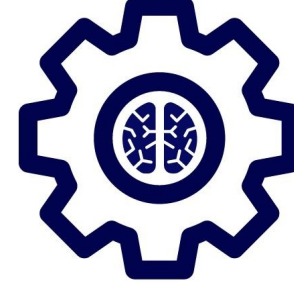




**İZMİR EKONOMİ
ÜNİVERSİTESİ**



**Machine Monitoring
&
Diagnostics**

Yapay Zeka ile Kestirimci Bakım

Prof. Dr. Levent Eren

Kestirimci Bakım

Problem

- Fabrikalarda bakım planlarının %70'i halen reaktif
 - Parçanın bozulana kadar çalıştırılması ve bozulduğunda değiştirilmesi/onarılması
 - Parça bozulmasa bile sürekli ve gereğinden fazla bakım yapılarak, parçanın bozulmasının önüne geçilmesi hedeflenmektedir.

Her iki çözümde de bakım maliyetleri çok yüksek olmakta ve özellikle plansız duruşlar yüzünden ek masraflar çıkmaktadır.

Kestirimci Bakım

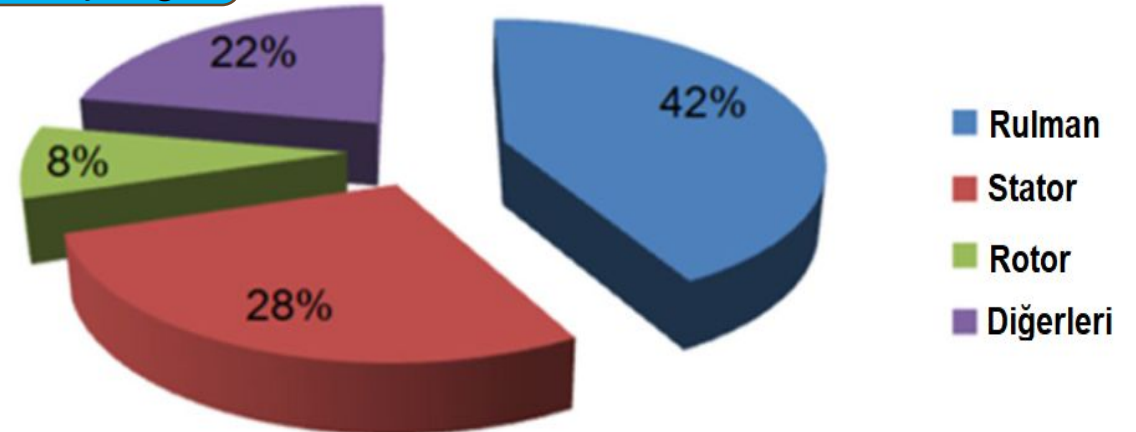
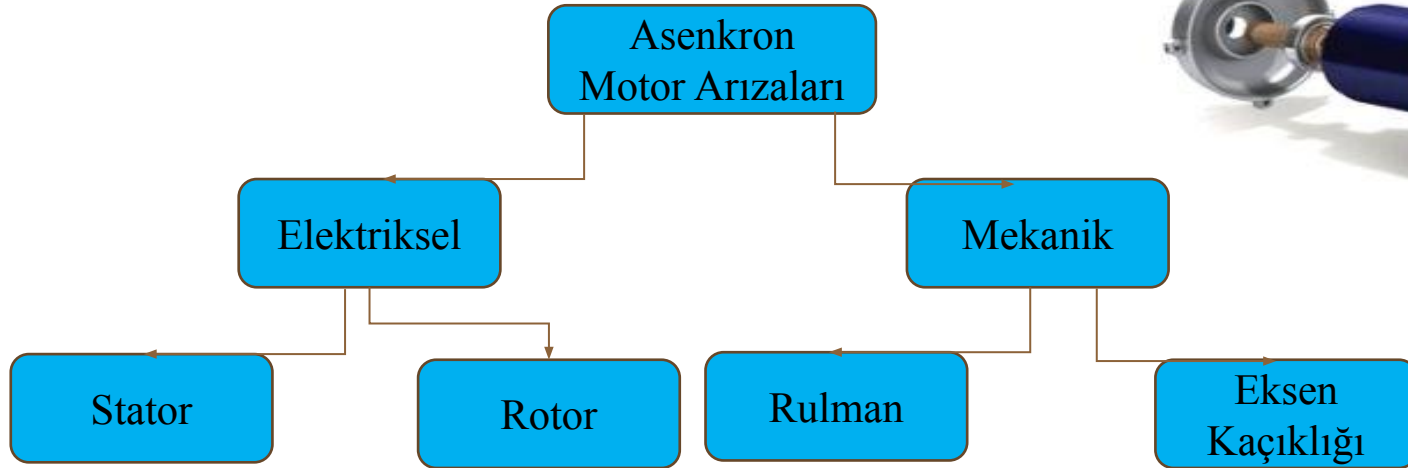
Çözüm

Sensörlerden gelen veriler, operasyonel sistemlerdeki duruş ve arıza bilgileriyle birlikte yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek ekipman/parça bozulma zamanı tahminlemesi, anomali tespiti ve bozulma ihtimali hesaplama.

Kestirimci bakım sayesinde plansız duruşlarda %70'e varan azalma, %10 - %20 arasında ekipman bulunabilirliğinde artış ve toplam maliyetlerde ortalama %10-%30 arasında azalma sağlanabilir.

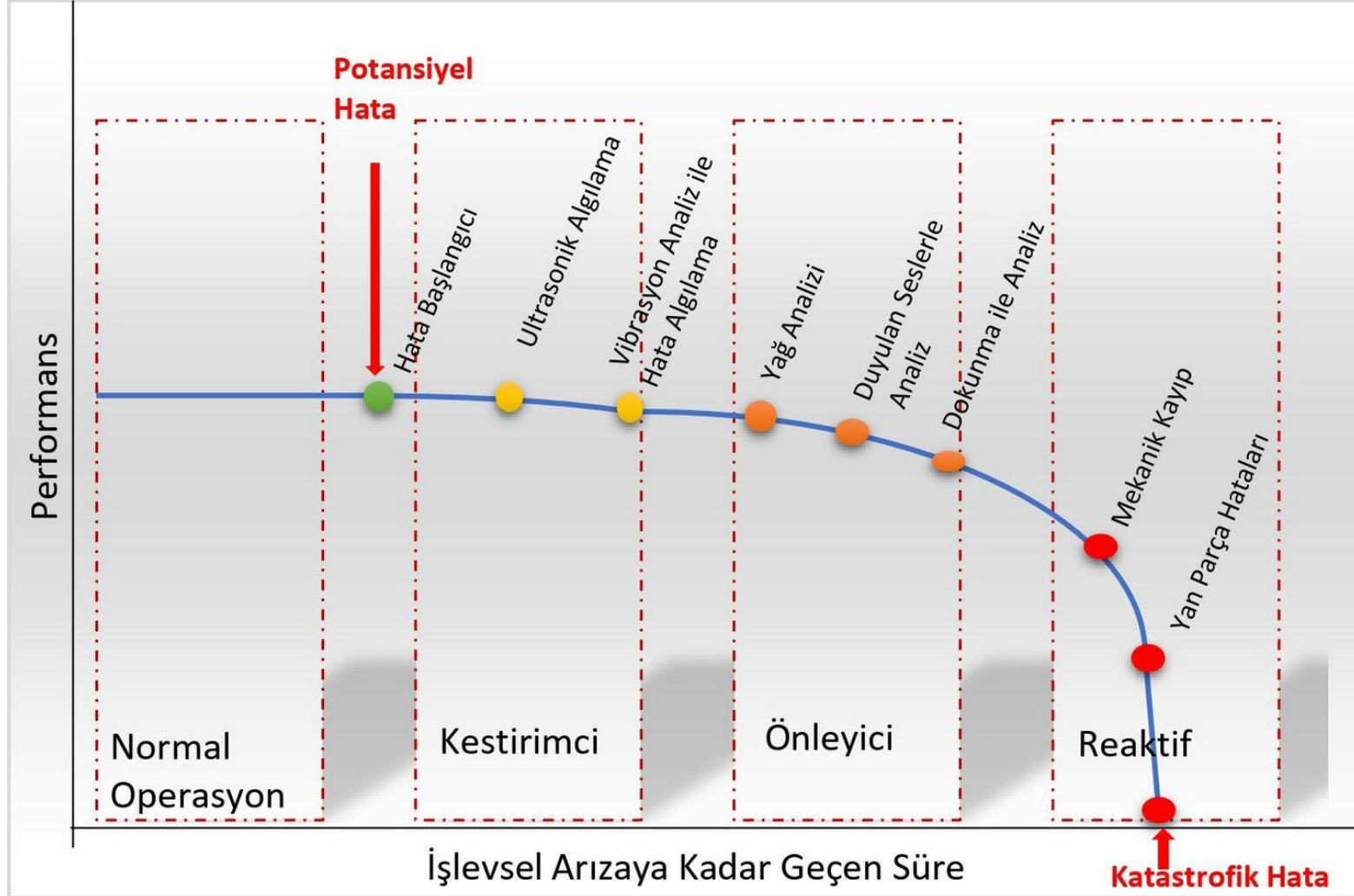
Asenkron Motorlar

Arıza Türleri



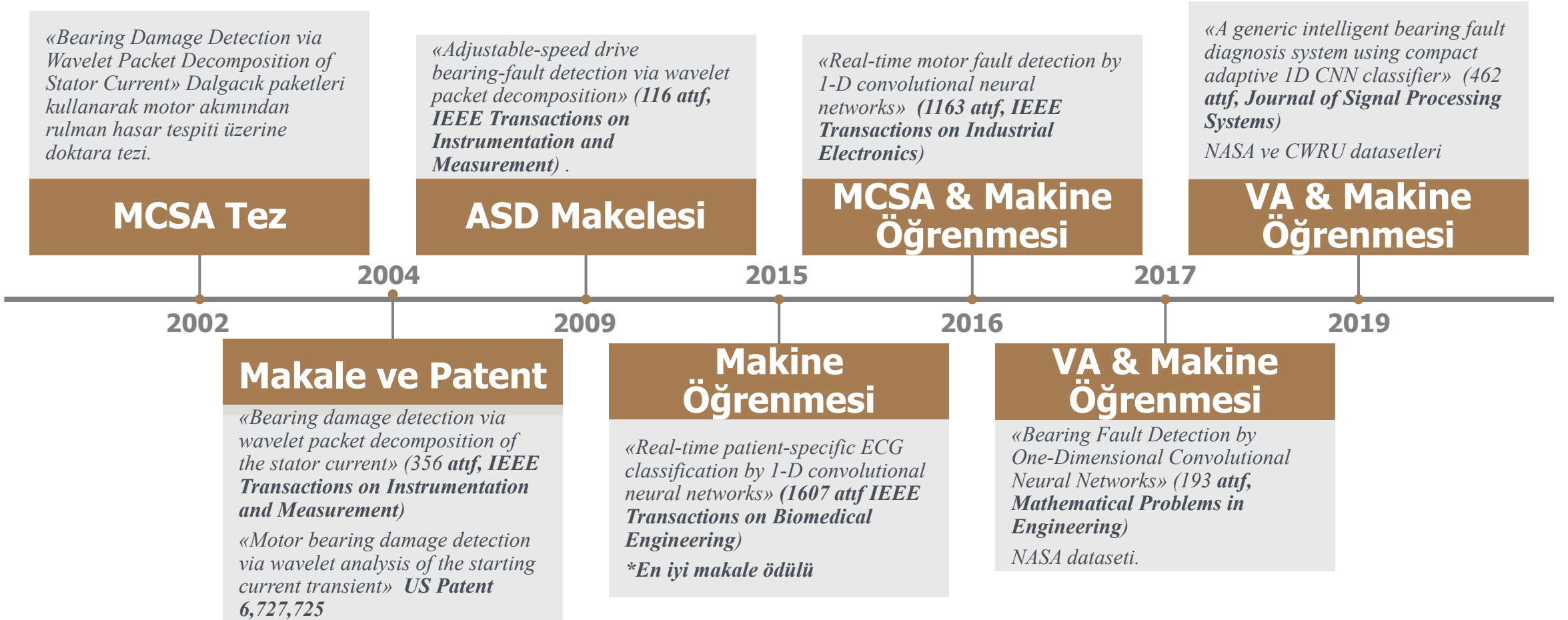
Bakım Teknikleri

Arıza Seviyeleri



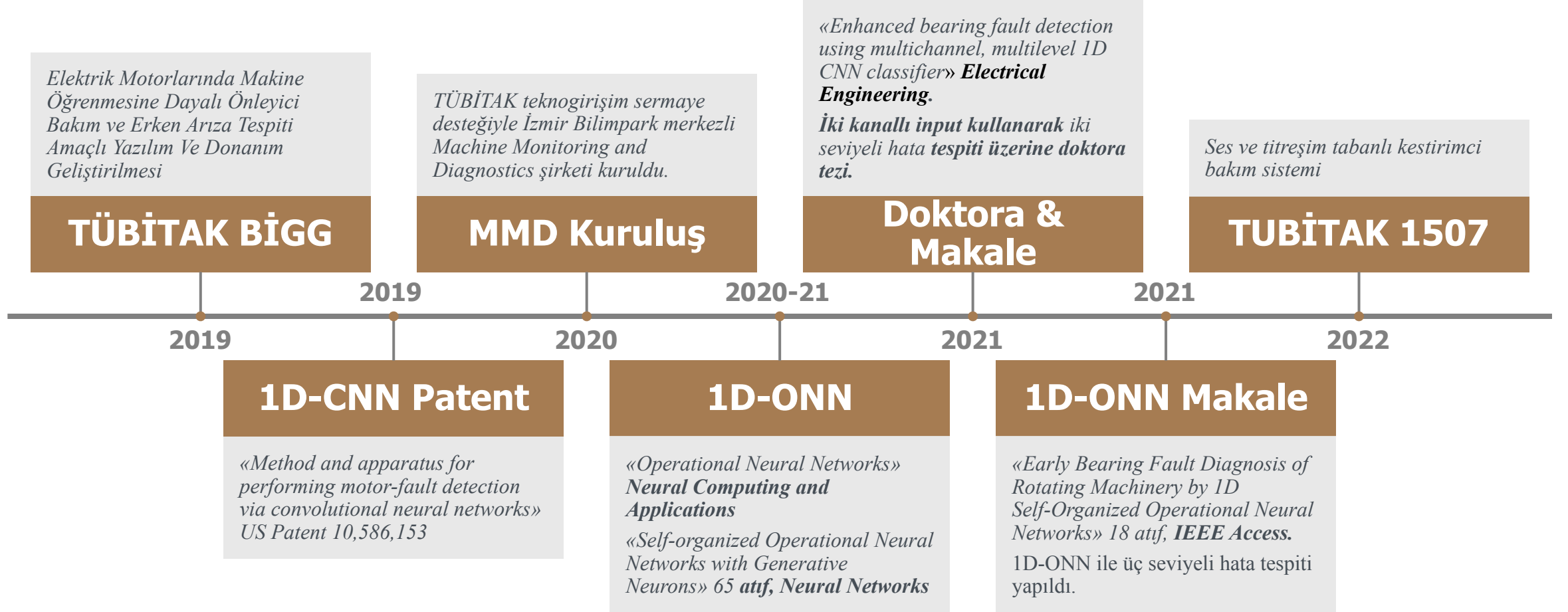
İEÜ Motor Erken Uyarı Sistemleri

Grup Uzmanlık Tarihçesi



İEÜ Motor Erken Uyarı Sistemleri

Grup Uzmanlık Tarihçesi



Kestirimci Bakım Çalışma Grubu

Ekip Üyeleri



Özer Can Devecioğlu
(İşaret İşleme & Makine Öğrenmesi)



Sertaç Kılıçkaya
(Gömülü Sistemler & Makine Öğrenmesi)



Prof. Dr. Türker İnce
(İşaret İşleme, Makine Öğrenmesi & Uzaktan Algılama)



Prof. Dr. Levent Eren
(Elektrik Makinaları & İşaret İşleme)



Prof. Dr. Murat Aşkar
(Elektronik Devreler, VLSI Tasarım & Telekomünikasyon)

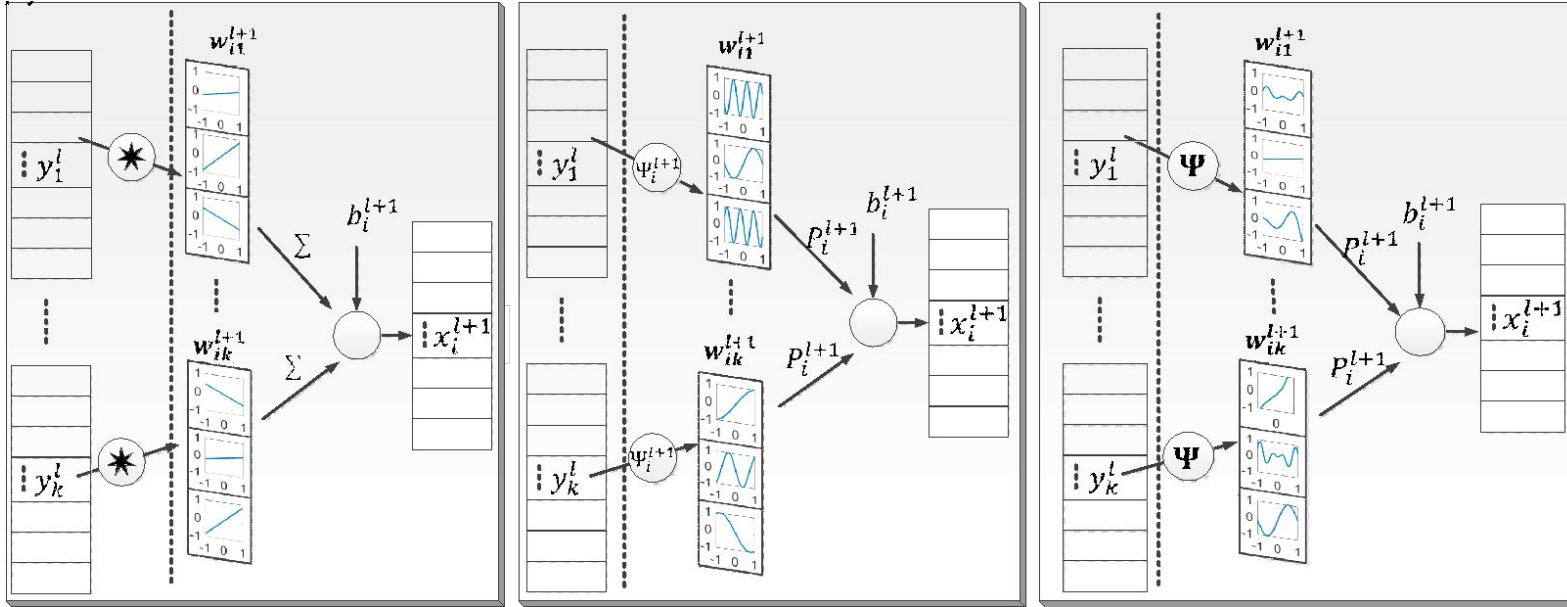
Hedefler

Geliştirilecek Üründe

- **İleri-seviye makine öğrenmesi modelleri** geliştirilerek,
- Farklı tip arızaları ve **arıza seviyelerini tespit** edebilecek,
- **Farklı güçteki** motorlarda arıza tespiti yapabilecek,
- Gömülü sistem gerçeklemlere uygun, **kompak yapıda ve hızlı**,
- Farklı tip sensör verilerin kullanımını ve füzyonunu destekleyen,
- Telefon uygulaması üzerinden kolaylıkla kullanılacak bir sistem geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Evrişimsel / Operasyonel Sinir Ağları

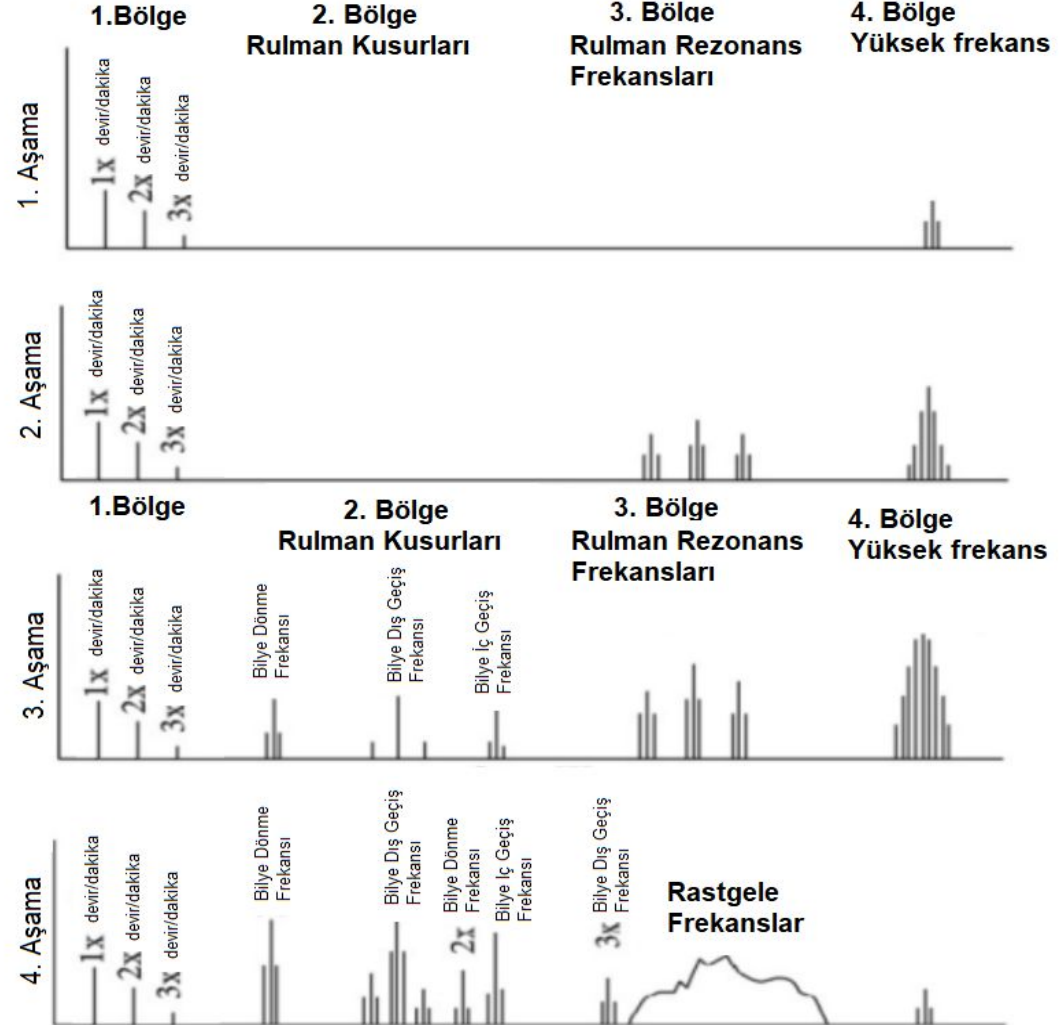
Modeller



- 1-B ESA'ların, kaydedilmiş ham sensör verilerini işleyerek motor arıza sınıflandırma problemleri için iyi bir çözüm olabileceği gösterilmesine karşın daha zor bir problem olarak farklı tip arızaların farklı seviyelerde yüksek doğrulukta tespiti için yetersiz kalmaktadır.
- Önerilen 1-B OSA'lar, CNN'lerin doğrusal nöron modellerini doğrusal olmayan genelleştirilmiş model ile değiştirerek daha karmaşık problemlerde öğrenme kapasitesini artırmaktadır.

Arızanın Evreleri

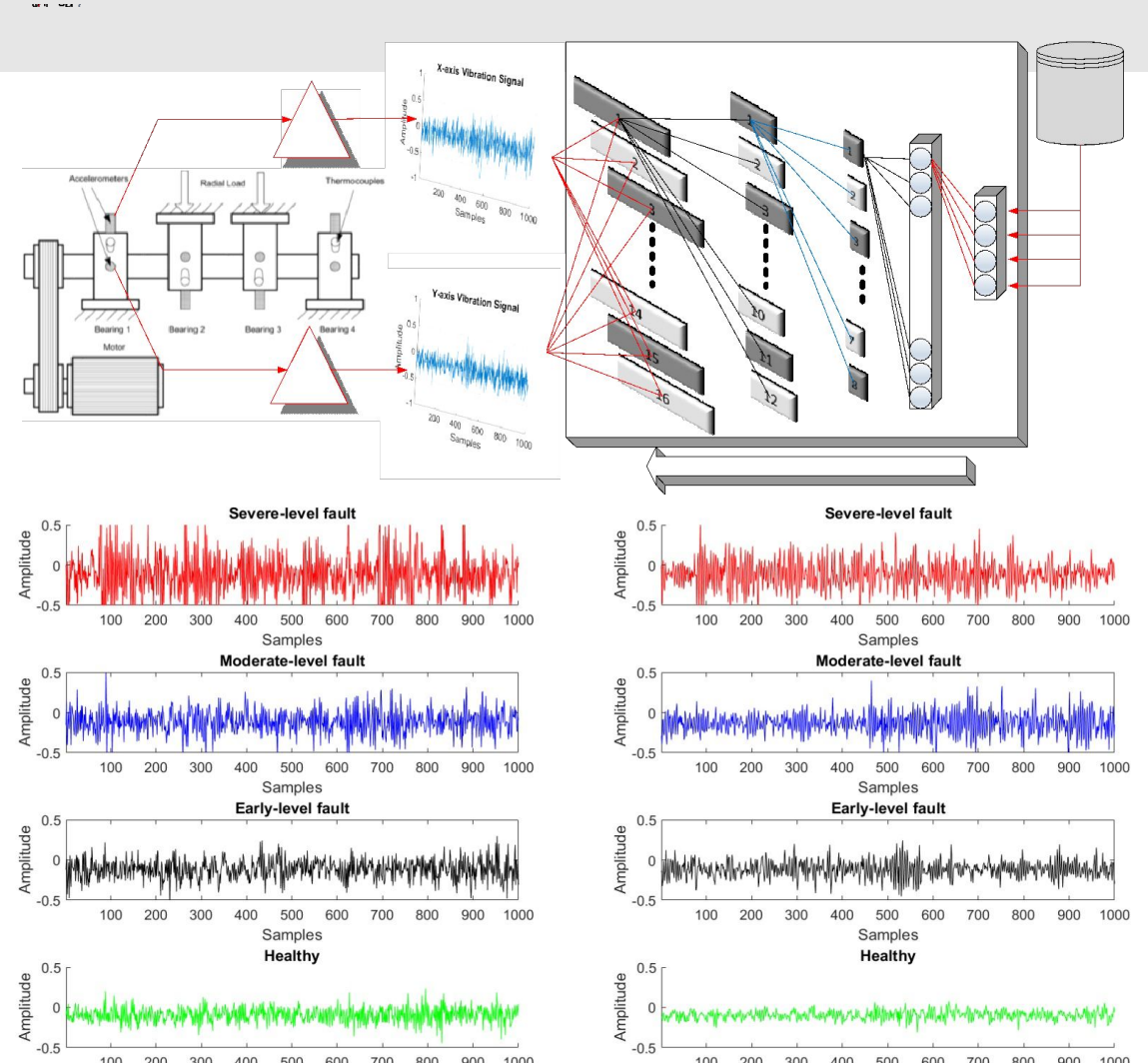
İlgili Frekanslar



1-B OSA'lar ile Arızanın Farklı Seviyelerde Tespiti

IMS Veri Kümesi

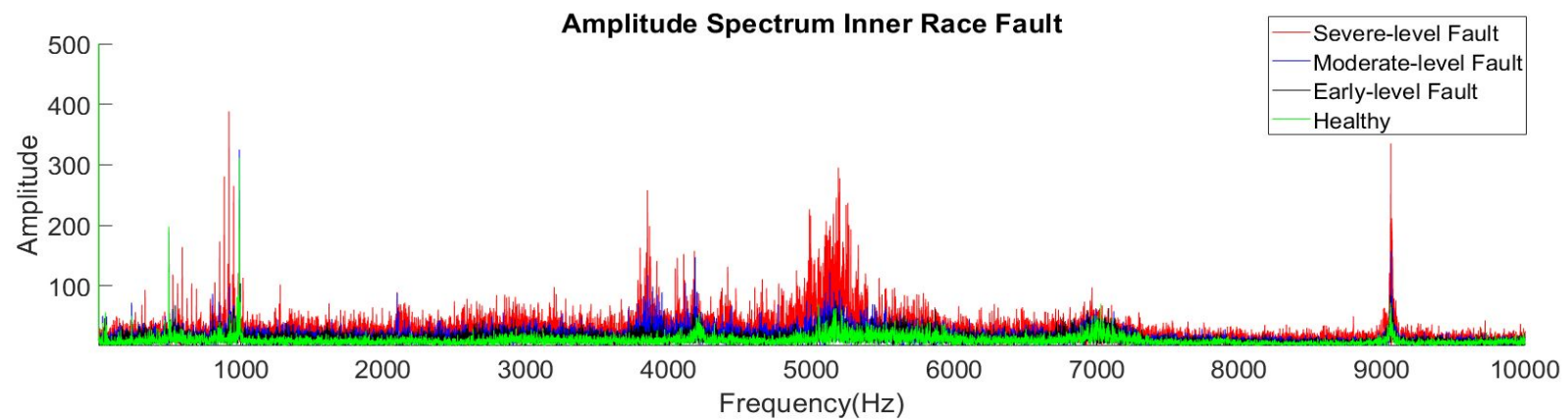
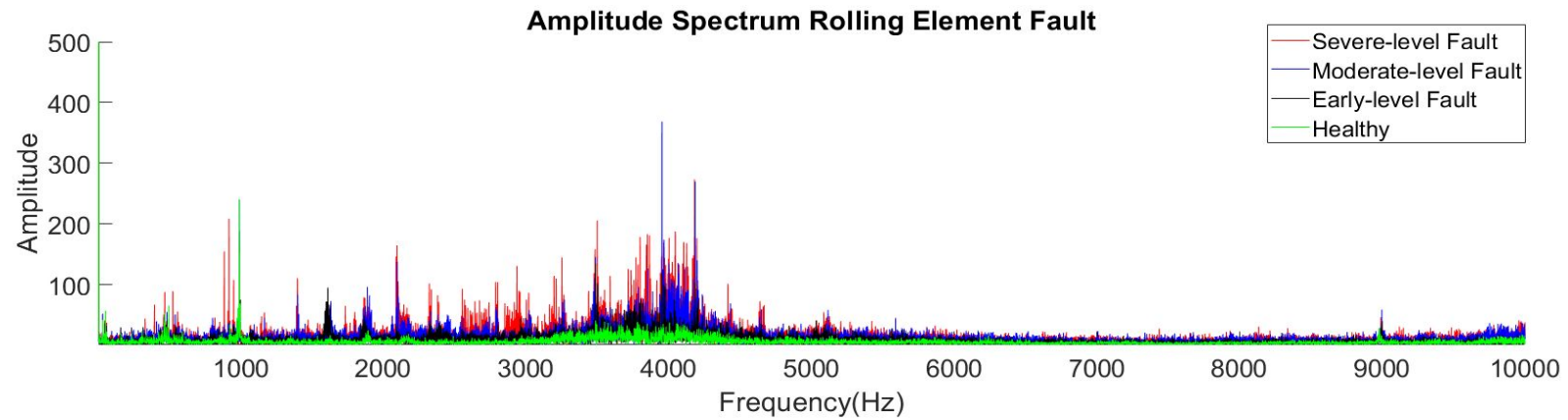
- Bu veri kümesi, 2014 yılında **Cincinnati Intelligent Maintenance Systems Üniversitesi (IMS)** tarafından sağlanmıştır.
- Resimde gösterilen test teçhizatı, Rexnord ZA-2115 tipi 4 çift sıralı rulmandan oluşmaktadır. Veri toplamak için yüksek hassasiyetli Quart ICP® tipi ivmeölçerler kullanılmıştır.
- Veri kümesi için her rulman için her bir rulman yatağına takılı **iki ivmeölçer** [x ve y eksenini] vardır.
- **“Run-to-Failure”** şeklinde hazırlanan bu veri kümesinde 3. rulmanda iç bilezik arızası, 4. rulmanda ise yuvarlanan eleman arızası görülmektedir.
- Her dosya, **örnekleme frekansı 20 kHz** olan 20.480 noktadan oluşur.



Farklı iç bilezik (solda) ve yuvarlanan eleman hataları (sağda) için tipik titreşim sinyalleri örnekleri

Verilerin Etiketlenmesi

IMS Veri Kümesi



1-B ESA ve OSA'lar ile Arızanın Farklı Seviyelerde Tespit Sonuçları

İç bilezik arızası seviyesi sınıflandırma performansı

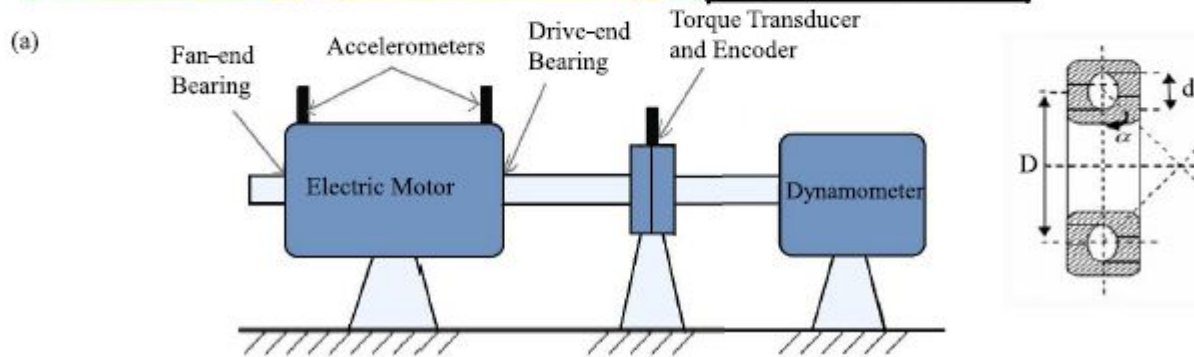
Q	Configuration	Healthy			Early-level fault			Moderate-level fault			Severe-level fault		
		Sen	Ppr	F1	Sen	Ppr	F1	Sen	Ppr	F1	Sen	Ppr	F1
1	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	1.0000	1.0000	0.9406	0.9500	0.9453	0.8284	0.8325	0.8304	0.8909	0.8775	0.8841
3	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	1.0000	1.0000	0.9750	0.9750	0.9750	0.9282	0.8725	0.8995	0.9033	0.9575	0.9296
5	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	0.9975	0.9987	0.9775	0.9775	0.9775	0.9295	0.8900	0.9093	0.9139	0.9550	0.9340
7	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	1.0000	1.0000	0.9848	0.9725	0.9786	0.9146	0.9100	0.9123	0.9263	0.9425	0.9343
9	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	1.0000	1.0000	0.9823	0.9700	0.9761	0.9116	0.9025	0.9070	0.9218	0.9425	0.9320

Q	Configuration	Healthy			Early-level fault			Moderate-level fault			Severe-level fault		
		Sen	Ppr	F1	Sen	Ppr	F1	Sen	Ppr	F1	Sen	Ppr	F1
1	(16-12-8)+(16-4)	0.9925	0.9975	0.9950	0.9607	0.9775	0.9690	0.8966	0.8450	0.8700	0.8865	0.9175	0.9017
3	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	1.0000	1.0000	0.9778	0.9900	0.9839	0.9435	0.8775	0.9093	0.9054	0.9575	0.9307
5	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	0.9975	0.9987	0.9706	0.9900	0.9802	0.9005	0.8825	0.8914	0.9102	0.9125	0.9114
7	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	1.0000	1.0000	0.9752	0.9850	0.9801	0.9306	0.9050	0.9176	0.9312	0.9475	0.9393
9	(16-12-8)+(16-4)	1.0000	1.0000	1.0000	0.9800	0.9800	0.9800	0.9071	0.9275	0.9172	0.9463	0.9250	0.9355

Yuvarlanan eleman arızası seviyesi sınıflandırma performansı

CWRU Rulman Veri Seti

- 2 HP asenkron motor
- Titreşim verisi 12kHz ve 48 kHz örnekleme
- Değişik yük seviyeleri
- Ön ve arka rulmandan veri toplama



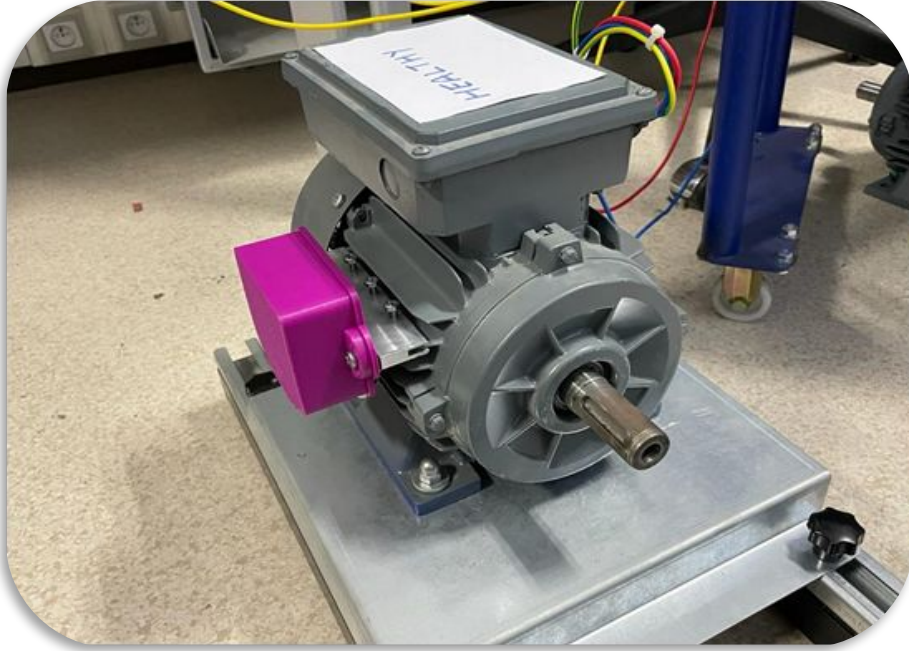
Rulman	Fault Location	Çap (cm)	Derinlik (cm)	Marka
Rotor Tarafi	İç bilezik	0.0178	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	İç bilezik	0.0356	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	İç bilezik	0.0533	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	İç bilezik	0.0711	0.1270	NTN
Rotor Tarafi	Dış bilezik	0.0178	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	Dış bilezik	0.0356	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	Dış bilezik	0.0533	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	Dış bilezik	0.1016	0.1270	NTN
Rotor Tarafi	Top	0.0178	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	Top	0.0356	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	Top	0.0533	0.0279	SKF
Rotor Tarafi	Top	0.0711	0.3810	NTN

CWRU Veri Seti Sonuçları

1D SelfONN (fs = 12kHz)

30-70 %																					
Train/Test Split		q=1				q=3				q=5				q=7				q=9			
Q	Scores	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support
	BF_DE	0.958	0.849	0.900	4433	0.938	0.911	0.925	4433	0.712	0.906	0.797	4433	0.935	0.970	0.952	4433	0.827	0.988	0.901	4433
	BF_FE	0.860	0.824	0.841	2023	0.956	0.917	0.936	2023	0.851	0.918	0.883	2023	0.968	0.947	0.958	2023	0.918	0.957	0.937	2023
	IR_DE	0.964	0.983	0.973	4246	0.992	0.986	0.989	4246	0.997	0.721	0.837	4246	0.980	0.997	0.989	4246	0.991	0.979	0.985	4246
	IR_FE	0.767	0.907	0.831	2013	0.934	0.911	0.922	2013	0.800	0.984	0.882	2013	0.901	0.971	0.935	2013	0.897	0.954	0.925	2013
	OR_DE	0.929	0.985	0.956	8503	0.950	0.993	0.971	8503	0.973	0.893	0.932	8503	0.988	0.962	0.975	8503	0.997	0.906	0.949	8503
	OR_FE	0.983	0.872	0.924	3556	0.962	0.936	0.949	3556	0.938	0.950	0.944	3556	0.981	0.945	0.963	3556	0.990	0.919	0.953	3556
	Normal	0.952	1.000	0.975	594	1.000	0.998	0.999	594	1.000	1.000	1.000	594	1.000	1.000	1.000	594	1.000	1.000	1.000	594
	Accuracy			0.926	25368			0.957	25368			0.886	25368			0.967	25368			0.945	25368
50-50 %																					
Train/Test Split		q=1				q=3				q=5				q=7				q=9			
Q	Scores	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support
	BF_DE	0.947	0.802	0.869	3149	0.944	0.984	0.963	3149	0.949	0.989	0.968	3149	0.963	0.975	0.969	3149	0.916	0.976	0.945	3149
	BF_FE	0.938	0.907	0.922	1438	0.985	0.932	0.958	1438	0.987	0.933	0.959	1438	0.981	0.964	0.972	1438	0.980	0.967	0.973	1438
	IR_DE	0.763	0.988	0.861	3052	0.995	0.994	0.995	3052	0.998	0.987	0.992	3052	0.990	0.995	0.992	3052	0.994	0.964	0.979	3052
	IR_FE	0.935	0.951	0.943	1446	0.967	0.964	0.966	1446	0.982	0.954	0.968	1446	0.979	0.950	0.964	1446	0.956	0.973	0.964	1446
	OR_DE	0.980	0.908	0.942	6073	0.994	0.973	0.984	6073	0.993	0.975	0.984	6073	0.986	0.986	0.986	6073	0.987	0.968	0.978	6073
	OR_FE	0.950	0.969	0.959	2548	0.955	0.985	0.970	2548	0.946	0.996	0.970	2548	0.975	0.982	0.978	2548	0.976	0.975	0.975	2548
	Normal	0.990	0.988	0.989	414	1.000	1.000	1.000	414	0.998	1.000	0.999	414	1.000	1.000	1.000	414	1.000	1.000	1.000	414
	Accuracy			0.917	18120			0.977	18120			0.978	18120			0.981	18120			0.971	18120
70-30 %																					
Train/Test Split		q=1				q=3				q=5				q=7				q=9			
Q	Scores	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support	Precision	Recall	F1 Score	Support
	BF_DE	0.965	0.970	0.968	1891	0.949	0.986	0.967	1891	0.991	0.923	0.956	1891	0.987	0.950	0.968	1891	0.986	0.946	0.965	1891
	BF_FE	0.950	0.990	0.969	879	0.989	0.947	0.967	879	0.990	0.949	0.969	879	0.975	0.965	0.970	879	0.968	0.961	0.965	879
	IR_DE	0.996	0.993	0.994	1808	0.999	0.947	0.973	1808	0.991	0.995	0.993	1808	0.968	0.998	0.983	1808	0.992	0.996	0.994	1808
	IR_FE	0.983	0.969	0.976	880	0.950	0.992	0.971	880	0.973	0.992	0.983	880	0.980	0.982	0.981	880	0.923	0.989	0.954	880
	OR_DE	0.991	0.981	0.986	3604	0.972	0.978	0.975	3604	0.962	0.997	0.979	3604	0.982	0.990	0.986	3604	0.981	0.996	0.988	3604
	OR_FE	0.980	0.987	0.983	1562	0.977	0.974	0.976	1562	0.980	0.987	0.984	1562	0.985	0.979	0.982	1562	0.989	0.961	0.975	1562
	Normal	1.000	0.996	0.998	248	1.000	1.000	1.000	248	1.000	1.000	1.000	248	0.996	1.000	0.998	248	0.992	1.000	0.996	248
	Accuracy			0.982	10872			0.973	10872			0.978	10872			0.980	10872			0.979	10872

Titreşim Sensör Kartı



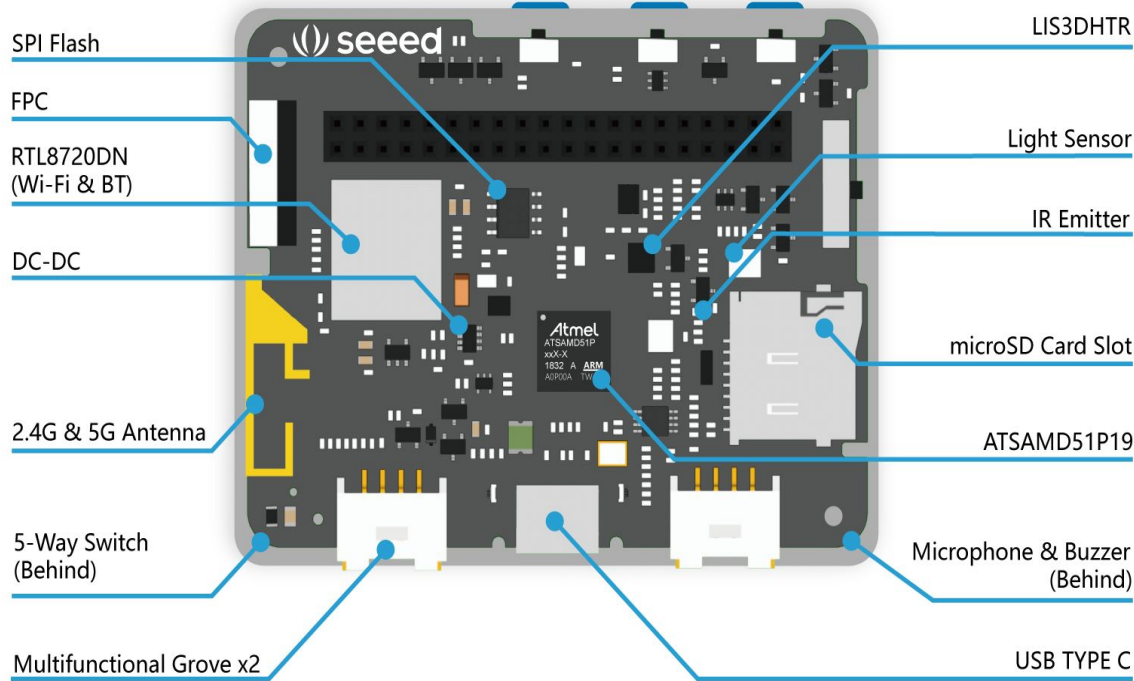
□ Karşılaşılan Zorluklar:

□ İvme / Titreşim Sensörü:

- Dar Bant Aralığı
(ODR: 1.6kHz, BW: 800 Hz)
- Dar Dinamik Aralık
(Max: 16 g)
- Örnek Kestirimci Bakım Sensörü: ADXL1001
- (BW: 21kHz, 100g, 1-eksen, 70,13 €)

□ Kutu Tasarımı ve Motor Bağlantı Aparatı

WIO Terminal Geliştirme Kartı



- Microchip ATSAM51 Cortex-M4F tabanlı MCU
 - Dual band 2.4GHz/5GHz WiFi
 - BLE/BLE 5.0
- B4013AM422-042 mikrofon (analog çıkış)
 - ADC çıkışı ses örnekleme frekansı: 16 kHz
 - Direct memory access controller (DMAC) ile 5 saniyelik ses verisi (16-bit PCM .wav formatı) Flash hafızasına kaydedildi.
 - Rest API sunucu-istemci ses verisi transferi
- LIS3DH 3-eksen ivme sensörü
 - I2C & SPI
 - $\pm 2g/4g/8g/16g$ dinamik aralık
 - 16-bit veri çıkışı
 - ODR: 1.6 kHz

1500 RPM Monofaze Motor

- 1500 rpm sağlıklı ve dış blezik rulman arızası olan monofaze motorlar
- Yüksüz, yarım yük ve tam yük durumlarından oluşın 16kHz 16-bit PCM ses verisi
- 1B ESA test verisi çıkarım sonucu (% 98 doğruluk ile sınıflandırma)

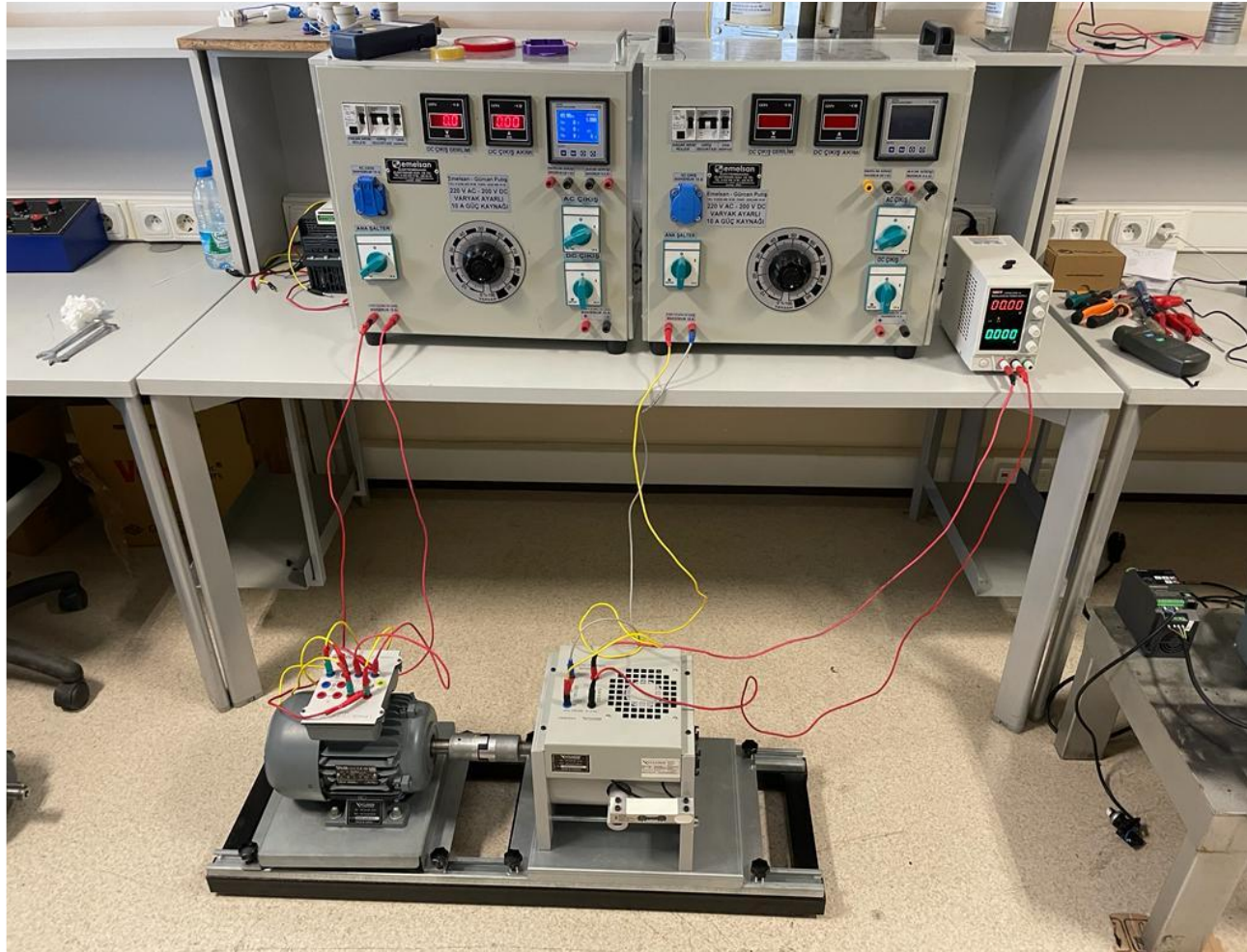
	TAHMİN		
G E R Ç E K		Sağlıklı	Dış Bilezik Hatası
	Sağlıklı	6078	91
	Dış Bilezik Hatası	166	6401

3000 RPM Monofaze Motor

- 3000 rpm sağlıklı, dış blezik ve iç bilezik rulman arızası olan monofaze motorlar
- Yüksüz durumda çalıştırılan motorlardan 16kHz 16-bit PCM ses verisi
- 1B ESA test verisi çıkarım sonucu (% 99 doğruluk ile sınıflandırma)

	TAHMİN			
G E R  E K		Sağlıklı	Dış Bilezik Hatası	İç Bilezik Hatası
	Sağlıklı	9965	1	33
	Dış Bilezik Hatası	0	9999	0
	İç Bilezik Hatası	14	0	9886

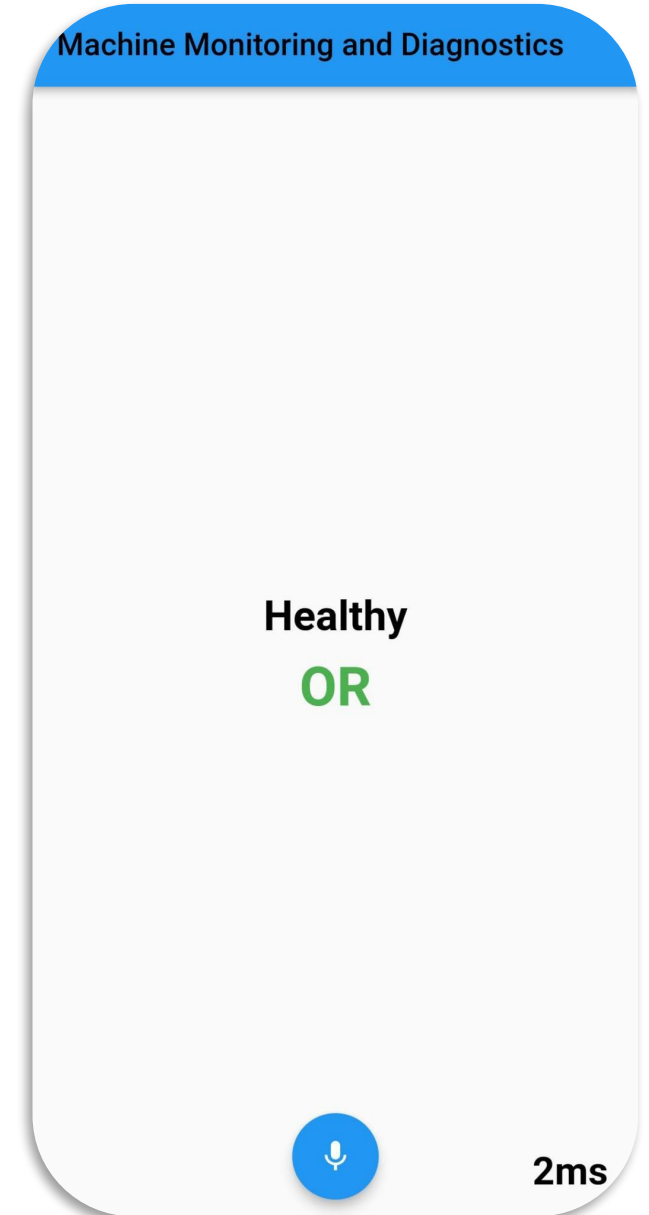
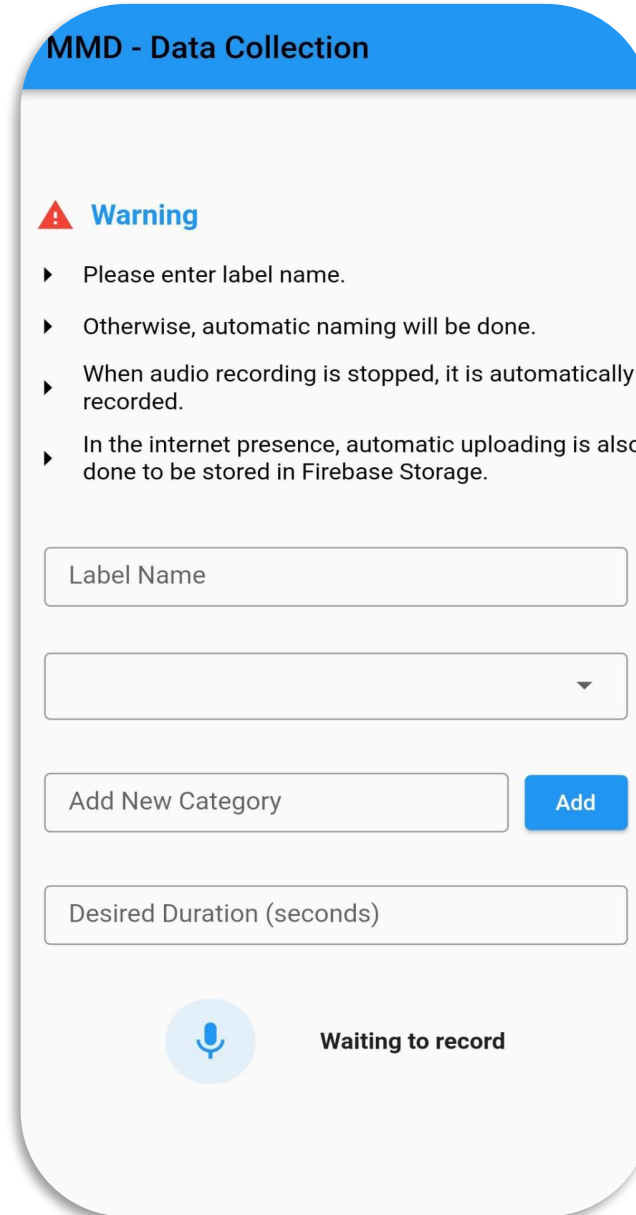
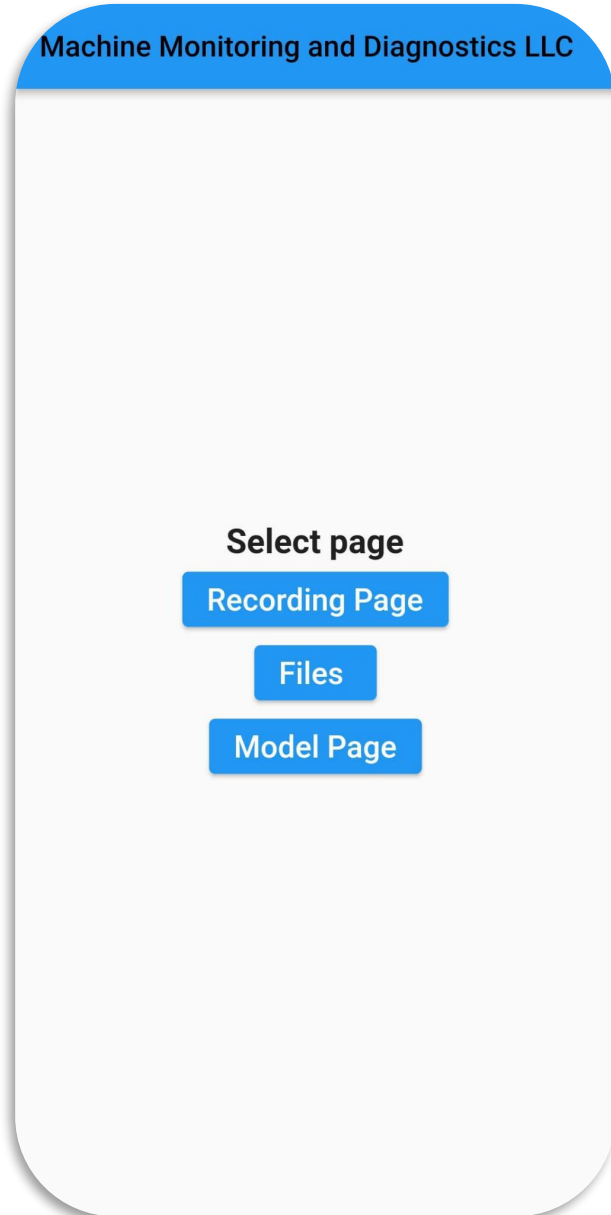
Asenkron Motor – Manyetik Toz Fren Test Düzenneği



- Sağlıklı ve dış bilezik hata durumları
- Yüksüz, eyrek, yarım ve tam yük durumları
- Her biri yaklaşık 6 dakika olmak üzere toplam 24 dakika sağlıklı ve 24 dakika dış bilezik hatası ses verisi
- %70'i eğitim, %15'i validasyon ve %15'i test

	TAHMİN		
GERÇEK	Sağlıklı	Dış Bilezik Hatası	
Sağlıklı	20588	103	
Dış Bilezik Hatası	1279	19115	

Mobil Uygulama Geliştirme Çalışmaları



Mobil Uygulama – Firebase Bulut Depolama

The screenshot displays the Firebase Storage console for the project 'MMD - LLC'. The left sidebar contains navigation options: Project Overview, Storage, Build, Release & Monitor, Analytics, Engage, and All products. The main content area shows the 'Storage' section with tabs for Files, Rules, Usage, and Extensions. A notification banner at the top right reads 'Protect your Storage resources from abuse, such as billing fraud or phishing' with a 'Configure App Check' link. Below this, a breadcrumb path is shown: 'gs://mmd-llc.appspot.com > 27-09-2023-Wed... > motor1'. An 'Upload file' button is visible in the top right of the file list area. The file list contains two entries:

<input type="checkbox"/>	Name	Size	Type	Last modified
<input type="checkbox"/>	Healthy_1-55.wav	312.54 KB	audio/x-wav	Sep 27, 2023
<input type="checkbox"/>	OR_1-26.wav	312.54 KB	audio/x-wav	Sep 27, 2023

At the bottom of the sidebar, there is a 'Customize your nav!' section with a 'Learn more' link and a 'Got it' button, and a 'Spark' section with 'No-cost \$0/month' and an 'Upgrade' button.



Teşekkürler

Demo

