



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**YARI-DİFERANSİYEL TEMELLİ SENKRON DEMODÜLASYON
YÖNTEMİ İLE TEMASSIZ KAPASİTİF YAKLAŞIM SENSÖRÜ**

Gamze BAYRAKDAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos - 2023

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Gamze BAYRAKDAR

Tarih: 15/08/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YARI-DİFERANSİYEL TEMELLİ SENKRON DEMODÜLASYON YÖNTEMİ İLE TEMASSIZ KAPASİTİF YAKLAŞIM SENSÖRÜ

Gamze BAYRAKDAR

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2023, 60 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Prof. Dr. Hayri Arabacı

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Demirtaş

Kapasitif sensörler başta tahıl sektörü olmak üzere gıda endüstrisinde farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu kullanım alanları, gerçek zamanlı üretim sistemlerinde proseslerini izlemek ve kontrol etmek amacıyla tahıl ürünlerinin seviye tespiti, ürün varlığı veya yokluğu, nem tayini gibi alanlardır. Kapasitif sensörler, diğer sensör (optik, endüktif vb.) gruplarına göre çevre koşullarından daha az etkilenmeleri, yüksek hassasiyetleri, kolay uygulanabilirlikleri ve düşük maliyetli olmaları gibi avantajlarından dolayı gıda endüstrisinde daha çok tercih edilmektedir.

Kapasitif algılama için literatürde birçok algılama yöntemi ve devre topolojisi bulunmaktadır. Kapasitif algılamada geliştirilen yeni yöntemler veya mevcut okuma devrelerinin iyileştirilmesi ile farklı sektörlerde uygulanabilirliği her geçen gün artmaktadır. Böylelikle bu tez çalışmasında, kepek, buğday, mısır gibi tahıl ürünlerinin tespiti için temassız kapasitif ölçüm yöntemi kullanılmıştır.

Temassız kapasitif ölçüm, elektrot ile ürün arasındaki kapasitansın, ürün ile elektrot arasında fiziksel temas olmadan ölçülmesidir. Ürünün elektroda temas etmemesi

ve kepek gibi ürünlerin dielektrik katsayısının düşük olması ürünün ölçüm zorluğunu arttırmaktadır. Bu nedenle daha doğru ve hassas ölçüm için yüksek frekanslı (250kHz) sinyal ile uyarılan yarı diferansiyel senkron demodülasyon tabanlı ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Tez çalışması sonucunda kepek, razmol gibi düşük dielektrik değerine sahip ürünleri tespit eden temassız ölçüm yapan kapasitif sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarım süreçlerine başlamadan önce, ön yüz devresinin AC/DC simülasyon analizleriyle ilgili ön çalışmalar yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları ile elektrotaya uygulanan frekans değeri, transempedans (TIA) devresi, analog anahtar ve Sallen-Key alçak geçiren filtre için uygun değer aralıkları belirlenmiştir. Ayrıca, elde edilen AC simülasyon verileri kullanılarak, sensörün sıcaklığa duyarlılığını azaltmak amacıyla ön yüz devresinde bulunan TIA devresinin kazanç parametresini etkileyen giriş frekansı ve direnç değeri optimize edilmiştir. Sensör tasarımının diğer önemli parçaları olan elektrot tasarımı ve mekanik mahfaza tasarımları eş zamanlı olarak tasarlanmıştır.

Tasarımın doğrulanması amacıyla çeşitli test süreçleri ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde ürünlerin (buğday, kepek, mısır) varlığı veya yokluğundaki kazanç performansı testi, sıcaklık testleri ve gerçek zamanlı fabrika ortamına bağlanarak doldur-boşalt (var-yok) testleri gerçekleştirilmiştir. Ürünlerin var-yok durumunda kazanç testleri sonucunda en küçük değişim (37mV) oranı ile kepek ve en büyük değişim (100mV) oranı ise buğdaydır. Bu değişim oranları mikrodenetleyicilerin (STM32F103C8T6) ADC çevresel birimleri tarafından okunabilecek seviyededir. Diğer bir testte ise sensörün bağlı olduğu ortamdaki sıcaklık değişimine duyarlılığını test etmek için -10°C ile 60°C arasında 5°C'lik adımlarla sıcaklık testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde sensörün önünde herhangi bir malzeme bulunmadan, yani sensör doğrudan ortam sıcaklığını algılamıştır. Elde edilen veriler, sensör çıkışında parabolik bir azalma olduğunu göstermektedir. Toplamda, 70°C'lik sıcaklık değişiminde yaklaşık olarak 280 mV değişim gözlenmiştir ve bu değişim oranı ortalama olarak 1°C'de 4 mV değişim ile ilişkilendirilmiştir. Sensör çıkışında belirli bir set değeri altında voltaj değeri "yok" olarak kabul edilirken, set değerinin üstünde bir voltaj değeri "var" olarak kabul edilmektedir. Bu durumda, sıcaklık değişiminden kaynaklanan değişimler sensörün sıcaklığa olan duyarlılığını ve performansını etkileyebilmektedir. Sıcaklık değişiminin düşük olduğu ortamlarda, sıcaklıktan kaynaklanan 4 mV gibi düşük değerler, kepek gibi daha düşük kazanç performansına sahip ürünlerde dahi set değeri için göz ardı edilebilecek değerlerdir. Ancak, sensörün sıcaklık değişiminin yüksek olduğu ortamlarda iyi bir performans sergilemesi için sıcaklık kompanzasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda sıcaklık testleri tekrar edilmiş ve 70°C'lik sıcaklık değişiminde sensör çıkışında ortalama

olarak 15 mV değişim gözlenmiştir. Bu sayede her sıcaklık ortamı için ayrı bir set değeri ayarlama ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Bu kompanzasyon çalışmaları, sensörün sıcaklığa olan duyarlılığını azaltarak daha istikrarlı bir performans sağlamıştır. Son olarak gerçek zamanlı sistemde gerçekleştirilen testlerde ise sensör randıman kantarının üst kefesine bağlanarak, kefenin içerisindeki buğdayın doldurulması ve boşaltılması yoluyla sensörün buğdayın varlığını ve yokluğunu algılama yeteneği test edilmiştir. Gerçekleşen testlerde sensörün belirlenen set değerine ulaştığında PNP ve NPN çıkışlarının aktif olması sensörün sistem ile senkron bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Sensörün sistem ile senkron çalışması, ortamda sıcaklık değişimi olsa dahi sensör performansının sıcaklıktan dolayı oluşan etkilerden etkilenmediğini göstermektedir. Böylece yapılan testler sonucunda sensörün tasarım ve optimizasyon çalışmaları doğrulanmış ve test sonuçları bu sensör için prototip aşamasında yeterli bulunmuştur.

Sonuç olarak tez çalışması sonucunda tasarlanan temassız kapasitif sensör ile tahıl ürününün temassız olarak algılanması sağlanmıştır. Böylelikle tahıl sektöründe kullanılan problu kapasitif sensörlerin oluşturduğu ürünlerin bozulması, mekanik kırımlar gibi olumsuz problemleri azaltacak sensör tasarımı optimize edilerek test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Analog Anahtarlama, Kapasitif Sensör, Senkron Demodülasyon, Tahıl, Temassız Ölçüm

ABSTRACT

MS THESIS

CONTACTLESS CAPACITIVE APPROACH SENSOR DESIGN WITH SEMI- DIFFERENTIAL BASED SYNCHRONOUS DEMODULATION METHOD

Gamze BAYRAKDAR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN
ELECTRICAL-ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2023, 60 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Prof. Dr. Hayri Arabacı

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Demirtaş

Capacitive sensors are used in different applications in the food industry, especially in the grain industry. These usage areas are areas such as level detection of grain products, presence or absence of product, moisture determination in order to monitor and control their processes in real-time production systems. Capacitive sensors are more preferred in the food industry due to their advantages such as being less affected by environmental conditions, high sensitivity, easy applicability and low cost compared to other sensor (optical, inductive, etc.) groups.

There are many sensing methods and circuit topologies in the literature for capacitive sensing. With the new methods developed in capacitive sensing or the improvement of existing reading circuits, its applicability in different sectors is increasing

day by day. Thus, in this thesis, non-contact capacitive measurement method was used for the detection of grain products such as bran, wheat and corn.

Non-contact capacitive measurement is the measurement of the capacitance between the electrode and the product without physical contact between the product and the electrode. The fact that the product does not contact the electrode and the dielectric coefficient of products such as bran is low increases the measurement difficulty of the product. For this reason, semi-differential synchronous demodulation-based measurement method induced by high frequency (250kHz) signal is used for more accurate and sensitive measurement. As a result of the thesis, a non-contact capacitive sensor design that detects products with low dielectric values such as bran and razmol has been realized.

Before starting the design processes, preliminary studies on AC/DC simulation analyzes of the front-end circuit were made. With the simulation studies, suitable value ranges for the frequency value applied to the electrode, transimpedance (TIA) circuit, analog switch and Sallen-Key low-pass filter were determined. In addition, using the obtained AC simulation data, the input frequency and resistance value affecting the gain parameter of the TIA circuit in the front face circuit are optimized in order to reduce the sensitivity of the sensor to temperature. Electrode design and mechanical housing designs, which are other important parts of the sensor design, were designed simultaneously.

Various test processes and optimization studies were carried out to verify the design. In the tests performed, gain performance test in the presence or absence of products (wheat, bran, corn), temperature tests and fill-empty (presence-absence) tests were carried out by connecting to the real-time factory environment. In the presence or absence of products, as a result of gain tests, bran with the smallest change (37mV) and the largest change (100mV) is wheat. These change rates are at a level that can be read by the ADC peripherals of the microcontrollers (STM32F103C8T6). In another test, temperature tests were carried out in 5°C steps between -10°C and 60°C to test the sensitivity of the sensor to the temperature change in the environment it is connected to. In these tests, the sensor directly detected the ambient temperature without any material in front of the sensor. The obtained data show a parabolic decrease in the sensor output. In total, approximately 280 mV change was observed at 70°C temperature change, and this rate of change was associated with an average of 4 mV change at 1°C. At the sensor output, voltage value below a certain set value is considered "absent", while a voltage value above the set value is considered "available". In this case, changes caused by temperature changes may affect the sensitivity of the sensor to temperature and its performance. In environments where temperature change is low, values as low as 4 mV caused by temperature can be ignored for the set value even in products with lower gain performance

such as bran. However, temperature compensation studies have been carried out in order for the sensor to perform well in environments with high temperature changes. As a result of these studies, the temperature tests were repeated and an average of 15 mV change was observed at the sensor output at a temperature change of 70°C. In this way, the need to set a separate set value for each temperature environment is eliminated. These compensation studies provided a more stable performance by reducing the sensitivity of the sensor to temperature. Finally, in the tests performed in the real-time system, the sensor's ability to detect the presence and absence of wheat was tested by connecting the sensor to the upper pan of the yield scale and filling and emptying the wheat in the pan. In the tests carried out, it has been observed that the PNP and NPN outputs are active when the sensor reaches the determined set value, and the sensor works synchronously with the system. The synchronous operation of the sensor with the system shows that the sensor performance is not affected by the effects caused by the temperature, even if there is a temperature change in the environment. Thus, as a result of the tests carried out, the design and optimization studies of the sensor were confirmed and the test results were found sufficient for this sensor at the prototype stage.

As a result, with the non-contact capacitive sensor designed as a result of the thesis study, the grain product was detected without contact. Thus, the sensor design, which will reduce negative problems such as deterioration of the products formed by the probe capacitive sensors used in the grain industry, and mechanical diffraction, has been optimized and tested.

Keywords: Analog Switching, Capacitive Sensor, Grain, Non-Contact Measurement, Synchronous Demodulation

ÖNSÖZ

"Yarı-Diferansiyel Temelli Senkron Demodülasyon Yöntemi ile Temassız Kapasitif Yaklaşım Sensörü" tezi, temassız kapasitif yaklaşım sensörlerinin yarı diferansiyel senkron demodülasyon yöntemi ile yapılan araştırmaların sonuçlarını ve analizlerini sunmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu tez çalışması, hem silolardaki seviye sensörlerinin genel kullanılabilirliğini incelemekte hem de tahıl endüstrisinde temassız kapasitif yaklaşım sensörlerinin var yok sensörü olarak potansiyelini araştırmaktadır. Ayrıca yarı-diferansiyel temelli senkron demodülasyon yöntemi, sensörün hassasiyetini ve doğruluğunu artırarak tahıl varlığını tespit etme yeteneğini geliştirmeyi hedeflenmiştir. Umarım, bu çalışma, tahıl endüstrisindeki uygulamalar için yeni bir çözüm sunar ve ilgili araştırmacılar için faydalı bir kaynak olur. Tez, çeşitli kaynakların incelenmesi ve araştırma çalışmalarının analiz edilmesiyle zenginleştirilmiştir. Tezin sonuç ve öneriler bölümlünde, bu kaynaklardan elde edilen değerli bilgiler ve sonuçlar ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır.

Gamze BAYRAKDAR

KONYA-2023

TEŞEKKÜR

Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan bu çalışmamda; danışmanlığımı üstlenen, tez çalışmasının yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında Ar-Ge, saha tecrübesi, ikili iş birlikleri ve maddi imkanlar konusunda desteklerini esirgemeyen; Endüstriyel Elektrik Elektronik San. ve Tic. A.Ő. ve birimlerine, katkılarından dolayı teşekkür ederim. Bu tez çalışması sırasında TÜBİTAK TEYDEB 1511 3200597 numaralı projeye desteklerinden ötürü Tübitak'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tez çalışmam sırasında bana destek oldukları için aileme ve sevdiklerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
ÖNSÖZ	x
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
ÇİZELGELER LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ VE LİTERATÜR TARAMASI	1
1.1. Silolarda Kullanılan Seviye Sensörleri	3
1.1.1. Elektromekanik Sensörler	4
1.1.1.1. Titreşim Proble Sensörler	4
1.1.1.2. Mekanik Rotor (Pedallı-Bayrak) Sensörleri	4
1.1.2. Elektriksel Sensörler	4
1.1.2.1. Lazer Sensörler	5
1.1.2.2. Mikrodalga Tabanlı Sensörler	5
1.1.2.3. Ultrasonik Sensörler	5
1.1.2.4. Kapasitif Sensörler	6
1.2. Tezin Önemi	9
1.3. Tezin Amacı	9
1.4. Tezin Yapılandırılması	10
2. ÖNYÜZ TASARIMI VE SİMÜLASYON	12
2.1. Sensör Tasarımı	12
2.1.1. Kapasitif Sensör Teorik Altyapı	12
2.1.2. Elektronik Devre Tasarımı ve Simülasyon	16
2.1.2.1. Mikrodenetleyici Özellikleri	19
2.1.3. Elektrot Tasarımı ve Test Sonuçları	20
2.2. Optimizasyon	21
2.2.1. Sensör Optimizasyonu	21
2.2.2. Sıcaklık Testleri	22

2.2.2.1. NTC Nedir ve Özellikleri	22
2.2.3. Sıcaklık Optimizasyonu	24
2.2.3.1. Polinom Eğri Uydurma.....	26
2.2.4. Otomasyon için Donanım Optimizasyonu	26
2.3. Mekanik Tasarım ve Entegrasyon	27
2.3.1. Muhafaza Tasarımı.....	27
2.3.1.1. Ara aparat ve Arka Kapak Tasarımı	28
3. TESTLER	30
3.1. Saha Ortamına Bağlanması	30
3.2. Saha Testleri	30
4. TEZ AMACININ DOĞRULANMASI	33
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	35
5.1. Gelecek Çalışmalar için Öneriler	36
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Silolarda Kullanılan Seviye Sensörleri (Hunt, 2007).	3
2.1 Paralel Plaka Kapasitör (Prit vd., 2019).	12
2.2 Genlik Modülasyonu (AM) (Faruque, 2017)	14
2.3 Yarı diferansiyel senkron demodülasyon yöntemi blok diyagramı (Senturia, 2005).	15
2.4 Yarı diferansiyel yapısı (Senturia, 2005)	15
2.5 Transempedans Yükselteç Temelli Tek Uçlu Kapasitif Sensör Ön Yüz Devresi (Senturia, 2005).	15
2.6 Analog Anahtar Temsili Gösterimi (Kara vd., 2022).	16
2.7 Sallen-Key Alçak Geçiren Filtre (Majumder, 2017).	16
2.8 Temassız Kapasitif Yaklaşım Sensörü Blok Diyagramı.	17
2.9 Yarıdiferansiyel Transempedans Yükselteç Devresi.	17
2.10 Transempedans AC Analiz Sonucu	18
2.11 Yarı Diferansiyel Senkron Demodülasyon Temelli Sensörün Elektronik Devresi.	18
2.12 Modülasyonlu Sinyal	19
2.13 Analog Anahtar Çıkışı	19
2.14 Alçak Filtre Çıkışı	19
2.15 Elektrot Tasarımının Birden Fazla Görüntüsü	21
2.16 -10°C den 60°C Arasında 5°C'lik Artımlarla Ring Sıcaklık Testi ve Sıcaklık Verileri.	23
2.17 Sıcaklık Testi ve Optimizasyon Verileri.	26
2.18 Muhafaza Tasarımı	28
2.19 Ara Aparat ve Arka Kapak Tasarımı	29
3.1 Randıman Kantarı ve Saha Ortamı.	30
3.2 Kapasitif Yaklaşım Sensörünün Sahaya Bağlanması.	31
3.3 Temassız Kapasitif Yaklaşım Sensörü Test Sonuçları.	32
3.4 Temassız Kapasitif Yaklaşım Sensörü Test Sonuçları Yakın Gösterimi. ...	32

ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Kazanç Tablosu	21
2.2 Sıcaklık ve Veri Tablosu	25

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C : Derece-Santigrat

Kısaltmalar

C : Kapasitans (Farad)

A : Akım

V : Voltaj

f : Frekans

Phi : Faz

M : Mega

k : Kilo

Hz : Hertz

Q : Toplam Yük Miktarı (Coulombs)

ϵ : Dielektrik sabiti (F/m)

A : Paralel kapasitörlerde plaka alanı (m²)

d : Paralel kapasitörlerde plakalar arası mesafe (m)

TIA : Transempedans Yükselteci

AC : Alternatif Akım

DC : Doğru Akım

MCU : Mikrodenetleyici

pF : Pikofarad

fF : Femtofarad

aF : Attofarad

SNR : Sinyal Gürültü Oranı

NTC : Negatif Sıcaklık Katsayısı (Negative Temperature Coefficient)

NPN : N-tipi Pozitif-Negatif

PNP : P-tipi Negatif-Pozitif

TAR : Hava Aracılığıyla Radar (thru-air radar)

KDR : Kılavuzlu Dalga Radarı

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR TARAMASI

Tarım ticareti ilk gelişmelerden bu yana insanın temel uğraşlarından biri olmuştur. Tarımda mevcut ve gelecekteki gıda taleplerinin karşılanabilmesi için üretim ve hasadın verimli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Tarımda insanlar öncelikle gıda arzını sağlamak için üretim yaparlar. Tahıl, insan ve hayvancılıkta büyük bir yere sahiptir. Tahılın bu kadar önemli olmasının nedeni, en temel gıda ürünlerinden biri olmasıdır. Bu yönüyle tahılın tarımdaki payını artmaktadır.

Tahılların yetiştirilmesi, toplanması ve depolanması büyük bir uğraş gerektirir. Tahılın mevsim şartları nedeniyle yılda ancak bir kez hasat edilebildiğinden, hasat edilen ürünlerin yıl boyunca kullanılabilmesi için iyi muhafaza edilmesi gerekmektedir. Tahılların hasat sonrası kayıpları, uygun tahıl depolama tesisleri ve yönetimi uygulanarak önemli ölçüde azaltılabilir (Singh ve Fielke, 2017). Tarımda silolar, tahılı depolamak ve onu böceklerin, kemirgenlerin, kuşların saldırılarına karşı korumak için kullanılır (Agrawal vd., 2016). Ayrıca, büyük miktarlarda tahılın uzun süreli muhafaza ile depolanması için bir ortam sağlarlar (Agrawal vd., 2016). Tahıl silosunun rolü, tahılı sınıflandırmak, tartmak, temizlemek, kurutmak, kısacası, basit depolamaya ek olarak, müşterinin isteğine göre belirli bir tahıl türünü hazırlamaktır (Lakhoua, 2013).

Son yıllarda tahıl depolamak için silolar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kryvenchuk vd., 2021). Silolar genellikle betonarme, paslanmaz çelik veya galvanizli saclardan yapılır (Yerli, 2013). Metal bir silo, galvanizli bir demir sacdan yapılmış ve hava geçirmez şekilde kapatılmış silindirik bir yapıdır, bu sebeple içerideki oksijeni ortadan kaldırır ve içeride olabilecek zararlı böcekleri öldürür (Tefera vd., 2011). Depolama kayıplarını önlemek ve gıda güvenliğini artırmak için metal siloların kullanımı teşvik edilmelidir (Tefera vd., 2011).

Silodaki tahıl depolamanın yanı sıra, içindeki tahıl durumunun izlenmesi gerekir. Silo içindeki tahıl miktarını veya hacmini ölçecek etkin bir sistem olmadan, tahıl stokunun doğru ve verimli yönetimini engellemekte, bu da bazen insanlarda tahıl kıtlığına, çiftçiler ve endüstriler için kayıplara ve tahıl israfı gibi sorunlara sebep olurken silo içeriğinin sürekli izlenmesi yoluyla çiftçiler ve silo

sahipleri silodaki hububat hacmi hakkında güncellemeler yaparak, tahılların piyasadaki mevcudiyetine ve piyasadaki tahıl fiyatlarına göre bir sonraki stoğu ne zaman satın almaları gerektiğini planlayabilirler (Agrawal vd., 2016). Tahıl depolama durumunu (hem donanım hem de yazılım) izleme ve kontrol etme konusundaki son teknolojik gelişmeler artık tahılın minimum kalite kaybıyla birkaç yıl boyunca güvenli bir şekilde depolanmasına yardımcı olmaktadır (Singh ve Fielke, 2017).

Tahıl depolamada kullanılan birçok geleneksel yöntem, süreç ve araç, gelişen teknolojiler nedeniyle sürekli olarak otomatik sistemler ve sensörler ile değiştirilmektedir (Jayas vd., 2007). Silolardaki durum değişiklikleri hakkında bilgi toplamak için yüksek hassasiyetli sensörler kullanılır (Markova vd., 2011). Hangi sensörün seçileceği, izlenecek ürünün sıcaklık, basınç, nem veya malzeme seviyesi gibi fiziksel özelliklerine bağlıdır (Dargie ve Poellabauer, 2010). Silolardaki seviye sensörleri, en düşük (minimum) ve en yüksek (maksimum) malzeme seviyelerine ulaşıldığında sinyal vermelidir ve aynı zamanda boşaltma veya yüklemenin durdurulması için bir komut vermelidir (Draganov ve Tanchev, 2005). Bu sebeple silo içerisindeki malzeme seviyesinin takibi için uygun sensör seçimidir.

Doğru ve tekrarlanabilir proses seviyesi ölçümü, endüstriyel proses kontrolü için her zaman zor bir problem olmuştur (He vd., 2014). Dökme tahıl silosu sistemi, dökme tahıl küçük parçacıklardır ve çok fazla toz, ağır su buharı içerir (Sheng vd., 2018). Birçok ürün, doldurma ve boşaltma sırasında düzensiz birikme yapmakta ve malzeme sürekli hareket halindeyken sensör çıkışında büyük dalgalanmalara neden olur (Csiba vd.). Ayrıca bazı ürünler higroskopiktir ve nemi kolayca emer veya hapseder ve nem katılarıyla birleşerek bir kap içinde topak oluşturabilir, bu da malzeme akışını zorlaştırır ve mevcut bazı seviye ölçüm teknolojilerine zorluklar getirir (Lewis Sr, 2004). Bu sebeple silolarda doğru ve hassas ölçümler için ortam şartları göz önüne alınmalıdır.

Silolarda seviye ölçümü için genellikle optik lazer tabanlı sensörler, ultrasonik sensörler, gerinim ölçer tabanlı sensörler vb. gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Pal vd., 2019). Joseph D. Lewis, yük hücresi tabanlı seviye ölçümü, ultrasonik sensör, lazer sensör ve güdümlü dalga radar sensör seviye sistemleri gibi çeşitli sensörleri kullanarak silolarda, silolarda dökme katı seviye ölçümünün farklı proseslerini bahsetmiştir (Lewis Sr, 2004). Hassas birimlerde,

kontrol edilen ortamın belirli niteliklerini (seviye) ilgili sinyallere dönüştürme ilkesine göre çalışan en geniş sensör grubu, elektriksel seviye ölçerlerdir. Bunlar direnç, kapasitif, endüktif, radar, lazer radar vb. sensörlerdir.

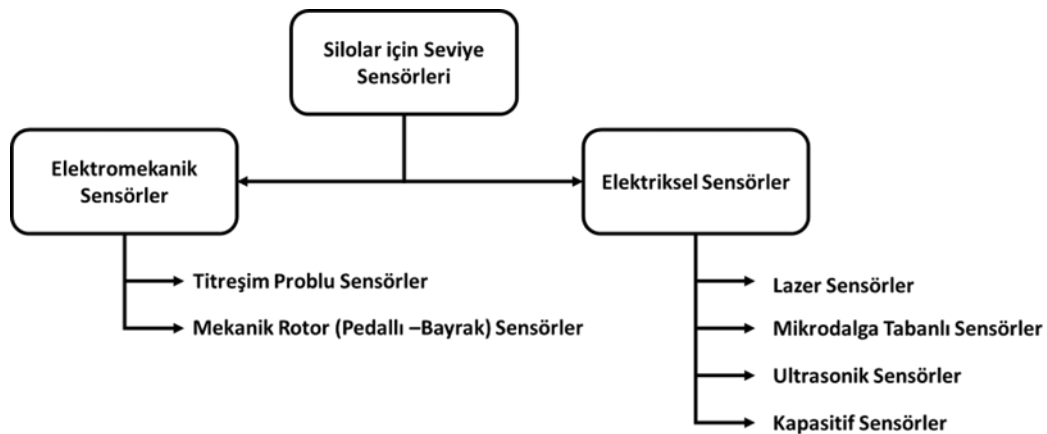
Ayrıca, sensörler ölçüm gereksinimlerine göre noktasal ve sürekli seviye ölçümleri olarak sınıflandırılabilirler (Jing, 2019; Praveen vd., 2015). Sürekli ölçüm durumunda, seviye değeri periyodik bir aralık için ölçülür (Zhang vd., 2018). Noktasal seviye ölçümü, açma/kapama anahtarları ile ilgili olarak yüksek veya düşük, boş veya mevcut olarak yapılan ölçümü gösterir (Lata vd., 2018). Noktasal seviye ölçümünün bazı örnekleri, kapasitif ve optik anahtarlardır (Ge vd., 2019). Bunun aksine, sürekli seviye ölçümü ultrasonik ve radar sensörleri içerir (Hunt, 2007).

Kullanıcı ve ölçüm arasındaki ilişkiye bağlı olarak, seviye sensörü temaslı ve temasız ölçüm olarak sınıflandırılır. (Ge vd., 2019).

Bu tez çalışmasında silolarda seviye ölçülmesinde kullanılan sensörler incelenmiş ve kategorize edilmiştir.

1.1. Silolarda Kullanılan Seviye Sensörleri

Silolarda kullanılan seviye sensörleri elektromekanik ve elektriksel olarak iki gruba ayrılır (Scott, 2018; Webster ve Eren, 2014). Şekil 1.1’de silolarda kullanılan seviye sensörleri gösterilmektedir. Mekanik sensörlerde ürün seviyesi, hareketli mekanik bir parça aracılığıyla ölçülmektedir. Elektriksel sensörler ise ürüne temas etmesi halinde oluşan elektriksel sinyallerin elektronik devreler ile anlamlandırılmasından oluşmaktadır.



Şekil 1.1. Silolarda Kullanılan Seviye Sensörleri (Hunt, 2007).

1.1.1. Elektromekanik Sensörler

En basit seviye ölçümünü sağlar. Örnek olarak, bir kabloya bağlı bir probu kaptaki malzemeye değene kadar hareket eden, ardından bir stok seviyesi ölçümü sağlamak için bırakılan mesafeyi ölçmektir (Wilson, 2004). Elektromekanik seviye ölçümleri ucuz ve basittir, ancak birçok dezavantajı vardır. Hareketli parçalar için sık sık bakım gereklidir ve özellikle tozlu silo ortamlarında hızla aşınabilirler. Silolarda genellikle mekanik seviye sensörleri tercih edilmez. Üründe bozulma, statik oluşum, ürün ile temas halinde mekanik kırım gibi olumsuz yönleri vardır.

1.1.1.1. Titreşim Probu Sensörler

Titreşim sensörlerindeki problemlerin uçlarında piezoelektrik bir yapı bulunur. Piezo-elektrik yapı belirli bir titreşim frekansına ayarlanmıştır. Piezo-elektrik yapı ürün ile temas ettiğinde ürüne vibrasyon (titreşim) geçer. Titreşimdeki bu değişiklik sensör tarafından algılanır ve bir röle çıkışına dönüştürülür (Hunt, 2007). Tek çubuklu aletler yalnızca katı malzemeler üzerinde kullanılabilirken, çift problu aletler hem sıvı hem de katı malzemeler üzerinde kullanılabilir. Titreşim problemleri tipik olarak tankın üstüne veya yanına monte edilir.

1.1.1.2. Mekanik Rotor (Pedallı-Bayrak) Sensörleri

Mekanik rotor sensörleri (Köse vd., 2015) motoru ve ucundaki pervanesi ile silo veya bunkerde katı malzeme yokken serbestçe döner. Sensörün bulunduğu ortamda zamanla katı madde (ürün) miktarı artıp dönen pervaneyi dönemeyecek kadar sıkıştırdığı zaman şaft yavaşlar veya tamamen durur. Bu durumda malzemenin cihazın takıldığı noktadaki seviyeye kadar toz veya granül seviyesine ulaştığı anlamına gelir. Bu sensörler, kullanım kolaylığı, güvenilirliği ve her türlü kuru yığınların (talaş, tahıl, bakliyat vb.) seviye ölçümü için uygulanabilirliği ile öne çıkmaktadır. Basınç ve sıcaklıktan bağımsız olarak kolay ve güvenli algılama sağlar.

1.1.2. Elektriksel Sensörler

Voltaj, akım, direnç, endüktans, kapasitans, dielektrik katsayısı, polarizasyon, elektrik alanı ve frekans gibi elektriksel değerler ölçülebilir. Farklı elektriksel özellikler (geçirgenlik ve iletkenlik), farklı boyut ve yapılardan dolayı ürünlerin yansıma, saçılma ve zayıflama özellikleri oldukça farklıdır (Vogt, 2018). Bu tür sensörler, elektromekanik sensörlere kıyasla daha uzun ömürlüdür ve daha az bakım gerektirirken, karmaşık sinyal işlemleri, onları pahalı sensörler haline getirir (Hassani vd., 2009).

1.1.2.1. Lazer Sensörler

Lazer seviye sensörleri malzeme yüzeyini aydınlatmak için bir lazer pulsleri kullanılır ve üründen yansıyan sinyal lazer sistemindeki alıcı tarafından alınır. Malzemenin mesafesi, lazer darbesinin yansıması ve üründen geri yansıyan süresi ile tahmin edilebilir (Sun ve Jiang, 2011). Lazer silo seviye sensörleri temassızdır ve uzun mesafeden tahıl seviyelerini doğru bir şekilde algılayabilir (Ren vd., 2012). Ürünlerin silo içerisinde düzgün bir şekilde birikmemesi, doğru ölçüm olasılığını azaltmaktadır.

1.1.2.2. Mikrodalga Tabanlı Sensörler

Radar tekniği ile level ölçümü genel olarak iki yöntem ile yapılır. Bunlar hava aracılığıyla radar (thru-air radar, TAR) ve kılavuzlu dalga radarıdır (KDR). KDR sinyal iletiminde dalga kılavuzunu kullanarak bilgi toplar. Tahılın dolum esnasında düzgün bir dağılım ile dolmayabilir. Bu sebeple KDR ile tek bir sensörden yapılan ölçümler yeterli olmayabilir (Duysak ve Yiğit, 2019; Yigit vd., 2018). TAR ise tahıl üzerine bir anten aracılığı ile nm boyutunda EM dalgalar gönderir. EM sinyaller tahıl yüzeyinden geri yansır. Geniş bir huzmeye sahip anten ile saçılmalar toplanır. Ancak bu tür bir TAR tekniği, yapının seviyesini ancak bir ölçüm noktasından belirleyebilir (Lewis, 2007).

1.1.2.3. Ultrasonik Sensörler

Ultrasonik sensörleri, ultrasonik sinyallerin sensöre geri yansımaları için geçen süreyi hesaplayarak temassız seviye ölçümünü sunar (Taylor ve Shirvaikar, 2010). Bu sinyaller, silonun iç kısmından yansıyan ses nedeniyle yön değiştirebilir, saçaklanma olabilir. Ve üst boşluktaki havadaki partiküller/toz tarafından bozulabilir ve ölçüm hatalarına yol açabilir. Silo içindeki tahıl seviyesini öğrenmekte kullanılmak istenirse, tahıl seviyesi okumalarını hatalı sonuçlar ortaya çıkabilir ve tahıl gibi katılar için seviye ölçüm sistemlerinde bu hatadan kaçınmak zordur. Tozlar vb. silo içindeki tane birikimi düz olmadığı ve yüzey profiline sahip olduğu için çok tercih edilmemektedir (Agrawal vd., 2016). Ancak, tozlu ortam nedeniyle çimento veya kül seviyesi ölçümü için ultrasonik sensörler ve optik sensörler önerilmez (Pal vd., 2019).

1.1.2.4. Kapasitif Sensörler

Sensörler, malzemenin kuru, serbest akışlı olduğu ve katı hal çıkışının gerekli olduğu yerlerde kullanılır (Hunt, 2007). Kapasitif seviye sensörleri, dielektrik bir malzeme ile bir sensör prob (elektrot) kullanır. Kapasitans silo içerisinde ürünün dielektrik özelliğindeki değişim ile elektrot arasında olan değişim olarak ifade edilebilir. Silo içerisinde ürünün dielektrik özellikleri, nem oranı, sıcaklık, uygulanan frekansa bağlı olarak vb. değişim gösterebilmektedir. Kapasitans değişiklikleri okuma devreleri ile mikrodenetleyici tarafından anlamlandırılır. Malzeme seviyesindeki değişiklik, son derece hassas kapasitif sensör tarafından algılanır (Draganov ve Tanchev, 2005). İstenilen seviye değerini takip etmek için ise akım temelli (4-20mA vb.), voltaj temelli (0-5V vb.) ya da bir çıkış rölesi kullanılır.

Kapasitif sensörler, tanklardaki sıvılarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak siloya tahıl dökülürken oluşan toz, tanelerin homojen olmayan dağılımı ve düşük dielektrik sabitleri nedeniyle sıvı seviyesi ölçümlerinden çok daha zordur (Nelson, 1991).

Sonuç olarak kapasitif sensörler diğer sensör tiplerine ortam koşullarından az etkilenme, kolay uygulanabilirlik ve direnç tabanlı okuma devrelerine nazaran

kapasitans tabanlı okuma devreleri sıcaklığa olan duyarlılığı daha fazladır. Kapasitif seviye sensörleri, dökme malzeme uygulamaları için yüksek düzeyde hassasiyet, kararlılık ve dayanıklılık sağlamak üzere tasarlanmıştır (Markova vd., 2011).

Bu tez çalışmasında temassız kapasitif yaklaşım sensör tasarımı yapılmıştır. Kapasitif sensörler genel mantığı iletken çubuklar (plaka) arasında sabit bir mesafe bırakılarak bir kapasitör elde etmek ve kapasitans değişimi ölçmektedir. Kapasitif sensörlerin altyapısı diğer sensör grupları ile kıyaslandığında silo içerisinde oluşan tozlu ortam, dolun ve boşaltım sırasında oluşan düzlemsel olmayan yapıya karşı en dirençli sensördür.

Literatürde birçok kapasitans algılama yöntemi bulunmaktadır (Salila Vijayalal Mohan ve Malcolm, 2021; Ding vd., 2018; Rai vd., 2005; İşiker ve Canbolat, 2009; Aezinia ve Bahreyni, 2013; Wang vd., 2013; Kirchner vd., 2008; Areekath vd., 2020; Pavliuk vd., 2019). Algılama için gerekli okuma devreleri kapasitans varyasyonlarını akıma (A), voltaja (V), faza (Phi), yüke (Q) veya frekansa (f) dönüştürmektedir. Literatürde kapasitans varyasyonlarını elde edilmesinde kullanılan ara yüz tasarımlarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirtilmektedir (Aezinia ve Bahreyni, 2012; Matko ve Milanović, 2014; Kar vd., 2018; Yamazoe ve Shimizu, 1986). Bu tez çalışmasında kapasitans algılamak için yarı diferansiyel senkron demodülasyon tekniği kullanılmıştır. Yarı diferansiyel yapı, hassasiyeti artıran ve ortak mod varyasyonlarını azaltan bir yapıdır (Tirupathi ve Kar, 2017). Bununla birlikte, senkron demodülasyon yapısı ise hem daha kararlıdır hem de sıcaklığa daha az duyarlıdır. Senkron demodülasyon ile sinyal örneklemede maksimum verimlilik elde edilir.

Tez çalışmasında demodülasyon tekniklerinden olan analog senkron demodülasyon tekniği kullanılmıştır. Bu tekniğin temelinde, kapasitans değişimini algılamak ve algılama işlemi sonucunda oluşan modülasyon sinyalini demodüle etmektir. Modülasyon düşük frekansa sahip bilgi sinyalini yüksek frekanstaki bir taşıyıcı sinyale çarpmaktır. Böylece çevredeki bozucu etkilerin etkisini minimize etmektir. Demodülasyon ise modülasyonlu sinyalin taşıyıcı sinyal ile çarpılarak taşıyıcı sinyali ayrıştırma işlemidir. Kısaca, bu işlemleri analog devre elemanları ile yapılmasıdır. Genel olarak demodülasyon için analog çarpıcılar kullanılabilmesi (Karali vd., 2018) gibi analog anahtarlar da kullanılabilir (González-Landaeta vd., 2020). Analog çarpıcı ve analog anahtarlar çalışma prensibi olarak kare dalga ile kontrol edilen senkron demodülasyon tekniğini

kullanılmaktadır. Ancak analog çarpıcı ürünler analog anahtara nispeten maliyeti fazladır.

Analog anahtarlama senkron demodülasyonun tümünden sayısal dünyada yapıldığı örnekler de mevcuttur (Yavsan vd., 2021). Bu örneklerde demodüle edilmemiş sinyal hızlı bir ADC ile sayısala çevrilip, sayısal sistem (mikrodenetleyici) ile demodülasyon ve filtreleme yapılabilmektedir (Banerjee vd., 2004; Kara vd., 2022). Yüksek frekanslara (1MHz ve üzeri) doğru ADC'nin örnekleme zamanı yeterli gelmeyeceği için analog senkron demodülasyon yönteminin daha verimli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca dijital senkron demodülasyon mikrodenetleyici üzerinde ekstra işlem yükünün oluşturması maliyeti arttırmanın yanısıra dünyada çapında bulunan çip krizi sorunlarına iki katına çıkarmaktadır.

Senkron demodülasyon tekniği asenkron demodülasyon tekniğine göre kapasitans ölçme yöntemlerine kolay entegre edilebilen ve demodülasyon işlemini eş zamanlı yapmasıyla yüksek sinyal-gürültü oranı (SNR) sağlamaktadır. SNR sinalin gürültü başıgıklığı olarak tanımlanabilir. SNR oranının yüksek olması ortam gürültüsünden az etkilendiğini gösterir.

Senkron demodülasyon tekniğinde sabit konumlandırılmış plakalara yüksek frekanslı uyartım sinyali gönderildiğinde, plakalardan okunan kapasitans değeri birim zamanda oluşan akımı verir. Meydana gelen akım sinyali modüle edilmiş bir AM (amplitude modulation) sinyali oluşturur. Oluşan modüleli sinyal elektronik ara yüz devreleri tarafından okunur ve demodüle edilir. Kapasitif sensörler, ortak varyasyonları ortadan kaldırmak ve daha büyük hassasiyet için farklı konfigürasyonda yapılandırılrsa da, karşılaştırılabilir parazitlerin varlığında kapasitansta bu kadar küçük bir değişikliğin tespiti büyük bir zorluk yaratır (Kar vd., 2015).

Sonuç olarak, kapasitif sensörlerde, silolardaki tane seviyesinden dolayı değişen kapasitans ile tane seviyesi ölçülebilir. Ancak, sensör okumasını etkileyen faktörler çeşitlidir ve hatalı seviye okumaları üretme potansiyeli yüksektir. Her şeyden önce tahılın nemi, tahılın içindeki toz ve silo içindeki sıcaklık ve tahılın türü kondansatörün dielektrik sabitini etkiler. Bu nedenle, sensör her ölçüm için kalibre edilmelidir (İşiker ve Canbolat, 2009). Yapılan çalışmalar neticesinde silo içersinde ortam göz önünde bulundurularak tasarım gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında literatür taraması sonucunda önerilen tasarımın

doğrulanması ve gerçek zamanlı bir fabrikada ürün akışı sırasında ölçümler alınarak temassız ölçüm yapan bir sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

1.2. Tezin Önemi

Ülkemizde başta tahıl üretimi ve buna bağlı tahıl sanayi önemli bir yer tutmaktadır. Tahıl endüstrisinde ürün, çiftçilerden market raflarına ulaşana kadar fabrika ortamında dolum, dağıtım ve paketleme gibi aşamalardan geçer. Üretimin dinamik yapıda kalabilmesi için üretim aksamamalıdır. Üretimdeki aksamalar hem insan ihtiyaçları açısından olumsuz sonuçlar doğurmakta hem de fabrikalarda ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Üretimin kontrolünde genel olarak sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Var-yok sensörleri, dolum, paketleme gibi süreçlerde ürünün akışının kontrol edilmesini sağlar.

Günümüzde nüfusun artması tahıl endüstrisine olan ihtiyacı artırmıştır. Nüfusun artışının yanı sıra günümüz teknolojisi de gün geçtikçe gelişmekte ve ürünlerin tarladan silolara gelen bir çok durumdaki proseslerde ürün tahribatı azaltılmalıdır. Ürün tahribatı olmadan ve üretim faaliyetleri aksamadan gerekli ihtiyaçlara cevap vermesi gerekmektedir. Bu nedenle tahılın anlık olarak takip edilmesi önemli hale gelmektedir.

Tezde yapılan çalışma ile ürün kontrol ve takibinin güvenilir şekilde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede oluşan ekonomik kayıpların azaltılabilecek ve ortam koşullarından daha az etkilenme, maliyet düşüklüğü, kolay uygulanabilirlik vb. avantajları olduğu için kapasitif algılama ile temassız yaklaşım sensörü düşünülmüştür.

Piyasada yaklaşım sensörleri bulunmaktadır. Bu sensörler maliyet, ithal ürün olması tedarikte sıkıntı oluşturmaktadır. Örneğin Carlo-Gavazzi gibi firmalardan temin edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, daha önce bahsedilen süreç doğrultusunda oluşan problemlere çözüm oluşturmak ve ürünü millileştirme adına önemli bir altyapı olabilecektir.

1.3. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, silolardaki seviye sensörlerinin genel kullanılabilirliğini ayrıntılı bir şekilde incelemek ve bu incelemeyi temel alarak tahıl endüstrisinde kullanılan temassız kapasitif yaklaşım sensörlerinin "var-yok" algılaması gibi spesifik bir uygulamadaki potansiyelini değerlendirmektir. Bu bağlamda, sensörün silo ortamının zorlu koşullarına uygun hale getirilmesi ve aynı zamanda sıcaklık gibi dış etkenlere karşı duyarlılığının azaltılması hedeflenmiştir.

Ayrıca, bu çalışma yarı-diferansiyel yapı kullanımını ele alarak düşük dielektrik değerine sahip ürünlerin (örneğin kepek, razmol gibi) varlığını tespit etme yeteneğini özellikle vurgulamaktadır.

Bu tezin bir diğer önemli hedefi, tahıl endüstrisindeki üretim süreçleri sırasında ortaya çıkan problemlere çözümler getirmektir. Ürüne temasın neden olduğu mekanik kırılmalar, toz birikimi ve ürün bozulmaları gibi sorunları ele alarak temassız kapasitif yaklaşım sensörleriyle bu olumsuz etkileri minimize etmek amaçlanmaktadır.

Son olarak, bu tez çalışması sadece teknik bir açıdan değil, aynı zamanda ürünü millileştirme hedeflerine ulaşmak için önemli bir adım olarak da konumlandırılmıştır. Endüstriyel Elektrik Elektronik San. ve Tic. A.Ş.'nin AR-GE imkanlarıyla desteklenmesi sayesinde, bu çalışma ürünün prototip aşamasından gerçek dünya endüstriyel koşullarında test edilmiş ve geliştirilmiş bir ürüne dönüşmüştür. Bu da yerli teknoloji geliştirme ve millileştirme hedeflerine önemli bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.4. Tezin Yapılandırılması

Birinci bölümde genel olarak silolarda kullanılan seviye sensörlerinden bahsedilmiştir. Sensörler elektromekanik ve elektriksel sensörler olarak kategorize edilmiştir. Ayrıca tezin amacı ve öneminden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde; elektronik arayüz tasarımı ve simülasyonlar, mekanik tasarımlar, tasarımların doğrulanmasında yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde; saha testlerinden ve test kayıtlarından bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde tez amacının doğrulanmadından bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde ise test sonuçları yorumlanmış ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. ÖNYÜZ TASARIMI VE SİMÜLASYON

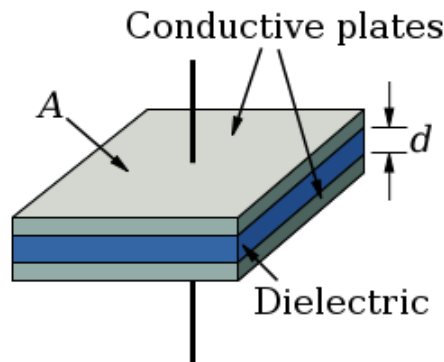
Bu bölümde temassız kapasitif yaklaşım sensörünün tasarımı sırasında kullanılan elektronik devrenin teorik alt yapısından, yapılan AC ve DC simülasyon çalışmalarından ve sensörün optimizasyon çalışmalarından bahsedilmiştir. Ayrıca kapasitif sensörler için gerekli olan mekanik muhafaza tasarımı ve elektrot tasarımıyla ilgili yapılan çalışmalar bu başlık altında açıklanmıştır.

2.1. Sensör Tasarımı

Sensör tasarımı üç kısımda incelenmektedir. Birinci kısımda kapasitif sensör teorik altyapısı, ikinci kısımda sensör için elektronik devre ve simülasyon sonuçları ve son olarak üçüncü kısımda ise sensörün elektrot tasarımı anlatılmıştır.

2.1.1. Kapasitif Sensör Teorik Altyapı

Kapasitans bir yapının elektrik yükü depolama potansiyeline sahip bileşenidir. İletken levhaları verilen gelirim ile iki plaka negatif ve pozitif olarak elektriksel yükü depolarlar ve bu ilişki kapasitansı belirtir. Kapasitans, kapasitörün yapısına ve geometrisine bağlıdır. Şekil 2.1’de paralel plakalı bir kapasitör gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Paralel Plaka Kapasitör (Prit vd., 2019).

Kapasitans denklemi (2.1)’de gösterilmektedir. C kapasitans değerini, ϵ

kapasitör plakaları arasındaki malzemenin dielektrik sabiti, A plakaların yüzey alanı (m) ve d iki plaka arasındaki mesafeyi (m^2) temsil etmektedir.

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad (2.1)$$

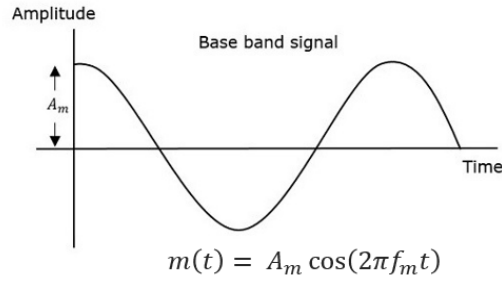
Bu parametrelerden birini değiştirebiliyorsa, kapasitans değerinde değişiklik yaşanır ve uygun bir elektronik arayüz tarafından okunabilir.

Kapasitif sensör ise nesnelerin kendisi üzerinde oluşturduğu elektrik alanı etkilerine göre doğrudan algılayabilen sensörlerdir. Kapasitans değerindeki değişiklik, birkaç farklı şekilde sınıflandırılabilir: İki plaka arasındaki mesafe değişimi (örneğin basınç sensörleri), plakalar arasında bulunan malzemenin dielektrik sabitinin değişimi (nem sensörleri, var yok sensörleri, yaklaşım sensörleri) ve kapasitansın plakaların yer değiştirmesi ile değişimi (hareket sensörleri, ivme ölçerler). Yapılan sensör tasarımına göre üç parametreden herhangi birinde oluşan değişiklik, kapasitans değerinin değişmesine yardımcı olur. Bu tez çalışmasında temassız kapasitif yaklaşım sensörü yapılmıştır. Temelinde kapasitans, dielektrik malzemenin değişmesi sonucunda oluşan kapasitans değişimini tespit etmektir.

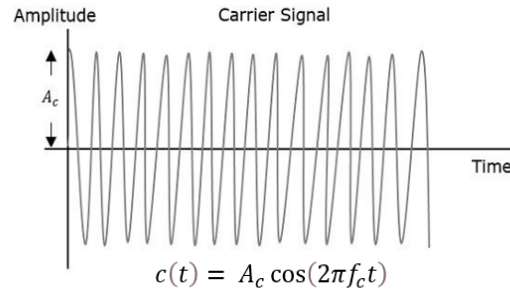
Bu yapıdaki kapasitif sensörlerde kapasitans değerini belirlemeye yönelik yaygın bir teknik olan genlik modülasyon tekniği, elektrotlar arasına sabit (alternatif) bir uyarma sinyali uygulandığında esas olarak yer değiştirme akımını ölçmektir (Bretterkieber vd., 2008). Bu teknikte kapasitans değişimini ölçmek için kapasitif sensörün elektrotuna yüksek frekanslı bir sinyal verilir (taşıyıcı sinyal). Elektrot ile ürün arasında oluşan kapasitans değişimi bilgi sinyalini oluşturur. Modülasyon ise taşıyıcı sinyal üzerine bilgi sinyalinin bindirilmesi şeklindedir. Örnek bir senaryo Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında genlik modülasyon tekniğine benzer yarı diferansiyel senkron demodülasyon tabanlı temassız kapasitif yaklaşım sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yarı diferansiyel senkron demodülasyon yöntemi, bir kare dalga sürücü devresinden, bir yarım köprü kapasitif sensörden, transempedastan, senkron demodülasyon ve bir alçak geçiren filtreden oluşur. Şekil 2.3’te sensörün blok diyagramı gösterilmektedir.

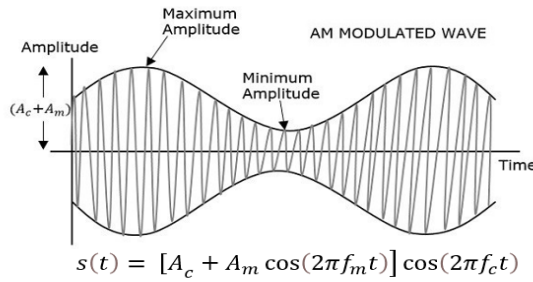
Yarı diferansiyel yapı, 180° faz farkı olan iki AC sinyal yarım köprü oluşturur. Diferansiyel algılama kondansatörü mevcut olmadığında, tam köprü



(a)



(b)

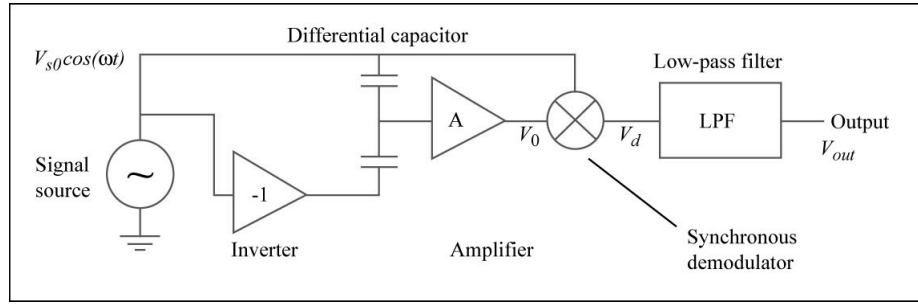


(c)

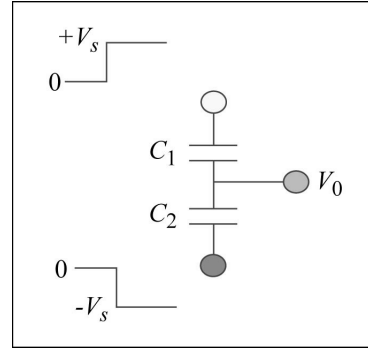
Şekil 2.2. Genlik Modülasyonu (AM) (Faruque, 2017)

konfigürasyonu da oluşturulabilir (Yazdi vd., 2004). Diferansiyel konfigürasyonda, bir kapasitör artarsa, diğer kapasitör azalır ve kapasitanstaki fark çıktıyı üretir (Kar vd., 2015). Yarı diferansiyel için örnek bir gösterim Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

Yüksek frekanslı uyartım sinyali daha yüksek akım akışı ve daha iyi hassasiyet elde etmede avantaj sağlar. Uyartım sinyali gönderilen elektrotlardaki kapasitans değişimleri sensörden geçen akımı modüle eder. Bununla birlikte, bu varyasyonlar pA düzeyinde son derece küçük olma eğilimindedir, bu nedenle ölçülebilir bir voltaj oluşturmak için yüksek kazançlı düşük gürültülü bir transempedans amplifikatör (TIA) gereklidir. Sensörden geçen akımı algılayan ve giriş düğümlerindeki voltaj değişimlerini ortadan kaldıran, kapasitif parazit etkilerini en aza indirebilen düşük giriş empedanslı bir TIA'dan oluşur (Royo vd., 2017). TIA yapısı Şekil 2.5 'te gösterilmektedir. Bu konfigürasyonda, sensör çıkış

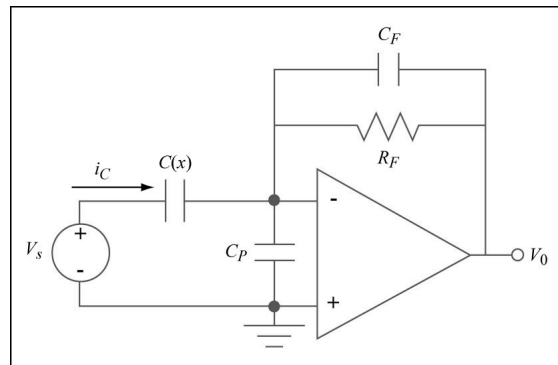


Şekil 2.3. Yarı diferansiyel senkron demodülasyon yöntemi blok diyagramı (Senturia, 2005).



Şekil 2.4. Yarı diferansiyel yapısı (Senturia, 2005)

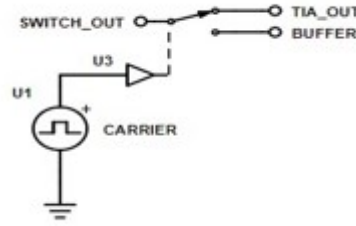
düğümü her zaman sabit bir potansiyele bağlı olduğundan ve çıkış sadece kapasitanstaki değişime bağlı olduğundan parazittik kapasitörün etkisi nispeten daha azdır. Kıyıcı stabilizasyonu olarak bilinen bu modülasyon ve demodülasyon, çıkışta düşük frekanslı gürültü performansını iyileştirir ve ofseti de azaltır (Kar vd., 2015). Bu modüle edilmiş giriş, istenen çıkışı sağlamak için transempedans ile voltaja çevrildikten ve yükselttikten sonra, demodüle edilir ve filtrelenir.



Şekil 2.5. Transempedans Yükselteç Temelli Tek Uçlu Kapasitif Sensör Ön Yüz Devresi (Senturia, 2005).

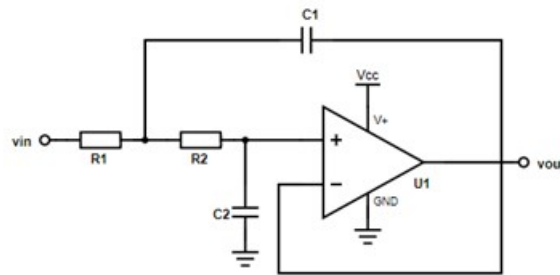
Demodülasyon sırasında, analog senkron demodülasyon yöntemi kullanılmaktadır. TIA dan sonra bir analog anahtar eklenmiştir. Transempedans çıkışı ile uyarım sinyal ile anahtarlanarak demodüle edilmiştir. Demodülasyon

işlemi için örnek bir gösterim Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Analog Anahtar Temsili Gösterimi (Kara vd., 2022).

Alçak geçiren filtre için ise Sallen-key alçak geçiren filtre tasarımı yapılmıştır. Demodülatör çıkışı daha sonra yüksek frekanslı gürültüyü ve analog çarpıcı çıkışındaki ani salınımları gidermek için alçak geçiren bir filtreden geçirilir (Kar vd., 2015). Şekil 2.7’de alçak geçiren filtreyi temsil etmektedir.

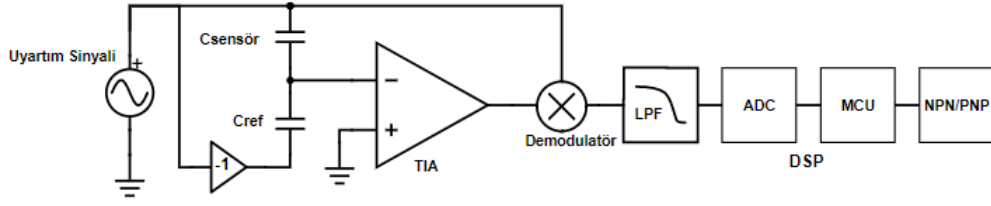


Şekil 2.7. Sallen-Key Alçak Geçiren Filtre (Majumder, 2017).

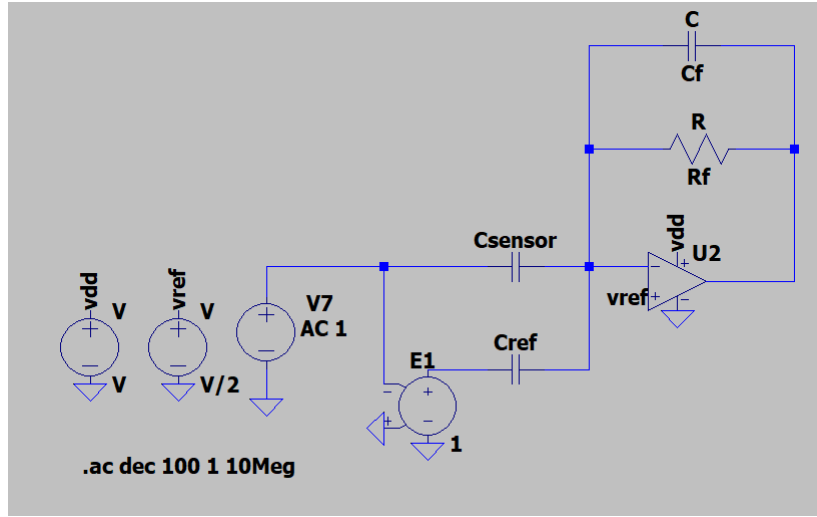
2.1.2. Elektronik Devre Tasarımı ve Simülasyon

Elektronik devre tasarımı, yarı diferansiyel yapı, transempedans yükselteç (TIA), analog senkron demodülasyon işlemi ve sallen key alçak geçiren filtreden oluşmaktadır. Simülasyon çalışmaları ise AC ve DC analizlerden oluşmaktadır. Kapasitif sensörü modülasyonun ve demodülasyon işlemi kolaylaştırmak ve MCU tarafından üretim saplayabilmek için kare dalga sinyali ile uyarılmıştır.

Kapasitör elektrotunun bir ucuna uyarma sinyali gönderilir. Diğer ucu ise transempedans girişine bağlanır. Ölçüm hassasiyetini artırmak ve ortak mod (common mode, CM) gürültüleri azalmak için kullanılan yarı diferansiyel bir yapı bulunmaktadır. Referans kapasitör bir ucuna uyarma sinyalinin zamanda 180



Şekil 2.8. Temassız Kapasitif Yaklaşım Sensörü Blok Diyagramı.

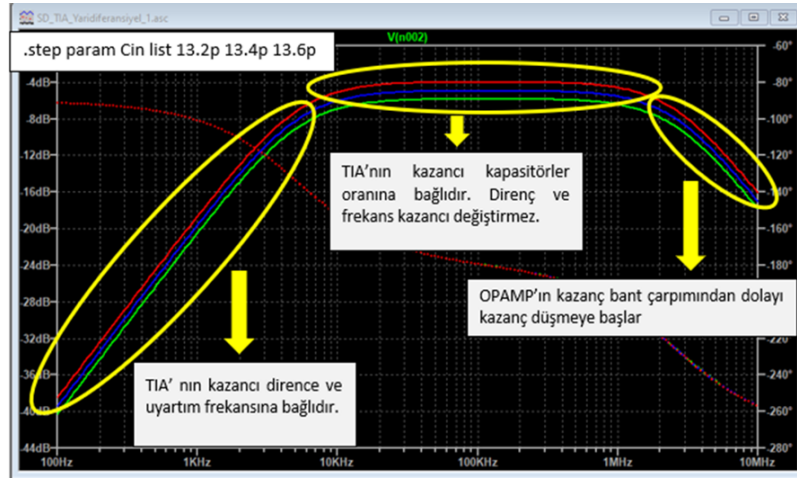


Şekil 2.9. Yarıdiferansiyel Transempedans Yükselteç Devresi.

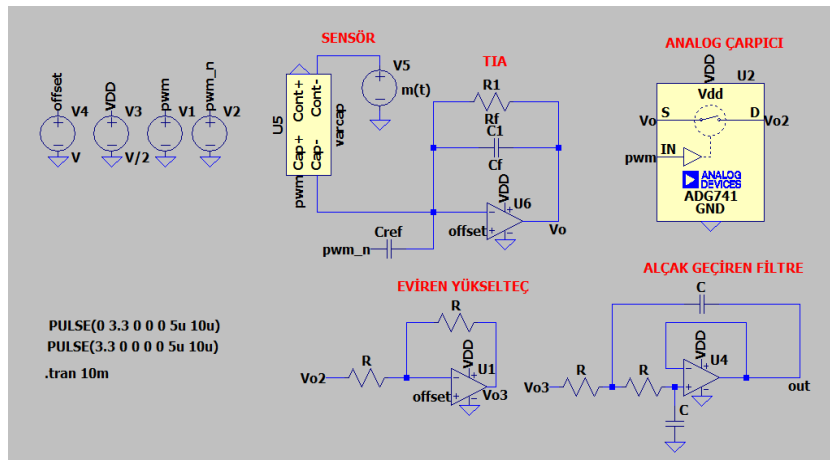
derece kaydırılmış hali uygulanır. Diğer ucu ise transempedans yükselteç (MCP6022) girişine bağlanır. Böylelikle zamana göre değişen küçük genlikli bir akım modülasyon sinyali oluşmaktadır. TIA ile voltaja dönüştürülerek kazanç oranı kadar yükseltilir. Bilgi sinyalini elde etmek (kapasitans değişimi) için ise modülasyonlu sinyal senkron demodülatör (analog anahtar) ile demodüle edilir. Ve son olarak içerisinde DC değer ve yüksek değerde oluşan frekans değerlerini etkisini kaldırmak için alçak geçiren filteren geçirilerek kapasitans değişimi elde edilmiştir. Kapasitans değişimini anlamlandırmak için MCU çevre birimi ADC tarafından okunur. Ve belirlenen set değerine ulaştıktan sonra PNP ve NPN çıkışları aktif olur. Sensörün işleyişini temsil eden blok diyagramı Şekil 2.8 'de gösterilmektedir.

AC analizde yarıdiferansiyel transempedans yükselteç kazanç parametreleri ve sıcaklık duyarlılığını azaltmak için yapılmıştır. AC Analiz LTSpice programı kullanılarak yapılmıştır ve Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

Analizde sensör için kazanç parametrelerini yani uyarım sinyali, C_f (feedback kapasitör), R_f (feedback direnç) ve C_{ref} (referans kapasitör) değerleri



Şekil 2.10. Transempedans AC Analiz Sonucu

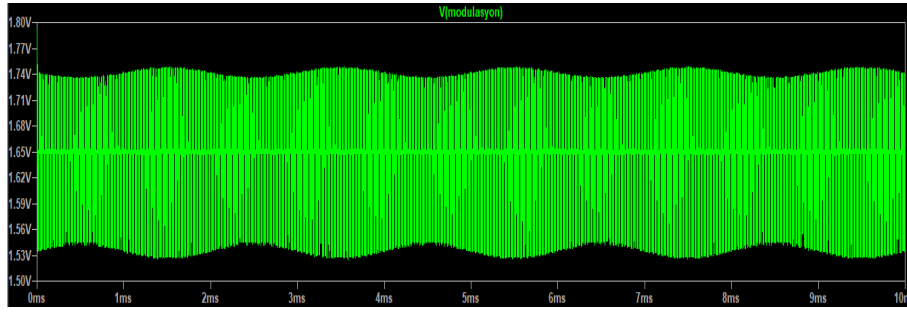


Şekil 2.11. Yarı Diferansiyel Senkron Demodülasyon Temelli Sensörün Elektronik Devresi.

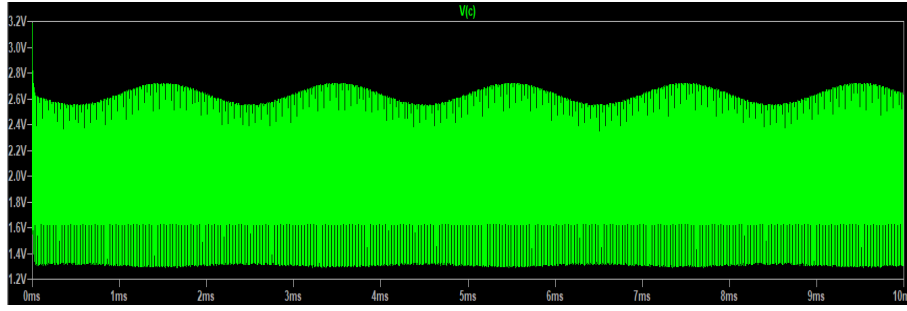
optimize edilmiştir. AC değerler belirlenirken bode diyagramında 3 farklı bölge oluşmuştur. Bu bölgedeki sonuçlar göz önüne alınmıştır. Örnek bir gösterim Şekil 2.10'da gösterilmektedir.

Yarı diferansiyel yapı ile daha hassas ölçüm olanağı sağlamaktadır. Çözünürlük problemini azaltmanın yanı sıra, uygulanan yarım köprü yapısı, sıcaklık kayması da dahil olmak üzere enterferans etkilerinin CM tarafından reddedilme avantajlarına sahiptir (Heidary, 2010). AC analizler ile transempedans kazancını kapasitif değişim ve feedback kapasitansın oranına ile değişmektedir. Böylelikle direncin etkisi giderilerek sıcaklığa olan bağışıklığı güçlendirilmiştir. DC analizde ise belirlenen uyarım sinyali, Cref, Cf ve Rf degerlerinin performansı simüle edilmiştir. DC analizde devre şematığı Şekil 2.11 'de gösterilmektedir.

DC analiz ile alçak geçiren filtre tasarımı için uygun değerler belirlenmiştir. DC analiz ile elde edilen veriler Şekil 2.12, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'de



Şekil 2.12. Modülasyonlu Sinyal

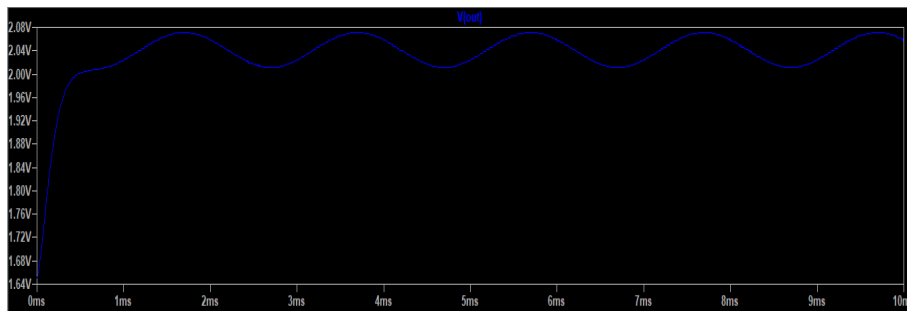


Şekil 2.13. Analog Anahtar Çıkışı

gösterilmektedir.

2.1.2.1. Mikrodenetleyici Özellikleri

Yarı diferansiyel senkron demodülasyon tabanlı kapasitif yaklaşım sensörü tasarımında STMicroelectronics firması tarafından geliştirilmiş ARM mimarisine sahip 32 bitlik STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Çalışma frekansı maksimum 72 MHz'dir. ARM Cortex-M3 çekirdeğe sahiptir. STM32F103 gerçek zamanlı uygulamalarda başarılı olarak çalışmaktadır. Asansör sistemleri, klima, güvenlik izleme sistemleri gibi sensör okumaları, sensör verilerini işleme konusunda yeterli donanıma sahip ve ucuz bir mikrodenetleyici



Şekil 2.14. Alçak Filtre Çıkışı

olduğu için seçilmiştir.

2.1.3. Elektrot Tasarımı ve Test Sonuçları

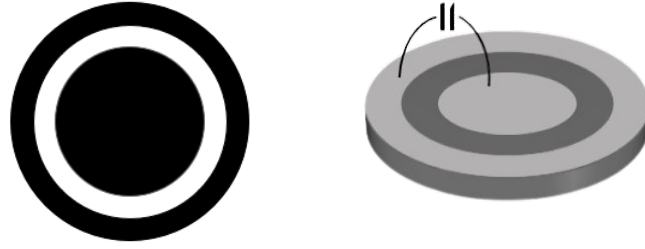
Elektrot tasarımı kapasitans algılamayı etkileyen en önemli etkidir. Ölçülmesi istenen yöntem için uygun elektrot tasarımı da önemlidir. Yapılan sensörün boyutu şekli kapasitans ölçümünün performansını etkilemektedir. Silindirik çubuklar, dikdörtgen plakalar, sarmal teller ve boru şekilli kapasitörler gibi farklı tipte algılama elektrotları mevcuttur. Bunlar genellikle ayrı cihazlar olarak kullanılır ve aynı tasarım her uygulama için uygun değildir (Nabovati vd., 2015).

Elektrot tasarımı aşamasında, malzeme seçimi, elektrot geometrisi, elektrotun yerleştirileceği alt tabaka (substrat), kapasitans ölçüm devresi, koruma ve kaplama, uygulanan frekans gibi faktörler titizlikle göz önünde bulundurulmuştur.

Elektrotun çapı ve genişliği, sensörün algılama yeteneğini etkileyen önemli faktörlerdir. Daha geniş bir çap, daha geniş bir algılama bölgesi sağlayabilirken, daha küçük bir çap daha yüksek hassasiyet sunabilir. Frekans seçimi de kritik bir noktadır. Temassız kapasitif yaklaşım sensörleri genellikle yüksek frekansta daha hassas ve etkili ölçümler yapmalarına yardımcı olabilir.

Temassız kapasitif sensörler, küçük boyutlu tasarım ve hassas kapasitans ölçümleri sunar, ancak ölçülen kapasitans genellikle pF aralığındadır (fF veya hatta aF) . Bununla birlikte, pF aralığında ölçüm yaparken en iyi hız-çözünürlük dengesini elde etmek için, $10\text{ M}\Omega$ 'dan daha büyük bir direnç (R_f) ihtiyaç duyulabilir, bu da gürültüye ve dış parazite karşı duyarlılığı arttırabilir (Gaitán-Pitre vd., 2009). Bu tez çalışmasında tahıl endüstrini barındıran ürünlerinde dielektrik katsayıları çok küçük değerlerde olduğu için uygun elektrot tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarım Şekil 2.15a'de gösterilmektedir. Elektrot tasarımının perspektif görünümü 2.15b'de gösterilmiştir. Yapılan tasarım ile buğday, kepek ve mısır için kazanç performansı yapılmıştır.

Sensör yapısı bir ölçümü etkileyebilir, bu nedenle pratik bir uygulama için en yüksek tasarım önceliğini elde etmek amacıyla elektrotların parametrelerini optimize etmek önemlidir.



(a) Elektrot Tasarımı (b) Elektrot Tasarımı Perspektif Görünümü

Şekil 2.15. Elektrot Tasarımının Birden Fazla Görüntüsü

Elektrot tasarımı yapıldıktan sonra kepek, buğday ve mısır gibi tahıl ürünleri üzerinde test edilmiştir. Elektrot performans test sonuçları Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Kazanç Tablosu

Kazanç Tablosu			
Ürünler	Mısır	Buğday	Kepek
Kazanç	100mV	93mV	37mV

2.2. Optimizasyon

Kompanzasyon, özellikle sıcaklık değişimleri bağlamında kapasitif yakınlık sensörlerinin performansını optimize etmede temel adımlardır. Bu işlemler, sıcaklığa bağlı sapma, hassasiyet değişimleri ve çevresel etkiler gibi faktörlerin neden olduğu ölçüm hatalarını en aza indirmeye yardımcı olur. Bu bölümde, kapasitif sensörün optimizasyonu, çevre standartlarına uygunluğu için sıcaklık testleri ve sıcaklık kompanzasyonu ele alınacaktır. Ayrıca saha şartlarına uyum sağlamak için yapılan otomasyon optimizasyonlarından da bahsedilecektir.

2.2.1. Sensör Optimizasyonu

Kompanzasyon, kapasitif yakınlık sensörleri için tipik olarak sensörün çıkış voltajını veya kapasitansını bir nesnenin mesafesi veya varlığı ile ilişkilendirmeyi içerir. Kapasitif sensörler söz konusu olduğunda, ölçülen

kapasitans ile hedef mesafe veya ilgilenilen parametre arasında bir korelasyon oluşturmak için kalibrasyon yapılır. Toplanan verilere dayanarak, bir kalibrasyon eğrisi veya denklemi türetilir. Bu eğri, sensör çıkışı ile hedef parametre arasındaki matematiksel ilişkiyi temsil eder. Ayrıca sıcaklık değişimleri, sürüklenme ve çevresel etkiler dahil olmak üzere çeşitli faktörlerin neden olduğu ölçüm hatalarını düzeltmek için kompanzasyon teknikleri kullanılır. Sonuç olarak, sıcaklık dalgalanmaları sensörün çıkış sinyallerinde değişikliklere yol açarak doğruluğundan ve güvenilirliğinden ödün verebilir. Bu nedenle, sıcaklık testleri yapmak ve bunları optimize etmek önemlidir.

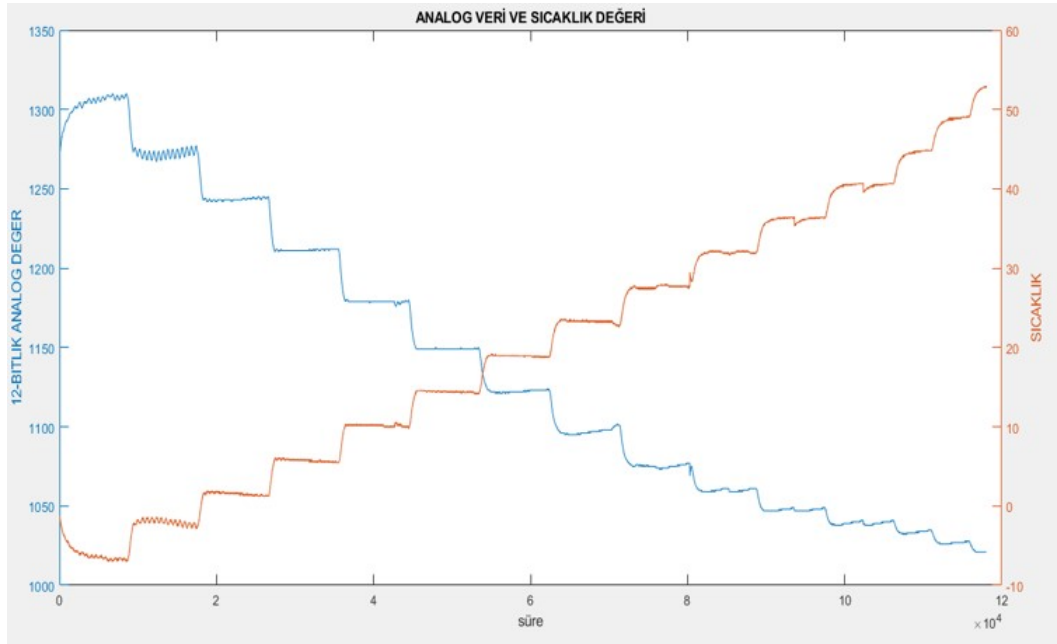
2.2.2. Sıcaklık Testleri

Sıcaklığın, kapasitif sensörlerde kullanılanlar da dahil olmak üzere, malzemelerin elektriksel özellikleri üzerinde derin bir etkisi vardır. Bu sebeple sensörün kapasitansı sıcaklıkla değişerek ölçüm hatalarına yol açabilir. Bu etkiyi telafi etmek için, sıcaklığı izlemek üzere sensör elektronik devresine sıcaklık sensörleri (termistörler veya entegre sıcaklık sensörleri gibi) entegre edilebilir.

Sıcaklık testleri, sıcaklığın sensör okumaları üzerindeki etkisini ölçmeye yardımcı olur. Sıcaklık ve sensör çıkışı arasındaki ilişkiyi anlayarak, sıcaklıktan kaynaklanan hataları en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için telafi teknikleri geliştirilebilir. Bu optimizasyon, sensörün geniş bir sıcaklık aralığında doğru ve güvenilir ölçümler yapmasını sağlar.

Gerçek ortamda direnç, kapasitör, opamp, regülatörlerin vb. komponentler sıcaklıktan etkilenirler. Bu sebeple tasarlanan elektronik devre komponentlerinden dolayı sensör küçük miktarda da olsa sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu kayma için sıcaklık optimizasyonu yapılmıştır.

Sensörün sıcaklığa olan duyarlılığı ölçmek için 5°C aralıklar ile sıcaklık testleri yapılmıştır. Şekil 2.16'da sensörün sıcaklığa değişimine karşı voltaj değişim grafiği gösterilmektedir. Sensörde sıcaklık takibi için NTC (Negative Temperature Coefficient) kullanılmıştır. Kapasitans-voltaj değişimi ise mikrodenetleyicinin ADC'si ile okunmuştur.



Şekil 2.16. -10°C den 60°C Arasında 5°C'lik Artımlarla Ring Sıcaklık Testi ve Sıcaklık Verileri.

2.2.2.1. NTC Nedir ve Özellikleri

NTC (Negative Temperature Coefficient) bulunduğu ortamın sıcaklığı artmasıyla elektriksel direnç değeri azalan termistör çeşididir. Termistörler, sıcaklıktaki değişikliklerle orantılı olarak direnç değeri değişen böylelikle sıcaklığı algılayan elemanlardır. NTC'ler genel olarak -55 °C ile +200 °C aralığında kullanılır. 0.1C'a kadar duyarlılıkları vardır. NTC genellikle mikrodalga fırınların aşırı ısınmasının önüne geçmek, kazanlarda sıcaklık değişimini izlemek, mobil iletişim cihazları, endüstriyel elektronik, iklimlendirme, tıbbi uygulamalar gibi birçok kullanım alanı bulunmaktadır. NTC'ler sıcaklık ölçümü ve sıcaklık değişimi incelemek için kullanılır. NTC dirençleri tarafından sergilenen direnç ve sıcaklık arasındaki ilişkinin doğrusal olmaması, sıcaklığı doğru bir şekilde ölçmek büyük bir zorluk teşkil ediyordu. Dijital devrelerin hızlı gelişimi ve NTC eğrisine yaklaşan denklemleri çözerek sıcaklık ve direnç arasındaki ilişki anlaşılmıştır (Akgul, 2021).

Eğri seçimi ve hesaplamada Termistörün Dağılım Sabiti, Termal Zaman Sabiti, Direnç değeri, Direnç-Sıcaklık eğrisi ve Toleransları etkilidir. Eğri seçimi için uygun formülasyon için birinci dereceden yaklaşım, beta formülü ve Steinhart-Hart denklemi ile hesaplanır (Cong vd., 2011). Bu çalışmada (2.2)'de gösterilen Steinhart-Hart denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3 \quad (2.2)$$

2.2.3. Sıcaklık Optimizasyonu

Sıcaklık testlerinin optimizasyonu, farklı sıcaklık koşullarında sensör davranışını değerlendirmede bu testlerin doğruluğunu ve etkinliğini artırmayı amaçlar. Sıcaklık kompanzasyon teknikleri, sıcaklığın ölçülmesini ve sensörün çıktısının önceden belirlenmiş bir kompanzasyon eğrisine veya denklemine göre ayarlanmasını içerir. Böylelikle sensör ölçümlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak, hataları en aza indirmek veya ortadan kaldırmayı sağlar.

Sıcaklık referansı (NTC) ve uygun dengeleme teknikleri uygulanarak, sensörün doğruluğu farklı sıcaklık aralıklarında önemli ölçüde iyileştirilebilir. Sensörün çıkış okumaları kaydedilir ve karşılık gelen referans değerlerle karşılaştırılır. Sensörün çıkışını ölçülen parametreyle ilişkilendiren kalibrasyon eğrisini veya denklemini belirlemek için doğrusal regresyon veya eğri uydurma gibi istatistiksel analiz teknikleri kullanılır.

Bu tezde, yapılan sıcaklık testleri neticesinde sensör çıkışında sıcaklıktan dolayı yaklaşık olarak 280 mV'luk bir kayma görülmüştür. Bu değer -10 °C ile 60 °C arasında yapılan testin sonucudur. Saha testleri ile ise fabrika ortamında sıcaklık değişiminin en fazla 10 - 15 °C'lik bir değişim olduğu görülmüştür. Fabrika ortamında yüksek dielektrik değerine (mısır, buğday vb.) sahip ürünlerde ürün tespiti için sorun teşkil etmemektedir. Ancak düşük dielektrik katsayısına sahip tahıl ürünlerinde (kepek, razmol vb.) kazanç değerinin küçük olması ve sıcaklık etkisinin sensör çıkışında kaymalara neden olması, önemli bir durumdur. Bu tür ürünlerde, sıcaklık artışıyla birlikte sensör çıkışında beklenmeyen kayma, sensörün yanlış şekilde aktif olmasına yol açabilir. Özellikle sensörün önünde herhangi bir ürün bulunmasa bile, sıcaklık kaynaklı bu kayma, sensörün etkin hale gelmesine neden olabilir. Bu nedenle, kayma miktarı set değeri için büyük bir öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında, bu kayma sorununu minimize etmek ve sensörün doğru ölçümler yapabilmesini sağlamak için sıcaklık kompanzasyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Bu optimizasyon süreci, sensörün sıcaklık değişimlerine karşı

duyarlılığını minimize etmeyi ve kaymaların minimal olduğu bir çalışma aralığı belirlemeyi hedeflemiştir. Bu sayede, tahıl ürünlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde ölçülmesidir. Sıcaklık değişimine karşı duyarlılığı olan sensörün optimizasyonu için 4. dereceden polinom eğri uydurma tekniği kullanılmıştır. 5 °C'lik adımlar ile yapılan sıcaklık testinden veriler EXCEL ortamına kaydedilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. Test sonucundan elde edilen veriler ile 4.dereceden eğri uydurma için beş adet katsayı elde edilmiştir. Katsayılar yazılıma eklenerek optimizasyon sağlanmıştır. Tekrar edilen sıcaklık testleri ile optimizasyon sonuçları alınmıştır. Böylelikle sensör çıkışında sıcaklık değişimi sonucu oluşan kayma 15mV'a kadar indirgenmiştir. Şekil 2.17 'de sıcaklık kompanzasyon sonucu gösterilmektedir.

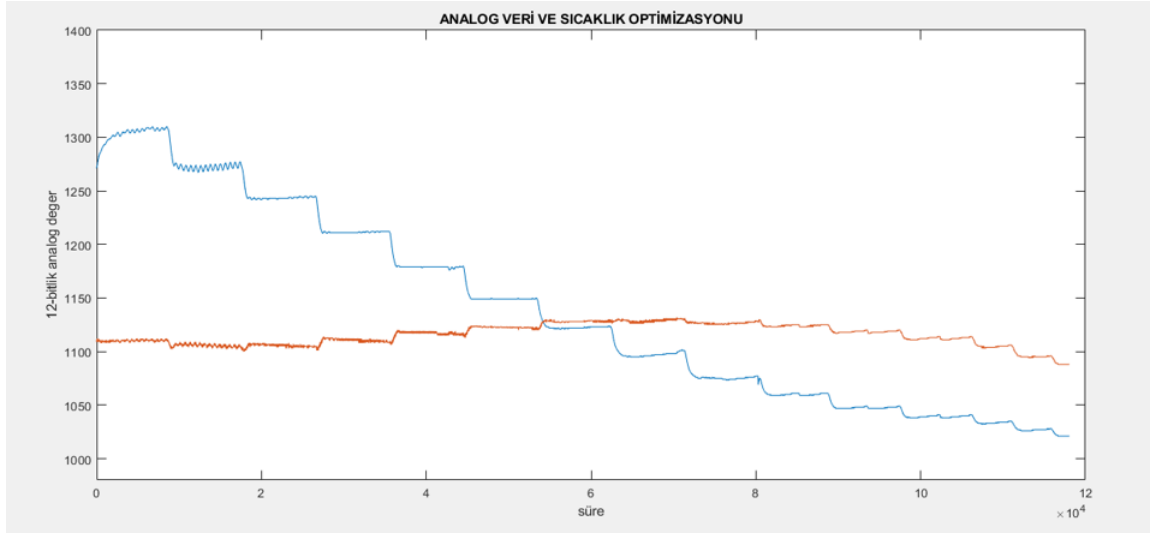
Sıcaklık optimizasyonu, temassız kapasitif yaklaşım sensörlerinin performansını artırarak doğru ve istikrarlı ölçümler yapmalarını sağlar. NPN ve PNP çıkışlı sensörlerde, set değeri ayarlaması gereksinimi ortadan kalktığından, sensörlerin yüksek performansını korumak daha kolay hale gelir. Bu optimizasyon sayesinde endüstriyel uygulamalarda güvenilirlik, hassasiyet ve sürekli performans elde edilir.

Çizelge 2.2. Sıcaklık ve Veri Tablosu

Sıcaklık (°C)	Veri (12-Bit)
-10	1307
-5	1270
0	1243
5	1211
10	1179
15	1149
20	1122
25	1097
30	1074
35	1059
40	1047
45	1038
50	1034
55	1027
60	1021

Sonuç olarak, düşük dielektrik katsayısına sahip ürünler için yapılan sıcaklık optimizasyonu, sensör çıkışında oluşan kaymayı minimize etmeyi ve doğru ölçümler yapabilme yeteneğini artırmayı amaçlamıştır. Sıcaklık

kompanzasyonu sayesinde sensör, sıcaklık değişimlerine karşı daha hassas ve güvenilir bir şekilde çalışabilir. Bu sayede, doğru ölçümler elde edebilir ve yanlış etkinleşmelerin önüne geçebilir.



Şekil 2.17. Sıcaklık Testi ve Optimizasyon Verileri.

2.2.3.1. Polinom Eğri Uydurma

Polinom eğri uydurma denklemleri, sensörün sıcaklığa bağlı davranışını modellemek için kullanılabilir. Farklı sıcaklıklardaki kalibrasyon verilerine bir polinom denklemi uydurarak kapasitans buna göre telafi edilebilir. Bu tekniği uygulayarak, kapasitif sensörlerin doğruluğu, güvenilirliği ve kararlılığı önemli ölçüde iyileştirilebilir ve çeşitli uygulamalarda daha kesin ve tutarlı ölçümler yapılabilir.

2.2.4. Otomasyon için Donanım Optimizasyonu

Otomasyon tabanlı sistemler, kapasitif sensörlerin çıkışlarını sürekli olarak izleyerek performanslarını optimize etmek, çevresel değişiklikleri telafi etmek ve doğru ölçümleri sürdürmek için gerekli takibi sağlar. Kapasitif sensörlerin PLC'ler veya SCADA gibi endüstriyel otomasyon platformlarıyla entegrasyonu bu amaçla büyük önem taşır. Bu entegrasyon, sensör sisteminin geniş bir otomasyon çerçevesinde merkezi olarak kontrol edilmesini, izlenmesini ve optimize edilmesini sağlar.

Temassız kapasitif yaklaşım sensörü, kapasitans değişikliklerini ölçerek bir nesnenin varlığını veya yakınlığını algılayan bir sensördür. Nesne algılama elektroduna yaklaştığında, sensörün kapasitansı nesnenin varlığını gösterecek şekilde değişir. Bu tez çalışmasında otomosyan entegrasyonu için NPN ve PNP anahtarlama devresi tasarlanmıştır. NPN/PNP'li temassız kapasitif sensör, çıkış aşaması için NPN (N-tipi Pozitif-Negatif) veya PNP (P-tipi Pozitif-Negatif) transistörler kullanır. Sensör, sensör ile bir nesne arasındaki kapasitans değişikliklerine dayanarak fiziksel temas gerektirmeden çalışır. Kapasitif eleman, yakınlarda bir nesne olduğunda kapasitans değişikliklerini algılar ve NPN veya PNP transistörlerini kullanarak buna bağlı olarak çıkış sinyalini oluşturur. PNP ve NPN transistörleri, algılanan kapasitans değişikliklerine bağlı olarak farklı çıkış sinyalleri sağlar. PNP çıkışı, sensör bir nesneyi algıladığında pozitif voltaj sağlarken, NPN çıkışı bir nesneyi algıladığında toprak bağlantısı (düşük voltaj) sağlar. Hem PNP hem de NPN çıkışlarına sahip olan bu sensör, geniş bir devre ve uygulama yelpazesine uyum sağlar ve farklı sistemlere entegre etme esnekliği sağlar.

2.3. Mekanik Tasarım ve Entegrasyon

Temassız yakınlık kapasitif sensörler için mekanik muhafaza tasarımı ve entegrasyonu, sensörün işlevselliğini ve dayanıklılığını sağlarken farklı ortamlara sorunsuz bir şekilde entegre etmesini sağlayan koruyucu bir muhafaza oluşturmayı içerir. Tasarım, malzeme seçimi, boyutlar, montaj gereksinimleri ve kablo yönetimi gibi faktörleri göz önünde bulundurarak fiziksel hasara, neme ve toza karşı koruma sağlamaya odaklanır. Entegrasyon, diğer sistem bileşenleriyle uyumluluğunu sağlamaktır. Genel olarak, sensörü koruyan, kolay kuruluma izin veren ve çeşitli çalışma koşullarında optimum performans sağlayan sağlam bir muhafaza oluşturmaktır.

Bu bölümde, kapasitif sensörün muhafaza tasarımı bahsedilecektir. Mekanik tasarım muhafaza tasarımı, ara aparat ve arka kapak kısmından oluşmaktadır.

2.3.1. Muhafaza Tasarımı

Bu tez çalışmasında, temassız kapasitif yaklaşım sensör için mekanik muhafaza tasarımı yapılırken, öncelikli olarak koruma, dayanıklılık ve elektrik yalıtımı sağlayan malzemeler tercih edilmiştir. Tasarım sürecinde çevresel koşullar, mekanik dayanıklılık, korozyon direnci ve üretim uyumluluğu gibi faktörler dikkate alınmıştır. Malzeme seçiminde delrin kullanılmıştır. ABS, PE ve PTPE vb. gibi uygun malzemeler kullanılabilir. Bu malzemeler, sensörün güvenliğini ve dayanıklılığını sağlarken, aynı zamanda üretim süreçlerine uygunluk gösterirler.

Bu çalışmada yapılan mekanik muhafaza tasarımı Şekil 2.18'da gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Muhafaza Tasarımı

2.3.1.1. Ara aparat ve Arka Kapak Tasarımı

Ara aparat ve arka kapak, bir mekanik muhafaza tasarımının önemli bir parçasıdır. Kapasitif yaklaşım sensörleri için ara aparat ve arka kapak iç bileşenlerin korunması ve düzgün çalışması için büyük önem taşır. Arka kapak, genellikle dayanıklı ve elektriksel yalıtım özellikleri sağlayan malzemelerden yapılır. Ayrıca, elektromanyetik girişime karşı yeterli bir koruma sağlamak için uygun bir şekilde tasarlanmalıdır. Montajın kolay olması ve bakım işlemlerinin yapılabilirliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Aynı zamanda, kablo yönetimi için uygun alanlar, bağlantı noktaları, uyarıcı led çıkışları ve contalar da arka kapak tasarımının bir parçası olabilir. Bu tasarımda tasarlanan ara aparat ve arka kapak tasarımları Şekil 2.19'de gösterilmiştir.

Bir sonraki bölüm, gerçek dünya koşullarında kapasitif yakınlık



Şekil 2.19. Ara Aparat ve Arka Kapak Tasarımı

sensörlerinin performansını değerlendirmek için saha testlerinin tasarımına ve uygulanmasına odaklanacaktır. Optimize edilmiş sıcaklık testi metodolojisini saha testiyle birleştirerek, sensör davranışının kapsamlı bir analizi elde edilebilir.

3. TESTLER

Bu bölümde sensörün sensörün saha ortamına bağlanması, saha testleri ve test sonuçlarından bahsedilmiştir.

3.1. Saha Ortamına Bağlanması

Sensör, sahada tipik olarak karşılaşılan çevresel koşullara dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu, toza, neme, titreşimlere ve sıcaklık dalgalanmalarına karşı korumayı içerir. Uygun muhafaza malzemelerinin kullanılması ve uygun sızdırmazlık mekanizmalarının kullanılması, zorlu saha ortamlarında sensörün güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamaya yardımcı olabilir. Gerçek zamanlı saha testleri öncesi kapasitif sensörün saha montajı ve entegrasyonu sağlanmıştır. Fabrika bünyesinde bulunan randıman kantarı bulunmaktadır. Şekil 3.1 'de randıman kantarı ve saha ortamı gösterilmiştir. Sensör randıman kantarının üst kefesine bağlanmıştır. Daha ayrıntılı gösterim Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Randıman Kantarı ve Saha Ortamı.



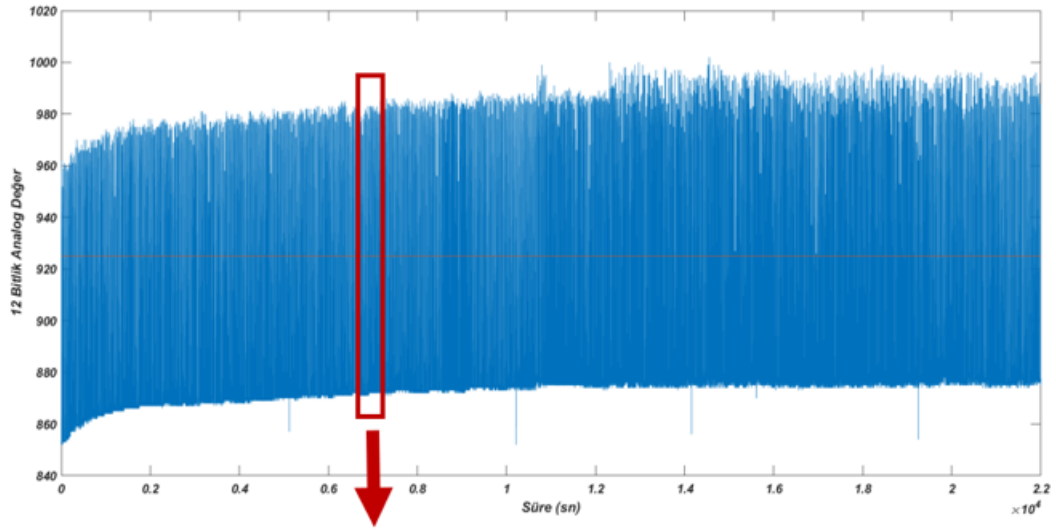
Şekil 3.2. Kapasitif Yaklaşım Sensörünün Sahaya Bağlanması.

3.2. Saha Testleri

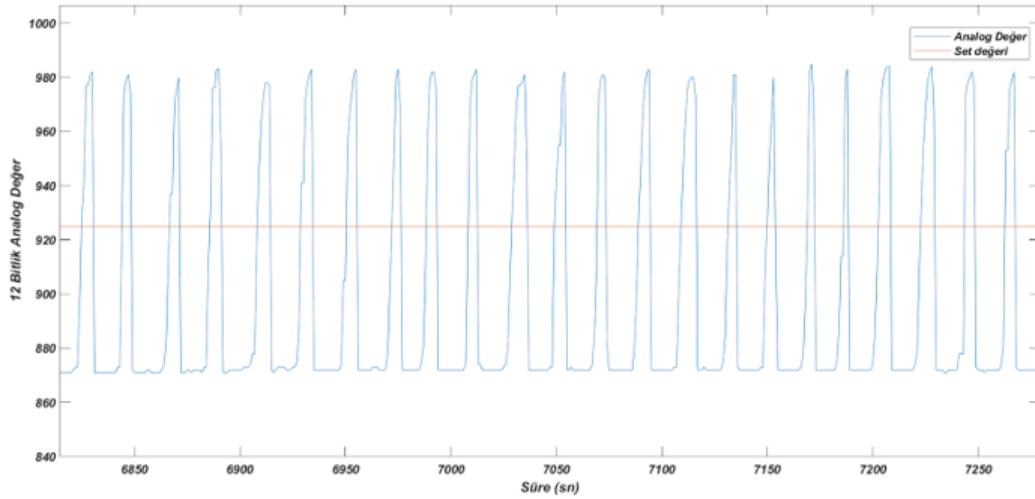
Saha testleri, tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörünün performansını gerçek dünya koşullarıyla değerlendirmek ve sensörün çevre koşullarına karşı duyarlılığı, dayanıklılığı ve güvenilirliğini test etmek amacıyla yapılmıştır. Sensörün doğruluğunu ve hassasiyetini belirlemek için, saha testleri sırasında ölçümler alınmıştır.

Gerçek zamanlı saha testi için randıman kantarı kullanılmıştır. Randıman kantarı, periyodik olarak 20kg'lık ölçümler yapacak şekilde ayarlanmıştır. Üst kefeye bağlı olan kapasitif sensör, bu periyotta kefe içine ürünün dolmasıyla birlikte belirlenen eşik değerini geçmesi durumunda dijital bir çıkış vermektedir. Sonuç olarak gerçek zamanlı olarak ürünün varlığını ve yokluğunu hızlı bir şekilde tespit etmek için kullanılmıştır.

Sensörden elde edilen veriler, nesne tespiti, sıcaklığa olan duyarlılığı ve hassasiyet gibi performans değerlendirmeleri için kullanılmıştır. Ayrıca, sensörün çevresel etkenlere karşı nasıl tepki verdiğini değerlendirmek için sıcaklık gibi çevresel değişkenler de kaydedilmiştir. Böylelikle sensörün performansı hakkında geri bildirimler alınmıştır ve olası iyileştirmeler veya sorunlar hakkında bilgi elde edilmiştir. Şekil 3.3'de alınmış verilerden bir test sonucu gösterilmiştir. Şekil 3.4'de ise kaydedilmiş verilerden alınmış bir kesit gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Temassız Kapasitif Yaklaşım Sensörü Test Sonuçları.



Şekil 3.4. Temassız Kapasitif Yaklaşım Sensörü Test Sonuçları Yakın Gösterimi.

(3.4)'de, ürünün periyodik bir şekilde dolup boşaldığı senaryoda sensörün çıkış durumunu göstermektedir. Belirlenen eşik değerinin (set değeri) üzerindeyken sensör açık, eşik değerinin altındayken ise sensör kapalı konumdadır. Test süresince sensör, doğru zamanda doğru tepkiyi vermiş ve senkronizasyonu sağlamıştır. Ürünün periyodik bir biçimde dolup boşaldığı senaryoda elde edilen sonuçlar, sensörün güvenilirliğini ve performansını desteklemektedir. Bu sonuçlar, temassız kapasitif yaklaşım sensörlerinin ürünün dolup boşaltılması sürecindeki kullanım potansiyelini, sensörün doğru zamanda tepki verdiğini ve çevresel faktörlerden etkilenmediğini doğrulamıştır.

4. TEZ AMACININ DOĞRULANMASI

Bu tezde temassız kapasitif yaklaşım sensörünün performansının doğrulanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, sensörün elektronik tasarımı, mekanik tasarımı, elektrot tasarımı ve sıcaklık optimizasyonu gibi çeşitli bileşenleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu sayede sensörün sinyal gücü, gürültü toleransı ve iletişim kabiliyeti gibi sensörün performansını etkileyen etkiler iyileştirildi.

Elektronik tasarım aşamasında, sensörün sinyal işleme ve veri iletimi için gerekli olan devreler tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Elektronik devre tasarımında AC analizler ile TIA'nın kazanç parametreleri optimize edilmiştir. Kazanç parametrelerini direnç (R_f) ve uyarım sinyalinden bağımsız hale getirip, sıcaklığa karşı olan duyarlılık azaltılmıştır. Ayrıca tasarıma eklenen C_f değeri ile opamp kazancının doyuma gitmesi engellenmiştir. Ayrıca yüksek frekans (250kHz) ile uyarılan elektrot $1/f$ (Flicker Gürültüsü) gürültüsüne bağışıklığı artırılmıştır.

Mekanik tasarım ise sensörün fiziksel yapısını ve montajını içermektedir. Sensörün doğru bir şekilde konumlandırılması ve sabitlenmesi için uygun bir mekanik yapı oluşturuldu. Böylece sensörün titreşimlere karşı dayanıklılığı artırıldı ve doğru ölçümler yapabilmesi sağlandı.

Elektrot tasarımı ise sensörün elektromanyetik alanını oluşturan ve ölçümlerin gerçekleştiği bileşenlerdir. Bu tasarım aşamasında, uygun elektrot geometrisi, malzeme seçimi ve boyutlandırma çalışmaları yapılmıştır. Bu sayede sensörün duyarlılığı ve ölçüm hassasiyeti optimize edilmiştir.

Sıcaklık optimizasyonu da önemli bir aşamadır çünkü sıcaklık değişimleri sensörün performansını etkileyebilir. Sensörün çevresel sıcaklık değişimlerine karşı nasıl tepki verdiği test edilmiş ve gerekli önlemler alınmıştır. Yapılan sıcaklık testleriyle temassız kapasitif yaklaşım sensörünün performansı incelenmiştir. Testler, -10°C ile 60°C arasında 5°C 'lik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, sensör çıkışında sıcaklığa bağlı olarak toplamda 280 mV'lik bir değişim gözlenmiştir. Ancak, sıcaklık kompanzasyonu yöntemi kullanılarak bu değer 15

mV'a kadar indirilmiştir. Sensörün sıcaklık değişimlerine duyarlılığı, sıcaklık kompanzasyonu kullanılarak azaltılmış ve çıkış sinyali istenilen düzeyde stabilize edilmiştir. Böylelikle, sıcaklık etkilerinin sensör performansına olan etkisi minimize edilmiştir. Bu optimizasyon sayesinde sensörün sıcaklık değişimlerine karşı daha stabil ve güvenilir bir şekilde çalışması sağlanmıştır.

Son aşamada, saha testleri gerçek dünya koşullarında sensörün performansını doğrulamak amacıyla gerçekleştirildi. Bu testlerde sensörün ölçüm doğruluğu, hassasiyeti, tepki süresi ve dayanıklılığı gibi faktörler değerlendirilmiştir. Saha testleri sayesinde sensörün gerçek kullanım senaryolarında nasıl performans gösterdiği ve olası iyileştirmelerin neler olabileceği belirlenmiştir.

Bu çalışma, temassız kapasitif yaklaşım sensörünün tahıl silolarında kullanım potansiyelini ve performansını doğrulamayı amaçlamaktadır. Sensörün elektronik, mekanik, elektrot ve sıcaklık optimizasyonu üzerinde yapılan çalışmalar, sensörün doğru ve güvenilir ölçümler yapabilmesini sağlamak için önemli adımlardır. Sensörün optimizasyonu ve iyileştirmeleriyle birlikte, bu teknolojinin grain silo yönetiminde önemli bir araç olabileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, yarı diferansiyel senkron demodülasyon yöntemi temelli temassız kapasitif yaklaşım sensörü tasarımını içermekte olup, düşük dielektrik katsayısına sahip zorlu ölçümler (örneğin, razmol, kepek gibi ürünler) için temassız tespit yöntemlerine odaklanmaktadır. Ayrıca silolardaki nem, toz ve sıcaklık gibi çevre koşullarına dirençli bir sensör tasarımı yapılmıştır. Sonuç olarak, yarı diferansiyel senkron tabanlı temassız yakınlık sensörünün yakınlık algılama uygulamaları için etkili ve güvenilir bir çözüm olduğu kanıtlanmıştır.

Tez çalışması tasarım, optimizasyon, test ve doğrulama olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Tasarım bölümünde, elektronik devre tasarımı, AC/DC simülasyon çalışmaları, elektrot tasarımı ve mekanik tasarımdan oluşmaktadır. Optimizasyon bölümünde otomasyon optimizasyon çalışmaları, sıcaklık testleri ve sıcaklık kompanzasyonu gibi adımlar gerçekleştirilmiştir. Son olarak, test ve doğrulama bölümünde, fabrika ortamında yapılan test sonuçları ve sensörün doğruluğu değerlendirilmiştir.

AC ve DC analizler ile elektronik devredeki parametrelerin belirlenmesinde önemli rol oynamıştır. Direnç (R_f) değerinin AC analizi ile etkisi azaltılarak sıcaklığa duyarlılığı büyük ölçüde azaltılmıştır. Uyarım sinyalinin kazanç parametrelerine olan etkisi de AC analizler ile azaltılmıştır. Elektronik komponentlerin sıcaklığa karşı performansı ideal olmadığından, sıcaklık kompanzasyonu ile sensörün sıcaklık değişimlerine olan duyarlılığı minimize edilmiştir. Sıcaklık kompanzasyonu için, eğri uydurma yöntemi kullanılarak sıcaklık değişimlerinin sensör üzerindeki etkisi 280mV'tan 15mV'a kadar indirgenmiştir.

Test ve doğrulama işlemleri, randıman kantarlarının üst kefesine sensörün bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Randıman kantarı üzerinde 20 kg'lık dolmuş-boşaltım periyoduyla ürünün varlığı ve yokluğu test edilmiştir. Ayrıca, yapılan testler sayesinde sıcaklık optimizasyonunun sensör üzerindeki sıcaklık değişiminin etkisini azalttığı gözlemlenmiştir. Saha testleri, sensörün gerçek dünya kullanım senaryolarında nasıl performans gösterdiğini göstermiştir. Bu testlerin

sonuçları, kapasitif yaklaşım sensörü teknolojisinin ticari uygulamaları ve gelecekteki geliştirme süreçleri için değerli bilgiler sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma tahıl ürünlerinin tahribatsız tespiti için yarı diferansiyel senkron tabanlı temassız kapasitif yaklaşım sensör tasarımının başarılı olduğunu göstermiştir. Sensörün tasarımı, optimizasyonu ve saha testleri ile performansı doğrulanmış ve gelecekte ticari uygulamalarda kullanılabilir potansiyele sahip olduğu kanıtlanmıştır. Ve temassız kapasitif yaklaşım sensörünü millileştirmek adına önemli bir altyapı oluşturulmuştur. Ancak, sensör tasarımının daha da geliştirilmesi ve optimizasyonu için ileri çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmalar, sensörün farklı ürünlerde kullanılabilirliğini artırmak, sıcaklık etkisini minimize etmek ve ticari potansiyelini değerlendirmek için önemli bir adım olacaktır.

5.1. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu tez çalışması ile ileri çalışmalarda sensör tasarımının daha da geliştirilerek farklı ürünlerin tespitinde kullanılabilirliğinin artırılması ve ticari potansiyelinin değerlendirilmesi önerilebilir. Ayrıca, sensörün sıcaklık etkisini daha da minimize etmek için farklı sıcaklık kompanzasyon yöntemleri veya teknikleri üzerinde çalışılabilir. Sensörün enerji verimliliğinin artırılması için güç tüketimi optimizasyonu yapılabilir. Sensörün ticari kullanıma yönelik pazar araştırması ve endüstriyel ortamlarda gerçek kullanım senaryolarında daha kapsamlı testler yapılması önerilebilir. Sensör tasarımında kullanılan malzemelerin maliyeti ve üretilebilirliği de göz önünde bulundurularak, üretim sürecinin optimize edilmesi hedeflenebilir.

KAYNAKLAR

- Aezinia, F. ve Bahreyni, B. (2012). A sensitive interface circuit with wide dynamic range for capacitive sensors. In *SENSORS, 2012 IEEE*, s. 1–4.
- Aezinia, F. ve Bahreyni, B. (2013). An interface circuit with wide dynamic range for differential capacitive sensing applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 60(11):766–770.
- Agrawal, H., Prieto, J., Ramos, C., ve Corchado, J. M. (2016). Smart feeding in farming through iot in silos. In *Intelligent Systems Technologies and Applications 2016*, s. 355–366. Springer.
- Akgul, F. T. (2021). NTC (Negative Temperature Coefficient) Nedir? Nasıl Çalışır? Ne İşe Yarar?
- Areekath, L., George, B., ve Reverter, F. (2020). A closed-loop capacitance-to-frequency converter for single-element and differential capacitive sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(11):8773–8782.
- Banerjee, K., Dam, B., Majumdar, K., Banerjee, R., ve Patranabis, D. (2004). A carrier peak synchronous direct digital demodulation technique and its fpga implementation. *Microprocessors and Microsystems*, 28(1):37–46.
- Bretterklierer, T., Zangl, H., Motz, M., Werth, T., ve Hammerschmidt, D. (2008). Versatile sensor front end for low-depth modulation capacitive sensors. In *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, s. 830–835.
- Cong, Y., Wang-chao, Z., Bin, S., ve Hang-xia, Z. (2011). Study on ntc thermistor characteristic curve fitting methods. In *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*, volume 4, s. 2209–2213.
- Csiba, M., Kovács, A., Virág, I., ve Neményi, M. The most common errors of

- capacitance grain moisture sensors: effect of volume change during harvest. *Precision agriculture*, 14(2):215–223.
- Dargie, W. ve Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- Ding, Y., Zhang, H., ve Thomas, U. (2018). Capacitive proximity sensor skin for contactless material detection. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, s. 7179–7184.
- Draganov, V. ve Tanchev, I. (2005). Device for measuring the level of bulk materials in bunkers. In *Proceedings of the Int. Conf. ICEST*, s. 379–381.
- Duysak, H. ve Yiğit, E. (2019). Level measurement in grain silos with extreme learning machine algorithm. In *2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT)*, s. 1–4.
- Faruque, S. (2017). *Amplitude Modulation (AM)*, s. 17–32. Springer International Publishing, Cham.
- Gaitán-Pitre, J. E., Gasulla, M., ve Pallas-Areny, R. (2009). Analysis of a direct interface circuit for capacitive sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(9):2931–2937.
- Ge, J., Cheng, X., Zhao, C., Gui, K., Zhang, W., Cheikh, F. A., ve Ye, L. (2019). Reflected light intensity-modulated continuous liquid level sensor based on oblique end face coupling optical fibers. *IEEE Sensors Journal*, 20(8):4229–4236.
- González-Landaeta, R., Cota-Ruiz, J., Sifuentes, E., Díaz, J., ve Casas, O. (2020). A fully differential synchronous demodulator for ac signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(1):35–44.
- Hassani, M., Tebianian, H., Mehbodniya, A., ve Mekhilef, S. (2009). Design and implementation of a level detector. In *2009 International Conference for*

Technical Postgraduates (TECHPOS), s. 1–5. IEEE.

He, L., Zhou, Y., Huang, Z., Wang, J., ve Yang, Y. (2014). An ultrasonic level measuring technique based on radiation dissipation and its industrial application. *Flow Measurement and Instrumentation*, 40:178–184.

Heidary, A. (2010). A low-cost universal integrated interface for capacitive sensors.

Hunt, J. A. (2007). Level sensing of liquids and solids—a review of the technologies. *Sensor Review*, 27(3):200–206.

Jayas, D. S. ve others (2007). Sensors for grain storage. In *2007 ASAE Annual Meeting*, s. 1. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Jing, N. (2019). Liquid level measurement based on multi-s-bend plastic optical fiber. *Sensor Review*, 39(4):522–524.

Kar, S. K., Chatterjee, P., Mukherjee, B., Swamy, K. B. M. M., ve Sen, S. (2018). A differential output interfacing ASIC for integrated capacitive sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(1):196–203.

Kar, S. K., Swamy, K. B. M., Mukherjee, B., ve Sen, S. (2015). Systematic development of integrated capacitance measurement system with sensitivity tuning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(10):2738–2746.

Kara, M. R., Yavşan, E., Karali, M., ve Erişmiş, M. A. (2022). A new discrete analog circuit solution for capacitive rotary encoders. *IEEE Sensors Journal*, 22(15):15062–15070.

Karali, M., Karasahin, A., Keles, O., Kocak, M., ve Erismis, M. (2018). A new capacitive rotary encoder based on analog synchronous demodulation. *Electrical Engineering*, 100:1975–1983.

Kirchner, N., Hordern, D., Liu, D., ve Dissanayake, G. (2008). Capacitive sensor for object ranging and material type identification. *Sensors and Actuators A:*

Physical, 148(1):96–104.

- Köse, T., Terzioğlu, Y., Azgın, K., ve Akın, T. (2015). A single mass two-axis capacitive mems accelerometer with force rebalance. In *2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS) Proceedings*, s. 1–4. IEEE.
- Kryvenchuk, Y., Zakharchuk, M., Chervinska, O., Pylypiv, O., ve Shayner, H. (2021). The system of temperature and conditioning control in industrial grain storages. In *ProfIT AI*, s. 106–113.
- Lakhoua, M. N. (2013). Systemic analysis of an industrial system: case study of a grain silo. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(5):1243–1254.
- Lata, A., Kumar, B., ve Mandal, N. (2018). Design and development of a level transmitter using force resistive sensor as a primary sensing element. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(1):118–125.
- Lewis, J. D. (2007). Ensuring successful use of guided-wave radar level measurement technology. *Technical Exclusive*, s. 28–33.
- Lewis Sr, J. D. (2004). Technology review level measurement of bulk solids in bins, silos and hoppers. *2004 Monitor Technologies LLC*.
- Majumder, S. (2017). *DESIGN Design and Implementation of Capacitive Sensor Interfacing Circuit*. PhD thesis, National Institute of Technology, Rourkela.
- Markova, V. I., Dimova, R. S., ve Draganov, V. D. (2011). An architecture design of a monitoring level sensor system. *Annual Journal of Electronics*, 5(2):37–39.
- Matko, V. ve Milanović, M. (2014). Temperature-compensated capacitance–frequency converter with high resolution. *Sensors and Actuators A: Physical*, 220:262–269.
- Nabovati, G., Zhu, Y. W., ve Sawan, M. (2015). *Capacitive Sensor Arrays*, s. 1–12. John Wiley & Sons, Ltd.

- Nelson, S. (1991). Measurement and use of dielectric properties of agricultural products. In *[1991] Conference Record. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, s. 636–640.
- Pal, A., Kalyan, U. P., Harika, C., ve Vasuki, B. (2019). Capacitive sensor for level measurement in hopper/silos-experimental evaluation. In *2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, volume 1, s. 202–205. IEEE.
- Pavliuk, N., Cherskikh, E., Pshchelko, N., ve Shabanova, A. (2019). Circuit schematics of a capacitive proximity sensor. In *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, s. 486–490.
- Praveen, K., Rajniganth, M., Arun, A., Sahoo, P., ve Murali, N. (2015). Continuous-type liquid level measurement system using pulsating sensor. In *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, s. 479–483. IEEE.
- Prit, G., Goyal, P., ve Islam, T. (2019). A novel design of the parallel plate capacitive sensor for displacement measurement. In *2019 IEEE 16th India Council International Conference (INDICON)*, s. 1–4.
- Rai, R., Sivadasan, K., ve Murty, S. (2005). A low cost field usable portable digital grain moisture meter with direct display of moisture (%). *African journal of science and technology*, 6(1).
- Ren, G. C., Yang, Y., ve Guo, H. C. (2012). Intelligent grain storage measurement system design and research. In *Advanced Materials Research*, volume 430, s. 1881–1885. Trans Tech Publ.
- Royo, G., Garcia-Bosque, M., Sánchez-Azqueta, C., Aldea, C., Celma, S., ve Gimeno, C. (2017). Transimpedance amplifier with programmable gain and bandwidth for capacitive mems accelerometers. In *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, s. 1–5.

- Salila Vijayalal Mohan, H. K. ve Malcolm, A. A. (2021). Non-destructive evaluation of food and beverage (f&b) fast moving consumer goods (fmcg) using capacitive proximity sensor. In *2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, s. 1–6.
- Scott, D. M. (2018). *Industrial process sensors*. CRC Press.
- Senturia, S. D. (2005). *Microsystem design*. Springer Science & Business Media.
- Sheng, Z., Ji, C., ve Hua, S. (2018). Application of siemens plc and wincc in the monitoring-control system of bulk grain silo. In *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, s. 4689–4693.
- Singh, C. B. ve Fielke, J. M. (2017). Recent developments in stored grain sensors, monitoring and management technology. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 20(3):32–55.
- Sun, J. ve Jiang, J. (2011). Laser triangulation measurement of the level in a coal silo. *Mining Science and Technology (China)*, 21(6):881–884.
- Taylor, R. ve Shirvaikar, M. (2010). Performance analysis of range sensors for a real-time power plant coal level sensing system. In *2010 42nd Southeastern Symposium on System Theory (SSST)*, s. 188–193.
- Tefera, T., Kanampiu, F., De Groote, H., Hellin, J., Mugo, S., Kimenju, S., Beyene, Y., Boddupalli, P. M., Shiferaw, B., ve Banziger, M. (2011). The metal silo: An effective grain storage technology for reducing post-harvest insect and pathogen losses in maize while improving smallholder farmers' food security in developing countries. *Crop Protection*, 30(3):240–245.
- Tirupathi, R. ve Kar, S. K. (2017). Design and analysis of signal conditioning circuit for capacitive sensor interfacing. In *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, s. 1717–1721.
- Vogt, M. (2018). Radar sensors (24 and 80 ghz range) for level measurement

- in industrial processes. In *2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, s. 1–4. IEEE.
- Wang, J., Salm, C., ve Schmitz, J. (2013). Comparison of c-v measurement methods for rf-mems capacitive switches. In *2013 IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)*, s. 53–58.
- Webster, J. ve Eren, H. (2014). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement preface*.
- Wilson, J. S. (2004). *Sensor technology handbook*. Elsevier.
- Yamazoe, N. ve Shimizu, Y. (1986). Humidity sensors: Principles and applications. *Sensors and Actuators*, 10(3):379–398.
- Yavsan, E., Kara, M. R., Karali, M., Gokce, B., ve Erismis, M. A. (2021). A novel high resolution miniaturized capacitive rotary encoder. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331:112992.
- Yazdi, N., Kulah, H., ve Najafi, K. (2004). Precision readout circuits for capacitive microaccelerometers. In *SENSORS, 2004 IEEE*, s. 28–31 vol.1.
- Yerli, O. (2013). *Ardgermeli Betonarme Silolarının Tasarım Esasları Ve Bir Uygulama*. PhD thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yigit, E., Toktas, A., Sabanci, K., Ustun, D., ve Isiker, H. (2018). 3d level measurement design by using multi static x-band radar. In *2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT)*, s. 1–4. IEEE.
- Zhang, Y., Zhang, B., Zhang, L., Li, Y., Gao, X., ve Liu, Z. (2018). Liquid level measurement model outside of closed containers based on continuous sound wave amplitude. *Sensors*, 18(8):2516.
- İşiker, H. ve Canbolat, H. (2009). Concept for a novel grain level measurement method in silos. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(2):258–267.