



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN ÇOK
DÜŞÜK GÜÇ TÜKETEN KAPASİTİF SENSÖR
GELİŞTİRİLMESİ**

Oğuzhan KELEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN ÇOK DÜŞÜK GÜÇ TÜKETEN KAPASİTİF SENSÖR GELİŞTİRİLMESİ

Oğuzhan KELEŞ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2022, 50 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Zafer ARICAN

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

Kapasitif sensörler başta endüstriyel alanda olmak üzere başlıca algılama, yaklaşım, miktar tespiti, basınç ve akış tespiti gibi hassas kontrol sistemlerinde ve benzeri yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Kullanım alanının genişliği farklı amaçları hedefleyen çalışmaların ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Çevre şartlarından daha az etkilenme, gürültüye karşı bağımsızlık veya iyi bir çözünürlük gerektiren alanlar için farklı kapasite ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Burada ölçüm tekniğinin belirlenmesinde maliyet, doğruluk oranı, ölçüm devrelerinin sadeliği ve benzeri gibi birçok etken göz önünde bulundurulur. En uygun ölçüm tekniği seçilerek istenen verim elde edilmeye çalışılır.

Teknolojik gelişmeler ve bu alanda birçok çalışmanın yapıyor olması, etkili, daha az yer kaplayan ve az komponent ihtiyacı duyan entegre devre yapılarının da gelişmesini sağlamıştır. Aynı zamanda gelişen teknolojik yenilikler ile düşük güçlü sistemlere ilginin arttığı ve artık bu durumun ihtiyaç olarak değerlendirildiği bir çağa girmiş bulunmaktayız. Ayrıca bu teknolojik çağın yeni çalışmalardan beklediği bir diğer husus harici bir kaynağa ihtiyaç duymadan pille çalışan ve özellikle uzun kullanım ömürleri sunabilecek karar verme mekanizmaları ve nesnelerin interneti platformlarına uyum sağlayabilecek kolay uyumlandırılabilir yapılarıdır. Bu bağlamda tezin amacı çok düşük güçlü sistemler için 2 seneye kadar uzun ömürler sunabilecek ortalama güç tüketimi olarak $150 \mu W$ altında kalabilecek Bluetooth Low Energy 5.0 uyumluluğu bulunan bir kapasitif sensör sistemi tasarımıdır. Özellikle Bluetooth Low Energy 5.0 kablosuz sisteminin düşük güçlü olmasının yanında en yenilikçi kablosuz servislerini de destekliyor olması nesnelerin interneti uygulamaları için uyumlandırma kolaylıkları sunmaktadır. Bu düşük güçlü sistem, anlık tepe akımı $10 mA$ altında kaldığından sağlayabildiği tepe akım seviyesi düşük olduğu için tercih edilmekte zorlanılan CR2450 pili ile çalışabilecek ve kompakt tasarım kolaylıkları sahip yenilikçi bir çözüm olacaktır. Endüstriyel uygulamalar için geliştirilen ve sadece mikro kontrolör ve kablosuz sistemleri destekleyen modüllerin birim maliyetinin $\$15$ seviyelerinde olması sensör sisteminin de birim maliyetini arttırmaktadır. Amaçlanan bu sistem ile toplam maliyeti $\$10$ altında kalabilecek şekilde çalışma yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında tasarlanan kapasitif sensör, kapasitans dijital dönüştürücü entegre yapısı ile yüksek çözünürlükte ve kararlılıkla algılama yaparak düşük güçlü sistemin temelini oluşturmaktadır. Düşük güçlü kapasitans dijital dönüştürücü entegresi düşük güçlü bir mikro kontrolör ile dijital arayüz üzerinden iletişim kurularak kontrol edilebilmektedir. Mikro kontrolör okunan kapasitif veriyi kablosuz sistemlerden olan Bluetooth Low Energy modülü arayıcılığı ile yayın yapmaktadır. Kapasitif sensör sisteminin düşük güçlü olması amaçlandığı için kullanılan komponentler düşük güçlü uygulamalara özel olarak seçilmiştir. Sistemde mikro kontrolör biriminin hem kapasitans dijital dönüştürücü entegresinin kapasitif eşik çıkış pini hem dahili gerçek zamanlı saat kaynağı aktif edilerek periyodik uyanma kesmesi ile düşük güç modundan

uyandırılıp kapasitans dijital dönüştürücü entegresinden güncel veriyi okuyup Bluetooth Low Energy üzerinden yayın yaptıktan sonra tekrar uyuduğu çalışma şekli hedeflenmiştir.

Bu hedef için öncelikle kapasitans dijital dönüştürücü entegresinin de ölçüm aralığında göz önünde bulundurularak yapılan çalışmalardan elde edilen kazanımlar doğrultusunda kapasitif sensör tasarım örnekleri yapılmıştır. Bu tasarım örneklerinin algılama karakteristikleri için denemeler yapılmıştır. Bu denemeler ile ölçülen değerlerin yanında kapasitans dijital dönüştürücü komut ayarları üzerinden dahili kapasitif ölçüm aralıkları genişletilerek ölçümler gözlemlenmiştir.

Bu gözlem ve ölçüm çalışmalarına kapasitif sensör tasarım deneme kartları ile içerisinde farklı maddelerin algılama testleri yapılmıştır. Bu ölçümler için mısır, pirinç gibi farklı tanecik boyutunda maddeler kullanılmış ve ölçümlerinde birbirlerinden ayrımı sağlayacak farklı değerlerde kapasitif ölçüm değerleri elde edilmiştir. Bu denemelere ek olarak kapasitif sensöre parmak yaklaştırılarak da ölçümler alınmıştır. Yakınlık uzaklığı göre değişebilen ölçümler gözlemlenmiştir. Bu testler ile algılama mesafesi ve bu mesafeye etkileyen durumlar incelenerek kapasitif ölçüm ile hedeflenen iyi çözünürlük, uzak algılama mesafesi gibi tasarıma etki eden durumlar belirlenmiştir.

Ayrıca mikro kontrolör düşük güç moduna alınarak kapasitans dijital dönüştürücü entegre devresinin kapasite eşik karşılaştırmacısı ile uyandırıldığı denemeler yapıp, düşük güç akım tüketim grafiği oluşturulmuştur. Bu tüketim hedeflenen aralıktan uzak olduğu gözlemlenip kapasitans dijital dönüştürücü entegre için güç kapatma modu denenerek hedefe ulaşılmıştır. Güç tüketim çıktıları grafikler oluşturularak farklı uyanma zamanı rutinleri oluşturularak enerji tüketimleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Kapasitif sensör, kapasitans dijital dönüştürücü, mikro kontrolör, düşük güç enerji birimi ve Bluetooth Low Energy kablosuz sistemi bir araya getirilerek pille çalışan düşük güçlü bir sistem hedefine ulaşılmıştır.

Sonuç olarak kapasitif sensör tasarımını çok düşük güçlü bir sistem ile birleştirerek yenilikçi kablosuz platformlara uyumlandırarak uzun ömürlü pille çalışan sistem oluşturulmuştur. Bu değerler endüstrideki birçok uygulama için oldukça yeterlidir. Bu sistem ile algılama olaylarının gerçekleştirilebileceği taşınabilir ve akıllı platformlardan olan nesnelerin internetine uyumlandırılacak çok düşük tüketim enerjisine sahip sensör sonucuna ulaşılmıştır. Güç tüketimi olarak 150 μ W altında kalınabilmektedir. Amaçlanan 2 sene pil tüketim ömrünün değişkenlik gösterebileceği göz önünde bulundurularak daha büyük pil yerleştirilmesi düşünülebilir. Sistem düşük güç tüketim testleri yaklaşık 6 saniye ve 11 saniye periyotta yayın süreleri ayarlanarak test edilmiştir. Testlerde ortalama güç tüketimi yaklaşık 11 dakikalık süre boyunca enerji profil arayüzü kullanılarak alınmıştır. Yayın periyodu yaklaşık 11 saniye ve ölçüm süresi yaklaşık 11 dakika olacak şekilde ortalama güç tüketimi amaçlanan tüketimin 4 katı olarak ölçülmüştür. Bazı sensörlerin 1 dakika, 2 dakika veya daha uzun periyotta yayın yaptığı ve hedeflenen çalışma için de 1 dakikada bir verinin gönderilmesi yeterli ve kabul edilebilir bir periyot olduğu göz önünde bulundurularak analitik hesap yapılarak güç tüketimi yaklaşık 108 μ W hesaplanmıştır. Yayın pulse (nabız) genişliği süresi, pulse ortalama tüketimi ve Standby enerji seviyesi ortalama tüketimi değerleri üzerinden yapılan hesapla hedeflenen güç tüketimine ulaşılmıştır.

Ayrıca birim maliyet olarak sadece kontrolcüsü \$15 olan alternatif yapılara göre kapasitans dijital dönüştürücü entegre birim maliyeti dahil edilmediği bu durum için \$10 altında bir sistem tasarım başarısına ulaşılmıştır. Seri üretime geçildiği takdirde yapılacak toptan entegre alımlarıyla zaten gayet düşük maliyetli olan çalışma tam bir fiyat-performans ürüne dönüştürülebilir.

Anahtar Kelimeler: Düşük güçlü uygulamalar, endüstriyel uygulamalar, nesnelerin interneti, kapasitif sensörler, kapasite ölçüm teknikleri

ABSTRACT

MS THESIS

DEVELOPMENT OF VERY LOW POWER CONSUMING CAPACITIVE SENSOR FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

Oğuzhan KELEŞ

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

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2022, 50 Pages

Jury

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Asst. Prof. Dr. Zafer ARICAN

Asst. Prof. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

Capacitive sensors are mainly used in the industrial field, mainly in sensitive control systems such as detection, approach, quantity detection, pressure and flow detection, and similar applications requiring high accuracy. The breadth of the usage area provides the emergence of studies targeting different purposes.

Different capacitance measurement techniques have been developed for areas that require less exposure to environmental conditions, immunity to noise or good resolution. Here, many factors are taken into account in determining the measurement technique, such as cost, accuracy, simplicity of measurement circuits, and so on. By choosing the most suitable measurement technique, the desired efficiency is tried to be achieved.

Technological developments and the fact that many studies are carried out in this field have also led to the development of integrated circuit structures that are effective, take up less space and require less components. At the same time, we have entered an era where the interest in low-power systems has increased with the developing technological innovations and this situation is now considered as a necessity. In addition, another aspect that this technological age expects from new studies is decision-making mechanisms that operate with batteries without the need for an external source and that can offer especially long lifetimes and easily adaptable structures that can adapt to IoT platforms. In this context, the aim of the thesis is to design a capacitive sensor system with Bluetooth Low Energy 5.0 compatibility, with an average power consumption of less than 150 μ W, which can offer long lifetimes of up to 2 years for very low power systems. In particular, the fact that the Bluetooth Low Energy 5.0 wireless system is low-power, as well as supporting the most innovative wireless services, offers convenience for adaptation for IoT applications. This low-power system will be an innovative solution with compact design easiness and will be able to work with the CR2450 battery, which is difficult to choose because its instantaneous peak current remains below 10 mA. The fact that the unit cost of modules developed for industrial applications and supporting only microcontroller and wireless systems is around \$15 increases the unit cost of the sensor system. With this intended system, work has been carried out so that the total cost can remain below \$10.

The capacitive sensor designed in this thesis is the basis of the low-power system by detecting with high resolution and stability with its capacitance digital converter integrated structure. The low-power capacitance digital converter IC can be controlled by communicating with a low-power microcontroller via the digital interface. The microcontroller broadcasts the read capacitive data via the Bluetooth Low Energy module, which is one of the wireless systems. Since the capacitive sensor system is intended to be low-power, the components used are specially selected for low-power applications. In the system, it is aimed to

operate the micro controller unit, in which both the capacitive threshold output pin of the capacitance digital converter IC and the internal real-time clock source are activated, and wake up from the low power mode with a periodic wake-up interruption, read the current data from the capacitance digital converter integrated and then go back to sleep after broadcasting over Bluetooth Low Energy.

For this purpose, first of all, capacitive sensor design examples were made in line with the gains obtained from the studies carried out by considering the measurement range of the capacitance digital converter integrated. Trials have been made for the detection characteristics of these design examples. In addition to the measured values with these experiments, measurements were observed by expanding the internal capacitive measurement ranges over the capacitance digital converter command settings.

In these observation and measurement studies, detection tests of different substances were carried out with capacitive sensor design trial cards. For these measurements, materials of different grain sizes such as corn and rice were used and capacitive measurement values were obtained at different values that would allow discrimination from each other in their measurements. In addition to these trials, measurements were taken by bringing the finger closer to the capacitive sensor. It has been observed that measurements can vary according to the proximity distance. With these tests, the detection distance and the conditions affecting this distance were examined and the conditions affecting the design such as the good resolution targeted by the capacitive measurement and the far detection distance were determined.

In addition, experiments were carried out in which the capacitance digital converter integrated circuit was awakened with the capacitance threshold comparator by putting the microcontroller in low power mode, and a low power current consumption graph was created. It was observed that this consumption was far from the targeted range and the power off mode was tried for the integrated capacitance digital converter and the target was achieved. Power consumption outputs were compared over energy consumption by creating different wake-up time routines by creating graphs. Combining the capacitive sensor, capacitance digital converter, microcontroller, low power energy unit and Bluetooth Low Energy wireless system, the goal of a battery powered low power system has been achieved.

As a result, a long-lasting battery-operated system was created by combining the capacitive sensor design with a very low-power system and adapting it to innovative wireless platforms. These values are quite sufficient for many applications in the industry. With this system, the sensor with very low consumption energy, which can be adapted to the Internet of Things, which is one of the portable and smart platforms where detection events can be carried out, has been reached. The power consumption was below 150 μ W. Considering that the intended 2 year battery consumption life may vary, it may be considered to place a larger battery. System low power consumption tests were tested by adjusting broadcast times in a period of approximately 6 seconds and 11 seconds. The average power consumption in the tests was taken using the energy profile interface for a period of approximately 11 minutes. The average power consumption was measured to be 4 times the intended consumption, with a broadcast period of approximately 11 seconds and a measurement time of approximately 11 minutes. Considering that some sensors broadcast for a period of 1 minute, 2 minutes or longer and sending data every 1 minute for the targeted operation is an acceptable and sufficient period, the power consumption was calculated as approximately 108 μ W by making analytical calculations. The targeted power consumption has been reached by the calculation made over the broadcast pulse width duration, pulse average consumption and Standby energy level average consumption values.

In addition, a system design success of less than \$10 has been achieved for this case, where the capacitance digital converter integrated unit cost is not included, compared to alternative structures with only \$15 per unit cost. If mass production is started, the already low-cost work can be turned into a full price-performance product with integrated wholesale purchases.

Keywords: Capacity measurement techniques, capacitive sensors, industrial applications, internet of things, low power applications

ÖNSÖZ

Lisans eğitiminden bu yana benden bilgisini ve bilgeliğini esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ’e teşekkürü bir borç bilirim. Bu zorlu süreçte benden desteklerini eksik etmeyen aileme, arkadaşlarıma ve iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Oğuzhan KELEŞ
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER.....	ix
ÇİZELGELER.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ VE KAYNAK TARAMASI.....	1
1.1. Endüstriyel Uygulamalarda Kapasitif Sensörlerin Uygulama Alanları	1
1.1.1. Madde cinsi tespiti, akış hızı ve doluluk ölçümü.....	1
1.1.2. Pozisyon algılama ve ölçümü	2
1.1.3. Hassas yakınlık ve dokunma algılama	3
1.1.4. Seviye ölçümüne dayalı buharlanma tespiti	4
1.2. Düşük Güç Tüketimine Sahip Kablosuz Sistem Uygulamalarının Endüstriyel Ürünlerdeki Yeri	5
1.3. Tezin Amacı ve Önemi	7
2. YÖNTEMSSEL ALTYAPI VE SİSTEM TASARIMININ BELİRLENMESİ... 9	
2.1. Kapasite Ölçüm Teknikleri ve Tekniğin Belirlenmesi	9
2.2. Kapasitiften Dijitale Dönüştürücü Tasarımları	11
2.3. Kapasitif Sensörlerin Düşük Güçlü Uygulamalar için Kullanımı.....	12
2.3.1. Mikro kontrolörün belirlenmesi	12
2.3.2. Güç biriminin seçimi ve uyumlandırılması.....	13
3. DONANIMSAL VE YAZILIMSAL TASARIM..... 15	
3.1. Kapasitif Sensör Tasarımı	15
3.2. Mikro Kontrolör Pin Konfigürasyonlarının Oluşturulması.....	19
3.3. Güç Biriminin Oluşturulması.....	20
3.4. Kablosuz Veri Aktarım ve Kapasitif Sensör Biriminin Oluşturulması.....	21
3.5. PCB Tasarımının Oluşturulması	22
3.6. Yazılımın Oluşturulup Çevre Birimler ile Düşük Güç Optimizasyonunun Yapılması	25
4. ÜRETİM VE TESTLER..... 29	
4.1. PCB Kartların Üretimi ve Dizgisi	29

4.2.	Farklı Maddelerle Kapasitif Ölçüm Testleri	33
4.3.	Düşük Güç Simülasyon Arayüzü Üzerinden Enerji Tüketim Grafiğinin Çıkartılması.....	38
5.	SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....	46
5.1.	Sonuçlar.....	46
5.1.1.	Tezin Amacının Doğrulanması	46
5.2.	Öneriler.....	46
KAYNAKLAR		48

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Bıçak başına taşınan malzemenin eşit olmadığı dolun seviyelerine sahip yatay kullanım için vidalı konveyör prensibi. Bu farklı dolun seviyeleri tipik olarak taşınan kütlelerin hatalı tahminlerine yol açmaktadır [6]	2
Şekil 1.2. Hatalı ölçümler için geliştirilen sensör tasarımı. (a) Sistemin 3 boyutlu modeli, sekiz verici elektrotun parçalı tabakası ve sürekli alıcı halkası. (b) Elektrotlar ve vida eğimi [6]	2
Şekil 1.3. Enkoder iç yapısı [3]	2
Şekil 1.4. Enkoderin servo motor ile testi [3]	3
Şekil 1.5. Hemşire robotun koluna yerleştirilmiş sensör tasarımı [7]	3
Şekil 1.6. (a) ToF sensörü ile obje tespit prensibi. (b) Kapasitif sensör ile obje tespit prensibi. (c) Ölçüm aralıkları ile gösterilmiş birleşik sensör prensibi [5]	4
Şekil 1.7. Uygulama olarak robot koluna monte edilmiş sensör grubu [5]	4
Şekil 1.8. Buhar yükseklik ölçümü için kapasitif tasarım [9]	5
Şekil 1.9. Yoğunlaştırılmış buhar tarafından kapasitif sensör yüzeyinin ıslanması [9] ...	5
Şekil 1.10. Kapasitif sensör kartı uzak bilgisayar iletişim yapısı [14]	6
Şekil 1.11. Kapasitif sensör kartı fonksiyon diyagramı [14]	7
Şekil 2.1. Yatay plakalar arası elektrik alan çizgileri [1]	10
Şekil 2.2. Basitleştirilmiş blok şema [25]	12
Şekil 3.1. Birbirine bağlı elektrot kapasitif buhar sensörü: (a) üstten görünümde sensör yapısı; (b) dikey enine kesit; (c) fotoğraf [8]	16
Şekil 3.2. Yakınlık modu çalışması için test edilen iki farklı üst elektrot konfigürasyonu [31]	16
Şekil 3.3. A, B ve B tipi konfigürasyonun her parçasından elektrik potansiyeli ve eş potansiyel çizgilerinin simüle edilmiş iki boyutlu haritası [31]	17
Şekil 3.4. Alternatif saçaklı tarak elektrotlardan oluşan kapasitif sensör tasarımı	18
Şekil 3.5. 25 şeritli 2 elektrottan oluşan kapasitif sensör tasarımı	18
Şekil 3.6. Topraklanmış yüzeylerin kapasitif sensör etki alanında uzaklaştırılması	19
Şekil 3.7. STM32CubeIde ile oluşturulmuş pin yapısı	20
Şekil 3.8. Altium Designer devre çizim programı ile mikro kontrolör için tasarlanan şematik	20
Şekil 3.9. Altium Designer devre çizim programı ile güç birimi için tasarlanan şematik	21
Şekil 3.10. Altium Designer devre çizim programı ile kablosuz BLE ve kapasitif sensör birimi için tasarlanan şematik	21
Şekil 3.11. Top Layer tasarımı	22
Şekil 3.12. Bottom Layer tasarımı	23
Şekil 3.13. Top Layer 3D tasarımı	24
Şekil 3.14. Bottom Layer 3D tasarımı	24
Şekil 3.15. Standby modunda RTC saat kaynağı seçimi	25
Şekil 3.16. AD7151 CDC entegresi kurulum ayarları	25
Şekil 3.17. AD7151 CDC entegresi kapasitif ölçüm ve düşük güç modu geçişi	26
Şekil 3.18. ControllerInit fonksiyonu	27
Şekil 3.19. controllerTaskHandler() fonksiyonu	27
Şekil 3.20. controllerTaskHandler fonksiyonu ve Standby geçişi	28
Şekil 4.1. Lazer ile kazıma arayüzüne yüklenmiş DXF formatında PCB Gerber çıktısı	29
Şekil 4.2. Lazer ile kazıma aşaması	29
Şekil 4.3. Lazer ile kazıma işlemi	30
Şekil 4.4. Kazınma işlemi tamamlanan ve henüz plakadan ayrılmamış PCB	30

Şekil 4.5. Top Layer kazıma ve delik delme işlemlerinin tamamlanmış hali	31
Şekil 4.6. Bottom Layer kazıma işleminin tamamlanmış hali	31
Şekil 4.7. Top Layer dizgi işleminin tamamlanmış hali	32
Şekil 4.8. Bottom Layer komponentlerin yerleştirilmiş hali	32
Şekil 4.9. Kapasitif sensör ve CDC entegre devresi birlikte sensör tasarımı, mikro kontrolör ve programlayıcı kartı ile oluşturulan deneme yapısı	33
Şekil 4.10. Sensör boşta iken ki durum için ölçülen kapasitif değer ölçüm kurulumu ..	34
Şekil 4.11. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 0,9 değerinde kapasitif ölçüm	34
Şekil 4.12. Sensörün mısır ile yapılmış kapasitif ölçüm kurulumu	35
Şekil 4.13. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 2,1 değerinde kapasitif ölçüm	35
Şekil 4.14. Sensörün mısır ile yapılmış kapasitif ölçüm kurulumu	36
Şekil 4.15. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 2,5 değerinde kapasitif ölçüm	36
Şekil 4.16. Sensörün parmak ile yapılmış kapasitif ölçüm kurulumu	37
Şekil 4.17. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 3,7 değerinde kapasitif ölçüm	37
Şekil 4.18. Sensör sistemi test kurulumu	38
Şekil 4.19. BLE 200 ms ile sabit yayın mesajı yaparken	39
Şekil 4.20. BLE Enable ve WakeUp pinleri yüksek seviyede iken (Power Down şartı)	39
Şekil 4.21. CDC aktif modda, eşik karşılaştırmacı ve RTC WakeUpTimer kurulu iken...	40
Şekil 4.22. CDC mikro kontrolör tarafında Power Down yapıp RTC WakeUpTimer kurulu iken Standby durumuna geçildiğinde	40
Şekil 4.23. Yaklaşık 6 saniyelik uyanma zamanı ile BLE üzerinden güncel kapasite değerinin gönderilmesi ve 11 dakikalık süre ile güç tüketiminin ölçülmesi	41
Şekil 4.24. Yaklaşık 11 saniyelik uyanma zamanı ile BLE üzerinden güncel kapasite değerinin gönderilmesi ve 11 dakikalık süre ile güç tüketiminin ölçülmesi	42
Şekil 4.25. Sistemin Standby modda iken akım tüketim değeri	42
Şekil 4.26. Sistemin Standby moddan uyanıp kapasite değerini güncelleyip BLE modülüne yollayarak 2 adet 200 ms yayından sonra tekrar uyuduğunda rutin işlemin bir pulse genişliği ve ortalama akımı	43
Şekil 4.27. Sistemin pil ile çalışırken alınmış fotoğrafı.....	43
Şekil 4.28. nRF Connect uygulaması ile 6 saniyelik periyotlarda yayın mesajları alınan sensör sistemi	44
Şekil 4.29. nRF Connect uygulaması ile alınan yayın mesajları ekranı	44
Şekil 4.30. EFR Connect uygulaması ile alınan yayın mesajları ekranı.....	45

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Kontrolör teknik detayları [27]	13
--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

\$: Para birimi işareti(dolar)

μ : Mikro

Kısaltmalar

AC: Alternatif Akım

ADC: Analog Dijitale Dönüştürücü

AM: Genlik Modülasyonu

ASCII: American Standard Code for Information Interchange

BLE: Bluetooth Low Energy

CAPDAC: Kapasitans Dijital Analog Dönüştürücü

CDC: Kapasitans Dijital Dönüştürücü

CMOS: Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletkeni

CVC: Kapasitans Voltaj Dönüştürücü

DAC: Dijital Analog Dönüştürücü

dBm: Decibel Miliwatt

EKG: Elektrokardiyogram

EMC: Elektromanyetik Uyumluluk

HRI: İnsan Robot Etkileşimi

IoT: Nesnelerin interneti

I2C: Inter-Integrated Circuit

mAh: Mili Amper Saat

mm: Mili Metre

ms: Mili Saniye

nF: Nano Farad

PCB: Baskı Devre Kartı

pF: Piko Farad

RAM: Rastgele Erişimli Hafıza

RSSI: Alınan Sinyal Gücü Göstergesi

RTC: Real Time Clock

SAR-ADC: Ardışık Yaklaşım Kaydı Analog Dijital Dönüştürücü

SWD: Serial Wire Debug

ToF: Time of Light

UART/USART: Universal Asynchronous/Synchronous Receiver/Transmitter

V: Volt

VPS: Buhar Fazlı Temizleme

μA : Mikro Amper

μF : Mikro Farad

μm : Mikro Metre

μW : Mikro Watt

1. GİRİŞ VE KAYNAK TARAMASI

Nesnelerin, sensör tarafından oluşturulan elektrik alanı üzerindeki etkisiyle algılandığı yapılara kapasitif sensörler denilmektedir. Kapasitif sensörler etki alanı içerisinde farklı yalıtkan materyallere göre farklı çıkış oluşturulabildikleri için çeşitli alanlardaki uygulamalarda karşımıza çıkabilmektedir [1]. Farklı yalıtkan katmanların algılanabiliyor oluşu bir yalıtkan içerisinde farklı bir maddenin doğrudan temas olmadığı halde tespit edilebileceği anlamına gelmektedir [2]. Ayrıca kapasitif sensör, iletken malzemelerin de sensörün oluşturduğu elektrik alanı üzerinde etkisinin olmasından ötürü algılanabilmesini sağlamaktadır. Kapasitif sensörler, oluşan elektrik alanının mesafeyle orantılı olarak zayıflaması ve bu nedenle de algılama mesafesinin kısa olmasına rağmen üzerine çalışmalar gerçekleştirilerek endüstriyel uygulamalar başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

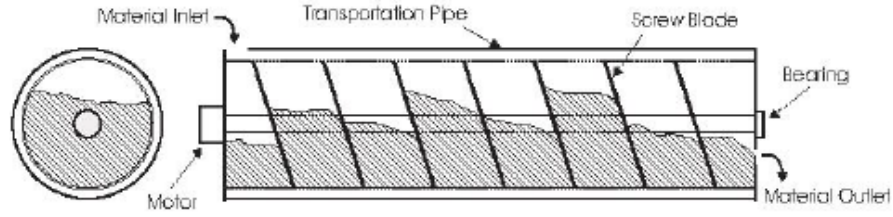
1.1. Endüstriyel Uygulamalarda Kapasitif Sensörlerin Uygulama Alanları

Kapasitif sensörler endüstriyel alanda başlıca konum, yaklaşım, miktar tespitlerinde ve hız bilgilerinin okunmasında, giyilebilir sağlık teknolojileri, savunma ve havacılık sanayii hassas kontrol sistemlerinde, koku tespiti, iç hava kalitesi, sağlık hizmetleri, gıda ürünlerinin kalite kontrolü ve benzeri yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [3-8]. Kullanım alanının bu denli geniş olması yeni teknolojik sistemler ile bütünleştirilerek geliştirilmeye açık ürün çeşitliliği imkânı sunmaktadır.

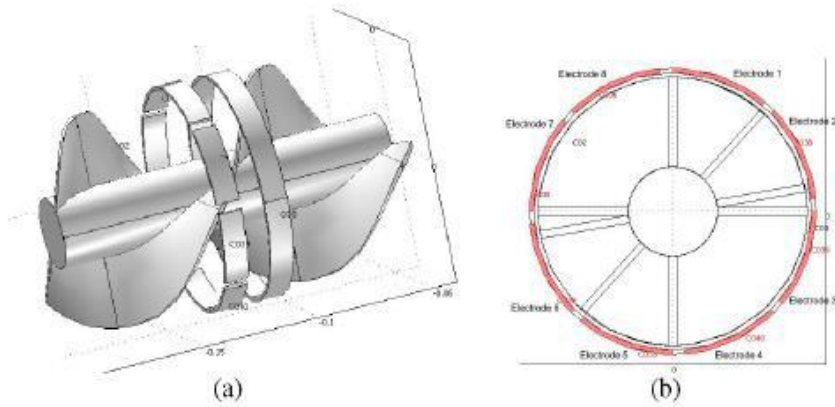
Kapasitif sensörler tüm endüstriyel alanlarda kullanılırken ürün ve hizmet kalitesinin arttırılmasının amaçlandığı uygulamalarda karşımıza çıkabilmektedir [9].

1.1.1. Madde cinsi tespiti, akış hızı ve doluluk ölçümü

Kapasitif sensörler yatay ve silindirik konveyör sistemlerinde malzeme akış hızı, cinsi, tespiti için kullanılırken, havacılık endüstrisinde hız ve konum geri besleme kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır [6]. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de konveyör sistemleri ile ilgili geliştirilmiş sensör tasarımı gösterilmektedir. Ayrıca depolama sistemlerinde malzeme seviye veya miktar tespitinde de kapasitif sensörlerinden yararlanılır.



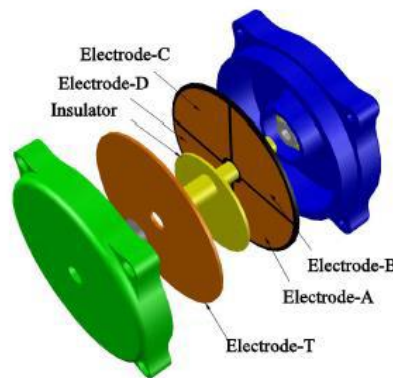
Şekil 1.1. Bıçak başına taşınan malzemenin eşit olmadığı dolum seviyelerine sahip yatay kullanım için vidalı konveyör prensibi. Bu farklı dolum seviyeleri tipik olarak taşınan kütlelerin hatalı tahminlerine yol açmaktadır[6]



Şekil 1.2. Hatalı ölçümler için geliştirilen sensör tasarımı. (a) Sistemin 3 boyutlu modeli, sekiz verici elektrotun parçalı tabakası ve sürekli alıcı halkası. (b) Elektrotlar ve vida eğimi [6]

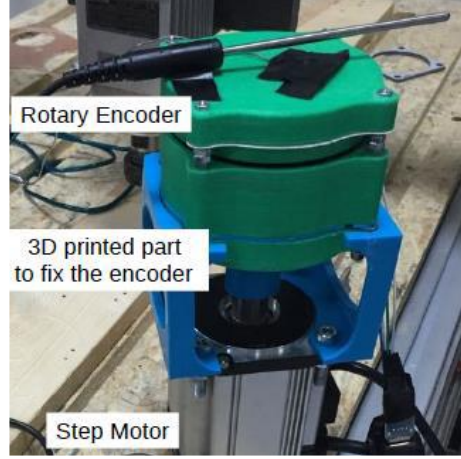
1.1.2. Pozisyon algılama ve ölçümü

Pozisyon ve hız algılama sistemleri enkoder denilen sensörler ile yapılmaktadır. Bu enkoder modellerinden kapasitif enkoder teknolojisinin, optik ve manyetik modellerine göre daha düşük maliyetli ve kolay üretilebiliyor olması geliştirilebilmeye daha açık bir alan olarak değerlendirilmesinin önünü açmaktadır [3].



Şekil 1.3. Enkoder iç yapısı [3]

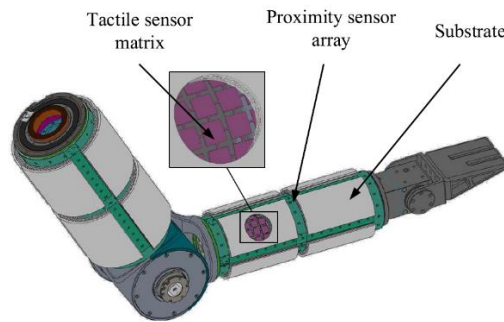
Bu nedenle kapasitif sensör temelli pozisyon ve hız algılama üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te pozisyon ve hız algılama sistemlerinde kullanılabilecek bir çalışma örneği gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Enkoderin servo motor ile testi [3]

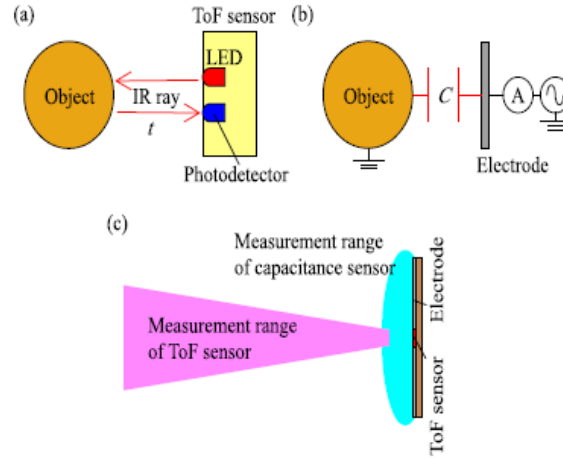
1.1.3. Hassas yakınlık ve dokunma algılama

Son yıllarda popülerliği artan insan makine ilişkisi (HRI) üzerine kurulan endüstriyel sağlık uygulamalarındaki çalışmaların sayısı artmaktadır. Gerek yeni kapasitif tasarımlar gerekse mikro kontrolör tabanlı algılama sistemleri de gelişme göstermektedir. Özellikle bu çalışmalarda, yaklaşan nesneleri algılamak için yakınlık sensörleri kullanarak robotik kol gibi yüksek hızlı çarpışmaların tehlike oluşturabileceği durumların önlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışmalarla endüstriyel sağlık uygulamalarında hemşire robotlar olarak adlandırılan çalışmalarda hastanın kaymasını ve robotik kolun arızalanmasını önlemek için kolun duruşunun dokunsal sensörler kullanılarak ayarlanabileceği düşünülmüştür [7]. Şekil 1.5'te hassas dokunsal sensör kol tasarımı gösterilmektedir.

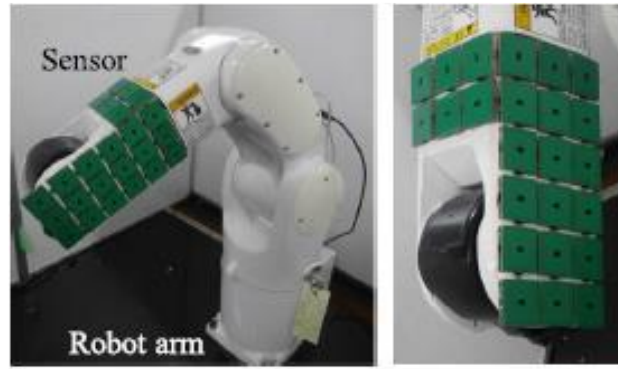


Şekil 1.5. Hemşire robotunun koluna yerleştirilmiş sensör tasarımı [7]

Kapasitif sensör teknolojisi hassas işlemler gerçekleştiren robotik tabanlı sistemlerde Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de görüldüğü gibi dokunma, güvenli çalışma alanı tespiti için de kullanılmaktadır [5]. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de belirtilen çalışmada Time of Light (ToF) algılama tekniğinin açılarak genişleyen ölçüm avantajının daha yakın mesafelerde hassas ölçüm imkânı sunan kapasitif sensör avantajı ile birleştirilmesi üzerinde durulmuştur [5].



Şekil 1.6. (a) ToF sensörü ile obje tespit prensibi. (b) Kapasitif sensör ile obje tespit prensibi. (c) Ölçüm aralıkları ile gösterilmiş birleşik sensör prensibi [5]



Şekil 1.7. Uygulama olarak robot koluna monte edilmiş sensör grubu [5]

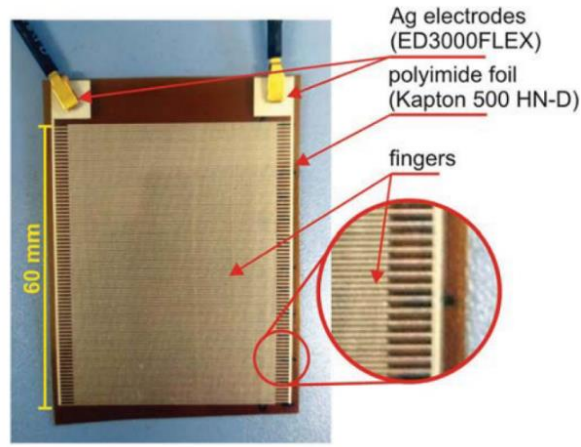
1.1.4. Seviye ölçümüne dayalı buharlanma tespiti

Endüstride, havacılık ve uzay sanayisinde elektronik kart üretim adımlarından olan Reflow lehimleme (lehimlene işlemi) işleminin kalite standartlarının artırılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

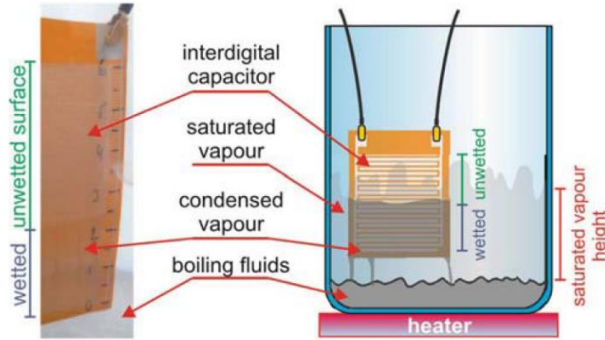
Bu alanda çalışmalardan olan Buhar Fazlı Lehimleme (VPS), halen geliştirilmekte olan modern bir Reflow süreci yöntemidir. Bu çalışmalarda Reflow lehimleme işleminin izlenmesi ve kontrol edilebilirliğine odaklanılmıştır. VPS Reflow işleminin kalitesi,

doymuş buhar durumuna doğrudan bağlıdır. Bu alanda birçok ürün veya çalışmada sıcaklığın algılanması yaygın yöntemdir. Sıcaklık durumunu ve yeniden akış sürecini değerlendirmenin ve kontrol etmenin başka bir yolu, buharlanma seviyesinin algılanmasıdır. Buharlanma seviyesi, VPS kabındaki kaynayan sıvı sonucu açığa çıkan doymuş buhar ile ilişkilidir. Çeşitli lehimli bileşenlerin farklı ısı kapasitesi olduğundan aynı sabit ortamlarda farklı seviyelerde buharlanmaya sebep olmaktadır.

Bu nedenle buharlanma tespitinin yapılması kararlı bir Reflow işlemi için algılama ve kontrol imkânı sunar [9]. Şekil 1.8 ve Şekil 1.9’da bu alanda yapılan çalışmalar gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Buhar yükseklik ölçümü için kapasitif tasarım [9]



Şekil 1.9. Yoğunlaştırılmış buhar tarafından kapasitif sensör yüzeyinin ısılanması [9]

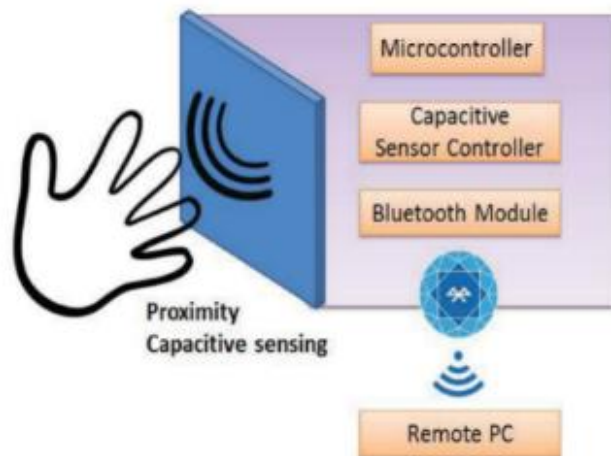
1.2. Düşük Güç Tüketimine Sahip Kablosuz Sistem Uygulamalarının Endüstriyel Ürünlerdeki Yeri

Kapasitif sensörler, buharları, yer değiştirmeyi, basıncı, nemi ve ivmeyi algılamada daha iyi çözünürlük, doğrusallık ve hassasiyet avantajı ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [10, 11].

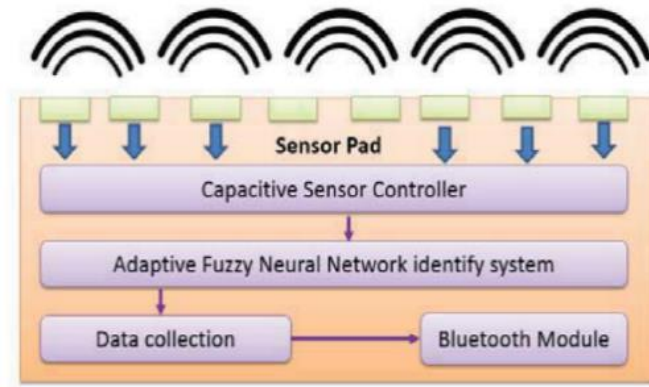
Endüstriyel ortamlarda kablolama maliyeti ve problemlerini en aza indirebilmek için pil ile çalışan düşük güç tüketen sensörler ilgi çekmektedir. Kablolama işleminde uzak mesafelere bilgi tanıştırken oluşabilecek veri kayıpları kablosuz sistemler kullanılarak çözülmeye çalışılmaktadır. Düşük güç tüketen kapasitif sensörler, herhangi bir kablolama gerektirmeyen kablosuz sistemler ile birleştirilerek depolama alanları gibi madde tespit sistemlerinde daha yenilikçi bir çözüm haline getirilebilmektedir. Bu durum uygulanabilirlik açısından daha kullanışlıdır. Bu belirtilen yenilikçi çözümde de belirtildiği gibi son zamanlarda, araştırmacılar, kullanıcı vücut sinyalinin birleştirmek için farklı algoritmaları analiz etmek için kolay taşınabilir olan nesnelerin interneti (IoT) alanlarına artan bir ilgi göstermektedirler [12, 13].

El terminalleri, konsollar, giyilebilir teknolojiler ve benzeri çalışmaların son yıllarda artışı aynı zamanda ürünlerin daha uzun ömürlü tasarlanma çalışmalarına fayda sağlamış ve bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca gerçek zamanlı olarak verilerin izlenebilmesi için kablosuz sistemlere talebin artması pil tüketiminin daha da azaltılabilmesi için tasarımsal detayları iyi analiz etmeyi zorunlu kılmaktadır. Çok düşük güçlü sistem tasarımlarını elektrokardiyogram (EKG) gibi eş zamanlı düşük güçlü kablosuz çalışmalarda görülmektedir [13].

Ayrıca çoklu sensör algılama yapılarından oluşan sistemlerden toplanan verilerin analizi ve bu verilere göre oluşturulan karar mekanizmaları öncelikle endüstriyel sağlık çalışmalarında karşımıza çıkabilmektedir [14]. Şekil 1.10 ve Şekil 1.11’de uzak bilgisayardan verilerin toplandığı fonksiyon diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Kapasitif sensör kartı uzak bilgisayar iletişim yapısı [14]



Şekil 1.11. Kapasitif sensör kartı fonksiyon diyagramı [14]

1.3. Tezin Amacı ve Önemi

Bu tezin amacı endüstriyel uygulamalar için yaklaşık $150 \mu W$ değerinden daha düşük güç tüketimine sahip olan, 1 dakikada bir kablosuz olarak veri gönderen kapasitif bir sensör sistemi geliştirmektir. Sensör sistemine enerji sağlaması için CR2450 pil modeli tercih edilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan CR2450 pil modelinin -CR2032 modelinin 3 katı kadar artırılmış pil kapasitesine sahip modelidir- anlık 10 mA tepe akımının üstünde akım sağlayamaması ve bu durum nedeniyle de uygulamalarda tercihinin zorlaşması göz önünde bulundurularak hedeflenen sistemde anlık 10 mA'in altında kalmak amaçlanmış ve tercih edilmekte zorlanan bir pil modeli ile çalışma yapılabileceği gösterilmek istenmiştir. Belirtilen CR2450, CR2032 ve benzeri piller için kullanılan pil yuvalarının pin aralıklarının aynı olması uyumlandırılabilirlik açısından avantaj sağlayacağı gibi tüm sensör sistemine de boyut için avantaj sağlayacaktır. Kapasite olarak 600-620 mAh olan bir CR2450 pil modeli ile çalışan sistem tasarımının tahmini ömrü, $150 \mu W$ 'ın altında güç tüketimi hedeflendiğini düşünürsek 2 yıl olabilmektedir. Pil kapasitesinin kullanım ömrüne etkisinin doğrudan olmasının yanında kablosuz olarak yapılan yayının sıklığının da etkisi olmaktadır. Düşük güç tüketimi hedeflenen sistemlerde 1 dakikada bir 5 dakikada bir veya daha uzun periyotlarda veri gönderilerek güç tüketimi azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu nedenle de sensör sisteminin kullanım alanındaki amacına uygun olarak tasarımın yapılması önemli olmaktadır. Ayrıca mikro kontrolör ve kablosuz sistemlerin bir arada olduğu kontrolcülerin birim maliyetinin \$15 seviyelerine yakın olması, bu sistemin aynı amaca uygun \$10 altında daha düşük birim maliyette tasarlanabileceğini düşündürmektedir. Kapasitans dijital dönüştürücü (CDC) entegresinin güncel birim maliyetinin yaklaşık \$5 olduğu ele alınırsa alternatif

sistemler için \$20 birim maliyetinin altına inebilmek zor gözükürken amaçladığımız tasarım için \$15 altında birim sistem maliyetine yaklaşılabilir.

Bu alanda yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında, kapasitif ölçümün bir CDC aracılığı ile yapılmasının daha az tasarım karmaşası imkânı sunması ve akabinde daha az güç tüketimi hedefine uyum sağlaması üzerine yoğunlaşılabilirliği fark edilmiştir.

Öncelikle düşük güç tüketimi bulunan bir CDC modeli belirlenmek istense de sistemin kontrolü ve düşük güç modlarının çalışma düzenini ayarlayan bir mikro kontrolör ile çalışabilecek bir analog veya dijital arayüz ihtiyacının da etkisi büyüktür. Bu bağlamda CDC seçimi yapıp düşük güç modlarında $10 \mu A <$ uyku modu akımı hedefinin yakalanması için en uygun mikro kontrolör ve çevre birim ekipmanlarının seçimi önemlidir. Yenilikçi ve gelişen endüstriyel sistemlerden kablosuz ve pille çalışan son kullanıcı ürünlere rağbetin artması bu alanda geliştirilebilirliği ve beklentiyi arttırmaktadır. Bu nedenle de tasarlanan sistemin Bluetooth'un düşük güç versiyonu olan Bluetooth Low Energy (BLE) uyumluluğunun olması hem düşük güç hedefine hem de yenilikçi çözüme katkı sağlamış olacaktır. BLE sistemlerin ürün yelpazesinin de endüstride kullanılmasının sonucu olarak gelişmesi ve ucuzlaması üzerine sistem tasarımında modül olarak kullanılmak istenmesin avantajını bizlere sunmaktadır.

Böylece yukarıda bahsedilen bu çalışma ile geliştirilecek sistemin kapasitif ölçümün endüstriyel kullanım alanına yeni bir katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Ayrıca sistem birim maliyetinin daha az komponent kullanımından kaynaklı azalacağı ve sistemin düşük güçlü yeterli özellikli yapılardan bir araya getirileceği düşünüldüğünde tek pakette -mikro kontrolör ve kablosuz kontrolör- olan yapılardan daha ucuz ve daha düşük güç tüketimli olabileceği hedeflenerek, üretim ve test aşamalarının gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

2. YÖNTEMSEL ALTYAPI VE SİSTEM TASARIMININ BELİRLENMESİ

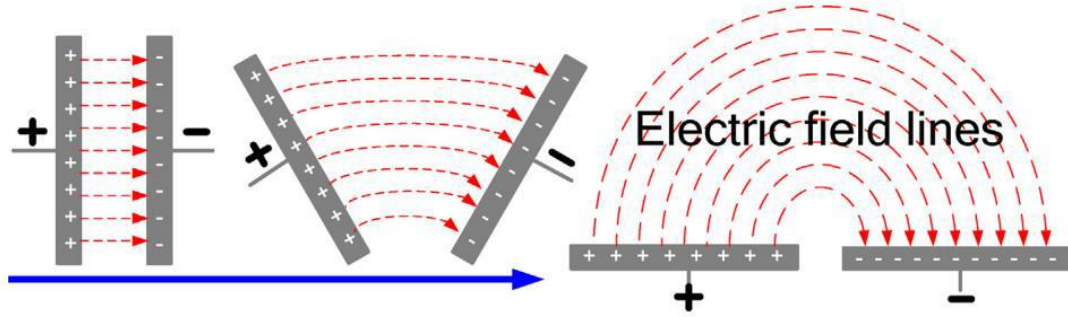
Seviye, miktar, yoğunluk vb. iyi bir çözünürlük gerektiren alanlar için kapasite ölçüm teknikleri geliştirilmiştir [15-19]. İyi bir çözünürlük haricinde gürültü bağışıklığı, değişimlere hızlı tepki gösterme, algılama hassasiyeti ve benzeri isterlere göre farklı kapasitif ölçüm tekniklerinden yararlanılabilir. Burada ölçüm tekniğinin belirlenmesinde maliyet, doğruluk oranı, ölçüm devrelerinin sadeliği ve benzeri gibi birçok etken göz önünde bulundurulur. En uygun ölçüm tekniği seçilerek istenen verim elde edilmeye çalışılır.

2.1. Kapasite Ölçüm Teknikleri ve Tekniğin Belirlenmesi

Kapasitif sensör için, küçük yer değiştirme kapasitansta küçük bir değişiklik getirmektedir, bu değişim genellikle pF seviyesindedir, bu nedenle tespit devresinin doğruluğu nispeten yüksek olmalıdır. Kapasitans edinimi ve tespiti için iki geleneksel yöntem vardır, bunlardan biri kapasitansı voltaj sinyaline dönüştürmektir, bu tür kapasite belirleme metodu genellikle nispeten yüksek hassasiyete ve entegrasyona sahiptir, fakat dezavantajı devre yapısının çok karmaşık olmasıdır [20].

Uygulamaların çoğu çok yüksek bir ölçüm bant genişliği gerektirmez, çünkü ölçülen fiziksel miktarın bant genişliği genellikle birkaç kilohertzin altındadır [21]. Bununla birlikte, bir kontrol döngüsünde kullanılan kapasitif yer değiştirme sensörleri için, kontrol döngüsünün stabilitesini etkileyen gecikmeyi en aza indirmek için daha yüksek bant genişliği ve kısa bir ölçüm süresi gereklidir. Diğer taraftan, bir nesnenin pozisyonunu stabilize etmek için kullanılan bir kontrol döngüsünde, ölçülecek yer değiştirme genellikle küçüktür. Bununla birlikte, montaj toleransı gibi pratik kısıtlamalardan dolayı, bir paralel plaka kapasitif sensörünün iki plakası arasındaki mesafe, sensörün hassasiyetini en üst düzeye çıkarmak için ölçülecek yer değiştirmeye her zaman karşılaştırılmaz [22]. Her zaman farklı uygulamalar için kullanılan ölçüm yöntemleri de farklılık gösterir.

Ayrıca değişimi ölçülmek istenen kapasitif sensör, ölçüm yapılacak ortama, maddenin cinsine ve benzeri durumlara göre farklı tasarımlarda olabilmektedir. Şekil 2.1’de birbirine paralel olmayan iki plaka arasında da kapasite ölçülebileceği gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Yatay plakalar arası elektrik alan çizgileri [1]

Kapasitif bir değişimi ölçmenin en temel yollarından biri harici bir alternatif akım (AC) sinyal kaynağından kapasitenin şarj-deşarj süresi ayarlanarak doğrudan bir analog dijital dönüştürücü (ADC) kanalı üzerinden okunma işlemidir. Kapasitif ölçüm bir mikro kontrolör üzerinden verilen kare dalga sinyalinin ADC ile işlenmesi ile ölçülebilmektedir [15]. Bu okuma yöntemi ile çok yüksek hızlara çıkılamayacağından kapasite ölçüm aralığı nF- μ F seviyelerinde sınırlı kalmaktadır.

Genlik değişimine bağlı olan doğrudan ölçüme göre fazda kayma esas alınarak ölçüm de yapılabilmektedir. Düşük kapasitans ölçümlerinde daha iyi sonuçlar elde edilir. Basit düzeyde faz farkı ile ölçüm tekniği sıfır geçişleri baz alınarak Opamp'lı pozitif geri beslemeli komparatör ile gerçekleştirilir. Girişe sinüs sinyali verilerek kapasitans değişimine göre oluşan sinyal ile referans sinyali karşılaştırıldığında fazda oluşan kayma ölçülebilmektedir [16].

Kapasitedeki değişimin doğrudan frekans değişimi ile orantılı olması ilkesine dayanarak sinyal genliği bakımında gürültü bağışıklığının iyileştirildiği ölçüm teknikleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemde kapasite değişimine duyarlı kare dalga osilatörünün çıkışının mikro kontrolör tarafından sayılması ile ölçüm gerçekleştirilebilir [17].

Daha hassas kapasitif ölçüm yapılmak istendiğinde ve bu hassas ölçümün yanında faz farkının etkisinin de ortadan kaldırılması istendiğinde daha karmaşık bir tasarım ortaya çıkmaktadır. Ölçülecek bu kapasitans analog ön yüz devresi ile gerilime çevrilerek elektrotlardan birine uygulanan taşıyıcı sinyal ile genlik değişiminin kapasitans bilgisini içerdiği, bir genlik modülasyonu (AM) sinyali oluşturulur. Bu AM sinyalinin zarfı, kapasitans bilgisi içerdiğinden, zarfı elde etmek için demodülasyon ve filtreleme yapılır [18].

Bazı ölçüm tekniklerinde kapasitörün şarj vedeşarj durumlarının anahtarlanarak doğru voltaj kazanımı elde edilmeye çalışılır. Bu anahtarlar mikro kontrolör tarafından

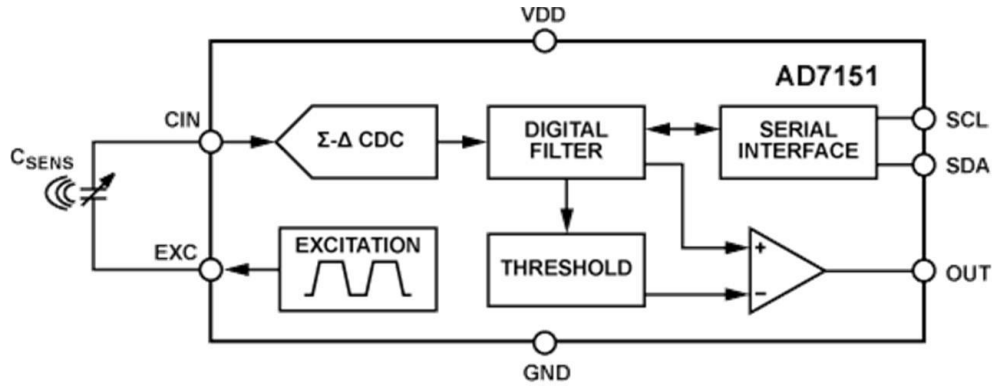
kontrol edilen elektronik kapılardır. Sistemin girişine sinüs dalgası anahtarların periyoduna bağlı olarak kıyılır. Anahtarlama frekansına uygun bir örnekleme ayarı ile mikro kontrolör ADC girişinden okuma işlemi gerçekleştirilebilir [19].

Ölçüm yöntemlerinin karmaşıklığı ve istenilen hassasiyeti verememesi kapasite voltaj değişim yönteminin daha cazip bir uygulama haline gelmesini sağlamıştır. Bu yöntemi kullanan CDC yüksek kararlılık, yüksek hassasiyet ve düşük ölçüm aralığı imkânı sunması, bu dönüştürücülerin kapasitif ölçüm için tercih edilmelerini sağlamaktadır [8].

2.2. Kapasitiften Dijitale Dönüştürücü Tasarımları

Kapasitif sensörlerin temel teorisi, kapasitansların hedeflerle orantılı olarak değişmesidir. Bu, kapasitif sensörlerin basınç sinyalinin veya diğer algılama hedeflerini kapasitif miktarlara dönüştürebileceği anlamına gelir. Kapasitif sensörlerden gelen bilgileri analiz etmek için CDC entegresine ihtiyaç vardır [8]. Anahtarlama kapasitör dönüştürücülü CDC devrelerinin yüksek çözünürlük elde ettiği kanıtlanmıştır [23, 24]. Ancak bu tip arayüzlerde, çok daha düşük voltajlarda çalışarak düşük güç tüketimi ve çok daha geniş dinamik aralığı hedeflenirse CDC sistemi, ardışık yaklaşım kaydı analog dijital dönüştürücü (SAR-ADC), kapasitans-voltaj dönüştürücü (CVC), anahtarlama referans kaynakları ve benzeri eklenerek elde edilebilmektedir [8]. CDC devrelerinin düşük değerli kapasite ölçümlerini yüksek çözünürlükle yaparak maliyet artımına sebep olan yüksek kazançlı düşük Offset'li pahalı trans empedans, çarpıcı ve çözücü devrelerinin kompleksliğinden uzaklaştırması ve aynı zamanda düşük güç sistemleri için uyumlandırılma çalışmalarının yapılması tercih edilmelerini sağlamaktadır. CDC entegrelerinden olan AD7151 entegresi öncelikle çok düşük güç tüketimi, farklı kapasitif ölçüm aralıklarını desteklemesi, bir mikro kontrolöre bağlanabilecek olan çıkış pinine sahip olması gibi özellikleri ile diğer modellerden ayrılmaktadır. Ayrıca Power Down tüketim seviyesinin 5 μ A seviyelerin altına inmesi düşük güçlü kablosuz uygulamalar için de doğru bir seçimdir.

Şekil 2.2'de kapasite voltaj dönüştürücü entegre devrenin blok diyagramı yer almaktadır [25].



Şekil 2.2. Basitleştirilmiş blok şema [25]

2.3. Kapasitif Sensörlerin Düşük Güçlü Uygulamalar için Kullanımı

Kapasitif sensörler, ek bir aktif kaynak kullanmadan elektrik alanındaki değişimi ölçen pasif bir mekanizmaya dayanmaktadır. Bu nedenle de bu durum kapasitif sensörleri düşük güçlü uygulamalarda kullanılabilir kılmaktadır. Ayrıca, kapasitif sensörler için sinyal okuma sırasında statik akım yoktur. Bu nedenle de kapasitif sensörlerin güç tüketimi diğer sensör türlerine göre daha azdır. Kapasitif sensörlerin taşınabilir cihaz ve kablosuz sensör ağları gibi düşük güçlü sistemler için uygun olmasının nedeni budur [8].

Yakındaki nesnelerin varlığını algılayan yakınlık sensörlerindeki son gelişmeler otomasyon, güvenlik sistemleri, mobil elektronik ve ev aletleri gibi çeşitli aralarında pil sistemi ile de çalışan sistemlerde uygulanmıştır [26].

2.3.1. Mikro kontrolörün belirlenmesi

Düşük güçlü uygulamalar için mikro kontrolör ve çevre birim elemanlarının seçimi önem arz etmektedir. Bu nedenle uygulama henüz tasarım aşamasında iken sistem gereksinimlerine uygun olarak kontrolör ve komponent seçimi yapılmalıdır. Kapasitif ölçümü yapmamızı sağlayan AD7151 CDC entegresinin Inter-Integrated Circuit (I2C) protokolü üzerinden komut arayüzü olduğu için bu protokolü destekleyen bir kontrolör seçimi yapılmıştır. Ayrıca ölçülen kapasitif değerlerin yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilen BLE üzerinden kablosuz platforma paylaşılması hedeflendiği için BLE 5.0 gibi en yeni sürümü destekleyen kablosuz modül seçimi yapılmıştır [14]. Bu kablosuz modül kontrol pinleri üzerinden çok düşük güç tüketimini ve seri arabirimi Universal Asynchronous/Synchronous Receiver/Transmitter (UART/USART) destekleyen BT4502 modülüdür. Bu modülün güncel birim maliyeti bir adet için yaklaşık \$3 seviyelerindedir.

Ayrıca mikro kontrolör seçiminde analog değer ölçüm pinleri ve gerçek zamanlı saat (RTC-Real Time Clock) birimine sahip olmasına dikkat edilmiştir. RTC birimi Standby uyku modunda olan kontrolcünün kapasitif eşik aşım kesmesi haricinde WakeUpTimer ile de uyku modunda çıkması için gerekli bir birimdir. Bu gereksinimlere göre kullanılacak hafıza ve rastgele erişimli hafıza (RAM) değerleri çalışmalar sonucu deneyimlerden elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Çalışma ortam koşulları, elektronik kart üzerine dizgi kolaylığı ve birim maliyet avantajı da göz önünde bulundurularak STM32L031F4P6 mikro kontrolörüne karar verilmiştir. Çizelge 2.1’de düşük güç detayları ve genel bilgiler görülebilmektedir.

Ayrıca karar verilen mikro kontrolörün güncel bir maliyetinin bir adetlik alım için yaklaşık \$4 -1000 adetlik için yaklaşık \$2- birim maliyetine sahip olduğu görülebilir.

Çizelge 2.1. Kontrolör teknik detayları [27]

STM32L031F4P6
ultra-low-power Arm Cortex-M0+ MCU
0.23 μ A Standby mode (2 wakeup pins)
0.35 μ A Stop mode (16 wakeup lines)
0.6 μ A Stop mode + RTC + 8 KB RAM retention
TSSOP20 yüzey montajlı (SMD)
16 KB Flash memory
8 KB SRAM

2.3.2. Güç biriminin seçimi ve uyumlandırılması

Sistem gereksinimlerinde kontrolör ve çevre birimlerin seçiminden sonra pil tüketiminde önemli bir etken olan regülatör sessiz akımlarının da uyumlandırılması gerekmektedir. Bu konuda hem standart hem de şarj edilebilir pil modellerini destekleyebilmesi adına sessiz akımı düşük giriş voltaj regülatörlerinden MCP1703 tercih edilmiştir. Bu regülatör için güncel birim maliyeti bir ürün için yaklaşık \$1 seviyelerindedir. 2 μ A [28] sessiz akıma sahiptir. Ayrıca sistemde BLE kablosuz modülün ve CDC entegresinin kontrolör Standby modunda iken güç biriminden tamamen ayrılmasını sağlayan ve kontrolcü üzerinden açılıp kapatılabilen bir CMOS lineer regülatörü daha tercih edilmiştir. Bu sayede uyku modu akım tüketimlerinin toplamından daha az akım tüketimi olan bir sistem elde edilmiştir. Bu voltaj regülatörü modeli de ADP123 modelidir. Bu regülatör için güncel birim maliyeti bir ürün için yaklaşık \$1 seviyelerindedir. ADP123 modeli için Power Down modu akımı 1 μ A’ın [29] altındadır. Ayrıca yük yok iken düşük sessiz akımı garanti eder [29].

Hedeflenen anlık maksimum tepe akımı 10 mA'in altında olduğundan, regülatör tarafından belirtilen 1 mA yük altında 60 μ A ve 150 mA yük altında 130 μ A [29] değerlerine göre sessiz akım tüketiminin 100 μ A altında kalacağı sonucuna varılabilmektedir.

3. DONANIMSAL VE YAZILIMSAL TASARIM

Düşük güçlü uygulamaların enerji verimliliği gereksinimi göz önünde bulundurularak kapasitif sensör verisinin kapasitiften dijitale dönüştürücüler aracılığı ile dijital arayüz üzerinden mikro kontrolör tarafından okunması üzerine çalışılmıştır. Ayrıca ölçülen kapasitif verilerin kablosuz sistemler üzerinden kullanıcılara aktarılması gibi yenilikçi bir çözümün belirlenmesi ile de sistem gereksinimlerine uygun olarak donanım ve yazılım tasarım detayları oluşturulmuştur.

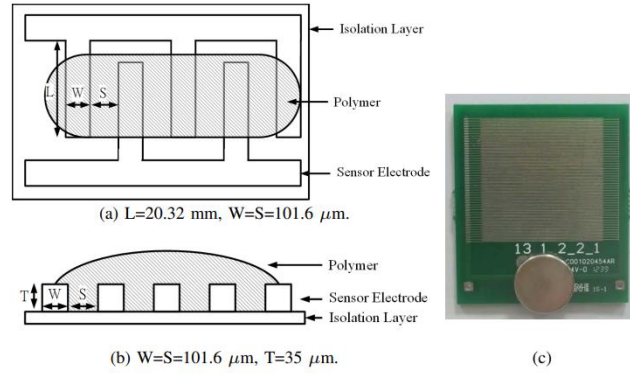
3.1. Kapasitif Sensör Tasarımı

Kapasitif sensörler, uygulama alanlarına göre tek, çift veya çok daha fazla elektrotlu olarak tasarlanabilmesi ve standart baskılı devre kartı (PCB) plakaları ile bile kolaylıkla oluşturulabilmesi nedeniyle endüstriyel alanlar başta olmak üzere birçok alanda ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. İyi bir koruma ile önleneyecek olan nem ve yağlar gibi endüstriyel kirliliğe karşı duyarlılığına rağmen, kapasitif sensörler hala yüksek hassasiyetle iyi sağlamlığı birleştirmekle kalmaz, aynı zamanda düşük maliyet, basit yapı ve düşük güç tüketimi de sağlar [19].

Polimer bir malzemenin oluşturacağı kapasitif etkiyi ölçmeyi hedefleyen bir çalışmada Şekil 3.1’de oluşturulan tasarımdan faydalanılmıştır. Birbirine bağlı olan bu elektrotlar bir PCB üzerine inşa edilmiştir. Her elektrot parmağının uzunluğu 20,32 mm, genişliği yaklaşık 102 µm ve kalınlığı sırasıyla 35 µm olacak şekilde PCB tasarımı yapılmıştır. Ayrıca bu tasarımda bitişik elektrot şeritleri arasındaki boşluk yaklaşık 102 µm olarak ayarlanmıştır. Tasarım birbirine bağlı 101 elektrot şerit çifti olacak şekilde oluşturulmuştur. Bu çalışmada yapılan sensör tasarımının kapasitansı (1)’e göre hesaplanmıştır [8].

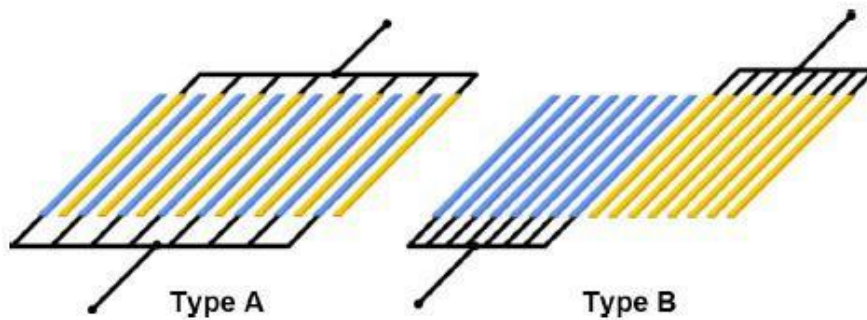
$$C = (n - 1) \times L \times \varepsilon_r \varepsilon_0 \times \frac{1}{2} + (n - 1) \times \varepsilon_r \varepsilon_0 \times \frac{L \times T}{S} \quad (1)$$

Burada, n çift sayısını, L elektrot şerit uzunluğunu ve T ise PCB bakır kalınlığını belirtir. FR4’ün (PCB yalıtkan malzemesi) dielektrik geçirgenlik sabiti 3,8 ile 4,8 - varsayılan 4,5 değeridir [30]- arasında değişkenlik göstermektedir. (1)’den, bu çalışmadaki sensörün kapasitansı 60 pF civarında olduğu belirtilmiştir [8].

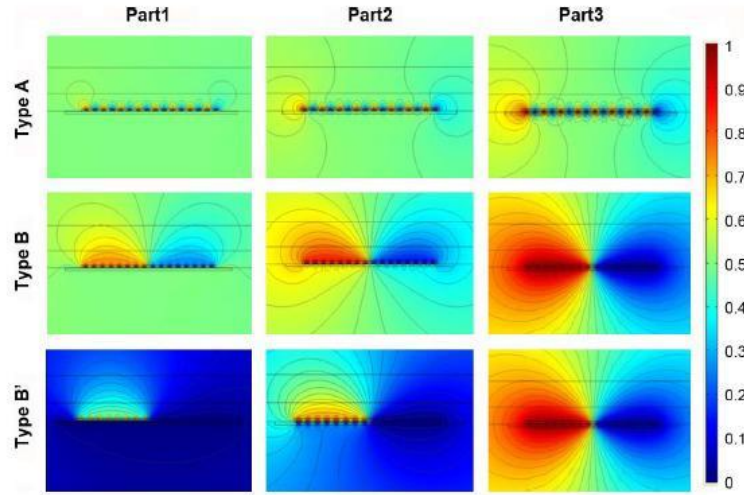


Şekil 3.1. Birbirine bağlı elektrot kapasitif buhar sensörü: (a) üstten görünümde sensör yapısı; (b) dikey enine kesit; (c) fotoğraf [8]

Kapasitif sensör tasarımlarında referans alınan denklemlere uygun olarak kapasitif sensör modeli oluşturulabilmektedir. Ancak tasarım modellerinde elektrik alanın etkisinin azaltacak yönde birçok durum da mevcuttur. Bu durumlarda doğrudan algılama mesafesi üzerinde etkilere sahiptir. Bu nedenle birçok çalışmada elektrik alan üzerindeki etkinin görülebilmesi için kapasitif sensör elektrot tasarımı varyasyonları oluşturulur. Bunlar arasında, Şekil 3.2'deki çalışmada elektrot şerit sayısının etkisini karşılaştırmak ölçümler yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada elektrik alan üzerinde etkisi olabilecek alt (Bottom) elektrotlarının da etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 3.3'te yüzer (bir yere bağlanmamış) ve topraklanmış (sabit potansiyel) alt yüzeylerin etkisi görülebilmektedir. Tip A, alternatif elektrot şeritlerinden oluşan on beş saçaklı bir tarak elektrot yapısıdır. Tip B, iki büyük elektrottan (elektrot başına sekiz şerit) oluşan yalnızca bir saçağa sahiptir. Alt elektrotların potansiyeli her iki konfigürasyon için de yüzer şekildedir. Şekil 3.2'de gösterilmeyen Tip B' ise, topraklanmış alt elektrotlara sahiptir, üst elektrot konfigürasyonu ise Tip B ile aynıdır [31].

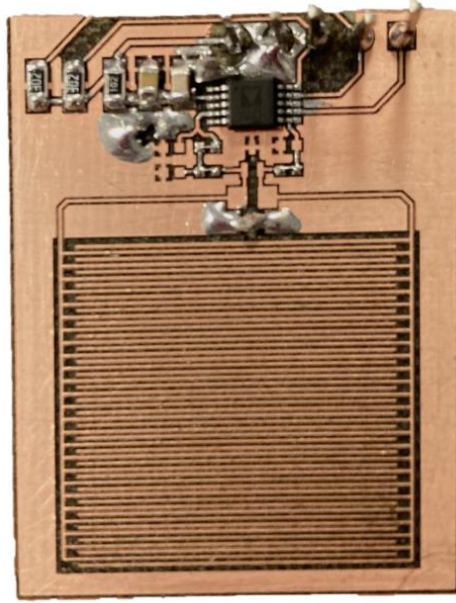


Şekil 3.2. Yakınlık modu çalışması için test edilen iki farklı üst elektrot konfigürasyonu [31]



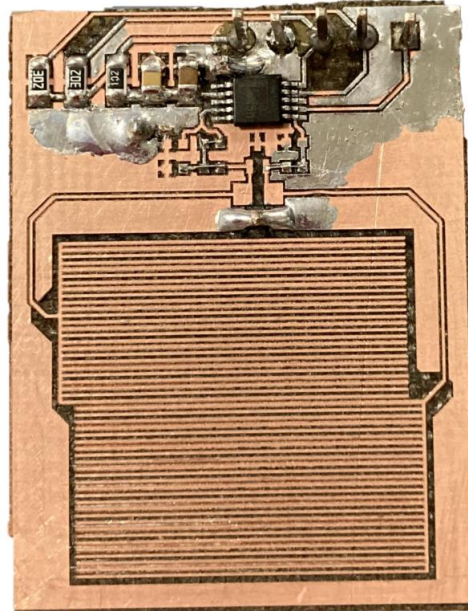
Şekil 3.3. A, B ve B tipi konfigürasyonun her parçasından elektrik potansiyeli ve eş potansiyel çizgilerin in simüle edilmiş iki boyutlu haritası [31]

Örnek tasarımsal yapılar, simülasyonlar ve denklemler incelendikten sonra düşük güçlü uygulamanın kapasitif sensör kısmını oluşturacak tasarım detayları üzerine çalışmalar yapılmıştır. (1)'de belirtilen formül kullanılarak CDC entegresinin ölçüm aralığının dışında kalmayacak şekilde bir kapasitif sensör tasarımı yapılmıştır. Bu sensör tasarımında ilk olarak taraklı iç içe geçmiş şerit elektrot yapıları oluşturulmuştur. Elektrot tasarımında hassas markalama sistemleri yapabilen FiberLAST marka lazer markalama ve kesim cihazları kullanılmıştır. Elektrot tasarımında iki tarak arası mesafe tasarlanırken kullanılacak PCB'lerin farklı kalitelerde olabildiği göz önünde bulundurularak 200 μm olarak belirlenmiştir. Daha sonra ölçülebilir aralıkta kalınabilmesi için 25 şerit elektrot çifti belirlenerek yaklaşık 8-10 pF aralığında olacağı denklem kullanılarak hesaplanan 20,0 mm'ye 22,0 mm ölçülerinde kapasitif tasarım oluşturulmuştur. Bu kapasitif tasarımda kapasitans değerinin birçok belirleyici faktör ile değişebilmektedir. PCB bakır kalınlığı belirleyici faktörlerden biri iken, diğer bir faktör de PCB temel dolgu malzemesi olan FR4 -bazı PCB'lerde farklı malzemeler kullanılabiliyor- materyalinin farklı dielektrik değerine sahip olabilmesidir. Şekil 3.4'te alternatif elektrot şeritlerinden oluşan kapasitif sensör tasarımı görülebilmektedir. Şekil 3.4'te kullanılan tasarımın alt elektrotu topraklanmıştır. Ayrıca CDC entegresinin hem besleme voltajını alabilmesi hem de mikro kontrolör ile haberleşmesi için -eşik karşılaştırmacı çıkışı dahil- bağlantı noktaları görülebilmektedir.



Şekil 3.4. Alternatif saçaklı tarak elektrotlardan oluşan kapasitif sensör tasarımı

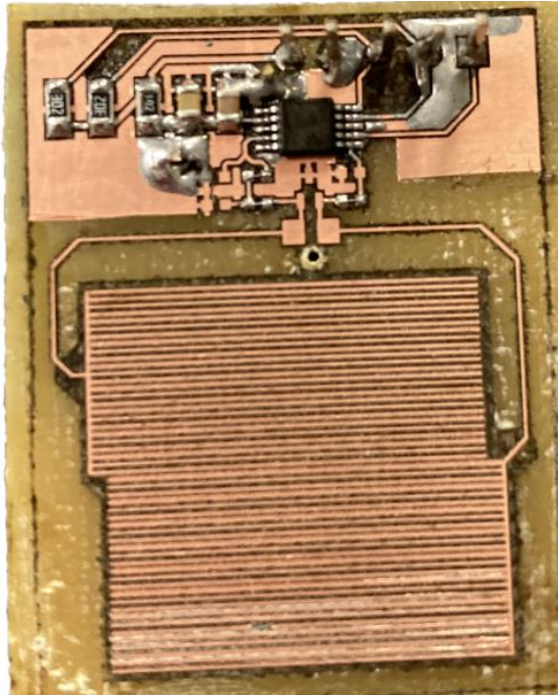
Kapasitif tasarımlarda elektrik alan potansiyelinin, elektrotlara yakın olan veya PCB alt yüzeylerinde yer alan diğer yüzler ve topraklanmış yüzeylerden etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle Şekil 3.3'te de bahsedilen eş potansiyel alan çizgileri göz önünde bulundurularak Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'daki kapasitif sensör tasarımları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. 25 şeritli 2 elektrottan oluşan kapasitif sensör tasarımı

Şekil 3.5'teki sensör tasarımı birbirine bağlı 25'er şeritten oluşan 2 büyük elektrot olacak şekilde alt elektrot yüzey seviyede bırakılarak tasarlanmıştır. Bu tasarım ile amaçlanan algılama mesafesini daha da arttırmaktır.

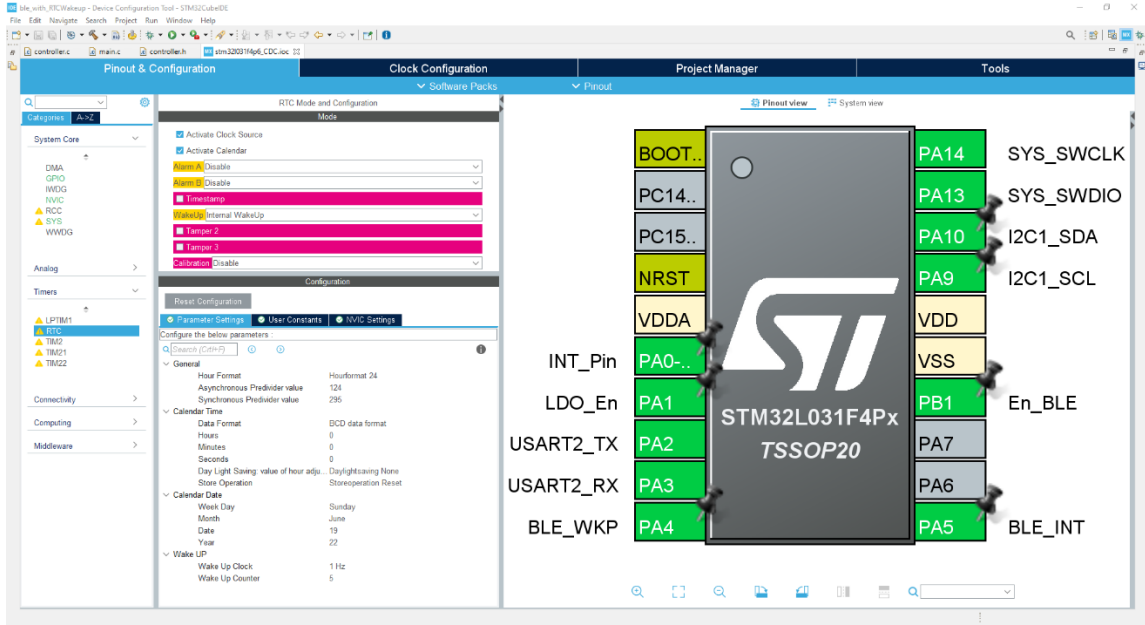
Ayrıca Şekil 3.6'da birleşen elektrotların CDC entegresine gidene kadar topraklanmış çevre yüzeylerinden etkilenebileceği ve eş potansiyel alan çizgilerinin hedeflenen algılama mesafesini kısaltabileceği düşünülüp o bakır yüzey alanları ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.6. Topraklanmış yüzeylerin kapasitif sensör etki alanında uzaklaştırılması

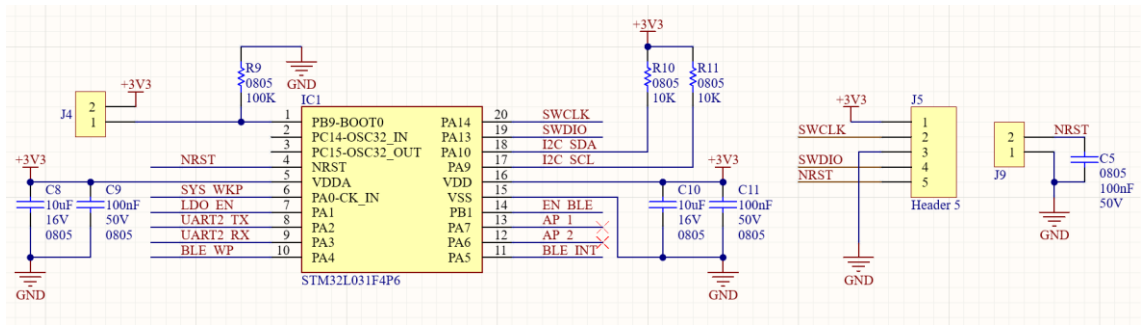
3.2. Mikro Kontrolör Pin Konfigürasyonlarının Oluşturulması

Mikro kontrolör pin konfigürasyonu oluşturulurken haberleşme için ve güç modları için gerekli yapılar önceliklidir. Şekil 3.7'den de anlaşılacağı üzere öncelikle CDC entegresi ile haberleşmek için kullanılacak I2C pinleri seçilmiştir. Daha sonra CDC kapasitif eşik aşma çıkışı, mikro kontrolör Standby modunda iken uyandırabilmesi açısından özel uyanma pinlerinden olan WakeUp pinine bağlanmıştır. Kablosuz BLE modülünün güç kontrol pinleri ve kablosuz BLE modülünün enerjisinin devre dışı bırakabilmek için tasarımda yer alan lineer regülatörün kontrol pini çıkış pinleri olarak yapılandırılarak PCB tasarım kolaylığına göre bağlanır. Ayrıca mikro kontrolöre yazılım yüklenebilmesi ve hata ayıklayıcı (Debug) çalıştırılabilmesi için Serial Wire Data (SWD) pinleri ilgili yerlere bağlanır.



Şekil 3.7. STM32CubeIde ile oluşturulmuş pin yapısı

Mikro kontrolör için pin yapısı belirlendikten sonra Altium Designer devre çizim programı kullanılarak şematik tasarımını oluşturulmuştur. Şematikte kullanılan mikro kontrolör kütüphanesi veri sayfasında belirtilen yapıda oluşturulmuştur. Şematik tasarımda mikro kontrolör programlama konektörü, besleme girişlerine daha kararlı çalışabilmesi için kapasitörler ve yazılım oluşturma adımlarından olan Şekil 3.7’deki pin yapısına uygun olarak pinler eklenmiştir. Şekil 3.8’de mikro kontrolör şematik tasarımı görülebilmektedir.



Şekil 3.8. Altium Designer devre çizim programı ile mikro kontrolör için tasarlanan şematik

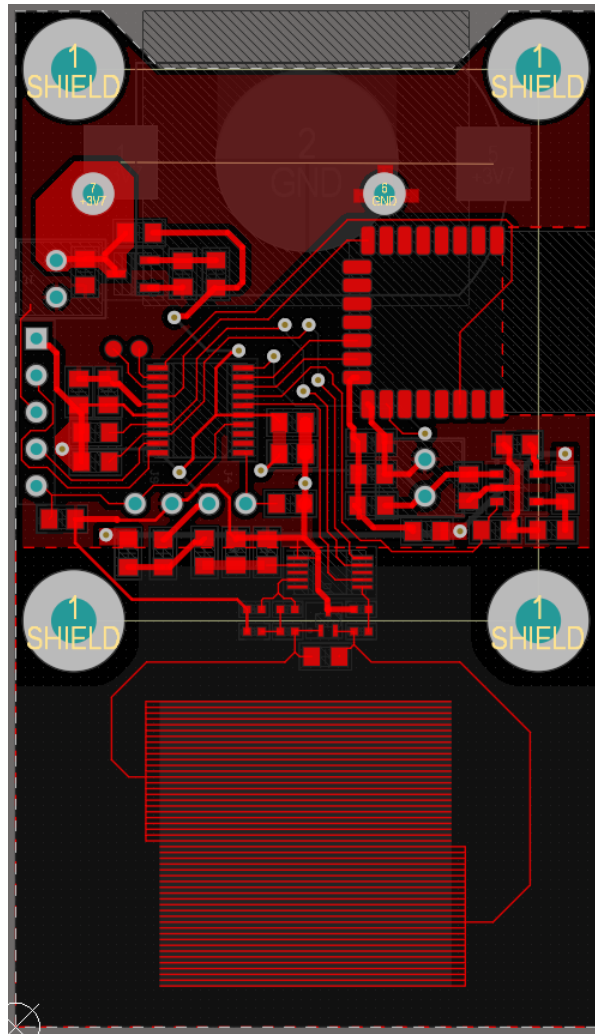
3.3. Güç Biriminin Oluşturulması

Güç birimi iki farklı devreden oluşmaktadır. Bu devrelerden MCP1703 lineer regülatörünü içeren yapı, 3,3 V pil seviyesinden daha yüksek -öncelikle şarj edilebilir piller için nominal 3,7 V- voltaj kapasitesine sahip pillerin kart üzerindeki

kontrolör voltajına hem de güç biriminde yer alan yazılım ile açılıp kapatılabilen lineer regülatör voltajına bağlanabilir bağlanabildiği görülebilmektedir. Ama güç tüketimini daha da azaltmak olduğundan böyle bir seçilebilir durum tercih edilmiştir. CDC entegresinin düşük güç modunda iken tüketiminin az olmasında ötürü mikro kontrolör ile aynı besleme hattı yolu seçilmiştir.

3.5. PCB Tasarımının Oluşturulması

Şematik tasarım tamamlandıktan sonra PCB tasarımına yapılmıştır. PCB tasarımı için Altium Designer devre çizim programı kullanılmıştır. Şekil 3.11’de PCB tasarımının Top Layer olarak adlandırılan üst yüzeyi gösterilmiştir.

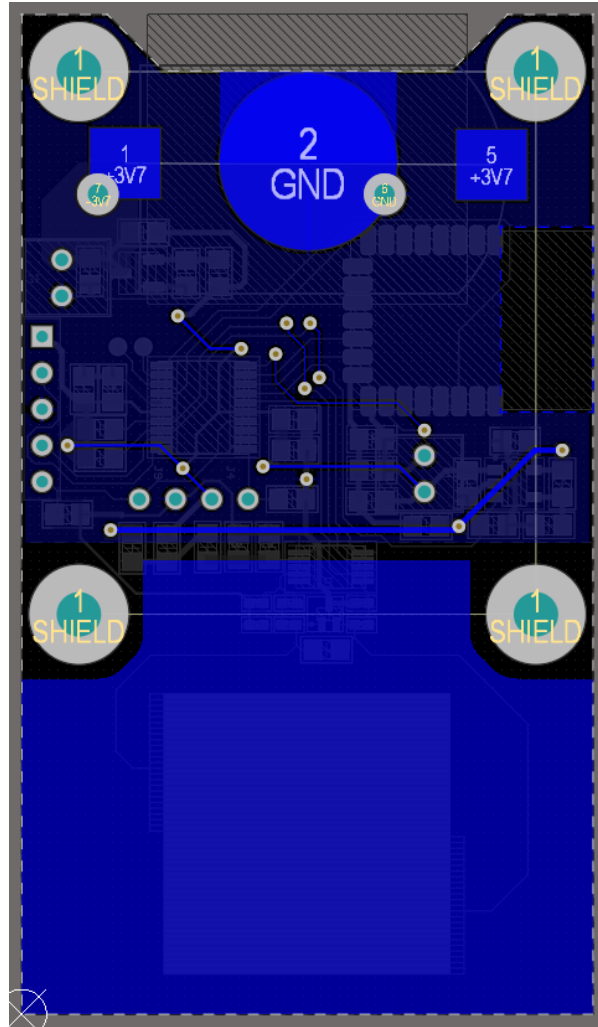


Şekil 3.11. Top Layer tasarımı

Şekil 3.11’de de görülebileceği gibi kapasitif sensör tasarımı Şekil 3.3’te görülebilen eş potansiyel alan çizgileri referans alınarak yapılmıştır.

Ayrıca Şekil 3.11’de kapasitif sensör tasarımı da görülebilmektedir. Bu kapasitif tasarımda birbirine bağlı olan 25’er şeritten oluşan 2 büyük elektrot olacak şekilde alt elektrot yüzey seviyede bırakılarak tasarlanmıştır. Her elektrot parmağının uzunluğu 21,0 mm, genişliği 200 μm ve kalınlığı sırasıyla 35 μm olacak şekilde PCB tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda bitişik elektrot şeritleri arasındaki boşluk 200 μm olarak ayarlanmıştır. Bu tasarımda 25’er 2 büyük elektrot yüzeylerinin birbirlerine hizalı elektrot alanı 19,8 mm’ye 20,2 mm’dir. Bu alan lehim maskesi olarak adlandırılan Solder Mask’tan arındırılmıştır. Kapasitif sensör yüzeyi çevre şartlarına karşı daha dayanıklı olabilmesi için Solder Mask ile kaplanabilir.

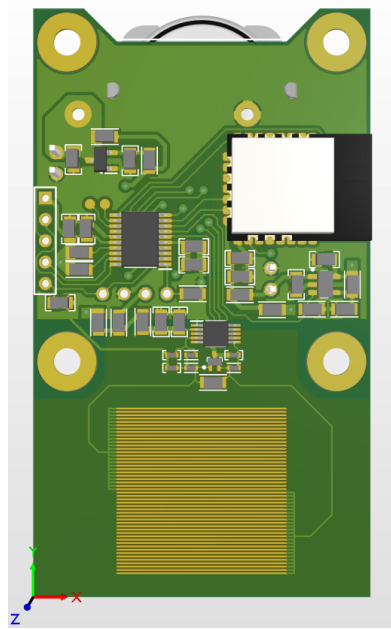
Şekil 3.12’de PCB tasarımının Bottom Layer olarak adlandırılan alt yüzeyi gösterilmiştir. Tasarımdan anlaşılabileceği üzere 2 Layer 1,6 mm FR4 dolgu malzemeler PCB ile tasarım yapılmıştır.



Şekil 3.12. Bottom Layer tasarımı

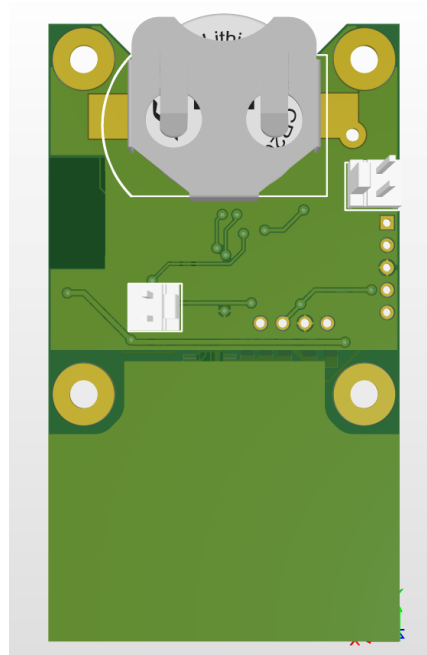
Şekil 3.12’de de görülebileceği gibi kapasitif sensör arka yüzeyi (Bottom) yüzer yapıda bir bakır yüzey olarak tasarlanmıştır. Bu tasarım Şekil 3.3’te görülebilen eş potansiyel alan çizgileri referans alınarak yapılmıştır.

Şekil 3.13’te tasarımın Top Layer yüzeyinin 3D görseli gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Top Layer 3D tasarımı

Şekil 3.14’te tasarımın Bottom Layer yüzeyinin 3D görseli gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Bottom Layer 3D tasarımı

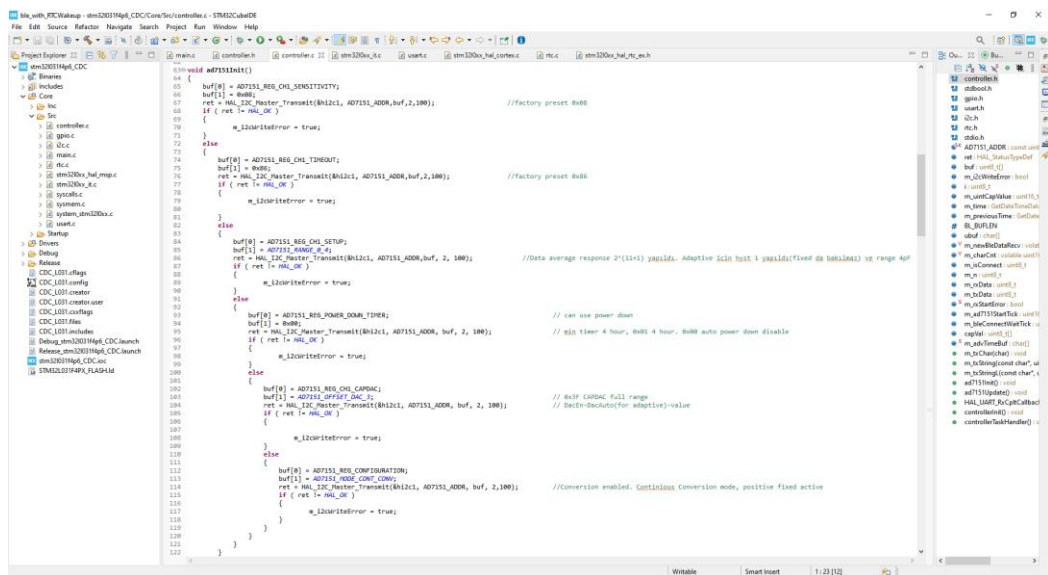
3.6. Yazılımın Oluşturulup Çevre Birimler ile Düşük Güç Optimizasyonunun Yapılması

Sensör sisteminin donanımsal tasarımı tamamlandıktan sonra yazılımsal olarak çevre birimlerin aktif edilmesi, sensör kütüphanelerinin oluşturulması, düzenlenmesi ve düşük güç sistemi ile ilişkilendirilen algoritma üzerinde çalışılmıştır. Öncelikle mikro kontrolör seçimine ve bu nedenle de donanımsal tasarıma doğrudan etki edebilecek tasarım tayları üzerinde durulmuştur. Şekil 3.15'te RTC kütüphanesinde belirtilen RTC saat kaynağının, mikro kontrolör Standby modunda dahili kristal osilatörün çalışabiliyor olması harici dışardan kristal koyma durumunu ortadan kaldırdığı için hem sistem birim maliyetine hem de PCB tasarımına olumlu etki etmiştir. Mikro kontrolör belirlenirken tüketim değerlerine, çevre birim yeterliliklerine ve bu durum gibi minimum sistem gereksinimleri bakılmıştır.

[..] The RTC provides a programmable time base for waking up from the Stop or Standby mode at regular intervals. Wakeup from STOP and STANDBY modes is possible only when the RTC clock source is LSE or LSI.

Şekil 3.15. Standby modunda RTC saat kaynağı seçimi

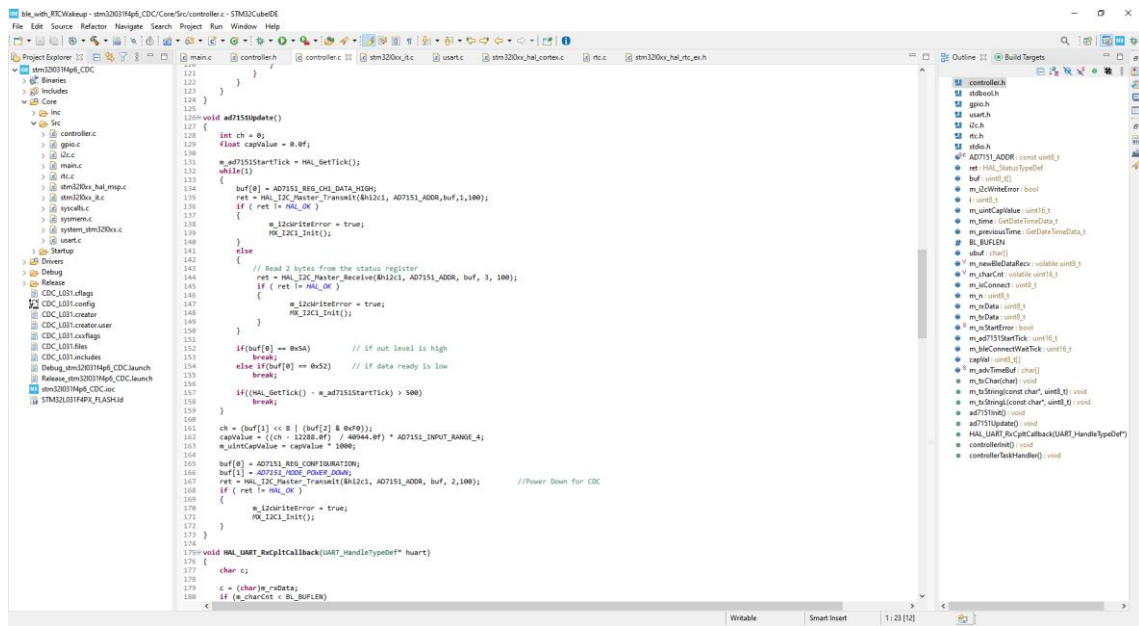
CDC entegresi mikro kontrolör ile I2C protokolü aracılığıyla iletişim kurduğundan, istenilen çalışma modları ve ayarları entegre veri sayfasına uygun olarak gönderilip alınmıştır. Bu entegre için kurulum ve güncelleme fonksiyonu oluşturulmuştur. Şekil 3.16'da CDC entegre kurulum fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.16. AD7151 CDC entegresi kurulum ayarları

Şekil 3.16'da kurulum ayarları arasında kapasitif Offset ayarı da mevcuttur. Bu ayar CAPDAC Register komutu üzerinden güncellenir. Bu CAPDAC değeri kapalı olduğu ve maksimum değer aralığında değiştirilerek belirli kapasitif değerlerde ölçüm yapılabilmesi doğrulanmıştır. Daha sonra tasarlanan kapasitif sensör için madde cinsine göre değişken değerler verebilecek aralık için CAPDAC değeri ayarlanmıştır.

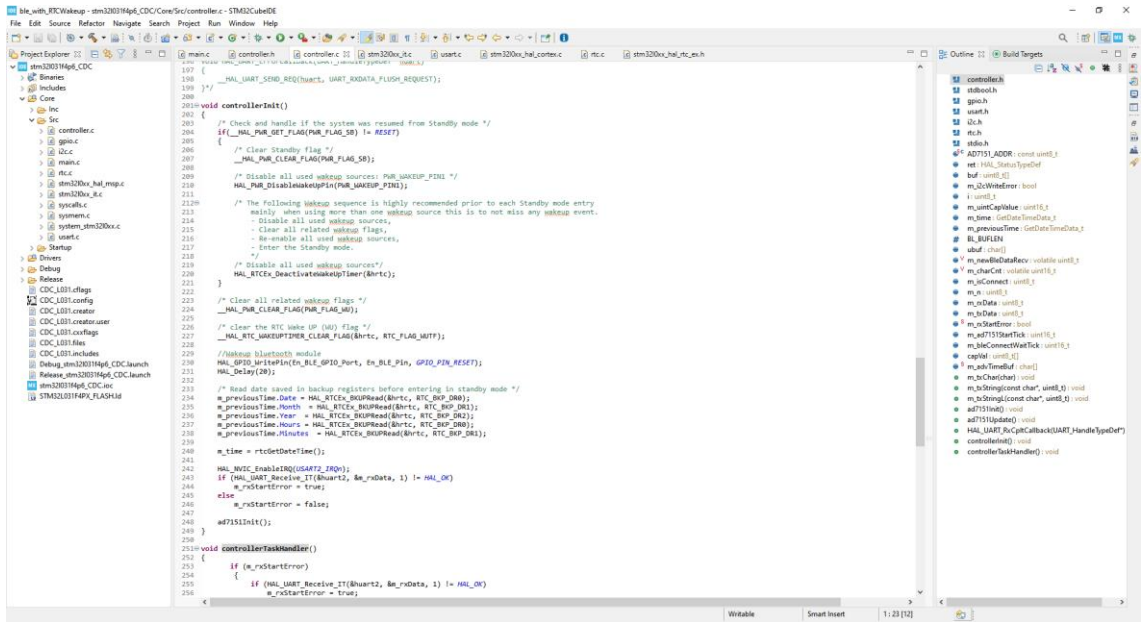
Mikro kontrolör CDC entegresinin yeni ölçüm değeri hazır olan bir döngüde bekler. Bu döngü süresi sonucunda veya yeni değer durumunda döngü kırılarak güç kapatma modu komutu gönderilir. Şekil 3.17'de yeni ölçüm değeri durumu ve güç kapatma komutu gösterilmiştir.



Şekil 3.17. AD7151 CDC entegresi kapasitif ölçüm ve düşük güç modu geçişi

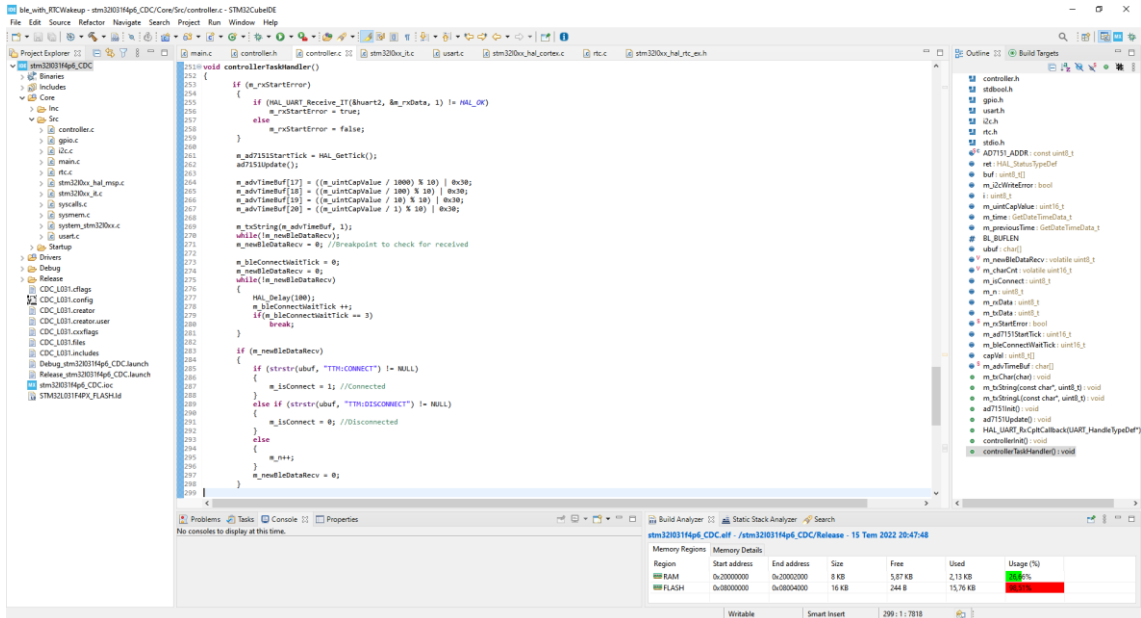
Mikro kontrolör Standby modundan uyandığında gerekli saat ayarları ve çevre birim ayarları yeniden yapılandırıldıktan sonra Şekil 3.18'de gösterilmiş olan controllerInit() fonksiyonu çağırılır.

Öncelikle yazılım bu bölümünde sistem Standby modundan yeniden başlayıp devam ediyor ise bayrak (Flag) temizleme işlemi yapılmıştır. Veri sayfalarında bu tip uyanma modları gibi durumlarda bayrak temizliği ve devre dışı yapma işlemleri önerilmektedir. Bu nedenle WakeUpTimer devre dışı bırakılmıştır ve bayrağı temizlenmiştir. Daha sonra BLE aktif pini düşüğe (Low) çekilerek uyandırılmıştır. RTC verileri bilgi amaçlı kayıt Register'larından okunup yeni RTC verileri güncellenmiştir. UART protokolü üzerinden veri alma aktif kesmesi aktif edilip AD7151 entegresi kurulum ayar fonksiyonu çağırılmıştır.



Şekil 3.18. ControllerInit fonksiyonu

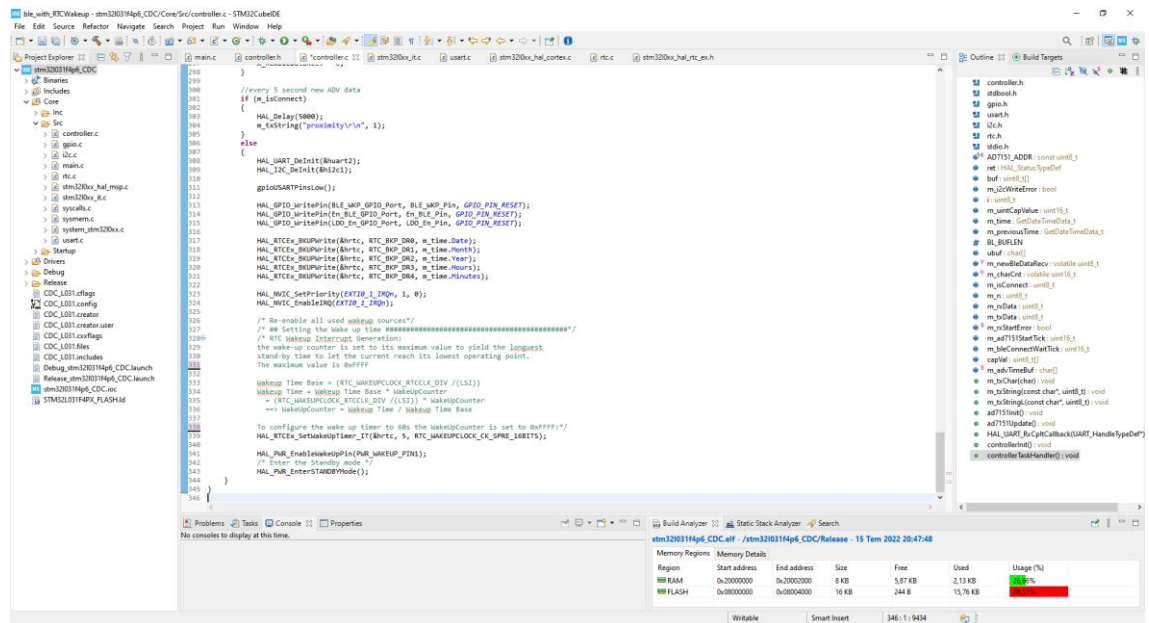
Şekil 3.19’da controllerTaskHandler() fonksiyonu gösterilmiştir. Bu fonksiyon kurulum fonksiyonu tamamlandıktan sonra çağırılmıştır. Fonksiyon incelendiğinde, ilk olarak başarılı kurulum yapılamayan UART kesmesi var ise yeniden kurulmuştur. AD7151 veri güncelleme fonksiyonu çağırılmıştır. BLE yayın verisi olarak güncellenen mesaj doldurulup döngü içerisinde gönderilmiştir.



Şekil 3.19. controllerTaskHandler() fonksiyonu

Daha sonra BLE modülünün 2 adet 200 ms aralıklarla yayın yapması için bekleme rutini yazılmıştır. Şekil 3.19'un sağ alt alanında tamamlanan kodun mikro kontrolör hafızasında kapladığı toplam yüzdeliği gösterilmiştir. Buradan anlaşılabileceği gibi bu uygulama için seçilebilecek en düşük hafızalı mikro kontrolörün seçildiği gösterilmiştir. Hafıza boyutunun birim fiyatlar üzerindeki etkisi düşünüldüğünde doğru bir seçim olduğu görülebilmektedir.

Şekil 3.20'de BLE üzerinden bağlantı mesajı alınmadığında ilk olarak çevre birimler devre dışı bırakılmıştır. Daha sonra bu çevre birimlerden olan UART pinleri LDO üzerinden besleme voltajı alamayacak olan BLE modülün pinlerine bağlı olduğundan çıkış pini olarak düzenlenip düşük seviyeye çekilmiştir. BLE kontrol pinleri ve LDO kontrol pini düşük seviyeye çekilerek kapatılmıştır. Güncel RTC verileri kaydedilip yeni WakeUp pini ve WakeUpTimer ayarları yapıp devreye alınmıştır. Bu kod için 5 saniye ayarlanmıştır. Daha sonra Standby moduna gidilmesini sağlayan kod çağırılmıştır. Bu sayede yeniden uyanıldığına kadar mikro kontrolör ve kontrol ettiği sistem düşük güç modunda bekleyecektir.



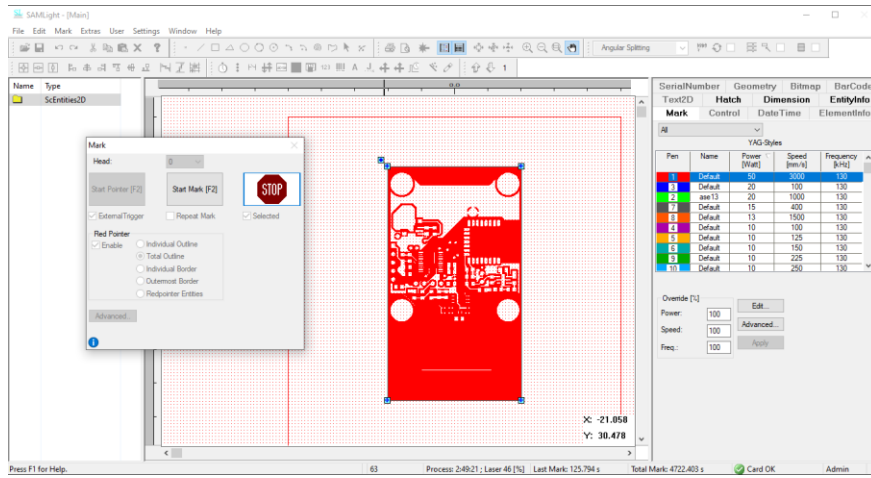
Şekil 3.20. controllerTaskHandler fonksiyonu ve Standby geçişi

4. ÜRETİM VE TESTLER

Devrenin şematik ve PCB tasarımı tamamlandıktan sonra FiberLAST marka lazer markalama ve kesim cihazı ile PCB kazıma işlemleri uygulanmıştır.

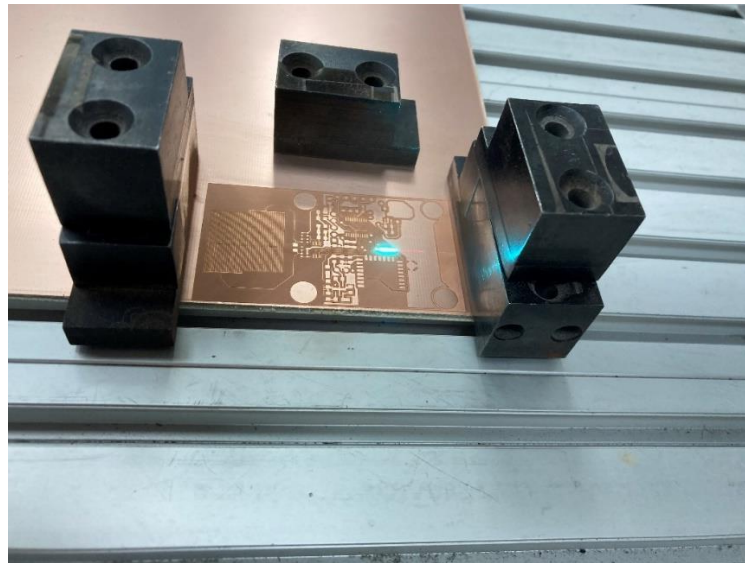
4.1. PCB Kartların Üretimi ve Dizgisi

Şekil 4.1’de lazer ile kazıma için kullanılan arayüze yüklenmiş .dxf formatında PCB Gerber çıktısı gösterilmiştir.



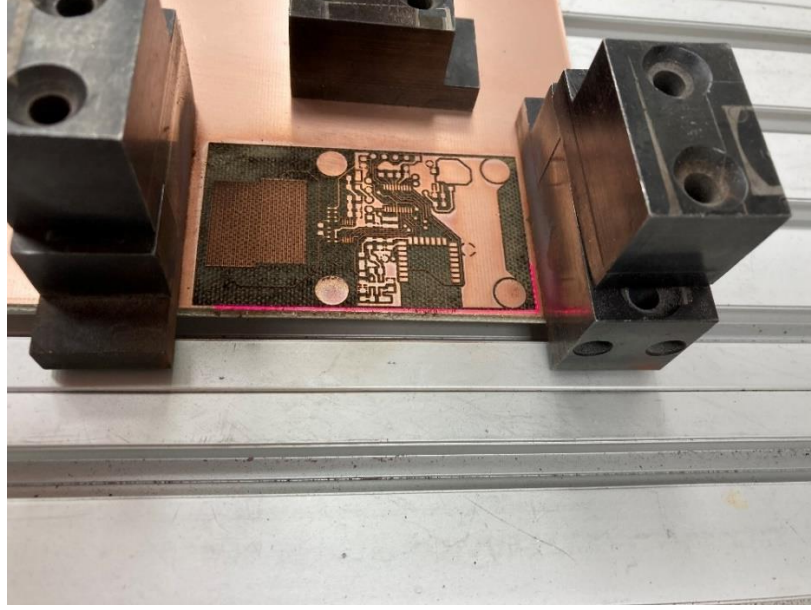
Şekil 4.1. Lazer ile kazıma arayüzüne yüklenmiş DXF formatında PCB Gerber çıktısı

Şekil 4.2’de lazer ile kazıma aşaması gösterilmiştir. Kazıma işlemi belirli parametrelerde ve tur sayılarında yapılmıştır.



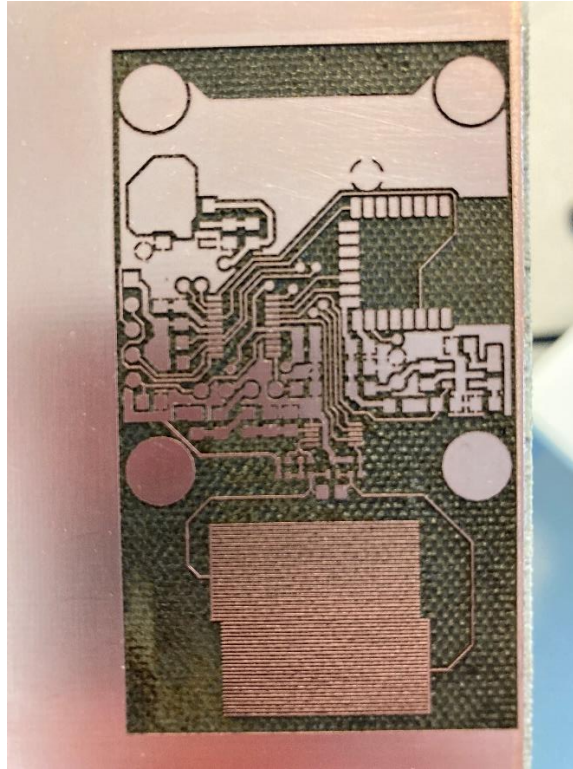
Şekil 4.2. Lazer ile kazıma aşaması

Şekil 4.3'te lazer ile kazıma aşamasının tamamlanmaya yakın kısmı gösterilmiştir.



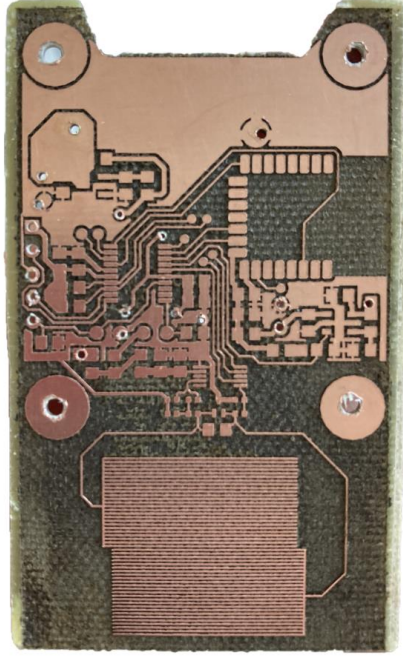
Şekil 4.3. Lazer ile kazıma işlemi

Şekil 4.4'te lazer ile kazıma aşamasının tamamlandığı ve izopropil alkol ile temizleme işleminin sonrası gösterilmiştir. Bu işlemden sonra tek parça halindeki PCB plakasından ayrılma işlemi yapılmıştır.



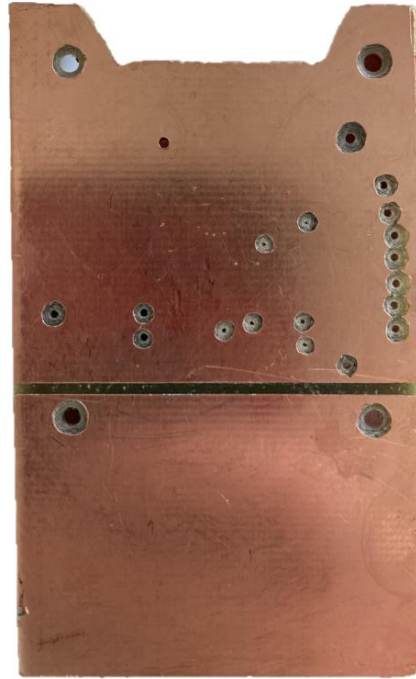
Şekil 4.4. Kazınma işlemi tamamlanan ve henüz plaka dan ayrılmamış PCB

Şekil 4.5'te plakadan ayrılma ve delik delme işlemi tamamlanan PCB tasarımı gösterilmiştir.



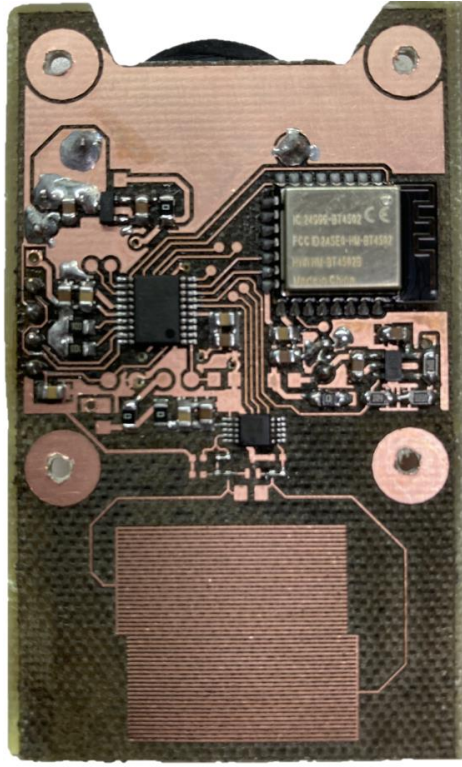
Şekil 4.5. Top Layer kazıma ve delik delme işlemlerinin tamamlanmış hali

Şekil 4.6'da Bottom Layer delik çıkışları ve ayrılması gereken yüzeyler için düzeltmeler yapılmıştır. Bu yüzey için lazer kazıma kullanılmamıştır.



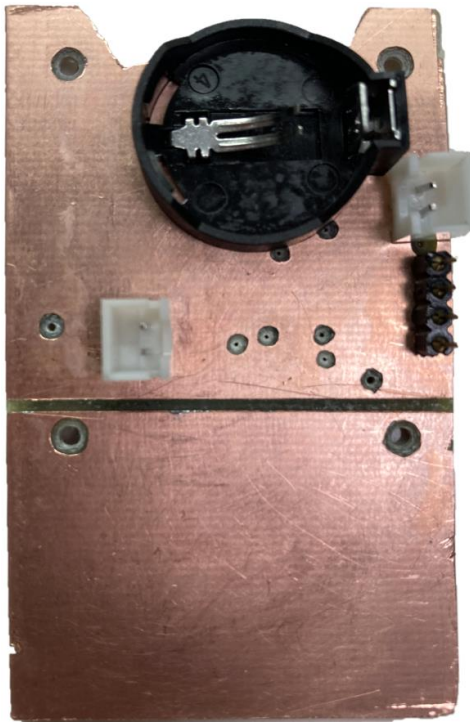
Şekil 4.6. Bottom Layer kazıma işleminin tamamlanmış hali

Şekil 4.7’de Top Layer dizgi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Top Layer dizgi işleminin tamamlanmış hali

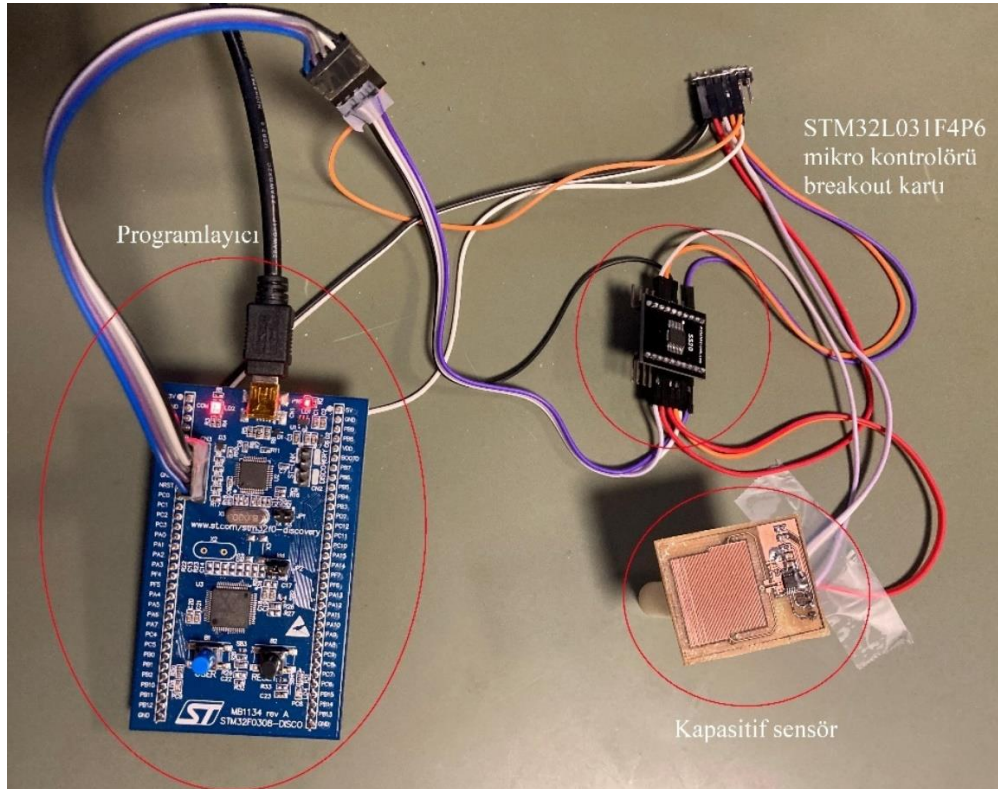
Şekil 4.8’de Bottom Layer dizgi gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Bottom Layer komponentlerin yerleştirilmiş hali

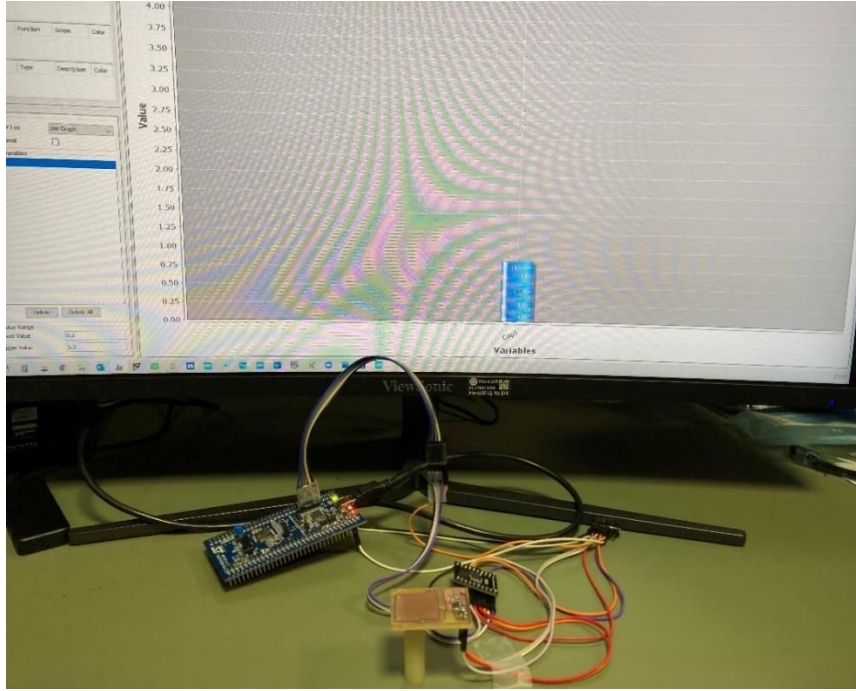
4.2. Farklı Maddelerle Kapasitif Ölçüm Testleri

Kapasitif sensör ve CDC entegre devresinin tek bir PCB üzerinde oluşturulduğu sensör modellerinden Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da bahsedilmişti. Bu sensör modelleri, mikro kontrolör için oluşturulan kopartma (Breakout) kartı adlandırılan yapıya haberleşme ve güç kabloları ile bağlanarak kapasitif değer ölçümleri yapılmıştır. CDC entegre devresinin aktif kapasitif Offset ekleme özelliği (CAPDAC), mikro kontrolör üzerinden gönderilen komutlar ile düzenlenerek 0 pF ve 13 pF arası sabit kapasitörler ile denenmiştir. Bu deneme ile tasarımsal farklılıklar olabilecek kapasitif sensörlerin, maksimum 4 pF’lık etkin ölçüm aralığı olan CDC entegresi üzerinden doğru bir şekilde okunabilirliği kanıtlanmıştır. Farklı kapasitif sensör tasarımlarında farklı CAPDAC değerleri komut arayüzü üzerinden gönderilerek o sensör için izlenebilir ve algılamaya göre değişebilir kapasitif ölçüm aralığı ayarlanmıştır. Şekil 4.9’da ölçümlerin gerçekleştirildiği sensör, mikro kontrolör ve programlayıcı deneme kurulumu gösterilmiştir.



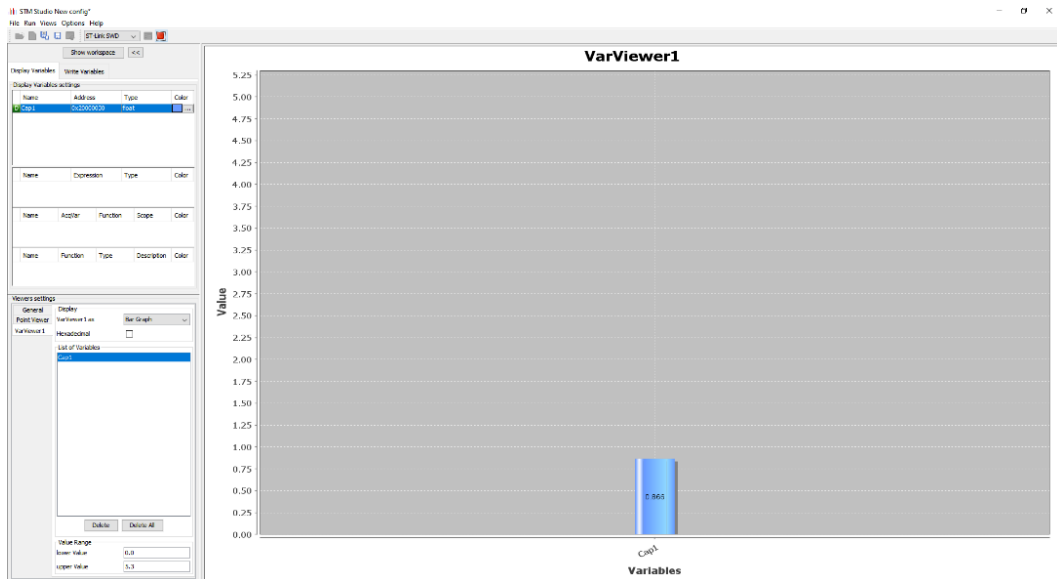
Şekil 4.9. Kapasitif sensör ve CDC entegre devresi birlikte sensör tasarımı, mikro kontrolör ve programlayıcı kartı ile oluşturulan deneme yapısı

Kapasitif değeri değişimlerini yüksekliği artan azalan bar değeri olarak görmemizi sağlayan STMStudio programı ile ölçümler canlı olarak izlenebilir hale getirilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de bu izleme ekranında görülebilen ve sensör değerinin boşta iken aldığı kapasitif ölçüm değeri gösterilmiştir. Ekrandan görülen değeri yaklaşık 0,9’dır.



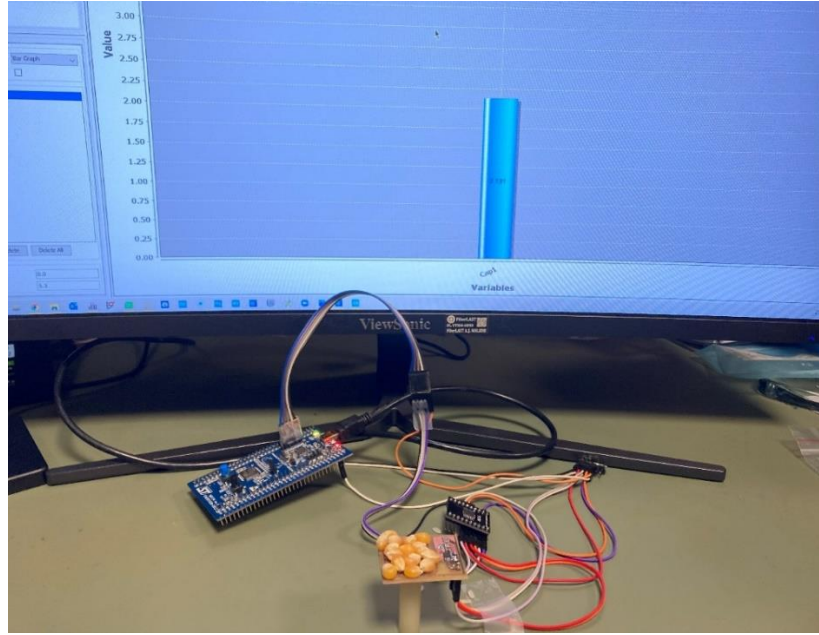
Şekil 4.10. Sensör boşta iken ki durum için ölçülen kapasitif değeri ölçüm kurulumu

Şekil 4.11’de STMStudio programı kullanılarak bar haline getirilmiş ölçüm grafiği görülebilmektedir.



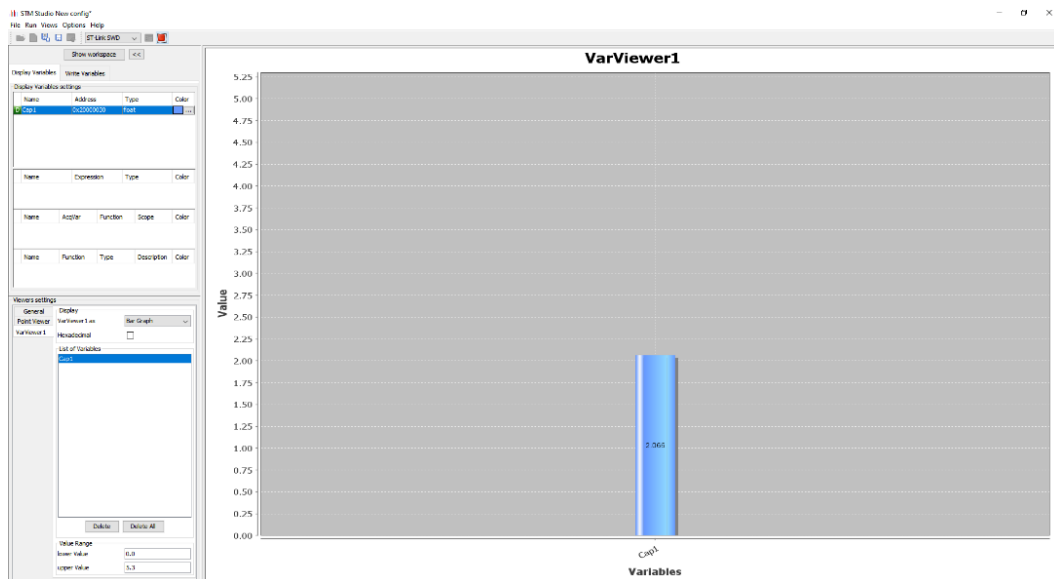
Şekil 4.11. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 0,9 değerinde kapasitif ölçüm

Farklı maddelerin sensör üzerindeki kapasitif değişime etkisinin görülebilmesi için ölçümler yapılmıştır. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilen ölçümler ve değer grafiğinde mısır tanelerinin kapasitif sensör değerindeki değişime etkisi incelenmiştir. İzleme ekranında görülebilen ve sensör değerinin mısır taneleri var iken alındığı kapasitif ölçüm değeri gösterilmiştir. Ekrandan görülen değer yaklaşık 2,1'dir.



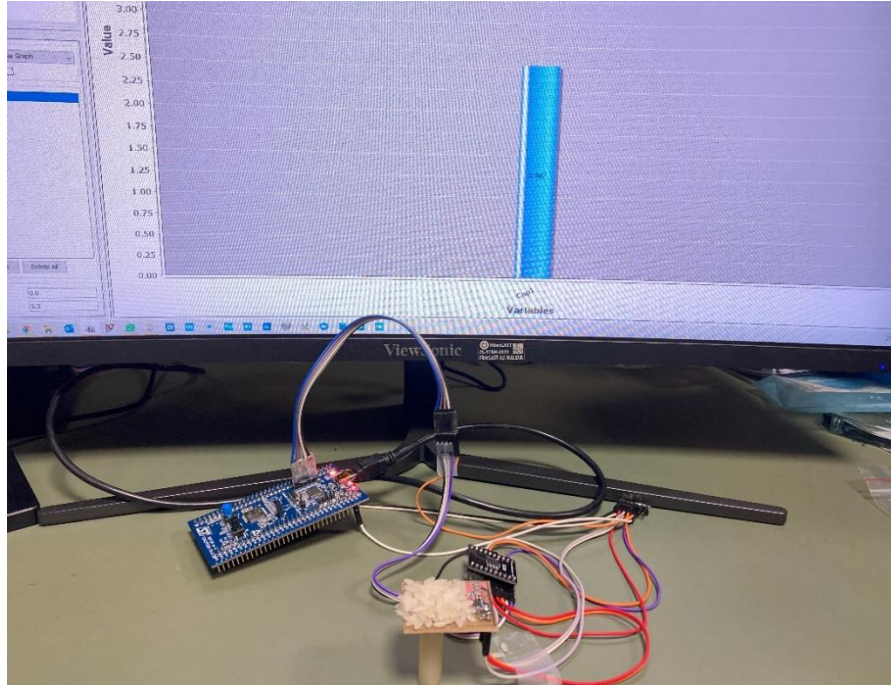
Şekil 4.12. Sensörün mısır ile yapılmış kapasitif ölçüm kurulumu

Şekil 4.13'te STMStudio programı kullanılarak bar haline getirilmiş ölçüm grafiği görülebilmektedir.



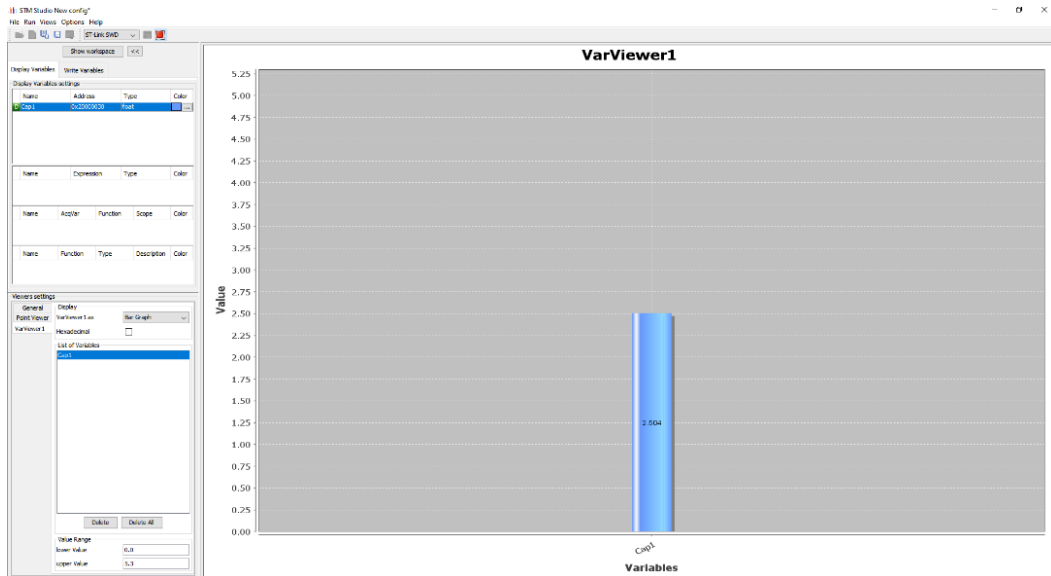
Şekil 4.13. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 2,1 değerinde kapasitif ölçüm

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te gösterilen ölçümler ve değer grafiğinde pirinç tanelerinin kapasitif sensör değerindeki değişime etkisi incelenmiştir. İzleme ekranında görülebilen ve sensör değerinin pirinç taneleri var iken alındığı kapasitif ölçüm değeri gösterilmiştir. Ekrandan görülen değer yaklaşık 2,5'tir.



Şekil 4.14. Sensörün mısır ile yapılmış kapasitif ölçüm kurulumu

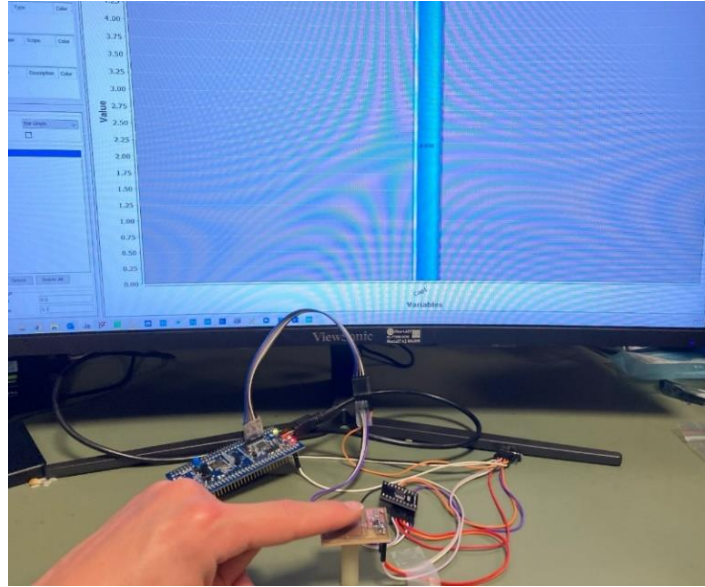
Şekil 4.15'te STMicroelectronics Studio programı kullanılarak bar haline getirilmiş ölçüm grafiği görülebilmektedir.



Şekil 4.15. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 2,5 değerinde kapasitif ölçüm

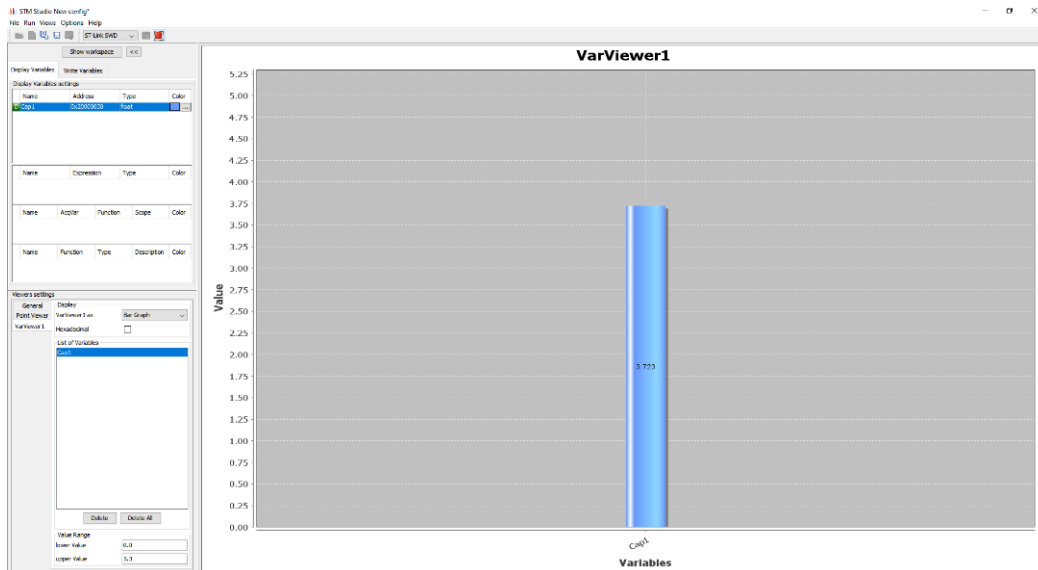
Ayrıca parmağın sensör ölçüm değeri üzerindeki etkisinin görülmesi için yapılan testlerde sensöre yakınlığa göre farklı değişken değerlerin ölçülebildiği görülmüştür. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de alınan ölçümler gösterilmiştir.

Şekil 4.16’da parmağın sensöre temas etmediği ancak çok yakın konumda olduğu durum için ölçüm değeri gösterilmiştir. Ölçüm değeri bu durum için yaklaşık 4,4’tür.



Şekil 4.16. Sensörün parmak ile yapılmış kapasitif ölçüm kurulumu

Şekil 4.17’de STMStudio programı kullanılarak bar haline getirilmiş ölçüm grafiği görülebilmektedir. Bu ölçüm alınırken parmağın kapasiteden uzaklığı değiştirildiği için ölçülen değer yaklaşık 3,7 olarak görülebilmektedir.

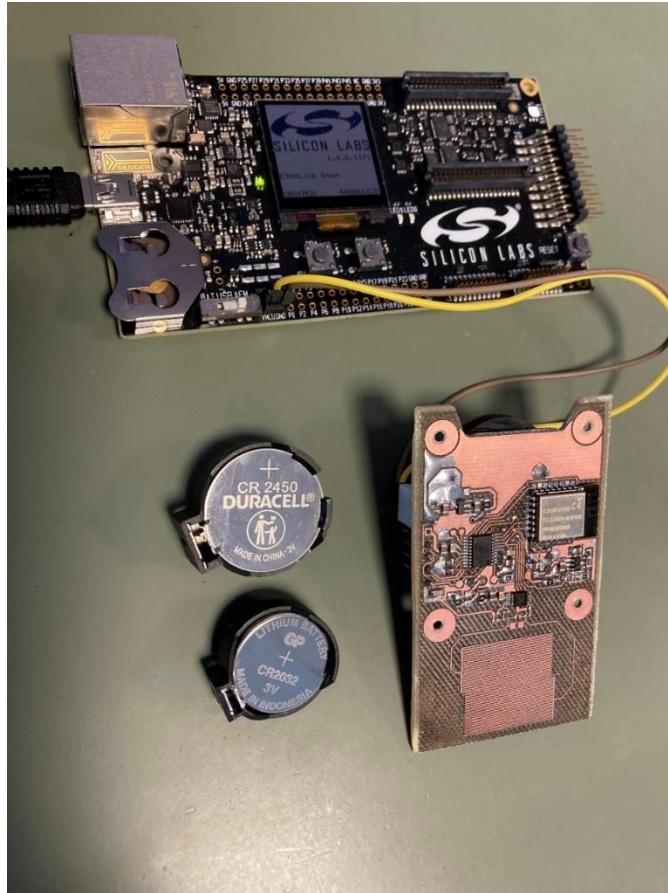


Şekil 4.17. Okunan ve bar olarak yansıtılan yaklaşık 3,7 değerinde kapasitif ölçüm

Ölçüm denemeleri sonucunda farklı maddelerin kapasitif sensörler üzerindeki etkisinin farklı oluşu birbirinden ayrılabilir ölçüm yapabileceğimizi bize bu deneme ölçüm çalışmasında göstermiştir. Bu teknik kullanılarak hem madenin o konumdaki varlığı hem de cinsinin tespit edilebileceği görülmüştür.

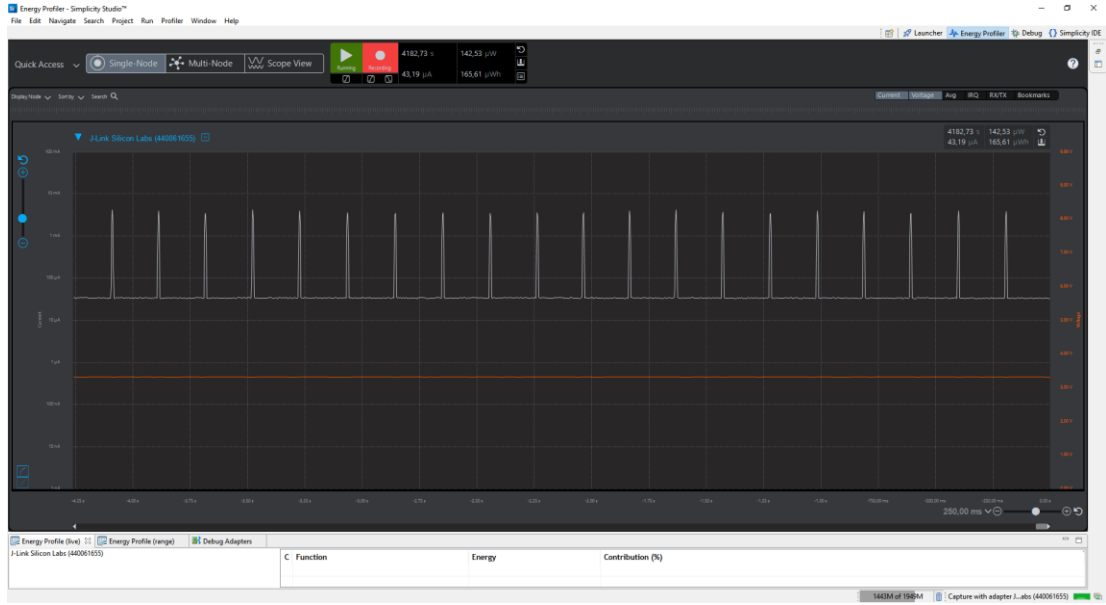
4.3. Düşük Güç Simülasyon Arayüzü Üzerinden Enerji Tüketim Grafiğinin Çıkartılması

Kapasitif sensör sistemi veri sayfalarına uygun olarak tasarlandıktan sonra yazılımın belirtilen durumlar doğrultusunda oluşturulup düşük güç tüketimli sistem haline getirilmesi için hassas ölçüm işlemlerini gerçekleştirebilen IoT uygulama geliştiricileri tasarlanmış geliştirme kitlerinden olan Silicon Labs marka Wireless Starter Kit'i kullanılmıştır. Yine bu firmanın Simplicity Studio derleyicisinde bulunan ve enerji profil izleme ekranı olarak kullanılabilen sayfası üzerinden düşük güç ölçümleri hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.18'de Wireless Starter Kit, kapasitif sensör sistemi ve sistemin uyumlu olduğu pillerden olan CR2032 ve CR2450 modelleri gösterilmiştir.



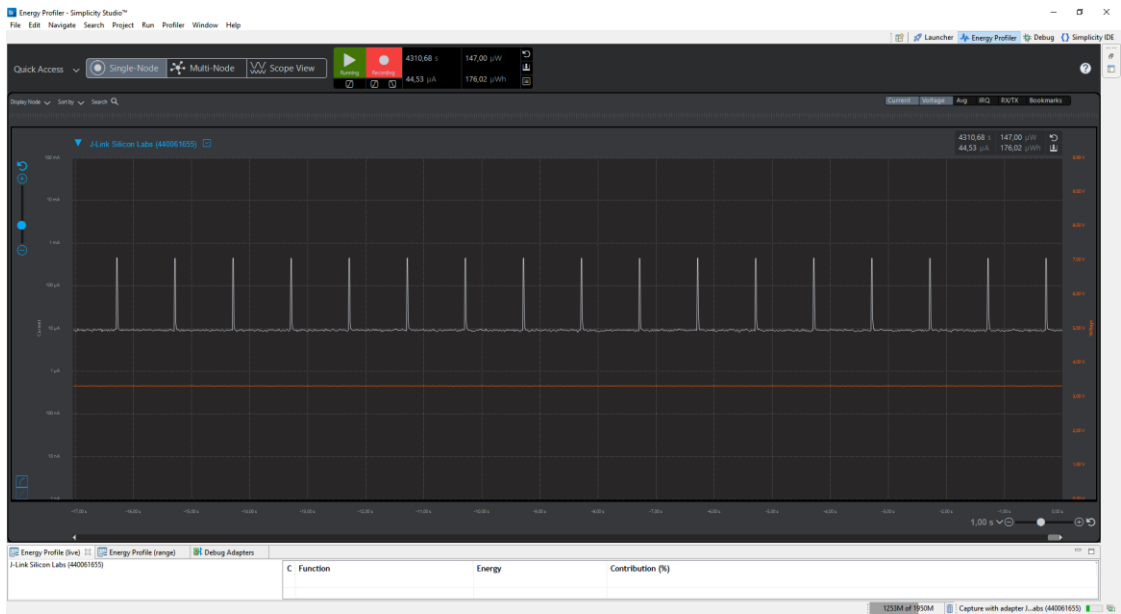
Şekil 4.18. Sensör sistemi test kurulumu

Şekil 4.19’da sensör sisteminde kullanılan BLE modülünün tek çalışırken ki enerji tüketim grafiği çıkarılmıştır. Sabit yayın mesajının modül aktif edildikten sonra 200 ms aralıklarla gönderildiği durumda en düşük tüketim seviyesinin yaklaşık 50 μA olduğu ölçülmüştür.



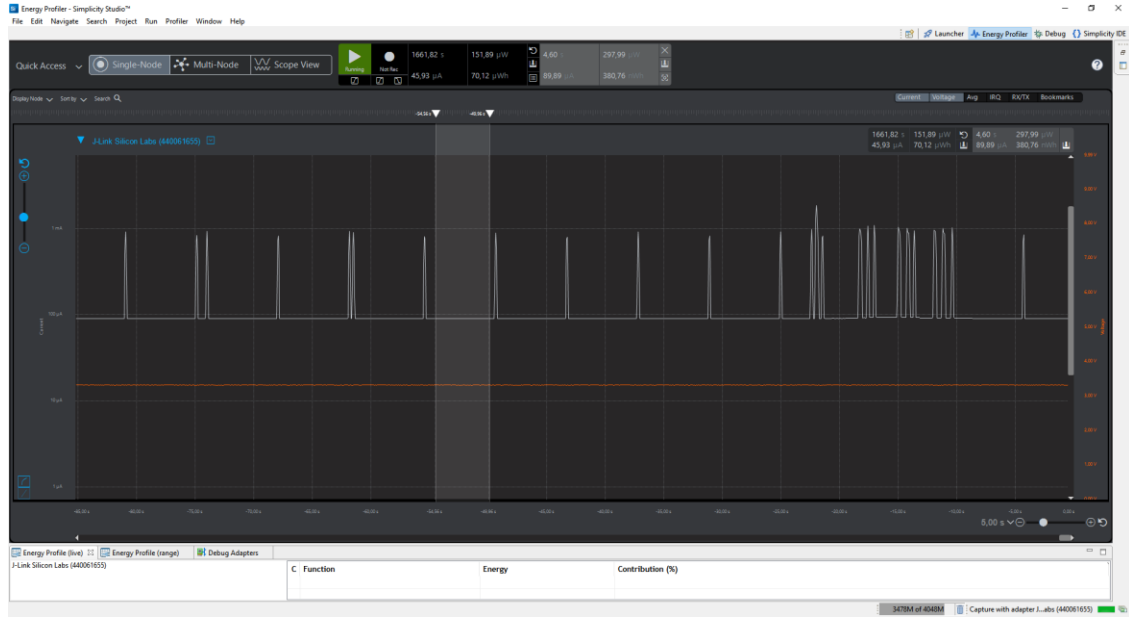
Şekil 4.19. BLE 200 ms ile sabit yayın mesajı yaparken

Şekil 4.20’de BLE güç kapatma modunda en düşük tüketim seviyesinin yaklaşık 10 μA olduğu ölçülmüştür. Bu akım seviyesinin kapasitif sensör sisteminin toplamına etkisinin olmaması için sistemde BLE besleme voltajı tamamen devre dışı bırakılmıştır.



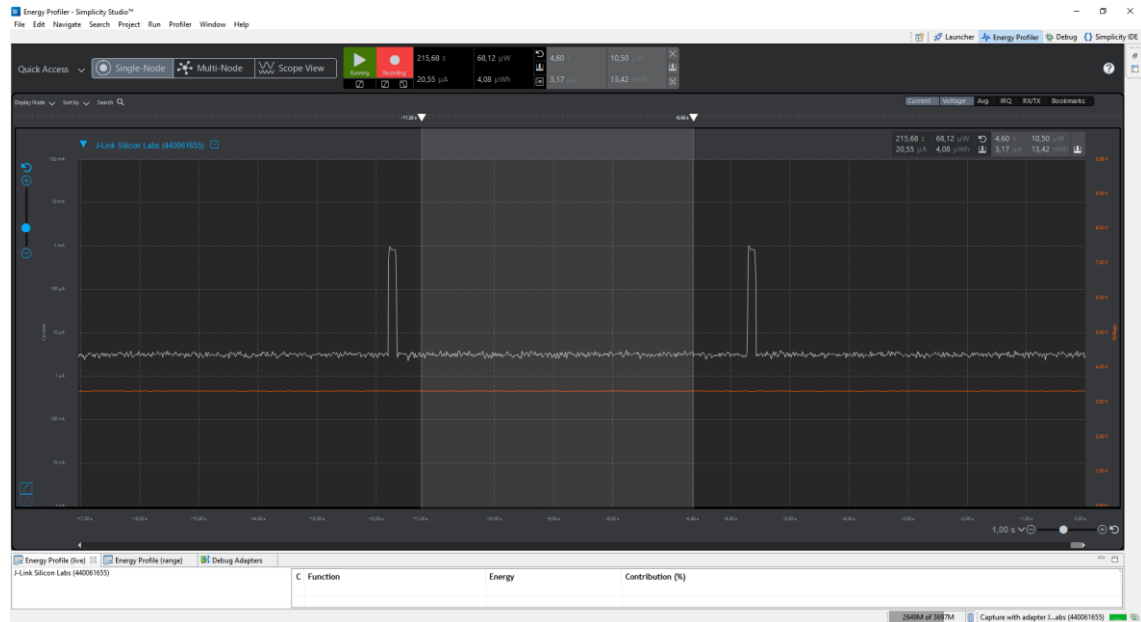
Şekil 4.20. BLE Enable ve WakeUp pinleri yüksek seviyede iken (Power Down şartı)

Şekil 4.21’de CDC entegresinin ve mikro kontrolörün sürekli ölçüm modunda WakeUpTimer kurulu iken en düşük tüketim seviyesinin yaklaşık 90 μA olduğu ölçülmüştür. Şekil 4.21’deki WakeUpTimer süreleri arasındaki anlık uyanma adımları, kapasitif eşik karşılaştırıcı aracılığı ile oluşturulmuş WakeUpPin kesmesi uyandırmasıdır.



Şekil 4.21. CDC aktif modda, eşik karşılaştırıcı ve RTC WakeUpTimer kurulu iken

Şekil 4.22’de CDC Power Pown ve mikro kontrolör de Standby modunda iken en düşük tüketim seviyesinin yaklaşık 3 μA olduğu ölçülmüştür.



Şekil 4.22. CDC mikro kontrolör tarafından PowerDown yapıp RTC WakeUpTimer kurulu iken Standby durumuna geçildiğinde

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te kapasitif sensör sisteminin CDC, BLE, mikro kontrolör ve diğer güç kontrol birimleri ile çalıştırılarak alınmıştır ölçümleri gösterilmiştir. Şekil 4.23'te yaklaşık 6 saniye uyanma periyodunda kurulumu yapılan ve her uyanma adımıyla kapasite verisinin okunup BLE yayın mesajının güncellenip 2 adet 200 ms aralıklarla yayın yapıp tekrar uyku moduna dönüldüğü ölçümler gösterilmiştir. Uyanma periyodunun ortalama güç tüketimine doğrudan etkisi olduğu için bu uyanma periyodunda yaklaşık 11 dakika kadar ölçüm alınarak ortalama güç tüketimi gibi değerler çıkarılmıştır. Ölçüm grafiğinin sağ üst köşesinden de görülebileceği gibi yaklaşık 900 μW güç tüketim değeri ölçülmüştür. Ayrıca ortalama akım tüketimi yaklaşık 272 μA iken enerji tüketimi de yaklaşık 170 μWh olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.23. Yaklaşık 6 saniyelik uyanma zamanı ile BLE üzerinden güncel kapasite değerinin gönderilmesi ve 11 dakikalık süre ile güç tüketiminin ölçülmesi

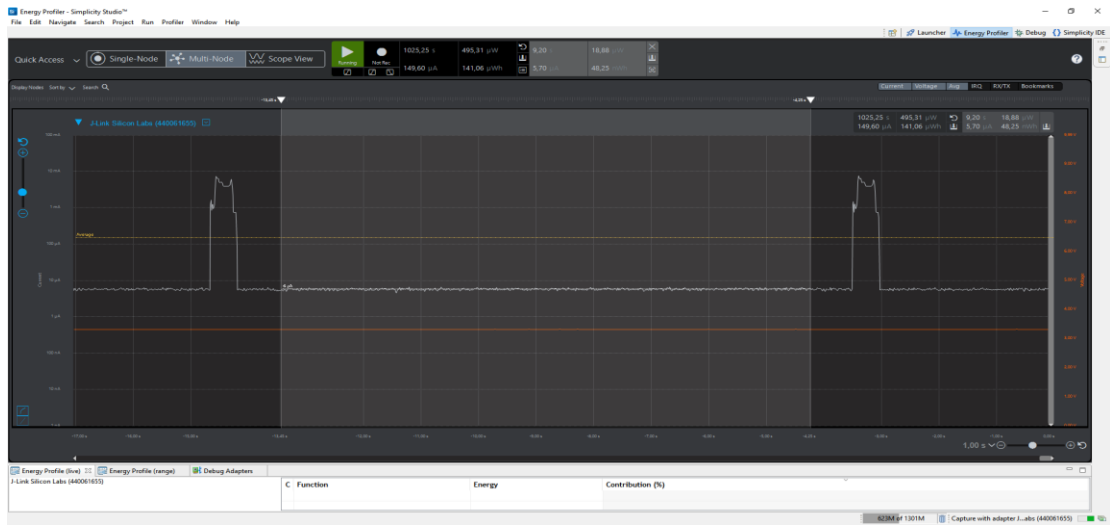
Şekil 4.24'te yaklaşık 11 saniye uyanma periyodunda kurulumu yapılan ve her uyanma adımıyla kapasite verisinin okunup BLE yayın mesajının güncellenip 2 adet 200 ms aralıklarla yayın yapıp tekrar uyku moduna dönüldüğü ölçümler gösterilmiştir. Uyanma periyodunun ortalama güç tüketimine doğrudan etkisi olduğu için bu uyanma periyodunda yaklaşık 11 dakika kadar ölçüm alınarak ortalama güç tüketimi gibi değerler çıkarılmıştır. Ölçüm grafiğinin sağ üst köşesinden de görülebileceği gibi yaklaşık 500 μW güç tüketim değeri ölçülmüştür. Ayrıca ortalama akım tüketimi yaklaşık 152 μA iken enerji tüketimi de yaklaşık 100 μWh olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.24. Yaklaşık 11 saniyelik uyanma zamanı ile BLE üzerinden güncel kapasite değerinin gönderilmesi ve 11 dakikalık süre ile güç tüketiminin ölçülmesi

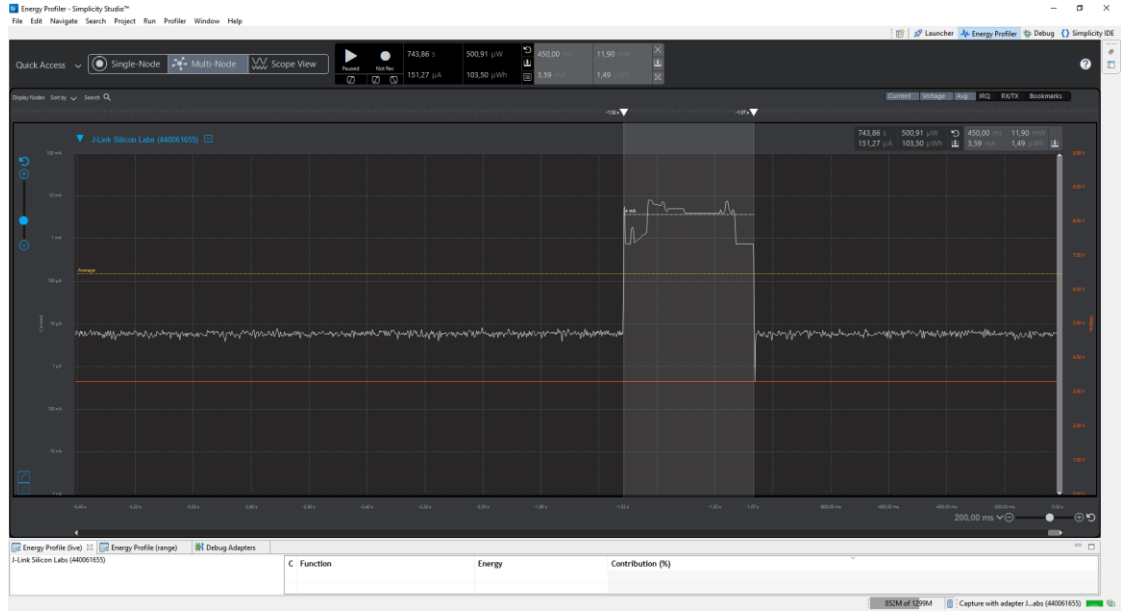
1 dakikada bir ölçüm için testler yapılmamıştır. Ancak var olan 6 saniyede bir ve 11 saniyede bir ölçümlerdeki ortalama akım değerleri artık netleştiği için 1 dakikada bir durumdaki ortalama güç tüketiminin hesap yolu ile bulunabileceği anlaşılmıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki ölçüm grafikleri referans alınarak Standby modunda ve yayın süresi boyunca toplam ortalama akım tüketimi yaklaşık 33 μA olarak hesaplanmıştır. Sistemin besleme voltajı da bilindiğinden ortalama güç tüketimi yaklaşık 108 μW hesaplanmıştır. Bu durum arzu edilen 150 μW güç tüketim değerinden oldukça düşüktür.

Şekil 4.25'te kapasitif sensör sisteminin Standby modunda iken en düşük tüketim seviyesinin yaklaşık 6 μA olduğu ölçülmüştür.



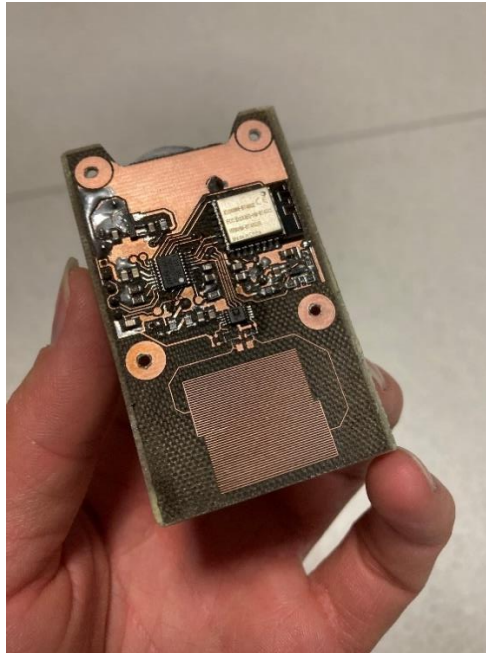
Şekil 4.25. Sistemin Standby modda iken akım tüketim değeri

Şekil 4.26’da kapasitif sensör sisteminin bir uyanma rutinin grafiği yakın şekilde gösterilmiştir. Bu bir pulse genişliği 450 ms olarak WakeUpTimer ile ayarlanan uyanma süresinden bağımsız olarak sabit bir süredir. Ortalama tüketimi bu pulse boyunca yaklaşık 4 mA (3,6) olarak ölçülmüştür. Güç tüketimi ise yaklaşık 12 mW ölçülmüştür.



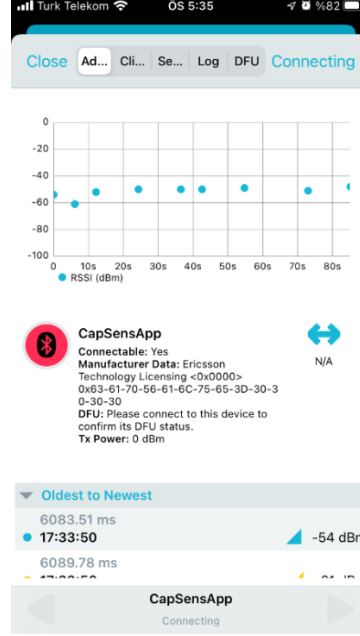
Şekil 4.26. Sistemin Standby moddan uyanıp kapasite değerini güncelleyip BLE modülüne yollayarak 2 adet 200 ms yayından sonra tekrar uyuduğunda rutin işlemin bir pulse genişliği ve ortalama akımı

Şekil 4.27’de kapasitif sensör sisteminin pille çalıştığı durum gösterilmiştir.



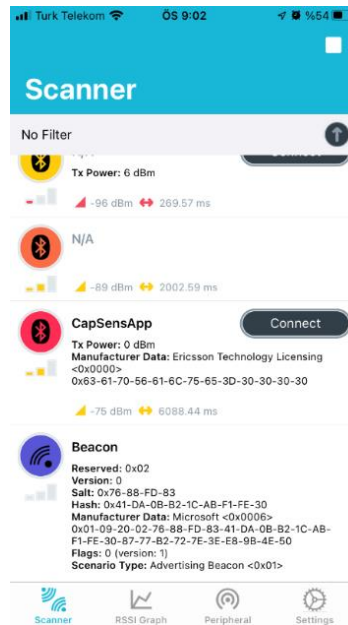
Şekil 4.27. Sistemin pil ile çalışırken alınmış fotoğrafı

CapSensApp isimli sensör sisteminin 6 saniye periyotta yayın mesajlarının, BLE yayınlarını toplayan ve kullanıcılara saniye-RSSI (dBm) grafiği üzerinden aktaran uygulama ile alınmış görseli Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



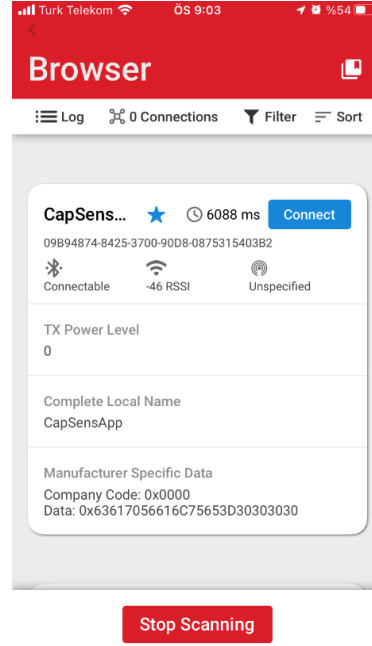
Şekil 4.28. nRF Connect uygulaması ile 6 saniyelik periyotlarda yayın mesajları alınan sensör sistemi

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da iki farklı uygulama aracılığı ile tespit edilmiş CapSensApp sisteminin görselleri gösterilmiştir. Burada ‘Manufacturer Data’ veya ‘Data’ bölümünde yazan mesaj ‘capValue=0000’ mesajının ASCII karakter karşılığıdır.



Şekil 4.29. nRF Connect uygulaması ile alınan yayın mesajları ekranı

Şekil 4.30’da EFR Connect uygulaması aracılığı ile tespit edilmiş CapSensApp sisteminin görselleri gösterilmiştir.



Şekil 4.30. EFR Connect uygulaması ile alınan yayın mesajları ekranı

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Kapasitif sensör sistemi için yapılan ölçümler sonucunda alınan değerler göz önünde bulunarak analitik hesaplar yapılmıştır.

5.1. Sonuçlar

Hedeflenen güç tüketim değeri için, 1 dakikada bir yapılan veri gönderilme rutini için, yayın pulse genişliğinin 450 ms olduğu ve ortalama akım tüketiminin yaklaşık 4 mA (3,6), bu değerlere ek olarak Standby mod süresinin 59550 ms ve ortalama akım tüketiminin yaklaşık 6 μ A olduğu test grafiklerinden incelenmiştir. Ortalama güç tüketimi bu durumda yaklaşık 108 μ W hesaplanabilir ki bu değer istenilen 150 μ W değerinin oldukça altındadır.

5.1.1. Tezin Amacının Doğrulanması

Kapasitif sensör sistemi güç tüketimi olarak 150 μ W altında kalmak hedeflendiğinden ve alınan ölçümler doğrultusunda hem Standby hem de yayın süresince güç tüketimi değişmeyeceği göz önünde bulundurularak yayın sıklığının değiştirilerek başarılabileceği görülmüştür. Hem 6 saniyede bir hem de 11 saniyede bir yayın yaparak yaklaşık 11 dakika boyunca ortalama tüketim değerleri çıkarılmıştır. Bu değerler hedeflenen tüketim değerini sağlamak için analitik işlemlerde kullanılmıştır. Sistemin beslemesi olarak kullanılan piller için ortalama enerji değerinin 600 mAh olduğu kabul edildiğinde, 3,3 V besleme voltajı ile çarpılarak 1980 mWh değeri elde edilmiştir. Bir günün 24 saat, bir yılı 365 gün ve hedeflenen kullanım ömrünün yaklaşık 2 yıl olduğu bilindiğinden yaklaşık 113 μ W güç tüketim değerinin altında kalınması gerektiği hesaplanmıştır. Ortalama güç tüketimi yaklaşık 108 μ W olduğundan ve 113 μ W güç değerinin altında kalındığından bu enerji değerindeki pil için 2 yıl kullanım ömrünün garanti edilebileceği doğrulanmıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada 2 yıl kullanım ömrünün sağlanabileceği doğrulanmış olup algılama, seviye tespiti gibi benzer endüstriyel kullanım ortamlarında test edilerek kullanım yerine uygun olarak geliştirilen mekanik tasarım çalışmalarının yapılması ve etkilerinin gözlemlenmesi önerilmektedir.

Ayrıca endüstriyel uygulamalar için dayanıklılık, uyumluluk, sızdırmazlık ve benzeri durumlar göz önünde bulundurulduğundan mekanik boyutu ve montaj alanları geniş olabilmektedir. Burada sistem mekanik boyutu pil alanı ile de ilişkili olabilmektedir. Bunun yanında endüstriyel uygulamalar için tasarım sınırları daha da büyüyebileceğinden pil kapasitesi de arttırılabilmektedir. İstenirse arttırılan pil kapasitesi ile daha uzun kullanım ömürleri sağlanabileceği gibi 1 dakikadan daha sık örneğin 5 saniyelik periyotlarda yayın sıklığı da sağlanabilmektedir. Ayrıca bu çalışmada, akıllı cihaz uygulamalarında görülebilirlik için uyanık kalınan bir pulse genişliğindeki süre boyunca 2 defa BLE yayını yapıldığından pil tüketimi de orantılı olarak artmaktadır. Bu yayın sayısı azaltılabileceği için pil tüketimi de azaltılabilecektir. Bu durumda bu çalışma için pil kapasitesini değiştirmeden daha uzun kullanım ömrü veya daha sık periyotta 2 yıl kullanım ömrü sağlanabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., Fumin Yang, Yanqing Du, & Zahn, M. (2004). *Interdigital sensors and transducers. Proceedings of the IEEE*, 92(5), 808–845.
- [2] Nikolov, G., Gieva, E., Nikolova, B., & Ruskova, I. (2020). *The effect of a pattern of capacitive sensors for liquid level measurements. 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*.
- [3] Karali, M., Karasahin, A. T., Keles, O., Kocak, M., & Erismis, M. A. (2018). *A new capacitive rotary encoder based on analog synchronous demodulation. Electrical Engineering*, 100(3), 1975–1983.
- [4] Hou, B., Zhou, B., Li, X., Gao, Z., Wei, Q., & Zhang, R. (2019). *An analog interface circuit for capacitive angle encoder based on a capacitance elimination array and synchronous switch demodulation method. Sensors*, 19(14), 3116.
- [5] Tsuji, S., & Kohama, T. (2020). *Proximity and contact sensor for human cooperative robot by combining time-of-flight and self-capacitance sensors. IEEE Sensors Journal*, 1–1.
- [6] Fuchs, A., Zangl, H., & Brasseur, G. (2007). *Mass flowmeter for screw conveyors based on capacitive sensing. 2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*.
- [7] Liang, J., Wu, J., Huang, H., Xu, W., Li, B., & Xi, F. (2019). *Soft sensitive skin for safety control of a nursing robot using proximity and tactile sensors. IEEE Sensors Journal*, 1–1.
- [8] Li, C.-H., Chou, T.-I., Chiu, S.-W., & Tang, K.-T. (2017). *A 0.7 V capacitance-to-digital converter for interdigitated electrode capacitive vapor sensors. 2017 New Generation of CAS (NGCAS)*.
- [9] Vehec, I., Livovsky, L., & Pietrikova, A. (2020). *Capacitive sensors for saturated vapour height sensing in VPS soldering. 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*.
- [10] Kitsara, M., Goustouridis, D., Chatzandroulis, S., Chatzichristidi, M., Raptis, I., Ganetsos, T., Igreja, R., & Dias, C. (2007). *Single chip interdigitated electrode capacitive chemical sensor arrays. Sensors and Actuators B: Chemical*, 127(1), 186–192.
- [11] Zhang, X., Liu, M., Wang, B., Chen, H., & Wang, Z. (2014). *A wide measurement range and fast update rate integrated interface for capacitive sensors array. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 61(1), 2–11.
- [12] Morin, B., Harrand, N., & Fleurey, F. (2017). *Model-based software engineering to tame the IoT jungle. IEEE Software*, 34(1), 30–36.

- [13] Chu, C.-T., Chiang, H.-K., & Hung, J.-J. (2015). *Dynamic heart rate monitors algorithm for reflection green light wearable device*. 2015 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS).
- [14] Chu, C.-T., Ho, C.-C., & Li, H.-W. (2018). *Proximity capacitive gesture recognition for a adaptive fuzzy neural network*. 2018 7th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE).
- [15] Chetpattananondh, K., Tapoanoi, T., Phukpattaranont, P., & Jindapetch, N. (2014). *A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor*. *Sensors and Actuators A: Physical*, 209, 175–182.
- [16] Jaworek, A., & Krupa, A. (2010). *Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow*. *Sensors and Actuators A: Physical*, 160(1-2), 78–86.
- [17] Reverter, F., Li, X., & Meijer, G. C. M. (2007). *Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor*. *Sensors and Actuators A: Physical*, 138(1), 1–8.
- [18] Frerking, M. E. (1994). *Digital Signal Processing in Communications Systems*. Chapman & Hall, 235-238.
- [19] Hosticka, B. J., Brodersen, R. W., & Gray, P. R. (1977). *MOS sampled data recursive filters using switched capacitor integrators*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 12(6), 600–608.
- [20] Bazaz, S. A., Khan, F., & Shakoar, R. I. (2011). *Design, simulation and testing of electrostatic SOI MUMPs based microgripper integrated with capacitive contact sensor*. *Sensors and Actuators A: Physical*, 167(1), 44–53.
- [21] Kulah, H., Chae, J., Yazdi, N., & Najafi, K. (2006). *Noise analysis and characterization of a sigma-delta capacitive microaccelerometer*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 41(2), 352–361.
- [22] Xia, S., & Nihtianov, S. (2011). *Zoom-in frontend for power-efficient high-speed and high-resolution capacitive sensor measurement system*. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference.
- [23] Tan, Z., Daamen, R., Humbert, A., Ponomarev, Y. V., Chae, Y., & Pertijs, M. A. P. (2013). *A 1.2-V 8.3-nJ CMOS humidity sensor for RFID applications*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 48(10), 2469–2477.
- [24] Liu, C.-C., Chang, S.-J., Huang, G.-Y., & Lin, Y.-Z. (2010). *A 10-bit 50-MS/s SAR ADC with a monotonic capacitor switching procedure*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 45(4), 731–740.
- [25] AD7151. Ultra-Low Power, 1-Channel, Capacitance Converter for Proximity Sensing.

- (<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7151.pdf>). Erişim Tarihi: 10.08.2022.
- [26] Kim, Y. S., Cho, S.-I., Shin, D. H., Lee, J., & Baek, K.-H. (2014). *Single chip dual plate capacitive proximity sensor with high noise immunity*. *IEEE Sensors Journal*, 14(2), 309–310.
- [27] STM32L031F4P6. *Access Line Ultra-Low-Power 32-Bit MCU Arm®-Based Cortex®-M0+, up to 32KB Flash, 8KB SRAM, 1KB EEPROM, ADC*. (<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l031f4.html>). Erişim Tarihi: 10.08.2022.
- [28] MCP1703A. *250 mA, 16V, Low Quiescent Current LDO Regulator*. (<https://www.microchip.com/en-us/product/MCP1703A>). Erişim Tarihi: 10.08.2022.
- [29] ADP123. *5.5 V Input, 300 mA, Low Quiescent Current, CMOS Linear Regulator*. (<https://www.analog.com/en/products/adp123.html#product-overview>). Erişim Tarihi: 10.08.2022.
- [30] Holzman, E. L. (2006). *Wideband measurement of the dielectric constant of an FR4 substrate using a parallel-coupled microstrip resonator*. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(7), 3127–3130.
- [31] Lee, H.-K., Chang, S.-I., & Yoon, E. (2009). *Dual-mode capacitive proximity sensor for robot application: Implementation of tactile and proximity sensing capability on a single polymer platform using shared electrodes*. *IEEE Sensors Journal*, 9(12), 1748–1755.