

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR  
ÜNİVERSİTESİ LİSANS ÜSTÜ  
EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MEKANİK PROGRAMI**

**PIEZOELEKTRİK ETKİ İLE TİTREŞİM YAPAN  
DELİKLİ YÜZEY ÜZERİNE YERLEŞTİRİLMİŞ SIVI  
DAMLANIN DİNAMİK DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**Ümü Gülsüm BİLEKLİ**

**Danışman  
Doç. Dr. Güzde SARI**

**MANİSA-2024**

## TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

**Ümü Gülsüm BİLEKLİ**



## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

**Ümü Gülsüm BİLEKLI**  
**Manisa Celal Bayar Üniversitesi**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**  
**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Gözde SARI**

Piezoelektrik etki ile titreşim yapan damla atomizasyonu, sıvıların bu titreşim enerjisini kullanarak daha küçük damlalara bölünmesini içerir. Bu yöntem, daha iyi verimlilik, homojenlik için birçok endüstri ve bilimsel çalışma için vazgeçilmezdir. Damla atomizasyonu yöntemi gıda sanayi, kumaş kurutma, elektronik soğutma, tarım, endüstriyel üretim, biyoteknoloji, tarım, havacılık, tıp alanı gibi çeşitli ilgi alanlarına ve kullanım alanlarına sahiptir. Bu tezin çalışmasında piezoelektrik etki ile yüksek frekansta titreşim yapan pirinç ve paslanmaz çelik malzemelerinin üzerine yerleştirilen su damlalarının dinamik davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, delikli ve deliksiz pirinç ve paslanmaz çelik özelliklerindeki plakaların yüzeyleri üzerine yerleştirilen, belirli hacimdeki su damlasının dinamik davranışının incelenmesi ve pirinç, paslanmaz çelik özelliklerinin ve gözenekli plakalarının gözenekler arası mesafesinin değişmesinin damla atomizasyon davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

Bir diğer amaç olarak frekans süpürme yöntemi, atomizasyonun daha etkili gözlemlenebilmesi için 15kHz ile 25 kHz arasında birçok frekansta çalışılarak süpürme yöntemi denenmiştir. Bu da tek bir frekansta çalışmak yerine, yüzeyin rezonans frekanslarını da denk gelen noktalarda çalışmaya deneyde olanak sağlamıştır. Bu deneyde, paslanmaz çelik ve pirinç plakalar lazer markalama yöntemi ile, aynı plaka üzerinde, gözenekler arası mesafelerin 1000, 1500, 2000 ve 2500 µm olacak şekilde delinmiştir. Gözenekli pirinç ve paslanmaz çelik plakalarının delik çaplarının gerçek ölçüleri mikroskopta

ölçülmüştür. Damla atomizasyonu deneyleri için piezoelektrik disk, deney plakalarının alt yüzeylerine sabitlenerek sinüs sinyali ile uyarılmıştır. Plakaların üst yüzeyi ile temas eden su damlasının deney boyunca değişiklik gösteren görüntüsü üstten bir kamera ile kaydedilmiştir. Kaydedilen görüntüler analiz programı ile zamana göre değişimleri kaydedilmiştir. Aynı analiz programı ile damlaların alan ölçümleri yapılarak grafikler oluşturulmuştur. Diğer bir amaç ile bu çalışmada frekans süpürme yönteminin deney yüzeylerinde atomizasyona olan katkısı araştırılmıştır. Bu yöntemde, farklı frekanslarda süpürme uygulanarak sıvı damlaların atomizasyonu incelenmiştir. Sonucunda damla görüntülerinin zamanla değişimleri aynı analiz programı kullanılarak alan ölçümleri yapılmıştır. Frekans ivme grafikleri oluşturulmuştur.

Bu çalışma ile, pirinç ve paslanmaz çelik olmak üzere iki farklı malzeme özelliklerine sahip, gözenekli ve gözeneksiz plakalar üzerinde belirli hacimde su damlacıklarının dinamik davranışı gösterilmiştir. Gözenekli plakaların iki gözenek arası mesafe boyu değiştirilerek damla atomizasyonuna olan etkisi incelenmiştir. Frekans süpürme yönteminin atomizasyon sürecini önemli ölçüde hızlandırdığı sonucu deneysel olarak gösterilmiştir. Elde edilen genel sonuçlar göre pirinç malzemelerin paslanmaz çelik malzemelere göre damla atomizasyonu daha hızlı gerçekleşmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Titreşim Analizi, Atomizasyon, Mikro Delikli Pirinç Plaka, Mikro Delikli Paslanmaz Çelik Plaka, Gözeneksiz Mikro Kalınlıkta Plaka, Görüntü Analizi, Piezoelektrik dönüştürücü

**2024, 108 Sayfa**

**ABSTRACT**  
**M.Sc. Thesis**

**Ümü Gülsüm BİLEKLİ**

**Manisa Celal Bayar**  
**University Graduate**  
**School of Education**  
**Department of Mechanical**  
**Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Gözde SARI**

The thesis study focuses on the dynamic behavior of water droplets placed on surfaces of brass and stainless steel materials that vibrate at high frequencies through the piezoelectric effect.

The purpose of this thesis study is to investigate the dynamic behavior of water droplets of specific volumes placed on the surfaces of porous and non-porous brass and stainless steel plates. Additionally, the study aims to examine the effects of the material properties of brass and stainless steel, as well as the spacing between pores in the porous plates, on droplet atomization behavior.

To achieve this goal, brass and stainless steel plates were perforated using laser marking methods, with pores spaced at distances of 1000, 1500, 2000 and 2500  $\mu\text{m}$  on the same plate. The actual diameters of the pores in the porous brass and stainless steel plates were measured under a microscope. For the droplet atomization experiments, a piezoelectric disk was attached to the underside of the test plates and stimulated with a sinusoidal signal. The top-view images of the water droplet in contact with the plate surface were recorded using a camera. The recorded images were analyzed over time using image analysis software to track changes in the droplet's behavior. The software was also used to measure the droplets' area over time, and graphical representations of this data were created.

This study demonstrates the dynamic behavior of water droplets on surfaces of brass and stainless steel, both porous and non-porous, with varying pore spacings. The impact of altering the spacing between pores in the porous plates on droplet atomization was examined. The overall findings suggest that

brass materials exhibit faster droplet atomization compared to stainless steel materials.

**Keywords:** Vibration Analysis, Atomization, Micro Perforated Square Brass Plate, Micro Perforated Square Stainless Steel Plate, Non-Perforated Micro Thickness Plate, Image Analysis, Piezoelectric Transducer

**2024, 108 Pages**



## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının amacı, gözenekli ve gözeneksiz pirinç ve paslanmaz çelik özelliklerindeki plakaların yüzeyleri üzerine yerleştirilen, belirli hacimdeki su damlasının dinamik davranışının incelenmesi ve pirinç, paslanmaz çelik özelliklerinin ve gözenekli plakalarının gözenekler arası mesafesinin artması ve azalmasının damla atomizasyon davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Aynı zamanda bu çalışmada frekans süpürme işlemi ile tek bir frekansta çalışmanın damla atomizasyon etkisi araştırılmıştır.

Öncelikle bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında katkı sağlayan tüm destekçilerime içtenlikle teşekkür ederim. Maddi ve manevi fedakarlıkları için, her zaman yanımda oldukları ve sınırsız destek verdikleri için aileme teşekkür ederim. Tez çalışmamın başarılı bir şekilde tamamlanmasında büyük emekleri olan Sayın Doç. Dr. Gözde SARI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin rehberliği ve öğrencisi olma şansı benim için gurur verici bir deneyim oldu.

Ümü Gülsüm BİLEKLİ  
Manisa, 2024

## İÇİNDEKİLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ.....	1
MANİSA-2024.....	1
ÖZET.....	3
Yüksek Lisans Tezi.....	3
Ümü Gülsüm BİLEKLİ .....	3
Manisa Celal Bayar Üniversitesi.....	3
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.....	3
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı .....	3
Danışman: Doç. Dr. Gözde SARI.....	3
ABSTRACT.....	5
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	7
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	10
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	11
TABLolar DİZİNİ .....	13
BİRİNCİ BÖLÜM .....	14
GİRİŞ.....	14
İKİNCİ BÖLÜM.....	20
GENEL BİLGİLER .....	20
2.1 Atomizasyon Teorisi .....	20
2.2 Piezoelektrik Malzemeler.....	23
2.3 Plakların Genel Özellikleri.....	26
2.3.1 Pirinç Malzeme ve Genel Özellikleri.....	27
Pirinç Malzemenin Özellikleri .....	30
2.3.2 Paslanmaz Çelik Malzeme ve Genel Özellikleri.....	30
Paslanmaz Çelik Malzemenin Özellikleri .....	33
2.4 Plaklar üzerinde Lazer Markalama Yöntemi İle Gözenek Oluşturma .....	34
2.5 Yüzeyin Islanabilirlik Özelliği .....	39
2.6 Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri.....	41
2.6.1 Görüntü Alma Tekniği Yöntemi .....	42
2.6.2. Sıvı Teması İle Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri.....	42
2.7. Mekanik Titreşimler .....	45
2.7.1. Serbest Titreşimler.....	46
2.7.2 Zorlamalı Titreşimler .....	49
2.7.3 Ultrasonik Titreşimler .....	50
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM .....	51
MATERYAL VE METOT.....	51
3.1. Delikli Pirinç ve Delikli Paslanmaz Çelik Plakların Tasarımı .....	51

3.2. Plaka Yüzeylerinde Temas Açısı Ölçümü.....	55
3.3 Damlanın Atomizasyon Analizi .....	58
3.4 Damla Görüntü Analizi ve İzdüşüm Alanı .....	62
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	63
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	63
Pirinç Plakalar Üzerinde İki Delik Arası Mesafenin Ölçülmesi .....	63
4.1. Delikli Plakların Ön ve Arka Yüzeyleri Delik Çapı Ölçümü.....	67
4.2. Damlanın Temas Açısı Ölçüm Sonuçları .....	74
4.3. Plakların Delik Çapları Ölçümleri.....	75
4.4. Plakaların Frekans İvme Analizi .....	78
BEŞİNCİ BÖLÜM.....	81
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	81
5.1. 18.7 Khz'de Damlanın İz Düşüm Alanı Ölçüm Sonuçları.....	81
5.1. Frekans Süpürme ile Damlanın İz Düşüm Alanı Ölçüm Sonuçları.....	87
5.2. Frekans Süpürme ile 18.7 Khz karşılaştırmalı İz Düşüm Alanı Ölçüm Sonuçları .....	93
5.3. 18.7 Khz ve Frekans Süpürmenin Genel Sonuçları: .....	96
KAYNAKLAR .....	101

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>EDM</b>	Elektro Erozyon Delme
<b>Fe</b>	Demir
<b>Cr</b>	Krom
<b>Gpa</b>	Gigapaskal
<b>Da</b>	Odak Noktası Çapı
<b>F</b>	Mercek veya aynanın odak uzunluğu (mm)
<b>K</b>	Optik ışın modu sabiti
<b>D</b>	Lazer Markalama Optik Dalga boyu ( $\mu\text{m}$ )
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Mikrometre
<b><math>\gamma_{SV}</math> (= <math>\gamma_S</math>)</b>	Katı-hava arayüzey enerjisi (= Katının serbest yüzey enerjisi, SYE) ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )
<b><math>\gamma_{SL}</math></b>	Katı-sıvı arayüzey enerjisi ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )
<b><math>\gamma_{LV}</math> (= <math>\gamma_L</math>)</b>	Sıvı-hava arayüzey gerilimi (Sıvının yüzey gerilimi/enerjisi) ( $\text{mN}/\text{m} = \text{mJ}/\text{m}^2$ )
<b>SYE</b>	Serbest Yüzey Enerjisi
<b><math>\theta</math></b>	Teta Temas Açısı
<b><math>l</math></b>	Yükseklik Boyutu
<b>w</b>	Genişlik Boyutu
<b>t</b>	Kalınlık
<b><math>\rho_w</math></b>	Plaka Yoğunluğu
<b><math>\rho_l</math></b>	Sıvı Yoğunluğu
<b>h</b>	Yükseklik (Daldırma Yüksekliği)
<b>F</b>	Kaldırma Kuvveti
<b>FS</b>	Frekans Süpürme
<b><math>\gamma</math></b>	Sıvının Yüzey Gerilimi
<b>g</b>	Yerçekimi ivmesi
<b>m</b>	Kütle
<b>k</b>	Direngenlik Katsayısı
<b>Khz</b>	Kilohertz
<b><math>\omega_n</math></b>	Doğal Frekans
<b>x</b>	Kütlenin Mutlak Deplasman

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Titreşim yapan su damlasının hareketleri [37].....	23
Şekil 2. 2. Titreşim yapan su damlasının patlaması görüntüsü [37].....	23
Şekil 2. 3. Direkt Piezoelektrik Etki Durumu [39].....	25
Şekil 2. 4. Ters Piezoelektrik Etki Durumu [39].....	25
Şekil 2. 5. Pirinç malzemesinin çinko miktarı ile değişen kopma uzaması ve çekme dayanımı değişimi grafiği [43].....	29
Şekil 2. 6. Lazer Markalama Işınının Odak Noktası [58].....	37
Şekil 2. 7. Temas Açısı [61].....	39
Şekil 2. 8. Katı bir yüzey üzerindeki sıvı damlasının, katı-sıvı-hava veya gazarasındaki üçlü temas noktasında oluşan denge temas açısı [61].....	40
Şekil 2. 9. Wilhelmy Plaka Metodu [66].....	44
Şekil 2. 10. Sönümsüz serbest titreşim şematik gösterimi.....	47
Şekil 2. 11. Sönümlü serbest titreşim şematik gösterimi.....	48
Şekil 2. 12. Zorlamalı ve sönümlü kütle-yay sistemi şematik gösterimi.....	49
Şekil 3. 1. İki delik arası mesafe: 2500 µm.....	52
Şekil 3. 2. İki delik arası mesafe:2000 µm.....	52
Şekil 3. 3. İki delik arası mesafe:1500 µm.....	52
Şekil 3. 4. İki delik arası mesafe:1000 µm.....	53
Şekil 3. 5. İki delik arası mesafe: 2500 µm.....	53
Şekil 3. 6. İki delik arası mesafe:2000 µm.....	54
Şekil 3. 7. İki delik arası mesafe:1500 µm.....	54
Şekil 3. 8. İki delik arası mesafe:1000 µm.....	54
Şekil 3. 9. ImageJ Programı.....	55
Şekil 3. 10. Damla temas açısının ölçümü-1.....	57
Şekil 3. 11. Damla temas açısının ölçümü-2.....	57
Şekil 3. 12. Su damlasının temas açısı ölçümünün şematik görüntüsü.....	58
Şekil 3. 13. Deney düzeneği görüntüsü.....	59
Şekil 3. 14. Piezoelektrik seramik disk görüntüsü [77].....	61
Şekil 3. 15. Damla iz düşüm alanı üstten görüntüsü.....	62
Şekil 4. 1. Gözenek merkezleri arası mesafe:2500 µm.....	63
Şekil 4. 2. Gözenek merkezleri arası mesafe: 2000 µm.....	64
Şekil 4. 3. Gözenek merkezleri arası mesafe: 1500 µm.....	64
Şekil 4. 4. Gözenek merkezleri arası mesafe:1000 µm.....	65
Şekil 4. 5. Gözenek merkezleri arası mesafe: 2500 µm.....	66
Şekil 4. 6. Gözenek merkezleri arası mesafe: 2000 µm.....	66
Şekil 4. 7. Gözenek merkezleri arası mesafe: 1500 µm.....	66
Şekil 4. 8. Gözenek merkezleri arası mesafe:1000 µm.....	67
Şekil 4. 9. Paslanmaz çelik iki delik arası 1000 µm arka yüzey.....	68
Şekil 4. 10. Paslanmaz çelik iki delik arası 1000 µm ön yüzey.....	68
Şekil 4. 11. Paslanmaz çelik iki delik arası 1500 µm arka yüzey.....	69
Şekil 4. 12. Paslanmaz çelik iki delik arası 1500 µm ön yüzey.....	69
Şekil 4. 13. Paslanmaz çelik iki delik arası 2000 µm arka yüzey.....	69
Şekil 4. 14. Paslanmaz çelik iki delik arası 2000 µm ön yüzey.....	70
Şekil 4. 15. Paslanmaz çelik iki delik arası 2500 µm arka yüzey.....	70
Şekil 4. 16. Paslanmaz çelik iki delik arası 2500 µm ön yüzey.....	70
Şekil 4. 17. Pirinç malzeme iki delik arası 1000 µm arka yüzey.....	71
Şekil 4. 18. Pirinç malzeme iki delik arası 1000 µm ön yüzey.....	71
Şekil 4. 19. Pirinç malzeme iki delik arası 1500 µm arka yüzey.....	71
Şekil 4. 20. Pirinç malzeme iki delik arası 1500 µm ön yüzey.....	72
Şekil 4. 21. Pirinç malzeme iki delik arası 2000 µm arka yüzey.....	72
Şekil 4. 22. Pirinç malzeme iki delik arası 2000 µm arka yüzey.....	72
Şekil 4. 23. Pirinç malzeme iki delik arası 2500 µm arka yüzey.....	73
Şekil 4. 24. Pirinç malzeme iki delik arası 2500 µm ön yüzey.....	73

Şekil 4. 25. Pirinç ve Paslanmaz çelik yüzeylerin frekans ivme grafiği.....	78
Şekil 4. 26. Paslanmaz çelik yüzeylerin frekans ivme grafiği.....	79
Şekil 4. 27. Pirinç yüzeylerin frekans ivme grafiği.....	79
Şekil 5. 1. Delikli pirinç plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi.....	82
Şekil 5. 2. Deliksiz pirinç plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi.....	83
Şekil 5. 3. Delikli pas. çelik plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi.....	84
Şekil 5. 4. Deliksiz paslanmaz çelik plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi.....	85
Şekil 5. 5. Pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi.....	86
Şekil 5. 6. Deliksiz pirinç ve deliksiz paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi.....	87
Şekil 5. 7. Frekans süpürme ve deliksiz pirinç plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi.....	89
Şekil 5. 8. Frekans süpürmede delikli paslanmaz çelik plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi.....	90
Şekil 5. 9. Pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi.....	91
Şekil 5. 10. Frekans süpürme ile paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi.....	92
Şekil 5. 11. Frekans Süpürme ile pirinç plaklara ait iz düşüm alan değişimi.....	92
Şekil 5. 12. Karşılaştırmalı pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişim.....	94
Şekil 5. 13. Karşılaştırmalı pirinç plaklara ait iz düşüm alan değişimi.....	94
Şekil 5. 14. Karşılaştırmalı paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi.....	95
Şekil 5. 15. Damla atomizasyonu görseli.....	96

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo 2. 1.</b> Pirinç malzemenin özellikleri [44] .....	30
<b>Tablo 2. 2.</b> Paslanmaz Çelik Malzemelerin Özellikleri .....	33
<b>Tablo 3. 1.</b> Piezoelektrik seramik disk malzeme özellikleri [77].....	61
<b>Tablo 4. 1.</b> Gözenekli pirinç ve paslanmaz çelik plakların delik çapları ölçümleri .....	74
<b>Tablo 4. 2.</b> Damlanın temas açısı ölçüm sonuçları .....	75
<b>Tablo 4. 3.</b> Gözenekli pirinç ve paslanmaz çelik plağın gözenek merkezleri arasimesafesinin mikroskop ölçüm sonuçları.....	76
<b>Tablo 4. 4.</b> Gözenekli paslanmaz çelik plağın iki gözenek arası mesafenin gerçekdeğerleri .....	77



## BİRİNCİ BÖLÜM

### GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesi ve endüstriyel süreçlerin karmaşıklığı, daha verimli ve hassas yöntemlere olan ihtiyacı arttırmıştır. Atomizasyon ve piezoelektrik malzemeler, bu karmaşık süreçlerin çözümünde önemli rolere sahiptir. Atomizasyon, sıvıların ince damlacıklara ayrılmasını sağlayan bir yöntem olarak birçok endüstriyel uygulama alanının merkezinde yer almaktadır. Titreşim destekli damla atomizasyonu, sıvıların titreşim enerjisi kullanılarak daha küçük damlalara bölünmesini amaçlayan bir tekniktir. Bu yaklaşım, birçok endüstriyel ve bilimsel uygulama alanında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Bu atomizasyon yöntemi prensibi, piezoelektrik etki gibi bir enerji kaynağı kullanılarak titreşim üretilmesine dayanır. Bu titreşim enerjisi sıvı damlacıklarını daha küçük parçalara ayırır. Bu genellikle yüksek frekansta gerçekleşir. Temel olarak titreşim kaynaklı damla atomizasyonu süreci, plakaya sabitlenmiş bir piezoelektrik disk ile plaka üzerine yerleştirilmiş bir sıvı damlasını içerir. Bu titreşim sinüzoidal sinyallerden meydana gelir. Yüksek frekanslarda uyarılma genliği belirli bir kritik eşiği aşar. Uyarılma genliği ile kritik eşiği aştıktan sonra, damla yüzeyi kararlı olmayan hale gelir. Uyarılma genliği arttıkça damlalar bu sinüs dalgaları tepelerinden atılmaya başlar.

Bu atomizasyon yöntemi, kumaş kurutma teknolojilerinde, tekstil endüstride, elektronik cihazların soğutulmasında, atomize edilmiş soğutucu sıvıların, elektronik bileşenlerin ısını daha hızlı şekilde uzaklaştırılmasında, gıda sanayinde, yiyecek ve içecek üretiminde sıvı malzemelerin püskürtülmesinde, aroma eklemek veya ambalajlama işlemlerinde, ilaç endüstrisinde, ilaçların sprey veya aerosol formunda uygulanmasında, kozmetik ürünlerde, parfüm, saç spreyi gibi kozmetik ürünlerin sprey formlarında dağıtılmasında, havacılıkta, jet motorlarının yakıtlarında, tarımda, zirai ilaçların bitkilere püskürtülmesinde, tıp alanında, astım, bronşit gibi solunum yolu problemleri tedavilerinde kullanılan solunum cihazları gibi çeşitli ilgi alanlarına ve kullanım alanlarına sahiptir .

Piezoseramikler ve piezopolimerler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren veya elektrik varlığında mekanik gerilim üreten piezoelektrik

özelliklere sahip malzemelerdir. Piezoseramikler, piezopolimerlere göre daha kırılğan olmalarına rağmen, yüksek elektromekanik sabitleri ve geniş bir titreşimsel erişim aralığı sayesinde daha fazla güç üretebilirler. PZT (kurşun zirkonat titanat), piezoelektrik dönüştürücüler olarak 1950'lerde Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilmiştir ve bugün mühendislikte kullanılan piezoseramikler arasında özellikle PZT-5A ve PZT- 5H en yaygın olarak kullanılan türlerdir. Öte yandan, en popüler piezopolimer olan PVDF, esnek ve kolayca uzatılabilen yarı kristal bir polimerdir. Ayakkabılar ve sırt çantaları gibi uygulamalar için uygun olan bu malzeme, kolay bükülebilirliği ve piezoseramiklere göre daha düşük yoğunluğu ile öne çıkar. Bu özellikler, piezoseramik ve piezopolimer malzemelerin geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasına olanak tanır.

Literatürde damla kaynaklı titreşim dinamikleri birçok çalışmada incelenmiştir. James ve arkadaşları, [1] damlacık püskürtme sürecinin dinamiklerini araştırdı ve püskürtme için gerekli koşulları ile sistem parametrelerinin atomizasyon süreci üzerindeki etkilerini belirledi. James ve arkadaşları [2], titreşimle indüklenen damlacık püskürtmesini inceledi. Zorlayıcı frekans düşük olduğunda aksel simetrik dalga modlarının, yüksek olduğunda ise aksel olmayan simetrik modların meydana geldiğini bildirdiler.

Simülasyon programları kullanılarak, farklı yöntemlerle doğal frekans bölgeleri ve mod şekilleri hesaplanabilir [3,4]. Ayrıca, düşük hata oranıyla yapılan deneysel modal analiz, teorik hesapların gerçek çevre koşullarıyla olan uyumunu sağlamaktadır. Ve yapıların titreşim davranışları hakkında bilgiler sunar [5],

Vukasinovic ve arkadaşları [6], yüksek hızlı görüntüleme tekniği kullanarak küçük damlacıkların püskürtülmesini inceledi. Damla çapının zorlayıcı frekansa  $f$  (2/3) oranında bağlı olduğunu ve püskürtülen damlacıkların çıkış hızının hem zorlayıcı uyaran genliğine hem de değişim hızına bağlı olduğunu belirttiler. Vukasinovic ve arkadaşları yine 2000 yılında yapmış olduğu çalışmada, titreşimli bir diyafram üzerine yerleştirilen bir sıvı damlacığının atomizasyonunu deneysel olarak incelemişlerdir. Sıvı dalgaları ve püskürtme sürecini görselleştirmişlerdir [7].

Palan ve Shepard [8], su damlacıklarını atomize etmek için titreşim ve akustik tabanlı yöntemleri inceledi. Damlacık atomizasyonu için gereken ivme seviyelerini belirlediler. Deepu ve arkadaşları [9], yüksek hızlı kamera aracılığıyla çeşitli viskoz sıvılar için damlacık atomizasyonunu gösterdi. Kararsız modun dalga boyunu belirlemede önemli bir rol oynadığını bildirdiler.

1831'de, Michael Faraday [10] dikey olarak titreştirilen bir sıvı sütunun atomize olması esnasında meydana gelen yüzey dalgalarıyla ilgili öncü deneyler yapmıştır. Bu deneyler, titreşim kaynaklı sıvı atomizasyonu alanının gelişimine zemin hazırlamıştır. Faraday'ın bu çalışmalarından bu yana, bu konuda pek çok deneysel araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar, atomizasyon süreçlerinin temelinde yatan fiziksel prensipleri aydınlatmış ve çeşitli teknolojik uygulamalarda bu süreçlerin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamıştır. Mevcut çalışma, ultrasonik frekansı uyaran tek damla atomizasyonuna odaklanmaktadır. Bir sıvı damlasının titreşimleri üzerine birçok deneysel araştırma yapılmış ve matematiksel modeller önerilmiştir. Faraday deneysel çalışmalara öncülük etmiş ve 1831 yılında dikey titreşime maruz kalan bir sıvı kütesinin serbest yüzeyinde dalgaların oluştuğunu rapor etmiştir.

1871 yılında Lord Kelvin ve 1883 yılında Lord Rayleigh, hidrodinamik ve dalga teorisine dayalı yüzey dalgaları üzerine matematiksel modeller geliştirmişlerdir [11]. Bu modeller, çeşitli kuvvetler altında sıvıların davranışını anlamada önemli bir ilerleme sağlamış ve sıvı atomizasyonu alanında ileri araştırmalara temel oluşturmuştur. Bu teorik çalışmalar, sıvı atomizasyonu ve ilgili uygulamaların anlaşılmasında ve geliştirilmesinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur [12].

1962 yılında Lang, atomizasyon süreci sırasında oluşan damlacıkların boyutlarının nicel ölçümüne ilişkin bir çalışma yayınlamış ve damlacıkların ortalama çapı ile yüzey gerilimi, akışkanın yoğunluğu ve uyarma frekansı arasında bir ilişki kurmuştur [16]. Bu ilişki, günümüzde Lang yasası olarak bilinir ve atomizasyon alanında damlacıkların boyutlarını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır. Lang yasasında yer alan katsayıyı, deneysel olarak belirlenmiş ve sonraki araştırmalarla doğrulanmıştır. Bu yasa, atomizasyon sürecinde oluşan damlacıkların boyutlarını tahmin etmede kritik bir rol oynar

ve bu alanda yapılan çalışmalara önemli bir katkı sunar. Lang yasasının formülasyonu, atomizasyon mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmuş ve bu alanda yapılan deneysel ve teorik çalışmaların gelişimini desteklemiştir. Bu şekilde, Lang'ın çalışması, atomizasyon sürecinin kapsamlı bir şekilde incelenmesine ve bu sürecin çeşitli uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Goodridge ve ark. 1997'de yaptığı çalışmalarda su, etanol ve gliserin-su çözeltilerinin fırlatma eşiği üzerindeki viskoz etkilerini belirlemişlerdir [13].

Smith ve ark. 1998 yılında, bir titreşimli plaka üzerine konulan sıvı damlasının dinamiklerini incelemiş ve plakanın rezonans frekansını hem teorik hem de deneysel olarak belirlemişlerdir [14].

James ve ark. 2003 yılında yapılan çalışmada, damlacık püskürtme süreci için gerekli sistem parametreleri belirlenmiş ve düşük frekansla çalışan, damlacık püskürtmeli, titreşim kaynaklı geçici akışkan mekaniklerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. [15].

Vukasinovic ve ekibinin yaptığı çalışmada, bir diyaframın salınımlarıyla atomize olan damlacıkların parçalanma süreçleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma, damlacıkların sıçrama mekanizmalarını ve spreyn oluşumunda sıvının viskozitesinin rolünü ortaya koymuştur [17].

Barreras ve ekibi 2002 yılında ultrasonik su atomizasyonunun niteliklerini keşfetmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlar. Bu çalışmada, damlacık boyutları bir difraktometre kullanılarak görselleştirilmiş ve ölçülmüştür [18].

Ramisetty ve ekip arkadaşları ise 2013 yılında ultrasonik bir atomizörde damlacık boyutlarının dağılımını fotoğrafik analiz yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Araştırmada, çalışma frekansı, güç dağılımı, akış hızı ve sıvının özelliklerinin damlacık boyutları üzerindeki etkileri incelenmiştir [19].

Deepu ve ekibi, farklı viskozitelerdeki sıvıların damlacık atomizasyon süreçlerini yüksek hızlı kameralar kullanarak gözlemlemişler ve viskozitenin, dalga boyunun kararsızlık modunu belirlemedeki kritik etkisini ortaya koymuşlardır [29]. Deepu ve ekip arkadaşları 2018 yılında, ultrasonik titreşime zorlanmış bir damlacığın atomizasyon davranışını deneysel olarak araştırmıştır.

Parçalanma mekanizmalarını tahmin etmek için teorik bir model önerilmiştir [31].

Goodridge ve arkadaşlarının çalışmalarında, parametrik olarak uyarılan yüzey dalgalarının kırılma durumu incelenmiştir [20]. Bu çalışmada, dalga tepelerinden küçük damlacıkların ayrışması gözlemlenmiştir. Ayrıca, ivmenin artmasıyla kırılma olaylarının sayısının arttığı, ivmenin azalmasıyla ise bu olayların kademeli olarak azaldığı ve nihayetinde sifıra yaklaştığı belirtilmiştir. Fırlatma olaylarının ivmeye bağlı analizi, fırlatma eşiğinin belirlenmesine ve dalga yüksekliği dağılımı hakkında önemli çıkarımlar yapılmasına imkan vermiştir. Ayrıca, fırlatmalar arasındaki zaman aralıklarının bir Poisson dağılımı izlediği bulunmuştur. Bu bulgular, yüzey dalgalarının kırılma mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuş ve dalga dinamiklerinin incelenmesinde yeni perspektifler sunmuştur.

Literatürde incelenen ve çalışılan bazı örnekler şunlardır: Cveticanin değişkenkütleli sistemlerde genlik ve frekans üzerine sönümlenme etkilerini analiz etmiştir [21]. Terumichi ve arkadaşları değişken uzunlukta bir ipin zorlanmış titreşimlerini araştırmışlar, bu sistem iki serbestlik derecesine sahip olup, ipin eksenal hızının, ipin uzunluğuna bağlı olarak rezonans geçişinde nasıl değiştiğini analitik olarak göstermişlerdir [22]. Holl ve ekibi, zamanla değişen kütleli bir osilatör modeli üzerinde çalışarak osilatör titreşimleri için analitik çözümler sunmuşlardır, bu çözümler üstel ve sinüzoidal kütle değişimi gösteren sistemler için geçerlidir [23]. Flores ve ekibi 2003 yılında değişken kütleli bir osilatörün dinamiklerini detaylı incelemiş ve osilatörün kütle değişiminin zamanla nasıl modelleneceğini göstererek kesin çözümler elde etmişlerdir [24]. Burgh ve arkadaşları 2006 yılında, yağmur ve rüzgarın osilatör üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla değişken kütleli tek serbestlik dereceli bir sistem için matematiksel modelleme yapmışlardır [25]. Horssenise 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada zamana göre değişen kütleyle sahip sönümlü bir tek serbestlik dereceli sistemin titreşimlerini ele almış, hem zorlanmış hem de serbest titreşimleri incelemiştir [26]. James ve ark. [1] ile Sarı ve Aydın [27] tarafından yapılan çalışmalar, enine yönde harmonik olarak zorlanan bir plakanın deney başlangıcındaki geçici davranışlarını incelemiştir. Bu araştırmalarda, sistemin geçici davranış sergilediği durumlarda damla

atomizasyon hızının yükseldiği; ancak sistem kararlı durum davranışına geçtiğinde bu hızın düştüğü gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışması, gözenekli ve gözeneksiz pirinç ile paslanmaz çelik plakalarını yüzeylerine yerleştirilen belirli hacimdeki su damlalarının dinamik davranışlarını incelemeyi ve bu malzemelerin özellikleri ile gözenekli plakalardaki gözenek aralıklarının damla atomizasyonu üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Araştırmada, paslanmaz çelik ve pirinç plakalar, lazer markalama tekniği kullanılarak, gözenek aralıkları sırasıyla 500, 1000, 1500 ve 2000 mikrometre olacak şekilde delinmiştir. Bu araştırmada, atomizasyon süreci sırasında plaka yüzeyine temas eden damlanın alanındaki zaman içindeki değişiklikler ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Damlacık boyutu ölçümleri üzerine geniş çapta çalışmalar yapılmıştır. Donnelly ve ekibi (2004), [28] zorlama frekansının artışı ile damlacık çapının nasıl azaldığını incelenmiştir. Avvaru ve arkadaşları 2006 yılında ise atomizasyon mekanizmasını daha iyi anlayabilmek için deneysel çalışmalar yapmış ve titreşim kaynaklı damla atomizasyonunun damlacıkları hızla püskürtmenin bir yöntemi olduğunu vurgulamışlardır [29].

Gözenekli plakalardaki deliklerin gerçek çapları mikroskop kullanılarak ölçülmüştür. Atomizasyon deneyleri, plakaların alt yüzeylerine monte edilen piezoelektrik diskler aracılığıyla sinüs sinyali uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Su damlalarının deney süresince geçirdiği değişiklikler, plakaların üst yüzeyine yerleştirilen bir kamera ile kaydedilmiş ve elde edilen görüntüler bir analiz programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu programla damlaların alan ölçümleri yapılarak bu ölçümler grafikler halinde sunulmuştur.

## İKİNCİ BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER

#### 2.1 Atomizasyon Teorisi

Atomizasyon, sıvıların ince damlacıklara dönüştürülme işlemidir ve bu işlem, birçok endüstriyel ve bilimsel uygulamada kritik bir rol oynar. Fiziksel mekanizması, sıvının basınç, hız ve çevresel koşullar altında nasıl davrandığına bağlı olarak değişir. Genel olarak, atomizasyon işlemi, sıvıyı bir nozuldan yüksek hızda püskürtmekle başlar. Bu aşamada, sıvı, nozulun şekli ve akışkanın hızına bağlı olarak belirli bir dağılım profili oluşturur.

Ultrasonik atomizasyon, yüksek frekans dalgalarının kullanımı ile bir sıvının ince damlacıklara veya aerosollere dönüştürülmesi sürecidir. Bu teknoloji, sıvıların atomizasyonu için etkili bir yöntem olarak kabul edilir ve iki ana teorik açıklama ile desteklenir. İlk olarak, kılcak dalga hipotezi, ultrasonik dalgaların sıvı yüzeyinde dalgabenzeri hareketler oluşturduğunu ve bu hareketlerin zamanla kararsızlaşarak sıvının damlacıklara ayrılmasına katkı sağlar [32]. Diğer yandan, kavitasyon hipotezi, ultrasonik dalgaların sıvı içinde minik kabarcıkların oluşumuna neden olduğunu ve bu kabarcıkların patlamasıyla hidrolik şok dalgalarının sıvıyı atomize ettiğini savunur. Yüksek frekans, kavitasyon etkisini azaltan örnekler de mevcuttur [33]. Bu süreçler, ultrasonik atomizasyonun çeşitli uygulamalarında, özellikle ince ve homojen damlacık dağılımı gerektiren alanlarda, kritik öneme sahiptir.

Kılcak damla yüzeylerindeki sıvının damlacık püskürten vaziyetlerine geçiş, Rayleigh-Taylor kararsızlığı, bir sıvı damlası üzerine uygulanan basıncın artırılması yoluyla tetiklenir ve bu süreç, dalga tepelerinin damlacıklara ayrılmasına kadar devam eder. Bu süreçte, damlanın fırlatma aşamasına geçmeden önce, dikey olarak salınan dalgalar bir dizi değişimden geçer [34, 35]. İlk olarak, damlanın yüzeyinde oluşan basit dalga yapısı, artan zorlama ile birlikte periyodik ve daha kararlı bir dalga formuna evrilir. Daha sonra, zorlamanın yeterince büyüklüğe ulaşması ile, bu dalga formu düzensiz bir hale dönüşür. Bu düzensiz durum, genellikle yukarı doğru jetler veya sivri uçlar şeklinde büyük genlikli dalgalar üretir ve bu dalgalar sonunda genellikle damlacıklara dönüşür. Bu fenomen, sıvı dinamiklerinde önemli bir rol oynayan Rayleigh-Taylor kararsızlığının tipik bir gösterimidir ve sıvıların davranışını

anlamak için kritik bir örnek teşkil eder. Bu süreç, akışkanlar mekaniği ve sıvı dinamikleri alanlarında, kararsızlık fenomenlerinin ve bunların sonuçlarının incelenmesinde kullanılır [35, 36].

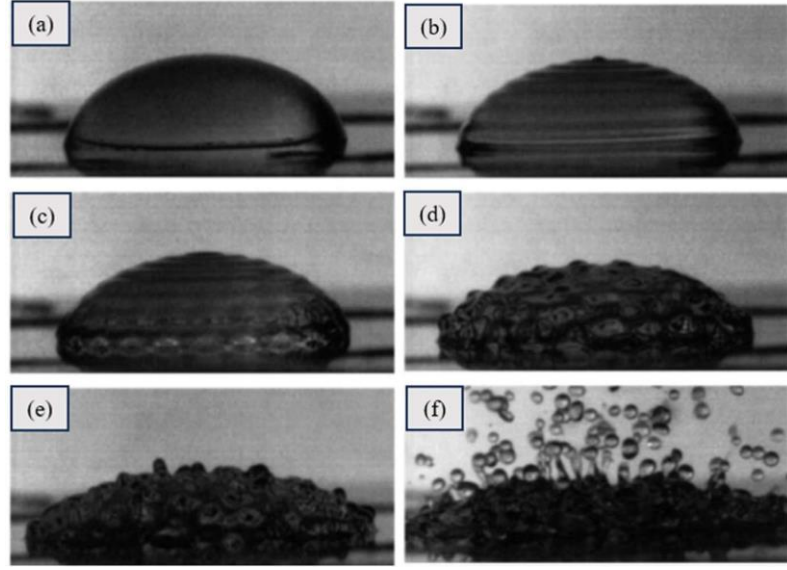
Şekil 2.1'de sunulan görsel dizide, piezoelektrik seramik bir disk tarafından titreştirilen metal bir diyafram üzerine yerleştirilmiş 100-110 µl hacimli su damlasının, uyarma genliği arttıkça geçirdiği değişiklikler gözlemlenmektedir. Şekil 2.1(a), herhangi bir zorlama uygulanmamış, başlangıç durumundaki damlayı gösterir. Uyarma genliğinin düşük olduğu durumlarda, Şekil 2.1(b)'de görüldüğü gibi, damlanın serbest yüzeyinde aksel simetrik ve kararlı dalgalar oluşur. Bu dalgalar, uyarmanın frekansıyla eşleşir ve en düşük uyarma genliğinde bile gözlemlenebilirler. Uyarma genliğinin kritik bir değere ulaştığı durumda, damlanın temas hattı boyunca azimutal bir kararsızlık modu tetiklenir. Şekil 2.1(c)'de görüldüğü gibi, bu durum aksel simetrik dalgalarla birleşerek, damlanın serbest yüzeyinde yüksek dalga sayısına sahip azimutal dalgaların oluşmasına yol açar.

İlk başta sabit olan bu dalga, deneydeki kusurlar nedeniyle damlanın etrafında saat yönünde veya saat yönünün tersine dönerek hareket eder. Bu tür kararsızlıklar, Faraday dalgası kararsızlıklarının klasik işaretleri olan serbest yüzey hareketinde alt harmonik frekansların ortaya çıkması ile karakterize edilir. Daha yüksek uyarma genliklerinde, serbest yüzey dalgalarının büyüklüğü ve karmaşıklığı artar ve zamanla değişen bir doğa kazanır. Şekil 2.1 (d), bu artan karmaşıklığın ve büyüklüğün görselleştirilmesidir. Zaman içinde, sürekli hareket halinde olan çeşitli çukurların ve sivri uçların gelişimi gözlemlenir, bu durum Şekil 2.1 (e)'de temsil edilmiştir. Nihayetinde, Şekil 2.1 (f), damlanın patlama sürecinin başlangıç aşamasını, yani su damlasının yapısal bütünlüğünün bozulmaya başladığı anı yansıtır. Bu aşamada, yüzey dalgalarının şiddeti o kadar artmıştır ki, damla artık ilk baştaki kararlı halini koruyamaz. Bu süreç, uyarmanın genliği arttıkça sıvı damlasının dinamik davranışının nasıl evrildiğini ve karmaşık fiziksel olayların ardında yatan mekanizmaları gösteren etkileyici bir örnektir.

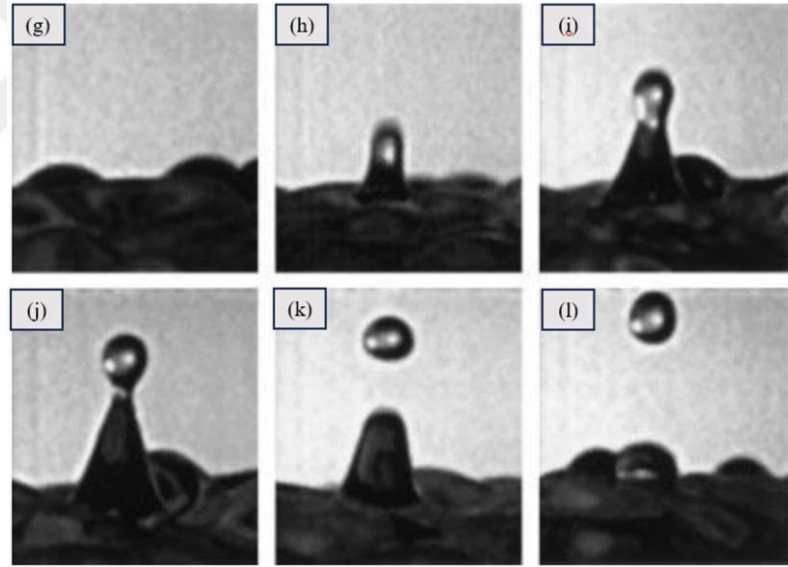
Bu gözlemler, sıvı dinamiklerindeki karmaşık fenomenlerin anlaşılmasında ve akışkanlar mekaniği alanındaki teorik modellerin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir.

Damlacık püskürtme sürecinin başlamasıyla birlikte, dalga hareketi ve damlacık püskürtme etkinlikleri damlanın serbest yüzeyine eşit bir biçimde yayılır. Patlama olayının en dikkat çekici yönü, damlacık püskürmesinin ilk belirmesinden bir süre sonra ortaya çıkar. Bu zaman aralığı, uygulanan uyarma genliğine bağlı olarak değişir. Eğer levhaya aniden yüksek bir uyarma sinyali uygulanırsa, patlama hemen gerçekleşebilir.

Diğer bir yandan, daha düşük uyarma genlikleri kullanıldığında patlama, zorlamanın uygulanmasından sonraki birkaç saniye veya hatta bir dakika sonra meydana gelebilir. Bu durum, patlama olayının zamanlamasının, uygulanan uyarma şiddetine bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini gösterir. Ayrıca, bazı durumlarda damlacık püskürtme gerçekleşse de patlama olayı meydana gelmeyebilir. Bu durum, damlacık püskürtme ve patlama süreçlerinin dinamiklerinin karmaşık doğasını yansıtır ve sıvı dinamikleri alanını inceler. Şekil 2.1’de salınımların hızlanması belirli bir eşiğe ulaştığında, damlacıkların kazandığı momentum, boyun kısımlarındaki yüzey gerilimini aşmak ve damlacıkların ana sıvı gövdesinden ayrılmasını sağlamak için yeterli olur. Bu süreç, sıvı damlalarının dinamik ayrılma sürecini ve sıvı yüzeyindeki karmaşık dalga etkileşimlerini gösterir ve akışkanlar mekaniğinde atomizasyonun temel mekanizmalarını anlamada kritik bir rol oynar.



Şekil 2. 1. Titreşim yapan su damlasının hareketleri [37]



Şekil 2. 2. Titreşim yapan su damlasının patlaması görüntüsü [37]

## 2.2 Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler, mekanik gerilim uygulandığında elektrik potansiyeli üretebilen veya tersine elektrik potansiyeli uygulandığında mekanik değişiklikler gösteren özel malzemelerdir. Bu özellikleri nedeniyle, piezoelektrikmalzemeler birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır.

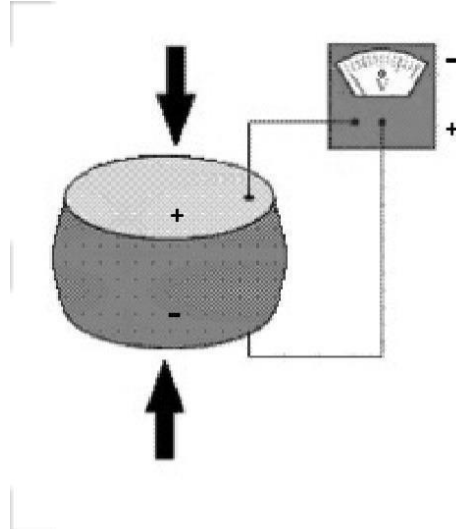
Piezoelektrik, belirli kristalin malzemelerin benzersiz ve ilginç bir

özelliği olarak, mekanik ve elektrik enerjisi arasında dönüşüm sağlar. Bu fenomen, Pierre ve Jacques Curie tarafından 1880'de keşfedilmiş olup, elektromekanik bilim alanında önemli bir kilometre taşı olarak kabul edilir.

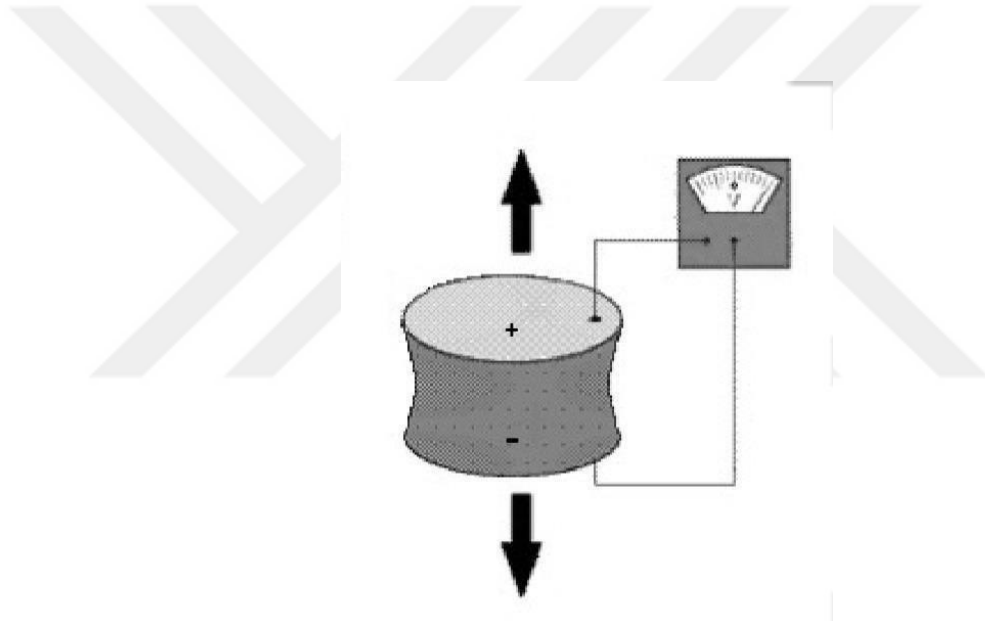
Piezoelektrik etkinin özü, malzemenin mekanik strese maruz kaldığında elektrik yükü üretebilme yeteneğindedir. Bu, doğrudan piezoelektrik etki olarak bilinir. Örneğin, bir piezoelektrik malzeme sıkıştırıldığında, büküldüğünde veya eğildiğinde, yüzeyleri boyunca elektrik voltajı üretir. Bu özellik, piezoelektrik malzemeleri sensörler, aktüatörler ve transdüserler gibi çeşitli uygulamalarda son derece kullanışlı kılar.

Örneğin, kuvvet transdüserleri, basınç veya ivme gibi bir mekanik kuvveti elektrik sinyaline dönüştürmek için doğrudan piezoelektrik etkiyi kullanır [38]. Öte yandan, ters piezoelektrik etki, bir piezoelektrik malzemeye elektrik alanı uygulandığında gözlemlenir ve bu, malzemenin şeklinin veya boyutunun değişmesine neden olur. Bu etki, aktüatörler ve motorlar gibi uygulamalarda kullanılır; burada bir piezoelektrik malzemeye uygulanan elektrik voltajı, genleşme veya büzülme gibi mekanik bir hareketi tetikler. Bu benzersiz özellik, tıbbi cihazlar ve hassas makineler gibi mikro-hareket uygulamalarında hassas kontrol sağlar. Piezoelektrik malzemelerin özellikleri, kristal yapılarına büyük ölçüde bağlıdır. Piezoelektrik etki doğal olarak anizotropiktir, yani kristal örgüsünün yönelimine bağlı olarak değişir. Tüm kristalin malzemeler piezoelektrik özellikler sergilemez. Bu özellik, örgüsünde simetri merkezi olmayan kristallere sınırlıdır.

Mekanik kuvvet, uygulandığı malzemede gerilim yaratır ve bu gerilim, malzemenin şeklini değiştirerek mekanik bir reaksiyon oluşturur. Direkt piezoelektrik etki ise, bu mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü sürecini ifade etmektedir (Şekil 2.2). Bir piezoelektrik malzeme elektrik alanına maruz kaldığında mekanik bir deformasyon üretir. Bu sürecin tersi ise, ters piezoelektrik etki olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.3). Bu, malzemeye uygulanan elektriksel enerjinin mekanik harekete dönüşmesi anlamına gelir. Bu çift yönlü piezoelektrik etki, tıbbi görüntüleme cihazlarındaki ultrasonik dalgaların üretiminden elektronik devrelerdeki yüksek voltajların üretilmesine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır.



Şekil 2. 3. Direkt Piezoelektrik Etki Durumu [39]



Şekil 2. 4. Ters Piezoelektrik Etki Durumu [39]

Piezoelektrik özelliğe sahip malzemeler, mekanik enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilme veya bunun tersini gerçekleştirebilme gibi dikkat çekici özelliklere sahiptir. Piezoelektrik ile ilgili, 1880 yılında ünlü Fransız fizikçi Curie kardeşler tarafından keşfedilmiş bir fenomendir. Ancak bu malzemelerin pazardaki varlığı ve kullanımı, sonraki bir yüzyılda önemli ölçüde artış göstermiştir. Terim, Yunanca piezo, (basınç) kelimesinden türemiştir ve bilimsel çalışmalarda sıklıkla mekanik stresi ifade etmek için kullanılır. Piezoelektrik özelliklerin ortaya çıkması için, kristalin yapının belirli şartları karşılaması gerekir. Bu tür kristaller, merkezci olmayan simetrik

yapıya sahip olanlar olup, piezoelektrik özellikleri sergileme kapasiteleri ile öne çıkarlar.

Piezoelektrik malzemelerin bu benzersiz özellikleri, günümüz teknolojisinde geniş bir uygulama alanı bulmalarını sağlamıştır [75, 76].

### 2.3 Plakların Genel Özellikleri

Plak ve kabuk teorisinin evrimi, deneysel ve teorik yaklaşımların entegrasyonu sonucunda meydana gelmiştir. Bu alan, sayısız tanınmış matematikçilerin, bilim adamlarının ve mühendislerin katkılarıyla derin ve çeşitli bir tarihe sahiptir. Plak davranışının incelenmesi, öncelikle serbest titreşimlerin analizi ile başlatılmıştır.

Plakların farklı özellikler göstermesinin temel sebepleri arasında kalınlıkları ve desteklenme şekilleri yer alır. Bu nedenle, plakların analiz sürecinde, plakların geometrik yapıları, destekleme yöntemleri, kullanılan malzemenin karakteristikleri, uygulanan yükler ve bu yüklerin uygulanma biçimleri gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörlerin bütünsel olarak değerlendirilmesi, plaklarındayanımlı ve performansı hakkında detaylı bilgiler sağlar. Öte yandan, analiz prosedürleri, plakların kullanıldığı özel alanlara göre değişiklik gösterebilir ve etkileyen faktörler de bu doğrultuda varyasyonlar sergileyebilir. Sonuç itibarıyla, plakların analizi, bu unsurların hassasiyetle incelenmesiyle yürütülerek, sağlamlığı ve fonksiyonelliği üzerine kapsamlı bir anlayış sunabilir.

1776 yılında, Leonard Euler, serbest titreşimlerin incelenmesinde ve plakların davranışlarının araştırılması konularının öncüsü olarak başlatan ilk kişidir. Araştırmaları, öğrencisi ve aynı zamanda torunu olan Jacob, Bernoulli tarafından genişletilmiş ve derinleştirilmiştir. Euler, özellikle ince plaklar üzerine odaklanarak, membran teorisini formüle etmiştir. Bunun yanı sıra, dairesel, üçgen ve dikdörtgen şeklindeki ince plaklar için serbest titreşim analizlerini başarıyla gerçekleştirilmiştir. Euler, dairesel, üçgen ve dikdörtgen biçimindeki ince plakların serbest titreşim analizlerini çözümlenmek suretiyle önemli katkı sağlamıştır. Ardından, 1811'de matematik alanının önde gelen isimlerinden Joseph-Louis Lagrange, levha titreşimlerini açıklamak adına

dördüncü mertebeden bir kısmi diferansiyel denklem geliştirmiş ve bu yenilikçi çalışmasıyla geniş çaplı bir takdir kazanmıştır [40].

### **2.3.1 Pirinç Malzeme ve Genel Özellikleri**

Pirinç, endüstriyel ve mühendislik uygulamalarında tercih edilen öncü malzemeler arasında yer alır, bunun sebepleri arasında yüksek mukavemet, sertlik, ısıve elektrik iletkenliği, kolay işlenebilirlik, korozyona karşı direnç ve estetik görünümüsayılabılır. Ek olarak, pirinç malzemeler, maliyet açısından da ekonomik bir alternatiftsunar. Bu özellikleriyle, pirinç çok çeşitli uygulama alanlarında geniş bir kullanım imkânı sağlar. Pirinç malzemeler, çeşitli özellikleri nedeniyle bir dizi uygulama alanında kullanılır. Bu alanların genel olarak kullanımları aşağıdaki gibidir:

**Müzik Aletleri Yapımı:** Pirinç, trampetler, trombonlar, saksafonlar ve diğer üflemeli çalgılar gibi müzik aletlerinin yapımında kullanılır. Ses kalitesine katkıda bulunur ve dayanıklılık sağlar.

**Makine Parçaları ve Aletler:** Yüksek mukavemeti ve korozyon direnci nedeniyle, pirinç vida, civata, dişli gibi makine parçalarında ve aletlerde sıklıkla tercih edilir.

**Elektrik ve Elektronik Komponentler:** İyi bir elektrik iletkeni olması sebebiyle, pirinç elektrik konnektörleri, soketler ve anahtarlar gibi elektrikli aletlerde kullanılır.

**Sıhhi Tesisat Malzemeleri:** Su boruları, vanalar, musluklar ve bağlantı parçaları gibi sıhhi tesisat malzemelerinde kullanımı yaygındır, çünkü suya karşı korozyon direnci gösterir.

**Dekoratif Amaçlar:** Güzel görünüşü nedeniyle, kapı kolları, mobilya aksesuarları ve dekoratif objelerin üretiminde de kullanılır.

**Mühimmat:** Özellikle mermi kovanları gibi mühimmat parçalarının üretiminde pirinç yaygın olarak tercih edilir, zira şekillendirilebilir ve dayanıklıdır.

**Otomotiv Endüstrisi:** Otomotiv parçalarında, özellikle radyatör komponentleri ve diğer ısıya dayanıklı parçalarda kullanılır.

İnşaat Sektörü: İnşaat malzemelerinde, özellikle dekoratif elemanlar ve dayanıklı yapısı gerektiren alanlarda tercih edilen bir malzemedir.

Bu çeşitlilik, pirincin geniş bir kullanım spektrumuna sahip olmasını sağlar ve mühendislikten sanata, endüstriyel üretimden günlük kullanıma kadar pek çok alanda değerli kılar.

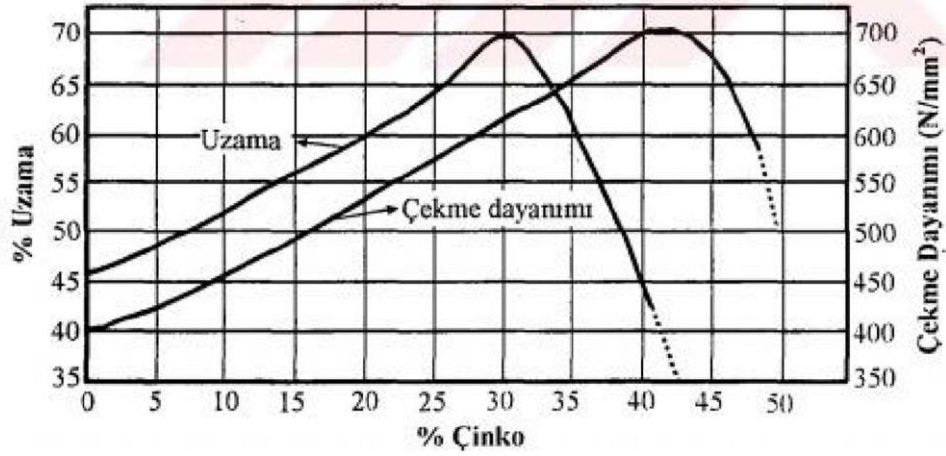
Pirinç, esas olarak bakır (Cu) ve çinko (Zn) elementlerinden oluşan bir alaşımdır. Bu iki metalin oranları, pirincin özelliklerini büyük ölçüde belirler. Bakır, alaşıma mukavemet ve korozyon direnci kazandırırken, çinko ise sertlik ve dayanıklılığı artırır. Pirinç alaşımları, içerdikleri çinko miktarına göre farklı türlerde olabilir; örneğin, daha yüksek çinko içeriği, genellikle daha sert ve dayanıklı bir pirinç türü oluşturur. Bununla birlikte, bazı pirinç türleri küçük miktarlarda başka elementler de içerebilir. Bunlar arasında kurşun (Pb), demir (Fe), alüminyum (Al) ve manganez (Mn) gibi elementler bulunabilir ve bu katkı maddeleri, pirincin işlenebilirliğini, mukavemetini ve diğer özelliklerini daha da iyileştirmek için eklenir [41].

Pirinç malzemelere alüminyumun yalnızca %1, %2 gibi küçük oranlarda eklenmesi, alaşımın deniz suyuna karşı korozyon direncini önemli ölçüde artırabilir. Öte yandan, kurşun ilavesi, alaşımın talaşlı işlenmesini kolaylaştırarak işlenebilirliğini iyileştirir. Bu nedenle, bakır ve çinko alaşımının, yani pirincin, kimyasal bileşimi dikkatlice seçilerek belirli özelliklerde malzemelerin elde edilmesi mümkündür [42].

Pirinç alaşımlarının mekanik özellikleri, alaşımda bulunan çinko içeriğine büyük ölçüde bağlıdır. Pirinçlerin mekanik mukavemeti, çinko oranının artmasıyla doğru orantılı olarak artar ve bu artış, yaklaşık %40 çinko oranında maksimum değere ulaşır. Ancak, pirinçlerin korozyon direnci ve süneklik özellikleri, çinko miktarının artmasıyla ters orantılı olarak azalma eğilimi gösterir. Özellikle, çinko oranı yaklaşık

%35 olduğunda, mukavemet ve süneklik açısından optimum bir dengeye ulaşıldığı gözlemlenir. Bu, mühendislik uygulamalarında malzeme seçimi ve tasarımı açısından önemli bir bilgi sunar, çünkü bu nokta, pirinç alaşımının hem yeterli mukavemeti hem de gerekli sünekliği sağladığı ideal bir kombinasyonu temsil eder. Bu bilgi, pirinç alaşımlarının çeşitli endüstriyel

uygulamalarda kullanımını etkileyen kritik bir faktördür (Şekil 2.4) [43].



Şekil 2. 5. Pirinç malzemesinin çinko miktarı ile değişen kopma uzaması ve çekme dayanımı değişimi grafiği [43]

Pirinç malzemesinin elastisite modülü, genellikle yaklaşık olarak 90 ile 120 GPa arasında değişir. Bu değer, alaşımın belirli kompozisyonuna ve işleme yöntemlerine bağlı olarak değişebilir. Özellikle, yüksek çinko içerikli pirinçler çoğunlukla bu aralığın bir ucunda yer alırken, daha düşük çinko içeriğine sahip pirinçler daha yüksek elastisite modülü değerlerine sahip olabilir. Bu nedenle, pirinç malzemesinin spesifik elastisite modülünü belirlemek için alaşımın kesin bileşimi ve işleme detayları önemlidir. Deneyde kullanılan pirinç malzemesinin özelliklerini içeren bilgiler, aşağıda tablo 2.1’de yer almaktadır.

**Tablo 2. 1.** Pirinç malzemenin özellikleri [44]

<b>Pirinç Malzemenin Özellikleri</b>	
Elastisite Modülü	116 GPa
Yoğunluk	8390 kg/cm <sup>3</sup> (20°C)
Poisson Oranı	0.3366

### **2.3.2 Paslanmaz Çelik Malzeme ve Genel Özellikleri**

Paslanmaz çelik, özellikle korozyon direnci, yüksek mukavemet, sıcaklık dayanıklılığı ve estetik görünüşü ile bilinen bir alaşım türüdür. Bu malzemenin temel bileşeni demir olup, krom, nikel ve diğer alaşım elementleri ile zenginleştirilmiştir. Kromun varlığı, malzemenin yüzeyinde oksijenle etkileşerek pasif ve koruyucu bir krom oksit tabakası oluşturmasına olanak tanır. Bu tabaka, malzemenin korozyona karşı direncini artırır ve hasar gördüğünde kendini yenileyebilir. Paslanmaz çelik, ayrıca mükemmel mekanik özellikler sergileyerek yüksek çekme mukavemeti ve iyi bir süneklik sunar. Yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği dayanıklılık, bu malzemenin aşırı sıcaklık koşullarında bile performansını korumasını sağlar. Estetik açıdan, parlak ve temiz bir yüzey sunması, dekoratif uygulamalarda tercih edilmesine yol açar. Bu özellikler, paslanmaz çeliği endüstriyel makinelerden, mutfak eşyalarına, tıbbi cihazlardan inşaat malzemelerine kadar geniş bir kullanım alanına sahip kılar.

Paslanmaz çelik, çok yönlü özellikleri sayesinde birçok farklı uygulama alanında kullanılır.

Paslanmaz çelik, çok yönlü özellikleri sayesinde birçok farklı uygulama alanında kullanılır. Bu alanlar:

Mutfak Eşyaları ve Aletleri: Paslanmaz çelik, mutfak gereçleri, tencere, tava, bıçaklar ve diğer pişirme aletleri için yaygın olarak kullanılır, zira

yiyeceklerle temasında güvenlidir ve kolay temizlenebilir.

**Medikal Ekipman ve Cihazlar:** Cerrahi aletler ve diğer medikal ekipmanlar paslanmaz çelikten yapılır, çünkü sterilizasyona uygun, paslanmaz ve dayanıklıdır.

**İnşaat ve Mimarlık:** Yapı malzemeleri, cephe kaplamaları, köprüler, sütunlar ve diğer inşaat elemanları için tercih edilir. Ayrıca, modern mimaride dekoratif amaçlar için sıklıkla kullanılır.

**Otomotiv Endüstrisi:** Otomobil ve diğer taşıtların egzoz sistemleri, motor parçaları ve karoseri bileşenleri gibi çeşitli parçalar paslanmaz çelikten üretilir.

**Ulaşım ve Altyapı:** Demiryolu araçları, otobüsler, metro ve tren istasyonları gibi ulaşım altyapısında kullanılır.

**Gemi İnşaatı ve Denizcilik:** Gemi gövdeleri, pervaneler ve diğer denizcilik ekipmanları, tuzlu suya karşı dirençli olduğundan paslanmaz çelikten yapılır.

**Endüstriyel Tesisler:** Kimya, petrokimya ve gıda işleme tesislerinde, boru hatları, tanklar ve diğer ekipmanlar bu malzemeden yapılır, zira kimyasal maddelere ve aşındırıcı ortamlara karşı dayanıklıdır.

**Ev Aletleri ve Mobilya:** Buzdolapları, çamaşır makineleri, lavabolar ve modern mobilyalar gibi ev içi kullanım alanlarında da tercih edilen bir malzemedir.

Paslanmaz çelikler, çok sayıda sektörde uygulanabilen bir çelik çeşididir. Bu çeliklerin yüzeylerinde oluşan ince krom oksit ( $Cr_2O_3$ ) tabakası, paslanmayı ve korozyonu önleyerek malzemeyi pasifleştirir [45, 46]. Bu çeliklerin bileşiminde, yüksek miktarlarda krom (Cr) ve yanında nikel (Ni), molibden (Mo) gibi elementler bulunur [47]. Bu elementler, paslanmaz çeliğin aşınma ve korozyona karşı direncini artırır. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşimindeki Cr ve Ni oranları belirleyici bir faktördür (Şekil 1). Ni içeriği %8'in üzerine çıktığında, östenitoda sıcaklığında stabil hale gelir ve bu tür paslanmaz çeliklere östenitik paslanmaz çelik denir [48].

Östenitik paslanmaz çelikler, paslanmaz çeliklerin bir alt grubunu oluşturur ve yüksek süneklik özellikleriyle dikkat çekerler. Bu çelikler haddeleme yoluyla sertleştirilebilir, iyi işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik özelliklerine sahiptirler [49]. Özellikle petrokimya sektörü, deniz yapıları, nükleer ve arıtma tesisleri, medikal ürünler gibi alanlarda östenitik paslanmaz çeliklere sıkça başvurulmaktadır [48].

Paslanmaz çelik, demir (Fe) ve minimum %10.5 krom (Cr) içerir. Krom, çeliğin yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak paslanmaya karşı direncini artırır. Kompozisyon türleri olarak paslanmaz çeliğe nikel (Ni) eklenir ve bu da malzemeye korozyon direncini artırıcı özelliğine katkı sağlar. Paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri olarak yüksek çekme mukavemeti, sertlik ayırıcı özellikleridir. Bu malzemenin en dikkat çekici özelliği, yüksek korozyon direncidir, bu da yüzeyinde oluşan ince krom oksit tabakasından kaynaklanır. Paslanmaz çelik, yüksek mukavemet, sıcaklık dayanıklılığı ve estetik bir görünüme sahiptir.

Paslanmaz çelikler, içeriklerindeki standart krom oranına ek olarak, özelliklerini geliştirmek amacıyla sıklıkla çeşitli alaşım elementleri içerirler. Bu çelikler, atomların çeliğin tanelerini oluşturma biçimine göre tanımlanan mikroyapıları veya kristal yapılarına göre sınıflandırılmaktadır. Paslanmaz çelikler, kimyasal bileşimlerine göre esas olarak iki ana kategoriye ayrılır: Krom ve Krom-Nikel türleri. Bu kategorizasyon, mikro yapılarına dayanarak çift fazlı östenitik-ferritik, martenzitik, ferritik ve östenitik-ferritik çökelme sertleştirmeli aileler gibi birkaç ana aileye ayrılmalarını sağlar. Paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri, uzama, akma mukavemeti, elastik modül ve nihai çekme mukavemeti gibi özellikler, alaşımın kimyasına ve işlemeye bağlı olarak değişir ve bu özellikler Tablo 2.2'de özetlenmiştir. Bununla birlikte, "Young Modülü" gibi bazı özellikler, paslanmaz çelik alaşımlarının kimyasal bileşimi ve mikro yapı ile oldukça ilişkilidir [50].

Paslanmaz çelik, çeşitlilik gösteren alaşımlar ve işlemler sonucu farklı özellikler gösterse de, genel olarak temel fiziksel özelliklere sahiptir. Bu özellikler, paslanmaz çelik türüne ve sınıfına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir, ancak tipik olarak paslanmaz çeliğin değerleri aşağıdaki Tablo 2.2’de verilmiştir.

**Tablo 2. 2. Paslanmaz Çelik Malzemelerin Özellikleri**

<b>Paslanmaz Çelik Malzemenin Özellikleri</b>	
Elastisite	190 – 210
Yoğunlu	7750 – 8100
Poisson Oranı	0.27 – 0.30

Pirinç, bakır ve çinko alaşımından oluşur ve mükemmel işlenebilirliği, kolay kaplanabilirliği, yüksek sünekliği ve çeşitli boyutlarda temin edilebilmesi gibi özelliklere sahiptir. Güçlü korozyon dayanımı ve bakıra göre daha yüksek mukavemeti, aşınma direnci ve 200 °C altındaki sıcaklıklarda fiziksel özelliklerini koruma yeteneği, pirinci çok yönlü ve dayanıklı bir malzeme yapar. Ek olarak, güneş ışığından etkilenmemesi ve ekonomik maliyeti, onu çeşitli uygulamalar için cazip bir seçenek haline getirir. Pirinç, işlenebilirliği ve sünekliği ile öne çıkarken, paslanmaz çelik, korozyon direnci ve sıcaklık dayanıklılığı ile dikkat çeker. Bu nedenle, malzeme seçimi, özel uygulama gereksinimlerine ve performans beklentilerine bağlı olarak yapılmalıdır.

Bu tez çalışmasında, ince plak malzemesi olarak paslanmaz çelik ve pirinç malzemeleri seçilmiştir. İlk olarak pirincin kolay işlenebilirliği, süneklik özelliği, yüksek sıcaklıklarda çalışma ortamı sağlamaya olanak tanınması, çok yüksek derecelerde deformasyona uğrayabilmesi, deforme olmadan form değiştirmeden çalışma aralığında kalabilmesi, maliyet açısından bakır malzemeye kıyasla daha avantajlı konumda olması gibi sebeplerden dolayı deney malzemesi olarak seçilmiştir. İkinci malzeme olarak, sünek olmayan bir malzeme olması ve deformasyona karşı direncini yani elastisite modülünün pirinç malzemeye göre daha yüksek olması bakımından paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir.

## 2.4 Plaklar üzerinde Lazer Markalama Yöntemi İle Gözenek Oluşturma

Endüstride kullanımı yaygın olarak tercih edilen lazer delik delme yöntemleri, yüksek hızda yüksek hassasiyet ve yüksek verimlilik gerektiren uygulama alanları için sık tercih edilen bir yöntemdir. Lazer makinesi kullanılarak delme yöntemi, geleneksel olarak bilinen mekanik delme yöntemlerine nazaran birçok avantaja sahiptir. Günümüz endüstrisinde kullanılan bir takım yaygın delme yöntemleri vardır. Bunların özelliklerinden, hız ve verimlilik, yüksek hassasiyet, temas etmeden işleme, çeşitlilik gibi sebeplerden lazer delik yöntemini en başta örnek gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, geleneksel yöntemlerden olan mekanik delme, yavaş işleme örnek olan elektro erozyon delme (EDM), ultrasonik delme, plazma delme yöntemleri de delik delme yöntemidir.

"Laser" terimi, "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ifadesinin ilk harflerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur.

Bu ifade, Türkçe'de "Uyarılmış Radyasyon Yayılımı ile Işığın Güçlenmesi" olarak çevrilebilir. Bu terim, lazer teknolojisinin temel prensibini ifade eder: belirli bir süreçle uyarılan radyasyonun ışık enerjisini artırması. Bu teknoloji, ışığın belirli bir dalga boyunda yoğunlaştırılması ve yönlendirilmesi prensibi üzerine kuruludur. Lazer, bu fiziksel süreci tanımlamak için kullanılan ve modern teknolojide çok çeşitli uygulamalara sahip olan bir kavramdır [51, 52, 54, 55].

Markalama işlemi, ürünlerin veya bileşenlerin üzerine barkod veya matris kodları gibi otomatik okunabilir bilgilerin işlenmesi amacıyla kullanılır. Bu kodlanmış bilgiler sayesinde, işlenmiş parçalar ve detaylar, üretim süreci ve tedarik zinciri boyunca etkin bir şekilde takip edebilirler. Servis ve tamir gerektiğinde, bu işaretlemeler, parçaların hızlı bir şekilde tanımlanmasını ve bulunmasını sağlar, bu da hesap verebilirlik ve garanti süreçlerine önemli katkılarda bulunur [52].

Endüstrinin pek çok alanında "Ürün Üzerinde Doğrudan İşaretleme" (Direct Part Marking - DPM) yöntemi, endüstriyel ürünlerin tanımlanmasını sağlamak için tercih edilir. Bu yöntem, geleneksel etiketleme gibi diğer işaretleme yöntemlerine göre bazı avantajlar sunar. Bununla birlikte, parçanın

fiziksel özellikleri ve yapısı, işaretleme sürecinde bazı zorluklara neden olabilir ve bu durum üreticiler için belirli sorunlara yol açabilir. Bu bağlamda, markalama işleminin başarısı hem işaretleme kalitesine hem de işaretleme malzemesinin özelliklerine bağlıdır.

Lazer markalama teknolojisi, günlük yaşamımızda birçok kolaylık sağlayan bir uygulamadır ve özellikle otomotiv ve elektronik endüstrilerinde yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe, çeşitli yapısal elemanlarında, araç gövde panelleri, gibi bileşimlerin tanımlanmasında etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkar. Bunların yanı sıra elektrik ve elektronik alanında kullanılır.

Lazer markalamanın diğer uygulama alanları arasında gıda endüstrisindeki ambalajlar, ev eşyaları, inşaat malzemeleri ve tarım ekipmanları bulunur. Bu süreçte, kalite, esneklik, hız ve üretim maliyetleri gibi katı standartlara uyulması gerekmektedir. İşaretleme, teknik veriler, seri numaraları, onay kodları, üretim ve son kullanma tarihlerini içeren barkodlar, fonksiyonel simgeler ve şirket logoları şeklinde olabilir.

Lazer markalama, imalat endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip olup, hemen hemen her türlü malzeme üzerinde uygulanabilir. Bu teknoloji, endüstride verimliliği ve takip edilebilirliği artırarak önemli bir rol oynamaktadır.

Endüstriyel alanda, lazer teknolojisinin kullanımı, deri, ahşap, cam, polimer ve metal gibi çeşitli malzeme türlerine işlem yapılmasını mümkün kılmaktadır. Metal malzemeler, özellikle üretim süreçlerinde merkezi bir rol oynamaları nedeniyle yoğun bir şekilde kullanılır. Bu durum, metalin yapısal olarak temel bir malzeme olması ve dayanıklılık gibi özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Lazer teknolojisi, metal işleme alanında yüzey işlemlerinin iyileştirilmesi gibi çeşitli amaçlar için etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemler, metal işlerinin hassasiyet ve verimlilik açısından fizibilite edilmesine olanak tanır.

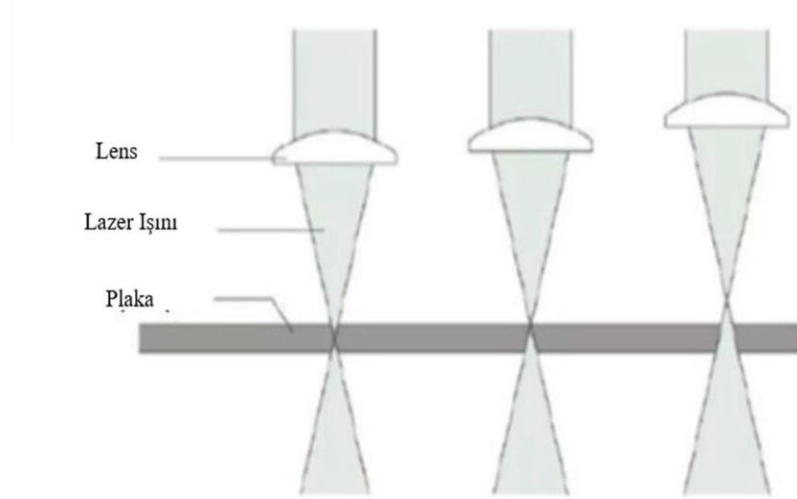
Bu işlemler, malzemenin doğasına uygun olarak, lazer teknolojisinin hassasiyet ve kontrollü enerji uygulaması avantajlarından faydalanarak

gerçekleştirilir. Bu kapsamlı kullanım, lazer teknolojisinin endüstrideki çok yönlülüğünü ve birçok farklı malzeme türü üzerindeki etkinliğini göstermektedir. Lazer teknolojisi, endüstriyel üretimde malzemelerin işlenmesi ve işaretlenmesi konusunda önemli bir araç haline gelmiştir, bu da işlem süreçlerinin verimliliğini ve kalitesini artırmaktadır.

Lazer ışınının karakteristik dalga boyu, lazerin aktif ortamında üretilir. Metal malzemelerin lazer ışığını daha etkin bir şekilde soğurabilmeleri için, genellikle dalga boyunun kısaltılması gerekmektedir. Ayrıca, kısa dalga boyları, lazer ışığının odaklanmasını daha kolay ve etkili bir hale getirir. Bu iki faktör, lazerle kesim işlemleri sırasında dalga boyunun önemini artırmaktadır.

Örneğin, 10,6 µm dalga boyuna sahip bir karbondioksit (CO<sub>2</sub>) lazeri, 1.06 µm dalga boyundaki bir Nd: YAG lazerine göre genellikle tercih edilmez. Bununla birlikte, ışın kalitesi ve diğer güç gibi teknik parametreler, katı hal lazerlerinin tam kapasitede verimli bir şekilde çalışmalarını sınırlandırabilir. Bu, lazer teknolojisi seçiminde dikkate alınması gereken önemli bir husustur ve uygulamanın gereksinimlerine göre lazer türünün seçilmesinde etkili olur.

Lazerin dalga boyu, kesim, gravür ve işaretleme gibi işlemlerin verimliliği ve etkinliği üzerinde önemli bir rol oynar [56, 57]. Lazer markalama, malzeme yüzeylerinde son derece hassas ve okunabilir işaretler oluşturarak, üstün düzeyde okunabilirlik ve adaptasyon yeteneği sunmaktadır. Elektrokimyasal gravür, mürekkep püskürtmeli baskı ve nokta vuruşlu baskı gibi diğer geleneksel markalama yöntemlerine göre daha hızlı bir süreç olduğundan, üretim süreçlerinin verimliliğini ve hacmini artırmada etkili bir role sahiptir. Bu avantajlar, lazer markalamanın özellikle yüksek hacimli ve hızlı tempolu üretim ortamlarında tercih edilmesinin başlıca nedenlerindedir. Lazer markalama yapılırken odak pozisyonu, plak parçası üst yüzeyindeki ışın çapı ve gücü yoğunluğunu, kesme biçimini belirler (Şekil 2.6).



**Şekil 2. 6.** Lazer Markalama Işınının Odak Noktası [58]

Lazer kesim işleminde, odak çapının büyüklüğü, kerf (kesim yarığı) genişliğini belirleyen önemli bir faktördür. Odak noktasının yüksekliği, kullanılan merceklerin mesafesinin ayarlanması ile değiştirilebilir. Küçük bir odak çapı, dar bir ışın genişliğine işaret eder. Kalın malzemelerin kesilmesinde, kesim çizgilerinin düzgünlüğünü sağlamak ve eriyen malzemenin hızla işlem alanından atılmasını kolaylaştırmak için uzun odak mesafeleri ve geniş odak çapları tercih edilir. Kesme işlemi sırasında, kesme hızını artırmak ve malzemenin yüzeyine yüksek güç yoğunluğu uygulamak için, odak çapının olabildiğince küçük tutulması gereklidir. Bu, lazerin etkinliğini ve kesim işleminin kalitesini artırırken, malzeme üzerindeki hassas kesimlerin gerçekleştirilmesini sağlar.

Bu parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması, lazer kesim işleminin verimliliği ve doğruluğu için kritik öneme sahiptir [59, 60]. Odak çapının hesaplanması yöntemi olarak aşağıdaki denklem kullanılmaktadır. Aşağıdaki denklem(2.1) ile hesaplanmaktadır.

$$da = 2.44 * K * F/D (2.1)$$

*da*: Odak noktası çapı

*F*: Mercek veya aynanın odak uzunluğu (mm)

*K*: Optik ışın moduna bağlı bir sabit

*D*: Lazer optik dalga boyu (μm)

Lazer teknolojisi, hassasiyet ve hızı bir arada sunarak, endüstrideki markalama süreçlerinin gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır. Lazer teknolojisinin endüstride yaygın olarak tercih edilmesinin nedenlerini açıklar ve lazerin modern üretim süreçlerindeki rolünü önemli ölçüde artırır. Lazer teknolojisi, çeşitli malzemeler üzerinde hassas, hızlı ve maliyet etkin işlemler yapma kabiliyeti sayesinde endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Bu çalışmada plakalara gözenek oluşturma yöntemi olarak lazer markalama yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem:

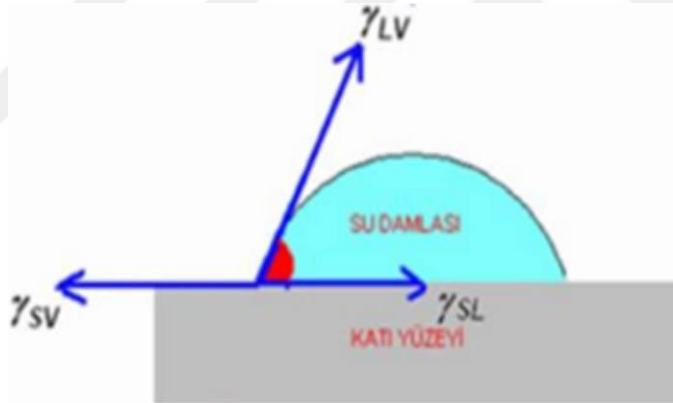
- Kalıpsız üretim süreci
- Esnek kablo sistemlerinin kullanılarak lazer ışının farklı konumlardakolaylıkla taşınmasının sağlanması
- Genel maliyet analizi yapıldığında bu işlemlerin daha düşük maliyetli olması
- Kesme ve gözenek oluşturma işlemleri sırasında aşınma ve yıpranma riskinin diğer yöntemlere kıyasla daha az olması
- İşlem süresinin kısa olması
- Son derece hassas işlemleri minimal hata ile mikron düzeyde gerçekleştirmesi

Lazer markalama yönteminin plakalar üzerinde gözenek oluşturmak için yukarıda maddeler halinde bahsedilen özelliklerinden dolayı seçilen avantajlı bir yöntemdir.

## 2.5 Yüzeyin Islanabilirlik Özelliği

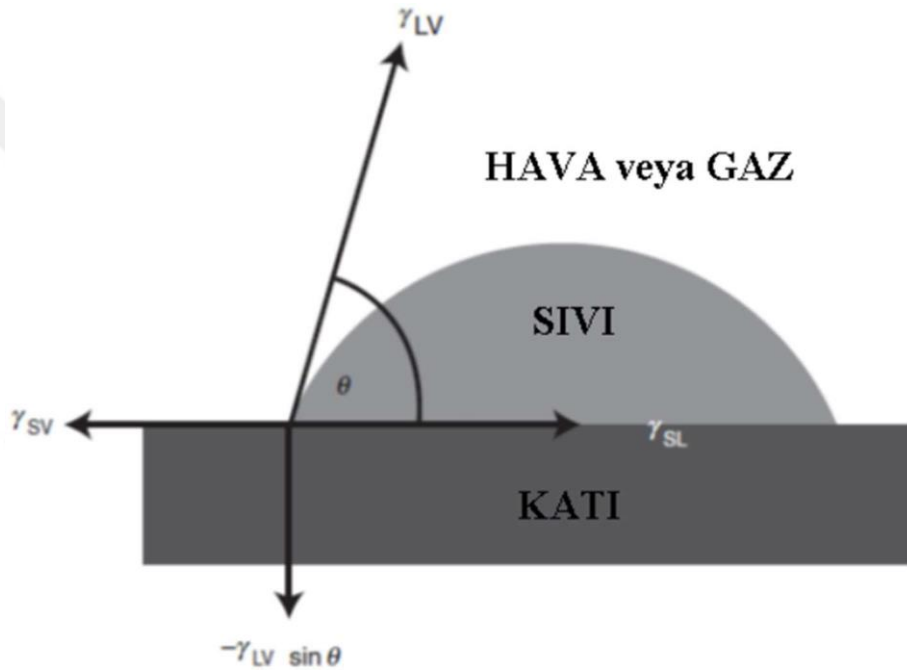
Bir yüzeyin ıslanabilirlik özelliği, temas açısı ölçümü ile değerlendirilir. Bu temas açısı, bir aderent yüzeye uygulanan adeziv maddenin oluşturduğu sıvı damlasının konturuna çizilen teğet ile aderent yüzey arasındaki açı olarak tanımlanır. Buna değim açısı olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.6). Temas açısı, iki malzemenin birleşim bölgesinde meydana gelen bu açısal ilişkiyi ifade eder ve yüzeyin adeziv malzemelerle etkileşim kapasitesini gösterir. Bu ölçüm, malzemelerin yüzeyıslanabilirliği ve adeziv bağlanma potansiyellerini anlamada önemli bir gösterge olarak kullanılır [61].

Bu temas açısı ölçümleri, sıvının yüzey üzerinde ne kadar yayıldığını ve yüzeyin sıvıyla etkileşiminin doğasını belirlemek için yapılır. Yaygın olarak kullanılan temas açısı ölçüm yöntemleri maddeler halinde bir sonraki bölümde yer almaktadır.



Şekil 2. 7. Temas Açısı [61]

1805 yılında Thomas Young, bir sıvı damlasının katı bir yüzey üzerindeki denge temas açısı ( $\theta$ ) kavramını tanımlayan ilk bilim insanı oldu ve bu bağlamda adıyla anılan Young Denklemi (2.2) literatüre kazandırdı. Bu denklem, bazen literatürde 'Young temas açısı' olarak da adlandırılır ve denge halindeki temas açısının ( $\theta$ ) yüzey ve arayüzey enerjilerine bağlı olduğunu ifade eder. Young Denklemi temel bileşenleri, Şekil 2.7'de şematik olarak gösterilmiştir [62].



**Şekil 2. 8.** Katı bir yüzey üzerindeki sıvı damlasının, katı-sıvı-hava veya gaz arasındaki üçlü temas noktasında oluşan denge temas açısı [61].

Bir katının ıslanabilirlik veya ıslanmazlık özelliği, bu katı yüzeyine bırakılan su damlasının yüzey ile oluşturduğu temas açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak değerlendirilebilir. Bu açı, katı yüzeyin sıvıyla etkileşimini ve dolayısıyla ıslanabilirlik özelliklerini belirlemenin temel bir yöntemidir.

$$\text{Young Denklemi: } \gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2.2)$$

Bu denklemde,  $\gamma_{SV}$ : katı-hava arayüzeyin enerjisini ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ ),  $\gamma_{SL}$ : katı-sıvı arayüzeyin enerjisini ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ ),  $\gamma_{LV}$ : sıvı-hava arayüzey gerilimi/enerjisi ( $\text{mN}/\text{m} = \text{mJ}/\text{m}^2$ ) temsil eder.  $\theta$ : sıvı damlası ile katı yüzey arasında ölçülen denge (veya young) temas açısını (derece) gösterir. Eğer  $\gamma_{SV} > (\gamma_{SL} + \gamma_{LV})$  olursa ki bu durum yüksek serbest yüzey enerjisine sahip bir katı olduğunu işaret eder, bu durumda young denkleminde “ $\cos\theta = 1$  ( $\theta = 0^\circ$ )” olacaktır ve bu ise sıvının bu katı yüzeyinde tamamen yayılabileceğini yani katıyı tamamen ıslattığını gösterir.

## 2.6 Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri

Katı bir yüzey üzerinde sıvı damlasının temas açısının ölçümü, bu katının sıvıyla olan termodinamik etkileşimlerini yansıtan önemli bilgiler sağlar. Bu bilgiler, katının yüzey enerjisinin hesaplanması veya tahmin edilmesinde kullanılır. Bu süreçte, katı yüzey üzerinde çeşitli sıvıların oluşturduğu temas açıları ( $\theta$ ) dikkatlice ölçülür. Bu ölçümler, aşağıda detaylandırılan çeşitli matematiksel yöntemler ve denklemler kullanılarak katıların serbest yüzey enerjilerinin (SYE) hesaplanmasına olanak tanır. Bu metodoloji, malzeme biliminde yüzey özelliklerini anlamada kritik bir araç olarak kabul edilir ve malzemelerin yüzey etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar.

Temas açısı ölçüm yöntemi, genellikle gonyometre adı verilen bir cihazın ve bilgisayar yazılımının kullanımı ile gerçekleştirilir. Bu süreçte, öncelikle katı bir yüzeye bir su damlası bırakılır ve ardından bu su damlasının katı yüzeyle oluşturduğu açının fotoğrafı çekilir. Daha sonra bu fotoğraf, bilgisayar ortamında özel bir yazılım aracılığıyla analiz edilerek teta açısı ( $\theta$ ) hesaplanır. Bu analiz sonucunda, katı yüzeyinsıvı ile oluşturduğu temas açısı belirlenir. Bu yöntem, temas açısının hassas bir şekilde ölçülmesini sağlar ve malzemenin yüzey özellikleri hakkında önemli bilgiler sunar [63].

### 2.6.1 Görüntü Alma Tekniği Yöntemi

Temas açısı ölçümlerinde, damlanın fotoğrafı çekildikten sonra, bu fotoğrafların analiz etmek için çeşitli yazılımlar kullanılır. Bu yazılımlar arasında en yaygın olanları "Image-J" ve "MB-Ruler" programlarıdır. Image-J programının ana arayüzü, damla alanı ve temas açısı ölçmeye uygun şekilde tasarlanmıştır. Bu arayüzde, "file-open" seçeneği ile temas açısının ölçüleceği bilinmektedir.

Alternatif olarak, bir kamera kullanılarak damlanın görüntüsü alınır ve sonrasında bu görüntü, analiz yazılımı yardımıyla işlenerek damlanın teğet değeri belirlenir ve temas açısı hesaplanır. Bu teknikler, temas açısının ölçümünde yüksek hassasiyet ve doğruluk sağlar [64].

### 2.6.2. Sıvı Teması İle Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri

- Damla Yayınım Metodu (Sessile Drop Method)

Yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan, düz bir katı yüzey üzerindeki sabit bir damlanın temas açısını ölçmek için açı ölçen bir göz merceğine sahip bir gonyometre-mikroskobun veya uygun bir büyüteç merceği ile donatılmış bir video kameranın kullanılmasına dayanır. Bu yöntemde, kaydedilen görüntüdeki temas açısı( $\theta$ ) hassas bir şekilde belirlenmek üzere, görüntü analiz yazılımı içeren bir bilgisayar ihtiyacı duyulur. Ayrıca, bu ölçüm tekniği, uygun bir soğuk ışık kaynağı ve yüksekliğı dikkatle ayarlanabilir bir numune tablası gerektirir. Doğru temas açısı ölçümünün başarılı olması, aynı zamanda cihazı kullanacak kişinin tecrübesine de bağlıdır. Bu prosedür, temas açısının ölçümünde yüksek hassasiyet ve doğruluğun sağlanmasında kritik rol oynar.

Sessile Drop tekniği, optik bir yöntem olarak, gonyometrenin yatay parçasına uygulanan sıvının kimyasal ve fiziksel özelliklerine uyum sağlayarak bir şekil oluşturmasına dayanır. Bu teknikte, sıvının katı yüzey üzerinde oluşturduğu damla şekli, indirekt bir şekilde temas açısının ölçümü için kullanılır. Sıvı damlanın katı yüzey üzerindeki morfolojisi, gonyometre ile yakalanan görüntüler aracılığıyla analiz edilir ve bu analiz, sıvının yüzey üzerindeki dağılımı ve etkileşimi hakkında bilgi verir. Bu yöntem, malzemenin

yüzey ıslanabilirliği ve sıvıyla etkileşim özellikleri hakkında önemli veriler sağlamak için kullanılır ve malzeme bilimi alanında yüzey karakterizasyonu için temel bir araç olarak kabul edilir [65].

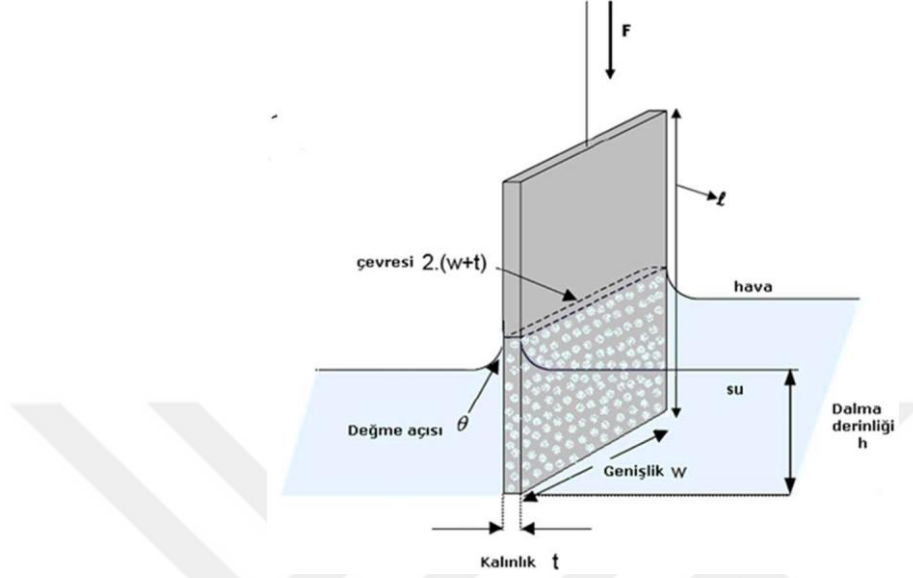
- Wilhelmy Plaka Metodu

Bu metod, katı yüzeylerin sıvıyla teması sırasında ortaya çıkan kuvvetlerin, birtansiyometre cihazı aracılığıyla ölçülmesine dayanmaktadır. Bu teknik, katı ve sıvı arasındaki etkileşimin sonucu olarak oluşan kuvvetlerin niceliksel değerlendirilmesini sağlar ve yüzey özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir araç olarak kullanılır.

Bu metotta iki plaka, her bir plaka bir teraziye asılarak aynı sıvının içine temas ederek daldırılır. Bu plakalardan biri, incelenen katı yüzeydir. Diğer plaka ise sıvı tarafından tamamen ıslatılan referans olarak kullanılan bir katıdır (örnek olarak metal bir plaka). Plakaların sürgüleri, aynı çevre uzunluğuna sahip olacak şekilde ayarlanır. Bu düzenlemeyle, test numunesinde meydana gelen aşağı çekme kuvveti, tamamen ıslanan plakadaki aşağı çekme kuvvetiyle (her ikisi de yüzdürme için düzeltilmiş) karşılaştırılır ve bu oran yalnızca  $(\gamma_{LV}\cos\theta/\gamma_{LV})$  veya  $(\cos\theta)$  olarak ifade edilir. Bu sayede, temas açısı, numunenin ve aynı sıvı içindeki referans katının adezyon farklılıklarına dayanarak hesaplanabilir. Bu yöntem, temas açısını belirlemek için incelenen yüzey ile referans katı arasındaki adezyon farklılıklarını dikkate alır [62, 66].

Wilhelmy Plaka Yöntemi, Şekil 2.9'da betimlendiği üzere, belirli bir plakanın bir sıvı içine daldırılması esasına dayanır. Bu yöntemde, plakaya etki eden kuvvetler; yüzey gerilimi, yerçekimi kuvveti ve kaldırma kuvvetidir. Dikdörtgen şeklinde, boyutları  $l$ ,  $w$ ,  $t$  ve yoğunluğu  $\rho_w$  olan bir plaka, yoğunluğu  $\rho_l$  olan bir sıvıya  $h$  derinliğine kadar daldırıldığında, plakaya aşağı doğru etki eden net kuvvet  $F$  olarak hesaplanır. Denklem 2.3'teki  $\gamma$  sıvı yüzey gerilimini,  $\theta$  sıvının plaka ile yaptığı temas açısını ve  $g$  ise yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Bu kuvvet, sıvı ile katı malzeme arasındaki etkileşimleri anlamada önemli bir göstergedir ve malzemenin yüzey özellikleri hakkında detaylı bilgiler sağlar. Wilhelmy Plaka Yöntemi, yüzey biliminde malzemelerin sıvılarla olan etkileşimlerinin incelenmesi için kullanılan hassas ve etkili bir araçtır [67].

$$F = \rho w g l w t + 2\gamma(t + w)\cos\theta - \rho l g t w h \quad (2.3)$$



Şekil 2. 9. Wilhelmy Plaka Metodu [66]

- Sıvı Penetrasyonu ve Washburn Kapiler Yükselme Metodu

Sıvı Penetrasyonu ve Washburn Kapiler Yükselme Metodu kapsamında, sıvının malzeme içerisine nüfuz etme şekillerini inceleyen iki önemli teknik bulunmaktadır. Bunlardan ilki kolon wicking metodu ve ikincisi ince tabaka wicking metodudur. Kolon wicking metodu, sıvının, genellikle dikey olarak konumlandırılmış bir malzeme kolonu içindeki yayılma ve emilimini incelemeye odaklanır. Bu teknik, malzemenin gözenekli yapısı ve sıvı emme kapasitesi hakkında değerli bilgiler sunar. Öte yandan ince tabaka wicking metodu, sıvının bir malzemenin ince tabakası üzerindeki yayılma davranışını analiz eder. Bu yöntem, malzemenin yüzey enerjisi ve ıslanabilirlik özellikleri gibi parametrelerin belirlenmesinde kullanılır. Her iki teknik de, malzeme biliminde sıvı-malzeme etkileşimlerinin anlaşılması için kritik öneme sahiptir ve yüzey bilimi ile ilgili uygulamaların bir parçası olarak değerlendirilir [68].

## 2.7. Mekanik Titreşimler

Titreşim, partiküllerin bir elastik yapı veya ortam içerisinde periyodik olarak gerçekleştirdikleri ileri-geri hareketleri olarak tanımlanırken, günümüz mühendislik ve fizik literatüründe daha geniş bir tanım ile "bir denge noktası etrafındaki mekanik salınım" olarak ifade edilmektedir. Bu iki tanım, titreşimin hem mikroskobik (partikül seviyesindeki hareketler) hem de makroskobik (genel mekanik yapıların salınımı) yönlerini vurgulamaktadır. Bu kapsamlı tanımlar, titreşimin hem atomik ve moleküler düzeyde hem de büyük mühendislik yapıları ve sistemlerde gözlemlenebildiğini göstermektedir. Bu, bir keman telinin titreşmesi, engebeli arazide ilerleyen bir aracın içindeki yolcuların hissettiği hareketler, hava hareketleri olan rüzgâr veya doğal olay olan deprem etkisiyle sallanan yüksek binalar ve türbülans sırasında bir helikopterin hareketleri gibi çeşitli örneklerle gözlemlenebilir. Titreşim teorisi, bu tür salınımların ve bunlara eşlik eden kuvvetlerin analizini içerir ve cisimlerin dinamik davranışlarının anlaşılmasında temel bir rol oynar. Bu alanda yapılan çalışmalar, mühendislik ve fizik alanlarında uygulamaları olan önemli bilgileri ortaya koyar.

Pratik uygulamalarda, titreşimin tamamen engellenmesi genellikle mümkün değildir. Üretim toleransları, makine parçaları arasındaki boşluklar, dinamik etkilere maruz kalan yuvarlanan veya sürtünen parçalar ve veya krank biyel mekanizmaları gibi sistemlerdeki serbest dengeli olmayan kuvvetler genellikle titreşim kaynağıdır. Çoğu zaman ihmal edilebilir olarak kabul edilen bu titreşimler, yapısal elemanların doğal frekanslarını tetikleyerek, titreşim etkilerinin büyümesine sebep olabilir. Diğer yandan, bazı durumlarda mekanik titreşimlerin bilinçli olarak üretilmesi faydalıdır. Örneğin, ultrasonik temizleme makineleri, beton sıkıştırıcılar, bir jantın talaşlı imalatı sonucunda delikleri arasında kalan talaşların titreşim yardımıyla temizlenmesinde, taş delme makineleri gibi uygulamalarda, işlevleri nedeniyle bilinçli olarak titreşimler oluşturulur. Titreşim test makineleri, bir cihazın titreşime fiziksel veya fonksiyonel tepkisini incelemek veya cihazların titreşimli ortamlara dayanıklılığını test etmek için sıklıkla kullanılır. Bu temel ihtiyaç, oluşan titreşimlerin doğru bir şekilde ölçülmesine ve analiz edilmesine bağlıdır.

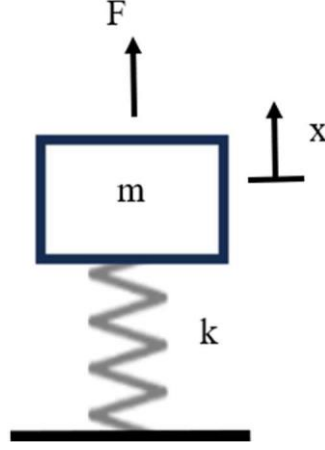
Bu yaklaşım, titreşimin ürettiği enerjiyi verimli bir şekilde kullanmak vemekanik sistemlerin düzgün çalışmasını sağlamak için gereklidir. Bu bakış açısı, titreşimin hem olası zararlı etkilerini azaltma hem de pratik uygulamalarda verimli şekilde kullanma konusunda önemli bir rol oynar [48]. Genel manada titreşmekte olan bir titreşim sisteminin elemanları kütle(m), yay(k), sönüm (c) ve zorlayıcı kuvvet (F(t)) dir. Bu sistem herhangi bir x konumundayken m kütlesi kx yay kuvvetinin, cx sönüm kuvvetinin ve mx atalet kuvvetinin etkisinde olup bu kuvvetler hareketin tersi yönündedir (Şekil 2.10). Bir diğer deyişle titreşim, yapıların kütlesi ve elastik özellikleri nedeniyle, denge durumları etrafında meydana gelen periyodik veya rastgele salınımlar olarak tanımlanabilir. Her yapı, uygun bir dış etki altında titreşim reaksiyonu sergileyebilir. Titreşimler genel olarak iki ana kategoriye ayrılır: serbest titreşimler ve zorlamalı titreşimler. Bu kategoriler daha da detaylandırılarak sönümlü ve sönümsüz serbest titreşimler ile sönümlü ve sönümsüz zorlamalı titreşimler olarak incelenebilir.

Titreşimler, genel olarak iki ana tür olarak sınıflandırılabilir: Serbest titreşimler ve zorlamalı titreşimler. Bu iki kategori, daha da detaylandırılarak alt kategorilere ayrılır. Sönümlü ve sönümsüz serbest titreşimlerde Sönümlü ve sönümsüz zorlamalı titreşimler olmak üzere alt kategorilerinde detaylandırılır.

### 2.7.1. Serbest Titreşimler

Serbest titreşimler, dış bir kuvvetin etkisi olmaksızın, sistemin kendi doğal özelliklerine bağlı olarak meydana gelir ve bu tür titreşimler sönümlü ve sönümsüz olarak incelenebilir.

Titreşimin sönümsüz şematik ifadesi Şekil 2.10'da ifade edilmiştir. Kütle yay mekanizmasının doğal frekansı denklem (1, 2, 3) dekiler gibi ifade edilir



**Şekil 2. 10.** Sönümsüz serbest titreşim şematik gösterimi

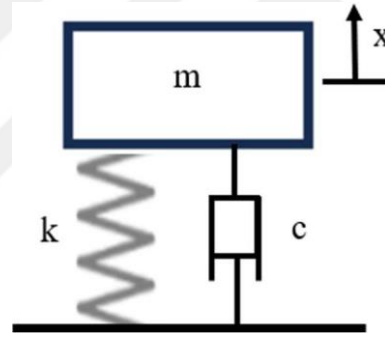
$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

$$\ddot{x} + \left(\frac{k}{m}\right)x = 0 \quad (2)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

Sönüm miktarı, bir mekanik sistemin karakteristik davranışını belirleyen önemli bir faktördür. Sönümün yeterince düşük olduğu durumlarda, sistem, başlangıç salınımını tamamladıktan sonra yavaş yavaş hareketini durdurur. Bu tür sistemler, az sönümlü sistemler olarak tanımlanır ve bu sistemlerde salınım, zamanla yavaşça azalır. Diğer bir yandan, eğer mekanik bir sistemin sönümü, sistemin ani bir şekilde hareket edip, daha sonra salınım yapmayacak seviyeye kadar artırılırsa, bu durum kritik sönümlü sistem olarak adlandırılır. Bu durumda, sistem ilk salınım sonrasında neredeyse hiç salınım yapmaz. Sönüm miktarı, kritik sönüm düzeyinin üzerine çıkarıldığında ve sistem hiç salınmaz hale geldiğinde, bu tür sistemler aşırı sönümlü sistemler olarak tanımlanır.

Bu ayırım, mekanik sistemlerin tasarımı ve analizinde, sistemin tepki ve stabilitesinin anlaşılması açısından önemlidir. Sönümlü serbest mekanik titreşimin şematik gösterimi şekil 2.11'e verilmiştir. Şekil 2.11'de gösterilen bir kütle-yay sisteminin sönümlü serbest titreşimleri, sönüm katsayısı ( $\zeta$ ) ile ifade edilmiştir. Bu sönüm katsayısı  $\zeta$ , c olarak belirtilen viskoz sönüm katsayısını temsil eder ve bu katsayı, sisteme herhangi bir dış kuvvet  $F(x)$  uygulanmadan yapılan serbest salınımları tanımlar. Şekil 2.11'de yer alan denklem 4, denklem 5 ve denklem 6'da yer almaktadır. Bu temsil, sistemin serbest hareketinin, harici bir zorlama olmaksızın, sönüm etkisi altında nasıl gerçekleştiğini gösterir ve mekanik sistemlerin dinamik analizinde kullanılan temel bir kavramdır. Bu tür analizler, mühendislikte sistem tasarımı ve performans değerlendirmesi için kritik öneme sahiptir



**Şekil 2. 11.** Sönümlü serbest titreşim şematik gösterimi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{c}{m}\right) = 2\xi\omega_n \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (6)$$

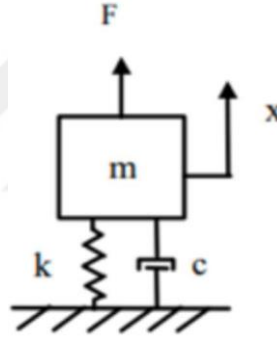
Yukarıdaki denklemlerde gösterildiği şekilde  $m$ =kütle,  $c$ =sönüm

katsayısı,  $k$ =yay sabiti,  $x(t)$  yer değiştirme,  $\dot{x}(t)$  hız ve  $\ddot{x}(t)$  ivme olmak üzere 4. denklemden açıkca belirtilmiştir.

### 2.7.2 Zorlamalı Titreşimler

Zorlamalı titreşimler, dış bir kuvvetin uygulanmasıyla olur ve bunlar da sönümlü ve sönümsüz zorlamalı titreşimler olarak iki alt kategoriye ayrılır. Sönümlü zorlamalı titreşimler, dış kuvvetin etkisi altında enerji kaybı ile karakterize edilirken, sönümsüz zorlamalı titreşimlerde bu enerji kaybı gözlemlenmez. Bu sınıflandırma, titreşimlerin doğasını ve dinamik sistemlerin analizinde dikkate alınması gereken faktörleri anlamada önemlidir.

Newton'un 2. Kanunu'nu ve kuvvet dengesi denklemini kullanarak, kütle-yay sisteminin sönümlü zorlamalı titreřimi için 2. dereceden adi diferansiyel denklemler denklemler 7, denklemler 8, denklemler 9'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 12. Zorlamalı ve sönümlü kütle-yay sistemi şematik gösterimi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (7)$$

$$\left(\frac{c}{m}\right) = 2\xi\omega_n \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (9)$$

Burada  $m$  kütle,  $k$  yayın direnci,  $x$  kütle için mutlak deplasmanı,  $\dot{x}$  hızı ve  $\ddot{x}$  ivmesi,  $c$  viskoz sönüm katsayısı,  $F(x)$  ise zorlama kuvvetidir. Doğal frekans  $\omega_n$  ise  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  şeklinde hesaplanır.

### 2.7.3 Ultrasonik Titreşimler

Ultrasonik titreşimler, genellikle 20 kHz 'in üzerindeki frekansta meydana gelen ses dalgalarıdır ve insan kulağının işitebileceği frekans aralığının ötesindedir. Bu titreşimler, çeşitli endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda kullanılır. Örneğin, temizleme, kesme, kaynak ve görüntüleme işlemleri ultrasonik titreşimlerle etkin bir şekilde gerçekleştirilir. Ultrason teknolojisi, moleküller arası bağların kırılmasını sağlayarak malzemelerin yapısında değişiklik yapabilir veya malzemelerin yüzeylerini temizleyebilir.

Bilim insanları, ultrasonik titreşimlerin özelliklerini ve etkileşimlerini anlamak için geniş çaplı araştırmalar yapmışlar ve bu titreşimlerin uygulama alanlarını genişletmek için çalışmalarını sürdürmektedirler [69]. Bu alandaki gelişmeler, ultrason teknolojisinin daha verimli ve çevre dostu uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, ultrasonik titreşimler, biyomedikal alanında ilaç teslimat sistemlerinde önemli bir rol oynar; bu titreşimler, ilaçların hedef dokulara daha doğru ve kontrollü bir şekilde ulaştırılmasını sağlayabilir [70].

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Delikli Pirinç ve Delikli Paslanmaz Çelik Plakların Tasarımı

Bu araştırma çalışmasında, 60 X 60 mm kenar uzunluğunda ve 0.15 mm kalınlığında kare formunda kesilmiş paslanmaz çelik ve pirinç plakalardan oluşan toplam 10 adet numune kullanılmıştır. Bu numunelerin sekiz adedi gözenekli yapıda, iki adedi ise gözeneksiz yapıdadır. Gözenekli numuneler, delik delme işlemlerinden olan, lazer markalama tekniği kullanılarak makine gücü 50 Watt delik delme işlemine hazırlanmıştır. Numunelerdeki gözenek çapları tüm gözenekli numuneler için sabit bir gözenek çapı belirlenmiş, bu değer plak numuneleri yüzeylerinde 500 µm olması planlanan şekilde delinmiştir.

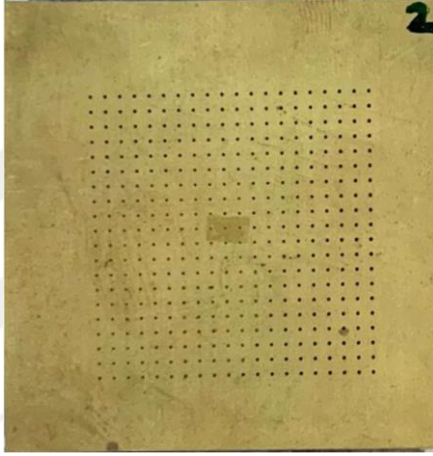
Lazer markalama ile gözenek oluşturma işleminden hemen sonra gözeneklerin yüzey temizleme atışı yapılmıştır. Bu işlemin amacı, gözenek yüzeylerinin üzerinde kalan ve varsa tıkanık gözeneklerin açılmasına katkı sağlaması amacıyla yapılmıştır.

Paslanmaz çelik ve pirinç plakların gözenekli numunelerinin birbirini takip eden iki gözenek arası mesafeler sırasıyla 1000 µm, 1500 µm, 2000 µm ve 2500 µm'dir.

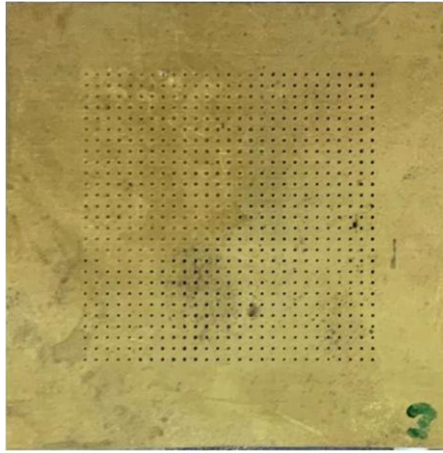
Pirinç plaklarda iki gözenek arası mesafe birbirini takip eden iki deliğin çap merkezinden merkezine sırasıyla, birinci numunede 2500 mikron, ikinci numunede 2000 mikron, üçüncü numunede 1500 mikron ve dördüncü numunede 1000 mikron olması planlanmıştır. Delikli pirinç malzeme numunelerin deney düzeneğine ait görselleri, Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4'te görselleştirilmiştir. İki delik arası mesafelerin ölçüm sonuçları ilerleyen bölümde tartışma ve bulgular bölümünde detaylı yer verilmiştir.



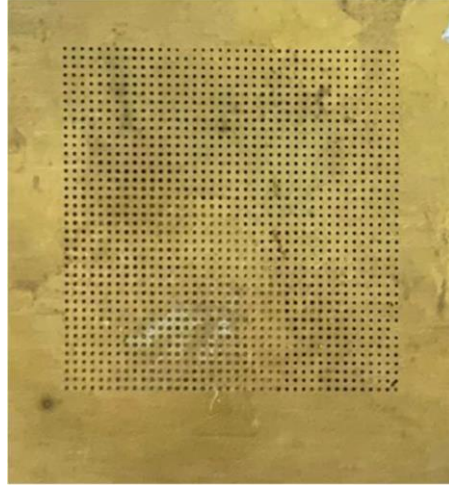
**Şekil 3. 1.** İki delik arası mesafe: 2500 µm



**Şekil 3. 2.** İki delik arası mesafe:2000 µm



**Şekil 3. 3.** İki delik arası mesafe:1500 µm

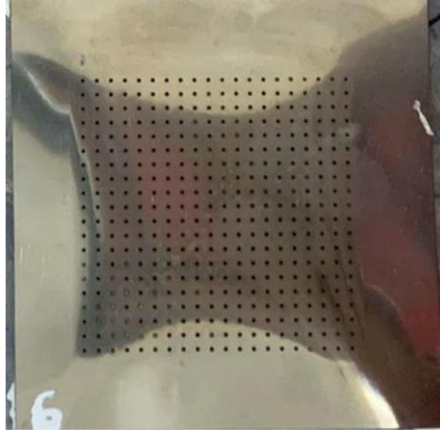


**Şekil 3. 4.** İki delik arası mesafe:1000  $\mu\text{m}$

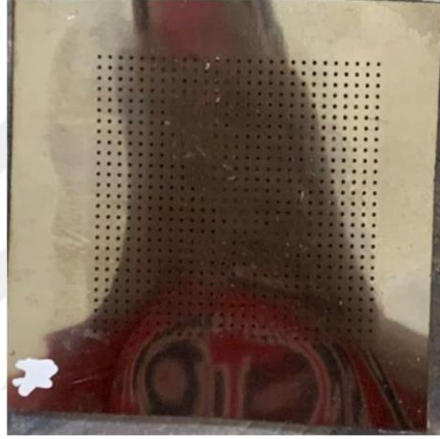
Paslanmaz çelik plaklarda iki gözenek arası mesafe sırasıyla, beşinci numunede 2500 mikron, altıncı numunede 2000 mikron, yedinci numunede 1500 mikron ve sekizinci numunede 1000 mikron olacak şekilde, pirinç plaklardaki iki gözenek arası mesafeleri aynı olacak şekilde lazer markalama ile delinmiştir. Gözenekli paslanmaz çelik numuneleri, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8’de görselleştirilmiştir. Pirinç malzemedeki gibi iki delik arası mesafelerin ölçüm sonuçları ilerleyen bölümde tartışma ve bulgular bölümünde detaylı yer verilmiştir.



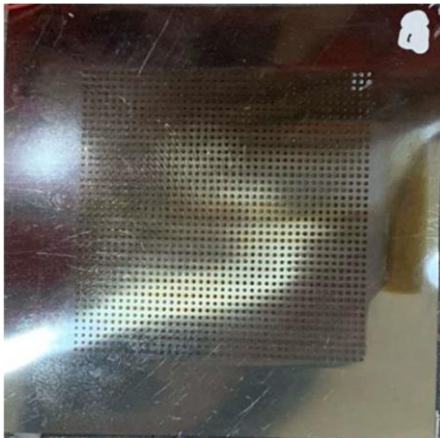
**Şekil 3. 5.** İki delik arası mesafe: 2500  $\mu\text{m}$



Şekil 3. 6. İki delik arası mesafe:2000 µm



Şekil 3. 7. İki delik arası mesafe:1500 µm



Şekil 3. 8. İki delik arası mesafe:1000 µm

Bu numuneler, deneyin amacına uygun olarak özel olarak tasarlanmış ve hazırlanmıştır ve plakaların farklı gözenek arası mesafenin özelliklerinin ve her iki malzemenin de gözenekleri arasındaki mesafe farkının etkilerini incelemek için kullanılacaktır.

### 3.2. Plaka Yüzeylerinde Temas Açısı Ölçümü

Gözeneksiz plakalar üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, plakaların yüzeylerinde yer alan 20 µl hacimli su damlasının temas açıları ölçülmüş ve bu sonuçlar ileride araştırma bulguları ve sonuçlar bölümünde sunulacaktır. Bu ölçümler, gözeneksiz plakaların yüzey özelliklerini ve bu yüzeylerin su damlalarıyla etkileşimini detaylı bir şekilde anlamak için yapılmıştır. Sunulan veriler, malzemenin yüzey davranışını objektif bir şekilde değerlendirmek için önemli bir referans sağlar. Bu çalışma, gözeneksiz ve gözenekli yüzeylerin su damlalarıyla etkileşimine yönelik detaylı bir inceleme sunmakta ve bu tür yüzeylerin suyla temas etkileşimleri konusunda değerli bilgiler içermektedir.

Temas açısı ölçümlendirilmesi için damla fotoğrafı alındıktan sonra, bu açıyı ölçmek için çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımlar arasında en yaygın kullanılanlar "Image-J" ve "MB-Ruler" programlarıdır. Yeni tasarlanan cihazda temas açısı ölçümleri için Image-J programı tercih edilmiştir.

Programın üst kısmında yer alan kullanıcı arayüzünde, "file-open" seçeneği ile ölçüm yapılacak su damlasının resmi açılır (Şekil 3.25)



Şekil 3. 9. ImageJ Programı

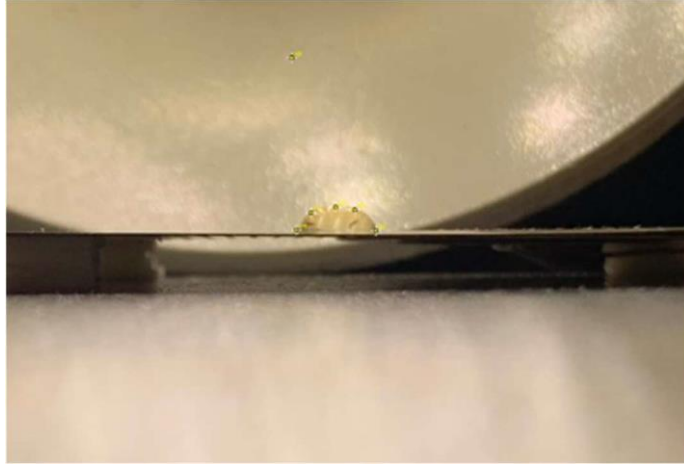
Resim açıldıktan sonra, program içerisindeki "plugins-contact angle" seçeneği kullanılarak, Şekil 3.26'da gösterildiği gibi, su damlası üzerinde 5

adet nokta belirlenir. Bu noktalardan ilk ikisi, damlanın katı yüzeyle temas ettiği kısımları işaret eder. Bu yöntem, temas açısının hassas ve doğru bir şekilde belirlenmesi için etkili bir araçtır ve sıvı damlalarının yüzey etkileşimlerinin incelenmesinde kullanılır.

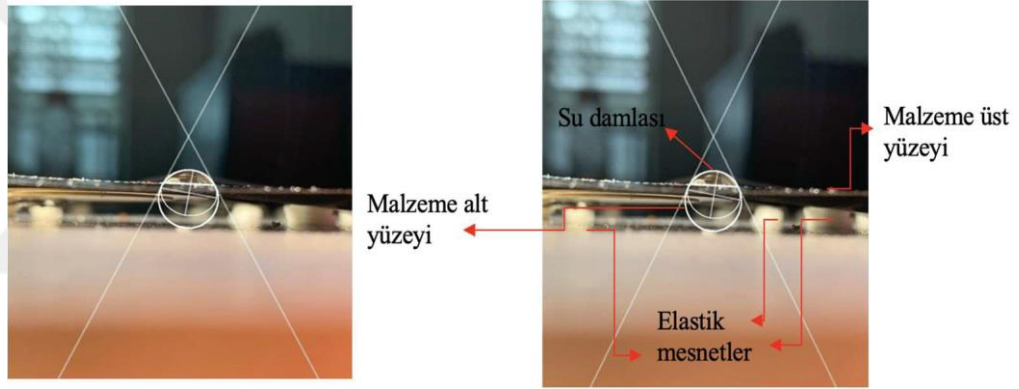
Manuel nokta seçimi işlevi etkinleştirildiğinde, kullanıcının su damlasının kenar boyunca bazı noktaları manuel yerleştirerek damlanın profilini belirlenmesi gerekmektedir. Seçilen bu noktalar temelinde, damlanın şekline uygun olarak bir daireveya elips hesaplaması yapılır. Bazı durumlarda, damla mükemmel bir simetriye sahip olmayabilir veya yerçekimi etkisi hafif bir asimetriye neden olabilir. Bu gibi durumlarda, neredeyse daire şeklinde bir analiz yapmak, damlanın gerçek şeklini anlamak adına faydalı sonuçlar sunabilir (Şekil 3.9). Bu metodoloji, su damlasının yüzeydeki etkileşiminin daha detaylı bir şekilde incelenmesini ve damlanın geometrisinin hassas bir şekilde belirlenmesini sağlar [74].

Bu çalışmada, manuel nokta seçimi yöntemi kullanılarak su damlalarının temas açıları ölçülmüştür. Bu yöntem, damlanın çevresine kullanıcı tarafından manuel olarak yerleştirilen noktalar esas alınarak, bu noktalardan geçen bir daire veya elips şeklinin program tarafından otomatik olarak oluşturulmasına dayanır. Bu şekilde, damlanın temas açısı hesaplanır.

Ölçüm yapılırken, öncelikle damlanın tabanını tanımlamak ve damlanın sınırlarını belirlemek için en az beş noktanın seçilmesi gereklidir. İlk iki nokta, damlanın plaka ile temas ettiği köşelere manuel olarak yerleştirilir ve bu iki noktanın düz bir çizgi üzerinde olmasına dikkat edilir, aksi takdirde program hatalı sonuçlar verebilir. Geriye kalan üç nokta, damlanın sınırlarını belirlemek amacıyla istenilen yerlere konumlandırılır. Bu noktalar yerleştirildikten sonra, program, bu noktalardan geçen bir eğri oluşturarak temas açısını belirler (Şekil 3.11). Bu eğri, damlanın yüzey geometrisini temsil eder ve program, bu geometriye dayanarak damlanın temas açısını hesaplar. Bu metodoloji, su damlalarının yüzey etkileşimlerinin analizinde ve temas açılarının hassas bir şekilde belirlenmesinde etkili bir yöntem sunar. Bu yaklaşım, damla ve yüzey arasındaki etkileşimin daha iyi anlaşılması ve damla davranışlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi için kritik öneme sahiptir.

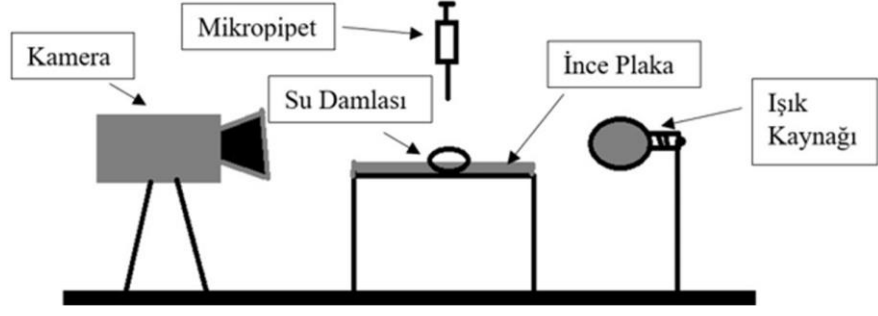


Şekil 3. 10. Damla temas açısının ölçümü-1



Şekil 3. 11. Damla temas açısının ölçümü-2

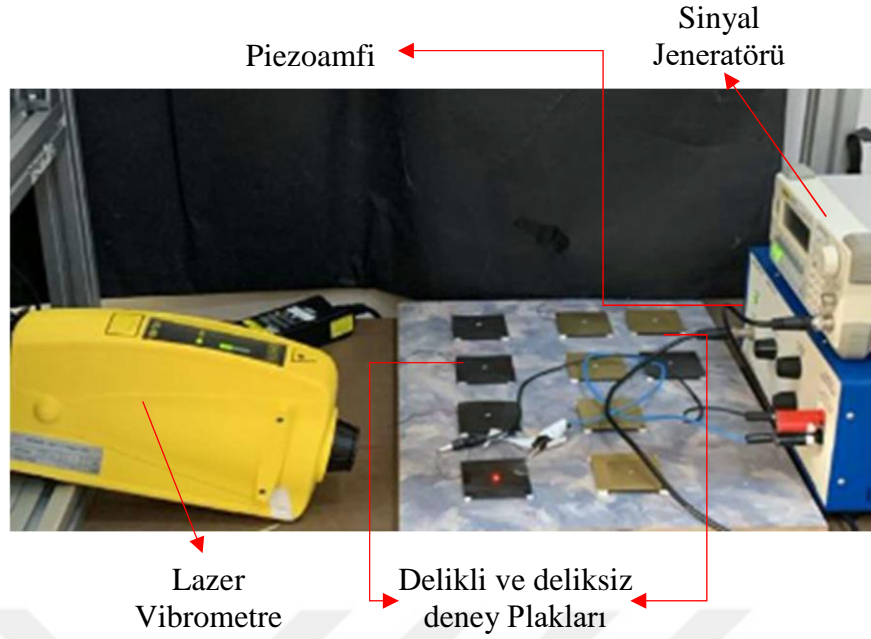
Temas açısı ölçümü yapılırken, yüksek çözünürlükte, odak ve yakınlaştırma özelliklerine sahip 60fps özelliklerine sahip, 12 Megapiksel (MP) kamera kullanılmıştır. Su damlasının kameranın tam karşısında olacak şekilde ışık kaynağı yerleştirilmiştir. 20 mikrolitre ( $\mu\text{l}$ ) hacimde su damlası kullanılmıştır. Su damlası mikropipet yardımı ile numune plak üzerine dikkatlice yerleştirilmiştir. Bu işlem her numune plak için tekrarlanmıştır. Bu işlemin şematik gösterimi yani su damlasının izdüşüm alanının ölçüm deney düzeneği Şekil 3.12’de yer almaktadır.



Şekil 3. 12. Su damlasının temas açısı ölçümünün şematik görüntüsü

### 3.3 Damlanın Atomizasyon Analizi

Damla atomizasyonu deneylerine geçilmeden önce, gözenekli plakaların detaylı tasarımı ve gözenekler arasındaki mesafenin kontrolü gibi önemli adımlar tamamlanmıştır. Ayrıca, su damlalarının plakalar üzerindeki temas açılarının ölçümü ve bu ölçümlerin doğrulaması da yapılmıştır. Bu hazırlık aşamalarını takiben, atomizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir ve bu deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar toplanmıştır. Bu bölümde, deney düzeneğinin, kullanılan deneyekipmanlarının ve deneysel sonuçların nasıl elde edildiği detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Bu açıklama, deney sürecinin her aşamasının anlaşılmasını sağlayacak ve deneysel çalışmanın metodolojisi hakkında kapsamlı bir bilgi sunacaktır. Su damlası atomizasyonu için kurulan deney düzeneği şekil 3.13'te verilmiştir.



**Şekil 3. 13.** Deney düzeneği görüntüsü

Bu deney düzeneğinin temel bileşenleri; saf su, gözenekli ve gözeneksiz yapıda olan pirinç ve paslanmaz çelik plakalar, bir mikropipet, Murata marka 7BB-35-3L0 model piezoelektrik seramik disk, Ometron VQ-400-A lazer vibrometre, Rigol Technologies tarafından üretilen DG1022A model sinyal jeneratörü, Piezo Systems marka EPA-104 piezo doğrusal amplifikatör, Brüel & Kjaer-3050-B-040 veri kaydedici ve 12 megapiksel ve 4K hd ultra özellikte bir yeni nesil 60fps görüntü alabilen kameradan oluşmaktadır.

Deneyde kullanılan gözenekli ve gözeneksiz plakalar önceden hazırlanmıştır. Su damlalarının eşit hacimlerde damlatılması için mikropipet kullanılmıştır; bu mikropipetin hacim özelliği minimum ve maksimum 10-100  $\mu$ l arasındadır. Deney düzeneğinin her bir su damlası, 20  $\mu$ l hacminde olup, mikropipet yardımıyla plakaların merkezine yerleştirilmiştir. Su damlalarının davranışlarının görsel analizi için 4K ultrahd kamera sistemine sahip 60fps özellikleri kullanılmıştır. Bu kamera, atomizasyon işlemi sırasında damlanın üstten görüntülerini kaydetmek üzere plaka yüzeyine dik olarak konumlandırılmıştır. Bu düzenek, damla atomizasyonu sürecinin detaylı bir şekilde incelenmesini ve analiz edilmesini sağlamak amacıyla özenle tasarlanmış ve kurulmuştur (Şekil 3.13).

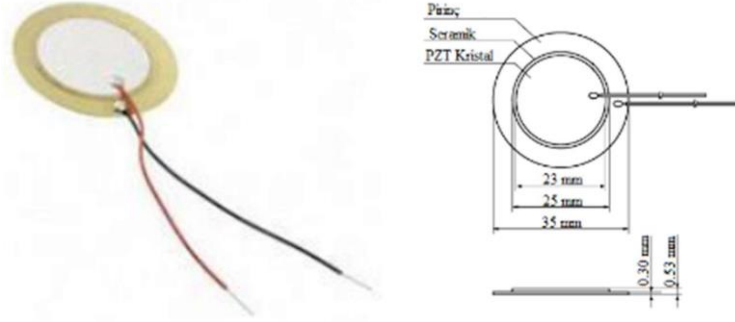
Atomizasyon deneylerinde temas açısı ölçümünün yanı sıra, su damlasının davranışları da kamera ile detaylı bir şekilde kaydedilmiştir. Görüntü kalitesinin, deney sonuçlarının doğruluğu üzerinde büyük bir etkisi olduğundan, yüksek çözünürlüklü ve net görüntüler sağlayabilecek bir fotoğraf makinesi seçilmiştir. Bu amaçla, 12 mega piksel (MP) çözünürlüğe sahip 4K çekim özelliğine sahip yeni nesil bir cep kamera modeli kullanılmıştır. Bu kamera, görüntü analizinde yeterli netliği ve detayı sağlamak için uygun olarak belirlenmiştir.

Su damlasının atomizasyon süreci sırasında elde edilen görsel veriler, aynı kamera ile video formatında kaydedilmiştir. Video kaydı, yüksek çözünürlük ve saniyede 60 kare çekim hızında gerçekleştirilmiştir, bu da atomizasyon sürecinin detaylı ve kesintisiz olarak incelenmesine olanak tanımaktadır. Bu yüksek kaliteli görüntüleme yöntemi, damla atomizasyonunun incelenmesinde kritik rol oynamakta ve elde edilen sonuçların doğruluğunu artırmaktadır.

Bu teknik yaklaşım, damla dinamiklerinin ve atomizasyon süreçlerinin daha derinlemesine anlaşılmasını sağlar.

Deney düzeneğinde, plakanın altına yapıştırılan piezo seramik disk, sinyal jeneratörü ve piezo doğrusal amplifikatör aracılığıyla harmonik olarak zorlanmaktadır. Şekil 3.14'te gösterildiği üzere, bu disk bir pirinç plaka üzerine monte edilmiş bir piezo seramikten oluşmakta ve disk boyutları da ayrıntılı olarak belirtilmiştir [54].

Piezo seramik diskin fiziksel özellikleri, Tablo 3.4'te ayrıntılı olarak listelenmiştir. Pirinç plakanın merkezi, diğer bölgelere göre daha yüksek genlikte hareket etmektedir, lazer ışığı, plakanın merkezine odaklanarak fiziksel frekans ve genlik değerlerini temas olmaksızın ölçmektedir. Lazer vibrometreden elde edilen analog veriler, Brüel&Kjaer veri toplayıcısı kullanılarak dijital sinyallere dönüştürülmüş ve Pulse LabShop yazılımı kullanılarak sayısal olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm yöntemi, plakanın hareketinin hassas bir şekilde kaydedilmesini ve analiz edilmesini sağlar, böylece deneylerin doğruluğu ve güvenilirliği artırılmış olur.



**Şekil 3. 14.** Piezoelektrik seramik disk görüntüsü [77]

**Tablo 3. 1.** Piezoelektrik seramik disk malzeme özellikleri [77]

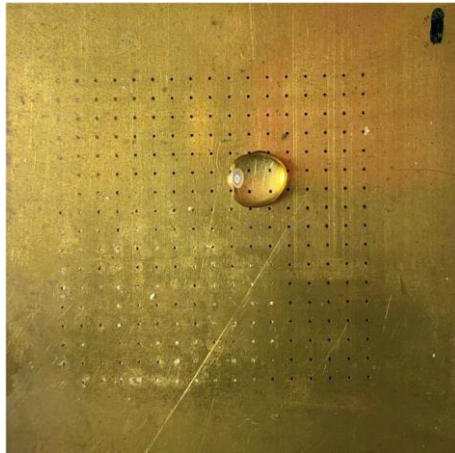
Piezoelektrik Özellikleri	Özellik Değerleri
Piezoelektrik seramik disk malzemesi	Zirkonyum oksit, kurşun titanyum
Rezonans frekansı	2.8 kHz
Sığa (kapasitesi)	30 nF
Plaka çapı	35 milimetre
Piezoelektrik eleman çapı	25 milimetre
Piezoelektrik eleman kalınlığı	0.23 milimetre
Plaka kalınlığı	0.3 milimetre
Elastisite Modülü	103 Gigapaskal

Bu deneyde, tüm kuru yüzeyler piezoya 50 Volt genlikli 0-50 kHz arasında harmonik frekans uygulanarak gerçekleştirilmiş ve sonucunda frekans-ivme tepki grafiği oluşturulmuştur. Plakaların titreşim davranışlarını karakterize etmek amacıyla, doğal frekans bölgelerindeki yanıtları belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 1 Hz'den başlayıp 50 kHz'e kadar uzanan frekans aralığında bir frekans süpürme yöntemi uygulanmıştır. Her bir frekans değerinde ölçülen ivme değerleri, numunenin zorlanan doğal frekanslarına karşılık gelen belli noktalarda belirgin sıçramalar göstermiştir. Bu sıçramalar, incelenen yapıların doğal frekanslarını göstermektedir. Deney sırasında zorlayıcı kuvvetin genliği sabit tutulmuş, frekans artırılarak plakaların merkez noktalarındaki ivme değerleri ölçülmüştür. Elde edilen frekans tepki grafiği çalışmanın sonuçlar bölümünde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu analiz,

plakaların doğal frekanslarını ve titreşim karakteristiklerini anlamak için kritik bir araç olarak kullanılmıştır.

### 3.4 Damla Görüntü Analizi ve İzdüşüm Alanı

Bu çalışmada, su damlasının izdüşüm yüzey alanının ölçümü, ImageJ adlı açık kaynak kodlu görüntü işleme programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, deney sırasında elde edilen videolar, ayrıntılı analiz yapılabilmesi için sıralı fotoğraf serisine dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm işleminde, özellikle hızlı değişimleri içeren videolarda saniyedeki kare sayısı büyük önem taşımaktadır. Yüksek kare hızı, daha detaylı analizlerin yapılabilmesini sağlar. Bu çalışmada kullanılan kamera, saniyede 60 kareye kadar görüntü kaydedebilmektedir. Damlanın plak üzerindeki görüntüsü ilk anda şekil 3.15'teki gibidir. Videolardan her 10 karede bir seçilerek fotoğraf serisi oluşturulmuş ve bu serinin analizi ImageJ görüntü işleme programı aracılığıyla yapılmıştır. Bu yöntem, su damlasının yüzey alanının hassas bir şekilde belirlenmesini sağlamış ve elde edilen fotoğraf serisinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak tanımıştır. ImageJ programı, bu tür görüntü analizlerinde güçlü bir araç olup, su damlasının izdüşüm yüzey alanının doğru ve etkin bir şekilde ölçülmesini mümkün kılmaktadır. Bu analiz yöntemi, su damlasının dinamiklerini ve davranışlarını detaylı bir şekilde anlamak için kritik öneme sahiptir.



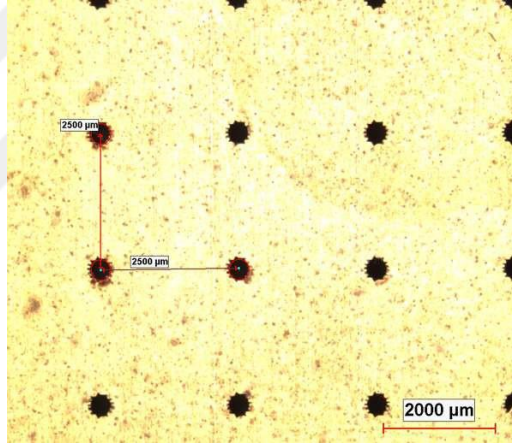
Şekil 3. 15. Damla iz düşüm alanı üstten görüntüsü

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

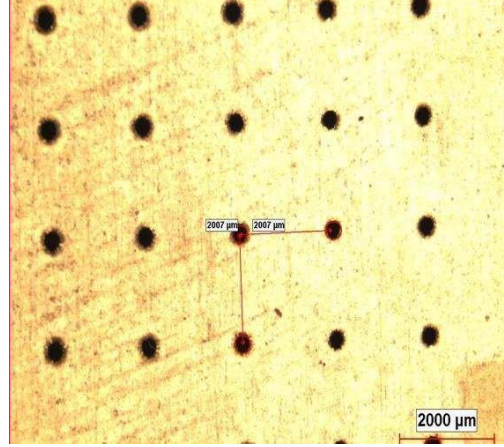
### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### Pirinç Plakalar Üzerinde İki Delik Arası Mesafenin Ölçülmesi

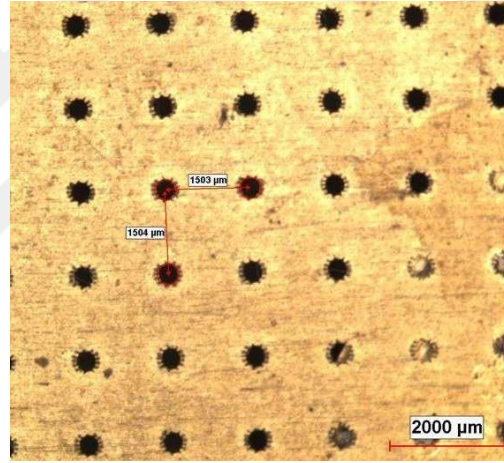
Pirinç plakalarda, ardışık iki delik arasındaki mesafe, deliklerin çap merkezlerinden merkezlerine olan uzaklık baz alınarak planlanmıştır. İki delik arası mesafeler stereo mikroskop ile ölçülmüştür. Birinci numunede bu mesafe 2500 mikron, ikinci numunede 2000 mikron, üçüncü numunede 1500 mikron ve dördüncü numunede 1000 mikron olarak belirlenmiştir. Delikli pirinç malzeme numunelerinin deney düzeneğine ait görseller, sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te yer almaktadır.



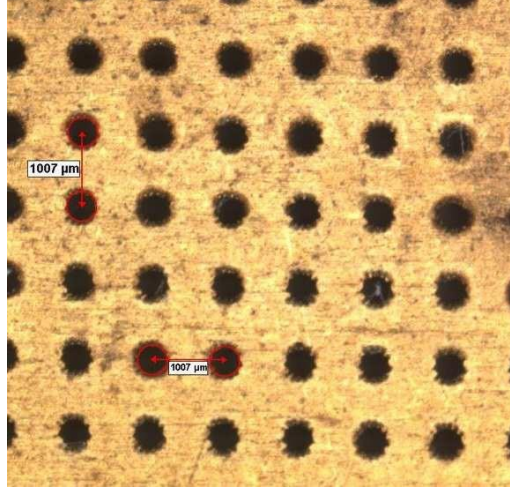
Şekil 4. 1. Gözenek merkezleri arası mesafe:2500 µm



Şekil 4. 2. Gözenek merkezleri arası mesafe: 2000 µm

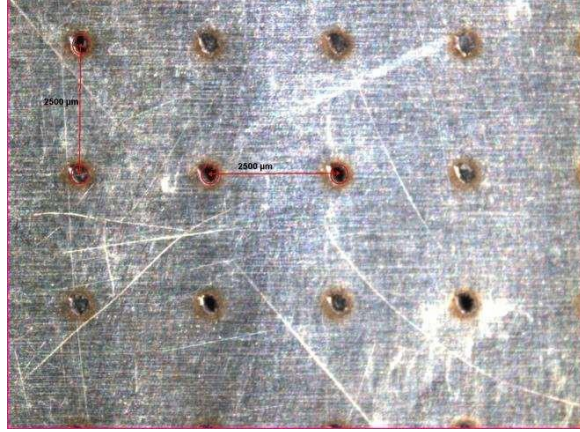


Şekil 4. 3. Gözenek merkezleri arası mesafe: 1500 µm

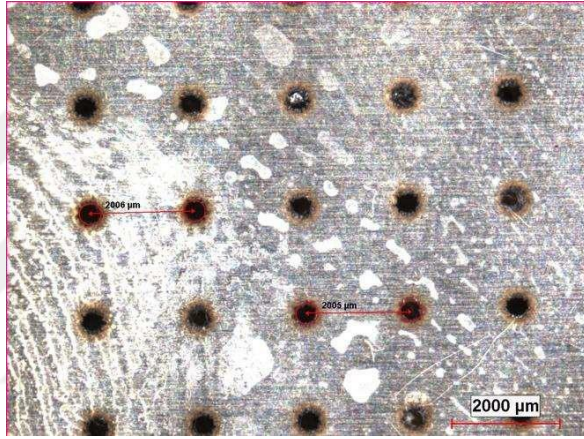


**Şekil 4. 4.** Gözenek merkezleri arası mesafe:1000  $\mu\text{m}$

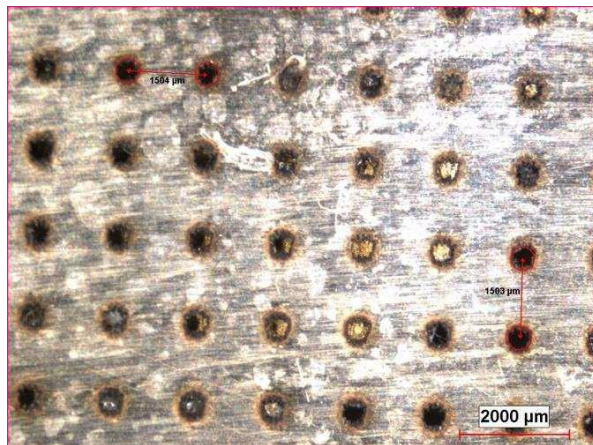
Paslanmaz çelik plaklarda iki gözenek arası mesafe sırasıyla, beşinci numunede 2500 mikron, altıncı numunede 2000 mikron, yedinci numunede 1500 mikron ve sekizinci numunede 1000 mikron olacak şekilde, pirinç plaklardaki iki gözenek arası mesafeleri aynı olacak şekilde lazer markalama ile delinmiştir. Gözenekli paslanmaz çelik numuneleri, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8’de görselleştirilmiştir.



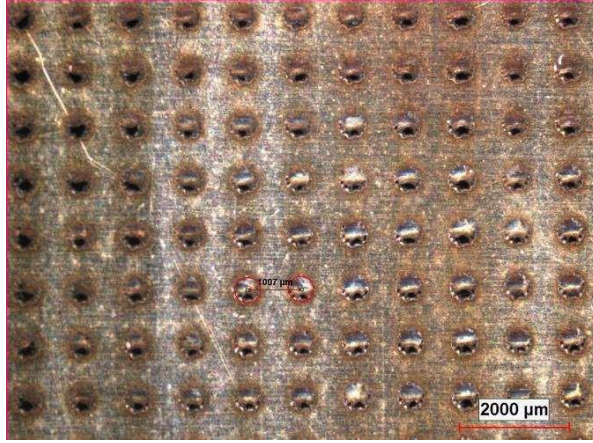
Şekil 4. 5. Gözenek merkezleri arası mesafe: 2500 µm



Şekil 4. 6. Gözenek merkezleri arası mesafe: 2000 µm



Şekil 4. 7. Gözenek merkezleri arası mesafe: 1500 µm



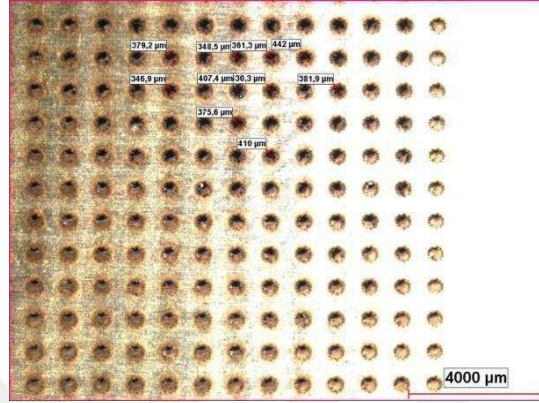
**Şekil 4. 8.** Gözenek merkezleri arası mesafe:1000 µm

Bu numuneler, deneyin amacına uygun olarak özel hazırlanmıştır ve plakaların farklı delikler arası mesafenin özelliklerinin ve her iki malzemenin de gözenekleri arasındaki mesafe farkının etkilerini incelenmiştir.

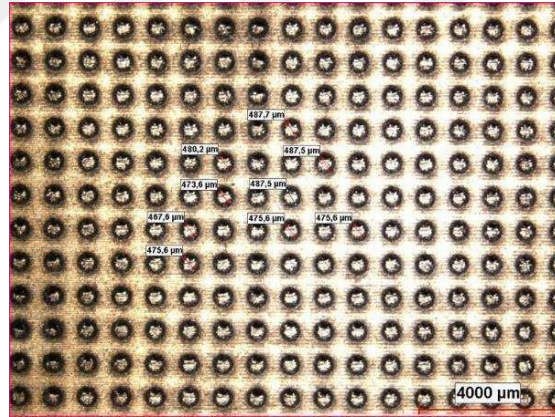
#### **4.1. Delikli Plakların Ön ve Arka Yüzeyleri Delik Çapı Ölçümü**

Delikli plak numuneleri, lazer markalama yöntemi ile delinmiştir. Delik delme işlemi tüm plak numuneleri için ortak olup 500 µm olarak planlanmıştır. Lazer markalama yöntemi ile delme işlemi prosesinden kaynaklanan özellikler nedeni ile, lazer ile delinen plakların gözeneklerin alt yüzey ve üst yüzeylerinde bu gözeneklerin çaplarının birbirinden farklı ölçülerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, plaka kesitinde konik bir yapının oluşmasına sebep olmuştur. Alt ve üst yüzeylerdeki bu farkların ölçülmesinde, yüksek çözünürlüklü görsel inceleme kabiliyetine sahip olan Nikon SMZ745T 15/6460 model stereo mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, hassas ölçüm yetenekleri sayesinde, pirinç ve paslanmaz çelik plakların gözenek çaplarını detaylı bir şekilde belirlememizi sağlamıştır. Bu ölçümler, araştırmada kullanılan delikli pirinç plaka ve paslanmaz çelik plakanın gözenek boyutlarını doğru bir şekilde tanımlamak için kritik öneme sahiptir. Bu mikroskopik inceleme, plakların delik çapı ölçümlerinin detaylı analizini ve deneyler için gerekli olan hassas bilgilerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Plaka numuneleri delik çaplarının her numune için ortak ve 500

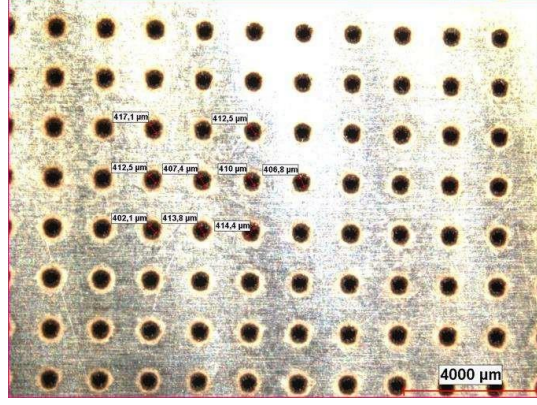
mikron olacak şekilde delinse de delik delme prosesi sonucu her bir numune için eşit olmadığı detayları aşağıdaki görsellerde mevcuttur. Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16'da paslanmaz çelik malzemelerin delik çapı ölçüleri ön yüzey ve arka yüzey ölçümleri mevcuttur.



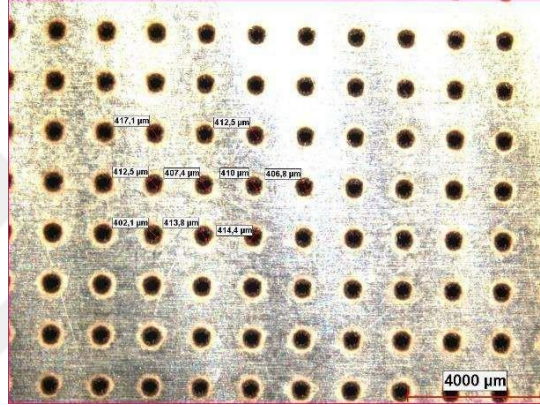
Şekil 4. 9. Paslanmaz çelik iki delik arası 1000 µm arka yüzey



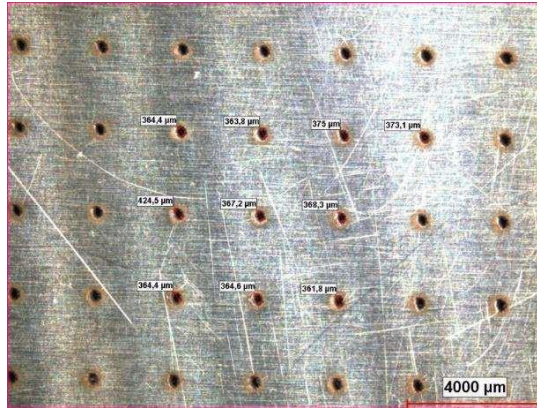
Şekil 4. 10. Paslanmaz çelik iki delik arası 1000 µm ön yüzey



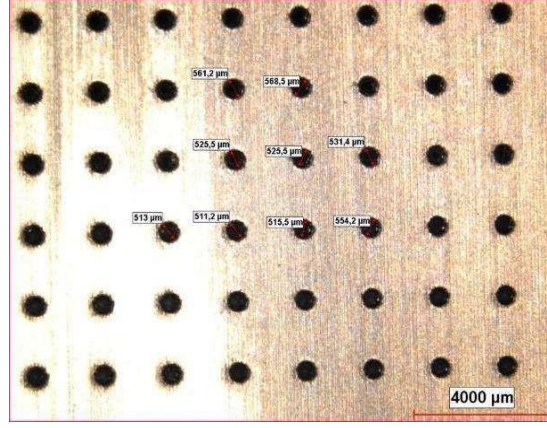
Şekil 4. 11. Paslanmaz çelik iki delik arası 1500 µm arka yüzey



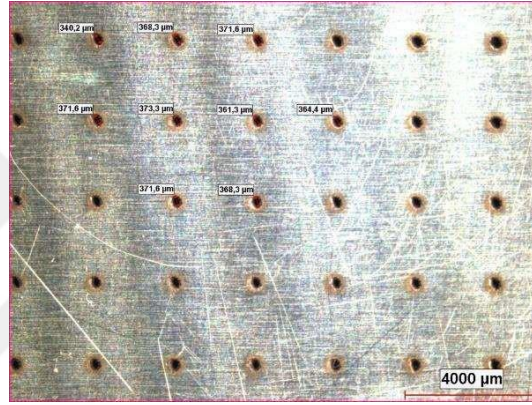
Şekil 4. 12. Paslanmaz çelik iki delik arası 1500 µm ön yüzey



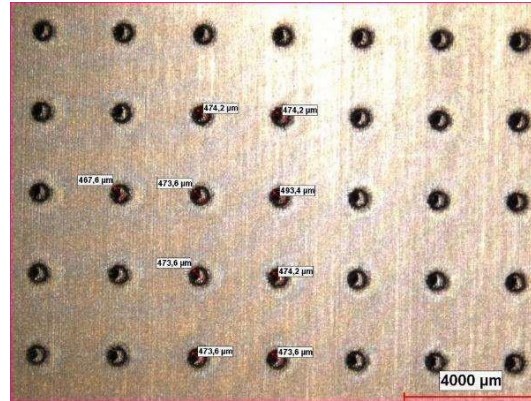
Şekil 4. 13. Paslanmaz çelik iki delik arası 2000 µm arka yüzey



Şekil 4. 14. Paslanmaz çelik iki delik arası 2000 µm ön yüzey

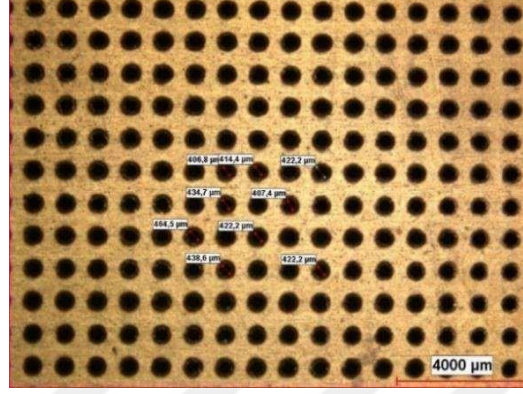


Şekil 4. 15. Paslanmaz çelik iki delik arası 2500 µm arka yüzey

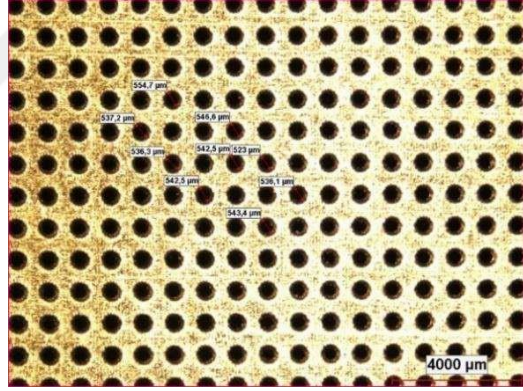


Şekil 4. 16. Paslanmaz çelik iki delik arası 2500 µm ön yüzey

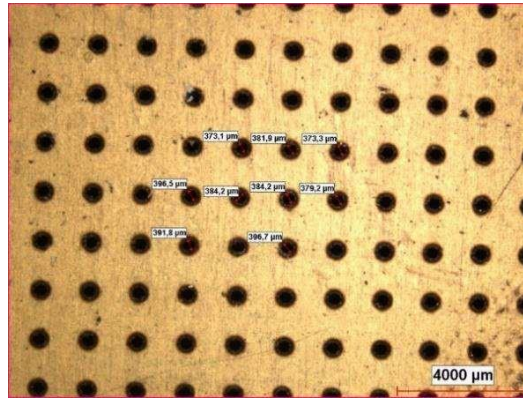
Şekil 4.17, Şekil 4. 18, Şekil 4. 19, Şekil 4. 20, Şekil 4. 21, Şekil 4. 22, Şekil 4. 23, Şekil 4. 24'te gözenekli pirinç plak numunelerinin stereo mikroskopla gerçek delik çapları ölçümünün malzemenin ön ve arka yüzeylerini ölçüm sonuçları detaylı yer verilmiştir.



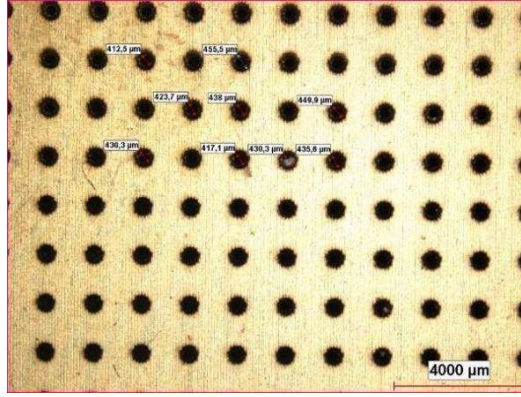
Şekil 4. 17. Pirinç malzeme iki delik arası 1000 µm arka yüzey



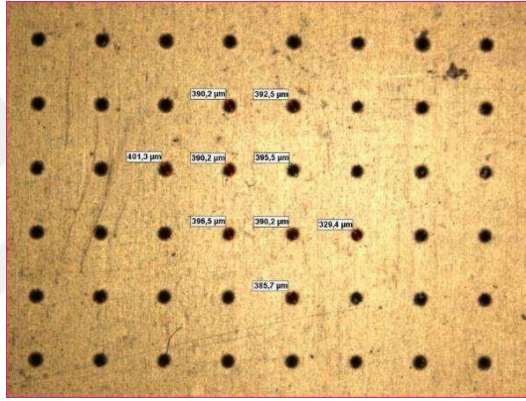
Şekil 4. 18. Pirinç malzeme iki delik arası 1000 µm ön yüzey



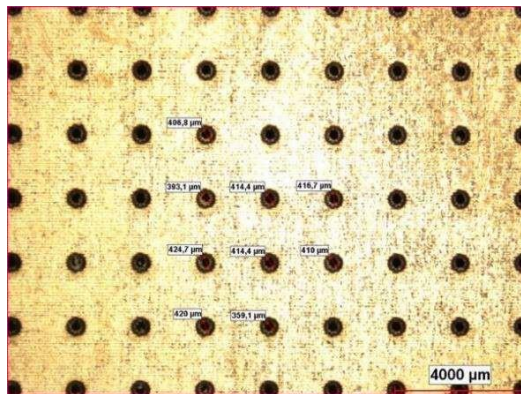
Şekil 4. 19. Pirinç malzeme iki delik arası 1500 µm arka yüzey



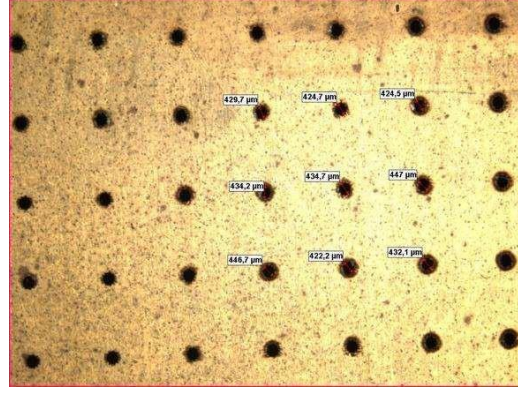
Şekil 4. 20. Piriç malzeme iki delik arası 1500 µm ön yüzey



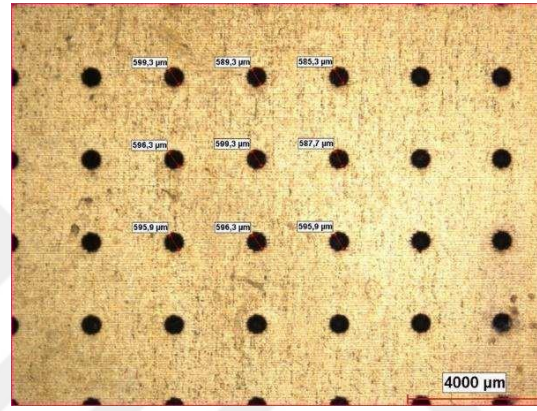
Şekil 4. 21. Piriç malzeme iki delik arası 2000 µm arka yüzey



Şekil 4. 22. Piriç malzeme iki delik arası 2000 µm arka yüzey



Şekil 4. 23. Pirinç malzeme iki delik arası 2500 µm arka yüzey



Şekil 4. 24. Pirinç malzeme iki delik arası 2500 µm ön yüzey

Paslanmaz çelik plak numunelerinin ön yüzey ve arka yüzeyleri arasında gözenek çapı farkı olduğu gözlemlenmiştir. Pirinç malzemedeki plak numunelerinde de benzer şekilde ön yüzey ve arka yüzeyleri arasında gözenek çapı farkı olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.1’de gözenekli tüm numunelerdeki alt ve üst yüzeylerdeki delik çaplarına ilişkin ölçümleri ve bu ölçümlerin ortalamasını içermektedir. Bu ortalamalar şekillerde de görüldüğü gibi her bir numune plak üzerinden alt ve üst yüzeylerinden on adet ölçüm yapılarak elde edilmiştir. Gözenek oluşturma sürecinin tamamlanmasının ardından, tasarlanan 500 µm çaplı gözeneklerin boyutlarıyla ilgili ortalama değerler de yine Tablo 4.1’de sunulmuştur. Deney düzenlemelerinde, daha küçük çaplı deliklerin numunenin üst yüzeyine gelecek şekilde yerleştirildiği belirtilmiştir [72, 73].

**Tablo 4. 1.** Gözenekli pirinç ve paslanmaz çelik plakların delik çapları ölçümleri

Numune	İki Delik Arası Mesafe- özellik - yüzey	Ortalama Delik Çapı (mm)
8.numune	1000 µm paslanmaz çelik – arka yüzey	0.39
8.numune	1000 µm paslanmaz çelik – ön yüzey	0.48
7.numune	1500 µm paslanmaz çelik – arka yüzey	0.41
7.numune	1500 µm paslanmaz çelik – ön yüzey	0.58
6.numune	2000 µm paslanmaz çelik – arka yüzey	0.37
6.numune	2000 µm paslanmaz çelik – ön yüzey	0.53
5.numune	2500 µm paslanmaz çelik – arka yüzey	0.37
5.numune	2500 µm paslanmaz çelik – ön yüzey	0.48
4.numune	1000 µm pirinç – arka yüzey	0.43
4.numune	1000 µm pirinç – ön yüzey	0.54
3.numune	1500 µm pirinç – arka yüzey	0.38
3.numune	1500 µm pirinç ön yüzey	0.43
2.numune	2000 µm pirinç arka yüzey	0.39
2.numune	2000 µm pirinç ön yüzey	0.41
1.numune	2500 µm pirinç arka yüzey	0.43
1.numune	2500 µm pirinç ön yüzey	0.59

#### 4.2. Damlanın Temas Açısı Ölçüm Sonuçları

Gözenekli ve gözeneksiz plaklar üzerinde deney tasarımına uygun olarak 20 mikrolitre hacminde su damlaları plak üzerine yerleştirilmiştir. Kamera yardımıyla temas açıları ölçülmüştür. Bu temas açıları ölçüm sonuçları aşağıdaki Tablo 4.2’de yer almaktadır.

**Tablo 4. 2.** Damlanın temas açısı ölçüm sonuçları

Ölçüm Numunesi	Numune Malzemesi	Numunelerin Gözenekleri Arası Mesafe ( $\mu\text{m}$ )	Temas Açısı (mm)
1.numune	Pirinç	2500	65.40
2.numune	Pirinç	2000	69.90
3.numune	Pirinç	1500	78.00
4.numune	Pirinç	1000	59.00
Gözeneksiz pirinçnumune	Pirinç	Delik yok	71.00
5.numune	Paslanmaz Çelik	2500	50.80
6.numune	Paslanmaz Çelik	2000	51.30
7.numune	Paslanmaz Çelik	1500	63.80
8.numune	Paslanmaz Çelik	1000	63.90
Gözeneksiz çelik numune	Paslanmaz Çelik	Delik yok	43.90

#### 4.3. Plakların Delik Çapları Ölçümleri

Deney tasarımında kullanılan plakların iki gözenek arası mesafe sırasıyla; 1000mikron (1.0 mm), 1500 mikron (1.5 mm), 2000 mikron (2.0 mm) ve 2500 mikron (2.5mm) gerçek ölçüleri ile hazırlanmıştır. Mesafeler arası uzaklık Image J programı yardımıyla ölçülmüştür. İleriki bölümlerden bu ölçüm yönteminin detayları yer almaktadır. Her bir numune plak görseli üzerinde onar adet ölçüm yapılmış olup, pirinçmalzemedden oluşan plak delikleri arası mesafelerinin ortalamaları aşağıda verilen Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3'te pirinç plak malzemeye plak numuneleri; sırasıyla birinci numune;2500 mikron (2.5 mm), ikinci numune 2000 mikron (2.0 mm), üçüncü numune 1500 mikron (1.5 mm) ve dördüncü numune ise 1000 mikron (1.0 mm) olarak tasarlanan plak numunelerinin iki gözenek arası mesafelerinin rastgele onar adet olarak belirlenenölçümleri yer almaktadır. Ortalama değerleri yine aynı Tablo 4.4'te yer almaktadır.

**Tablo 4. 3.** Gözenekli pirinç ve paslanmaz çelik plağın gözenek merkezleri arası mesafesinin mikroskop ölçüm sonuçları

Ölçüm Sayısı	1.numune Pirinç 2500 $\mu$ m	2.numune Pirinç 2500 $\mu$ m	3.numune Pirinç 1500 $\mu$ m	4.numune Pirinç 1000 $\mu$ m
1	2.00	1.44	0.99	0.60
2	1.96	1.52	1.01	0.48
3	1.98	1.58	1.00	0.48
4	1.96	1.52	1.06	0.45
5	2.02	1.50	1.10	0.50
6	2.00	1.49	1.09	0.54
7	1.91	1.54	1.00	0.52
8	2.03	1.56	1.10	0.54
9	2.00	1.54	1.05	0.50
10	2.06	1.57	1.05	0.50
<b>ORT.</b>	<b>1.99</b>	<b>1.53</b>	<b>1.05</b>	<b>0.51</b>

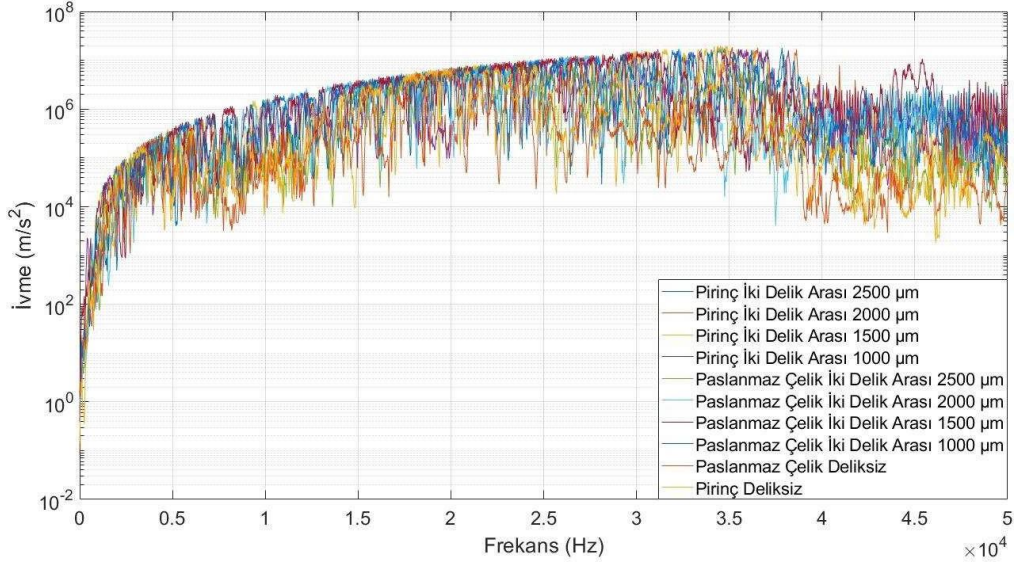
Tablo 4.4'te paslanmaz çelik malzeme plak numuneleri; sırasıyla birinci numune, 2500 mikron (2.5 mm), ikinci numune 2000 mikron (2.0 mm), üçüncü numune 1500 mikron (1.5 mm) ve dördüncü numune ise 1000 mikron (1.0 mm) olaraktasarlanan plak numunelerinin iki gözenek arası mesafelerinin rastgele onar adet olarak belirlenen ölçümleri yer almaktadır. Ortalama değerleri yine aynı tabloda yer almaktadır.

**Tablo 4. 4.** Gözenekli paslanmaz çelik plağın iki gözenek arası mesafenin gerçek değerleri

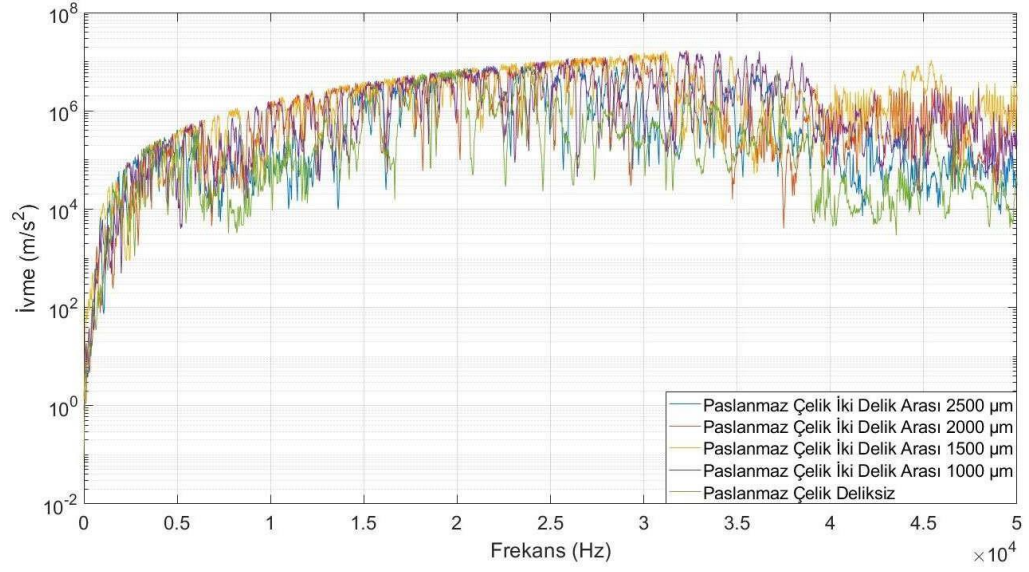
Ölçüm Sayısı	5.numunePaslanmazÇelik 2500µm	6.numunePaslanmazÇelik 2500µm	7.numune Paslanmaz Çelik 1500µm	8.numunePaslanmaz Çelik 1000µm
1	1.94	1.50	0.95	0.54
2	1.94	1.42	0.89	0.51
3	1.94	1.45	0.93	0.51
4	2.00	1.45	1.08	0.54
5	1.98	1.47	1.08	0.51
6	1.99	1.48	1.02	0.41
7	1.99	1.53	0.97	0.54
8	2.08	1.51	1.04	0.54
9	1.96	1.53	0.97	0.54
10	1.95	1.54	1.04	0.51
ORT.	1.98	1.49	1.00	0.52

#### 4.4. Plakaların Frekans İvme Analizi

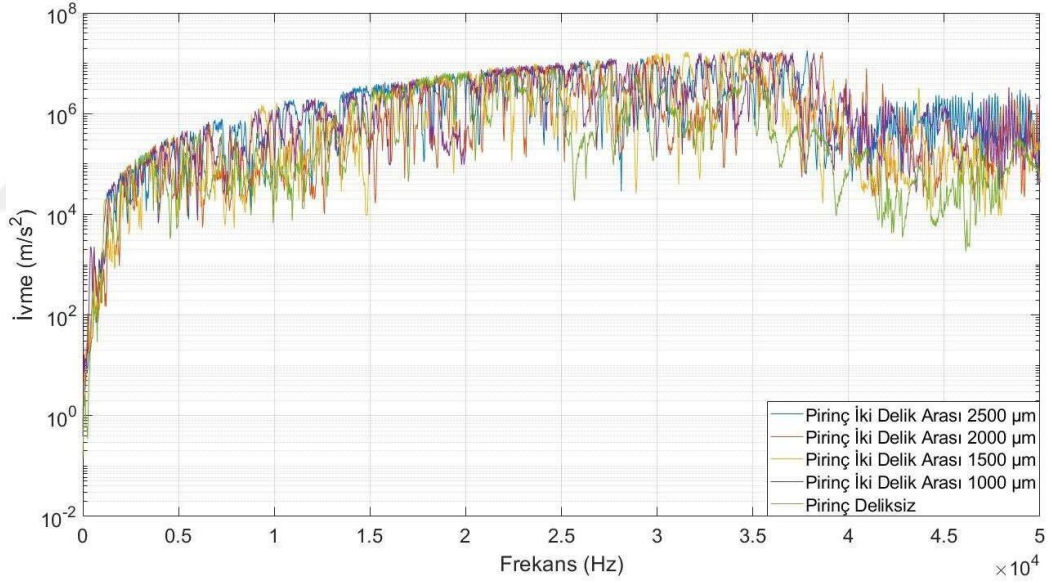
Gözenekli ve gözeneksiz plakların üst yüzeylerinde sıvı damlası olmadan harmonik olarak frekans taraması yapılmıştır. Bunun için plak üst yüzeylerinde iletken gri bant kullanılmıştır. Bu bant her bir plak için tam orta noktaya yerleştirilmiştir. Harmonik frekans taraması daha önceki çalışmalarımızda da kullandığımız ölçüm aralığında olup 1 Hz ile 50 kHz arasındadır. Sinyal jeneratörü ile 20Hz-50kHz arasında 60s olarak tarama yapılmıştır. Amfi genliği, 50 Voltluk gerilim oluşturmaktadır. Harmonik olarak frekans taraması yapılmıştır. Frekans taraması yapıldıktan sonra grafikleri oluşturulmuştur. Bunun için plak üst yüzeylerinde iletken gri renk bant kullanılmıştır. Bu bant her bir plak için tam orta noktaya yerleştirilmiştir. Harmonik olarak frekans taraması yapıldıktan sonra grafikleri oluşturulmuştur. Numunelerin tümünü içeren frekans ivme grafiği Şekil 4.25 'de yer almaktadır. Plak numunelerin malzemesine grafikler Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 'de yer almaktadır.



Şekil 4. 25. Piriç ve Paslanmaz çelik yüzeylerin frekans ivme grafiği



**Şekil 4. 26.** Paslanmaz çelik yüzeylerin frekans ivme grafiği



**Şekil 4. 27.** Pirinç yüzeylerin frekans ivme grafiği

Şekillerde gösterildiği üzere, incelenen tüm numunelerde en yüksek ivme değerlerinin genellikle 17.5kHz ile 30 kHz frekans aralığında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu gözlem, deneylerde kullanılacak çalışma frekansının seçimi için önemli bir rehber teşkil etmektedir. Bu bilgiye dayanarak, deneyler için optimal çalışma frekansının bu yüksek ivme değerlerine yakın bir noktada olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Frekans tarama çalışmaları yapıldıktan sonra, deneysel verilere dayanarak daha önceki literatürde yer alan damla atomizasyonu çalışmalarında da referans alınarak [78] tercih edilen 18.7 kHz frekansı çalışma frekansı olarak belirlenmiştir. Bu referansın seçilmesindeki bir diğer neden ileriki bölümlerde anlatılacak olan atomizasyon deneylerinde suyun bu damlada atomize olduğunun gözlemlenmesidir. Bu frekansta çalıştırılan plakalar, kalıcı durum davranışı sergileyen kadar bekletilmiş ve bu noktada ivme değerleri ölçülmüştür. Bu yöntem, frekansın dinamik sistemlerin davranışı üzerindeki etkilerini anlamak için kritik önem taşımaktadır ve plakaların tepkilerini daha doğru bir şekilde değerlendirmeyi sağlamıştır.



## BEŞİNCİ BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, pirinç ve paslanmaz çelik plakalar üzerine yerleştirilen 20 mikrolitre hacmindeki su damlalarının boyutsuz izdüşümü alan değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu ölçümler, malzemelerin yüzey özelliklerinin sıvıların davranışı üzerindeki etkilerini anlamak için önemlidir.

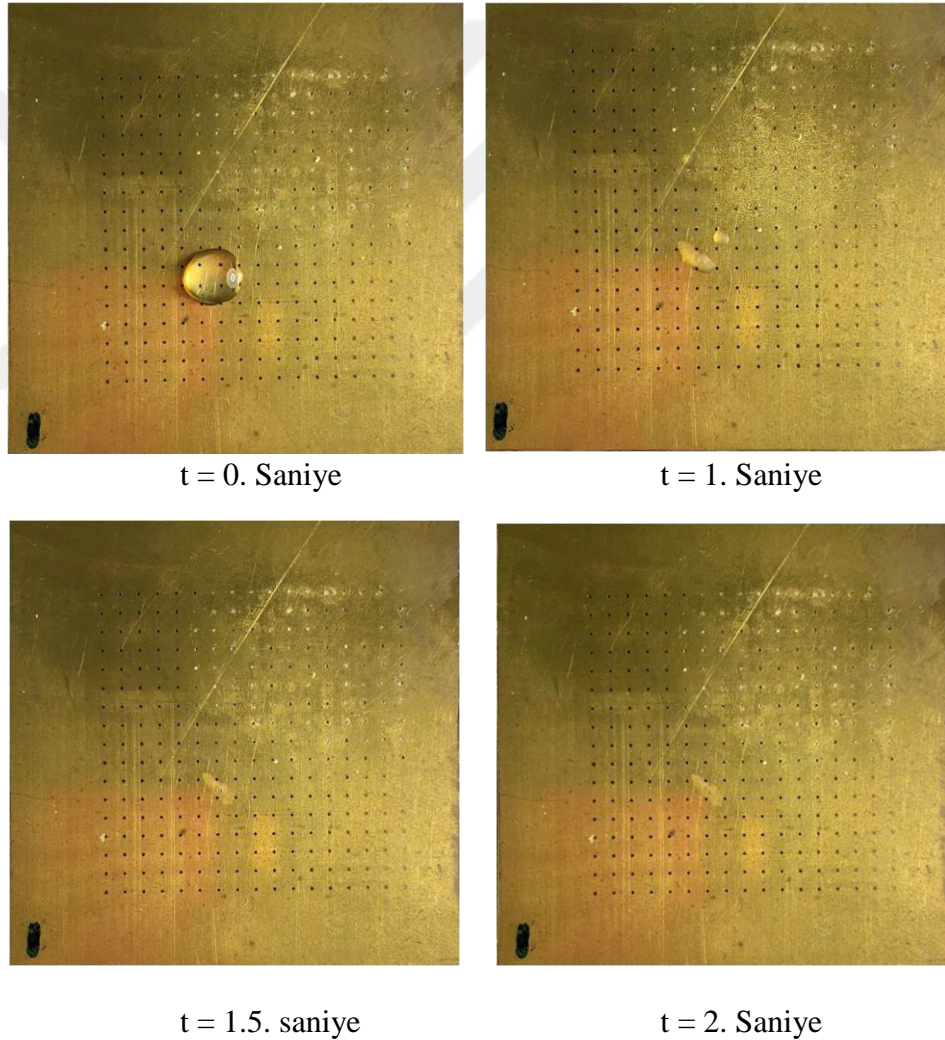
Çalışmada delikli plaka üzerine yerleştirilen damla, yüzeyinden küçük damlacıkların bir kısmının damla yüzeyinden havaya fırlatıldığı, bir kısmının ise plak alt kısmına atomize olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmalar, suyun atomizasyon süreci ile ilgili sorunları çözmek ve daha verimli çözümler sunmak için önemli bir adım sunmuştur. Bu adımları incelerken 18.7 Khz frekansındaki damla iz düşüm alanı sonuçları ve frekans süpürme ile karşılaştırılmıştır. Frekans süpürme sırasında birçok frekans üzerinden geçtiğimiz için, yüzey ya da damla çeşitli frekanslarda zorlanmakta ve bu da yüzeyin veya damlanın rezonans frekanslarına denk gelen bazı frekansların sürekli olarak uyarılmasına neden olmaktadır. Bu uyarılma sonucunda damla yoğun bir şekilde zorlanmakta ve atomizasyon sürecinin çok kısa sürdüğünü gözlemlemekteyiz.

#### 5.1. 18.7 Khz'de Damlanın İz Düşüm Alanı Ölçüm Sonuçları

Deney sürecinde, her iki malzeme türüne aynı hacimde su damlası yerleştirilmiş ve bu damlaların iz düşüm alanlarının zamanla nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.1 'de pirinç malzemeli delikli plağa ait ve iki delik arası mesafenin 2.5 mm olduğu numunenin görseli mevcuttur Şekil 5.2. 'de damlanın zamanla alan değişimini gösteren görseller örneklendirilmiştir. Şekil 5.1 'de görselleri mevcut olan deney süresi toplamda 2 dakika 17 saniye sürmüştür. Şekil 5.2 'de ise deliksiz pirinç malzeme numunesine ait görselin belirli zamanlarda görüntü analizi programı ile elde edilmiş görsellerin örnekleri mevcuttur. Şekil 5.2 'de görselleri verilen deneyin toplam atomizasyon süresi ise 13 dakika 1 saniye sürmüştür. Şekil 5.3 'te iki delik arası mesafenin 2.5 mm olduğu paslanmaz çelik plak numunesine ait deneyin belirli t zaman aralığındaki görselleri mevcuttur. Bu görsellere ait deneyin gerçek

süresi toplamda 6 dakika 39 saniye sürmüştür. Şekil 5.4 'te ise deliksiz paslanmaz çelik malzemeli plak numunesinin görselleri belirli t zamanlarındaki görüntü örnekleri mevcuttur. Şekil 5.4 'te görselleri verilen deneyin toplam atomizasyon süresi ise 39 dakika 27 saniye sürmüştür ve bu değer tez çalışmasının maksimum deney süresidir. Toplanan veriler grafiksel olarak analiz edilmiş ve bu analizlerin sonuçları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sunulmuştur. Grafikler, damlaların alanlarının zaman içindeki değişimlerini göstererek, farklı yüzey özelliklerine sahip malzemelerin sıvıyla olan etkileşimlerindeki farklılıkları ortaya koymaktadır.



**Şekil 5. 1.** Delikli pirinç plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi



t = 0. saniye



t = 1. Saniye



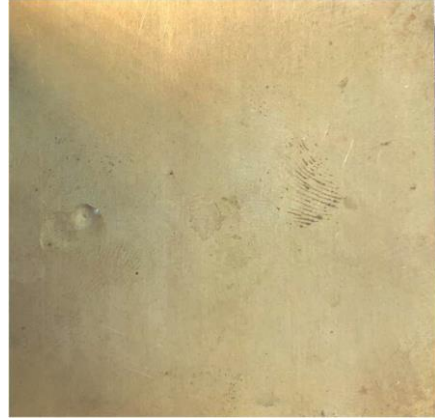
t = 20. saniye



t = 49. Saniye

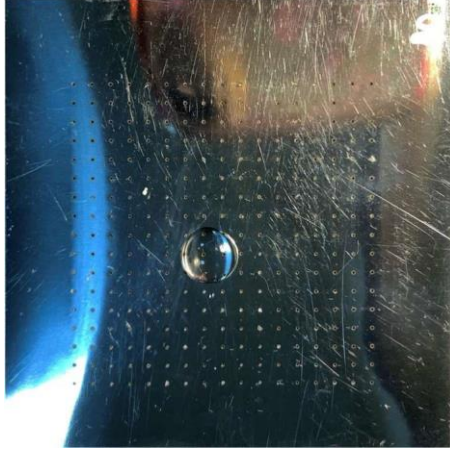


t = 520. saniye

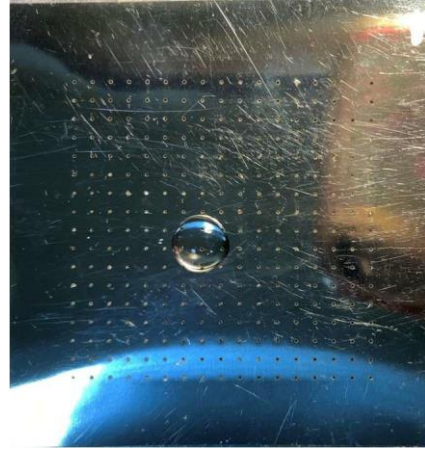


t = 1170. Saniye

Şekil 5. 2. Deliksiz pirinç plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi



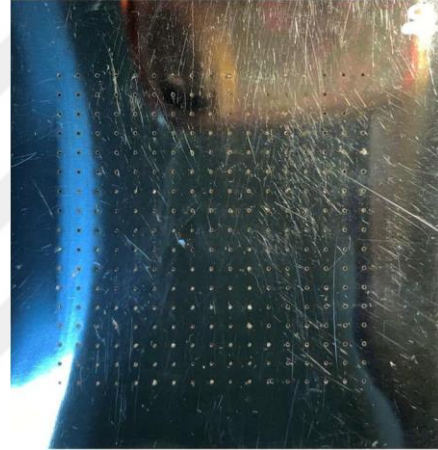
t = 0. saniye



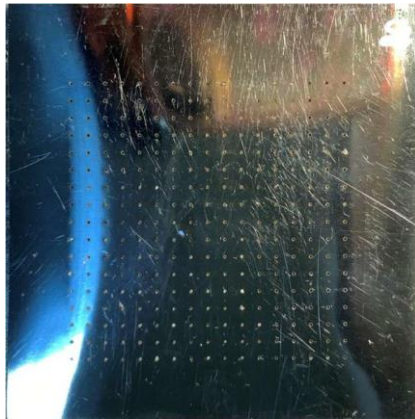
t = 10. Saniye



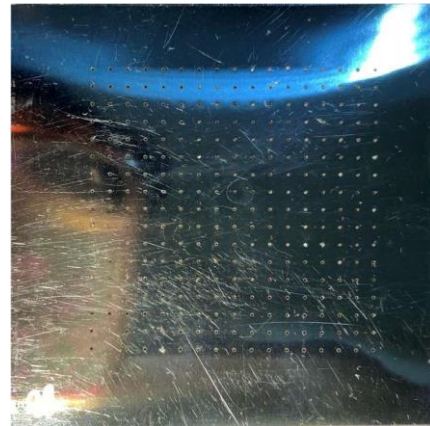
t = 260. saniye



t = 500. Saniye



t = 520. saniye



t = 770. Saniye

Şekil 5. 3. Delikli pas. çelik plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi



t = 0. saniye



t = 1. Saniye



t = 20. saniye



t = 49. Saniye

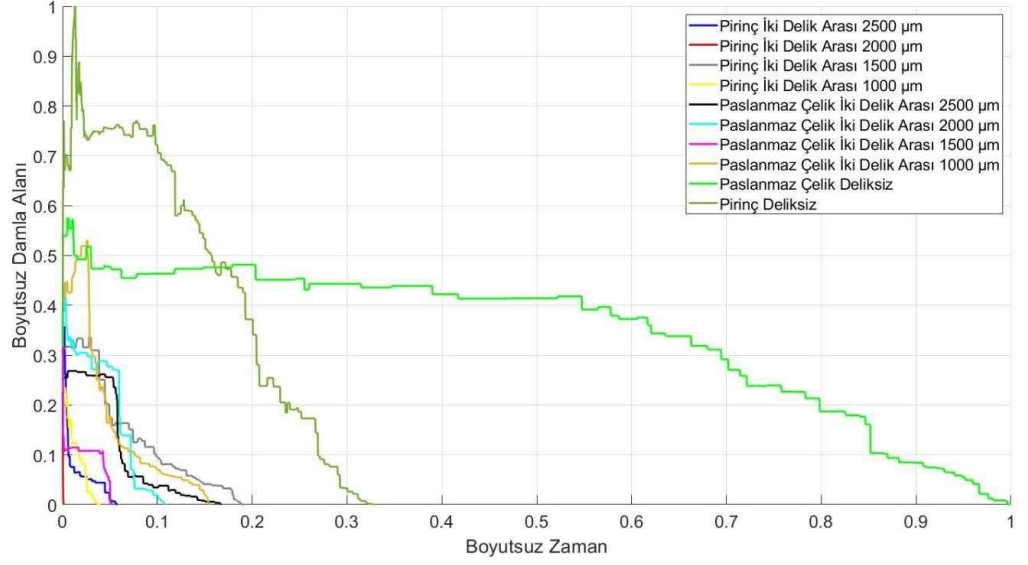


t = 520. saniye



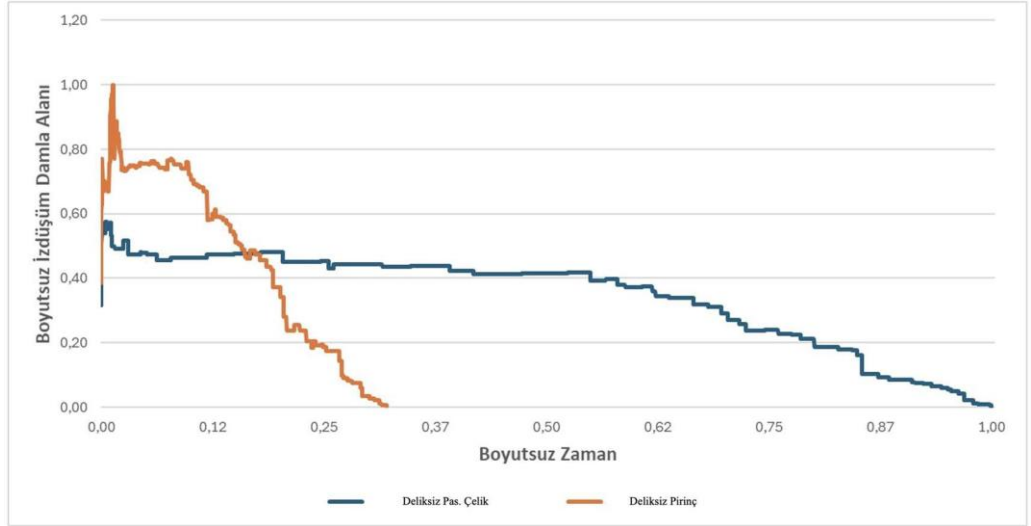
t = 1170. Saniye

**Şekil 5. 4.** Deliksiz paslanmaz çelik plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi



**Şekil 5. 5.** Pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi

Şekil 5.5 ‘deki grafikte yer alan sonuçlar, zamanın ve alanın boyutsuzlaştırma sonuçlarıdır. Boyutsuzlaştırma işlemi her bir deneyin 60 fps zaman aralığında oluşturulmuş görüntülerinin maksimum zamana ve maksimum alanına bölünmesi ile elde edilmiştir. Örneğin; 18.7 Khz ‘de paslanmaz çelik ve deliksiz plağa ait deneyin toplam atomizasyon süresi 39.27 saniyedir. Görüntü işleme analizi ile bölüm 3.4’te anlatıldığı gibi damla görüntü alanları ölçülmüştür ve en fazla görüntü adedi paslanmaz çelik ve deliksiz plağa ait olduğu görülmüştür. Boyutsuz zaman için her alan bu maksimum değere ait toplam görüntü adedine bölünerek elde edilmiştir. Aynı şekilde boyutsuz damla alanı için de, her bir fotoğraf karesine denk gelen damla alanı, maksimum alana bölünerek elde edilmiştir.



**Şekil 5. 6.** Deliksiz pirinç ve deliksiz paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi

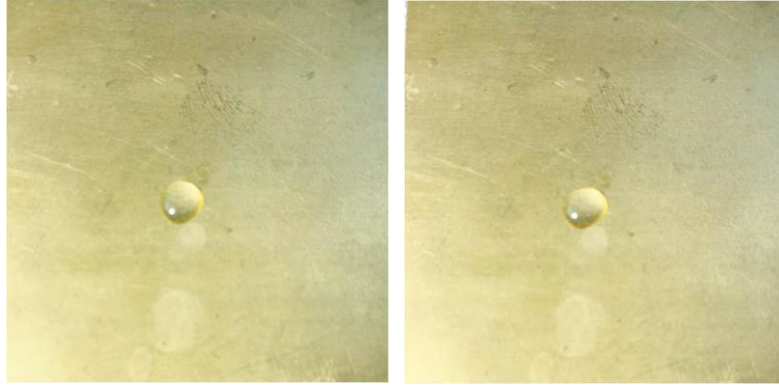
Damla alanı, başlangıçta artar ve ardından azalır. Grafiğin azalan bölgelerinde zaman zaman duraksamalar meydana geldiği grafikler üzerinde görülmektedir. Deneylerde kullanılan numunelerde atomizasyon süresinin en uzun olduğu numune deliksiz paslanmaz çelik plakaya aittir. Deliksiz numunelerin atomizasyon süresi delikli olan numunelere kıyasla çok daha uzun sürmektedir. Bölüm 4 ve şekil 4.25 'teen genel haliyle detayları mevcuttur. Genel olarak paslanmaz çelik numunelerinin, atomizasyon süresi pirinç malzeme kıyasla daha uzun sürdüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin bu tez çalışmasında paslanmaz çelik malzemenin elastisite modülü ile doğrudan ilişkili olduğunu kanıtlamıştır. Paslanmaz çeliğin elastisite modülü, pirinç malzemeye kıyasla daha büyüktür. Paslanmaz çeliğin piezoelektrik etki altında titreşiminin daha zor gerçekleşmesi ve bununla beraber daha uzun atomizasyon süresine maruz kalması beklenen bir sonuçtur. Deneysel olarak gözlenen bu sonuç grafikler ile uyumaktadır. Şekil 5.6'daki grafikte bu süre açıkça sunulmuştur

### 5.1. Frekans Süpürme ile Damlanın İz Düşüm Alanı Ölçüm Sonuçları

Frekans süpürme sırasında, 60 saniye boyunca 15.0 Khz – 25.0 Khz arasında birçok frekansta tarama yapıldığı için yüzey veya damla çeşitli frekanslarda zorlanmaktadır. Bu durum, yüzeyin veya damlanın rezonans frekanslarına denk gelen bazı frekansların sürekli olarak uyarılmasına neden

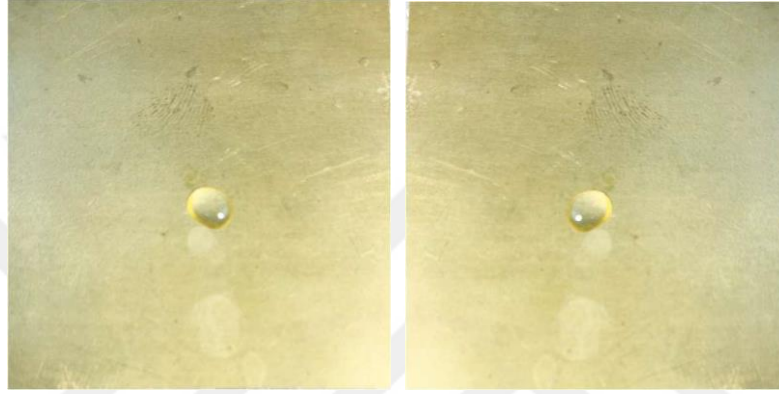
olmaktadır. Bu sürekli uyarılma sonucunda damla yoğun bir şekilde zorlanmakta ve atomizasyon sürecinin çok kısa sürdüğü gözlemlenmiştir. Şekil 5.7 'de frekans süpürme deneyine ait belirli t zaman aralığındaki deliksiz pirinç malzemeye ait görseller mevcuttur. Frekans süpürme işlemi her bir numune için maksimum 60 saniye olacak şekilde kurgulanmıştı. Bazı numune plakların üzerinde damlanın tamamının atomize olduğu gözlenmiş olsa da bazı numune plakların üzerinde bu belirlenen 60 saniye zamanında damlanın tamamının atomize olmadığı gözlemlenmiştir. Deliksiz plağın üzerinde damlanın tamamen bitmediği 3100. saniyede damlanın varlığı aşağıdaki şekil 5.7 'de açıkça görülmektedir.





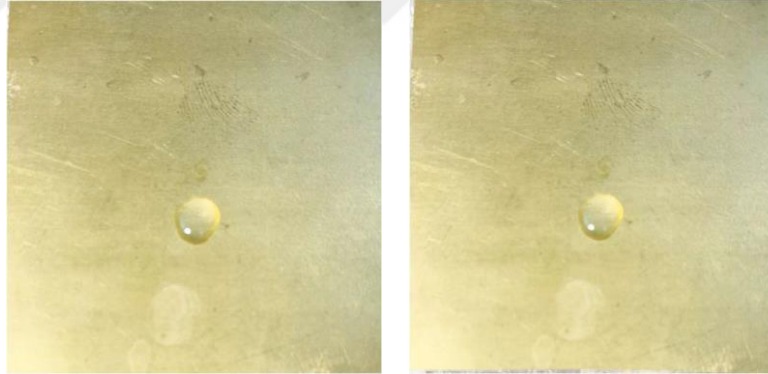
t = 0. saniye

t = 50. Saniye



t = 220. saniye

t = 260. Saniye

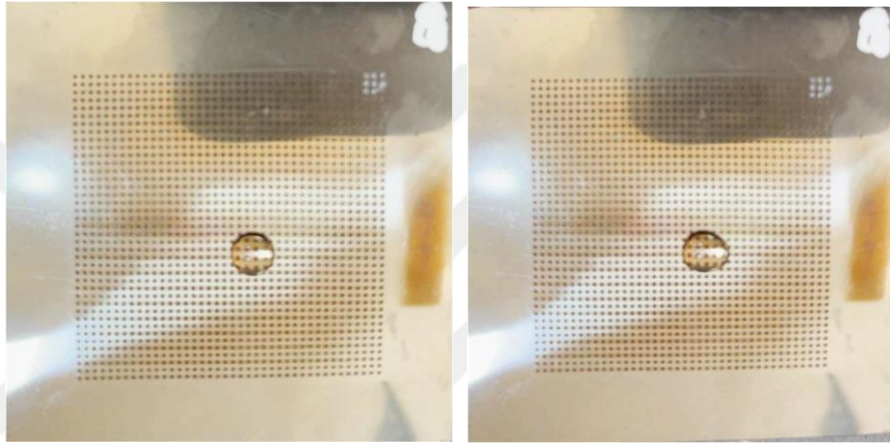


t = 2000. saniye

t = 3100. Saniye

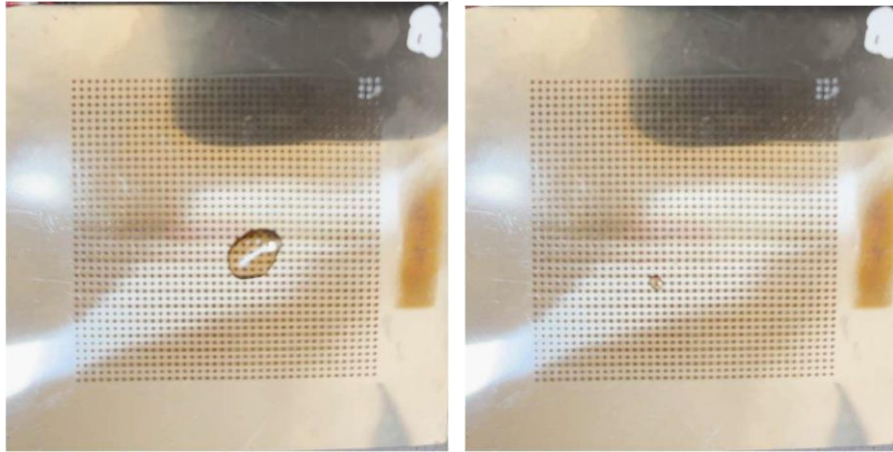
**Şekil 5. 7.** Frekans süpürme ve deliksiz pirinç plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi

Şekil 5.8 'de frekans süpürme deneyine ait görseller, delikli paslanmaz çelik malzeme ve iki delik arası mesafenin 0.5 mm olduğu deneyin görselleridir. Bu görsellerin oluşturulması yine yukarıdaki bölüm 5.1 'de bahsedildiği üzere görüntü işleme programı ile elde edilmiştir. Görseller, belirli t zaman aralığına ait olup görsellerin altlarındaki t zaman aralıklarına uygun olarak örneklendirilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere damla alanı ilerleyen süre boyunca önce artar, daha sonra azalmaya başlar. Tüm deneyler boyunca da deneysel olarak gözle görülür şekilde gözlemlenen sonuçların grafikleri ile de uyumlu olduğunu gözlemlenmiştir.



t = 0. Saniye

t = 80. Saniye

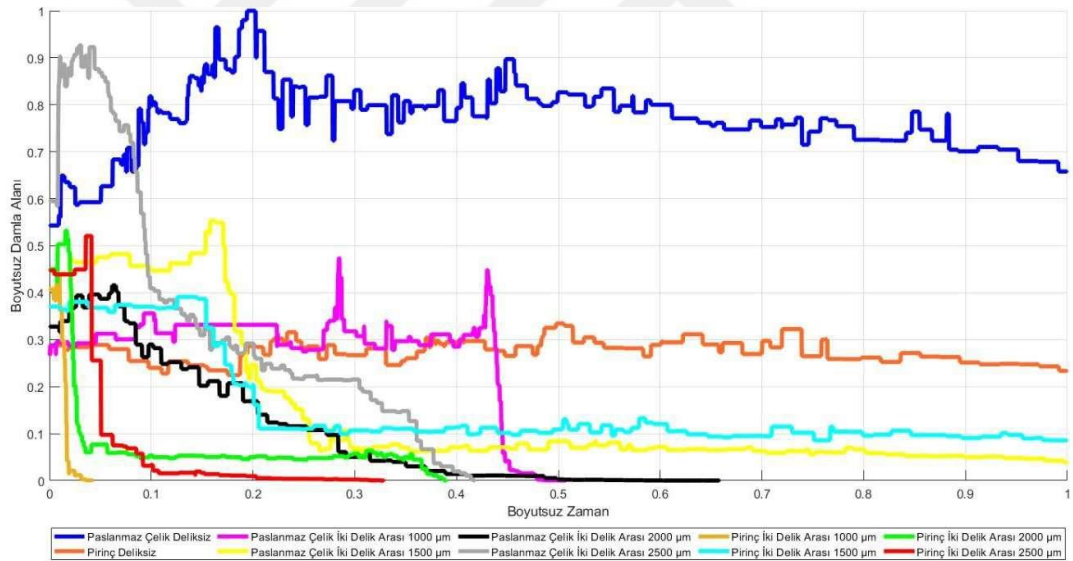


t = 1535. Saniye

t = 1630. Saniye

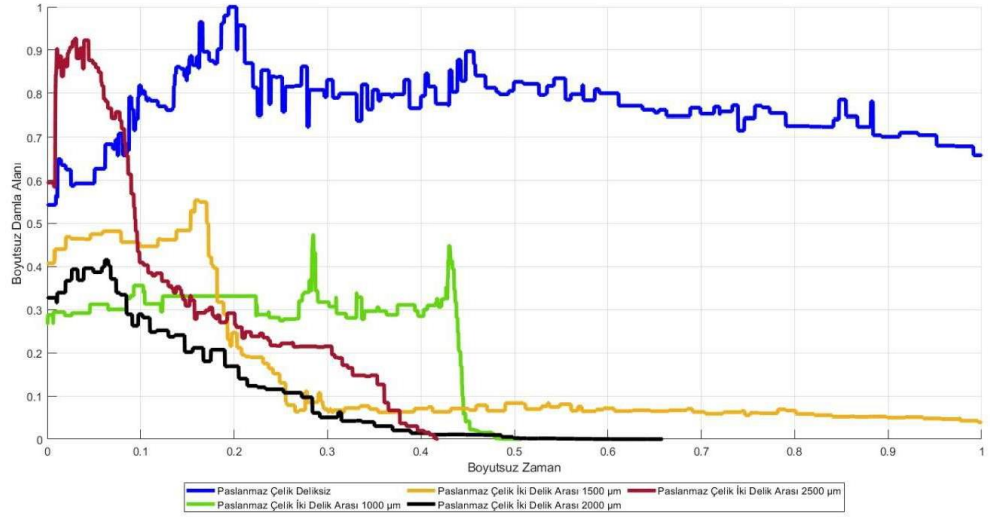
**Şekil 5. 8.** Frekans süpürmede delikli paslanmaz çelik plak üzerindeki damla alanının zamanla değişimi

Şekil 5.9 'da pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait genel grafikleri mevcuttur. Grafikte de görüldüğü üzere paslanmaz çelik malzemelerden iki delik arası mesafenin 1500 mikron paslanmaz çelik, deliksiz pirinç ve deliksiz paslanmaz çelik numuneleri ile iki delik arası mesafenin 1500 mikron olduğu pirinç plaklara ait değerlerin sıfırlanmadığı gözlemlenmiştir. Frekans süpürme boyunca 60 saniye süreci içerisinde damlanın tamamen atomize olduğu numunelerin değerleri grafikte de görüldüğü şekliyle sıfırlanmıştır. Damla tamamen atomize olmuştur. Frekans süpürme işlemindedamla atomizasyon süresince, grafiklerde önce artan, daha sonra azalmaya başlayan, zaman zaman duran eğilimde olduğunu gözlemlemekteyiz. Azalmanın bazı aralıklardahızlı bir şekilde bazı aralıklarda ise daha kısa sürede azaldığını grafiklerde görmektedir. Pirinç malzeme ve iki delik arası mesafenin 1000 mikron olduğu plağım en kısa sürede atomize olmuştur.

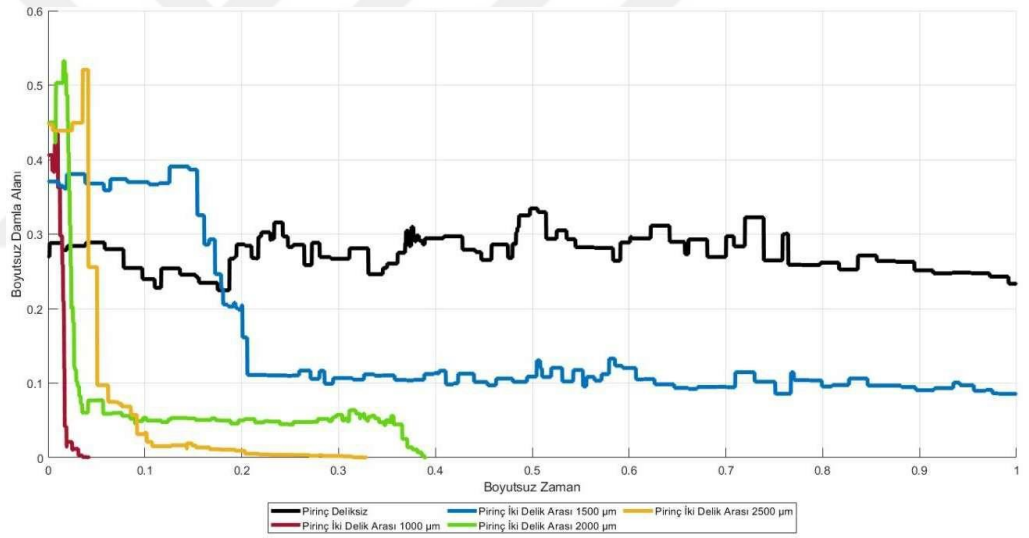


**Şekil 5. 9.** Pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi

Şekil 5.10 'da pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait genel grafikleri mevcuttur. Grafikte de görüldüğü üzere paslanmaz çelik malzemelerden iki delik arası mesafenin 1500 mikron, deliksiz pirinç ve deliksiz paslanmaz çelik numuneleri ile iki delik arası mesafenin 1500 mikron olduğu plaklara ait değerlerin sıfırlanmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 10. Frekans süpürme ile paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi

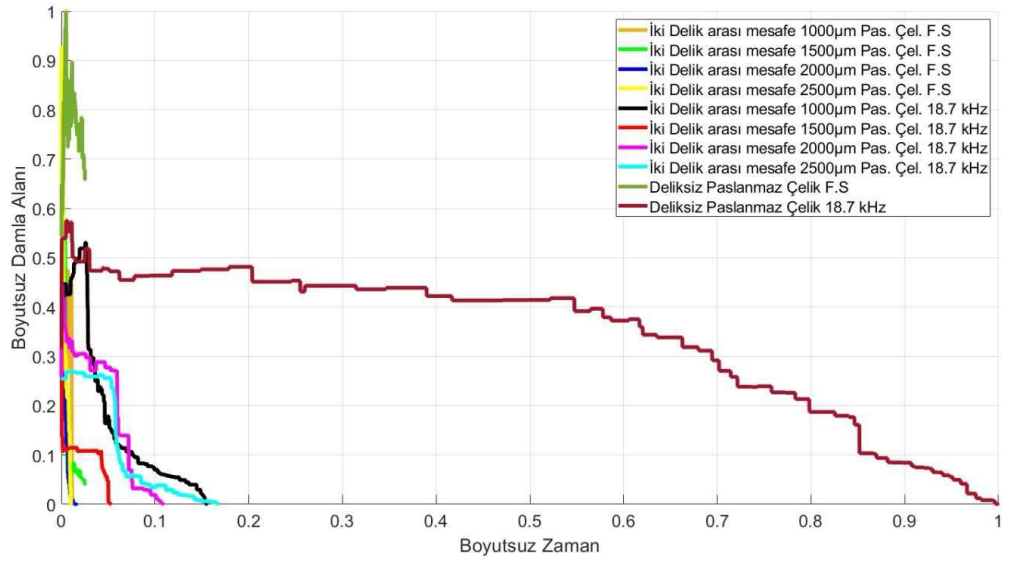


Şekil 5. 11. Frekans Süpürme ile pirinç plaklara ait iz düşüm alan değişimi

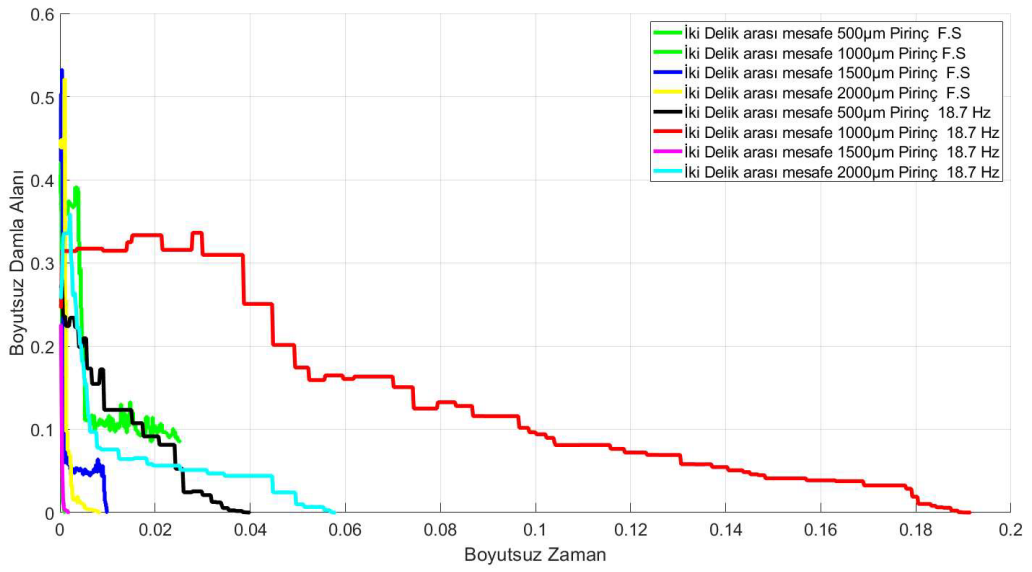
Bu tez çalışmasının odak noktası, yüksek frekansla titreşen gözenekli ve hidrofobik özellikteki plakalar üzerindeki su damlalarının davranışlarının deneysel incelenmesidir. Araştırma kapsamında, gözeneksiz plakalarda birbirini izleyen iki gözenek arasındaki mesafeler sırasıyla 1000 µm, 1500 µm, 2000 µm ve 2500 µm olarak tasarlanmıştır. Bu farklı mesafeler, gözenekli plakaların yüzey morfolojisini çeşitlendirerek, su damlalarının üzerlerindeki davranışlarını etkileme potansiyeline sahiptir.

## **5.2. Frekans Süpürme ile 18.7 Khz karşılaştırmalı İz Düşüm Alanı Ölçüm Sonuçları**

Tek bir frekansta (18.7 Khz) çalışmak yerine, birden fazla frekansta çalışmanın atomizasyon süreci üzerinde daha olumlu etkiler yaratacağını öngörülmüştü. Frekans süpürme sırasında, geniş bir frekans aralığı üzerinde tarama yapıldığından, yüzey veya damla birçok farklı frekansta zorlanmaktadır. Bu frekanslardan bazıları, yüzeyin veya damlanın rezonans frekanslarına denk gelmekte ve damlanın sürekli olarak uyarılmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, damla yoğun bir şekilde zorlanmakta ve atomizasyon sürecinin çok kısa sürdüğü gözlemlenmektedir. Şekil 5.12, şekil 5.13, şekil 5.14 'teki grafiklerde frekans süpürmenin, tek bir frekansta; (18.7 Khz) çalışmaya kıyasla avantajları görülmektedir. Şekil 5.12 'de görüldüğü üzere frekans süpürmenin, tek bir frekans olan 18.7 khz 'de çalışmaya kıyasla, atomizasyon hızının çok daha avantajlı olduğu gözlenmektedir. Delikli ve deliksiz paslanmaz çelik malzemelerin hem frekans süpürme hem de 18.7 khz 'de alanlarının zamanla değişimi aynı grafikte görünmektedir. Paslanmaz çelik numunelerinin frekans süpürme ile tarama işlemi ile damla atomizasyonu oldukça avantajlıdır.

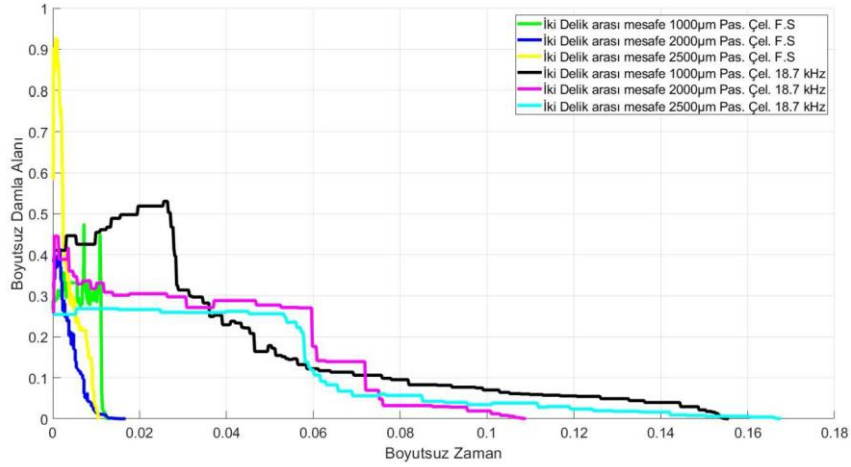


Şekil 5. 12. Karşılaştırmalı pirinç ve paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişim



Şekil 5. 13. Karşılaştırmalı pirinç plaklara ait iz düşüm alan değişimi

Şekil 5.13 'te delikli pirinç malzemelerin frekans süpürme (F.S) ve 18.7 khz 'de çalışıldığı damla atomizasyon sonuçları görünmektedir. Grafğin geneline baktığımız zaman frekans süpürme işlemi, tek bir frekansta çalışarak atomize olması sürecine kıyasla avantajlıdır. Örneğin, iki delik arası mesafenin 1000 mikron olduğu pirinç malzemenin frekans süpürme ve 18.7 Khz 'de çalışılmış sonuçları arasında büyük fark meydana geldiği grafikte açıkça görülmektedir. Pirinç plak numuneleri üzerinde damla atomizasyonu süresi, frekans süpürme ile oldukça avantajlı konumdadır.

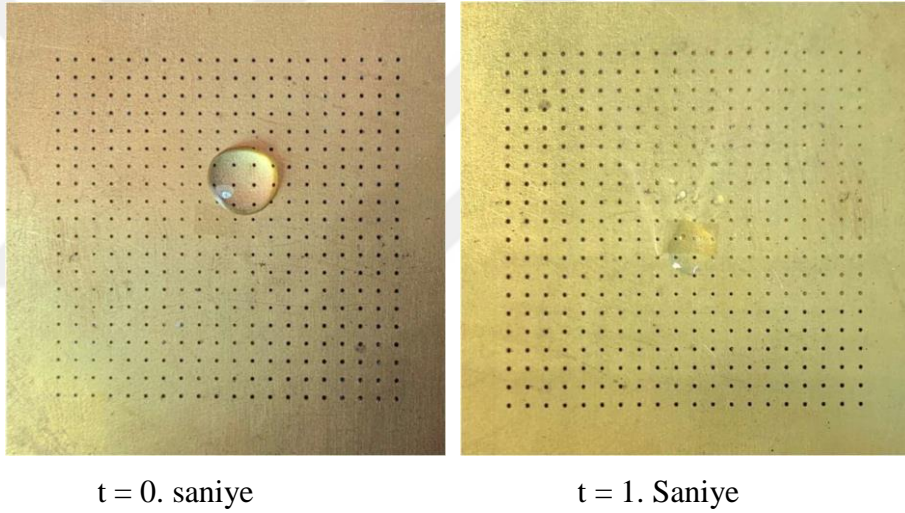


**Şekil 5. 14.** Karşılaştırmalı paslanmaz çelik plaklara ait iz düşüm alan değişimi

Şekil 5.14 'te paslanmaz çelik malzemelerin frekans süpürme (F.S) ve 18.7 khz 'de çalışıldığı damla atomizasyon sonuçları görünmektedir. Grafğin geneline baktığımız zaman frekans süpürme işlemi, tek bir frekansta çalışarak atomize olması sürecine kıyasla avantajlıdır. Örneğin, iki delik arası mesafenin 2500 mikron olduğu paslanmazçelik malzemenin (açık mavi) frekans süpürme ve 18.7 Khz 'de (sarı) sonuçları arasında büyük fark meydana geldiği grafikte açıkça görülmektedir. Paslanmaz çelik plak numuneleri üzerinde damla atomizasyonu süresi, frekans süpürme ile oldukça avantajlı konumdadır.

### 5.3. 18.7 Khz ve Frekans Süpürmenin Genel Sonuçları:

Araştırmadan elde edilen bulgular, gözenekli plakaların yüzey yapısının ve gözenek çaplarının, su damlasının davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Yüksek frekansta titreşim uygulanan su damlaları, atomizasyona uğrayarak küçük parçalara ayrılır. Şekil 5.9'da iki delik arası mesafenin 2000 mikron olan plağa ait görsel mevcuttur. Bu görselde, damlanın atomizasyon başlamadan önceki hali ve atomizasyon başladıktan sonra birinci saniyedeki görseli mevcuttur. Damlanın bir kısmı havaya atomize olduğu görülmektedir. Bir kısmı ise deliğe sahip plaklarda, plağın alt yüzeyine geçtiği ve böylelikle damla atomizasyonunun iki yönde meydana geldiği deney sırasında gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 15. Damla atomizasyonu görseli

Göl, çalışmasında yüksek frekansta titreşim yapan delikli yüzey üzerine yerleştirilen sıvı damlanın dinamik davranışını incelerken benzer sonuçları ortaya koymuştur. Plakaların farklı delik çaplarına sahip olması atomizasyon süresinin etkilerini ortaya koyduğu çalışma, bu tez çalışmasının çalışma koşullarının hazırlanmasına yüksek frekans titreşimlerinin 18.7 Khz de çalıştırılmasına ve yüzey özelliklerinin su damlası davranışları üzerindeki etkisini derinlemesine incelenmesinde katkı sağlamıştır [79].

Bu tezde, yüksek frekansta titreşim uygulanan delikli ve deliksiz paslanmaz çelik ile pirinç plakalar üzerinde su damlacıklarının davranışlarının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, delikli plakalar üzerinde çalışmaları yürütülmüştür; her bir delik 500 µm çapında olup, delikler arası mesafeler 1000 µm, 1500 µm, 2000 µm ve 2500 µm olarak belirlenmiştir. Araştırmanın bulguları ve bu bulguların tartışmaları birçok şekilde sunulmuştur.

Paslanmaz çelik ve pirinç plakaların her ikisi de hem delikli hem de deliksiz olarak yüksek frekanslı titreşimlere maruz bırakılmıştır. Deliklerin çapı sabit tutulurken, delikler arası mesafeler bir önceki paragrafta belirtildiği gibi değişken olarak tasarlanmıştır. Delikli plakaların üretim yönteminden kaynaklanan, plağın alt yüzeyi ve üst yüzeyi arasındaki çap farkı, plak kesitinde konik bir yapı meydana getirmiştir. Plak titreşim ile uyarıldığında, deliklerdeki havanın hızı artar ve basınç azalır. Bu nedenle, delik içinde bir emme kuvveti oluşur ve bu kuvvet damla üzerine etki eder. Damla, emme kuvvetinin etkisiyle plağın içine doğru emilir ve suyun gözeneklerden çekilmesi sağlanır. Bu durum Peng ve ark. [80], Dupuis ve ark. [81], Patel ve ark. [82] ve Sarı ve ark. [83], Göl 'ün [84] çalışmalarında görüldüğü gibi bu tez çalışmasında da gözlenmiştir.

Pirinç ve paslanmaz çelik malzemeli delikli ve deliksiz 20 mikrolitre hacmindeki damlanın yüzey ile temas açısı ölçümleri elde edilmiştir. Pirinç malzemelerin yüzey ile temas açılarının paslanmaz çelik malzemeye kıyasla daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, delik çapı ve delik aralıklarının su damlasının dinamiği üzerindeki etkileri detaylı olarak tartışılmıştır. Farklı malzeme özelliğine sahip ve delikler arası mesafenin su damlasının atomizasyonu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Hem pirinç hem de paslanmaz çelik malzemeli plaklarda, frekanssüpürme ve (15 Khz – 25 Khz) tek bir frekansta (18.7 Khz) çalışmanın atomizasyona olan katkısı incelenmiştir. Deliksiz plaklarda yapılan deneyler, suyun yüzeyden uzaklaşma süresinin en uzun olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, deliklerin varlığının, sudamlasının atomize olma sürecini hızlandırdığını ortaya koymaktadır. Frekans süpürmenin su damlasının atomizasyon süreci üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir ve bu etki, sıvıların yüzeylerle etkileşimini anlamada kritik bir parametre olarak değerlendirilmelidir. Bu çalışma, dinamik sıvı davranışlarını anlamak için önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu tez çalışması yüksek frekansta titreşim uygulanan pirinç ve paslanmaz çelikyüzeylerin su damlası ile etkileşimini anlamaya yönelik önemli bulgular sunmakta ve bu bulgular, ilgili alanlardaki gelecekteki araştırmalara ışık tutmaktadır. Bu bulgular, literatürde Sarı ve arkadaşları tarafından [78] ve Göl 'ün [84] çalışmaları ile uyumludur. Delikli plakalar üzerine yerleştirilen su damlalarından, belirli koşullar altında, küçük damlacıkların havaya fırlatıldığını ve yeterli ilk ivme değeri sağlandığında ise gözeneklerden plakanın alt yüzeyine emildiğini göstermiştir.

Bu araştırma yukarıda belirtildiği gibi birçok yönüyle ele alınmıştır ve incelenmiştir. Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir:

Su damlasının davranışı, numune plakların yüzeylerinin delikli ya da deliksiz olması ile ilişkilidir. Atomizasyon sürecinin hızlı gerçekleştiği delikli plaklar üzerinde, su damlasının daha kısa sürelerde atomize olduğu sonuçları elde edilmiştir.

İki delik arası mesafenin ortak olduğu, paslanmaz çelik ve pirinç malzemelerin çalışma frekansının 18.7 Khz değerlerindeki damla atomizasyonu süresi ile frekans tarama işlemiyle damla atomizasyon süresine kıyasla daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın geneli incelendiğinde frekans süpürme ile tarama

işleminin (15Khz – 25 Khz), her çeşit yüzey özelliğindeki (delikli – deliksiz) ve her iki malzeme (paslanmaz çelik, pirinç) özelliklerinde de tek bir çalışma frekansına(18.7 khz) kıyasla avantajlı olduğunu gözlemlenmiştir.

18.7 Khz ‘de damla atomizasyonu en hızlı gerçekleştiği numune, pirinç malzeme ve iki delik arası mesafenin 2000 µm olduğu delikli numuneye aittir. Frekans süpürme ile damla atomizasyonunun en hızlı gerçekleştiği numune değerleri pirinç malzeme ve delikli numunelere aittir.

Titreşim yapan delikli ve deliksiz paslanmaz çelik ve pirinç malzeme yüzeylerin frekans tepkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler grafikler ile tezde sunulmuştur. Frekans ivme grafiği incelendiğinde yüksek ivme değerleri aralığında çalışma frekansı belirlenmiştir. 18.7 Khz değeri deneysel olarak çalışma frekansım olarak seçilmiştir. Yüksek ivme değerine karşılık gelen bu frekans değerinin belirlenmesi Göl’ün çalışma değeri [84] ile de ortak bir sonuçtur.

Elde edilen veriler ile bu deney sonuçlarına dayanarak şu sonuçlar çıkarılabilir. Endüstriyel süreçlerde su atomizasyonunun iyileştirilmesine yönelik potansiyel uygulamalar açısından frekans süpürmenin ve elastisite modülü düşük malzemeler ile çalışılmasının atomizasyon süresini kısaltılmasında önemli adımlar olabilir. Endüstriyel üretim, enerji üretimi ve kimyasal işlemler gibi çeşitli alanlarda, delikli plakların ve farklı malzeme yüzeylerinin uygulanabilirliği ve bunların sağladığı avantajlar detaylı bir şekilde incelenebilir. Bu konu ile ilgili ileride yapılması planlanan çalışmalar aşağıdaki alanlara odaklanabilir:

Titreşim yapan yüzeylerin frekans tepkilerinin incelenmesi ile elde edilen veriler, delikler arasındaki mesafenin değişmesi ile atomizasyonu doğrudan artırdığı veya azalttığı sonucunu incelemek adına daha fazla deneysel ve hesaplamalı çalışmalar yapılabilir.

Paslanmaz çelik plaklar ve deliksiz plaklar üzerindeki atomizasyon süresi, pirinç plaklar ve delikli plaklar üzerindeki su damlasının atomizasyon süresine göre daha uzun sürmüştür. Bu sonuçlar ile farklı özelliklere sahip paslanmaz çelik ve iki delik arası mesafenin farklı kombinasyonları ile deneysel çalışma yapılabilir.

Bu çalışma, bu tür yüzeylerin suyun atomizasyon sürecini nasıl etkileyebileceğine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Önerilen gelecekteki çalışmalar, bu alanda daha derinlemesine bir anlayış geliştirebilir, yeni teknikler ve malzemeler üzerinde yoğunlaşabilir ve bu teknolojinin potansiyel uygulama alanlarını genişletebilir. Özellikle, su atomizasyonunun verimliliğini artırma ve ilgili endüstriyel süreçlerdeki sorunlara yenilikçi çözümler sunma potansiyeli, bu çalışmaların odak noktası olmalıdır. Sonuç olarak, bu tez çalışması, suyun atomizasyonu ile ilgili mevcut zorlukların üstesinden gelmek ve daha etkili, verimli süreçlerin geliştirilmesine katkıda bulunacak önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Bu çalışma, ilgili alanlarda yeni araştırma yollarını açarak, bu konudaki bilimsel ve teknolojik ilerlemelerin önünü açmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] A. J. James, B. Vukasinovic, M.K. Smith, A. Glezer, Vibration-Induced Drop Atomization and Bursting. *Journal of Fluid Mechanics*, 476:1-28, 2003.
- [2] A. J. James, M. K. Smith and A. Glezer, Vibration-Induced Drop Atomization and the Numerical Simulation of Low-Frequency Single-Droplet Ejection, *Journal of Fluid Mechanics*, 476, 29–62, 2003.
- [3] Hebba, M.S., Dabair, M. Static Structural, Modal and Harmonic Analysis of Alloy Car Wheel Rim using ANSYS Workbench. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* ,2019, 8, 599-611.
- [4] Suman, S., Abhimanyu Abrol, J., and Ravi, K. Impact and Modal Analysis for Different Alloy Wheel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2017*, 263, 1-10.
- [5] Akbar, M.M., Farahani, M. Modal Analysis of a Non-rotating Inflated Tire using Experimental and Numerical Methods. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 2018, 7, 15-21.
- [6] Vukasinovic, M. K. Smith, and A. Glezer, Spray Characterization during Vibration-Induced Drop Atomization, *Physics and Fluids* 16 (2), 306-316, 2004
- [7] B. Vukasinovic, A. Glezer, M.K. Smith. (2000). Vibration-Induced Droplet Atomization. *Physics of Fluids*, 12:12.
- [8] Avvaru, M. N. Patil, P. R. Gogate, A. B. Pandit, Ultrasonic Atomization: Effect of Liquid Phase Properties, *Ultrasonics* 44,146–158, 2006
- [9] P. Deepu, S. Basu, R. Kumar, Dynamics and Fracture of Ligaments from a Droplet on a Vibrating Surface. *Physics of Fluids*, 25(8): 082106-1-19, 2013.
- [10] Faraday, M. (1831). On the forms and states assumed by fluids in

- contact with vibrating elastic surfaces. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 121, 319-340.
- [11] Kelvin, W. Hydrokinetic solutions and observations. *Phil. Mag. Series 4*, 1871
- [12] Rayleigh, L. VII. On the crispations of fluid resting upon a vibrating support. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 16(97), 50-58, 1883
- [13] Goodridge, W. T. Shi, H. G. E. Hentschel, D. P. Lathrop. (1997). Viscous Effects in Droplet-Ejecting Capillary Waves. *Physical Review*, 56:472-475.
- [14] M.K. Smith, A. James, B. Vukasinovic, A. Glezer. (1998). Vibration-Induced Droplet Atomization. *Proceedings of Fourth Microgravity Fluid Physics and Transport Phenomena Conference*, (pp. 447–452). Cleveland, OH.
- [15] A. J. James, B. Vukasinovic, M.K. Smith, A. Glezer. (2003). Vibration-Induced Drop Atomization and Bursting. *Journal of Fluid Mechanics*, 476:1- 28.
- [16] Lang, R. J. Ultrasonic atomization of liquids. *The journal of the acoustical society of America*, 34(1), 6-8, 1962
- [17] Vukasinovic, B., Glezer, A., & Smith, M. K. (2002). Droplet formation during the atomization of a viscous liquid. *Physics of Fluids*, 14(9), S6-S6.
- [18] F. Barreras, H. Amaveda, A. Lozano. (2002). Transient High-Frequency Ultrasonic Water Atomization. *Experiments in Fluids*, 33(3):405-413.
- [19] K.A. Ramisetty, A.B. Pandit, P.R. Gogate. (2013). Investigations into Ultrasound Induced Atomization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1):254-264.
- [20] Goodridge, C. L., Hentschel, H. G. E., & Lathrop, D. P. (1999). Breaking Faraday waves: critical slowing of droplet ejection rates. *Physical review letters*, 82(15), 3062, 1999
- [21] L.Cveticanin. (30: 1995). Approximate Solution of a Time-

- Dependent Differential Equation. *Meccanica*, 665-671.
- [22] Y. Terumichi, M. Ohtsyka, M. Yoshizawa, Y. Fukawa, and Y. Tsujioka. (12: 1997). Nonstationary Vibrations of a String with Time-Varying Length and a Mass-Spring System Attached at the Lower End. *Nonlinear Dynamics*, 39–55.
- [23] H.J. Holl, A.K. Belyaev, H. Irschik. (73: 1999). Simulation of the Duffing- Oscillator with Time-Varying Mass by a BEM in Time. *Computers and Structures*, 177-186.
- [24] J. Flores, G. Solovey, S. Gil. (71(7): 2003). Variable Mass Oscillator. *American Association of Physics Teachers*, 721-725.
- [25] A.H.P. Van der Burgh, Hartono, A.K. Abramian. (41: 2006). A New Model for the Study of the Rain-Wind-Induced Vibrations of a Simple Oscillator. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 345–358.
- [26] W.T. Van Horssen, O.V. Pischanskyy. (330: 2011). On the Stability Properties of a Damped Oscillator with a Periodically Time-Varying Mass. *Journal of Sound and Vibration*, 3257-3269.
- [27] G. Sarı and Y. N. Aydın, “Nonstationary vibrations of piezoelectric atomizer: experimental analysis and mathematical model,” *Arabian J. Sci. Eng.*, vol. 45, pp. 9725–9733, 2020
- [28] T. D. Donnelly, J. Hogan, A. Mugler, N. Schommer, M. Schubmehl, A.J. Bernoff, B. Forrest, An experimental study of micron-scale droplet aerosols produced via ultrasonic atomization, *Physics of Fluids*, 16 (8), 2004
- [29] B. Avvaru, M. N. Patil, P. R. Gogate, A. B. Pandit, Ultrasonic Atomization: Effect of Liquid Phase Properties, *Ultrasonics* 44,146–158, 2006.
- [30] Deepu, P., Basu, S., & Kumar, R. (2013). Dynamics and fracture of ligaments from a droplet on a vibrating surface. *Physics of Fluids*, 25(8), 082106.
- [31] P. Deepu, C. Peng, S. Moghaddam. (2018). Dynamics of Ultrasonic Atomization of Droplets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 92:243- 247.
- [32] G. I. Taylor, “The Instability of Liquid Surfaces When

- Accelerated in a Direction Perpendicular to Their Planes,”  
Proceedings of the Royal Society of London, Vol. A201, No.  
1065, pp. 192-196, 1950.
- [33] Adewuyi, Y. G. Sonochemistry: environmental science and  
engineering applications. Industrial & Engineering Chemistry  
Research, 40,22, 4681-4715,2001.
- [34] Ezerskii, A. B., Korotin, P. I., & Rabinovich, M. I. Random self-  
modulation of two-dimensional structures on a liquid surface  
during parametric excitation.  
JETP Lett, 41(4), 129-131, 1985
- [35] L.H, M. S. Bubbles, breaking waves and hyperbolic jets at a  
free surface. Journal of Fluid Mechanics, 127, 103-121, 1983.
- [36] Goodridge, C. L., Shi, W. T., Lathrop, D. P. (1996). Threshold  
dynamics of singular gravity-capillary waves. Physical review  
letters, 76(11), 1824.
- [37] James, A. J., Vukasinovic, B., Smith, M. K., & Glezer, A.  
Vibration-induced drop atomization and bursting. Journal of Fluid  
Mechanics, 476, 1-28, 2003.
- [38] A.Preumont, “Solid Mechanics and Its Applications 2006.
- [39] KOCAER, Sezgin. Piezoelektrik Tahrikli Doğrusal Hareket  
Mekanizma Tasarımı. 2015. ÖZGEN, D.G.O., Piezoelectric  
materials. ME 493 Introduction to Smart Structures and Materials,  
METU, 2011.
- [40] Ugural, A. C. Plates and shells: theory and analysis. CRC Press, 2017
- [41] Vernon, J., “Introduction to Engineering Materials”, Macmillan  
Pres Ltd., pp.203-205, Hong Kong, 1992
- [42] Meran, C. Pirinç Malzemelerin Kaynak Edilebilirliği ve Uygun  
Kaynak Parametrelerinin Tespiti, Pamukkale Üniversitesi, Fen  
Bilimleri Enstitüsü,  
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli, 211 s., (Doktora Tezi),  
2001
- [43] OĞUZ, B., “Demir Dışı Metallerin Kaynağı”, s. 120, Erdini  
Basım ve Yayınevi, İstanbul, 1990
- [44] Brass UNS C28000, Mechanical and Physical Properties,

- “<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6380>, 2023
- [45] Türkan, M., ‘‘Kaynaklı ve Kaynaksız Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Korozyif Ortamlardaki Çekme Davranışları,’’ Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 2013
- [46] Murat, M, G., ‘‘Savunma Sanayinde Kullanılan 420 ve 304L Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağı Sonrası Korozyon ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,’’ Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma
- [47] Gökmen, M., ‘‘Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemleri ile Kaynağında Koruyucu Gaz ve İlave Metalin Mekanik Özelliklere Etkisi,’’ Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya, 2009.
- [48] Köse, C., and Kaçar R., "The effect of preheat & post weld heat treatment on the laser weldability of AISI 420 martensitic stainless steel." *Materials & Design* 64: 221-226, 2014.
- [49] Öcal, M., ‘‘AISI 316L Östenitik Paslanmaz Çeliğın Korozyonlu Yorulma, Termal Çevrim ve Darbeli Aşınma Davranışlarına Farklı Kaplamaların Etkisi,’’ Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 2020
- [50] F. Zivic, S. Affatato, M. Trajanovic, M. Schnabelrauch, N. Grujovic, and K. L.Choy, *Biomaterials in clinical practice: advances in clinical research and medical devices*. Springer, 2017
- [51] S. Dutta, ‘‘Different types and new applications of stainless steel,’’ *Stainless steel*, vol. 62, no. 5, pp. 86–91, 2018
- [52] Karaaslan, A., *Lazer ile malzeme işlemleri*, Literatür Yayınları, 1-218, 2009
- [53] Url-  
2<<http://genelbilgecom.tumblr.com/post/62703371580/new-post-hasbeenpublished-on-genelbilgecom>>, erişim tarihi 31.12.2023
- [54] Url-3 <[www.mellesgriot.com](http://www.mellesgriot.com)>, erişim tarihi 31.12.2023

- [55] Ürgüplü M., Su jeti destekli lazer sisteminin işlem kalitesine etkisinin incelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2016
- [56] Url-1<<https://instrumentationtools.com/laser-diode-working-principle/>>, erişim tarihi 27.04. 2023
- [57] Poprawe, R., König, W., Modelling, Monitoring and Controlling High Quality Laser Cutting. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 50 (1), 137- 140 2001
- [58] Url-4<<https://www.blmamachinery.com/How-to-Choose-the-Location-of-Focalin-Laser-cutting-Process-id3440668.html>>, erişim tarihi 31.12.2023
- [59] Ezpelata D.T. Contribution to Laser Milling Process Parameters Selection for Process Planning Operations, (Ph.D Thesis), University of Girona, Girona, 2013
- [60] Anık S., Özgür A., Vural M. Termik Kesme Teknolojisi (Birinci Baskı). İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı, 109-117, 1996
- [61] Ozdemir G. Sıvıların ıslatma yetenekleri ve temas açısı. "<https://inovatifkimyadergisi.com/sivilarin-islama-yetenekleri-ve-temas-acisi>", erişim tarihi 31.12.2023
- [62] Erbil H Y, Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces, BlackwellPublishing Ltd, 365s, İngiltere, 2006
- [63] Aydın AK, Terzioğlu H, Ulubayram K, et al. Wetting properties of saliva substitutes on acrylic resin. International Journal of Prosthodontics, 10(5), 1997
- [64] Han, W., Shin, J., & Shin, J. H. Low-cost, open-source contact angle analyzer using a mobile phone, commercial tripods and 3D printed parts. HardwareX, 12, e00327, 2022
- [65] 112. Böhringer KF. Bounds on Contact Angle Hysteresis of Textured SuperHydrophobic Surfaces, erişim tarihi 30.12.2023
- [66] Sen F. , Effects of contact angle measuring liquids on surface free energy of materials, 2022

- [67] Uzunoğlu, T., II-VI Yarıiletken nanoparçacık içeren organik Langmuir Blodgett ince filmlerin özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008
- [68] Alghunaim A, Kirdponpattara S, Newby B Z, Techniques for determining contact angle and wettability of powders, Powder Technology, 287, 201-215, 2015
- [69] Santos et al., 2018; Gupta & Leong, 2020
- [70] Patel et al., 2021.
- [71] Orhan ÇETİNUS, Mekanik Sistemlerde Farklı Modellerle Aktif Titreşim Kontrolü Yüksek Lisans Tezi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2009
- [72] Yan, Q., Sun, W., Zhang, L., Wang, H., & Zhang, J. Effects of vibration characteristics on the atomization performance in the medical piezoelectric atomization device induced by intra-hole fluctuation. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 34(1), 1-9, 2021
- [73] Guerra-Bravo, E., Lee, H. J., Baltazar, A., & Loh, K. J. Vibration analysis of a piezoelectric ultrasonic atomizer to control atomization rate. Applied Sciences, 11(18), 8350, 2021
- [74] ImageJ, ContactAngle, “<https://imagej.nih.gov/ij/plugins/contact-angle.html>”, 2023
- [75] R. K. Pandey. Fundamentals of Electroceramics: Materials, Devices, and Applications - R. K. Pandey - Google Kitaplar; 2019.
- [76] Cross, L. E. Relaxor Ferroelectrics. Springer Series in Materials Science 114, 131–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-68683-5\\_5/COVER](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68683-5_5/COVER), 2008
- [77] Piezoelectric Diaphragms, 7BB-35-3L0, Appearance & Shape, Specifications, “<https://www.murata.com/en-eu/products/productdetail?partno=7BB-35-3L0>”, 2023
- [78] Sarı G., Aydın, Y. N., Bilekli, Ü. G., & Göl, M. B. Dynamics of liquid drop on a vibrating micro-perforated plate. Zeitschrift für Naturforschung A, 76(4), 305-314, 2021

- [79] Gol M.B., Yüksek frekansta titreşim yapan hidrofobik ve gözenekli yüzey üzerine yerleştirilmiş su damlasının analizi, 56, 71
- [80] Peng, C., Ravi, S., Patel, V. K., Momen, A. M., & Moghaddam, S. (2017). Physics of direct-contact ultrasonic cloth drying process. *Energy*, 125, 498-508.
- [81] Dupuis, E. D., Momen, A. M., Patel, V. K., & Shahab, S. (2019). Electroelastic investigation of drying rate in the direct contact ultrasonic fabric dewatering process. *Applied Energy*, 235, 451-462.
- [82] Patel, V. K., Kyle Reed, F., Kisner, R., Peng, C., Moghaddam, S., & Mehdizadeh Momen, A. (2019). Novel experimental study of fabric drying using direct-contact ultrasonic vibration. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 11(2).
- [83] Sarı, G., Aydın, Y. N., Bilekli, Ü. G., & Göl, M. B. (2021). Dynamics of liquid drop on a vibrating micro-perforated plate. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 76 (4), 305-314.
- [84] Göl M.B., Yüksek frekansta titreşim yapan hidrofobik ve gözenekli yüzey üzerine yerleştirilmiş su damlasının analizi, 88