

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SES ÖTESİ TEMİZLEME ETKİNLİĞİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE  
GÖRE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sunay GÜLER**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektronik Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SES ÖTESİ TEMİZLEME ETKİNLİĞİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE  
GÖRE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sunay GÜLER  
(504091259)**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektronik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Metin HÜNER**

**02 MAYIS 2012**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091259 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Sunay GÜLER**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SES ÖTESİ TEMİZLEME ETKİNLİĞİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE GÖRE İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Yrd. Doç. Dr. Metin HÜNER**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Mürvet KIRCI**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Baki ALTUNCEVAHİR**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **02 Mayıs 2012**  
**Savunma Tarihi :**      **06 Haziran 2012**



*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Öncelikle beni bugünlerime getirmek için büyük çaba ve fedakarlık gösteren anne ve babama, tez çalışmalarım sırasında karşılaştığım her türlü zorluklarda beni sabırla dinleyen ve cesaret veren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Metin Hüner’e, eğitim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2012

Sunay Güler  
(Elektronik ve Haberleşme  
Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                           |       |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖNSÖZ.....                                                                | vii   |
| İÇİNDEKİLER .....                                                         | ix    |
| KISALTMALAR .....                                                         | xi    |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                      | xiii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                        | xv    |
| ÖZET.....                                                                 | xix   |
| SUMMARY .....                                                             | xxiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                            | 1     |
| 2. ULTRASONİK DALGALAR.....                                               | 3     |
| 2.1 Ultrasoniğin Tanımı .....                                             | 3     |
| 2.2 Ses Dalgası ve Yayılımı .....                                         | 4     |
| 2.3 Ses Dalgalarının Doğası .....                                         | 5     |
| 3. ULTRASONİK TEMİZLEME.....                                              | 7     |
| 3.1 Ultrasonik Temizlemenin Temel Prensipleri.....                        | 7     |
| 3.2 Ultrasonik Temizleme Sistemini Oluşturan Parçalar .....               | 9     |
| 3.2.1 Dönüştürücüler (Transducers).....                                   | 9     |
| 3.2.1.1 Elektromanyetik (Magnetostriktive) dönüştürücüler .....           | 9     |
| 3.2.1.2 Piezoelektrik (Piezoelectric) dönüştürücüler .....                | 9     |
| 3.2.1.3 Daldırılmalı tip dönüştürücüler .....                             | 11    |
| 3.2.2 Ultrasonik üreteçler .....                                          | 12    |
| 3.2.2.1 Darbe kontrollü üreteçler .....                                   | 12    |
| 3.2.2.2 Tam dalga/yarım dalga ve darbe kontrolleri .....                  | 12    |
| 3.2.3 Ultrasonik temizleme kazanları .....                                | 13    |
| 3.2.4 Temizleme sıvısı .....                                              | 14    |
| 3.3 Kavite Erozyonu.....                                                  | 15    |
| 3.4 Ultrasonik Temizleme Sürecinde Optimizasyon.....                      | 16    |
| 3.4.1 Ultrasonik dalgaının genliği ve frekansı .....                      | 16    |
| 3.4.2 Sıvının buhar basıncı, yüzey gerilimi, yoğunluğu ve kayganlığı..... | 16    |
| 3.4.3 Statik sıvı koşulları ve akış karakteristiği .....                  | 18    |
| 4. ULTRASONİK TEMİZLEME MAKİNESİNİN TASARIM AŞAMALARI                     | 19    |
| 4.1 Sistemin Donanımı .....                                               | 19    |
| 4.2 Mikrodenetleyici Seçimi .....                                         | 21    |
| 4.3 Kontrol Kartı Tasarımı .....                                          | 21    |
| 4.4 Yarım Köprü (Half Bridge) ile DC/AC Dönüştürme Yöntemleri.....        | 23    |
| 4.4.1 Ölü bant gecikmesi (Dead band delay) .....                          | 25    |
| 4.5 Besleme Kartı Tasarımı.....                                           | 26    |
| 4.6 Sürücü Devresi .....                                                  | 28    |
| 4.6.1 Ultrasonik dönüştürücü modelleme ve empedans uydurma .....          | 30    |
| 4.7 Program Akış Şeması .....                                             | 35    |
| 4.7.1 Çalışma frekansının ayarlanması .....                               | 39    |
| 4.7.2 Güç kontrolü .....                                                  | 41    |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.7.3 Emniyet tedbirleri.....                                                | 41        |
| 4.7.4 Kazan suyu sıcaklık kontrolü .....                                     | 41        |
| <b>5. TEST SONUÇLARI.....</b>                                                | <b>41</b> |
| 5.1 Sabit Frekansta Çalışma .....                                            | 43        |
| 5.2 Frekans Taramalı Çalışma.....                                            | 43        |
| 5.3 Anahtarlama Çalışma .....                                                | 43        |
| 5.4 Folyo Testi ve Önemi .....                                               | 44        |
| 5.5 Folyo Testi ve Sonuçları.....                                            | 44        |
| 5.5.1 Frekansa göre temizleme etkinliğinin incelenmesi .....                 | 44        |
| 5.5.2 Sıcaklığa göre temizleme etkinliğinin incelenmesi.....                 | 48        |
| 5.5.3 Güç seviyesine göre temizleme etkinliğinin incelenmesi .....           | 51        |
| 5.5.4 Frekans tarama tekniğine göre temizleme etkinliğinin incelenmesi ..... | 52        |
| 5.5.5 Anahtarlama tekniğine göre temizleme etkinliğinin incelenmesi .....    | 54        |
| 5.5.6 Folyonun kazana dik tutulmasına göre temizlemenin incelenmesi.....     | 56        |
| 5.6 Üç Boyutlu Cisimler Üzerinde Yapılan Testler ve Sonuçları .....          | 60        |
| 5.6.1 Farklı derinliklere göre temizleme etkinliğinin incelenmesi.....       | 61        |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                             | <b>65</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                        | <b>67</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                        | <b>69</b> |

## **KISALTMALAR**

|                |                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| <b>A</b>       | : Amper                                               |
| <b>ADC</b>     | : Analog to Digital Converter                         |
| <b>BP</b>      | : Band Pass                                           |
| <b>CCS-C</b>   | : Custom Computer Services                            |
| <b>ECCP</b>    | : Enhanced Capture Compare PWM                        |
| <b>EEPROM</b>  | : Electrically Erasable Programmable Read Only Memory |
| <b>FPGA</b>    | : Field Programmable Gate Array                       |
| <b>HS</b>      | : High Speed                                          |
| <b>IGBT</b>    | : Insulated Gate Bipolar Transistor                   |
| <b>kHz</b>     | : Kilo Hertz                                          |
| <b>LCD</b>     | : Liquid Crystal Display                              |
| <b>MHz</b>     | : Mega Hertz                                          |
| <b>MOSFET</b>  | : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor   |
| <b>PIC</b>     | : Peripheral Interface Controller                     |
| <b>PLC</b>     | : Programmable Logic Controller                       |
| <b>PWM</b>     | : Pulse Width Modulation                              |
| <b>PWM1CON</b> | : Pulse Width Modulation Control Register             |
| <b>V</b>       | : Volt                                                |
| <b>W</b>       | : Watt                                                |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 : Sesin değişik ortamlardaki yayılma hızı .....                                | 4  |
| Çizelge 4.1 : Güç seviyesi ve gerilim karşılıkları.....                                    | 26 |
| Çizelge 4.2 : PR2 değişkeninin farklı değerlerine karşılık gelen $f_{pwm}$ değerleri ..... | 40 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 : Bir cisme çarpan dalga'nın yansıması ve absorbe edilmesi ..... | 3  |
| Şekil 2.2 : Ses dalgasının yayılımı.....                                   | 5  |
| Şekil 3.1 : Bir ultrasonik temizleme düzeneği.....                         | 7  |
| Şekil 3.2 : Denge basıncına göre pozitif ve negatif basınç bölgeleri.....  | 8  |
| Şekil 3.3 : Ultrasonik kavitasyon oluşumu .....                            | 8  |
| Şekil 3.4 : Piezo seramik dönüştürücünün iç yapısı .....                   | 10 |
| Şekil 3.5 : Dönüştürücünün kazana yapıştırılması .....                     | 10 |
| Şekil 3.6 : Daldırılmalı tip dönüştürücü yapıları .....                    | 11 |
| Şekil 3.7: Ultrasonik üreteç .....                                         | 12 |
| Şekil 3.8 : Kavitasyon kabarcığı.....                                      | 15 |
| Şekil 3.9 : Sıcaklığın temizleme süresine etkisi .....                     | 17 |
| Şekil 3.10 : Kavitasyon-basınç ilişkisi.....                               | 18 |
| Şekil 4.1 : Sistem mimarisi.....                                           | 19 |
| Şekil 4.2 : Sistemden bir görünüm. ....                                    | 20 |
| Şekil 4.3 : Kontrol kartı devre tasarımı .....                             | 22 |
| Şekil 4.4 : Kontrol kartından görünüm. ....                                | 23 |
| Şekil 4.5 : Tek kaynaklı yarım köprü devresi.....                          | 24 |
| Şekil 4.6 : Standart yarım köprü devresi. ....                             | 24 |
| Şekil 4.7 : Tam köprü devresi.....                                         | 25 |
| Şekil 4.8 : Yarım köprü PWM modunun çıkışı. ....                           | 26 |
| Şekil 4.9 : Besleme kartı tasarımı. ....                                   | 27 |
| Şekil 4.10 : Besleme kartından görünüm.....                                | 27 |
| Şekil 4.11 : Güç devresi prensip şeması. ....                              | 28 |
| Şekil 4.12 : Yalıtılmış sinyal yükselteç devresi.....                      | 29 |
| Şekil 4.13 : IGBT sürücü devresi. ....                                     | 29 |
| Şekil 4.14 : Modüle edilmiş ultrasonik sinyal. ....                        | 30 |
| Şekil 4.15 : Ultrasonik dönüştürücü test devresi. ....                     | 30 |
| Şekil 4.16 : Ultrasonik dönüştürücüye ait empedans karakteristiği. ....    | 31 |
| Şekil 4.17 : Butterwoth-Van Dyke Transducer Model.....                     | 31 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.18 : Butterwoth-Van Dyke Transducer Model'ine ilişkin empedans eğrisi.. | 32 |
| Şekil 4.19 : Ultrasonik dönüştürücüye ait empedans eşdeğer devresi. ....        | 33 |
| Şekil 4.20 : Empedans uydurma benzetim devresi. ....                            | 34 |
| Şekil 4.21 : Empedans uydurma eğrileri.....                                     | 34 |
| Şekil 4.22 : Program akış diyagramı.....                                        | 36 |
| Şekil 4.23 : Tuştakımı alt programı. ....                                       | 37 |
| Şekil 4.24 : TMR0 kesme alt programı.....                                       | 38 |
| Şekil 4.25 : HS osilatör için bağlantışekli.....                                | 39 |
| Şekil 5.1 : 37 kHz sabit frekansta çalışma. ....                                | 44 |
| Şekil 5.2 : 38 kHz sabit frekansta çalışma. ....                                | 44 |
| Şekil 5.3 : 39 kHz sabit frekansta çalışma. ....                                | 45 |
| Şekil 5.4 : 40 kHz sabit frekansta çalışma. ....                                | 45 |
| Şekil 5.5 : 41 kHz sabit frekansta çalışma. ....                                | 46 |
| Şekil 5.6 : 42 kHz sabit frekansta çalışma. ....                                | 46 |
| Şekil 5.7 : 20°C'de 40 kHz sabit frekansta çalışma. ....                        | 48 |
| Şekil 5.8 : 30°C'de 40 kHz sabit frekansta çalışma. ....                        | 48 |
| Şekil 5.9 : 50°C'de 40 kHz sabit frekansta çalışma. ....                        | 49 |
| Şekil 5.10 : 60°C'de 40 kHz sabit frekansta çalışma. ....                       | 49 |
| Şekil 5.11 : 70°C'de 40 kHz sabit frekansta çalışma. ....                       | 50 |
| Şekil 5.12 : Güç Seviyesi 3 ve 39 kHz sabit frekansta çalışma. ....             | 51 |
| Şekil 5.13 : Güç Seviyesi 5 ve 39 kHz sabit frekansta çalışma. ....             | 51 |
| Şekil 5.14 : 38 kHz civarında frekans taraması. ....                            | 52 |
| Şekil 5.15 : 39 kHz civarında frekans taraması. ....                            | 53 |
| Şekil 5.16 : 40 kHz civarında frekans taraması. ....                            | 53 |
| Şekil 5.17 : 1 sn susma süreli anahtarlmalı çalışma.....                        | 54 |
| Şekil 5.18 : 2 sn susma süreli anahtarlmalı çalışma.....                        | 54 |
| Şekil 5.19 : Folyo kazana dik ve 38 kHz sabit frekansta çalışma.....            | 56 |
| Şekil 5.20 : Folyo kazana dik ve 39 kHz sabit frekansta çalışma.....            | 56 |
| Şekil 5.21 : Folyo kazana dik ve 40 kHz sabit frekansta çalışma.....            | 57 |
| Şekil 5.22 : Folyo kazana dik, 20°C'de 38 kHz sabit frekansta çalışma. ....     | 57 |
| Şekil 5.23 : Folyo kazana dik, 30°C'de 38 kHz sabit frekansta çalışma. ....     | 58 |
| Şekil 5.24 : Folyo kazana dik, 50°C'de 38 kHz sabit frekansta çalışma. ....     | 58 |
| Şekil 5.25 : Temizleme öncesi madeni para. ....                                 | 59 |
| Şekil 5.26 : Temizleme sonrası madeni para. ....                                | 59 |
| Şekil 5.27 : Temizleme öncesi metal kilit.....                                  | 60 |
| Şekil 5.28 : Temizleme sonrası metal kilit .....                                | 60 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.29 :</b> Temizleme öncesi metal kilit .....     | 61 |
| <b>Şekil 5.30 :</b> 10 cm derinlikte temizleme sonucu..... | 61 |
| <b>Şekil 5.31 :</b> 8 cm derinlikte temizleme sonucu.....  | 62 |
| <b>Şekil 5.32 :</b> 5 cm derinlikte temizleme sonucu.....  | 62 |



## **SES ÖTESİ TEMİZLEME ETKİNLİĞİNİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE GÖRE İNCELENMESİ**

### **ÖZET**

Temizlik endüstrisinde bugün, kimyasal çözücülerin yerine doğaya dost alternatif temizleme yöntemleri kullanılarak temizleme teknikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bunlar su temelli ve petrol temelli temizleyicilerdir; fakat bu temizleme yöntemleri çoğunlukla temizleyici olarak kimyasal çözücülere oranla daha az etkilidir ve istenilen kalitede temizlik elde edilememektedir.

Temizlik endüstrisi istenilen temizliği sağlamak için araştırmalar yapmış ve son yıllarda elde edilen yeniliklerin pek çoğunu ultrasonik temizleme yöntemleri teşkil etmiştir. Ultrasonik temizlik genellikle hassas temizlemelerde, hızlı, ucuz, güvenilir ve daha kaliteli temizlik sağladığı için kimyasal temizliğe alternatif olarak kullanılır.

Mikrodenetleyicilerin geliştirilmesi ile endüstriyel otomasyonda büyük bir çıkış açılmıştır. Mikroişlemci temelli elektronik devreler giderek yaygınlaşarak çok değişik uygulama alanlarında yerini almıştır. Cihazların küçültülmesi ve ortaya çıkan yeni ihtiyaçlar sebebi ile gerek hız ve gerekse işlem kapasitesi yönünden daha gelişmiş mikroişlemci yongaları tasarlanarak piyasaya sunulmuştur. İçlerinde analog sayısal dönüştürücü de bulunan PIC mikrodenetleyicileri bunlara güzel bir örnektir. Bu elemanlar sensör tabanlı endüstriyel otomasyon uygulamalarında tasarımcılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Ultrasonik temizleme sistemleri genel olarak paslanmaz çelikten yapılmış bir kazan, bu kazan altına özel bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış bir veya birden fazla ultrasonik dönüştürücü, ultrasonik üreteç ve temizleme sıvısından oluşmaktadır. Bu birimlerin her biri mühendislik konusu olarak ele alınması gereken konulardır.

Ultrasonik sinyal üreteçleri yüksek frekanslı sinyalleri (20-120 kHz) üretirler. Temizleme kazanının altına yapıştırılmış olan ultrasonik dönüştürücüler bu sinyaller ile sürüldüklerinde temizleme kazanındaki sıvıda alçak ve yüksek basınç bölgeleri meydana getiren ultrasonik dalgalar üretirler. Bu basınç dalgaları, temizleme sıvısı içinde mikroskobik milyonlarca kabarcık oluşturur. Bu kabarcıklar alçak basınçta genişleyerek büyürken yüksek basınçta büzülerek şiddetli bir şekilde patlarlar. Bu olaya ultrasonik kavitasyon adı verilir ve ultrasonik temizleme sistemlerinin çalışma prensibini oluşturur.

Bu tez çalışmasında, endüstriyel üretim ve laboratuvar çalışmalarında kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşan ultrasonik temizleme sistemlerinin elektronik devrelerinin tasarımında, gelişmiş bir PIC mikrodenetleyicisinin avantajlarından maksimum oranda faydalanılması düşünülmüştür. Yapılan piyasa ön araştırmaları sonucunda ülkemizde bu konuda üretim yapan firmaların nerede ise tamamen eski ve analog tabanlı ultrasonik üreteç devreleri yapısında oldukları, mikrodenetleyici temelli daha gelişmiş ürünlerin ise yurt dışı pazarlardan ithal edildikleri anlaşılmıştır. Bu konuda dışa bağımlılığı ortadan kaldırmak ve özgün bir endüstriyel ürün tasarlamak için bu yüksek lisans tez çalışmasına başlanmıştır.

Bu çalışmada, ultrasonik temizleme etkinliğinin frekans, güç, sıcaklık, dalga şekli gibi çeşitli parametrelere göre değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. 40 kHz'lik ultrasonik temizleme makineleri için mikrodenetleyici tabanlı, geliştirilmiş kontrol özelliklerine sahip bir ultrasonik üreteç devresinin sürücü ve güç kartı devre tasarımları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ultrasonik temizleme etkinliğinin yüzey temizliğinde kullanımı ve öneminden bahsedilmiştir. Tasarlanan sistem temizleme kazanındaki sıcaklık, sıvı yüksekliği, temizlenen malzeme gibi parametrelerden dolayı temizleme verimliliğindeki azalma problemlerine karşı çeşitli frekans tarama teknikleri ile bir çözüm sunmaktadır. Dar bir frekans bandında tarama özelliği kullanılarak daha homojen bir temizleme örüntüsü elde edildiği folyo testleri ile gözlenmiş olup sonuçları tezde yer almıştır. Bunların yanında temizleme makinesine sıcaklık ve zaman kontrolü eklenmiştir. Güç katında kısa devre problemlerine karşı koruma devreleri ilave edilmiştir. Yüksek gerilim ve alçak gerilimler birbirinden yalıtılmıştır.

Tasarlanan ultrasonik temizleme makinesi 37-42 kHz çalışma frekansı aralığında çalışabilmektedir. Kazan su sıcaklığı 20°C-80°C arasına herhangi bir sıcaklık değerine set edilebilmektedir. Sistemde manuel çalışma modu, otomatik çalışma modu ve anahtarlama çalışması olmak üzere üç adet çalışma modu bulunmaktadır. Manuel çalışma modunda 37-42 kHz frekans aralığında set edilen bir frekansta ultrasonik dönüştürücü sürülmektedir. Otomatik çalışma modunda ise kullanıcının set ettiği frekans, merkez frekansı olarak alınarak 2 kHz'lik bant genişliğinde frekans tarama tekniği kullanılmıştır. Anahtarlama çalışması, prensip olarak manuel çalışma moduna benzemektedir. Manuel çalışma moduna ek olarak susma süresi parametresi bu çalışma modunda kullanılmaktadır. Susma süresi 1 sn, 2 sn, 3 sn, 4 sn şeklinde seçilebilmektedir. Seçilen değere göre ultrasonik üreteç, ultrasonik sinyali set edilen saniye kadar üretir ve sonra set edilen saniye kadar susar. Bu işlem çalışma süresi boyunca ultrasonik sinyalin üretilmesi ve durdurulması şeklinde devam eder. Sistem 1-5 dakika arasında değişen çalışma sürelerine ayarlanıp çalıştırılabilmektedir. Sistem çalışır durumda iken kalan süre saniye bazında LCD ekranda gösterilir.

Sistemde 5 adet güç seviyesi bulunmaktadır. Güç kontrolü PWM darbeleri arasındaki ölü bant gecikmesinin artırılıp azaltılmasıyla sağlanmaktadır. Ultrasonik dönüştürücü yarım köprü DC-AC inverter devresi kullanılarak sürülmüştür. Yarım köprü devre topolojisinde sadece iki adet güç transistörüne ihtiyaç duyulduğundan bu yapı tercih edilmiştir. Ultrasonik dönüştürücünün sürülmesinde bu devre topolojisinde sürülebilmesi için ECCP (Enhanced Capture/Compare/PWM) modülü olan bir mikrodenetleyiciye gereksinim vardır. Bu modül sayesinde birbirinin eşleniği iki adet PWM sinyali üretilir ve bu sinyaller yarım köprü devre topolojisindeki transistörlerin sürülmesinde kullanılır. Mikrodenetleyicinin programlanabilen ölü bant gecikmesi değiştirilerek ultrasonik sinyalin gücü değiştirilebilmektedir.

Ultrasonik dönüştürücünün sürülmesinde tepeden tepeye genliği 100-300V olan modüle edilmiş ultrasonik sinyaller üretildiğinden, bu tasarım için yüksek gerilimlerde performansı daha iyi olan IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) transistörler kullanılmıştır. Sistem üzerindeki alçak ve yüksek gerilimler optokuplörli devreler ile birbirinden yalıtılmıştır. Böylece yüksek gerilimlerden dolayı alçak gerilimlerde çalışan mikrodenetleyici ve LCD ekranın çalışmasındaki parazitik etki ortadan kalkmıştır.

Ultrasonik dönüştürücüden maksimum güç alabilmek için ultrasonik dönüştürücü ile güç katının arasına empedans uydurma devresi eklenmiştir. Empedans uydurma

devresinin tasarımı için öncelikle kullanılan ultrasonik dönüştürücünün RLC eşdeğer devresi çıkarılmıştır. Ultrasonik dönüştürücü modellemede literatürde yaygın bir şekilde kullanılan “Butterworth-Van Dyke Transducer Model” modeli kullanılmıştır. Kullanılan ultrasonik dönüştürücünün karakteristiği kapasitif olduğundan empedans uydurma devresi olarak dönüştürücüye seri bir endüktans ilave edilmiştir.

Sistemin yazılım tasarımında C programlama dili kullanılmıştır. Sistem açıldığında önceki çalışma moduna ilişkin sıcaklık, çalışma frekansı, çalışma süresi ve güç seviyesi gibi parametreler EEPROM’dan okunur. Kullanıcı dilerse bu parametreleri değiştirebilmektedir. Kazan sıcaklığı anlık olarak okunmakta ve set edilen sıcaklık değerine geldiğinde sistem otomatik olarak ısıtıcıyı kapatmaktadır. BAŞLA/DUR düğmesine basılarak sistem çalıştırılır. Sistem set edilen çalışma süresi bitiminde otomatik olarak ultrasonik sinyal üretimini durdurur ve yüksek besleme gerilimini röle aracılığıyla kapatır. Kullanıcı çalışma süresinin bitmesini beklemeden de sistemi durdurabilmektedir.

Folyo testi ultrasonik kazanın kabaca ne kadar güçte ve nasıl bir profilde yıkama yaptığını gösteren pratik bir yöntemdir. Folyo, ultrasonik kazana yatay veya dik olarak daldırılır. Folyonun kazanda oluşan kavitasyon patlamaları sonucu aşındığı görülür. Bu aşınmaların folyo üzerindeki homojenliği ve derecesi kazanın yıkama kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Kazan iç ebatları 150x135x150 mm<sup>3</sup>, kazan su miktarı 2,5 litre, çalışma frekansı 38 kHz, su sıcaklığı 60°C’de iken yapılan folyo testleri sonucunda sistemde en iyi temizleme etkinliğinin elde edildiği görülmüştür.

Proje kapsamında geliştirilen ultrasonik yıkama makinesi prototipinde frekans, güç seviyesi, çalışma modu, çalışma süresi ve kazan sıcaklığı manuel olarak ayarlanabilmektedir. 37-42 kHz aralığında seçilen bir frekans değerinde manuel olarak çalışabilmektedir. Endüstriyel veya laboratuvar tipi modellere kolaylıkla adapte edilebilir. Elektronik sarf malzemeleri hariç yerli teknoloji kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Temizleme sıvısının sıcaklık kontrolü mikrodenetleyici aracılığıyla yapılmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı piyasadaki birçok ürüne göre daha avantajlıdır.

Tez raporunda ultrasonik dalgaların tanımı ve doğası, ultrasonik temizleme konusu, mikrodenetleyici tabanlı ultrasonik temizleme makinesinin tasarım aşamaları yazılım ve donanım yönleri, çalışma modları ve folyo testi sonuçları yer almıştır.



## **EXAMINATION OF CLEANING EFFICIENCY OF ULTRASOUND WITH RESPECT TO VARIOUS PARAMETERS**

### **SUMMARY**

There are lots of cleaning methods that are used for many years in several industrial areas. These are acid based vapor degreasing techniques. Vapor degreasing techniques use chlorinated and fluorinated solvents that damage the ecology of our planet. At the same time, cleaning requirements are continually increasing. Cleanliness has become an important issue in many industries where it never was in the past. As a result, it continually needs to be developed. Cleanliness was always important in industries such as electronics which has critical role for growing technology. It is obvious that each advance in technology demands greater and greater attention to cleanliness for its success. Cleaning technology is in a state of change. Ultrasonic cleaning technology is commonly used to clean many different types of objects, including jewellery, lenses, watches, electronic equipments, mechanical components, dental and surgical instruments.

In recent years, the cleaning industry researches for environmentally friendly cleaning methods to find an alternative cleaning technique instead of chemical cleaning. These are water based and petroleum based cleaning techniques. But they are often less effective as cleaners than the solvents and may not perform adequately in some applications. Ultrasonic energy is now used extensively in critical cleaning applications. This project is intended to familiarize the reader with the definition, nature and the basic theory of ultrasonic waves, ultrasonic cleaning phenomena and how ultrasonic energy can be most effectively applied to enhance a variety of cleaning processes.

The cleaning industry has made many researches to provide desired cleaning efficiency and in recent years, ultrasonic cleaning methods have made lots of innovation in cleaning industry. Ultrasonic cleaning is commonly used for an alternative way to chemical cleaning in critical cleaning process. Because ultrasonic cleaning is faster, cheaper, more reliable and higher quality cleaning process rather than the chemical cleaning process.

New era has just begun with the improvements of microcontrollers in industrial automation. Microprocessor based electronic circuits are started to be used in several application areas. Because of decreasing of dimensions of devices and several new requirements, faster microprocessor chips are designed and they are released in the market. PIC microcontrollers, which have their own ADC inside, are a good example for this development. These kind of components provide easier and flexible design to designers on sensor based applications in industrial automation.

Ultrasonic cleaning systems are generally consisted of a tank that is made of stainless steel, one or more ultrasonic transducers which are located under the tank with a special glue, an ultrasonic generator and a cleaning solution. Each of the units of ultrasonic cleaning system must be approached as an engineering issue.

Ultrasonic signal generators produce high frequency signals between 20-120 kHz. High and low pressure ultrasonic waves occur in the liquid of the cleaning tank when ultrasonic transducers are driven by these kind of ultrasonic signals. These pressure waves make millions of microscopic bubbles in cleaning liquid. These bubbles become larger under low pressure. On the other hand, they implode by getting smaller under high pressure. This event is called as ultrasonic cavitation and it is the principle of ultrasonic cleaning systems.

In this study, it is aimed to benefit from the advantages of an advanced PIC microcontroller on designing of electronic circuits of ultrasonic cleaning systems which are commonly used in industrial manufacture and laboratory studies. After having made research in the industrial market, it seems that lots of companies in our country use former technology and they all design only analog based ultrasonic generator circuits. However, microcontroller based advanced products come from abroad. For these reasons, this thesis study has been started to get rid of dependency to other countries and to design a genuine industrial product.

In this study, it is aimed to examine the cleaning efficiency of ultrasound with respect to various parameters such as frequency, power, temperature, shape of wave. Driver and power units of a microcontroller based ultrasonic generator, which has advanced controlling functions are designed and implemented for 40 kHz ultrasonic cleaning machines. The importance and usage of ultrasonic frequencies for surface cleaning purposes are addressed. The designed generator provides a solution with several frequency scanning techniques against degradation problems of cleaning efficiency caused by parameters such as temperature, height of liquid, material that is cleaned. Since its operation has the property of frequency sweeping in a narrow frequency band, more homogenous cleaning patterns have been observed in the foil tests, and the related results are included in this report. Moreover, temperature and timing control is added to cleaning machine. Protections against short circuits in the power unit are added. High voltages and low voltages are isolated from each other.

Designed ultrasonic cleaning machine can operate at any frequency between 37-42 kHz operating frequencies. Temperature of water in ultrasonic tank can be set at any degree between 20°C-80°C. In this system, there are three operation mode such as manuel mode, automatic mode and switching mode. In manuel mode, ultrasonic transducer is driven with a frequency which is choosen between 37-42 kHz. In automatic mode, the frequency, which is set by the user, is taken as central frequency and frequency scanning technique is applied in 2 kHz band width around this central frequency. In switching mode, ultrasonic transducer is driven during on time and than it is stopped during silent time until operation time is over. The system can be operated during any time that is choosen between 1-5 minutes. When the system operates, reminder of time is shown on LCD screen.

There are 5 power levels in the system. Power control of the system is provided by increasing or decreasing dead band delay between PWM pulses. Ultrasonic transducer is driven by using a half-bridge DC-AC inverter circuit topology. This topology is preferred because only two power transistors are needed. To drive ultrasonic transducer by using this circuit topology, a microcontroller with ECCP (Enhanced Capture/Compare/PWM) module is needed. Two complementary PWM signals are generated and these signals are used to drive power transistors in half-bridge circuit topology. The power of ultrasonic signal can be changed by increasing or decreasing of programmable dead band delay of the microcontroller.

Because of driving ultrasonic transducer with modulated ultrasonic signals that have 100-300V peak to peak amplitude, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) transistor, which has higher performance than MOSFET in high voltage operations, is selected for this design. High voltage and low voltage are isolated from each other by using optocouplers, so parasitic effects that come from high voltages to microcontroller and LCD screen are prevented.

Impedance matching circuit is added between ultrasonic transducer and power stage to get maximum power from ultrasonic transducer. First of all, RLC equivalent circuit of ultrasonic transducer is determined to design impedance matching circuit. "Butterworth-Van Dyke Transducer Model", which is widely used in literature, is used to model the ultrasonic transducer. Due to capacitive characteristic of the ultrasonic transducer, an inductor is connected serially to the transducer as for impedance matching.

C programming language is used for software design of the system. When the system is started, parameters of last operation mode such temperature, operation frequency, operation time and power level are read from EEPROM of the microcontroller. Temperature of the tank is read permanently and the system stops heater when the temperature of the tank reaches setted temperature value. The system stops generating ultrasonic signal when operation time is over and the system closes high voltage power supply via relay at the same time. However, user can also stop the system without waiting the system finishes its work.

Folio test is a practical way to understand how much power is in the tank and what kind of cleaning profile occurs in the ultrasonic cleaning tank. Folio is dipped into ultrasonic tank horizontally or vertically. Due to implosion of cavitation in the tank, folio gets holes. These holes on the folio give information about homogeneity and cleaning efficiency of the tank. After the folio tests, the best cleaning efficiency in the system is achieved when tank's inner dimension is 150x135x150 mm<sup>3</sup>, 2,5 litre water is in the tank, operating frequency is 38 kHz and temperature of the water is 60°C.

Frequency, power level, operation mode, operation time and temperature of the tank can be set manually in this prototype of ultrasonic cleaning machine, which is designed in the project. This prototype can operate manually with any frequency between 37-42 kHz. It can be adapted easily to industrial or laboratory model of ultrasonic cleaning systems. Temperature of water in the tank is controlled by microcontroller. Due to these advantages of this prototype of ultrasonic cleaning machine, it seems to be superior than many other machines sold in market.

Examination of cleaning efficiency of ultrasound with respect to various parameters has been studied for 40 kHz ultrasonic cleaning machines. In this study, only one ultrasonic cleaning tank was used during the folio test. New driving methods such as frequency sweeping and signal switching techniques were invented and tested for the ultrasonic transducer located under the ultrasonic cleaning tank with different frequencies.

In the thesis report, definition and nature of ultrasonic waves, ultrasonic cleaning phenomena, design steps of the ultrasonic cleaning machine, software and hardware aspects, operation modes, folio test results are included.



## 1. GİRİŞ

Endüstride yeni üretilen veya kullanılmakta olan pek çok cihaz, aparat ve makine parçaları yüzey kalitelerini arttırmak amacıyla bir takım temizleme işlemlerine tabi tutulurlar. Çeşitli ve sürekli gelişen teknolojiler, minyatür parça üretimindeki hızlı gelişmeler; hassas ve kritik temizlik ihtiyacını doğurmuştur. Tek tabaka halinde yüzeyde birikmiş kir, yüzeyin ıslanma kabiliyetini, adezyonunu, optik ve elektrik özelliklerini değiştirebilir. Ayrıca 1-2 µm büyüklüğündeki parçacıklar, korozyon izleri ve iyonlar; optik, tıbbi-cihaz, uzay, eczacılık, takım-kaplama, disk sürücüler, yarı-iletkenler ve otomotiv endüstrisi gibi dallarda, imalat mühendislerinin günlük ilgi alanları arasına girmiştir.

Temizlik endüstrisi istenilen temizliği sağlamak için araştırmalar yapmış ve son yıllarda elde edilen yeniliklerin pek çoğunu ultrasonik temizleme yöntemleri teşkil etmiştir. Ultrasonik temizlik genellikle hassas temizlemelerde, hızlı, ucuz, güvenilir ve daha kaliteli temizlik sağladığı için kimyasal temizliğe alternatif olarak kullanılır.

Ultrasonik temizleme sistemleri ultrasonik dönüştürücü, ultrasonik üreteç devresi, temizleme kazanı ve temizleme çözeltisi olmak üzere dört ana birimden oluşur. Bu birimlerin her biri bir mühendislik problemi olarak ele alınması gereken konulardır.

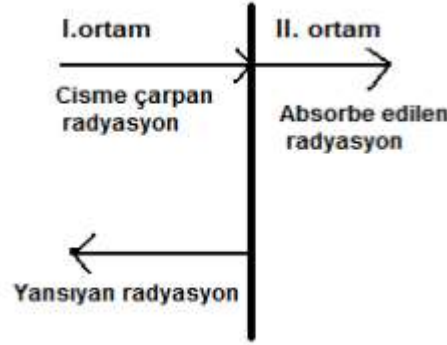
Tez raporunda ultrasonik dalgaların tanımı ve doğası hakkında bilgilere Bölüm 2’de yer verilmiştir. Bölüm 3’te ultrasonik temizleme konusu ele alınmıştır. Ultrasonik temizleme makinesinin donanım ve yazılım tasarımları Bölüm 4 ‘te açıklanmıştır. Folyo testi ve diğer test sonuçları Bölüm 5’te gösterilmiştir. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve öneriler ise Bölüm 6’da yer almaktadır.



## 2. ULTRASONİK DALGALAR

### 2.1 Ultrasoniğin Tanımı

Ultrasonik, insan kulağının duyabileceği frekans sınırının üzerindeki mekanik ses dalgalarının bilimidir. Herhangi bir elektromanyetik dalga yayılımında olduğu gibi, ultrasonik bir dalga da herhangi bir cisme çarptığı zaman bir kısmı cisim tarafından absorbe edilir, bir kısmı da cisim üzerinden geçer. Eğer ses dalgası yansıtıcı cisme doğru yaklaştırılırsa yansiyarak geri döner ve alınan dalgaların frekanslarında değişme olur (Doppler etkisi). Dalgaların yansıdığı cisimle olan bu etkileşmesi bazı fiziksel büyüklüklerin ölçümünde ve hareketli cisimlerin hızını izlemede kullanılmaktadır. Ultrasoniğin içeri işleyebilme özelliği de vardır. Bu özelliği sayesinde tıpta da kullanılmakta ve röntgen ışınlarına göre daha güvenilir olduğu bilinmektedir [1].



**Şekil 2.1 :** Bir cisme çarpan dalgaın yansıması ve absorbe edilmesi [1].

Ses dalgalarının frekansı onun tonunu belirler. Düşük frekanslı dalgalar kalın tonda (bas), yüksek frekanstaki dalgalar ince tonda (tiz) ses oluştururlar. 18 kHz'in üzerindeki sesler genellikle ultrasonik olarak dikkate alınırlar ve 20-120 kHz aralığındaki ses dalgaları da ultrasonik temizlik için kullanılır, fakat daha yüksek frekanslara da (Örneğin 400 kHz) çıkılmıştır. Endüstrideki temizliklerde en çok kullanılan frekanslar 20-50 kHz arasındadır. 50 kHz'in üzerindeki frekanslar masaüstü ultrasonik temizleyicilerde, bunlar da daha çok kuyumculuk, diş hekimliği ve yarıiletken alanlarındaki temizlik işlemlerinde kullanılmaktadır.

## 2.2 Ses Dalgası ve Yayılımı

Ultrasonik ses dalgası akustik bir dalgadır. Başka bir deyişle katı, sıvı veya gaz ortamındaki mekanik bir dalgadır. Sesin iletilebilmesi için bir ortam (madde) gereklidir. Sesin yayılımı bir yerden başka bir yere enerji taşınımı şeklindedir. Ses dalgalarının yayılma hızı, ortamın yoğunluğuna bağlıdır. Ses dalgaları frekanslarına göre üçe ayrılır. Bunlar:

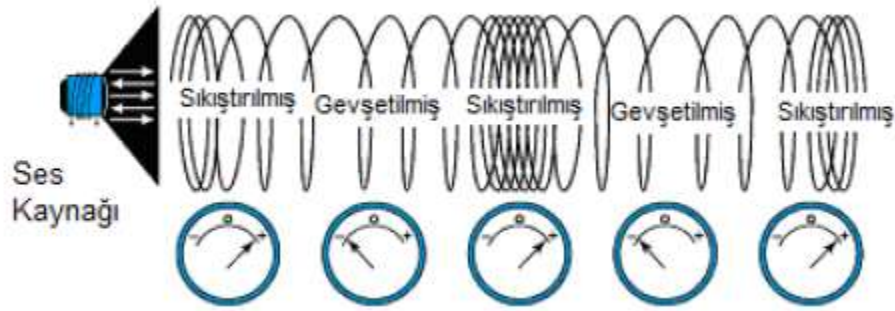
1. Ses altı (infrasonic) dalgalar, duyulabilen frekans altındaki ses dalgalarıdır. Deprem dalgaları bunlara örnektir.
2. Duyulabilen dalgalar, insan kulağının duyabileceği sınırlar içindeki ses dalgalarıdır ve 16 ile 18 000 Hz arasındadır.
3. Ses üstü (ultrasonic) dalgalar, işitilebilir frekansın üzerindeki ses dalgalarıdır. 18 kHz ve üstü ses dalgalarıdır. Bunlar quartz kristaline alternatif akım uygulanması ile elde edilebilir.

**Çizelge 2.1:**Sesin değişik ortamlardaki yayılma hızı [2].

| Ses dalgasının değişik ortamlardaki yayılma hızı |          |
|--------------------------------------------------|----------|
| Sıfır derecedeki havada                          | 331 m/s  |
| 20 derecedeki havada                             | 343 m/s  |
| Sıfır derecedeki helyum gazı                     | 972 m/s  |
| 25 derecedeki suda                               | 1493 m/s |
| Deniz suyunda                                    | 1533 m/s |
| Alüminyumda                                      | 5100 m/s |
| Bakırda                                          | 3560 m/s |
| Kauçukta                                         | 54 m/s   |

### 2.3 Ses Dalgalarının Doğası

Şekil 2.2’de görülen sarmal yay gösterimi sesin iletim ortamındaki bireysel moleküllerini temsil eder. İletim ortamındaki komşu moleküller birbirlerini iterler, tıpkı sarmal yaydaki bitişik yayların birbirlerini itmesi gibi. Soldaki ses kaynağının etkisi ile her bir yay komşusu olan yayı iterek ilerlerken ses kaynağı tarafından sıkıştırmalar meydana gelmiş olur.



**Şekil 2.2 :** Ses dalgasının yayılımı [2].

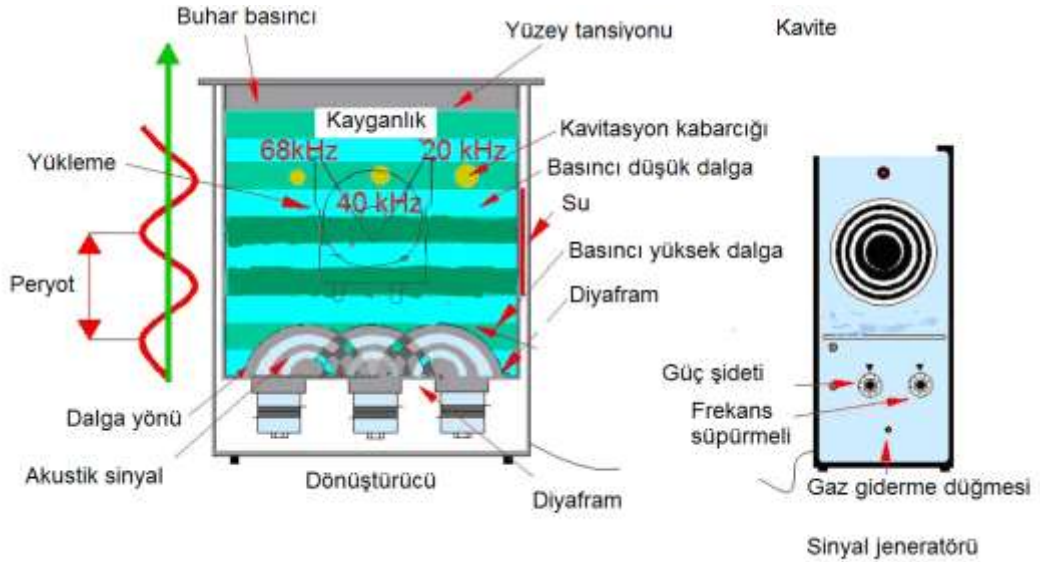
İlk anda sıkıştırılmış bölümün parçası olan yay, komşu yayların itilmesi devam ederken sıkıştırılmış kısım onu bıraktığı için yoğunluğu az kısmın parçası oluverir. Bu tıpkı sesin iletildiği ortamın moleküllerinin sıkıştırılması daha sonra da bırakılması ile aynıdır. Şekil 2.2’de sıkıştırılmanın olduğu yerdeki basınç pozitif, gevşetilmiş bölgenin basıncı ise negatif olarak gösterilmiştir.



### 3. ULTRASONİK TEMİZLEME

#### 3.1 Ultrasonik Temizlemenin Temel Prensipleri

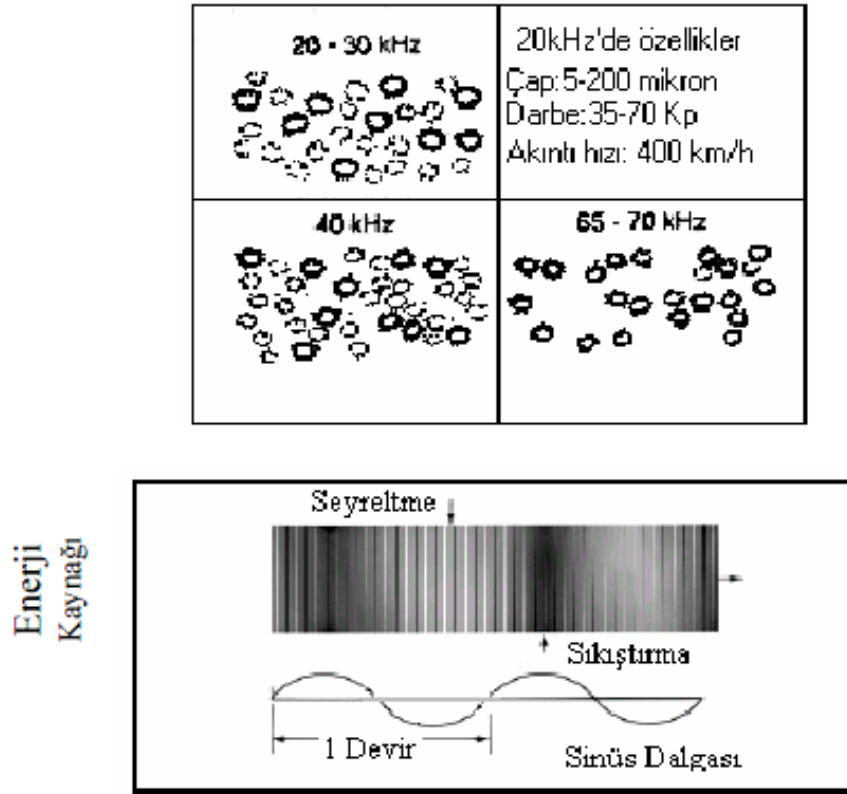
Bir ultrasonik temizleme sistemi Şekil 3.1’de görüldüğü gibi paslanmaz çelikten yapılmış bir kazan, bu kazanın altına özel bir yapılandırıcı ile yapıştırılmış bir veya birden fazla ultrasonik dönüştürücü, ultrasonik üreteç ve temizleme sıvısından oluşur.



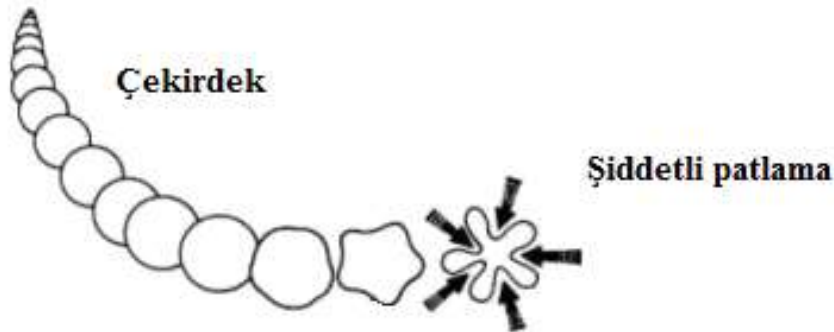
Şekil 3.1 : Bir ultrasonik temizleme düzeneği [2].

Ultrasonik sinyal üreteçleri yüksek frekanslı sinyalleri (20-120 kHz) üretirler. Temizleme kazanının altına yapıştırılmış olan ultrasonik dönüştürücüler(transducers) bu sinyaller ile sürüldüklerinde temizleme kazanındaki sıvıda basıncı arttırılmış ve azaltılmış ultrasonik dalgalar meydana getirir. Bir prob (horn) vasıtasıyla dönüştürücüden yayılan titreşimlerin şiddetleri arttırılır veya azaltılır. Bu basınç dalgaları, temizleme sıvısı içinde mikroskobik milyonlarca kabarcık (vakum boşluğu-baloncukları) oluşturur. Bu kabarcıklar Şekil 3.2’deki gibi negatif basınç esnasında genişleyerek büyürken, pozitif basınç esnasında şiddetli bir şekilde içeri çökme ile son bulurlar. Bu olay esnasında, 5000 °C’lik bir sıcaklık yükselmesi olur [3]. Bu baloncukların içeri çökmesiyle boşalan hacme temizleme sıvısı molekülleri

büyük bir hızla hücum ederler. Bu olaya ultrasonik kavitasyon adı verilir. Kavitasyon olayı sonucunda çok hızlı bir şekilde hareket eden temizlik sıvısı molekülleri, parça yüzeyini yaklaşık 7000 atmosfer basıncına varan bir basınçla bombardımana tutarlar [3]. Bunun sonucu olarak parça yüzeyi, istenmeyen kir ve paslardan temizlenmiş olur.



**Şekil 3.2 :** Denge basıncına göre pozitif ve negatif basınç bölgeleri [2].



**Şekil 3.3 :** Ultrasonik kavitasyon oluşumu [2].

### **3.2 Ultrasonik Temizleme Sistemini Oluşturan Parçalar**

Ultrasonik temizleme sistemleri 4 temel parçadan oluşur. Bunlar ultrasonik üreteç, dönüştürücü, kazan ve kazanın içindeki temizleme sıvısıdır. Sistemin performansı ve güvenilirliği dönüştürücü ve üreteçlerin tasarım ve yerleştirilmesine, temizliğin etkili bir şekilde gerçekleşmesi ise temizleme sıvısına bağlıdır. Temizleme kazanının büyüklüğünü ise temizlenecek parçanın büyüklüğü belirler. Kazan büyüdükçe dönüştürücülerin sayısı artar. Çözeltinin nasıl olacağı kararını ise temizlenecek parça ve temizlenecek kirin türü belirler.

#### **3.2.1 Dönüştürücüler (Transducers)**

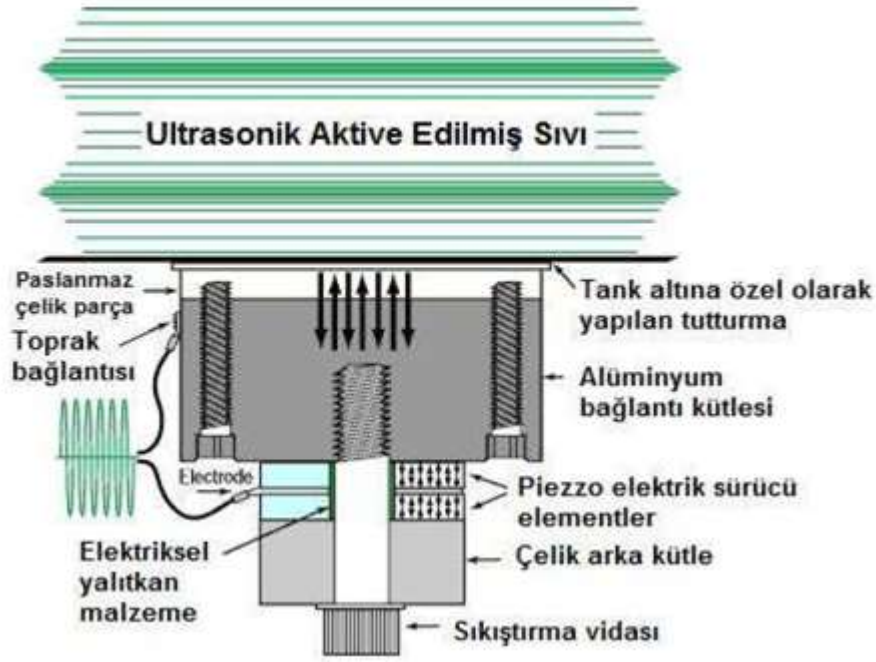
Ultrasonik temizleme sisteminin kalbi dönüştürücülerdir. Dönüştürücülerin diğer adı titreşim elemanıdır. Bugün endüstride bu amaçla 2 tip dönüştürücü kullanılmaktadır. Bu çalışmada piezoelektrik dönüştürücü kullanıldığından manyetik dönüştürücülerden kısaca bahsedilmiştir.

##### **3.2.1.1 Elektromanyetik (Magnetostrictive) dönüştürücüler**

Bu dönüştürücüler Nikel alaşımından yapılmışlardır. Manyetik alanı değişen bir ortamda, boyutlarında değişimler gösterirler. Verimleri %20 ile %50 arası değişmektedir. Manyetik esaslı dönüştürücüler endüstri uygulamalarında dayanıklı olarak bilinmektedirler. Sıfır aralıklı manyetik esaslı dönüştürücüler, nikel bir kütle üzerine yerleştirilen bir elektrik bobini ile beraber sıkıca bağlanmış ince nikel levhalardan meydana gelmiştir. Bobinden akım geçtiğinde, manyetik bir alan doğar. Piezoelektrik bir kristale gerilim uygulandığında nasıl deformasyona uğruyorsa, manyetik esaslı bir bobine de alternatif akım gönderildiği zaman, nikel kütle de akım frekansında titreşir.

##### **3.2.1.2 Piezoelektrik (Piezoelectric) dönüştürücüler**

Bu dönüştürücüler kurşun zirkonyum titanat veya diğer seramiklerden yapılmışlardır. Bu tip malzemeler gerilimi değişen bir elektrik ortamında bulunurlarsa, boyutlarında değişimler gösterirler. Bu etki piezoelektrik etki olarak bilinir. Verimleri %70 ile 90 arasındadır. Şekil 3.4’de piezo seramik dönüştürücünün iç yapısı yer almaktadır. Şekil 3.5’te ise temizleme kazanına yapıştırılmış hali görülmektedir.



Şekil 3.4 : Piezo seramik dönüştürücünün iç yapısı.



Şekil 3.5 : Dönüştürücünün kazana yapıştırılması.

Piezoelektrik dönüştürücüler, iki kalay şerit arasına eklenmiş bir seramik kristalden yapılmışlardır. Şeritler arasına gerilim uygulandığında kristalde yer değiştirme meydana gelir. Bu durum piezoelektrik etki olarak adlandırılır. Bu dönüştürücüler bir diyaframa (kazanın yan cidarlarına veya alt kısmına) monte edilirler. Kristaldeki yer değiştirme, diyaframın hareket etmesine neden olur. Burada sırası ile basınç dalgaları

oluşur. Bu dalgalar kazan içindeki sulu çözelti içine taşınırlar. Kristalin kütlesi, paslanmaz çelik diyaframın kütlesi ile iyi uyum içinde değildir. Diyaframa, titreştirici enerjiyi daha verimli bir şekilde taşıması ve empedans uyumunu iyileştirmek için bir alüminyum blok kullanılır. Piezoelektrik dönüştürücülerin malzemesi ve montajı ucuz olduğundan ultrasonik temizleme için tercih nedeni olmaktadır. Fakat bu dönüştürücülerin çeşitli kusurları da vardır. En genel problem, aşırı çalıştıklarında performanslarının bozulmasıdır. Bunun nedeni kristal aşırı çalıştığı zaman kendi kendisini depolarize etmeye başlar. Bu da kristalin yer değiştirme özelliğinde oldukça önemli azalmalara neden olur. Kristalin kendisi daha az genişleme büzülme hareketi yaptığından diyaframın da titreşme genliği azalır. Daha az titreştirici enerji üretilir ve kavitasyondaki azalma, kazanda dikkat çekici seviyede olur.

### 3.2.1.3 Daldırmalı tip dönüştürücüler

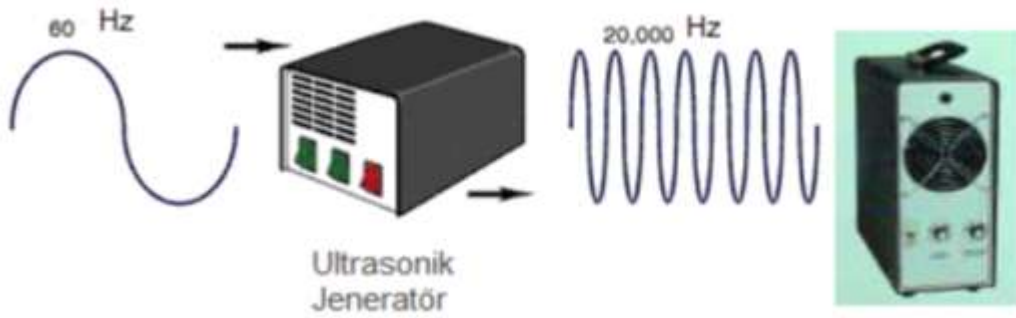
Daldırmalı tip dönüştürücüler, içi dışına döndürülmüş temizleme kazanı yapısıymış gibi düşünülebilir. Genellikle 7,5-10 cm kalınlığında yüksekliği ve genişliği gerektirdiği kadar olan, su geçirmez bir kutunun içine yüzeyleri yukarı gelecek şekilde yerleştirilmiş dönüştürücülerden oluşan yapılardır. Su geçirmez bir koaksiyel kablo ile dönüştürücü üretece bağlanır. Dönüştürücü her hangi bir kazana yerleştirilebilir ve o kazanı ultrasonik kazana dönüştürür. Bu bir avantajdır. Şekil 3.6'da değişik boyutta daldırmalı tip dönüştürücü fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 3.6 : Daldırmalı tip dönüştürücü yapıları [2].

### 3.2.2 Ultrasonik üreteçler

Ultrasonik üreteçler, ultrasonik dönüştürücüleri sürmek için kullanılırlar. Ultrasonik üreteç şehir şebekesinden aldığı enerjiyi ultrasonik dönüştürücünün çalışma frekansında yüksek gerilimde bir sinyale dönüştürür. Dönüştürücü bu sinyali aldığı anda şeklini değiştirerek cevap verir ve bu durum sinyal uygulandığı müddetçe devam eder. Uygulama yerlerine bağlı olarak 18 kHz ile 120 kHz arasında, özel durumlarda ise 400 kHz'e kadar frekans üreten üreteç mevcuttur.



Şekil 3.7 : Ultrasonik üreteç [2].

Üreteçler dönüştürücülere uygun olarak belli güçlerde imal edilirler. Tipik bir üreteç genellikle dönüştürücünün gücünü kontrol edebilir ve dönüştürücünün çalışma frekans aralığı dikkate alınarak frekans taramalı olarak yapılandırılabilir.

#### 3.2.2.1 Darbe kontrollü üreteçler

Üreteç otomatik olarak çok hızlı bir şekilde açılıp kapatılır, bu durum temizleme sıvısının içindeki gazların giderilmesinde (degas) etkili olabilir. Ultrasonik darbeler belli bir zaman devreye uygulanırken, belli zamanlarda da uygulanmaz. Bu zamanlama kontrolü mikrodenetleyici veya PLC kullanılarak yapılabilir. Çözeltinin cinsine göre bu süreler değişik olabilir ve verimli bir temizleme işlemi olması için bu bekleme süresi optimize edilmelidir.

#### 3.2.2.2 Tam dalga/yarım dalga ve darbe kontrolleri

Bazı üreteçlerde anahtarlama vardır ve bunlar dönüştürücüye giden dalgaları keserek yarım dalga halinde gönderir. Bu, gazın çözelti içinden çok daha hızlıca çıkmasına (degas) izin veren başka bir yöntemdir. Degas kontrollü ya da degas kontrolsüz bir kazan, yaklaşık 20 dakika içerisinde kendiliğinden degas olayını gerçekleştirecektir.

### 3.2.3 Ultrasonik temizleme kazanları

Ultrasonik kazanlar genellikle dikdörtgen şeklinde olurlar ve herhangi bir büyüklükte, paslanmaz çelikten imal edilirler. Mümkün olduğunca ince ama aynı zamanda da istenen dayanıklılığı sağlayabilecek kalınlıktaki bir paslanmaz çelik malzemeden imal edilirler.

Temizleme kazanları üç kategoride incelenebilir. Bunlar:

- 1) Küçük bir oyuncak gibi görünen tiplerdir. Bunlarda küçük dönüştürücüler kullanılmıştır ve oldukça basit yapıya sahip üreteçlerle birlikte hafif işlerde kullanılırlar, örneğin kontak lenslerin temizliğinde.
- 2) Diş hekimliği malzemelerinin temizliğinde kullanılan masa üstü küçük temizleyicilerdir. Bunların daha büyük dönüştürücüleri ve daha kaliteli üreteçleri vardır. Küçük parçaların ve laboratuvarındaki camdan yapılmış deney aletlerinin temizlenmesinde kullanılır. Uzun bir zaman periyodu içinde kullanabilirler. Bunların çoğunun üreteçleri kendi içlerindedir.
- 3) Büyük ebatlarda dönüştürücüleri ve dönüştürücü başına daha güçlü enerji verebilecek kapasitede büyük üreteçler vardır ve sanayide ağır işlerde kullanılırlar. Üreteçler kazandan ayrı bir yerde konumlandırılırlar. Bunlar daha verimli temizleme yapabilirler ve üretim amaçlı temizlik işlerinde kullanılabilirler.

Ultrasonik temizleme kazanlarında temizlenecek malzemeler bir sepet içerisine dizilmelidir. Bu sepet paslanmaz çelikten olmalıdır. Plastik gibi yumuşak malzemeler enerjiyi absorbe eder. Eğer parça çok kolay çizilebilen veya hasara uğrayabilecek yapıda ise o zaman teflon gibi malzemelerden kaplamalı sepetler veya parça dizme düzenekleri kullanılmalıdır.

Bir ultrasonik kazandaki güç seviyesi genellikle Watt ile gösterilir. Bir ultrasonik üreteç tarafından üretilen 500 Watt'lık ortalama gücü ele alırsak bu sistemde 500 Watt'lık temizleme gücü olduğu anlamına gelmez. Her sistemde olduğu gibi burada az da olsa güç kaybı vardır. Bunlar:

- 1) Dönüştürücüde hızlı hareketin sebep olduğu sürtünmeden kaynaklı ısınma
- 2) Temizlenecek parçalarda ve sepette bir kısım enerjinin absorbe edilmesi
- 3) Ultrasonik enerjinin sıvıyı ısıtmasıdır.

Güç kaybı sıcaklıktan, temizleme sıvısının yoğunluğundan ve kimyasal katkılardan da etkilenir. Ultrasonik kazanda güvenilir bir şekilde yerel bölgelerde elektriksel sinyal okunarak kazanın farklı bölgelerindeki kavitasyonun şiddeti kıyasla belirlenebilir. Üreteçten gelen ultrasonik sinyal dönüştürücü sayesinde (titreşerek) mekanik enerjiye dönüşür, dönüştürücü de bunu diyaframa ileterek diyaframın titreşmesini sağlar. Bu titreşimle suda oluşan basınçlı dalgalar tekrar sensör prob tarafından ölçülerek, tekrar elektrik sinyaline dönüştürülür.

Ultrasonikle uğraşan şirketler ultrasonik enerji gücünü iki yolla hesaplarlar. Bunlar tepe (peak) ve ortalama değerleridir. Tepe gücü operasyona başlamak için gerekli enerjiyi sağlar. Çoğu şirketler bir seçenek olarak güç yoğunluğu kontrolü sunarlar. Bu kontrol ultrasonik gücü azaltarak güç eğrisi üzerinde gücü istenen bir düzeyde sabit tutmaya çalışır.

Enerji %50'nin altındaysa dönüştürücüyü aktive edebilecek yeterli enerji olmaz; örneğin 100 Watt'lık ultrasonik kazanda güç 50 Watt ile 100 Watt arasında ayarlanabilir. Eğer hassas parçalar temizleniyorsa kavite erezyonu engellenmesi açısından, veya ultrasonik kaplama işinde kullanılırsa ya da diğer kimyasal uygulamalarda güç kontrolü önemli bir seçenektir.

### **3.2.4 Temizleme sıvısı**

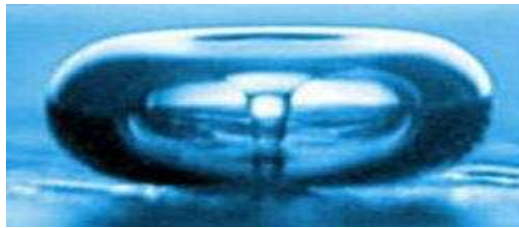
Modern ultrasonik çözeltiler çeşitli deterjanlardan, sıvı yüzey gerilimini azaltan ve temizleme etkinliğini artırıcı maddelerden oluşmuştur. Çeşitli formüllerden oluşan çözeltiler, özel uygulamalar için uygulanabilirler. Çözeltinin amacı pislik ile parça arasındaki bağı koparmaktır. Suyun tek başına temizleme özelliği yoktur. Ultrasonik aktivitenin birinci amacı çözeltiliye bu işi yapmakta yardımcı olmaktır. Bir ultrasonik çözelti içinde temizleme işlemini optimize etmek için çeşitli maddeler vardır. Ultrasonik çözelti sıvı yüzey gerilimini düşürücü maddeler içerir. Sıvı yüzey geriliminin düşmesiyle, ultrasonik kazan içindeki kavite şiddeti artar.

Ultrasonik kazan içinde tek etkili değişken çözeltilidir. Bazı sıvılar oda sıcaklığında iyi çalıştığı halde bazıları 60-70°C derecede iyi iş görür. Bazı sıvılarda çözeltinin içine ultrasonik enerjiyi etkin bir şekilde transfer edebilmesi için temizlik maddelerine ihtiyaç duyulur. Su ile temizlikte, çoğu zaman temizleme malzemesine ihtiyaç duyulur ve daha iyi sonuç verebilmesi için sıcaklığının da yüksek olması gerekir.

Deterjanın seçimi temizlenecek olan kire bağlıdır. Bu herhangi bir ultrasonik temizleme işleminde yapılacak önemli seçimlerden biridir. Deterjan kullanılarak yapılan ultrasonik temizleme işleminde parça temizleme sonrası ayrışan kirler parça yüzeyinde yapışık veya çözelti içinde asılı kalırlar. Çok fazla miktarda ve kaliteli temizlik isteniyorsa ultrasonik temizleme kazanlarında filtreleme ve ilave kazanlar kullanımı önerilir. Temizleme çözümleri ve deterjan kullanımı ayrıca tavsiye edilir. Çözücü kullanımı da çok fazla abartılmamalıdır. Çünkü fazla kullanım, temizlenecek parça üzerinde temizlenmesi orijinalinden daha zor olan kir katmanı oluşturur. Seri üretim sırasında temizleme gerektiren uygulamalarda, işleyen seri üretim sürecinin durmaması için filtreleme işleminin önemi daha büyüktür.

### 3.3 Kavite Erozyonu

Temizlenecek malzeme kazanın içinde uzun süre kaldığında kavitasyon erozyonu olarak adlandırılan olay meydana gelir. Kavitasyon kabarcığı patladığı zaman çok yüksek sıcaklıklarda ısı yayar ve anlık şok dalgalar oluşturur. Oluşan şok dalgalar temizlenen malzeme üzerinde aşınmalara sebep olur. Düşük frekanslarda uzun yıllar kullanım sonucunda ultrasonik kazanların tabanı da aşınır. Eğer temizlenen malzemenin yüzü yumuşaksa aşınma etkisi burada da görülür. Bu olay düşük frekanslarda daha etkili olmakla birlikte yüksek frekanslarda da kavitasyon erozyonu gerçekleşebilir. Fakat bu durum daha uzun temizleme zamanı sonucunda görülür.



**Şekil 3.8 :** Kavitasyon kabarcığı.

Bir ultrasonik sistemin gücü ve frekansı temizlenecek parçanın seviyesine ayarlanarak parça hasardan korunabilir. Yüksek frekanslarda güç daha düzgün yayılır ve bu da parçanın daha iyi temizlenmesini sağlar. Ayrıca yüksek frekanslarda daha küçük kavitasyon kabarcıkları oluşturarak daha ince parçaların temizlenmesine olanak sağlar.

### 3.4 Ultrasonik Temizleme Sürecinde Optimizasyon

Ultrasonik temizlemede kazan içindeki kavitasyon yoğunluğu çok önemlidir. Kavitasyon şiddetini belirleyici faktörler şunlardır:

- Ultrasonik dalgaların genliği ve frekansı,
- Sıvının buhar basıncı, yüzey gerilimi, yoğunluğu ve kayganlığı,
- Statik sıvı koşulları ve akış karakteristiği

#### 3.4.1 Ultrasonik dalgaının genliği ve frekansı

Ultrasonik şiddet, yayılan dalgaının genlik ve frekansına bağlıdır. Verilen herhangi bir güç değerinde 20 kHz ses dalgalarının oluşturduğu şiddet 40 kHz'lik ses dalgalarının oluşturduğu şiddetin yaklaşık olarak iki katıdır. Yani 20 kHz'lik dalgaların kavitasyon yoğunluğunun doğurduğu temizleme gücü 40 kHz'likten daha fazladır [2].

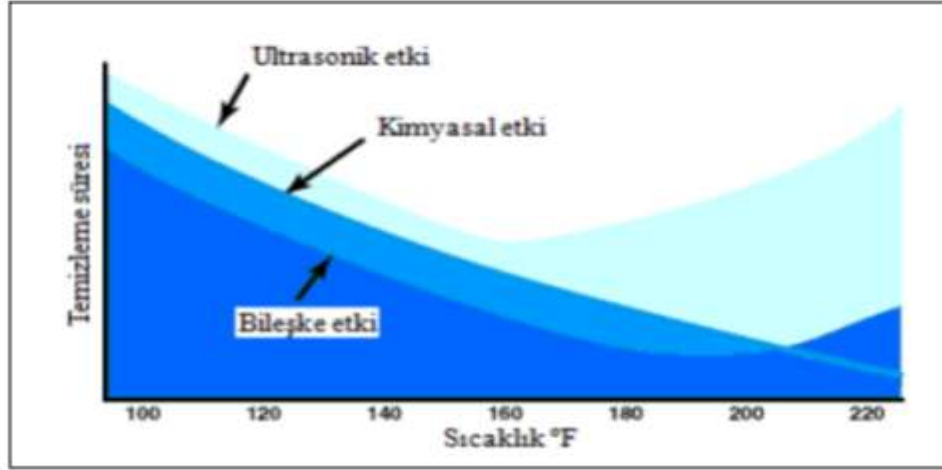
20 kHz'de daha yavaş kavitasyon baloncuğu oluşur fakat daha güçlü patlayarak etrafa daha fazla enerji verir. Bu homojen temizlik için uygun bir durum değildir. Ultrasonik sistemin düşük frekanslarının uzun dalga boyları sıvı ortamı boyunca çok değişik noktalarda duran dalga örüntüleri oluştururlar.

#### 3.4.2 Sıvının buhar basıncı, yüzey gerilimi, yoğunluğu ve kayganlığı

Kavitasyon oluşumunda sıcaklık önemli bir faktördür. Sıcaklık, kavitasyon oluşumunda etkili olan sıvının kayganlığına, sıvı içindeki gazın çözünürlüğüne, çözülmüş gazın sıvı içindeki difüzyon oranına ve buhar basıncına doğrudan etki eder.

Maksimum kavitasyon etkisi için sıvının kayganlığının minimum olması gerekir. Sıvı kaygan olduğu zaman kavitasyon baloncuğunun yeterince hızlı oluşmasına ve güçlü bir şekilde patlamasına izin vermeyecektir. Sıcaklığın artışı çoğu sıvıların kayganlığını düşürür [2].

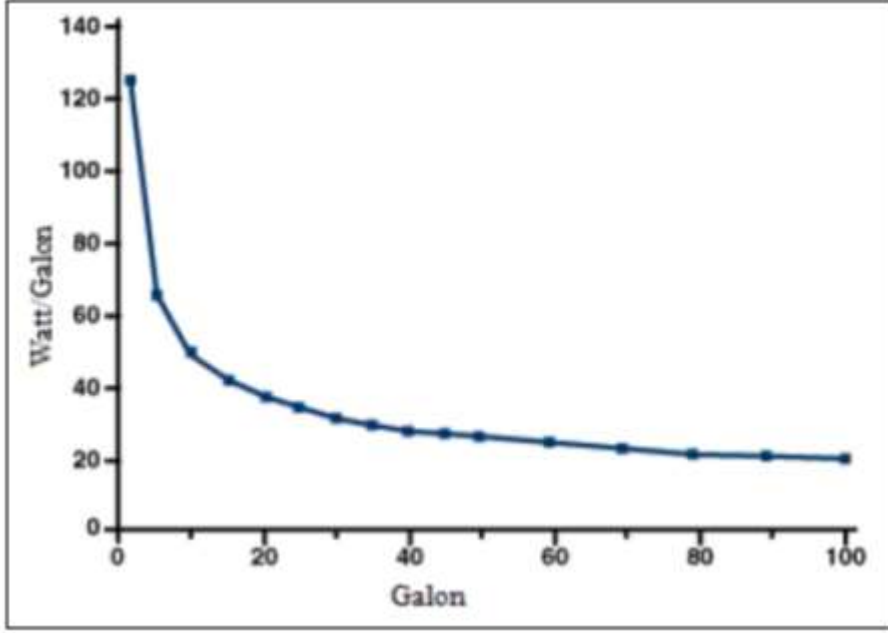
Sıcaklığın ultrasonik temizleme işleminde maksimum kavitasyon oluşmasında önemi büyüktür. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi katalizör olarak kullanılan temizlik kimyasalının verimliliği de sıcaklıkla ilişkilidir. Diğer yandan, saf suda yaklaşık olarak 160°F'da kavitasyon etkisi maksimum olmaktadır.



Şekil 3.9 : Sıcaklığa temizleme süresine etkisi.

Kavitasyon oluşumuna sıvı içindeki çözünmüş gazların olumsuz etkisi vardır. Kavitasyon baloncuğu büyüme fazında iken sıvı içindeki çözünmüş gazlar baloncığa gelirler ve bunlar istenilen ultrasonik etki için gerekli olan güçlü patlamalara engel olurlar. Sıvı içindeki çözünmüş gazların miktarı sıcaklık arttıkça azalır. Sıvının yüzey gerilimi yükseldikçe minimum kavitasyon oluşabilme enerjisi de artar. Ancak bu durumda da kabarcık patladığında daha fazla şok dalga enerjisi meydana getirir. Saf suyun yüzey gerilimi  $75 \times 10^{-5}$  N/cm civarındadır, oda sıcaklığında kavite zor oluşturulur. Ancak sıvıya yüzeyde aktif bir kimyasal malzeme (deterjan) katıldığında yüzey gerginliği  $30 \times 10^{-5}$  N/cm ye düşer ve kavite oluşturabilir. Sıvının buhar basıncı düşük olduğu zaman, soğuk suda olduğu gibi kavite üretimi zordur; fakat sıcaklık arttıkça buhar basıncı gitgide yükselir [2]. Kavitasyon yoğunluğu ultrasonik temizleme sistemlerinde kullanılan güç seviyelerindeki ultrasonik güçle yakından ilişkilidir. Eğer güç, kavitasyon eşik değerinin çok üstüne çıkarılırsa kavitasyon yoğunluğunun artışı durur ve ancak bazı teknikler kullanılarak arttırılabilir.

Bütün temizlik sıvısı içerisinde kavitasyon oluşturabilmek için temizlik kazanına yeterli seviyede ultrasonik güç iletilmelidir. Şekil 3.10'da gösterildiği üzere, bir ultrasonik temizlik kazanı içerisindeki ultrasonik güç seviyesini ölçmek üzere galon başına düşen güç anlamına gelen Watt/Galon birimi kullanılmaktadır. Ultrasonik temizlik sürecinde kullanılan temizlik kazanının hacmi arttıkça, hedeflenen performansın elde edilebilmesi için galon başına gereken güç miktarı azalır. Yüzeyce büyük cisimler temizlenmek istendiğinde ekstra ultrasonik güç gerekmektedir. Diğer yandan, aşırı ultrasonik güç kullanımı kavitasyon erozyonu dediğimiz olumsuz etkiye neden olabilmektedir.



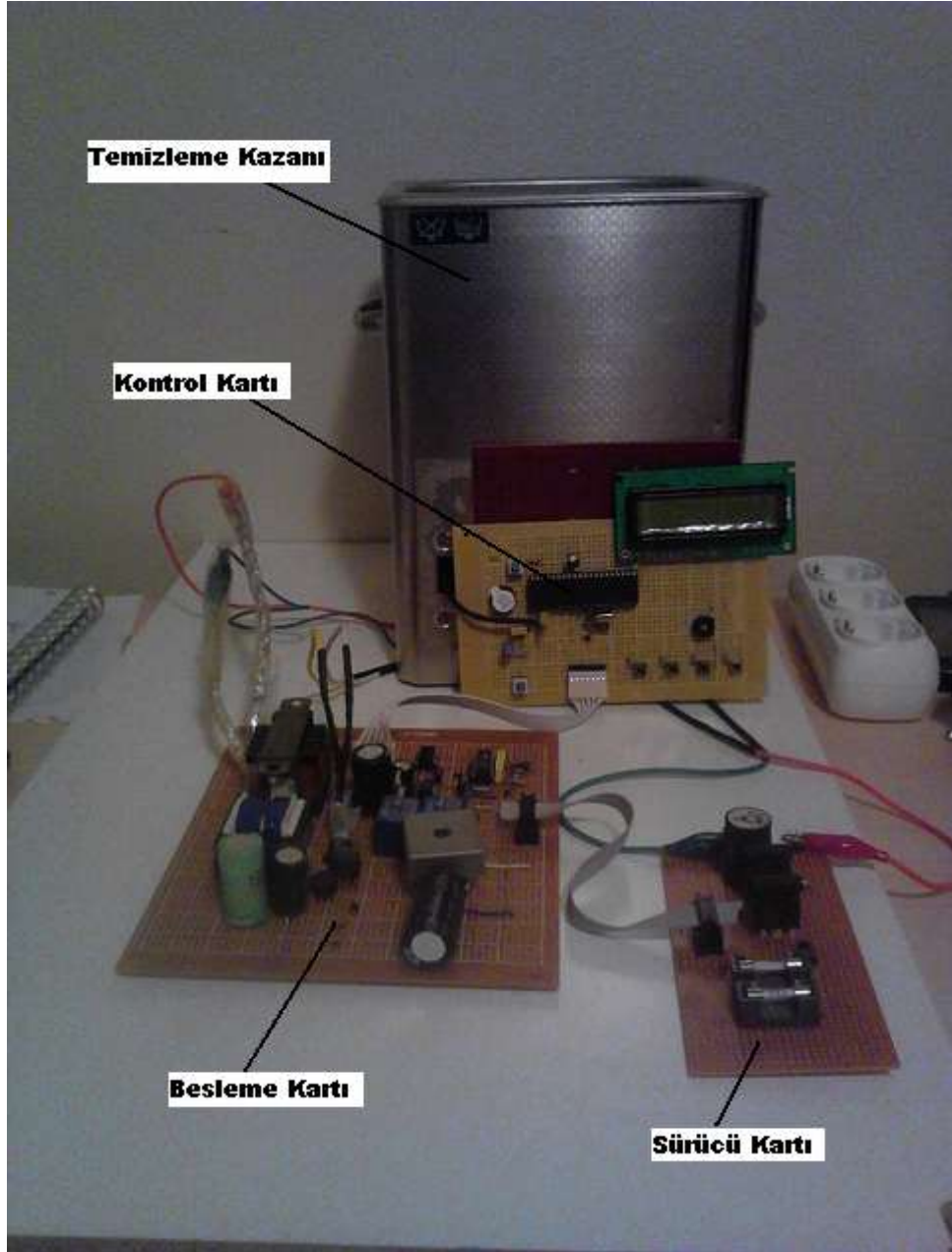
**Şekil 3.10 :** Kavitasyon-basınç ilişkisi.

Kavitasyon yoğunluğu ile ultrasonik frekans ters orantılıdır. Ultrasonik frekans arttıkça kavitasyon baloncuğunun boyutu küçülecek ve daha az şiddetli patlamalar olacağından kavite yoğunluğu azalacaktır.

### **3.4.3 Statik sıvı koşulları ve akış karakteristiği**

Temizleme uygulamalarında kullanılacak olan sıvının statik koşulları ve akış karakteristiği, ultrasonik alan şiddetini karakterize eden duran dalga örüntüsü oluşumu ile ilişkili olup bu şartlar altında kavite şiddeti maksimize edilebilir. Efektif temizleme için tavsiye edilen yöntemlerden biri olan, sıvının arındırma işlemi sayesinde çok az ya da hiç kavitasyon kaybı olmayacaktır. Homojen bir temizlik için de bu sistemin kullanılması uygundur.





**Şekil 4.2** : Sistemden bir görünüm.

Mikrodenetleyicili kontrol devresi: Tuş takımı ve LCD ekranı da içine alan PIC serisinden bir mikrodenetleyicinin kullanıldığı kontrol kartıdır.

Besleme devresi: Şehir şebekesinden alınan gerilimi doğrultarak düşük ve yüksek gerilimlerin elde edilmesini sağlayan ve tüm sistemi besleyen devredir.

Sürücü devresi: Ultrasonik dönüştürücünün sürülmesi için gereken yüksek frekanslı, yüksek gerilimli modüle edilmiş sinüsoidal işaretlerin üretildiği devredir.

Sıcaklık devresi: Mikrodenetleyici kontrolünde sistemin sıcaklığını istenilen seviyede sabit tutan, ısıtıcı ve sıcaklık algılayıcı devresinden oluşan devredir.

Yıkama kazanı: Paslanmaz elikten yapılan, kullanılacak yere göre dikdörtgen, kare veya daire şeklinde olabilen, içinde çözelti ile birlikte temizlenecek malzemenin konulduğu sepeti bulunduran bölümdür. Kazanın genellikle altında ve/veya yanlarında, kazanın byklğu ile orantılı sayıda dönüştürücü bulunur.

#### **4.2 Mikrodenetleyici Seçimi**

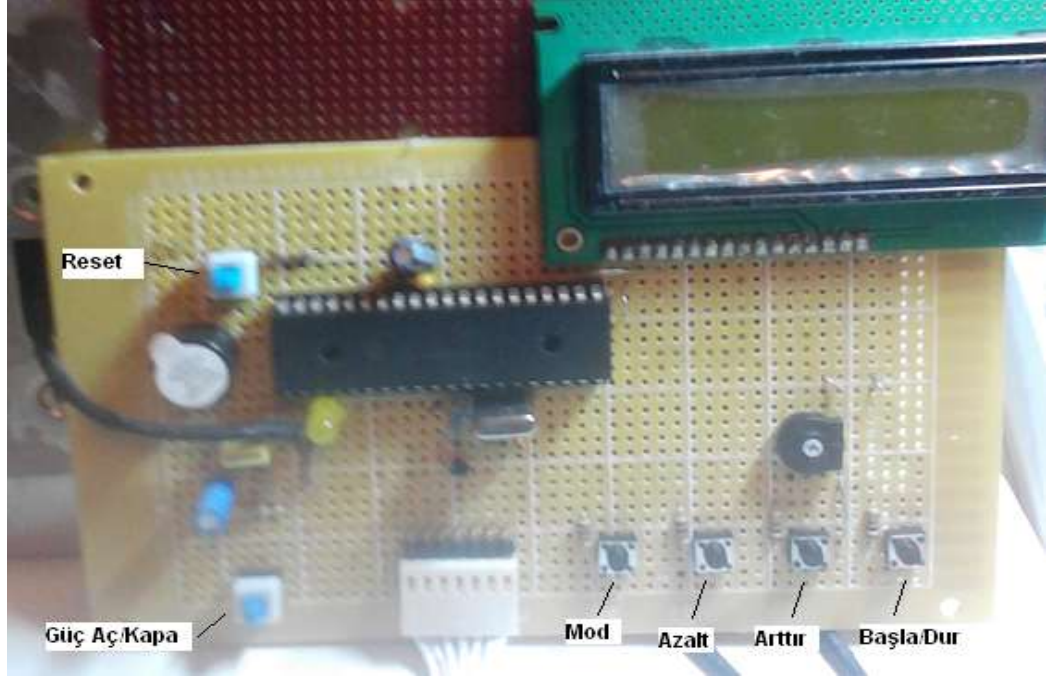
Tez alışması kapsamında, ultrasonik dönüştürücünün sürülmesinde kullanılacak sinyalin genliği ve frekansı ayarlanabilir olması amaçlanmıştır. Böylece rezonans frekansını içine alan belli bir frekans bandı dahilinde frekans taramalı çalışma modu kullanılabilecektir. Mikrodenetleyici kontrolünde yüksek frekanslı sürücü sinyallerinin elde edilebilmesi PWM (Pulse Width Modulation) modüllü bir mikrodenetleyici kullanma ihtiyaını doğurmuştur. Ultrasonik sürücü sinyali sinusoidal bir sinyal olacağından, PWM darbelerinin eşlenik ve senkronize olması gerekmektedir. Ayrıca C programlama dili ile mikrodenetleyicinin programlanabilmesi için program belleğinin yeterli büyüklükte olması gerekmektedir. LCD, tuş takımı, LED, röle gibi elemanların sürülebilmesi için de çok sayıda çıkış pinine sahip olması tasarım açısından önemlidir. Piyasada kolay bulunabilmesi ve maliyetinin düşük olması da mikrodenetleyici seçimindeki önemli faktörlerdendir.

Bu çalışmada sistemin donanım ve yazılım tasarımındaki ihtiyaçlarını karşılayabilecek PIC mikrodenetleyici ailesinden ECCP (Enhanced Capture/Compare/PWM) modülüne sahip 40 pinli PIC18F4520 mikrodenetleyicisi seçilmiştir. Seçilen PIC mikrodenetleyicisi dört farklı PWM moduna sahiptir. Bu modlardan yarım köprü (half bridge) modu ihtiyaı karşılamaktadır. l-bant gecikmesi 28 pinli PIC’lerde bulunmamaktadır. Bu zellik sayesinde eşlenik PWM darbelerinin genliği kontrol edilebilmektedir.

#### **4.3 Kontrol Kartı Tasarımı**

Tasarlanan sisteme ilişkin kontrol, değerlendirme işlemlerinin yapıldığı sistemin beyni olan karttır. zerinde mikrodenetleyici, tuş takımı, 2x16 karakter LCD, buzzer, sıcaklık sensörü, uyarı LED’i bulunmaktadır. Tasarlanan karta ilişkin devre çizimleri şekil 4.3’te yer almaktadır.

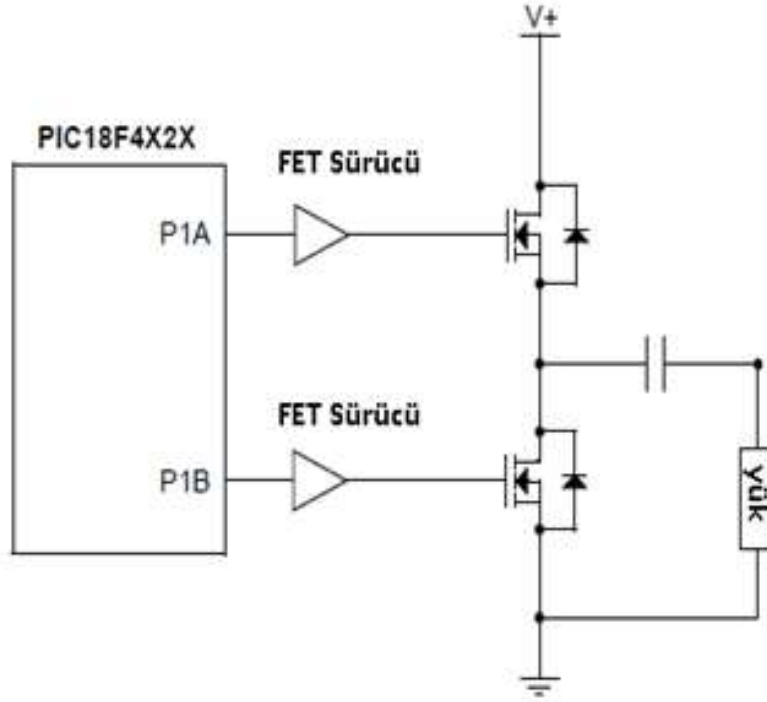




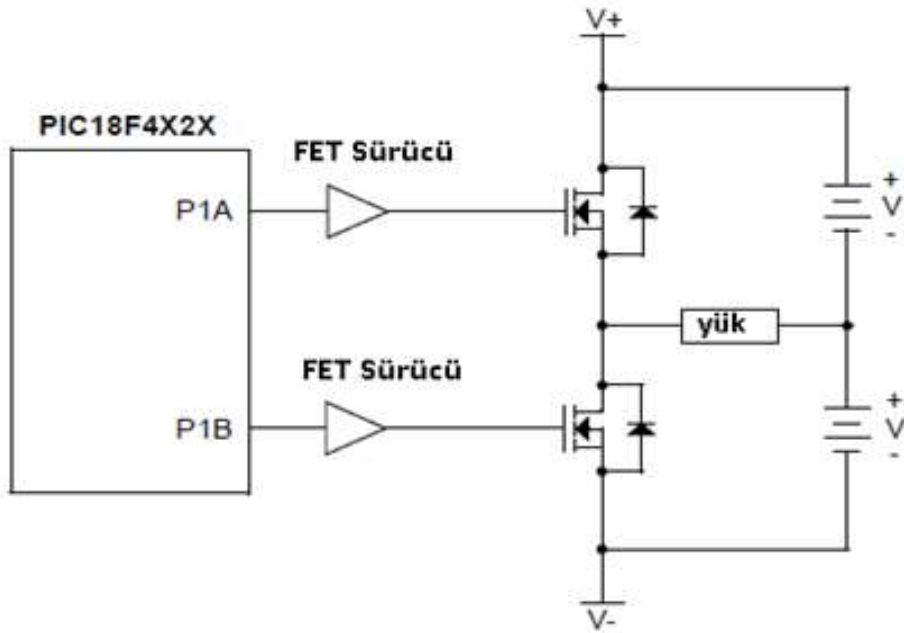
Şekil 4.4 : Kontrol kartından görünüm.

#### 4.4 Yarım Köprü (Half Bridge) ile DC/AC Dönüştürme Yöntemleri

Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’deki devrelerde mikrodenetleyicinin eşlenik PWM çıkışları olan P1A ve P1B pinlerinden PWM sinyalleri elde edilir. Bu sinyaller kullanılarak DC-AC dönüşüm farklı yollarla elde edilebilir. Şekil 4.5’deki devrede sürücü devresi ile birlikte iki adet IGBT’i kullanılmıştır. Bu devrede kullanılan kondansatörün dolma ve boşalması sayesinde yük uçlarına sırasıyla farklı polaritede gerilim aktarılabilceğinden, simetrik DC güç kaynağı kullanmak yerine tek bir DC güç kaynağı kullanmak yeterli olmaktadır. Güç harcanımını azaltan bir yöntem olduğundan dolayı tez çalışmasında bu yöntem tercih edilmiştir. Ancak, bu devrede hiçbir zaman her iki IGBT’nin aynı anda iletim durumunda olmaması gerekmektedir. Aksi takdirde DC gerilim kaynağı kısa devre olmaktadır. Bu nedenle mikrodenetleyici üzerinde çalışacak yazılım bu durum göz önünde bulundurularak hazırlanmalıdır ve gerekli emniyet tedbirleri alınmalıdır. Diğer bir problem de endüktif yük kullanılması durumunda kondansatör ve yük bobininin oluşturduğu RLC seri rezonans devresinin ortaya çıkarabileceği, rezonans anında oluşabilecek yüksek gerilimin güç devresine zarar verebilme ihtimalinin olmasıdır. Burada çalışma frekansına göre kondansatörün değerinin belirlenmesi çok önemlidir. Şekil 4.6’daki devrede böyle bir durum söz konusu değildir ancak iki adet DC güç kaynağı gerektirmesi dezavantajdır.

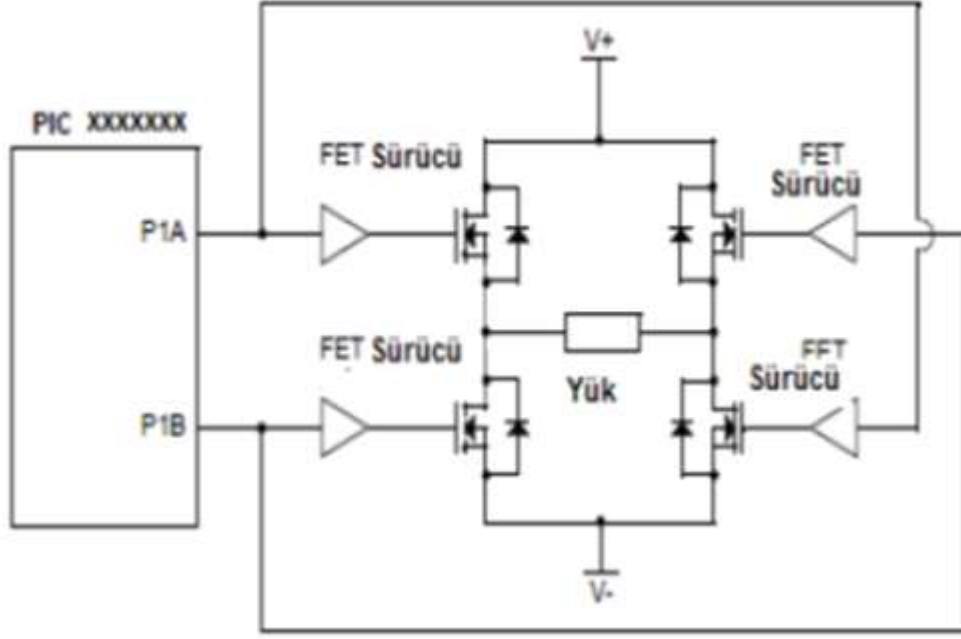


Şekil 4.5 : Tek kaynaklı yarım köprü devresi [4].



Şekil 4.6 : Standart yarım köprü devresi [4].

Şekil 4.7’de ise tek veya simetrik kaynak kullanılabilir. Kondansatör kullanılmadığından rezonans kaynaklı yüksek gerilim ortaya çıkma durumu söz konusu değildir. Ancak 4 adet sürücü ve IGBT kullanmak gerekmektedir. Bu da maliyeti artırmaktadır.

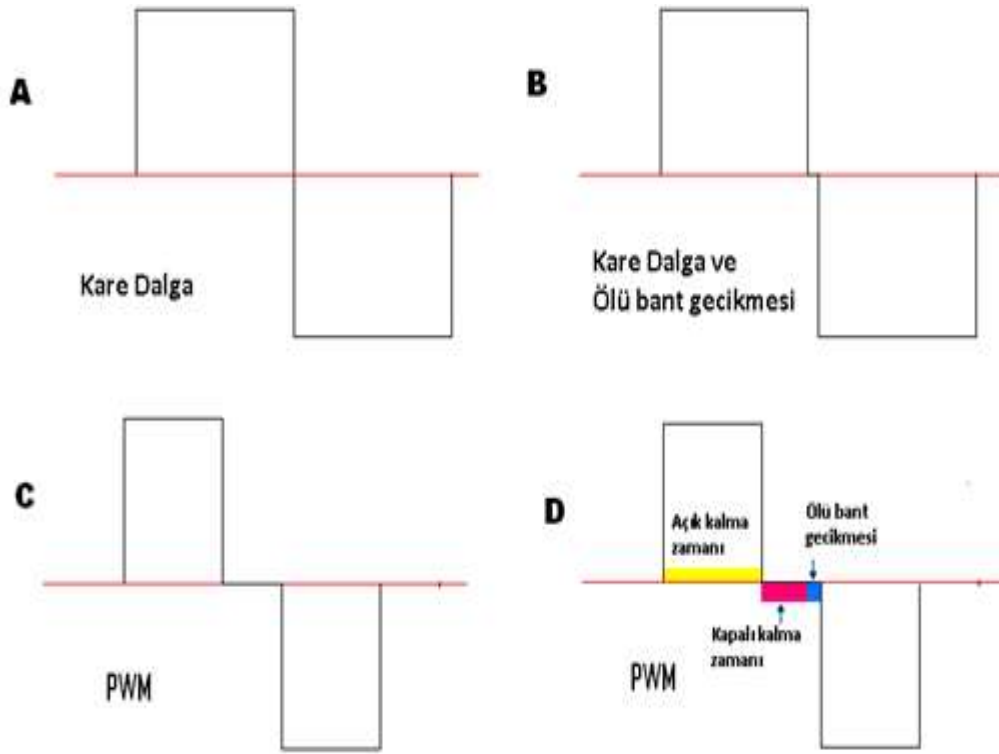


Şekil 4.7 : Tam köprü devresi [4].

#### 4.4.1 Ölü bant gecikmesi (Dead band delay)

Yarım köprü uygulamalarında iki çıkış pini de PWM frekansı ile modüle edilmiş durumdadır. Güç anahtarlarının kapanması açılmasına göre daha fazla zaman gerektirir. Eğer aynı anda iki anahtar bir süre açık kalırsa çok yüksek bir akım güç transistörleri üzerinden akabilir ve diyot köprü devresini kısa devre yapabilir. Ölü bant gecikmesi ile eşlenik PWM sinyalleri arasında gecikme uygulanarak güç katının kısa devre olması önlenir. Yani anahtarların açılması geciktirilerek kapanacak olan anahtara yeterli süre verilmiş olur. Gecikme, sinyalin aktif olmayan kısmından aktif olan kısmına geçerken oluşturulur.

PIC mikrodeneleyicisinin ECCP modülündeki programlanabilen ölü-bant gecikme özelliği sayesinde PWM1CON yazıcısının ayarlanması ile ölü-bant gecikmesi değiştirilerek iş zamanı (duty cycle) değiştirilebilmektedir. Bu değişim sayesinde modüle edilmiş sinyalin modüle edilen kısmı da değişmektedir. Modüle edilen bu sinyal ultrasonik dönüştürücüye uygulanan ultrasonik sinyalin genliğinin efektif değerini değiştirebilmeyi sağlar, böylece güç kontrolü sağlanabilmektedir. Dönüştürücü kendisine uygulanan bu sinyalin genlik ve frekansına bağlı olarak ultrasonik kazandaki kavite yoğunluğunu oluşturmakta ve kavite yoğunluğu da yıkama gücünü belirlemektedir. Tasarlanan sistemde Çizelge 4.1’de belirtildiği gibi 5 adet güç seviyesi bulunmaktadır.



**Şekil 4.8 :** Yarım köprü PWM modunun çıkışı.

**Çizelge 4.1 :** Güç seviyeleri ve gerilim karşılıkları.

| Güç Seviyesi   | Gerilim Değeri ( $V_{pp}$ ) |
|----------------|-----------------------------|
| Güç Seviyesi 1 | 100                         |
| Güç Seviyesi 2 | 150                         |
| Güç Seviyesi 3 | 200                         |
| Güç Seviyesi 4 | 250                         |
| Güç Seviyesi 5 | 300                         |

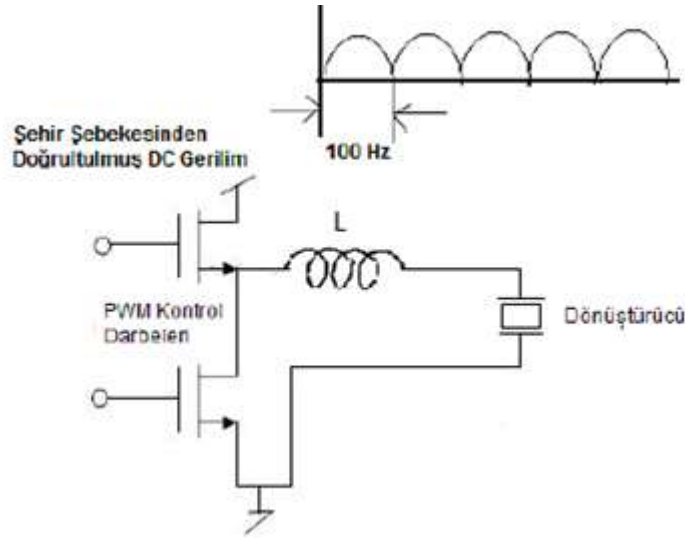
#### 4.5 Besleme Kartı Tasarımı

Besleme kartı, sisteme ilişkin tüm devre elemanları için gerekli beslemeyi üreten karttır. Kontrol kartı için 5V besleme, yalıtım ve röle sürücü devreleri için 12V besleme ve IGBT sürücü devresi için de 300V dc gerilim üretilmektedir. Kart üzerinde güç trafoları, doğrultucu devreleri, regülatör devreleri ile besleme gerilim değerleri sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak optokuplörülü yalıtım devreleri sayesinde 5V ile 12V sinyaller ve 12V ile 300V sinyaller birbirinden izole edilmiştir.



#### 4.6 Sürücü Devresi

Sürücü devresi tek kaynakla beslenen, yüksek gerilimlerde MOSFET'lere göre daha iyi performans gösteren 2 adet IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ve transistörleri koruyan 2 adet diyot kullanılarak oluşturulmuş yarım köprü devre topolojisi kullanılarak tasarlanmıştır. Bir adet endüktanstan oluşan temel bir DC-AC inverter devresi yapısındadır. Güç devresinin prensip şeması Şekil 4.11'de gösterildiği gibidir.

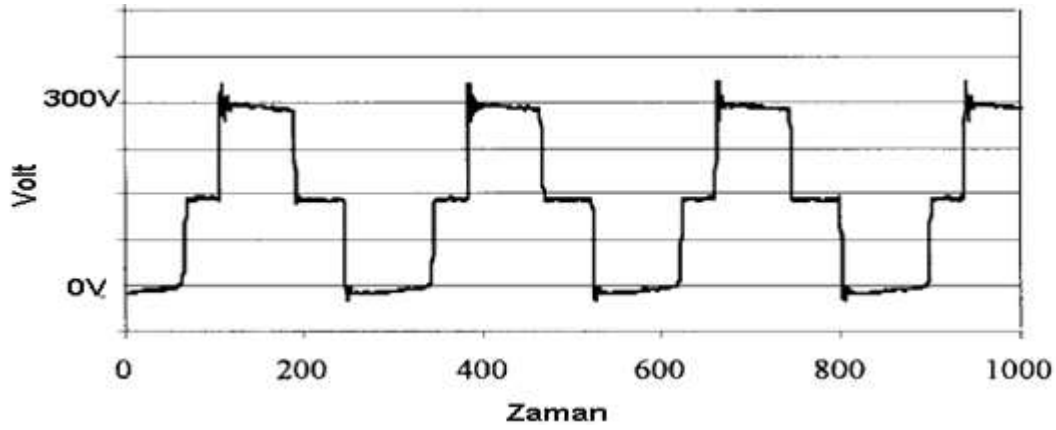


**Şekil 4.11 :** Güç devresi prensip şeması.

Mikrodenetleyiciden elde edilen PWM 0-5V genliğinde ve 40 kHz frekansında darbeler şeklindedir. Bu sinyaller IGBT'lerin sürülmesinde kullanılmak üzere öncelikle 0-12V genlik seviyesine çıkarılması gerekmektedir. Bu işlem optokuplör devre elemanı kullanılarak 5V, 12V beslemeleri birbirinden izole olacak şekilde Şekil 4.12'deki yalıtılmış sinyal yükselteç devresi ile sağlanmaktadır. Bu darbeler şehir şebekesinin tam dalga doğrultulmuş şeklini DC gerilim girişi olarak kullanan bir DC-AC dönüştürücü devresindeki güç transistörlerine, bu uygulamalar için özel olarak üretilmiş olan sürücü tümleşik devrelerinden IR2110 aracılığıyla yükseltilerek aktarılır.

37 kHz-42 kHz arasında anahtarlanan IGBT'ler sayesinde güç devresi çıkışında zarfı 100 Hz, taşıyıcı frekansı 37-42 kHz ve tepeden tepeye genliği ise 100-300 Volt arasında değişebilen yüksek genlikli bir genlik modülasyonlu sinusoidal işaret elde

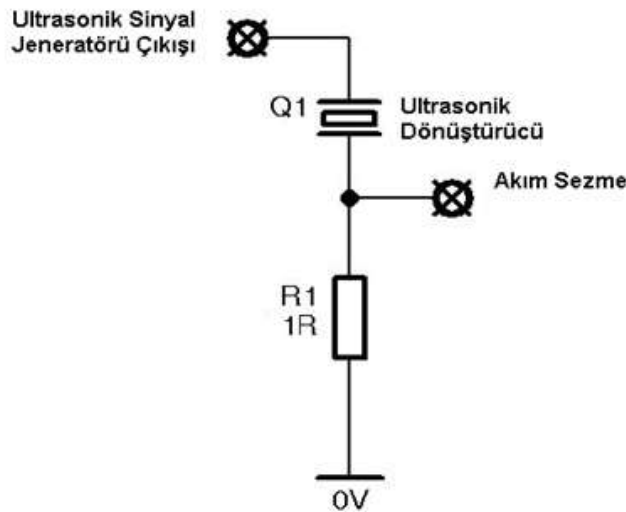
29



Şekil 4.14 : Modüle edilmiş ultrasonik sinyal.

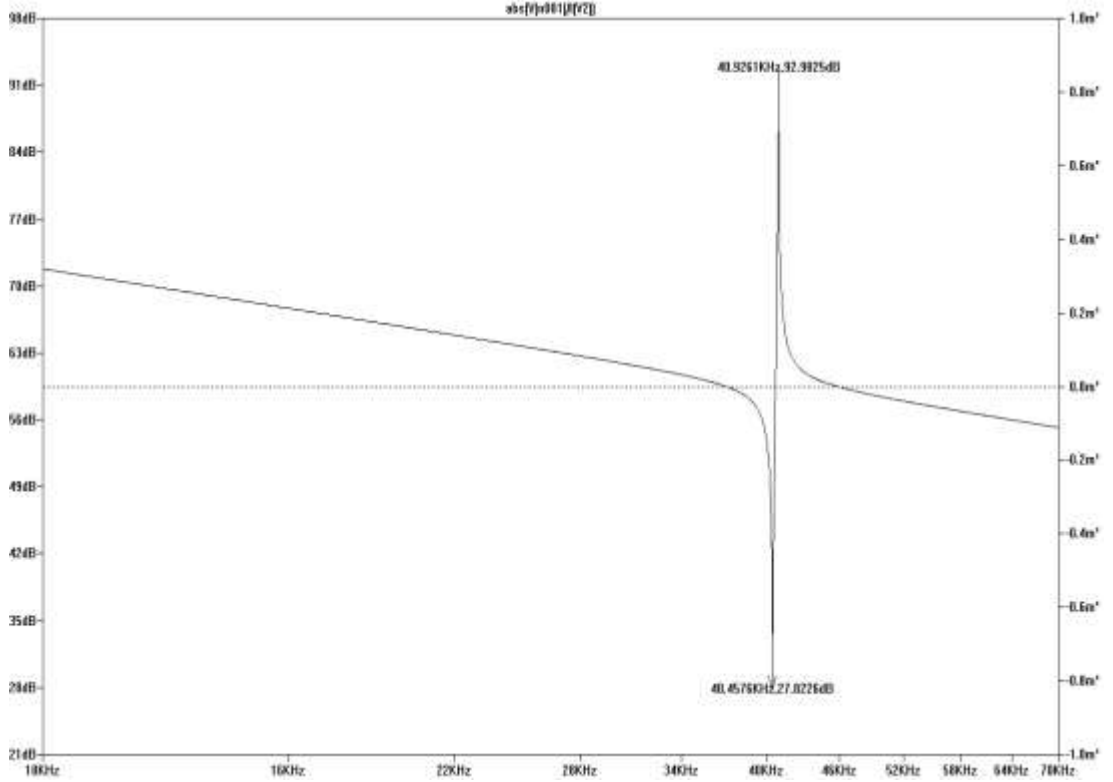
#### 4.6.1 Ultrasonik dönüştürücü modelleme ve empedans uydurma

Ultrasonik dönüştürücüden maksimum güç alabilmek için ultrasonik dönüştürücü ile güç katının arasına empedans uydurma devresi eklenmelidir. Empedans uydurma devresinin tasarımı için öncelikle kullanılan ultrasonik dönüştürücünün RLC eşdeğer devresi çıkarılmalıdır. Bunun için kurulan test düzeneği Şekil 4.15’de gösterilmektedir. Bu devrenin yanında test için bir adet osiloskop ve sinyal jeneratörüne ihtiyaç vardır. Ultrasonik sinyal üretici, ultrasonik dönüştürücünün bir ucuna bağlanır. Ultrasonik dönüştürücünün diğer ucuna da akım sezme işlemi için düşük bir direnç bağlanır. Ultrasonik dönüştürücüden geçen akım bu direnç üzerinden okunur. Ultrasonik dönüştürücüye uygulanan sinusoidal gerilim ve üzerinden akan sinusoidal akımın farklı frekans değerlerinde maksimum tepe noktaları elde edilir. Elde edilen V-I değerlerinden ultrasonik dönüştürücüye ait empedans karakteristiği Şekil 4.16’daki gibi çıkarılmaktadır.



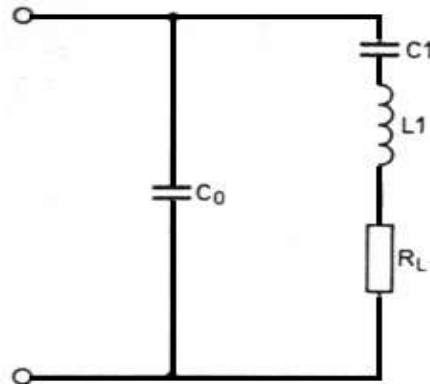
Şekil 4.15 : Ultrasonik dönüştürücü test devresi.

Ultrasonik dönüştürücünün, tepeden tepeye 4V genlikte bir sinyal üreticiyle farklı frekanslarda sürülmesi ile V-I noktasal değerleri elde edilmiştir. Test için %2 toleranslı 1 $\Omega$  luk bir direnç kullanılmıştır. Elde edilen V-I noktasal değerleriyle ultrasonik dönüştürücüye ait empedans karakteristiği modellenmiş ve bu modele karşılık gelen RLC eşdeğer devresi çıkarılmıştır. Elde edilen verilere göre ultrasonik dönüştürücüye ait empedans karakteristiği ise Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 : Ultrasonik dönüştürücü ait empedans karakteristiği.

Kullanılan ultrasonik dönüştürücü için tasarlanan eşdeğer devrede, literatürde yaygın bir şekilde kullanılan “Butterworth-Van Dyke Transducer Model” modeli kullanılmıştır. Şekil 4.17’de bu modele ilişkin devre yapısı gösterilmektedir [5].



Şekil 4.17 : Butterworth-Van Dyke Transducer Model.

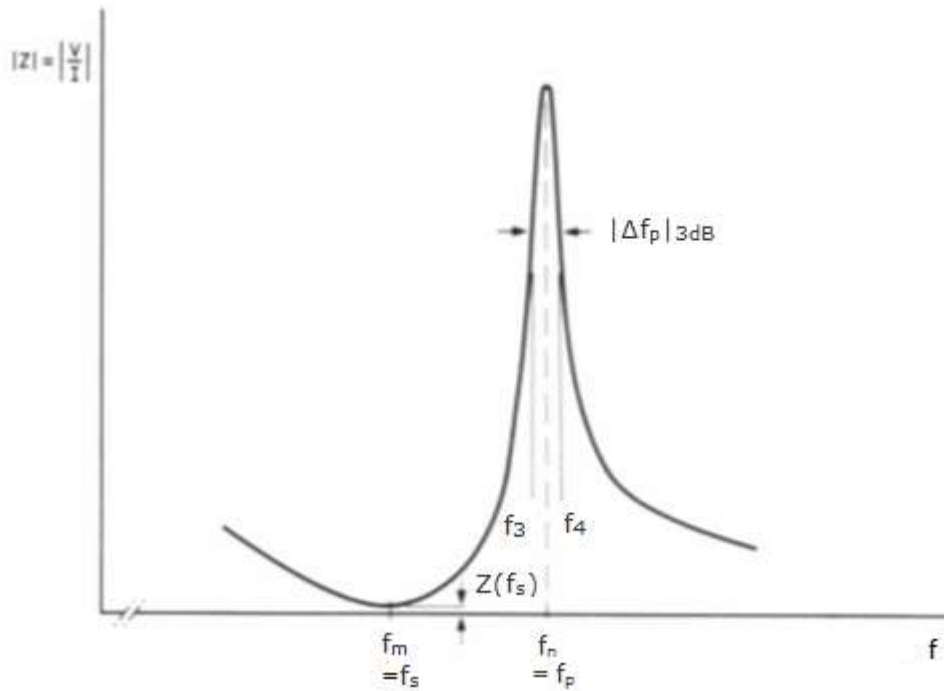
$C_0$ : Rezonans frekansı altında, ultrasonik dönüştürücü kapasitansı

$R_L$ : Mekanik kayıpların neden olduğu rezistans

$C_1$ : Mekanik devrenin kapasitansı

$L_1$ : Mekanik devrenin endüktansı

Bu devre modeline ilişkin karakteristik empedans eğrisi Şekil 4.18’de verilmiştir. Bu karakteristik eğrisi için bir adet minimum empedans noktası ( $f_s$ ) ve bir adet minimum admitans noktası ( $f_p$ ) bulunmaktadır. Bu noktalar dikkate alınarak eşdeğer devrenin devre elemanları tespit edilmiştir.



**Şekil 4.18 :** Butterworth-Van Dyke Transducer Model’ine ilişkin empedans eğrisi.

$R_L$  direnci ihmal edildiğinde, eşdeğer devrenin empedansının sıfır olduğu noktadaki frekans ifadesi  $f_s$  olarak denklem 4.1’de verilmiştir. Eşdeğer devrenin admitansının sıfır olduğu andaki frekans ifadesi  $f_p$  olarak denklem 4.2’de verilmiştir.

$$f_s - \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} = 0 \quad (4.1)$$

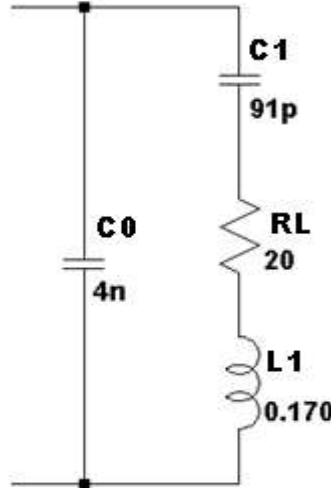
$$f_p - \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_0 C_1}} = 0 \quad (4.2)$$

Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'den yararlanarak  $L_1$  ve  $C_1$  değerleri bulunabilir.  $C_0$  değeri ultrasonik dönüştürücülere göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu projede kullanılan ultrasonik dönüştürücü için  $C_0$  değeri 4nF'tır.  $R_L$  değeri de 20Ω'dur.

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} = 40,4576 \text{ kHz} \quad (4.3)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-9} + C_1}{L_1 4 \cdot 10^{-9} C_1}} = 40,9261 \text{ kHz} \quad (4.4)$$

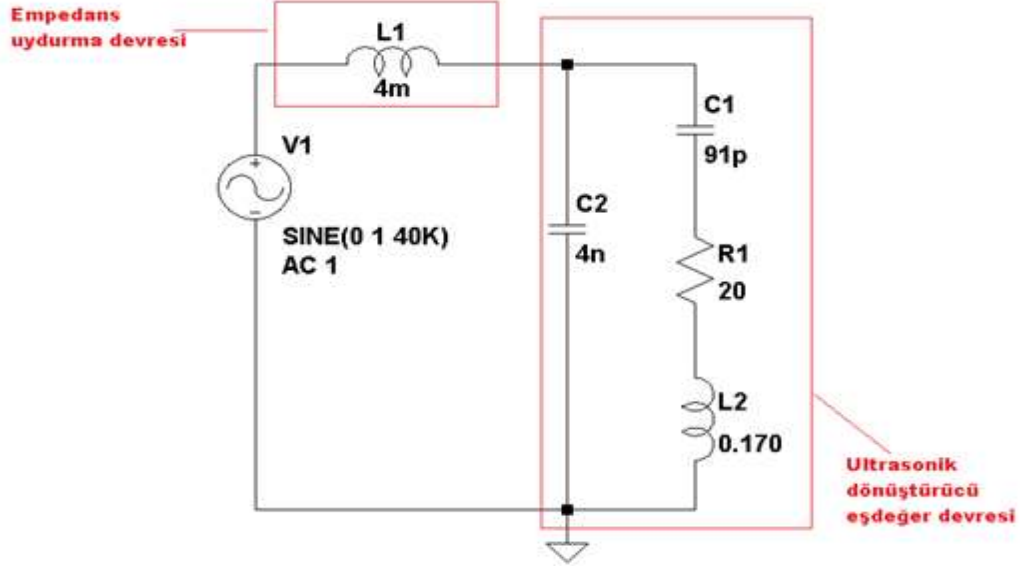
Denklem 4.3 ve Denklem 4.4'ten  $C_1=91\text{pF}$ ,  $L_1=0,170\text{H}$  olarak bulunmuştur. Ultrasonik dönüştürücüye ait eşdeğer empedans devresi Şekil 4.19'daki gibi elde edilmiştir.



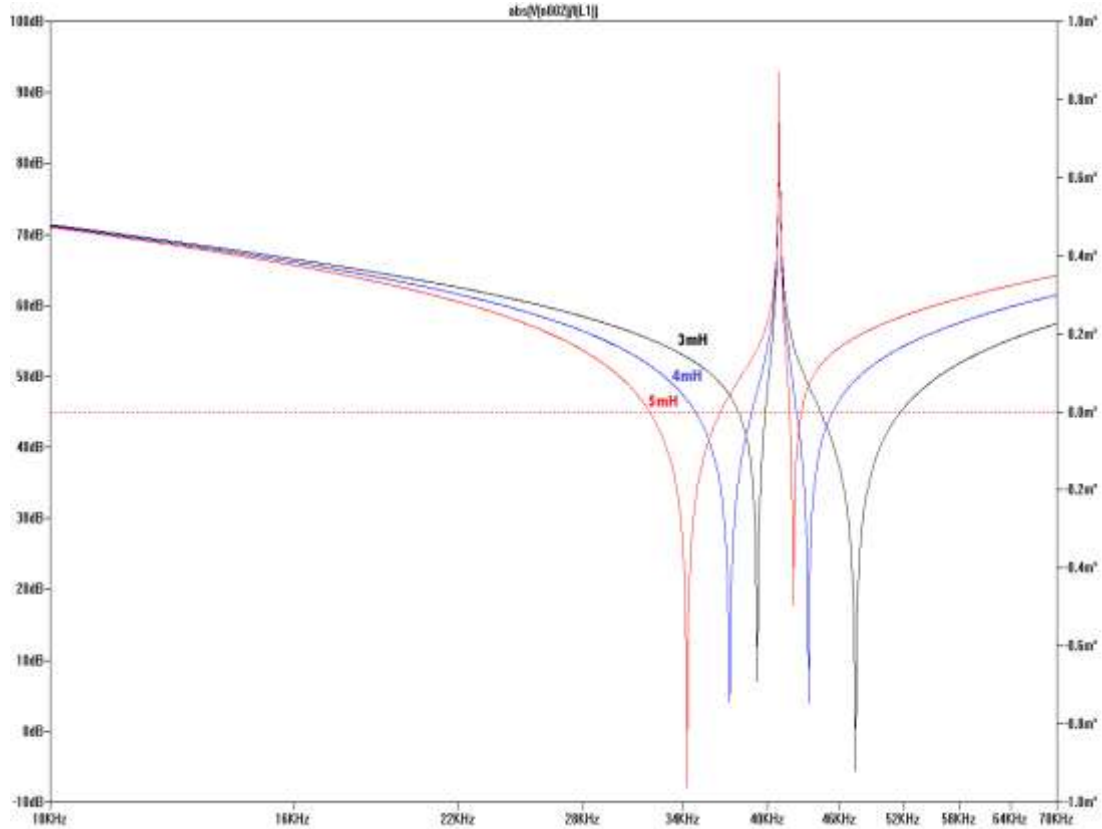
**Şekil 4.19 :** Ultrasonik dönüştürücüye ait empedans eşdeğer devresi.

Şekil 4.19'daki ultrasonik dönüştürücünün eşdeğer devresinden maksimum güç elde edebilmek için empedans uydurma devresi ilave edilmelidir. Rezonans frekansında ve 5 kHz'lik çalışma bandında seri kol üzerinde bulunan L ve C ifadeleri birbirinin duali gibi davranacağından geriye sadece  $R=20 \Omega$  direnci kalacaktır. Bu durumda 4 nF'lık paralel kapasitenin duali bir devre ilave edilmesi gerekmektedir. Bu tasarım için kurulan benzetim devresi Şekil 4.20'de verilmiştir. Yapılan benzetimde, 37-42 kHz frekans bandında eşlenik devreye maksimum güç aktarılması için eklenmesi gereken endüktans değeri saptanmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen empedans uydurma eğrileri Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Güç katını, ultrasonik dönüştürücünün empedansına uydurmak için yapılan benzetimlerde  $L=4\text{mH}$  değeri olarak

belirlenmiştir. Bu değer sayesinde ultrasonik dönüştürücüye maksimum güç aktarımı mümkün olmaktadır. Güç katından elde edilen sinyal gücünü verimli bir şekilde ultrasonik dönüştürücüye aktarabilmek, ultrasonik kazan içerisinde kavite şiddetini de arttırmış olacaktır.



Şekil 4.20 : Empedans uydurma benzetim devresi.



Şekil 4.21 : Empedans uydurma eğrileri.

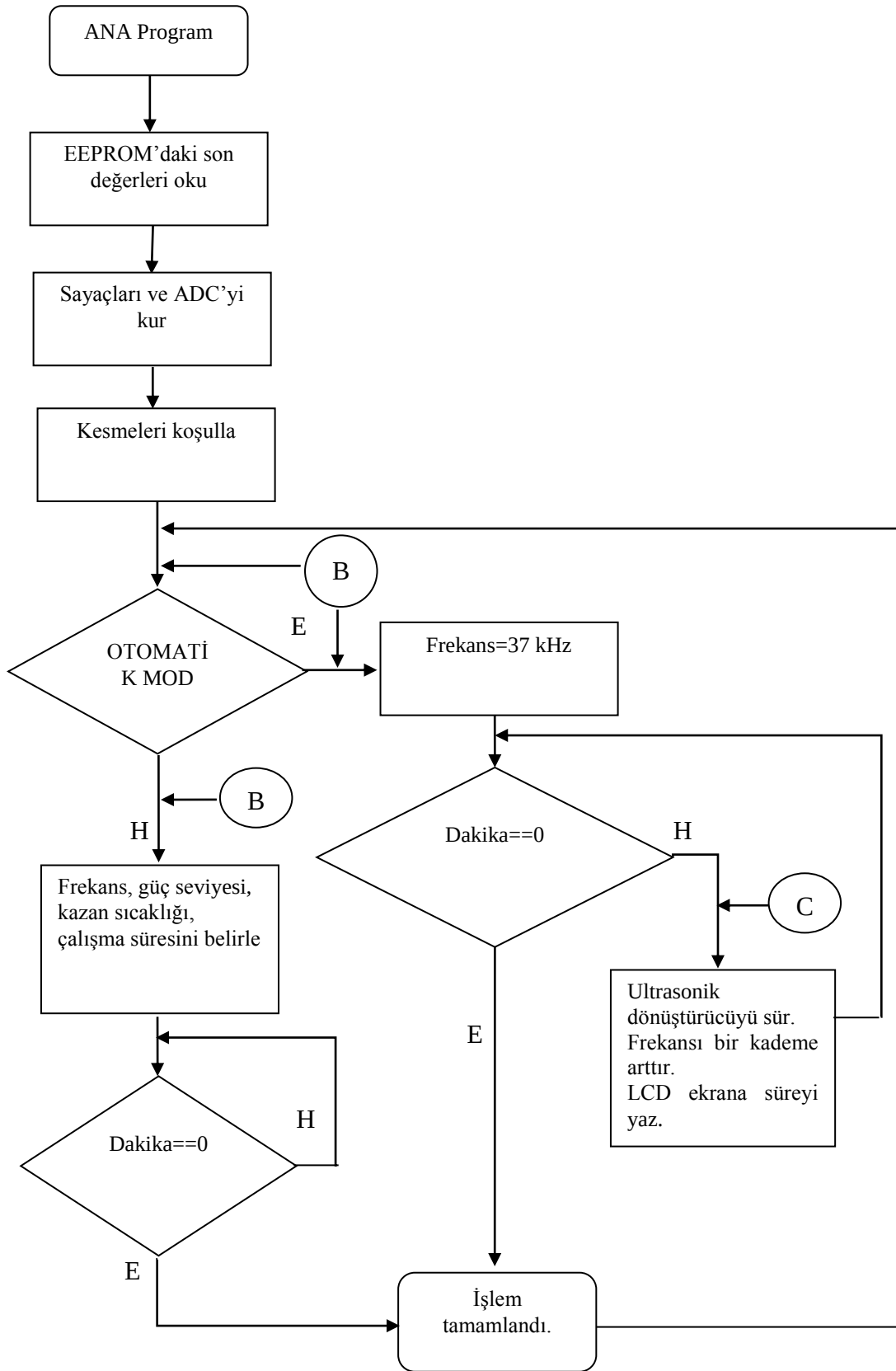
#### 4.7 Program Akış Şeması

Program algoritması Şekil 4.22’de gösterildiği gibi bir ana program ve ona bağlı alt programlardan meydana gelen uzunca bir akış şeması ile anlatılmıştır. Yazılım CCS-C diliyle yazılmıştır. Tasarlanan cihaz, üzerinde bulunan tuşlar ile manuel değerlere set edilip çalıştırılabildiği gibi, otomatik çalışma modu kullanılarak 37-42 kHz arasında 2 kHz’lik bant genişliğinde frekans taramalı olarak da çalışabilmektedir. Manuel değerlerin hepsi kalıcı hafızaya alınıp, bir sonraki çalışmada cihaz önceden set edildiği değerlerden başlamaktadır.

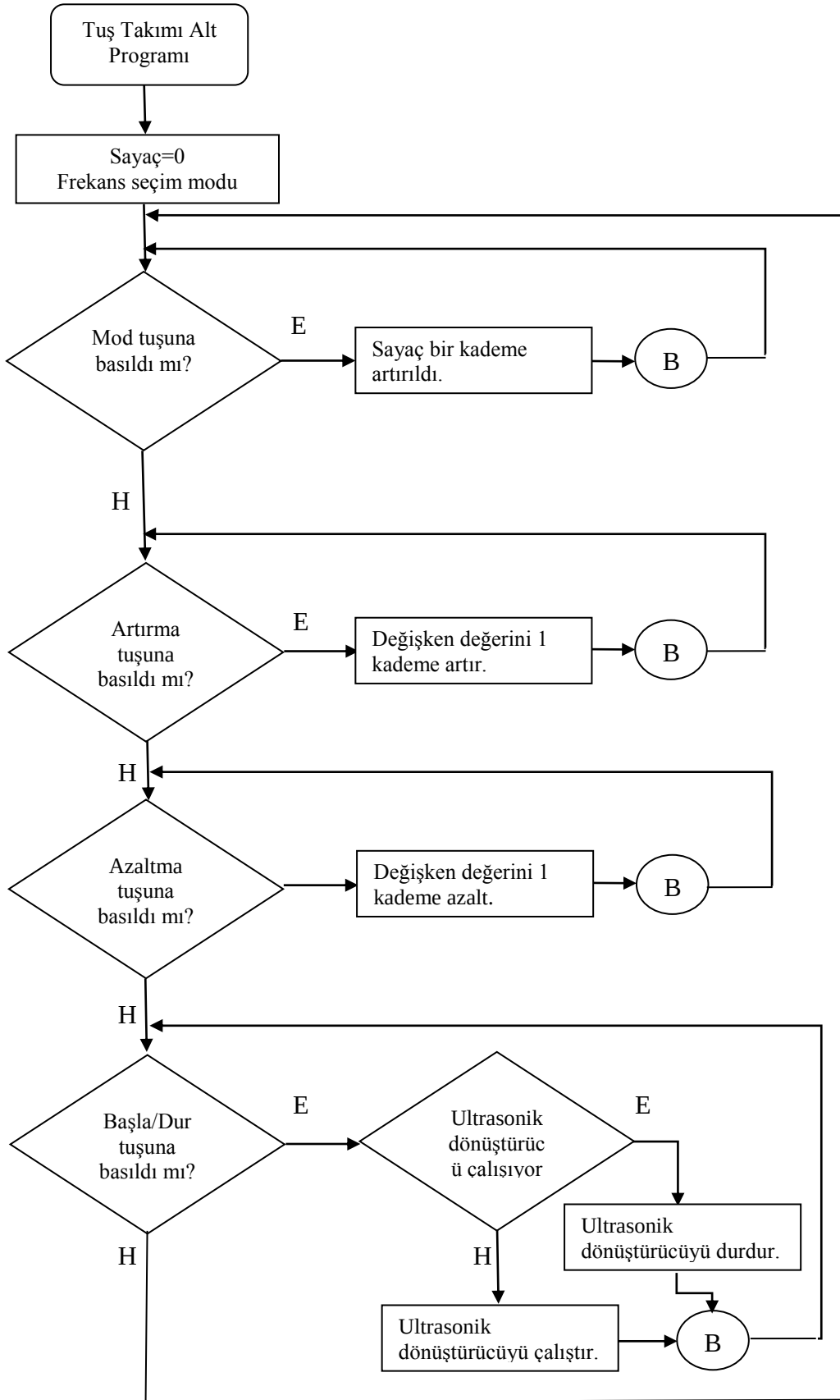
Ana programda önce ilk koşullama işlemleri gerçekleştirilir. Kullanılacak değişkenlere başlangıç değerleri atanır. Daha sonra kesme düzenlemeleri yapılır ve kullanılacak modun seçme aşamasına geçilir.

Manuel veya otomatik mod seçim isteği varsa tuşlar yardımıyla seçilir ve seçilen mod işleme konur. Böyle bir durum yok ise EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) dan okunan değerler (en son kullanılan değerler) LCD ekranda gösterilir.

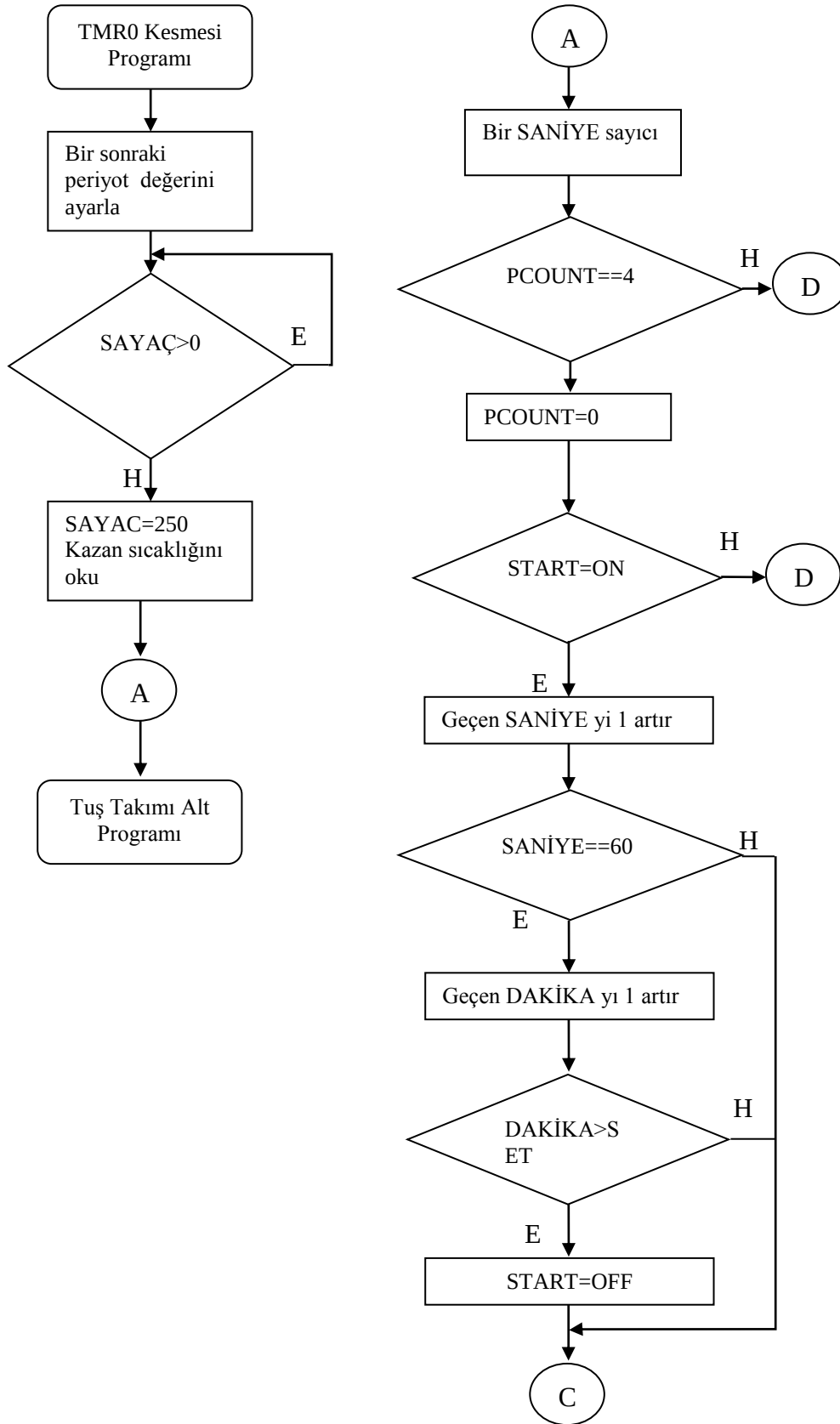
Manuel modun çalışma şekli şöyledir: Mod parametreleri kalıcı hafızadan (EEPROM) okunur. Okunan değerler: temizleme kazanın set edildiği sıcaklık, çalışma süresi, frekans değeri, güç seviyesidir. Manuel alt programının çalışmaya başlaması için BAŞLA/DUR düğmesine basılmalıdır. Çalışmaya başladıktan sonra LCD ekranda beliren kronometre ile temizleme işleminin bitmesi için ne kadar süre kaldığı gözlemlenir. Temizleme işlemi bittikten sonra LCD ekranda işlemin bittiğine dair bilgilendirme yazısı yazılır. Çalışma sırasında istenildiğinde BAŞLA/DUR düğmesine basılarak işlem durdurulabilmektedir. Kazan sıcaklığı, güç seviyesi, frekans değeri, çalışma süresi gibi parametreler sisteme güç verildikten sonra herhangi bir anda değiştirilebilmektedir.



**şekil 4.22 :** Program akış diyagramı.



**Şekil 4.23 :** Tuş takımı alt programı.



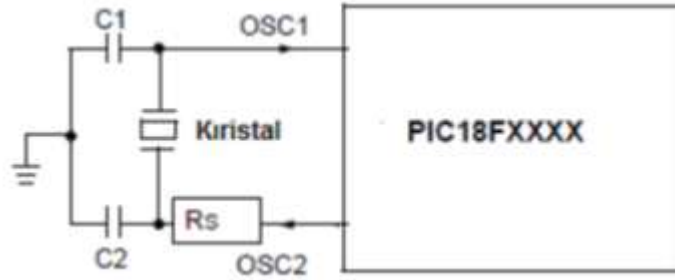
Şekil 4.24 : TMR0 kesme alt programı.

Burada kullanılan mikrodenetleyici devresi üzerinde koşturulan özğün yazılım aşağıda listelenen özellikleri kapsamaktadır:

- Çalışma frekansının ayarlanması
- Güç kontrolü
- Emniyet tedbirleri
- Kazan suyu sıcaklık kontrolü
- LCD ekran kontrolü

#### 4.7.1 Çalışma frekansının ayarlanması

Gerçekleştirilen sistemde çalışma frekansı gerektiğinde istenilen değere (37 kHz- 42 kHz arası bir kademede) manuel olarak ayarlanabilmektedir. Sistemde 2 çalışma modu vardır. Bu modlardan ikinci olan otomatik çalışma modunda, sistem 2 kHz'lik bant genişliğinde frekans tarama tekniğini kullanarak temizleme işlemini gerçekleştirmektedir.



**Şekil 4.25 :** HS osilatör için bağlantı şekli [4].

Bu çalışmada kullanılan dönüştürücü 40 kHz'lidir. Yani 40 kHz'de rezonansa gelmektedir (Kazanın su seviyesi değıştikçe yük değışeceğinden dönüştürücünün rezonans frekansı da değışir). Maksimum verim alabilmek için kullanılan PWM sinyalinin de dönüştürücü ile uyum içinde olması gerekir ki bu da 40 kHz frekansını zorunlu kılmaktadır.

Mikrodenetleyici saat işareti için kullanılan osilatör frekansı 24 MHz'dir ve bu da mikrodenetleyici tarafından 4'e bölünerek kullanılır. Yani mikrodenetleyici 6 Mhz'lik bir uygulama frekansı ile çalışır. Buradan mikrodenetleyici için  $T=1/f=1/6000000=0,166666$  µs olarak bir komutu işleme hızı bulunur. Şekil 4.25'de HS osilatör için bağlantı şekli görölmektedir.

CCP modülü PWM modunda çalışırken Timer2 modülünü kullanır. 40 kHz’lik PWM için gerekli olan PR2’nin (periyodun) bulunuşu aşağıda belirtilmiştir. Timer2 PR2 yazıcısındaki değere kadar sayar ve o değere eşit olduğunda TMR2 yazıcısını sıfırlayarak tekrar saymaya başlar.

$$T_{pwm}=[PR2+1].[1/f].[TMR2 \text{ bölme değeri}] \quad (4.5)$$

$$F(\text{mikrodenetleyici komut işleme frekansı})=f_{\text{osilatör}}/4 \quad (4.6)$$

$$f_{pwm}=1/T_{pwm} \quad (4.7)$$

$$f_{pwm}=f/(PR2+1) \quad (4.8)$$

Buradan PR2 çekilirse:

$PR2=(f/f_{pwm})-1=(6 \text{ Mhz}/40 \text{ kHz})-1=149\approx 150$  bulunur. (Yarım periyot kullanıldığı için çıkan sonuç çift tamsayıya yuvarlanır). Formüldeki “1 ihmal edilirse” denklem:  $PR2= (f/f_{pwm})$  şeklini alır. Buradan  $f_{pwm}$ ’i çekersek:

$f_{pwm}=(f/PR2)$  elde edilir.

PR2 değişkeninin farklı değerlerine karşılık gelen  $f_{pwm}$  değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Program içinde ise bu değer 1’er 1’er artırılarak 142-162 arasında sınırlandırılmıştır. Kullanıcı tarafından girilen  $f_{set}$  frekansının, 37-42 kHz frekans aralığında 500 Hz’lik adımlarla değişimlerinde, PWM frekansı 348-426 Hz aralığında değişmektedir.

**Çizelge 4.2 :** PR2 değişkeninin farklı değerlerine karşılık gelen  $f_{pwm}$  değerleri.

| PR2 | $f_{pwm}$ (Hz) | $f_{set}$ (Hz) |
|-----|----------------|----------------|
| 162 | 37037          | 37000          |
| 160 | 37500          | 37500          |
| 158 | 37974          | 38000          |
| 156 | 38461          | 38500          |
| 154 | 38961          | 39000          |
| 152 | 39473          | 39500          |
| 150 | 40000          | 40000          |
| 148 | 40540          | 40500          |
| 146 | 41095          | 41000          |
| 144 | 41666          | 41500          |
| 142 | 42253          | 42000          |

#### **4.7.2 Güç kontrolü**

Kullanılan mikrodnetleyicinin ECCP modülünün PWM modunun yarım köprü çıkış modunda çalışıldığında, programlanabilen ölü bant gecikmesi sayesinde güç kontrol edilmektedir. Bu konuda detaylı bilgi Bölüm 4.4.1’de verilmiştir. Bu nedenle bu bölümde tekrar edilmemiştir.

#### **4.7.3 Emniyet tedbirleri**

Uzun süreli çalışmalarda veya IGBT’lerde herhangi bir sebeple ortaya çıkan uzun süreli kısa devre durumlarında aşırı akım çekme durumuna karşı güç besleme devresine sigorta ilave edilmiştir.

Kazan dış yüzeyi üzerine yapıştırılmış sıcaklık sensörü aracılığıyla bir sıcaklık kontrol mekanizması sisteme ilave edilmiştir. Temizleme kazanının sıcaklığı bir sıcaklık sensörü ile algılanır. Algılanan sıcaklığa göre sensör çıkışından gerilim elde edilir. Bu gerilim, mikrodnetleyicinin ADC girişlerinden birine verilir ve okunan gerilim değerlerinden kazanın sıcaklığı hakkında bilgi elde edilir. Set edilen sıcaklık değeri aşıldığında mikrodnetleyici çıkış pinlerinden biri tarafından kontrol edilen tek transistörlü röle sürücü devresi tetiklenir. Çalışma süresi bittiğinde veya herhangi bir sebeple sistemdeki güç transistörleri veya temizleme kazanında aşırı ısınma durumu ortaya çıktığında bu röle kontağı açılarak ısıtıcının enerjisi kesilir.

#### **4.7.4 Kazan suyu sıcaklık kontrolü**

Sıcaklığın maksimum kavitasyon olayında en önemli parametre olduğu daha önce belirtilmişti. Çünkü sıcaklık artışının kavitasyonu etkileyen diğer parametrelerle ilişkisi vardır. Bunlar suyun kayganlığı, sıvı içindeki çözünmüş gazların difüzyonu, sıvı içinde bulunan gazların sıvıyı terk edişi ve buhar basıncıdır. Bu durum kavitasyon için sıcaklık gibi önemli bir faktörün program içinde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Tasarlanan sistemde, temizleme kazanı dış yüzeylerine yerleştirilmiş ısıtıcının sıvıda meydana getirdiği anlık sıcaklık değerinin, set edilen sıcaklık değerini aşması durumunda güç kesilir. Sıcaklık hangi dereceye set edilmişse bu EEPROM’da belli bir adreste kayıtlı bulunur. Program herhangi bir modda çalışmaya set edildiğinde bu değer okunur. Set edilen değere gelindiğinde ısıtıcı durdurulur.



## **5. TEST SONUÇLARI**

### **5.1 Sabit Frekansta Çalışma**

Tuş takımı kullanılarak istenilen frekans, güç seviyesi, sıcaklık ve çalışma süresi ayarı yapılır. Burada rezonans frekansında çalışılmadığından çok iyi bir temizleme beklenilmemelidir. Fakat frekans ayarlayabilme avantajının olması ile duran dalgaların yeri değiştirilerek kontrol edilebilir bir yıkama profili elde edilebilir.

### **5.2 Frekans Taramalı Çalışma**

Set edilen bir frekansta ve çalışma süresi içinde frekans çok küçük adımlarla artırılıp azaltılarak 2 kHz'lik bir bant aralığında frekans taraması gerçekleştirilir, böylece homojen bir güç dağılımı elde edilmeye çalışılır. Sistem bu çalışma modunda maksimum güç ile set edilen frekans ve çevresinde, dar bir frekans bandında çalışır.

### **5.3 Anahtarlama Çalışma**

Anahtarlama çalışması, prensip olarak sabit frekansta çalışmaya benzerdir. Tuş takımı ile istenilen frekans, güç seviyesi, sıcaklık ve çalışma süresi ayarı yapılır. Sabit frekansta çalışma moduna ek olarak susma süresi parametresi bu çalışma modunda kullanılmaktadır. Susma süresi 1sn, 2sn, 3sn ve 4sn olarak seçilebilmektedir. Seçilen değere göre ultrasonik üreteç, ultrasonik sinyali set edilen saniye kadar üretir ve sonra set edilen saniye kadar susar. Bu işlem çalışma süresi boyunca ultrasonik sinyalin üretilmesi ve durdurulması şeklinde devam eder.

Bu çalışma modunun amacı, temizleme sıvısındaki gazların giderilmesi için çalışmaya ara vermenin faydasını test etmektir. Piyasadaki bazı ürünlerde bu şekilde çalışan ultrasonik temizleme sistemlerinin de var olduğu tespit edilmiştir. Ancak kazandaki su yeteri kadar dinlenmiş ise bu çalışma moduna ihtiyaç yoktur. Düzenli olarak kazan sıvısının yenilenmesi gerektiği durumlarda başlangıç için bir süre bu modda çalışmanın sıvıdan gazın daha çabuk dışarı atılmasına faydası olacaktır.

## 5.4 Folyo Testi ve Önemi

Folyo testi ultrasonik kazanın kabaca ne kadar güçte ve nasıl bir profilde yıkama yaptığını gösteren pratik bir yöntemdir. Folyo, ultrasonik kazana yatay olarak daldırılır. Folyonun kazanda oluşan kavitasyon patlamaları sonucu aşındığı görülür. Bu aşınmaların folyo üzerindeki homojenliği ve derecesi kazanın yıkama kalitesi için başvurulan yaygın test tekniklerindendir. Ucuz ve basit bir yöntemdir. Sistemde kullanılan kazanın iç ebatları 150x135x150 mm<sup>3</sup>'dür.

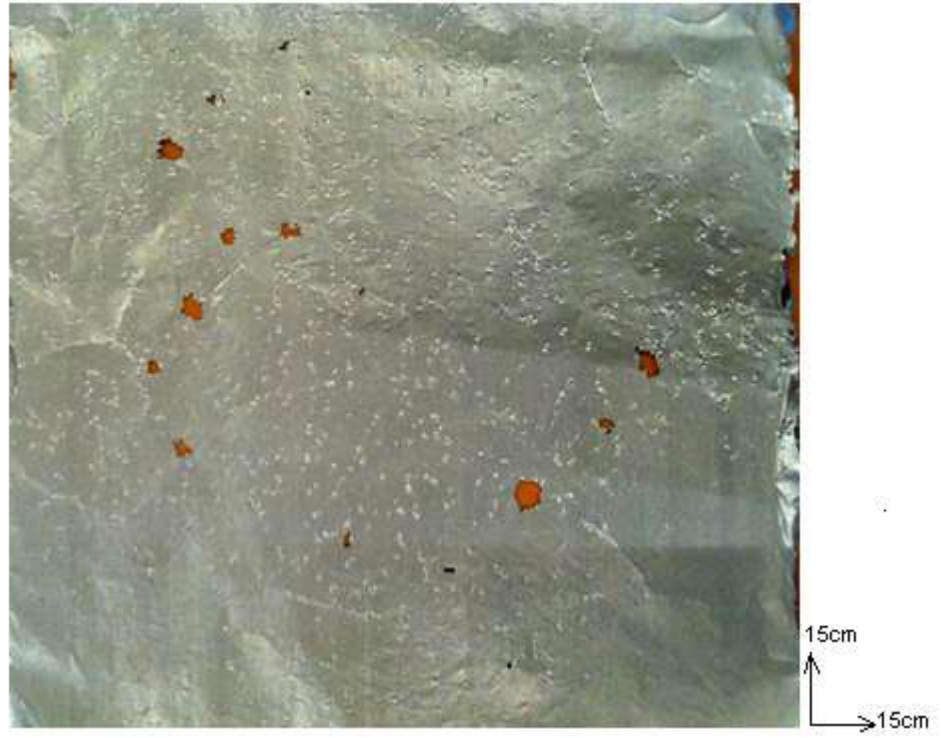
## 5.5 Folyo Testi ve Sonuçları

### 5.5.1 Frekansa göre temizleme etkinliğinin incelenmesi

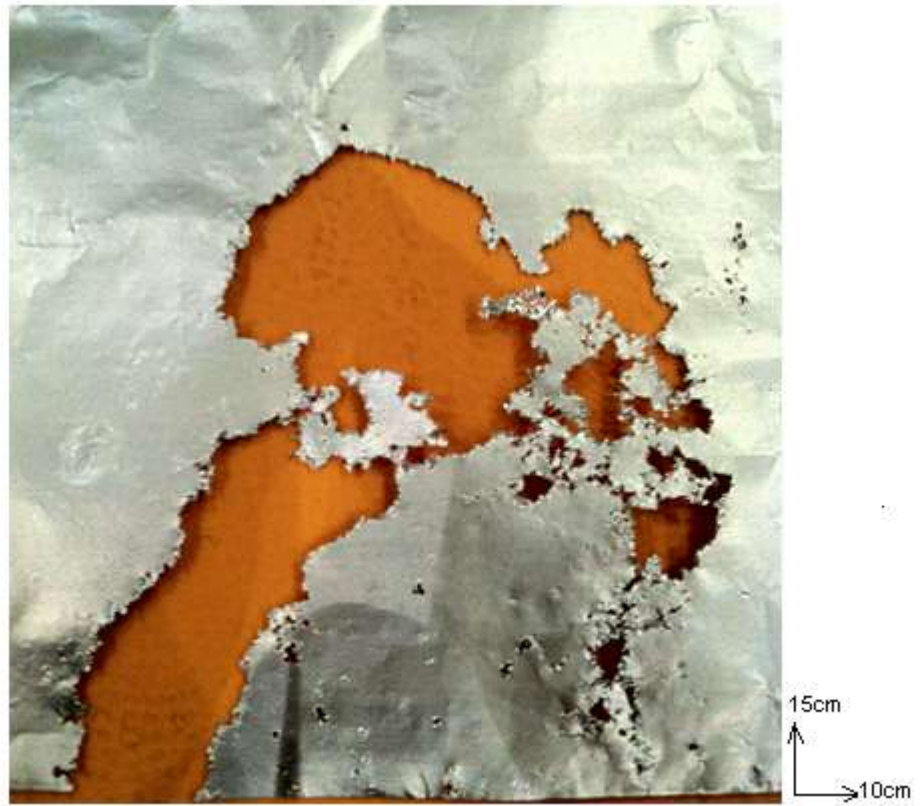
Ultrasonik temizleme etkinliğinin, 37 kHz-42 kHz çalışma frekansı aralığındaki verimliliğini inceleyebilmek için ultrasonik temizleyicinin diğer parametreleri sabit tutulmuş ve çeşitli frekans değerlerine göre folyo testi yapılmıştır. Bu testler sırasında ultrasonik kazanın sıcaklığı 35°C, kazan içindeki su miktarı 2,5 litre, güç seviyesi maksimum ve çalışma süresi 3 dakika olarak set edilmiştir. Şekil 5.1'de 37 kHz için elde edilen folyo testi sonucu görülmektedir. Folyo üzerinde belli bölgelerde gözlenen delinmeler, ultrasonik kazan içindeki güç dağılımının bölgesel olarak farklılaştığını göstermektedir. Bazı bölgelerde kavitasyon şiddeti fazla olduğundan folyo daha çok aşınıp üzerinde delikler oluşmuştur.

Şekil 5.2'de 38 kHz için sabit frekansta çalışma sonucu gösterilmektedir. 38 kHz'de ultrasonik dönüştürücü rezonansa girdiğinden folyo üzerinde maksimum aşınma görülmektedir. Ultrasonik kazanın ortasında kavitasyon şiddeti maksimum seviyeye ulaştığından folyoyu ortasından itibaren hızlıca aşındırmıştır. Şekil 5.3'te 39 kHz için de aşınmaların fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuçta da rezonans frekansı civarında çalışıldığı görülmektedir.

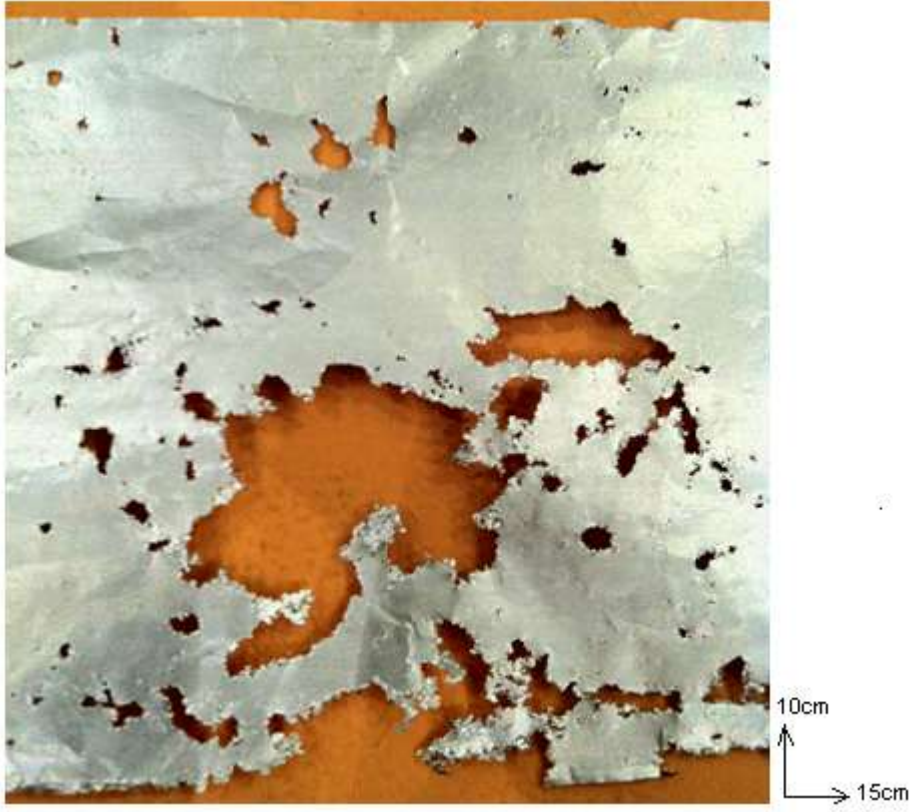
40 kHz ve üstü çalışmalarda ise rezonans frekansından uzaklaşmaya bağlı olarak temizleme gücünde azalmalar meydana gelmiştir. Folyo üzerindeki aşınmaların, 38 kHz çalışma frekansında elde edilen sonuçlara kıyasla azaldığı görülmektedir. Folyo üzerindeki delinmelerin farklı olması homojen bir temizlemenin elde edilemediğini göstermektedir. Folyo testi üzerindeki aşınmalar 42 kHz çalışma frekansında minimuma inmiştir. Bu sonuç, temizleme gücünün rezonans frekansından uzaklaştıkça azaldığını göstermektedir.



Şekil 5.1 : 37 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.2 : 38 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.3 : 39 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.4 : 40 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.5 : 41 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.6 : 42 kHz sabit frekansta çalışma.

Ultrasonik temizlemeye etki edecek diğer parametreler sabit tutularak, sadece frekansın ultrasonik temizlemeye olan etkisi incelenmiş olup yapılan folyo testleri neticesinde rezonans frekansının ultrasonik dönüştürücünün üzerine binen yüke bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Rezonans frekansına yakın frekans değerlerinde ultrasonik dönüştürücünün maksimum güç ile çalıştığı ve kazan içindeki kavitasyon şiddetinin maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Ultrasonik temizleyicinin rezonans frekansı kazan içindeki su yüksekliğine, suyun sıcaklığına, suyun saflığına bağlı olarak değişim göstermektedir.

### **5.5.2 Sıcaklığa göre temizleme etkinliğinin incelenmesi**

Ultrasonik temizlemeye etki eden bir diğer önemli parametre de ultrasonik kazan sıcaklığıdır. Sıcaklık, kavitasyon oluşumunda etkili olan sıvının kayganlığına, sıvı içindeki gazın çözünürlüğüne, çözülmüş gazın sıvı içindeki difüzyon oranına ve buhar basıncına doğrudan etki eder. Maksimum kavitasyon etkisi için sıvının kayganlığının minimum olması gerekir. Sıcaklık arttıkça ultrasonik kazan içinde maksimum kavitasyon oluşur.

Kazan sıcaklığının ultrasonik temizlemeye etkisini incelemek için ultrasonik temizleyicinin diğer parametreleri sabit tutulmuştur. Testler sırasında frekans 40 kHz, güç seviyesi maksimum, kazan içindeki sıvı miktarı 2,5 litre, çalışması süresi 3 dakika olarak ayarlanmıştır. Şekil 5.7’de 40 kHz sabit frekans ve 20°C kazan sıcaklığında elde edilen folyo testi yer almaktadır. Şekil 5.8’de 30°C, Şekil 5.9’da 50°C, Şekil 5.10’da 60°C, Şekil 5.11’de 70°C için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın artmasına bağlı olarak kazan içinde kavitasyon şiddeti artmış ve dolayısıyla temizleme gücü de artmıştır. Folyo testinin belli bölgelerde daha fazla aşınması, homojen bir temizleme örüntüsünün elde edilemediğini göstermektedir.

Şekil 5.7’de oda sıcaklığında yapılan folyo testi sonucunda temizleme etkinliğinin düşük sıcaklıklarda da gerçekleştiği görülmektedir. Ultrasonik kazan içindeki su sıcaklığının, oda sıcaklığında (20°C) yapılan 3 dakikalık test sonrasında 3-4°C arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.8’de ve Şekil 5.9’da kazan sıcaklığının artmasıyla, folyo testi üzerindeki aşınmaların arttığı görülmektedir. Sıcaklık artışı ile kazan içinde kavitasyon oluşumu artmıştır. Sıcaklık artışı ile maksimum kavitasyon oluşumu ve folyo testinin en fazla

aşındığı durum ise Şekil 5.10'da 60°C için yapılan testte görülmektedir. 70°C'de yapılan folyo testinde ise 60°C elde edilen kavitasyon oranının elde edilemediği folyo üzerindeki aşınmaların azalmasıyla tespit edilmiştir.



Şekil 5.7 : 20°C'de 40 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.8 : 30°C'de 40 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.9 : 50°C’de 40 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.10 : 60°C’de 40 kHz sabit frekansta çalışma.

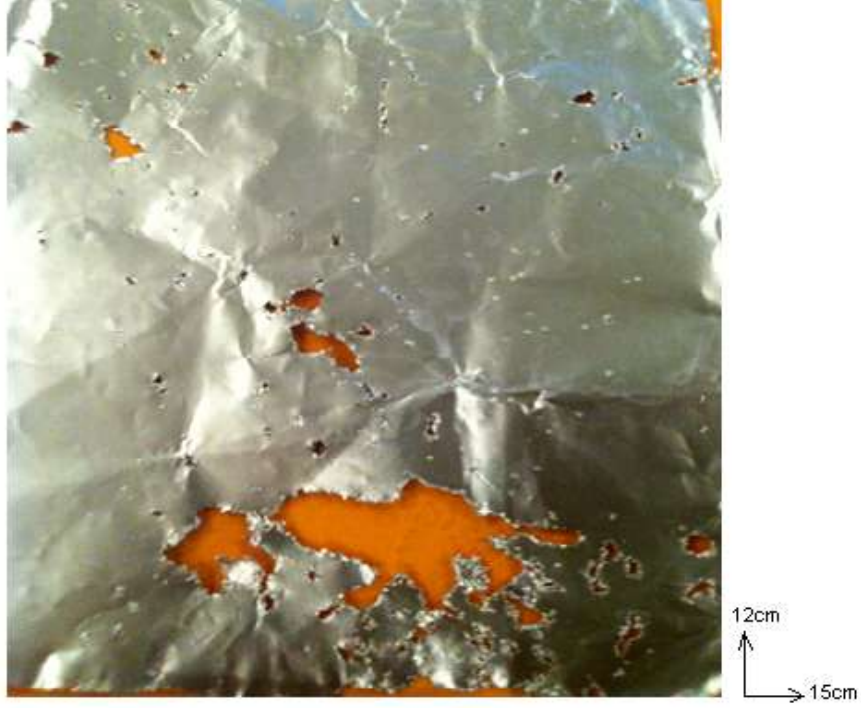


**Şekil 5.11 : 70°C’de 40 kHz sabit frekansta çalışma.**

Sıcaklığın temizleme etkinliği üzerindeki etkisini incelemek için yapılan testler neticesinde 50-60°C arası sıcaklığın temizleme işlemi için optimum sıcaklık aralığı olduğu belirlenmiştir.

### **5.5.3 Güç seviyesine göre temizleme etkinliğinin incelenmesi**

Tasarlanan ultrasonik temizleme sisteminde 5 kademe güç seviyesi vardır. Güç seviyesi ultrasonik dönüştürücüye uygulanan gerilim ile doğrudan ilişkilidir. Güç seviyesi arttıkça, ultrasonik dönüştürücüye uygulanan modüle edilmiş ultrasonik sinyal darbeleri arası boşluklar azalır. Dolayısıyla ultrasonik dönüştürücüye uygulanan gerilimin ortalama değeri artar. Güç seviyesi azaldıkça ultrasonik dönüştürücüye uygulanan gerilimin ortalama değeri azalır ve kazan içindeki kavitasyon şiddeti azalır. Şekil 5.12’de 39 kHz çalışma frekansında, 35°C kazan sıcaklığında, 2,5 litre su miktarında “Güç Seviyesi 3” için yapılan folyo testi sonucu yer almaktadır. Şekil 5.13’de aynı çalışma koşullarında “Güç Seviyesi 5” almaktadır. Güç seviyesi arttıkça kazan içindeki kavitasyon şiddeti artmaktadır. Böylece folyo daha çok aşınarak üzerinde oluşan deliklerin çapı artar.



**Şekil 5.12 :** Güç Seviyesi 3 ve 39 kHz sabit frekansta çalışma.



**Şekil 5.13 :** Güç Seviyesi 5 ve 39 kHz sabit frekansta çalışma.

#### **5.5.4 Frekans tarama tekniğine göre temizleme etkinliğinin incelenmesi**

Otomatik çalışma modunda, frekans tarama tekniği kullanılmıştır. Ayarlanan frekans değeri ve çalışma süresi dikkate alınarak maksimum güçte sistem çalışmaktadır.

Sisteme girilen frekans değeri çalışma süresi boyunca 5 saniye aralıklarla 2 kHz bant genişliği içinde arttırılıp azaltılmaktadır. Frekans değeri 38 kHz, kazan sıcaklığı 35°C, güç seviyesi maksimum, kazan içi sıvı miktarı 2,5 litre ve çalışma süresi 4 dakikaya ayarlandığında elde edilen sonuç Şekil 5.14’de görülmektedir.

Ultrasonik dönüştürücünün rezonans frekansı, sistemdeki birçok parametreye bağlı olarak değişebilmektedir. Otomatik çalışma modunun manuel çalışmaya göre avantajı, rezonans frekansı civarında ultrasonik dönüştürücüyü çalıştırıp, temizleme etkinliğinde maksimum verimliliği sağlayabilmektir.

Şekil 5.14’te 2 kHz bant genişliğinde yapılan test sonucu sabit frekansta çalışmaya oranla homojen bir temizlemenin olduğu görülmektedir. Sabit frekanstaki bölgesel aşınmalar, bu tarama tekniğinde güç dağılımı homojen olduğundan minimuma inmiştir. Şekil 5.15’de ise frekans değeri 39 kHz’e ayarlanmış olup aynı koşullar altında frekans taramalı olarak sistem çalıştırılmıştır. Bu test sonucunda da güç dağılımının homojen olduğu fakat aşınmaların Şekil 5.14’teki kadar olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni ultrasonik temizleyicinin rezonans frekansının 38 kHz civarına kaymasıdır. Rezonans frekansındaki tarama sonucu aşınmalar, ultrasonik dönüştürücünün gücünün artmasına bağlı olarak artmaktadır. Şekil 5.16’da ise 40 kHz civarında frekans taramasından elde edilen sonuç gösterilmektedir. Bu frekans civarında yapılan frekans taramasında ise diğer taramalara oranla folyo üzerindeki aşınmaların minimuma indiği görülmektedir.



**Şekil 5.14 :** 38 kHz civarında frekans taraması.



**Şekil 5.15 :** 39 kHz civarında frekans taraması.



**Şekil 5.16 :** 40 kHz civarında frekans taraması.

Otomatik çalışma modunda frekans tarama tekniği kullanılmıştır. Yapılan testler sonucu sabit frekansta çalışmaya göre homojen bir temizleme örüntüsünün elde edildiği görülmektedir. Rezonans frekansı civarında yapılan taramalarda folyoların daha fazla aşındığı görülmektedir. Rezonans frekansından uzaklaşıldığında ise ultrasonik dönüştürücünün gücündeki azalmaya bağlı olarak folyo üzerindeki aşınmalar minimuma inmiştir. Bu teknik ile sabit frekansta çalışma tekniğine oranla homojen bir temizleme örüntüsü sağlanmıştır.

#### **5.5.5 Anahtarlama tekniğine göre temizleme etkinliğinin incelenmesi**

Bu çalışma modunda sistem, manuel çalışma modunda olduğu gibi tüm parametreleri ayarlayabilme imkanı sağlar. Manuel çalışma moduna ek olarak susma süresi

ayarlanarak ultrasonik üreticin susma süresi kadar sinyal üretip, susma süresi kadar susması şeklinde çalışma süresi boyunca anahtarlama olarak çalışmasını sağlar. Bu çalışma modu ile kazan içindeki gazın giderilmesi (degas) amaçlanmıştır. Kazan içinde oluşan gaz, temizleme etkinliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 5.17’de 38 kHz çalışma frekansında, 40°C kazan sıcaklığında, maksimum güçte, 3 dakikalık çalışma süresinde 1 saniye susma süre için ve Şekil 5.18’de ise aynı koşullarda 2 saniye susma süresi için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



**Şekil 5.17 :** 1 sn susma süreli anahtarlama çalışması.



**Şekil 5.18 :** 2 sn susma süreli anahtarlama çalışması.

Şekil 5.18’de Şekil 5.17’deki sonuca göre daha homojen bir temizleme örüntüsünün elde edildiği görülmektedir. 2 saniyelik susma süresi sayesinde kazan içindeki gazın büyük bir bölümünün dışarı atılması sağlanmıştır. Böylece temizlemeye olumsuz

etkisi olan, çalışma esnasında kazan içinde biriken gazın atılması, kazan sıvısı içindeki kavitasyon oluşumunu kolaylaştırmış ve homojen bir temizleme elde edilmiştir. 1 saniye susma süresi ise gazın tamamın çıkmasına yeterli olmadığından Şekil 5.17’de görüldüğü gibi folyo üzerindeki bölgesel aşınmalardan, temizleme örüntüsünün homojen yayılmadığı tespit edilmiştir.

#### **5.5.6 Folyonun kazana dik tutulmasına göre temizlemenin incelenmesi**

Folyonun, ultrasonik kazana dik konumlandırılmasıyla yapılan testlerde folyoların üzerinde, değişen parametrelere bağlı olarak farklı temizleme örüntüleri elde edilmiştir. Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de frekans değişiminin, kazana dik şekilde daldırılan folyolar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu testler sırasında ultrasonik kazanın sıcaklığı 40°C, kazan içindeki su miktarı 2,5 litre, güç seviyesi maksimum ve çalışma süresi 3 dakika olarak set edilmiştir. Şekil 5.19’da 38 kHz frekans değeri için yapılan test yer almaktadır. 38 kHz’de sistem rezonansa girdiğinden folyo üzerindeki aşınmaların diğer frekans değerlerine kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Folyo üzerinde, kazanın dibine yakın olan kısımlarında aşınmaların fazla olduğu ve sıvı yüzeyine yaklaştıkça da aşınmaların azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.20’de 39 kHz için ve Şekil 5.21’de ise 40 kHz için yapılan testler yer almaktadır. Rezonans frekansından uzaklaştıkça folyolar üzerindeki aşınmaların azaldığı görülmektedir. Folyonun, ultrasonik kazanın dibine yaklaştıkça daha fazla aşındığı görülmektedir.

Şekil 5.22’de 20°C için, Şekil 5.23’te 30°C için, Şekil 5.24’te ise 50°C için 38 kHz frekansında, maksimum güçte, su miktarı 2,5 litre ve çalışma süresi 3 dakika için yapılan folyo testleri yer almaktadır. Sıcaklık arttıkça kavitasyon şiddeti artmış ve temizleme gücü artmıştır. Dolayısıyla folyonun, sıvı yüzeyine yakın yerlerinde de aşınmalar meydana gelmiştir.



Şekil 5.19 : Folyo kazana dik ve 38 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.20 : Folyo kazana dik ve 39 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.21 : Folyo kazana dik ve 40 kHz sabit frekansta çalışma.



Şekil 5.22 : Folyo kazana dik, 20°C’de 38 kHz sabit frekansta çalışma.



**Şekil 5.23 :** Folyo kazana dik, 30°C’de 38 kHz sabit frekansta çalışma.

Sıcaklığın artması ile folyo üzerindeki aşınmalar, folyonun tüm yüzeyine doğru yayılmaktadır. Bu sonuç, sıcaklık artışının homojen bir temizleme örüntüsü elde etmedeki önemini göstermektedir.



**Şekil 5.24 :** Folyo kazana dik, 50°C’de 38 kHz sabit frekansta çalışma.

## 5.6 Üç Boyutlu Cisimler Üzerinde Yapılan Testler ve Sonuçları

Tasarlanan ultrasonik temizleme makinesi, 2,5 litre sıvı kapasitesine sahip olup, masaüstü ultrasonik temizleme makinesi sınıfına uyacak şekilde tasarlanmıştır. Masaüstü ultrasonik temizleme makineleri, küçük boyutlu makine parçaları, gümüş ve altın takılar ve metal eşyaların temizlenmesi gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Folyo testleri ile elde edilen sonuçlardan yola çıkarak farklı boyutlarda ve şekildeki cisimler üzerinde temizleme etkinliği incelenmiştir. Şekil 5.25'te madeni para üzerindeki yağ ve kir tabakasının, temizleme sonucu Şekil 5.26'daki gibi temizlendiği görülmektedir. Bu işlem sırasında ultrasonik temizleme kazanı içindeki sıvı miktarı 2,5 litre, kazan sıcaklığı 50°C, çalışma frekansı 38 kHz ve çalışma süresi de 4 dakika olarak ayarlanmıştır.



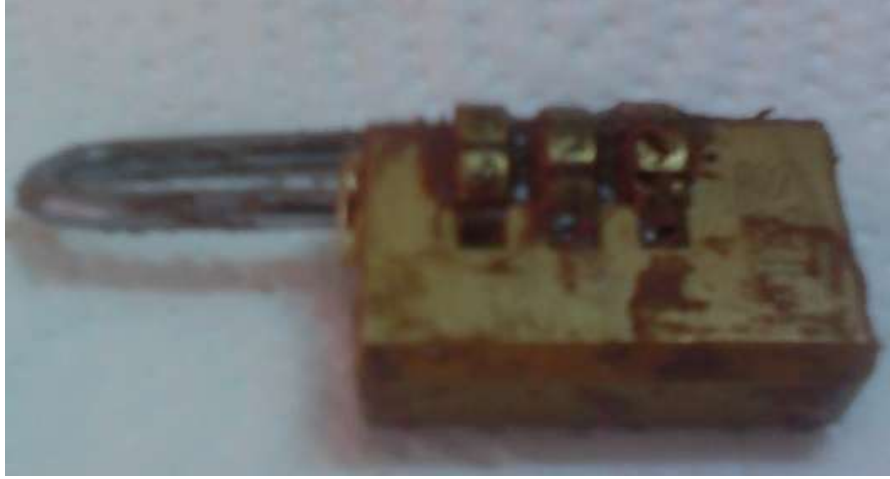
**Şekil 5.25 :** Temizleme öncesi madeni para.



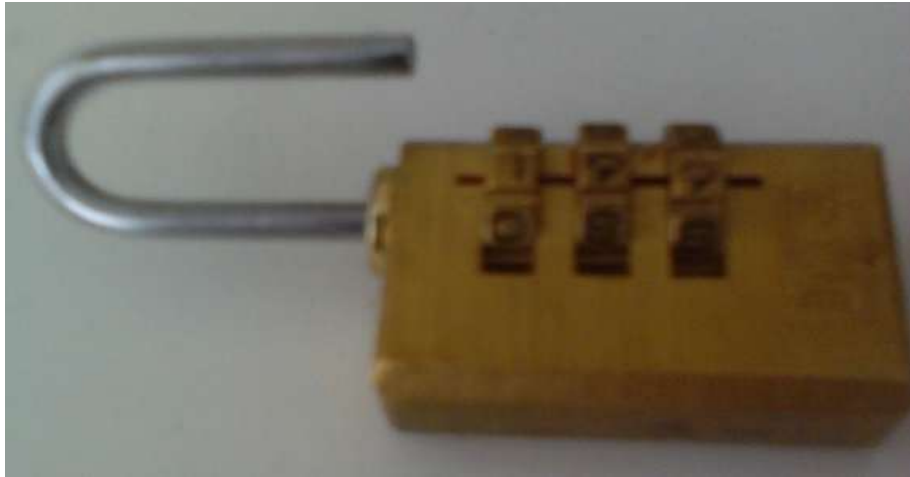
**Şekil 5.26 :** Temizleme sonrası madeni para.

Şekil 5.27’de aynı çalışma koşulları içinde madeni paraya göre daha karmaşık ve temizlenmesi zor olan metal kilit üzerindeki temizleme etkinliği incelenmiştir. Şekil 5.28’de metal kilidin tüm yüzeylerinden kir tabasının söküldüğü görülmektedir.

Üç boyutlu cisimler üzerinde yapılan testler neticesinde ultrasonik temizleme makinesinin verimli bir şekilde çalıştığı ve etkili bir temizlik sağladığı görülmektedir. Temizleme sonrasında cisimler üzerinde çizilme veya aşınmalara rastlanmamıştır. Bu da temizleme kalitesini belirleyici önemli bir faktördür.



**Şekil 5.27 :** Temizleme öncesi metal kilit.



**Şekil 5.28 :** Temizleme sonrası metal kilit.

#### **5.6.1 Farklı derinliklere göre temizleme etkinliğinin incelenmesi**

Ultrasonik temizleme etkinliğini, kazan içindeki farklı derinliklerde incelemek için birbirine eş üç adet madeni para Şekil 5.29’daki gibi aynı miktarda yağ ve kir tabakasıyla kaplanmıştır. Kazan sıcaklığı 50°C, sıvı miktarı 2,5 litre, çalışma frekansı

38 kHz ve çalışma süresi 2 dakika olarak set edilmiştir. Kazan dibinden itibaren 10 cm, 8 cm, 5 cm derinliklerde madeni para kazan dibine yatay olacak şekilde tutulduğunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32’de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre kazan dibine yaklaştıkça madeni para üzerinde temizleme etkinliğinin arttığı görülmektedir. Çünkü kazan dibinde ultrasonik dönüştürücüden elde edilen güç maksimumdur. Sıvı yüzeyine yaklaştıkça kavitasyon oluşumu ve temizleme gücü azalır.



**Şekil 5.29 :** Temizleme öncesi madeni para.



**Şekil 5.30 :** 10 cm derinlikte temizleme sonucu.



**Şekil 5.31 : 8 cm derinlikte temizleme sonucu.**



**Şekil 5.32 : 5 cm derinlikte temizleme sonucu.**



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ses ötesi temizleme etkinliğinin frekans, ultrasonik sinyal gücü, kazan sıcaklığı, çalışma süresi gibi parametrelere göre değişimin incelenmesi ve bu değişimler baz alınarak farklı teknikler ile temizleme verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen ultrasonik yıkama makinesi prototipi teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

1. Frekans, güç seviyesi, çalışma süresi ve kazan sıcaklığının manuel ayarlanabilmesi
2. 37 kHz-42 kHz aralığında seçilen bir frekans değerinde manuel olarak çalışma veya aynı frekans aralığında set edilen frekans değerine göre frekans taramalı olarak çalışma
3. Endüstriyel veya laboratuvar tipi (masa üstü) modellere kolaylıkla adapte edilebilir olması
4. Elektronik sarf malzemeleri hariç yerli teknoloji kullanılarak gerçekleştirilebilir olması
5. Temizleme sıvısı sıcaklık kontrolü

Kazan iç ebatları 150x135x150 mm<sup>3</sup>, kazan içindeki su miktarı 2,5 litre, kazan sıcaklığı 20°C-70°C arasında değişen bu sistemde yapılan folyo testleri neticesinde en iyi temizleme etkinliğinin 38 kHz çalışma frekansında elde edildiği görülmektedir.

İleriye yönelik bir çalışma olarak, bu sistemde ultrasonik dönüştürücünün çektiği akım geri besleme olarak mikrodenetleyiciye iletilebilir ve akım değerindeki değişimler gözlemlenerek rezonans frekansı otomatik olarak saptanabilir. Rezonans frekansında temizleme etkinliği artmaktadır. Ultrasonik dönüştürücü rezonans frekansında sistemden maksimum akım çeker. Çekilen akım bilgisi anlık olarak okunarak rezonans frekansında güç katından çekilecek maksimum akım sonucu güç katının zarar görmesini önleyecek otomatik koruma devresi ilave edilebilir.

Bu prototip güç katında doğrudan şehir şebekesi üzerinden beslendiğinden daha büyük kazanlı uygulamalar veya birden fazla ultrasonik dönüştürücü sürmek için elverişli bir tasarımdır. Güç katına bağlanacak ultrasonik dönüştürücüler ile büyük kazanlarda da temizleme sağlanabilir.

Bu tasarım farklı frekanslarda manuel olarak çalışabilmektedir. Daha etkin bir temizlik için bu tasarım çoklanarak temizleme kazanının yan ve alt çeperlerine monte edilebilir ve çeşitli rezonans frekanslarında çalışan dönüştürücüler sürülerek, kazan içinde düşük ve yüksek frekanslı kavitasyon kabarcıklarının oluşumu sağlanabilir. Yüksek frekanslar küçük yüzeylerde, düşük frekanslar ise büyük yüzeylerde daha etkin temizlik sağlar. Böylece temizlenecek malzemenin yüzeyinden bağımsız bir temizleme sağlanmış olur.

Ultrasonik temizleme yönteminde mikrodenetleyici tabanlı çözüm yerine FPGA tabanlı bir çözüm tercih edildiğinde önemli bir avantaj elde edilmiş olacaktır. Frekans kontrol adımları 300-400 Hz mertebelerinden 5-10 Hz'lere kadar düşebilecektir. Bu da rezonans frekansını hassas bir şekilde yakalamada büyük katkı sağlayacaktır. FPGA'lerde çalışma saat frekansları 500-600 MHz'lere ulaşmaktadır. Piyasada bulunan mikrodenetleyiciler ile bu mümkün olmamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Arnau, A.**(2007) *Piezoelectric Transducers and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ay, İ., Anaç, N.**(2002).*Ultrasonik Yöntemle Parça Temizleme*, Balıkesir Üniversitesi, IV. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, 229-241.
- David, J., Cheeke, N.**(2002).*Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*,CRC Press.
- Ensminger, D.**(1998).*Ultrasonics:Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*,CRC Press.
- Fencl, R.,Hollerith, B.**(1963).*The advantages of Ultrasonic Cleaning as a ProductionTool*,IEEE Transactionson Ultrasonic Engineering, 71-74.
- Güler, S.**(2009).*Ultrasonik Sensör ile Uzaklık ve Engel Algılayıcı Sistemin Tasarımı*, Elektronik Devre Tasarımı Projesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Hatano, H., Kanai, S.**(1996).*High-Frequency Ultrasonic Cleaning Tank Utilizing Oblique Incidence*,IEEE Transactions on Ultrasonics,Ferroelectrics and Frequency Control.
- Papadakis, E.P.**(2000).*Ultrasonic Instruments and Devices*,Academic Press.
- Svilainis, L.**(2006).*Power amplifier for ultrasonic transducer excitation*,ULTRAGARSAS.
- Tangel, C.**(2009).*Mikrodenetleyici Kontrollü Ultrasonik Temizleme Makinesi Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi
- Wilcox, D., Aswegan, B., Withcomb, A.** (2004).*Ultrasonic Cleaner Project*, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Williams, D.**(1994).*Guide to Cleaner Technologies: Cleaning and Degreasing Process Changes*,Washington DC:United States Environmental Protection Agency.pp. 19.
- Url-1**<<http://www.midnightscience.com/ultrasonics.html>>, alındığı tarih 12.12.2011.
- Url-2**<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39631E.pdf>>, alındığı tarih 12.12.2011.
- Url-3**<[http://imajeenyus.com/electronics/20110514\\_power\\_ultrasonic\\_driver](http://imajeenyus.com/electronics/20110514_power_ultrasonic_driver)>, alındığı tarih 12.12.2011.
- Url-4**<<http://webpace.webring.com/people/bt/tjaco/tesla2/tesla2.html>> alındığı tarih 12.12.2011.
- Url-5** <<http://www.natclo.com/dp/ultra.html>>, alındığı tarih 12.12.2011.

- [1]**Güler, S.**(2009).*Ultrasonik Sensör ile Uzaklık ve Engel Algılayıcı Sistemin Tasarımı*, Elektronik Devre Tasarımı Projesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [2]**Tangel, C.**(2009).*Mikrodenetleyici Kontrollü Ultrasonik Temizleme Makinesi Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- [3]**Ay, İ., Anaç, N.**(2002).*Ultrasonik Yöntemle Parça Temizleme*, Balıkesir Üniversitesi, IV. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, 229-241.
- [4]**Url-2**<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39631E.pdf>>, alındığı tarih 12.12.2011.
- [5]**Url-6**<[http://www.ipeuropa.com/petra/es/actividades/petra1/reunion1/sesion1/Caactive\\_compensation.pdf](http://www.ipeuropa.com/petra/es/actividades/petra1/reunion1/sesion1/Caactive_compensation.pdf)>, alındığı tarih 10.01.2012.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Sunay Güler

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Eskizara (Bulgaristan) 16.01.1987

**E-Posta:** sunay.guler@hotmail.com

**Lisans:** Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi

### **Mesleki Deneyim ve Ödüller:**

(2010-2011) Pavo Tasarım Üretim Tic. A.Ş.'de Elektronik Tasarım Mühendisi

(2011- halen) Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş.'de Charging Operations Specialist

