması esnasında oluşan yüzey pürüzlülüğünü içeren bir görsel bulunmaktadır.



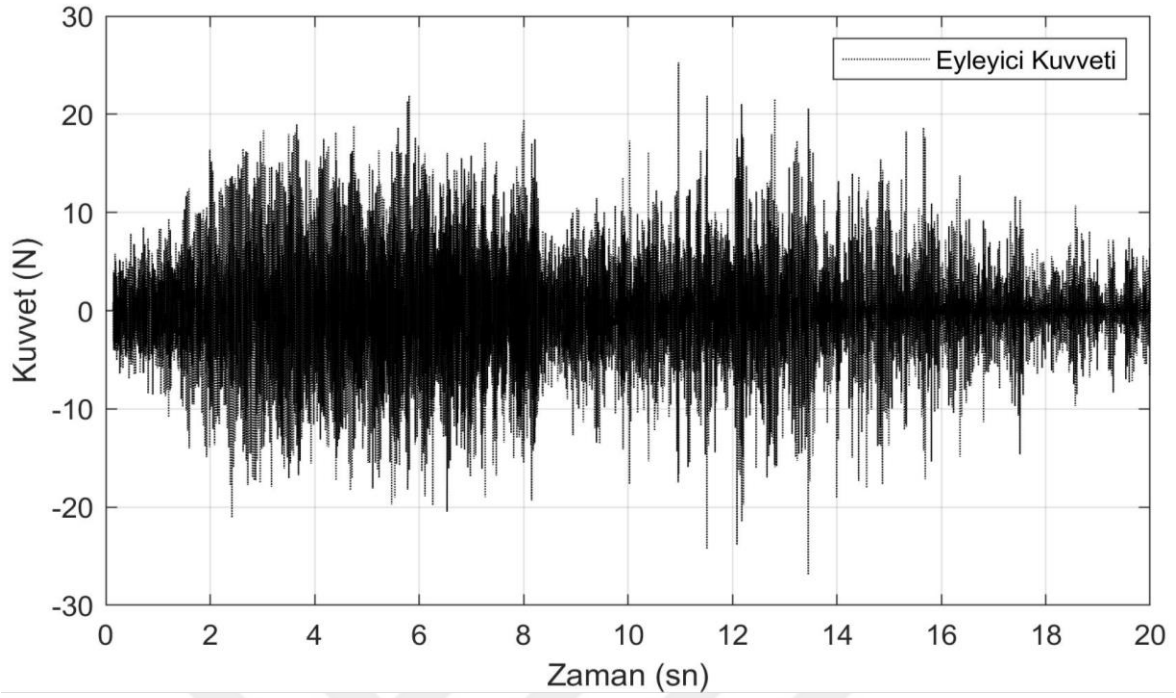
Şekil 4.30. Ti6Al4V iş parçası için tornalama sonrası görüntü

Şekil 4.31'de aktif kontrol uygulamasının normal veri ile karşılaştırıldığı bir görsel bulunmaktadır. Görselden de anlaşılacağı üzere kesici takımın aktif yöntemle kontrol edilmesi sonucu tornalama esnasında oluşan titreşim genliklerinde dolayısı ile yüzey pürüzlülüğü kalitesinde ciddi bir artış meydana gelmiştir.



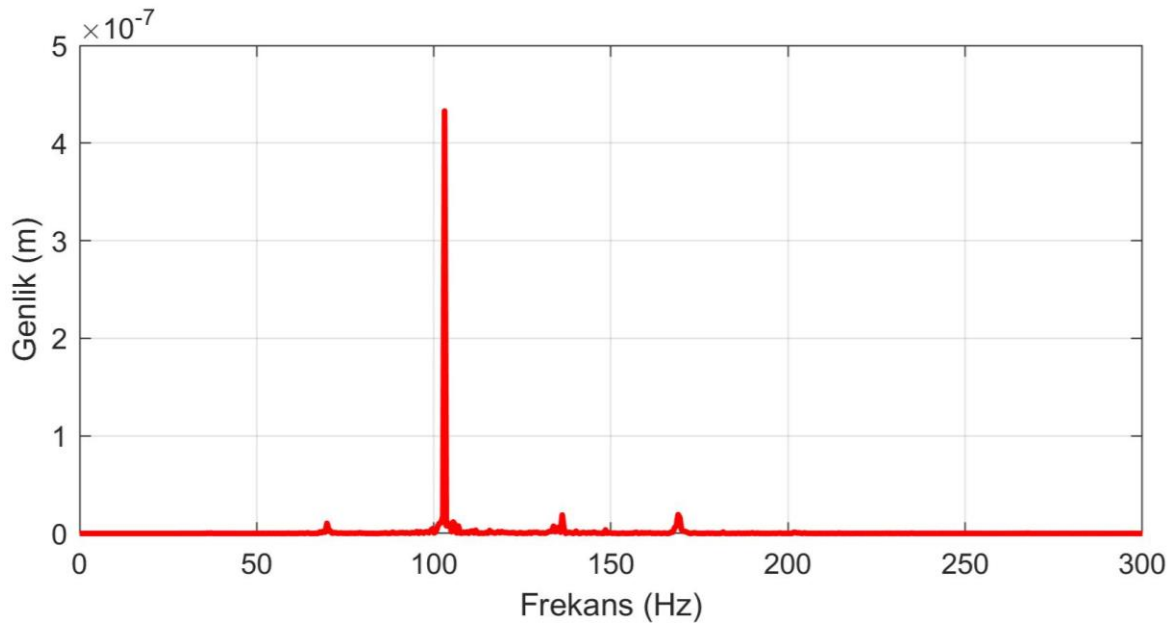
Şekil 4.31. Kontrollü ve kontrolsüz durumlarda elde edilen veriler

Aktif kontrol esnasında genliği en aza indirebilmek adına eyleyicinin 25 N'a kadar kuvvet ürettiği belirlenmiştir. Yapılan literatür araştırmaları neticesinde; AA6025 alüminyum alaşımının tornalanması esnasında aktif kontrolü için 18 N, C45 kalitesinde çeliğin tornalanması için ise 45 N'luk aktuatör kuvvetine gerekli olduğu görülmüştür (Ma ve diğerleri, 2017b; Zaeh ve diğerleri, 2017). Aktif kontrol uygulamalarında eyleyicinin üretmesi gereken kuvvetin işlenen parçanın mekanik özelliklerine, kesici ucun özelliklerin ve işleme parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği savunulmaktadır. Literatürden edinilen bilgiler aldığımız sonuçları doğrular niteliktedir. Aktif kontrol uygulaması için eyleyici kuvvet grafiği Şekil 4.32'te verilmiştir.

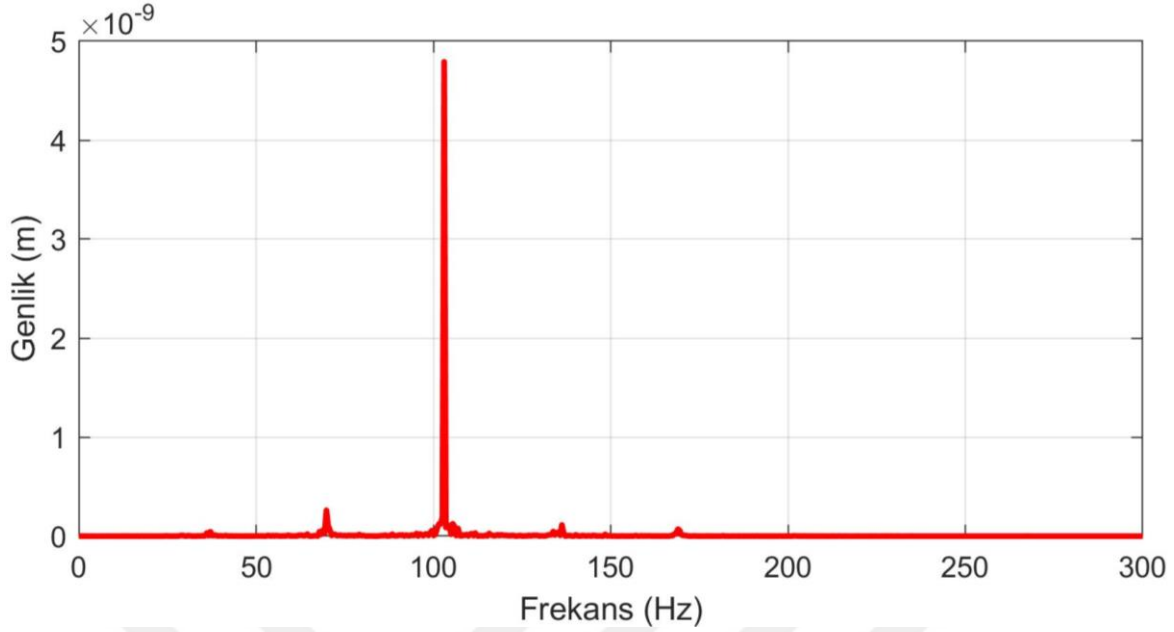


Şekil 4.32. Eyleyici tepki kuvveti grafiği

Şekil 4.33 ve 4.34 de sırası ile kontrolsüz ve kontrollü durumlar için deplasman FFT analizi verilmiştir. FFT sonuçlarına göre kritik frekans genliğinde %80 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum kontrol sonrası oluşan titreşimin genliğinin ve frekansının ürün kalitesine ve sistem elemanlarına olumsuz etki bırakmayacak kadar küçük olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.33. Kontrol öncesi deplasman verisi için FFT sonuçları

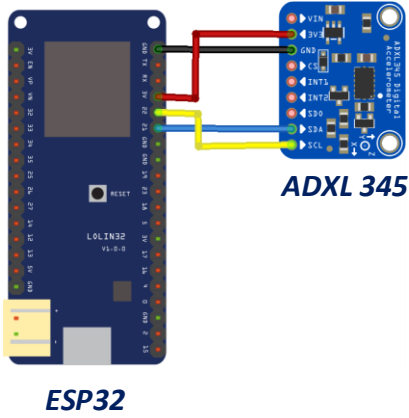


Şekil 4.34. Kontrol sonrası deplasman verisi için FFT sonuçları

4.4. Talaşlı İmalatta İot ve Durum İzleme

Tasarım ve imalat mühendisliğinde çözülmesi gereken en önemli dinamik problemlerinden bir tanesi olarak görülen mekanik titreşimler, sistem üzerinde malzeme yorulması, aşınma, yüksek gerilmeler ve gürültü gibi birçok olumsuz durumlara sebebiyet verebilmektedir. Bu sebeple mekanik titreşimler sistem üzerinde ciddi hasarlara sebebiyet verebilmektedir (Zhang ve diğerleri, 2015). Sistemde oluşabilecek istenmeyen durumların önlenmesi adına bazı önlemlerin alınması gerekmektedir. Öncelikle mekanik titreşimlerin tanınması ve ölçümlerinin yapılması hayati önem taşımaktadır (Çakır, Guvenc ve Mistikoglu, 2021; Ma ve diğerleri, 2017b; Mechkouri, Chaaba, Moraru ve Veron, 2017; Mohammadi ve Ahmadi, 2019).

Çalışan bir sistem üzerinde, farklı eksenlerde titreşimler oluşabilmektedir. Dolayısı ile ölçümlerin üç eksen üzerinden yapılması gereklidir. Endüstriyel uygulamalarda farklı tipte titreşim ölçerler bulunmaktadır. Ancak bu tip ivmeölçerler, yüksek fiyat, ölçüm kayıtlarındaki sınırlama, eksen sayısının yeterli olmaması, teknik personele duyulan ihtiyaç ve teknik personelin titreşim ölçümü yapılacak bölgede bulunma zorunluluğu gibi dezavantajları olan cihazlar olabilmektedir. (Çakır, Güvenç ve Mıstıkoğlu, 2018). Bu tasarımda kullanılan elektronik devre şeması Şekil 4.35'de görülmektedir.



Şekil 4.35. Elektronik devre şeması

Talaşlı imalat esnasında oluşan titreşimlerin üç eksen den toplanması için oluşturulan elektronik devrede, bir adet ADXL-345 ivmeölçer ve bir adet ESP32 mikrodnetleyicisi yer almaktadır. ADXL-345sensöründen elde edilen ivme verileri ESP32 mikrodnetleyici platformu aracılığı ile UART bağlantısı ile dizüstü bilgisayar ortamındaki Microsoft Excel ara yüzüne aktarılmıştır. Aynı zamanda kullanılan ESP32 mikrodnetleyici platformu sayesinde Wi-Fi kablosuz bağlantısı ile mobil cihaza aktarılabilir. Bu sayede verilerin uzaktan izlenebilmesine de olanak tanınmaktadır. Toplanan veriler dikkate alındığında 11 m/s^2 lik genlik değeri ile 108 Hz'in en yüksek gefnliğe sahip en kritik frekans değeri olduğu anlaşılmıştır. Ancak bu genliği torna operatörünün anlayabilmesi oldukça güç bir durumdur. Torna operatörünün 100 Hz'i fark edebilmesi için titreşim verileri bilgisayar ortamında analiz edilmiş ve titreşim değerlerinin artmaya başladığı tırlama durumunu IoT sistemi ile ikaz verebilme imkânı sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, mobil cihaz ekranında titreşimlerin izlenebilmesi için RemoteXY uygulaması kullanılmaktadır. RemoteXY uygulaması Bluetooth, Wi-Fi ve Cloud gibi kablosuz bağlantı desteği sunduğundan dolayı birçok IoT uygulaması gerçekleştirilebilmektedir (Çakır ve Çakır, 2017; Çakır ve Oral, 2018; Duman ve Çakır, 2018; Oral ve Çakır, 2017). RemoteXY web tasarım uygulaması ile tasarlanan mobil cihaz ara yüzüne ait ilk sayfa görüntüsü Şekil 4.36'da görülmektedir.



Şekil 4.36. RemoteXY ara yüz geliştirme ortamına ait görüntü

RemoteXY ilk sayfa tasarımında 6 adet “Label”, 3 adet “Text String”, 2 adet “Panel” ve 1 adet “Sound” nesnesi kullanılmıştır. “Label” nesnelere eksen adları ve etiketlemeler için kullanılırken “Text String” nesnelere 3 ayrı eksen üzerinden gelen ivme verilerini görüntülemek için kullanılmıştır. RemoteXY ara yüz geliştirme ortamına ait ikinci sayfa görüntüsü Şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.37. RemoteXY ara yüz geliştirme ortamına ait ikinci sayfa görüntüsü

İlk sayfada anlık olarak görüntülenen ivme değerleri “Online Graph” nesnelere ile geçmişe dönük titreşim verilerinin de izlenmesine yardımcı olmaktadır. Sayfa 1 ve Sayfa 2 arayüzlerinde yer alan “Sound” nesnesi, analizler sonucunda elde edilmiş olan titreşim eşik değeri aşıldığında sesli uyarı vermek için eklenmiştir.

Tasarlanan RemoteXY gerçekleştirilen bulut üzerinden durum izleme uygulaması için kullanıcı dostu bir ara yüze sahip olan RemoteXY ara yüzü kullanılmıştır. RemoteXY ara

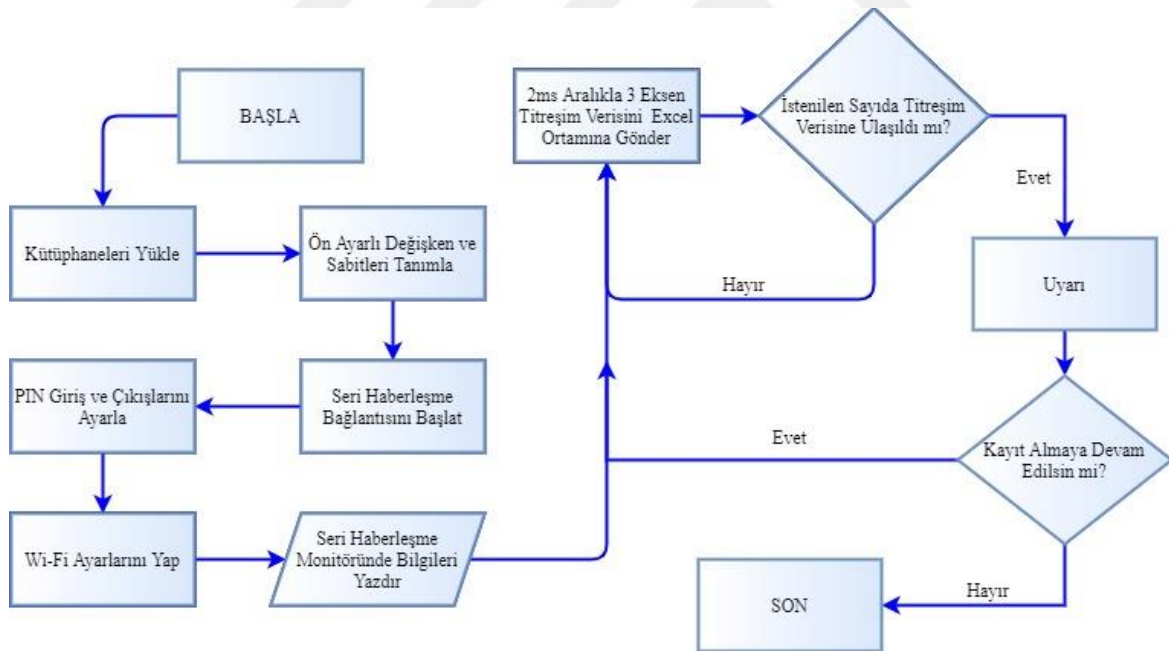
yüzü tasarımında bulut üzerinden izlemeyi sağlamak için yapılması gereken konfigürasyon Şekil 4.38’de görülmektedir.

Nº	Board name	Token	Device state	Server	Device port	App port	Actions
1	VIBRATION_MONITORING	3f717658cd9aabc18b5013f609d9f9e6	disconnected	cloud.remotexy.com	6376	6375	Edit Delete

Şekil 4.38. Bulut servisini kullanmak için kullanılan iletişim portları ve token

Bir bulut sunucusu aracılığıyla titreşim izleme sistemine bağlanmak, dünyanın herhangi bir yerinden izlememizi sağlar. ESP32 bir bulut sunucusuna bağlamak için bir “token”a ihtiyaç duyar ve ihtiyaç duyduğu bu “token” RemoteXY Server’i tarafından “cloud.remotexy.com” sitesi aracılığıyla sağlanır.

ESP32 mikrodenetleyicisi Arduino IDE 1.8.13 açık kaynak yazılımı ile programlanmış olup programa ait akış şeması Şekil 4.39’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.39. ESP32 ve ADXL345 ile 3 eksen veri toplama yazılımına ait algoritma

Tez kapsamında gerçekleştirilen durum izleme uygulamaları için kullanıcı dostu bir ara yüze sahip olan Virtuino ara yüzü kullanılmıştır. Virtuino uygulaması; Arduino ve ESP gibi kontrol panoları ile verimli bir şekilde iletişim kurabilme, kontrol kartlarına sinyal gönderebilme ve tasarlanan sistemin durumunu mobil cihazlarla kablosuz olarak takip edebilme yeteneğine sahiptir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Kesme Parametreleri Tahmini

Bu çalışmada öncelikle, YSA modeli ve ÇLRM kullanılarak, tornalama işleminin en önemli kalite kriterleri arasında yer alan yüzey kalitesi ve kesici takım ucu sıcaklığının en iyi değerleri için kesme parametreleri tahmininde bulunulmuştur. Tahmin ve karşılaştırma sonuçlarına göre;

- Takım ucu sıcaklığı değerlendirmelerinde, R değeri YSA için yaklaşık %92 iken ÇLRM için %76 olarak bulunmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre YSA modeli R değeri %93 iken ÇLRM için %43 değerlerinde kalmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü eğitim sonuçlarına göre, ÇLRM %77 sonuç verirken YSA modeli %96 sonuç vermiştir.
- Takım ucu sıcaklığı eğitim sonuçlarına göre, ÇLRM ve YSA için eğitim sonuçları birbirine çok yakın olup yaklaşık olarak %95'tir.
- YSA modeli ve ÇLRM'nin genel değerlendirmeleri dikkate alınacak olursa, MSE, MAE, RMSE ve R gibi tüm değerlendirme kriterlerine göre yapay zeka tekniklerinin en yaygın kullanıma sahip olan türü olan YSA, geleneksel yöntemler arasında yer alan ÇLRM'ye göre yüksek doğrulukta çalışmaktadır.

İkinci olarak, AA6013 Al alaşımının kuru tornalanması sırasında takım titreşimlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için geleneksel ve AI tabanlı tahmin modelleri geliştirilmiştir. ANFIS modelinin eğitiminde literatürde sıklıkla kullanılan ve başarısı kanıtlanmış metasezgisel algoritmalarından PSO, ACO ve GA algoritmaları kullanılmıştır. Bu sayede sınırlı bir veri seti kullanılarak geleneksel yöntemlere göre başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır.

- Acc tahmininde R değeri 0,726 olan ÇLRM, önerilen yaklaşımlar arasında en kötü model olarak görünmektedir.
- 0.946 R değerine sahip GA-ANFIS, Acc tahmininde önerilen yaklaşımlar arasında en iyi model olarak görülmektedir. 0,025 MSE ve 0,146 MAE ile GA-ANFIS modeli, çalışmada tartışılan modeller arasında açıkça en göze çarpan Tahmin modelidir.

- Ra tahmininde R değeri 0,810 olan ACO-ANFIS, önerilen yaklaşımlar arasında en kötü model olarak görünmektedir.
- R değeri 0,916 olan PSO-ANFIS, Ra tahmininde önerilen yaklaşımlar arasında en iyi model olarak görülmektedir. 0,031 MSE ve 0,139 MAE ile PSO-ANFIS modeli, çalışmada tartışılan modeller arasında açıkça en başarılı Ra tahmin modelidir.

Ayrıca Acc ve Ra değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve ampirik bir model önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile 0,2 kesme derinliği, 0,3 ilerleme hızı ve 800 rpm dönüş hızı ile optimum yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel yöntemlere göre umut verici sonuçlar veren GA-ANFIS ve PSO-ANFIS modelleri benzer uygulamalar için etkin tahmin modelleri olarak kullanılabilir.

5.2. Optimizasyon ve Varyans Sonuçları

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi arasındaki ilişkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Buna ek olarak kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili hızı gibi kesme parametrelerinin takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Tornalama işleminin ardından, kesme parametreleri, takım ömrü ve en iyi ürün kalitesi için optimize edilmiştir. Taguchi Yöntemi kullanılarak geliştirilen optimum parametre kombinasyonu geliştirilmiştir. Çalışmada edinilen sonuçlara göre;

- Araştırmalar ve karşılaştırmalar sonrasında yüzey pürüzlülüğü ile takım titreşimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.
- Kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili hızının yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi üzerindeki etkisi araştırıldı. En önemli parametrenin takım titreşimi için kesme derinliği ve yüzey pürüzlülüğü için iş mili hızı olduğu bulunmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi için en önemli faktörler sırasıyla iş mili hızı ve kesme derinliğidir.
- Varyans sonuçlarına göre; kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili dönme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi sırası ile yüzdesi % 27,562, % 27,749, % 29,686 olarak bulunmuştur. Tüm kesme parametrelerinin yüzdesel etkisi birbirine yakın olmasına rağmen, yüzey pürüzlülüğü için en önemli faktörün iş mili hızı olduğu sonucuna varılabilir.
- Kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili dönme hızının takım titreşimi üzerine etki yüzdesi sırası ile % 36,697, % 29,233, % 25,962 olarak elde edilmiştir. Varyans analizi

sonuçları neticesinde takım titreşimi için en önemli faktörün kesme derinliği olduğu görülmüştür.

- Elde edilen yüksek doğrulukta regresyon denklemi, takım titreşimini ortadan kaldırmak ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için kesme parametrelerinin optimizasyonu ve tahmini için kullanılabilir.
- Yüzey pürüzlülüğü ve takım titreşimi değişiklikleri, kesme derinliği, ilerleme hızı ve iş mili hızı açısından çok benzerdir. Bu sonuçlar bize takım titreşimini ölçerek yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilebileceğini göstermektedir.
- Önümüzdeki yıllarda yapılacak çalışmalarda birden fazla YZT'nin aynı anda kullanıldığı çalışmalar daha doğru sonuçlar alabilmek adına önemli olacaktır.

5.3. Aktif Titreşim Kontrolü

Bu çalışmada, tornalamada ürün kalitesini ve üretkenliği olumsuz manada etkileyen tırlama titreşimlerinin tanımlanması ve aktif kontrol uygulaması ile azaltılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında titanyum alaşımli Ti6Al4V kalite malzemenin kuru tornalanması esnasında kesici takım üzerinden 3 eksen de ivme verisi toplanmış ve toplanan verilerin işlenmesinin ardından aktif kontrol uygulamalarında kullanılabilir hale getirilmiştir. Çalışma neticesinde edinilen sonuçlara göre;

- Ti6Al4V alaşımının kuru tornalanması esnasında takım üzerinden toplanan ivme verilerinin genlik değerlerinin pozitif yönde 110 m/s² ve negatif yönde -132 m/s² arasında değişmekte olduğu görülmüştür.
- İvme verilerinin FFT sonucuna göre kritik frekans değerleri belirlenmiş olup 110 Hz'in kritik frekans değeri olduğu gözlemlenmiştir.
- İvme verileri çift integrale tabi tutulmuş ve kontrol öncesi deplasman değerlerinin 250-350 µm yoğunluğunda olduğu görülmüştür,
- Aktif kontrolcünün uygulanmasından sonra deplasman verilerinin 50-100 µm aralığına indiği gözlemlenmiştir.
- FIR dijital filtreleme yönteminin aktif kontrol uygulamalarında önemli bir uygulama olduğu sonucuna varılmıştır.
- Aktif titreşim kontrolü uygulamaları ile doğru bir veri toplama düzeneği, kontrolcü, sistem tanıma işlemleri ve aktif eyleyici ile talaşlı imalatın büyük sorunlarından bir tanesi olan tırlama probleminin çözülebileceği sonucuna varılmıştır.

- Tornalamada aktif titreşim kontrolü için kayan kipli kontrolün yüksek doğrulukta çalıştığı sonucuna varılmıştır.
- Önümüzdeki yıllarda yapılacak olan çalışmalar için KK kontrolcünün yüksek doğruluk ve gürbüzlüğü ile ümit vadettiği söylenebilir.
- Tez kapsamında edinilen bilgiler doğrultusunda tornalamada aktif titreşim kontrolü için piezo ve MR tabanlı eyleyiciler büyük öneme sahip olacağı ön görülmektedir.

5.4. IoT ve Durum izleme

Bu çalışma kapsamında, Endüstriyel IoT kavramı çerçevesinde, tornalama esnasında takım üzerinden üç eksen ivme verisi toplanmış ve frekansın istenmeyen düzeylere ulaşması durumunda kullanıcıya SMS yolu ile bilgi veren bir durum izleme/görüntüleme sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada edinilen sonuçlara göre;

- Tornalama esnasında oluşan titreşimlerin üç eksen den toplanması için bir adet ADXL-345 ivmeölçer ve bir adet ESP32 mikro denetleyiciden oluşan bir elektronik devre tasarlanmış ve tornalama için başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- Verilerin izlenebilmesi için RemoteXY yazılımı kullanılarak kullanıcı dostu bir ara yüzü tasarlanmış ve operatörün anlık olarak verileri görüntüleyebilmesi sağlanmıştır.
- RemoteXY ve Virtuino yazılımları aracılığı ile veriler bulut üzerine gönderilmiş ve istendiği zaman geçmişin kontrol edilebildiği bir platform oluşturulmuştur.
- Üretim esnasında istenmeyen frekanslar ile karşılaşıldığında operatöre SMS yolu ile bilgi verilmiş üretimin uzaktan kontrol edilebilmesi sağlanmıştır.
- IoT tabanlı sistemlerin önümüzdeki yıllarda üretim kalitesini artırma ve maliyeti düşürme amacıyla önemli bir konuma sahip olacağı düşünülmektedir.
- Akıllı fabrikalarda makinelerin sayısının artması ve her bir makineden sayısız veri toplanması sonucunda oluşan büyük verinin analiz edilmesi, değerlendirilmesi ve saklanması hususunda Derin Öğrenme Tekniklerinin büyük öneme sahip olacağı düşünülmektedir. Dolayısı ile gelecekteki çalışmalarda Derin Öğrenme tabanlı çalışmalara yoğunlaşmak büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbas, A. T., Pimenov, D. Y., Erdakov, I. N., Taha, M. A., El Rayes, M. M., ve Soliman, M. S. (2018). Artificial intelligence monitoring of hardening methods and cutting conditions and their effects on surface roughness, performance, and finish turning costs of solid-state recycled aluminum alloy 6061 chips. *Metals*, 8(6), 394.
- Abouelatta, O. B., ve Madl, J. (2001). Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. *Journal of materials processing technology*, 118(1-3), 269-277.
- Abraham, A. (2005). Artificial neural networks. *Handbook of measuring system design*.
- Ahmad, A., Cuomo, S., Wu, W., ve Jeon, G. (2019). Intelligent algorithms and standards for interoperability in Internet of Things. *Future Generation Computer Systems*, 92, 1187-1191.
- Akdagli, A. A., Guney, K., ve Karaboga, D. (2006). Touring ant colony optimization algorithm for shaped-beam pattern synthesis of linear antenna. *Electromagnetics*, 26(8), 615-628.
- Akkuş, H. (2010). *Tornalama işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünün istatistiksel ve yapay zeka yöntemleriyle tahmin edilmesi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Al Dossary, M. A., ve Nasrabadi, H. (2016). Well placement optimization using imperialist competitive algorithm. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147, 237-248.
- Al-Shayea, A., Abdullah, F. M., Noman, M. A., Kaid, H., ve Abouel Nasr, E. (2020). Studying and optimizing the effect of process parameters on machining vibration in turning process of AISI 1040 steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
- Alujevic, N., Cakmak, D., Wolf, H., ve Jokic, M. (2018). Passive and active vibration isolation systems using inerter. *Journal of Sound and Vibration*, 418, 163-183.
- Ambhore, N., Kamble, D., ve Chinchankar, S. (2020). Evaluation of cutting tool vibration and surface roughness in hard turning of AISI 52100 steel: An experimental and ANN approach. *Journal of Vibration Engineering ve Technologies*, 8(3), 455-462.
- Arriaza, O. V., Tumurkhuyagc, Z., ve Kim, D. W. (2018). Chatter Identification using Multiple Sensors and Multi-Layer Neural Networks. *Procedia Manufacturing*, 17, 150-157.
- Ashton, K. (2009). That 'internet of things' thing. *RFID journal*, 22(7), 97-114.
- B Balaji, M., Rao, K. V., Rao, N. M., ve Murthy, B. S. N. (2018). Optimization of drilling parameters for drilling of Ti-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration. *Measurement*, 114, 332-339.
- Babu, S., Elangovan, K., Balasubramanian, V., ve Balasubramanian, M. (2009). Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA2219 aluminum alloy joints. *Metals and Materials International*, 15(2), 321-330.
- Bagci, M. (2016). Determination of solid particle erosion with Taguchi optimization approach of hybrid composite systems. *Tribology International*, 94, 336-345.

- Banaz, M. (2018). Anti-vibrasyon takımla yapılan delik içi tornalama işleminde kesme parametrelerinin optimizasyonu, *Necmettin Erbakan Üniversitesi*.
- Baron Fourier, J. B. J. (1878). *The analytical theory of heat*. The University Press.
- Bekele, A. J. A. A. (2016). Cooley-tukey fft algorithms. *Advanced algorithms*.
- Berezvai, S., Bachrathy, D., ve Stepan, G. (2018). High-speed camera measurements in the mechanical analysis of machining. *Procedia CIRP*, 77, 155-158.
- Bilgic, H. H., Guvenc, M. A., Cakir, M., ve Mistikoglu S. (2019). A study on prediction of surface roughness and cutting tool temperature after turning for S235JR steel. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7, 966-974.
- Bilgiç, H. H., ve Mert, İ. (2021). Comparison of different techniques for estimation of incoming longwave radiation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(3), 601-618.
- Bottega, W. J. (2014). *Engineering vibrations*. CRC Press.
- Budak, E., ve Kops, L. (2000). Improving productivity and part quality in milling of titanium based impellers by chatter suppression and force control. *CIRP Annals*, 49(1), 31-36.
- Bullock, J., Luccioni, A., Pham, K. H., Lam, C. S. N., ve Luengo-Oroz, M. (2020). Mapping the landscape of artificial intelligence applications against COVID-19. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 69, 807-845.
- Chen, G. J., Hou, S., Yan, B., Guo, R. P., Han, S. X., Wang, L., ve Sun, G. X. (2020). Vibration prediction of hardened steel in precision cutting based on BP neural network. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 37(6), 305-312.
- Chen, W. C., ve Kurniawan, D. (2014). Process parameters optimization for multiple quality characteristics in plastic injection molding using Taguchi method, BPNN, GA, and hybrid PSO-GA. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 15(8), 1583-1593.
- Cheng, F. T., Tieng, H., Yang, H. C., Hung, M. H., Lin, Y. C., Wei, C. F., ve Shieh, Z. Y. (2016). Industry 4.1 for wheel machining automation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1), 332-339.
- Chengzhe, J. I. N., Chang, G. U. O., ve Yun, G. A. O. (2017). Research on cutting vibration characteristics of face-milling involute gear. *Defence technology*, 13(5), 380-384.
- Chengzhe, J. I. N., Chang, G. U. O., ve Yun, G. A. O. (2017). Research on cutting vibration characteristics of face-milling involute gear. *Defence technology*, 13(5), 380-384.
- Childs, T. H., Maekawa, K., Obikawa, T., ve Yamane, Y. (2000). *Metal machining: theory and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Çakır, M., ve Okan O. (2018). *RemoteXY Ile Mobil Programlama*. 1st ed. İSTANBUL: Kodlab Yayıncılık.
- Çakır, M., Güvenç, M.A. ve Mıstıkoğlu S. (2018). The Design of Three Axial Wireless Mechanical Vibration Meter. P. 331 in *IVSS 2018 International Vocational Science Symposium*. ANTALYA.

- Çam, G., Serindağ, H. T., Çakan, A., Mistikoglu, S., ve Yavuz, H. (2008). The effect of weld parameters on friction stir welding of brass plates. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*, 39(6), 394-399.
- Dahbi, S., Ezzine, L., ve EL Moussami, H. (2017). Modeling of cutting performances in turning process using artificial neural networks. *International Journal of Engineering Business Management*, 9, 1847979017718988.
- Das, R., ve Hazarika, M. (2019, July). A study on effect of process parameters on vibration of cutting tool in turning operation. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1240, No. 1, p. 012086). IOP Publishing.
- Daut, M. A. M., Hassan, M. Y., Abdullah, H., Rahman, H. A., Abdullah, M. P., ve Hussin, F. (2017). Building electrical energy consumption forecasting analysis using conventional and artificial intelligence methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1108-1118.
- Davim, J. P. (Ed.). (2008). *Machining: fundamentals and recent advances*. Springer Science ve Business Media.
- Delijaicov, S., Yakabu, D. Y., De Macedo, B., Resende, H. B., ve Batalha, M. H. F. (2018). Characterization of the surface and mechanical properties of the friction stir welding in tri-dissimilar joints with aluminum alloys and titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 1339-1355.
- Demir, M. (2021). Yeni Tip Ni-Cr/hBN fonksiyonel kompozit kaplamaların elektrodolama yöntemi ile üretilmesi, mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi. *İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Hatay.
- Deshpande, Y. V., Andhare, A. B., ve Padole, P. M. (2019). Application of ANN to estimate surface roughness using cutting parameters, force, sound and vibration in turning of Inconel 718. *SN Applied Sciences*, 1(1), 1-9.
- Deshpande, Y., Andhare, A., ve Sahu, N. K. (2017). Estimation of surface roughness using cutting parameters, force, sound, and vibration in turning of Inconel 718. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(12), 5087-5096.
- Dobrzanski, L. A., Domagala, J., ve Silva, J. F. (2007). Application of Taguchi method in the optimisation of filament winding of thermoplastic composites. *Archives of Materials Science and Engineering*, 28(3), 133-140.
- Dorigo, M., ve Di Caro, G. (1999). Ant colony optimization: A new metaheuristic, evolutionary computation. CEC 99. In *Proceedings of the 1999 Congress on* (Vol. 2).
- Du Preez, A., ve Oosthuizen, G. A. (2019). Machine learning in cutting processes as enabler for smart sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 33, 810-817.
- Eberhart, R., ve Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* (pp. 39-43). Ieee.

- El-Naggar, K. M., AlRashidi, M. R., AlHajri, M. F., ve Al-Othman, A. K. (2012). Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification. *Solar Energy*, 86(1), 266-274.
- Eren, B., Guvenc, M. A., ve Mistikoglu, S. (2021). Artificial intelligence applications for friction stir welding: A review. *Metals and Materials International*, 27(2), 193-219.
- Espressif, S. (2019). ESP32 Series Datasheet. *Espressif Systems*, 20-50.
- Etyemez, A. (2019). Investigation of the Effects of DLC Cutting Tool and Machining Parameters on Surface Quality and Cutting Force. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 494-504.
- Eynian, M., Magnevall, M., Cedergren, S., Wretland, A., ve Lundblad, M. (2018). New methods for in-process identification of modal parameters in milling. *Procedia CIRP*, 77, 469-472.
- Ezziane, Z. (2006). Applications of artificial intelligence in bioinformatics: A review. *Expert Systems with Applications*, 30(1), 2-10.
- Fausett, L. V. (2006). *Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms and applications*. Pearson Education India.
- Fidanova, S. (2021). Ant Colony Optimization. In *Ant Colony Optimization and Applications* (pp. 3-8). Springer, Cham.
- Gershenson, C. (2003). Artificial neural networks for beginners. *arXiv preprint cs/0308031*.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. Apress.
- Gold, G., ve Helmreich, K. (2017). A physical surface roughness model and its applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(10), 3720-3732.
- Goldberg, D. E., ve Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning.
- Grzesik, W. (2008). *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Elsevier.
- Guo, K., Lu, Y., Gao, H., ve Cao, R. (2018). Artificial intelligence-based semantic internet of things in a user-centric smart city. *Sensors*, 18(5), 1341.
- Guvenc, M. A., Bilgic, H. H., ve Mistikoglu, S. (2021). Identification of Chatter Vibrations And Active Vibration Control By Using The Sliding Mode Controller On Dry Turning Of Titanium Alloy (Ti6AL4V). *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*.
- Guvenc, M. A., Cakir, M., ve Mistikoglu, S. (2019). Experimental study on optimization of cutting parameters by using Taguchi method for tool vibration and surface roughness in dry turning of AA6013. In *10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems* (pp. 1032-1040).
- Guvenc, M. A., Kapusuz, H., ve Mistikoglu, S. (2020). Experimental study on accelerometer-based ladle slag detection in continuous casting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7), 2983-2993.

- Harja, H. B., Prakosa, T., Martawirya, Y. Y., Nurhadi, I., ve Januartha, A. S. (2019). Development of Real Time Machine Tools Component Utilization Data Acquisition for developing Dynamic Model of Maintenance Scheduling. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 130, p. 01015). EDP Sciences.
- Hatata, A. Y., Osman, G., ve Aladl, M. M. (2018). An optimization method for sizing a solar/wind/battery hybrid power system based on the artificial immune system. *Sustainable energy technologies and assessments*, 27, 83-93.
- Hayani, M., Chaaba, A., Moraru, G., ve Veron, P. (2017). Prediction of multi-dimensional milling behavior.
- Hoe, C. H., Reddy, M. M., Lee, V. C. C., ve Debnath, S. (2018). Chatter Behavior in the Milling Process of Inconel 718: Effects of Tool Edge Radius. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 202, p. 02006). EDP Sciences.
- Holappa, L., ve Wijk, O. (2014). Inclusion engineering. *Treatise on process metallurgy*, 347-372.
- Huang, W., Li, X., Wang, B., Chen, J., ve Zhou, J. (2016). An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 111, 63-67.
- Ikegame, T., Takagi, K., Inoue, T., ve Jikuya, I. (2017). Sensorless parameter estimation of electromagnetic transducer considering eddy currents. *Mechatronics*, 45, 130-142.
- Ilham, M., Suparjon, S., ve Sanjiwani, Y. (2020). Optimization of Cutting Speed and Feed Rate on Surface Roughness and Vibration using Taguchi Method: A Review. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, 1(2), 43-49.
- Iluore, O. E., Mamudu Onose, A., ve Emeterere, M. (2020). Development of asset management model using real-time equipment monitoring (RTEM): case study of an industrial company. *Cogent Business ve Management*, 7(1), 1763649.
- Imran, M., Pambudi, N. A., ve Farooq, M. (2017). Thermal and hydraulic optimization of plate heat exchanger using multi objective genetic algorithm. *Case studies in thermal engineering*, 10, 570-578.
- Ja Jang, J. L., ve Tarnag, Y. S. (1999). A study of the active vibration control of a cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 95(1-3), 78-82.
- Jain, A. K., Mao, J., ve Mohiuddin, K. M. (1996). Artificial neural networks: A tutorial. *Computer*, 29(3), 31-44.
- Jang, J. S. R. (1991, July). Fuzzy modeling using generalized neural networks and kalman filter algorithm. In *AAAI* (Vol. 91, pp. 762-767).
- Kakinuma, Y., Enomoto, K., Hirano, T., ve Ohnishi, K. (2014). Active chatter suppression in turning by band-limited force control. *CIRP Annals*, 63(1), 365-368.
- Kalogirou, S. (2007). *Artificial intelligence in energy and renewable energy systems*. Nova Publishers.

- Kalogirou, S. A. (2003). Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. *Progress in energy and combustion science*, 29(6), 515-566.
- Kanca, E., Demir, M., ve Çavdar, F. Investigation of the Effect of Cutting Parameters on the Cutting Force and Energy in the Bar Cutting Process. *Authors Title Volume-Issue-Page*, 44.
- Kanca, E., Eyercioglu, O., Gunen, A., ve Demir, M. (2019). Determination of Barreling of Aluminum Solid Cylinders During Cold Upsetting Using Genetic Algorithm. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24.
- Kao, C. C., ve Shih, A. J. (2008). Design and tuning of a fuzzy logic controller for micro-hole electrical discharge machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 10(2), 61-73.
- Kapusuz, H., Güvenç, M. A., ve MISTIKOĞLU, S. (2019). A review study on ladle slag detection technologies in continuous casting process. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 3(3), 144-149.
- Karaboga, D., ve Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of global optimization*, 39(3), 459-471.
- Karna, S. K., ve Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International journal of engineering and mathematical sciences*, 1(1), 1-7.
- Kato, H., ve Yamasita, M. (1987). New automation and control technology of slab caster. *IFAC Proceedings Volumes*, 20(8), 253-258.
- Khademi, F., Akbari, M., Jamal, S. M., ve Nikoo, M. (2017). Multiple linear regression, artificial neural network, and fuzzy logic prediction of 28 days compressive strength of concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(1), 90-99.
- Khasawneh, F. A., Munch, E., ve Perea, J. A. (2018). Chatter classification in turning using machine learning and topological data analysis. *IFAC-PapersOnLine*, 51(14), 195-200.
- Khuntia, S. R., Rueda, J. L., ve van der Meijden, M. A. (2019). Smart asset management for electric utilities: Big data and future. In *Asset intelligence through integration and interoperability and contemporary vibration engineering technologies* (pp. 311-322). Springer, Cham.
- Kıvık, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, 19-28.
- Kim, D. H., Kim, T. J., Wang, X., Kim, M., Quan, Y. J., Oh, J. W., ... ve Ahn, S. H. (2018). Smart machining process using machine learning: A review and perspective on machining industry. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5(4), 555-568.
- Kodali, R. K., Yerroju, S., ve Yogi, B. Y. K. (2018, October). IoT Based Wearable Device for Workers in Industrial Scenarios. In *TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1893-1898). IEEE.

- Koene, I., Klar, V., ve Viitala, R. (2020). IoT connected device for vibration analysis and measurement. *HardwareX*, 7, e00109.
- Kolhe, B. P., Rahane, S. P., ve Galhe, D. S. (2015). Prediction and control of Lathe Machine tool vibration—A Review. *Int J Adv Res Innov Ideas Educ*, 1(3), 153-156p.
- Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I., ve Pintelas, P. (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Emerging artificial intelligence applications in computer engineering*, 160(1), 3-24.
- Koyee, R. D., Heisel, U., Eisseler, R., ve Schmauder, S. (2014). Modeling and optimization of turning duplex stainless steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(4), 451-467.
- Kumar, K., Zindani, D., ve Davim, J. P. (2018). Thermal Processes. In *Advanced Machining and Manufacturing Processes* (pp. 123-152). Springer, Cham.
- Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y., Giasin, K., Mikolajczyk, T., ve Sharma, S. (2020). Modeling of cutting parameters and tool geometry for multi-criteria optimization of surface roughness and vibration via response surface methodology in turning of AISI 5140 steel. *Materials*, 13(19), 4242.
- Kurniawan, A. (2019). *Internet of Things Projects with ESP32: Build exciting and powerful IoT projects using the all-new Espressif ESP32*. Packt Publishing Ltd.
- Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., Belhadi, S., ve Haddad, A. (2019). Investigation, modeling, and optimization of cutting parameters in turning of gray cast iron using coated and uncoated silicon nitride ceramic tools. Based on ANN, RSM, and GA optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1), 523-548.
- Li, B. H., Hou, B. C., Yu, W. T., Lu, X. B., ve Yang, C. W. (2017). Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers of Information Technology ve Electronic Engineering*, 18(1), 86-96.
- Li, C., Mo, L., Tang, H., ve Yan, R. (2020). Lifelong Condition Monitoring Based on NB-IoT for Anomaly Detection of Machinery Equipment. *Procedia Manufacturing*, 49, 144-149.
- Li, H., Xiang, S., Deng, M., Zhu, M., Du, Z., ve Yang, J. (2018, June). Measuring and modeling of volumetric errors for vertical machining centers based on bi-directional laser sequential step diagonal measurement. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 51371, p. V003T02A022). American Society of Mechanical Engineers.
- Li, S., Chen, Y., Kang, J., Huang, Y., Gianetto, J. A., ve Yin, L. (2019). Interfacial microstructures and mechanical properties of dissimilar titanium alloy and steel friction stir butt-welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 40, 160-168.
- Li, Y., Liu, Q., Tong, R., ve Cui, X. (2015). Shared and service-oriented CNC machining system for intelligent manufacturing process. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(6), 1100-1108.

- Liu, R., Yang, B., Zio, E., ve Chen, X. (2018). Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108, 33-47.
- Llumà, J., Gómez-Gras, G., Jerez-Mesa, R., Rue-Mascarell, J., ve Travieso-Rodriguez, J. A. (2020). Mechanical strengthening in S235JR steel sheets through vibration-assisted ball burnishing. *Metals*, 10(8), 1010.
- Lu, C. (2008). Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of materials processing technology*, 205(1-3), 439-450.
- Ma, H., Wu, J., Yang, L., ve Xiong, Z. (2017). Active chatter suppression with displacement-only measurement in turning process. *Journal of Sound and Vibration*, 401, 255-267.
- Mac, T. B., Long, B. T., ve Nguyen, D. T. (2020). Optimization of Surface Roughness and Vibration During Thermal—Assisted Milling SKD11 Steel Using Taguchi Method. In *Advanced Materials* (pp. 271-282). Springer, Cham.
- Madias, J. (2014). Electric furnace steelmaking. In *Treatise on process metallurgy* (pp. 271-300). Elsevier.
- Maier, A., Sharp, A., ve Vagapov, Y. (2017, September). Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. In *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)* (pp. 143-148). IEEE.
- Mancisidor, I., Pena-Sevillano, A., Barcena, R., Franco, O., Munoa, J., ve Lacalle, L. N. L. D. (2019). Comparison of model free control strategies for chatter suppression by an inertial actuator. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 12(3-4), 164-179.
- Mancisidor, I., Pena-Sevillano, A., Dombovari, Z., Barcena, R., ve Munoa, J. (2019). Delayed feedback control for chatter suppression in turning machines. *Mechatronics*, 63, 102276.
- Mancisidor, I., Rafael B., Jokin M., and Ainhoa E.. (2013). Chatter in Turning. *2013 European Control Conference (ECC)*, 791–96
- Markopoulos, A. P., Manolacos, D. E., ve Vaxevanidis, N. M. (2008). Artificial neural network models for the prediction of surface roughness in electrical discharge machining. *Journal of intelligent Manufacturing*, 19(3), 283-292.
- Maslen, D. K., ve Rockmore, D. N. (2001). The Cooley-Tukey FFT and group theory. *Notices of the AMS*, 48(10), 1151-1160.
- McCulloch, W. S., ve Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133.
- Mechkouri, M. H., Chaaba, A., Moraru, G., ve Veron, P. (2017). Prediction of multi-dimensional milling behavior. *International journal of engineering sciences & research technology*, 10, 329-339.
- Medsker, L. R. (1996). Microcomputer applications of hybrid intelligent systems. *Journal of Network and Computer applications*, 19(2), 213-234.

- Mellit, A. (2008). Artificial Intelligence technique for modelling and forecasting of solar radiation data: a review. *International Journal of Artificial intelligence and soft computing*, 1(1), 52-76.
- Mert, İ., Bilgic, H. H., Yağlı, H., ve Koç, Y. (2020). Deep neural network approach to estimation of power production for an organic Rankine cycle system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(12), 1-16.
- Mia, M., ve Dhar, N. R. (2019). Prediction and optimization by using SVR, RSM and GA in hard turning of tempered AISI 1060 steel under effective cooling condition. *Neural Computing and Applications*, 31(7), 2349-2370.
- Mikhailov, V. P., ve Bazinenkov, A. M. (2017). Active vibration isolation platform on base of magnetorheological elastomers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 431, 266-268.
- Mo, Y. C., Su, K. Y., Kang, W. B., Chen, L. B., Chang, W. J., ve Liu, Y. H. (2017, December). An FFT-based high-speed spindle monitoring system for analyzing vibrations. In *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)* (pp. 1-4). IEEE.
- Mohammadi, Y., ve Ahmadi, K. (2019). Frequency domain analysis of regenerative chatter in machine tools with linear time periodic dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 378-391.
- Mokhtari, Y., ve Rekioua, D. (2018). High performance of maximum power point tracking using ant colony algorithm in wind turbine. *Renewable energy*, 126, 1055-1063.
- Morales, R. D., Omar Dávila-Maldonado, Ismael Calderón, and Ken Morales-Higa. 2013. "Physical and Mathematical Models of Vortex Flows During The Last Stages of Steel Draining Operations from a Ladle." *ISIJ International* 53(5):782-91.
- Mori, K., Kono, D., Yamaji, I., ve Matsubara, A. (2017). Modelling of viscoelastic damper support for reduction in low frequency residual vibration in machine tools. *Precision Engineering*, 50, 313-319.
- Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., ve Stepan, G. (2016). Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Annals*, 65(2), 785-808.
- Munoa, J., Beudaert, X., Erkorkmaz, K., Iglesias, A., Barrios, A., ve Zatarain, M. (2015). Active suppression of structural chatter vibrations using machine drives and accelerometers. *CIRP Annals*, 64(1), 385-388.
- Neugebauer, R., Denkena, B., ve Wegener, K. (2007). Mechatronic systems for machine tools. *CIRP annals*, 56(2), 657-686.
- Nguyen, D. K. (1998). *Sliding-Mode Control: Advanced Design Techniques* (Doctoral dissertation, University of Technology, Sydney).
- Ogun, P. S., ve Jackson, M. R. (2017). Active vibration control and real-time cutter path modification in rotary wood planing. *Mechatronics*, 46, 21-31.

- Okokpujie, I. P., Salawu, E. Y., Nwoke, O. N., Okonkwo, U. C., Ohijeagbon, I. O., ve Okokpujie, K. O. (2018). Effects of process parameters on vibration frequency in turning operations of perspex material.
- Olejárová, Š., Dobránský, J., Svetlík, J., ve Pituk, M. (2017). Measurements and evaluation of measurements of vibrations in steel milling process. *Measurement*, 106, 18-25.
- Oral, O., ve Çakır, M. (2017). Nesnelerin interneti kavramı ve örnek bir prototipin oluşturulması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1, 172-177.
- Ortega, A., Frossard, P., Kovačević, J., Moura, J. M., ve Vandergheynst, P. (2018). Graph signal processing: Overview, challenges, and applications. *Proceedings of the IEEE*, 106(5), 808-828.
- Öztürk, O., Kalyoncu, M., ve Ünüvar, A. (2018, November). Multi objective optimization of cutting parameters in a single pass turning operation using the bees algorithm. In *1st International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering*.
- Panda, A., Sahoo, A. K., Panigrahi, I., ve Rout, A. K. (2020). Prediction models for on-line cutting tool and machined surface condition monitoring during hard turning considering vibration signal. *Mechanics ve Industry*, 21(5), 520.
- Pauget, B., ve Dammak, A. (2019). The implementation of the Internet of Things: What impact on organizations?. *Technological Forecasting and Social Change*, 140, 140-146.
- Paul, S. K., Azeem, A., ve Ghosh, A. K. (2015). Application of adaptive neuro-fuzzy inference system and artificial neural network in inventory level forecasting. *International Journal of Business Information Systems*, 18(3), 268-284.
- Pegues, J., Roach, M., Williamson, R. S., ve Shamsaei, N. (2018). Surface roughness effects on the fatigue strength of additively manufactured Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 116, 543-552.
- Pham, D. T., ve Kalyoncu, M. (2009, June). Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm. In *2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics* (pp. 475-480). IEEE.
- Pham, D., ve Karaboga, D. (2012). *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks*. Springer Science ve Business Media.
- Phan, N. H., ve Muthuramalingam, T. (2021). Multi criteria decision making of vibration assisted EDM process parameters on machining silicon steel using Taguchi-DEAR methodology. *Silicon*, 13(6), 1879-1885.
- Pinto, A. R. F., Crepaldi, A. F., ve Nagano, M. S. (2018). A Genetic Algorithm applied to pick sequencing for billing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(2), 405-422.
- Preumont, A. (2011). *Vibration Control of Active Structures*, vol. 179. *Bruxelles: Springer*.
- Qiao, Q., Wang, J., Ye, L., ve Gao, R. X. (2019). Digital twin for machining tool condition prediction. *Procedia CIRP*, 81, 1388-1393.

- Qiu, M., Fu, Z., Eglese, R., ve Tang, Q. (2018). A Tabu Search algorithm for the vehicle routing problem with discrete split deliveries and pickups. *Computers ve Operations Research*, 100, 102-116.
- Raghavendra, K., Sandip Sarkar, S. K. Ajmani, M. B. Denys, and M. K. Singh. 2013. "Mathematical Modelling of Single and Multi-Strand Tundish for Inclusion Analysis." *Applied Mathematical Modelling* 37(9):6284–6300.
- Raj, P. P., Perumal, A. E., ve Ramu, P. (2012). Prediction of surface roughness and delamination in end milling of GFRP using mathematical model and ANN.
- Rao, R. S., Prakasham, R. S., Prasad, K. K., Rajesham, S. S. P. N., Sarma, P. N., ve Rao, L. V. (2004). Xylitol production by *Candida* sp.: parameter optimization using Taguchi approach. *Process Biochemistry*, 39(8), 951-956.
- Rao, S. S. (2012). Mechanical vibrations fifth edition in SI units.
- Raza, M. Q., ve Khosravi, A. (2015). A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1352-1372.
- Riahi, V., Khorramizadeh, M., Newton, M. H., ve Sattar, A. (2017). Scatter search for mixed blocking flowshop scheduling. *Expert Systems with Applications*, 79, 20-32.
- Roy, S. C. D. (2020). A new canonic lattice realization of arbitrary FIR transfer functions. In *Topics in Signal Processing* (pp. 301-309). Springer, Singapore.
- Sadrmomtazi, A., Sobhani, J., ve Mirgozar, M. A. (2013). Modeling compressive strength of EPS lightweight concrete using regression, neural network and ANFIS. *Construction and Building Materials*, 42, 205-216.
- Sandberg, E., Lennox, B., ve Undvall, P. (2007). Scrap management by statistical evaluation of EAF process data. *Control engineering practice*, 15(9), 1063-1075.
- Sercan, D. E. D. E., ve Altay, F. (2018). Biosensors from the first generation to nanobiosensors. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(2), 200-207.
- Sevim, U. K., Bilgic, H. H., Cansiz, O. F., Ozturk, M., ve Atis, C. D. (2021). Compressive strength prediction models for cementitious composites with fly ash using machine learning techniques. *Construction and Building Materials*, 271, 121584.
- Shankar, N. V. S., Chand, A. G., Rao, K. H., ve Sai, K. P. (2018). Low Cost Vibration Measurement and Optimization during Turning Process. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1148, pp. 103-108). Trans Tech Publications Ltd.
- Siddhpura, M., ve Paurobally, R. (2012). A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine tools and manufacture*, 61, 27-47.
- Sims, N. D., Bayly, P. V., ve Young, K. A. (2005). Piezoelectric sensors and actuators for milling tool stability lobes. *Journal of sound and Vibration*, 281(3-5), 743-762.

- Singaravel, B., ve Selvaraj, T. (2016). Application of Taguchi method for optimization of parameters in turning operation. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 16(3), 183-187.
- Singh, Kundan K., V. Kartik, and Ramesh Singh. 2015. "Modeling Dynamic Stability in High-Speed Micromilling of Ti-6Al-4V via Velocity and Chip Load Dependent Cutting Coefficients." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 96:56–66.
- Singh, V., ve Rao, S. M. (2005). Application of image processing and radial basis neural network techniques for ore sorting and ore classification. *Minerals Engineering*, 18(15), 1412-1420.
- Sivarajah, U., Kamal, M. M., Irani, Z., ve Weerakkody, V. (2017). Critical analysis of Big Data challenges and analytical methods. *Journal of Business Research*, 70, 263-286.
- Sivasakthivel, P. S., Sudhakaran, R., ve Rajeswari, S. (2013). Optimization of machining parameters to minimize vibration amplitude while machining Al 6063 using gray-based Taguchi method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227(12), 1788-1799.
- Srinivasan, M., Prince, E., ve Padmanabhan, R. (2020). IoT architecture for advanced manufacturing technologies. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2359-2365.
- Suresh Prabhu, P., Prathipa, R., ve Shanmugasundaram, B. (2016). Design and development of two degree of freedom model with PID controller for turning operation. *Journal of measurements in engineering*, 4(4), 224-231.
- Susanto, A., Yamada, K., Tanaka, R., Handoko, Y. A., ve Subhan, M. F. (2020). Chatter identification in turning process based on vibration analysis using Hilbert-Huang transform. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(2), 6856-6868.
- Swain, S., Chattarjee, S., Panigrahi, I., ve Sahoo, A. K. (2018). Cutting tool vibration analysis for better surface finish during dry turning of mild steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24605-24611.
- Şeremet, M. (2019). AISI 4140 ıslah eliğinin seramik kesici takımlarla tornalanmasında oluşan titreşimin yzzey pürüzlüluğüne etkisinin deneysel analizi. *Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi*.
- Tabacaru, L. L., Axinte, E., ve Musca, G. (2016, November). Experimental research on the elastic deformation mode of S235JR rolled steel fastened between the centers of a Universal Lathe. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 161, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.
- Tan, L., ve Jiang, J. (2018). *Digital signal processing: fundamentals and applications*. Academic Press.
- Tasdemir, S. (2018). *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*.
- Teixeira, F. A., Pereira, F. M., Wong, H. C., Nogueira, J. M., ve Oliveira, L. B. (2019). SIIoT: Securing Internet of Things through distributed systems analysis. *Future Generation Computer Systems*, 92, 1172-1186.

- Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., ve Dornfeld, D. (2010). Advanced monitoring of machining operations. *CIRP annals*, 59(2), 717-739.
- Thamizhmanii, S., Saparudin, S., ve Hasan, S. (2007). Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 20(1-2), 503-506.
- Thoben, K. D., Wiesner, S., ve Wuest, T. (2017). "Industrie 4.0" and smart manufacturing- a review of research issues and application examples. *International journal of automation technology*, 11(1), 4-16.
- Tinin, M. (2018, May). Overview of possibilities of spatial signal processing in an inhomogeneous medium based on integral representation of wave field as double weighted Fourier transform (DWFT). In *2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC)* (pp. 1-4). IEEE.
- Tůma, J., Šimek, J., Škuta, J., ve Los, J. (2013). Active vibrations control of journal bearings with the use of piezoactuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 36(2), 618-629.
- Upase, R., ve Ambhore, N. (2020). Experimental investigation of tool wear using vibration signals: An ANN approach. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1365-1375.
- Uppendar, J., Gupta, C. P., Singh, G. K., ve Ramakrishna, G. (2010). PSO and ANN-based fault classification for protective relaying. *IET generation, transmission ve distribution*, 4(10), 1197-1212.
- Vivekanandan, T. (2017). Sriman Narayana Iyengar, N. Ch.: Optimal Feature Selection Using a Modified Differential Evolution Algorithm and Its Effectiveness for Prediction of Heart Disease. *Computers in Biology and Medicine*, 90, 125-136.
- Vogel-Heuser, B., ve Hess, D. (2016). Guest editorial Industry 4.0–prerequisites and visions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), 411-413.
- Wahid, M. A., Masood, S., Khan, Z. A., Siddiquee, A. N., Badruddin, I. A., ve Algahtani, A. (2020). A simulation-based study on the effect of underwater friction stir welding process parameters using different evolutionary optimization algorithms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(2), 643-657.
- Wallace, S. R., ve Wallace, F. L. (1991, March). Two neural network programming assignments using arrays. In *Proceedings of the twenty-second SIGCSE technical symposium on Computer science education* (pp. 43-47).
- Wang, Z., ve Mak, C. M. (2018). Application of a movable active vibration control system on a floating raft. *Journal of Sound and Vibration*, 414, 233-244.
- Xu, K., Zhang, Y., Zhu, Y., Zang, J., ve Chen, L. (2020). Dynamics analysis of active variable stiffness vibration isolator for whole-spacecraft systems based on nonlinear output frequency response functions. *Acta Mechanica Sinica*, 33(6), 731-743.

- Xu, Y., Wan, Z., Zou, P., Huang, W., ve Zhang, G. (2021). Experimental study on cutting force in ultrasonic vibration-assisted turning of 304 austenitic stainless steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(3), 494-513.
- Xu, Z., Liu, J., Chen, X., Wang, Y., ve Zhao, Z. (2017). Continuous blood pressure estimation based on multiple parameters from eletrocardiogram and photoplethysmogram by Back-propagation neural network. *Computers in Industry*, 89, 50-59.
- Yahya, E., Ding, G., ve Qin, S. (2016). Prediction of cutting force and surface roughness using Taguchi technique for aluminum alloy AA6061. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 14(3), 151-160.
- Yan, W. Y., ve Al-Jumaily, A. M. (2005). Workpiece Deflection Compensation Using a Two-Dimensional Toolposts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 219(4), 393-400.
- Yang, A., Han, Y., Pan, Y., Xing, H., ve Li, J. (2017). Optimum surface roughness prediction for titanium alloy by adopting response surface methodology. *Results in Physics*, 7, 1046-1050.
- Yang, H., Hasanipanah, M., Tahir, M. M., ve Bui, D. T. (2020). Intelligent prediction of blasting-induced ground vibration using ANFIS optimized by GA and PSO. *Natural Resources Research*, 29(2), 739-750.
- Yang, H., Kumara, S., Bukkapatnam, S. T., ve Tsung, F. (2019). The internet of things for smart manufacturing: A review. *IISE Transactions*, 51(11), 1190-1216.
- Yang, M. (2018). Smart metal forming with digital process and IoT. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(4), 207-214.
- Ye, Y., Yin, C. B., Gong, Y., ve Zhou, J. J. (2017). Position control of nonlinear hydraulic system using an improved PSO based PID controller. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 83, 241-259.
- Yildirim, Ş., ve Eski, İ. (2010). Noise analysis of robot manipulator using neural networks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(4), 282-290.
- Yoshitani, Y. (1983). Contribution of Control Systems to Energy Savings in Steel Works. *IFAC Proceedings Volumes*, 16(15), 25-38.
- Zad, H. S., Khan, T. I., ve Lazoglu, I. (2017). Design and adaptive sliding-mode control of hybrid magnetic bearings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2537-2547.
- Zaeh, M. F., Kleinwort, R., Fagerer, P., ve Altintas, Y. (2017). Automatic tuning of active vibration control systems using inertial actuators. *CIRP Annals*, 66(1), 365-368.
- Zain, A. M., Haron, H., ve Sharif, S. (2010). Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1755-1768.

- Zeid, E. A. (2019). Mechanical and electrochemical characteristics of solutionized AA 6061, AA6013 and AA 5086 aluminum alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1870-1877.
- Zeqiri, F., Alkan, M., Kaya, B., ve Toros, S. (2018). Experimental Research and Mathematical Modeling of Parameters Effecting on Cutting Force and Surface Roughness in CNC Turning Process. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 295, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
- Zhang, Q., Wang, J., Zhang, Y., ve Xu, G. (2013). Numerical simulation and manifold learning for the vibration of molten steel draining from a ladle. *Journal of Vibroengineering*, 15(2), 549-557.
- Zhang, S. J., To, S., Zhang, G. Q., ve Zhu, Z. W. (2015). A review of machine-tool vibration and its influence upon surface generation in ultra-precision machining. *International journal of machine tools and manufacture*, 91, 34-42.
- Zhang, X., Wang, C., Liu, J., Yan, R., Cao, H., ve Chen, X. (2019). Robust active control based milling chatter suppression with perturbation model via piezoelectric stack actuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 808-835.
- Zhong, R. Y., Wang, L., ve Xu, X. (2017). An IoT-enabled real-time machine status monitoring approach for cloud manufacturing. *Procedia Cirp*, 63, 709-714.

DİZİN

A

ACO · iv, v, ix, xiv, xv,
xvi, 57, 58, 67, 74, 75,
76, 77, 78, 102, 103
ANFIS · iv, v, viii, xiv,
xvi, 5, 9, 55, 56, 67,
74, 76, 77, 78, 79, 102,
103, 117, 120
ANOVA · ix, 5, 14, 16,
18, 62, 83, 84

Ç

ÇLRM · viii, ix, xv, xvi,
6, 30, 59, 60, 67, 70,
71, 72, 75, 102

F

FFT · iv, v, vii, xvi, 7,
16, 33, 38, 39, 91, 92,
96, 97, 104, 107, 114

G

GA · iv, v, ix, xiv, xv,
xvi, 56, 58, 67, 74, 75,
76, 77, 78, 79, 81, 102,
103, 108, 113, 114,
120

I

IoT · iv, v, viii, xiv, xvi,
2, 3, 7, 25, 26, 27, 28,
31, 63, 64, 65, 66, 98,
105, 112, 113, 115,
120, 121

K

Kayan Kipli Kontrol ·
viii, xvi, 48, 49, 105

P

PSO · iv, v, ix, xv, xvi,
57, 58, 59, 67, 74, 75,
76, 78, 79, 80, 102,
103, 108, 119, 120

T

Taguchi · viii, ix, xvi, 5,
6, 10, 11, 15, 16, 17,
18, 30, 61, 62, 81, 82,
103, 107, 108, 109,
110, 111, 112, 113,
117, 118, 119
Takım titreşimi · iv, xv,
6, 18, 62, 80, 81, 82,
83, 84, 85, 86, 103,
104
Takım ucu sıcaklığı · iv,
6, 70, 102

Y

YSA · iv, viii, ix, xiv,
xv, xvi, 5, 6, 9, 12, 14,
30, 51, 53, 55, 60, 61,
67, 70, 72, 73, 102
Yüzey pürüzlülüğü · iv,
4, 6, 12, 16, 17, 22, 40,
60, 62, 67, 68, 69, 80,
81, 82, 83, 84, 85, 94,
103



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

