

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

CEVHER DEĞİRMENLERİNDE KAUÇUK LİFTERBAR AŞINMASINI
ALGILAMAK İÇİN KABLOSUZ SENSÖR TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk KOÇBIYIK

MART 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CEVHER DEĞİRMENLERİNDE KAÇUK LİFTERBAR AŞINMASINI
ALGILAMAK İÇİN KABLOSUZ SENSÖR TASARIMI**

Ufuk KOÇBIYIK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 06 /03 / 2025

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Cevher Değirmenlerinde Kauçuk Lifterbar Aşınmasını Algılamak İçin Kablosuz Sensör Tasarımı” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Ayhan YAZGAN’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocam Sayın Oğuzhan ÇAKIR’a , teşekkür ederim.

Araştırmalarımnda teknik imkan sağlayan FKK firmasına, Lora alıcısı konusunda destek veren Oğuzhan BAŞER’e teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama, kardeşime ve yoğun çalışmalarım süresince sabır gösteren sevgili karıma teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ufuk KOÇBIYIK

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Cevher Değirmenlerinde Kauçuk Lifterbar Aşınmasını Algılamak İçin Kablosuz Sensör Tasarımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/03/2025

Ufuk KOÇBIYIK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Aşınmanın Çeşitleri.....	2
1.1.1. Yapışkan (Adeziv) Aşınma	2
1.1.2. Abrasif Aşınma	2
1.1.3. Koroziyel Aşınma.....	3
1.1.4. Yorulma Aşınması	3
1.2. Aşınmanın Önemi.....	3
1.3. Aşınma Ölçüm Yöntemleri	4
1.4. Bilyeli Maden Değirmenleri.....	8
1.5. Kablosuz Sensör Haberleşmesi	11
1.5.1. Lora Haberleşmesi	11
1.5.2. E28-2G4M27S Lora Modülü	13
1.6. Kauçuk ve Karbon Siyahı.....	15
1.7. Rezistif Aşınma sensörleri.....	16
1.7.1. Çalışmada Kullanılan İletken Kauçuk ile Üretilen Aşınma Sensörü.....	16
1.8. Osilatörler	17
1.8.1. RC Osilatörler	18
1.8.2. LC Osilatörler	19
1.8.3. Sinüzoidal Olmayan Osilatörler	21
1.9. STM32L051 Mikro Denetleyici.....	22
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Kapasitif Aşınma Sensörü Testi	24
2.2. Çalışmada Kullanılan Karedalga Osilatör Devresi	28

2.2.1. Osilatör Devresinin Analizi	29
2.2.2. Osilatörün Ayarlanması ve Ölçüm Devresinin Hazırlanması.....	33
2.3. Çalışmada Kullanılan Lora Veri Formatı	35
2.4. Blok Diyagram	36
2.5. STM32L051 Sayıcı Modülün Ayarlanması	36
2.6. STM32L051 Stop Moduna Sokulması.....	38
2.7. Ana Yazılım	39
2.8. Akım ve Batarya Ömrü Hesabı	40
2.9. Lora Modülünün Açılışı ve Konfigüre Edilmesi.....	41
2.10. Alıcının Hazırlanması.....	42
2.11. Rezistif Algılayıcının Gerçekleştirilmesi	44
2.12. Deney ve Test Düzenegi.....	46
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
3.1. Rezistans ve Frekans - Aşınma Eğrisi.....	51
3.2. Kapasitans ve Frekans - Aşınma Eğrisi.....	52
3.3. Osilatör Frekansı - Rezistans Eğrisi	53
3.4. Aşınma - Frekans Grafiği.....	54
3.5. Rezistif Sensör ve Kapasitif Sensör - Aşınma Grafiği.....	55
3.6. Gerçek Ortam Verileri.....	56
3.7. Frekansa Bağlı Ömür Eğrisi	58
4. SONUÇLAR.....	60
5. ÖNERİLER.....	62
6. KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

CEVHER DEĞİRMENLERİNDE KAUÇUK LİFTERBAR AŞINMASINI ALGILAMAK İÇİN KABLOSUZ SENSÖR TASARIMI

Ufuk KOÇBIYIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN
2025, 65 Sayfa

Cevher değirmenlerin birçoğunda malzemenin öğütülmesi için metal bilyeler kullanılmaktadır. Metal bilyeler ve öğütülecek maddeler, dönen değirmen içerisinde lifterbarlar aracılığı ile karıştırılarak bilyelerin madenleri ezmesi sağlanır. Bu kaotik ve sürtünmeli ortamda kauçuktan yapılan lifterbarlar sürekli aşınır ve özelliğini kaybeder. Aşınma seviyesi değirmen performansını düşürme eşiğine gelmeden veya değirmen gövdesine zarar vermen lifterbar değişimi yapılmalıdır. Aşınma seviyesinin kontrolü mevcut durumda değirmen durdurularak değirmen içerisinde yapılan mekanik ölçümler ve gözlemler ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem işgücü ve üretim kapasitesi kaybına sebep olmaktadır. Bunlardan daha önemlisi değirmen içerisinde yapılan ölçümler işçi güvenliği açısından büyük risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem ile lifterbar aşınması değirmen durdurulmadan canlı olarak takip edilebilmektedir. Bu amaçla bir aşınma ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu ölçüm yöntemi ile alınan analog veriler frekans verisine ve daha sonra sayısal verilere çevrilerek değirmen dışına gönderilebilmesi için bir elektronik kart tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sensörler ve elektronik kart hem laboratuvar ortamında hem de gerçek ortamda lifterbarlar içerisine yerleştirilerek 2000 saat boyunca veri alınarak denenmiş ve alınan veriler tezde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Aşınma sensörü, Lifterbar Aşınması, Lora

Master Thesis

SUMMARY

WIRELESS RESISTIVE SENSOR APPLICATION TO DETECT RUBBER LIFTERBAR WEAR IN ORE MILLS

Ufuk KOÇBIYIK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ayhan YAZGAN
2025, 65 Pages

Most ore mills have rubber lifter bars and lining to mix ore and metal balls together to crush the ore. This chaotic and frictional environment causes rubber lifterbars constantly to wear out. Lifterbar service life depends on its location in the mill, ore type, the rubber material, mill load and mill speed. Worn lifterbars must be replaced as the wear level reaches the critical threshold before reducing mill performance or causing damage to the mill body. Control of the wear level is currently carried out by stopping the mill and taking mechanical measurements and making observations from inside of the mill. This method costs extra labor and reduces production capacity. But the most important, measurements made from inside the mill build up a great risk in terms of worker safety. With the method proposed in this study, lifterbar wear can be monitored live without stopping the mill. The proposed system tested in laboratory wearing with a sanding machine and collected data. The data studied in tables and graphics. An electronic card is designed and produced to measure wear using oscillator circuit, counting frequency and sending the data from inside of the mill to outside. The system also applied to a working mill and wear data stored in computer with along 2000 hours and presented in this thesis.

Key Words: Wear Sensing, Lora, Lifter bar, Ore Mill, Mining

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Yapışkan aşınma.....	2
Şekil 2. Abrasif aşınma	3
Şekil 3. Ultrasonik aşınma ölçüm tekniği (Brunskil, Harper, & Lewis, 2015).....	5
Şekil 4. Ultrasonik işaret ve yansıyan işaretler (Brunskil, Harper, & Lewis, 2015).....	5
Şekil 5. Rezistif komponentler ile üretilmiş aşınma sensörü (Dardona, Shen, & Tokgöz, 2018).....	6
Şekil 6. "Direct Write" tekniği ile üretilmiş rezistif elementler ve sensörün görseli (Dardona, Shen, & Tokgöz, 2018).....	6
Şekil 7. (a) Aşınma sensörü teorik gösterim, (b) gerçekleştirilmiş sensör (Serdah, Bailey, Schmidt, Bansal, & Dardona, 2021).....	7
Şekil 8. Bilyeli maden değirmeninin içi; bilyeler , kauçuk astar ve lifterbarlar	8
Şekil 9. Maden değirmeni kesit gösterimi; bilye hareketi ve lifterbarlar (Vermeulen, 1985).....	9
Şekil 10: Kauçuk lifterbar değişimi yapılan bilyeli bir değirmen (Altuncu, ve diğerleri, 2022).	10
Şekil 11. Farklı SF değerine göre SNR BER grafiği (Maleki, Nguyen, Bedeer, & Barton, 2024).....	12
Şekil 12. E28 modülü.....	13
Şekil 13. E28 Lora modülü ayak bağlantıları	14
Şekil 14. SX1280 Lora modem blok diyagramı (Semtech Corporation, 2023).....	14
Şekil 15. Tasarlanan rezistif sensör	16
Şekil 16. Propların yerleşim şekli	17
Şekil 17. Faz kaydırmalı osilatör	18
Şekil 18. Wien köprüsü osilatörü.....	19
Şekil 19. Opamp (işlemsel yükselteç) ile yapılmış Colpitts osilatörü	20
Şekil 20. Kristal ve eşdeğer devresi	20
Şekil 21. Bir gevşeme kare dalga osilatörü.....	21
Şekil 22. Bir gevşeme osilatörünü çıkış sinyal şekli (Atwal, 2024)	22
Şekil 23. Ayırık kapasitörlerden oluşturulan kapasitif prop gösterimi	24
Şekil 24. Kapasitör ölçümü için kullanılan RC devresi.....	25
Şekil 25. T süresinin hesaplanması için kullanılan eğri.....	25

Şekil 26.	(a) Üretilen kapasitif aşınma probu yapısı, (b) Probun yerleştirildiği poliamid cisim ölçüsü, (c) Kapasitans okuma devresi ve Arduino	26
Şekil 27.	Sensörün aşındırılma süreci	26
Şekil 28.	Test sonucunda elde edilen aşınma - kapasitans ve çıkış eğrisi	28
Şekil 29.	Kullanılan osilatör devresi	29
Şekil 30.	T1 periyodu için eşdeğer devre	31
Şekil 31.	T2 periyodu için eşdeğer devre	32
Şekil 32.	Gerçekleştirilen ölçüm kartı	34
Şekil 33:	Sistemin blok diyagramı	36
Şekil 34.	Timer21 konfigürasyonu	37
Şekil 35.	Frekans ölçüm (darbe sayım) işlemi.....	37
Şekil 36.	Düşük güç modu için RTC konfigürasyonu	38
Şekil 37.	Uyandırma saat frekansı 1 saniyeye ayarlanması ve alarminin kurulması	39
Şekil 38.	Stop moduna giriş	39
Şekil 39.	Ana yazılım döngüsü	40
Şekil 40.	Aşamalarda ölçülen akımın osiloskopta görüntüsü	41
Şekil 41.	Lora açılış konfigürasyonu	42
Şekil 42.	Alıcı devresi ve üzerindeki lora modülü.....	43
Şekil 43.	Alıcının blok diyagramı	43
Şekil 44.	ANSYS HFSS 3D Simülasyon programında elektrik alan simülasyon sonucu.....	44
Şekil 45.	Elektrik alan simülasyonun detaylı gösterimi.....	45
Şekil 46.	İçerisine problemlerin yerleştirilmiş olduğu lifterbar parçası ve aşınma ölçülme şekli.....	45
Şekil 47.	Rezistif proplar ve kapasitif prop eklenmiş test edilecek lifterbar parçası	46
Şekil 48.	Aşındırma amacıyla kullanılan şerit zımpara makinesi ve bir miktar aşındırma yapılmış test lifterbarı	47
Şekil 49.	RCL metre ile kapasitif prob ölçümü yapılmakta olan lifterbar.....	47
Şekil 50.	Aşındırma işlemi sonunda aşındırılmış ve aşındırılmamış lifterbar parçası.....	48
Şekil 51.	(a) Sensör monte edilen gerçek lifterbar (b) Rezistif proplar lifterbara yerleştirilmiş şekilde (c) Ölçüm devresi yerleşimi	48
Şekil 52.	Rezistif sensör devresinin ölçtüğü frekans ve RCL metre ile ölçülen rezistansın aşınmaya göre değişimi grafiği.....	52

Şekil 53.	Kapasitif prop devresinin ölçtüğü frekans ve RCL metre ile ölçülen kapasitansının aşınmaya göre değişimi grafiği.....	52
Şekil 54.	Sensör devresinin ölçtüğü frekansın rezistansa göre grafiği	53
Şekil 55.	Rezistif sensör devresi çıkışı ile Denklem (22)' ye göre hesaplanan logaritmik ölçekte frekans eğrisi ve sensör çıkışı frekans eğrisi	53
Şekil 56.	Frekans değerine bağlı olarak aşınma eğrisi.....	54
Şekil 57.	Frekansa bağlı aşınma eğrisi, uydurulan polinom ve mutlak hata	55
Şekil 58.	Rezistif sensör ile kapasitif sensör frekans verilerinin karşılaştırılması.....	55
Şekil 59.	Bilyeli cevher değirmenine yerleştirilmiş sensörlü lifterbardan alınan işlenmemiş frekans verileri.....	56
Şekil 60.	Değirmen sensör verilerine uyundurulan polinom eğrisi	57
Şekil 61.	Frekansa bağlı ömür grafiği.....	58
Şekil 62.	Aşınma miktarının hesaplanması için kullanılan polinom eğrisi	59

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.	Stm32L051 düşük güç modları ve akım değerleri.....	23
Tablo 2.	Elde edilen değerler	27
Tablo 3.	Rezistif prop aşınma/frekans çevirici osilatör bileşenlerinin değerleri	34
Tablo 4.	Çalışmada kullanılan veri formatı	35
Tablo 5.	Ölçümlere göre hesaplanan pil tüketimleri tablosu	40
Tablo 6.	Lora modülünün konfigürasyonu	42
Tablo 7.	Laboratuar testi rezistif prop sonuçları	49
Tablo 8.	Laboratuar testi kapasitif prop sonuç tablosu	50

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CRC	: Cyclic redundancy check
Bw	: Bant Genişliği
RFID	: Radyo frekans id
Opamp	: İşlemsel yükselteç
ADC	: Analog dijital Çevirici
STM	: STM32L051
RTC	: Gerçek zaman saati
RAM	: Rastgele erişimli bellek
PCB	: Baskı devre
SPI	: Serial peripheral interface
UART	: Universal asynchronous receiver and transmitter
SF	: Yayılım faktörü
LNA	: Düşük gürültülü amplifikatör
PA	: Güç amplifikatörü

1. GENEL BİLGİLER

Aşınma genellikle istenmeyen bir durumdur ancak hemen hemen her alanda az veya çok miktarda ortaya çıkar. DIN 50320' ye göre de aşınma, "katı cismin yüzeyinden, tribolojik zorlanma sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybıdır" şeklinde tanımlanır (Varol, 2016). Kaybolan malzeme, kullanılan araçta genellikle bir fonksiyon kaybına sebep olur ve bunu aracın değiştirilmesi veya yenilenmesi süreci takip eder.

Başka bir yaklaşımla aşınmanın tanımı; "sürtünme sonucu oluşan, katı cisimde teknolojik olarak bilinen şekil değiştirme ya da madde değişimi dışında kalan kalıcı biçimlenme ve madde değişimidir" (Tobbaş, 1993).

Başka bir tanıma göre aşınma, "mekanik etki sonucu katı yüzeylerden malzeme kalkması, eksilmesidir. Herhangi bir nesnenin faydasız hale gelmesinin ana üç sebeplerinden biridir. Bu üç sebep; modasının geçmesi, kırılması ve aşınmasıdır" (Oğuz, 1993).

Bütün bu olumsuz etkilerin yanında aşınmanın faydalı kullanımları da vardır. Traş makinesi bıçaklarının veya budama inesi bıçaklarının çalıştıkça aşınarak birbirini keskinleştirmesi bunlara örnektir. Bundan başka, otomobil lastiklerindeki aşınma şekli tekerlek ayarları konusunda bilgi verir, bu durum aşınmanın arıza teşhisinde kullanılmasına örnektir (Oğuz, 1993).

Aşınma değişik sebeplerle olabilir, ancak gerek yüzeylerin cinsi gerek ise aşınmanın nedeni konuları dikkate alınarak birkaç ana gruba ayrılabilir. Örneğin sıvıların katıları aşındırması, taneciklerin katıları aşındırması, pürüzlü katı yüzeylerin birbirini aşındırması gibi. Bu düşünceyle bakıldığında, aşınmanın katı cisimler için söz konusu olduğu düşünülebilir. Çünkü aşınmanın -yapılan tanımlara göre bir şekil kaybı ya da değişikliği olduğunu düşünürsek, "yalnızca belli bir şekli olan maddeler yani aslında cisimler için söz konusu olabilir" düşüncesine varılır.

1.1. Aşınmanın Çeşitleri

Oğuz (1993), aşınma tiplerini 4 ana grupta incelemiştir. Bunlar:

- Yapışkan Aşınma (Adeziv aşınma)
- Abrasif aşınma
- Koroziv aşınma
- Yüzey yorulma aşınması

1.1.1. Yapışkan (Adeziv) Aşınma



Şekil 1. Yapışkan aşınma

Farklı iki temas eden yüzeyde temas noktaları küçük olduğu için sıkıştırma kuvvetine bağlı olarak temas yüzeylerinde yüksek basınçlar oluşur. Bu yüksek basınçlar temas eden maddelerin akma basıncına kadar çıkabilir. Akma basıncında temas eden bölgeler birbirine yapışır veya kaynar. Yapışma sonrasında temas eden yüzeylerin birbirine bağlı hareketi olursa bu yapışan yüzeyler, yapıştıkları bölgelerden bir miktar parça kopartarak hareket ederler. Bu tür parça kaybı yapışkan aşınma veya adeziv aşınma olarak sınıflandırılır.

1.1.2. Abrasif Aşınma

İki farklı durumda oluşabilen aşınma durumudur. Bunlardan birincisi; iki farklı sertlikte pürüzlü iki yüzeyin basınç altında göreceli hareketi sonucu kendisinden daha sert olan yüzeyden malzeme koparması şeklinde gerçekleşen türüdür. İki bileşenli aşınma olarak isimlendirilir. İkincisi ise; iki yüzey arasında, görece daha sert parçacıkların girmesi sonucu, basınç altında göreceli hareketler, yani sürtünme sonucu sert parçacıkların bir veya iki yüzeyden parça koparması şeklinde oluşan aşınma türüdür (Varol, 2016).



Şekil 2. Abrasif aşınma

1.1.3. Koroziyel Aşınma

Yüzeylerin oksijen gibi koroziyel bileşenler ile temas etmesi yüzeyde bir korozyon tabakası oluşturur. Koroziyel tabakanın molekül bağları daha düşük olduğu durumda basınç ve sürtünme bu koroziyel tabakanın parçalanmasına ve alt kısmın tekrar korozyona uğrayıp tabaka oluşturmaya ve bu tabakanın tekrar koparak yüzeyde döngü halinde madde kaybı oluşmasına sebep verir (Varol, 2016).

1.1.4. Yorulma Aşınması

Dişli çark ve rulmanlı yatak gibi mekanizmaların temas alanları küçük olduğundan yüzeylerinde Hertz basınçları oluşmaktadır. Bu basınçların etkisiyle yüzeylerin altında kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin oluşturduğu deformasyonlar yüzeyde ilerleyerek yüzeyde çukurlara sebep olmaktadır (Kato & Adachi, 2000).

1.2. Aşınmanın Önemi

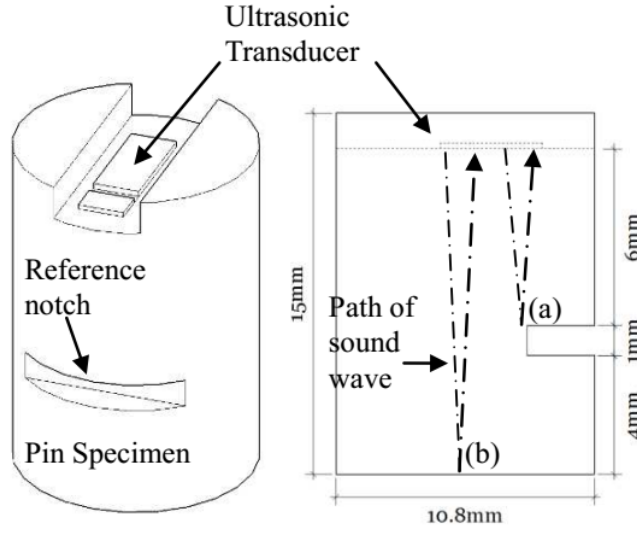
Aşınma olumsuz yönleriyle ele alınacak olursa, aletlerin, makinelerin, eşyaların kullanım ömürlerinde oldukça belirleyici bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanım ömürlerini uzatmak için aşınma miktarlarının azaltılması, aşınmayı önleyici önlemler alınması, aşınmanın fazla olduğu hareketli ya da sürtünmeye maruz kalan kısımlarda değiştirilebilir yatak veya aşınma plakaları kullanılması, bu sayede belli periyotlarda bu plaka veya yatakların değiştirilerek araç, makine veya cihazların kullanım ömürlerinin makul seviyelere getirilmesi gerekmektedir. Örneğin, içten yanmalı motorlarda eğer yağlama sistemi olmasa idi muhtemelen birkaç yüz kilometre içerisinde bozulacak bir aracın yağlama sistemi yüz binlerce kilometre yapabilmesine olanak sağlar.

1.3. Aşınma Ölçüm Yöntemleri

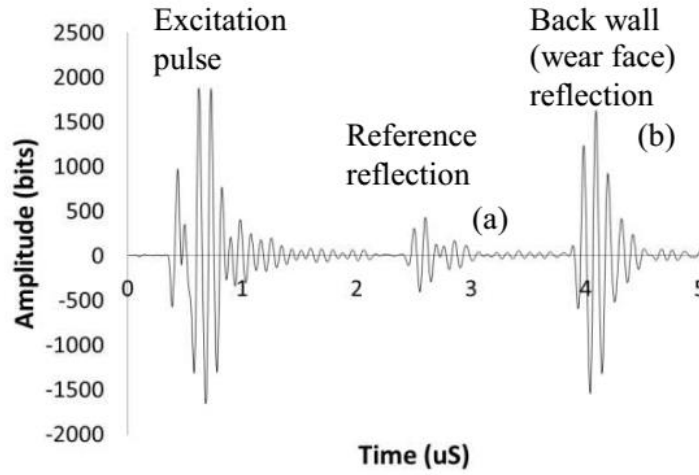
Saraç,A,E & Durak,E (2024) yaptıkları bir çalışmada madde numunelerinin farklı şartlarda aşınmasının test edilebilmesi için bir düzenek hazırlamışlardır. Bu düzenek laboratuvar şartlarında numune malzemelerin aşınma özelliklerinin incelenebilmesine olanak sağlar. Düzenek dönen ve üzerine aşındırılmak istenen numunelerin sabitlenebileceği bir disk ile bu disk üzerine yerleştirilmiş numuneye baskı uygulayabilen ve yükü ayarlanabilen, ucuna diğer bir sürtünme numunesinin yerleştirilebileceği bir koldan oluşmaktaydı. Bu tür aşınma ölçüm yöntemlerini aşınma test yöntemleri olarak ifade etmek daha uygun olabilir.

Laboratuvar ortamındaki aşınma testlerinden ziyade, endüstride aktif olarak kullanılan araçlardaki aşınmaların canlı olarak ölçülmesi veya algılanması bu çalışmanın odaklanacağı konudur. Örneğin bir aracın fren mekanizmasındaki aşınan fren balatalarının aşınma durumu veya bir yarış aracının lastik aşınmasının turlara göre durumu birçok durumda önemlidir.

Yapılan bir çalışmada aşınma verisinin ultrasonik olarak ölçülebileceği gösterilmiştir. Ultrasonik reflektometri tekniğine dayanan bu yöntem, malzeme kalınlığının ultrasonik dalgaların cismin bir yüzeyinden diğer yüzeyine ulaşp yüzeyden yansıyarak geri gelmesi süresini ölçerek hesaplanması yöntemi ile yapılmaktadır. Ultrasonik işaretin malzeme içerisindeki hızı bilindiği sürece, sinyalin uçuş süresi, yan, bir yüzeyden diğer yüzeye gidip geri gelme süresi ölçüldüğünde malzeme kalınlığı hesaplanabilir. Bazen, malzemenin ses işaretini veya ultrasonik işareti iletme hızı bilinmediğinde, malzeme içerisinde bir referans noktası olarak kullanılabilecek çentik, delik açılır. Bu referans noktasının mesafesi bilindiği için, ultrasonik işaret bu referans noktasının konumunu algılayacak şekilde yönlendirilerek kalibre edilir. Ultrasonik sinyal, yüzeye yapışan veya yüzeye tam bir temas sağlayan bir jel ile yüzeye temas ettirilen bir transdüser ile cismin içine gönderilir ve süre sayımı başlatılır. Yansıyan sinyal gönderici transdüserin hemen yanında bulunan bir alıcı transdüser ile alındığında süre durdurularak ne kadar süre geçtiği hesaplanabilir. Alıcı transdüser ve gönderici transdüser ayrı ayrı olabileceği gibi, alıcı ve gönderici aynı transdüser de olabilir. Malzemenin kalınlığı bu şekilde sıklıkla ölçülerek, kalınlıkta bir azalma olup olmadığı varsa ne kadar olduğu, dolayısıyla da aşınma miktarı ölçülmüş olur (Brunskil, Harper, & Lewis, 2015).

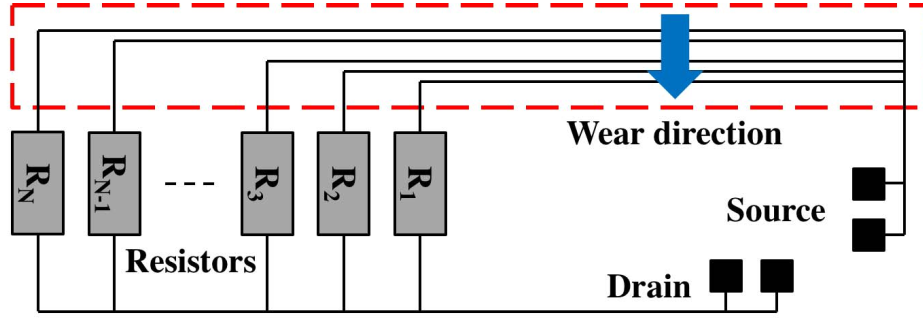


Şekil 3. Ultrasonik aşınma ölçüm tekniği (Brunskil, Harper, & Lewis, 2015)

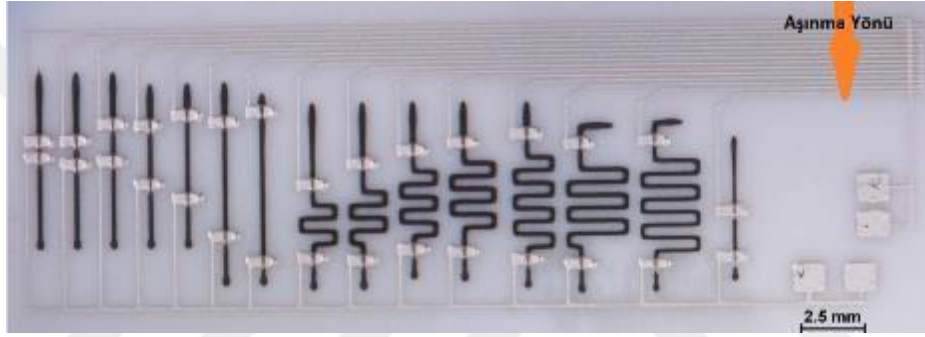


Şekil 4. Ultrasonik işaret ve yansıyan işaretler (Brunskil, Harper, & Lewis, 2015)

Başka bir çalışmada “Direct Write” tekniği kullanılarak aşınmanın canlı olarak algılanabilmesi için bir yöntem sunulmuştur. Bu çalışmada aşınma miktarı belli seviyelerde yerleştirilmiş rezistans elementleri ile kodlanmıştır. Aşınma ilerledikçe rezistans elementleri devre dışı kalır. Rezistanslar birbirlerine paralel bağlanmıştır. Rezistansların devre dışı kalması bileşke rezistansı değiştirir. Sabit akım kaynağı ile bileşke rezistans uçlarında bileşke rezistansa dolayısıyla aşınma değerine bağlı bir gerilim değeri üretilir. Rezistans elementleri katılaştığında belli bir iletkenlik olan özel bir mürekkep doğrudan bir nozul kullanılarak PCB (baskıdevre) üzerinde basılmışıdır (Dardona, Shen, & Tokgöz, 2018).

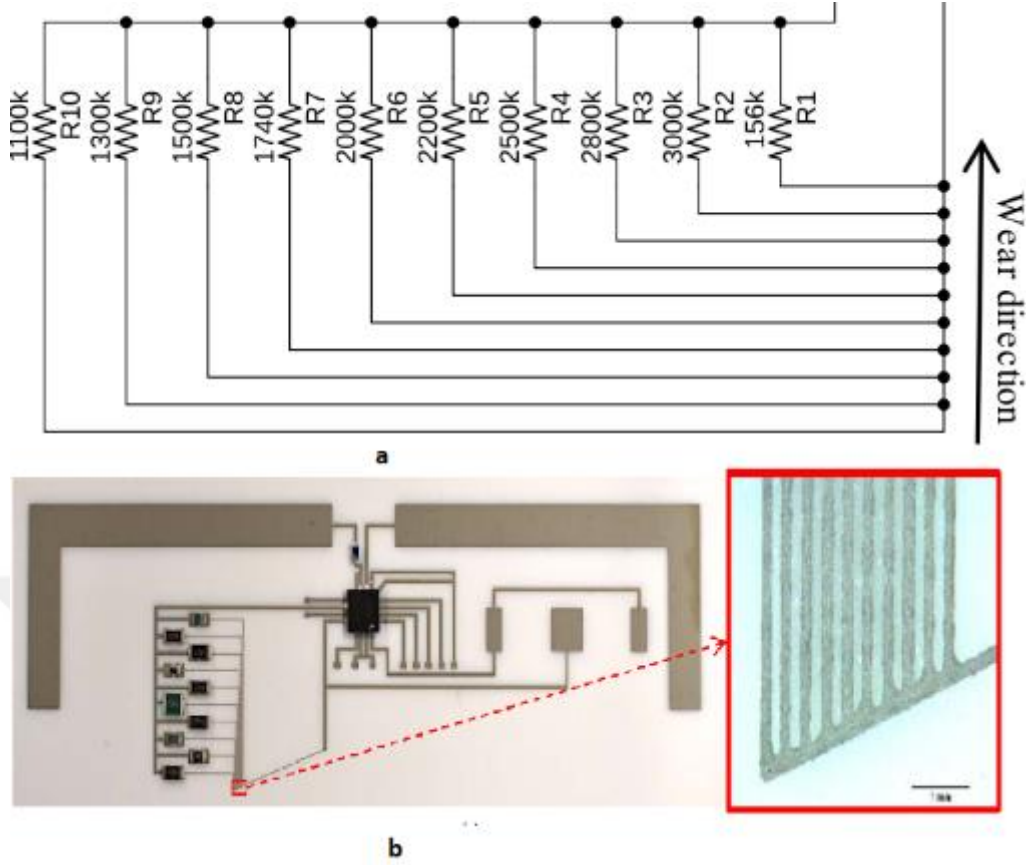


Şekil 5. Rezistif komponentler ile üretilmiş aşınma sensörü (Dardona, Shen, & Tokgöz, 2018)



Şekil 6. "Direct Write" tekniği ile üretilmiş rezistif elementler ve sensörün görseli (Dardona, Shen, & Tokgöz, 2018)

Başka bir çalışmada yine rezistif elementler kullanılarak kablosuz özelliği de olan aşınma algılaması gerçekleştirilmiştir. Aşınma, PCB üzerindeki iletim yollarının deve dışı bırakılması suretiyle algılanabilmektedir. Her bir iletim yolu smd rezistanslar ile seri bağlanarak bir akım kaynağına paralel olarak bağlanmıştır. Her bir iletim yoluna bağlı rezistans değeri, bileşke rezistans değerini değiştirir. Devre dışı kalan her bir iletim yolu, bileşke rezistans değerinin yükselmesini sağlar. Nihayetinde yükselen rezistans değeri akım kaynağı çıkış geriliminin yükselmesine ve dolayısıyla aşınma değerine bağlı bir gerilim değeri üretilmesini sağlar. Bu çalışmada SL900A entegre devresi ve akım kaynağı olarak bu SL900A'nın akım kaynağı çıkış pini kullanılmıştır. SL900A , aynı zamanda RFID (radyo frekans id) özelliği sayesinde bir RFID okuyucu ile aşınma değerini RF olarak iletebilmiştir. Cihazın pasif olarak çalışması pil ihtiyacını da ortadan kaldırmıştır. Çalışmada aşınma 50um hassasiyetle 10 kademedede okunabilmektedir (Serdah, Bailey, Schmidt, Bansal, & Dardona, 2021).



Şekil 7. (a) Aşınma sensörü teorik gösterim, (b) gerçekleştirilmiş sensör (Serdah, Bailey, Schmidt, Bansal, & Dardona, 2021)

Bir patent çalışmasında ultrasonik yöntemle lastik aşınması ölçümü nasıl yapılacağı açıklanmıştır. Bu patente göre lastik basınçlarının canlı olarak ölçülüp gösterilmesin benzer şekilde lastik içlerine yerleştirilen batarya ile beslenen ultrasonik yayıcı ve alıcı ile ultrasonik sinyalin lastiğin iç kısmından dış kısmına varış ve geri dönüş süresi ölçülmesi suretiyle lastik kalınlığı ve dolayısıyla aşınma durumu konusunda bilgi edinilebilir. Araç lastikleri kauçuktan üretilmiştir, ana madde kauçuktur, içerisinde metal veya tekstil teller de bulundurulur. Söz konusu patentte lastik için uygun frekansın 200-300 kHz aralığı olduğu belirtilmiştir. Ultrasonik alıcı ve vericinin yönü, lastik kalınlığının dolayısıyla oluşacak aşınmanın ölçülmek istenen noktasında doğru, lastik su kanallarına değil de lastik dışlarının dış kısmına doğru yönlendirilmesi aşınma miktarının doğru algılanması için önemlidir. Yine batarya destekli bir kontrol elektroniği ile gönderilen sinyalin gidiş dönüş süresi (time of flight) ölçülür (Patent No. EP 4 219 195 A1, 2022).

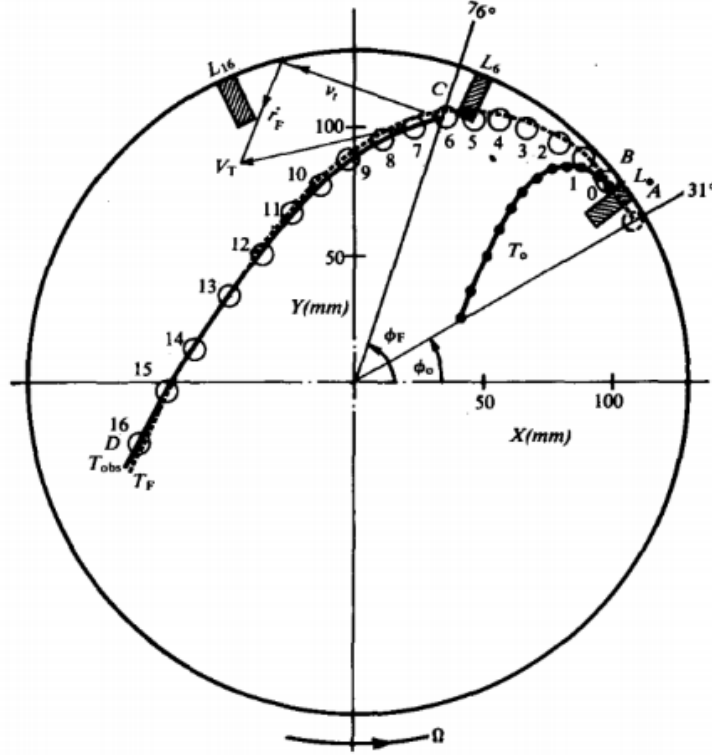
1.4. Bilyeli Maden Değirmenleri

Cevherlerin aşındırılarak ufak parçacıklar haline getirmek için maden tesislerinde maden değirmenleri kullanılır. Bu değirmenlerin içi değirmeni korumak için Şekil 8’de görülebileceği gibi kauçuk veya benzeri başka malzemeler ile kaplanır. Bu kaplamalar sayesinde madeni ezip parçalayan bilyeler değirmenin gövdesine zarar vermez. Ancak kaplama malzemesi zamanla aşınır.



Şekil 8. Bilyeli maden değirmeninin içi; bilyeler , kauçuk astar ve lifterbarlar

Aynı şekilde bilyeleri ve madeni değirmen dönerken yükseltip madenin üzerine dökülmesini sağlamak amacıyla firmaların “Lifterbar” ismini verdiği, genellikle kauçuk malzemeden yapılmış çıkıntılar bulunur. Şekil 8’ de bu çıkıntılar görülebilmektedir. Bilyelerin ortalama çapı yaklaşık 8cm, lifterbar’ların ortalama boyu da yaklaşık 150 cm’dir. Bir değirmende bir sırada yaklaşık olarak 4 adet lifterbar bulunur. Değirmen çevresi boyunca ise yaklaşık 16 sıra lifterbar bulunur.



Şekil 9. Maden değirmeni kesit gösterimi; bilye hareketi ve lifterbarlar (Vermeulen, 1985).

Lifterbarlar, madende bilyeler ile daha fazla sürtünme oluşturduğu için aylar içerisinde aşınıp kullanım ömürlerini tamamlar. Özellikle kauçuk lifterbarlar birkaç aylık kullanımdan sonra ömürlerini tamamlar. Ömürlerinin kısa olmasına karşın diğer lifterbarlara göre bazı avantajları vardır: Hafifliklerinden dolayı değirmen için ekstra yük oluşturmazlar. Montajda ve demontajda işçilik daha azdır. Sesi ve titreşimleri sönümleme özelliğinden dolayı daha az gürültü çalışırlar (FKK, 2024) .

2022 yılında bilyeli maden değirmenlerinde lifterbar aşınmasını ölçüp bir merkeze göndermek amacıyla yapılan çalışmada, aşınma bilgisi canlı olarak internet ortamına aktarılabilmiştir. Lifterbar aşınma verisi, içerisinde yerleştirilen sensörler ile değirmen dışına değirmen gövdesindeki montaj delikleri kullanılarak elektriksel iletken kablolar ile aktarılmış, değirmen dışından veri toplama merkezine ise kablosuz olarak aktarılmıştır (Altuncu, ve diğerleri, 2022). Sensörlerin kablolu olması lifterbar montajında ek işçilik oluşturmuştur. Bu ek işçilik firmalar tarafından istenmeyen bir durumdur. Bu noktada endüstrinin talebi herhangi bir ekstra işçilik gerektirmeyen, geleneksel montaj yöntemini etkilemeden sensörlü liftebarların montajlanabilmesidir. Bu çalışmada lifterbarların sensör

verilerini değirmen içerisinde ve dışında kablolama ihtiyacı oluşturmada kablosuz şekilde toplama merkezine ulaştırılması üzerinde durulmuştur.

Bilyeli değirmenler içerisinde Şekil 10’da ve Şekil 9’da görülebileceği gibi, bilyeler ve öğütülen maden, değirmenin bir kısmını doldurmaktadır. Değirmen dönüş hareketini gerçekleştirdiği göz önünde bulundurulduğunda Şekil 9’da anlaşılabileceği gibi lifterbarların maden ve bilyelerin altında kalmadığı zaman dilimi 76° ile 200° arası yaklaşık 120° ’lik bir açı durumudur. Sensörler, ancak değirmen tam tur dönüşünde bu açıda veri gönderip alabilmektedir. Değirmen gövdesini kalın ve metal olması, radyo sinyallerinin gövdeden geçmesini imkansız hale getirmektedir. İletken olan bilyeler ve madenin oluşturduğu yansımalar ve dolayısıyla “fading” etkisi, sinyallerin değirmen dışına aktarılması hususunda karşılaşılabilecek zorlayıcı durumlardır. Çalışma esnasında değirmen iç astarının bir miktar iletken olduğu da fark edilmiştir. Tam iletken olmayan bu katman sinyallerin soğrulmasına ve yok olmasına neden olmaktadır. Bu şartlarda uygun haberleşme yöntemini seçmek oldukça önemlidir.



Şekil 10: Kauçuk lifterbar değişimi yapılan bilyeli bir değirmen (Altuncu, ve diğerleri, 2022).

1.5. Kablosuz Sensör Haberleşmesi

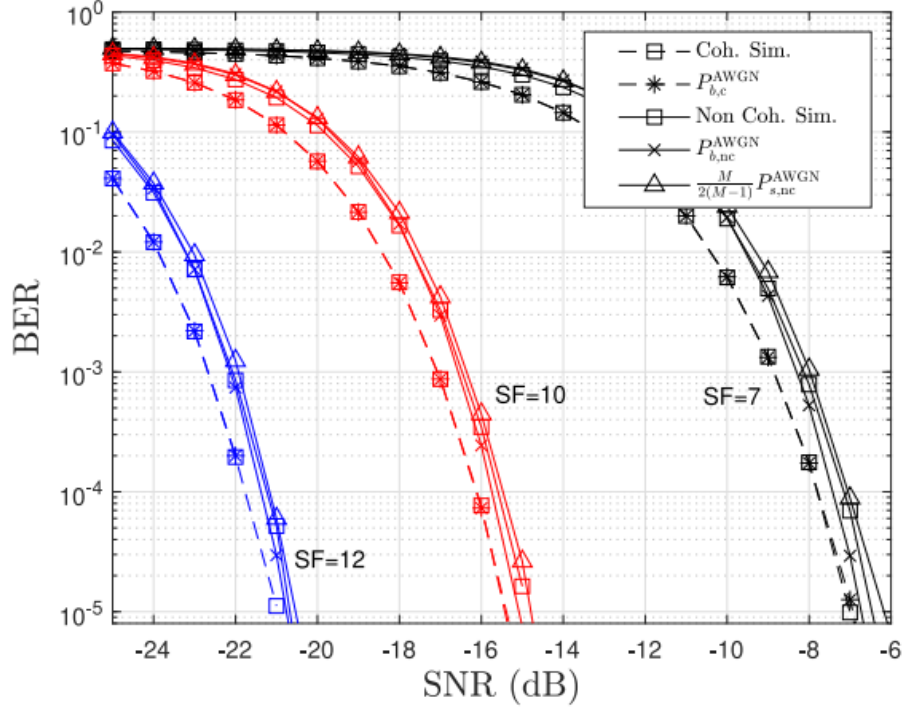
Kablosuz kısa mesafe için iletişim yöntemleri sıralanacak olursa bunlar ticari isimleri ile Wi-Fi , Bluetooth, ZigBee, Lora , UWB gibi yöntemler olur. Farklı yöntemlerin veya tekniklerin olması ihtiyaçların farklı oluşundandır. Bazı uygulamalar yüksek bant genişliği gerektirirken, bazı uygulamalar düşük enerji tüketimi gerektirir; bazıları yüksek güvenilirlik gerektirirken, bazıları da basitlik gerektirir. Bu farklı gereklilikler de farklı yöntemleri, farklı standartları ortaya çıkarmıştır. Örneğin bilgisayarlar arası kablosuz haberleşmede güvenlik ve hız ihtiyaç duyulan kriterler iken; bir lastik basınç sensörünün değerlerinin kablosuz olarak okunması uygulamasında en önemli kriter güç tüketiminin çok az olmasıdır.

Bilyeli değirmenlerin içerisi oldukça kaotik bir ortamdır. Değirmen gövdesi oldukça kalın çelikten üretilir, değirmen içerisindeki bilyeler da madeni ezip öğütecek şekilde sertleştirilmiş çelikten üretilmektedir. Bütün bu metal olan aksamalar sensörlerden sinyallerin değirmen dışındaki alıcıya ulaşmasını engellemektedir. Metal gövde ve bilyelerden yansıyan sinyaller birbirlerini sönmölemek ve “fading” etkisi ile alıcıda sinyalin zayıflamasına yol açmaktadır. Ayrıca değirmen döndüğünde yükselen ve düşen bilyeler ve cevher; sinyalin iletilme ortamını oldukça azaltmaktadır. Değirmen içerisindeki haberleşme yöntemi bu zor şartlara uygun haberleşme yöntemi olmalıdır. Alıcıların hassasiyeti yüksek, göndericilerin gücü yüksek olmalı ve yansılardan mümkün oldukça az etkilenmelidir.

1.5.1. Lora Haberleşmesi

Uzak mesafe, gürültü altında haberleşme ve yüksek alıcı hassasiyeti ihtiyacı gibi şartlar söz konusu olduğunda Lora haberleşmesi akla gelebilir. Lora uzak mesafe ile yüksek veri oranı arasında esneklik sunar. Mesafe uzak olduğunda eğer yüksek veri oranı ihtiyacı yoksa, haberleşmeyi olanaklı kılar. Ayrıca düşük veri yoğunluğu durumlarında enerji ihtiyacını minimuma indirme imkanı vererek batarya ile enerjilendirilen kablosuz sensörler yapılabilmesine olanak sağlar (Semtech Corporation, 2024).

Alıcı kısımda sinyal gücü azaldığında, yani vericiden uzaklaşıldığında veya ortamın sinyal zayıflatması arttığında alıcıda gürültüye göre sinyal oranı yani işaret gürültü oranı düşmektedir. Bu da bit hata oranını arttırmaktadır. Lora modülasyonunda bu gibi durumlarda yayılım faktörü (Spreading Factor, SF) yükseltilerek bit hata oranının azaltılması, dolayısıyla sinyalin daha düzgün alınmasını sağlamaktadır (Maleki, Nguyen, Bedeer, & Barton, 2024).



Şekil 11. Farklı SF değerine göre SNR BER grafiği
(Maleki, Nguyen, Bedeer, & Barton, 2024)

SF değerinin yükseltilmesi alıcı hassasiyetini arttırmakta ancak aynı zamanda da paket gönderme süresini uzatmaktadır. R_b ; bit hızı ifadesi, B_w ; bant genişliği ve SF değerine bağlı olarak aşağıdaki gibi verilmiştir (Semtech Corporation, 2015).

$$R_b = SF * \frac{1}{\left\lceil \frac{2^{SF}}{B_w} \right\rceil} \quad (1)$$

Bu denklemden de anlaşılabileceği gibi bit hızı R_b ;, “spreading factor (SF)” değerine bağlı olarak SF değeri arttıkça bit hızı azalmaktadır. Bit hızının azalması, paket gönderim süresini arttırdığından batarya kullanımını arttırmakta bu durum da batarya tüketimini arttırmaktadır. SF değerinin batarya kullanımı için optimumda tutulması gerekebilir.

1.5.2. E28-2G4M27S Lora Modülü

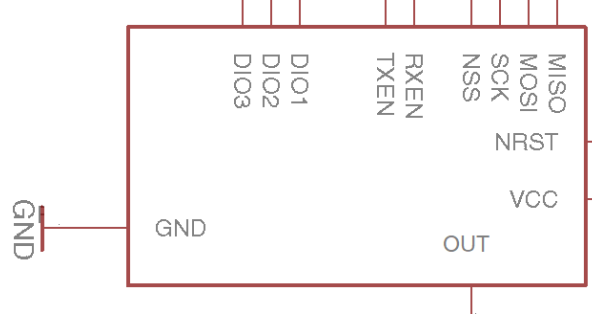
Kısa ismiyle E28 Modülü, uzun ismiyle E28-2G4M7SX bir lora modemi ve güç amplifikatörü içeren bir modüldür. Modülasyon ve de-modülasyon işlemlerini kendi iç donanımı ile gerçekleştirir. İçerisinde SX1280 lora modemi ve 27 dBm güç çıkışı sağlayabilen güç amplifikatörü vardır. Dahili anten M27S modelinde bulunur M27SX modelinde bulunmaz. IPX soketi bulunur. Bu nedenle uygun bir anten bağlayıp kullanmak gerekir. 27 dBm çıkış gücü verir. Watt olarak karşılığı 500 mW'tır. Mikroişlemci haberleşme arayüzü UART (universal asynchronous receiver and transmitter) veya SPI (Serial Peripheral Interface) olabilir. UART ve SPI arayüzü aynı pinler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bir açılışta bir seçim yapılması gerekir. Modül enerjilendikten sonra, açılış işlemleri ardından her iki arayüzden de veri paketi bekler. İlk geçerli veri hangi arayüze uygun gelir ise o arayüzü aktif edip diğer arayüzü iptal eder (Ebyte, 2024).



Şekil 12. E28 modülü

SX1280 Lora modemi Lora modülasyon ve demodülasyon işlemlerini otomatik olarak gerçekleştirir. Açılış işlemleri ardından modemin alıcı veya verici olarak ayarlanması gerekir. Aynı anda gönderici ve alıcı olarak çalışmaz. Modemin sinyal girişinde “düşük gürültülü amplifikatör” bulunur. Amplifikatör bir kontrol pini ile aktif edilip kapatılır.

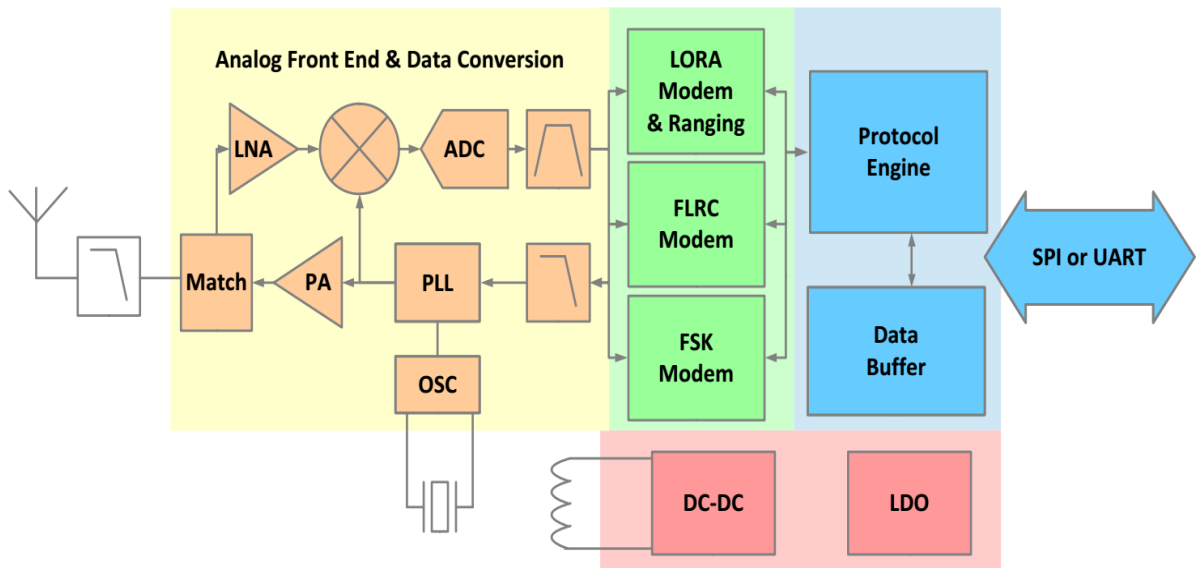
Aynı şekilde çıkış güç amplifikatörü SX1280 modemi dışında modül üzerinde bulunur yine bir pin sayesinde aç kapa yapılır. Modül alıcı olarak konfigüre edildiğinde veri alabilmesi için LNA (düşük gürültü amplifikatörü) manuel olarak pin ile aktif hale getirilmelidir. Aynı şekilde gönderici olarak konfigüre edildiğinde PA (güç amplifikatörü), kontrol pinine sinyal verilerek aktif hale getirilmelidir. Aksi takdirde çıkış gücü vermez veya çok düşük kalır. SX1280 modemi kendi halinde 12 dBm çıkış verebilmektedir. Modül üzerindeki PA sayesinde çıkış gücü 27 dBm e çıkabilmektedir. SX1280 üzerimden yazılım ile çıkış gücü ayarlanabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken modül üzerindeki PA'nın efektif çalışabilmesi ve maksimum gücü verebilmesi için SX1280 çıkış gücünün 12 dBm değil, 0 dBm olarak ayarlanması tavsiye edilmektedir (Ebyte, 2024).



Şekil 13. E28 Lora modülü ayak bağlantıları

E28 modülü bağlantı şekli Şekil 13'te gösterilmiştir. TXEN ve RXEN olarak ifade edilen pinler PA ve LNA aktif eden pinlerdir. MISO, MOSI, SCK NSS ile ifade edilen pinler SPI haberleşmesi için kullanan pinlerdir. DIO1, 2 ve 3 genel amaçlı giriş çıkış için kullanılabilir pinlerdir. OUT pini çıkış pinidir, normal durumda düşük seviyedir. Modem kendi iç işlemi ile meşgul olduğu ve komutları işlemeyecek olduğu anlarda bu pin ile yüksek seviye çıkış verir.

Modem konfigürasyonları, SPI veya UART arayüzünden gerekli komutlar ve veriler gönderilerek yapılır. Aynı şekilde veri gönderme komutu ve gönderilecek veriler SPI veya UART arayüzünden; açılışta hangisi aktif ise yapılır. Veriler ve ayarlar modem içerisindeki belli adreslerde bulunan yazmaçlarda tutulur. Aynı şekilde gönderilecek veriler ve alınan veriler modem içerisinde bulunan fifo yazmaçlarında tutulur. Bu yazmaçlar SPI veya UART arayüzünden erişilebilir durumdadırlar.



Şekil 14. SX1280 Lora modem blok diyagramı (Semtech Corporation, 2023)

1.6. Kauçuk ve Karbon Siyahı

Kauçuk malzemeler insanın günlük hayatına fazlaca kullanılmaktadır. Otomobillerde ev eşyalarında kıyafetlerde kauçuklardan yapılmış parçalar bulunur. Otomobillerde motor takozları lastikler, titreşim emen birçok parçanın temelini kauçuk oluşturur. Elastikiyeti ve titreşim emme özelliği, dayanıklılığı, bu maddeyi birçok açıdan günlük hayatımızın içerisinde yerleştirir.

Kauçuk doğal olarak ve sentetik olarak elde edilebilir. İlk doğal kauçuk Amerika’da bir ağacın öz suyundan elde edildiği söylenir. Kristof Kolomb, Amerika kıtasına yaptığı ikinci seyahat sırasında Haiti adasındaki yerlilerin ağaçtan elde ettikleri reçinelerden top ve çeşitli giysiler yaptıklarını, bu maddenin de “*havea brasiliensis*” ağacına açılan yarıklardan aktığını görmüştür. Teknik anlamda kauçuk ilk defa 1751 yılında kullanılmıştır. İlk kauçuk fabrikası ise Paris’te 1803 yılında kurulmuştur. Charles Goodyear 1839 ilk kauçuk fabrikasını kurarak aynı zamanda vulkanizasyon tekniğini keşfetmiştir. Vulkanizasyon tekniği kauçuk malzemelerin dayanıklı hale getirilmesi için uygulanan bir tekniktir. John Boyd Dunlop ise 1888 yılında ilk havalı lastiği kauçuktan üretmiştir (MEB, 2011).

İlk Sentetik kauçuk 1909 yılında Almanya’da Bayer firmasında H. Holman tarafından petrolden elde ettikleri bütadienin polimerleştirilmesi ile üretilmiştir. Üretim yöntemine göre farklı kauçuk çeşitleri sentezlenmiştir. Bunlar; poli isopren kauçuk (IR), stiren bütadien kauçuk (SBR), polibütadien kauçuk (BR), kloropren kauçuk (CR), bütül kauçuk (IIR), etilen-propilen kauçuk (EPM- EPDM) şeklinde isimlendirilir. Kullanım alanları ve özellikleri farklılık gösterir (MEB, 2011).

Çalışmanın temel alındığı cevher değirmenleri için üretilen lifterbarlar da bazı kauçuk türlerinden karbon siyahı isimlendirilen katkı maddesi katılarak üretilmektedir. Karbon siyahının amacı kauçuğun mekanik dayanımını arttırmak ve aşınmasını azaltmaktır. Uygulamada karbon siyahı katkısı EPDM, NBR ve SBR kauçuklarına eklenebilmektedir. Eklenen karbon siyahının oranı istenen özelliğe göre değişmektedir ve her ürün için belli optimum oranlar vardır (Erkek, 2007). Lifterbar üretiminde kimyasal oranları firmalar tarafından paylaşılmamasına rağmen belli ölçümler ile karbon siyahının oluşturduğu elektriksel özellikler tespit edilebilir.

Bu çalışmada en önemli özellik elektriksel iletkenliktir. Elektriksel iletkenlik; kauçuk içerisinde yerleştirilecek sensörlerin, dışarıyla haberleşmesinde, haberleşme sinyalinin çok büyük ölçüde zayıflamasına neden olmaktadır.

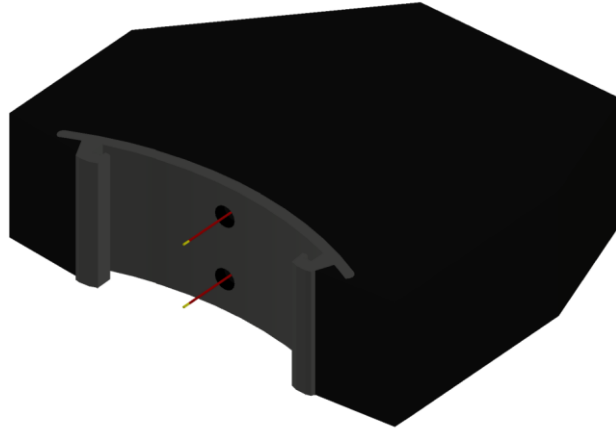
1.7. Rezistif Aşınma Sensörleri

Aşınma miktarının elektriksel iletkenlik ya da direnç değişimi ile kodlanması tekniği birkaç uygulamada aşınma durumunun ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır. Genel olarak aşınma yönüne göre aşınma miktarı ile devre dışı kalan iletim hatlarına bağlı rezistans komponentlerinin bileşke rezistansı değiştirmesi ve bu değişimin akım gerilim gibi fiziksel etkilerin ölçülerek algılanması esasına dayanılır (Dardona, Shen, & Tokgöz, 2018) (Serdah, Bailey, Schmidt, Bansal, & Dardona, 2021).

Bu çalışmada, karbon siyahı dolgusu sayesinde elektriksel iletkenlik özelliği oluşmuş kauçuk lifterbarların aşınma ile elektrik alan oluşan yüzeyin azalması sonucu akımın azalması sayesinde aşınma miktarı algılanmaktadır.

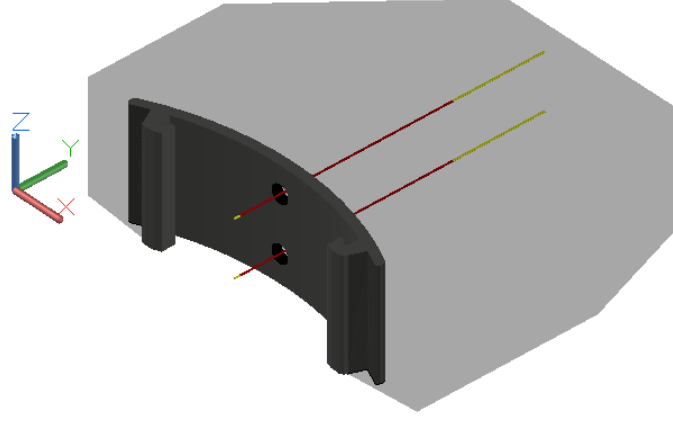
1.7.1. Çalışmada Kullanılan İletken Kauçuk ile Üretilen Aşınma Sensörü

Piyasada kullanılan kauçuk lifterbarlardan bir tane seçilerek yaklaşık 8 cm'lik bir dilim kesilmiş ve sensörler bu kesilen dilim içerisine yerleştirilen proplar ile oluşturulmuştur. Test işlemi bu oluşturulan numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan lifterbarın tasarımı Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Tasarlanan rezistif sensör

Dilimlenmiş lifterbar parçasının arkasındaki metal kısımdan 1 cm çapında 2 adet alan açılarak 2 adet iletken prop sıkı sıkıya 3 cm aralıkla lifterbarın en uç kısmına ulaşacak kadar metal borular ile alan açılarak yerleştirilmiştir. İletkenler çok telli olup 1.5 milimetre kare kesitinde seçilmiştir.



Şekil 16. Propların yerleşim şekli

Yerleştirilen propların görüntüsü Şekil 16’da verilmiştir. Propların ucu lifterbar yüzeyinden itibaren 50 mm kadar izolasyonsuz geri kalan kısmı, propların terminal uçlarına kadar izolasyonludur. Proplar 1.5 mm^2 ’lik çok telli bakır kablolardan yapılmıştır. Elektriksel işaret veya frekans bu yerleştirilen propların terminal uçlarına verilmektedir; oluşan elektrik alan sayesinde elektrik akımı kauçuğun içerinden geçmektedir.

1.8. Osilatörler

Elektronikte osilatörler “belli frekanslarda kare, sinüs, üçgen veya testere gibi sinyal üretmeye yarayan, geri beslemeli amplifikatör (yükseltici) devreleridir. Diğer bir deyişle kendi kendine sinyal üretebilen elektronik bir elemandır” (M.E.B., 2012). Bu ifadeden de anlaşılacağı gibi osilatör devresinin temelini yükselticiler oluşturmaktadır.

Osilatörler elektronikte özellikle haberleşme alanında oldukça önemli yer teşkil ederler. Örneğin haberleşme taşıyıcı frekansı bir osilatör devresi ile üretilir.

Çalışmada aşınma ölçümü bir frekansla kodlanmaktadır. Bunun nedeni aşınma değeri frekans ile kodlandığında dış ve iç gürültülerden daha az etkilenmesidir. Ayrıca besleme gerilim değişimi sıcaklık değişimi gibi etkilerden de daha az etkileneceği düşünülmektedir. Frekans işareti bir osilatör devresi ile aşınmaya bağlı dirence göre üretilmektedir. Bu amaçla uygun osilatör devresini seçmek gerekir.

Osilatörler birkaç şekilde gruplandırılır. Örneğin yapısına göre veya işaret cinsine göre ve hatta frekans aralığına göre farklı isimlerde osilatör devreleri bulunur. İşaret cinsine göre

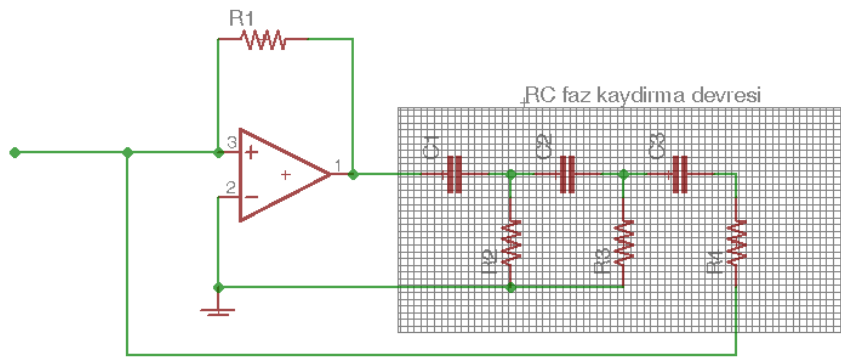
osilatörler sinüzoidal osilatörler ve sinüzoidal olmayan osilatörler olarak iki ana gruba ayrılabilir. Sinüzoidal denmensin sebebi çıkış işareti bir sinüs işareti olmasıdır.

Sinüzoidal olmayan osilatörler; kare, üçgen, testere dişi osilatörler gibi osilatörlerdir. Bu tür osilatörler yapısal olarak gevşeme osilatörü (relaxation oscillator) olarak isimlendirilir (Atwal, 2024).

Sinüzoidal osilatörleri 3 ana grupta toplayabiliriz. Bunlar; RC osilatörler, LC osilatörleri ve kristal osilatörlerdir. RC osilatörler, faz kaydırmalı osilatörler ve Wien köprüsü osilatörü olarak iki türdür.

1.8.1. RC Osilatörler

RC osilatörlerin bir türü faz kaydırmalı osilatördür. Yapısal olarak bir yükselteç ve ardışıl RC devrelerinden oluşur. Bir yükseltecin çıkışından girişine pozitif bir geribesleme ile giriş çıkış faz farkının 180 dereceye ulaşması ile devre osilasyona girer. Çıkışta bulunan ardışıl RC devreleri çıkış sinyalinin fazını 180 derece çevirerek yükselteç girişine geribesleme olarak verir. Yükselticinin de kendisi giriş çıkışı arasında 180 derece faz farkı oluşturduğu için toplam çevrimde faz kayması 360 derece yani aslında 0'dır. RC devresinin faz kaydırması frekansa bağlı olduğu için osilasyon frekansı toplam çevrimin faz farkının 0 olduğu frekansta olacaktır. Dolayısıyla frekans belirleyicisi RC ardışıl faz kaydırma geribesleme devresidir.

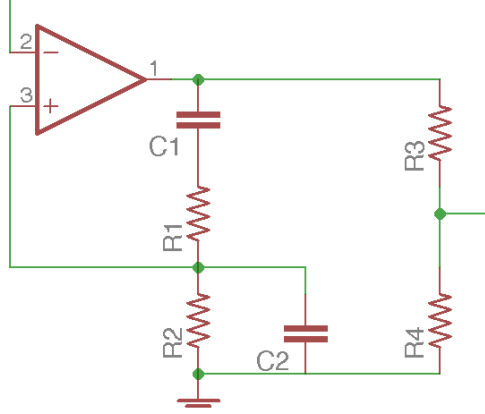


Şekil 17. Faz kaydırmalı osilatör

Şekil 17’de verilen devrede RC faz kaydırma devresinin her bir RC katının faz kayması 90 derecenin altında olacağından 3 katlı bir RC devresi kullanılması gerekmiştir. Devrenin osilasyon frekansı aşağıdaki formülle verilmiştir (Schubert & Kim, 2016):

$$\omega = \frac{1}{RC\sqrt{6}} \quad (2)$$

Wien-köprü osilatörü bir diğer RC sinüzoidal osilatördür. Devre şeması Şekil 18 'de gösterilmiştir.



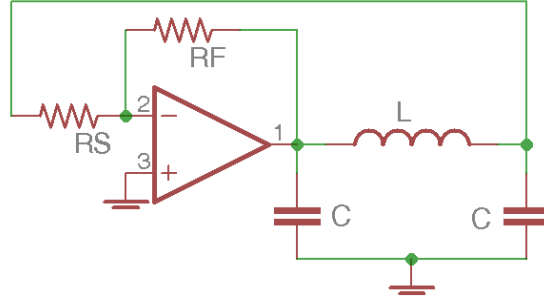
Şekil 18. Wien köprüsü osilatörü

Wien köprü osilatörü; geribesleme devresi olarak dengeli bir köprü devresine sahip osilatör devresidir. Yükselteç olarak bir işlemsel yükselteç kullanılır. Çalışma frekansı kazancın 0 dBm olduğu birim kazanç frekansının altında olmalıdır. Çalışma frekansı “w” aşağıdaki formülle verilir (Schubert & Kim, 2016):

$$\omega = \frac{1}{RC} \quad (3)$$

1.8.2. LC Osilatörler

Colpitts osilatörü bir diğer sinüzoidal osilatördür. Yükselteç olarak işlemsel yükselteç, BJT , FET gibi elemanlar kullanılabilir . İşlemsel yükselteçli genel devresi aşağıdaki çizimde verilmiştir. Geribesleme devresi olarak LC devresi kullanılır.



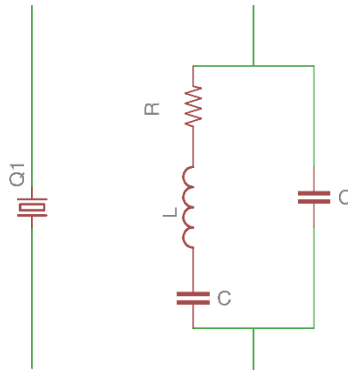
Şekil 19. Opamp (işlemsel yükselteç) ile yapılmış Colpitts osilatörü

Şekil 19’da verilen Colpitts osilatörü çalışma frekansı “ ω ” aşağıdaki eşitlikle verilmiştir (Schubert & Kim, 2016):

$$\omega = \sqrt{\frac{2}{LC}} \quad (4)$$

Colpitts osilatörünün geribesleme devresinde endüktans yerine kapasitör, kapasitör yerine ise endüktanslar konulabilir. Bu durumda yapılan osilatör bir Hartley osilatörü olur.

Osilatörlerin çalışma frekansları RC, LC devrelerinin ve yükselteç devrelerinin sıcaklıkla olan ilişkilerine göre değişir. Bu nedenle frekanslar sıcaklığa bağlı hale gelir. Daha kararlı frekans değerleri için kristal osilatörleri kullanılır. Kristal olarak bilinen komponent bir RLC devresi gibi davranır ve kendi halinde sönümlü bir osilasyon üretir. Osilasyon bir kazanç devresi ile beslendiğinde -ki bunun için yine geribesleme devresine ihtiyaç duyulur, osilasyon devam eder ve frekans üretilmiş olur. Bu durumda osilasyon frekansını kristal tayin eder (Schubert & Kim, 2016).

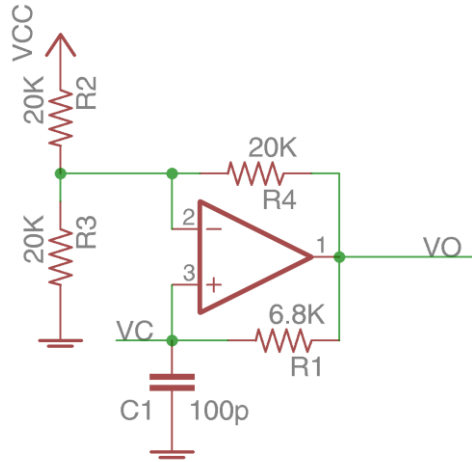


Şekil 20. Kristal ve eşdeğer devresi

Colpitts osilatöründe endüktans elemanı doğrudan bir kristal elemanı ile, kapasitans değerleri de kristale uygun değerler ile değiştirilip bir kristal osilatörü elde edilebilir. Frekans stabilitesi daha iyi olur. Aynı zamanda kristallerin frekans toleransı da daha düşük olduğu için istenilen frekans değerine daha yakın değerler elde edilir.

1.8.3. Sinüzoidal Olmayan Osilatörler

Sinüzoidal işaret üretmeyen gevşeme osilatörlerinin yapısı, sinüzoidal osilatörlere benzer olmakla beraber çalışma prensibi daha kolay anlaşılır bulunmuştur. Genel olarak bir Schmitt tetikleyici devresi bir kapasitörü şarj/deşarj edecek şekilde kurgulanır. Geribesleme, kapasitans değerinin dolup boşalacağı gerilim eşiklerine göre kapasitans gerilimi üzerinden alınır. Bu sayede kapasitans bir direnç üzerinden şarj olurken belli bir gerilim seviyesine geldiğinde Schmitt tetikleyici konum değiştirir. Aynı şekilde boşalırken belli gerilim seviyesine kadar boşaldığında yine Schmitt tetikleyici konum değiştirerek doldurma konumuna geçer. Bu osilatörler genel olarak gevşeme osilatörü olarak isimlendirilmektedir. Gevşeme osilatörleri genellikle kare dalga, testere, üçgen dalga gibi dalga şekillerini üretecek şekilde karşımıza çıkar.

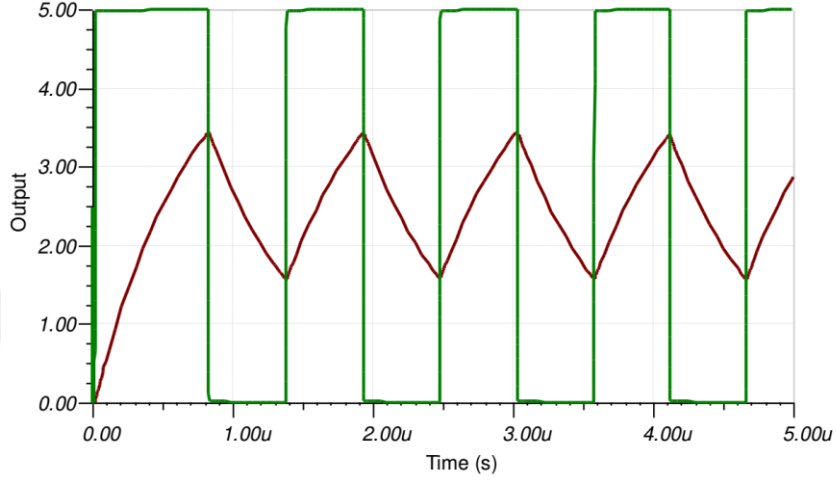


Şekil 21. Bir gevşeme kare dalga osilatörü

Şekil 21’de verilen bir kare dalga gevşeme osilatörüdür. Kapasitörün dolma ve boşalma süresi birbirine eşittir ve şu şekilde hesaplanır (Atwal, 2024):

$$t = 0.69R_1C_1 \quad (5)$$

$R_1 = 6.8 k$ ve $C_1 = 100$ pF değerlerine göre dolma süresi 500 ns, boşalma süresi de 500 ns olarak hesaplanır. Bu durumda toplam periyot 1 us olmaktadır, osilasyon frekansı ise 1 MHz olmaktadır. Çıkış dalga şekli aşağıdaki gibidir (Atwal, 2024).



Şekil 22. Bir gevşeme osilatörünü çıkış sinyali şekli (Atwal, 2024)

Bu çalışmada, bu tür gevşeme osilatörü kullanılması uygun bulunmuştur çünkü hesabı kolay ve yapısı diğerlerine göre daha basit görünmüştür.

1.9. STM32L051 Mikro Denetleyici

Ultra düşük güçlü STM32L051 denetleyicisi, 32 bit ARM M0 işlemcili bir denetleyicidir. Çalışma frekansı 32 Mhz'e kadar çıkabilir. Ultra düşük güç özelliği sayesinde hem çalışma akımının hem uyku modları akımının düşük olması ve hatta "Stop" modu özelliği sayesinde birçok düşük enerji şartı olan uygulamada tercih edilmesini sağlar. Örnek olarak endüstriyel sensör uygulamaları, sağlık ve spor uygulamaları, uzaktan kontrol gerektiren uygulamalar, gaz ölçümleri, konumlandırma uygulamaları ve kablosuz algılayıcılar ve pil ile çalışan cihazlar için uygundur. Normal çalışma modunda çalışma frekansına bağlı olarak Mhz başına 140 uA akım çekmektedir. Diğer düşük güç özellikleri şu şekildedir (STMicroelectronics, 2019):

Tablo 1. Stm32L051 düşük güç modları ve akım değerleri

Mod	Akım	Açıklama
Uyku Modu	37uA/Mhz	
StandBy Modu	0.27uA	2 uyandırma pini aktif
Stop Modu	0.8uA	RTC ve 8KB RAM aktif
Run Modu	140uA/Mhz	

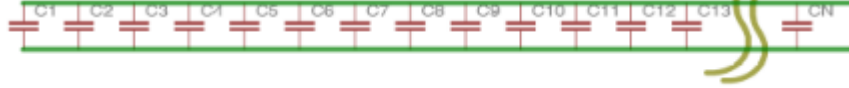
Tabloda verilen değerler giriş çıkış pinleri, ADC'ler (analog dijital çevirici), zamanlayıcı devreleri gibi dahili ve harici akım çeken kısımlar hariç tutularak veya kapalı varsayılarak, RTC (Real Time Clock) ve RAM (Random Acces Memory) açık varsayılarak belirtilmiş değerlerdir.

Düşük güç özellikleri yansira, zamanlayıcılar, ADC'ler, karşılaştırıcılar, CRC (cyclic redundancy check) modülleri gibi kullanışlı modüller içerir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kapasitif Aşınma Sensörü Testi

Aşınma algılaması için ilk aşamada bir kapasitif sensör yapılmıştır ve laboratuvar şartlarında test edilmiştir. Ayırık kapasitörler paralel bir dizi halinde bir PCB çubuk üzerine yerleştirilerek bir sensör probu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kapasitör dizisi her bir kapasitans değerinin toplamı olan bir eşdeğer kapasitans değeri oluşturur. Aşınma çubuk boyunca gerçekleştiğinde devre dışı kalan kapasitörler toplam kapasitans değerini azaltacak yönde kapasitans değerini değiştirir.



Şekil 23. Ayırık kapasitörlerden oluşturulan kapasitif prop gösterimi

Eşdeğer kapasitans C_t değeri dizi boyunca yerleştirilen kapasitörleri kapasitans değerlerinin toplamıdır:

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (6)$$

Her kapasitörün paket boyutu 0805 (20 mm x 12 mm) olduğu için hassasiyet 1.2 mm ile sınırlıdır. Her bir kapasitörün boyutu ve kapasitans değeri bilinildiğine göre toplam kapasitans değeri bir RLC metre ile ölçülerek Denklem (7)'deki gibi sensör boyunun hesabı yapılabilir. Her bir kapasitörün kapasitansı 47 nf olarak seçilmiştir. Bu durumda “D” sensör boyu hesabı aşağıdaki gibi olur:

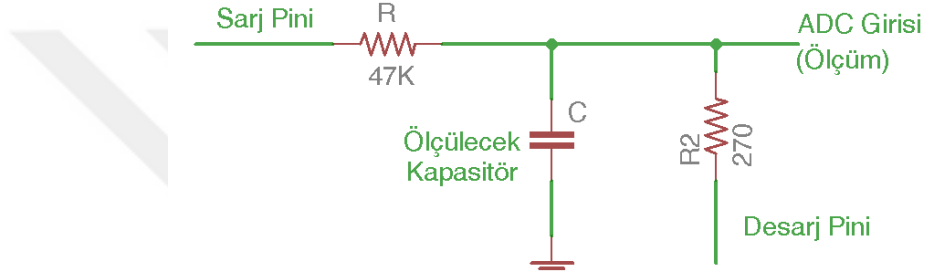
$$D = 1.2 \text{ mm} \frac{C_t}{47 \text{ nF}} \quad (7)$$

C_t toplam kapasitans değeri bir RLC metre ile, ölçülebileceği gibi bir osilatörün sarjdeşarj kapasitörü olarak bağlanarak bir frekans değerine dönüştürülebilir. Bu testte bir RC

devresi kurularak “T” zaman sabiti Arduino kartı ile ölçülmektedir. “Ct” kapasitans değeri “T” zaman sabiti ve “R” direnç değerine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

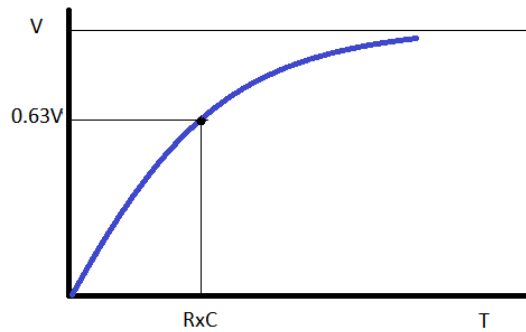
$$Ct = \frac{T}{R} \quad (8)$$

“T” periyodu RC devresi üzerinde kapasitör geriliminin 0’dan başlayıp besleme gerilimine göre 0.693 ile çarpımı değerine geldiği ana kadar geçen sürenin ölçümü ile elde edilmektedir. Söz konusu ölçüm için uyarlanan RC devresi aşağıdaki gibidir:

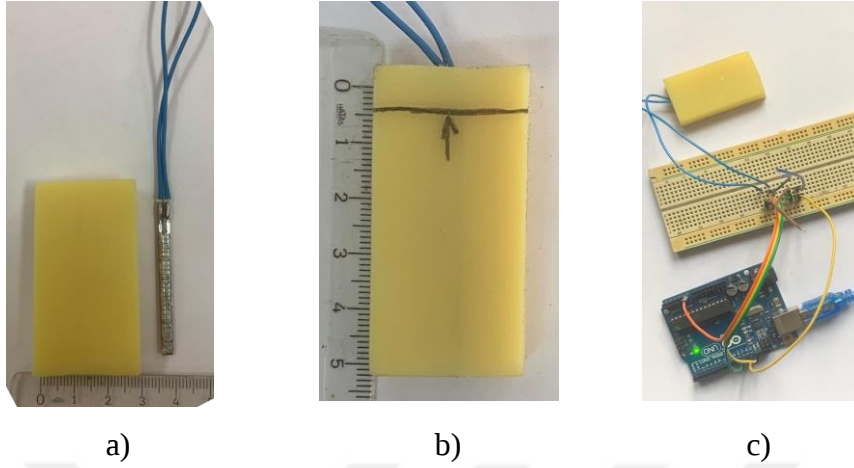


Şekil 24. Kapasitör ölçümü için kullanılan RC devresi

Şekil 24’te gösterilen devrededeşarj pininden kapasitör 0 V’a kadardeşarj edildikten sonradeşarj pini yüksek empedans moduna geçipşarj pininden 5 V uygulanmakta ve süre başlatılmakta, gerilim ADC girişinden takip edilerek, gerilim besleme geriliminin yani 5 V’un 0.693 katına geldiğinde ise süre durdurulmaktadır. Bu şekilde elde edilen “T” süresinden Denklem (8) kullanılarak Ct değeri hesaplanmaktadır.

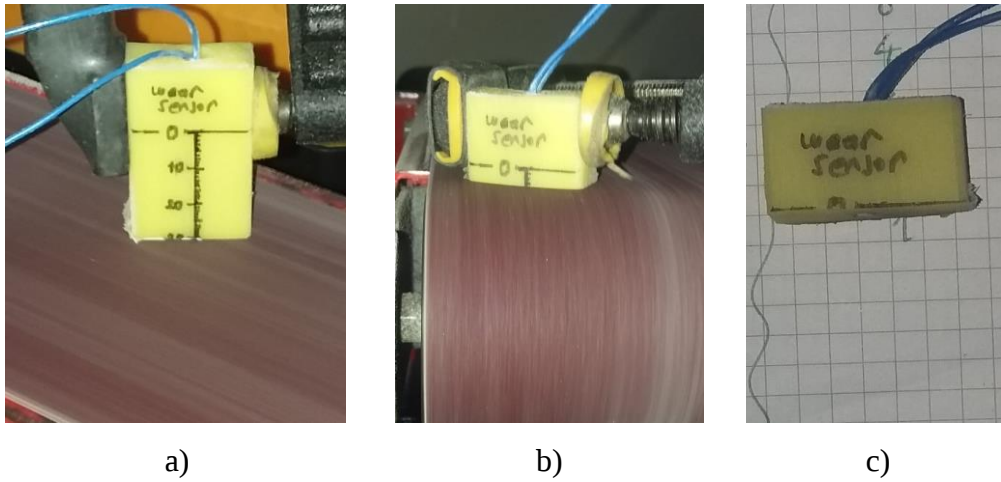


Şekil 25. T süresinin hesaplanması için kullanılan eğri



Şekil 26. (a) Üretilen kapasitif aşınma probu yapısı, (b) Probun yerleştirildiği poliamid cisim ölçüsü, (c) Kapasitans okuma devresi ve Arduino

Şekil 26 (b)'de gösterildiği gibi kapasitif prob bir kestamit aşındırma aparatı içerisine delik açılarak yerleştirilmiştir. Şekil 26 (c)'de gösterildiği gibi Arduino kartı ve ölçüm devresi hazırlanmıştır. Cisim aşındıkça kapasitörler de sırayla aşınacak ve bileşke kapasitörün değeri değişecektir. Sistem yalnızca her bir kapasitör tamamen aşındığında değer verir. Bir kapasitör aşınmaya başladığında içerisindeki şerit plakalar kısa devre olacağı için aşınmaya başlayan kapasitörü tamamen aşınıp devre dışı kalıncaya kadar sistem bir kapasite değeri vermemektedir.

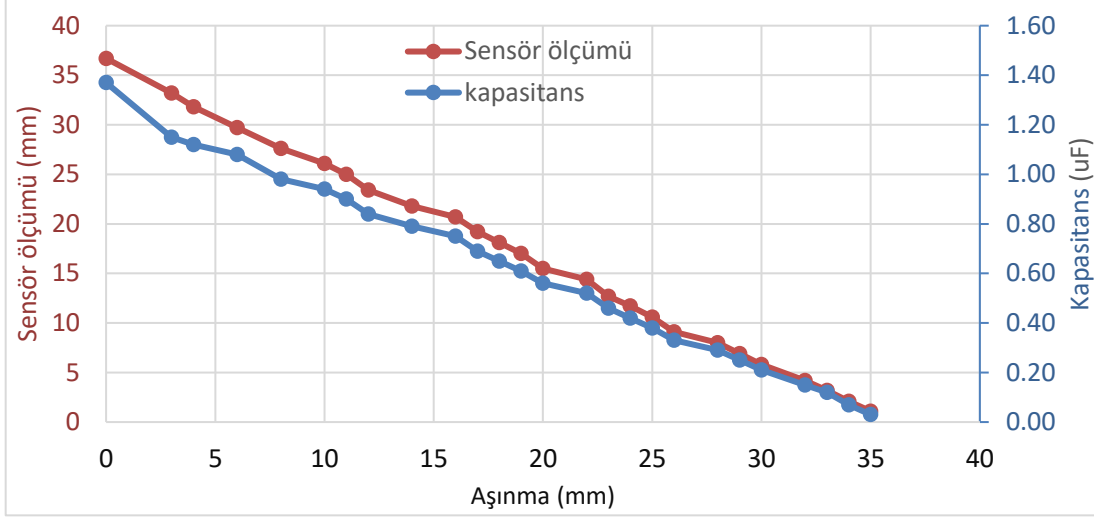


Şekil 27. Sensörün aşındırılma süreci

Tablo 2. Elde edilen değerler

Gerçek Boy (mm)	Ölçülen Kapasite(uF)	Ölçülen Boy (mm)	Aşınma (mm)
36	1.37	36.7	0
33	1.15	33.2	3
32	1.12	31.8	4
30	1.08	29.7	6
28	0.98	27.6	8
26	0.94	26.1	10
25	0.90	25	11
24	0.84	23.4	12
22	0.79	21.8	14
20	0.75	20.7	16
19	0.69	19.2	17
18	0.65	18.1	18
17	0.61	17	19
16	0.56	15.5	20
14	0.52	14.4	22
13	0.46	12.7	23
12	0.42	11.7	24
11	0.38	10.6	25
10	0.33	9.1	26
8	0.29	8	28
7	0.25	6.9	29
6	0.21	5.8	30
4	0.15	4.2	32
3	0.12	3.2	33
2	0.07	2.1	34
1	0.03	1.1	35

Test sonucunda elde edilen değerler Tablo 2’de gösterilmiştir. Alınan değerlerin grafiği Şekil 28’de gösterilmiştir. Aşınma sütünü, başlangıç boyu olan 36 mm’den, ilk sütunda verilen aşınan sensörün anlık gerçek boyu çıkartılarak elde edilmiştir.



Şekil 28. Test sonucunda elde edilen aşınma - kapasitans ve çıkış eğrisi

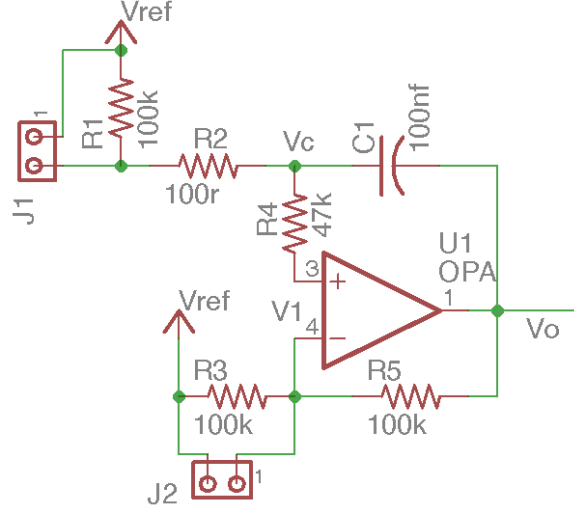
Şekil 28’de kapasitans değeri ve sensör çıkışları her kapasitans değişiminde alınmış çıkışlardır. Kapasitans değerlerinde ara değer yoktur. Bunun nedeni bir kapasitör aşınmaya başladığında tüm sensör devresini kısa devre etmesi ve sensörün çıkış vermemesidir. Kapasitör tamamen aşındıktan sonra bir sonraki kapasitör aşınmaya başlayıncaya kadar çıkış alınabilmektedir. Dolayısıyla her bir adım 47 nF değerinde çıkmaktadır. Milimetre olarak ise yaklaşık 1.5 mm adımlar ile ölçüm yapılabilmektedir. Bunun nedeni her ne kadar kapasitörlerin paket genişliği 1.2 mm olsa da montajda her bir paket arasında 0.3 mm kadar boşluk kalmış olmasıdır. Dolayısıyla sonuç olarak hassasiyet 1.5 mm olarak karşımıza çıkmıştır.

Kapasitif sensör aşınma bilgisini belli hassasiyette vermesine rağmen, hassasiyet ve dayanıklılık konusunda bazı dezavantajları olduğu için ve aşındırıcı kimyasala karşı dayanıklılığı bilinmediği için, daha farklı bir rezistif sensör üzerinde çalışma yapılmıştır.

2.2. Çalışmada Kullanılan Karedalga Osilatör Devresi

Çalışmada verinin dijital hale getirilmesine kadar olan aşamada elektromanyetik gürültülerden ve diğer elektriksel girişimlerden daha az etkilenmesi amacıyla verinin bir frekansa dönüştürülmesi düşünülmüştür. Bu amaçla bir osilatör devresi kullanılmıştır. Osilatör devresi olarak bir gevşeme osilatörü seçilmiştir. Bunun nedeni kararlı yapısı ve basit tasarımıdır. Gevşeme osilatörü bir kapasitörün bir direnç üzerinden belli bir gerilime kadar dolup belli bir gerilime kadar boşalıp tekrar dolması şeklinde çalışır. Dolma boşalma

gerilimleri bir Schmitt tetikleme devresinin eşik gerilimleri olur. Eşik gerilimine ulaşıldığında çıkış seviye değiştirir. Dolma aşamasındayken eşik gerilimine ulaşınca çıkış düşük voltaj seviyesine geçer ve kapasite boşalmaya başlar. Boşalma aşamasında alt eşik gerilimine ulaşıldığında çıkış, yüksek gerilim seviyesine geçer ve kapasitör dolmaya başlar. Bu çevrim, kapasitansı ve direnç değerlerine bağlı olarak değişir.



Şekil 29. Kullanılan osilatör devresi

Kullanılan devrenin şeması Şekil 29’da gösterilmiştir. Aşınma sensörü J1 soketine takılmıştır. Devrede dolma boşalma kondansatörü C1, dolma boşalma direnci ise; R2, R1 ve J1 soketine takılmış aşınma probunun iç direnci olan R_s nin bileşekeleridir. R4 direnci emniyet amaçlı konmuştur ve opamp giriş dirençleri çok yüksek olduğu için R4 üzerinden akım akmamaktadır ve gerilim düşümü olmamaktadır. Bu nedenle R4 direnci ihmal edilmiştir.

2.2.1. Osilatör Devresinin Analizi

Şekil 29’de verilen devre bir çeşit gevşeme osilatörü devresidir. Bu osilatör devresinde bulunan işlemsel yükselteç pozitif geribesleme devresi sayesinde bir Schmitt tetikleyici gibi çıkış gerilimini maksimum veya minimum yapacak şekilde çalışır (Atwal, 2024). Artı besleme gerilimi 10 V, eksi besleme gerilimi ise 0 V olarak bağlanmıştır. Referans gerilimi ise 3.6 V olarak bağlanmıştır. İşlemsel yükselteç giriş direnci, normal çalışma gerilimlerinde

çok yüksek olduğu için R4 direnci üzerinden akım akmamaktadır ve üzerindeki gerilim 0 V olmaktadır.

J1 soketine rezistif probun bağlandığı ve rezistans değeri R_s olduğu göz önüne alındığında R1, R2 ve R_s direnç devresi için bir bileşke dirence R denirse, bu durumda R değerinin ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$R = \frac{R_s R_1}{R_s + R_1} + R_2 \quad (9)$$

v_1 geriliminin hesabı, çıkışın 10 V ve 0 V olduğu durumlarda ayrı ayrı yapılmaktadır. Çünkü bu gerilimler, kapasitörün dolması ve boşalması esnasında işlemsel yükseltecin çıkışı değiştireceği gerilimlerdir. Çıkış 10 V olduğunda v_1 geriliminin ifadesi şöyledir:

$$v_1 = \frac{v_0 - v_{ref}}{R_5 + R_3} \cdot R_3 + v_{ref} \quad (10)$$

v_0 çıkış gerilimi: 10 V, v_{ref} gerilimi: 3.6 V olduğu bilindiğine göre R_5 ve R_3 direnci yerine konulursa v_1 gerilimi 6.8 V olarak bulunur. Bu duruma göre çıkış gerilimi 10 V iken v_c gerilimi 6.8 V 'a çıktığında çıkış yön değiştirmekte ve 0 V olmaktadır. Çıkış yön değişimi anında kapasitör üzerindeki gerilim ise 3.2 V olur. 3.2 V kapasitör gerilimi aynı zamanda T2 periyodunda kondansatörün başlangıç gerilimidir.

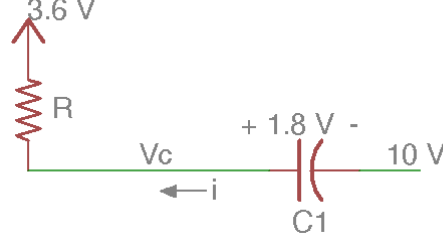
Benzer şekilde v_0 gerilimi 0 V iken v_1 gerilimi değerini hesaplayacak olursak ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$v_1 = \frac{v_{ref}}{R_5 + R_3} \cdot R_5 \quad (11)$$

Bu ifadede, direnç değerlerini ve gerilim değerlerini yerine koyacak olursak v_1 gerilimi 1.8 V olarak bulunur. Bu durumda çıkış 0 V olduğunda v_c gerilimi 1.8 V'a indiğinde çıkış yine yön değiştirerek 10 V olmaktadır. Çıkış 10 V'a döndüğünde kapasitör başlangıç gerilimi ise 1.8 V olur. Devre 10 V ile 0 V arasında kare dalga çıkışı verir. Çıkış 10 V olduğunda kondansatörün dolma süresi T_1 ; T_2 ise çıkış 0 V olduğunda kondansatörün boşalma süresi olduğu varsayılırsa çıkış frekansının periyodunun hesabı aşağıdaki gibidir.

$$T = T_1 + T_2 \quad (12)$$

Çıkış 10 V olduğunda T_1 hesaplanırken C1 başlangıç gerilimi 1.8 V ve eşdeğer devre aşağıdaki gibidir.



Şekil 30. T_1 periyodu için eşdeğer devre

Şekil 30'da i akımın ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$i = \frac{10 + 1.8 - 3.6}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (13)$$

$$i = \frac{8.2}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (14)$$

Denklem (14)'te verilen i kullanarak v_c gerilim ifadesini yazmak istersek v_c gerilimi aşağıdaki gibi olmaktadır:

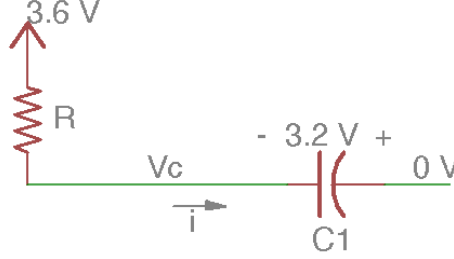
$$v_c = 3.6 + 8.2 \cdot e^{\frac{-t}{RC}} \quad (15)$$

Denklem (15)'de v_c ifadesini T_1 periyodunun sonundaki v_c değeri olan 6.8 V 'u yerine koyup t ifadesini çekersek T_1 periyodunun değerini bulmuş oluruz.

$$T_1 = R \cdot 9.4 \times 10^{-8} \quad (16)$$

Rezistif prop direnci örneğin 400 ohm olarak verilirse, R1 direnci 400 ohm yanında çok büyük olduğu için burada ihmal edilirse bileşke R direnci 500 ohm olur. Bu durumda Denklem (16)'ya göre T_1 süresi 47 mikro saniye çıkar.

Benzer şekilde T_2 süresince çıkış 0 V olduğu için ve T_1 süresinin sonundaki kapasitör üzerindeki gerilim T_2 süresindeki eşdeğer devrenin kapasitör başlangıç durumu gerilimi olduğu için eşdeğer devre aşağıdaki gibi verilmiştir.



Şekil 31. T_2 periyodu için eşdeğer devre

Şekil 31'deki eşdeğer devrede akımın ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$i = \frac{6.8}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (17)$$

Denklem (17) 'de ifadesi verilen i akımına göre v_c geriliminin ifadesi aşağıdaki gibi çıkartılabilir:

$$v_c = 3.6 - 6.8 e^{\frac{-t}{RC}} \quad (18)$$

T_2 Periyodunun son anının değeri olan 1.8 V Denklem (18)'de v_c değerinin yerine konulursa T_2 ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$T_2 = R \cdot 13.3 \times 10^{-8} \quad (19)$$

Aynı şekilde R bileşke direnci (9) denkleminde göre; R1 direnci ihmal edilirse 500 ohm olacağı için T_2 değeri 66 uS olarak hesaplanacaktır. T periyodu (12) ifadesine göre aşağıdaki gibi olur:

$$T = 66 + 47 = 103 \mu S, \quad (20)$$

Bu durumda osilatör çıkış frekansı başlangıçta 9.7 kHz olarak bulunmuş olur.

Denklem (16) ve denklem (19) kullanılarak T periyodunun “R” bileşke direncine göre ifadesi aşağıdaki gibi bulunur:

$$T = R \cdot 22.4 \times 10^{-8} \quad (21)$$

Frekans ifadesi ise denklem (21) kullanılarak aşağıdaki gibi çıkartılır:

$$f = \frac{4.46 \times 10^6}{R} \quad (22)$$

Burada R; bileşke direncidir ve ifadesi denklem (9)’da gösterilmiştir.

2.2.2. Osilatörün Ayarlanması ve Ölçüm Devresinin Hazırlanması

Osilatör devresinin besleme gerilimi, gerilim değişiminden frekansın en az seviyede etkilenmesi sağlamak amacıyla 10 V olarak belirlenmiş, referans gerilimi 3.6 V yapılmıştır. 10 V gerilimi 3.6 V pil geriliminden boost konvertör ile yükseltilerek üretilmiştir. Bu sayede pil geriliminin zamanla düşmesi osilatör devresinin besleme geriliminin değişmesine neden olmamıştır ve pil gerilimi osilatör çıkış frekansını etkilememektedir. Boost konvertör devresinin çıkış akımı sınırlıdır, bu nedenle kapasitör dolma boşalma akımı da sınırlı kalmaktadır. Problar arası rezistans 500 Ohm civarında olduğu, dolup boşalma geriliminin de yaklaşık 5 V olduğu düşünüldüğünde, dolum akımı maksimum değeri 10 mA , yarım periyod akım ortalaması 5 mA, tam periyod ortalaması ise 2.5 mA olmaktadır. Başlangıç frekansı 6 kHz civarında arzu edilmiş olduğu için 500 Ohm prop rezistansı göz önüne alındığında (21) denklemine göre kapasitans değeri 100 nF olarak seçilmiştir. Osilatör ölçüm devresi 20 kHz üstü frekansı ölçmemektedir. Bu nedenle prop başlangıç rezistans değerine frekans değerinin 20 kHz e çıkmaması için geniş bir tolerans aralığı bırakılmıştır.

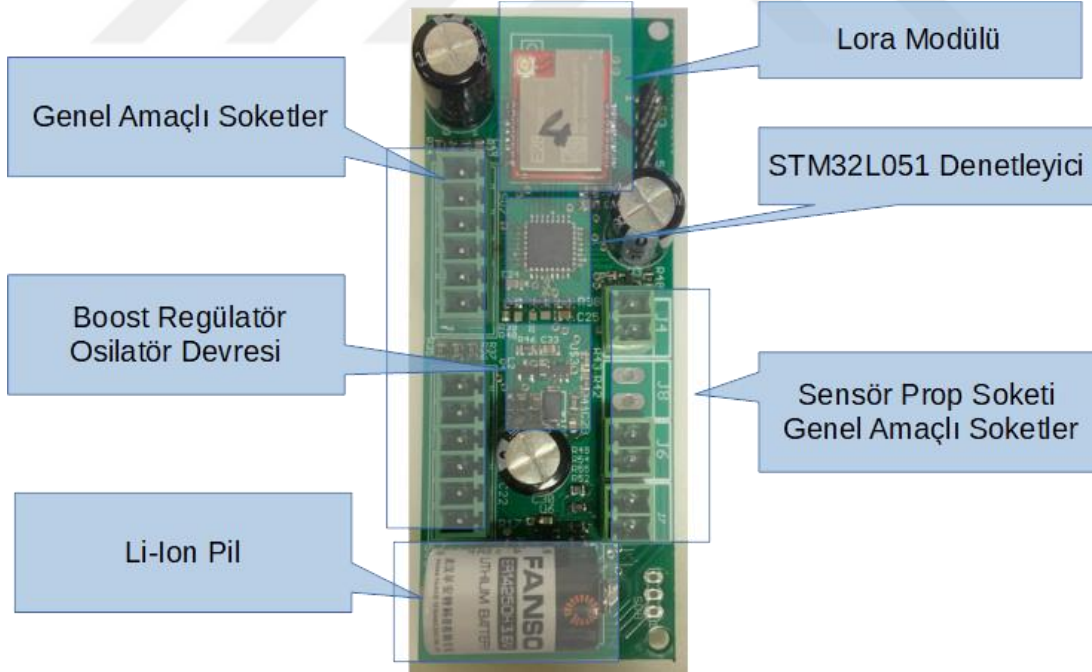
Rezistif problemlerin rezistans değeri aşınmanın başında yaklaşık 500 Ohm çıkmaktadır. Aşınma son seviyeye geldiğinde ise direnç değeri sonsuz olmaktadır. Bu direnç aralıklarını düzgün ölçebilmek için Şekil 29’da verilen osilatörün kapasitans değeri ve direnç değerleri uygun şekilde seçilmelidir. Sonsuz empedans durumunda osilasyon frekansının oluşabilmesi için problemlere paralel bir R1 direnci eklenmiştir. R1 direnci, minimum frekans 100 Hz olarak

ayarlanması için 100 kOhm olarak seçilmiştir. Aynı şekilde proplar arasında bir kısa devre durumunda osilasyon frekansı üretilebilmesi için seri bir direnç eklenmelidir. Seri direnç frekans hassasiyetini düşürmeyecek şekilde düşük değerli seçilmiştir. Ancak aynı zamanda osilasyon frekansının, mikrodenetleyici tarafından ölçüm sınırı olan 20 kHz değerine çıkmaması için belli değerlerden düşük olması gerekir. Bu amaçla en fazla 10 kHz değerini oluşturabilmesi için direnç değeri 100 Ohm olarak seçilmiştir.

Tablo 3. Rezistif prop aşınma/frekans çevirici osilatör bileşenlerinin değerleri

C1	R1	R2	R3	R5
100nf	100K	100R	100K	100K

R4 direnci, deneme aşamalarında oluşabilecek kısa devre durumunda opamp zarar görmemesi için eklenmiştir. Normal şartlarda R4 direnci üzerinde akım akmayacağı için analizde kullanılmamıştır, çıkış frekansını etkilememektedir.



Şekil 32. Gerçekleştirilen ölçüm kartı

Ölçüm devresi Şekil 32’de gösterilmiştir. Devrenin merkezinde STM32L051 mikrodenetleyicisi vardır. Lora modülü, osilatör, boost regülatör ve pil devre üzerinde

birleştirilmiştir. İhtiyaç halinde kullanılabilmesi için mikrodenetleyici pinlerine bağlı bazı portlar eklenmiştir.

2.3. Çalışmada Kullanılan Lora Veri Formatı

Çalışmada gereken veriler sensör kimliği, aşınma verisidir. Sensör kimliği 1 byte olarak, veri çerçevesinde ilk byte alanına yerleştirilmiştir.

Çalışmada, aşınma sensörünün çalışmasını ihtiyaç olduğunda takip edebilmek için belli aşınma derinliklerine yerleştirilen ve aşınma bu bölgeye ulaştığında iletimi kopan iletken teller yerleştirilebilmesi için 1 byte olarak rezerve edilmiş zoka ismi verilen her bir iletken için 1 veya 0 bilgisini tutan alan bulundurulmuştur.

Aşınma seviyesi bir osilatör devresi ile algılandığı için, aşınma sensör çıkışı bir frekanstır. Frekansın 100 Hz ile 15 kHz (15000 Hz) arasında değişmesi öngörülmektedir. Bu nedenle frekans 2 byte olarak okunmaktadır ve veri formatında üçüncü ve dördüncü byte alanına yerleştirilmiştir. Son olarak 5. byte alanında ise 1 byte boyutunda sıcaklık bilgisi santigrat derece olarak yerleştirilmiştir. Sıcaklık bilgisi mikrodenetleyici içerisinde zaten bulunan bir sıcaklık sensörü ile bir ek donanım gerekmeden alınabildiği için veri paketine ihtiyaç olduğunda kullanılabilmesi için yerleştirilmiştir.

Kullanılan Lora modemlerin CRC hata kontrolü özelliği bulunduğundan ve alıcıda CRC kontrolü otomatik olarak yapıldığı için uygulama katmanındaki veri formatında ayrıca CRC alanına yer verilmemiştir.

Cihaz kimlikleri yazılım aşamasında her bir sensörün “flash” hafızasına benzersiz 1 byte kod olarak işlenmiştir. Sensör yazılımı bu “flash” alanından aldığı kimlik bilgisini veri formatındaki ilgili alana yerleştirip veriyi gönderebilmektedir.

Aşağıda veri formatının grafiksel gösterimi “0x33 0xFE 0x0F 0x41 0X17” örnek veri paketi için verilmiştir.

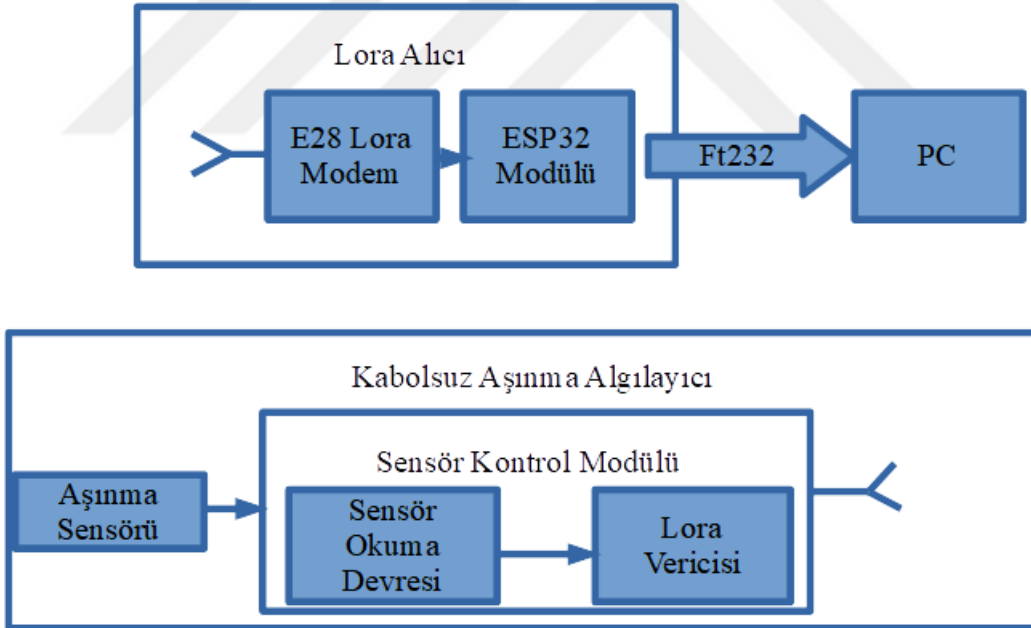
Tablo 4. Çalışmada kullanılan veri formatı

Byte :1	Byte :2	Byte:3	Byte:4	Byte:5
0x33	0xFE	0x0F	0x41	0x17
Sensor Kimlik	Zoka Durumu	Osilator (H)	Osiltor (L)	Sıcaklık(C)

Osilatör frekans bilgisi Hertz olarak 2 byte tamsayı olarak gönderileceği için veri paketinde 3. byte en anlamlı byte 4. byte ise en anlamsız byte olmaktadır. Frekans bilgisinin yeniden oluşturulmasında 3. ve 4. byte alanları birleştirilip bir tamsayı oluşturulmaktadır. Bu tamsayı direk olarak osilatör frekansını hertz cinsinden ifade etmiş olur.

2.4. Blok Diyagram

Üretilen rezistif sensörün laboratuvar şartlarında denenmesi ve çalışırılığının gösterilmesi amacıyla bir sistem oluşturulmuştur. Bu sistem içerisinde sensörün kendisi, aşınma algılanması yapan liftebar, aşınmayı algılamak için hazırlanan elektronik donanım ve aşınma sinyallerinin algılanıp işlenebilmesi için yapılmış bir alıcı bulunmaktadır. Aşınma testleri belli ve eşit sürelerle aşınmaya tabi tutulan parçanın hem kumpasla mekanik olarak ölçümü hem de elektronik olarak sensör çıkışının alınması ve aynı zamanda ölçü aletiyle rezistans ölçümü şeklinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 33: Sistemin blok diyagramı

2.5. STM32L051 Sayıcı Modülün Ayarlanması

Aşınma sensörü frekans çıkışı verdiği için frekans ölçümü ile aşınma algılaması gerçekleştirilmiş olur. Frekansı ölçülecek işaret bir kare dalgadır. Dolayısıyla kare dalga işaretinin belli bir süre boyunca yükselen kenar darbe sayımı ve sayılan darbelerin süreye

bölümü ile frekans elde edilebilmektedir. Darbe sayısı P ve geçen süre T 'ye bağlı olarak frekans ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$f = \frac{P}{T} \quad (23)$$

Darbe sayma işlemi için mikrodenetleyicinin “timer” modülünün sayıcı özelliği kullanılmıştır. Konfigürasyon bilgisi Şekil 34’te verilmiştir. Timer modülünün sayıcı fonksiyonu aktif edildiğinde giriş işaretinin yukarı kenar veya aşağı kenar geçişlerinden biri seçilerek, her bir geçişte sayaç değerinin artması sağlanır. Sayma işlemi sırasında aynı zamanda süre tutulması gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 35’da gösterildiği gibi süre başında sayaç sıfırlanır, süre sonunda ise sayaç değeri okunur.

```
htim21.Init.Prescaler = 0;
htim21.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
htim21.Init.Period = 0xffffffff;
htim21.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
htim21.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;

sClockSourceConfig.ClockSource = TIM_CLOCKSOURCE_ETRMODE2;
sClockSourceConfig.ClockPolarity = TIM_CLOCKPOLARITY_NONINVERTED;
sClockSourceConfig.ClockPrescaler = TIM_CLOCKPRESCALER_DIV1;
sClockSourceConfig.ClockFilter = 0;
```

Şekil 34. Timer21 konfigürasyonu

Saat veya frekans kaynağı olarak “ETRMODE2” seçeneği ile ilgili frekans yani kare dalga işareti verilen pin, saat veya sayıcı girişi olarak seçilmiş olur.

```
HAL_TIM_Base_Start(&htim21);
htim21.Instance->CNT=0x00000000;
HAL_Delay(1000);
f_cntr_res=htim21.Instance->CNT;

HAL_TIM_Base_Stop(&htim21);
```

Şekil 35. Frekans ölçüm (darbe sayım) işlemi

2.6. STM32L051 Stop Moduna Sokulması

Aşınma sensörü lifterbar içerisine yerleştirildiği için lifterbarın üretiminden son kullanım ömrüne kadar müdahale edilmesine ihtiyaç olmadan çalışabilecek şekilde düşünülmüştür. Sensör, okuma devresi, mikrodenetleyici ve lora modemi tek bir pil kaynağından beslenmiştir. Pil li-ion teknolojili ve 85 C sıcaklığa dayanıklı olarak seçilmiştir. Değirmen iç sıcaklığı 65 santigrat dereceye kadar çıkabileceği öngörüldüğü için 85 santigrat derecelik bir sıcaklık dayanımı yeterli olarak düşünülmüştür. Sensör ömrü boyunca ihtiyacı olacak pil kapasitesi mili amper saat olarak hesaplanarak 1200 mAh olarak belirlenmiştir. Veri gönderme sıklığı 1 saat olarak planlanmış, pil dayanımı hedefini tutturabilmek için devre ve lora modemi veri göndermediği durumlarda uyku modunda tutulmaktadır. STM32L051 düşük güç modları olarak birkaç seçenek olmasına karşın, Lora modülü tek seçenektir. Ayrıca lora modülü SPI pinlerinde olan değişimden uyanmaktadır. Bu nedenle STM (STM32L051) denetleyicisi uyku modunda pinleri yüksek empedans moduna alırsa, Lora modemi yüksek empedans olan giriş pinlerinden dolayı uyanır. Bu sorunu engellemek için STM denetleyicisi STOP modunda tutulmuştur. Bu modda işlemci, pinlerinin son halini korumaktadır. Bu sayede Lora modemi giriş pinleri yüksek empedans moduna geçmemekte ve Lora modemi vaktinden erken uyandırmamaktadır. STOP modu için STM akımları Tablo 1’de gösterilmiştir. Lora modemi uyku modunda 2 uA akım çektiği bilgisi verilmiştir (Ebyte, 2024). Toplamda sensör, denetleyici, modem dahil çekilen akım 30 uA olarak uygulamada ölçülmüştür.

STM denetleyicinin uyku moduna geçirilmesinden önce uyandırma algoritmasının belirlenmesi gerekmektedir. Uyandırma zaman bazlı olarak planlandığı için, RTC modülünün uyandırma fonksiyonu kullanılmıştır. Bunu için öncelikle RTC modülü ayarlanmalıdır.

```
hrtc.Instance = RTC;
hrtc.Init.HourFormat = RTC_HOURFORMAT_24;
hrtc.Init.AsynchPrediv = 127;
hrtc.Init.SynchPrediv = 255;
hrtc.Init.OutPut = RTC_OUTPUT_DISABLE;
hrtc.Init.OutPutRemap = RTC_OUTPUT_REMAP_NONE;
hrtc.Init.OutPutPolarity = RTC_OUTPUT_POLARITY_HIGH;
hrtc.Init.OutPutType = RTC_OUTPUT_TYPE_OPENDRAIN;
```

Şekil 36. Düşük güç modu için RTC konfigürasyonu

Daha sonra uyandırma zamanlayıcısı saati 16. kademe frekans bölücüsü ile 1 saniyeye ayarlanmıştır.

```
//Set wakeup timer
// RTC_WAKEUPCLOCK CK_SPRE_16BITS = 1 Hz
HAL_RTCEx_SetWakeUpTimer_IT(&hrtc, sleep_time, RTC_WAKEUPCLOCK CK_SPRE_16BITS);
```

Şekil 37. Uyandırma saat frekansı 1 saniyeye ayarlanması ve alarmının kurulması

Şekil 37’de görüleceği gibi uyandırma alarm saat frekansı 1 saniyeye ayarlanarak kurulabilir. Uyandırma alarmı kurulduktan sonra artık gerekli komutlar ile denetleyici “STOP” moduna geçirilebilir.

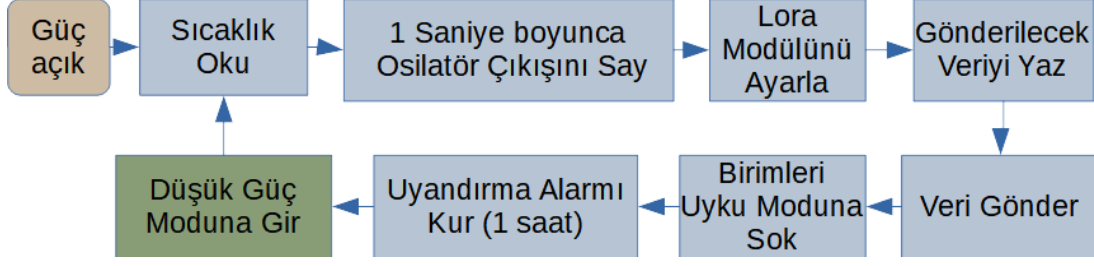
```
/* Enter STOP mode */
__HAL_PWR_CLEAR_FLAG(PWR_FLAG_WU);
HAL_PWR_DisablePVD(); //disable all unwanted wakeups
HAL_PWR_DisableWakeUpPin(PWR_WAKEUP_PIN1);
HAL_PWR_DisableWakeUpPin(PWR_WAKEUP_PIN2);
HAL_PWR_EnterSTOPMode(PWR_LOWPOWERREGULATOR_ON, PWR_STOPENTRY_WFE);
```

Şekil 38. Stop moduna giriş

Şekil 28’de gösterildiği gibi komutlar girildikten sonra artık denetleyici birçok birimi kapatıp düşük enerjili moda girer ve belirtilen uyanma süresi boyunca bu modda kalır.

2.7. Ana Yazılım

Cihaz C dilinde yazılan ana yazılım döngüsüyle kontrol edilmektedir. Yazılım, kontrol kartı üzerindeki STM32L051 denetleyicisi üzerinde koşar. Enerjilendikten hemen sonra RTC, SPI, Timer, ve lora konfigürasyonlarının yapılmasından sonra cihaz ana yazılım döngüsüne girmektedir. Cihaz enerjilendikten sonra kısa bir süre içerisinde işlemlerini tamamlayıp düşük enerji modu olan “Stop” moduna girer.



Şekil 39. Ana yazılım döngüsü

2.8. Akım ve Batarya Ömrü Hesabı

Sensörün çalışma süresi bağlanacak batarya ve devrenin çektiği akım ile ilişkili olduğu için bu iki kriter kullanılarak batarya ömrü hesaplanmıştır. Devrenin çektiği akım 4 ayrı aşamada 4 ayrı değerde olur. Devre uyku aşamasında 0.03 mA akım çektiği ölçülmüştür. Buna karşın çalışma aşamasında 3 ayrı akım aşaması olmuştur. Birincisi ölçüm aşaması, ikinci aşama veri gönderme, son aşama ise komut bekleme aşamasıdır. Uyandıktan sonra ilk aşama olan ölçüm aşamasında çekilen akım 7 mA ölçülmüştür. Veri gönderme aşamasında akım değeri modülün teknik dokümanındaki maksimum akım değeri olan 500 mA alınacak diğer akımlar oldukça düşük olduğu için hesap basitliği açısından ihmal edilmiştir (Ebyte, 2024). Son aşamada ise sistem veri bekleme aşamasına geçer. Bu aşama çekilen akım 20mA olarak ölçülmüştür.

Tablo 5. Ölçümlere göre hesaplanan pil tüketimleri tablosu

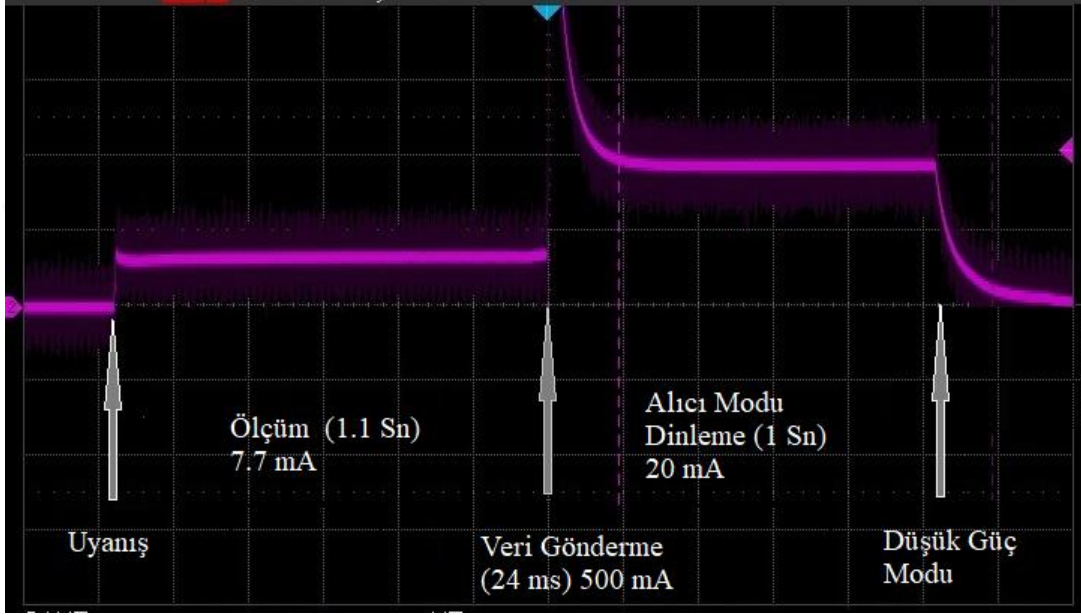
	Ölçüm	Veri Gönderimi	Dinleme
Çekilen Akım	7 mA	500 mA	20 mA
Süre	1.1 sn	0.024 sn	1 sn
Pil Tüketimi	0.0021mAh	0.0033mAh	0.0055mAh

Her bir aşamanın süresi ölçüldüğünde her bir ölçüm ve veri gönderme işlemi için gerekli batarya tüketimi hesaplanabilmektedir. Tablo 55'teki veriler kullanılarak her bir ölçüm ve ölçümün gönderilmesi için gerekli pil kapasitesini; 3 aşamada harcanan pil kapasitesi toplanarak 0.011 mAh olarak elde edilmiştir.

Uyku modunda çekilen akım 0.03mA olarak ölçüldüğüne göre, bir günde veri gönderme sayısı “n” e göre pilin gün olarak ömrü “L” aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$L = \frac{1200}{n \times 0.011 + 24 \times 0.03} \quad (24)$$

Denklem (24)'te değerler yerine konulduğunda günde 24 defa veri gönderimi için pil ömrü 1219 gün olarak çıkmıştır.



Şekil 40. Aşamalarda ölçülen akımın osiloskopta görüntüsü

2.9. Lora Modülünün Açılışı ve Konfigüre Edilmesi

Lora modülü, mikrodenetleyiciye SPI arayüzü ile bağlanmıştır, haberleşmeler bu arayüz üzerinde yapılmaktadır. Haberleşmenin SPI arayüzünden sağlıklı olarak yapılabilmesi için öncelikle SPI arayüzü mikrodenetleyicide aktif hale getirilmiştir.

Mikrodenetleyici SPI portu konfigürasyonları yapıldıktan sonra RXEN ve TXEN pinlerine bağlı 8 ve 9' nolu pinler de dijital push pull çıkış olarak ayarlanmıştır. RXEN pini Lora modülü içerisindeki LNA yı aktif hale getirir. Aynı şekilde TXEN pini Lora modülü içerisindeki güç amplifikatörünü aktif hale getirir. Bu pinler kullanılmadan veri gönderme ve alma işlemleri yapılamamaktadır.

```
//SET PACKET TYPE lora
spi_buf1[0]=0x8a; spi_buf1[1]=0x01;
HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_RESET);
HAL_SPI_TransmitReceive(&hspi1, spi_buf1, spi_buf2, 2, 60);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_SET);
HAL_Delay(1);
```

Şekil 41. Lora açılış konfigürasyonu

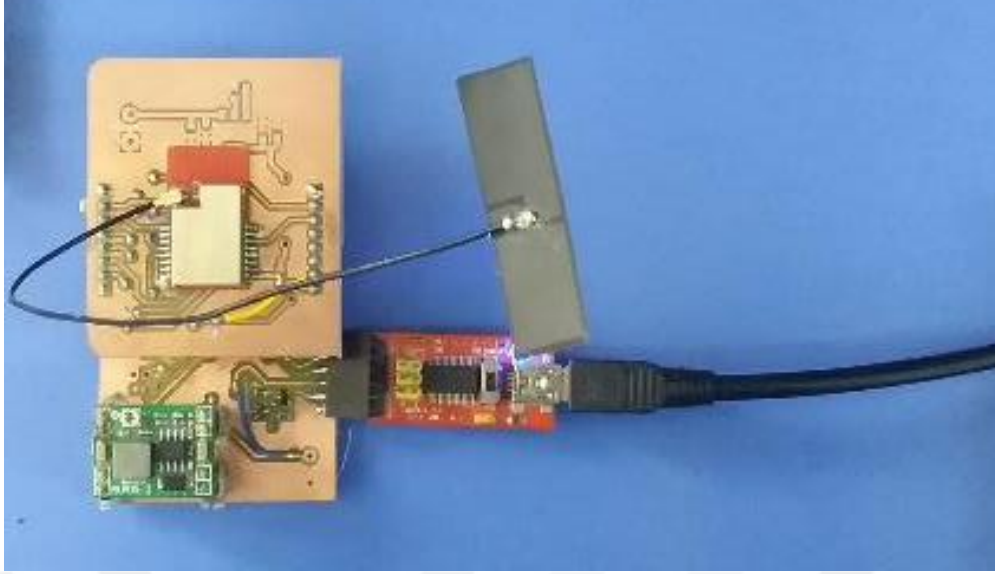
Şekil 41’de Lora konfigürasyonu için C kodu verilmiştir. NSS , yani “SPI slave select” pini manuel olarak kullanıldığı için “HAL_GPIO_WritePin” komutu NSS pinini SPI haberleşmesinden önce aktif hale getirmek için kullanılmıştır. Lora ile veri gönderme ve alma işlemleri yine Şekil 41’de gösterildiği gibi SPI arayüzünden komutlar ile yapılmaktadır. Tablo 6’te haberleşmede kullanılan Lora konfigürasyonu verilmiştir.

Tablo 6. Lora modülünün konfigürasyonu

Açıklama	Komut	Parametre
Frekans 2.4GHz	0x86	0xb8 0x9d 0x89
Tx buffer base 0x80 rx buffer base 0x00	0x8f	0x80 0x00
sf 07, bw 800 kHz, cr 4/5	0x8b	0x70 0x18 0x01
10 preamble, open header, 5 byte payload, crc aktif, std iq	0x8c	0x0a 0x00 0x05 0x20 0x40

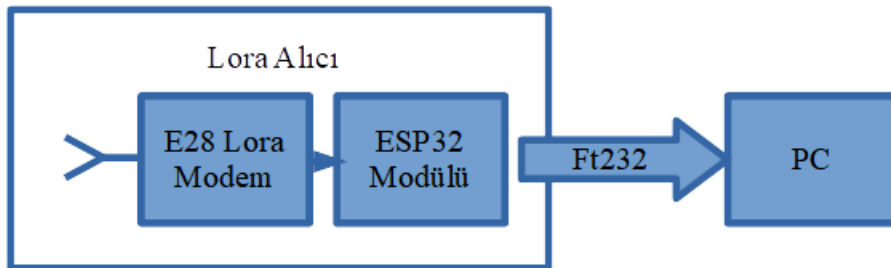
2.10. Alıcının Hazırlanması

Şekil 42’de alıcı görülmektedir. Alıcı devresi yine Lora modülü kullanılarak oluşturulmuş bir modüldür. Bu proje için özel olarak üretilmemiş olsa da alıcı olarak uygun bulunmuştur.



Şekil 42. Alıcı devresi ve üzerindeki lora modülü

Alıcı modül üzerindeki ESP32 modülü, üzerindeki bir yazılım ile lora konfigürasyonlarını gerçekleştirip Lora modülüne gelen lora sinyallerini SPI arayüzünden okuyup uart ile göndermektedir. Ft232 dönüştürücüsü de uart verilerini USB ile bir bilgisayara izleyip kaydedilmesi için göndermektedir. Bilgisayar üzerinde çalıştırılan “Realterm” terminal programı gelen verileri kaydetmekte veya ekranda gösterebilmektedir. Dolayısı ile alıcı olarak bir Lora modülü, ESP32 modülü, uart-usb dönüştürücü ve bir bilgisayar kullanılmıştır. Alıcı kısım genel olarak belirlenmiş frekans ve kodlamada gönderilecek lora sinyallerini alıp herhangi bir işlem yapmadan bilgisayar gönderilmesi görevini gerçekleştirmektedir.



Şekil 43. Alıcının blok diyagramı

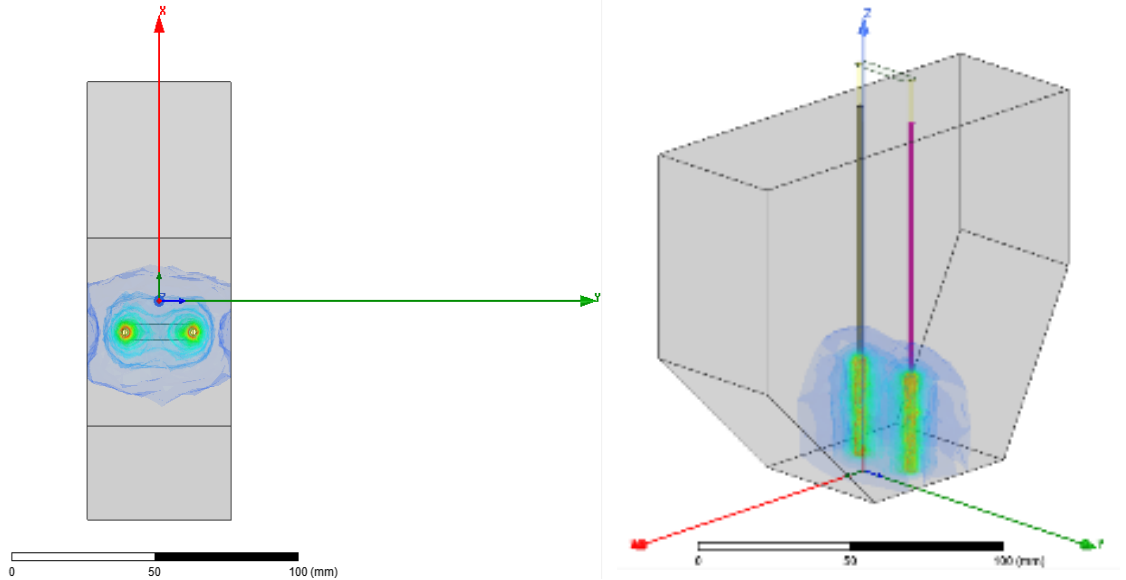
2.11. Rezistif Algılayıcının Gerçekleştirilmesi

Bu çalışmada lifterbar aşınma ölçümünün temeli lifterbar kauçuk yapısının elektriksel iletkenliğinin aşınma miktarına göre değişimidir. Aşınma gerçekleştikçe elektrik alanın uygulandığı kesit daralmakta, akımın geçtiği kesit daralmakta ve dolayısıyla akımın veya elektrik alan altındaki elektronların karşılaşacağı direnç artmaktadır.

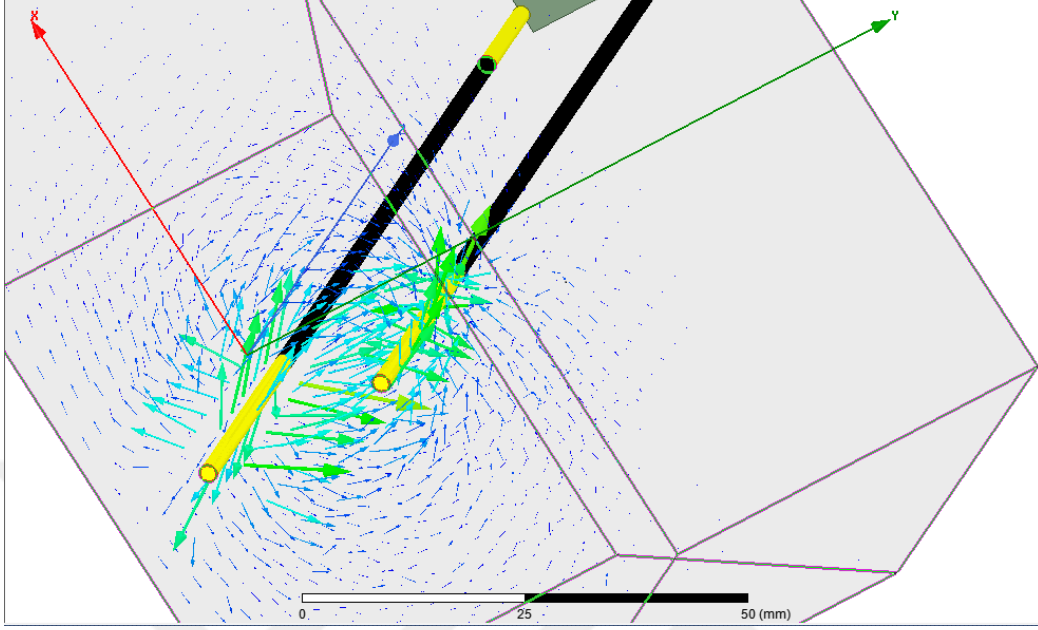
Elektrik alan yönü aşınma yönüne dik olacak şekilde propların yerleşimi Şekil 16’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Ohm kanununa göre iki prop arasında oluşan direnç “R” iki prop arasındaki kauçuk kesiti “S” ve iki prop arasındaki mesafe “l” ve malzemenin öz iletkenliği “ σ ” ya göre aşağıdaki gibidir:

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (25)$$

Lifterbar üzerinde yerleştirilen Şekil 16 ve Şekil 15’te tasarımları gösterilen propların ANSYS HFSS 3D simülasyon yazılımında elektrik alan simülasyonları yapılarak Şekil 44’de gösterilen çıktılar elde edilmiştir. Elektrik alanın yoğunlaştığı bölgeler simülasyonda gösterildiği gibi aşınmanın tespit edilmesi hedeflenen bölgeler olduğu teyit edilmiştir.

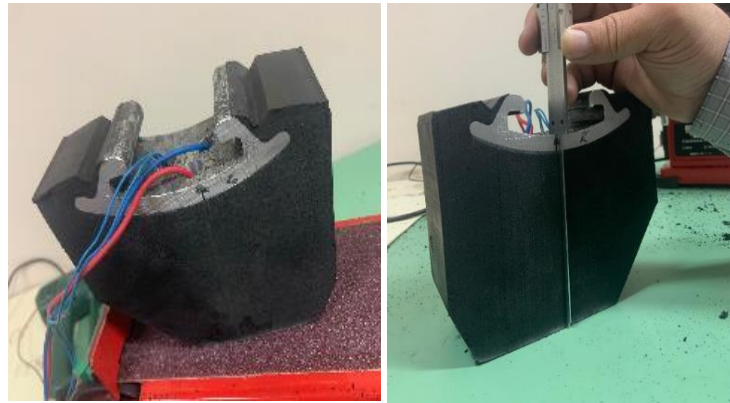


Şekil 44. ANSYS HFSS 3D Simülasyon programında elektrik alan simülasyon sonucu



Şekil 45. Elektrik alan simülasyonun detaylı gösterimi

Şekil 45’de simülasyon sonucuna göre oluşan elektrik alanın daha yakından detaylı gösterimi verilmiştir. Propların izolasyon olmayan 5 cm’lik uç kısımları kauçuk ile temas halindedir. Akım, kauçuk içerisinde bir proptan diğer proba doğru elektrik alanının etkisiyle akmaktadır. Propların iletken kısımları aşınmanın etkisiyle, kauçuk kesitiyle birlikte kısılmakta ve elektrik alanına maruz kalan kesit daralmaktadır. Ohm kanununa göre kesit daraldığı için elektronların karşılaştığı direnç artmakta bu nedenle de akım azalmaktadır. Sensörün çalışma prensibi bu temel üzerine inşa edilmiştir.



Şekil 46. İçerisine propların yerleştirilmiş olduğu lifterbar parçası ve aşınma ölçülme şekli

Ölçüm yapılacak lifterbar içerisinde kontrol amaçlı, cetvel ile ölçümün yanında alternatif olarak kapasitif bir ölçüm probu yerleştirilmiştir. Bu kapasitif probun hassasiyeti paket yapısı seçimine göre 2.5 mm'dir. Her bir 2.5 mm aşınma karşısında 100 nf değerinde kapasitans değeri de aşınmakta ve toplam kapasitans düşmektedir. Bir RLC metre ile rezistif problemlerin rezistans değeri ve ölçüm osilatörü devresini frekans çıkışı ve aynı zamanda kapasitans değeri not edilmiştir. Ölçüm aşamasında lifterbar parçasının hem sağ taraftan hem de sol taraftan kumpas ile ölçümü alınmış ve kaydedilmiştir.

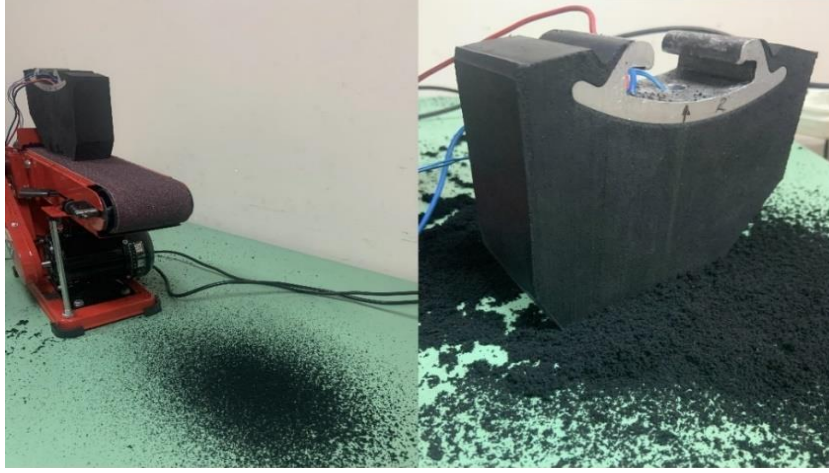


Şekil 47. Rezistif proplar ve kapasitif prop eklenmiş test edilecek lifterbar parçası

2.12. Deney ve Test Düzenegi

Deney ve ölçüm sistemi Şekil 47'de görülen lifterbar parçası üzerinde, bir şerit zımpara makinesi ile aşındırılarak gerçekleştirilmiştir. Zımpara makinesi 40 kum özellikte 10 cm genişliğinde bir şerit zımparadır.

Süreç 6 dakika aşındırma ve 6 dk dinlendirme şeklindedir. Aşındırma süreleri bu şekilde eşit süreler ile gerçekleştirilmiştir. Dinlendirme süresi içerisinde aşınma ölçümü kumpasla iki kenardan hem sağ yüzden hem sol yüzden yapıp ayrı ayrı kaydedilmiştir. Aşınma ölçümü bu şekilde mekanik olarak yapıldıktan sonra, ölçü aleti ile kapasitif probun kapasitansı ve kaçak rezistansı, rezistif probun rezistansı hem DC hem 100 Hz de alternatif akım olarak ölçülüp kaydedilmiş, sonra ölçüm devresi proplara sırasıyla bağlanmış, kapasitif prop ve rezistif probun bağlanmasıyla üretilen frekans sırasıyla kaydedilmiştir. Sonraki ölçüm için gerekli 6 dakika bekleme süresinin dolması beklenmiş; süre dolduğunda sonraki aşındırma adımına geçilmiştir. Süreler alarm özellikli bir kronometre ile tutulmuştur.

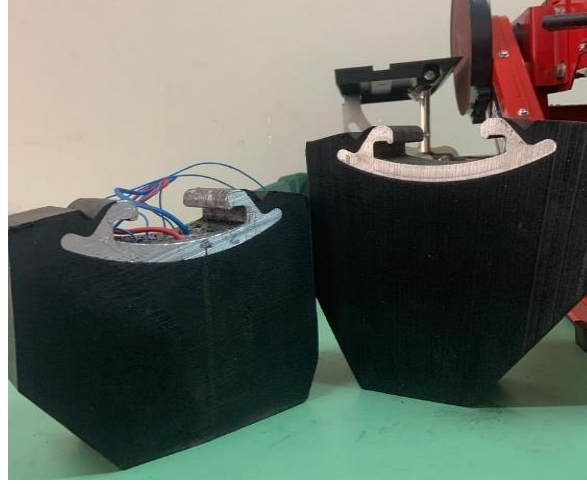


Şekil 48. Aşındırma amacıyla kullanılan şerit zımpara makinesi ve bir miktar aşındırma yapılmış test lifterbarı

Şekil 48’de aşındırma amacıyla kullanılan zımpara makinesi ve aşınma dolayısıyla makine önünde biriken kauçuk tozları görülebilmektedir. Test işleminde aşındırma aynı zamanda yüzeyde bir sıcaklık artışına sebep olmuştur. İlk aşındırma aşamasında sonra ikinci aşamada sıcaklık stabil olmuştur. Ancak aşındırma aşamasından ölçme aşamasına geçildiğinde yüzeyde hızlı bir sıcaklık düşüşü olmaktadır. Kauçuk yüzeyinde oluşan sıcaklık değişimi, rezistans değerini önemli ölçüde etkilediğinden ölçme işlemi, her bir aşamada aşındırma bitişinde eşit süreler ile gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

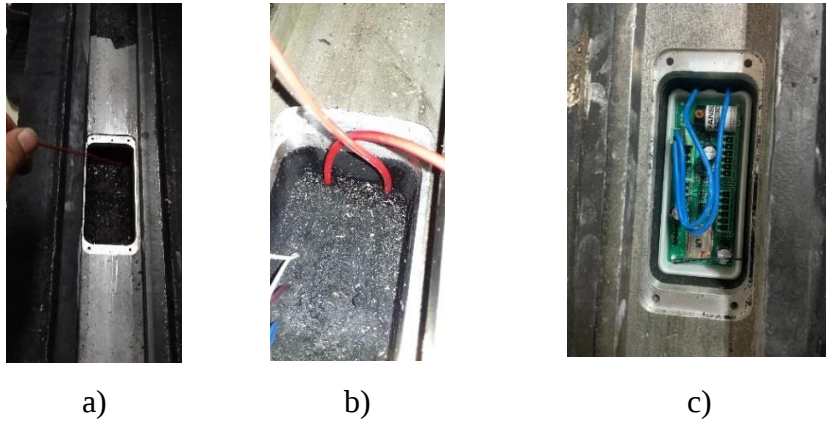


Şekil 49. RCL metre ile kapasitif prob ölçümü yapılmakta olan lifterbar



Şekil 50. Aşındırma işlemi sonunda aşındırılmış ve aşındırılmamış lifterbar parçası

Laboratuvar ortamında yapılan aşındırma çalışmasından sonra bir maden değirmenine yerleştirilen liftebarlara aşınma sensörü yerleştirip denenmesi düşünülmüştür. Bu amaçla Bingöl’de Dimin işletmesine ait bir maden değirmenine sensörlü lifterbar yerleştirilmiştir. Bu değirmende oluşan aşınma verileri bir mini bilgisayar tarafından toplanarak internet ortamında “Firebase Relatime Database” veri tabanına yüklenmiştir. Daha sonra bu veri tabanından veriler “Json” formatında indirilerek Microsoft Excel çalışma ortamında yüklenerek incelenmiştir. Deneysel veriler ile gerçek değirmenden çekilen veriler kıyaslanmış, birbirlerine uygunlukları irdelenmiştir. Elde edilen deneysel verilere ikinci dereceden bir polinom uydurulmuştur. Maden değirmeninden elde edilen verilere de ikinci dereceden bir polinom uydurulmuştur. Deneysel verilere uydurulan polinomun aynı zamanda gerçek değirmenden elde edilen polinomla benzerliği tartışılmıştır.



Şekil 51. (a) Sensör monte edilen gerçek lifterbar (b) Rezistif proplar lifterbara yerleştirilmiş şekilde (c) Ölçüm devresi yerleşimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan test ve ölçümler sonucundan Tablo 7’de gösterilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 7. Laboratuvar testi rezistif prop sonuçları

Kauçuk				Rezistif Prob		
Sol ölçüm (mm)	Sağ Ölçüm (mm)	Ortalama (mm)	Aşınma (mm)	Rezistans (DC, ohm)	Frekans (HEX)	Frekans (Hz)
121.3	120.7	121	0	169	25ED	9709
120.8	118.8	119.8	1.2	175	251F	9503
120	118.2	119.1	1.9	179	2471	9329
118.7	118.1	118.4	2.6	171	253D	9533
118.7	117.5	118.1	2.9	173	252F	9519
117	117	117	4	182	2467	9319
116.6	116.6	116.6	4.4	183	244E	9294
115.9	115.6	115.75	5.25	182	247B	9339
115.5	115	115.25	5.75	190	23E1	9185
114.8	114.1	114.45	6.55	198	2305	8965
114.3	113.7	114	7	207	226E	8814
113.5	112.8	113.15	7.85	203	22EF	8943
113	113	113	8	214	2213	8723
112.6	111.9	112.25	8.75	210	2255	8789
112.6	111.8	112.2	8.8	211	222D	8749
112.6	112	112.3	8.7	212	224E	8782
111.4	111.7	111.55	9.45	217	21E4	8676
110.9	111.1	111	10	225	2167	8551
110	109.7	109.85	11.15	244	201E	8222
109.5	107.6	108.55	12.45	253	1F7F	8063
108.2	106.7	107.45	13.55	289	1D5D	7517
106.6	106.5	106.55	14.45	312	1C2D	7213
105.5	104.8	105.15	15.85	331	1B69	7017
103.5	103.6	103.55	17.45	367	19BE	6590
102.4	102.1	102.25	18.75	392	18D4	6356
101.4	101	101.2	19.8	411	1806	6150
101.1	100	100.55	20.45	436	1759	5977
100.7	99.4	100.05	20.95	446	170B	5899
100.4	99	99.7	21.3	466	1671	5745
100.1	97	98.55	22.45	545	145C	5212
98.8	97	97.9	23.1	735	107B	4219
98	96.1	97.05	23.95	783	0FBF	4031
96.4	95.4	95.9	25.1	1008	0D07	3335
95.5	94.5	95	26	1094	0C20	3104

Tablo 7'nin devamı

94.1	93.3	93.7	27.3	1398	0A17	2583
92.7	91.6	92.15	28.85	2003	076B	1899
92.2	91.2	91.7	29.3	2433	0645	1605
92	91	91.5	29.5	2610	05EA	1514
91.2	89.9	90.55	30.45	5510	031C	796
89.7	89.6	89.65	31.35	83000	64	100

Tablo 8. Laboratuvar testi kapasitif prop sonuç tablosu

Kauçuk				Kapasitif Prop		
Sol ölçüm (mm)	Sağ Ölçüm (mm)	Ortalama (mm)	Aşınma (mm)	Kapasitans (1 kHz, pF)	Frekans (HEX)	Frekans (Hz)
121.3	120.7	121	0	979	0CFC	3324
120.8	118.8	119.8	1.2	973	0CEB	3307
120	118.2	119.1	1.9	977	0CE4	3300
118.7	118.1	118.4	2.6	977	0D37	3383
118.7	117.5	118.1	2.9	962	0D39	3385
117	117	117	4	930	0D80	3456
116.6	116.6	116.6	4.4	937	0D7F	3455
115.9	115.6	115.75	5.25	922	0D8E	3470
115.5	115	115.25	5.75	917	0DB5	3509
114.8	114.1	114.45	6.55	921	0D80	3456
114.3	113.7	114	7	888	0DE5	3557
113.5	112.8	113.15	7.85	892	0DE1	3553
113	113	113	8	890	0DE3	3555
112.6	111.9	112.25	8.75	870	0E14	3604
112.6	111.8	112.2	8.8	867	0E0D	3597
112.6	112	112.3	8.7	869	0DF8	3576
111.4	111.7	111.55	9.45	863	0E39	3641
110.9	111.1	111	10	869	0DF9	3577
110	109.7	109.85	11.15	855	0E31	3633
109.5	107.6	108.55	12.45	846	0E41	3649
108.2	106.7	107.45	13.55	821	0E87	3719
106.6	106.5	106.55	14.45	825	0E75	3701
105.5	104.8	105.15	15.85	799	0ECB	3787
103.5	103.6	103.55	17.45	780	0F01	3841
102.4	102.1	102.25	18.75	778	0F0F	3855
101.4	101	101.2	19.8	750	0F46	3910
101.1	100	100.55	20.45	754	0F4B	3915
100.7	99.4	100.05	20.95	754	0F47	3911
100.4	99	99.7	21.3	734	0F73	3955
100.1	97	98.55	22.45	732	0F70	3952

Tablo 8'in devamı

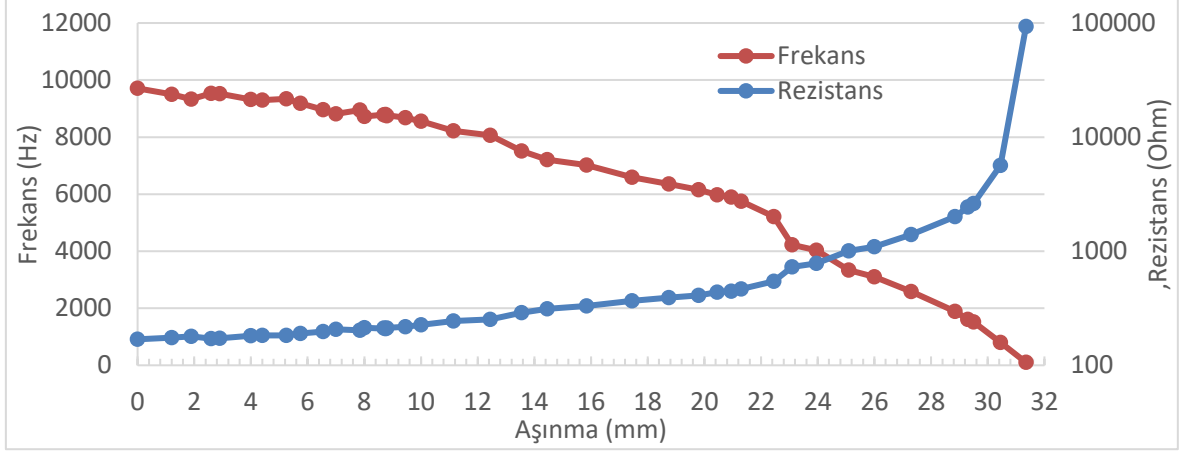
98.8	97	97.9	23.1	713	0FC3	4035
98	96.1	97.05	23.95	711	0FC9	4041
96.4	95.4	95.9	25.1	691	100F	4111
95.5	94.5	95	26	693	0FE2	4066
94.1	93.3	93.7	27.3	651	1027	4135
92.7	91.6	92.15	28.85	665	102E	4142
92.2	91.2	91.7	29.3	642	10C5	4293
92	91	91.5	29.5	640	10D1	4305
91.2	89.9	90.55	30.45	662	110D	4365
89.7	89.6	89.65	31.35	620	111A	4378

Tablo 7’de aşınma miktarına göre rezistans değerindeki artış ve buna bağlı olarak frekans değerindeki düşüş görülebilmektedir. Aşındırma işleminin başında 121 mm olan kauçuk, işlem sonunda 89.6 mm ‘ye düşmüş bunun karşılığında frekans değeri 9.7 kHz’den 100 Hz’ye kadar düşmüştür. Aşınma işleminin son aşamasında prop açık devre olmuş ve çıkış frekansı olarak açık devre frekansı görülmüştür. Toplam aşınma 31.5 mm olarak kumpasla ölçülmüştür.

Benzer şekilde kapasitif prop frekans başlangıç değeri 3.33 kHz olup aşınma sonunda bu değer 4.37 kHz’ye çıkmıştır. Aşınma gerçekleştikçe, kapasitif probun kapasitans değeri düşmüş bunun neticesinde frekans, rezistif prop aksine yükselmiştir. 31.5 mm aşınma değerine karşılık kapasitif probta frekans değişimi yaklaşık 1 kHz dir. Kapasitif probun algılama skalası 100 mm ye ayarlanmış iken rezistif probun algılama skalası 50 mm’ye ayarlanmıştır. Ancak deney başlarında sistemin tam olarak oturması ve deneme provaları ile yaklaşık 20 mm’lik kısım eritilmiş ve testler, kalan 30 mm sensör skalası ve 80 mm’lik lifterbar kalınlığı üzerinden gerçekleştirilmiştir.

3.1. Rezistans ve Frekans - Aşınma Eğrisi

Tablo 7’deki veriler kullanılarak aşınmaya bağlı olarak rezistans ve frekans değerleri grafikte Şekil 52’de gösterilmiştir.

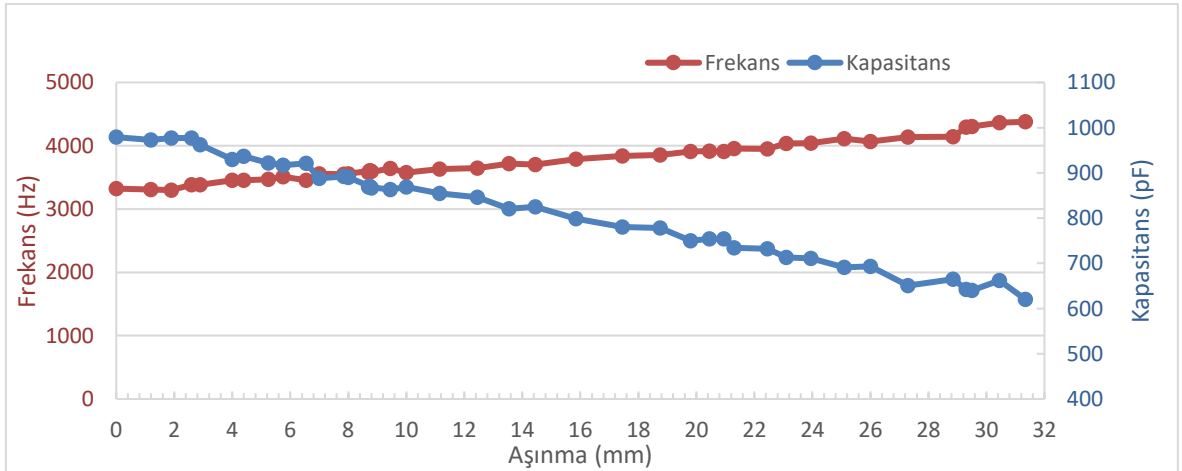


Şekil 52. Rezistif sensör devresinin ölçtüğü frekans ve RCL metre ile ölçülen rezistansın aşınmaya göre değişimi grafiği

Şekil 52’de grafikte sol eksen frekans eksenidir. Aşınma 32 mm’ye geldiğinde frekans 100 Hz seviyesine düşmüştür. Sağ eksen rezistans eksenidir. Aşınma, son aşamaya doğru geldiğinde rezistans, çok yüksek değerlere doğru yaklaşmaktadır. Bu nedene rezistans eksenini logaritmik gösterilmiştir.

3.2. Kapasitans ve Frekans - Aşınma Eğrisi

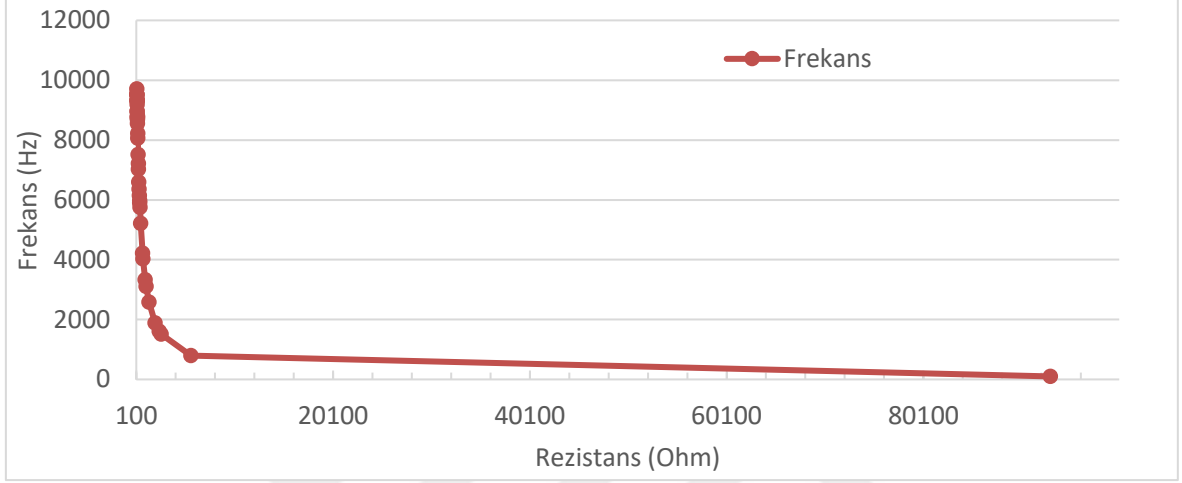
Kapasitif prop rezistif prop ile aynı şekilde aşındığı halde skala farkı nedeniyle daha yatay bir çıkış vermiştir. Hem ölçü aletiyle ölçülen kapasitans değeri hem de frekans değeri aynı grafikte aşınma miktarına göre aşağıdaki gibi çıkmıştır.



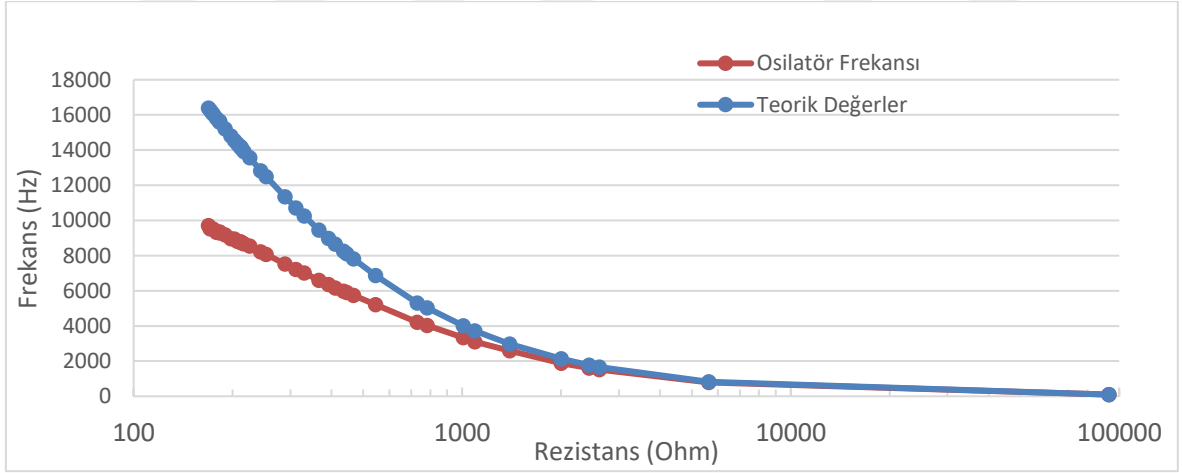
Şekil 53. Kapasitif prop devresinin ölçtüğü frekans ve RCL metre ile ölçülen kapasitansın aşınmaya göre değişimi grafiği

3.3. Osilatör Frekansı - Rezistans Eğrisi

Frekansın rezistansa göre değişimi Tablo 7'daki verilerden elde edilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 54'te verilmiştir. Görüleceği gibi aşınmanın sonlarına doğru rezistansın çok yüksek değerlere gitmesiyle frekans da 100 Hz seviyesine gelmiştir.



Şekil 54. Sensör devresinin ölçtüğü frekansın rezistansa göre grafiği

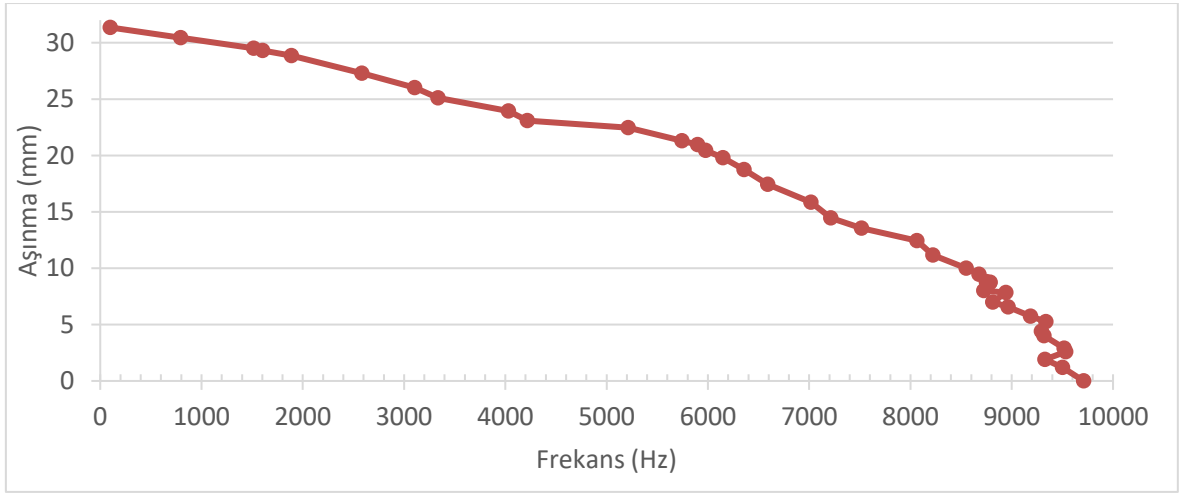


Şekil 55. Rezistif sensör devresi çıkışı ile Denklem (22)'ye göre hesaplanan logaritmik ölçekte frekans eğrisi ve sensör çıkışı frekans eğrisi

Üretilen rezistif sensör çıkış frekansı aşınmanın başlarında, yani düşük direnç ve yüksek frekans değerlerinde hesaplanan teorik frekans değerlerinden Şekil 55'te gösterildiği gibi bir miktar farklı çıkmıştır. Grafiğin yatay eksenini logaritmik olarak ölçeklendirilmiştir. Yüksek rezistans veya düşük frekans değerlerinde teorik olarak

hesaplanan frekansın ise gerçekleşen çıkış frekansına yakınlığı ve belli değerden sonra tam olarak örtüştüğü görülmüştür. Bu durumun olası sebebi rezistif sensör direnç değerinin deneysel belirlenen değere göre düşük gerçekleşmiş olduğu düşünülmüştür. Düşük rezistans, kapasitör akımının yükselmesine sebep olmuştur. Yüksek kapasitör akımı besleme devresinin akım kapasitesini zorlamış ve muhtemelen besleme devresinde gerilim düşümü oluşturmuştur.

3.4. Aşınma - Frekans Grafiği

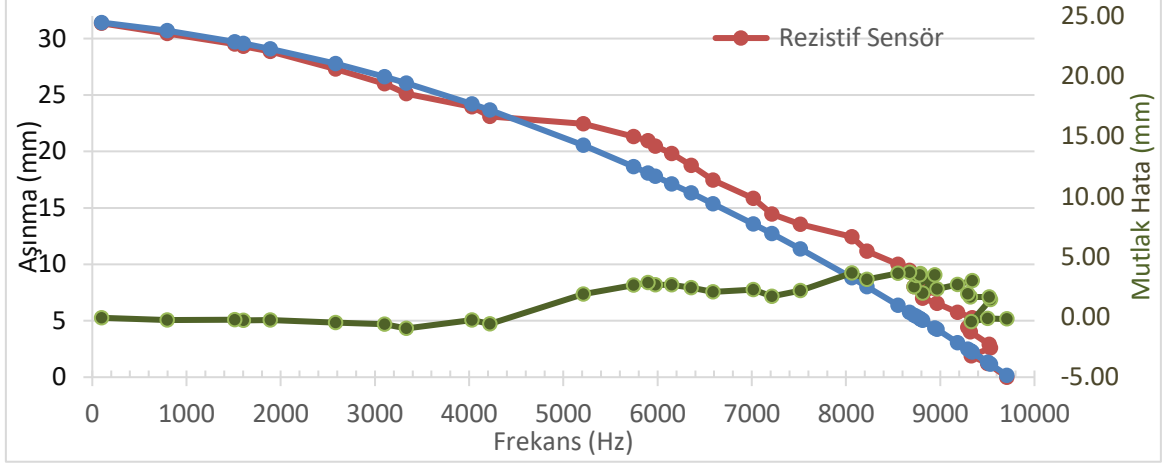


Şekil 56. Frekans değerine bağlı olarak aşınma eğrisi

Şekil 56'da verilen frekansa bağlı aşınma eğrisine ileri dönem aşınma tahmini için bir eğri uydurularak polinom fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan polinom aşağıdaki gibidir:

$$-0.00000025 X^2 - 0.0008 X + 31.5 \quad (26)$$

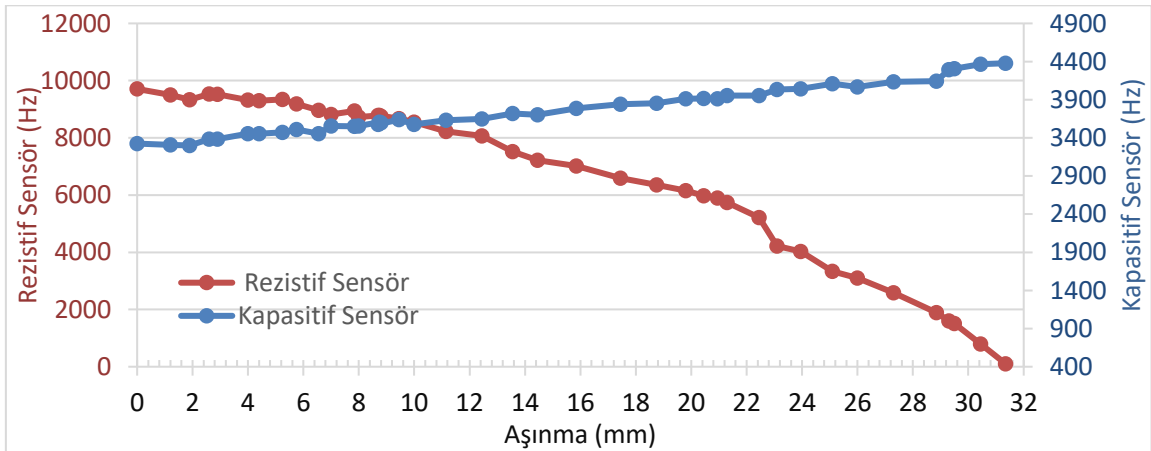
Oluşturulan eğri Şekil 57'de gösterilmiştir. Aşınmanın başlarında oluşan eğri oturmamış gibi görünse de aşınma ilerledikçe eğri alınan değerlere oturmuştur. Özellikle 22 mm'den sonraki değerler oldukça yakındır. Uydurulan polinom ile alınan değerler arasındaki fark değeri hata değeri olarak tanımlanmıştır. Bu durumda frekanstan aşınmaya dönüşümde ortaya çıkan en yüksek hata yaklaşık 4 mm'dir. 30 mm'lik sensör skalasında oluşan 4 mm mutlak hata yaklaşık %13 bağıl hataya eşit olmaktadır.



Şekil 57. Frekansa bağlı aşınma eğrisi, uydurulan polinom ve mutlak hata

Hata değeri frekans yüksek olduğunda yüksek çıkmıştır, ancak frekans 4 kHz civarına indiğinde mutlak hata değerinin 1 mm'nin altında olduğu görülmüştür. Frekans yüksek iken hatanın fazla çıkmasının bir sebebi, düşük prop rezistansı değerlerinde boost konvertör çıkış akımının kapasitör şarj akımından düşük kalmasının olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla frekans bu değerlerde asıl olması gereken değerin bir miktar altında kaldığından doğal olarak hata değerinde yükselme olmuştur. Başka bir sebep olarak ise düşük direnç değerlerinde mekanik darbelerin kauçuk ile prop arasındaki elektriksel iletme etkisinden dolayı oluşan direnç değişimlerinin toplam prop direncine göre yüksek kalmış olduğu düşünülmüştür.

3.5. Rezistif Sensör ve Kapasitif Sensör - Aşınma Grafiği

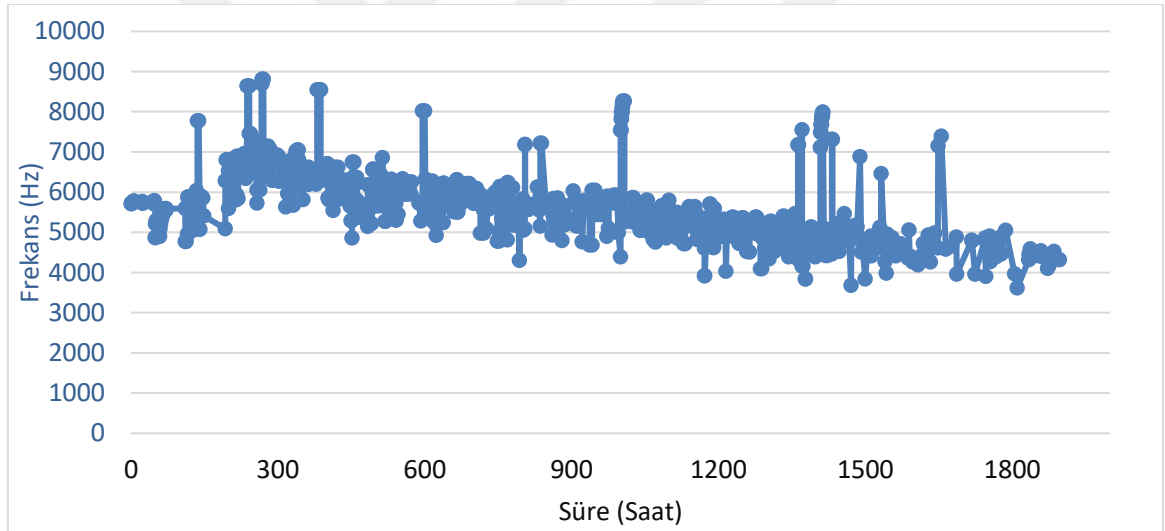


Şekil 58. Rezistif sensör ile kapasitif sensör frekans verilerinin karşılaştırılması

Şekil 58'deki eğrilerde görülebileceği gibi rezistif sensör çıkış frekansı aşınma miktarıyla ters orantılı olarak azalmaktadır. Kapasitif sensör ise kapasitans değeri azaldığı için frekans değeri artmaktadır. Kapasitif sensör parça parça kapasitörlerden meydana geldiği için frekans değeri basamak şeklindedir. Hassasiyet kullanılan kapasitör paket boyutuna bağlıdır. Kullanılan paket boyutu 805 (20x12mm) olduğu için hassasiyet 1.2mm den yüksek değildir. Rezistif sensör yapısı farklı olduğu için yapısı kapasitif sensör gibi ayrıktır; sürekli. Dolayısıyla hassasiyet daha iyidir.

3.6. Gerçek Ortam Verileri

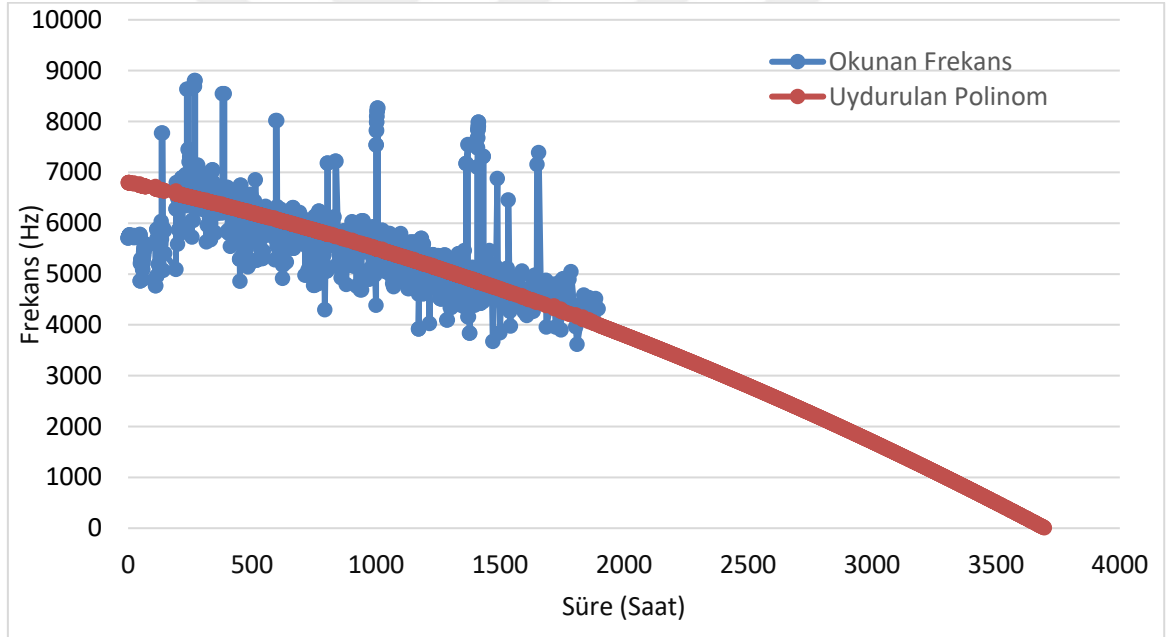
Sensör, Bingöl ilinde bir cevher değirmenine yerleştirilmiş ve sonuçlar alınarak incelenmiştir. Sensör yerleştirilen değirmen bilyeli bir cevher değirmenidir.



Şekil 59. Bilyeli cevher değirmenine yerleştirilmiş sensörlü lifterbardan alınan işlenmemiş frekans verileri

Şekil 59'da gerçek değirmenden alınan veriler bir grafik üzerinde çizilmiştir. Grafikte yatay eksen sensörlerin yerleştirilmesinden itibaren geçen süreyi saat cinsinden temsil etmektedir. Yerleşimden bu yana 2000 saat yani 83 güne yakın zaman geçmiştir. İlk 150 saat süresince lifterbarların yerleşimi ve değirmenin diğer işlemleri devam ettiği için değirmen düzenli olarak çalıştırılmamıştır. Değirmenin düzenli çalışma süreci ilk 150 saatten sonra başlamıştır. 7.5 kHz değerlerinden başlayan frekans değeri 2000 Saatlerinde 4 kHz seviyelerinde düşmüştür.

Grafikte görülen çıkış frekansındaki kısa süreli piklerin sebepleri değirmen içerisinde oluşan lifterbara gelen bilye darbelerinin olduğu düşünülmüştür. Lifterbar darbe aldığı anda içerisine yerleştirilen prop mikron seviyesinde esnemekte ve yüzeyiyle olan temas miktarı değişmektedir. Temas yüzeyindeki değişim iletkenliği değiştirdiği için çıkış frekansında değişim oluşmaktadır. Bu tür değişimler düşük frekans sapmalarına sebep olmuştur. Madenin ve bilyelerin toplu bir şekilde lifterbara baskı yapması durumunda proplar ve lifterbar malzemesi birbirine doğru basılarak temas yüzeyini arttırmış, bu durumda da yüksek frekans piklerine sebep olmuştur. 1000 ,1500 ve 1700 saatlerindeki yüksek frekans değerlerindeki düzenli artış yönündeki sapmalar, değirmenin bir gün kadar durmasına işaret etmektedir. Hareketsiz bir şekilde duran prop ve kauçuk zamanla yerleşerek temas yüzeyini arttırmakta bu nedenle de iletkenlik artmaktadır. Bu durum frekansta artış olarak karşımıza çıkmıştır.



Şekil 60. Değirmen sensör verilerine uyundurulan polinom eğrisi

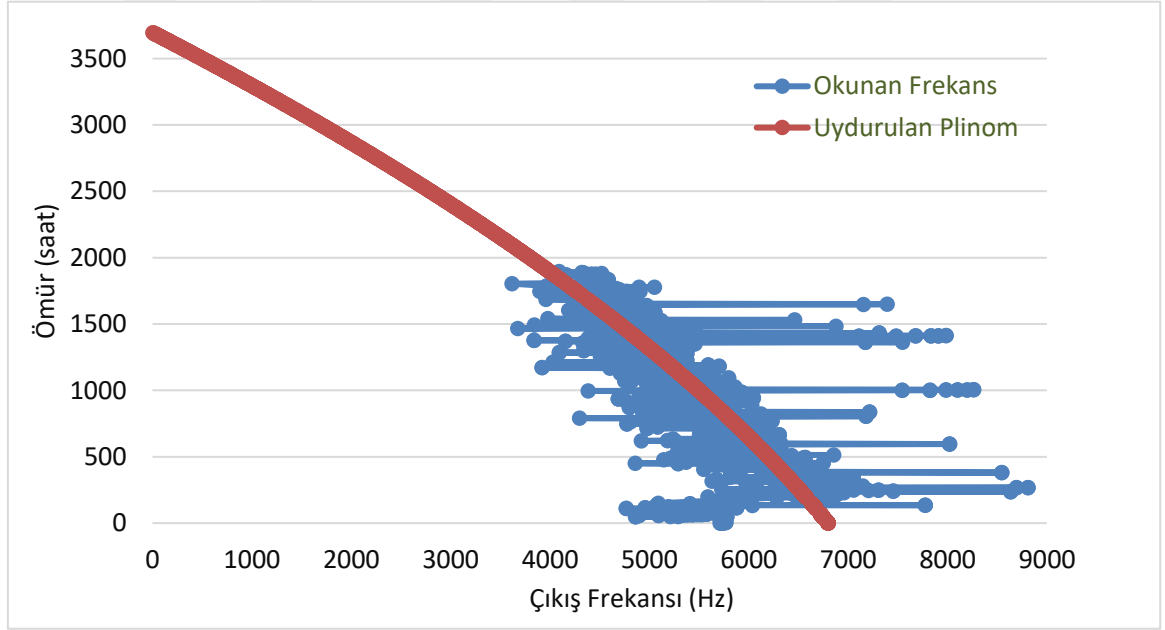
Şekil 59'daki cevher değirmeninden gelen frekans verilerinin üzerine bir polinom uydurulmuştur. Uydurulan polinom Şekil 60'da gösterilmiştir, ikinci dereceden bir polinomdur ve ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$-0.0002 X^2 - 1.1 X + 6800 \quad (27)$$

Uydurulan ve ifadesi Denklem (27)'de verilen polinom sayesinde Şekil 60'ta görülebileceği gibi frekans değeri yaklaşık 3700 saatinde 0'a yaklaşmakta ve sensör son aşamaya gelmektedir. Gelen frekans verilerinden elde edilmiş olan Denklem (27)'deki polinom sayesinde aşınma kestirimi yapılmıştır.

3.7. Frekansa Bağlı Ömür Eğrisi

Şekil 60'da verilen eğriler eksen dönüşümü yapılarak frekansa bağlı geçen zamanın eğrisi oluşturulmuştur. Söz konusu eğri Şekil 61'de gösterilmiştir. Şekildeki grafik, verilerde ve uydurulan polinomda herhangi bir değişiklik yapılmadan yalnızca Şekil 60'da verilen grafikteki eksenler değiştirilerek oluşturulmuştur.

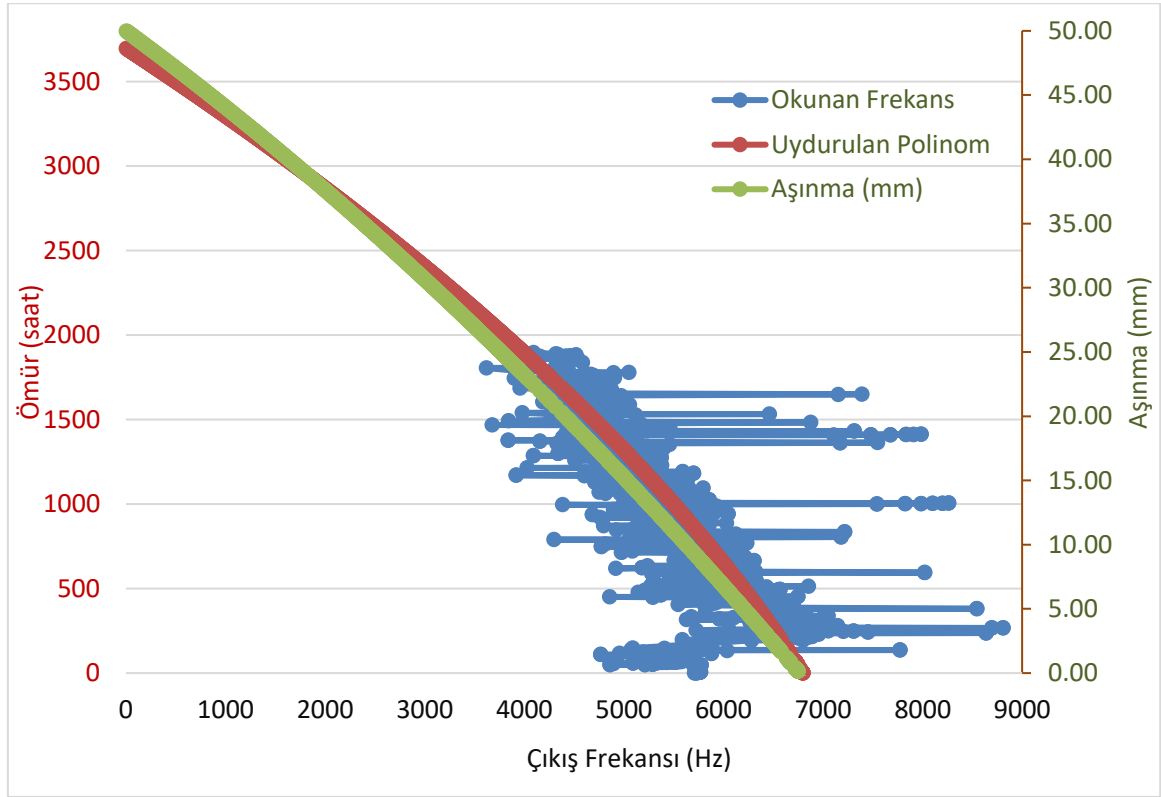


Şekil 61. Frekansa bağlı ömür grafiği

Şekil 61'de Hz olarak frekansa bağlı, saat olarak ömür eğrisi verilmiştir. Laboratuvar şartlarında elde edilen verilere uydurulan Denklem (26)'daki polinom yalnızca başlangıç değeri ve eğimi değiştirilerek uyarlandığında, dolayısıyla laboratuvar şartlarında oluşturulan rezistans frekans karakteristiği kullanılarak yeni bir polinom ifadesi oluşturulmuştur. Bu polinom ifadesi frekans verilerinden aşınma verisinin milimetre olarak elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulan polinom ifadesi aşağıdadır:

$$-0.00000025 X^2 - 0.0057X + 50 \quad (28)$$

Oluşturulan polinom eğrisi Şekil 62’de çizilmiştir. Bu grafikte gösterildiği gibi 3700 saatin sonunda ulaşılan aşınma miktarı 50 mm olmaktadır. Bu değer sensör skalasının sonu olan değerdir.



Şekil 62. Aşınma miktarının hesaplanması için kullanılan polinom eğrisi

Şekil 62’de gösterildiği gibi laboratuvar testlerinde elde edilen polinom gerçek ortamda gelen sensör frekans verilerine uygulanarak bir aşınma değeri elde edilebilmiştir. Bu aşınma değerine frekans değerinin en düşük değeri olan 100 Hz değeri girildiğinde sonuç olarak aşınmanın son aşamaya geldiği süre bilgisi saat olarak elde edilmektedir. Bu sayede grafikte de gösterildiği gibi bir kestirim yapılmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada sunulan lifterbarlar için aşınma ölçüm sistemi, lifterbar kauçuğunun kendisini sistemin bir bileşeni olarak kullanarak aşınma durumunun canlı olarak takip edilebilmesini sağlamaktadır. Kauçuğa yerleştirilen propların oluşturduğu elektrik alanının etkisinde kauçuğun iletkenliğine bağlı olarak bir akım akar. Bu akım, aşınmaya bağlı olarak kesitin azalmasıyla Denklem (24)'te ifade edilen Ohm kanununa göre iletkenliğin değişiminden dolayı azalmaktadır. Kullanılan gevşeme osilatörü ile kapasitörün dolma boşalma akımının lifterbardan geçen akım olması sebebiyle aşınmaya bağlı olarak bir frekans üretilmektedir. Bu frekans bilgisi aşınma miktarının da bilgisidir. Frekans bilgisi kullanılan mikrodenetleyici devre ve Lora modülü sayesinde değirmen içerisinden değirmen dışındaki bir alıcıya gönderilmiştir. Bu şekilde aşınma miktarı canlı olarak takip edilebilmiştir.

Sensör bir batarya destekli olduğu için sensör verilerinin gönderilmesi ve ölçülmesi sıklığı batarya kapasitesine göre planlanmıştır. Test edilen değirmende bu süre saate bir ölçüm ve gönderim şeklinde olsa da her 4 gönderimden yaklaşık olarak 3'ü değirmenin dönüş pozisyonu ve bilyelerin dökülme açısı nedeniyle kesintiye uğramaktadır. Yine de ortalama 4 saatte bir gelen veri lifterbar aşınım hızının çok yavaş olduğu düşünüldüğünde yeterli olmaktadır. Bu gönderim sıklığı ile batarya ömrü yaklaşık 1200 gün olarak çıkmaktadır. Lifterbar aşınma süresi olarak 6 ay gibi bir süre düşünüldüğünde lifterbar ömrü boyunca sensör veri gönderebilmektedir. Sensör skalası 50 mm olmasına karşın lifterbar aşınma alanı yaklaşık 120 mm'dir.

Laboratuvar ortamında yapılan testte lifterbar aşınım ölçümü 30 mm boyunca uygulanarak takip edilmiştir. Şekil 52'de verilen eğride sensörün aşınma miktarını net bir şekilde gösterdiği görülmektedir. Frekans aşınma dönüşümünde laboratuvar testlerinde aşınma miktarı en az %87 doğruluk ile tespit edilebilmiştir. Gerçekleştirilen sensör ayırık değil sürekli bir sonuç veren sensör olduğu için hassasiyet gürültü ile sınırlı kalmıştır. Alınan ölçüm örnek sıklığı ve prop yerleşiminde iyileştirmeler yapılarak gürültü azaltıldığında hassasiyet de aynı oranda artacağı düşünülmüştür.

Netice olarak aşınma sensörü lifterbarlar için başarılı bir şekilde üretilmiştir. Gerçekleştirilen sensörün hassasiyet ve doğruluk kriterlerinin çıkarılması kısmında daha

detaylı çalışmalar yapılabilir. Doğruluk ve hassasiyet kriterleri sensörlerin kullanım amacına göre belirlenmelidir. Mekanik gürültülerden daha az etkilenmek için okuma sıklığı arttırılarak ortalama değer verisi gönderilmesi gerektiği düşünülmüştür.

Laboratuvar testinin dışında gerçek şartlarda bir değirmene sensörlü lifterbar yerleşimi yaptırılmıştır. Sensörlerden alınan veriler değirmen içerisinden başarılı bir şekilde değirmen dışına çıkarılıp kaydedilebilmiştir. Bu işlem için lora modülasyonu SF7 yayılma faktörü ile gerçekleştirilmiştir. Daha gürültülü ve zayıflatıcı ortamlarda bu değer SF12 değerine kadar çıkartılabilir. Değirmen dışında alınan sinyallerin gücü -50 dBm ile -110 dBm arasında değişmiştir. -110 dBm altındaki sinyallerde veri bozulmaları yaşanmıştır. Alınan veriler laboratuvar ortamındaki test ile karşılaştırılmış ve yüksek oranlarda uyumluluk gözlenmiştir. Laboratuvar ortamında elde edilen aşınma karakteristiği gerçek ortamda çalışan sensörlü lifterbara uygulanarak aşınma durumunun tespiti ve yaklaşık ömür tespiti yapılabilmektedir.

Aşınma verilerinin dışında değirmen içinin sıcaklığı hakkında bilgi veren lifterbar sıcaklığı bilgisi de veri paketinin içerisine yerleştirilerek değirmen dışından, değirmene herhangi bir müdahalede bulunmadan okunabilmektedir. Dış ortam sıcaklığına göre yaklaşık +15 derecelik bir sıcaklık değirmen içerisinde gözlenmiştir.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, maden değirmenleri için kullanılan kauçuk lifterbarların aşınma bilgisinin değirmeni durdurmaya gerek kalmadan canlı olarak takip edilebilmesi için yöntem sunulmuş ve yöntem hem laboratuvar şartlarında test edilmiş hem de gerçek bir çalışma ortamına uygulanarak çalışma performansı gösterilmiştir. Çalışma ile ilgili bazı öneriler aşağıda listelenmiştir:

- Lifterbar aşınma aralığı 5 cm lik bir kısma odaklı yapılmıştır. Aşınma alanının genişletilmesi problemlerin kauçuğa temas eden iletken kısımlarının uzatılması ile gerçekleştirilebilir. Ancak bu aşınma algılanmasının hassasiyetini düşürecektir. Hem algılama alanını genişletmek hem de hassasiyeti korumak istenirse 2'den fazla prop ve uygun frekans çevirici devre kullanılabilir.
- Gerçek değirmendeki verilerde belli sınırlar içerisinde kalan gürültüler şeklinde değerler gözlenmiştir. Bu gürültülerin sebebinin değirmenin içerisindeki kaotik hareketler sonucu oluşan vurmalar ve çarpmalar sebebiyle kauçuğun anlık hareketleri olduğu düşünülmektedir. Bu kauçuk hareketleri propların kauçuğa olan temas yüzeyini kısa süreli olarak değiştirmektedir. Bu değişimin minimize edilmesi için proplar yerleştirildikten sonra kauçuğa vulkanizasyon işlemi yapılması veya belli bir sıcaklığa kadar belli bir süre ısıtılıp bekletilerek propların kauçuğa yapışması sağlanabilir.
- Vulkanizasyon işlemi frekans sapmalarını azaltsa da mekanik gürültülere bağlı sapmalar yine de oluşabilir. Anlık verinin gönderilmesi yerine birkaç değer alınıp aritmetik ortalamaların gönderilmesi doğruluğu yükseltecektir. Sensör veri gönderme aralarında birkaç kere uyanıp frekans değeri okuyup, veri gönderme zamanında ise uyandığında aldığı ortalamaları gönderebilir.
- Verilerin Lora modülasyonu ile gönderilmesinde herhangi bir şifreleme yöntemi ve verilerin yetkilendirilmesi yöntemi uygulanmamıştır. Verilere, değirmen yakınlarındaki konumlarda üretilebilecek yanıltıcı ve bozucu girişimlere karşı yetkilendirme kodları eklenerek güvenlik artırılabilir.
- Geliştirilen bu sistem farklı ortamlardaki kauçuk aşınma ölçümlerinde, örneğin hibrit lifterbarlarda ve hardoks aşınma ölçümlerinde de kullanılabilir.

- Aşınma bilgisinin iletilmesinde kullanılan haberleşme yöntemi yine maden değirmenlerindeki aşırı yükleme bilgisinin iletilmesinde de kullanılabilir.
- Sensör doğruluğunun ve ölçüm hatalarının belirlenmesi için bir yöntem geliştirilerek önerilen sensörün ölçme hatası, doğruluğu ve hassasiyeti konusunda inceleme yapılmalıdır.
- Osilatör beslemesi için eğer bir boost regültör kullanılacak ise, boost regülatör çıkışının, rezistif sensör direncine göre çekilecek akımı karşılayabileceği şekilde hesap edilmesi gereklidir.
- Kablosuz vericilerin antenleri lifterbar kauçuğu içerisinde iyi performans vermediği için, lifterbar içerisinden veriyi daha iyi gönderebilmek için farklı anten tasarımları yapılabilir. Ayrıca lifterbar ve değirmen içerisinden farklı frekanslarda veri gönderme konusunda araştırmalar faydalı olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Altuncu, A., Çalışkan, B., Erdöl, H., Şevik, U., Berber, T., Yazıcı, E. Y., . . . Çakır, F. (2022). Development of a Real-Time Abrasion Monitoring and Forward Prediction. *17th International Mineral Processing Symposium*, 24, s. 299-308. İstanbul.
- Atwal, J. (2024, 12 25). *Relaxation Oscillator Circuit*. Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com: <https://www.ti.com/lit/ab/snoa998a/snoa998a.pdf> adresinden alındı
- Brunskil, H., Harper, P., & Lewis, R. (2015, July 20). The real-time measurement of wear using ultrasonic reflectometry. *WEAR*(332), s. 1129-1133.
- Dardona, S., Shen, A., & Tokgöz, Ç. (2018, April 15). Direct Write Fabrication of a Wear Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 18(8), s. 3461 - 3466.
- Ebyte. (2024, 6 11). E28-2G4M27S SX1281 2.4GHz Lora Module. *28-2G4M27S User Manual*.
- Erkek, S. (2007). Karbon Siyahı/Yağ ve Karbon Siyahı/Dolgu Maddesi Oranının Farklı Vulkanizasyon Sistemlerinde Epdm, Nbr ve Sbr Elastomerlerinin Fiziko-Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*. Adana.
- FKK. (2024, 11 25). *Kauçuk Astar ve Lifterbarlar*. fkk.com.tr: <https://www.fkk.com.tr/madencilik> adresinden alındı
- Kato, K., & Adachi, K. (2000). *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology*. CRC Press.
- Koçbıyık, U., & Yazgan, A. (2024). Yalıtkan Esaslı Yenilikçi Aşınma Plakaları İçin Yüksek Çözünürlüklü Aşınma Sensörü Tasarımı. *19th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematical Sciences*. İstanbul.
- M.E.B. (2012). *Osilatörler ve Filtre Devreleri*. Ankara.
- Maleki, A., Nguyen, H. H., Bedeer, E., & Barton, R. (2024, July 25). A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances. *IEEE Open Journal of The Communications Society*(5), s. 4578-4612.
- MEB. (2011). *Sentetik Kauçuk Özellikleri ve Testleri*. Ankara.
- Oğuz, B. (1993). *Aşınma Sorunları I ve Dolgu Kaynakları* (Cilt 38). İstanbul.
- Saraç, A. E., & Durak, E. (2024, Ocak 31). Pim Disk Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*.

- Schubert, T. F., & Kim, E. M. (2016). *Fundamentals of Electronics: Book 4 Oscillators and Advanced Electronics Topics*. Morgan & Claypool. doi:10.2200/S00715ED1V04Y201604DCS050
- Semtech Corporation. (2015, May). *LoRa™ Modulation Basics AN1200.22*. Semtech Semiconductor, IoT Systems and Cloud Connectivity | Semtech: <https://www.frugalprototype.com/> adresinden alındı
- Semtech Corporation. (2023, Eylül). SX1280/SX1281 Data Sheet.
- Semtech Corporation. (2024, Aralık 19). *LoRa® and LoRaWAN® AN1200.86*. Semtech Semiconductor, IoT Systems and Cloud Connectivity | Semtech: <https://www.semtech.com/> adresinden alındı
- Serdah, M., Bailey, C., Schmidt, W. R., Bansal, R., & Dardona, S. (2021, April 15). Fully Passive-Printed Wireless Wear Sensor. *IEEE Internet of Things Journal*, s. 7036-7045.
- STMicroelectronics. (2019, Ekim). STM32L051x6 STM32L051x8 Data Sheet. *DS10184 Rev 10*.
- Tobbaş, M. A. (1993). *Isıl İşlemler* (Cilt 1928). İstanbul: Prestij Basın Yayın ve Hizmetleri. doi:10.1080/03461238.1928.10416862
- Varol, T. (2016). Nano partikül takviyeli bakır esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş elektrik kontak malzemelerinin üretimi ve karakterizasyonu. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Vermeulen, L. (1985). The lifting action of lifter bars in rotary mills. *Journal Of The South African Institute Of Mining and Metallurgy*, 63, s. 38-47.
- Vigo, A. A., Vigo, R., Ourense, F., Ourense, C., & Madrid, O. (2022). *Patent No. EP 4 219 195 A1*.
- Yazıcı, E. Y., Celep, O., Şevik, U., Berber, T., Başer, O., Çakır, O., . . . Oktay, B. (2024). Değirmenlerde Gerçek Zamanlı Aşınma Takip İçin Kaplosuz Algılayıcı Ağ Sisteminin Geliştirilmesi. *Maden-Tek*. Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Ufuk KOÇBIYIK, İlköğrenimini İsmet Paşa İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2001 yılında Trabzon (YDA) Lisesi'nde tamamladı. 2001-2002 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2005 yılında bu bölümden mezun oldu. 2006 yılında askerlik görevini kısa dönem er olarak tamamladı 2006 yılından itibaren özel sektörde mühendislik alanında hizmet verdi. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2014 yılında yüksek lisans eğitimine ara verip çalışma hayatı sebebiyle İstanbul'a taşındı. İstanbul'da yine özel sektörde mühendislik hizmetleri verdi. Mecburi olarak ara verdiği yüksek lisans eğitimini 2023 yılında çıkartılan af sayesinde devam ettirme şansı buldu.