

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ULTRASONİK SES DALGALARININ OLUŞTURDUĞU
AKUSTİK KAVİTASYONU ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER VE
KAVİTASYON ENERJİSİ ÖLÇÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fulya ÇİÇEKDAĞI

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Isı-Akışkan

Haziran 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ULTRASONİK SES DALGALARININ OLUŞTURDUĞU
AKUSTİK KAVİTASYONU ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER VE
KAVİTASYON ENERJİSİ ÖLÇÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fulya ÇİÇEKDAĞI

(503091140)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.Levent KAVURMACIOĞLU (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Haluk EROL (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Emre ALPMAN (MÜ)

Haziran 2011

Babama,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenim süresinde benden bilgisini ve desteğini esirgemeyen yüksek lisans danışmanım Yrd. Doç. Dr. Levent KAVURMACIOĞLU' na teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans tez çalışmam için tüm imkan ve olanaklarını sunarak bana destek olan Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi' ne, Sn. Dr. Cemil İNAN' a ve Sn. Yalçın GÜLDAL' na teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar için her türlü donanımın sağlanmasında yardımcı olan Arçelik A.Ş. AR-GE Merkezi Temizleme Teknolojileri Aile Lideri Sn. Hakan TATAR' a, teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda düzeneklerin kurulması, deneylerin yapılması gibi birçok konuda yardımcı olan ve emeği geçen, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen başta Sn. Zehra ÜLGER ve Sn. Erman TUTKAK olmak üzere tüm Arçelik A.Ş. Ar-Ge Temizleme Teknolojileri Ailesi' ne teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca bana destek olan, arkadaşlıklarını ve yardımlarını esirgemeyen, Sn. Bilge ÖLÇEK, Sn. Çağlar ŞAHİN başta olmak üzere tüm yüksek lisans öğrenci arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her adımında yanımda olan, eğitim hayatımı ve başarılarımı destekleyen babam, annem ve kardeşim N. Ebru Çiçekdağı' na, Aysun BOZOK ve Ünsalcan SAMUR' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2011

Fulya ÇİÇEKDAĞI

(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kavitasyon.....	4
2.2. Ultrasonik Transduser	7
2.2.1. Transduser Çeşitleri [URL-1]	7
2.2.2. Kullanım çeşitlerine göre transduserler	9
2.3. Kavitasyon Yoğunluğuna Etki Eden Faktörler	10
2.4. Kavitasyon ve Ultrasonik Güç Ölçüm Yöntemleri	16
2.4. Kavitasyon ve Ultrasonik Güç Ölçüm Yöntemleri	16
2.4.1. Deneysel çalışmalar	17
2.4.2. Teorik yöntemler.....	19
2.4.3. Ultrasonik güç ölçümü ile ilgili IEC standardı	20
3. DENEY DÜZENEGİ	23
3.1. Sistem Elemanları	24
3.2. Deney Prosedürü	27
3.3 Ölçüm Belirsizliği	28
3.3.1. Hata kaynakları	28
3.3.2. Hataların sınıflandırılması.....	29
4. DEGAZE ETME YÖNTEMLERİ	33
5. ALÜMİNYUM FOLYO TESTİ	39
6. ENERJİMETRE ÇALIŞMALARI	43
6.1. Frekans Etkisi	46
6.2. Sıvı Ortam Etkisi.....	47
6.3. Transduser Tipinin Etkisi	51
6.3.1. Temas Tipi Transduserler	52
6.3.2. Daldırma Tipi Transduser	56
6.3.3. HIFU Tipi Transduser.....	58
6.4. Sıcaklık Etkisi	60
6.5. Mekanik Hareket Etkisi.....	63
6.6. Genlik Etkisi.....	65
7. BELİRSİZLİK ANALİZİ	67
8. SONUÇ.....	69

KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	73

KISALTMALAR

RFB	: Radiation Force Balance
SONAR	: Sonar Navigation And Ranging
UV	: Ultra Violet
HPLC	: High Performance Liquid Chromatography
PIV	: Particle Image Velocimetry
SCL	: Sonochemiluminescence
IEC	: International Electrotechnical Commission
FFT	: Fast Fourier Transform

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Gauss dağılımında güvenirlik seviyesi [13]	30
Çizelge 4.1: Keselere konulacak kimyasal maddelerin oranı [16].	35
Çizelge 4.2: Kimyasal yöntem kullanarak sıvının degaze edilme oranları ve işlem adımları.....	37
Çizelge 6.1: 80 kHz frekansta transduser için farklı genliklerde enerji ölçümü.	66

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kavitasyon bulutu.	4
Şekil 2.2: Kabarcık gelişimi ve patlaması.	5
Şekil 2.3: Kavitasyon oluşum aşamaları [4].	6
Şekil 2.4: Piezoelektrik transduser [URL-1]	8
Şekil 2.5: Magnetostrictive transduser [URL-1]	8
Şekil 2.6: Elektromanyetik transduser [URL-2]	8
Şekil 2.7: Elektrostatik transduser [URL-2].	9
Şekil 2.8: Sıvılı transduser [URL-2].	9
Şekil 2.9: Odaklı (HIFU) transduser.	10
Şekil 2.10: Frekans ve kavitasyon enerjisi ilişkisi [9].	11
Şekil 2.11: Genliğin 0 (■), 300 (▲) ve 600 kPa (●)' da, 20kHz'lik ultrasonik çıkış gücüne etkisi [7].	13
Şekil 2.12: Statik basıncın 40°C (□), 70°C (O) ve 120°C (Δ) sıcaklıkta ultrasonik çıkış gücüne etkisi [7].	13
Şekil 2.13: Başlangıç sıcaklığı 5°C olan su içerisinde (1) 900 W, (2) 570 W ve (3) 530 W güç değerlerinde, sıcaklık ve kavitasyon yoğunluğu [8].	14
Şekil 2.14: 0 (■) ve 200 kPa (●) 'da başlangıç sıcaklığının ultrasonik (120 kHz) çıkış gücüne etkisi [7].	14
Şekil 2.15: 20 kHz, 0 kPa' da ultrasonik çıkış gücüne viskozite etkisi [7].	15
Şekil 2.16: Kavitasyon aktivitesi ölçüm yöntemleri.	20
Şekil 2.17: Düzenleme A, yutucu (a) ve yansıtıcı (b) hedefli [11].	22
Şekil 2.18: Düzenleme B, konveks-konik hedef. Düzenleme C, yutucu hedef [11]. ..	22
Şekil 3.1: Ultrasonik banyonun üstten görünüşü ve kavitasyon şiddetleri [12].	24
Şekil 3.2: RF amplifikatör.	25
Şekil 3.3: i) HIFU transduser ii) Enerjimetre	25
Şekil 3.4: Sisteme yerleştirilmiş, transduser bağlı bir yıkama tankı.	26
Şekil 3.5: Yıkama tankını yerleştirmek için tasarlanmış destek.	26
Şekil 3.6: Ölçüm probu ve hareket sisteminin yerleştirilmesi.	27
Şekil 4.1: Su içerisindeki çözünmüş gaz miktarının sıcaklıkla değişimi [16].	33
Şekil 4.2: Saf su ve farklı sürelerde kaynatılmış suyun içerdiği gaz miktarı	36
Şekil 5.1: 110W-28kHz transduserin oluşturduğu kavitasyon altında sırasıyla 20, 40 ve 60 sn. boyunca bekletilen alüminyum folyo örnekleri	40
Şekil 5.2: 95W-47 kHz transduserin oluşturduğu kavitasyon altında sırasıyla 20, 40, 60 ve 180 sn. boyunca bekletilen alüminyum folyo örnekleri	40
Şekil 5.3: 70W-132 kHz transduserin oluşturduğu kavitasyon altında 15 dakika boyunca bekletilen alüminyum folyo örneği.	41
Şekil 5.4: Farklı frekansların oluşturduğu kavitasyon altındaki alüminyum folyo örneklerindeki aşınmanın karşılaştırılması.	41
Şekil 6.1: Kavitasyon enerji ölçümünde kullanılan ultra/megasonik enerjimetre.	43
Şekil 6.2: Transduser tepkilerini ölçmek için kullanılan yıkama tankı.	44
Şekil 6.3: Cheng-Cheng Weiye Ultrasonic S&T firmasına ait transduserlere ait güç ve frekans ölçümleri.	45

Şekil 6.4: Hainertec firmasına ait transduserlere ait güç ve frekans ölçümleri.	45
Şekil 6.5: Transduserlerin güç ölçümleri	46
Şekil 6.6: 47 kHz ve 132 kHz frekanstaki transduserlerin karşılaştırılması.	47
Şekil 6.7: 28 kHz-100W Ortama bağlı kavitasyon enerjisi eğrileri.	48
Şekil 6.8: 28 kHz-100W Transduserin load power değişimi.	48
Şekil 6.9: 47 kHz-95 W ortama bağlı kavitasyon enerjisi.	49
Şekil 6.10: 47 kHz-95W Transduserin load power değişimi.	49
Şekil 6.11: 70W-132 kHz Ortama bağlı kavitasyon enerjisi.	50
Şekil 6.12: 70W-132 kHz Transduserin güç değişimi.	50
Şekil 6.13: Ses dalgasının şematik gösterimi.	52
Şekil 6.14: ı) x-y düzlemi haritalama çalışmaları için ii) y-z düzlemi haritalama çalışmaları için kullanılacak düzlemlerin gösterimi.	52
Şekil 6.15: 100W-67 kHz transduserin düşey düzlemde kavitasyon enerji haritası (y-z düzlemi).	53
Şekil 6.16: 100W-67 kHz transduserin farklı seviyelerde ve farklı sıvı ortamlarında kavitasyon enerji haritası (x-y düzlemi).	54
Şekil 6.17: 60W - 80 kHz transduserin farklı seviyelerde ve farklı sıvı ortamlarında kavitasyon enerji haritası (x-y düzlemi).	55
Şekil 6.18: 60W- 80 kHz transduserin düşey düzlemde kavitasyon enerji haritası (y-z düzlemi).	56
Şekil 6.19: 60W - 160 kHz transduserin farklı derinliklerde kaynatılmış sıvı ortamında kavitasyon enerji haritası (x-y düzlemi).	56
Şekil 6.20: 100W- 1MHz daldırma tipi transduserin düşey düzlemde enerji haritası.	57
Şekil 6.21: 100W- 1 MHz daldırma tipi transduserin farklı derinliklerde ve farklı sıvı ortamlarında kavitasyon enerji haritası.	58
Şekil 6.22: 75W-670 HIFU transduserin 3 farklı sıvı ortamında kavitasyon enerji haritası.	59
Şekil 6.23: 100W-1MHz HIFU transduserin kaynamış su ortamında farklı seviyelerde kavitasyon enerji haritası.	59
Şekil 6.24: 75W - 670kHz HIFU Transduserin düşey düzlemde kavitasyon enerji haritası.	60
Şekil 6.25: 60W-80kHz Temas Tipi transduserin 5°C ve 40°C sıcaklıklarında iki farklı derinlikte kavitasyon enerji haritası.	61
Şekil 6.26: 75W-670 kHz HIFU transduserin 10°C, 25°C ve 40°C sıcaklıklarında kavitasyon enerji haritası.	62
Şekil 6.27: 100W-1MHz HIFU transduserin 7°C, 15°C, 25°C ve 40°C sıcaklıklarında kavitasyon enerji haritası.	63
Şekil 6.28: 100W-1MHz HIFU transduserin mekanik etki altında iki farklı derinlikte kavitasyon enerji haritası.	64
Şekil 6.29: 60W-80kHz transduserin mekanik etki altında iki farklı derinlikte kavitasyon enerji haritası.	65
Şekil 6.30: 80 kHz temas tipi transduserin 60W, 40W ve 20W güç değerlerinde kavitasyon enerji eğrileri.	66

SEMBOL LİSTESİ

F: Frekans [Hz]

P: Güç [Watt]

W/cm²: Birim alan için toplam güç

Yunan Harfleri

ρ : Yoğunluk [kg/m³]

σ : Yüzey gerilmesi [N/m]

δ : Belirsizlik [%]

ϵ : Rastgele hata

β : Sistemik hata

ULTRASONİK SES DALGALARININ OLUŞTURDUĞU AKUSTİK KAVİTASYONU ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER VE KAVİTASYON ENERJİSİ ÖLÇÜMÜ

ÖZET

Bu çalışmada yüksek frekanslı ses dalgalarının sıvı içerisinde yarattığı basınç farklılıkları nedeniyle meydana gelen kavitasyon olgusu açıklanmıştır. Ultrasonik transduser elektrik sinyallerini mekanik titreşimlere çeviren bir alettir, bu çalışmada ayrıca ultrasonik transduser çeşitleri de incelenmiştir. Sıvı içerisinde oluşan kavitasyon kabarcıklarının patlamasıyla açığa çıkan enerji miktarına ve kavitasyon yoğunluğuna etki eden faktörlerin araştırılması amaçlanmıştır. Kabarcık boyutu, sıcaklık, frekans, genlik, sıvı çeşidi ve sıvı içerisinde çözünmüş gaz miktarı gibi birçok değişik parametrenin kavitasyon enerjisini etkilendiği gösterilmiştir. Ayrıca kavitasyon yoğunluğunu belirlemek için kullanılan ölçüm yöntemleri tanımlanmıştır.

Projenin devamında, farklı tiplerdeki transduserlerin oluşturduğu kavitasyon yoğunluğunu ölçmek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak temizleme cihazlarından ayrı, özel bir yıkama tankı ile deney düzeneği oluşturulmuştur. Literatür ve patent araştırmalarına dayanarak, sıvı içerisindeki çözünmüş gaz miktarını azaltmak için kimyasal ve fiziksel yöntemler denenmiş, kaynatma ile suyun degaze edilmesine karar verilmiştir.

Temas, daldırma ve odaklı transduserlerin yıkama tankı içerisinde oluşturdukları kavitasyon bölgelerinin ve bu bölgelerde ulaşılan maksimum kavitasyon değerlerinin tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, kavitasyon aktivitesine karar verilmesi için en geleneksel ve pratik yöntem olan alüminyum folyo aşınmasının gözlemi kullanılmıştır.

Tüm bu çalışmalarda enerjimetre kullanılarak yıkama hacmi içerisinde kavitasyon yoğunluğunun değişimi incelenmiş ve kavitasyon aktivitesi haritalama çalışmaları yapılmıştır. Ultrasonik kavitasyonu etkileyen frekans, genlik, ortam özellikleri gibi değişkenlerin yanı sıra ayrıca mekanik hareket, sıcaklık gibi etkiler de deneysel yıkama tankında çalışılmıştır.

Son olarak, optimum kavitasyon enerji seviyesinin elde edilebilmesi için deney sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

INFLUENTIAL PARAMETERS ON ACOUSTICAL CAVITATION WHICH IS CREATED BY ULTRASONIC WAVES AND MEASURING CAVITATION ENERGY

SUMMARY

In this project, the cavitation phenomena which is occurred by the pressure differences in a liquid medium as a result of high frequency sound waves is explained. An ultrasonic transducer is a device that converts the electrical signals to the mechanical vibrations, also the kinds of these ultrasonic transducers are examined. It's aimed to investigate the parameters that effect on the amount of energy released by the collapse of cavitation bubbles in the liquid and the cavitation intensity. It's shown that the cavitation energy and intensity are effected by many different parameters such as; bubble size, temperature, frequency, amplitude, liquid type and amount of dissolved gases in liquid etc... Furthermore, the measuring methods for determining the cavitation intensity are described.

The continuation of the project, the studies are done in order to measure cavitation intensity that is created by different types of ultrasonic transducers. First of all, seperated from any cleaning device, an experimental setup is configured with a speacial cleaning tank. Depending on the literature and patent researches, the chemical and physical methods for decreasing amount of dissolved gases in liquid are examined, degassing by boiling the water is determined.

Additionally, it's aimed to find out the cavitation regions and the maximum cavitation levels in the cleaning tank which are created by contact, immersion and focused transducers. For this reason, observation the aluminum foil erosion in cavitation medium as known the most traditional and practical method is used to determine cavitation activity.

In whole these studies, the change in cavitation intensity in the cleaning volume is examined by using an energymeter and mapping of cavitation activity is done. In addition to the parameters such as frequency, amplitude, liquid type also the mechanical motion and temperature effect is examined on that experimental cleaning tank.

Finally, the results of these experiments are given comparisonly to obtain the optimum cavitation energy level.

1. GİRİŞ

Sınırlı enerji kaynakları ve enerjinin en verimli şekilde kullanılmasının gerekliliği, var olan sistemler üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılması ve yeni teknolojilerin geliştirilmesini beraberinde getirmiştir. Bu kapsamda gaz dinamiklerinin anlaşılması ve sıvı içerisinde ultra sesle oluşturulmuş gaz kabarcıklarının patlamasıyla meydana gelen akustik kavitasyonun bu yönde kullanımı söz konusu olmuştur.

Ultra sesin tarihi yüz yıllar öncesine F.Galton' un insanlar ve hayvanlar için duyma eşiğiyle ilgilendiği çalışmalarına dayanır. Ayarlanabilir rezonans boşluğuyla bilinen frekansta ses üreten bir düdük icat ederek insan kulağının duyma eşiğinin normalde 16000 dalga/sn (16 kHz) olduğunu saptamıştır. Bahsedilen icat, gaz hareketi enerjisini ses enerjisine dönüştüren bir transduser örneğidir. Ultra ses uygulamada birçok farklı alanda kullanılmaktadır:

- Hırsız alarmları,
- Mücevher ve gözlük temizleyiciler,
- Medikal alanda prostat kanseri ve böbrek taşı tedavileri,
- Hamilelik sürecinde fetüs görüntüleme,
- Menzil ve obje bulma (SONAR),
- Yüzey temizleme,
- Sonokimya,
- Nemlendirme cihazları.

Zaman, enerji ve kaynaktan tasarruf sağlayarak çevreye olan zararı, kirliliği azaltmak amacıyla çeşitli sistemlerde kullanılan akustik kavitasyonun, oluşumunu ve enerjisini etkileyen onlarca değişken göz önüne alınırsa bu sistemleri geliştirmek için kullanılan ultra sesin; frekansının, genliğinin, ortam sıvısının özelliklerinin etkisi iyi bilinmelidir. Ayrıca yeni deney teknolojilerinin gelişmesi patlama sıcaklığı, kabarcık ömrü ve boyut dağılımının bilinmesindeki belirsizlikleri kaldırmıştır.

Akustik kavitasyonun en etkili şekilde kullanılmasının bu değişkenlerin optimize edilmesiyle gerçekleşeceği bilinmektedir. Kavitasyonu etkileyen değişkenlerin belirlenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışmasının ilk aşaması kavitasyon fenomeni ve fiziksel özelliklerinin anlaşılması için kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Ayrıca ürüne yönelik akustik kavitasyon teknolojilerinin bilinmesi için patentler incelenmiştir.

İkinci aşama olarak incelenen çalışmalar doğrultusunda kavitasyon aktivitesinin oluşumunda ve enerjisinde rol oynayan değişkenler ve sistem üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Örneğin; frekansın düşük olmasının, kabarcık boyutunun daha büyük olmasını ve daha yüksek patlama şiddeti sağlayacağı gibi... Ayrıca lm yöntemleri takip edilmiş, hidrofon, alüminyum folyo aşınması gibi geleneksel yöntemler ve enerjimetre gibi en son teknolojilerin kullanıldığı yöntemlerin yanı sıra dalga denklemi, kabarcık dinamik denklemi zmleri gibi teorik yöntemlerin de tercih edildiği görülmüştür.

Deney alışmaları üçüncü aşama olarak başlatılmış; frekans, genlik, sıvı özelliği, transduser cinsi ve yerleşimi, başlangıç sıcaklığı vs. değişkenlerinin etkisini incelemek için bir enerjimetre ölçümüyle devam edilmesi düşünülmüştür. Deney planlanması bir düzeneğin sağlanması gerektirmiş, uygun donanımlarla bir test sistemi kurulmuştur. Bu alışmalar boyunca değişik frekanslarda (20 kHz- 1 MHz) ve değişik tiplerde (temaslı, daldırma, odaklanmış) transduserlerle; farklı sıvı ortamlarında (saf su, degaze su ve deterjanlı su) x, y, z koordinat sisteminde onlarca nokta belirlenerek ölçümler alınmış ve bir haritalama çalışması yapılması planlanmıştır.

Son olarak bu haritalama çalışmaları, değişik sıvı sıcaklıklarında, mekanik etki altında, farklı ortam özelliklerinde tekrarlanarak değişkenlerin etkileri literatür çalışmalarıyla desteklenerek kavitasyon aktivesi ölçümü ve bunu etkileyen değişkenlerin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

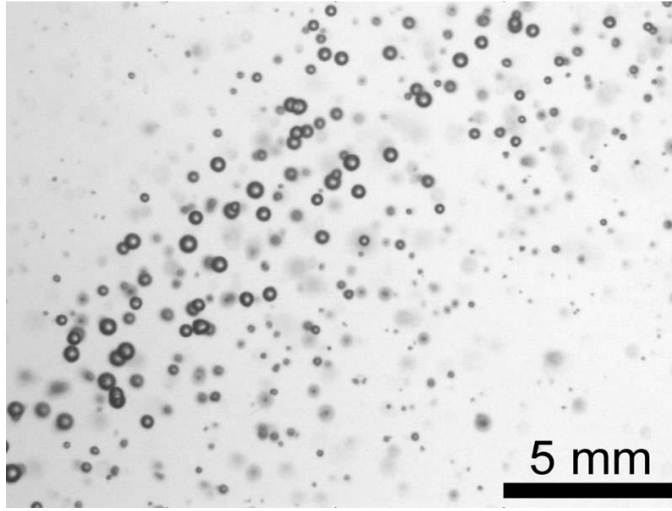
Ses atmosferde kulağımız tarafından algılanabilen periyodik basınç değişimleridir. Fiziksel boyutta ses, hava katı sıvı veya gaz ortamlarda oluşan basit bir mekanik düzensizliktir ve bir maddedeki moleküllerin titreşmesi sonucunda oluşur. Ses kaynaktan aldığı enerjilerle titreşerek yayılırlar. Titreşen cisimler esnek olup sesi oluşturur. Esnek olan cisimler ses dalgaları meydana getirebilir ve ses dalgalarını iletebilir.

Ses mekanik dalga olduğu için yayılması için bir ortama ihtiyaç duymaktadır. Ses dalgaları ortamlarda sıkışma ve genleşme şeklinde boyuna ilerleyen dalgalardır. Sesin bir frekansı, boyu, periyodu ve hızı bulunmaktadır. Bir saniye içerisindeki titreşim sayısına sesin frekansı denir. Birimi ise Hertz (Hz)' dir. Dalga boyu, bir ses dalgasının oluşması için sesin aldığı yoldur. Sesin hızı normal koşullarda; havada 340, tahtada 4000-6000, suda 3000-5000, çelikte ise 8000 m/s' dir [1].

- Alçak Frekanslı Ses (Infrasonik): Ses beri ya da infrases olarak nitelendirilen ses frekansları, 16 ile 20 Hz arasında olurlar. Böylece insan kulağının duyamayacağı kadar düşük, fakat hava basıncı değişiklikleriyle oluşan ses dalga frekanslarından daha yüksektirler. İnsan kulağının teorik olarak 20 Hz ile 20000 Hz arasını duyduğu söylene de, en iyi 250 Hz ve 3000 Hz arasındaki konuşma frekansı bölgesini duyar.
- Yüksek Frekanslı Ses (Ultrasonik): Ses öte ya da ultra ses, insan kulağının duyamayacağı yüksek frekanstaki seslere verilen addır. Frekansı 20 kHz' in üstündedir.
- Çok Yüksek Frekanslı Ses (Megasonik): Mega ses ya da megasonik 800 kHz 'ten büyük olan MHz mertebesinde ölçülen çok yüksek frekanslı seslere denir.

2.1. Kavitasyon

Kavitasyon sıvı içerisinde çoğunlukla gözle görülemeyecek kadar küçük kabarcıkların oluşması demektir. Yüksek yoğunluklu ultra ses kavitasyon, mikro salınımlar ve ısıtma gibi bazı özel etkiler yaratabilir. Kabarcıklar belli bir sıcaklıktaki gaz, buhar ya da bu ikisinin karışımıyla doludur ve belirli koşullar altında patlamaktadır. Ultrasonik kavitasyon, bir titreşim kaynağından ya da transduserden yayılan ses dalgalarının sıvı içerisinde oluşturduğu negatif ve pozitif basınç bölgelerinin salınım etkisi altında oluşur ve büyür.

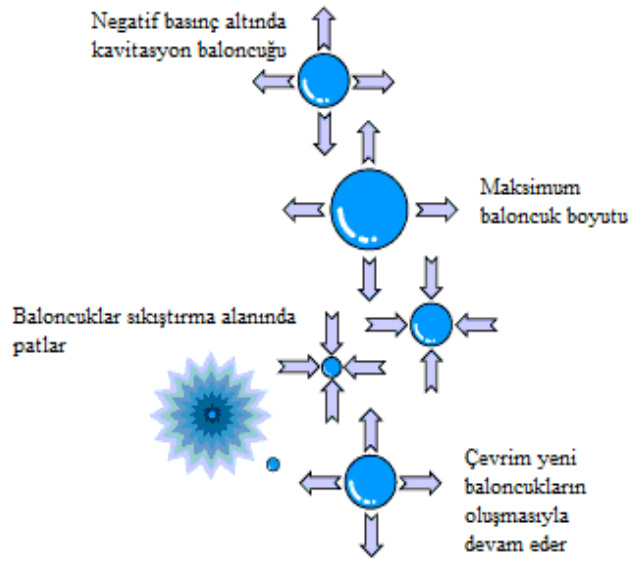


Şekil 2.1: Kavitasyon bulutu.

Suslick [1], 1994 yılında yayımlanan çalışmasında kavitasyonu sadece sıvıların içerisinde, kabarcıkların biçimlenme, büyüme ve ani patlaması aşamalarından oluştuğunu tanımlamıştır. Boşluğun gelişmesi ve patlaması fark edilebilecek şekilde çevre şartlarına bağlıdır. Boşluğun homojen bir sıvıda çökmesiyle bir katı-sıvı arayüzüne yakın noktada çökmesi arasında oldukça fark vardır. Ultrases sıvı içerisinde geçerken, genleşme dalgaları sıvı üzerine molekülleri birbirlerinden uzaklaştıracak negatif basınç uygular. Eğer bu ultrases yeterince yoğunsa genleşme dalgaları sıvı içerisinde boşluklar yaratır.

Bu olay negatif basınç, sıvının tipine ve saflığına bağlı olarak değişen yerel gerilme direncini aştığı zaman olur. Kavitasyon çekirdeklenme süreci, gaz içeren küçük parçacıklar ya da önceki kavitasyon olayında kalan geçici mikrokabarcıklar gibi sıvı içerisinde önceden var olan zayıf noktalarında başlar. Çoğu sıvıya, kavitasyon daha orta dereceli negatif basınçlarda başlarsın diye küçük parçacıklar eklenir.

Ultra sesle oluşan küçük gaz kabarcıkları ses dalgalarından enerji çeker ve büyür. Boşluk gelişimi sesin yoğunluğuna bağlıdır. Yüksek yoğunluklarda küçük bir boşluk aniden büyüyebilir. Eğer ses dalgasının genleşme yarı çevriminde boşluk genişlemesi yeterince hızlıysa, sıkıştırma yarı çevrimi boyunca tekrar sıkışmaya zaman bulamaz. Daha az akustik yoğunluk altında boşluklar, düzeltilmiş difüzyon denilen daha yavaş bir süreçle büyür. Bu koşullar altında boşluk birçok genleşme ve sıkıştırma çevrimi boyunca salınacaktır. Salınımlar sırasında yüzey alanına bağlı olarak boşluktan içeri ya da dışarı geçen gaz ve buhar miktarı, genleşme sırasında sıkıştırmaya göre oldukça fazladır. Buna göre her bir genleşmede boşluk büyümesi, sıkıştırmada büzülmesinden daha fazla olacaktır. Böylece devam eden akustik dalgalar boyunca boşluk büyüyecektir.



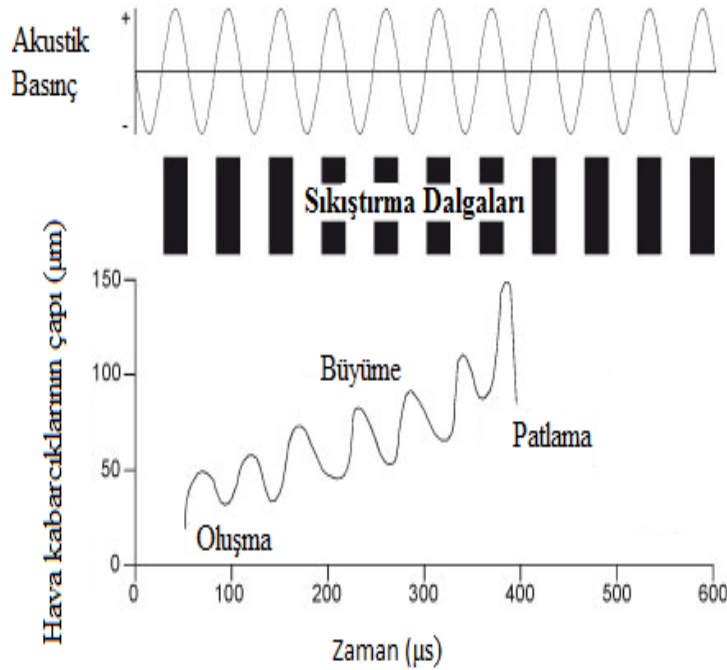
Şekil 2.2: Kabarcık gelişimi ve patlaması.

Şekil 2.2' de boşluğun farklı basınç alanları altında genişlemesi, ufalarak salınımına devam etmesi veya kritik boyuta gelince patlaması gösterilmiştir.

Boşluğun büyümesi yeterli miktarda ultra ses yayılımından enerji çektikten sonra kritik noktaya ulaşır. Bu kritik boyut, rezonansa boyutu, sıvıya ve sesin frekansına bağlıdır. Örneğin; 20 kHz frekansta, boşluk boyutu yaklaşık 170 mikrometredir. Tam bu kritik noktada boşluk tek bir ses dalgası boyunca aniden büyür.

Boşluk bu çok büyümüş haliyle artık yüksek ya da düşük ses yoğunluğu altında daha fazla enerji absorbe edemez. Enerji girişi olmadan da boşluk kendini koruyamaz ve çevreleyen sıvı içeri dolmaya başlayarak boşluğun yıkılma patlamasına neden olur. Bu patlamalar genellikle ultra ses dalgalarının yoğunluğu, akustik kavitasyonel eşiği aştığı zaman meydana gelir. Örneğin; bu eşik değer 20 kHz' e maruz kalan sıradan bir sıvı için birkaç W/cm²'dir [2, 3, 4].

Ses dalgasının sıkıştırma ve genleşme dalgaları, oluşan pozitif ve negatif basınç bölgelerinin etkisi altında oluşan bir boşluğun oluşma, büyüme ve patlama evreleri süresince boyutunda meydana gelişen değişimler Şekil 2.2'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Kavitasyon oluşum aşamaları [4].

Kavitasyon doğanın bilinen en etkili ve en etkileyici enerji yoğunluğunu yükselticidir. Her kabarcık patlaması, yerel sıcaklığın 5000°C ve basıncın 1000 atmosfer değerini aşmasına neden olur. Fakat ömrü 0.1 saniyeden kısadır, ısıtma ve soğutma oranları saniyede 10 milyar°C' den fazladır [2, 4].

Kabaca bir kıyasla bahsedilen değerler sırasıyla, güneşin yüzey sıcaklığı, okyanus dibindeki basınç, bir şimşegin ömrüne ve kor bir demirin suya daldırılmasından milyonlarca kat fazla soğumasıdır.

Kavitasyon Çeşitleri [5]:

1. Akustik kavitasyon: Bu durum ultra ses (16kHz-100 MHz) dalgalarının sıvı içerisindeki basınç değişimlerinden oluşur.

2. Hidrodinamik Kavitasyon: Sistem geometrisinin yarattığı hız değişimleri kullanılarak elde edilen basınç değişimleri ile oluşturulur. Örneğin; sistem geometrisine bağlı olarak basıncın ve kinetik enerjinin değişmesi, orifis ya da venturiden geçen akışta olduğu gibi boşlukların oluşmasıyla sonuçlanır.

3. Optik Kavitasyon: Yüksek yoğunluklu ışınların (lazer) sıvı sürekliliği kesen fotonlarıyla oluşur.

4. Parçacık Kavitasyonu: Temel parçacık yayılımı tarafından oluşturulur. Örnek olarak; kabarcık odasında olduğu gibi bir nötron yayılımının sıvıyı kesmesi verilebilir.

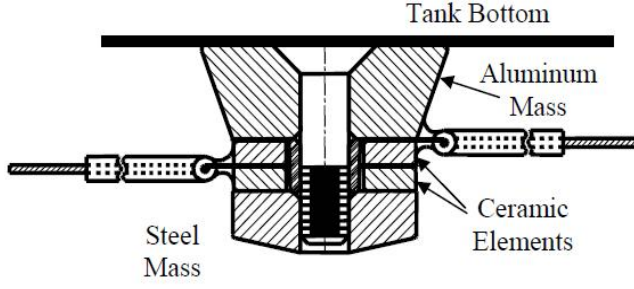
2.2. Ultrasonik Transduser

Su ortamında kavitasyon oluşturmak için kullanılan ultrasonik transduserler elektrik enerjisini mekanik titreşimlere dönüştüren ve tam tersi şekilde mekanik titreşimleri elektriğe çeviren güç dönüştürücüleridir. Transduserin içindeki en önemli aktif element elektrik enerjisini akustik enerjiye, akustik enerjiyi de elektrik enerjisine çevirir. Bu aktif element en basit şekliyle, karşılıklı iki yüzüne elektrot yerleştirilmiş polarize bir malzeme parçasıdır. Polarize malzeme ise bazı molekülleri pozitif yüklü, diğer molekülleri de negatif yüklü olan malzemelerdir.

2.2.1. Transduser Çeşitleri [URL-1]

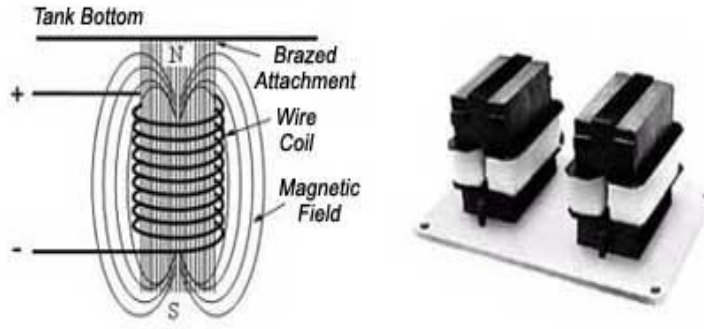
Transduserler çalışma prensibi itibariyle birkaç çeşitten oluşmaktadır:

Piezoelektrik transduser: Malzemeye elektrik alanı uygulandığı zaman, polarize moleküller bu yüke göre kendilerini sıralar. Bu da malzemenin moleküler ya da kristal yapısında uyarılmış ikiz kutuplar oluşmasına neden olur. Moleküllerin sıralanması malzemenin boyutunu değiştirir ve bu olguya da *Electrostriction* denir. Ayrıca kalıcı olarak polarize edilmiş *Quartz* (SiO_2) yada baryum titan (BaTiO_3) gibi malzemeler, mekanik bir kuvvet etkisiyle boyut değiştirdiğinde elektrik alanı oluşturur. Bu olgu da Piezoelektrik etki olarak bilinir.



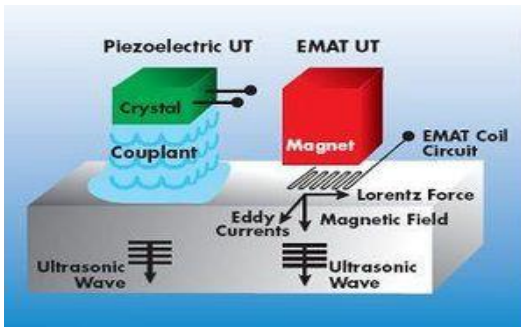
Şekil 2.4: Piezoelektrik transduser [URL-1]

Magnetostrictive Transduser: Büyük miktarda nikel ya da diğer manyetik malzeme plakaların etrafına bir tel bobini yerleştirilir ve bobinden akım geçirildiğinde manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan da malzemenin daralmasını ve uzamasını sağlar böylece ses dalgası oluşur. Tam tersi şekilde de dışarıdan bir kuvvet uygulandığında manyetik alanda değişimler gözlenir.



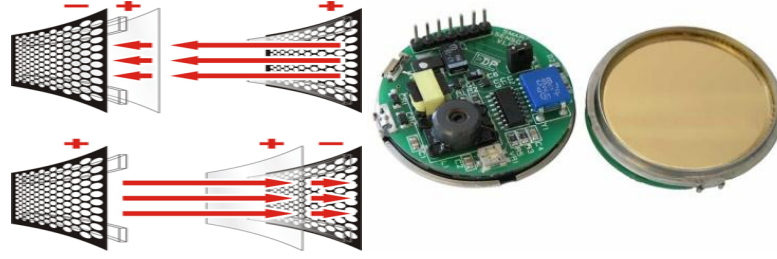
Şekil 2.5: Magnetostrictive transduser [URL-1]

Elektromanyetik transduser: Bu transduser mikrofon ve hoparlör zarında da kullanılan katı armatürden yapılır, elektrik ve manyetik alanın birlikte varlığında titreşimler yaratır [URL-2].



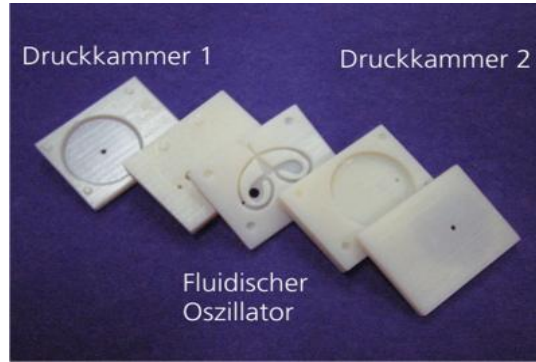
Şekil 2.6: Elektromanyetik transduser [URL-2]

Elektrostatik transduser: Özel tasarımı olan bir elektrik kapasitöründe periyodik yük değişimleriyle mekanik titreşimler oluşur.



Şekil 2.7: Elektrostatik transduser [URL-2].

Sıvılı transduser: Sıvının kinetik enerjisi sistemin içindeki hareket edebilir bir parçayı titreştirdiğinde akustik dalgalar oluşturulur.



Şekil 2.8: Sıvılı transduser [URL-2].

2.2.2. Kullanım çeşitlerine göre transduserler

Temaslı transduser: Temizlenecek yüzeye doğrudan temas ettirilerek kullanılır. Yani yıkama tankının herhangi bir bölgesinin dış yüzeyine monte edilir. Bunun için ısıya dayanıklı yapıştırıcı ya da özel vidalar kullanılır.

Daldırmalı transduser: Sıvı içerisine daldırılarak ses dalgalarının yayılımı sağlanır. Daldırma tipi ve temas tipli transduserlerin en büyük farkı içine konuldukları hazne yani kasalarıdır. Daldırma olanları su geçirmeyecek şekilde özel kalıplara yerleştirilir. Genellikle daldırma tipli transduserler çoklu ve sıralı biçimde bir hazneye monte edilir ve bu kapalı kutu suyun içine yıkama tankının duvarlarına ya da tabanına olmak üzere yerleştirilerek kullanılır. Endüstriyel ultrasonik temizleme banyolarında daha fazla ultrasonik güç gerektiği için bu kullanım oldukça uygundur. Laboratuvar uygulamalarında ise çoğunlukla kalem tipinde olan daldırmalı ultrasonik transduser tercih edilmektedir.

Yüksek Yoğunluklu Odaklı Ultrasonik Transduser :Genelde medikal operasyonlarda kullanılan yüksek frekanslı ses dalgalarını bir noktaya odaklayarak ileten cihazdır. Yüksek yoğunluklu odaklı transduserler ise adından da anlaşılacağı gibi ses dalgalarını belirli bir mesafede odaklar. Odaklama mesafesi kullanılan lense göre ayarlanabilir.

Odaklı transduserler çok yüksek mertebelerde enerji açığa çıkarabilirler bu nedenle kullanım sırasında özen gösterilmelidir. Odak noktasına kadar olan bölge içerisine zarar görmesi istenmeyen maddeler yerleştirilmemelidir. Yüksek kavitasyon etkisini odaklaması sayesinde kanser tedavisinde noktasal olarak kanserli doku tahribatında kullanılmaktadır.

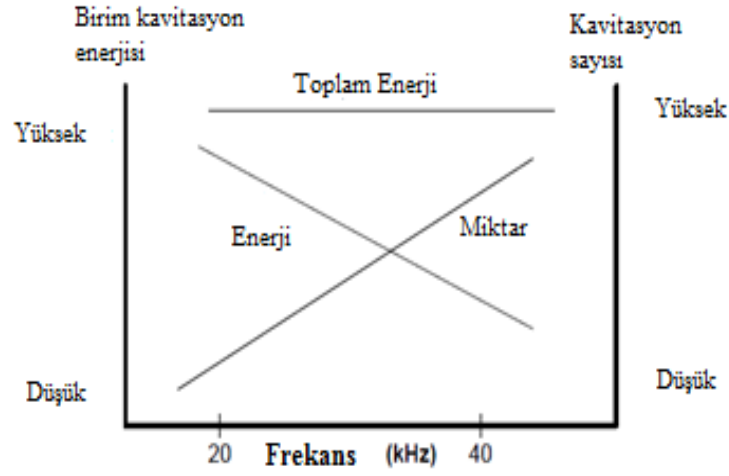


Şekil 2.9: Odaklı (HIFU) transduser

2.3. Kavitasyon Yoğunluğuna Etki Eden Faktörler

Kavitasyonu yoğunluğu, şiddeti, kabarcık sayısı değişik parametreler tarafından etkilenir. Kabarcığın patlamasıyla oluşan şok dalgasının şiddeti doğrudan kabarcık boyutuyla alakalıdır. Daha büyük boyuttaki kabarcık daha güçlü şok dalgası üretir. Boyutu ise frekans belirler. Bu ikisi arasında ters bir orantı vardır, düşük frekansta daha büyük boyutlu kabarcık oluşurken yüksek frekansta kabarcık boyutları küçüktür. Bunun nedeni düşük frekanslarda kabarcığın gelişmesi için daha fazla zaman aralığı bulunmasıdır. Fakat yüksek frekansta daha çok sayıda kabarcık oluşurken, düşük frekansta bu sayı oldukça azdır. Buradan bir yaklaşımla az sayıda ama büyük boyutundan dolayı yüksek enerjili kabarcıklar içeren bir düşük frekanslı sistemle, çok sayıda düşük enerjili küçük kabarcıklar içeren başka bir sistemin aynı enerjiyi sağlayabileceğini söyleyebiliriz.

Şekil 2.10'da düşük ve yüksek frekanstaki transduserlerin oluşturduğu kavitasyonun toplam enerji miktarının bir noktada kesişebileceği gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Frekans ve kavitasyon enerjisi ilişkisi [9].

Patlamanın şiddetini belirleyen diğer bir faktör ise her bir kabarcığın içerisindeki gaz ya da buhar miktarıdır. Eğer kabarcığın içerisinde daha az gaz ya da buhar varsa patlama daha güçlü olur. Oldukça fazla miktarda oluşan kabarcıklar ve bunların patlaması, yüzeyde şiddetli yerel gerilmeler oluşturur ve zarar görmesine neden olur. Bir yüzeyin kavitasyona olan hassaslığını belirlemek için kullanılır kavitasyon parametresi kullanılır. Boyutsuz olan bu kavitasyon parametresi basınç katsayısının bir şeklidir.

(Denklem 2.1)

P: mutlak basınç

: sıvı buharının basıncı

ρ : sıvının yoğunluğu

V: referans hızı

Eğer σ değeri geometrik olarak benzer iki sitemde de aynıysa kavitasyon oluşumu aynıdır. $\sigma = 0$ olduğunda sıvı basıncı, buhar basıncına eşitlenir ve kavitasyon oluşur. Bazı malzemeler hasar görmeden belirli bir süre bu darbeleri tolere edebilirken, kırılğan malzemeler anında kütle kaybederler. Elektrokimyasal aşınma ve ısı etkileri de bu yüzey hasarlarını artırır.

Sıcaklık kavitasyon miktarını arttırmak için en önemli parametredir. Sıcaklıktaki değişimler viskozite, gaz çözünürlüğü, difüzyon hızı, buhar basıncı gibi kavitasyonu etkileyen parametreleri de değiştirir.

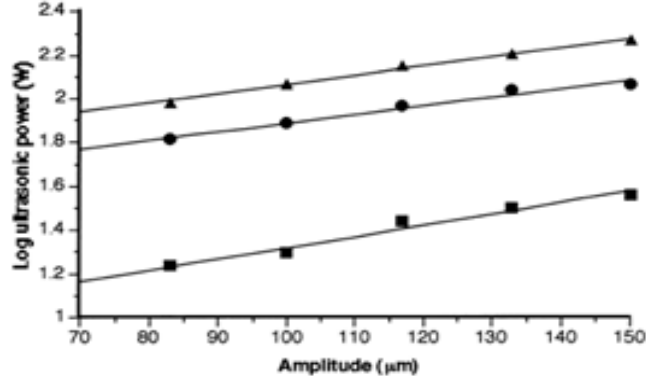
Kavitasyon yoğunluğunu arttırmak için viskozite değeri minimum olmalıdır çünkü viskoz sıvılar kabarcıkların çabuk oluşmasına izin vermez ve patlamalar şiddetli olmaz. Çoğu sıvının viskozitesi sıcaklık arttıkça düşer.

Ayrıca sıvı içerisinde çözünmüş gazlar, kavitasyonun kabarcık gelişme evresinde ayrışır ve patlamanın şiddetli olmasını önler. Çözünmüş gaz miktarı sıvı sıcaklığı artmasıyla azalır. Yüksek sıcaklıklarda çözünmüş gazların difüzyon hızında artış olur. Buharlı kavitasyon, kabarcıkların ortam sıvısının buharıyla dolu olduğu ve en etkili kavitasyondur. Ancak kaynama sıcaklığına ulaşıldığında, kavitasyon yoğunluğu sıvı kaynamaya başlayınca azalır. Enerji, kavitasyon eşiğinin üzerine çıkartılırsa kavitasyon sabitlenir ve ancak odaklama teknikleri kullanarak arttırılabilir [9].

Frekans: Kavitasyon üzerine en etkili parametrenin frekans olduğunu söyleyebiliriz. Düşük frekansta genleşme ve sıkıştırma çevrimleri arasında geçen sürenin boşluğun büyümesi için daha fazla olduğu bilinirken, yüksek frekansta tam tersine daha küçük ama daha fazla sayıda kabarcık oluşmaktadır [3].

Güç: Kavitasyon eşiği için minimum bir güç gerekmektedir. Enerji çok düşükse çok az oluşabilir ya da bu eşiğe hiç ulaşamayabilir. Kavitasyon eşiğinin üzerindeyken daha fazla güç vermenin tek etkisi, aynı kavitasyonel enerjiye sahip daha fazla kabarcık üretmektir. Genellikle güç artışı ultrasonik etkinin de artmasına neden olur fakat bir noktada üretilen kavitasyon kabarcıkları güç aktarım verimini düşürmeye başlar bu nedenle güç her durumda optimize edilmelidir [3].

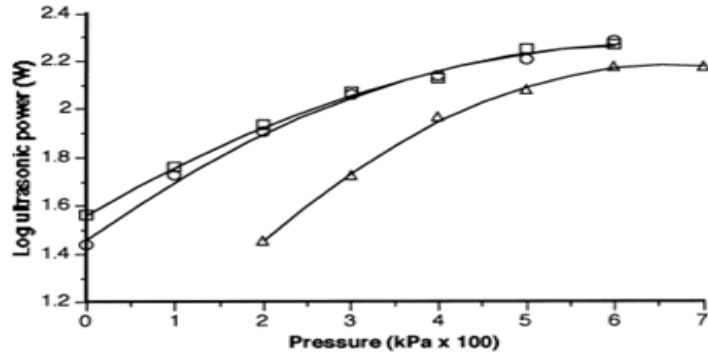
40°C' de değişik basınç aralıklarında yapılan deneylere göre genliğin artmasının çıkış gücünü üssel olarak arttırdığı görülmüştür. Aynı şekilde farklı sıcaklık değerlerinde aynı basınç altında da yine üssel olarak arttırdığı gözlemlenmiştir. Böylece genlikle beraber çıkış gücünün artmasının sıcaklıkla ya da basınçla ilgili olmadığı, genliğin her koşulda gücü arttırdığı sonucuna varılmıştır [7].



Şekil 2.11: Genliğin 0 (■), 300 (▲) ve 600 kPa (●)'da, 20kHz'lik ultrasonik çıkış gücüne etkisi [7].

Basınç: Sıvı buhar basıncı uçucu sıvılar düşük akustik güçlerde kavitasyonu güçlendirir ve buhar dolu kabarcıklar üretir. Ancak bu kabarcıkların patlaması buharla tamponlandığı için daha az enerji verir [3]. Dış basıncın artması kavitasyonun başlaması için daha seyrek basınç gerekmesi demektir. Bundan daha önemli bir nokta dış basıncı arttırarak kavitasyonel patlamanın şiddeti artar ve böylece ultrasonik etkide artış görülür [3]. Basınç artışının, ultrasonik güç artışına etkisi vardır ama bu etki sınırlıdır ve bu sınır işlem sıcaklığına bağlıdır.

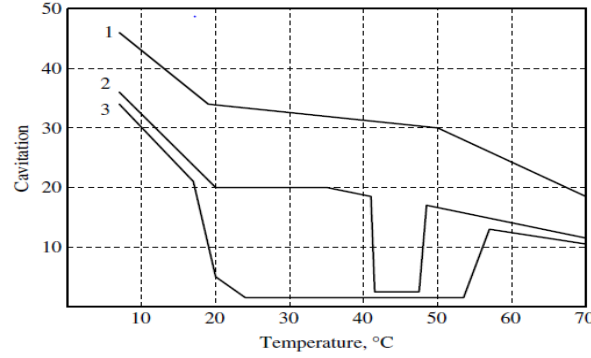
Şekil 2.12'de görüldüğü gibi hidrostatik basınç arttıkça çıkış gücü de artar. Ama bu artış bir basınç aralığına ve işlem sıcaklığına bağlıdır. Çünkü basınç çok arttıkça artık güç artışının azaldığı hatta durduğu görülmüştür [7].



Şekil 2.12: Statik basıncın 40°C (□), 70°C (O) ve 120°C (Δ) sıcaklıkta ultrasonik çıkış gücüne etkisi [7].

Sıcaklık: Sıcaklık arttırılınca sıvının buhar basıncı da artar ve kabarcıkların içine daha fazla buhar girerek patlamanın şiddeti düşürür. Sıvının sıcaklığı arttığında kabarcık sayısı da çoğalır ve kavitasyon daha da yoğunlaşır. Diğer bir taraftan, sıcaklık yükselirken kabarcıkların içerisindeki gaz içeriği de yükselir böylece

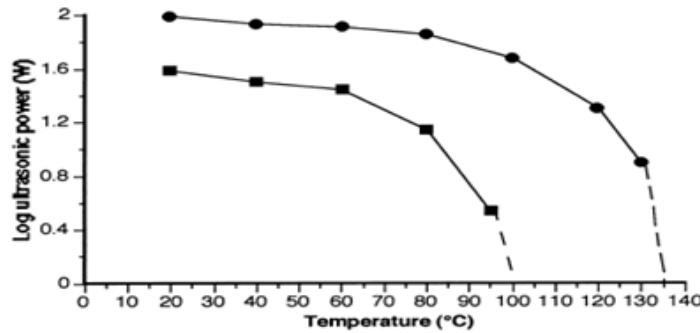
kabarcıkların patlama şiddeti azalır. Sıcaklığın bu zıt etkilerini düşünürsek optimum bir sıcaklık değerinde kavitasyonun en yoğun olabileceği çıkarımı yapılır. Sıcaklık etkisinin belirlenmesi için yapılan bir çalışmada deney düzeneği olarak 37 kHz' te endüstriyel ultrasonik yıkama makinesi kullanılmıştır. İki kısımda yapılan deneylerde su sıcaklığı 5°C de kış koşullarında ve su sıcaklığı 20°C çevre sıcaklığı 25°C civarı ve 32°C üzerinde iken incelemeler yapılmıştır [8].



Şekil 2.13: Başlangıç sıcaklığı 5°C olan su içerisinde (1) 900 W, (2) 570 W ve (3) 530 W güç değerlerinde, sıcaklık ve kavitasyon yoğunluğu [8].

Ayrıca ortamın başlangıç sıcaklığının çıkış gücü üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Farklı basınçlarda yapılan deneyler sonuçlarına göre, yukarıda şekilde gösterildiği gibi sıcaklık etkisi hep aynı şekilde gerçekleşmiştir. Sıcaklık arttıkça zamanla çıkış gücü düşer [7].

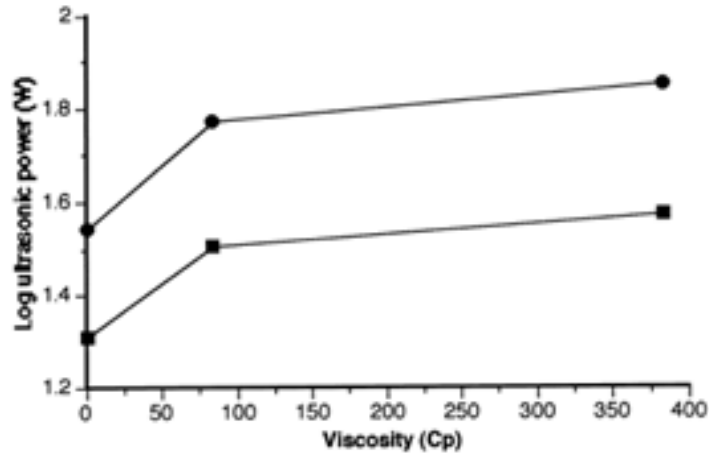
Şekil 2.14'te görüldüğü gibi atmosferik basınçta 20°C ve 70°C aralıklarında fazla bir değişme gözlenmezken 70°C ve 100°C arasında büyük ölçüde azalmıştır. Aynı şekilde 200 kPa' da denendiği zaman 100°C 'den sonra çıkış gücünde azalma başlayıp 135°C 'de sıfır olmuştur.



Şekil 2.14: 0 (■) ve 200 kPa (●) 'da başlangıç sıcaklığının ultrasonik (120 kHz) çıkış gücüne etkisi [7].

Sıvı viskozitesi ve yüzey gerilmesi : Viskozite kesme kuvvetlerine karşı direnç demektir ve viskoz sıvılarda kavitasyon oluşumu daha zordur. Yüksek viskozite değerlerinde kavitasyonun daha zor oluşması, daha çok giriş gücü gerektirdiği ve baloncukların birim hacim başına daha az sayıda olmasına rağmen patlamaları daha etkilidir. Sıvı ortamın yüzey gerilmelerinin, konsantrasyonun yani viskozitenin ultra sese etkisi olduğu bilinmektedir. Kavitasyon sıvı-gaz ara yüz üretimi gerektirir, bu nedenle düşük yüzey gerilmeleri kavitasyon eşiğini düşürür [3].

Şekil 2.15'te görüldüğü gibi ortamın viskozitesinin artmasıyla çıkan güç artmıştır ama bu lineer değildir. Aynı şekilde farklı basınçlarda, aynı genlikte ultra ses uygulanan farklı viskoziteli ortamlarda çıkan gücün aynı olabileceği görülmüştür. Viskozite etkisi basınca bağlı olarak değişmektedir, basın yükseldikçe etki azalır hatta basınç 400 kPa üzerine çıktığında bu etkinin neredeyse sıfır olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan viskozite etkisi genlikten bağımsızdır [7]. Ayrıca değişkenlerin kabarcık enerjisine etkisini fonksiyonel olarak belirtmek için Çizelge 2.1 kullanılabilir.



Şekil 2.15: 20 kHz, 0 kPa' da ultrasonik çıkış gücüne viskozite etkisi [7].

Çizelge 2. 1: Kavitasyon enerjisinin bazı değişkenlerle fonksiyonel ilişkisi.

Değişken	Sembol	Kabarcık Enerjisine Etkisi
Frekans	f	f^{-2}
Basınç Genliği	P	$P^{5/3}$
Yüzey Gerilimi	σ	$\sigma^{1/3}$
Yoğunluk	ρ	$\rho^{-1/2}$
Kabarcık Çapı	R	R^2

2.4. Kavitasyon ve Ultrasonik Güç Ölçüm Yöntemleri

Kavitasyon yoğunluğunu, aktivitesini ve şiddetinin ölçmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Sıcaklık farkı, basınç değişimlerini belirlemek, alüminyum folyo üzerinde aşınım miktarına göre karar vermek ya da enerjimetre ile ölçüm almak en bilinen yöntemlerdir. Kavitasyon enerjisini belirlemek, sistemin etkili olup olmadığına karar vermede, gücün ne kadar etkili olacağını belirlemede ayrıca sistemde kavitasyon oluşmayan noktaları ayırt etmede yararlı olacaktır.

Bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Genellikle deneysel olan bu çalışmaların yanısıra teorik olarak denklemler, nümerik simulasyonlar da kullanılmıştır.

2009 yılında yayımlanan "Design aspects of sonochemical reactors: Techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters" isimli çalışmada kavitasyona etki eden faktörler açıklandıktan sonra kullanılabilecek yöntemler özetlenmiştir [10].

2.4. Kavitasyon ve Ultrasonik Güç Ölçüm Yöntemleri

Kavitasyon yoğunluğunu, aktivitesini ve şiddetinin ölçmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Sıcaklık farkı, basınç değişimlerini belirlemek, alüminyum folyo üzerinde aşınım miktarına göre karar vermek ya da enerjimetre ile ölçüm almak en bilinen yöntemlerdir. Kavitasyon enerjisini belirlemek, sistemin etkili olup olmadığına karar vermede, gücün ne kadar etkili olacağını belirlemede ayrıca sistemde kavitasyon oluşmayan noktaları ayırt etmede yararlı olacaktır.

Bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Genellikle deneysel olan bu çalışmaların yanısıra teorik olarak denklemler, nümerik simulasyonlar da kullanılmıştır.

2009 yılında yayımlanan "Design aspects of sonochemical reactors: Techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters" isimli çalışmada kavitasyona etki eden faktörler açıklandıktan sonra kullanılabilecek yöntemler özetlenmiştir [10].

2.4.1. Deneysel çalışmalar

a) Birincil etkilerle ölçme

Basınç ölçümü: Kavitasyonun sıvı içerisinde yarattığı basınç yoğunluğu hidrofona ölçülebilir ve çeşitli analizörle dağılım hakkında istenilen bilgi alınabilir.

Başlıca sistem elemanları şu şekildedir:

- Heterodyne interferometer: ses alanına göre optik yörüngedeki değişimleri algılar.
- FFT , HP3589A spektrum analizör
- Akustik kavitasyon monitörü(ACAM II)
- Kavitasyon Aktivite Göstergesi

Bu çalışmada karşılaşılabilecek problemler şöyle açıklanır: Suyun içerisinde hidrofona gibi parçaların varlığı kavitasyonel aktivite dağılımını etkileyebilir. Kalibrasyon gereklidir. Düzgün ölçümler alınması için sinyallerin oscilloscope, Fourier transform ya da data toplama yazılımlarıyla çevrilmesi gereklidir, bunlar oldukça pahalı olabilir. Toplam basınç yoğunluğu ölçülür, harmonik titreşen baloncukların yarattığı noise da içerilir. Baloncukların hepsi transient kavitasyon yaratmayabilir.

Sıcaklık ölçümü: Enerji transferi sıvıda yerel sıcaklık artışlarına neden olur ve termocouple ya da termistörle ölçülerek yerel kavitasyon aktivitesi miktarı hakkında bilgi alınır. Bu deneysel çalışmada gözönüne alınması gereken problemlerden bazıları aşağıda listelenmiştir:

- Patlamaya bağlı olarak sensor bozulabilir,
- Tekrarlanabilirliği ve hassasiyeti düşüktür,
- Ayrık metotlarda, sıcaklığın farklı yerlerde eş zamanlı ölçümü zor olabilir.
- Patlamalar sırasında çok yüksek yerel sıcaklıklar oluşur. Çok kısa sürede ölçü alınması için tepki süresi çok kısa olan termocouple/termistör kullanılmalıdır.(Daha önce hava için 54 ± 3 ms'de ölçüm alınması kullanılmıştır.)

b) İkincil etkilerle ölçme: Kimyasal yöntemler incelenecek olursa,

- Iodine release method : KI oksidasyonla iyonlarına ayrışır, ultrasonik yayılım altında iyodin oluşur.
- Fricke dosimetry : Demir iyonları hidrojenperoksitle tepkimeye girer.

- Salicyclic acid dosimetry : Hidroksil radikali üretim hızına bakılır.

Yukarıda sıralanmış kimyasal yöntemlerde suda çözünen maddelerden radikal oluşumu gözlenmektedir. Ortamda kavitasyon etkisinin varlığıyla iyon yükleri değişir ya da yeni ürünler oluşur. Bunlar UV spectrophometer ile ölçülür sadece salicyclic acid dosimetry’de daha hassas ölçüm alan HPLC kullanılır.

Kimyasal yöntemlerin uygulanmasında karşılaşılabilecek zorluklar düşünülürse bunlar aşağıdaki gibidir:

- Çok büyük ölçüm hataları olabilir,
- Transient kavitasyon baloncuklarının patlamasından sonra oluşan iyonlar bazında ölçüm alınırken, titreşen baloncukların yarattığı kavitasyonel aktivite dikkate alınmaz.

Elektroiletkenlik ölçümü: Belirli koşullar altında miktarı bilinen suyun içerisinde ultra ses dalgaları geçirilir. Suyun içerisinde normal şartlar altında birbirleriyle tepkimeye girmeyen nitrojen ve oksijen molekülleri bulunur.

Yalnız çok gelişmiş koşullarda, yüksek sıcaklık ve basınçta tepkimeye girerek NO oluştururlar, bu koşul kavitasyonla sağlanır. NO daha sonra suyla tepkimeye girerek asit oluşturur, bu da suyun elektrik iletkenlik miktarını artırır. Böylece kavitasyon aktivite miktarı belirlenir. Bu yöntemde aktivite yoğunluğu oksijen ve nitrojenin çözünme miktarıyla oldukça ilgilidir.

Flüoresan belirleme: Sulu çözeltide floresan olmayan bir asitin (TA) ve hidroksil radikaliyle (OH) birleşmesinden oldukça yüksek floresan olan başka bir asit açığa çıkar (HTA). Reaksiyon çok spesifik olduğundan aslında kavitasyonun gerçek ölçüsünü verdiğini söyleyebiliriz. Fluorescence Spectrophotometer kullanılarak ölçüm alınabilir. Metodun en zor yanı tamamen karanlık ortamda yapılması gerekmektedir ve floresan yoğunluğu 2-4 sa. arasında ölçülmelidir.

Fiziksel yöntemlere bakıldığında ise daha pratik yöntemlerle karşılaşılmıştır. Bunlar:

Sonochemiluminescence (SCL): sonokimyasal reaksiyonun gerçekleştiği reaktör içinde kavitasyonel olarak aktif olan bölgeleri görselleştiren bir yöntemdir. Reaktif olarak Luminol kullanılır, ultrasonik koşullarda OH ile oksidasyona girince mavi ışık spektrumunda 3-amino phtalate verir ve kavitasyon yoğunluğu görülmüş olur. SCL, dijital bir kamerayla görüntülenebilir.

Aluminyum folyo aşınması: Aluminyum folyo transduser yerleşim yönüne paralel tutulur ve yüzeydeki aşınmalar gözlemlenerek kavitasyon aktivite miktarına karar verilir. Bu işlem için yüksek çözünürlükte dijital kamera gereklidir. Ayrıca yüksek frekanslarda sonuç alınamamaktadır.

Kütle Transferine Bağlı Elektrokimyasal Metot: Bu yöntemde elektrokimyasal bir reaksiyon kullanılarak katı-sıvı kütle geçiş katsayısı ölçülür. Hidrojen peroksitin karasızlığı ve çok az miktarda açığa çıkmasından dolayı doğru karakteristik vermeyebilir.

Polimer İndirgenmesi: Kavitasyon yoğunluğuna bağlı polimerlerin monomere dönüşmek üzere kırılması gerçekleşir. Belirli noktalarda molekül ağırlıktaki değişimler ölçülerek aktivite yoğunluğu bulunur.

Particle Image Velocimetry (PIV): Double-pulsed lazer teknolojisi kullanarak parçacıkların yer değiştirmelerini gösteren bir metottur. Artarda alınan iki görüntüden parçacıkların yer değiştirmesi analiz edilir.

Kavitasyon baloncuklarının izlenmesi olarak kullanılması düşünülse de farklı boyutlardaki baloncukların sıvıda rastgele dağılımı nedeniyle güvenilir olmadığı düşünülmüştür. Böylece ortama floresan izbirakıcılar eklenmiştir.

Deneyisel yöntemler oldukça pahalıdır ve zaman aldıkları düşünülür. Kavitasyon ortamı dışarıdan eklenen hidrofön, termocouple, alüminyum folyo, test tüpü gibi cihazlarla bozulabilir ve dağılımın gerçekçi bir görüntüsü alınamayabilir. Ayrıca elde edilen sonuçlar kavitasyon fenomeninin dinamik yapısı nedeniyle tekrarlanamayabilir. Bu nedenle teorik araştırmalar geliştirilmiştir. Teorik uygulamalardan elde edilen sonuçlar deneyisel sonuçlarla uygunluk göstermiştir.

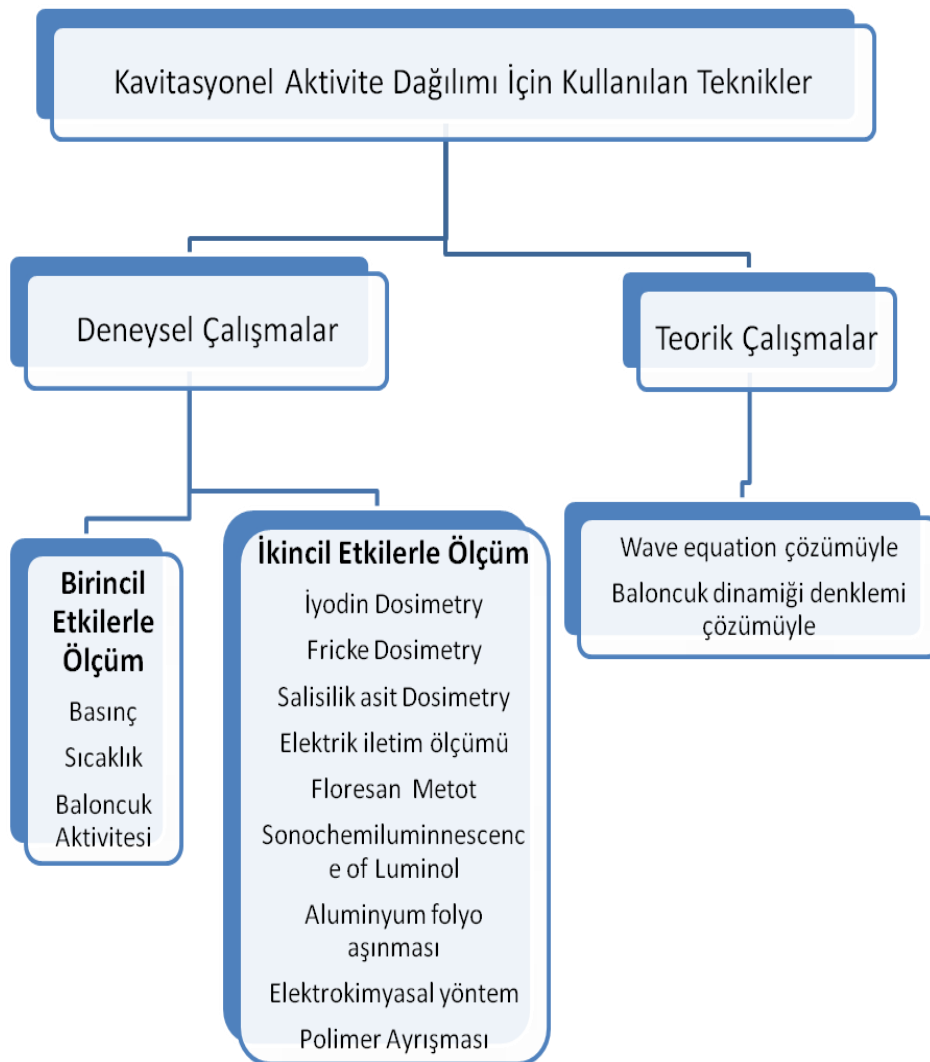
2.4.2. Teorik yöntemler

Homojen ve homojen olmayan baloncuk dağılımlı Helmholtz ve Kirchhoff integral denklemleri çözülerek kavitasyonel aktivite değişimleri elde edilmiştir. Sonuçta transdusere çok yakın alanlarda aktivitenin maksimum olduğu ve uzaklaştıkça azaldığı ortaya çıkmıştır. Diğer bir yöntem de dalga denkleminin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümünden akustik alan dağılımının karakteri ortaya çıkarmaktır [10]. Burada özetlenen çalışmalara dair bir şema Şekil 2.16'da gösterilmiştir.

2.4.3. Ultrasonik güç ölçümü ile ilgili IEC standardı

IEC'nin 61161 kodlu "Ultrasonics-Power measurement- Radiation Force Balances and Performance Requirements" standartında ultrasonik gücün ölçümü yer almaktadır [11].

Bu standartın amacı sıvı içerisinde, düşük megahertz frekans aralığındaki ultrasonik gücün, ağırlık ölçümü kullanarak ve yayılım gücünün ölçümüne dayalı olarak bulunması için standart metotlar önermektir. Ultrasonik transduserlerden yayılan toplam akustik gücün yayılım güç dengesi kullanımına dayanarak bulunmasına yönelik bir standarttır.



Şekil 2.16: Kaviteasyon aktivitesi ölçüm yöntemleri.

Genel prensipte ses alanını kesen bir hedef aracılığıyla yayılım güç dengesinin ölçülmesidir. Bu metottaki sınırlamalar ise kaviteasyon ve sıcaklık artışıdır.

Ayrıca tüm ölçüm belirsizlikleriyle ilgili bilgi de vermektedir. 1 W'a kadar olan ultrasonik güç 0,5 MHz - 25 MHz frekans aralığında ölçülebilirken, 20W'a kadar olan ultrasonik güç ölçümü 0,75 MHz - 5 MHz frekansları arasında uygulanabilir.

Standarta göre ultrasonik güç, ultrasonik yayılım varken ve yokken oluşan kuvvetlerin farkından bulunabilir.

Sistemde kullanılan hedef iki çeşittir:

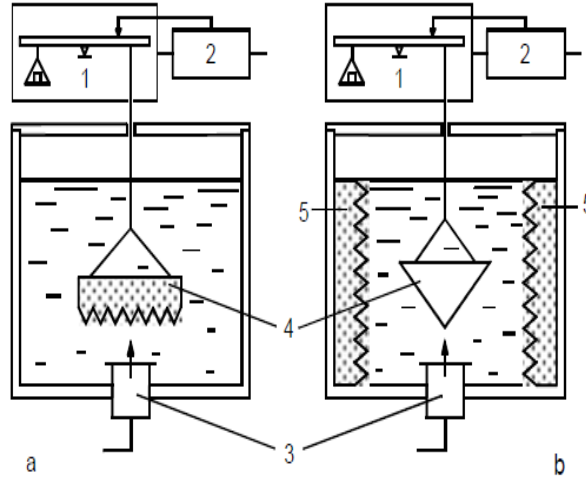
1. Yutucu Hedef: Akustik enerjinin %99'unu absorbe etmesi gerekmektedir ve yansıtma oranı % 3,5'tan az olmalıdır.
2. Yansıtıcı Hedef: Yansıtma faktörü %99'dan büyük olmalıdır.

Bu hedeflerin çapı, alanın önemli kısımlarını kesecek kadar büyük olmalıdır. Genellikle ultrasonik transduserin çapının en az 1,5 katı olması istenir.

Diğer sistem gereksinimlerinden bahsedecek olursak; Sistem tankı, hedef destek yapıları, transduser yerleşimi, kalibrasyon, degaze edilmiş su, hassas terazi sistemi, çevresel titreşimlerden ve hava akımından arınmış ortam.

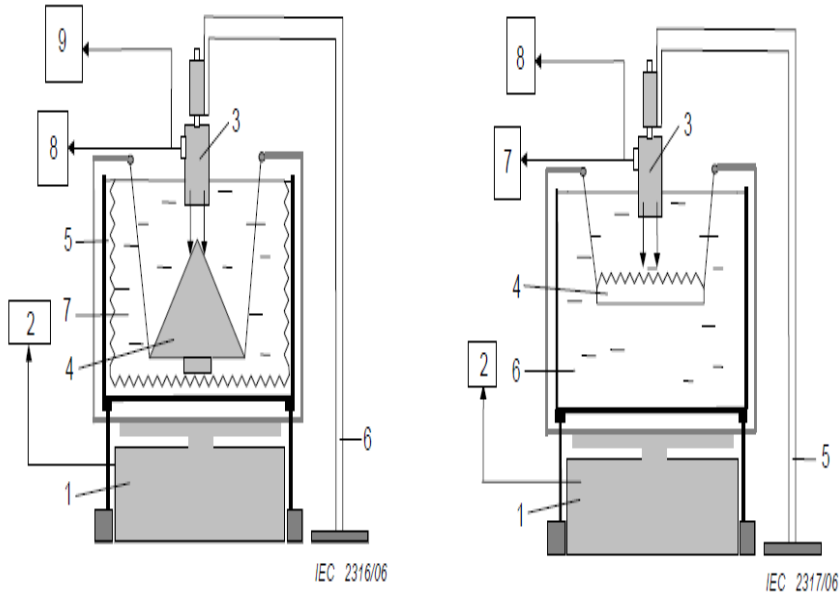
Terazi/Güç ölçüm sistemi: Seçilecek terazi tipi ölçülecek ultrasonik gücün büyüklüğüne bağlıdır. 10 mW güç değeri , su içerisindeki emici hedefte 0,68 mg kütleyle eşit olan 6,7 μ N yayılım gücüne denktir. Yani güç değeri 10 W iken yayılım kuvveti 0,68 grama denk gelen 6,7 mN'dir. Bu durumda elektronik ve kendini dengeleyebilen bir mikroterazi en uygun cihaz olacaktır. Ayrıca standartta suyun degaze edilmesi için bazı yöntemler açıklanmıştır. Bunlardan biri 2 kPa-2,5 kPa vakum uygulamaktır. Suyun oksijen oranı birkaç saat için 4 mg/l olarak kaldığı için uygun bir yöntemdir. Bir diğeri ise suyu kaynatmaktır ve örneğin suyu 5dk civarında kaynatmak degaze etmek için uygulanabilir.

1.B Terazi, 2.B Terazi Kontrol, 3.B Transduser, 4.B Hedef, 5.B Yan yüzey yutucuları, 6.B Transduser desteği, 7.B Su tankı, 8.B Jeneratör ve amplifier, 9.B Voltaj ölçer; 1.C Terazi, 2.C Terazi Kontrol, 3.C Transduser, 4. Hedef, 5. C Transduser desteği, 6.C Su tankı, 7.C Voltaj ölçer, 8.C Jeneratör ve amplifier.



Şekil 2.17: Düzenleme A, yutucu (a) ve yansıtıcı (b) hedefli [11].

1. Terazi 2. Terazi Kontrol 3. Transduser 4. Hedef 5 Yan yüzey yutucuları



Şekil 2.18: Düzenleme B, konveks-konik hedefli. Düzenleme C, yutucu hedefli[11].

Şekil 2.17 ve 2.18 görüldüğü gibi değişik düzenlemeler kullanılarak ölçüm yapılan bu sistemde prensip hepsi için aynıdır. Ultrasonik güç uygulanınca hedefin su içerisindeki ağırlık değişimi bulunarak , ultrasonik güç uygulanmadan önceki ölçümle karşılaştırılır. Aradaki fark hesaplandığında sisteme verilen ultrasonik güç elde edilmiş olur.

3. DENEY DÜZENEGİ

Proje çalışmaları kapsamında ultra/megasonik dalgaların bulaşık yükleri gibi sert ve çamaşır yükleri gibi yumuşak yüzeyler üzerindeki etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak makinelerden bağımsız, özel hacimlerde farklı çalışma prensiplerine sahip, rezonans frekans değerleri farklı olan transduserlerin kavitasyon etkinliğini belirleme çalışmaları yapılmıştır. Literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar incelenmiş ve "*Mapping the Cavitation Intensity in an Ultrasonic Bath Using The Acoustic Emission*" isimli çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmada, kavitasyon ortamı oluşturmak ve boyutsal dağılımını belirlemek için bir yıkama tankı, transduser, RF-amplifikatör (*amplifier*), uygun sıvı ortamı ve ölçüm cihazı kullanıldığından bahsedilmiştir [12].

Çalışmada, 0,15x0,15x0,15 metre ölçülerinde, 0,0225 m² yüzey alanına sahip paslanmaz çelikten bir tank kullanıldığı ve tankın alt köşelerinden birinin koordinat sisteminin orijini olacak şekilde x,y,z eksenlerinin belirlendiği tariflenmiştir. Farklı 9 noktadan hidrofona ölçüm alınmış ve bir yük yükseltici (*charge amplifier*) ile banyo içerisindeki değişik noktalardaki basınç değişimleri belirlenmiştir. Hidrofona banyonun tabanı arasındaki mesafe 5mm olarak sabitlenmiş ve 300 mL sıvı ile doldurularak frekansı 22 kHz olan transduser ile çalıştırılmıştır. Deneyler, içerisinde kabarcıkların oluşmasına izin veren (kavite olabilen) su ve silikon yağı gibi kavite olmayan iki farklı sıvı ortamında gerçekleştirilmiştir. Çıktı olarak osiloskoba, hidrofona tarafından algılanan basıncın bir fonksiyonu olan voltaj iletilmiştir [12].

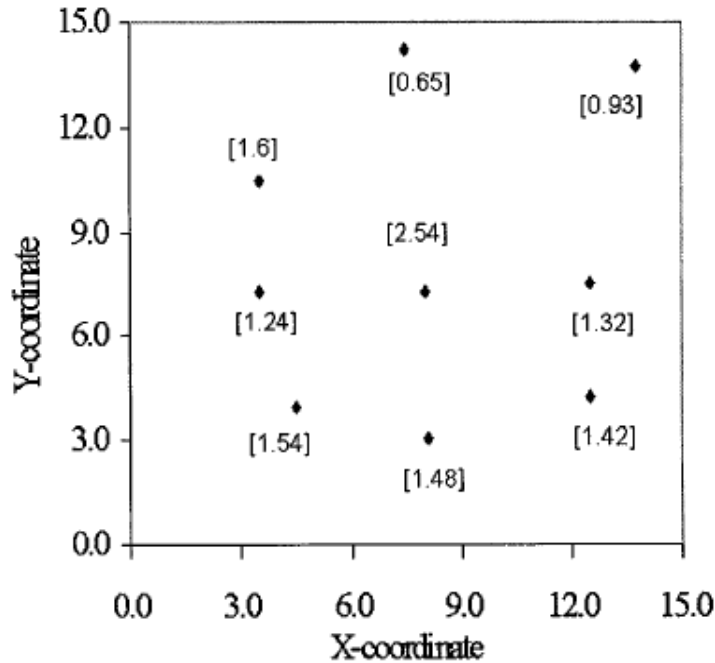
Sıvı ortam seçimi: Literatürde çoğu çalışmada sıvı ortam olarak su kullanılmıştır. Bunun ana nedeni organik çözücülerin ultrasonik dalgalara karşı zayıf tepki vermesi olarak açıklanmıştır. Organik çözücülerin yüksek buhar basıncı, kavitasyon etkilerinin gözlenmesi için asıl gerekli olan kavitasyon kabarcığının geçici patlamasını önler. Verilen koşullar için kavitasyon eşiğine bakılarak o ortam için kavite olan veya olmayan ortam denilir.

Deney prosedürü: İncelenen çalışmada bahsedilen deney prosedürü seçilen 9 farklı noktadan basınç ölçümleri alarak bunların analizini kapsamaktadır. Deney öncesi

belirtilen bazı şartlar sağlanarak (sıvı sıcaklığı, silikon yağının degaze edilmesi vb.) işlem başlatılmıştır. Kabarcık salınımı fenomeni ve patlamalar tamamen rastgele bir doğaya sahip olduğu için aynı süre içerisinde birbirini takip eden ölçümler farklı sonuçlar verebildiği belirtilmiştir. Bu etkiyi dışarıda bırakmak için her noktada için 50 basınç titreşim ölçümü alınıp, ortalama bir değerle analiz yapılmıştır.

Deney boyunca toplanan verilerin, Ayırık Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) ve baloncuk dinamiği denklemi ile analizinden de bahsedilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlardan bir tanesi Şekil 1'de farklı 9 nokta için kavitasyon şiddeti atmosfer cinsinden hesaplanmış ve en yüksek kavitasyon şiddetinin tam orta noktada, transdusere en yakın bölgede olduğu gösterilmiştir [12].



Şekil 3.1: Ultrasonik banyonun üstten görünüşü ve kavitasyon şiddetleri [12].

3.1. Sistem Elemanları

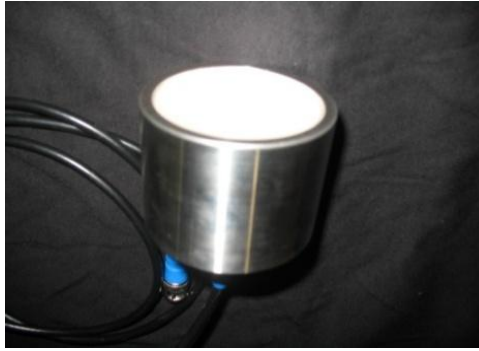
Proje kapsamında kavitasyon enerjisi ölçümü amacıyla oluşturulan deney sisteminin elemanları açıklanmıştır.

RF Amplifikatör: Alçak veya yüksek frekanstaki elektrik sinyallerinin gerilimini, şiddetini veya gücünü artırma amacıyla kullanılan bu cihaz, 50-60 Hz olan şebeke frekansını 18 kHz'in üzerindeki yüksek frekanslarda elektrik sinyallerine çevirmektedir. Bu çalışma kapsamında Şekil 2' de görülen T&C Power Conversion firmasından temin edilen AG1024 model ürün kullanılmaktadır.

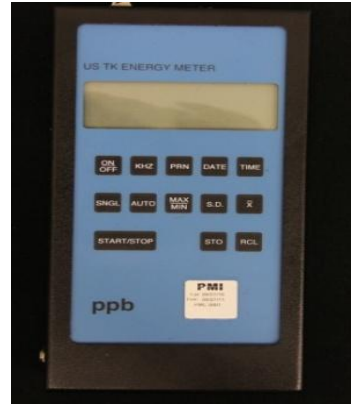


Şekil 3.2: RF amplifikatör.

Ultrasonik Transduser: Yüksek frekanstaki elektrik sinyallerini ses dalgalarına dönüştüren transduser çeşitleri ve çalışma prensipleri 2 numaralı bölümde detaylıca açıklanmıştır. Bu proje kapsamında kullanılan transduser tipleri kısaca şöyledir; temas tipi, daldırma ve HIFU tipi... Şekil 3.3'te solda gösterilen cihaz bu projede kullanılan odaklama özelliği bulunan transduserdir.



i)



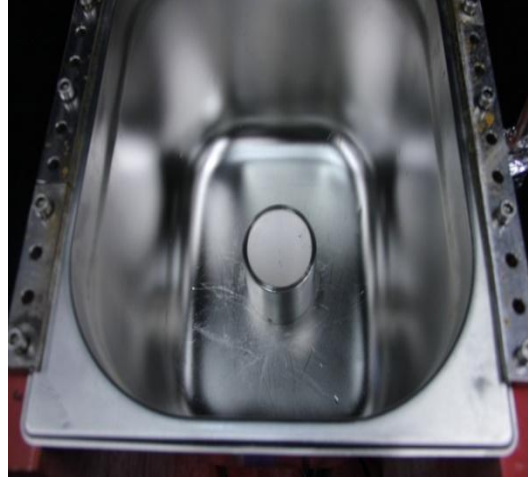
ii)

Şekil 3.3: i) HIFU transduser ii) Enerjimetre

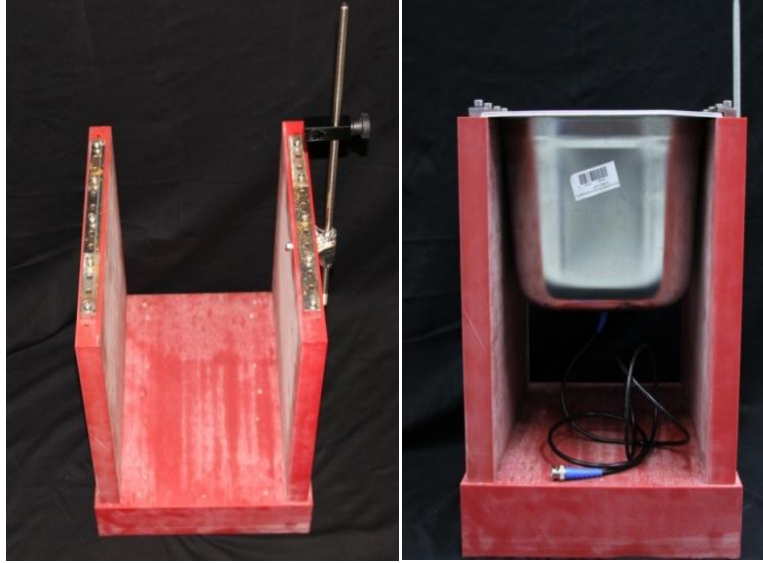
Enerjimetre: Kavitasyon enerjisi ölçümünde kullanılmak üzere PPB Megasonics firmasından temin edilen enerjimetre; ultrasonik frekans aralığı için EPDM ve megasonik frekans aralığı için quartz probu bulunan göstergeli, el tipi bir cihazdır. Enerji ölçümü için proplar su içerisine daldırılır ve ekranda okunan değerlerin kaydedilmesiyle veri toplama işlemi yapılır.

Yıkama tankı: Paslanmaz çelik malzemeden yapılmış, 325x225x200 mm ölçülerinde su haznesidir. Temas tipi transduserler tankın alt dış yüzeyine yapıştırılırken, daldırma ve HIFU transduserler tankın alt iç yüzeyine, transduser su içerisinde kalabilecek şekilde monte edilmektedir.

Yıkama tankını sabit tutmak ve dış titreşimlerden etkilenmesini en aza indirmek için bir destek tasarlanmış ve epawood malzemeden üretilmiştir. Transduser kullanım şekline göre tanka monte edilir. Şekil 3.4'te daldırma tipi transduserin yıkama tankı tabanına su içerisinde kalacak şekilde yerleştirildiği görülmektedir.

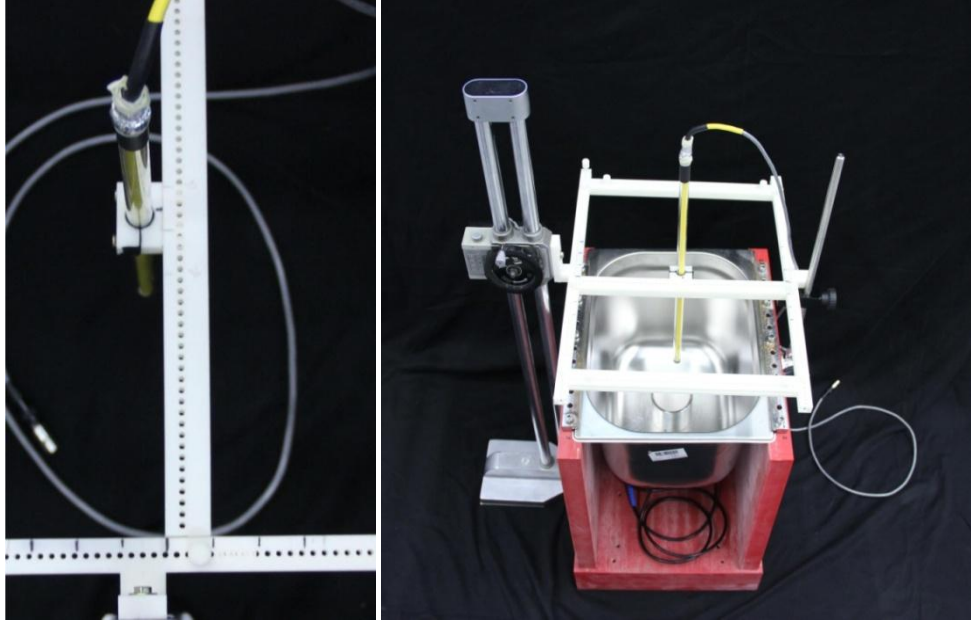


Şekil 3.4: Sisteme yerleştirilmiş, transduser bağlı bir yıkama tankı.



Şekil 3.5: Yıkama tankını yerleştirmek için tasarlanmış destek.

Tankın ve desteğin üstten ve karşıdan görünüşleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Bunun yanısıra ölçüm almaya yardımcı bir sistem tasarlanmıştır. Böylece ölçüm probunun, sıvı içerisinde değişik yönlerde hareket ettirilmesi ve sabitlenmesi sağlanmaktadır. Bu amaç için x, y, z eksenlerinde aşağıda görülen doğrusal hareket sağlayıcı bir sistemle konum ayarlaması yapılabilmektedir.



Şekil 3.6: Ölçüm probu ve hareket sisteminin yerleştirilmesi

3.2. Deney Prosedürü

Proje kapsamında yapılan çalışmalarda kavitasyonun incelendiği sıvı ortam olarak su kullanılmıştır. Sıvı ortam özelliklerinin kavitasyona etkisi Bölüm 2'de literatür çalışmaları kısmında ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Sıvı ortamdaki çözünmüş gaz miktarının yüksek olması durumunda, ultrasonik ses dalgalarının oluşturduğu baloncukların içerdiği gazlar, baloncukların patlaması sırasında şok emici olarak davrandığı ve patlama şiddetini düşürdüğü bilinmektedir. Bu nedenle kavitasyon yoğunluğunu yüksek tutmak, oluşumunu engelleyecek zayıflıkları ortadan kaldırmak ve patlama şiddetini arttırmak için kullanılacak su gazdan arındırılmalıdır.

Suyun gazdan arındırılması işlemi degaze olarak isimlendirilir. Bu işlem için kullanılan farklı yöntemler vardır; kaynatmak, vakumlamak, kimyasal tepkimeler kullanmak vb. Bu çalışma boyunca kullanılacak su 5 dakika boyunca kaynatılarak degaze edilmiş, özel şişelerde oda sıcaklığına gelene kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

Deneylere başlamadan önce su özelliklerini belirlemek için HACH marka oksijenmetre, pHmetre ve iletkenlik ölçer kullanılmıştır. Sıvı ortamın hazırlanmasından sonra seçilen transduser yıkama tankına adapte edilir ve tank desteğe yerleştirilir.

Hazırlanan sıvı yıkama tankına eklenir ve jeneratörün transduser ile bağlantısı yapılarak ölçümler alınmaya başlanır. Enerjimetrenin frekans aralığına göre seçilen prob ile çözelti ortamı içerisinde belirli noktalardan ölçümler alınmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3.3 Ölçüm Belirsizliği

Belirsizlik (*Uncertainty*): Hata için belirlenen bir değerdir. Cihaz ile ölçüm yapılması durumunda hatanın ne olacağının belirlenmesidir. Belirsizliğin hem kesinlik hem de doğruluk hatalarının sonucu olmasına rağmen sadece kesinlik hataları istatistikî yöntemlerde konu edilir Bir ölçüm hatası, çoğu zaman birçok nedenden kaynaklanan çok sayıda bağımsız hataların sonucunda oluşur. Hata analizi, bu bağımsız hataların genel hata üzerindeki etkilerini değerlendirme çalışmasıdır. Ölçüm hatası hiçbir zaman tam olarak bilinemez. En iyi ihtimalle, içinde gerçek değerin yer aldığı bir bölge belirlenebilir.

Bu bölge belirsizlik olarak adlandırılır ve hatanın olası bir büyüklüğünün ifadesidir.

Belirsizliğin gerçekçi bir ölçümüne ulaşmak için tüm potansiyel hata kaynaklarının etkilerinin tam olarak belirlenmesi gerekir [13].

3.3.1. Hata kaynakları

1. Fiziksel niceliği tanımlayan matematiksel modeldeki bir yanlışlık
2. Ölçme işleminin doğasından kaynaklanan tahminlerin çeşitliliği
3. Ayarlı cihazlar ve ölçüm standartlarındaki belirsizlik
4. Standart ve cihazlarda kademeli değişikliklere yol açan zamana bağlı karasızlıklar
5. Sıcaklık, nem, basınç gibi çevresel faktörlerine etkisi
6. Başka kaynaklardan elde edilen sabit değerler ve diğer parametreler
7. Sinyal karışması, parazitler, homojen olmama, yetersiz çözünürlük ve tam olmayan ayrışma durumlarından ileri gelen belirsizlik

8. Sayısal belirsizlik ve veri analizi

9. Yanlış belirlemeler ve prosedür hataları

10. Temizlik, beceri ve kullanıcı tekniklerini içeren laboratuvar çalışmaları [13]

3.3.2. Hataların sınıflandırılması

Ölçme iki özellik içerir:

- 1) Aynı niceliğe ait tekrarlanan ölçümlerin birbirini tutmaması,
- 2) niceliğin gerçek değerinin, ölçüm sonuçlarının limit değerinden farklı olması.

Bu özellikler rastgele ve sistematik hata olmak üzere iki çeşit hatanın sonucudur [13].

a) Rastgele hatalar

Rastgele hatalar ölçümün tekrarlanması durumunda değişimlere yol açan etkilerle ilişkilidir. Rastgele hataları düzeltmek mümkün değildir. Ölçüm sayısı artırılarak etkisi azaltılabilir. Herhangi bir rastgele hatanın büyüklüğü saptanamaz çünkü bu tamamen bir rastgele olaydır. Dağılım, olası değerlerin yayılımını tanımlayan standart sapma (σ) ile karakterize edilir. Bu standart sapma, tekrarlanan ölçümlerin ($x_1, x_2, \dots, x_n$) sonucu elde edilir ve s ile belirtilir.

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{Denklem 3.1})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{Denklem 3.2})$$

Belli sayıda yapılan ölçüm sonuçlarının ortalaması olan $\bar{x}$, genellikle ölçüm sonucu olarak alınır. Bu takdirde rastgele hata etkileri azalır ve $\bar{x}$ değerindeki belirsizlik ölçüsü ortalamanın standart sapması (veya standart hata) olarak verilir ve

$$\frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Denklem 3.3})$$

$$\frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Denklem 3.4})$$

şeklinde hesaplanır. için rastgele hata limiti, C güvenirlik seviyesinde olarak verilebilir.

Burada , (n-1) serbestlik derecesidir. t değeri tablolardan güvenirlik seviyesine bağlı olarak okunur.

Rastgele belirsizlik çoğu zaman t istatistiğini kullanmak yerine standart sapmanın iki veya üç katı olarak verilir.

Rastgele hata aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$= \text{---} \quad \text{(Denklem 3.5)}$$

Çizelge 3.1: Gauss dağılımında güvenirlik seviyesi [13]

Yüzde	Katsayı
%50	$\pm 0,675 \sigma$
%68,3	$\pm 1,0 \sigma$
%95	$\pm 1,96 \sigma$
%99,7	$\pm 3,0 \sigma$
%99,99	$\pm 4,0 \sigma$

Ölçülen niceliği etkileyen rastgele hata nedenleri çok sayıda ise toplam standart sapma hesaplanır. Böylece bağımsız hata kaynaklarının birleşik etkisine de açıklık getirilmiş olunur [13, 14].

b) Sistemik hatalar (bias)

Ölçümün aynı koşullar altında tekrarlanmasına rağmen hata değişmiyorsa bu hata, sistemik hata olarak adlandırılır. Sistemik hatalar tüm ölçümlerin aynı miktarda hatalı olmasına yol açarlar ve ölçümün tekrarlanması ile belirlenemezler.

Sistemik hataların belirlenmesi daha karmaşık olup, genellikle istatistiki metotlar ile yapılamaz. Sistemik hatalara yol açan parametrelerden bazıları da deneylerde kullanılan sabitler, çarpanlar, vb. katsayılardır.

Bu hataların etkileri, ölçülen değerlerin kontrolü ve kişisel beceri ile belirlenir. Hataların büyüklükleri deneysel doğrulamayı gerektirebilir, ancak deneyi yapan kişinin yargı ve tecrübelerine başvurmak gerekli olabilir. Sistemik hatalar, gerçekçi olarak saptanamadığında güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi gerekir. Güvenirlik sınırları ve rastgele hata limitleri, sistemik hatanın doğru olarak bilinebilmesi için yeterli genişlikte olma gerekliliği açısından, birbirlerine benzeyen kavramlardır.

Her sistemik belirsizlik bileşeni, hata etkisi için bir sanki mutlak üst sınır olarak değerlendirilir ve büyüklüğü tipik olarak $-\delta / +\delta$ aralığı içerisindeki değerler

cinsinden hesaplanır. Sistemik hata kaynaklarının çok sayıda olması durumunda, $-\delta / +\delta$ sınırları, her bileşen için ayrı ayrı elde edilir. Bileşenleri birleştirmede kullanılan en yaygın iki yöntem, lineer toplama ve kareleri toplamının karekökünü hesaplamadır [13, 14].

c) Toplam belirsizlik

Toplam ölçüm hatası, δ ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki farktır.

ϵ =Rastgele hata

β =Sistemik hata

$$\delta = \beta + \epsilon \quad \text{(Denklem 3.6)}$$

Rastgele hata her ölçüm için farklı değer alır. Buna karşılık sistemik hata tüm ölçümlerde aynıdır değişmez [13]. Bir değişkenin ölçüm belirsizliği deklere edilirken, o değişkenin tahmin edilen değeri, mutlak belirsizliği ve güvenilirlik seviyesinin birlikte verilmesiyle ifade edilir. Örneğin; bir değişkenin ölçüm belirsizliği denklem 3.7 kullanılarak gösterilir.

$$\text{(Denklem 3.7)}$$

ifadesi ile tanımlanır.

Burada;

m: Değişkenin ortalama değeri,

w: Değişkenin belirsizliği

p: Güvenilirlik seviyesi (%) olarak tanımlanmıştır.

Bu ifade, fiziksel büyüklük ile şöyle örneklendirilebilir:

Bu değer bize ortalama değerin 50.2 Pascal olduğunu ve %95 ihtimalle gerçek değerinde ortalama değer etrafında ' lık bir salınım içinde bulunduğunu gösterir. Buradaki "k=2" ifadesi %95 güvenirlilik seviyesini gösteren bir parametredir [15].

Cihazlara ait doğruluklar (sistematik hata) genelde %95' lik güvenirlilik seviyesinde belirtilirler. Ancakı ölçümlerden kaynaklanan rastgele hatalar %68' lik güvenirlilik seviyesinde verilirler. %68' lik güvenirlilik seviyesindeki hata, %95 güvenirlilik seviyesindeki hatanın yarısıdır [15].

Çalışmada çok fazla tekrar edilen ve parametrelere göre çeşitlenen deney olduğu için örnek olarak sadece bir deney verileri kullanarak belirsizlik analizi yapılmıştır. Ayrıca kullanılan cihazlardan kaynaklanan sistematik hatalar ihmal edilmiştir. Deney sonuçlarının açıklanmasına ek olarak Bölüm 7' de ölçüm belirsizliği bu bölümde verilen bilgilere dayanarak hesaplanmıştır.

4. DEGAZE ETME YÖNTEMLERİ

Ultra/megasonik uygulamalarda önemli sistem parametrelerinden bir tanesi ses dalgalarının uygulandığı sıvı ortamı içerisinde çözünmüş halde bulunan gaz miktarıdır. Sıvı içerisindeki çözünmüş gaz miktarının yüksek olduğu koşullarda ultra/megasonik ses dalgalarının oluşturduğu bubbleların etkinlikleri daha düşük olmaktadır. Bu nedenle uygulamalarda, çalışılan sıvı ortamı degaze edilerek içerisindeki çözünmüş gazlar uzaklaştırılmaktadır. Sıvıların degaze edilebilmesi için literatürde kullanılan yöntemlerden bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Basıncın Azaltılması: Gazların çözünürlüğü, sıvı içerisinde çözünmüş halde bulunan gaz miktarının kısmi basıncıyla doğru orantılı olacak şekilde Henry kuralına uyar. Bu kurala göre, daha düşük basınçlı ortamda bulunan sıvıda çözünebilecek gaz miktarı düşük olacaktır. Düşük basınç altında karıştırmak ya da ultrasonik etki uygulamak (sonication) sıvı içerisinde çözünmüş halde bulunan gazın sıvıdan uzaklaştırılmasını daha da verimli hale getirebilmektedir. Vakum degazerler bu yöntemle göre çalışmakta ve sıvının basıncı düşürülerek gaz miktarı azaltılabilmektedir.

Isıtma: Uygulamalarda sıvının sıcaklığı artırılarak, sıvı içerisindeki gazın çözünebilirliği azaltılabilmektedir. Bir önceki yöntemle benzer şekilde yüksek sıcaklıklarda karıştırmak ya da ultrases uygulamak etkinliği artırmaktadır. Bu yöntemin özel ekipman gerektirmemesi ve uygulamanın kolay olması nedeniyle degaze yöntemleri içerisinde kullanımı yaygındır. Belirli bir sıcaklıktaki su içerisindeki çözünmüş hava miktarını yaklaşık olarak belirlemek için Şekil 4.1 kullanılabilir.

Temp. in °C	level of air in water in mmol/l
20	0.824
30	0.710
40	0.629
50	0.578
60	0.544

Şekil 4.1: Su içerisindeki çözünmüş gaz miktarının sıcaklıkla değişimi [16].

Membran degaze: Bu yöntemde kullanılan membran sıvı içerisinde çözünmüş halde bulunan gaz moleküllerinin geçişine izin verirken, sıvı moleküllerinin geçişini engellemektedir. Gaz moleküllerinin membrandan geçişini sağlayabilmek için vakum uygulanmaktadır. Bu yöntemde gazın sıvı içerisinde tekrar çözünmesi engellenerek daha saf bir sıvı elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Bahsedilen bu yöntemlerde sıvı içerisindeki çözünmüş gazın tamamı sıvı içerinden ayrıştırılabilmektedir. Aşağıdaki yöntemler ise, seçici uygulamalar olup, belirli gazların sıvı içerisinden uzaklaştırılması sağlanabilmektedir.

Soygaz kullanma: Çözeltiye soy gaz eklenmesi ile, sıvı içerisinde çözünmüş halde bulunan oksijen ve karbondioksit moleküllerinin soy gazlar ile yer değiştirmesi sağlanabilmektedir. Bu uygulamada, soy gaz olarak nitrojen, argon ve helyum gibi gazların kullanımı yaygındır. Uygulamanın etkin olabilmesi için soy gaz eklenmesi sırasında uzun süre karıştırmak gerekmektedir.

İndirgeyici eklenmesi: Oksijen uzaklaştırılmasında kullanılan bir diğer yöntem ise, çözeltiye indirgeyici eklenmesidir. Ancak bu uygulamada kullanılan indirgeyicinin sadece oksijeni degaze etme amacıyla kullanılmasına rağmen çözelti içerisindeki diğer kimyasallarla reaksiyona girebilmesi mümkündür. Elektrokimyasal uygulamalarda amonyum sülfid sıklıkla kullanılan indirgeyicidir.

Yapılan literatür ve patent araştırmalarında, degaze yöntemlerinde kimyasal uygulamaların sıkça kullanıldığı görülmüştür. Özellikle kimyasal tepkimelerin çözelti içerisinde bulunan gaz miktarını oldukça azalttığı görülmüştür. UNILEVER firmasının WO 9423852 numaralı patent başvurusunda bu yöntemler ayrıntılı olarak tariflenmiştir.

Yöntem 1: 0,25 g/l Na-dodecyl Benzene Sulphonate kullanılarak gaz miktarı 0,48 mmol/l değerine kadar düşürülebilir.

Yöntem 2: 8 t l musluk suyuna pH (9.5) iken 1,75 g/l Na-dodecyl Benzene Sulphonate + 3,5 g/l STP eklenir ve arada hafifçe karıştırılabilir.

Yöntem 3: Citric acid (3g/l konst.) ve Na-dodecyl Benzene Sulphonate(1g/l konst.) suda çözülür. Ultrasonik enerji uygulanırken Na-Bicarbonate (3.6 g/l konst.) eklenir. 3-5dk boyunca suda küçük karbondioksit baloncukları belirir. pH 5.5 olsun diye NaOH (1.8g/l konst.) pH 9.5'e eklenir. 0.21 mmol/l'ye kadar gaz oranı düşürülür.

Yöntem 4: Deterjan ve efervesan içerikleri iki ayrı PVA(polyvinylalcohol) keseciklere Çizelge 4.1'deki oranlarda konulur.

Çizelge 4.1:Keselere konulacak kimyasal maddelerin oranı [16].

Kese 1	Kese 2
	42 g granular malzeme:
8g Na-dodecylbenzene	14% sodyum hidroksit,
sulfonate,	6.5% coconut fatty acid,
24g citric acid,	14% zeolite 4A,
29g Na-bicarbonate	2% citric acid
	4% bicarbonate

PVA'nın bir katmanı kese 1 için kullanılır, 4 katmanı kese 2 için ve yıkama başlangıcında eklenir. Havanı %30 'u 5 dakika içinde azalır. çözelti pH'ı 7-12 dakika arasında 6'dan 9'a çıkar.

Yöntem 5: Yöntem 4'te anlatılan karışım ayrı ayrı iki tablet haline getirilebilir ve yıkama başlangıcında eklenir [16].

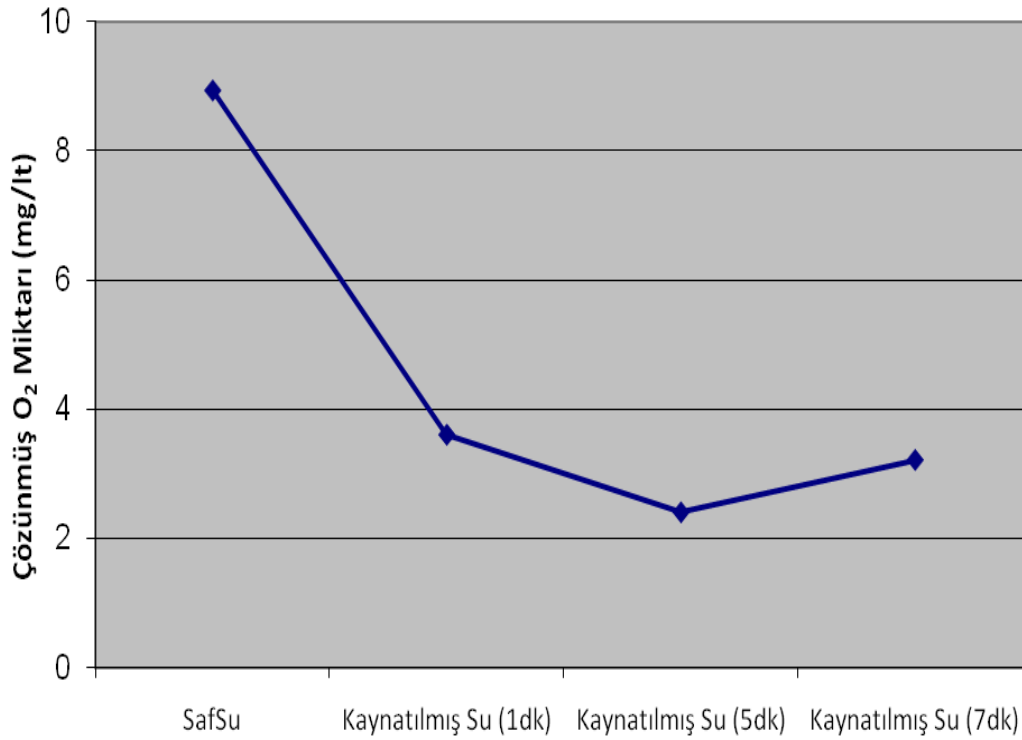
Bu patentte bahsedilen ve yukarıda özetlenen yöntemlerden 3. yöntem denenmiştir. Bunun için farklı su çeşitlerinin (şebeke suyu, saf su ve kaynatılarak degaze edilmiş su) başlangıç ölçümleri alınmıştır işlem sonundaki değerlerle karşılaştırılmıştır.

Yöntemin özelliği kimyasal tepkime sırasında ultrasonik etkiye maruz bırakılmasıdır. Öncelikle sitrik asit ve Na-Dodecyl Benzene birer litre saf suda verilen oranlarda çözülür. Daha sonra ayrıca bir litre suda çözülmüş sodyumbikarbonat, çözeltiye ultrasonik etki uygulanırken yavaş yavaş eklenir. Bu sırada yüksek miktarda karbondioksit kabarcıkları gözlemlenir. Tepkime sonunda ölçüm alınarak oksijen miktarının düşmesinden sıvının degaze edildiği belirlenir. Ayrıca farklı sıvı tipleri için yöntem denenerek etki karşılaştırılması yapılır.

Ultrasonik etki sırasında degaze işlemi bitmeden sıvının pH ve iletkenlik değerleri devamlılığı bozmamak için alınmamıştır. Süreç sonunda tüm ölçümler alınmıştır.

Alınan ölçümler ve işlem basamakları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Kimyasal yöntemle sıvı içerisinde çözünmüş oksijen miktarının 9 mg/lt seviyesinden yaklaşık 5 mg/lt değerine düşürülebildiği görülmüştür.

Kimyasal yöntemlerin degaze etkisinin belirlenmesinin ardından ısıtma uygulamasının etkinliği araştırılmıştır. Bu amaçla, oda sıcaklığındaki saf su ve sırasıyla 1 dakika, 5 dakika ve 7 dakika boyunca kaynatılmış ve oda sıcaklığına getirilmiş saf suların içerisindeki çözünmüş oksijen miktarı takip edilmiştir.



Şekil 4.2: Saf su ve farklı sürelerde kaynatılmış suyun içerdiği gaz miktarı

Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, kimyasal uygulama ile ısıtma yöntemi kullanımı durumunda benzer seviyelerde çözünmüş oksijen miktarlarına ulaşılması mümkün olmaktadır. Bu nedenle proje kapsamında yapılan çalışmalarda, uygulaması kolay olan ısıtma yöntemi tercih edilmiş ve 5 dakika kaynatılmış saf su ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2: Kimyasal yöntem kullanarak sıvının degaze edilme oranları ve işlem adımları.

SIVI	PARAMETRELER	BAŞLANGIÇ	Citric acid+Na-Dodecyl		ÖLÇÜMLER				
					3dk	5dk	10dk	15dk	20dk
SAF SU	O ₂ (mg/lt)	9,63	9,58	Ultrasonik	3,8	4,44	4,28	4,54	4,77
	İletkenlik(μS)	73,5	1756						4,9
	pH	6,46	2,37						3,6
	Sıcaklık (°C)	19,8	19,8						5,87
KAYNAMIŞ SU	O ₂ (mg/lt)	3,14	5,13						20,9
	İletkenlik(μS)	97,4	1677		3,26	3,56	3,87	4,25	4,54
	pH	9,41	2,38						4,92
	Sıcaklık (°C)	19,9	19,9						3,63
ŞEBEKE SUYU	O ₂ (mg/lt)	10,13	9,92						5,9
	İletkenlik(μS)	240	1781		3,71	4,08	4,25	4,35	4,44
	pH	6,7	2,41						4,84
	Sıcaklık (°C)	19	19,4						3,72
									5,77
									20,8

5. ALÜMİNYUM FOLYO TESTİ

Proje kapsamında, ultra/megasonik uygulamaların etkinliğinin belirlenebilmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, önceki bölümlerde bahsedildiği gibi kurulan ölçüm düzeneği ile test prosedürü doğrultusunda ve degaze edilmiş su kullanılarak yıkama tankı içerisindeki kavitasyon aktivitesi iki farklı yöntemle incelenmiştir.

Alüminyum folyo testi ile kavitasyon aktivitesinin belirlenmesi çalışmaları bu bölümde, enerjimetre ile yapılan ölçüm çalışmaları bir sonraki bölümde detaylı olarak aktarılmıştır.

Literatür araştırmalarında karşılaşılan en pratik kavitasyon aktivitesini belirleme yöntemi, alüminyum folyo aşınmasının takibidir. Folyo kesitlerinin sıvı içerisine daldırılıp bir süre akustik kavitasyona maruz bırakılarak deney sonunda alüminyum folyo üzerinde kabarcıkların patlama şiddetine bağlı olarak gözle görülebilecek tahribatın oluştuğu belirtilmiştir. Bu deliklerin konumu ve sıklığının kavitasyon enerjisi hakkında bilgi vermesi, örneğin; düşük frekansın oluşturduğu akustik alanda patlamaların daha şiddetli olacağından daha geniş deliklerin gözlenmesi beklenmiştir.

Bu yöntemi uygulamak için sisteme değişik frekanslarda transduserler sırasıyla takılıp aynı ebatlardaki alüminyum folyo örnekleri suya daldırılarak aşınma testi başlatılmıştır. Burada en önemli noktanın aşınmanın folyonun en zayıf noktasından ya da daha önce hasar almış noktasından başlayacağı düşünülüp, olabildiğince tahrip olmamış, düzgün bir folyo tercih edilmiştir.

İlk olarak rezonans frekansı 28 kHz olan ultrasonik transduserin bağlandığı sistemde, yıkama tankı içindeki yıkama sıvısına alüminyum folyo daldırılmış ve akustik alan etkisinin süreyle değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.1'de sırasıyla 20, 40 ve 60 saniye boyunca ultrasonik etki altında suda bekletilen folyo örneklerinin aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak görülmektedir.



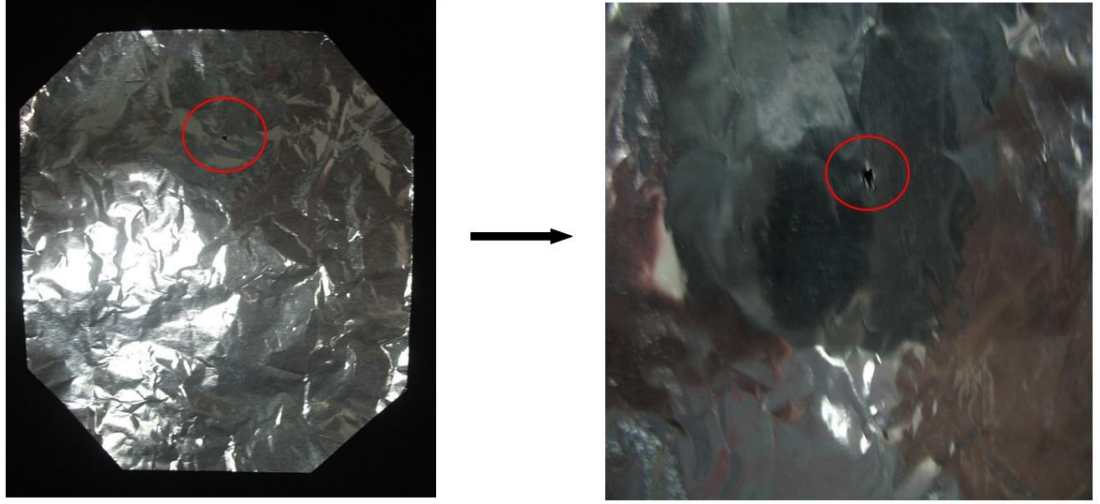
Şekil 5.1: 110W-28kHz transduserin oluşturduğu kavitasyon altında sırasıyla 20, 40 ve 60 sn. boyunca bekletilen alüminyum folyo örnekleri

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi transdusere oldukça yakında tutulan alüminyum folyo örnekleri 20, 40 ve 60 saniye boyunca sıvı içerisinde ultrasonik etkiye maruz bırakıldığında en belirgin aşınmanın folyo örneğinin transdusere en yakın nokta olan orta noktasında oluştuğu ve uzak noktalarda halka şeklinde dizildiği görülmüştür.

Düşük frekanslı transduser için yapılan folyo testi, 95 W - 47 kHz transduser için deney tekrarlanarak 4 adet örnek değişik zaman aralıklarında bekletilip yüzeylerindeki aşınma miktarı gözlenmiştir. Bu koşulda frekansın yükselmesiyle kavitasyon enerjisinin düşmesi beklenmiş ve kabarcık sayısının da yine frekans artışına bağlı olarak artacağı düşünülmüştür. Şekil 5.2'deki test örnekleri 20, 40, 60 ve 180 saniye su içerisinde ultrasonik etki altında bekletildikten sonra karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 5.2: 95W-47 kHz transduserin oluşturduğu kavitasyon altında sırasıyla 20, 40, 60 ve 180 sn. boyunca bekletilen alüminyum folyo örnekleri



Şekil 5.3: 70W-132 kHz transduserin oluşturduğu kavitasyon altında 15 dakika boyunca bekletilen alüminyum folyo örneği

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, diğer transduser testlerinden daha uzun süre akustik alan içerisinde kalmasına rağmen folyo örneğinde oldukça küçük bir delik gözlenmiştir. Bu sonuç yüksek frekanstaki kabarcık patlama şiddetinin folyoyu aşındırmaya yetmediği şeklinde yorumlanmıştır.

Farklı frekanslardaki ultrasonik alan içerisinde 60 saniye süresince bekletilen alüminyum folyo örneklerinin karşılaştırması Şekil 5.4'te sunulmuştur.



28 kHz

47 kHz

132 kHz

Şekil 5.4: Farklı frekansların oluşturduğu kavitasyon altındaki alüminyum folyo örneklerindeki aşınmanın karşılaştırılması

Düşük frekansta kabarcıkların boyutu büyük olduğu için folyo üzerinde kavitasyon etkisi altında meydana gelen delikler daha geniş çaplıdır. Frekansın artmasıyla kabarcık sayısının da arttığı, 47 kHz frekanslı transduser örneğinde de görülen daha sık ama daha küçük boyutlu deliklerden de açıkça anlaşılmaktadır. Frekans etkisini daha net belirlemek için rezonans frekansı 132 kHz olan transduserin oluşturduğu kavitasyon incelendiğinde folyo yüzeyinde aşınma oluşturacak kadar yüksek kavitasyonun meydana gelmediği görülmüştür.

Çalışmalarda, alüminyum folyo üzerindeki aşınmaların takip edildiği transduserlere ait rezonans frekans değerleri ve elektriksel giriş güçleri sırasıyla 28, 47 ve 132 kHz ve 110, 95 ve 70 W'dır. Yapılan çalışmalarda, elektriksel giriş güçlerinin farklı olmasına rağmen transdusere iletilen güçler aynı mertebede kalmıştır. Bunun da sebebi geri yansılardan kaynaklı olarak giriş gücünün tamamının transdusere iletilememesi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle alüminyum folyo üzerindeki aşınmaların, aynı mertebelerde ultrasonik güç için frekans değerine bağlı olarak yıkama ortamında oluşan kavitasyon aktivitesi kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Düşük rezonans frekanslarında kavitasyon aktivitesinin yüksek frekanslara oranla çok daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

6. ENERJİMETRE ÇALIŞMALARI

Transduserler kullanılarak oluşturulan kavitasyon aktivitesinin belirlenebilmesi için alüminyum folyo aşınmasının takip edilmesinden farklı olarak bu çalışmada kullanılan bir diğer yöntem de enerjimetre kullanımıdır. PPB Megasonics firmasından temin edilen enerjimetre hem ultrasonik hem de megasonik frekans aralıklarında kavitasyon enerjisi ölçümleri için kullanılmaktadır. Bu ölçümlerde kullanmak için iki adet probu bulunan cihaz, 0- 5 MHz frekans aralığında ölçüm almaktadır. Özellikle temizleme tanklarının enerji seviyesi ölçümlerinde kullanılan bu cihazın en önemli özelliği hem kavitasyon aktivitesini hem de frekansı ölçebilmesidir. Böylece tank performansı ölçümü ve enerji değişimlerinin haritalanması mümkün olmaktadır.



Şekil 6.1: Kavitasyon enerji ölçümünde kullanılan ultra/megasonik enerjimetre.

Ultrasonik ölçüm probu ile megasonik ölçüm probu arasındaki en belirgin fark sırasıyla; EPDM ve Quartz malzemeden yapılmış olmalarıdır. Bunun yanında Quartz ve EPDM problemlerin ölçüm alınan kesit alanları 1/5 oranındadır.

Bölüm 2.1' de sistem elemanlarında bahsedilen enerjimetre ve ultrasonik transduserler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak cihazın çalışma prensibini ve transduserlerin tepkisini incelemek amacıyla Şekil 15'te görülen küçük hacimli bir yıkama tankı içerisinde kavitasyon enerjisi ölçülmüştür.



Şekil 6.2: Transduser tepkilerini ölçmek için kullanılan yıkama tankı.

Çalışmanın ilk aşamasında temizleme amaçlı temas tipi transduserlerin testleri yapılmış ve üretici tarafından belirtilen rezonans frekansı ve giriş gücünde verimli çalışma kontrolünden geçirilmiştir. Test edilen transduser belirtilen frekans ve güç değerlerinde çalıştırılarak çalışma süresince *forward power* (sürülen güç), *reverse power* (yansıyan güç) ve *load power* (yüklenen güç) değerleri jeneratör üzerindeki gösterge panelinden takip edilmiştir. Transduserin en yüksek tepki vermesi için yansıyan güç değerinin en az olması gerektiğinden, frekans ve güç değerleri değiştirilerek daha verimli çalışacağı değerler belirlenmiştir.

Ayrıca temas tipi transduserler için, yüklenen güç, sürülen güce oranlanarak *load power* yüzdesi hesaplanmıştır. Tablo 3 ve 4'te sırasıyla Beijing Cheng-Cheng Weiye Ultrasonic S&T Co., Ltd ve Hainertec (Suzhou) Co., Ltd firmalarından temin edilen transduserlere ait ölçüm değerleri ve hesaplanan *load power* yüzde değerleri verilmiştir.

Şekil 6.3'te 4, 5, 9 ve 14 numaralı, Şekil 6.4'te 1 ve 4 numaralı transduserler ile proje devamındaki testler yapılmıştır.

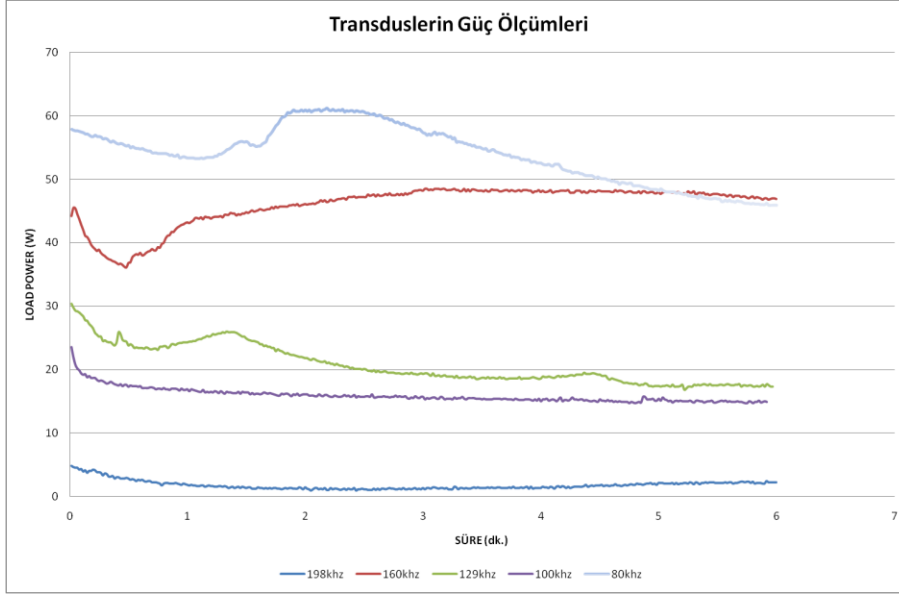
Ayrıca Şekil 6.4'te listelenmiş Hainertec firmasından temin edilen temas tipi transduserler için yüklenen güç değerlerinin Şekil 6.5'te gösterildiği gibi çok büyük farklılıklar göstermediği ve daha kararlı bir yapısının olduğu görülmüştür. Aynı grafik incelendiğinde 80 kHz ve 160 kHz transduserlere yüklenen güç değerleri daha yüksek olduğu için proje kapsamında devam eden çalışmalarda bu transduserler kullanılmıştır.

NO	Üzerinde yazan değer	1.ÖLÇÜM					2.ÖLÇÜM				
		Yeni değer	Forward Power	Reverse Power	Load Power	Load Power Yüzdesi	Yeni değer	Forward Power	Reverse Power	Load Power	Load Power Yüzdesi
1	120W/68K	110W/71K	108	85	24	22,2%	110W/71K	103	86	19	18,4%
2	100W/30K	100W/40K	98	72	25	25,5%	95W/40K	94	65	30	31,9%
3	60W/40K	60W/43K	55	50	4,7	8,5%	80W/43K	77	70	7,7	10,0%
4	50W/135K	70W/133K	68	35	33	48,5%	70W/132K	78	31	55	70,5%
5	100W/20K	100W/47K	97	35	62	63,9%	95W/47K	95	30	66	69,5%
6	100W/20K	100W/47K	106	56	49	46,2%	110W/47K	105	63	42	40,0%
7	120W/68K	80W/85K	79	78	10	12,7%	80W/84K	78	56	23	29,5%
8	60W/40K	100W/47K	97	91	6,5	6,7%	100W/47K	96	92	3,9	4,1%
9	60W/120K	60W/80K	56	35	33	58,9%	70W/80K	68	23	46	67,6%
10	50W/135K	50W/87K	57	36	21,5	37,7%	70W/87K	68	45	23	33,8%
11	60W/80K	70W/85K	67	49	17	25,4%	70W/82K	67	24	43	64,2%
12	100W/30K	90W/40K	91	80	12	13,2%	100W/40K	97	89	10,5	10,8%
13	120W/28K	100W/28K	96	45	51	53,1%	110W/28K	106	53	54	50,9%
14	120W/28K	100W/28K	97	44	53	54,6%	110W/28K	104	50	54	51,9%
15	üzerinde deger yazılı degil	90W/110K	97	95	2,5	2,6%	110W/41K	108	70	37	34,3%
16	üzerinde deger yazılı degil	75W/92K	73	60	13,5	18,5%	100W/92K	98	84	13,5	13,8%
17	üzerinde deger yazılı degil	100W/75K	102	34	67	65,7%	110W/75K	107	30	76	71,0%
18	60W/120K	60W/70K	54	41	13,5	25,0%	90W/70K	90	76	14	15,6%

Şekil 6.3: Cheng-Cheng Weiye Ultrasonic S&T firmasına ait transduserlere ait güç ve frekans ölçümleri.

NO	Güç/Frekans değerleri	Forward Power	Reverse Power	Load Power	Load Power
1	60W/80K	96	42	54	56,3%
2	60W/100K	59	43	16	27,1%
3	60W/129K	54	34	20	37,0%
4	60W/160K	53	7	36	67,9%
5	20W/198K	7	6	1	14,3%

Şekil 6.4: Hainertec firmasına ait transduserlere ait güç ve frekans ölçümleri.



Şekil 6.5: Transduserlerin güç ölçümleri

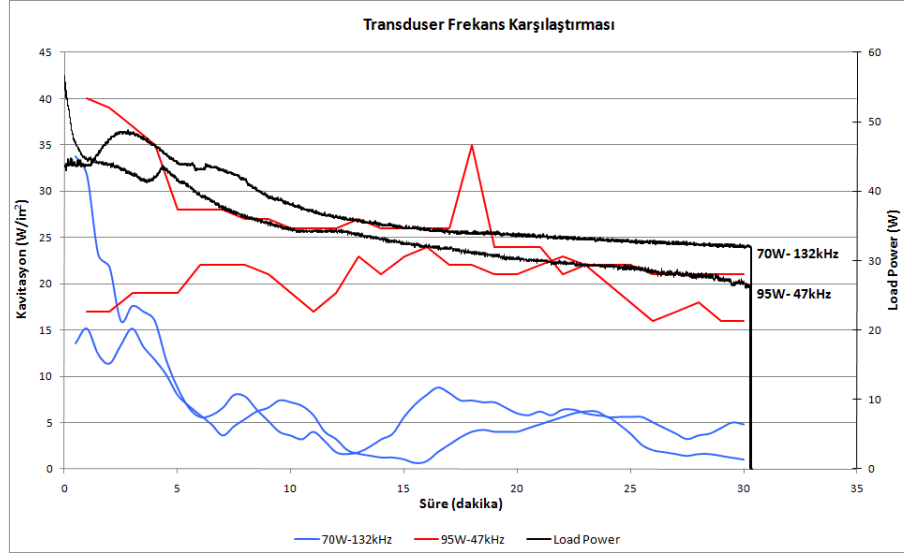
6.1. Frekans Etkisi

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi düşük frekansta daha büyük boyutlu kabarcıklar oluşmakta bu nedenle patlama şiddeti daha yüksek olmaktadır. Tam tersi şekilde yüksek frekansta kabarcık, ses dalgasının *expansion* yarı çevriminde daha kısa süre kalmaktadır. Bu aşamada yeterli büyüklüğe gelmeden *compression* yarı çevrimine geçmekte ve henüz boyutu çok küçükken patlamaktadır. Bunun bir sonucu olarak fazla enerji veremediği literatür çalışmalarından bilinmektedir.

Frekansın kavitasyon aktivitesine etkisini incelemek için iki farklı frekanstaki transduser yarım saat boyunca çalıştırılmış ve ölçüm noktası değiştirilmeden bu süre boyunca her 30 saniyede bir kavitasyon enerji miktarı kaydedilmiştir. İkişer tekrar yapılan deneyler sonunda kavitasyon enerji seviyesinin aynı transduser için farklılık göstermediği belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 6.6'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 6.6'te görüldüğü gibi düşük frekanslı 47 kHz transduserin birim alan başına ürettiği kavitasyon enerjisi, 132 kHz frekanstaki transduserin üretebildiğinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Load power değerleri incelendiğinde 95 W - 47 kHz transdusere yüklenebilen gücün daha düşük mertebelerde kalmasına rağmen, oluşan kavitasyonun daha şiddetli olması, düşük frekansın etkisini açıkça göstermiştir.



Şekil 6.6: 47 kHz ve 132 kHz frekanstaki transduserlerin karşılaştırılması.

6.2. Sıvı Ortam Etkisi

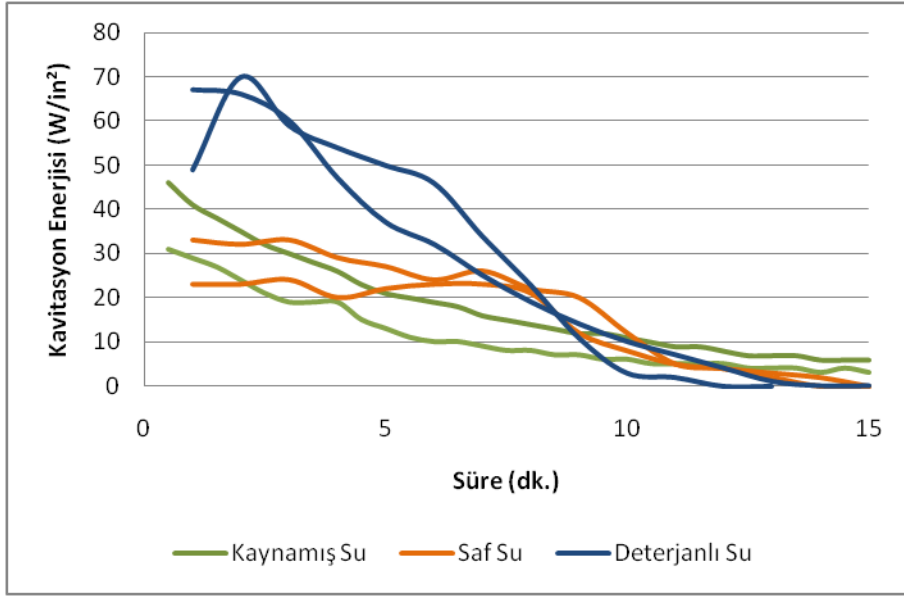
Kavitasyon enerjisini etkileyen en önemli faktörlerden birisinin de sıvı ortamın özellikleri olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada tek tip transduser farklı sıvı ortamlarında çalıştırılarak kavitasyon oluşumu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sıvı ortam olarak; saf su, degaze etkisi için 5 dakika boyunca kaynatılmış ve oda sıcaklığına getirilmiş su ve deterjan etkisi için de 10 g/l konsantrasyon değerinde IEC-A* deterjan çözeltisi kullanılmıştır.

110 W- 28 kHz, 95 W-47 kHz ve 70 W - 132 kHz değerlerindeki transduserler ile yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda paylaşılmıştır. Bu çalışmaların tamamı iki tekrarlı olarak yapılmış ve ölçümler anlık olarak kaydedilmiştir.

110 W-28 kHz: Şekil 6.7'de gösterilen kaynatılmış su, saf su ve deterjanlı su ölçümlerinin sonuçları incelendiğinde, kavitasyonun başlangıç değerinden zamanla uzaklaştığı ve sıvı ortam cinsinden bağımsız olarak sifra yaklaştığı görülmektedir.

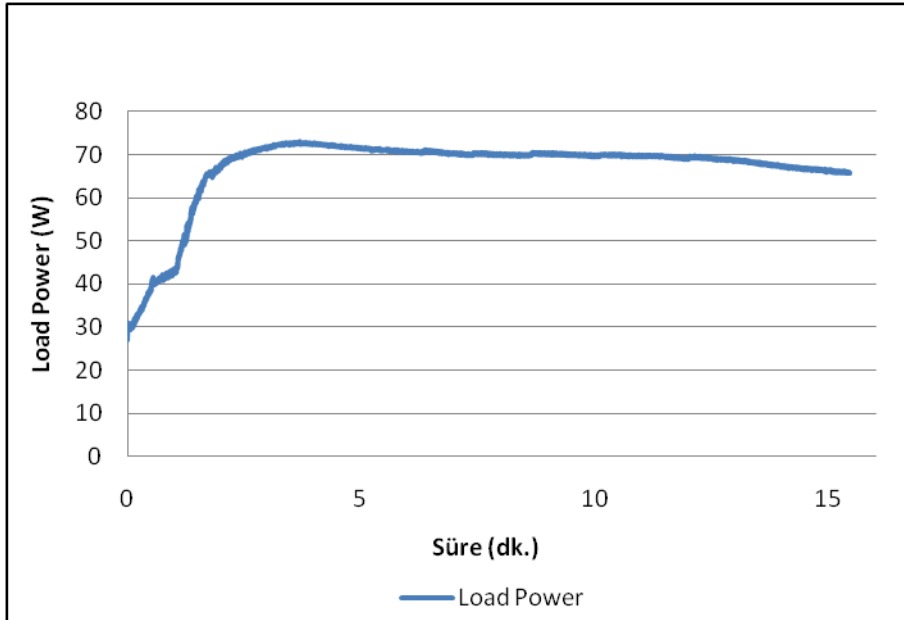
İlk 3 dakika içerisinde deterjanlı su ve saf su ortamları için birim alandaki kavitasyon enerjisi yüksek seviyelerdeyken, 15 dakika sonunda ölçülemeyecek kadar düşmüştür.

Kaynatılarak degaze edilmiş su için ise 15 dakika sonunda az da olsa kavitasyonun hala devam ettiği ve deney boyunca daha kararlı bir değişim sergilediği görülmektedir.



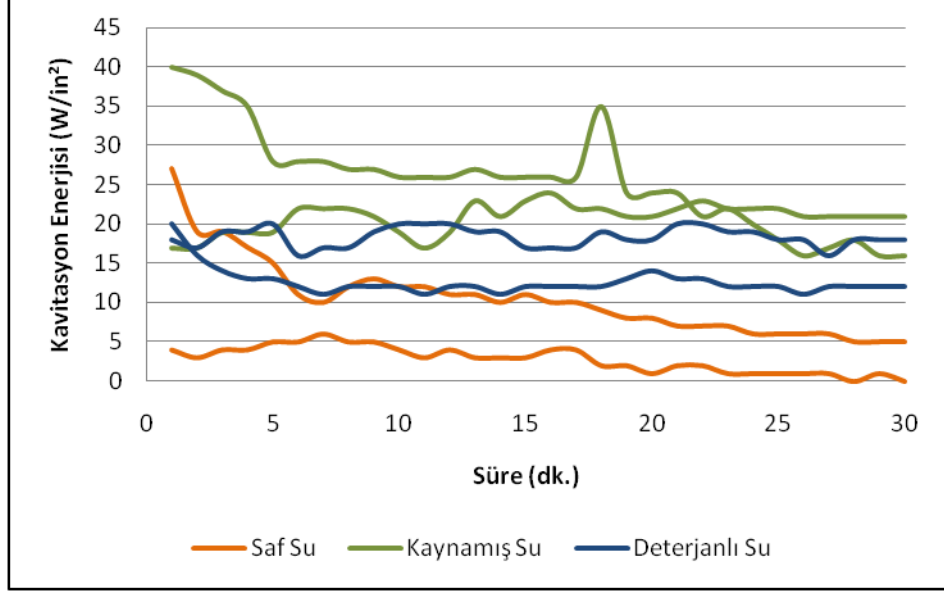
Şekil 6.7: 28 kHz-100W Ortama bağlı kavitasyon enerjisi eğrileri.

Çalışma boyunca kullanılan 28 kHz-100W transdusere ait *load power* değişim grafiği ise Şekil 6.8'de sunulmuştur. Farklı sıvı ortam testleri için yüklenen güç grafiğinin benzer olduğu ve jeneratörün ısınmasına bağlı olarak ilk 5 dakika içinde artarak sabit devam ettiği görülmüştür.



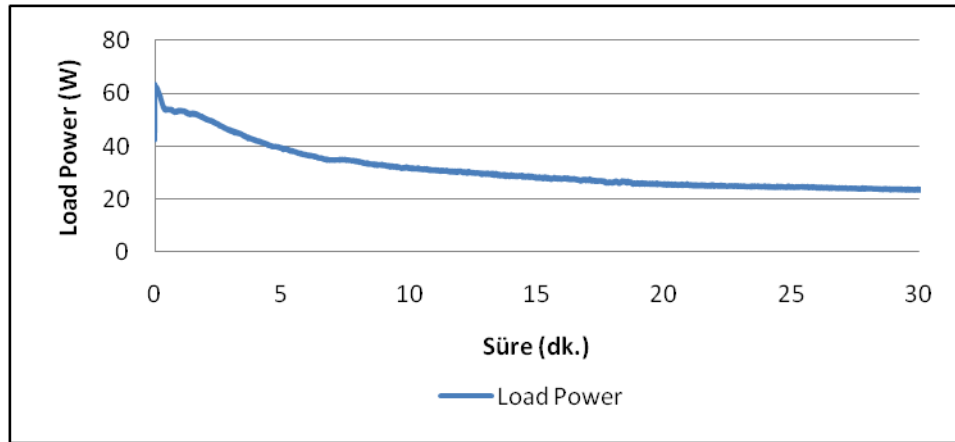
Şekil 6.8: 28 kHz-100W Transduserin load power değişimi.

95W - 47 kHz: Bu transduser için birim alandaki kavitasyon enerjisi ölçüldüğünde, üç farklı sıvı ortamında değişik enerji seviyeleri olduğu görülmüştür. Kaynatılmış, yani degaze edilmiş suda, gaz içeriği daha az olan kabarcıklar olduğu için patlamaların daha şiddetli olduğu ve birim alandaki enerji yayılımının daha fazla olacağı literatür araştırmalardan da bilinmektedir.



Şekil 6.9: 47 kHz-95 W ortama bağlı kavitasyon enerjisi.

Şekil 6.9 incelendiğinde her üç sıvı ortam için, başlangıç değerlerine göre kavitasyon enerjisinde bir miktar düşüş yaşandığı ve saf sudaki enerji azalması daha fazla gerçekleşirken, deterjanlı suda birim alandaki kavitasyon enerjisinin oldukça sabit kaldığı görülmüştür. Degaze edilmiş sudaki kavitasyon enerji seviyesi diğer sıvı ortamlara göre daha yüksek ölçülmüştür.

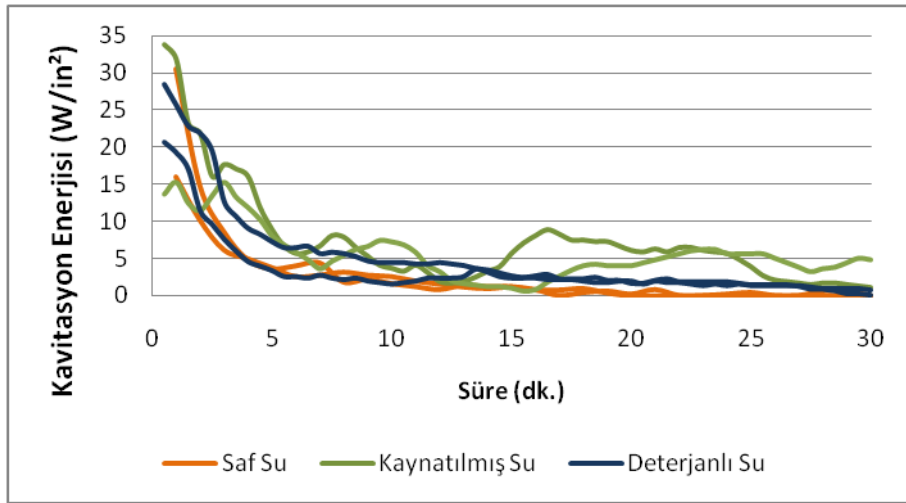


Şekil 6.10: 47 kHz-95W Transduserin load power değişimi.

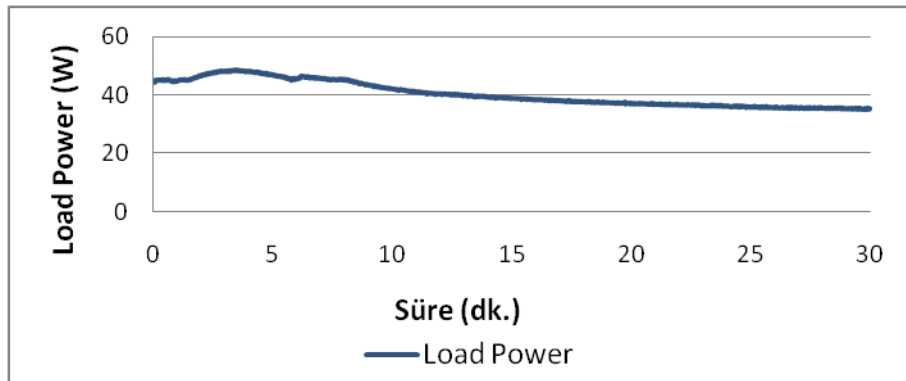
Şekil 6.10'da rezonans frekansı 47 kHz olan bu transdusere 95 W güç verildiğinde bu gücün neredeyse 1/3 'ünün, ortalama 30W civarında, iletildiği ve güç eğrisi üzerinde ani değişimlerin olmadığı görülmüştür.

70W - 132 kHz: Farklı sıvı ortamları için yüksek frekansta çalışmalar tekrarlandığında, ilk 5 dakika içerisinde her üç sıvı ortam tipi için ani düşüşlerin yaşandığı Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Ancak kaynatılmış su ortamında, deney sonuna kadar enerji seviyesi korunurken saf su ve deterjanlı su ortamında oluşan kavitasyon enerjisi 30 dakika sonunda sıfır olmuştur. Deney sonunda saf sudaki enerji seviyesinin yine en düşük olduğu ve kaynamış suyun degaze edilmiş özelliğinden dolayı daha fazla kavitasyon enerjisi oluşturduğu görülmüştür.

132 kHz -70 W özelliklerindeki bu transdusere yüklenen güç değişimi Şekil 6.10'da gösterilmiştir. İlk 10 dakika içerisinde yüklenen gücün artış göstermesine rağmen transduserin ısınmasına bağlı olarak azalma eğiliminde olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 6.12'de deney sonuna doğru transdusere verilen 70 W giriş gücü ile karşılaştırıldığında bu gücün neredeyse yarısının transdusere aktarıldığı görülmüştür.



Şekil 6.11:70W-132 kHz Ortama bağlı kavitasyon enerjisi.



Şekil 6.12: 70W-132 kHz Transduserin güç değişimi.

Sıvı ortamın etkilerini incelemek için yapılan bu çalışma sonucunda kaynatılmış sudaki kavitasyon enerjisinin deterjanlı ve saf suya göre daha yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Seçilen farklı frekans ve güç değerlerindeki transduserler için güç ölçüm çalışmalarına kaynamış su kullanılarak devam edilmiş ve en son karşılaştırma kaynamış sudaki enerji değerleri baz alınarak hazırlanmıştır.

60 W - 80 kHz, 60 W - 129 kHz ve 60 W - 160 kHz' teki transduserler için degaze edilmiş su içerisindeki kavitasyon enerjisi ölçülmüş ve takip edilen *load power* değeri ile birlikte Ek-1' de gösterilmiştir.

6.3. Transduser Tipinin Etkisi

Proje içerisinde transduser çeşitlerinin incelenmesi çalışmalarında her bir transduser tipi için aynı noktadan uzun süreli ölçüm almak yerine, ölçüm noktaları değiştirilerek bir haritalama çalışması yapılmıştır. Böylece kavitasyon enerjisinin en yoğun olduğu noktalar ve derinliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalarda temas, daldırma ve HIFU transduserler denenmiştir. Yapılan literatür araştırmalarında ses dalgasının, dalga boyunun yarısında ve bunun tek katlarında kavitasyonun daha etkin olduğu bilinmektedir ve bu nedenle *mapping* çalışması yapılırken su yüksekliğine özellikle dikkat edilmiştir.

Dalga boyu; sesin sudaki yayılma hızının frekans değerine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Ses dalgasının genliği, dalgaboyu ve frekans ilişkisi Şekil 6.13 üzerinde gösterilmiştir.

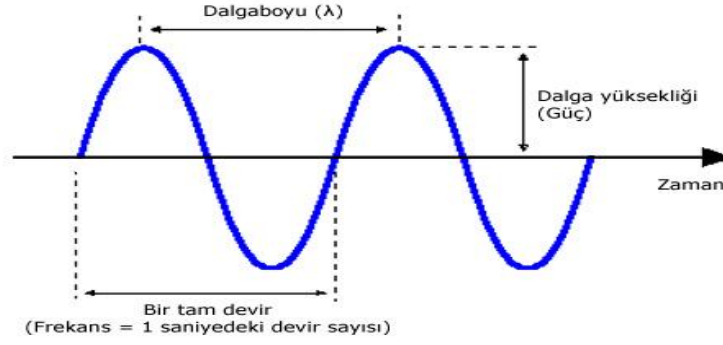
—

(Denklem 6.1)

f: Frekans (Hz)

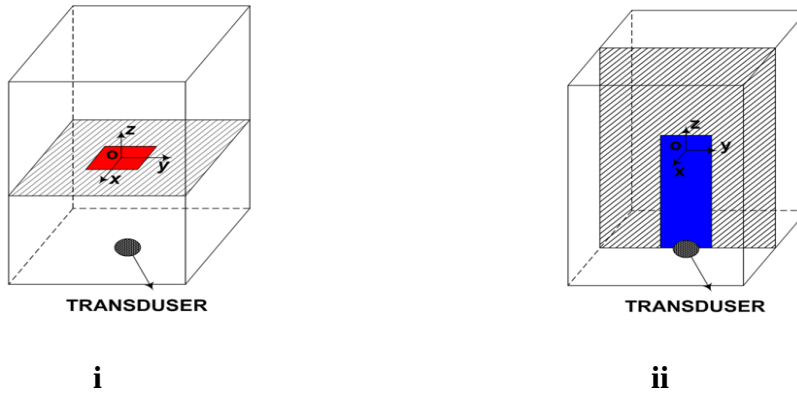
c: Sesin sudaki hızı (1500 m/s)

Transduser tipinin, frekansının ve gücünün etkisini, bunun yanı sıra sıvı ortama göre kavitasyon enerjisinin değiştiğini göstermek için yapılan haritalama çalışması için ilk olarak 67 kHz rezonans frekansına sahip temas tipi transduser deney düzeneğine yerleştirilmiştir.



Şekil 6.13: Ses dalgasının şematik gösterimi.

Kullanılan transduser temas tipi olduğu için tankın alt yüzeyine dışarıdan yapıştırılmış ve ultrasonik prob tankın orta noktasına getirilerek doğrusal hareket sistemi ayarlanmıştır. Böylece prob x ve y yönünde 10'ar mm aralıklarla hareket ettirilerek 30x30 mm' lik bir alan taranıp alınan bu ölçümlerle aynı şekilde y-z düzlemindeki (düşey düzlem) kavitasyon enerjisindeki değişimler gösterilmiştir.



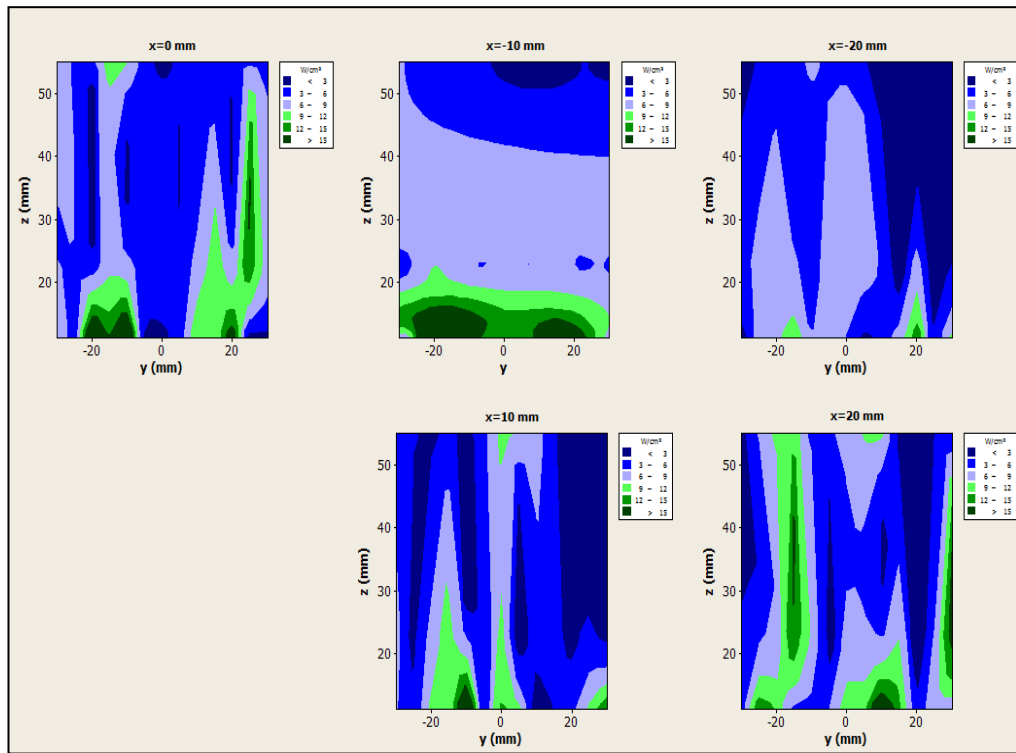
Şekil 6.14: 1) x-y düzlemi haritalama çalışmaları için 2) y-z düzlemi haritalama çalışmaları için kullanılacak düzlemlerin gösterimi.

6.3.1. Temas Tipi Transduserler

100W - 67 kHz: Çalışmanın bu kısmında ilk olarak 67 kHz rezonans frekansındaki transduser sisteme yerleştirilerek hesaplanan dalga boyuna göre üç farklı seviyede, üç farklı sıvı ortam için ölçüm alınmıştır. Şekil 6.15 incelendiğinde yukarıda bahsedildiği gibi transdusera en yakın olan – değerine karşılık gelen mesafede (11.2 mm) en yüksek kavitasyon aktivitesi ölçülmüştür.

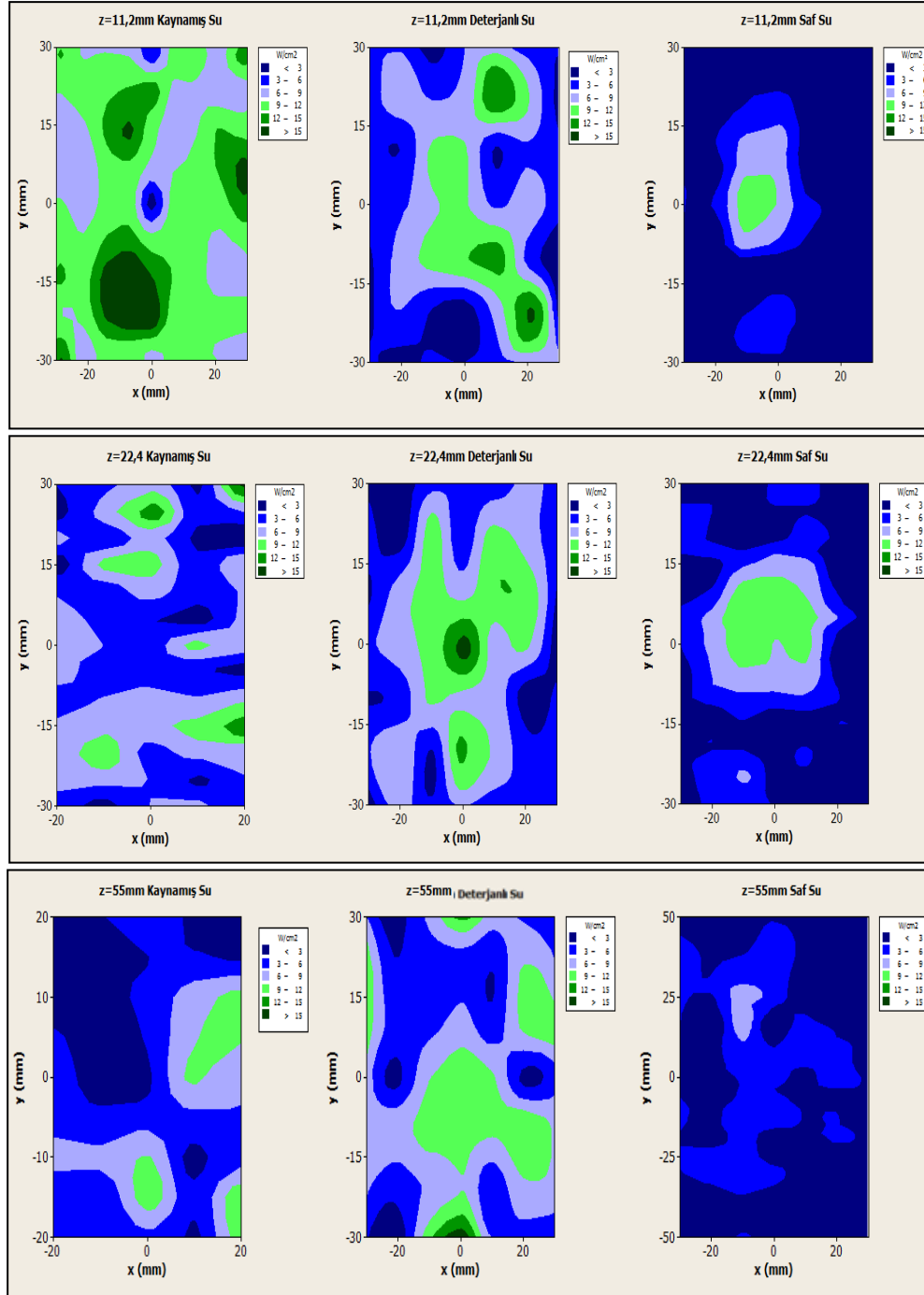
(22.4 mm) mesafesinde kavitasyon enerjisi azalmış ve transduser yüzeyinden uzaklaştıkça (55 mm) kavitasyon etkinliğinin düştüğü belirlenmiştir. Buna ek olarak kaynatılarak degaze edilmiş suda kavitasyon enerjisinin saf su ve deterjan çözeltisine göre daha yüksek seviyede olduğu görülmüştür.

Yıkama tankından alınan ölçümler incelendiğinde, Şekil 6.16'te y-z düzlemindeki (düşey düzlem) enerji ölçümlerinin transduserden uzaklaştıkça oldukça düştüğü ve eşit x-mesafelerinde, transduserin çevresinden kesitler alınarak enerji dağılımı çizildiğinde transdusere en yakın noktada enerji yoğunluğunun en fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6.15: 100W-67 kHz transduserin düşey düzlemde kavitasyon enerji haritası (y-z düzlemi).

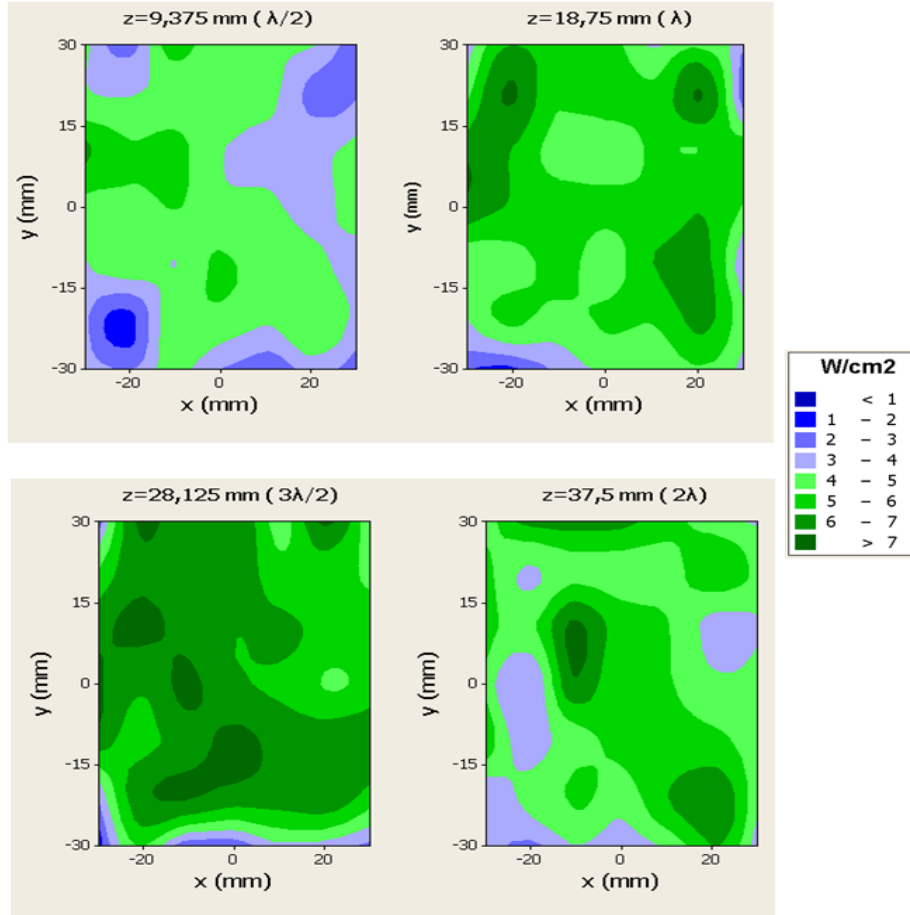
Kaynamış su için verilen sonuçlara ek olarak aynı çalışma saf su ve deterjanlı su ortamlarında tekrarlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmaların sonunda elde edilen şekiller Ek-2'de sunulmuştur.



Şekil 6.16: 100W-67 kHz transduserin farklı seviyelerde ve farklı sıvı ortamlarında kavitasyon enerji haritası (x-y düzlemi).

60W - 80 kHz : Rezonans frekansı 80 kHz olan temas tipi transduser için -, , —, 2 ve her transduser ölçümünde kullanılacak seviyelerde sırasıyla 9.375 mm, 18.74 mm, 28.125 mm, 37.5 mm ve 55 mm derinliklerinde haritalama çalışması yapılmış ve bu seviyeler yıkama tankının tabanı sıfır noktası kabul edilerek ölçülmüştür.

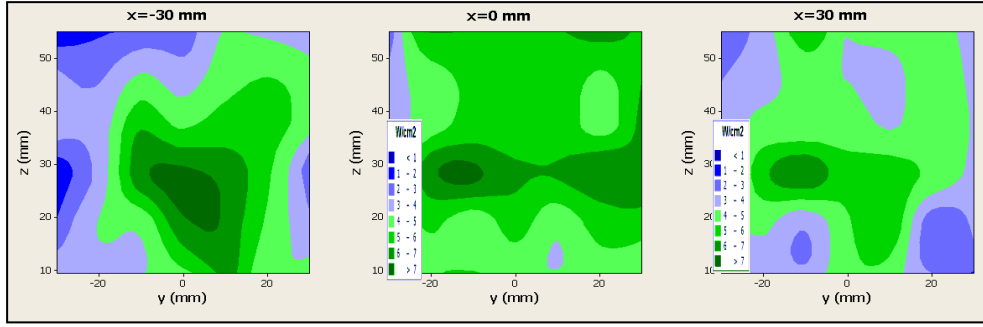
Çalışılan 80 kHz transduser için Şekil 6.17 incelenerek her derinlikte oldukça geniş bir alanda kavitasyon enerjisi olduğu ve dalga boyunun yarısının tek katların seviyesinde yoğunluğun arttığı fark edilmiştir. Üç farklı sıvı ortam için tekrar edilen deneylerde kaynatılmış suda en fazla enerji gözlenirken deterjanlı ve saf su ortamlarında bu frekansta kavitasyon aktivitesinin çok düşük mertebelerde kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 6.17: 60W - 80 kHz transduserin farklı seviyelerde ve farklı sıvı ortamlarında kavitasyon enerji haritası (x-y düzlemi).

Şekil 6.18 incelendiğinde, en yüksek enerjili noktaların birbirini takip etmediği ve değişik bölgelerde olduğu görülmüştür.

Kaynatılmış su ortamındaki ölçüm sonuçları birbirleriyle karşılaştırıldığında —28.125 mm değerinde en fazla kavitasyon enerjisi görülmüştür.

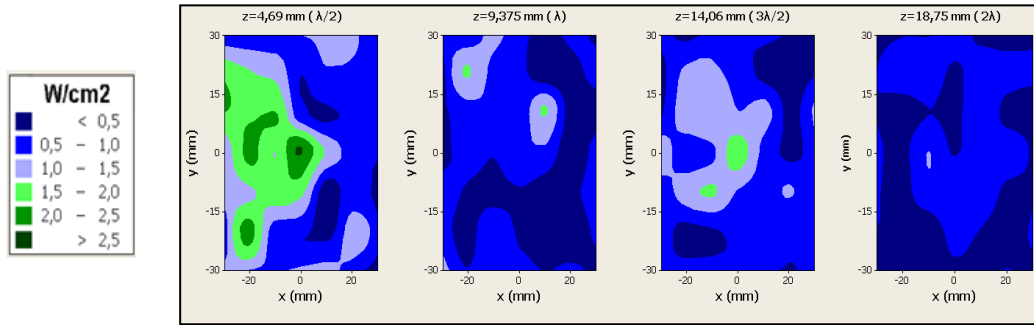


Şekil 6.18: 60W- 80 kHz transduserin düşey düzlemde kavitasyon enerji haritası (y-z düzlemi).

Bu transduser için alınan ölçümler y-z ekseninde, merkezde ve merkeze eşit uzaklıklarda olacak şekilde incelendiğinde kavitasyon enerjisinin yıkama tankının orta seviyelerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir.

Kaynamış su için verilen sonuçlara ek olarak saf su ve deterjanlı su ortamlarında farklı seviyelerdeki ölçümler tekrarlanmış ve sonuçlar Ek-3'te verilmiştir.

60W - 160 kHz : Rezonans frekansı 160 kHz olan transduser tankın tabanına yapıştırılarak haritalama çalışması yapılmış ve Şekil 6.19'da farklı seviye sonuçlarına incelendiğinde – değerinde, transduser yüzeyine en yakın olan alanda kavitasyon enerjisinin yoğun olduğu görülmüştür. Temas tipindeki diğer transduser sonuçlarına benzer şekilde enerji dağılımının düzenli olmadığı belirlenmiştir.



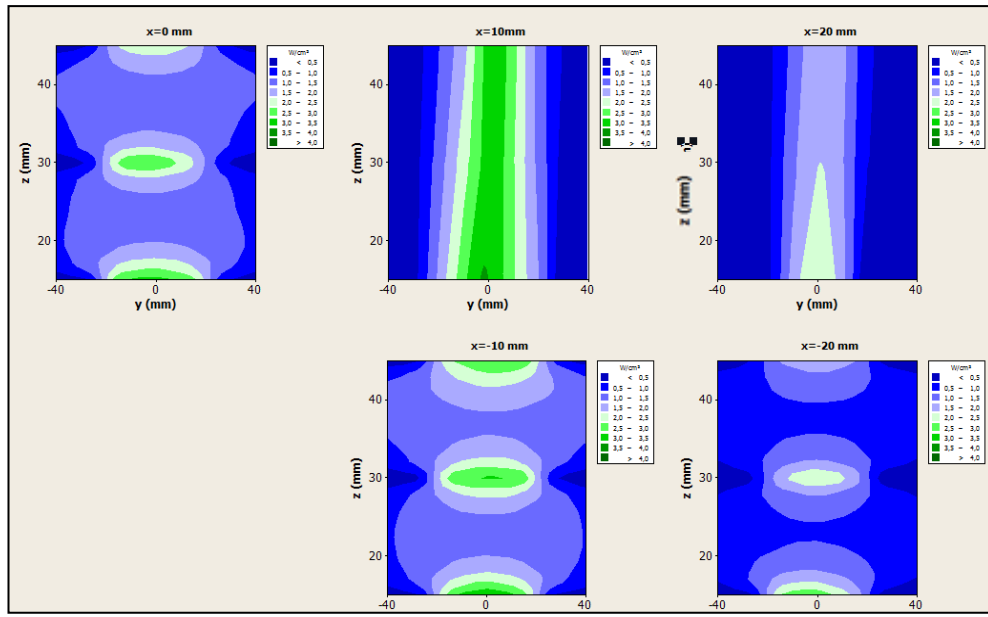
Şekil 6.19: 60W - 160 kHz transduserin farklı derinliklerde kaynatılmış sıvı ortamında kavitasyon enerji haritası (x-y düzlemi).

6.3.2. Daldırma Tipi Transduser

Özel su geçirmez tasarımı ile daldırılarak çalıştırılma özelliği bulunan 1 MHz rezonans frekansa sahip 100 W giriş gücü gerektiren bu transduser ses dalgalarının tankın dış yüzeyinden değil doğrudan suyun içerisine verilmesini sağlar.

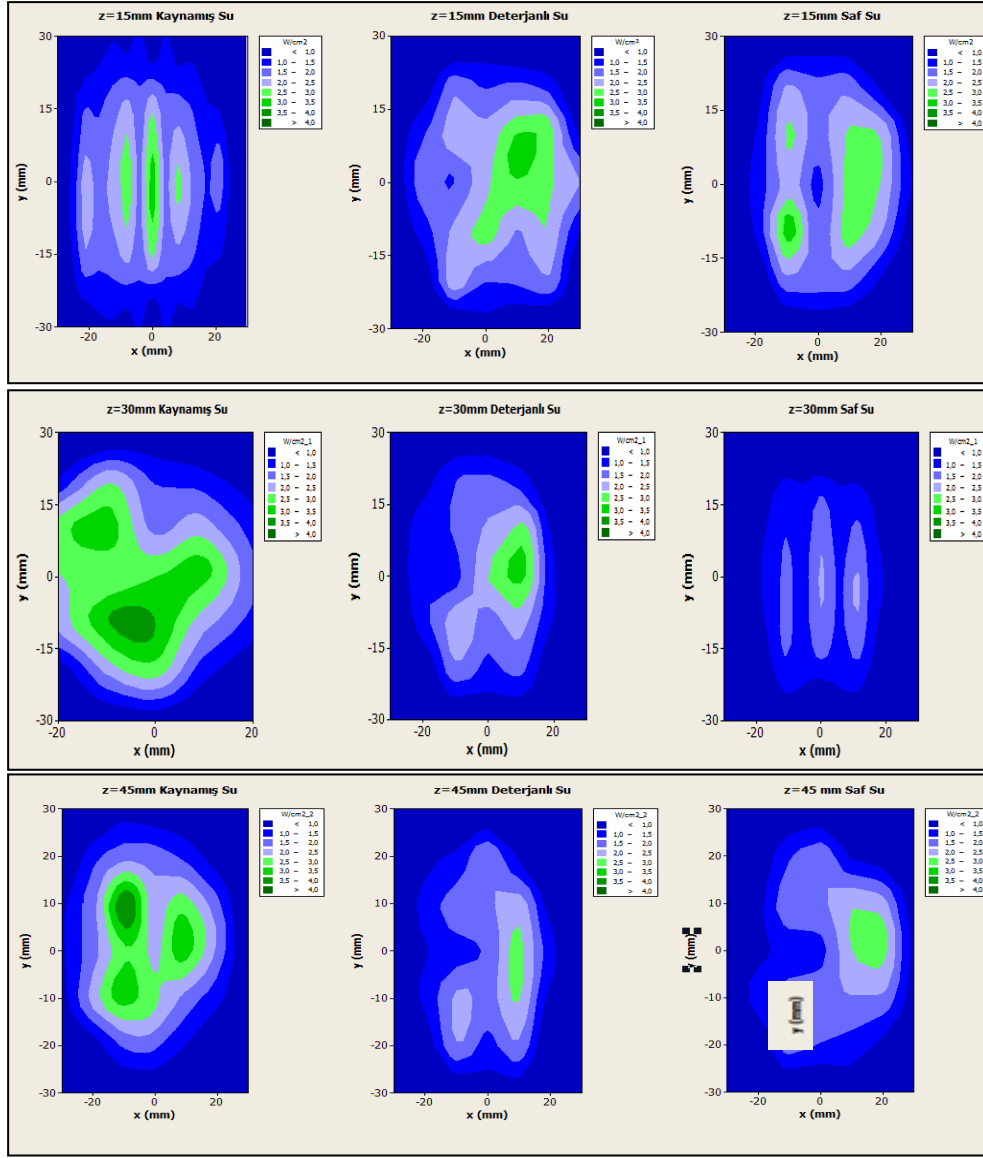
Daldırma tipi transduserin karakteristiğini anlamak için yapılan enerjimetre ölçümlerinde aynı zamanda MHz mertebesindeki yüksek frekansın etkisi gösterilmiştir.

Şekil 6.20'de daldırma tipi transduserin yıkama tankı içerisinde oluşturduğu 1 MHz frekansındaki akustik alanın yarattığı kavitasyon enerjisinin tank tabanından, yüzeye doğru düşey düzlemde değişimi gösterilmiştir. Kavitasyon enerji seviyesinin dikey doğrultuda yüzeye kadar ölçüm alınan derinlikler çerçevesinde neredeyse sabit kaldığı, transduserden yatay düzlemde uzaklaşınca bu enerjinin oldukça azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.20: 100W- 1MHz daldırma tipi transduserin düşey düzlemde enerji haritası.

Transduserin yüzeyinden belirli mesafelerde uzaklaşarak aynı çerçeve içerisinde tarama yapılmış ve en yüksek enerji miktarının $3,5 \text{ W/cm}^2$ civarında olduğu görülmüştür. Daldırma tipindeki transduserin Şekil 6.21'de gösterildiği gibi her seviye için en çok kendi alanı ve yakın çevresinde oluşturduğu kavitasyon enerjisi oluşturduğu belirlenmiştir.

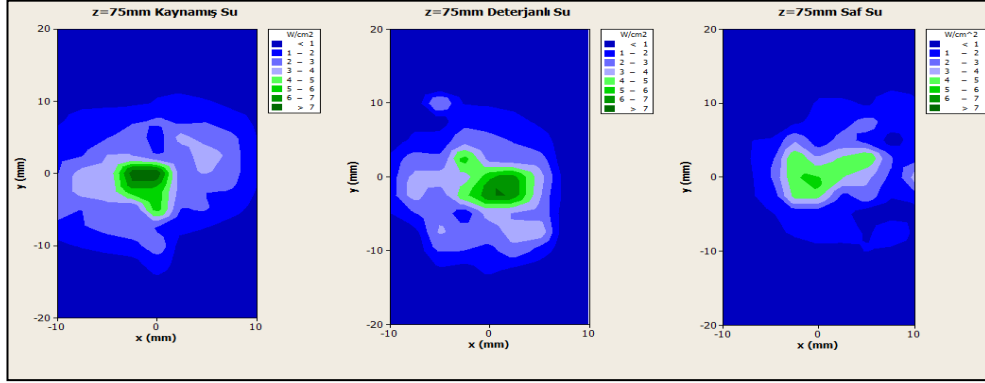


Şekil 6.21:100W- 1 MHz daldırma tipi transduserin farklı derinliklerde ve farklı sıvı ortamlarında kavitasyon enerji haritası.

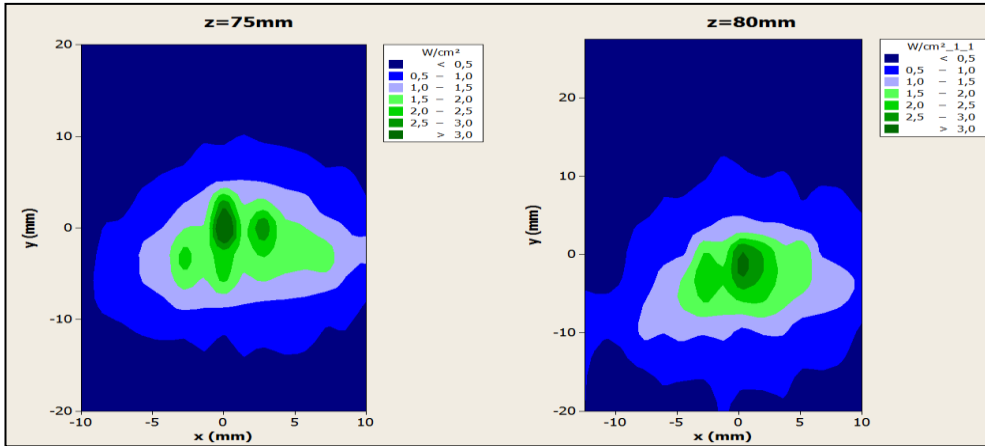
6.3.3. HIFU Tipi Transduser

Proje kapsamında ses dalgalarını bir noktada yoğunlaştıran HIFU transduserlerle çalışılmış ve 20x20 mm' lik bir alan için 2,5 mm aralıklarla tarama yapılarak enerji haritası çıkarılmıştır. Üç farklı sıvı ortamında testler tekrar edilmiş böylece sıvı ortamın kavitasyon enerjisi üzerinde bu transduser tipi için tepkisini belirlemek amaçlanmıştır. HIFU tipi transduserlerin de daldırma tipi gibi suyun içerisinde çalıştığı ve belirli bir mesafede kavitasyon odak noktası oluşturduğu bilinmektedir.

Çalışmalarda rezonans frekansı 670 kHz ve 1 MHz olan iki farklı HIFU kullanılmıştır. Farklı frekansta iki ayrı HIFU transduser için enerji haritası çıkartılıp karşılaştırıldığında 670 kHz frekansta çalışan transduserin daha düşük frekanslı olduğu için enerjisinin daha yüksek olduğu, 7 W/cm^2 seviyesinde kavitasyon enerjisi üretebildiği belirlenirken, daha yüksek frekanstaki 1 MHz HIFU transduserin bunun enerji miktarının ancak yarısını sağlayabildiği Şekil 6.22 ve 6.23'ün karşılaştırılmasından görülmüştür.

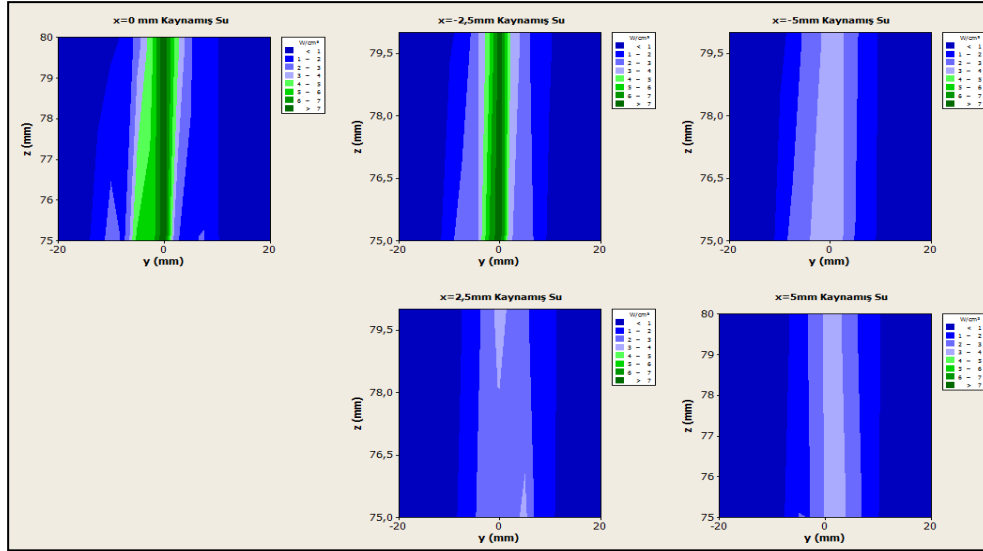


Şekil 6.22: 75W-670 HIFU transduserin 3 farklı sıvı ortamında kavitasyon enerji haritası.



Şekil 6.23: 100W-1MHz HIFU transduserin kaynamış su ortamında farklı seviyelerde kavitasyon enerji haritası.

Şekil 6.24'te 670 kHz transduserin sonuçları düşey düzlemde incelendiğinde HIFU tipi transduserin kavitasyon enerjisini odakladığı, merkezde ve merkeze oldukça yakın noktada doğrusal bir çizgi boyunca enerjinin en yüksek seviyesini koruduğu ve yüzeye kadar bozulmadan ilerlediği görülmüştür.



Şekil 6.24: 75W - 670kHz HIFU Transduserin düşey düzlemde kavitasyon enerji haritası.

Farklı tiplerde transduserler ile yapılan kavitasyon aktivitesi ölçüm çalışmaları sonunda, temas tipi transduserlerin kavitasyon enerjisini yıkama tankının her noktasına dağıttığı görülmüştür. Ayrıca düşük giriş gücü ile çalıştırılmasına rağmen oluşturduğu kavitasyon aktivitesi bakımından diğer tiplere göre daha verimli olduğu belirlenmiştir.

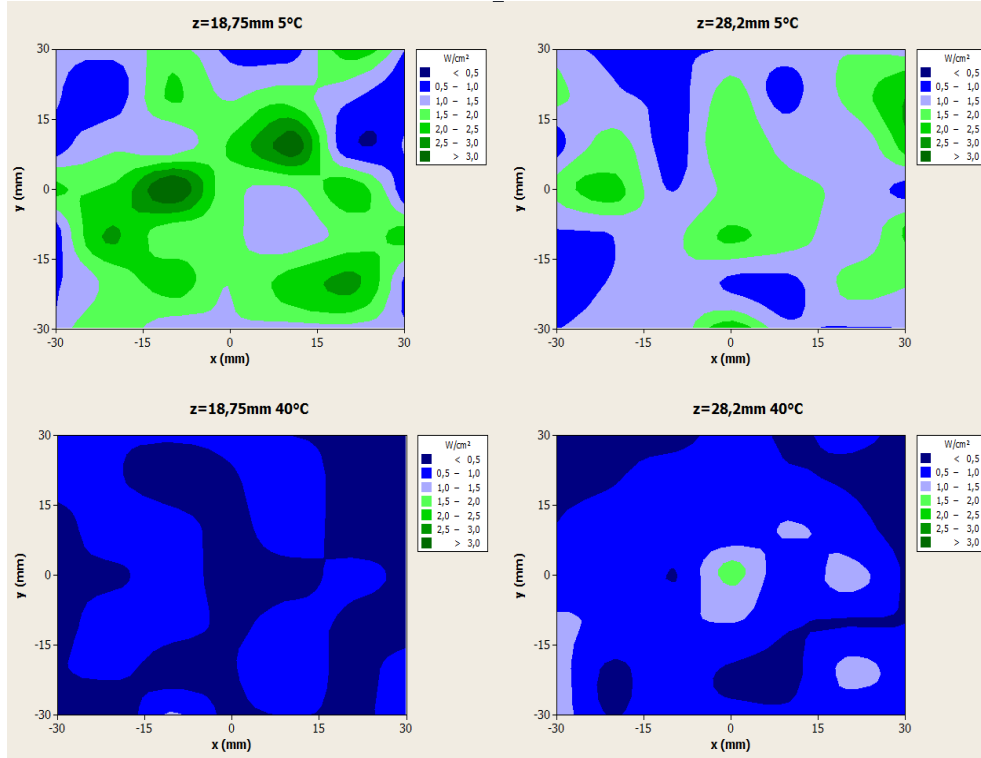
Daldırma tipinde ise temas tipi transduserlerin aksine kavitasyon enerjisini transduser çapıyla orantılı dağıttığı, daha sabit enerji dağılımı oluşturduğu görülmüştür. Son olarak HIFU tipi transduser, özel tasarımından dolayı beklenildiği gibi kavitasyon enerjisini oldukça küçük bir alana toplamış ve enerji seviyesini sıvı ortamın yüzeyine kadar korumuştur.

6.4. Sıcaklık Etkisi

Sıcaklığın kavitasyon oluşumunda ve enerji seviyesinde en etkili değişkenlerden biri olduğu bilinmektedir. Bu etkinin düşük sıcaklıkta çözünmüş gaz miktarının az olması ve oluşan kavitasyon kabarcıklarının daha az gaz içerdiği için patlama şiddetinin yüksek olması beklenmekte ve tam tersi şekilde sıcaklık arttıkça çözünen gaz miktarı artacağından kabarcıkların daha düşük enerji seviyesinde patladığı bilinmektedir. Sıvı ortam sıcaklığının etkisini incelemek için farklı sıcaklıklarda kavitasyon oluşumu sağlanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

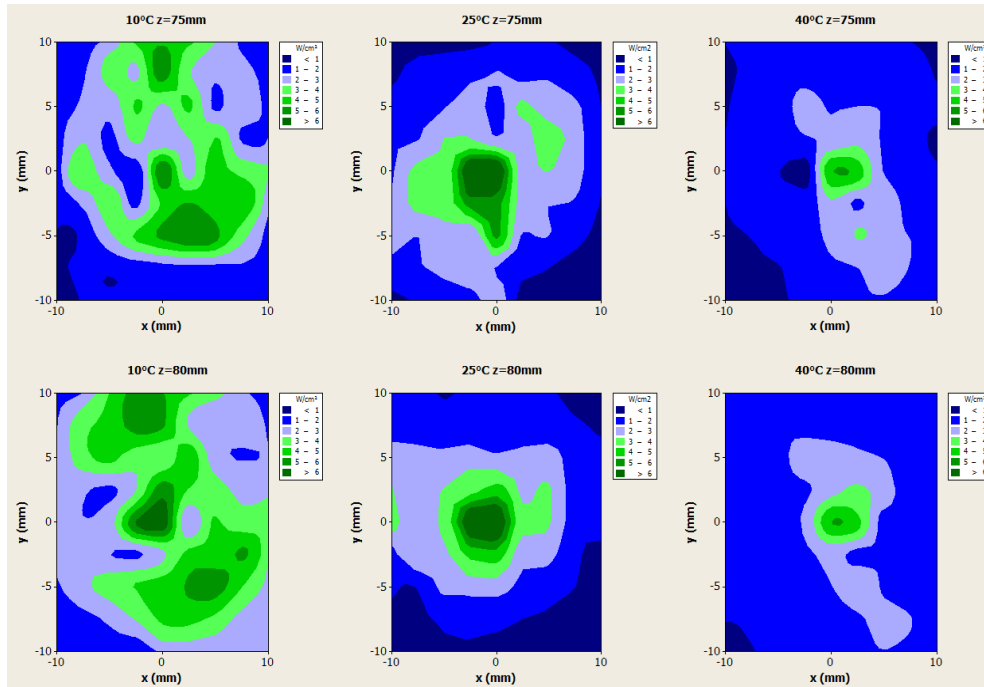
Seçilen sıcaklıkların olabildiğince düşük sıcaklık derecesi, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık değeri olmasına dikkat edilmiştir. Sıvı ortam olarak sadece degaze edilmiş su kullanılmış ve farklı seviyelerde aynı çerçeve içerisinde haritalama çalışmaları yapılmıştır.

Temas Tipi Transduser: Şekil 6.25'te 80 kHz rezonans frekansına sahip transduserin 5°C ve 40°C sıvı ortam sıcaklıkları altında farklı seviyelerde alınan kavitasyon enerji ölçümleri verilmiştir. Aynı frekans değeriinde iki farklı seviyede sıcaklığın etkisi oldukça net görülmüştür. Düşük sıcaklıkta her iki seviye için yüksek kavitasyon enerjisi elde edilirken 40°C sıcaklıkta enerji iyice azalmıştır. Kavitasyon enerjisinin ölçüldüğü seviyeler için bahsedilen dalga boyunun etkisi ve 28.2 mm'de bir alt seviye değeri olan 18.75 mm' ye göre daha yüksek enerji bölgeleri oluştuğu belirlenmiştir



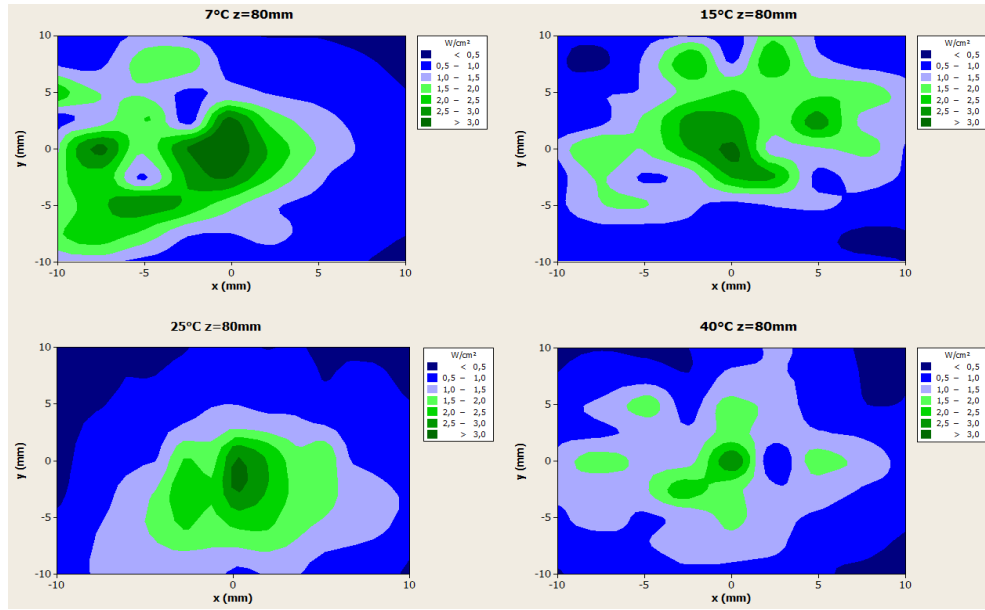
Şekil 6.25: 60W-80kHz Temas Tipi transduserin 5°C ve 40°C sıcaklıklarında iki farklı derinlikte kavitasyon enerji haritası.

HIFU Tipi Transduser: Şekil 6.26'da 670 kHz frekanstaki HIFU transduser için yapılan sıcaklık etkisi inceleme çalışmasının sonuçları gösterilmiş ve bu sonuçlar incelendiğinde düşük sıcaklıkta beklenildiği gibi yüksek enerjili bölgelerin yoğunlukta olduğu fark edilmiştir. Düşük sıcaklık, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık değerleri için 75 mm ve 80 mm seviyelerinde tekrarlanan bu test sonuçları karşılaştırıldığında sıcaklığın arttıkça enerjinin düştüğü fakat düşük sıcaklıkta odak noktasının her iki seviye için de rahatlıkla seçilemediği aynı seviyede birkaç bölgenin daha oluştuğu görülmüştür. Ayrıca kavitasyon enerjisi odak noktasının çapının sıcaklıkla artışıyla beraber oldukça küçüldüğü, optimum enerji yoğunluğunun her iki ölçüm seviyesi için oda sıcaklığında, 25°C'de elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 6.26: 75W-670 kHz HIFU transduserin 10°C , 25°C ve 40°C sıcaklıklarında kavitasyon enerji haritası.

Çalışmaların devamında sıcaklık aralıkları düşürülerek, tek bir seviye için 1 MHz frekanstaki HIFU transduser ile enerji ölçümü yapılmış ve sonuçlar Şekil 6.27' de gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça yüksek enerjili bölgelerin ve enerjinin bir bölgeye toplanmaya başladığı, odak noktasının daha belirginleştiği fakat 40°C sıcaklıkta bu odağın iyice küçüldüğü belirlenmiştir.



Şekil 6.27: 100W-1MHz HIFU transduserin 7°C, 15°C, 25°C ve 40°C sıcaklıklarında kavitasyon enerji haritası.

Transduser tiplerinin farklı kavitasyon enerji karakteristiği olduğu bir önceki bölümde açıklanmış ve sıcaklık etkisi çalışmaları daldırma tipi transduser için de tekrarlanmıştır. 1 MHz - 100 W Daldırma tipi ve 1 MHz - 100 W HIFU transduserler için yapılan çalışmaların sonuçları Ek-4'de verilmiştir.

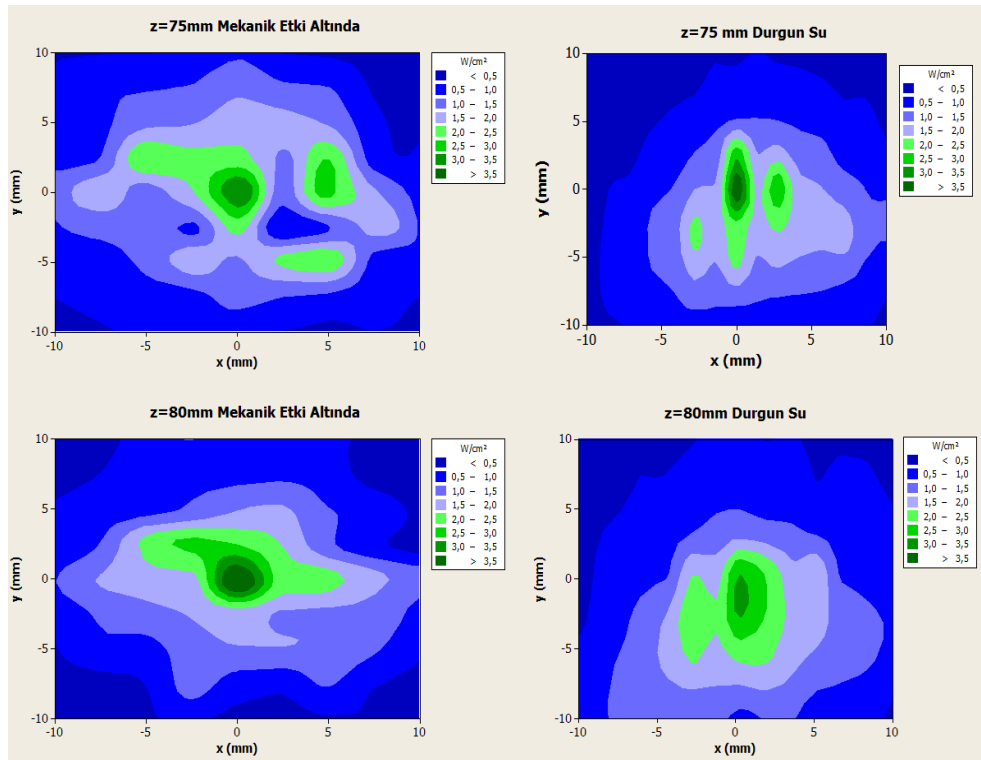
Bu konuda bir başka etki de HIFU transduser üzerinde görülmüş, oda sıcaklığında odak noktası belirgin bir enerji haritası elde edilirken, düşük sıcaklıklarda enerjinin daha dağınık olduğu ve yüksek sıcaklıklarda odak noktasının iyice küçüldüğü belirlenmiştir. Temas tipinde enerji zaten dağınık olduğu için bu yönde bir etkisi olmadığı gibi kavitasyon enerji şiddetinin sıcaklık artışıyla beraber büyük miktarda azaldığı fark edilmiştir.

6.5. Mekanik Hareket Etkisi

Kavitasyon enerjisi üzerine etkiyen değişkenlerden birisinin de mekanik hareket olduğu bilinmektedir. Kabarcıkların durgun su içerisinde doğal salınımına devam ederken kritik boyuta gelince patlamasıyla, mekanik bir hareketin yarattığı basınç değişimlerinden etkilenerek patlaması arasında belirgin bir fark olacağı düşünülmüştür.

Bu etkiyi incelemek için kullanılan yıkama tankı içerisine mekanik bir karıştırıcı yerleştirilip 310 rpm devrinde tüm test boyunca çalıştırılıp, kavitasyona ek olarak su içerisinde hareket oluşturulması sağlanmıştır.

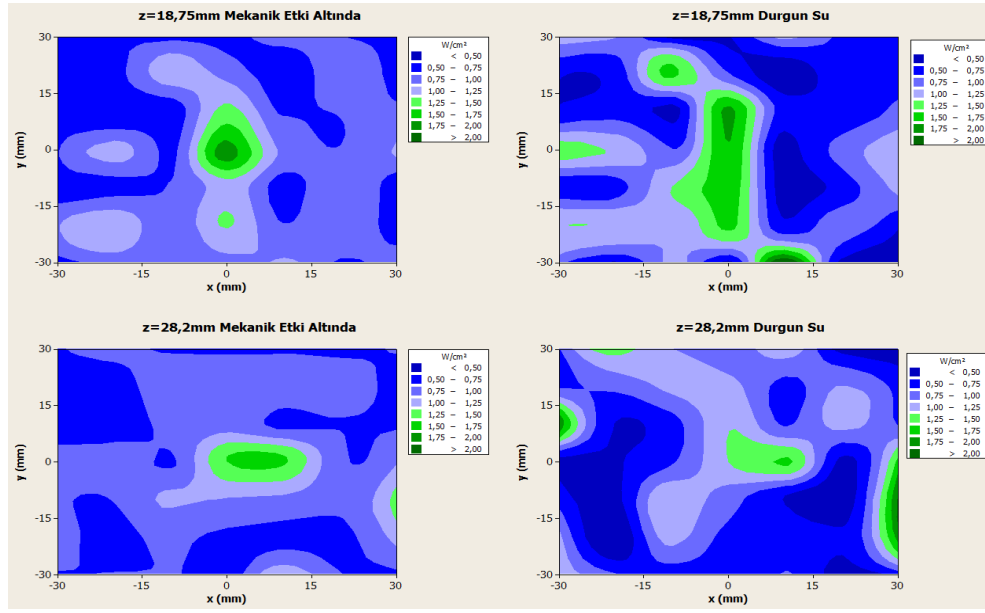
Bu çalışmada, 1 MHz rezonans frekansındaki HIFU transduser sisteme takılarak 75 mm ve 80 mm seviyelerinde, odak noktaya yakın konumda mekanik karıştırıcı çalıştırılıp megasonik prob ile enerji ölçümü yapılmıştır. Şekil 6.28'de gösterilen sonuçlar incelendiğinde oluşan enerji miktarının çok değişmediği fakat odak noktasında kavitasyonun daha dağınık gerçekleştiği, toplam etki alanının genişlediği görülmüştür.



Şekil 6.28: 100W-1MHz HIFU transduserin mekanik etki altında iki farklı derinlikte kavitasyon enerji haritası.

Aynı yöntemle mekanik hareket etkisini incelemek için temas tipi transduser yıkama tankına monte edilip bir önceki bölümde sıcaklık etkisini göstermek için ölçüm alınan seviyelerde, karıştırıcı çalışırken enerjimetre ile tarama yapılmıştır. Şekil 6.29'da 80 kHz frekanstaki temas tipi transduser mekanik etki altında çalıştırılmış ve durgun sudaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Zaten oldukça dağınık bir kavitasyon enerji karakterine sahip transduser için mekanik hareketin yoğun kavitasyon bölgelerini ayırdığı söylenememiştir.

Buna rağmen durgun su sonuçları ile kıyaslandığında yüksek enerjili bölge alanında azalma olduğu fark edilmiştir. Projede mekanik hareket etkisi üzerine yapılan bu çalışma kavitasyon enerjisinin durgun suda daha kararlı ve yüksek seviyede olduğunu göstermiştir. Mekanik hareketin, özellikle HIFU transduser üzerinde enerji bölgelerinin dağıtılmasına etkisinin fazla olduğu ve optimum koşulların durgun suda gerçekleştiği belirlenmiştir. Ek-5'de 1 MHz-100W HIFU ve 75W-670kHz HIFU transduserlere ait mekanik hareket altındaki deney sonuçları ve 670 kHz HIFU için durgun su sonuçları ile mekanik hareket sonuçlarının karşılaştırması sunulmuştur.



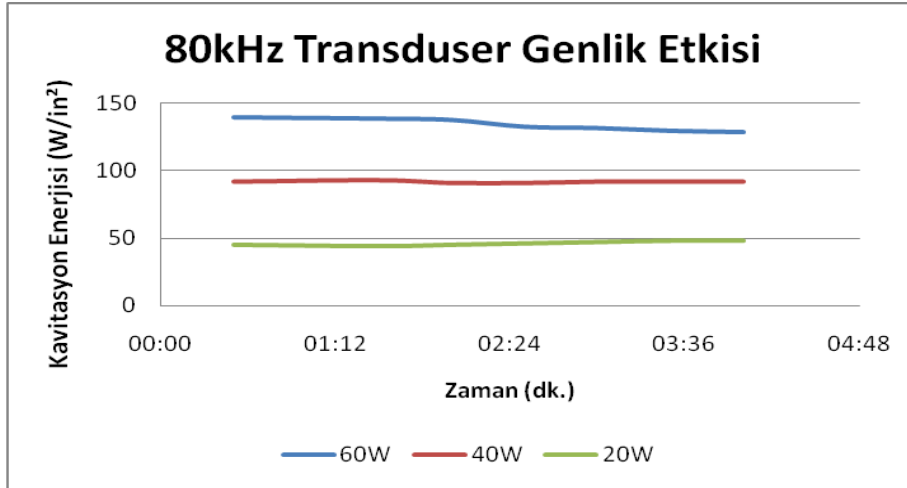
Şekil 6.29: 60W-80kHz transduserin mekanik etki altında iki farklı derinlikte kavitasyon enerji haritası.

6.6. Genlik Etkisi

Genlik etkisinin test sistemi üzerinde gösterilmesi için 80 kHz temas tipi transduser yıkama tankına monte edilip jeneratör üzerinden farklı güç değerlerinde çalıştırılarak enerjimetre ile kavitasyon ortamı içerisinde prob konumu sabit kalarak ölçümler alınmıştır. Temas tipi transduser 4 dakika boyunca 20W, 40W ve 60W giriş gücü değerlerinde çalıştırılmış, sonuçlar Çizelge 6.1'de ve Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Genliğin etkisinin incelendiği bu çalışmanın sonuçları yukarıdaki şekilden incelendiğinde, beklenildiği gibi kavitasyon enerjisinde giriş gücüyle doğrusal oranda artış meydana geldiği görülmüştür.

Çizelge 6.1: 80 kHz frekansta transduser için farklı genliklerde enerji ölçümü.

80 kHz Temas Tipi Transduser			
Zaman (dk.)	60W	40W	20W
00:30	140	92	45
01:30	139	93	44
02:00	138	91	45
02:30	133	91	46
03:00	132	92	47
03:30	130	92	48
04:00	129	92	48



Şekil 6.30: 80 kHz temas tipi transduserin 60W, 40W ve 20W güç değerlerinde kavitasyon enerji eğrileri.

7. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Çalışmanın bu aşamasında deneysel çalışmalarda rastlanan hataların bulunmasına yönelik hesaplamalar yapılmıştır. Kullanılan enerjimetre özel bir cihazdır ve referans cihazı bulunmamaktadır. Bu nedenle yapılan analizde sistematik hatalar hesaba katılmayıp sadece deneysel çalışmaların hata analizi yapılmıştır.

Bunun için yapılan araştırmalarda aynı koşullarda ve aynı zamanlarda alınan ölçümlerin standart sapmaları hesaplanıp, Bölüm 3.3' te verilen denklemlerden bulunacağı görülmüştür. Bahsedilen analizin gerçekleştirilmesi için deney düzeneği üzerinde aynı noktadan ölçümler alınmıştır ve deneyler birkaç kere tekrar edilmiştir. Sisteme takılı olan 28 kHz 100W özelliğindeki temas tipi transduser 60 dakika boyunca çalıştırılmış, ultrasonik proba dakikada bir olmak üzere toplam 60 ölçüm alınmıştır. Bu deney degaze edilmiş su kullanılarak gerçekleştirilmiştir, hesaplamalar MS Excel 2010 üzerinden yapılmıştır.

Toplam ölçümler için ortalama değerler:

Denklem 3.3 kullanılarak

$$2,10$$

Son olarak ortalamanın standart sapması denklem 3. 5'ten $n=20$ için hesaplama yapıldığında;

$\bar{x} = 0,27$ olarak bulunur. Bu değer %68 güvenilirlik seviyesindeki rastgele hata değerini vermektedir.

%Belirsizlik= _____

%Belirsizlik= _____

8. SONUÇ

Yapılan araştırmalar ultra ses dalgalarının sıvı içerisinde oluşturduğu kabarcıkların yoğunluğunun ve patlama şiddetinin artmasının açığa çıkan enerjiyi arttırdığını göstermiştir. Aslında kabarcıklar oluşurken akustik alandan absorbe ettiği enerjiyi, patlama sırasında tekrar açığa çıkarmaktadır. Bu durumda kabarcık oluşum ortamının optimum düzeye getirilmesi için çalışmalar yapılması öncelikli olmalıdır. Ortamda çözünen gaz miktarıyla ilişkisinin önemli olduğu ve gaz miktarının azalmasının kavitasyon miktarını arttırdığı bilinmektedir. Bu konuda sıvının degaze edilmesi yönündeki çalışmalar başarılı olmuştur, çözünmüş gaz miktarı azalmış sıvıda kavitasyon yoğunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür.

Proje kapsamında yapılan çalışmalarda özel bir yıkama hacmi içerisinde ultra/megasonik ses dalgalarının etkileri incelenmiştir. Oluşturulan test düzeneğinde, kavitasyon aktivitesinin ölçülmesinde kullanılan enerjimetre ile üç boyutlu olarak kavitasyon değişimi takip edilmiş ve haritalama çalışmaları yapılmıştır. Testlerde kavitasyon oluşumu ve kavitasyonu etkileyen en önemli parametre olan su çözeltisinin içerisindeki çözünmüş gaz miktarının değişimi incelenmiştir. Gaz miktarı arttıkça kavitasyon etkinliğinin azaldığı görülmüştür. Bu nedenle, tüm çalışmalarda degaze edilmiş (kaynatma işlemi ile) sular kullanılmıştır.

Ultrasonik uygulamaların temelini oluşturan transduserlerin kavitasyon aktivitesinin belirlenmesi için alüminyum folyo ve enerjimetre yöntemleri kullanılmıştır. Farklı rezonans frekanslarına sahip transduserler ile yapılan testlerde, 60 saniye boyunca ses dalgalarına maruz bırakılan alüminyum folyolarda meydana gelen aşınmalar gösterilmiştir. Her iki yöntem sonuçlarından görülebileceği gibi düşük rezonans frekanslarında kavitasyon aktivitesinin yüksek frekanslara oranla çok daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Kavitasyon aktivitesi incelemeleri transduser yüzeyinden belirli mesafelerde tekrarlanmış ve kavitasyon değişiminin transduser yüzeyinden mesafesine göre değişiminin transduserden uzaklaştıkça kavitasyonun azaldığı yönünde olduğu belirlenmiştir.

Temas tipi transduser ile yapılan bu çalışmaların ardından, daldırma tipi ve HIFU transduserler içinde benzer çalışmalar yapılmıştır. Daldırma tipi transduserde ultrasonik etkinin transduser çapına eş bir alanda etkili olduğu, HIFU tipinde ise transduserin odaklı olmasından dolayı etki alanının daha kısıtlı olduğu, maksimum kavitasyonun tek bir noktada elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Aynı mertebelerde kavitasyon değerlerinin elde edildiği farklı tiplerdeki transduserler karşılaştırıldığında, en geniş etki alanına sahip transduserin daldırma tipi olduğu belirlenmiştir. Odaklı olmasından dolayı HIFU transduserin etki alanı diğerlerine oranla kısıtlı kalmaktadır. HIFU tipi transduserlerin kullanılması durumunda odak noktasında oluşan ultrasonik kavitasyon etkisinin yanı sıra diğer transduserlerde görülmeyen yıkama tankı içerisinde ek bir mekanik hareket yarattığı gözlenmiştir.

Kavitasyon aktivitesinin degaze çözelti içerisinde etkinliğinin incelenmesinin ardından, ortam koşullarının; sıcaklığın ve mekanik hareketin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmalar sonucunda sıcaklığın artması ile birlikte kavitasyon aktivitesinin azaldığı belirlenmiştir. Sıcaklığın 40°C'ye ulaşması durumunda kavitasyon etkinliğinin 1 W/cm²'nin altına düştüğü görülmüştür.

Tank içerisindeki suya karıştırıcı ile uygulanan mekanik hareketin sonucunda ultrasonik kabarcıkların etkinliğinin azaldığı belirlenmiştir. Ancak, bunun sıcaklık artışı kadar yüksek bir etkisinin olmadığı, yıkama tankında aynı seviyede kavitasyon aktivitesi elde edilebildiği, sadece etki alanının azaldığı tespit edilmiştir.

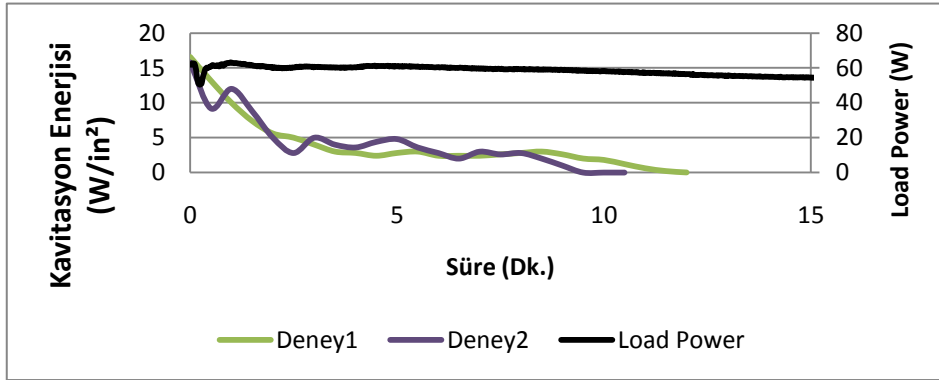
KAYNAKLAR

- [1] **Suslick, K. S.**, 1994: The Chemistry of Ultrasound,
<http://www.scs.uiuc.edu/~suslick/britannica.html>.
 - [2] **Suslick, K. S.**, 1990. Sonochemistry, *Science*, 247, 1439-1445.
 - [3] **Mason, T. J.**, 1999. Sonochemistry, Oxford University Press Inc., New York.
 - [4] **Kidak, R.**, 2005. Optimization of ultrasonic reactors for bacterial and organic matter decay.
 - [5] **Gogate P.**, 2007. Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review.
 - [7] **Raso, J., Pagán, R.**, 1999. Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound, *Ultrasonics Sonochemistry*, 157-162.
 - [8] **Niemczewski, B.**, 2007. Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic cleaning conditions, *Ultrasonics Sonochemistry*, 13-18.
 - [9] **Piazza, T., Puskas W.**, 2001. The Ideal Ultrasonic Parameters for Delicate Parts Cleaning.
 - [10] **Sutkar, V., Gogate, P.**, 2009. Design aspects of sonochemical reactors: Techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters.
 - [11] **IEC 61161**, Ultrasonic - Power measurement - Radiation force balances and performance requirements, *International Standard*.
 - [12] **Moholkar, V.**, 2000. Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using the acoustic emission.
 - [13] **Erken, N.**, 2008. Mikroboru akışlarındaki ölçüm belirsizlikleri.
 - [14] **Coleman, H. W., Steele, W. G.**, 1989. Experimentation and uncertainty analysis for engineers, John Wiley & Sons.
 - [15] **Sadikhov, E., Kangı R., Uğur S.**, 1995. UME 95-114, Ölçüm Belirsizliği, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi- Ulusal Metroloji Enstitüsü
 - [16] **Warmoeskerken, M.**, Cleaning Process, No: WO 94/23852 dated 27.10.1994.
- Url-1** <www.blackstone-ney.com>, alındığı tarih 08.11.2010.
- Url-2** <<http://en.wikipedia.org/>>, alındığı tarih 08.11.2010.

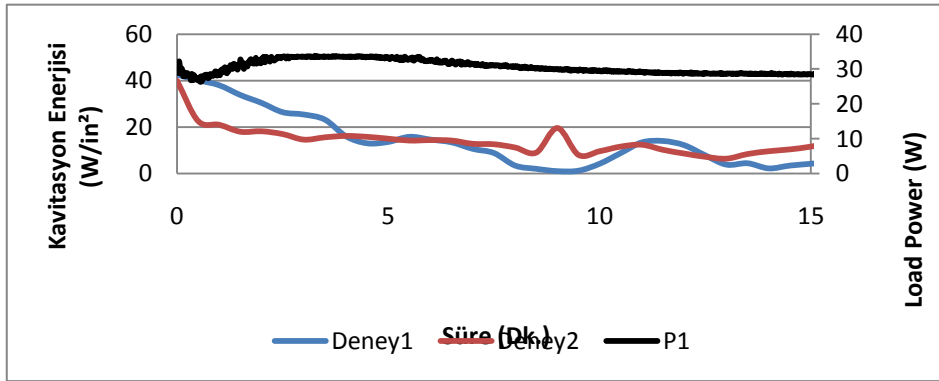
EKLER

EK-1 Degaze Suda Kaviteasyon Enerjisi ve Load Power Değişimleri

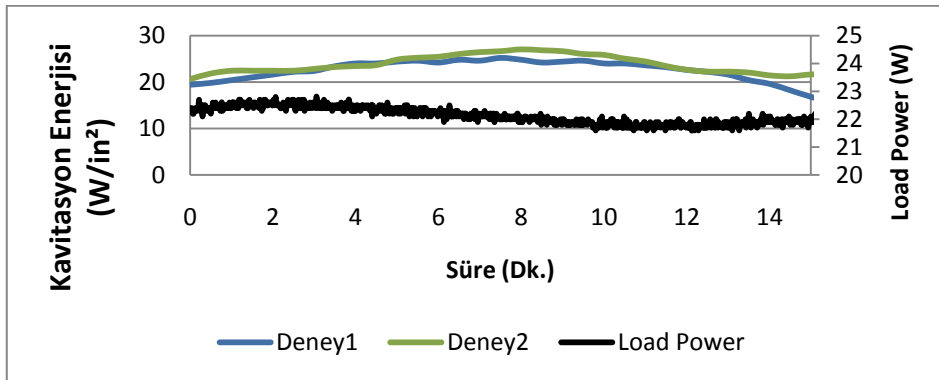
1. 80 kHz- 100W



2. 129 kHz- 60W

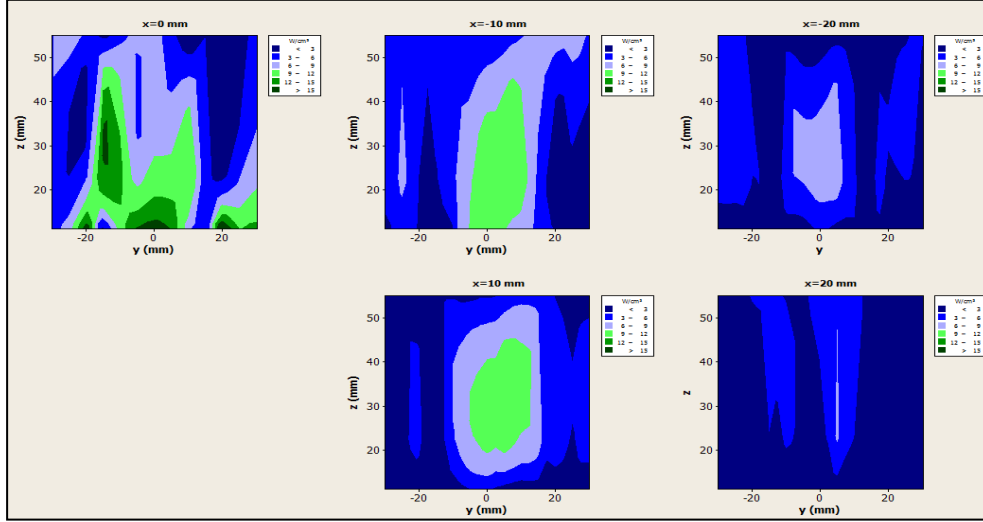


3. 160 kHz- 60W

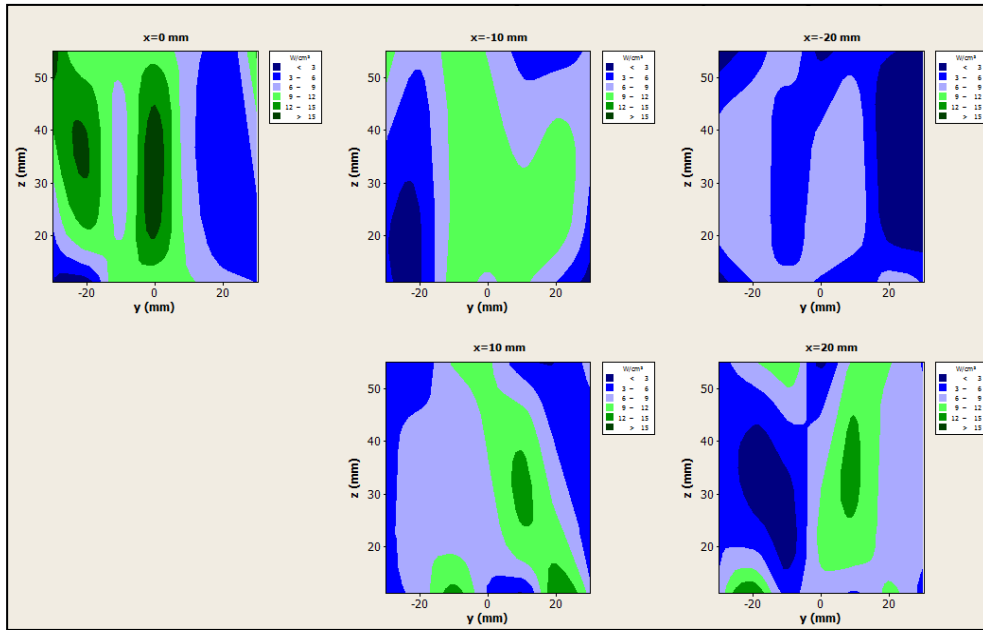


EK-2 67 kHz-100W Temas Tipi Transduserin Düşey Düzlemde Kaviteasyon Enerjisi Dağılımı

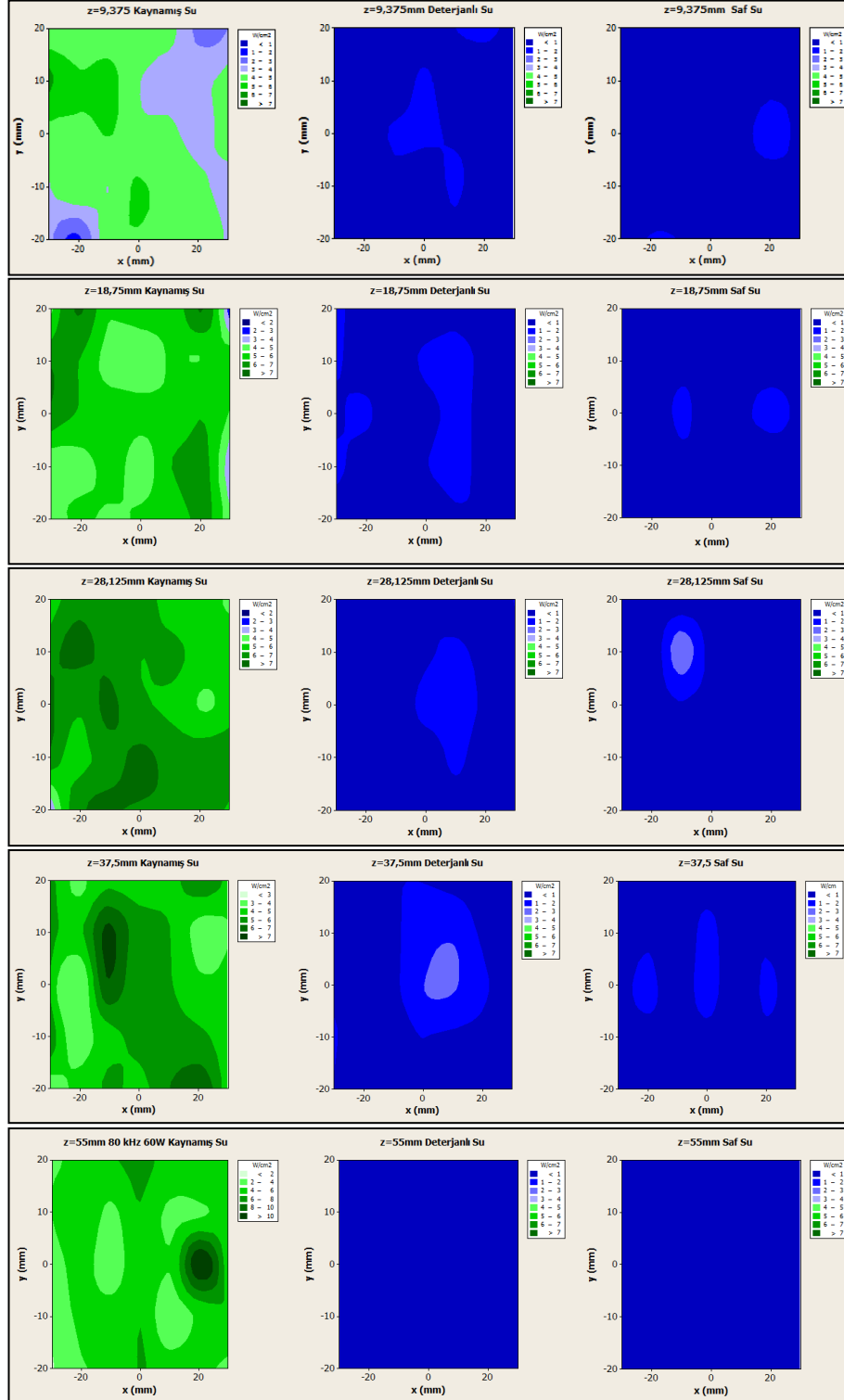
1. Saf Su



2. Deterjanlı Su

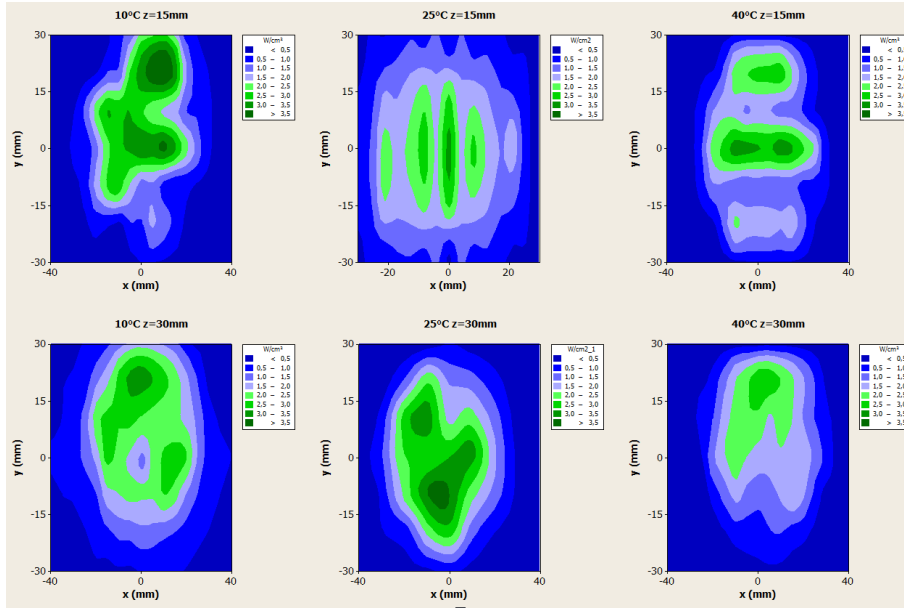


Ek-3 60W - 80 kHz Temas Tipli Transduserin Farklı Sıvı Ortamlarında Yatay Düzlemde Kavitasyon Enerji Dağılımı

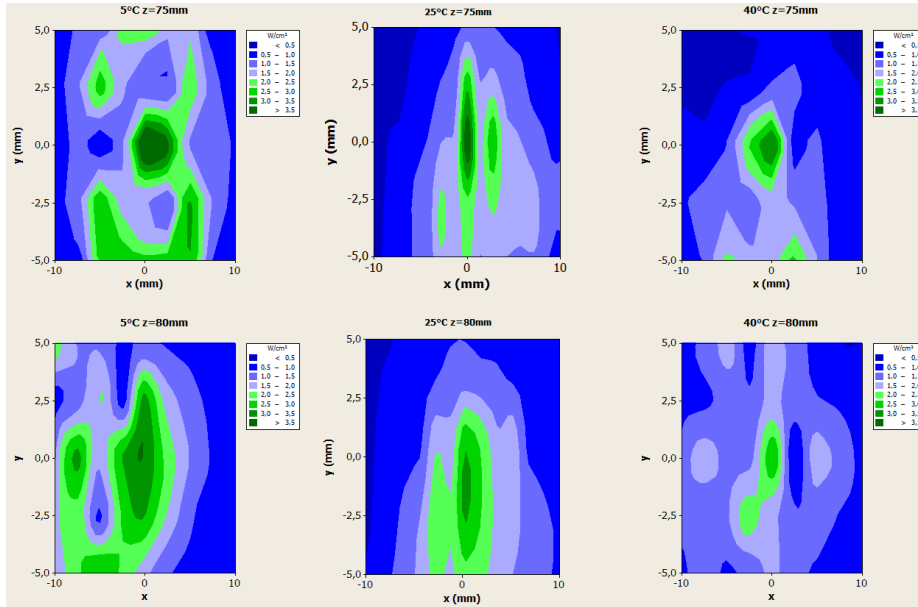


Ek-4 Sıcaklığın Transduserin Oluşturduğu Kaviteasyon Enerjisine Etkisi

1. 100W - 1 MHz Daldırma Tipli Transduser

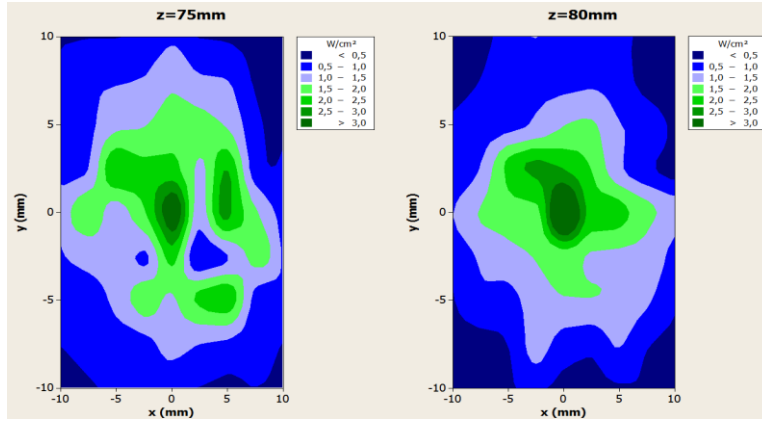


2. 100W - 1 MHz HIFU Tipli Transduser

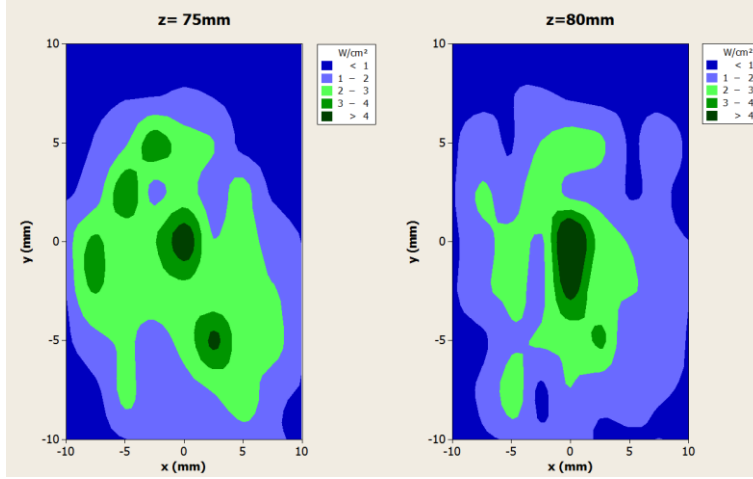


Ek-5 Mekanik Hareketin Transduserin Oluşturduğu Kavitasyon Enerjisine Etkisi

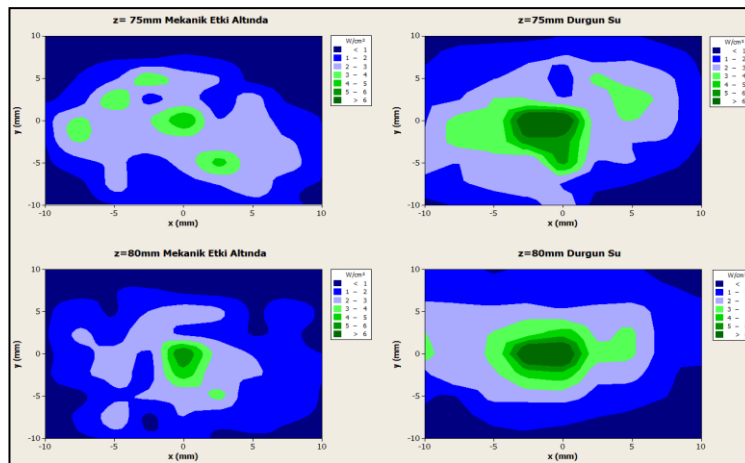
1. 100W - 1 MHz HIFU Tipli Transduser



2. 75W - 670 kHz HIFU Tipli Transduser



3. 75W - 670kHz HIFU Tipli Transduser için Durgun Su ile Mekanik Etki Altında Enerji Dağılımının Karşılaştırılması



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyadı: Fulya ÇİÇEKDAĞI

Doğum Yeri ve Tarihi: Mersin - 29.11.1987

Lise: Antalya Adem Tolunay Anadolu Lisesi

Lisans Üniversite: Yeditepe Üniversitesi/ Makine Mühendisliği (2005-2009)