

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TİTREŞİMİ ALGILAYAN VE ANALİZ EDEN KABLOSUZ GÖMÜLÜ**  
**SİSTEM TASARIMI**

**Bilal CANATAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektronik Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**Elektronik Programı**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Revna ACAR VURAL**

**Eş Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Baykal SARIOĞLU**

**Haziran, 2020**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TİTREŞİMİ ALGILAYAN VE ANALİZ EDEN KABLOSUZ GÖMÜLÜ  
SİSTEM TASARIMI**

Bilal CANATAR tarafından hazırlanan tez çalışması 23.06.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Revna ACAR VURAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

Dr. Öğr. Baykal SARIOĞLU  
İstanbul Bilgi Üniversitesi  
Eş-Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Revna ACAR VURAL, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Burcu Erkmen, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat TÜMER, Üye  
Türk Alman Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Revna ACAR VURAL ve Eş Danışmanın Dr. Öğr. Üyesi Baykal SARIOĞLU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Kablosuz Gömülü Sistem Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bilal CANATAR

İmza

## TEŞEKKÜR

---

Tez çalışmamın her aşamasında değerli katkıları ve eleştirileri ile yol gösteren, sonsuz sabırla beni her zaman çalışmaya teşvik eden ve güven veren danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Revna Acar Vural ve Dr. Öğr. Üyesi Baykal Sarıoğlu'na, her türlü desteği esirgemeyen ve çalışmanın her aşamasında manevi olarak yanımda olan değerli arkadaşlarıma, çalışmamda sağlamış oldukları destekten dolayı ARÇELİK'e ve her zaman yanımda olan Ailem'e içtenlikle teşekkür ederim.

Bilal CANATAR

# İÇİNDEKİLER

---

|                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| SİMGE LİSTESİ                                                                                  | vi   |
| KISALTMA LİSTESİ                                                                               | vii  |
| ŞEKİL LİSTESİ                                                                                  | viii |
| TABLO LİSTESİ                                                                                  | xi   |
| ÖZET                                                                                           | xii  |
| ABSTRACT                                                                                       | xiv  |
| 1 Giriş                                                                                        | 1    |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                                                      | 1    |
| 1.2 Tezin Amacı .....                                                                          | 3    |
| 1.3 Hipotez .....                                                                              | 5    |
| 2 Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Gömülü Sistemine Genel Bakış                              | 6    |
| 2.1 Sistem Alt Bileşenleri .....                                                               | 7    |
| 2.2.1 Mikrokontrolör .....                                                                     | 7    |
| 2.2.2 Güç Yönetim Devresi .....                                                                | 8    |
| 2.2.3 İvmeölçer Sensör .....                                                                   | 9    |
| 2.2.4 BLE Beacon .....                                                                         | 10   |
| 2.2 Gömülü Sistem Tasarım ve Geliştirme Süreci .....                                           | 10   |
| 3 Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Gömülü Sisteminin Yazılıma Ait Bileşenlerinin İncelenmesi | 13   |
| 3.1 Frekans Analizi .....                                                                      | 13   |
| 3.1.1 Fourier Yaklaşımı .....                                                                  | 13   |
| 3.1.2 Hızlı Fourier Dönüşümü .....                                                             | 17   |
| 3.1.3 Otomatik Gömülü Kod Üretimi .....                                                        | 18   |
| 3.2 Haberleşme Protokolleri .....                                                              | 19   |
| 3.2.1 I2C İletişim Protokolü .....                                                             | 19   |
| 3.2.2 BLE Beacon .....                                                                         | 21   |

|     |                                                             |    |
|-----|-------------------------------------------------------------|----|
| 4   | Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Gömülü Sistemin Donanımı | 24 |
| 4.1 | Güç Yönetim Devresi.....                                    | 24 |
| 4.2 | İvmeölçer Sensör.....                                       | 28 |
| 5   | Deneysel Sonuçlar                                           | 29 |
| 6   | Sonuç ve Öneriler                                           | 42 |
|     | A Fourier Dönüşümünün MATLAB Uygulaması                     | 44 |
|     | B MATLAB ile Oluşturulan Frekans Tespit Fonksiyonu          | 49 |
|     | C Beacon Konfigürasyon Parametreleri                        | 50 |
|     | Kaynakça                                                    | 52 |
|     | Tezden Üretilmiş Yayınlar                                   | 56 |

## SİMGE LİSTESİ

---

|        |                |
|--------|----------------|
| cos    | Cosinüs        |
| Hz     | Hertz          |
| v      | Hız            |
| sin    | Sinüs          |
| $\eta$ | Verim          |
| W      | Watt           |
| mAh    | Milliamp Hours |



|        |                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------|
| ADC    | Analog Digital Converter                            |
| ARM    | Acorn RISC Machine                                  |
| BLE    | Bluetooth Low Energy                                |
| CAN    | Controller Area Network                             |
| EEPROM | Electrically Erasable Programmable Read Only Memory |
| FFT    | Fast Fourier Transform                              |
| FPGA   | Field Programmable Gate Array                       |
| GPS    | Global Positioning System                           |
| IDE    | Integrated Development Environment                  |
| I2C    | Inter Integrated Circuit                            |
| LDO    | Low Drop Out                                        |
| LDV    | Laser Doppler Vibrometer                            |
| LSB    | Least Significant Bit                               |
| MSB    | Most Significant Bit                                |
| PWM    | Pulse Width Modulation                              |
| RAM    | Random Access Memory                                |
| ROM    | Read Only Memory                                    |
| RTOS   | Real Time Operating System                          |
| SCL    | Serial Clock                                        |
| SDA    | Serial Data Line                                    |
| SEC    | Second                                              |
| SPI    | Serial Peripheral Interface                         |
| UART   | Universal Asynchronous Receiver Transmitter         |
| WDT    | Watchdog Timer                                      |



## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 Gömülü sistemin genel mimarisi .....                                         | 4  |
| Şekil 2.1 Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin genel görünüşü .....      | 6  |
| Şekil 2.2 CYBLE-022001-00 .....                                                        | 7  |
| Şekil 2.3 CYBLE-022001-00 mikrokontrolörün şematik gösterimi .....                     | 8  |
| Şekil 2.4 Cypress S6AE103A güç yönetim devresi .....                                   | 9  |
| Şekil 2.5 İvme ölçer sensörün eksenlerin tanımı .....                                  | 9  |
| Şekil 2.6 Bosh Sensortech BMI160 ivmeölçer sensör .....                                | 10 |
| Şekil 2.7 Bir gömülü sistem geliştirme süreci .....                                    | 11 |
| Şekil 2.8 Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin akış diyagramı .....      | 12 |
| Şekil 3.1 Kare dalga sinyal .....                                                      | 14 |
| Şekil 3.2 Testere dişli sinyal .....                                                   | 14 |
| Şekil 3.3 Frekans tespitinin genel akış diyagramı .....                                | 17 |
| Şekil 3.4 MATLAB ile otomatik gömülü kod üretimi akış diyagramı .....                  | 18 |
| Şekil 3.5 Mikrokontrolör ile ivmeölçer sensörünün I2C bağlantı şekli .....             | 19 |
| Şekil 3.6 I2C haberleşme protokolü [42] .....                                          | 20 |
| Şekil 3.7 I2C haberleşme protokolünde start-stop koşulu [42] .....                     | 20 |
| Şekil 3.8 BLE Bağlantısı sırasındaki zamana karşı akım tüketimi [43] .....             | 21 |
| Şekil 3.9 Tek Bir bağlantı etkinliğinde zamana karşı akım tüketimi [43] .....          | 21 |
| Şekil 3.10 BLE Beacon paket yapısı “Advertising Data” ya aittir. ....                  | 22 |
| Şekil 3.11 BLE Beacon paket yapısı .....                                               | 23 |
| Şekil 4.1 Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin donanım blok şeması ..... | 24 |
| Şekil 4.2 Sistem blok şeması .....                                                     | 24 |
| Şekil 4.3 Cypress S6AE103A güç entegresinin bloklarının gösterimi .....                | 25 |
| Şekil 4.4 S6AE103A entegresinin güç giriş bloğu .....                                  | 25 |
| Şekil 4.5 S6AE103A entegresinin çıkış gerilimi ayarlama bloğu .....                    | 26 |
| Şekil 4.6 S6AE103A entegresinin enerji depolama bloğu bloğu .....                      | 26 |
| Şekil 4.7 S6AE103A entegresinin zamanlayıcı bloğu .....                                | 27 |
| Şekil 4.8 Zamanlayıcı modunun ayrıntılı dalga formu [45] .....                         | 28 |
| Şekil 4.9 BMI160 ivmeölçer sensör .....                                                | 28 |

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.10</b> BMI160 sensörün düşük güç ve normal çalışma modunun karşılaştırılması [46] .....                                                               | 28 |
| <b>Şekil 5.1</b> Deney düzeneğinin genel görünümü .....                                                                                                          | 29 |
| <b>Şekil 5.2</b> Uygulanan salınım hareketinin zaman düzlemindeki sinyali .....                                                                                  | 30 |
| <b>Şekil 5.3</b> Uygulanan salınım hareketinin frekans düzlemindeki sinyali.....                                                                                 | 30 |
| <b>Şekil 5.4</b> Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin bu salınım hareketine karşılık gelen frekans değeri.....                                     | 31 |
| <b>Şekil 5.5</b> Kablosuz olarak iletilen frekans bilgisi .....                                                                                                  | 31 |
| <b>Şekil 5.6</b> Test 2 işlemine ait sinyallerin gösterimi .....                                                                                                 | 32 |
| <b>Şekil 5.7</b> Test2 gömülü sistemin algıladığı frekans değeri .....                                                                                           | 32 |
| <b>Şekil 5.8</b> Test 3 işlemine ait sinyallerin gösterimi .....                                                                                                 | 33 |
| <b>Şekil 5.9</b> Test3 gömülü sistemin algıladığı frekans değeri .....                                                                                           | 33 |
| <b>Şekil 5.10</b> Test 4 işlemine ait sinyallerin gösterimi .....                                                                                                | 34 |
| <b>Şekil 5.11</b> Test4 gömülü sistemin algıladığı frekans değeri.....                                                                                           | 34 |
| <b>Şekil 5.12</b> Deney düzeneğinin genel görünümü .....                                                                                                         | 35 |
| <b>Şekil 5.13</b> 300 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyali.....                                                  | 36 |
| <b>Şekil 5.14</b> 300 rpm hızda dönen çamaşır makinesinden elde edilen titreşim sinyalinin frekans düzleminde gösterimi.....                                     | 36 |
| <b>Şekil 5.15</b> Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 300rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri .....  | 37 |
| <b>Şekil 5.16</b> 400 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyalinin zaman ve frekans düzleminde gösterimi .....        | 37 |
| <b>Şekil 5.17</b> Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 400rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri.....   | 38 |
| <b>Şekil 5.18</b> 800 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyalinin zaman ve frekans düzleminde gösterimi .....        | 38 |
| <b>Şekil 5.19</b> Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 800rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri .....  | 39 |
| <b>Şekil 5.20</b> 1000 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyalinin zaman ve frekans düzleminde gösterimi .....       | 39 |
| <b>Şekil 5.21</b> Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 1000rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri ..... | 40 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.22</b> Harici anten ile desteklenen bilgisayar ve telefonun sistem ile<br>haberleşme mesafeleri ..... | 41 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## TABLO LİSTESİ

---

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1</b> Fourier dönüşüm türleri .....                                                                               | 16 |
| <b>Tablo 3.2</b> BLE Beacon başlangıçtaki paket yapısı .....                                                                 | 23 |
| <b>Tablo 4.1</b> Zamanlayıcı bloğundaki pinlerin açıklaması .....                                                            | 27 |
| <b>Tablo 5.1</b> Test1 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması .....   | 31 |
| <b>Tablo 5.2</b> Test2 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması .....   | 32 |
| <b>Tablo 5.3</b> Test3 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması .....   | 33 |
| <b>Tablo 5.4</b> Test4 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması .....   | 34 |
| <b>Tablo 5.5</b> Farklı motor hızlarında denge taşı üzerinde oluşan titreşim sinyalinin sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 40 |
| <b>Tablo 6.1</b> DeneySEL sonuçların karşılaştırılması.....                                                                  | 42 |
| <b>Tablo 6.2</b> Titreşimi algılayan ve analiz eden kablosuz gömülü sistemin kullandığı gücün dağılımı .....                 | 43 |

## **Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Kablosuz Gömülü Sistem Tasarımı**

Bilal CANATAR

Elektronik Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Revna ACAR VURAL

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Baykal SARIOĞLU

Gömülü sistemler algılama, işleme ve iletişim yeteneklerinden oluşan, donanım ve yazılım alt birimleri ile bir araya gelmiş tümleşik sistemlerdir. Bu yetenekleri ile gömülü sistemler çeşitli bilimsel ve endüstriyel alanlarda birçok yeni uygulamalar oluşturmuştur. Gömülü sistemlerin çoğu sabit bataryaların sağladığı gücü tüketir. Bu yüzden sistemin uzun süre çalışması için bu enerji kaynağını etkili bir şekilde kullanılması gerekir. Böylelikle gömülü sistemlerin çeşitli saha uygulamalarında uzun süre ve devamlı kullanımına olanak sağlanabilmektedir. Bu saha uygulamalarından biride yapıların titreşim analizinin gerçekleştirilmesidir. Yapıların titreşim analizinin gerçekleştirilmesi ve frekansının tespiti yapının ömrü için büyük önem arz etmektedir. Günümüzde, titreşim analizinin sahada gerçekleştirilmesi için LDV ( Laser Doppler Vibrometer) tekniği, görüntü işleme gibi yüksek güç ve karmaşık donanım ihtiyacı olan sistemler kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, yerleştirildiği yapının titreşim analizini gerçekleştiren kablosuz, düşük güç tüketimine sahip bir gömülü sistem ortaya koymaktır. Bu gömülü sistemde kullanılan güç yönetim devresi işlemciyi belirli aralıklarla çalıştırır.

Enerjilenen işlemci ile yapı üzerinden titreşim sinyalleri elde edilir. Bu sinyaller FFT yöntemiyle işlenir ve analiz edilir. Veriler analiz edildikten sonra frekans değeri sunucuya düşük enerjili bluetooth teknolojisini kullanan beacon tarafından kablosuz iletilir. Daha sonra güç yönetim devresi tarafından işlemcinin enerjisi kesilip kesilmemesine göre işlem tekrar etmektedir. Böylece hem enerjinin etkili bir şekilde kullanılması hem de yapının durumunu uzaktan gerçek zamanlı izlenmesine olanak sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Gömülü Sistem, Kablosuz Sensör, Beacon, Titreşim Analizi, Hızlı Fourier Dönüşümü.



# **Vibration Detection and Analysis Based on a Wireless Embedded System**

Bilal CANATAR

Department of Electronics and Communication Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Asst. Prof. Dr. Revna ACAR VURAL

Co-advisor: Asst. Prof. Dr. Baykal SARIOGLU

Embedded systems are integrated systems consisting of hardware and software sub-units with the capabilities of detection, processing and communication. With these capabilities, embedded systems have created many new applications in various scientific and industrial fields. Most embedded systems consume the power provided by fixed batteries. Therefore, this energy source must be used effectively by the embedded system. This enables long-term and continuous use of embedded systems in various field applications. One of these field applications is the vibration analysis of structures. Performing vibration analysis and frequency determination of structures is significant for the life of the structure. Systems with the requirements of high power and complex hardware such as LDV (Laser Doppler Vibrometer) technique and image processing are used to perform vibration analysis in the field applications. The aim of this study is to provide wireless low power consumption embedded system that performs vibration analysis of the structure in which it is placed. The power management circuit used in this embedded system operates the processor periodically. Vibrating signals are captured from the structure with the energized processor. These signals are processed and analyzed

by the FFT method. After the data is analyzed, the frequency value is transmitted to the server by the beacon using low energy bluetooth technology. The process is repeated according to whether the processor is powered by the power management integrated circuit. In this way, both the effective use of energy and the real-time monitoring of the state of the structure are provided.

**Keywords:** Embedded System, Wireless Sensor, Beacon, Vibration Analysis, Fast Fourier Transform





### 1.1 Literatür Özeti

Titreşim, bir denge noktası etrafında mekanik salınım olarak tanımlanabilir. Bu salınımlar periyodik olabileceği gibi rastgele de olabilir [1]. Titreşim yıpranma veya metal yorulması nedeniyle yapı ömrünün ksalmasına neden olduğu gibi, cihazların etkin bir şekilde çalışmasını da önler. Yol açtığı sonuçlar itibariyle önemli bir maliyet yükü oluşturmaktadır. Bu nedenle geçmişten günümüze üzerinde hassasiyetle durulması gereken önemli bir çalışma alanı olmuştur. Titreşim birçok alanda sorun teşkil eden önemli bir parametredir.

Dönen makinelerde titreşimler iyi veya kötü bir davranışın belirtileri olabilir. Günümüzde bu titreşimlerden yararlanarak mekanik birçok problem çözülmektedir. Büyük işletmelerde makinelerde oluşacak arızalar büyük üretim kaybına neden olur. Aynı zamanda verimliliğin azalmasıyla makinenin işletme maliyetini artırır. Bu nedenle kök nedeninin teşhisi ile hatanın erken tespit edilmesi gerekir [2].

Hidrolik santral tesislerinin en önemli parçalarından biri barajdır. Barajın güvenliği insanların yaşamını ve mallarını doğrudan etkiler. Nehrin, gölün ve denizin muazzam itiş ve baskısı, barajın mikro hareket ve titreşim üretmesini sağlar. Baraj sağlam durmuş gibi görünse de, barajın uzun süre baskısı nedeniyle toprak kayması olabilir. Bu durum ekonomik kayıplara ve talihsizliğe yol açacaktır. Bu yüzden barajlarda gerçek zamanlı olarak titreşim ölçülmeli ve izlenmelidir [3].

Dünyada elektrik enerjisi üretimi kaynaklarından rüzgâr enerjisi en hızla gelişen enerji kaynaklarından biri olmuştur. Rüzgâr türbinlerinin sayısının artması ile ortaya çıkan türbinlerin güvenliği, bakım maliyetleri ve performanslarını artırmak için bu sistemlerin izlenmesi ve hatanın önceden tespit edilmesi zorunlu bir hal olmuştur [4]. Rüzgâr türbin sistemi arızalandığında, oluşan kayıplar ve oluşan maliyetler de çok önemlidir. Bu kayıpları engellemek için rüzgâr türbinlerinin

izleme sistemlerinde titreşim verileri yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Rüzgâr türbinlerinde belirli bileşenler için özgül frekanslar kullanılarak, hasarların sınıflandırılması yapılabilmektedir.

Biyofiziksel ölçümün faydalı bilgiler sağladığı birçok durum vardır. Son yıllarda algılama cihazı tiplerin ilerlemesi, biyofiziksel sinyallerin laboratuvarlardan uzakta ölçülmesini mümkün kılmıştır. Uyuşukluk ile araç kullanmak trafik kazalarının ana nedenlerinden biridir. Sürücülerin uykulu araç kullanmasını önlemek için sürücü izleme sistemlerine güçlü bir talep vardır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalardan bir tanesi de koltuğa yerleştirilmiş titreşim sensörleri ile sürücünün uyuşukluk düzeyine karar vererek güvenli sürüş sağlamaktır [6].

Taşımacılık sektöründe yer alan özel ve kamu kuruluşları için demiryolu ağlarının güvenli işletilmesi ve izlenmesi önemli bir husustur. Tren çarpışmaları, raydan çıkma ve yol kavşakları tehlikeli kazaların en önemli nedenleri olduğu gözlemlenmiştir [7]. Bu tür kazaların önüne geçilebilmesi için demiryolu hattının yapısal sağlık durumu izlenmesi gerekmektedir. Son zamanlarda ise demiryolu hattında yapısal sağlık durumunun izlemesini mümkün kılmak için çeşitli teknikler önerilmiştir [8, 9, 10]. Bu çalışmalarda ray durumunun bozulması, engel tespit ve titreşim ölçümü kazaların önüne geçebilmek ve yapısal sağlık durumunun gözlenmesi için kullanılmıştır.

Toplumların yaşam koşullarını iyileştirmeye çalışırken gürültüye karşı mücadele, modern uygarlığın başlıca görevlerinden biridir. Pencerelemler ve diğler bina bölümlerinin akustik yalıtımının test edilmesi, bu mücadelenin hizmet verdiği araştırma alanının bir parçasıdır. Ses bölümden geçtiğinde ortaya çıkan olayları anlamak, bina bölümlerinin yalıtımını arttırmak için vazgeçilmezdir [11]. Son yıllarda, bu sorunları ele almak için pencerelemlerde titreşim testleri yapılarak çalışmalar yürütölmektedir. Aynı zamanda çift camlı pencerenin ses iletimi ve yapısal titreşim karakteristikleri incelenmektedir [12].

Yoğun trafik koşullarında köprülemlerin stabilizesinin izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bir köprünlün dikey salınımını ölçmenin yaygın bir yolu titreşimlemleri ölçmektir. Bir köprünlün titreşim miktarı, yer değıştirmenin zamansal eğilimi ile birlikte köprünlün onarılması gerekip gerekmediğini değlerlendirmek için

kullanılabilir [13]. Aynı zamanda hasarlı bir köprünün titreşim tepkisinin değişen özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Köprünün titreşim analizi yapılarak, köprünün olası çöküşünün erken işaretleri tespit edilebilir [14].

Makineler, çok katlı bina, rüzgâr türbinleri, büyük pencereler, köprü, baraj, hidroelektrik santral tesislerde ve daha birçok alanda yapıyı ve yapının etrafındaki insanların güvenliğini korumak için önem arz etmiştir. Titreşimden kaynaklı yapı üzerinde ortaya çıkan kayıplar ve maliyetler de çok önemlidir. Mekanik donanımın üzerinden titreşimin izlenmesi ve elde edilen bilgi donanımın emniyetli ve güvenilir çalışmasını sağlamak için önemli bir yoldur [15]. Bu nedenle, titreşim analizi ile sistem üzerindeki olağandışı veya hasarlı durum tespit edilerek, sistemin zarar görmeden önce önlenmesi genel olarak hedef alınmaktadır [16].

Literatür araştırmasında titreşim analizini gerçekleştirmek LDV ve görüntü işleme tekniği olmak üzere çeşitli yaklaşımlar ve cihazlar bulunmaktadır. Lazer Doppler Vibrometre (LDV) [17] - [20], temassız tipte titreşim ölçen cihazlardır ve belirli mesafedeki birden fazla yerde doğru bir şekilde titreşim ölçülebilir, ancak maliyetleri ve yasaklayıcı önlemleri çoktur. Farklı özelliklerde lazer türleri olmakla birlikte kaynağın gücüne bağlı olarak uzak mesafelerden ölçüm alınabilmektedir. Ancak lazer ışınlarının ölçüm alınacak yüzeyden yansıma yoğunlukları düşük olduğu durumlarda yüzey üzerinde yansıtıcı etkiler veya özel boyalarla iyileştirme yapılmak zorundadır.

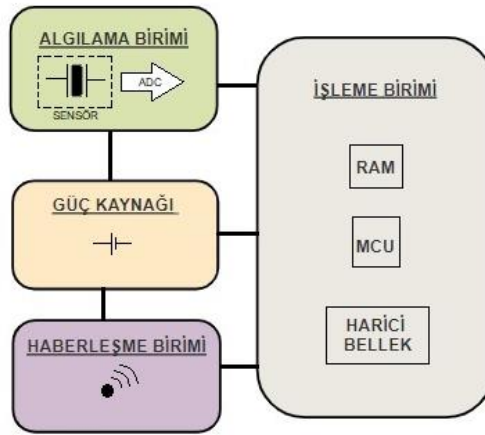
Kamera tekniği ile titreşim analizine baktığımızda, son yıllarda kameralarla titreşim ölçümü konusunda birçok çalışmalar yapılmıştır [21-25]. Kamera kullanan yöntemlerin ölçüm çözünürlükleri ve örnekleme hızları ivmeölçerlerden daha düşüktür; Yine de uzaktan ve çok noktalı ölçüm cihazı olarak kullanılabilirler. Fakat kamera tekniğini kullanmasından dolayı ortamın karanlık olması durumunda ekstra donanıma ihtiyaç duymaktadır [26].

## **1.2 Tezin Amacı**

Titreşim analizindeki temel sorun, geleneksel tekniklerin oldukça fazla zaman alması, çevrimdışı yapılması ve gerekli donanımın genel olarak pahalı ve karmaşık olmasıdır. Gerçek zamanlı titreşim analizi, gömülü sistemlerdeki mevcut gelişmeler

ile bu sorun için pahalı olmayan (en azından daha az pahalı) bir çözüm getirebilir. Bu çalışmanın amacı daha düşük maliyetli ve daha az donanıma ihtiyaç duyan, yüksek performansa sahip, gerçek zamanlı bir titreşim analizi gerçekleştiren gömülü sistem tasarlamaktır.

Bir gömülü sistemin genel mimarisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Herhangi bir elektronik sistemde olduğu gibi, gömülü bir sistem üzerinde işlem yaptığı bir donanım platformu vardır. Bunlar genel olarak iletişim, algılama, bilgi işlem, güç, zamanlayıcı ve hafıza birimlerinden oluşmaktadır. Bu gömülü sistemlerin çalışması bataryaya bağlıdır ve güç tüketimi, tasarımlarını önemli ölçüde etkileyen ana faktörlerden biridir. Bu yüzden bu enerjinin etkin bir şekilde kullanılması gerekmektedir.



**Şekil 1.1** Gömülü sistemin genel mimarisi

Gömülü sistemler üzerinde karmaşık işlemlerin yapılabilmesinde etkili çözüm yaklaşımları mevcuttur. Bu yaklaşımlar, gömülü sistemlerin işlem yeteneğini etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Fakat bu yaklaşımların pratik uygulaması yapılırken fazla zaman alabilmektedir. Sunulan yaklaşımların dışında gömülü sistemler için uyarlanmış otomatik kod üretme araçları bu sorunların üzerinden gelmektedir. Bu tez çalışmasında otomatik kod üretme araçlarının gömülü sistem üzerindeki verimliliğini ve performansını kullanmaktadır.

Bu tez çalışması toplamda 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm içerisinde tez çalışmasının konusu ve literatür özeti verilmiştir. İkinci bölümde gömülü sistem hakkında genel bilgi, donanım, yazılım ve gömülü sistem geliştirme sürecinden

bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde Fourier hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin tasarımından bahsedilmiştir. Beşinci bölümde tasarlanan bu gömülü sistemin doğruluğu MATLAB'ın bulduğu sonuç ile karşılaştırılması yapılmıştır. Altıncı bölümde ise sonuç kısmına yer verilmiştir.

### **1.3 Hipotez**

Yapılar deprem ve doğal afet dışında birçok şekilde titreşime maruz kalmaktadır. Bu titreşimler, yapı işlevini ve ömrünü etkileyen önemli bir unsurdur. Yapının çevresindeki çeşitli titreşim kaynakları yapıları işlev ve hasar yönünden etkilemektedir. Bu etki yapıyı ve yapının etrafına hasar verebilmektedir. Bunu engellemek için çeşitli bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Teknolojideki gelişmeler ile titreşimi ölçmek için kamera ve lazer teknikleri kullanılmıştır. Fakat bu teknikler pahalı ve karmaşık donanıma sahiptir. Bu tez çalışmasında yerleştirildiği yapının titreşim analizini gerçekleştiren kablosuz, düşük güç tüketimine sahip, düşük maliyetli ve az yer kaplayan bir gömülü sistem tasarlanmak istenmiştir.

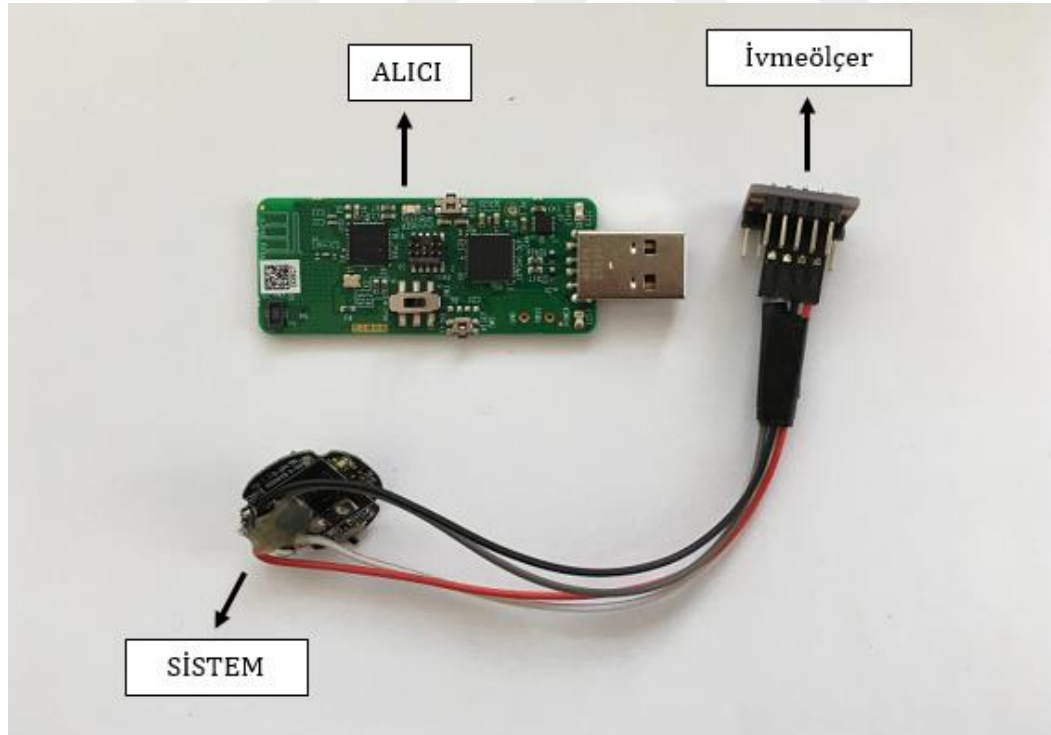
Bunu gerçekleştirirken kullanılan yöntem ise sistem içerisinde kullanılan güç yönetim devresi işlemciyi belirli aralıklarla çalıştırır. Enerjilenen işlemci ile yapı üzerinden titreşim sinyalleri elde edilir. Bu sinyaller FFT yöntemiyle işlenir ve analiz edilir. Veriler analiz edildikten sonra frekans değeri sunucuya düşük enerjili bluetooth teknolojisini kullanan beacon tarafından kablosuz iletilir. Daha sonra güç yönetim devresi tarafından işlemcinin enerjisi kesilip kesilmemesine göre işlem tekrar etmektedir. Böylece hem enerjinin etkili bir şekilde kullanılması hem de yapının durumunu uzaktan gerçek zamanlı izlenmesine olanak sağlanmıştır.

## 2

### Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Gömülü Sisteme Genel Bakış

Gömülü sistemler algılama, işleme ve iletişim yeteneklerinden oluşan, donanım ve yazılım alt birimleri ile bir araya gelmiş tümleşik sistemlerdir. Bu yetenekleri ile gömülü sistemler çeşitli bilimsel ve endüstriyel alanlarda birçok yeni uygulamalar oluşturmuştur [27]. Gömülü bir sistem, açıldığında istenen işlevi tekrar tekrar gerçekleştiren özel bir sistemdir. Belirli bir özel uygulama gerçekleştirmek için yapılandırılmıştır.

Bir gömülü sistem boyut olarak mümkün olduğunca küçük ve hafif olmalı, az enerji tüketmeli ve uzun süre boyunca güvenli bir şekilde çalışmalıdır. Bu doğrultuda tasarlanan titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin genel görünümü Şekil 2.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin genel görünüşü

Titreşimi algılama ve analiz etmek için geliştirilen sistemin gerekli olan elektronik devre elemanları zorlu çalışma şartlarına uygun, hafif ve az yer kaplayacak şekilde seçilmiştir. Mikrokontrolör olarak Cypress firmasının ARM mimarisi ile üretilmiş CYBLE-022001-00 modeli seçilmiştir. Yapı üzerinden titreşimi sinyallerini elde etmek için ise BOSH Sensortec firmasının ürünü olan BMI160 IMU sisteme entegre edilmiştir. Titreşim sinyali üzerinden frekans değeri tespit edildikten sonra bu frekans değerini kablosuz olarak iletebilmek için ise Cypress firmasının EZ-BLE PSoC modülü kullanılmıştır.

## 2.1 Sistem Alt Bileşenleri

Gömülü sistemler, amaca uygun alt bileşenleri bir araya getirerek karmaşık sistemlerin oluşturulduğu ve yazılım ile desteklenen sistemlerdir. Bu sistemler çevre koşullarına uygun ve kendine ait güç ve bellek sınırlamalarına sahip sistemlerdir. Hedeflenen uygulama doğrultusunda mikrokontrolör, haberleşme modülleri, sensörler gibi sistem alt bileşenlerine sahiptir.

### 2.1.1 Mikrokontrolör

Titreşim algılayan ve analiz eden gömülü sistemin beyni mikrokontrolördür. Mikrokontrolör içerisinde mikro işlemci barındıran bir cihazdır. Genelde başlı başına bir sistem olmayıp içerisinde hafıza, zamanlayıcı, haberleşme portları ve giriş – çıkışları ile amaca ulaşır [28]

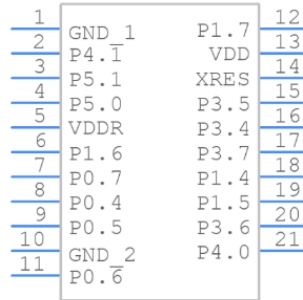
Mikrokontrolör üzerinde analog ve dijital çeviricileri ve haberleşme portları tümleşik devreler barındırmaları sayesinde her türlü verinin toplanması ve işlenmesini sağlamaktadır. Küçük ve düşük maliyete sahip olmalarından dolayı günümüzde gömülü sistem uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [29].



Şekil 2.2 CYBLE-022001-00

Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemi içerisinde titreşim sinyali verilerinin toplanmasında, elde edilen sinyallerin analiz edilmesinde ve elde edilen frekans değerinin kablosuz olarak iletilmesi için kullanılmıştır. Tercih edilen bu mikrokontrolün sağlamış olduğu avantajları şu şekilde sıralayabiliriz.

1. İçerisinde ram, rom, adc, I/O pinleri, haberleşme portları gibi bileşenleri içerisinde bulundurmasından dolayı tasarımda boyuttan önemli ölçüde tasarruf sağlar.
2. Yüksek seviye programlama dilleri ile kolay bir şekilde programlanabilir.
3. Tasarım içerisinde çok düşük tüketimine sahiptirler.
4. Düşük maliyet ve oldukça yüksek performansa sahiptir.



|    |       |      |    |
|----|-------|------|----|
| 1  | GND 1 | P1.7 | 12 |
| 2  | P4.1  | VDD  | 13 |
| 3  | P5.1  | XRES | 14 |
| 4  | P5.0  | P3.5 | 15 |
| 5  | VDDR  | P3.4 | 16 |
| 6  | P1.6  | P3.7 | 17 |
| 7  | P0.7  | P1.4 | 18 |
| 8  | P0.4  | P1.5 | 19 |
| 9  | P0.5  | P3.6 | 20 |
| 10 | GND 2 | P4.0 | 21 |
| 11 | P0.6  |      |    |

**Şekil 2.3** CYBLE-022001-00 mikrokontrolörün şematik gösterimi

Bu sistem maksimum 48 Mhz kadar çalışma aralığı sunmaktadır. 21 adet I/O'u bulunmaktadır. Bu pinler I2C, UART, SPI haberleşme portları ve ADC, PWM, zamanlayıcı ve sayıcı olarak ayarlanabilmektedir. Sistemde içerisinde BLE Beacon parametrelerini yapılandırmak için UART ve ivmeölçer sensörü ile haberleşmek için I2C haberleşme portlarından faydalanılmıştır. Sistemin güvenliğini ve kararlılığını artırmak için güvenlik zamanlayıcısı WDT kullanılmıştır. Sisteme yazılım yüklemek ve debug yapabilmek için SWD Debug pinleri aktif edilmiştir.

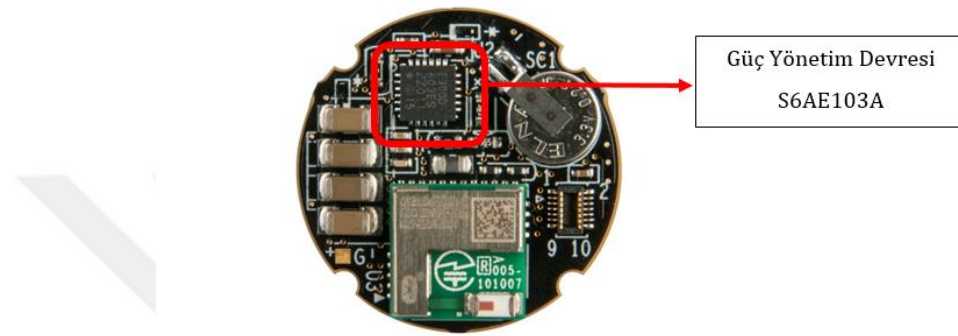
### 2.1.2 Güç Yönetim Devresi

Güç yönetim devresi, DC-DC dönüştürme, enerji depolama, batarya şarj ve koruma gibi elektronik sistemler için çok çeşitli görevler gerçekleştirir. Güç yönetim devreleri düşük güçlü ve küçük boyutta olan tasarımlar için oldukça önemlidir.



Düşük boyutta tasarlanan sistemler için büyük bir enerji depolama cihazının entegrasyonuna izin vermez. Bu nedenle güç yönetim devrelerinin verimliliği sistemin uzun süre çalışması için önemlidir [30].

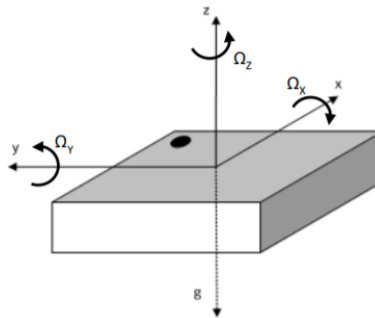
Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin enerjisinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için ve sistemin uzun süre çalışmasını sağlamak için tercih edilen güç yönetim devresi Cypress tarafından üretilen S6AE103A entegresidir.



**Şekil 2.4** Cypress S6AE103A güç yönetim devresi

### 2.1.3 İvmeölçer Sensör

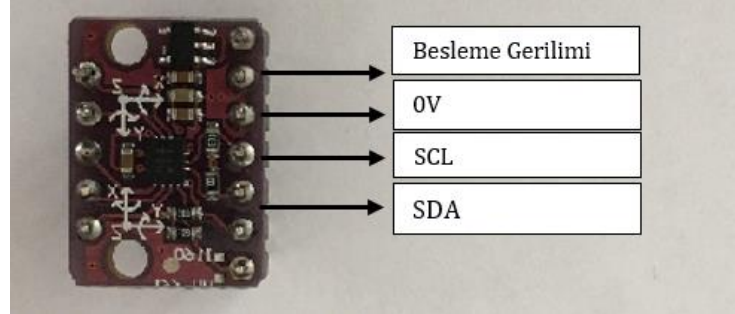
İvmeölçer, hareket, yerçekimi veya titreşimden kaynaklanan ivme kuvvetini ölçen bir elektromekanik cihazdır. Bu kuvvetler, yerçekimi kuvveti, dinamik duyu hareketi veya titreşimler gibi statik olabilir. Matematiksel olarak hızlanma, hız veya hızdaki değişimin zamana bölündüğü bir ölçümdür.



**Şekil 2.5** İvme ölçer sensörün eksenlerin tanımı

Bu çalışmada yapılarıdaki titreşimi sinyalini elde etmek için BOSH tarafından üretilen BMI160 ivmeölçer sensörü kullanılmıştır. BMI160 yüksek hassasiyetli,

düşük güçlü, düşük gürültüye sahiptir. Bu sensör 1,71V ile 3,6V besleme gerilimi aralığına sahip, 16-bit 3 eksenli ivmeölçer ile 16-bit 3 eksenli jireskobu birleştiren 6 eksenli MEMS sensörüne dayanmaktadır. İvmeölçer ve jiroskopun birlikte çalıştığı tam modda akım tüketimi 950  $\mu$ A'dır.



**Şekil 2.6** Bosh Sensortech BMI160 ivmeölçer sensör

Projede ivmeölçer titreşim sinyallerini elde etmek için kullanılmıştır. Seçilen ivmeölçer bilgi iletimini I2C protokolü üzerinden iletme özelliğine sahiptir. Gereken kalibrasyon işlemi yazılım içerisinde yapılmıştır. İvmeölçerin hassasiyeti +/-2g ve çıkış veri hızı robotik uygulamalarda, insan hareketi, köprü ve türbin izleme için uygun olan 100 Hz olarak ayarlanıp bilgi alabilmek için I2C protokolü seçilmiştir.

#### **2.1.4 BLE Beacon**

Bu çalışmada titreşim sinyali elde edildikten sonra kablosuz olarak farklı bir noktaya iletebilmek için Beacon kullanılmıştır. Beacon, BLE protokolü üzerinde çalışan, küçük veri paketlerini düzenli zaman aralıklarında yayınlayan BLE aygıtlardır. Çok küçük boyuta sahip olup yapılandırmalarına bağlı olarak bir saat pili ile bir yıldan fazla çalışabilirler [31].

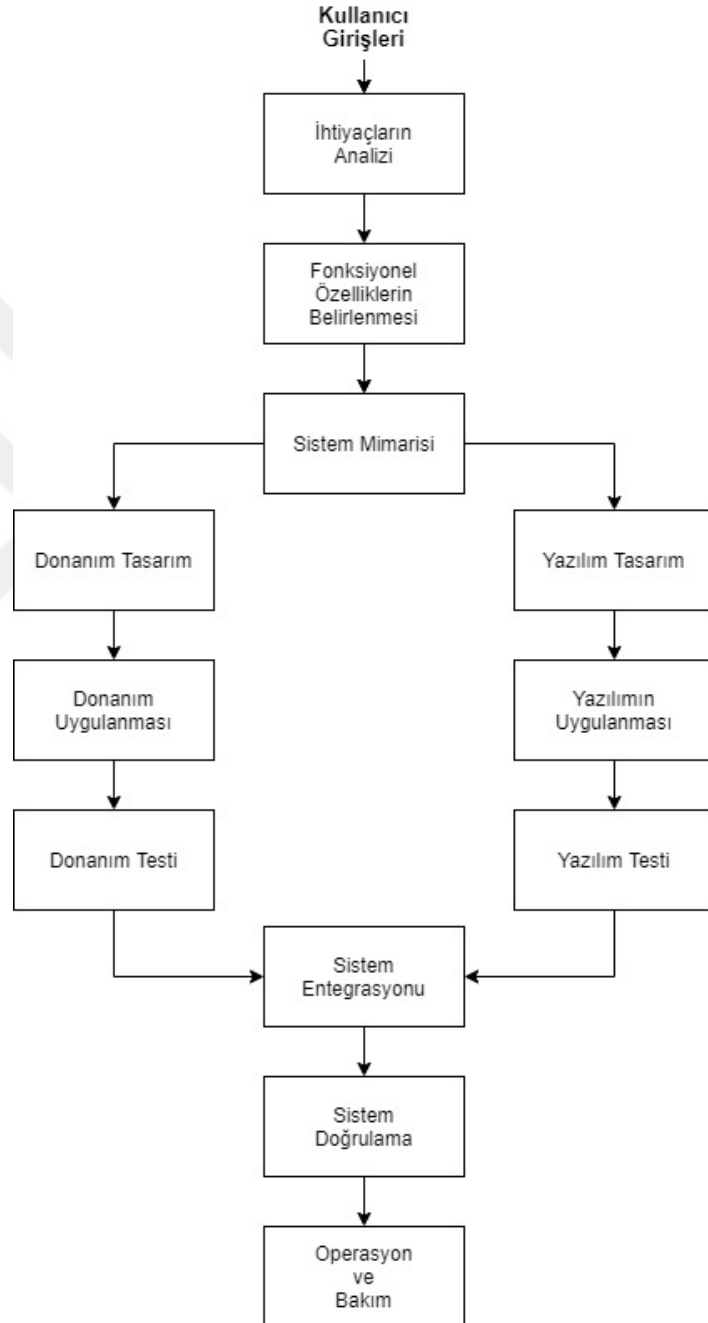
Beaconlar çalışma sürelerinin çoğunu uykuda bırakarak optimum güç tüketimine ulaşırlar ve yalnızca önceden belirlenmiş aralıklarında yayın yapmak için uyanırlar [32]. Bu zaman aralıkları uygulamanın amacına bağlı olarak birkaç saniye ile 100ms arasında ayarlanabilir.

## **2.2 Gömülü Sistem Tasarım ve Geliştirme Süreci**

Bir gömülü sistemin geliştirilmesinde gereksinim tanımı yapmak, sistemin özelliklerini belirlemek, fonksiyonel tasarımları oluşturmak, mimari tasarım

yapmak ve ilk örneğini oluşturmak sistemin geliştirilmesinde önemli adımlardır [33].

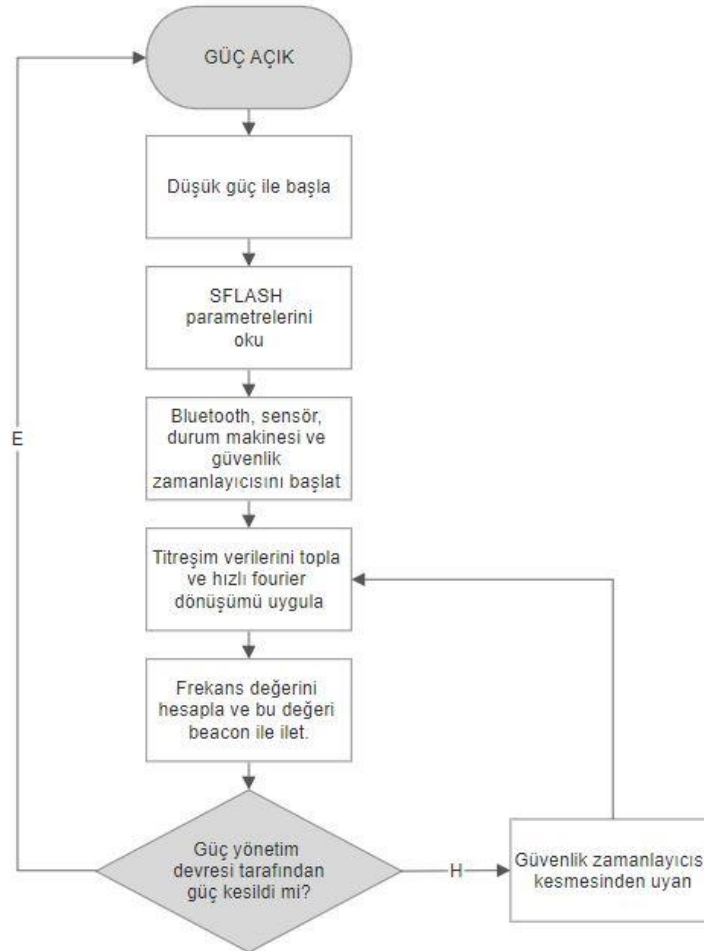
Bu bölümde titreşim algılayan ve analiz eden gömülü sistemin geliştirme sürecinde temel alınan ürün geliştirme sürecinin temel yaklaşımından bahsedilecektir. Şekil 2.8’de tasarlanan gömülü sistemin geliştirme sürecinin ana öğeleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.7** Bir gömülü sistem geliştirme süreci

Bu geleneksel tasarım yaklaşımı, donanım ve yazılım bileşenlerini ayrı ayrı tasarlayıp ikisini bir araya getirerek sistemi test etmek ve hata ayıklamak için zaman ayırma şeklinde diyagramın iki tarafını ayrı ayrı yürütmüştür.

Bu çalışmada tasarlanan gömülü sistemde kullanılan güç yönetim devresi işlemciyi belirli aralıklarla çalıştırır. Enerjilenen işlemci ile yapı üzerinden titreşim sinyalleri elde edilir. Bu sinyaller FFT yöntemiyle işlenir ve analiz edilir. Veriler analiz edildikten sonra frekans değeri sunucuya düşük enerjili bluetooth teknolojisini kullanan beacon tarafından kablosuz iletilir. Daha sonra güç yönetim devresi tarafından işlemcinin enerjisi kesilip kesilmemesine göre işlem tekrar etmektedir. Böylece hem enerjinin etkili bir şekilde kullanılması hem de yapının durumunu uzaktan gerçek zamanlı izlenmesine olanak sağlanmıştır.



**Şekil 2.8** Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin akış diyagramı

## Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Gömülü Sisteminin Yazılımına Ait Bileşenlerinin İncelenmesi

---

Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin yazılım kısmını gerçekleştirirken iki ana program kullanılmıştır. Bunlardan ilki titreşim sinyalinin frekansını analiz etmek için diğeri mikrokontrolör üzerinde yazılım yapmak için kullanılmıştır.

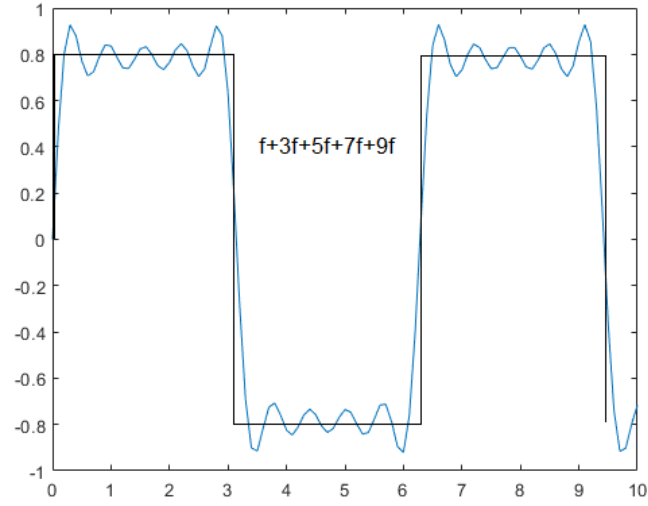
### 3.1 Frekans Analizi

Sayısal işaret işleme; sayı dizileri şeklinde ifade edilen işaretlerden gerekli olan bilgileri elde etmek için işaretleri inceleyen bir alandır. Yazılım yoluyla işaret işleme uygulamaları daha güvenilir ve kolay olmakla birlikte daha esnek bir yapıya sahiptir [34]. Bazı durumlarda zaman alanında elde edilen işaretlere bakarak ne anlama geldikleri, taşıdığı bilgiyi anlamak mümkün olmayabilir. Dolayısıyla zaman alanında işaret işlemenin zor olduğu durumda, işaretler frekans alanına dönüştürülerek işlemler yapılır. Frekans alanına dönüştürülen işaretler daha açık bir şekilde gözlenir ve zaman alanına göre daha kolay bir şekilde işlenir [35].

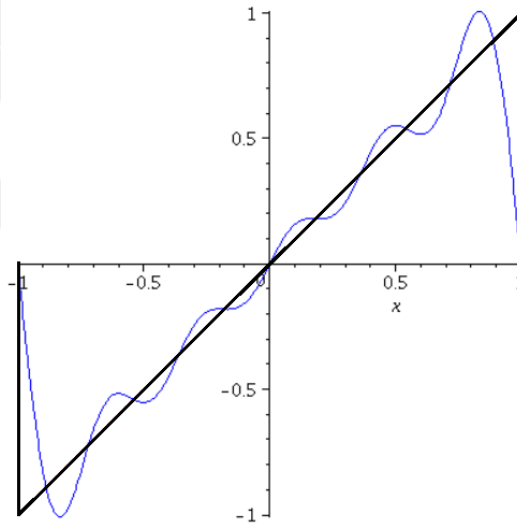
#### 3.1.1 Fourier Yaklaşımı

Sistem ve işaretleri analiz etmek için kullanılan önemli araçlardan bir tanesi de Fourier yaklaşımıdır. Fourier, 1768 yılında Joseph Fourier tarafından sinyallerin sinüzoidal fonksiyonların toplamı cinsinden yazılması olarak önerilmiştir. Yani işaretleri farklı frekans ve genlikteki sinüzoidal bileşenleri şeklinde göstermek mümkündür. Bu dönüşüm sayesinde frekans bölgesine taşınan işaretlerde, zaman alanında gözlemlenemeyen birçok olay frekans alanında gözlemlenebilir.

Aşağıda şekillerde kare ve testere dişli sinyallerin oluşumu gösterilmiştir (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2).



**Şekil 3.1** Kare dalga sinyal



**Şekil 3.2** Testere dişli sinyal

Fourier serisi periyodik bir  $f(t)$  fonksiyonunun kosinüs ve sinüslerin sonsuz toplamı biçiminde matematiksel gösterimi (3.1) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_k \sin n\omega t) \quad (3.1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\begin{aligned}
f(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos n\omega t + b_k \sin n\omega t) \\
&= \frac{a_0}{2} + (a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t) + (a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t) \\
&\quad + (a_3 \cos 3\omega t + b_3 \sin 3\omega t) + \dots
\end{aligned}$$

Fourier serisi hesaplamaları harmonik analiz olarak bilinir ve bir fonksiyonun basit terimlerine ayrılarak çözülmesi ve yeniden birleştirilip orijinal problemin çözümü için kullanışlı bir yoldur [36].

Denklem (3.1) eşitliğinde  $f(x)$  fonksiyonu sinüs ve kosinüslerin toplamı olan bir seri şeklinde ifade edilmiştir. Denklemde yer alan  $\omega$  temel frekans ve  $a_0, a_k$  ve  $b_k$  Fourier katsayılarıdır. Bu katsayılar aşağıdaki (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitliği ile ifade edilir.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.2)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.3)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad (3.4)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \quad (3.5)$$

Bir sinyal sürekli ya da kesikli olabilir ve periyodik ya da periyodik olmayabilir. Bu iki özelliğin birleşimi, aşağıda açıklanan ve Tablo 3-1'de gösterilen dört kategoriye oluşturur [37].

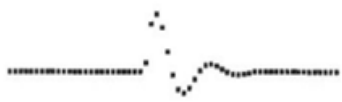
Periyodik olmayan sürekli sinyaller, bu sinyaller periyodik bir düzende tekrar etmeden hem pozitif hem de negatif sonsuzluğa uzanır. Bu tür bir sinyal için Fourier dönüşümü, basitçe Fourier dönüşümü olarak adlandırılır.

Periyodik sürekli sinyaller, sinüs dalgaları, kare dalgalar ve negatiften pozitif sonsuza kadar kendisini düzenli bir şekilde tekrarlayan herhangi bir dalga formunu içerir. Fourier dönüşümünün bu sürümüne Fourier serisi denir.

Periyodik olmayan ayrık sinyaller, negatiften pozitif sonsuza kadar periyodik bir şekilde tekrarlayan ayrık sinyallerdir. Bu Fourier dönüşümü sınıfına bazen Ayrık Fourier Serisi denir ancak en sık Ayrık Fourier Dönüşümü olarak adlandırılır.

Periyodik ayrık sinyaller, negatiften pozitif sonsuza kadar periyodik bir şekilde tekrarlayan ayrık sinyallerdir. Bu Fourier dönüşümü sınıfına bazen Ayrık Fourier Serisi denir, ancak en sık Ayrık Fourier Dönüşümü olarak adlandırılır.

**Tablo 3.1** Fourier dönüşüm türleri

| Dönüşüm Türleri                                                               | Örnek Sinyal                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fourier Dönüşüm</b><br>Sürekli ve periyodik olmayan sinyaller              |  |
| <b>Fourier Serileri</b><br>Sürekli ve periyodik sinyaller                     |  |
| <b>Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü</b><br>Ayrık ve periyodik olmayan sinyaller |  |
| <b>Ayrık Fourier Dönüşümü</b><br>Ayrık ve periyodik sinyaller                 |  |



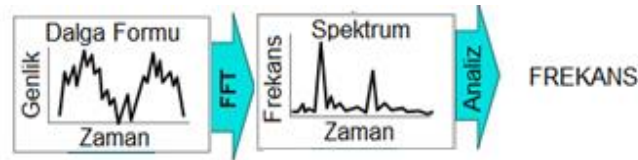
### 3.1.2 Hızlı Fourier Dönüşümü

Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistem tasarımında ivmeölçer sensöründen elde edilen titreşim sinyallerine Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak frekans analizi yapılmıştır. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) farklı veya yeni bir Fourier dönüşümü değildir. Ayırık Fourier Dönüşümünü daha verimli bir şekilde hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Örneğin,  $N = 2^{10}$  noktalı bir sinyalin dönüşümü FFT kullanarak 100 kat daha hızlı hesaplanabilir [38].

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-jwn} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.6)$$

Dönüşümün her  $k$  değeri için  $N$  adet karmaşık çarpma işlemi ve  $N-1$  adet karmaşık toplama işlemi yapılması gerekmektedir. Bu ise  $N$  noktaya sahip bir Ayırık Fourier dönüşümü için  $N^2$  ile orantılı bir hesap yükü oluşturacaktır [39]. Hızlı Fourier dönüşümü, Ayırık Fourier hesabı için faz faktörünün periyodik ve simetri özelliğinden yararlanarak hızlı bir hesaplama sağlamaktadır. MATLAB programı ile Fourier dönüşümünün gerçekleştirilmesi EK-A'da örnek üzerinden gösterilmiştir.

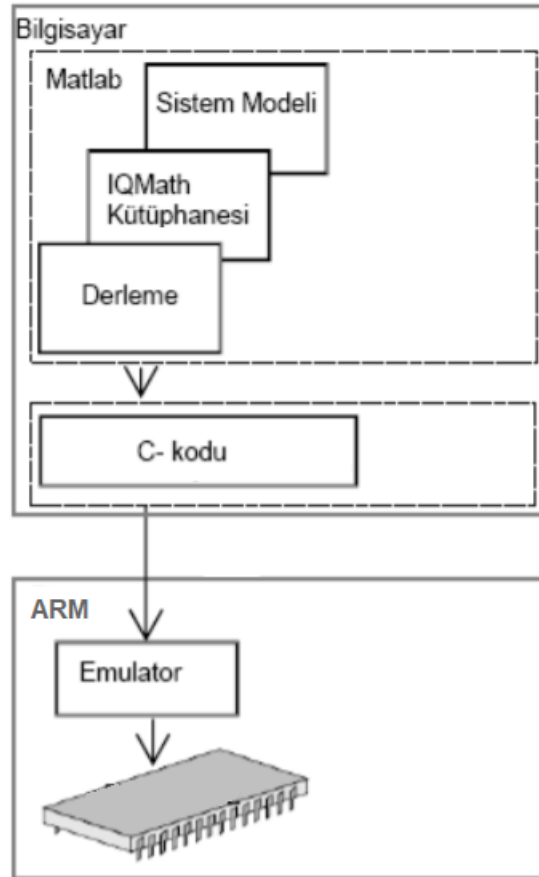
Bu projede ivmeölçer sensörü ile elde edilen titreşim sinyalleri ile MATLAB'de frekans analizi yapıldı. FFT yardımıyla oluşturulan frekans tespit algoritması, MATLAB'in "Code Generation" eklentisi ile sistemde kullanılan işlemci çekirdeğine uygun bir şekilde C koduna dönüştürüldü. Oluşturulan bu C kodunun mikrokontrolün kullandığı IDE ile sistemin tasarıma uygun bir şekilde kullanılması sağlandı. Titreşim sinyalinden frekans tespiti yapmak için uygulanan genel akış diyagramı şekil 3.3 'de gösterilmiştir. (Ek-B'de frekans tespit fonksiyonu verilmiştir.)



**Şekil 3.3** Frekans tespitinin genel akış diyagramı

### 3.1.3 Otomatik Gömülü Kod Üretimi

MATLAB mühendisler ve bilim adamları için özel olarak tasarlanmış bir programlama geliştirme ortamıdır. Blok ya da script ile oluşturulan algoritmalar mikrokontrolöre uygun platform seçilerek tasarımları makine diline çevirmekte, gerçekte uygulanması ve tasarım doğrulamasını çok hızlı bir şekilde yapmaya olanak sağlamaktadır [40].



**Şekil 3.4** MATLAB ile otomatik gömülü kod üretimi akış diyagramı

Hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak oluşturulan frekans tespit algoritması MATLAB yardımı ile C kodlarına otomatik olarak dönüştürülmektedir. Oluşturulan bu kodlar PSoC Creator yazılım geliştirme ortamına aktarılarak diğer destek kütüphaneleri ile birlikte tek bir proje dosyası içinde derlenmekte ve Cypress'in emülatörü ile mikrokontrolöre yüklenmektedir. Bu çalışma içerisinde otomatik kod üretim araçlarını üçüncü parti uygulamalar ile destekleyerek kullanılan platform için tasarımın daha verimli olması sağlanmıştır.

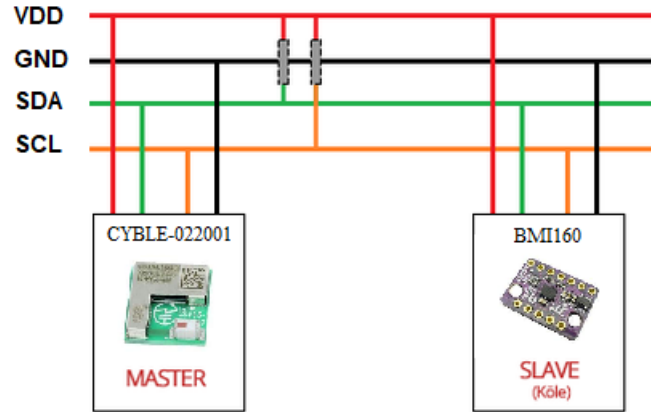
## 3.2 Haberleşme Protokolleri

Titreşim algılayan ve analiz eden gömülü sistem projesinde ivmeölçer sensörü ve mikrokontrolör tarafından elde edilen frekans değerinin kablosuz iletimi için belirli veri iletim protokolleri uygulanmıştır. Bu protokoller; I2C haberleşmesi ivmeölçer sensörü, için ve BLE Beacon kablosuz veri iletimi için tercih edilmiştir.

### 3.2.1 I2C İletişim Protokolü

I2C iletişim protokolü 1980'lerde Philips Semiconductor tarafından bilgi alışverişi bulunmak üzere geliştirilmiş iyi bilinen bir seri haberleşme protokolüdür. Sadece SDA ve SCL'den oluşan iki kablo ile diğer protokollerden daha basit ve ucuz bir şekilde kayıpsız veri iletme yeteneğine sahip merkezi işlemci ile harici entegrelerini birbirine kolayca bağlamak için geliştirilmiştir. Multi-master ve multi-slave protokoldür, ancak single-master ve multi-slave kombinasyonu çoğunlukla kullanılır [41].

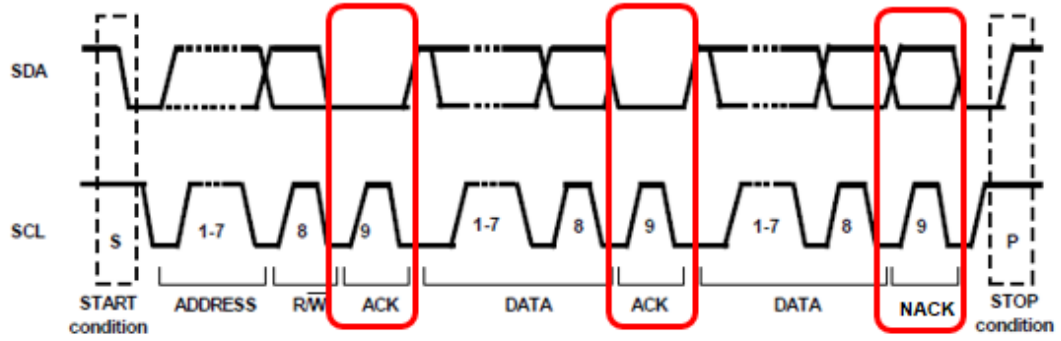
I2C haberleşme arayüzünde normal mod (100 kbps), hızlı mod (400kbps) ve yüksek hızlı mod (3400kbps) olmak üzere üç çalışma durumu vardır. Bu çalışma durumlarına göre iletişim hızı farklılık göstermektedir. Bu projede mikrokontrolör, ivmeölçer sensörü ile 100 kbps veri iletim hızında I2C üzerinden haberleşmektedir.



**Şekil 3.5** Mikrokontrolör ile ivmeölçer sensörünün I2C bağlantı şekli

I2C haberleşme protokolünde, seri saat sinyali (SCL) ve seri veri giriş/çıkış (SDA) uçları ile seri haberleşme gerçekleşmektedir. SDA hattı ile veri aktarımı ve SCL hattı sayesinde iletişim içerisinde senkronizasyon sağlanmaktadır. Bu protokolde master

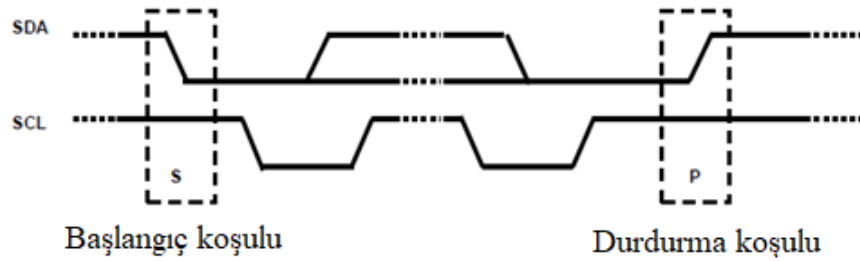
(ana) olan entegre SCL üzerinden gönderdiği saat sinyali ile iletişimi kontrol eder. Slave konumunda olan entegre ise sadece veri alış verişi gerçekleştirir. Şekil 3.6'da I2C haberleşmesinin veri iletimi sinyal olarak gösterilmektedir.



**Şekil 3.6** I2C haberleşme protokolü [42]

I2C haberleşmesinin temel adımlar aşağıda tanımlanmıştır.

1. Başlangıç Koşulu: SCL "H" olduğunda, SDA hattı "H" den "L" ye değişir.
2. Durdurma Koşulu: SCL "H" olduğunda, SDA hattı "L" den "H" ye değişir.



**Şekil 3.7** I2C haberleşme protokolünde start-stop koşulu [42]

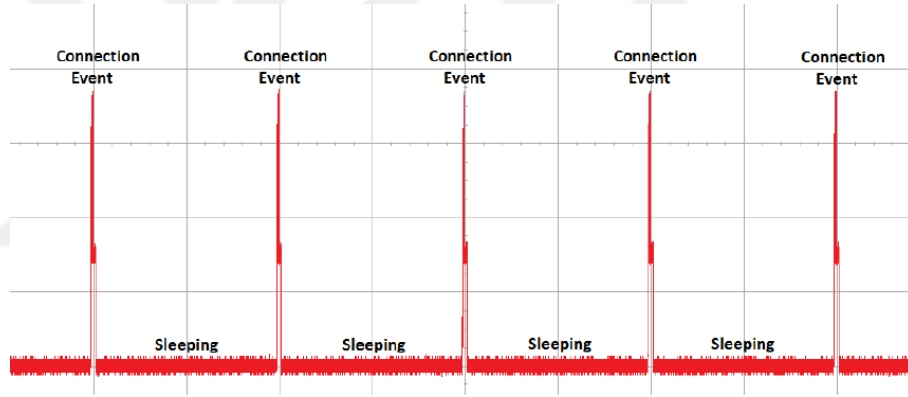
3. Slave adresi ve Okuma/Yazma biti: Hedef slave cihazın adresi 7 bit olup geri kalan bir bit ise verinin yönünü tamamlayan Okuma/Yazma bitidir.
4. Veri Aktarımı: 8 bit veri, MSB ilk önce ve LSB en sonunda iletilecek şekilde SDA hattı üzerinden iletilir.

### 3.2.2 BLE Beacon

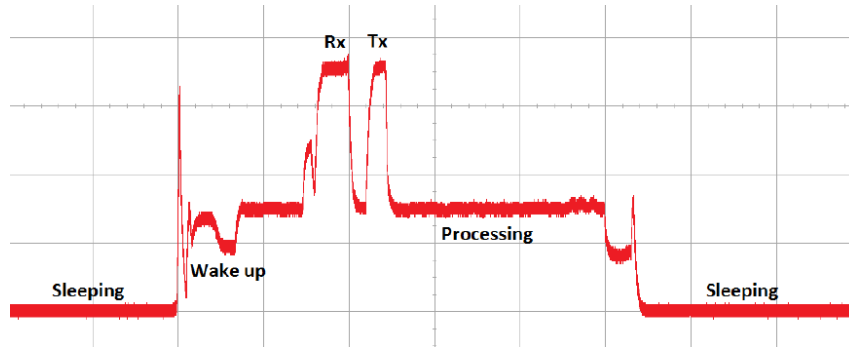
Bluetooth, IEEE 802.15.1 olarak standartlaştırılmış 2,4GHz - 2,48GHz frekans bandında çalışan bir kablosuz veri aktarım teknolojisidir. BLE (Bluetooth Low Energy) olarak kısaltılmış olan ise düşük güçlü uygulamalar için optimize edilmiş bir Bluetooth sürümüdür. Frekans analizi tespit edildikten sonra bu frekans değeri BLE beacon kablosuz haberleşme protokolü ile farklı bir noktaya iletilmektedir.

Beacon düzenli aralıklarla yakındaki cihazlara az miktarda veri yayınlayan özel bir BLE cihazıdır. Diğer BLE cihazlarının aksine, beacon normal çalışması sırasında cihazlar arasında bağlantı kurmaz ve herhangi bir veri almaz. Bu nedenle beacon bluetooth teknolojisi içinde en az enerji tüken sürümdür.

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da beacon cihazının bağlantı sırasında ve tek bir bağlantı durumundaki zamana karşı akım tüketim şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.8 BLE Bağlantısı sırasında zamana karşı akım tüketimi [43]

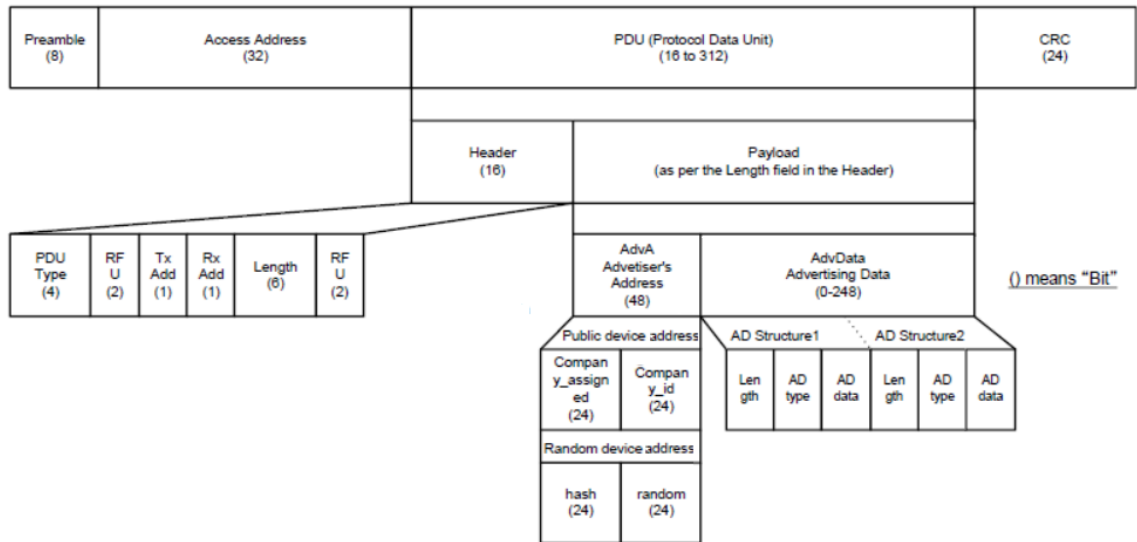


Şekil 3.9 Tek Bir bağlantı etkinliğinde zamana karşı akım tüketimi [43]

Bir bluetooth cihazının güç tüketimini tek bir metrik kullanarak karşılaştırmak mümkün değildir. Örneğin tepe akımlarına bakarak çektiği toplam güç hesaplanamaz. Tüketilen toplam akımın doğru bir ölçümünü elde etmek için birden çok parametre dikkate alınmalıdır. Ancak bluetooth sürümleri içerisinde en az enerji tüketen beacon modelidir.

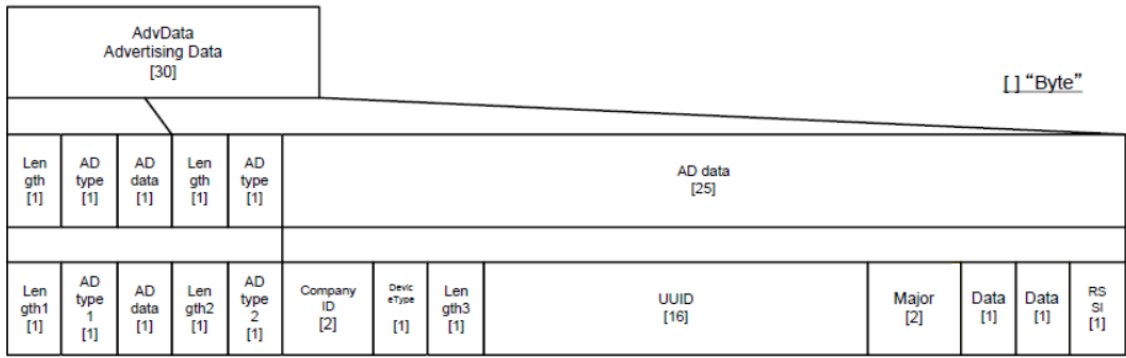
Bu haberleşme paketleri 30 bayt'tır. Aşağıdaki şekilde BLE yayın kanalının paket formatının link layer katmanı verilmiştir. Bu katman "Preamble", "Access Address", "PDU (Protocol Data Unit)" ve "CRC" içerir.

- Preamble, "10101010b." olarak set edilmelidir.
- Access Address, "10001110100010011011111011010110b (0x8E89BED6)." olarak set edilmelidir.
- PDU "Header" ve "Payload." içerir.



**Şekil 3.10** BLE Beacon paket yapısı "Advertising Data" ya aittir.

Beacon cihazlarından yayılan Bluetooth sinyalleri onaltı bayt UUID (Universal Unique Identifier), iki bayt üst adres (major), iki bayt alt adres (minor) ve bir bayt sinyal gücü bilgilerini içermektedir. UUID üretici bilgisini içerir ve tüm ağı tanımlamak için kullanılır. Major ve Minor adresler ise, örneğin bir binaya beacon yerleştirirken UUID olarak bina bilgisini, major olarak bulunduğu kat bilgisini, minor olarak ise bulunduğu oda numarası verilebilir. Böylelikle işaretçinin konumu kolayca tanımlanabilir ve takip edilebilir [44].



**Şekil 3.11** BLE Beacon paket yapısı

Bu çalışmadaki BLE Beacon için başlangıçta paket yapısı yazılım içerisinde Tablo 3-2'deki gibi olacak şekilde ayarlandı. Gömülü sistemin tespit ettiği frekans değeri paket yapısındaki "Data" içerisine yerleştirilerek kablosuz olarak bu formatta iletilmesi sağlandı.

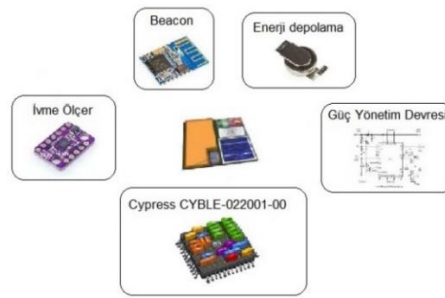
**Tablo 3.2** BLE Beacon başlangıçtaki paket yapısı

|                   |                                            |
|-------------------|--------------------------------------------|
| Length1           | 0x02                                       |
| AD type1          | 0x01                                       |
| AD data           | 0x04                                       |
| Length2           | 0x1A                                       |
| AD type2          | 0xFF                                       |
| Company ID        | 0x004C                                     |
| Device type       | 0x02                                       |
| Length3           | 0x15                                       |
| UUID1             | 00050001-0000-1000-8000-00805F9B0131 [hex] |
| Major2            | 0x000A                                     |
| Data              | Frequency_1                                |
| Data              | Frequency_2                                |
| RSSI4 0xC3        | [-61dBm]                                   |
| Transmitter Power | 3 dBm                                      |

Beacon paket yapısındaki bazı parametreler yazılım içerisinde set edildi. Ancak bu parametrelerden bazıları USB ile programlanabilir. USB ile programlanabilecek bu parametreler Ek-C'te verilmiştir.

## Titreşimi Algılayan ve Analiz Eden Gömülü Sistemin Donanımı

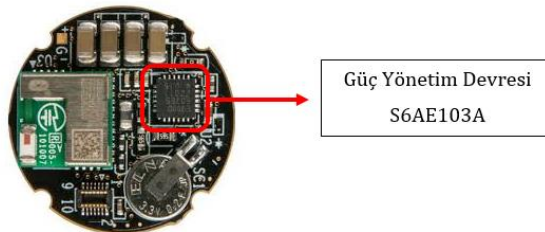
Bu bölümde çalışmada kullanılan donanımlar incelenecek ve özelliklerinden bahsedilecektir. Ayrıca güç yönetim devresi tarafından da dalga formlarına bakılacaktır. Bu gömülü sistemi tasarlarken minimum enerji tüketmek hedef alındığından, sistemden kullanılacak donanımlarda bu doğrultuda seçilmiştir.



**Şekil 4.1** Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin donanım blok şeması

### 4.1 Güç Yönetim Devresi

Güç yönetim entegre devreleri (PMIC), tek bir çip içerisinde güç kanalları ve güç yönetimi işlevlerini içeren entegre devrelerdir. Bu entegre devreler küçük pille çalışan aygıtlarda, sistem gücünün daha verimli kullanılması sağlar. Yüksek performanslı bu entegre devreler performansı en üst düzeye çıkarırken, çip üzerindeki sistemler SoC'ler, FPGA'lar ve uygulama işlemcileri gibi hesaplama açısından yoğun platformlar için sistem verimliliğini artırır. Ek olarak gücün verimli kullanılması ile pil ömrünün uzatılmasına yardımcı olur.



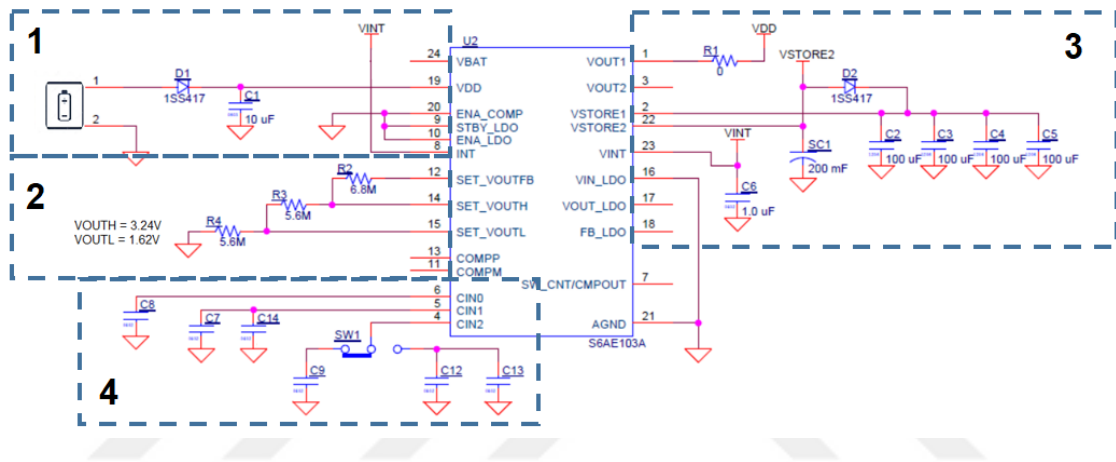
**Şekil 4.2** Sistem blok şeması



Bu çalışmada Cypress S6AE103A entegresi kullanılmıştır. Bu entegre devresi;

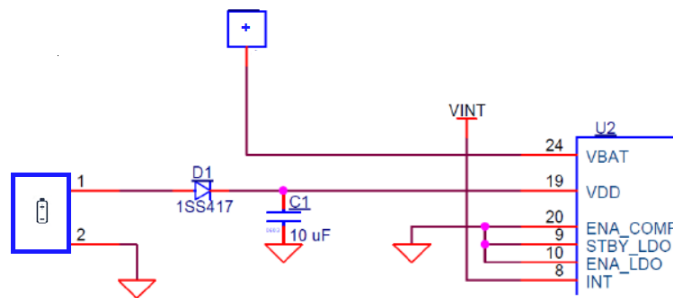
1. Güç giriş bloğu
2. Çıkış gerilimi ayarlama bloğu
3. Enerji depolama bloğu
4. Zamanlayıcı ayar bloğu

olmak üzere dört ana bloktan oluşmaktadır. Bu blok yapıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



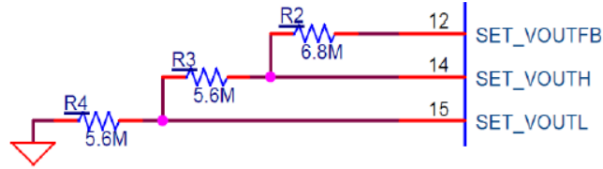
**Şekil 4.3** Cypress S6AE103A güç entegresinin bloklarının gösterimi

Güç giriş bloğu; iki güç giriş pinine sahiptir. Bunlar VDD ve VBAT'tır. Ayrıca dahili LDO (Low-Dropout Regulator), karşılaştırıcı (Comparator) ve kesme (Interrupt) girişi bulunmaktadır.



**Şekil 4.4** S6AE103A entegresinin güç giriş bloğu

Çıkış gerilimini ayarlama bloğu; VOUT1 ve VOUT2 çıkış gerilimleri SET\_VOUTH ve SET\_VOUTL pinlerine bağlı dirençler değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Çıkış geriliminin en yüksek ve en düşük limiti bu dirençlere bağlıdır.



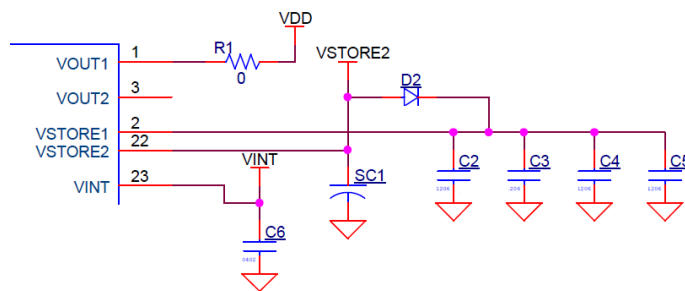
**Şekil 4.5** S6AE103A entegresinin çıkış gerilimi ayarlama bloğu

VOUT en yüksek ve en düşük gerilimi aşağıdaki (4.1) ve (4.2) denklemleri ile hesaplanır.

$$V_{VOUTH} = \frac{57.5 \times (R3 + R4)}{11.1 \times (R2 + R3 + R4)} \quad (4.1)$$

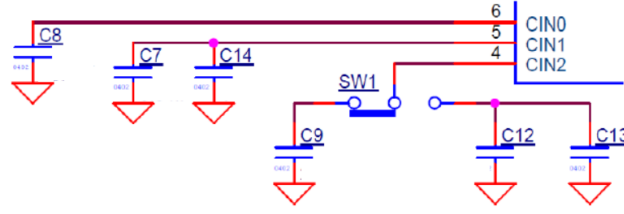
$$V_{VOUTL} = \frac{57.5 \times R3}{11.1 \times (R2 + R3 + R4)} \quad (4.2)$$

Enerji depolama bloğu; iki adet yük pinine sahiptir. Bu pinler ile hem yüksek kapasitör hem de düşük kapasitör şarj edilir.



**Şekil 4.6** S6AE103A entegresinin enerji depolama bloğu

Zamanlayıcı bloğu; VOUT pinlerini kontrol etmek için üç tane kapasite vardır. Bu kapasite değerlerini değiştirerek çıkış geriliminin çalışma aralığı ayarlanabilmektedir.



**Şekil 4.7** S6AE103A entegresinin zamanlayıcı bloğu

(Tablo 4.1) kullanılan entegrenin zamanlayıcı bloğuna ait pinlerin açıklaması yapılmıştır.

**Tablo 4.1** Zamanlayıcı bloğundaki pinlerin açıklaması

| Pin  | Mod                     | Açıklama  |
|------|-------------------------|-----------|
| CIN0 | -                       | T0 süresi |
| CIN1 | -                       | T1 süresi |
| CIN2 | Anahtar birinci konumda | T2 süresi |
|      | Anahtar ikinci konumda  | T2 süresi |

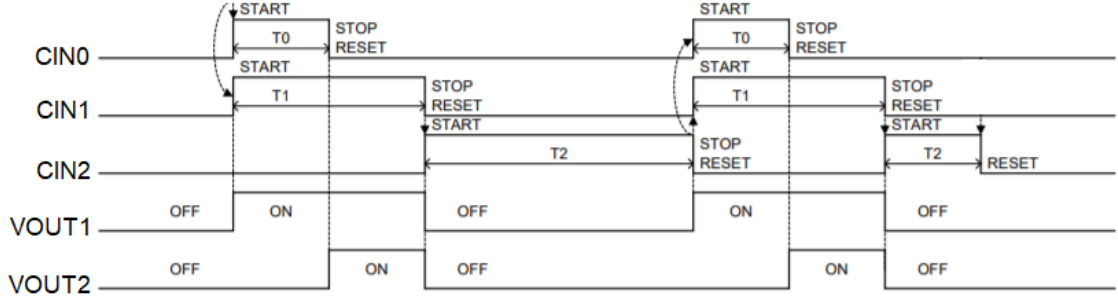
T0, T1 ve T2 süreleri kapasitans değerlerine göre ayarlanır. Aşağıdaki (4.3), (4.4) ve (4.4) denklemlerinde bu eşitlikler verilmiştir.

$$T0[s] = 0.5455 \times CIN0 \times 10^9 + 0.01327 \quad (4.3)$$

$$T1[s] = 0.5455 \times CIN1 \times 10^9 + 0.0132 \quad (4.4)$$

$$T2[s] = 0.5455 \times CIN2 \times 10^9 + 0.01327 \quad (4.5)$$

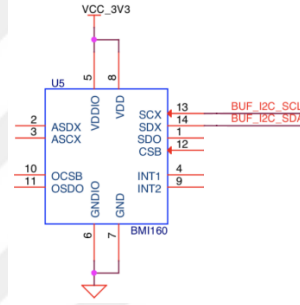
Şekil 4.8' de ayarlanan süreler ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki daha iyi açıklanmaktadır [45].



**Şekil 4.8** Zamanlayıcı modunun ayrıntılı dalga formu [45]

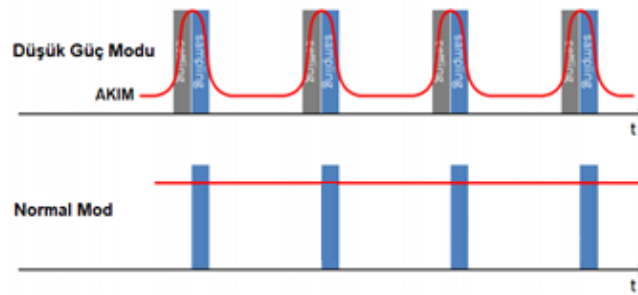
## 4.2 İvmeölçer Sensör

Bu çalışmada yapılardaki titreşimi sinyalini elde etmek için BOSH tarafından üretilen BMI160 ivmeölçer sensörü kullanılmıştır.



**Şekil 4.9** BMI160 ivmeölçer sensör

BMI 160 ivmeölçer sensörün iki tane çalışma modu bulunmaktadır. Bunlar düşük güç ve normal çalışma modlarıdır. Bu gömülü sistemin daha az enerji tüketmesini sağlamak için sensörün düşük güç modda sadece ivmeölçer sensörü aktif edilerek çalışması sağlanmıştır.

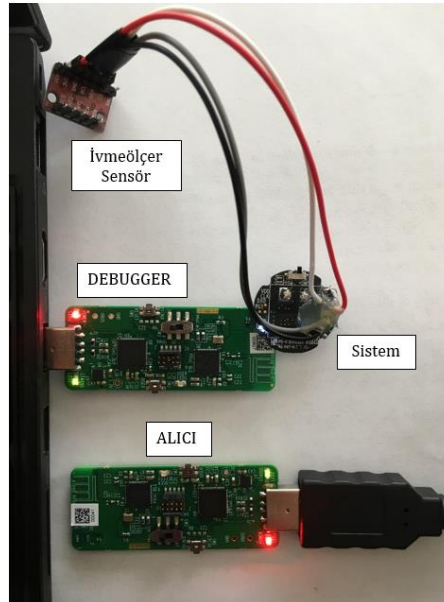


**Şekil 4.10** BMI160 sensörün düşük güç ve normal çalışma modunun karşılaştırılması [46]

Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin çalışmasını test etmek için iki farklı deney düzeneği ile çok sayıda test yapılmıştır. İlk deney için şekil 5.1'deki düzenek kurulmuştur. Bu deney ile gömülü sistemdeki ivmeölçer sensörüne farklı frekanslar üretecek şekilde dört farklı salınım hareketi uygulanmıştır. İkinci deney için sistem çamaşır makinesi üzerinde denenmiştir. Bunun için çamaşır makinesinin motoru 300, 400, 800 ve 1000rpm hızlarda dndrlerek denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşimin frekans değeri ölçülmüştür.

Bu salınım hareketleri Cypress PSoC Creator IDE yardımı ile debug edilerek titreşim sinyalleri kaydedilmiştir. Bu titreşim sinyalleri MATLAB yardımı ile zaman ve frekans düzleminde gösterimi gerçekleştirilmiş ve MATLAB'ın bulduğu frekans değeri ile tasarlanılan gömülü sistemin frekans değerleri karşılaştırılmıştır.

Son olarak ise tasarlanan gömülü sistem ile elde edilen frekans değerinin kablosuz olarak iletilebileceği mesafe değeri ölçülmüştür.



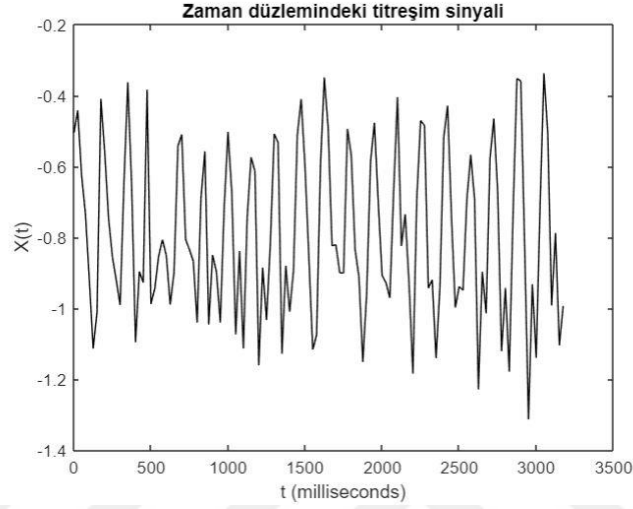
**şekil 5.1** Deney düzeneğinin genel görünümü

## DENEY-1

Deney-1’de gömülü sistemdeki ivmeölçer sensörüne farklı frekanslar üretecek şekilde dört farklı salınım hareketi uygulanmıştır.

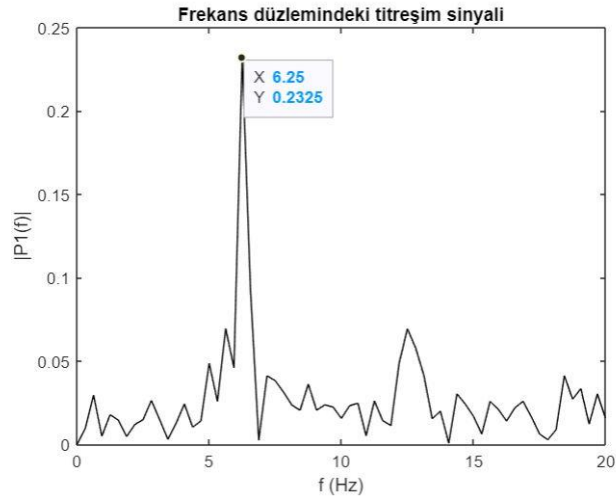
### TEST - 1

İvmeölçer sensörüne uygulanan salınım hareketinin zaman düzlemindeki gösterimi şekil 5.2’de gösterilmiştir.



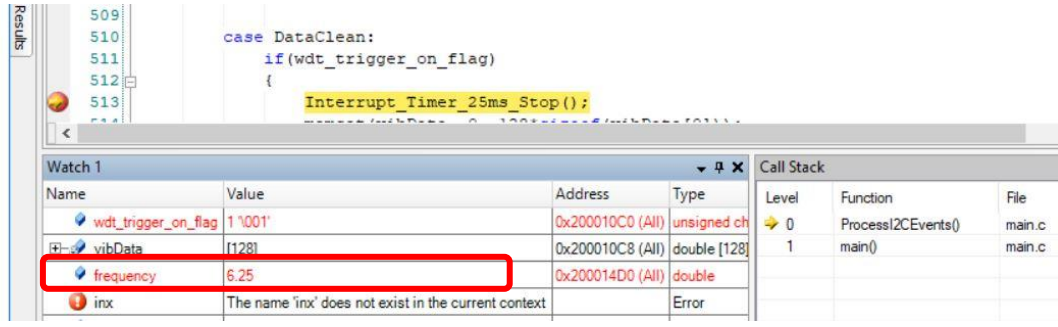
**Şekil 5.2** Uygulanan salınım hareketinin zaman düzlemindeki sinyali

Bu titreşim sinyaline MATLAB üzerinde oluşturulan frekans tespit algoritması uygulandığında elde edilen frekan değeri 6.25 olarak bulunmuştur.



**Şekil 5.3** Uygulanan salınım hareketinin frekans düzlemindeki sinyali

Tasarlamış olduğumuz gömülü sistemin bu titreşim sinyaline karşılık gelen frekans değerini ise 6.25 olarak tespit etmiştir.



**Şekil 5.4** Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin bu salınım hareketine karşılık gelen frekans değeri

Bu frekans değeri beacon ile kablosuz olarak iletildiğinde alıcı tarafından gelen paket yapısı Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

| Type       | ID0 | ID1              | ID2    | Sensor Data | Raw Data                                                     |
|------------|-----|------------------|--------|-------------|--------------------------------------------------------------|
| BLE Beacon | N/A | 81C91AB9-9996... | 0x0001 | 0x1388      | 0201041AFF4C00021581C91AB99996ABBA40868780200CEE0000011388ED |
| BLE Beacon | N/A | 81C91AB9-9996... | 0x0001 | 0x186A      | 0201041AFF4C00021581C91AB99996ABBA40868780200CEE000001186AD1 |

**Şekil 5.5** Kablosuz olarak iletilen frekans bilgisi

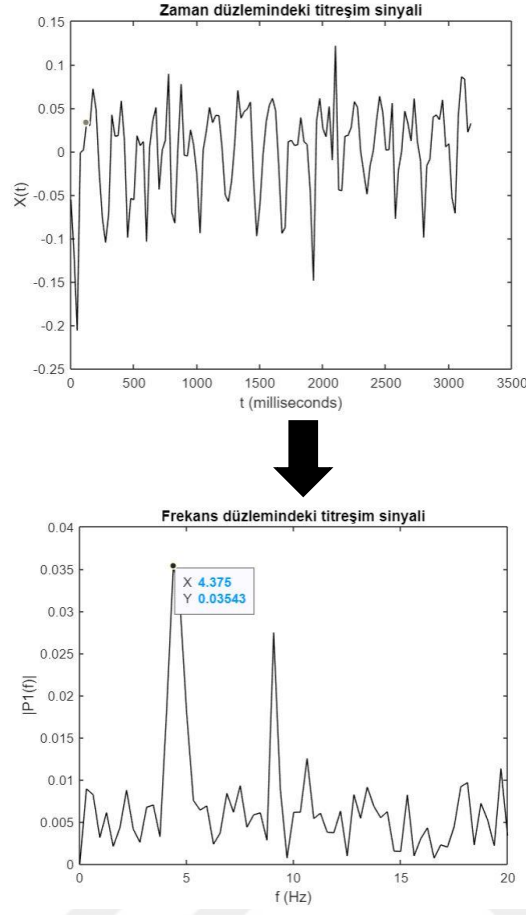
Tasarlanan gömülü sistem 2 bayt frekans bilgisini 0x186A olarak göndermiştir. Bu frekans değeri hexadecimal olup decimal sayı birimine dönüştürüldüğünde 6,250 olarak görünmektedir.

**Tablo 5.1** Test1 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması

|               | Tespit Edilen Frekans Değeri |
|---------------|------------------------------|
| MATLAB        | 6,25 Hz                      |
| Gömülü Sistem | 6,250 Hz                     |

Bu test işlemi toplamda dört farklı salınım hareketi uygulanarak tekrar edilmiştir. Sonuçları sırasıyla gösterilmiştir.

## TEST - 2



**Şekil 5.6** Test 2 işlemine ait sinyallerin gösterimi

**Tablo 5.2** Test2 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması

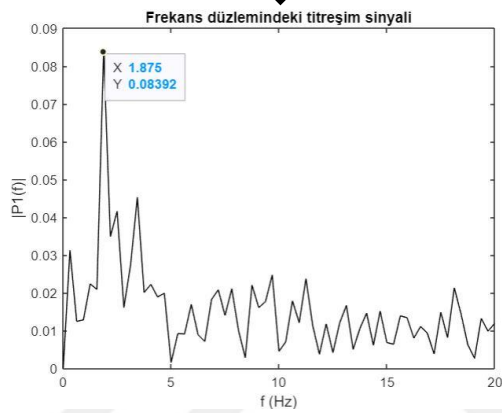
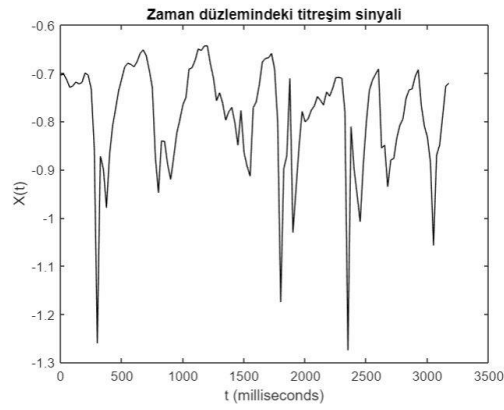
|               | Tespit Edilen Frekan Değeri |
|---------------|-----------------------------|
| MATLAB        | 4,375 Hz                    |
| Gömülü Sistem | 4,375 Hz                    |

| Watch 1             |                 |                  |               |
|---------------------|-----------------|------------------|---------------|
| Name                | Value           | Address          | Type          |
| highByte            | <optimized out> |                  | unsigned char |
| wdt_trigger_on_flag | 1 '001'         | 0x200010C0 (All) | unsigned char |
| vibData             | [128]           | 0x200010C8 (All) | double [128]  |
| frequency           | 4.375           | 0x200014D0 (All) | double        |

**Şekil 5.7** Test2 gömülü sistemin algıladığı frekans değeri



### TEST - 3



**Şekil 5.8** Test 3 işlemine ait sinyallerin gösterimi

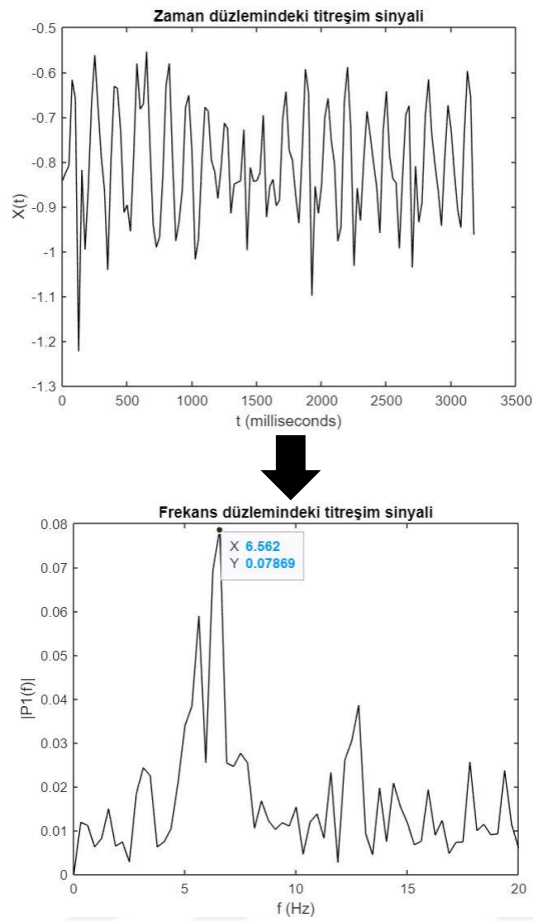
**Tablo 5.3** Test3 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması

|               | Tespit Edilen Frekan Değeri |
|---------------|-----------------------------|
| MATLAB        | 1,875 Hz                    |
| Gömülü Sistem | 1,875 Hz                    |

| Watch 1             |         |                  |
|---------------------|---------|------------------|
| Name                | Value   | Address          |
| wdt_trigger_on_flag | 1 '001' | 0x200010C0 (All) |
| vibData             | [128]   | 0x200010C8 (All) |
| frequency           | 1.875   | 0x200014D0 (All) |

**Şekil 5.9** Test3 gömülü sistemin algıladığı frekans değeri

## TEST - 4



**Şekil 5.10** Test 4 işlemine ait sinyallerin gösterimi

**Tablo 5.4** Test4 MATLAB ile tasarlanan gömülü sistemin tespit ettikleri frekans değerlerinin karşılaştırılması

|               | Tespit Edilen Frekan Değeri |
|---------------|-----------------------------|
| MATLAB        | 6,562 Hz                    |
| Gömülü Sistem | 6,562 Hz                    |

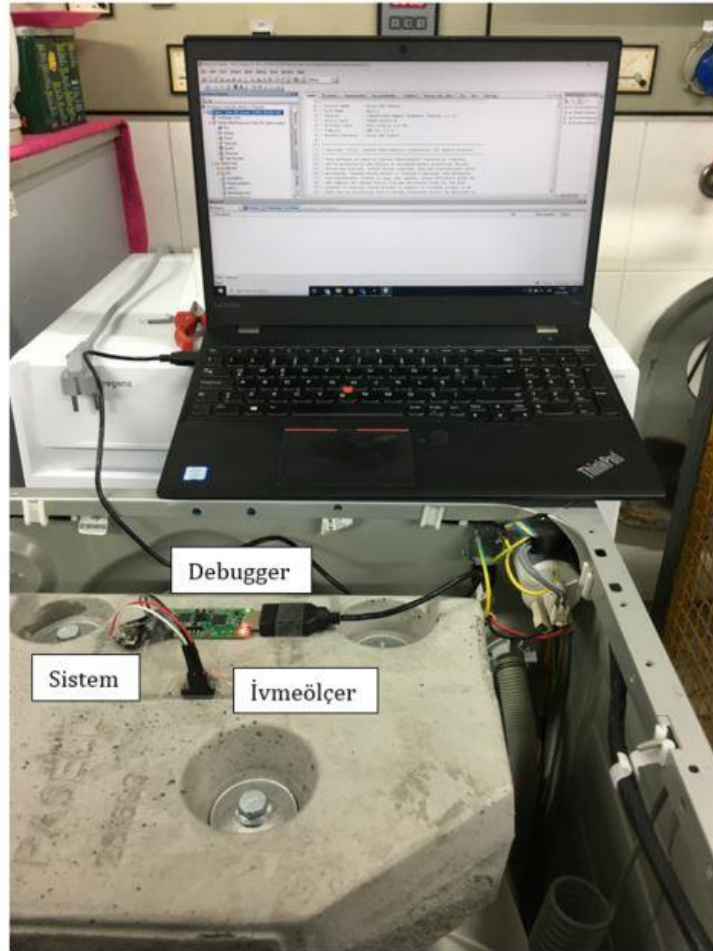
| Watch 1             |                                                      |                  |
|---------------------|------------------------------------------------------|------------------|
| Name                | Value                                                | Address          |
| wdt_trigger_on_flag | 1 '001'                                              | 0x200010C0 (All) |
| vibData             | [128]                                                | 0x200010C8 (All) |
| frequency           | 6.562000000000003                                    | 0x200014D0 (All) |
| inx                 | The name 'inx' does not exist in the current context |                  |

**Şekil 5.11** Test4 gömülü sistemin algıladığı frekans değeri

## DENEY-2

Bu deneyde çamaşır makinesi içerisinde bulunan denge taşı üzerinden titreşim analizi yapabilmek için şekil 5.12'de görüldüğü gibi bir düzenek kullanılmıştır. Bu deneyde amaç tasarımı yapıtığımız gömülü sistem ile birlikte çamaşır makinesinin 300, 400, 800 ve 1000rpm sıkma devirlerinde denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim frekansını tespit etmektir.

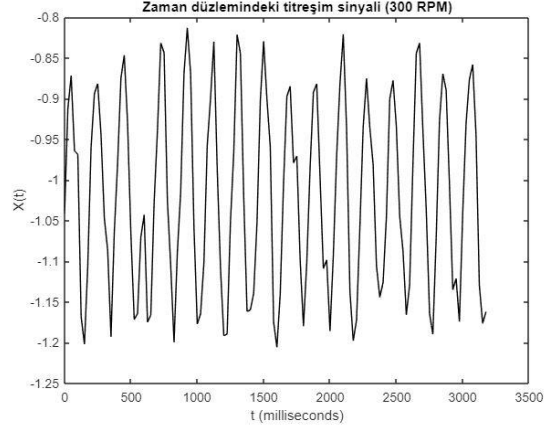
Bu salınım hareketleri de ilk deneyde olduğu gibi Cypress PSoC Creator IDE yardımı ile debug edilerek titreşim sinyalleri kaydedilmiştir. Bu titreşim sinyalleri MATLAB yardımı ile zaman ve frekans düzleminde gösterimi gerçekleştirilmiş ve MATLAB'ın bulduğu frekans değeri ile tasarlanılan gömülü sistemin frekans değerleri karşılaştırılmıştır.



şekil 5.12 Deney düzeneğinin genel görünümü

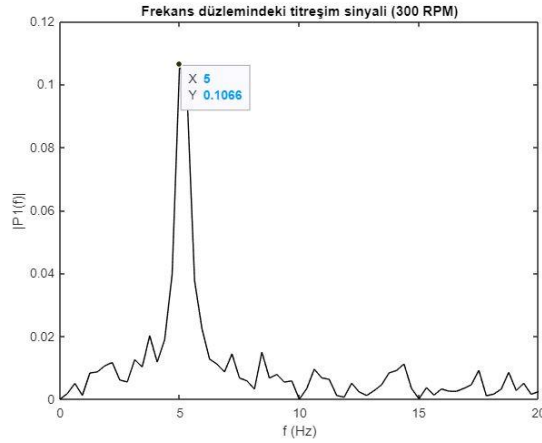
## TEST - 1

Çamaşır makinesinde bulunan motor 300 rpm sabit hızda döndürüldüğünde denge taşı üzerinde bulunan ivmeölçer sensöründen elde edilen titreşim sinyali Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.13** 300 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyali

Bu titreşim sinyaline MATLAB üzerinde oluşturulan frekans tespit algoritması uygulandığında elde edilen frekans değeri 5 Hz olarak bulunmuştur.



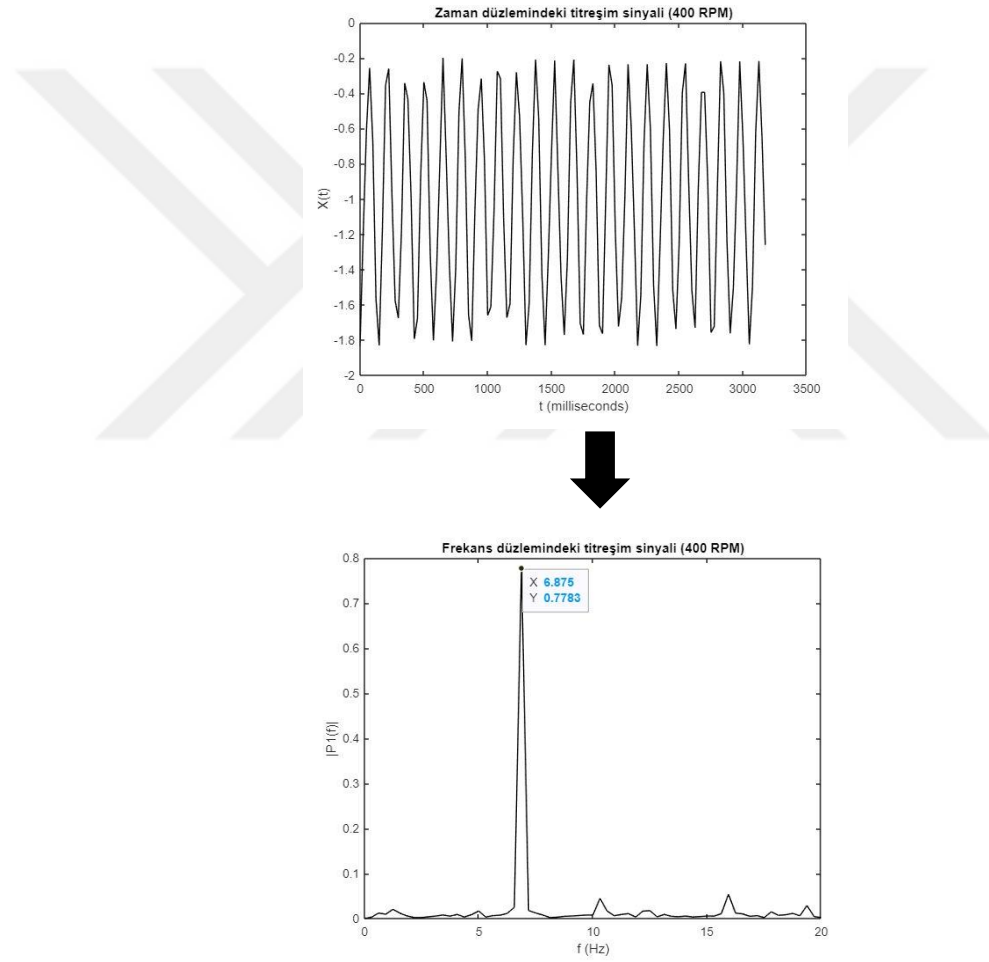
**Şekil 5.14** 300 rpm hızda dönen çamaşır makinesinden elde edilen titreşim sinyalinin frekans düzleminde gösterimi

Tasarlamış olduğumuz gömülü sistem ise 300 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu bu titreşim sinyaline karşılık gelen frekans değerini ise 5 Hz olarak iletmiştir.

| Watch 1             |                                                      |                  |              |
|---------------------|------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| Name                | Value                                                | Address          | Type         |
| wdt_trigger_on_flag | 1 '001'                                              | 0x200010C0 (All) | unsigned ch  |
| vibData             | [128]                                                | 0x200010C8 (All) | double [128] |
| frequency           | 5                                                    | 0x200014D0 (All) | double       |
| inx                 | The name 'inx' does not exist in the current context |                  | Error        |
| Click here to add   |                                                      |                  |              |

**Şekil 5.15** Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 300rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri

## TEST - 2

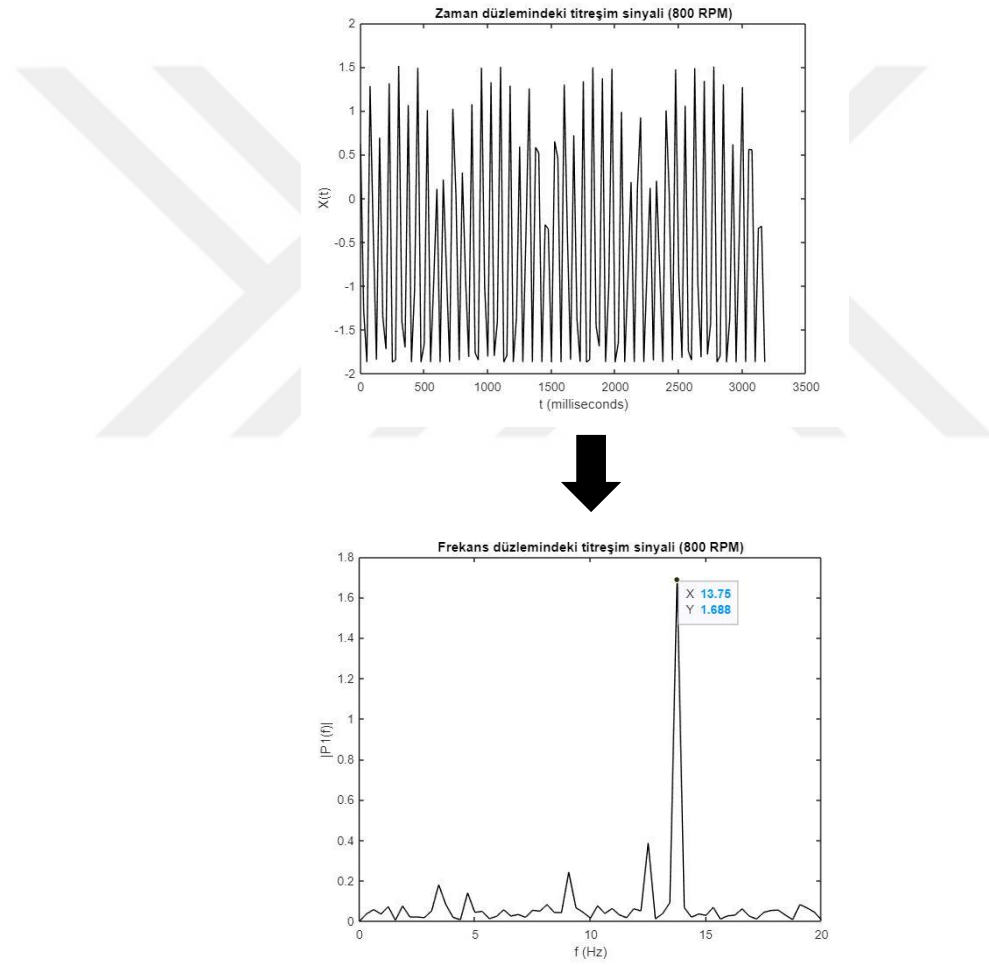


**Şekil 5.16** 400 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyalinin zaman ve frekans düzleminde gösterimi

| Watch 1                                                                                               |                                                      |                  |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------|---------------|
| Name                                                                                                  | Value                                                | Address          | Type          |
|  wdt_trigger_on_flag | 1 '001'                                              | 0x200010C0 (All) | unsigned char |
|  vibData             | [128]                                                | 0x200010C8 (All) | double [128]  |
|  frequency           | 6.875                                                | 0x200014D0 (All) | double        |
|  inx                 | The name 'inx' does not exist in the current context |                  | Error         |
| <a href="#">Click here to add</a>                                                                     |                                                      |                  |               |

**Şekil 5.17** Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 400rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri

### TEST – 3

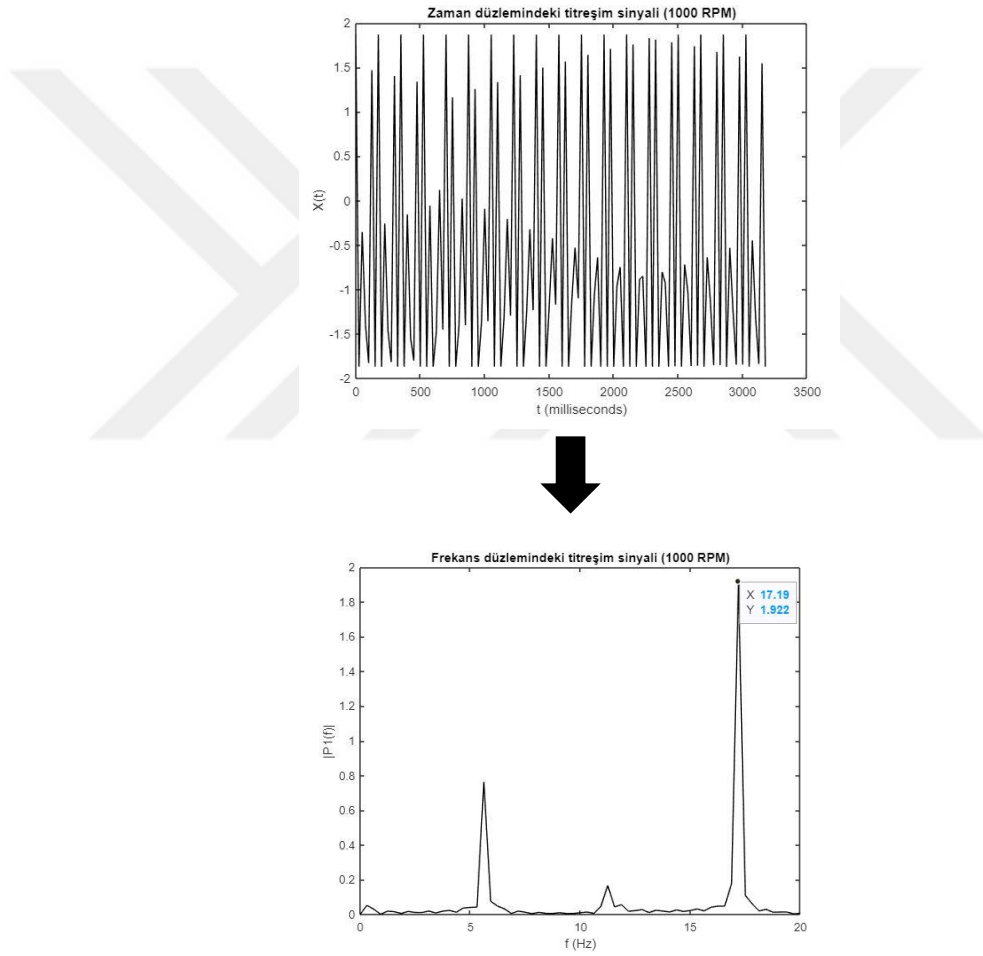


**Şekil 5.18** 800 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyalinin zaman ve frekans düzleminde gösterimi

| Watch 1                                                                                               |                                                      |                  |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| Name                                                                                                  | Value                                                | Address          | Type         |
|  wdt_trigger_on_flag | 1 '001'                                              | 0x200010C0 (All) | unsigned ch  |
|  vibData             | [128]                                                | 0x200010C8 (All) | double [128] |
|  frequency           | 13.75                                                | 0x200014D0 (All) | double       |
|  inx                 | The name 'inx' does not exist in the current context |                  | Error        |
| Click here to add                                                                                     |                                                      |                  |              |

**Şekil 5.19** Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 800rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri

#### TEST – 4



**Şekil 5.20** 1000 rpm hızda dönen çamaşır makinesinin denge taşı üzerinde oluşturduğu titreşim sinyalinin zaman ve frekans düzleminde gösterimi

| Watch 1             |                                                      |                  |              |
|---------------------|------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| Name                | Value                                                | Address          | Type         |
| wdt_trigger_on_flag | 1 '001'                                              | 0x200010C0 (All) | unsigned ch  |
| vibData             | [128]                                                | 0x200010C8 (All) | double [128] |
| frequency           | 17.187000000000001                                   | 0x200014D0 (All) | double       |
| inx                 | The name 'inx' does not exist in the current context |                  | Error        |
| Click here to add   |                                                      |                  |              |

**Şekil 5.21** Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin 1000rpm hızda dönen çamaşır makinesinin hareketine karşılık gösterdiği frekans değeri

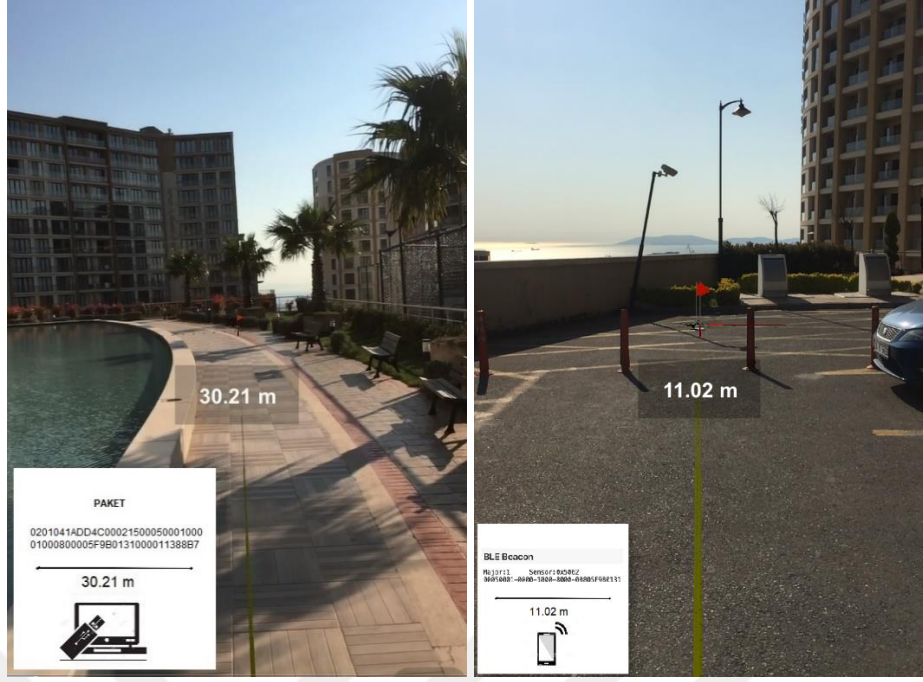
Dört farklı test sonucu elde edilen sonuçlar tablo 5.5’de gösterilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre tasarlanan titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin yüksek doğruluk ile çalıştığı görülmüştür.

**Tablo 5.5** Farklı motor hızlarında denge taşı üzerinde oluşan titreşim sinyalinin sonuçlarının karşılaştırılması

| Motor Hızı | MATLAB   | Tasarlanan Gömülü Sistem |
|------------|----------|--------------------------|
| 300 rpm    | 5 Hz     | 5 Hz                     |
| 400 rpm    | 6,875 Hz | 6,875 Hz                 |
| 800 rpm    | 13,75 Hz | 13,75 Hz                 |
| 1000 rpm   | 17,19 Hz | 17,187 Hz                |

Son olarak tasarladığımız titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistem Şekil 5.22’te görüldüğü gibi açık alanda test edilerek haberleşme mesafesinin sınır değerleri yaklaşık olarak belirlenmiştir.





**Şekil 5.22** Harici anten ile desteklenen bilgisayar ve telefonun sistem ile haberleşme mesafeleri

Titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin elde ettiği frekans değerini bilgisayarımızda bulunan harici alıcı sayesinde yaklaşık 30 metreye ve telefona yaklaşık 11 metreye kablosuz olarak iletebildiği görülmüştür. BLE Beacon yapılandırmasında verici gücü 3dBm olarak ayarlanmıştır. Sistemin çalışacağı alana uygun bir şekilde ve aynı zamanda batarya ömrü göz önüne alınarak bu verici gücü ayarlanabilir.

Yapıların analizi insanlara ve yapının kendisine zarar verebilecek olası kazaları önlemek için önemlidir. Yapının durumu hakkında bilgi alabilmenin bir yolu da titreşim analizi yapmaktır. Bunu gerçekleştirmek için kullanılan geleneksel teknikler yüksek güç tüketmekte ve maliyetleri oldukça fazladır.

Bu tezin amacı, titreşim analizini geleneksel tekniklere göre daha az enerji tüketerek, daha az donanıma ihtiyaç duyarak ve de daha az maliyetle tasarlamaktır. Bu amaca yönelik seçilen donanımlar minimum maliyet ve enerji tüketecek şekilde araştırılmış ve seçilmiştir. Ayrıca titreşim temelli analizde kullanılan geleneksel teknikler oldukça zaman alırken bu sistem ile titreşimi analiz etmek daha kısa sürmektedir.

Hedeflenen çıktı tasarlanan gömülü sistem ile gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukla yapıların durumunu izlenmesi hedeflenmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre tasarlanan titreşimi algılayan ve analiz eden gömülü sistemin yüksek doğruluk ile çalıştığı görülmüştür.

**Tablo 6.1** Deneysel sonuçların karşılaştırılması

|       | MATLAB | Tasarlanan Gömülü Sistem |
|-------|--------|--------------------------|
| TEST1 | 6,25   | 6,25 Hz                  |
| TEST2 | 4,375  | 4,375 Hz                 |
| TEST3 | 1,875  | 1,875 Hz                 |
| TEST4 | 6,562  | 6,562 Hz                 |

Sistemin çalışması için gerekli olan minimum güç 495mW'tır. Ölçülen güç değerine güvenlik limiti olarak ise %10'luk bir limit eklenirse, bu değer 544,5mW olarak hesaplanır. Kullanılan her bir komponent için bu gücün dağılımı, Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

**Tablo 6.2** Titreşimi algılayan ve analiz eden kablosuz gömülü sistemin kullandığı gücün dağılımı

| Komponent         | Besleme Gerilimi<br>(V) | Çektiği Akım<br>(mA) | Güç<br>(mW) |
|-------------------|-------------------------|----------------------|-------------|
| İvmeölçer sensörü | 3,3V                    | 0,173                | 0,570       |
| Led               | 3,3V                    | 7                    | 23,1        |
| Beacon + İşlemci  | 3,3V                    | 142,8                | 471,32      |

Tasarlanan titreşimi algılayan ve analiz eden kablosuz gömülü sistem, bir yapı üzerinden sürekli frekans ölçüp elde ettiği frekans değerini kablosuz olarak iletmesi durumunda, 3,3V 2500mAh bir batarya ile yaklaşık olarak 12 saat kullanılabilir.

$$Pil \text{ Ömrü} = \frac{\text{Pil, Akü Kapasitesi}}{\text{Yük akımı}} \times 0,707 \quad (6.1)$$

(6.1) eşitliğinde 0.707 pil ömrünü etkileyecek ortam sıcaklığı, malzemenin kalitesi gibi faktörleri temsil eder.

$$Pil \text{ Ömrü} = \frac{2500 \text{ mAh}}{150 \text{ mA}} \times 0,707 \quad (6.2)$$

$$Pil \text{ Ömrü} = \sim 12 \text{ saat} \quad (6.3)$$

Tasarlanan gömülü sistemin ileriki çalışmasında sistemin güç kaynağından bağımsız kendinden beslemeli olarak titreşimi algılayıp analiz edecek şekilde çalışması hedeflenmektedir.

## Fourier Dönüşümünün MATLAB Uygulaması

---

Fourier Dönüşümünün MATLAB uygulaması ile gösterimini aşağıdaki örnek üzerinden gösterilmiştir.

Frekansını kendi belirlediğimiz bir sinüs sinyali oluşturalım ve bu sinüs sinyaline Fourier dönüşümü uygulayalım.

```
Fsample = 40  
Tsample = 1/Fsample  
frq = 5
```

```
Fsample =  
40
```

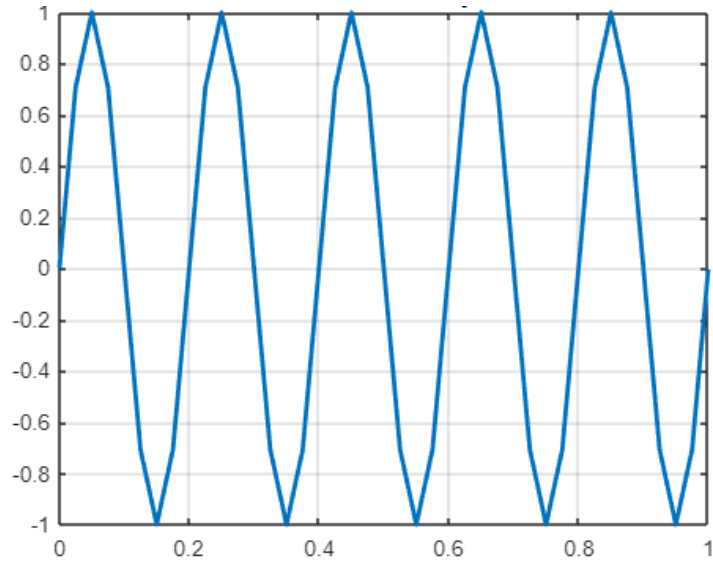
```
Tsample =  
0.0250
```

```
frq =  
5
```

```
t = 0:Tsample:5/ frq;  
U = sin(2*pi*frq*t);
```

5 Hz frekansa sahip oluşturduğumuz bu sinyali MATLAB'de grafiğini çizelim.

```
plot(t,U, 'LineWidth',2);
```



**Şekil 1** 5 Hz'lik sinüs sinyali.

Bu sinyalin Fourier dönüşümünü almak için MATLAB'de hazır fonksiyon olan “fft” komutu kullanılır. Bu fonksiyonu kullanarak Fourier dönüşümünü gerçekleştirelim.

```
Uf = fft(U)
```

```
Uf =
```

```
Columns 1 through 9
```

```
-0.0000 + 0.0000i    0.0147 - 0.1919i    0.0669 - 0.4331i    0.1942 -  
0.8298i    0.5809 - 1.8354i    7.3658 -18.2757i    -1.3800 + 2.7872i    -0.8050  
+ 1.3540i    -0.6341 + 0.9015i
```

```
Columns 10 through 18
```

```
-0.5540 + 0.6717i    -0.5084 + 0.5282i    -0.4796 + 0.4274i    -0.4601 +  
0.3507i    -0.4463 + 0.2890i    -0.4364 + 0.2373i    -0.4290 + 0.1923i    -0.4236  
+ 0.1521i    -0.4197 + 0.1153i
```

```
Columns 19 through 27
```

```
-0.4169 + 0.0809i    -0.4152 + 0.0479i    -0.4143 + 0.0159i    -0.4143 -  
0.0159i    -0.4152 - 0.0479i    -0.4169 - 0.0809i    -0.4197 - 0.1153i    -0.4236  
- 0.1521i    -0.4290 - 0.1923i
```

```
Columns 28 through 36
```

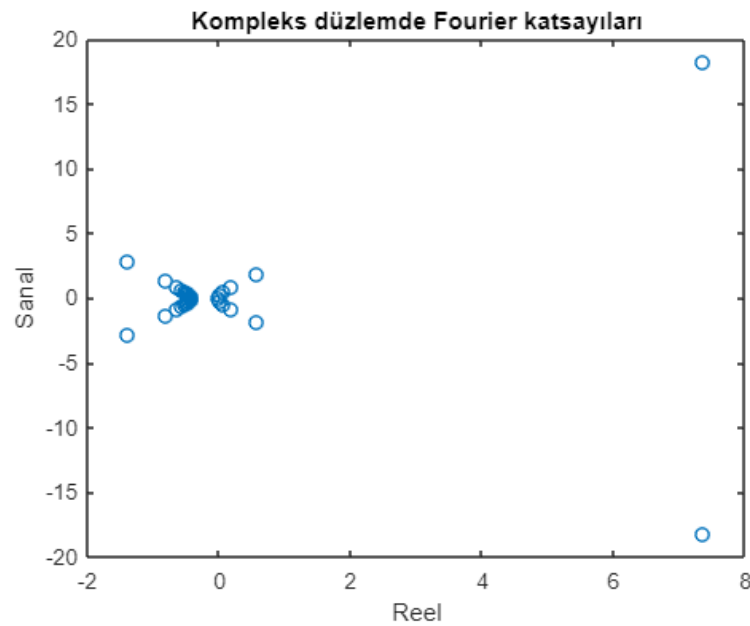
```
-0.4364 - 0.2373i -0.4463 - 0.2890i -0.4601 - 0.3507i -0.4796 -  
0.4274i -0.5084 - 0.5282i -0.5540 - 0.6717i -0.6341 - 0.9015i -0.8050  
- 1.3540i -1.3800 - 2.7872i
```

Columns 37 through 41

```
7.3658 +18.2757i 0.5809 + 1.8354i 0.1942 + 0.8298i 0.0669 +  
0.4331i 0.0147 + 0.1919i
```

Uf'nin karmaşık sayılardan oluştuğu görülmektedir. Herhangi bir fonksiyona Fourier dönüşümü uyguladığımızda sonuç karmaşık olacaktır. Karmaşık sayıların katsayılarını kompleks düzlemde çizderelim.

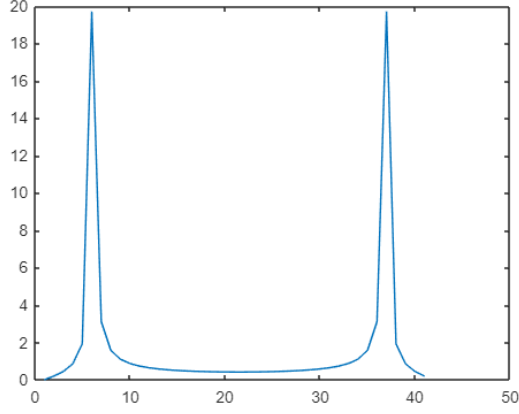
```
plot(Uf,'o');  
title('Kompleks düzlemde Fourier katsayıları');  
xlabel('Reel');  
ylabel('Sanal');
```



**Şekil 2** Kompleks düzlemde Fourier katsayılar

Şekil 2'yi yorumlamak zor olduğu için Fourier dönüşümün sonucunda elde edilen karmaşık katsayıların büyüklüğüne bakmak daha doğru olacaktır.

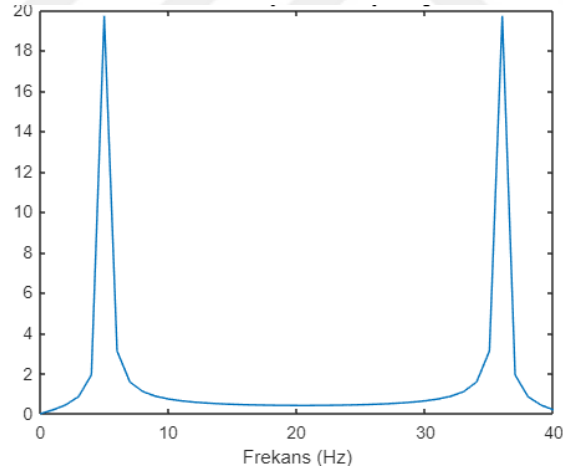
```
plot(abs(Uf));
```



**Şekil 3** Karmaşık katsayıların büyüklüğü

Şekildeki katsayılara denk gelen frekansları etiketleyelim. Bu katsayılar sırasıyla 0'dan başta belirttiğimiz örnekleme frekansına kadar olan frekansları temsil ediyor.

```
f = linspace(0, Fsample,length(Uf));
plot(f,abs(Uf));
xlabel('Frekans (Hz)');
```



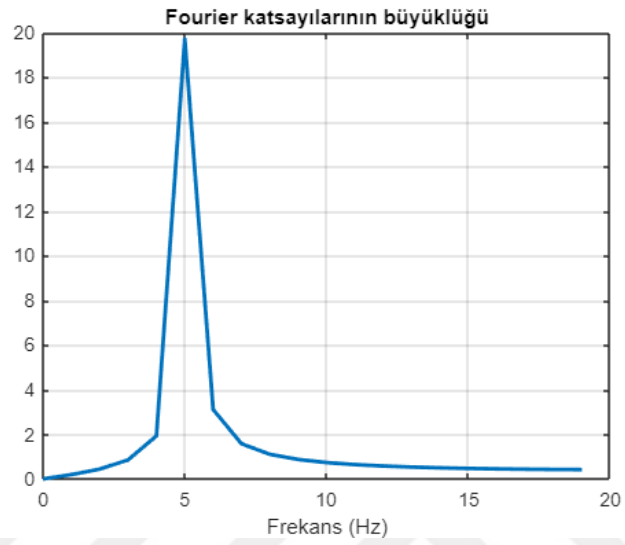
**Şekil 4** Frekans değerleri ile karmaşık katsayıların büyüklüğü

Şekilde dikkat edilirse  $F_{\text{sample}}/2$ 'den sonraki kısım ile önceki kısmın simetridir. Bu nedenle sadece  $[0, F_{\text{sample}}/2]$ 'e kadar olan kısma bakmamız yeterlidir. Bu nedenle grafiğin yarısını çizdirirsek:

```

n = floor(length(f)/2);
plot(f(1:n),abs(Uf(1:n)),'LineWidth',2);
title('Fourier katsayılarının büyüklüğü');
xlabel('Frekans (Hz)');
grid;

```



**Şekil 5** Örnekleme frekansının yarısına kadar olan Fourier katsayılarının büyüklüğü

Yukarıdaki örnekte gösterilen dönüşüm tek frekansı olan bir sinüse ait olduğu için o frekansta tepe yapan bir şekil elde ettik. Örnekten anlaşıldığı gibi Fourier dönüşümünün bir sinyal içerisindeki frekans bileşenlerini ortaya çıkarır. Böylelikle MATLAB üzerinde FFT uygulamasını göstermiş olduk.



## **MATLAB İle Oluşturulan Frekans Tespit Fonksiyonu**

---

```
function [amp,inx] = fft_function(data,Fsample,dataLength)

% FFT
Y = fft(data);
P2 = abs(Y/dataLength);
P1 = P2(1:dataLength/2+1);
P1(2:(dataLength/2+1)-1) = 2*P1(2:(dataLength/2+1)-1);

P1(1) = 0;
first = 0;

for n = 1:1:(dataLength/2+1)-1
    if (P1(n) > first)
        first = P1(n);
        inx = n;
    end
end

amp = first;
end
```

## Beacon Konfigürasyon Parametreleri

BLE Beacon konfigürasyon

| No | Komut Adı         | Açıklama                               |
|----|-------------------|----------------------------------------|
| 1  | UUID              | Yaz/Oku UUID                           |
| 2  | MAJOR             | Yaz/Oku MAJOR                          |
| 3  | Verici Gücü       | Yaz/Oku Verici Gücü                    |
| 4  | RSSI              | Yaz/Oku 1 metre mesafe için alıcı gücü |
| 5  | Bluetooth şirketi | Yaz/Oku Bluetooth şirketi              |
| 6  | Mod               | Yaz/Oku Mod                            |

### [1] Yaz/Oku UUID

#### [1-1] Oku

Read UUID data. Default: 00050001-0000-1000-8000-00805F9B0131

#### [1-2] Yaz

Write UUID data.

### [2] Yaz/Oku MAJOR

#### [2-1] Oku

Read MAJOR. Default: 0x0001

[2-2] Yaz

Write MAJOR.

[3] Yaz/Oku Verici Gücü

[3-1] Oku

Read Power Strength. Default: 3 dBm

[3-2] Yaz

Set Power Strength. Set Value: -18, -12, -6, -3, -2, -1, 0, 3

[4] Yaz/Oku 1 metre mesafe için alıcı gücü (RSSI)

[4-1] Oku

Read RSSI. Default: -61dBm

[4-2] Yaz

Set RSSI.

[5] Yaz/Oku Bluetooth şirketi

[5-1] Oku

Read Bluetooth Company. Default: 0x004C

[5-2] Yaz

Write Bluetooth Company.

[6] Yaz/Oku Mod

[6-1] Oku

Read the mode setting Default: BLEBeacon

[6-2] Yaz

Change the mode setting set value: BLEBeacon, Eddystone, EDTest

- [1] Roy, D., Mukherjee, S., Bhowmik, B., Sinharay, A., Dasgupta, R., & Pal, A. (2016, November). An autonomous, non-invasive vibration measurement system using stroboscope. In 2016 10th International Conference on Sensing Technology (ICST) (pp. 1-6). IEEE.
- [2] Gawde, S. S., & Borkar, S. (2017, July). Condition monitoring using image processing. In 2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) (pp. 1083-1086). IEEE.
- [3] Ioan, C., Donciu, O., & Septimiu, P. (2007, May). Laser based displacement measurements using image processing. In 2007 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) (pp. 372-376). IEEE.
- [4] Bayrak, M., Eric, N., & Küçüker, A. (2016). RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE MEKANİK DENGESİZLİK ARIZALARININ ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLERDEN TESPİT EDİLMESİ. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(3).
- [5] Tzeng, C. B. (2018, April). Vibration detection and analysis of wind turbine based on a wireless embedded microcontroller system. In 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI) (pp. 133-136). IEEE.
- [6] Mizuno, N., & Washino, K. (2014, May). A model based filtering technique for driver's heart rate monitoring using seat-embedded vibration sensors. In 2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP) (pp. 137-140). IEEE.
- [7] Abdallah, W., & Boudriga, N. (2017, July). The design of an optical wireless sensor network based train vibration monitoring system. In 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (pp. 1-5). IEEE.
- [8] Bissa, G. A., Jayasudha, S., Narmatha, R., & Rajmohan, B. (2013). Train collision avoidance system using vibration sensors and Zigbee technology. Int. J. Res. Eng. Adv. Technol, 1, 1-7.
- [9] Lai, C. C., Kam, J. C., Leung, D. C., Lee, T. K., Tam, A. Y., Ho, S. L., ... & Liu, M. S. (2012). Development of a fiber-optic sensing system for train vibration and train weight measurements in Hong Kong. Journal of sensors, 2012.
- [10] Kouroussis, G., Caucheteur, C., Kinet, D., Alexandrou, G., Verlinden, O., & Moeyaert, V. (2015). Review of trackside monitoring solutions: from strain gages to optical fibre sensors. Sensors, 15(8), 20115-20139.
- [11] Kwapisz, L., Jakubowski, P., & Radzieński, M. (2018, September). On Some Problems with Vibroacoustic LDV Measurements for Windows. In 2018 Joint Conference-Acoustics (pp. 1-4). IEEE.
- [12] Qibo, M. A. O. (2012). Experimental Study the Vibro-Acoustic performance of a Double Glazed Window.

- [13] Marino, A. (2018, July). Monitoring Bridges Vibration Using a Ground Based Radar. In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 2964-2967). IEEE.
- [14] Kawakatsu, T., Kakitani, A., Aihara, K., Takasu, A., & Adachi, J. (2017, August). Traffic surveillance system for bridge vibration analysis. In 2017 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI) (pp. 69-74). IEEE.
- [15] Qing, H., Bin, T., & Dongmei, D. (2009, April). Design of portable system of measurement and analysis for vibration based on S3C2440. In 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (Vol. 3, pp. 370-373). IEEE.
- [16] Tzeng, C. B. (2018, April). Vibration detection and analysis of wind turbine based on a wireless embedded microcontroller system. In 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI) (pp. 133-136). IEEE.
- [17] Stanbridge A, Ewins D, Khan A (2000) Modal testing using impact excitation and a scanning LDV. *Shock Vibration* 7(2):91–100.
- [18] Cunha, A., Caetano, E., and Delgado, R. \_2001\_. "Dynamic tests on large cable-stayed bridge." *J. Bridge Eng.*, 6\_1\_, 54–62.
- [19] Castellini P., Martarelli M., Tomasini E.P. 2006. Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs. *Mech. Syst. Signal Pr.* 20, p 1265-1285.
- [20] Bartoli G., Facchini L., Pieraccini M., Fratini M., Atzeni C. 2008. Experimental utilization of interferometric radar techniques for structural monitoring. *Struct. Control Health Monit.* 15 p. 283-298.
- [21] S.B. Lee, M.K. Kwak, Development of Vibration Measurement Technique Using the Image Processing, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, 2000, pp. 327-329.
- [22] K.Y. Kim, M.K. Kwak, Measurement of large-amplitude and lowfrequency vibrations of structures using the image processing method, *Trans. Korean Soc. Noise Vibration Eng.* 15 (2005) 329-333.
- [23] A.M. Wahbeh, J.P. Caffrey, S.F. Masri, A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems,, *Smart Structures Mater.* 12 (2003) 785-794.
- [24] H.S. Jeon, Y.C. Choi, J.W. Park, Displacement measurement of multipoint using a pattern recognition from video signal, *Trans. Korean Soc. Noise Vibration Eng.* 18 (2008) 1256-1261.
- [25] H.S. Jeon, Y.C. Choi, J.W. Park, Measurement structural vibration from video signal using curve fitting, *Trans. Korean Soc. Noise Vibration Eng.* 19 (2009) 943-949
- [26] Roy, D., Mukherjee, S., Bhowmik, B., Sinharay, A., Dasgupta, R., & Pal, A. (2016, November). An autonomous, non-invasive vibration measurement system using

- stroboscope. In 2016 10th International Conference on Sensing Technology (ICST) (pp. 1-6). IEEE.
- [27]Yüksel M. E. 2019. Design and Implementation of A Batteryless Wireless Embedded System for IoT Applications. *Electrica*, 19(1), 1-11.
- [28]Tozan, A. (2007). Otonom Mobil Robot (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [29]Mazidi, M. A., Mazidi, J. G., & Mckinlay, R. D. (2000). The 8051 microcontroller and embedded systems. New Delhi.
- [30]El-Damak, D. R. (2015). Power management circuits for ultra-low power systems (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [31]Sandve, S. (2016). Indoor Positioning System Using BLE Beacons (Master's thesis, University of Stavanger, Norway).
- [32]Lindh, J. 2015. 'Bluetooth® Low Energy Beacons'. Application Report, Texas Instruments. Available at: . [30 November 2015]
- [33]Peckol, J. K. (2019). Embedded systems: a contemporary design tool. John Wiley & Sons.
- [34]Proakis, J., G., and Manolakis, D., G., (Salor, Ö., Karamancioğlu, A., Karaboğa, N., Altun, ve H., Yıldırım, R., Çev.), 2010. Sayısal Sinyal İşleme, İlkeler, Algoritmalar ve Uygulamalar, Nobel Akademik Yayıncılık, Sarıyıldız Ofset, Ankara.
- [35]AYDIN, S. G. (2016). LabVIEW kullanılarak biyoelektriksel işaretlerin zaman frekans analizi/Time frequency analysis of bioelectrical signals using LabVIEW.
- [36]Bulut, K. N. (2016). Optik uydu görüntülerinin birleştirilmesinde frekans bölgesi filtrelerinin karşılaştırılması (Doctoral dissertation, Bilişim Enstitüsü).
- [37]Smith, S. (2013). Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. Elsevier.
- [38]Brigham, E. O., & Morrow, R. E. (1967). The fast Fourier transform. *IEEE spectrum*, 4(12), 63-70.
- [39]Kelleci, B., Öner, M., & Başaran, H. Hızlı Fourier Dönüşümünün FPGA Uygulamasının SQNR Simülasyonu SQNR Simulations of Fast Fourier Transform Implementation on FPGA.
- [40]Kesler, M., Uçar, M., & Özdemir, E. Paralel Aktif Güç Filtresi için DSP Tabanlı Denetim Algoritmasının Otomatik Gömülü Kod Üretimi ile Hızlı Prototiplendirilmesi.
- [41]Vivek Kumar Pandey, Sparsh Kumar, Vimal Kumar, Pankaj Goel (2018). A Review Paper on I2C Communication Protocol. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 4(2) [www.IJARIIIT.com](http://www.IJARIIIT.com).
- [42]Device Solutions Business Division Automotive & Industrial Systems Company Panasonic Corporation (2018). PS-A PressureSensor Low pressure type (Digital type). <https://industrial.panasonic.com/ww/products/sensors/built-in-sensors/ps-a> internet adresinden 24.10.2019 tarihinde edinilmiştir.

- [43]Kamath, S., & Lindh, J. (2010). Measuring bluetooth low energy power consumption. Texas instruments application note AN092, Dallas.
- [44]M. Köhne, J. Sieck, "Location-based Services with iBeacon Technology", Second International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, Madrid, Spain, 315-321, 18-20 November 2014.
- [45]Cypress Semiconductor Corporation (2017). Energy Harvesting PMIC for Wireless Sensor Node. <https://www.cypress.com/products/s6ae103a> internet adresinden 24.10.2019 tarihinde edinilmiştir.
- [46]Bosch Sensortec (2018). BMI160 Small, low power Inertial Measurement Unit. [https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all\\_products/bmi160](https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bmi160) internet adresinden 01.10.2019 tarihinde edinilmiştir.



## Tezden Üretilmiş Yayınlar

---

**İletişim Bilgisi:** bilal.canatar1@gmail.com

### Konferans Bildirileri

1. Canatar, B., Vural R. A., Sarıoğlu, B. (2019). "Vibration Detection and Analysis Based On a Wireless Embedded System", International Marmara Sciences Congress (Autumn) 2019 Proceedings Book (Natural and Applied Sciences), Sayfa: 824-830

