



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KAPASİTANS-FREKANS DÖNÜŞÜMÜ TEMELLİ YENİLİKÇİ KAPASİTİF
YAKLAŞIM SENSÖRÜ**

Mustafa Talip KOYUNCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat - 2024

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa Talip KOYUNCU tarafından hazırlanan "*KAPASİTANS-FREKANS DÖNÜŞÜMÜ TEMELLİ YENİLİKÇİ KAPASİTİF YAKLAŞIM SENSÖRÜ*" adlı tez çalışması 16/02/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Akif DURDU

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / ... /20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU

FBE Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK TEYDEP tarafından 1511 3200597 nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

Mustafa Talip KOYUNCU

Tarih: 16/02/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAPASİTANS-FREKANS DÖNÜŞÜMÜ TEMELLİ YENİLİKÇİ KAPASİTİF YAKLAŞIM SENSÖRÜ

Mustafa Talip KOYUNCU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2024, 65 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Doç. Dr. Akif DURDU

Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA

Kapasitif sensörler, birçok endüstriyel ve bilimsel uygulamadaki fiziksel parametrelerin tespiti ve ölçümü için sıklıkla tercih edilen sensör türlerindedir. Bunun nedeni düşük maliyet, hızlı tepki süresi, yüksek doğruluk ve temassız algılama gibi çeşitli avantajlara sahip olmalarıdır. Ayrıca kapasitif sensörler, nesnelerin dielektriksel özelliklerinden faydalanarak ölçüm gerçekleştirdiği için, iletken veya yalıtkan birçok nesnenin kolaylıkla algılanabilmesine olanak sağlarlar.

Tahıl ürünlerinin kapasitif sensörler ile ölçülmesi, gıda endüstrisinde önemli bir konudur. Bu nedenle yapılan tez çalışması, tahıl ürünlerinin kapasitif sensörler kullanılarak ölçülmesi için yeni bir kapasitif yaklaşım sensörünün, tasarlanması, geliştirilmesi ve optimizasyonunu içermektedir. Tasarlanan sensör ile tahıl ürünlerinin depolama esnasındaki durumları (Dolu-Boş) hakkında, bilgi elde edilmesi amaçlanmaktadır. Tahıl ürünleri yapıları itibarıyla çok düşük bir kapasitif değişime (fF) neden olurlar. Bu sebeple tasarlanacak olan sensörün de bu değişimi algılayabilecek nitelikte olması gerekmektedir.

Kapasitif yaklaşım sensörlerini, farklı yöntem ve metotlar kullanarak tasarlamak mümkündür. Bu çalışma kapsamında tasarlanan sensör için, Kapasitans-Frekans Dönüşüm (KFD) tekniğine dayalı, yeni bir osilatör devresi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni osilatör devresi sayesinde, sensör önündeki kapasitansın frekansa dönüştürülmesi ve bu frekans değerindeki değişime bağlı olarak da algılama yapılabilmesi amaçlanmıştır. Yeni tasarlanan osilatör devresinin analizi, bilgisayar tabanlı simülasyon araçları kullanılarak doğrulanmış ve optimize edilmiştir. Simülasyon sonuçları literatürde bulunan standart bir RC osilatör devresi ile karşılaştırılmış ve yeni tasarlanan osilatör devresinin standart bir RC osilatör devresine göre yaklaşık 8 kat daha fazla kazanç sağladığı gözlemlenmiştir.

Simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda, ilk elektronik devre kartı prototipleri oluşturulmuştur. Algılama yüzeyi olarak kapasitif yapıdaki dairesel elektrotlardan yararlanılmıştır. Elektrot kapasitansının değeri, yeni tasarlanan osilatör devresinin çıkış frekansı ile orantılı olacak şekilde ayarlanmıştır. Çıkış sinyalinin frekans değeri de bir mikrodenetleyici yardımı ile anlık olarak ölçülerek, frekans değerindeki değişim takip edilmiştir. Bu değişimin belirli bir seviyenin üzerinde olması halinde, sensörün algılama yaptığı bilgisi, kullanıcıya iletilmiştir. Ardından mekanik tasarımının ilk numuneleri ile ürün algılama testlerine geçilmiştir. Ürün algılama testleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Ürün olarak farklı tanecikli yapıya ve dielektrik katsayıya sahip tahıl ürünleri (mısır, buğday, kepek, razmol) kullanılmıştır. Yapılan testler ile sensör kazanç değerinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Farklı sıcaklık seviyelerinin, sensör üzerinde oluşturabileceği performans kayıplarını önlemek için -10°C ile 60°C arasında sıcaklık testi yapılmış ve elde edilen sonuçlar neticesinde sıcaklık optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Son olarak ise sensör tasarımının temel şartlardaki EMC dayanımı için, EMC testleri ve saha testleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testler ve elde edilen test sonuçları, yeni sensör tasarımının farklı yapıdaki tahıl ürünlerini, temassız ve amacına uygun bir şekilde başarıyla algıladığını göstermiştir. Düşük dielektrik katsayılarına sahip tahıl ürünlerinin (kepek, razmol), sensör üzerinde %2 seviyelerinde frekans değişimine neden olduğu gözlemlenirken, biraz daha yüksek dielektrik katsayılarına sahip tahıl ürünlerinin (buğday, mısır) %6 seviyelerinde frekans değişimine neden olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık kompanzasyonu sayesinde de sıcaklık farklarının sensör performansında oluşturduğu olumsuz etki, büyük ölçüde azaltılmıştır. Bu sonuçlar neticesinde, tasarlanan sensörün tahıl ölçümündeki uygunluğu doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kapasitans-Frekans Dönüşümü, Kapasitif Sensör, Osilatör Devresi, Tahıl Ölçümü, Yaklaşım Sensörü

ABSTRACT

MS THESIS

INNOVATIVE CAPACITIVE PROXIMITY SENSOR DESIGN BASED ON CAPACITANCE-FREQUENCY CONVERSION

Mustafa Talip KOYUNCU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / ELECTRICAL AND
ELECTRONIC ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2024, 65 Pages

Jury

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Assoc. Prof. Dr. Akif DURDU

Asst. Prof. Dr. Sabri ALTUNKAYA

Capacitive sensors are one of the most preferred sensor types for the detection and measurement of physical parameters in many industrial and scientific applications. This is because they have various advantages such as low cost, fast response time, high accuracy and non-contact detection. In addition, since capacitive sensors perform measurements by utilising the dielectric properties of objects, they allow many conductive or insulating objects to be easily detected.

Measurement of cereal products with capacitive sensors is an important issue in the food industry. For this reason, the thesis work includes the design, development and optimisation of a new capacitive proximity sensor for the measurement of cereal products using capacitive sensors. With the designed sensor, it is aimed to obtain information about the status (full-empty) of grain

products during storage. Grain products cause a very low capacitive change (fF) due to their structure. For this reason, the sensor to be designed must be capable of detecting this change.

It is possible to design capacitive proximity sensors using different methods and techniques. In this study, a new oscillator circuit based on Capacitance-Frequency Conversion technique has been developed for the designed sensor. Thanks to this new oscillator circuit, it is aimed to convert the capacitance in front of the sensor into frequency and to make detection depending on the change in this frequency value. The analysis of the newly designed oscillator circuit has been verified and optimised using computer based simulation tools. The simulation results are compared with a standard RC oscillator circuit available in the literature and it is observed that the newly designed oscillator circuit provides approximately 8 times more gain than a standard RC oscillator circuit.

In line with the data obtained from the simulation results, the first electronic circuit board prototypes were created. Capacitive circular electrodes were used as the sensing surface. The value of the electrode capacitance was adjusted to be proportional to the output frequency of the newly designed oscillator circuit. The frequency value of the output signal was measured instantly with the help of a microcontroller and the change in the frequency value was monitored. If this change is above a certain level, the user is informed that the sensor has made a detection. Then, product detection tests began with the first samples of the mechanical design. Product detection tests were carried out in a laboratory environment. Cereal products (corn, wheat, bran, razmol) with different granular structures and dielectric coefficients were used as products. The tests performed aimed to increase the sensor gain value. In order to prevent performance losses that different temperature levels may cause on the sensor, temperature tests were carried out between -10°C and 60°C and temperature optimization process was applied in line with the results obtained. Finally, EMC tests and field tests were carried out for the EMC resistance of the sensor design under basic conditions.

The tests performed and the test results obtained have shown that the new sensor design successfully detects cereal products of different structures in a non-contact and purposeful way. It was observed that cereal products with low dielectric coefficients (bran, razmol) caused a frequency variation of %2 on the sensor, while cereal products with slightly higher dielectric coefficients (wheat, corn) caused a frequency variation of %6. Thanks to the temperature compensation, the negative effect of temperature differences on the sensor performance has been greatly reduced. As a result of these results, the suitability of the designed sensor in grain measurement has been verified.

Keywords: Capacitance-to-Frequency Conversion, Capacitive Sensor, Grain Measurement, Oscillator Circuit, Proximity Sensor

ÖNSÖZ

Günümüzde teknolojinin hızlı ilerleyişi, bilim ve teknoloji alanlarında sürekli olarak yeni araştırma ve gelişmelerin kapılarını aralamaktadır. Bu hızlı evrim, özellikle elektrik ve elektronik alanındaki çalışmalarda, sensör teknolojilerinin gelişimi üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Bu bağlamda, "Kapasitans-Frekans Dönüşümü Temelli Yenilikçi Kapasitif Yaklaşım Sensörü" adlı tez çalışması, tahıl depolama ve işleme süreçlerinde kullanılmak üzere özgün bir kapasitif yaklaşım sensör tasarımını ele almaktadır.

Bu tezin temel amacı, tahılın depolama ve işleme aşamalarındaki varlığını yüksek hassasiyetle tespit edebilen, dayanıklı ve yenilikçi bir kapasitif sensör tasarlamaktır. Bu amaca ulaşmak için, kapasitans-frekans dönüşümü tabanlı özel bir osilatör devresi geliştirilmiştir. Yeni osilatör devresi, sensörün performansını artırmak ve özel gereksinimlere uygun hale getirmek amacıyla özenle tasarlanmıştır.

Tez kapsamında, geliştirilen sensör tasarımının performansı simülasyon ve test süreçleriyle değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar, geliştirilen kapasitif sensör tasarımının sektördeki çeşitli uygulama alanlarında başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir.

Mustafa Talip KOYUNCU

KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	1
1.1. Kapasitif Sensörler ve Kapasitans-Frekans Dönüşüm Yöntemi	3
1.2. Kapasitans-Frekans Dönüşümünde Kullanılan Osilatör Devre Çeşitleri	5
1.2.1. RC Osilatör Devreleri	6
1.2.2. LC Osilatör Devreleri	7
1.3. Kapasitif Sensörler ile Tahıl Ölçüm Uygulamaları	9
1.3.1. Tahıl Seviye Kontrolü	9
1.3.2. Nem Ölçümü	10
1.3.3. Tahıl Tanıma ve Sınıflandırma	10
1.3.4. Tahıl Akış Kontrolü	10
1.4. Tez Konusunun Amacı	11
1.5. Tez Konusunun Önemi	12
2. ELEKTRONİK VE MEKANİK TASARIM	14
2.1. Sensör Elektroniğinin Tasarımı ve Optimizasyonu	14
2.1.1. Kapasitif Sensör Teorisi	14
2.1.2. Elektrot Tasarımı	16
2.1.3. Kapasitans-Frekans Dönüşüm Tekniğine Dayalı Yeni Bir Osilatör Devre Tasarımı Ve Simülasyonu	18
2.1.4. Yeni Tasarlanan Osilatör Devresi ile RC Osilatör Devresinin Karşılaştırılması	22
2.1.5. Mikrodenetleyici Tabanlı Frekans Ölçümü	23

2.1.6. Sensör Çıkış Devresinin Tasarımı	25
2.1.7. Prototip Elektronik Kart Tasarımı ve Üretimi	27
2.2. Sensör Mekaniğinin Tasarımı ve Entegrasyonu	28
2.2.1. Sensör Muhafazasının Tasarımı ve Üretimi	29
3. PROTOTİP SENSÖR ÜRETİMİ VE TESTLERİ	32
3.1. Prototip Sensör ile Tahıl Ürünlerinin Ölçümü	32
3.1.1. Farklı Tahıl Numuneleri ile Performans Değerlendirmesi	32
3.2. Sıcaklık Testleri	34
3.2.1. Farklı Sıcaklık Değerlerinin Sensör Üzerindeki Etkisi	35
3.2.2. Sıcaklık Kompanzasyon Uygulaması ve Sonuçları	39
3.3. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) Testleri	41
3.3.1. Elektriksel Hızlı Geçici Rejim (EFT) Testi	42
3.3.2. Elektrostatik Boşalma (ESD) Testi	45
3.3.3. Ani Yükselmelere Karşı Bağışıklık (Surge) Testi	47
3.3.4. EMC Testine Göre Performans Kriterinin Belirlenmesi	49
3.4. Saha Testi	50
3.4.1. Saha Test Sonuçları ve Değerlendirilmesi	51
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
4.1. Sonuçlar	54
4.2. Öneriler	55
KAYNAKLAR	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 RC osilatör devresi.	6
1.2 LC osilatör devresi.	8
2.1 Tasarlanan sensörün blok diyagramı.	14
2.2 Kapasitif sensör elektrot yapıları.	15
2.3 Elektrot tasarımı.	17
2.4 Kapasitans-Frekans dönüşüm yöntemi blok şeması.	18
2.5 Kapasitans-frekans dönüşüm yöntemi ile tasarlanan yeni osilatör devresi.	19
2.6 Simülasyon sonucunda oluşan yeni osilatör devresinin çıkış sinyali.	20
2.7 Elektrotun 1pF'lık kapasitans değişimine karşılık gelen, frekans değişimi	21
2.8 RC osilatör devresi.	22
2.9 RC osilatör devresinin frekans değişim grafiği.	23
2.10 Gerçekleştirilen frekans ölçümüne ait blok şeması.	24
2.11 Sensör anahtarlama çıkışları.	26
2.12 Sensör anahtarlama çıkışı.	27
2.13 Sensör prototip devre kartı.	28
2.14 Sensör mekaniği teknik resmi.	30
2.15 Sensör mekaniğinin 3D tasarımı.	30
2.16 Sensör muhafazası.	31
2.17 Devrenin muhafazaya yerleşimi.	31
3.1 Tahıl ölçümü için tasarlanan test düzeneği.	33
3.2 Ölçüm numunelerinin nem değerleri.	34
3.3 TK-120 iklimlendirme kabini.	36
3.4 Sıcaklık ölçümü için kullanılan devre modeli.	37
3.5 Sensöre ait sıcaklık-frekans grafiği.	38
3.6 Sıcaklık optimizasyonu için NTC entegrasyonu.	39
3.7 NTC entegrasyonu öncesi ve sonrası sıcaklık-frekans karşılaştırma grafiği. ...	39
3.8 Eğri uydurma yöntemi.	41
3.9 Kompanzasyon sonucunda oluşan çıkış grafiği.	41
3.10 EMC PARTNER TRANSIENT 300 test cihazı.	43
3.11 EFT test sinyali.	44

3.12 Test esnasında sensörün çıkış frekans sinyali.	45
3.13 EXT-TRA3000 ESD tabancası.	46
3.14 ESD testi.	47
3.15 Surge test sinyali.	48
3.16 Sensörün test edildiği saha ortamı ve randıman cihazı.	50
3.17 Sensör montajı.	51
3.18 Test sonucunda elde edilen sensör verilerinin grafiği.	52



ÇİZELGELER LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Farklı tahıl ürünlerinin ölçüm sonuçları.	34
3.2 Sıcaklık-Frekans değerleri.	40
3.3 Uygulanan EMC Testleri	42
3.4 EFT testi deney seviyeleri	44
3.5 ESD testi deney seviyeleri	47
3.6 Surge testi deney seviyeleri	48



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C : Derece-Santigrat

Kısaltmalar

ADC : Analog-Dijital Dönüştürücü

KFD : Kapasitans-Frekans Dönüşümü

PLC : Programlanabilir Mantık Denetleyicisi

PCB : Baskı Devre Kartı

NTC : Negatif Sıcaklık Katsayısı

CNC : Bilgisayar Nümerik Kontrol

EMC : Elektromanyetik Uyumluluk

EFT : Elektriksel Hızlı Geçici Rejim

ESD : Elektrostatik Deşarj

Surge : Ani Yükselme

UART : Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

pF : Piko Farad

fF : Femto Farad

sn : Saniye

us : Mikrosaniye

mm : Milimetre

Hz : Hertz

DC : Doğru Akım

F : Frekans

T : Periyot

N : Darbe Sayısı

k : Kilo

V : Volt

R : Direnç

C : Kapasitans

L : Endüktans

ε : Epsilon (Dielektrik Sabiti)

1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dünya nüfusunun hızla artması ile birlikte, tarımsal üretim, giderek daha fazla önem kazanan bir sektör haline gelmiştir. Gıda talebinin karşılanabilmesi için, tarımsal süreçlerin etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir (Harshini vd., 2021). Bu süreçlerden biri de tahıl ölçümüdür. Tahıl, dünya genelinde temel gıda kaynaklarından biridir ve tarım sektörü için büyük bir ekonomik değer taşımaktadır (Wen ve Wen-jun, 2006). Bu nedenle, tahıl ölçümünde doğruluk ve güvenilirlik, tarım endüstrisinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Geleneksel tahıl ölçüm yöntemlerinin iş gücü yoğunluğu, zaman alıcılığı ve yüksek hata riski gibi zorlukları göz önünde bulundurulduğunda, modern teknolojilerin tarım sektörüne entegrasyonu, tahıl ölçümünde önemli ve gerekli geliştirmeleri beraberinde getirmiştir (Putri vd., 2023). Bu sayede sensör teknolojileri gibi yenilikler, iş gücü yoğunluğunu azaltarak, ölçüm süreçlerini hızlandırarak ve hata yapma potansiyelini minimize ederek modern tahıl ölçümünde önemli geliştirmelere yol açmıştır. Sensörler, tahılın nem içeriğini, sıcaklık değişikliklerini, bozulma riskini ve diğer önemli parametreleri sürekli olarak izleyerek, hızlı ve doğru kararlar alınabilmesine olanak sağlamıştır. Bu da çiftçilere, üreticilere ve diğer paydaşlara daha iyi yönetim ve planlama seçenekleri sunarak, tahıl ölçümünde büyük ilerlemelere neden olmuştur (Raju vd., 2020; Nelson, 2006).

Tahıl ölçümünde, ölçülecek olan fiziksel niceliklerin farklı olması, sensör türlerinin çeşitliliğini de beraberinde getirmiştir. Ancak çeşitli sensör türleri içerisinde kapasitif sensörler, son zamanlarda bu alanda yapılan çalışmaların yoğunlaştığı sensör türlerinden birisidir. Çünkü kapasitif sensörler farklı fiziksel parametrelerin ölçülebilmesi için esnek bir yaklaşım sunar. Tahıl ürünlerinin dielektriksel özelliklerinden yararlanarak ölçüm gerçekleştirirler. Bu sayede kapasitif sensörler, tahılın nem seviyelerini son derece hassas bir biçimde ölçerek kalite kontrolünü sağlayabilmekte ve aynı zamanda tahıl depolama alanlarında meydana gelebilecek olumsuz şartları önceden tespit ederek erken müdahale imkânı sunabilmektedir. Kapasitif sensörlerin bu özellikleri, onları tarım sektöründe tahıl yönetimini daha etkili ve verimli hale getiren değerli bir araç haline getirmiştir (Rufyid-U-Nissa ve Khan, 2019; Sacilik ve Çolak, 2010).

Kapasitif sensörler, kapasitif yapıdaki elektrotlar sayesinde elektrik alan değişimlerini algılayabilen ve buna bağlı olarak da ölçüm gerçekleştiren sensörler olarak tanımlanabilir (Pavliuk vd., 2019; Tirupathi ve Kar, 2018). Bir cismin elektrik yükünü veya dielektrik sabitini ölçerek çevresel değişiklikleri tespit edebilirler. Bu özellikleri sayesinde de iletken veya yalıtkan yüzeylerden bağımsız birçok nesnenin algılanabilmesine olanak sağlarlar (Cheng vd., 2023). Bu nedenle de tahıl ölçümü için kapasitif sensörlerin kullanışlı bir seçenek olduğunu söylemek mümkündür.

Tahılların farklı yoğunluk, nem ve hacim özelliklerine sahip olmaları, kapasitif sensörlerin algılama yetenekleri açısından önemli parametrelerdir (Wu vd., 2018). Bu değişkenler, sensörlerin tahılları algılama ve ölçüm yapma konusunda kolaylık sağlayan kapasitans farklılıklarına yol açarlar (McIntosh ve Casada, 2008; Nelson, 2006). Bu çalışma, kapasitif yaklaşım sensörlerinin tahıl ölçümünde nasıl kullanılabileceğini ve tarım endüstrisine sağlayabileceği potansiyel faydaları değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Kapasitif sensörlerin tahıl ölçümlerinde kullanılması, üreticilere tahıl depolama, işleme ve pazarlama süreçlerini daha etkili bir şekilde planlama ve kaynakları daha etkin bir biçimde yönetme imkânı sunmaktadır. Ayrıca, doğru ve güvenilir ölçümler elde etmek, tarım işletmelerinin stok yönetimini optimize etmelerine ve verimliliklerini artırmalarına önemli katkılar sağlamaktadır (Agrawal vd., 2016). Bu sayede, tahıl miktarları daha hassas bir şekilde belirlenerek, atık ve kayıplar azaltılmakta, depolama alanları optimize edilmekte ve tahıl ürünleri uygun zamanda pazarlama için yönlendirilmektedir (Nelson vd., 2002). Ayrıca, kapasitif sensörlerin kullanımı, kalite kontrol süreçlerinin yönetilmesi için de önemli avantajlar sağlamaktadır. Tahılın nem içeriği, yoğunluğu ve kalite özellikleri gibi parametrelerin doğru bir şekilde ölçülerek değerlendirilmesine olanak tanır. Sonuç olarak, kapasitif sensörlerin tahıl ölçümüne entegrasyonu, tarım sektöründe doğru, güvenilir ve verimli bir ölçüm sürecini destekleyerek, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesine ve gıda güvencesinin sağlanmasına önemli bir katkı sunar (Nelson, 2006).

Kapasitif sensörlerin, tahıl ölçümünde yaygın bir kullanıma sahip olmalarının bir başka nedeni de bu sensörlerin yüksek hassasiyetle çalışabilmesi ve düşük miktarda tahıl numunesiyle bile doğru sonuçlar elde edebilmesidir. (Wu vd., 2018). Ayrıca, kapasitif yaklaşım sensörleri temassız bir ölçüm yeteneğine sahip olduğundan, tahıl ürünlerine zarar vermezler (Kandala vd., 2007). Bu da tahılın kalitesini koruma açısından önemli bir avantajdır. Aynı zamanda temassız ölçüm özelliği, yalnızca gıda

kalitesini korumak ile kalmayıp, sensör aşınması ve kırılmalarına bağlı deformasyonların da önüne geçilmesine neden olmaktadır (Salila Vijayalal Mohan ve Malcolm, 2021). Bununla birlikte, kapasitif sensörlerin bazı zorlukları ve sınırlamaları da vardır. Örneğin, tahıl numunesinin homojen olmaması veya sensörün çevresel etkilere duyarlı olması gibi faktörler ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Bu nedenle, sensör tasarımında ve ölçüm yöntemlerinde dikkatli bir optimizasyon ve kalibrasyon süreci gerekmektedir (Nelson, 1991).

Kapasitif yaklaşım sensörlerinin tasarlanmasına yönelik literatürde birçok farklı yöntem mevcuttur. Ancak bu çalışma kapsamında kapasitans-frekans dönüşüm yöntemi ile tasarlanmış yeni bir osilatör devresi incelenecektir. Ve bu osilatör devresi ile tasarlanan yeni bir kapasitif yaklaşım sensörünün, tahıl ürünlerinin ölçümündeki performans etkileri değerlendirilecektir.

1.1. Kapasitif Sensörler ve Kapasitans-Frekans Dönüşüm Yöntemi

Kapasitif sensörler, genellikle bir kapasitörün değişen kapasitans değerini ölçmek ve bu ölçüm sonucunda da algılama yapabilmek amacı ile geliştirilirler (Areekath vd., 2020). Ancak doğrudan kapasitans ölçümü yapmak oldukça zordur. Çünkü ölçülmek istenen kapasitans değerleri çoğu zaman çok küçük değerlidir ve bu değerleri algılayabilmek hassas ölçüm cihazları gerektirir. Bu problem nedeniyle, kapasitans değerinin daha kolay ve kullanışlı bir şekilde ölçülebilmesi adına farklı teknikler kullanılmıştır. Bu teknikler sayesinde, kapasitans değerinin, başka bir elektriksel büyüklüğe dönüştürülmesi ve ölçümün, dönüştürülen büyüklük üzerinden gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır (Al-Hamry vd., 2021).

Literatürde, kapasitans değerinin ölçülmesi için geliştirilen çeşitli yöntemler içerisinde akım, voltaj veya frekans dönüşüm yöntemleri gibi farklı elektriksel büyüklükler üzerinden yapılan ölçüm çalışmaları, öne plana çıkmaktadır (Ghoor vd., 2017). Ancak, kapasitansın akım veya voltaj gibi analog büyüklükler üzerinden ölçülmesi, her ne kadar yüksek çözünürlükte ölçümlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlasa da analog sinyallerin doğası gereği, gürültüye karşı oldukça duyarlıdır (Khan vd., 2015). Bu durum, özellikle hassas ölçümlerin yapılmasının gerektiği durumlarda, kademeli amplifikatörler, filtre devreleri ve yüksek çözünürlüklü analog-dijital dönüştürücülere (ADC) ihtiyaç duyulabileceği anlamına gelir. Dolayısıyla, bu

gereksinimler nedeniyle de daha karmaşık ve maliyetli tasarımlar ortaya çıkmaktadır (Lu vd., 2020).

Öte yandan, kapasitansı frekansa dönüştürme yöntemi, adından da anlaşılacağı üzere, kapasitans değerinin, frekans değerine dönüştürülmesi yöntemidir. Dijital bir çıkış sinyali üretme özelliği sayesinde diğer yöntemlere göre birtakım avantajlar sağlamaktadır. Bu yöntem, analog sinyallerin aksine, gürültülere karşı daha dirençlidir ve daha az duyarlıdır. Dolayısıyla, ölçüm süreçlerindeki istenmeyen etkilerin azaltılması mümkün olurken, tasarım karmaşıklığı ve maliyet açısından da önemli bir avantaj sunmaktadır (Sreenath ve George, 2017; Aragonés vd., 2010). Dijital sinyal işleme teknikleri sayesinde, ölçülen kapasitans değerleri daha doğru ve istikrarlı bir şekilde elde edilebilir. Bu nedenle, kapasitansı frekansa dönüştürme yaklaşımı, günümüzde tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir ve birçok uygulamada kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yüksek hassasiyet, düşük gürültü düzeyi ve uygun maliyetli tasarım imkânı sunması, bu yöntemin popüleritesini artıran etmenler arasındadır (Khan vd., 2015).

Kapasitans-frekans dönüşüm yöntemi ile tasarlanan bir kapasitif sensör, temel olarak üç bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilki, algılama yüzeyi olarak da bilinen, kapasitif yapıdaki elektrotlardır. İkinci olarak ise çıkış frekansının değeri, elektrot kapasitansı ile orantılı osilatör devreleridir. Son olarak ise, osilatör devresinin çıkış frekansını ölçmeye yarayan karşılaştırma devreleridir (Salila Vijayalal Mohan ve Malcolm, 2021).

Elektrotlar, kapasitif sensörlerde nesnelere varlığını, mesafesini veya özelliklerini belirlemek için, kapasitans değişikliklerine duyarlı çalışan fiziksel yapılardır. Bu elektrotlar, kapasitörlerin temel çalışma prensipleriyle hemen hemen aynı özelliktedir (Rosario ve Fruett, 2021). Ancak normal bir kapasitör gibi sabit değerlikte değildir. Oluşturdukları elektrik alan sayesinde, ortam ve nesnelere etkileşim halindedir. Ve bu sebepten dolayı değişken değerlikteki bir kapasitörmüş gibi düşünülebilir (Kim vd., 2014). Elektrotların kapasitans değeri, önünde herhangi bir nesne olmadığı durumlarda genellikle sabit değerliktedir. Ancak elektrot yakınına bir nesne girişi veya teması sonucunda, kapasitans değeri değişime uğrar. Ve bu kapasitans değişimi, bir osilatör devresi yardımıyla frekans değişimine çevrilir (Al-Hamry vd., 2021).

Farklı yapıda osilatör çeşitleri vardır ancak, temel olarak hepsi aynı işlevi görür

ve devre için gerekli olan frekans sinyallerini üretirler. Kapasitans-frekans dönüştürme yöntemine sahip bir yaklaşım sensörü, dielektrik olarak hava ile bir algılama yüzeyinden kontrol edilebilir algılama derinliğine sahip, salınımlı bir elektrik alanı oluşturmak için yüksek frekanslı bir osilatör kullanır. Elektrik alan oluşturmak için sisteme verilecek olan osilasyon, bazen harici bir entegre ile (Ghoor vd., 2017) bazen de kapalı çevrim bir döngü (Sreenath ve George, 2017) ile devrenin kendisi tarafından karşılanır. Bu sayede sistem için gerekli olan osilasyon frekansı, istenilen seviye de ayarlanmış olur. Frekans değeri, elektrot kapasitansının değeriyle değişkenlik göstererek, algılama için gerekli olan elektriksel sinyal elde edilir.

Elde edilen frekans değerini ölçmek bir karşılaştırma devresine ihtiyaç vardır ve genellikle bu işlem için bir mikrodenetleyiciden yararlanır. Mikrodenetleyici, frekans değerini hassas bir şekilde ölçmek için kullanılacak en uygun elektronik bileşendir. Bu sayede frekans değeri anlık olarak takip edilebilir ve ölçüm sonuçlarına dayalı olarak çeşitli işlemler gerçekleştirilebilir (Czaja, 2023). Bu yaklaşım, sinyal bütünlüğünü koruyarak hassas ölçümler yapmayı sağlar. Aynı zamanda dijital çıkış, yüksek doğruluk ve gürültü bağımsızlığı sağlar. Bu özellikler, elde edilen verilerin güvenilir ve kesin olmasını sağlayarak doğru sonuçlara ulaşmayı kolaylaştırır. Dijital çıkışın bir diğer avantajı, iletişim ve arayüz basitliğidir. Dijital verilerin iletimi genellikle daha kararlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilir. Bu da ölçüm sonuçlarının diğer cihazlar veya sistemlerle kolayca paylaşılmasını sağlar. Ayrıca, mikrodenetleyici üzerindeki kodlama işlemleri, elde edilen verileri işlemek ve istenen sonuçlara ulaşmak için oldukça esnek bir yaklaşım sunar (Czaja, 2022).

1.2. Kapasitans-Frekans Dönüşümünde Kullanılan Osilatör Devre Çeşitleri

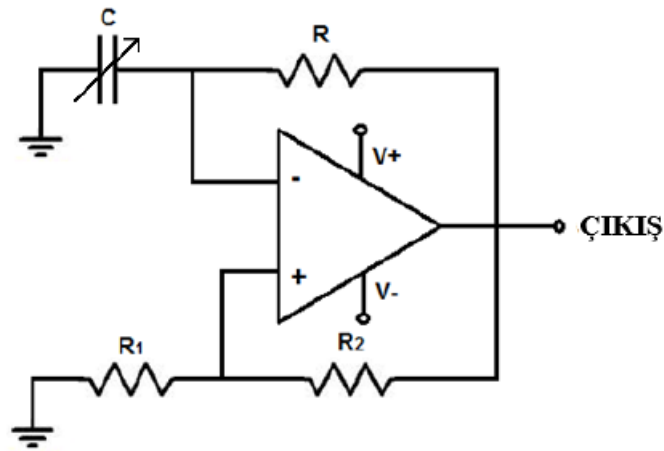
Farklı tasarımlara sahip osilatör devrelerinin varlığı, ölçüm amacıyla kullanılan kapasitörün değer aralığını genişletmede kritik bir rol üstlenir. Bu çeşitlilik, her bir osilatör devresinin farklı frekans aralıklarında çıkış sinyalleri üretebileceği anlamına gelir. Her osilatörün ürettiği frekans aralığı, ölçüm yapılan kapasitansın değerine uygun bir çözüm sunabilmesi için göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür. Bu noktada, devrede kullanılan kapasitör bileşenlerinin değer aralıklarının kısıtlı olabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, istenen kapasitans değerine en uygun osilatör devresinin seçimi büyük bir önem taşır (Sacilik ve Çolak, 2010).

Bir diğ er göz önünde bulundurulması gereken etken ise kapasitansın değ iş imi esnasında, frekans değerinde meydana gelebilecek değ iş imin miktarıdır. Bu etken, genellikle sensör uygulamalarında "hassasiyet" veya "kazanç" terimleriyle anılır. Hassasiyet veya kazanç, bir kapasitans biriminin değ iş imine karş ılık gelen frekans değerindeki değ iş im miktarını ifade eder ve sistemin ne kadar hassas ölçümler gerçekleşt irebileceğ ini belirler. Bu etken, özellikle hassas ölçüm sistemlerinin doç ruluğu ve güvenilirliğ i açısından büyük bir öneme sahiptir (Vig ve Walls, 2000).

1.2.1. RC Osilatör Devreleri

Bu devreler, direnç (R) ve kapasitans (C) elemanları kullanılarak bir osilasyon sinyali üretmek amacıyla tasarlanmışt ır. RC osilatörleri, belirli bir frekansta sürekli bir titreş im sinyali üretirler. Devrenin temel prensibi, bir kapasitörün enerji depolama ve deş arj sürecine dayanır. Baş langıçta ş arj edilmiş bir kapasitör, deş arj edilene kadar enerjiyi depolar. Bu deş arj süreci, kapasitörün kendisini bir zaman sabiti ($\tau = RC$) içinde deş arj etmesiyle gerçekleş ir. Ardından, kapasitör tekrar ş arj edilir ve bu iş lem sürekli bir osilasyon dö ngüsü oluşturur (Bolea vd., 2007; Wen, 2019).

RC osilatörleri, düşük frekanstaki osilasyon sinyalleri üretmek için kullanılır ve frekansları, R ve C elemanlarının değerlerine bağ lı olarak ayarlanabilir. Bu devreler, saat devreleri, zamanlama devreleri, frekans sentezleyiciler ve benzeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Ş ekil 1.1'de basit bir dolup boş almalı RC osilatör devresine bağ lanmış , değ iş ken bir kapasitör gösterilmektedir (Bolea vd., 2007; Anjanakumari vd., 2019).



Ş ekil 1.1. RC osilatör devresi (Anjanakumari vd., 2019).

$$f_0 = \frac{1}{2RC \ln\left(\frac{2R_1+R_2}{R_2}\right)} \quad (1.1)$$

Osilatör devresinin çıkış frekansı Denklem 1.1’de belirtilen matematiksel ifade ile hesaplanabilir (Anjanakumari vd., 2019). Bu matematiksel ifadeye göre C değeri ile çıkış frekansının değeri arasında ters bir orantı vardır. C değerinin azalması halinde çıkış sinyalinin frekans değeri artacak, C değerinin artması durumunda ise frekans değeri azalacaktır. Bu sayede, kapasitans değişimine duyarlı bir osilatör devresi elde edilmiş olur (Bolea vd., 2007; Aragonés vd., 2010).

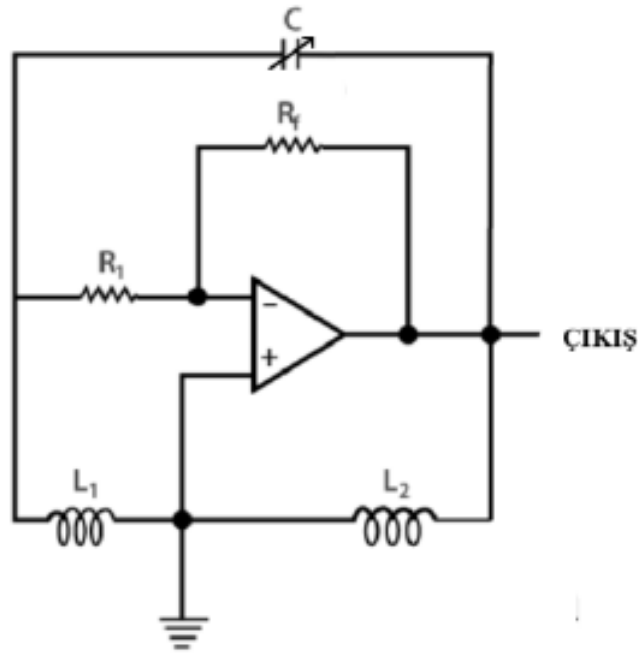
RC osilatör devreleri, kapasitans-frekans dönüştürücü olarak kullanıldığında yüksek hassasiyet ve çözünürlük sunabilirler. Bu devreler, kapasitans değerlerini ölçme yeteneği, basit ve ekonomik tasarımı ile dikkat çekerler. Kapasitans ölçümü, elektronik ve endüstriyel uygulamaların temel bir gereksinimidir ve RC osilatör devreleri, bu gereksinimi karşılamak için ideal bir araç sunarlar. Ancak, çıkış frekansı üzerinde yalnızca kapasitörlerin etkisi bulunmaz, aynı zamanda dirençlerin de etkisi söz konusudur. Direnç bileşenlerinin sıcaklıkla olan ilişkisi, çıkış frekansının stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu, istenmeyen bir durumdur çünkü kapasitans değeri için yapılan ölçümler, sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak sonuçlarının değişmesine neden olabilir. Bu etkiyi en aza indirebilmek için sıcaklık kompanzasyonu gereklidir. Böylece, sıcaklık etkisinin telafisi sağlanmış olur (Czaja, 2023; Matko ve Milanović, 2014; Ibrahim vd., 2020).

1.2.2. LC Osilatör Devreleri

LC osilatör devresi, elektronik mühendisliği ve iletişim sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak kullanılan bir osilatör türüdür. Bu devre, endüktans (L) ve kapasitans (C) elemanlarını kullanarak osilasyon sinyali üretmek amacıyla tasarlanmıştır. LC osilatörleri, genellikle yüksek frekansta çalışan ve kararlı bir çıkış sinyali üreten devreler olarak bilinir. Devrenin temel çalışma prensibi, endüktans ve kapasitansın enerji depolama ve deşarj süreçlerine dayanır. Endüktans, enerjiyi manyetik alan içinde depolar ve bu alanın deşarj edilmesiyle osilasyon başlar. Kapasitans ise, enerjiyi elektrik alan içerisinde depolar ve bu alanın deşarj edilmesiyle endüktansın enerjisini alır. Bu sürekli enerji değişimi, devrede kararlı bir osilasyon

döngüsü yaratır. LC osilatörleri, radyo frekansı üretiminden güç yükselteçlerine kadar birçok farklı uygulama için kullanılır ve frekansları, L ve C elemanlarının değerlerine bağlı olarak ayarlanabilir. Bu devreler, iletişim sistemlerinin temel yapı taşlarından biri olarak önemli bir rol oynar ve yüksek frekansta kararlı sinyal üretme yetenekleriyle dikkat çekerler (Garinto vd., 2020; Chlis vd., 2016; Hershenson vd., 1999).

KFD (Kapasitans-Frekans Dönüşümü), LC osilatör devreleri için de geçerlidir. LC devresindeki kapasitörler de çıkış frekansını doğrudan etkilemektedir. Ancak LC devrelerinin RC devrelerine göre farkı, Denklem 1.2’de de belirtildiği üzere kapasitansın, frekans değerine kök ile orantılı bir bağlılığının olmasıdır. Bu sebepten dolayı LC devrelerinin, kapasitör değerindeki bir birimlik değişimin RC osilatör devrelerine göre daha düşük kazanca sahip olacağı söylenebilir. Şekil 1.2’de çıkış frekansı C değerine bağlı bir LC osilatör devresi gösterilmektedir (Garinto vd., 2020; Hershenson vd., 1999).



Şekil 1.2. LC osilatör devresi (Garinto vd., 2020).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{es}C}} \quad (1.2)$$

$$L_{es} = L1 + L2 \quad (1.3)$$

Şekil 1.2’de gösterilen devrede LC osilatör devresinin çıkış frekansı C kapasitörüne ve L1-L2 bobininin, Denklem 1.3’te belirtildiği gibi eş değer endüktanslarına bağlıdır. Çıkış frekansının direnç değerine bağlı olmaması, LC devrelerinin, sıcaklığa bağlılığını azaltır. Bu sayede ölçüm sırasında oluşabilecek sıcaklık farkları hataya sebebiyet vermez. Bu durum sıcaklık duyarlılığı açısından LC osilatör devrelerini, RC osilatör devrelerine göre daha avantajlı kılar. Düşük frekanslar için uygun değildir. Yüksek frekanslarda daha kararlı sonuçlar elde edilir (Hajimiri ve Lee, 1999; Garinto vd., 2020).

1.3. Kapasitif Sensörler ile Tahıl Ölçüm Uygulamaları

Kapasitif sensörler, tahıl ölçümü alanında yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, tahıl seviye kontrolü, nem ölçümü, tahıl tanıma ve tahıl akış kontrolü gibi bir dizi kritik uygulamada önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle tahıl depolama gereksinimlerinde, hasat sonrası ürünlerin uzun süreli saklanması gerektiği durumlarda, kapasitif sensörler, bu depo alanlarının tahıl seviyelerini sürekli ve hassas bir şekilde izleyerek depo verimliliğini artırma konusunda kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca tahılın sınıflandırılması ve ayrılması, tahıl endüstrisinde kalite kontrolünün vazgeçilmez bir parçasıdır. Kapasitif sensörler, tahılın nem içeriğini ölçerek, ürün kalitesini titizlikle değerlendirir ve aynı zamanda istenmeyen yabancı maddelerin varlığını tespit etme konusunda da başarılıdır. Bu, tahılın ticari değerini artırmanın yanı sıra, tüketici sağlığı ve güvenliği açısından da son derece önemlidir. Bu bağlamda, kapasitif sensörler, tahıl endüstrisinin hem verimliliğini artırmak hem de kalite standardını yükseltmek için kullanışlı bir araç olarak kabul edilmektedir. (Isiker ve Canbolat, 2009; Zia-Ur-Rehman, 2006).

1.3.1. Tahıl Seviye Kontrolü

Kapasitif sensörler, tahıl depolama sistemlerindeki tanklar veya silolar içerisindeki tahıl seviyelerinin sürekli ve yüksek hassasiyetle takip edilmesi amacıyla etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu sensörler, elektrik alan temelinde çalışarak, iki yüzey arasındaki elektriksel kapasitansın değişkenliğini algılayarak işlev görürler. Tahıl seviyesindeki artışlar veya azalmalar, sensörün tespit edebildiği kapasitans değişimleri şeklinde belirginleşir. Bu sistem sayesinde, tahıl depolama kapasitesi anlık

olarak izlenerek, muhtemel aşırı yüklenme veya tahliye durumları önceden tahmin edilebilir hale gelmektedir (Nelson, 1991).

Tahıl depolama ve yönetim süreçlerinde bu kapasitif sensör teknolojisinin kullanımı hem endüstriyel hem de tarımsal alanlarda önemli bir araştırma ve uygulama alanı oluşturmaktadır. Bu teknoloji, tahıl seviyelerinin gerçek zamanlı olarak takip edilmesini sağlayarak, depolama tesislerinin daha etkin bir şekilde işletilmesine olanak tanır. Ayrıca, tahıl seviyelerindeki ani değişimler veya potansiyel aşırı doluluk durumları gibi riskler önceden tespit edilerek, olumsuz sonuçların önüne geçilmesi sağlanır (Isiker ve Canbolat, 2009).

1.3.2. Nem Ölçümü

Kapasitif sensörler, tahılın nem içeriğinin belirlenmesinde hayati bir rol oynarlar. Tahılın nemi, depolama koşulları, işleme süreçleri ve nihai ürün kalitesi üzerinde derinlemesine etkilere sahiptir. Bu nedenle, tahılın nem içeriğini doğru bir şekilde belirlemek, tahılın kalitesini değerlendirmek ve uygun depolama koşullarını sağlamak için kritik bir adımdır (M. E. Casada, 2009).

Kapasitif sensörler, tahıl numunesinin içerdiği su miktarının kapasitans üzerindeki etkilerini analiz ederek çalışırlar. Bu sensörler, tahılın içerdiği suyun miktarına duyarlıdır ve bu nedenle tahılın nem içeriğini hassas bir şekilde tespit etmek için kullanılır. Bu tespit, hem endüstriyel işlemlerde hem de araştırma amaçlı tahıl analizlerinde büyük önem taşır (Sreenath ve George, 2017; Hanlı vd., 2020).

1.3.3. Tahıl Tanıma ve Sınıflandırma

Tahıl tanıma ve sınıflandırma konusunda kapasitif sensörler, özgün bir strateji sunmaktadır. Her tahıl türü veya kalite seviyesi, kendine özgü kapasitans karakteristikleri üretebilir. Bu özellik, otomatik sınıflandırma süreçlerinin etkinliğini artırırken, insan müdahalesi gereksinimini en aza indirir. Kapasitif sensörler, büyük veri setlerini hızlı ve etkili bir şekilde işleyebilme yetenekleri sayesinde tahıl türlerini ayırt etmeyi daha hızlı hale getirir. Böylece tarım endüstrisinde üretim verimliliğini artırmak için önemli bir araç oluşturur. Aynı zamanda, çevre dostu yaklaşımların geliştirilmesine olanak sağlar ve tarım sektörünün sürdürülebilirliğini destekler (J.V. Stafford, 1996).

1.3.4. Tahıl Akış Kontrolü

Tarım ve gıda endüstrilerinde, kesintisiz ve verimli bir üretim akışının sağlanması, genel işletme verimliliği açısından hayati önem taşır. Bu bağlamda kapasitif sensörler, tahılın üretim hattında beslenme ve taşıma süreçlerinin izlenmesi ve kontrol edilmesi amacıyla başarılı bir biçimde kullanılmaktadır.

Üretim hattında, tahılın konveyör bantları üzerinde taşınması sırasında bir dizi zorlayıcı faktör, üretim sürecinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olabilir. Bu faktörler, tahılın sıkışması, tıkanması veya düzensiz dağılımı gibi sorunları içerebilir. Bu sorunlar, anında müdahale edilmedi takdirde, üretim hattının durmasına, buna bağlı olarak da mali kayıplara sebebiyet verebilmektedir. Kapasitif sensörler, bu tür sorunları algılayarak üretim hattının düzgün bir şekilde işlenmesini sağlar. Sensörler, tahılın akışını, yük miktarını ve konumunu sürekli olarak izlerler. Bu sayede, olası tıkanmalar veya aksamalar hızla tespit edilebilir ve operatörlere anında uyarılar gönderilir. Bu erken uyarılar, gerektiğinde müdahale edilerek üretim kesintilerinin önlenmesine ve üretim süreçlerinin verimliliğinin artırılmasına olanak sağlar (P. Reyns, 2002).

1.4. Tez Konusunun Amacı

Bu çalışma, kapasitif yaklaşım sensörlerinin sunduğu yüksek duyarlılık, hızlı tepki süresi ve temas olmadan çalışabilme özelliği gibi avantajları kullanarak, özellikle tanecikli yapıya sahip ürünlerin kolaylıkla algılanabilmesine olanak sağlayacak, yenilikçi bir kapasitif yaklaşım sensörünün tasarlanmasını içermektedir.

Bu işlem için, Kapasitif-Frekans Dönüşüm (KFD) tekniğine dayalı ve oldukça küçük kapasitif değişimleri (10-100fF aralığında) tespit edebilen yeni bir osilatör devresi tasarlanmıştır. Bu osilatör devresi yarı diferansiyel tabanlı bir yapıya sahiptir ve kapasitans değişiminin frekans değişimine olan kazancını arttırmak için özel olarak geliştirilmiştir. Amaç, çeşitli hal ve yapıdaki ürünlerin (katı, sıvı, toz, tanecik gibi) farklı koşullarda algılanabilirliğini arttıracak yeni bir yaklaşım sunmaktır. Özellikle, değirmen sektöründe kullanılan ürünlerin tanecikli yapıları ve düşük dielektriksel katsayılarına sahip olmalarından dolayı oluşturdukları ölçüm zorluklarına çözüm olmayı hedeflemektedir. Bu tahıl ürünlerine razmol ve kepek gibi maddeler örnek gösterilebilir. Yapıları gereği kapasitif sensörlerle olan etkileşimleri oldukça düşüktür. Ancak tasarlanacak olan yeni sensör ile bu ürünlerin 25°C sıcaklık altında yaklaşık %2-2.5 gibi

bir frekans değişim kazancı ile ölçülmesi amaçlanmıştır.

Bu yeni kapasitif yaklaşım sensörü tasarımı, temassız ölçüm kabiliyeti sayesinde ürünlerin tanecikli yapılarını algılamak için geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkili ve doğru sonuçlar sağlayacaktır. Ayrıca, düşük maliyetli bir üretim imkânı sunarak, endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılabilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede, çeşitli sektörlerdeki üretim süreçlerinde daha güvenilir ve hassas ölçüm teknikleri kullanılarak, ürün takibi, ürün tespiti ve seviye belirleme gibi uygulamalarda önemli avantajlar sağlanacaktır.

Bu araştırma aynı zamanda literatüre yeni bir devre tasarımı kazandırarak, kapasitif yaklaşım sensörlerinin kullanım alanını genişletecek ve daha ileri düzeyde araştırmaların yapılmasına zemin hazırlayacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma tanecikli ürünlerin algılanmasındaki zorluklara çözüm sunacak, endüstriyel uygulamadaki verimliliği arttıracak ve daha ileri düzeyde araştırmalar için örnek teşkil edecek yenilikçi bir yaklaşım sunma amacı taşımaktadır.

1.5. Tez Konusunun Önemi

Tarım sektöründe, tahıl ürünlerinin doğru bir şekilde ölçülmesi, depolama, ticaret ve işleme süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, doğru ve verimli bir ölçüm yöntemi kullanmak, tarım endüstrisinin rekabetçiliğini artırmak ve kaynakları optimize etmek için kritik bir öneme sahiptir. Yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörü ile tarım endüstrisinde doğru ölçümlerin sağlanması ve kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca gıda üretim proseslerinde, sıklıkla kullanılan temaslı sensörlerin, kırılma ve deformasyonlara bağlı olarak ürün içerisinde oluşturabileceği sağlık sorunlarına, temassız ölçüm sayesinde çözüm üretebilecektir.

Endüstriyel ortamlarda kullanılan kapasitif yaklaşım sensörlerinin, üretimi ve geliştirilmesi ile alakalı ülkemizde yeterli bir çalışma mevcut değildir. Buna bağlı olarak kullanılan sensörlerin neredeyse tamamı ülkemize ithal olarak getirilmektedir. Bu sebepten dolayı yapılacak olan çalışma ulusal anlamda yenilik içermektedir. Aynı zamanda sensör elektroniğinin özgün bir tasarıma sahip olması literatüre sağlayabileceği kazanımlar açısından da büyük öneme sahiptir. İthal edilmekte olan kapasitif yaklaşım sensörünün yapılacak çalışmalar ile millileştirilmesi ve de piyasada muadillerinin yerini alabilecek rekabetçi bir ürün prototipinin oluşturulması, bu alan ile

alakalı gelecekte yapılacak çalışmalara da rehber niteliğinde olacaktır. Ayrıca düşük seviyedeki kapasitans değişimlerini algılayabilmesi nedeniyle, yalnızca değirmen sektöründe değil, bunun gibi kapasitif ölçüm gerektiren birçok sektör için de alternatif oluşturacaktır. Bunun yanı sıra, ithal ürünlerin ülke çapında oluşturduğu tedarik ve teknik destek sorunlarının kolaylaştırılmasına da katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, bu gelişme, yeni bir kapasitans-frekans dönüşüm devresinin literatüre sağlayacağı katkılar ile elektronik teknolojilerin ilerlemesine önemli bir destek sunacaktır.



2. ELEKTRONİK VE MEKANİK TASARIM

Bu bölümde, yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörünün geliştirilme sürecine ve bu sürecin ayrılmaz iki bileşeni olan elektronik ve mekanik tasarımların ayrıntılı analizine ağırlık verecektir. Sensörün başlangıç aşamasından sonuçlarının elde edildiği noktaya kadar geçen tüm adımları içeren tasarım süreci incelenecek ve her bir aşamada alınan kararlar ve yapılan iyileştirmeler açıklanacaktır. Son olarak, tasarım sürecinin sonuçlarına dayalı olarak geliştirilen sensör prototipi ve bu prototip üzerinde yapılan performans testleri ve çevresel uyumluluk testleri sunulacaktır. Bu bölüm, kapasitif yaklaşım sensörünün kapsamlı bir şekilde incelenmesini ve geliştirilme sürecinin her aşamasının ayrıntılı bir analizini sunarak, sensörün potansiyel uygulamalarına ve gelecekteki gelişmelere katkı sağlayacak önemli bilgiler sunacaktır.

2.1. Sensör Elektroniğinin Tasarımı ve Optimizasyonu

Tasarlanan yeni sensör elektroniğinin yapısı, kapasitans frekans dönüşüm yöntemi ile tasarlanan kapasitif sensörlerin, genel yapısına benzer olacak şekilde dört bileşenden oluşmaktadır (Salila Vijayalal Mohan ve Malcolm, 2021). Tasarıma ait genel blok şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Tasarlanan sensörün blok diyagramı (Salila Vijayalal Mohan ve Malcolm, 2021).

Bu bölümde, blok şemasında gösterilen aşamaların her biri için gerçekleştirilen çalışmalar detaylı bir şekilde incelenecektir. Bu değerlendirme sürecinde, öncelikle her aşamadaki bileşenlerin genel amaçları anlaşılacak, ardından her bir aşama için gerçekleştirilen araştırmalar ve uygulamalar detaylı bir şekilde değerlendirilecektir. Son olarak bu bileşenlerin birbirleri ile olan entegrasyonu sonucu oluşan sensör tasarımı ve optimizasyon süreçleri incelenecektir.

2.1.1. Kapasitif Sensör Teorisi

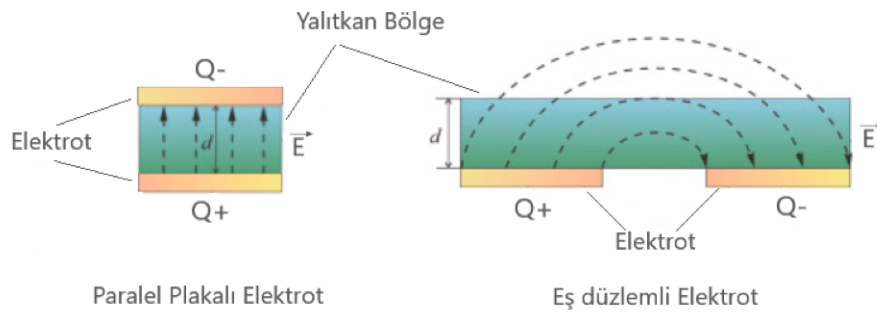
Kapasitans, elektriksel bir sistemde, elektrot çifti arasındaki elektrik yükünün depolanma kapasitesini ifade eden, elektriksel bir özelliktir. Matematiksel olarak, kapasitans (C) şu formülle ifade edilir (Abd Rashid vd., 2016);

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

Burada Q elektrotlar arasındaki yükü temsil ederken, V elektrotlar arasındaki potansiyel farkı temsil eder. Ayrıca kapasitans, kapasitörün geometrisine bağlı olarak, farklı şekilde de tanımlanabilir. En basit haliyle, A yüzey alanına (m^2) sahip iki düzlemsel iletken plakanın, aralarında d mesafesi (m) olacak şekilde yerleştirmeleri sonucu, oluşturdukları yapının kapasitansı Denklem 2.2'deki gibi ifade edilebilir (Prit vd., 2019).

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

Burada epsilon (ϵ) iki iletken plaka arasındaki malzemenin dielektrik sabitini veya dielektrik katsayısını temsil etmektedir. Denklem 2.2'deki matematiksel ifadeden yola çıkılarak, kapasitansın 3 faktöre bağlı olduğu görülebilir. Bu üç parametreden herhangi birinin değişmesi sonucu, kapasitans değerinde de bir değişim olacağı sonucuna ulaşılabilir. Bu da kapasitans değişimlerini algılayabilen bir sensör oluşumunu mümkün hale getirir (Kandala ve Puppala, 2012; Ma vd., 2023).



Şekil 2.2. Kapasitif sensör elektrot yapıları (Zhang vd., 2023).

Kapasitif sensörler için iki tip yaklaşım vardır. Bunlardan biri paralel plakalı kapasitör prensibini kullanırken diğeri saçak kapasitans prensibini kullanır. Paralel plakalı kapasitif sensör, genellikle iki paralel düz metal plaka arasındaki kapasitans değişikliklerini algılamaya yönelik çalışır. Bu sensörde, elektrotlar arasındaki mesafe ve yüzey alanı önemli parametrelerdir. Bir nesne bu elektrotlar arasında hareket ettiğinde veya yaklaştığında, elektrotlar arasındaki kapasitans değişir ve sensör bu değişikliği ölçerek nesnenin varlığını algılar. Saçak kapasitans prensibi ise, birbirinden yalıtılmış eş düzlemlerle iki elektrottan oluşur. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj farkı sayesinde bir elektrik alan meydana gelir. Ve bu elektrik alan içerisine, herhangi bir nesne girişi olması, elektrik alanın bozulmasına, buna bağlı olarak da kapasitansın değişmesine neden olur. Bu sayede nesnelerin varlığı tespit edilebilir (Ma vd., 2023; Zhang vd., 2023). Bu iki yaklaşıma ait elektrot yapıları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Her iki sensör tipi de geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu sensör tipleri, kapasitif yaklaşım teknolojisinin esnekliğini ve çok yönlülüğünü vurgulayan önemli bileşenlerdir.

2.1.2. Elektrot Tasarımı

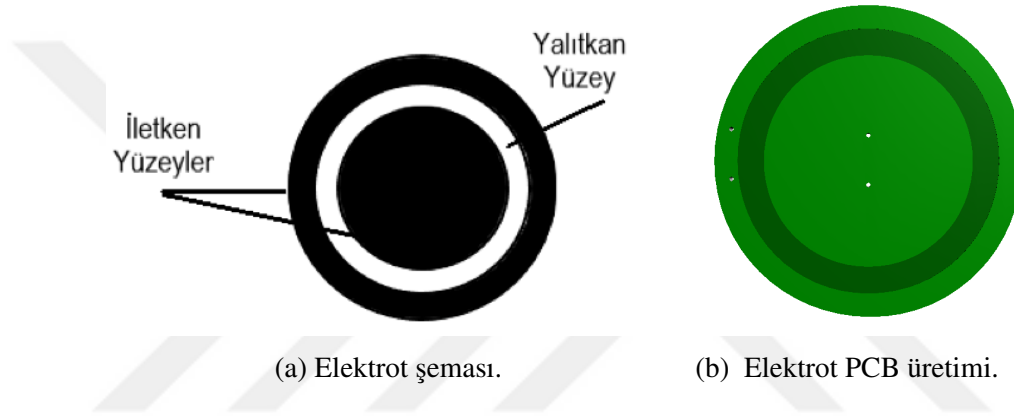
Kapasitif sensörlerdeki, nesnelerle etkileşim halinde olan ve kapasitans değişimlerini algılamaya yarayan yapılara elektrot denir. Ve kapasitif sensörler için önemli bir bileşendir. Bu değişiklikler, sensörün belirlenmiş olan ölçüm aralığında varlık tespiti, mesafe ölçümü, dokunmatik algılama veya malzeme tespiti gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Ye vd., 2020; Zada vd., 2024).

Geleneksel bir kapasitör, aralarında dielektrik bir malzeme bulunan paralel elektrotlardan oluşur. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj farkı, bir elektrik alanının oluşmasına neden olur ve bu alan sadece elektrotlar arasında değil, aynı zamanda örtüşme alanında da genişler. Ve bu alan da saçak alanı olarak adlandırılır. Normal şartlarda, paralel elektrotlu bir kapasitörde saçak alanı, elektrotlar arasındaki mesafe elektrot boyutlarından çok daha küçük olduğu sürece ihmal edilebilir. Ancak, elektrotlar arasındaki mesafe arttıkça, elektrik alanı geniş bir alana yayılır ve saçak alanı baskın hale gelir. Bu durumda, bir kapasitif sensör ortaya çıkar. Ancak, saçak alanının doğru bir şekilde hesaplanması genellikle karmaşık matematiksel modeller gerektirir ve mevcut formülasyonlar belirli bir kapasitif sensör için doğru sonuçlar vermek

konusunda zorluklar içerebilir. Bu nedenle, kapasitif algılama tasarımında, elektrot geometrisi ve mesafeleri gibi parametrelerin dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir (Aswani ve Islam, 2023; Ye vd., 2020; Zhang vd., 2023).

Elektrotların konumu, boyutu, şekli ve malzeme özellikleri, sensörün hassasiyetini, doğruluğunu ve tepki süresini etkiler. Doğru tasarlanmış elektrotlar, belirli bir uygulama için en uygun algılama yeteneğini sağlayabilir. Bu nedenle, elektrotların dikkatlice tasarlanması ve konumlandırılması, kapasitif sensörlerin performansını belirlemede kritik bir rol oynar (Aswani ve Islam, 2023).

Yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörü için, oluşturulan elektrot yapısı Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Elektrot tasarımı.

Elektrot, birbirinden yalıtılmış iki adet iletken yüzeyden oluşmaktadır. Şekil 2.3 (b)'de gösterilen elektrotun PCB üretimi, yaklaşık olarak 2.5 mm kalınlığında ve 26 mm çapında dairesel bir yapıya sahiptir. Bu elektrotların belirtilen ölçülerde ve dairesel formda olmasının nedeni, hedeflenen sensör tipinin 'civata tipi' olarak adlandırılan bir türde tasarlanmak istenmesidir. Elektrot kapasitansı, hassas bir LCR metre yardımıyla ölçülmüş ve yaklaşık '9pF' olarak belirlenmiştir.

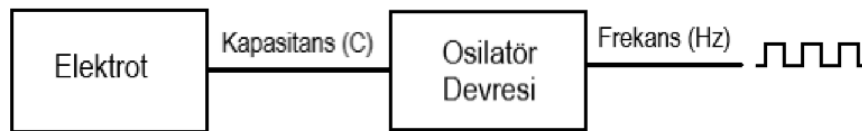
Bu elektrot, planlanan kapasitif yaklaşım sensörünün aktif yüzeyini oluşturmaktadır ve nesnelere etkileşime girerek sensörün algılama sürecini yönlendirecektir.

Elektrot tasarımı, tarımsal ürünlerin özellikle düşük dielektrik katsayısına sahip olanlarıyla etkili bir etkileşimde bulunabilme kabiliyetini göz önünde bulundurarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı elektrot tasarımları üzerinde çeşitli testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar, hassas ölçüm ve algılama yeteneği açısından en verimli olanı belirlemek için kullanılmıştır.

Sonuç olarak, yapılan testler ve değerlendirmeler sonucunda Şekil 2.3'teki elektrot tasarımında karar kılınmıştır. Bu tasarım, düşük dielektrik katsayısına sahip tarımsal ürünlerle etkili bir şekilde etkileşime girme ve hassas ölçüm yapma kapasitesiyle öne çıkmıştır. Belirlenen elektrot tasarımı, tarım endüstrisinde kullanılan algılama sistemlerinin daha hassas, doğru ve güvenilir ölçümler yapmasını sağlamak adına önemli bir adım olmuştur.

2.1.3. Kapasitans-Frekans Dönüşüm Tekniğine Dayalı Yeni Bir Osilatör Devre Tasarımı Ve Simülasyonu

Kapasitif yaklaşım sensörlerindeki elektrotların, çevresel etkileşimlerinden dolayı oluşturdukları bilgi sinyali, kapasitans değişimi şeklinde ortaya çıkar. Ancak, bu değişimin miktarı genellikle oldukça düşüktür ve doğrudan ölçümü zor olabilir. Bu nedenle, elde edilen kapasitans sinyalinin, anlamlı ve ölçülebilir bir seviyeye getirilebilmesi için harici bir arayüz devresine ihtiyacı vardır. Bu arayüz devresi sonucunda, kapasitans bilgisi genellikle, akım, voltaj, frekans gibi elektriksel parametrelerden birine dönüştürülür. Bu sayede, kapasitans değişimleri daha geniş bir sistem içinde işlenerek anlamlı ve kullanılabilir hale getirilir (Sreenath ve George, 2017). Bu çalışma kapsamında, kapasitans bilgisinin frekans sinyaline dönüştürülmesi yoluyla elde edilen ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle ait blok şeması Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

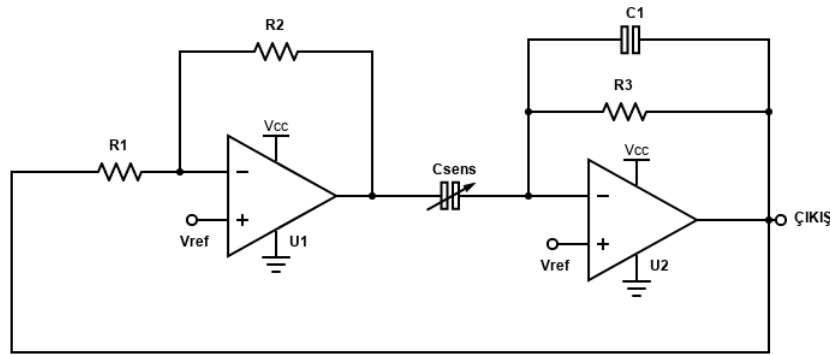


Şekil 2.4. Kapasitans-Frekans dönüşüm yöntemi blok şeması (Sreenath ve George, 2017).

Kapasitans-frekans dönüşüm yöntemi için genellikle bir osilatör devresine ihtiyaç vardır. Bu çalışma kapsamında, Şekil 2.5'te gösterilen, elektrot kapasitansı ile orantılı yeni bir osilatör devresi tasarlanmıştır. Bu yöntem sayesinde, kapasitans değişimi doğrudan frekans değişimine dönüştürülerek, daha kolay işlenebilir ve ölçülebilir bir sinyal elde edilmiştir. Ayrıca, yüksek hassasiyeti sayesinde oldukça düşük

kapasitans seviyelerini (fF) kolaylıkla algılayabilir. Çıkış sinyali dijital bir formda (kare dalga) olduğundan, gürültüye karşı dirençlidir ve veri iletimi için stabil bir yapı sunar. Bu özellikler, harici bir dönüştürücüye veya entegreye ihtiyaç duymadan, bu sinyalin doğrudan bir mikrodenetleyici tarafından ölçülmesine olanak tanır. Ayrıca, karmaşık ve kompleks devrelerin aksine daha basit bir yapıya sahip olması, maliyet açısından da oldukça avantajlıdır.

Bu bölümde yeni tasarlanan osilatör devresi ile alakalı simülasyon çalışmaları ve sonuçlarına yer verilecektir.



Şekil 2.5. Kapasitans-frekans dönüşüm yöntemi ile tasarlanan yeni osilatör devresi.

Şekil 2.5'te gösterilen osilatör devresi, eviren yükselteç ve farklılaştırıcı bloğun kapalı çevrim bir şekilde birleştirilmesinden meydana gelir. " C_{Sens} " ile ifade edilen değişken kapasitör, elektrot kapasitansını temsil etmektedir. Ayrıca osilatör devresi, yarı diferansiyel bir yapıya sahiptir ve elektrot kapasitansı (C_{Sens}) ile referans kapasitansı (C_1) arasındaki farka bağlı olarak bir çıkış sinyali üretir. Bu sayede kapasitans-frekans dönüşüm kazancında bir miktar artış meydana gelir.

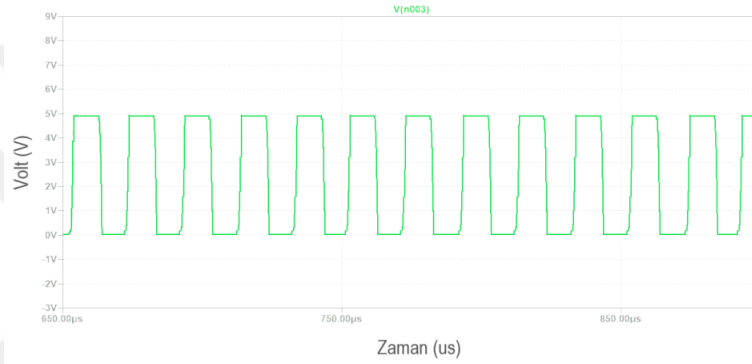
$$f_0 = \frac{1}{2R_3(C_{Sens} + C_1) \ln\left(\frac{3C_{Sens} - C_1}{C_{Sens} + C_1}\right)} \quad (2.3)$$

Şekil 2.5'teki osilatör devresinin çıkış frekansı, Denklem 2.3'te gösterilmiştir. Devrenin çıkış frekans denklemine, bu tez çalışması kapsamında yazdığımız ve şu an hakem değerlendirmesinde olan makalede (Koyuncu vd., 2024) detaylıca yer verilmiştir. Denklemden de anlaşılacağı üzere, osilatör devresinin çıkış frekansı " C_{Sens} , R_3 ve C_1 " parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerin optimizasyonu ile maksimum kazancın elde edilebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu bileşen değerlerinin en uygun şekilde

ayarlanması, frekans tepkisinin geliştirilmesi ve devre kararlılığının sağlanması açısından da oldukça önemlidir.

Devrenin ilk analizleri, bilgisayar tabanlı simülasyon programı olan LTSpice aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları, elektronik devrelerin hızlı ve maliyet etkin bir şekilde analiz edilmesine ve tasarlanmasına olanak sağlar. Bu sayede, gerçek dünyada maddi kaynakların ve zamanın gereksiz harcanmasının önüne geçilerek, daha sağlam ve optimize edilmiş devreler elde edilebilir.

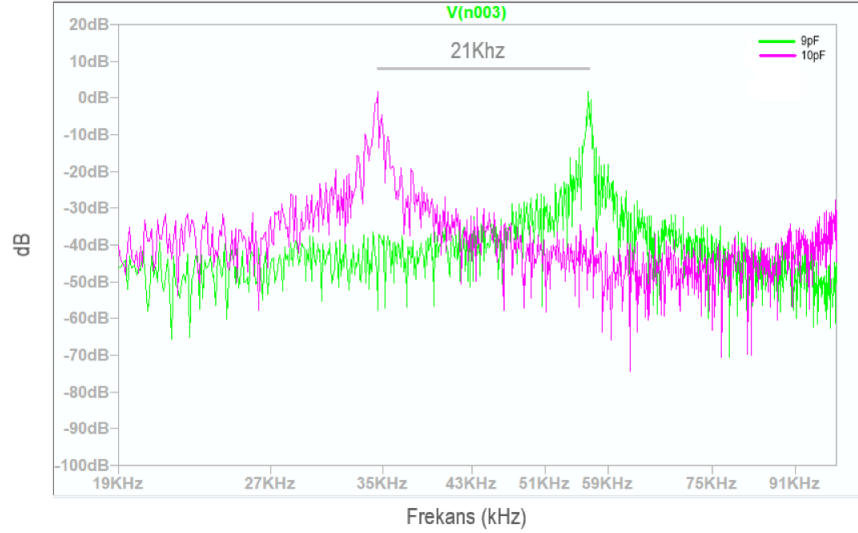
Şekil 2.5'te gösterilen yeni osilatör devresinin, simülasyon sonucunda oluşturduğu çıkış sinyalinin grafiği Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Simülasyon sonucunda oluşan yeni osilatör devresinin çıkış sinyali.

Simülasyon çalışmaları sonucunda " C_{Sens} , R_3 ve C_1 " parametreleri optimize edilmiştir. Devrenin osilasyona başlaması için " C_1 " kapasitans değerinin, elektrot kapasitans (C_{Sens}) değerinden daha küçük bir değer olması gerekmektedir. Ancak küçük olduğu kadar yakın da olması gerekmektedir. Çünkü bu durum kapasitans-frekans kazanç oranını doğrudan etkilemektedir. Yakın bir değer olmaması durumunda kazanç düşmektedir. Ayrıca devrenin osilasyona başlaması için de gerekli bir durumdur. Bu nedenle " C_1 " kapasitansı " C_{Sens} " kapasitansından küçük ve oldukça yakın bir değer olarak belirlenmiştir. Kazanç üzerinde etkili olan bir diğer parametre ise " R_3 " direncidir. Bu değer mümkün olduğunca yüksek bir seviyeye ayarlanması, kazanç değerini arttırmaktadır.

Bu bilgiler ışığında, elektrot kapasitansındaki 1pF'lik artışın frekans üzerindeki etkisi simüle edilmek istenmiştir. Örneğin, elektrot kapasitansının 9pF'tan 10pF'a yükselmesi durumunda, oluşacak frekans değişiminin miktarı analiz edilmiştir. Simülasyon sonucunda oluşan frekans değişiminin, grafiği Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Elektrotun 1pF'lık kapasitans değişimine karşılık gelen, frekans değişimi

Simülasyon sonucunda, elektrot kapasitansının, 1pF'lık değişiminin (9pF-10pF), frekans tarafında (56kHz-35kHz), 21kHz'lik bir değişime neden olduğu gözlemlenmiştir. Frekans değişimindeki bu fark, bize yeni tasarlanan osilatör devresinin, kapasitans-frekans dönüşümünü yüksek bir kazanç ile gerçekleştirdiğini ve kapasitans değişimlerini algılamak için başarılı bir devre olduğunu göstermiştir.

Kazanc değeri, frekans değişiminin yüzdesel bir ifadesi olarak gösterilecek olursa, Denklem 2.4'teki gibi tanımlanabilir. Denklemde belirtilen yerlere uygun değerler yazılırsa frekans değişiminin yüzdesel karşılığı elde edilir.

$$Kazanc = \% \left(\frac{|F_{son} - F_{ilk}|}{F_{ilk}} \right) * 100 \quad (2.4)$$

Simülasyon verilerinden elde edilen sonuçları kullanarak, frekans değişiminin yüzdesel karşılığını hesaplayacak olursak;

$$Kazanc_{CF} = \% \left(\frac{|35kHz - 56kHz|}{56kHz} \right) * 100 \quad (2.5)$$

$$Kazanc_{CF} = \%37.5 \quad (2.6)$$

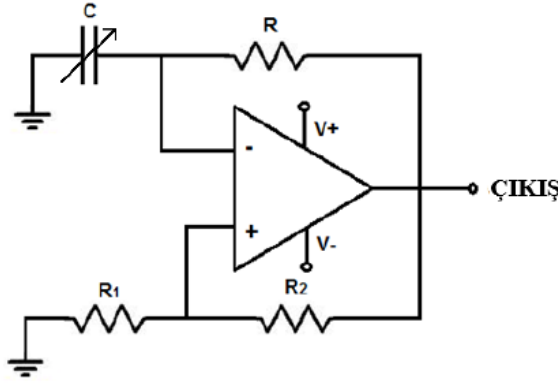
olarak hesaplanır.

Yapılan hesaplamadan da anlaşılacağı üzere, 1pF'lık kapasitans değişiminin sonucunda %37.5 değerinde bir frekans değişimi elde edilmiştir.

Sonuç olarak simülasyon verileri, yeni tasarlanan bu osilatör devresinin, çok düşük kapasitans değişimlerini, yüksek kazanç oranlarıyla algılayabildiğini doğrular niteliktedir.

2.1.4. Yeni Tasarlanan Osilatör Devresi ile RC Osilatör Devresinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, yeni tasarlanan osilatör devresinin simülasyon performansı ile, literatürde bulunan RC osilatör devresinin karşılaştırmalı analizlerine yer verilmiştir. Yeni osilatör devresi için yapılan simülasyon çalışmaları bu devre için de tekrarlanmıştır. Şekil 2.8'de standart bir RC osilatör devresi gösterilmektedir (Anjanakumari vd., 2019). Bu devrede bulunan "C" kapasitansı, elektrot kapasitansını temsil etmektedir.

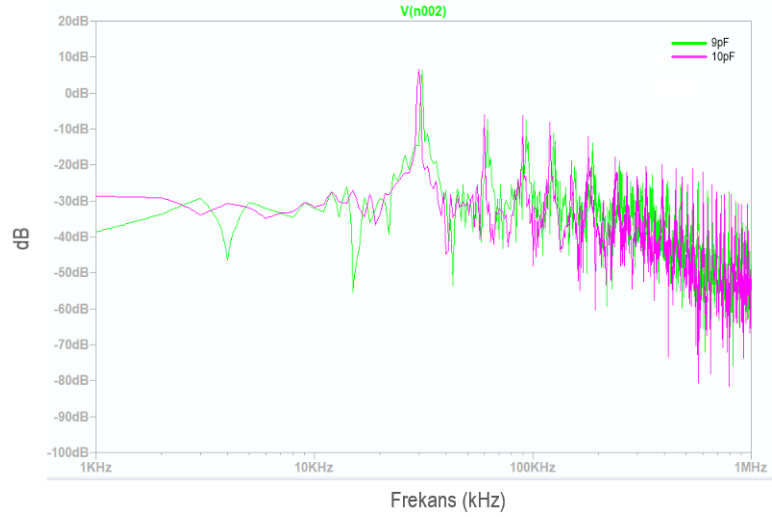


Şekil 2.8. RC osilatör devresi (Anjanakumari vd., 2019).

Simülasyon, yeni tasarlanan osilatör devresinde olduğu gibi 1pF'lık kapasitans değişiminin, frekans değişimine olan etkisini incelenmek üzerine gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon sırasında, RC osilatör devresinin parametreleri, kazanç değerinin maksimum seviyede olabileceği şekilde ayarlanmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen frekans grafiği Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Elektrot kapasitansının, 1pF'lık değişiminin (9pF-10pF), frekans tarafında (42kHz-40kHz), 2kHz'lik bir değişime neden olduğu gözlemlenmiştir.

Denklem 2.4'teki kazanç hesaplama işlemini, RC osilatör devresiyle yapılan simülasyon sonucunda elde edilen veriler üzerinden uygulayacak olursak, Denklem 2.8'deki sonucu elde ederiz.



Şekil 2.9. RC osilatör devresinin frekans değişim grafiği.

$$Kazanc_{RC} = \% \left(\frac{|40kHz - 42kHz|}{42kHz} \right) * 100 \quad (2.7)$$

$$Kazanc_{RC} = \%4.76 \quad (2.8)$$

Her iki osilatör devresi için de simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler, birbirleri ile kıyaslandığı zaman, tasarladığımız yeni osilatör devresinin, standart bir RC osilatör devresine göre yaklaşık 8 kat daha yüksek bir kazançta sahip olduğunu söyleyebiliriz.

$$\frac{Kazanc_{CF}}{Kazanc_{RC}} = \frac{\%37.5}{\%4.76} = 7.87 \quad (2.9)$$

2.1.5. Mikrodenetleyici Tabanlı Frekans Ölçümü

Mikrodenetleyici temelli frekans ölçümü, dijital sistemlerde periyodik sinyallerin frekanslarını belirlemek amacıyla kullanılan yaygın ve önemli bir yöntemdir. Bu ölçüm işlemi, genellikle darbe sayma ve periyot ölçümü olmak üzere iki temel yöntemle gerçekleştirilebilir. Darbe sayma yöntemi, giriş sinyalinin yükselme veya düşme kenarlarını algılayarak bir sayıcı kullanır. Belirli bir zaman (1sn) aralığında meydana gelen kenar sayısı, frekansın (F) doğrudan bir ölçüsünü sağlar. Bu yöntem, özellikle sinyalin düşük frekanslarda olduğu durumlarda etkilidir. Diğer bir yaklaşım

olan periyot (T) ölçüme yöntemi ise, sinyalin periyodu üzerinden frekansı hesaplamayı amaçlar. Giriş sinyali ile bir zaman ölçümü yapılır ve periyot (bir döngünün tamamlanma süresi) belirlenir. Periyot, Denklem 2.10 kullanılarak frekansa dönüştürülür. Bu yöntem, özellikle yüksek frekanslı sinyallerin ölçümü için daha uygundur. Ancak daha yüksek hızlara sahip mikrodenetleyiciler gerektirir. Ölçülecek olan sinyalin frekans aralığına göre iki yöntemden biri tercih edilerek, hassas ölçümler gerçekleştirilebilir. (Shao, 2022).

$$F = \frac{1}{T} \quad (2.10)$$

Bu çalışma kapsamında darbe sayma yöntemi ile frekans ölçme işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikrodenetleyici olarak Microchip Technology firmasına ait Atmega328P modelindeki mikrodenetleyici kullanılmıştır.

Yeni tasarlanan osilatör devresinin çıkış sinyali Atmega328P mikrodenetleyicinin dijital bir pinine bağlanmıştır. Yazılımsal olarak, gelen darbeleri saymak için bir sayıcı ve hassas bir zamanlayıcı belirlenmiştir. Ölçüme ait blok şeması Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Gerçekleştirilen frekans ölçümüne ait blok şeması (Shao, 2022).

Frekans, Denklem 2.11'de belirtilen formül ile hesaplanmıştır. Burada formüle göre T zamanında ölçülen darbe sayısı (N) bize frekans değerini vermektedir.

$$F = \frac{N}{T} \quad (2.11)$$

T=1sn olarak belirlendiğinde, frekans değeri doğrudan darbe sayısına eşittir.

$$F = N \quad (2.12)$$

Frekans ölçümü için yazılımsal olarak 1sn'lik zamanlayıcı ayarlanmıştır. Ve 1sn boyunca gelen darbe sinyalleri sayılmıştır. Bu sayede frekans değeri elde edilmiştir. Elde edilen frekans değeri, seri haberleşme ile bilgisayar ekranına gönderilmiş ve anlık olarak takip edilmiştir.

Sensör, boşta olduğu durumda, yani önünde herhangi bir nesne bulunmadığında, seri ekranda sabit bir frekans değeri gözlemlenmiştir. Ancak, sensörün önüne bir nesne yaklaştırıldığında, frekans değerinde belirgin bir değişim meydana gelmiştir. Bu değişim, sensörün çevresindeki fiziksel ortamda meydana gelen, değişikliklere karşı duyarlılığını yansıtmaktadır. Nesnenin yaklaştırılmasıyla birlikte sensörün algılama kapasitesi devreye girmiş ve frekans değeri, nesnenin konumuna bağlı olarak dinamik bir şekilde değişmiştir. Bu durum, sensörün hassas algılama yeteneklerini ve çevresel değişikliklere olan duyarlılığını vurgulayarak, uygulama alanında detaylı ve kontrol edilebilir bir sistem oluşturulabileceği anlamına gelmektedir.

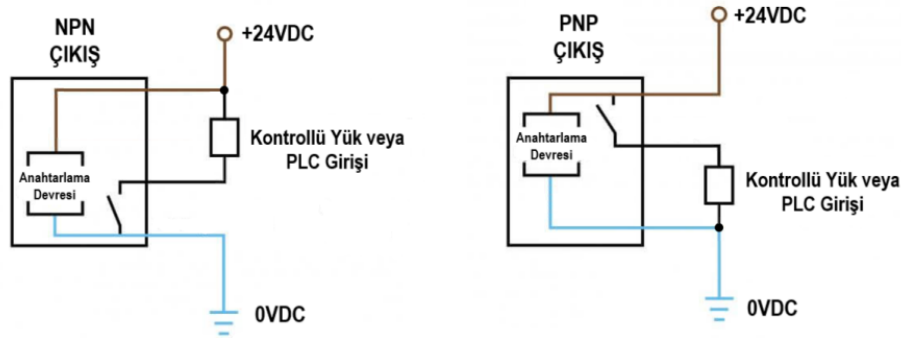
Gerçekleştirilen ölçümler neticesinde, belirlenen bir referans değeri esas alınarak, frekans değerinin bu referans değerini aşması durumunda, bir tetik sinyali oluşturulması amacıyla çıkış devresine bilgi iletimi sağlanmıştır. Bu işlem, ölçüm sonuçlarının belirli bir eşik değeri üzerindeki değişikliklere tepki verme yeteneğini içeren bir kontrol mekanizmasını ifade etmektedir.

2.1.6. Sensör Çıkış Devresinin Tasarımı

Elektronik sistemlerde kullanılan sensörler, röle bobinleri veya Programlanabilir Mantık Denetleyici (PLC) girişi gibi çeşitli yükleri enerji ile beslemek üzere çeşitli tasarımlara sahiptir. Bu sensörler genellikle anahtarlama çıkışlarına göre NPN ve PNP olmak üzere iki temel kategoride sınıflandırılmaktadır. Sensörlerin anahtarlama çıkışlarına ilişkin polariteyi belirtmek için kullanılır (Feng, 2008). Şekil 2.11'de anahtarlama çıkışları ve yük bağlantısı gösterilmektedir.

NPN sensörler, genellikle çalışma durumunda çıkışlarını negatif voltaj seviyeleriyle ifade ederler. Bu, sensör aktive olduğunda çıkışın negatif bir referans seviyesi ile ilişkilendirildiği anlamına gelir. Örneğin, normal durumda çıkış voltajı 24V iken sensör aktive olduğunda çıkış voltajı 0V'a düşer (Feng, 2008).

PNP sensörler de ise durum tam tersidir. Genellikle çalışma durumunda



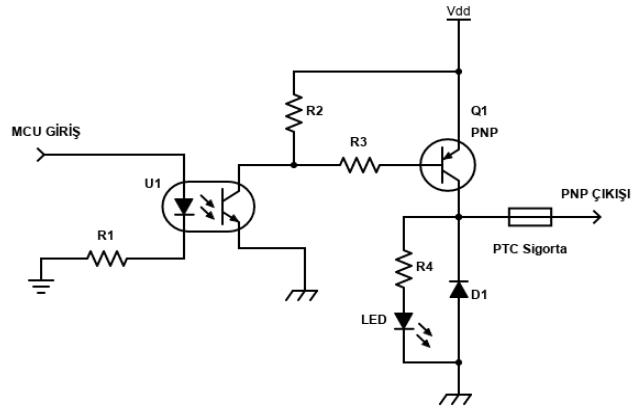
Şekil 2.11. Sensör anahtarlama çıkışları (Feng, 2008).

çıkışlarını pozitif voltaj seviyeleriyle ifade ederler. Bu durumda, sensör aktive olduğunda çıkış pozitif bir referans seviyesi ile ilişkilendirilir. Yani, normal durumda çıkış voltajı 0V iken sensör aktive olduğunda çıkış voltajı 24V'a çıkar (Feng, 2008).

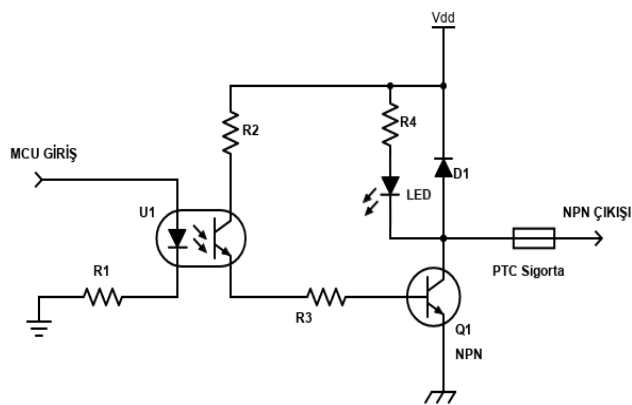
Bu voltaj seviyeleri örnekleri, tipik endüstriyel uygulamalardaki sinyal seviyelerini temsil etmektedir. Ancak, gerçek uygulamalarda kullanılacak voltaj seviyeleri sistem tasarımına ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca sensör çıkışları, NPN, PNP veya her ikisinin de mevcut olduğu şekilde tasarlanabilir. Yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörü, her iki çıkış türünü de içerecek şekilde konfigüre edilmiştir. Çıkış türlerine ait devre şemaları Şekil 2.12' de gösterilmektedir.

Sensörün anahtarlama çıkışları, herhangi bir nedenden dolayı mikrodenetleyici zarar görmesin diye optokuplör yardımıyla izole edilmiştir. Bu izolasyon önlemi, sensör ile mikrodenetleyici arasında elektriksel ayrımı sağlayarak güvenilir bir çalışma ortamı oluşturmayı amaçlamaktadır. Ayrıca her çıkış için PTC sigorta kullanılarak, kısa devre ve aşırı akım durumlarına karşı ek koruma sağlanmıştır. Endüstriyel uygulamalarda genellikle tercih edilen 24V çıkışa sahip sensörler göz önüne alındığında, mevcut sensörün çıkış devreleri özellikle 24V'a uygun bir şekilde tasarlanmıştır.

Sensör, algılama işlemi gerçekleştirmediği durumlarda, mikrodenetleyici tarafından herhangi bir tetikleme sinyali almadığından dolayı PNP çıkış devresinin voltaj seviyesi 0V, NPN çıkış devresinin voltaj seviyesi ise 24V olarak ölçülmektedir. Sensör, algılama işlemi gerçekleştirdiği anlarda ise PNP çıkış devresinin voltaj seviyesi 24V, NPN çıkış devresinin voltaj seviyesi ise 0V olarak belirlenmektedir. Bu durum, kullanıcının tercihine bağlı olarak uygulama alanına uygun çıkış sinyalini seçme imkânı sunmaktadır. Bahsi geçen çıkış sinyalleri, röle veya kontaktör gibi cihazları



(a) PNP tipi.



(b) NPN tipi.

Şekil 2.12. Sensör anahtarlama çıkışı.

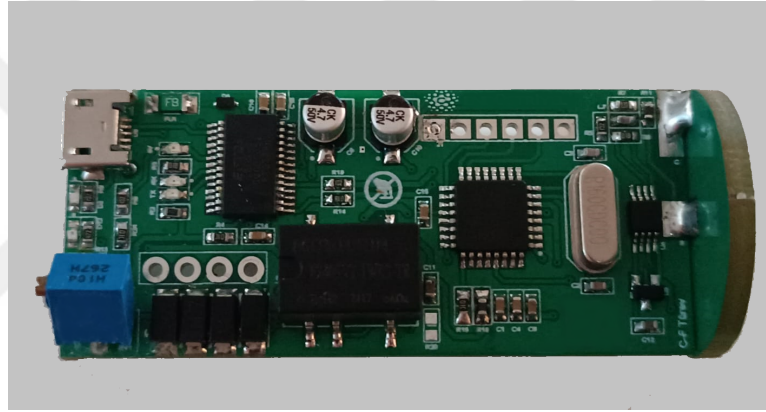
tetiklemek için kullanılabilir. Aynı zamanda, PLC ve mikrodenetleyici gibi kontrol cihazları aracılığıyla gelen sinyaller işlenebilir, yorumlanabilir veya kontrol edilebilir. Bu özelliklere ek olarak, sensör üzerinde bulunan LED göstergesi, algılama durumunu kullanıcıya görsel bir biçimde ileterek, sistem üzerindeki durumu daha anlaşılır kılmaktadır.

2.1.7. Prototip Elektronik Kart Tasarımı ve Üretimi

Prototip devresi, teorik hesaplamaların sonuçlarına dayanarak tasarımın gerçekleştirilmesi ve üretim öncesi testlerin gerçekleştirilmesi amacıyla oluşturulan elektronik devreyi ifade eder. Bu aşama, tasarlanan elektronik devrenin işlevselliğini doğrulama, performansını ölçme ve potansiyel hataları tanımlama sürecini içerir. Prototip devresi, teorik olarak belirlenen parametreleri pratikte test etme ve gerektiğinde

tasarımı revize etme imkânı sunar. Aynı zamanda, üretim öncesi denemeler, nihai ürünün kalitesini ve güvenilirliğini artırmak adına önemli bir aşamayı temsil eder. Bu süreç, tasarımın gerçek dünya koşullarında başarılı bir şekilde çalışabilmesini sağlamak ve potansiyel mühendislik zorluklarına erken aşamada müdahale etmek için kritik bir rol oynamaktadır.

Yeni geliştirilen kapasitif yaklaşım sensörünün testlerini gerçekleştirmek amacıyla, bilgisayar tabanlı tasarım araçları kullanılarak baskı devre kartı (PCB) oluşturulmuş ve üretime gönderilmiştir. Üretimden gelen kartın dizgi işlemi tamamlandıktan sonra test için hazır hale getirilmiştir. Prototip devre kartına ait görsel, Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Bu tasarım süreci, sensörün teorik özelliklerini pratiğe dönüştürmeyi amaçlamaktadır.



Şekil 2.13. Sensör prototip devre kartı.

Prototip devresi, elektrot, osilatör devresi, mikrodenetleyici, çıkış devresi ve seri haberleşme entegresi gibi bileşenlerle donatılmıştır. Bu devre kartı ile, sensörün tüm tasarımının kapsamlı bir şekilde test edilmesi ve doğrulanması amaçlanmıştır. Elektrot, çevresel etkileşimleri algılamakla görevlidir. Osilatör devresi kapasitans değişimlerini, frekans sinyallerine dönüştürürken, mikrodenetleyici, topladığı verileri işleyerek çıkış devresine iletilmesini sağlar. Seri haberleşme entegresi ile de bu veriler bilgisayar ekranında kolaylıkla izlenebilmektedir. Bu entegre yapı, tasarımın her bir bileşeninin etkileşimini ve işlevselliğini sistematik bir şekilde değerlendirerek, sensörün genel performansını test etmeye yönelik bir test platformu sağlar. Bu sayede, tasarım sürecinin her aşamasında elde edilen sonuçlar titiz bir değerlendirme ile doğrulanır ve tasarımın istenilen özelliklere uygunluğu sağlanmış olur.

2.2. Sensör Mekanizmasının Tasarımı ve Entegrasyonu

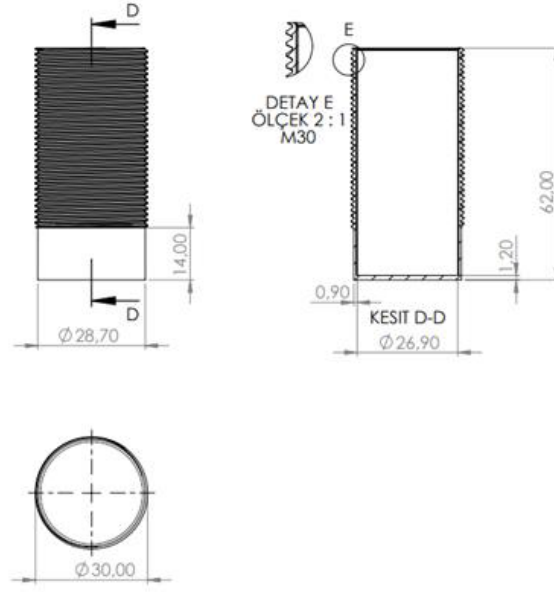
Sensör mekanizmasının tasarımı ve entegrasyonu, sensör teknolojisinin verimliliği, dayanıklılığı ve spesifik uygulamalara uygunluğu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Mekanik tasarım, sensörün fiziksel yapısını ve bileşenlerini içerir. Bu sensörün çevresel koşullara dayanıklılığını, titreşimlere karşı direncini ve montaj esnekliğini belirler. Ayrıca, sensörün entegrasyonu, sensörü kullanılacağı sistem veya cihazla bütünleştirme sürecini ifade eder. Bu entegrasyon süreci, sensörün doğru konumlandırılması, bağlantıları ve diğer mekanik özellikleriyle uyumlu bir şekilde entegre edilmesini içerir (Maniatis vd., 2013).

Sensör mekanizması tasarımında, malzeme seçimi, toleranslar, boyutlar ve sensörün koruma seviyeleri gibi faktörler dikkatlice göz önünde bulundurulur. Bu tasarımın başarısı, sensörün uzun ömürlü olmasını, doğru ölçümler yapmasını ve çevresel etmenlere karşı direnç göstermesini sağlar. Ayrıca, entegrasyon süreci, sensörün kullanılacağı ortamın gereksinimlerine uygun bir şekilde yapılandırılmasını ve sensörün diğer sistem bileşenleriyle sorunsuz bir etkileşimini hedefler (Maniatis vd., 2013).

2.2.1. Sensör Muhafazasının Tasarımı ve Üretimi

Prototip devrelerinin ölçüm testlerini gerçekleştirebilmesi için, mekanik bir tasarımın hayata geçirilmesi kaçınılmaz bir gerekliliktir. Bu bağlamda, sensör muhafazasının dayanıklılığı, uzun ömrü ve sensör performansını olumsuz etkilemeyecek şekilde tasarlanması kritik bir öneme sahiptir. Sensör kutusunun malzemesi, çeşitli çevresel etmenlere karşı direnç göstermeli ve sensörün stabil çalışmasına katkıda bulunmalıdır. Bu doğrultuda yapılan araştırmalar neticesinde, sensör muhafazasının, teflon malzemesinden üretilmesi uygun görülmüştür.

Teflon, ısıya, kimyasal maddelere, neme, elektrik atlamasına ve sürtünmeye karşı dayanıklılığı ile bilinen bir malzemedir (Rae ve Dattelbaum, 2004). Bu özellikleri sayesinde teflon, sensör muhafazasının uzun ömürlü olması ve güvenilir bir koruma sağlaması adına uygun bir seçim olarak belirlenmiştir. Teflon dışında, ABS plastik ve Delrin gibi malzemeler ile de sensör muhafaza üretimi gerçekleştirilmiştir. Ancak, ABS plastik malzemesinin frekans dönüşüm kazancını düşürme eğiliminde olması nedeniyle bu malzeme tercih edilmemiştir. Delrin malzemesinde ise frekans dönüşüm kazancı, Teflon malzemesiyle benzer bir orana sahiptir. Ancak Teflon malzemesinin yüzeyinin



Şekil 2.14. Sensör mekaniği teknik resmi.



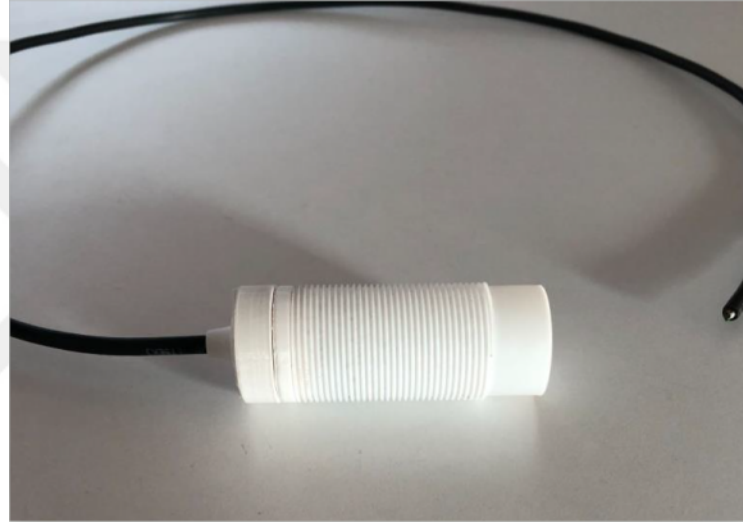
Şekil 2.15. Sensör mekaniğinin 3D tasarımı.

daha kaygan ve sürtünmeye karşı daha dirençli olması, bu malzemenin tercih edilmesine sebep olmuştur. Uygulama alanına bağlı olarak, Delrin malzemesi de tercih edilebilir.

Sensör muhafazası, bilgisayar tabanlı çizim programları aracılığıyla silindirik bir formda tasarlanmış ve üzeri cıvata gibi dişlere sahip olacak şekilde işlenmiştir. Bu yapısal tasarım ile sensör montajının, kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Cıvata dişli detayları, muhafazanın montaj sürecinde sağlam bir bağlantı oluşturarak, sensörün stabil bir konumda tutulmasına destek olacaktır. Aynı zamanda montaj ve demontaj işlemlerinin daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için de avantaj sağlayacaktır. Sensör tasarımına ait teknik resim, ve 3 boyutlu görüntüsü, sırasıyla Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Sensör muhafazası.



Şekil 2.17. Devrenin muhafazaya yerleşimi.

Sensör muhafazasının ilk numuneleri, teknik resme uygun bir şekilde CNC (Bilgisayar Numerik Kontrol) makinası kullanılarak üretilmiştir. CNC makineleri, bilgisayar tabanlı kontrol sistemleri aracılığıyla yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlayarak üretim süreçlerini optimize etmektedir. Bu özellikleri sayesinde, birkaç numune ürünün hızlı ve pratik bir şekilde üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Ayrıca CNC makinesinin kullanımı, plastik enjeksiyon üretimindeki yüksek kalıp maliyetinden de kaçınma avantajı sunmuştur. Bu, tasarım değişiklikleri veya küçük üretim serileri için ekonomik ve etkili bir çözümdür. Üretim sonucunda oluşan sensör muhafazası ve devrenin muhafazaya yerleşimi sırasıyla Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de gösterilmiştir.

Kapasitif yaklaşım sensörü, elektronik devre kartının, üretilen sensör muhafazasına entegre edilmesinin ardından, testler için hazır hale getirilmiştir.

3. PROTOTİP SENSÖR ÜRETİMİ VE TESTLERİ

Bu aşamada, elektronik devre kartı ve mekanik muhafaza üretimi tamamlandıktan sonra, ilk prototip sensör başarıyla oluşturulmuştur. Elektronik devre kartının sorunsuz bir şekilde çalıştığı doğrulandıktan sonra, sensör testler için hazır hale getirilmiştir.

Prototip sensör, tasarım aşamasındaki teknik gereksinimlerin uygunluğunu değerlendirmek amacıyla çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Bu testler arasında hassasiyet, sıcaklık stabilitesi ve çevresel koşullara dayanıklılık gibi kritik parametrelerin ölçümü yer almaktadır.

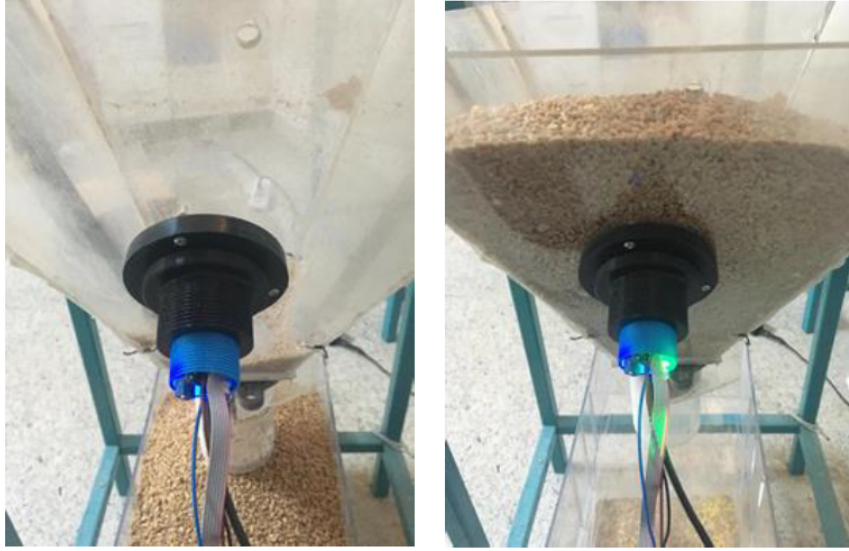
Test sonuçları, sensörün tasarımında ve üretiminde potansiyel iyileştirmeleri belirleme açısından değerli bilgiler sağlamıştır. Bu bilgiler ışığında, sensörün performansını optimize etmek amacıyla düzenlemeler ve ayarlamalar gerçekleştirilmiştir.

3.1. Prototip Sensör ile Tahıl Ürünlerinin Ölçümü

Yenilikçi kapasitif yaklaşım sensörünün tahıl ölçümündeki performansını değerlendirmek amacıyla, bir test düzeneği tasarlanmıştır. Bu düzenek, sensörün hassasiyetini, doğruluğunu ve ölçüm stabilitesini belirlememize yardımcı olacaktır. Sensör, özellikle tahıl ürünlerinin belirli bir hazne içerisindeki durum bilgisini (dolu-boş), ölçerek kullanıcıya iletmek amacıyla geliştirilmiştir. Test düzeneği içerisinde yer alan tahıl haznesi, belirli periyotlarla doldurulup boşaltılmış ve bu süreç sırasında sensör tarafından elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktararak kaydedilmiştir. Sensörün hazne üzerindeki montajına ait görsel Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Hazne içerisinde bir ürün bulunmadığı takdirde, sensör çıkışında ölçülen frekans değeri sabittir. Ancak hazne içerisine, tahıl ürünü dolmaya başladığı anda, sensörün kapasitans değeri değişmekte ve buna bağlı olarak da frekans değerinde bir artış meydana gelmektedir. Bu sayede, sensör, hazne içerisindeki ürünün varlığını algılayabilmektedir.

Algılama sürecinin ardından, kullanıcıya bilgi aktarımı, led göstergesi ve anahtarlama devresi aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda, devrenin çıkış frekans bilgisi, bilgisayara UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) seri haberleşme protokolü ile aktararak anlık gözlemlene imkanı sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Tahıl ölçümü için tasarlanan test düzeneği.

3.1.1. Farklı Tahıl Numuneleri ile Performans Değerlendirmesi

Tahıl ölçümü amacıyla gerçekleştirilen testler kapsamında, mısır, buğday, kepek ve razmol gibi çeşitli tahıl ürünleri üzerinde sistemli denemeler yapılmıştır. Her bir tahıl türü, kendine özgü fiziksel ve dielektriksel özelliklere sahiptir. Bu çeşitlilik, sensör tarafından algılanan frekans değişimlerinde, anlamlı farklılıklar meydana getirecektir. Bu durum, yeni tasarlanan sensörün farklı tahıl türlerini algılama yeteneğini analiz etmek adına önemli bir performans değerlendirmesi sunacaktır. Elde edilen veriler, sensörün her bir tahıl türü üzerindeki tepkisini anlamak ve sensörün geniş bir uygulama yelpazesine adaptasyon yeteneğini değerlendirmek için kullanılacaktır.

Bu test kapsamında, farklı tahıl ürünlerinin, nem değerlerinden kaynaklı oluşturabilecekleri kazanç sapmalarına sebebiyet vermemek adına, tahıl ürünlerinin yaklaşık aynı nem değerlerinde ve düşük seviyede olmasına özen gösterilmiştir. Bu sayede, analizlerimizde sadece tahıl türleri arasındaki etkileşimlere odaklanarak, nem değerlerinden kaynaklanabilecek potansiyel karşılaştırma hatalarının önüne geçilmesi ve elde edilen sonuçların daha güvenilir olması sağlanmıştır.

Tahıl türlerinin nem değerlerini belirlemek için "Pfeuffer-HE-50-6" isimli ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümlere ait görsel Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Her bir tahıl ürünü sırasıyla test düzeneği içerisine doldurulmuş ve boşaltılmıştır. Ve bu işlem sırasında her bir durum için ayrı ayrı ölçümler alınmıştır. Çizelge 3.1'de elde edilen ölçüm değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Ölçüm numunelerinin nem değerleri.

Elde edilen sonuçlar açıkça göstermektedir ki, yeni tasarlanan kapasitif sensör, yalnızca mısır ve buğday gibi büyük taneli tahıl ürünlerini değil, aynı zamanda razmol ve kepek gibi küçük taneli ve düşük dielektriksel özelliklere sahip tahıl ürünlerini de kolaylıkla algılamaktadır.

Çizelge 3.1. Farklı tahıl ürünlerinin ölçüm sonuçları.

	Mısır	Buğday	Razmol	Kepek
Ölçüm numunelerinin nem değerleri (%)	9.4	10.0	10.3	9.9
Boş haznedeki frekans değeri (Hz)	73680	73680	73680	73680
Dolu haznedeki frekans değeri (Hz)	78345	78195	75463	75212
Frekans değişimi (%)	6.33	6.13	2.42	2.08

Bu gözlem, sensörün geniş bir tahıl yelpazesinde etkili bir şekilde çalıştığını ve tahıl türüne bağlı olarak değişen dielektrik özelliklere duyarlılık gösterdiğini vurgulamaktadır. Özellikle, sensörün küçük taneli tahıl ürünlerini hassasiyetle tespit etme yeteneği, gıda endüstrisinde ve tarım uygulamalarında kullanılabilecek çok yönlü bir özellik olarak ön plana çıkmaktadır.

3.2. Sıcaklık Testleri

Sensörlerin performansı, çevresel koşullardaki değişikliklere, özellikle de sıcaklık varyasyonlarına karşı hassas bir şekilde tepki verebilir. Bu bağlamda, farklı sıcaklık değerlerinin sensör üzerindeki etkisi önemli bir değerlendirme unsurudur.

Sıcaklık, bir sensörün elektriksel özelliklerini etkileyebilir. Özellikle kapasitif yaklaşım sensörleri gibi hassas algılayıcılar, sıcaklık değişimlerine karşı duyarlı olabilir. Sıcaklık arttıkça veya azaldıkça sensörün kapasitans değerleri, frekans tepkileri ve genel performansı değişiklik gösterebilir (Wang vd., 2017).

Bu nedenle, farklı sıcaklık değerlerinin sensör üzerindeki etkisinin anlaşılması, sensörün güvenilirliğini ve doğruluğunu belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Sıcaklık değişimlerinin sensör çıkışına olan etkisinin sistematik bir şekilde incelenmesi, sensörün geniş bir çalışma aralığında etkili bir şekilde kullanılabilmesi için önemli bilgiler sağlayacaktır. Bu başlık altında gerçekleştirilecek olan analizler, sensörün farklı sıcaklık koşullarında nasıl tepki verdiğini anlama ve gerekli optimizasyon çalışmalarının yapılması açısından önemli bir adımı temsil edecektir.

3.2.1. Farklı Sıcaklık Değerlerinin Sensör Üzerindeki Etkisi

Yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörünün farklı sıcaklık değerlerine olan tepkisini analiz etmek amacıyla sıcaklık testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler için TK-120 isimli iklimlendirme kabini kullanılmıştır. Bu kabini kullanmak, sıcaklık değerini istenilen süre boyunca -10°C ile 60°C arasında ayarlayabilme avantajını bize sunmaktadır. Şekil 3.3'te gösterilen iklimlendirme kabini, sıcaklık testlerini kontrol altında tutarak sensörün performansını farklı sıcaklık koşullarında değerlendirme imkânı sağlamıştır.

İklimlendirme kabini -10°C 'den 60°C 'ye kadar, 5'şer derece artacak şekilde, toplamda 15 kademeye ayarlanmıştır. Ve ayarlanan her kademe değeri için 2.5 saat bekleme süresi tanımlanmıştır. İçerisine sensör yerleştirilip gerekli bağlantılar yapıldıktan sonra, sıcaklık ve devrenin çıkış frekans değeri anlık olarak takip edilerek, kaydedilmiştir.

Sensör bünyesinde sıcaklık ölçümünü gerçekleştirmek için, NTC (Negatif Sıcaklık Katsayısı) devre elemanından yararlanılmıştır. NTC, elektriksel direnci sıcaklıkla ters orantılı olarak değişen bir termistör türüdür. Yarı iletken malzemelerden

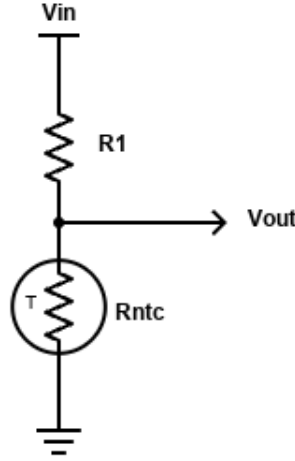


Şekil 3.3. TK-120 iklimlendirme kabini.

üretilen bu bileşen, belirli bir sıcaklık aralığında sıcaklık değişikliklerine duyarlı bir şekilde tepki verir. NTC termistörlerin belirgin özelliği, sıcaklık arttıkça direncinin azalmasıdır. NTC'ler, direnç değerindeki bu hassas değişimleri sayesinde, sıcaklık sensörü olarak kullanılabilir (Liu vd., 2020). Bu işlem için Şekil 3.4'teki devre modelinden faydalanılmıştır. Bu devre sayesinde, NTC direncindeki değişim, sabit bir voltaj ve referans direnci sayesinde voltaj sinyaline dönüştürülür. Devrenin çıkış sinyali de bir mikrodenetleyicinin ADC pinine bağlanarak anlık olarak ölçümler gerçekleştirilir (Kim ve Kim, 2011).

NTC termistörlerle sıcaklık ölçümü yapabilmek için genellikle Steinhart-Hart denklemi (3.1) kullanılır (Andreiev vd., 2023). Bu matematiksel ifade, NTC termistörün direnç değerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini ifade eder. Steinhart-Hart denklemi şu şekildedir:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R_{ntc}) + C \cdot (\ln(R_{ntc}))^3 \quad (3.1)$$



Şekil 3.4. Sıcaklık ölçümü için kullanılan devre modeli.

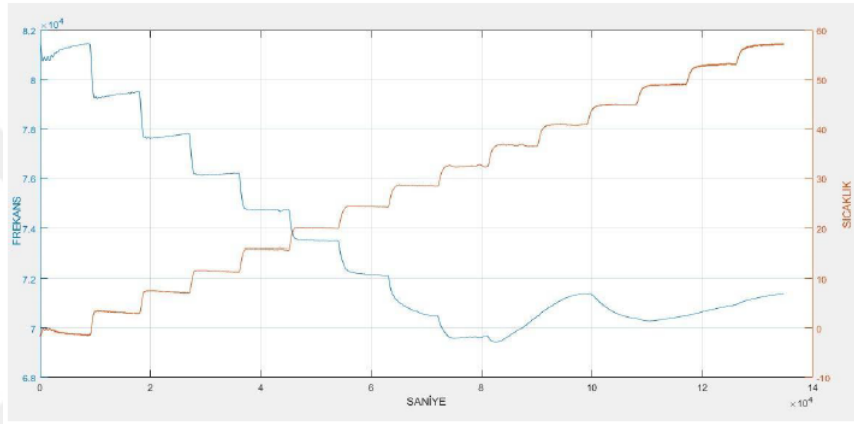
Burada T, Kelvin cinsinden sıcaklığı temsil eder. Sıcaklık değerini Celsius'a çevirmek istersek, bulunan değerden 273,15 değerini çıkarmamız gerekmektedir. R_{ntc} , termistörün direnç değerini ifade ederken, A, B ve C katsayıları ise, termistörün spesifik katsayılarını temsil eder. Bu denklem, termistörün direnç değeri ile sıcaklık arasındaki kompleks ilişkiyi açıklar. Pratikte, bu denklem genellikle termistörün üreticisi tarafından sağlanan özellikler ve kalibrasyon verileri kullanılarak sıcaklık değerini doğrudan elde etmek üzere kullanılır. Steinhart-Hart denklemi, termistör direnç değerinden sıcaklık değerine geçişteki doğrusal olmayan doğayı yakalamak için tasarlanmıştır ve bu nedenle termistörlerin hassas sıcaklık ölçümlerinde yaygın olarak kullanılır (Andreiev vd., 2023; Liu vd., 2020).

Denklem 3.1'deki matematiksel ifadeye göre, sıcaklık değerinin hesaplanabilmesi için, NTC direnç değerinin bilinmesi gerekmektedir. NTC direncinin belirlenmesi için ise sırasıyla Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 ifadeleri kullanılmaktadır. Denklem 3.2 ile ilk olarak Şekil 3.4'teki devrenin çıkış voltajı hesaplanmaktadır. Bu denklem sayesinde, mikrodenetleyiciden okunan ADC değerine karşılık gelen voltaj değeri belirlenir (Mangeni vd., 2017). Ardından, Denklem 3.3 kullanılarak okunan voltaj değeri, direnç değerine çevrilir (Kim ve Kim, 2011).

$$V_{out} = (ADC/1023).5 \quad (3.2)$$

$$R_{ntc} = \frac{R_1 \cdot V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \quad (3.3)$$

NTC direnç değerinin hesaplanmasının ardından geriye sadece A, B ve C katsayılarının hesaplanması kalır. Bu işlem için kullanılan NTC elemanının veri sayfasına bakılması gerekmektedir. Veri sayfasında belirtilen sıcaklık direnç grafiğine bakılarak, 3 farklı sıcaklık değerine karşılık gelen, direnç değerleri belirlenir. Ardından Denklem 3.1’de her bir direnç değeri için 3 farklı denklem elde edilir. Ve bu denklemler kullanılarak A, B ve C katsayıları hesaplanır. Bu şekilde elde edilen sıcaklık değeri, sensör için referans sıcaklık değerini temsil etmektedir. Farklı sıcaklık seviyelerinin sensör üzerinde oluşturacağı etkiyi analiz etmek ve optimize etmek için büyük bir öneme sahiptir (Andreiev vd., 2023).

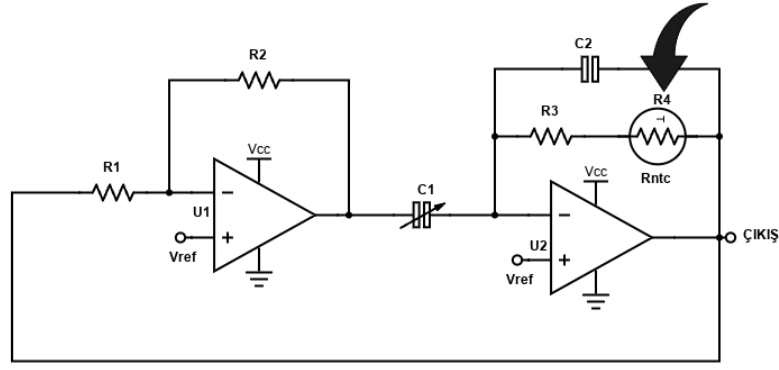


Şekil 3.5. Sensöre ait sıcaklık-frekans grafiği.

Gerekli matematiksel hesaplamaların yazılıma entegre edilmesi ve gerekli bağlantıların yapılmasının ardından, sensör iklimlendirme kabineye yerleştirilerek test için hazır hale getirilmiştir. Test süresi boyunca, sensörden gelen sıcaklık ve frekans verileri kaydedilerek analiz edilmiştir. Şekil 3.5’te, test sonucunda, sensöre ait sıcaklık-frekans ilişkisini ifade eden grafik gösterilmektedir.

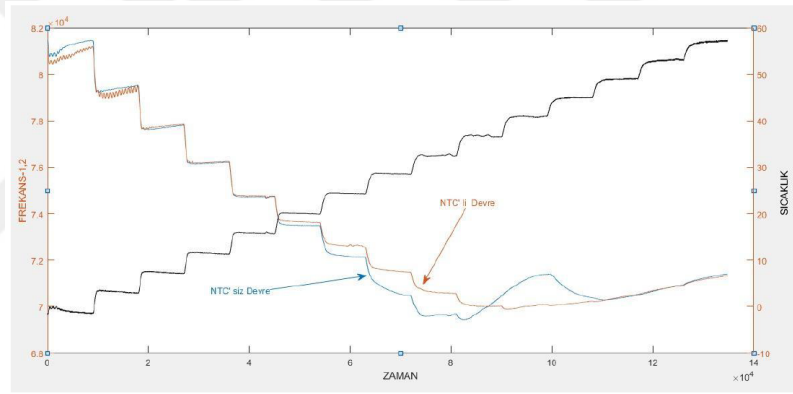
Yaklaşık 30°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda anormal bir değişim olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin frekans çıkışımızın, R3 değerlerine bağlı olmasından dolayı, direnç değerinde oluşabilecek herhangi bir değişimin frekans çıkışını doğrudan etkiliyor olmasıdır. Şekil 3.6’da da gösterildiği üzere R3 direncinin sıcaklık ile olan değişimini dengelemek için, R3 direncine seri bir NTC direnci bağlanmış ve sıcaklık testleri aynı şartlarda tekrarlanmıştır.

Testin tekrarlanmasının ardından elde edilen veriler ile bir önceki test sonucundan elde edilen veriler karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Şekil 3.7’de bu karşılaştırmaya ait grafik gösterilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere NTC’nin



Şekil 3.6. Sıcaklık optimizasyonu için NTC entegrasyonu.

etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Belirli bir sıcaklıktan sonra oluşan, anormal değişim giderilmiş ve sensörün sıcaklık etkisini telafi edebilmek için kullanılacak olan veriler daha anlamlı bir hale gelmiştir.



Şekil 3.7. NTC entegrasyonu öncesi ve sonrası sıcaklık-frekans karşılaştırma grafiği.

Sonuç olarak, farklı sıcaklık seviyelerinin, yeni tasarlanan kapasitif sensörün çıkış frekansında, olumsuz değişimlere yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu değişimlerin göz ardı edilmesi, sensörün istikrarsız bir çalışma performansına sahip olmasına ve yanıltıcı ölçümler yapmasına neden olabilir. Dolayısıyla, sensörün sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan olumsuz performans etkilerinin telafi edilmesi gerekmektedir. Bu telafi önlemleri, sensörün doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak, tutarlı ve kesin ölçümler elde etmek amacıyla gereklidir. Bu bağlamda, sensör optimizasyonu sürecinde sıcaklıkla ilişkili performans kaybını düzeltmek için kalibrasyon ve doğrulama gibi tekniklerin uygulanması önerilir. Bu yaklaşımlar, sensörün farklı sıcaklık koşullarında tutarlı bir performans sergilemesini sağlayarak, elde edilen verilerin güvenilirliğini artırmaya yönelik kritik adımları temsil etmektedir (Liu vd., 2020).

3.2.2. Sıcaklık Kompanzasyon Uygulaması ve Sonuçları

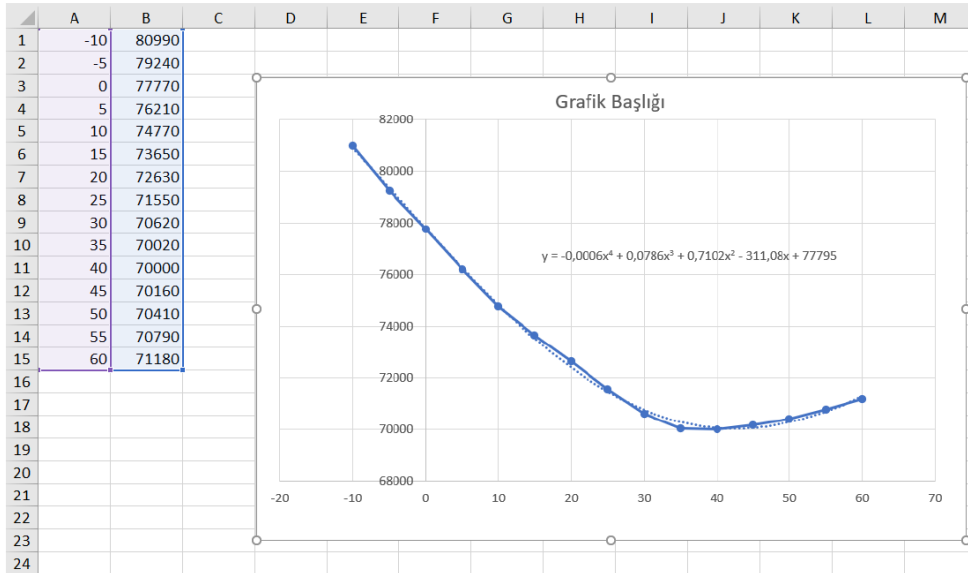
Bu bölüm, yeni tasarlanan kapasitif sensörün sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan performans etkilerini ele almak amacıyla sıcaklık kompanzasyon yöntemini içermektedir. Sıcaklık kompanzasyonu, sensörün sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini korumak ve doğruluğunu artırmak için kullanılan bir tekniktir (Wang vd., 2017). Bu bağlamda, sensörün çıkış frekansındaki değişimleri minimize etmek ve ölçümlerini sıcaklık değişimlerinden bağımsız hale getirmek amaçlanmıştır.

Uygulama aşamasında, sensör, belirlenen bir sıcaklık aralığında çeşitli sıcaklık değerlerine maruz bırakılmış ve her bir sıcaklık seviyesinde çıkış frekansındaki değişimler kaydedilmiştir. Bu veriler, sıcaklık kompanzasyon algoritmalarının geliştirilmesi ve uygulanması için temel oluşturmuştur. Sıcaklık ve frekans değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Sıcaklık-Frekans değerleri.

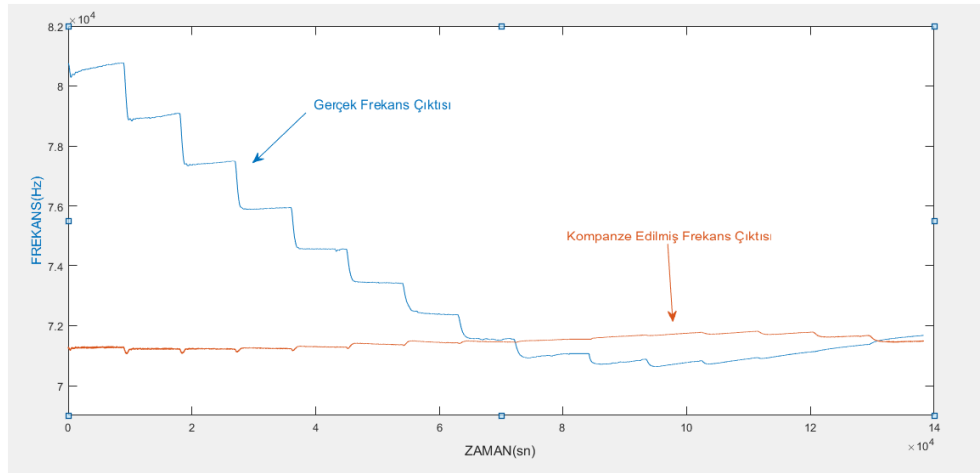
Sıcaklık (°C)	Frekans (Hz)
-10	80990
-5	79240
0	77770
5	76210
10	74770
15	73650
20	72630
25	71550
30	70620
35	70020
40	70000
45	70160
50	70410
55	70790
60	71180

Elde edilen veriler üzerinde detaylı analizler gerçekleştirilmiş ve sıcaklık ile çıkış frekansı arasındaki matematiksel ilişkiyi belirlemek amacıyla eğri uydurma (curve fitting) yöntemi kullanılmıştır. Eğri uydurma yöntemi, bir veri setindeki noktalara en iyi uyan matematiksel bir eğri ya da fonksiyonun bulunması sürecidir. Bu yöntem, veri setindeki dağılımı temsil etmek ve gelecekteki değerleri tahmin etmek için kullanılır (Kafazi vd., 2017). Bu çalışmada, veri setini modelleyebilmek için 4. dereceden polinomal eğilim grafiği kullanılmıştır. Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Eğri uydurma yöntemi.

Bu süreç sonucunda elde edilen matematiksel ifade, sıcaklık kompanzasyonu adına yazılım içerisinde entegre edilmiştir. Bu sayede sıcaklığın sensör çıkış frekansına olan etkisinin telafi edilmesi amaçlanmıştır. Bu işlemin ardından bir önceki sıcaklık testi aynı değer ve şartlarda tekrarlanmıştır. Test sonucunda elde edilen kompanzasyon grafiği Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kompanzasyon sonucunda oluşan çıkış grafiği.

Sonuçlar, sıcaklık kompanzasyonu uygulandığında sensörün çıkış frekansındaki olumsuz değişimlerin belirgin bir şekilde azaldığını göstermektedir. Sıcaklık değişimlerinin telafi edilmesiyle sensörün istikrarlı bir performans sergilemesi ve doğru ölçümler yapabilmesi sağlanmıştır. Bu, sensörün farklı sıcaklık koşullarında güvenilir ölçümler yapabilme yeteneğini artırmış ve kullanım alanlarını genişletmiştir.

3.3. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) Testleri

Elektromanyetik uyumluluk testleri, elektrikli ve elektronik cihazların, sistemlerin veya ekipmanın, elektromanyetik alanlara karşı dayanıklılığını ve diğer cihazlarla veya sistemlerle bir arada çalışabilirliğini değerlendiren bir dizi test ve değerlendirmeyi kapsar. EMC testleri, cihazların elektromanyetik ortamlarda sorunsuz çalışmasını sağlamak için yapılan standartlara dayalı testlerdir (Xi vd., 2015; Carlton, 2004).

EMC testleri, genellikle elektromanyetik yayılma, iletkenlik, radyasyon, parazit etkiler, elektrostatik deşarj, elektromanyetik alan şiddeti ve elektromanyetik radyasyon direnci gibi çeşitli kriterleri ölçer. Bu testler, cihazların güvenli, verimli ve diğer cihazlarla birlikte sorunsuz çalışmasını sağlamak için hayati öneme sahiptir (Xi vd., 2015; Carlton, 2004).

Çizelge 3.3. Uygulanan EMC Testleri (Lvt, 2020).

EMC Testi	Uygulanacak Kısım	Bağışıklık Seviyesi
ESD (Elektrostatik Boşalma) Testi	Muhafaza	Temasla: $\pm 4\text{kV}$ Havadan: $\pm 8\text{kV}$
EFT (Elektriksel Hızlı Geçici Rejim) Testi	DC Güç Girişi	$\pm 2\text{kV}$ (5/50ns, 5kHz)
Surge (Ani Yükselmeler) Testi	DC Güç Girişi	Hattan-Toprağa: 2kV

EMC testleri, cihazların belirli bir standartla uyumlu olup olmadığını belirlemek için laboratuvar ortamlarında yapılır. Test sonuçları, cihazın pazarlanabilirliği ve kullanılabilirliği için belirleyici olabilir. Bu testlerin yapılmaması durumunda, cihazların elektrikli veya elektromanyetik etkileşimler nedeniyle kullanım sırasında karşılaşılabileceği sorunlar ortaya çıkabilir (Xi vd., 2015; Carlton, 2004).

Bu çalışma kapsamında yapılan EMC testleri, temel Elektriksel Hızlı Geçici Rejim (EFT), Elektrostatik Boşalma (ESD) ve Ani Yükselmeler (Surge) testlerini içermektedir.

Yapılan EMC testlerinin, uygulanma şekli ve bağışıklık seviyeleri Çizelge 3.3'te gösterilmektedir. Testler için, EMC PARTNER TRANSIENT 300 cihazı kullanılmıştır. Cihaza ve test düzeneğine ait görsel Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. EMC PARTNER TRANSIENT 300 test cihazı.

3.3.1. Elektriksel Hızlı Geçici Rejim (EFT) Testi

Elektriksel hızlı geçici rejim, elektronik cihazların dayanıklılığını elektromanyetik koşullara karşı test etmek için kullanılan bir EMC testidir. Genellikle endüstriyel ortamlarda ve elektrik devrelerinde meydana gelebilecek geçici gerilim patlamalarını simüle etmek amacıyla gerçekleştirilir (Zych, 2023; Ker vd., 2010; Bauer vd., 2019).

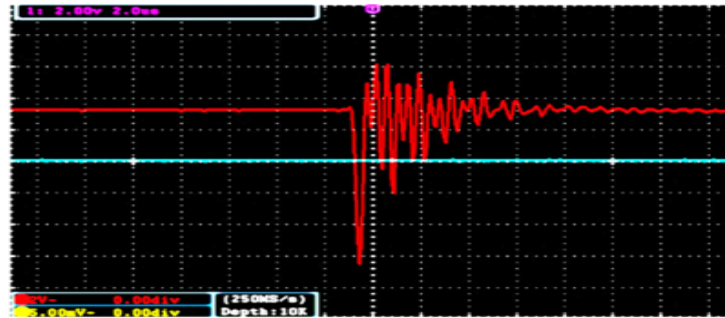
Bu test, elektronik cihazların kapanma, anahtar açma/kapama, rölelerin tetiklenmesi veya diğer yüksek enerji cihazlarının devre dışı bırakılması gibi durumlarda ortaya çıkabilen ani gerilim değişikliklerini taklit etmek için tasarlanmıştır. EFT testleri, bu gibi ani değişikliklerin elektronik cihazlarda yarattığı olumsuz etkileri ölçmek ve cihazın bu tür koşullara karşı direncini değerlendirmek için yapılır (Zych, 2023; Ker vd., 2010; Bauer vd., 2019).

Bu geçici gerilim patlamaları genellikle elektronik cihazlara fiziksel olarak zarar vermekten ziyade onları rahatsız eder. Bu durum, cihazın yanıt verme yeteneğini veya performansını geçici olarak etkileyebilir. Bu tür ani gerilim değişikliklerinin elektronik cihazlara etkisi, cihazın işlevselliğini veya verimliliğini geçici olarak bozabilir, veri kaybına neden olabilir veya cihazın beklenen performansını etkileyebilir (Zych, 2023; Ker vd., 2010; Bauer vd., 2019).

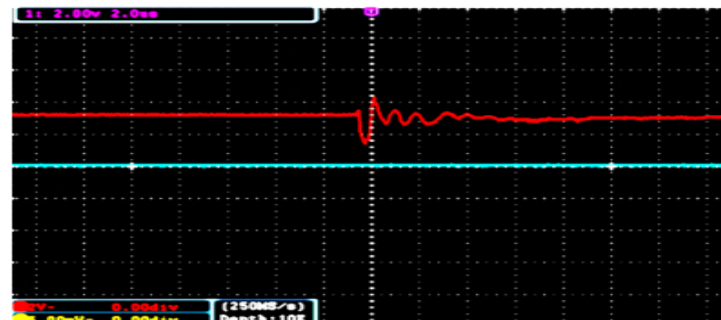
Çizelge 3.4. EFT testi deney seviyeleri (Lvt, 2020).

Deney Seviye Değerleri	
Test Standartı	TS EN 61000-4-4
Darbe Karakteristiği	5/50ns
Tekrarlama Frekansı	5kHz
Testin Uygulandığı Kısım	DC güç girişi (24V)
Bağışıklık Seviyesi	$\pm 2kV$
Test Süresi	60sn
Ortam Sıcaklığı ve Nemi	29°C - %20RH
Test Düzeneği	Masa üstü
Performans Kriteri	Test sırasında performansta azalmaya müsaade ediliyor. Çalışma modunda bir değişikliğe ve bilgi kaybına izin verilmiyor.

Tasarlanan yeni sensör üzerinde EMC testi yapılarak, sensör performansı ve elektronik cihazların anahtarlama geçişlerinden kaynaklanan, bozucu geçici rejim etkileri analiz edilmiştir. Sensör, için gerekli güç bağlantıları test cihazı üzerinden sağlanmıştır. Aynı zamanda güç hattına osiloskop bağlanarak, sinyallerin anlık görüntülenmesi yapılmıştır. EFT test menüsünden gerekli seviyelerde voltaj ve polarite değeri ayarlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Test sırasında uygulanan deney seviyeleri (Lvt, 2020) tablo halinde Çizelde 3.4'te gösterilmiştir.



(a) Uygulanacak olan EFT test sinyali.

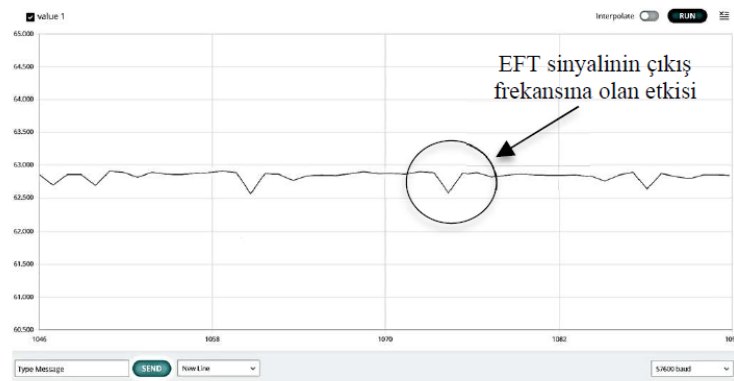


(b) Sensör bağlandıktan sonra oluşan EFT sinyali.

Şekil 3.11. EFT test sinyali.

Test işlemi sırasında sensörlerin performans analizi yapılırken, ekran bilgileri, bilgisayar haberleşmesi, giriş/çıkış portları ve led göstergeleri anlık olarak takip edilmiştir. Ayrıca her test sonrası sensörlerin çalışma fonksiyonları kontrol edilmiştir. Sensöre uygulanacak olan EFT sinyali ve uygulama sırasındaki EFT sinyallerin osiloskop görüntüleri Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

Şekil 3.11’de de gösterildiği üzere sensörler, EFT sinyalinin oluşturduğu gürültüyü büyük bir oranda yumuşatmıştır. Test esnasında sensörlerin çıkış değerleri de anlık olarak izlenmiş ve ekran görüntüleri alınmıştır. Şekil 3.12’de EFT testinin, test sırasında, sensörün çıkış frekans değerine olan etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Test esnasında sensörün çıkış frekans sinyali.

EFT testi sonuçları incelendiğinde, test esnasında osilatör devresinin çıkış frekans değerinde anlık değişimlerin olduğu gözlemlenmiştir. Test sırasında osilatör devresinin frekans değerindeki bu geçici değişim, testin uygulanması esnasında ortaya çıkan hızlı transiyent etkilerinden kaynaklı istenmeyen bir durumdur. Bu performans kayıpları, sensör çıkışında yanlış bilgi aktarımına neden olabilir. Ancak test sonrasında, sensörler de herhangi bir işlev kaybı veya performans düşüşü gözlemlenmemiştir. Test sonrası sensör, normal çalışmasına devam etmiştir.

3.3.2. Elektrostatik Boşalma (ESD) Testi

Elektrostatik boşalma testi, elektronik cihazların elektrostatik boşalmalara karşı dayanıklılığını test etmek amacıyla gerçekleştirilen bir EMC testidir. Bu test, cihazların elektrostatik boşalmalardan kaynaklanan olası etkilerini değerlendirmek ve bu tür durumlarda cihazın performansını ölçmek için yapılan bir test prosedürüdür (Viheriäkoski vd., 2018; Fotis vd., 2006).

Elektrostatik yük birikimi, insanlar veya ekipmanlar arasındaki sürtünme, yüksek voltajlı ekipmanların kullanımı veya statik elektriğin birikimi gibi durumlar sonucu oluşabilir. ESD, bu statik elektrik boşalmalarının ani bir şekilde cihazlara deşarj olması durumunu ifade eder. Bu tür bir deşarj, elektronik cihazların bileşenlerini etkileyebilir ve cihazın çalışmasını geçici olarak veya kalıcı olarak bozabilir. Bu durum, bileşenlerin zarar görmesine, veri kaybına, cihazın performansında düşüşe veya cihazın ömrünün kısalmasına neden olabilir (Viheriäkoski vd., 2018; Fotis vd., 2006).



Şekil 3.13. EXT-TRA3000 ESD tabancası.

Tüm bu olumsuz etkilerin, sensör üzerinde oluşturacağı performans sorunlarının tespiti ve giderilmesi adına ESD testi yapılmıştır. Test esnasında, elektrostatik boşaltım işlemi için Şekil 3.13’de gösterilen EXT-TRA3000 ESD tabancası kullanılmıştır. Bu tabanca sayesinde, statik enerjinin depolanarak istenilen hedefe boşaltımı kolaylaşmaktadır.

ESD tabancasının değiştirilebilir iki ayrı başlığı bulunmaktadır. Bu başlıklardan birisi ile havadan statik boşaltım işlemi gerçekleştirilirken, diğer uçtan ise temas yoluyla statik boşaltım işlemi gerçekleştirilmiştir.

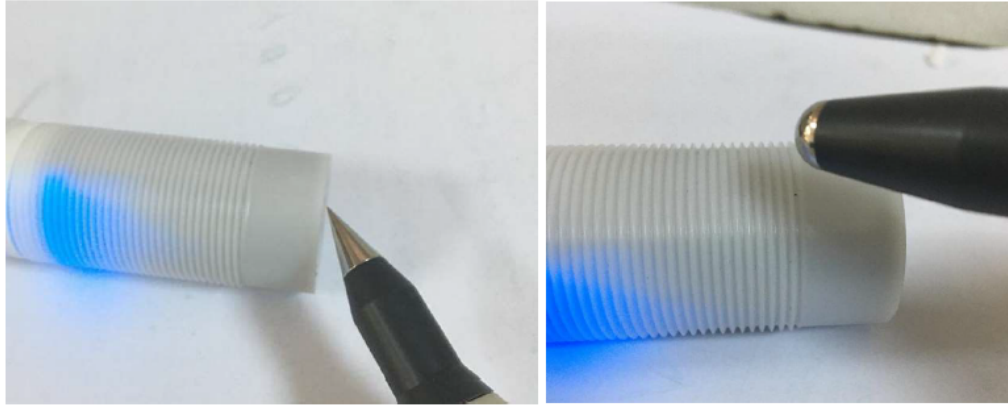
Test sırasında uygulanan deney seviyeleri (Lvt, 2020) tablo halinde Çizelge 3.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5’te gösterildiği üzere, sensörler için farklı polarite ve voltaj değerlerinde elektrostatik deşarj işlemi uygulanmıştır. Test sırasında sıcaklık ve nem değerleri sabittir. Şekil 3.14’te test işleminin uygulanma esnasına ait görsellere yer verilmiştir.

ESD testi, hem temashlı hem de havadan olmak üzere cihaz üzerinde erişilebilir tüm noktalara uygulanmıştır. Test sürecinde cihazın maruz kaldığı elektrostatik deşarj potansiyellerine rağmen, cihazın işlevselliğinde herhangi bir azalma veya performans

Çizelge 3.5. ESD testi deney seviyeleri (Lvt, 2020).

Deney Seviye Değerleri	
Test Standartı	TS EN 61000-4-2
ESD Tabanca Başlığı	Temas ucu ve Hava ucu
Desarj Voltajı	2kV, 4kV, 8kV
Voltaj Polaritesi	Pozitif ve Negatif
Test Düzeneği	Masa Üstü
Testin Uygulanacağı Kısım	Sensör Muhafazası
Desarj Noktası	Cihaz muhafazasında ulaşılabilen tüm noktalar
Ortam Sıcaklığı ve Nemi	29°C - %20RH
Performans Kriteri	Test sırasında performansta azalmaya müsaade ediliyor. Çalışma modunda bir değişikliğe ve bilgi kaybına izin verilmiyor.

**Şekil 3.14.** ESD testi.

kayıbı gözlenmemiştir. Bu durum, cihazın endüstri standartlarına uygun olduğunu ve elektrostatik deşarja karşı güvenilir bir dirence sahip olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, cihazın kullanımı sırasında elektrostatik olaylardan kaynaklanabilecek potansiyel sorunların minimum seviyeye indirildiğini ve cihazın dayanıklılığının sağlandığını göstermektedir.

3.3.3. Ani Yükselmelere Karşı Bağışıklık (Surge) Testi

Ani yükselmelere karşı bağışıklık testi, elektrik ve elektronik cihazların yıldırım, anahtarlama ve benzeri durumlarda ortaya çıkabilen ani gerilim yükselmelerine karşı dirençlerini belirlemek amacıyla yapılan bir EMC testidir. Bu test, cihazların bu tür ani yükselmeler veya dalgalanmalara karşı dayanıklılığını ve performansını değerlendirmek için uygulanır (Grebović vd., 2023).

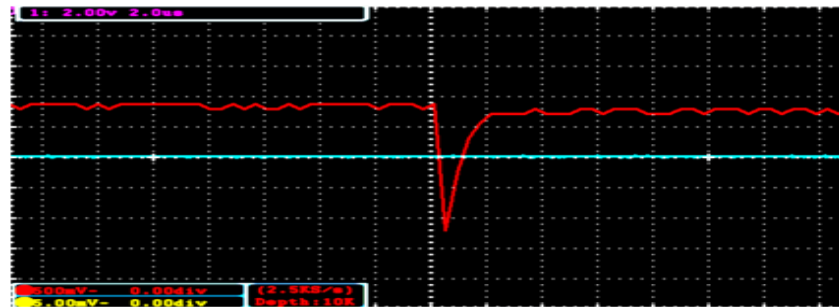
Çizelge 3.6. Surge testi deney seviyeleri (Lvt, 2020).

Deney Seviye Değerleri	
Test Standartı	TS EN 61000-4-5
Darbe Karakteristiği	1,2/50us
Tekrarlama Hızı	5sn
Testin Uygulandığı Kısım	DC güç girişi (24V)
Testin Uygulandığı Hat	Hattan-Toprağa
Bağışıklık Seviyesi	2kV
Test Süresi	60sn
Ortam Sıcaklığı ve Nemi	29°C - %20RH
Test Düzeneği	Masa üstü
Performans Kriteri	Test sırasında performansta azalmaya müsaade ediliyor. Çalışma modunda bir değişikliğe ve bilgi kaybına izin verilmiyor.

Elektrik şebekelerinde anahtarlamalar, yıldırım darbeleri veya diğer dış etkenlerden kaynaklanan ani gerilim yükselmeleri, elektrik devrelerinde ciddi sorunlara yol açabilir. Bu tür ani yükselmeler, elektronik cihazların çalışmasını etkileyebilir, bileşenlerine zarar verebilir veya cihazın normal işlevselliğini geçici veya kalıcı olarak bozabilir (Grebović vd., 2023).



(a) Uygulanacak olan Surge test sinyali.



(b) Test esnasında oluşan sinyal görüntüsü.

Şekil 3.15. Surge test sinyali.

Surge testleri, bu tür ani yükselmelere maruz kalan cihazların nasıl tepki vereceğini belirlemek için yapılır. Bu testler genellikle standartlarla belirlenmiş test darbeleri kullanılarak gerçekleştirilir. Cihazlar, belirli bir gerilim yükselmesine maruz bırakılarak bu durumlarda nasıl davrandıkları incelenir (Grebović vd., 2023). Test sırasında uygulanan deney seviyeleri (Lvt, 2020) tablo halinde Çizelge 3.6’te gösterilmiştir.

Test öncesinde ve esnasında, elde edilen osiloskop görüntüleri Şekil 3.15’te gösterilmiştir. Test süreci sırasında ölçümlerin etkilendiği gözlemlenmiş, ancak test sonrasında sensörde herhangi bir performans kaybı veya kalıcı hasar gözlemlenmemiştir.

3.3.4. EMC Testine Göre Performans Kriterinin Belirlenmesi

Elektromanyetik uyumluluk test sonuçları, cihazların belirli performans standartlarına göre değerlendirilmesini sağlar. Bu testler, elektromanyetik uyumluluk standartlarına uygunluğu ölçmek amacıyla gerçekleştirilir ve elde edilen veriler, cihazların elektromanyetik ortamlarda nasıl tepki verdiğini anlamak için kullanılır. Sonrasında performans kriteri adı altında sınıflandırma yapılır. Performans kriterleri genellikle endüstri normları ve uluslararası standartlar tarafından belirlenir ve cihazların güvenli, etkili ve uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlamak üzere tanımlanır. Performans kriterleri en temel haliyle 3 şekilde sınıflandırılır;

Performans Kriteri A: Performans kriteri A’ya göre, testleri gerçekleştirilen cihazların, test sırasında ve testten sonra amaçlandığı şekilde çalışmaya devam etmesi gerekmektedir. Cihazın amaçlandığı gibi kullanıldığı durumlarda, üretici tarafından belirlenen performans seviyesinin altında performans kaybı veya işlev kaybının olmaması gerekir. Ayrıca gerçek çalışma durumunda veya depolanmış veride değişiklik yapılmasına izin verilmez (Lvt, 2020).

Performans Kriteri B: Performans kriteri B’ye göre, testleri gerçekleştirilen cihazlarda, test esnasında bir takım performans kayıpları gözlemlenebilir. Ancak cihazın testten sonra amaçlandığı şekilde çalışmaya devam etmesi gerekir. Gerçek çalışma durumunda veya depolanmış veride değişiklik yapılmasına izin verilmez (Lvt, 2020).

Performans Kriteri C: Performans kriteri C’ye göre, testleri gerçekleştirilen cihazlarda, test esnasında veya sonrasında geçici işlev kaybı gözlemlenebilir. Ancak

cihaz fonksiyonlarının kendini kurtarması veya kontrollerin çalışması ile cihazın yeniden yüklenebilmesi gerekmektedir (Lvt, 2020).

Yapılan testler sonucunda, elde edilen verilere göre, tasarladığımız yeni sensörün, performans kriteri B'ye uygun olduğu gözlemlenmiştir. Her ne kadar sensör, test esnasında bir takım performans kayıplarına maruz kalmış olsa da, sensörün test sonrası çalışmasında, herhangi bir problem veya işlev kaybı gözlemlenmemiştir.

3.4. Saha Testi

Sensörle ilgili önceki aşamalarda gerçekleştirilen kazanç, sıcaklık optimizasyonu ve çevresel uyumluluk çalışmalarının başarıyla tamamlanması, sensörlerin saha uygulamalarına yönelik montaj sürecini mümkün kılmıştır. Sensörlerin gerçek saha koşullarında etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla, tahıl ürünleri üretim sürecinde kullanılan randıman cihazı seçilmiştir. Bu cihaz, ürünleri sürekli olarak doldurup boşaltabilme özelliği sayesinde, sensör performansının titiz bir şekilde test edilebilmesi için uygun bir seçenek olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.16'da sensörün test edildiği saha ortamı ve sensörün entegre edildiği randıman kantarı cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Sensörün test edildiği saha ortamı ve randıman cihazı.

Sensörler randıman kantarının üst kefesine bağlanmıştır. Ve sistem, tahıl ürününün, randıman kantarının üst kefesine yaklaşık 25 saniyede bir dolup boşalacak şekilde ayarlanmıştır. Test süresi boyunca, tahıl ürünü olarak buğday kullanılmıştır. Sensörlerin montajına ait görsel Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Sensörün montajını kolaylaştırmak adına, yardımcı bir ara aparat kullanılmıştır. Bu montaj düzenlemesi, sensörlerin doğru konumlandırılmasını ve randıman kantarının işlevselliğiyle uyumlu bir şekilde çalışmasına ek olarak, sensör ile tahıl ürünü arasındaki izolasyonu da sağlamıştır.

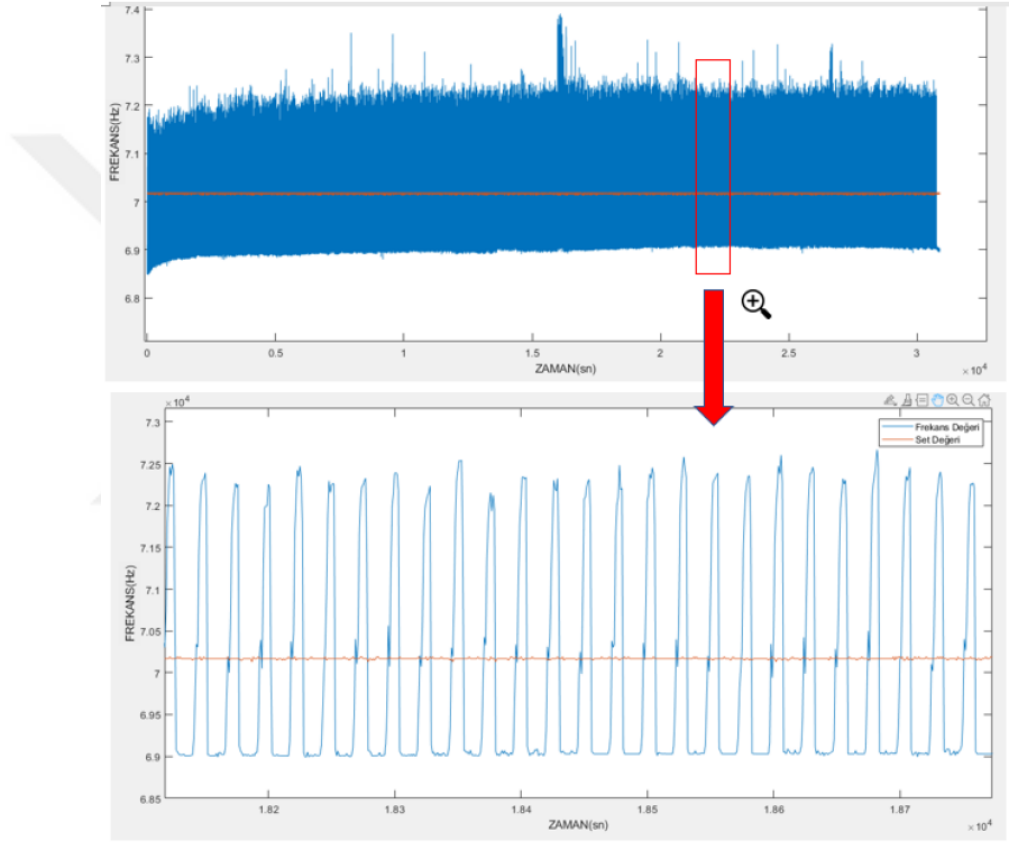


Şekil 3.17. Sensör montajı.

Gerekli elektriksel bağlantıların yapılmasının ardından, saha testlerine başlanmıştır. Sensörden gelen veriler test süresi boyunca anlık olarak izlenmiş ve bu veriler kaydedilmiştir. Bu durum, test esnasında ve sonrasında, sensör performansı ile alakalı detaylı analizlerin yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Sensör tarafından toplanan veriler, test süresince titizlikle takip edilmiş ve bu süre zarfında ortaya çıkan herhangi bir değişiklik, dalgalanma veya olası anormallik kaydedilmiştir. Tüm bu süreçlerin detaylı bir şekilde belgelenmesi, elde edilen verilerin sistematik bir şekilde raporlanması ve olası geliştirme alanlarının belirlenmesi, sensörün optimal performansının sağlanması ve sensörün saha koşullarındaki çalışma güvenilirliğinin doğrulanması açısından önemli bir temel oluşturmuştur.

3.4.1. Saha Test Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Saha testlerinden elde edilen sonuçlar, yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörünün, pratik saha uygulamalarındaki uygunluğunu ve performansını değerlendirmek açısından önemli bir veri kaynağı sunmuştur. Ayrıca, bu değerlendirme sensörün tahıl ürünleri üzerindeki ölçümlerinin güvenilirliğini, hassasiyetini ve dayanıklılığını belirleyerek, saha koşullarındaki değişken etkilere karşı olan tepkisini ayrıntılı bir şekilde ele almıştır.



Şekil 3.18. Test sonucunda elde edilen sensör verilerinin grafiği.

Test süresi boyunca kaydedilen osilatör devresinin çıkış frekans değerleri, dinamik bir sisteme bağlı sensörün, çevresel değişikliklere karşı göstermiş olduğu algılama tepkisini, ölçmeye yöneliktir. Bu veriler bilgisayar tabanlı programlar aracılığıyla grafik haline getirilmiş ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Grafikte belirtilen set değeri, sensörün algılama yapabilmesi için, osilatör devresinin çıkış frekansının ulaşması gereken minimum değeri ifade etmektedir. Osilatör devresinin çıkış frekans değeri, bu set değerinin altında olduğu yerlerde, sensör algılama yapılmadığı bilgisini

kullanıcıya iletirken, set değerinin üzerinde olduğu yerlerde ise algılama yapıldığı bilgisini kullanıcıya iletir. Set değeri, osilatör devresinin algılama aralığı içerisinde, rastgele bir değer olarak ayarlanabilir. Ayarlanan set değeri, sensörün algılama hassasiyetini belirlemektedir. Grafik sonuçları, sensörün pratik saha koşullarında başarıyla performans sergilediğini göstermektedir. Frekans değerinin sürekli olarak, artıp azalması, randıman kantarının, dolun ve boşaltım sürecinde, sensörün hassas ölçümler gerçekleştirdiğini, sistem ile senkronize çalıştığını ve bu süreçlerde istikrarlı bir performans sergilediğini ifade etmektedir.

Sonuç olarak, yapılan analizeler, yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörünün saha uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabilirliğini doğrular niteliktedir. Ayrıca tarım ve benzeri saha uygulamalarında, etkili bir araç olarak kullanılabileceği konusunda önemli bir perspektif sunmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmaların ve araştırmaların sonucunda, elde edilen bulgular ve sunulan öneriler, ilerleyen dönemlerde yapılabilecek olan çeşitli çalışmalar için rehber niteliğindedir.

4.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında, tahıl numunelerinin ölçümü için geliştirilen, kapasitif-frekans dönüşüm yöntemine dayalı, yeni bir osilatör devresi tanıtılmıştır. Yapılan simülasyonlar ve analizler, çok düşük kapasitans değişimlerinde bile bu yeni osilatör devresinin, literatürde bulunan standart bir osilatör devresine göre, yaklaşık 8 kat daha yüksek bir kapasitans-frekans kazanç oranına sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum, yeni osilatör devresiyle tasarlanacak bir kapasitif yaklaşım sensörünün, yüksek hassasiyet ve doğruluk seviyelerine ulaşma potansiyelini açıkça ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, yeni bir kapasitif yaklaşım sensörü tasarlanmıştır.

Elde edilen bu teorik bilgiyi doğrulamak üzere, kapasitif yaklaşım sensörünün ilk prototipleri üzerinde çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Özellikle, farklı tahıl numuneleri kullanılarak gerçekleştirilen kazanç testleri, sensörün mısır ve buğday gibi daha iri taneli ürünleri yaklaşık %6 oranında, kepek ve razmol gibi daha küçük taneli ürünleri ise yaklaşık %2 oranında belirgin bir hassasiyetle algılayabildiğini göstermiştir. Test sonuçları, sensörün geniş bir tahıl yelpazesine yönelik kullanım potansiyelini güçlü bir şekilde vurgulamaktadır. Sensörün algılama yetenekleri, tahıl türleri arasındaki farklı fiziksel ve dielektriksel özelliklere duyarlılığını göstererek, endüstriyel uygulamalarda çeşitli tahıl ürünlerinin hassas ölçümlerini mümkün kılmaktadır.

Kazanç testlerinin yanı sıra, sensör çıkışının değişken sıcaklık koşullarına karşı olan duyarlılığı detaylı bir şekilde analiz edilerek, sensör için bir optimizasyon süreci gerçekleştirilmiştir. -10°C ile 60°C arasındaki geniş sıcaklık aralığı üzerinde gerçekleştirilen testler, sensörün sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini değerlendirmiştir. Bu testler, sıcaklık etkilerini belirleme ve telafi etme amacı taşımıştır. Optimizasyon süreci ve telafi çalışmaları sonucunda elde edilen veriler, sensörün performansında önemli ölçüde iyileşme sağlandığını göstermiştir. Sıcaklık etkilerinin etkin bir şekilde telafi edilmesi, sensörün daha güvenilir ve istikrarlı bir şekilde

çalışabilme kapasitesini artırmıştır. Ayrıca, sensörün değişen sıcaklık koşullarına karşı duyarlılığının azaltılması, sensörün kullanım alanını genişleterek çeşitli pratik uygulamalarda daha güvenilir bir performans sergileme potansiyelini desteklemiştir.

EMC uyumluluk testleri, sensörün elektromanyetik ortamlara karşı direncini ve performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sensör, EFT, ESD ve SURGE testlerinden geçirilmiştir. Testler sırasında sensördeki performans kayıpları dikkatlice izlenmiş ve ölçülmüştür. Yapılan testler sonrasında, sensörün EMC uyumluluğu açısından genel olarak olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Her ne kadar testler sırasında geçici performans kayıpları yaşansa da, sensör testlerin ardından normal çalışma durumuna geri dönmüş ve kalıcı bir performans düşüşü gözlenmemiştir. Bu durum, sensörün elektromanyetik ortamlara karşı dayanıklılığını ve güvenilirliğini doğrulayarak, sensörün çeşitli endüstriyel ortamlarda güvenilir bir şekilde kullanılabilmesini göstermiştir.

Son olarak bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen saha testleri, yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörünün başarılı bir şekilde gerçek dünya koşullarında performans sergilediğini göstermiştir. Yeni osilatör devresi ve kapasitif yaklaşım sensörü tasarımı, optimizasyon süreçleri ve kapsamlı testlerle birlikte ele alındığında, sensörün endüstriyel uygulamalarda güvenilir ve etkili bir şekilde kullanılabilmesini ortaya koymaktadır.

4.2. Öneriler

Tez çalışmasının sonuçlarına dayanarak, yeni tasarlanan kapasitif yaklaşım sensörü için çeşitli öneriler sunulmaktadır. Bu öneriler, sensörün performansını artırmak, kullanım alanını genişletmek ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmek amacıyla taşımaktadır.

Sensörün hassasiyetini artırmak için yeni algoritmaların veya kalibrasyon yöntemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Bu sayede sensör, daha kesin ve doğru ölçümler gerçekleştirerek endüstriyel uygulamalarda güvenilir sonuçlar elde edebilir. Ayrıca, sensörün performansının çeşitli tarım ürünleri üzerindeki etkisinin daha geniş bir ölçekte değerlendirilmesi için farklı tahıl türleri ve tarım ürünleri üzerinde daha fazla test yapılabilir.

Sensörün uzaktan izleme yeteneklerinin geliştirilmesi, tarım sahalarının uzaktan kontrol edilebilmesini ve sensör verilerinin daha etkin bir şekilde erişilebilir olmasını

sağlayarak tarım yönetimine katkı sağlayabilir. Ayrıca, sensörün çevresel koşullara dayanıklılığını artırmak için çeşitli testler yapılmalıdır. Bu testler, özellikle aşırı sıcaklık, nem ve toz gibi faktörlere karşı sensörün direncini değerlendirerek endüstriyel kullanım için önemli bir parametre olacaktır.

Bu öneriler, tezin elde ettiği bulgulara dayanarak sensör tasarımının ve performansının daha ileri düzeyde geliştirilmesine yönelik potansiyel çalışma alanlarını vurgulamaktadır. Bu öneriler, ilgili okuyuculara ve gelecekteki araştırmacılara yol gösterici nitelikte olup, sensör teknolojisinin tarım alanındaki uygulamalarını daha etkili ve güçlü hale getirmeyi amaçlamaktadır.



KAYNAKLAR

Abd Rashid, W. N., Mohamad, E. J., Abdul Rahim, R., Abdullah, J., Mahmad Ameran, H. L., Kok, S. L., Mohamad Sapiee, M. R., Saat, S., ve Subki, A. S. R. A. (2016). Design of non-destructive test on gold metal using parallel plate capacitance sensor: A conceptual framework. In *2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, s. 1–6.

Agrawal, H., Prieto, J., Ramos, C., ve Corchado Rodríguez, J. (2016). Smart feeding in farming through iot in silos. volume 530.

Al-Hamry, A., Kallel, A. Y., Liu, G., ve Kanooun, O. (2021). Low-cost portable system for capacitance measurement based on active bridge and relaxation oscillator. In *2021 6th International Conference on Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NanofIM)*, s. 1–5.

Andreiev, O., Andreieva, O., ve Abramov, F. (2023). Measuring complex for determination of temperature characteristics of thermistors. In *2023 IEEE 13th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)*, s. 275–278.

Anjanakumari, B. T., Bhoomika, C. M., Jugale, A. A., ve Ahmed, M. R. (2019). Memristor based relaxation oscillator for biomedical applications. In *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, s. 1–5.

Aragonés, R., Álvarez, P., Oliver, J., ve Ferrer, C. (2010). A capacitance-to-frequency converters comparison for a frequency acquisition platform. In *2010 IEEE Sensors*, s. 1431–1436.

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.

Aswani, G. ve Islam, T. (2023). Capacitive fringing sensor based on pcb for the

detection of moisture content in grain. In *2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON)*, s. 1–5.

Bauer, S., Renhart, W., Bíró, O., Türk, C., Maier, C., Winkler, G., ve Deutschmann, B. (2019). Investigation of spice models for overvoltage protection devices with respect to fast transients. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 1(1):20–25.

Bolea, R., Luque, A., ve Quero, J. (2007). Single-wafer pressure capacitive sensor. In *2007 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, s. 3315–3318.

Carlton, R. M. (2004). An overview of standards in electromagnetic compatibility for integrated circuits. *Microelectronics Journal*, 35(6):487–495. 3rd International workshop on Electromagnetic compatibility of Integrated circuits.

Cheng, A. J., Wu, L., Sha, Z., Chang, W., Chu, D., Wang, C. H., ve Peng, S. (2023). Recent advances of capacitive sensors: Materials, microstructure designs, applications, and opportunities. *Advanced Materials Technologies*, 8(11):2201959.

Chlis, I., Pepe, D., ve Zito, D. (2016). A novel differential hartley cmos oscillator circuit topology. In *2016 27th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, s. 1–3.

Czaja, Z. (2022). Measurement method for capacitive sensors for microcontrollers based on a phase shifter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 192:110890.

Czaja, Z. (2023). A new approach to capacitive sensor measurements based on a microcontroller and a three-gate stable rc oscillator. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72:1–9.

Feng, N. (2008). Npn and pnp proximity sensors. Retrieved August 28, 2023, from <https://www.omchsmpls.com/tr/npn-and-pnp-proximity-sensors/>.

Fotis, G., Gonos, I., ve Stathopoulos, I. (2006). Measurement of the magnetic field radiating by electrostatic discharges using commercial esd generators. *Measurement*,

39(2):137–146.

Garinto, D., Syahriar, A., ve Budiyanto, S. (2020). A novel op-amp based lc oscillator for wireless communications. In *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, s. 2243–2248.

Ghoor, I. S., Bezuidenhout, P., ve Joubert, T. H. (2017). High-resolution capacitance-frequency converter for biosensor applications. In *2017 IEEE Africon*, s. 671–674.

Grebović, S., Uglešić, I., Xémard, A., Milardić, V., Sinčić, S., ve Diaz, L. (2023). The principles of a new line surge arrester's transient current measurement system. *Electric Power Systems Research*, 223:109633.

Hajimiri, A. ve Lee, T. (1999). Design issues in cmos differential lc oscillators. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 34(5):717–724.

Hanlı, S., Çaçık, F. S., ve Erişmiş, M. A. (2020). Capacitive grain moisture sensor. In *2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, s. 1–6.

Harshini, K., Madhira, P. K., Chaitra, S., ve Reddy, G. P. (2021). Enhanced demand forecasting system for food and raw materials using ensemble learning. In *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Machine Vision (AIMV)*, s. 1–6.

Hershenson, M., Hajimiri, A., Mohan, S., Boyd, S., ve Lee, T. (1999). Design and optimization of lc oscillators. In *1999 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design. Digest of Technical Papers (Cat. No.99CH37051)*, s. 65–69.

Ibrahim, R. O., Abd El-Azeem, S., El-Ghanam, S., ve Soliman, F. (2020). Studying the operation of mosfet rc-phase shift oscillator under different environmental conditions. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(8):1764–1770.

Isiker, H. ve Canbolat, H. (2009). Concept for a novel grain level measurement method in silos. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(2):258–267.

J.V. Stafford, B. Ambler, R. L. (1996). Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 14(2):101–119. Spatially Variable Field Operations.

Kafazi, I. E., Bannari, R., Abouabdellah, A., Aboutafail, M. O., ve Guerrero, J. M. (2017). Energy production: A comparison of forecasting methods using the polynomial curve fitting and linear regression. In *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, s. 1–5.

Kandala, C. V. ve Puppala, N. (2012). Parallel-plate capacitance sensor for nondestructive measurement of moisture content of different types of wheat. In *2012 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, s. 1–5.

Kandala, C. V. K., Butts, C. L., ve Nelson, S. O. (2007). Capacitance sensor for nondestructive measurement of moisture content in nuts and grain. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(5):1809–1813.

Ker, M.-D., Lin, W.-Y., Yen, C.-C., Yang, C.-M., Chen, T.-Y., ve Chen, S.-F. (2010). New transient detection circuit for electrical fast transient (eft) protection design in display panels. In *2010 IEEE International Conference on Integrated Circuit Design and Technology*, s. 51–54.

Khan, A. U., Islam, T., ve Akhtar, J. (2015). A differential interface for trace moisture sensor. In *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, s. 1–5.

Kim, J. ve Kim, J. D. (2011). Voltage divider resistance for high-resolution of the thermistor temperature measurement. *Measurement*, 44(10):2054–2059.

Kim, Y. S., Cho, S.-I., Shin, D. H., Lee, J., ve Baek, K.-H. (2014). Single chip dual plate capacitive proximity sensor with high noise immunity. volume 14, s. 309–310.

Koyuncu, M. T., Bayrakdar, G., Keskin, O. S., ve Erismis, M. A. (2024). A new opamp differentiator based relaxation oscillator for capacitive proximity sensors.

Liu, Y., Liu, Y., Zhang, W., ve Zhang, J. (2020). The study of temperature calibration method for ntc thermistor. In *2020 IEEE 4th International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST)*, s. 50–53.

Lu, S.-Y., Shan, S.-S., Chang, T., ve Liao, Y.-T. (2020). A wide-range capacitance-to-frequency readout circuit using pulse-width detection and delay-line-based feedback control loop. In *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, s. 1–5.

Lvt (2020). Emc testi en 61326-1/iec 61326-1 standardı. Retrieved September 15, 2023, from <https://www.lvt.com.tr/tr/makale/emc-testi-ts-en-61326-1-iec-61326-1-standardı>.

M. E. Casada, P. R. A. (2009). Wheat moisture measurement with a fringing field capacitive sensor. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.

Ma, Z., Zhang, Y., Zhang, K., Deng, H., ve Fu, Q. (2023). Recent progress in flexible capacitive sensors: Structures and properties. *Nano Materials Science*, 5(3):265–277.

Mangeni, G., Tan, R. H. G., Tan, T. H., Cheo, S. K., Mok, V. H., ve Pang, J. Y. (2017). Photovoltaic module cell temperature measurements using linear interpolation technique. In *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, s. 1–6.

Maniatis, G., Hoey, T., ve Sventek, J. (2013). Sensor enclosures: Example application and implications for data coherence. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2(4):761–779.

Matko, V. ve Milanović, M. (2014). Temperature-compensated capacitance–frequency converter with high resolution. *Sensors and Actuators A: Physical*, 220:262–269.

McIntosh, R. B. ve Casada, M. E. (2008). Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities. *IEEE Sensors Journal*, 8(3):240–247.

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.

Nelson, S. (2006). Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13(4):688–702.

Nelson, S., Trabelsi, S., ve Kraszewski, A. (2002). Principles of microwave moisture measurement in grain. In *IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.00CH37276)*, volume 1, s. 99–102 vol.1.

P. Reys, B. Missotten, H. R. (2002). A review of combine sensors for precision farming. *Precision Agriculture*, 3(2):169–182.

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.

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.

Putri, R., Pratama, W., ve Ifmalinda, I. (2023). Application of capacitive sensor for measuring grain moisture content based on internet of things. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 11:29–40.

Rae, P. ve Dattelbaum, D. (2004). The properties of poly(tetrafluoroethylene) (ptfe) in compression. *Polymer*, 45(22):7615–7625.

Raju, R., Bridges, G. E., ve Bhadra, S. (2020). Wireless passive sensors for food quality monitoring: Improving the safety of food products. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 62(5):76–89.

Rosario, P. ve Fruett, F. (2021). Flexible electrode capacitive sensors system for human

fluid detection. In *2021 IEEE Latin America Electron Devices Conference (LAEDC)*, s. 1–4.

Rufyid-U-Nissa ve Khan, S. A. (2019). Linear and sensitive detection electronics for capacitive sensors. In *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, s. 1–4.

Sacilik, K. ve Çolak, A. (2010). Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 mhz. *Powder Technology*, 203:365–370.

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.

Shao, Z. (2022). Research on digital frequency meter based on single chip microcomputer. In *2022 5th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*, s. 114–117.

Sreenath, V. ve George, B. (2017). A novel closed-loop sc capacitance-to-frequency converter with high linearity. In *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, s. 1–5.

Tirupathi, R. ve Kar, S. K. (2018). A differential output switched capacitor based capacitive sensor interfacing circuit. In *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, s. 0565–0569.

Vig, J. ve Walls, F. (2000). A review of sensor sensitivity and stability. In *Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition (Cat. No.00CH37052)*, s. 30–33.

Viheriäköski, T., Fung, R., Wong, R., Gärtner, R., Smallwood, J., ve Tamminen, P. (2018). ESD shielding of thermoformed clam shell packaging. In *2018 40th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD)*, s. 1–10.

Wang, Y., Hong, Y., Goh, W. L., Chai, K. C. T., Lou, X., ve Ye, W. (2017). A passively

compensated capacitive sensor readout with biased varactor temperature compensation and temperature coherent quantization. In *2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, s. 1–4.

Wen, D. (2019). Analysis of the rc phase-shift oscillator. In *2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, s. 1–4.

Wen, S. ve Wen-jun, S. (2006). Decision of production planning in agricultural management using genetic algorithm. In *2006 International Conference on Management Science and Engineering*, s. 645–650.

Wu, S., Zhang, B., Tian, Y., Zhou, S., ve Ma, H. (2018). A grain moisture model based on capacitive sensor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1074:012120.

Xi, Y., Salcedo, J. A., Zhou, Y., Liou, J. J., ve Hajjar, J.-J. (2015). Design and characterization of esd solutions with emc robustness for automotive applications. *Microelectronics Reliability*, 55(11):2236–2246.

Ye, Y., Zhang, C., He, C., Wang, X., Huang, J., ve Deng, J. (2020). A review on applications of capacitive displacement sensing for capacitive proximity sensor. *IEEE Access*, 8:45325–45342.

Zada, M., Basir, A., Lee, B., ve Yoo, H. (2024). Improving capacitance measurements of aqueous solutions with alpha and beta corrections in a parallel-plate capacitor system: Insights into dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, 364:111798.

Zhang, J., Li, R., Zhang, M., Peng, J., Fan, Y., Ma, S., ve Zhang, J. (2023). A novel measurement method for ash deposition based on coplanar capacitance principle: Theoretical, numerical and experimental studies. *Energy*, 282:128846.

Zia-Ur-Rehman (2006). Storage effects on nutritional quality of commonly consumed cereals. *Food Chemistry*, 95(1):53–57.

Zych, P. (2023). Basic model for verification of the simulation methodology of the

analysis of eft/burst transient disturbances. In *2023 24th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, s. 1–4.

