

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

**YÜKSEK FREKANSLA TİTREŞİM YAPAN HİDROFOBİK VE GÖZENEKLİ
YÜZEY ÜZERİNE YERLEŞTİRİLMİŞ SU DAMLASININ ANALİZİ**

Mehmet Bartu GÖL

**Danışman
Doç. Dr. Güzde SARI**



MANİSA-2023

Mehmet Bartu

**YÜKSEK FREKANSLA TITREŞİM YAPAN HİDROFOBİK VE GÖZENEKLİ YÜZEY
ÜZERİNE YERLEŞTİRİLMİŞ SU DAMLASININ ANALİZİ**

2023

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 beyan ederim.

Mehmet Bartu GÖL



İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLO DİZİNİ	IX
TEŞEKKÜR.....	X
ÖZET.....	XI
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	10
2.1. Atomizasyonun Fiziksel Mekanizması.....	10
2.2. Piezoelektrik Malzemeler	12
2.2.1. Piezoelektrik Bünye Denklemleri.....	16
2.3. Hidrofobik Özellik, Temas Açısı ve Yüzey Pürüzlülüğü.....	20
2.3.1. Hidrofobi Teorileri	21
2.3.2. Temas Açısı ve Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri	24
2.3.2.1. Kamera Kullanarak Statik Temas Açısı Ölçümü	25
2.3.2.2. Diğer Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri.....	26
2.3.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi.....	29
2.3.3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Yöntemleri.....	31
2.4. Plakaların Genel Özellikleri	33
2.4.1. Pirinç Malzemesinin Genel Özellikleri	35
2.4.2. Delme ve Gözenek Oluşturma Yöntemleri	36
2.4.3. Yüzey Kaplama	38
2.5. Titreşim Analizi	41
2.6. Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Yapılan Analizler.....	46
3. MATERYAL VE METOT.....	49
3.1. Gözenekli Pirinç Plaka Tasarımı	49
3.2. Hidrofobik Plakanın Hazırlanması	51
3.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	53
3.4. Temas Açısı Ölçümü	54
3.5. Damla Atomizasyon Analizi.....	57
3.5.1. Damla İzdüşüm Alanı Görüntü Analizi.....	61
3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plakanın Uygulanan Frekansa Tepkisinin Bulunması.....	65

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	69
4.1. Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları	69
4.2. Temas Açısı Ölçüm Sonuçları	70
4.3. Yüzeylerin Frekans-İvme Analizi.....	71
4.4. Damla İzdüşüm Alanı Ölçümleri Sonuçları	72
4.5. Plakanın Uygulanan Frekansa Tepkisinin Nümerik Olarak Eldesi	82
4.5.1. Plakanın Tepkisinin Plaka Kalınlığına Göre Değişimi	86
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	91



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A^r	Gerçek yüzey alanı
A^s	Görülen makroskopik alan
BaTiO₃	Baryum titanat
c	Viskoz sönüm katsayısı
CAE	Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CO₂	Karbondioksit
d, d_{ij}	Piezoelektrik gerinim sabiti
D_m, D_k	Elektriksel yer değiştirme bileşenleri
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
e_{ij}	Dielektrik katsayısı
E_m, E_k, E_i	Elektrik alan bileşenleri
f	Frekans
F(x)	Zorlama kuvveti
f, f₁, f₂	Alan kesirleri
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
g_i	Piezoelektrik gerilim sabiti
g_{mi}	Piezoelektrik gerilim katsayıları
GPa	Gigapascal
h	Damlanın yüksekliği
H	Temas açısı histerezisi
HD	High Definition (Yüksek Çözünürlük)
k	Yay direnci
kHz	Kilohertz
m	Kütle
mm	Milimetre
Nd:YAG	Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet (Neodimyum Katkılı İtiryum Alüminyum Garnet)
nF	Nanofarad
O	Oksijen
°C	Santigrat derece
PFA	Perfloroalkoksi

PIV	Particle Image Velocimetry (Parçacık Görüntü Hız ölçümü)
PVDF	Poliviniliden Florid
PZT	Kurşun zirkonat titanat
R	Küresel kesitin yarıçapı
r	Yüzey pürüzlülük faktörü
R_a	Ortalama pürüzlülük
r_b	Sıvı damlasının temas yarıçapı
R_{max}	Profilin en yüksek ve en alçak noktasıyla temas eden çizgiler arasındaki dikey mesafe
R_q	Bir yüzeyin pürüzlülük profiline karşılık gelen y-koordinatlarının kuadratik ortalaması
r_w	Gerçek yüzey alanının, görülen makroskopik alana oranı
R_z	En yüksek tepe nokta ile en derin çukur arasındaki yükseklik farkının ortalaması
SAW	Surface Acoustic Waves (Yüzey Akustik Dalgaları)
S_{ij}	Elastik rijitlik katsayıları
T_C	Curie sıcaklığı
V	Volt
V_s	Sıvı damlasının hacmi
Zn	Çinko
ZnO	Çinko oksit
μm	Mikrometre
μl	Mikrolitre
ε_i	Gerinim bileşenleri
γ	Yüzey gerilimi
γ_{LV}	Sıvı ve gaz arasındaki yüzey gerilimi
γ_{SL}	Katı ve sıvı arasındaki yüzey gerilimi
γ_{SV}	Katı ve gaz arasındaki yüzey gerilimi
θ	Temas açısı
θ_a	İlerleyen temas açısı
θ_{CB}	Cassie-Baxter temas açısı
θ_r	Gerileyen temas açısı
θ_w	Wenzel temas açısı

σ_i, σ_j	Normal ve kayma gerilmeleri
φ_t	Eğim açısı
x	Kütlenin mutlak deplasmanı
\dot{x}	Hız
\ddot{x}	İvme
ω_n	Doğal frekans



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Titreşim yapan bir diyafram üzerindeki su damlasının hareketi [14].....	11
Şekil 2.2: Direkt ve ters piezoelektrik etki durumu [79].....	13
Şekil 2.3: Kutuplanma süreci: a) Serbest durum, b) Elektrik alan etkisi altında, c) Elektrik alan kaldırıldıktan sonra [83].	15
Şekil 2.4: Malzeme özellikleri için belirlenen eksen takımı [83]	17
Şekil 2.5: Sıvı damlanın hidrofilik, hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyler üzerindeki genel görünüşü [86].....	20
Şekil 2.6: Katı bir yüzey üzerinde durağan bir sıvı damlası [93].....	22
Şekil 2.7: Wenzel ve Cassie-Baxter durumları [99].....	24
Şekil 2.8: Kamera kullanarak statik temas açısı ölçümü yönteminin şematik gösterimi [97]	25
Şekil 2.9: İlerleyen temas açısı ve gerileyen temas açısı [97].....	26
Şekil 2.10: Eğimli plaka üzerinde kayan damla yöntemi ile temas açısı ölçme [93].	27
Şekil 2.11: Wilhemy plakası kullanarak temas açısı ölçme yöntemi [97]	28
Şekil 2.12: Damla boyutundan temas açısı ölçümü [93]	29
Şekil 2.13: Yüzey pürüzlülüğü parametreleri (R_a , R_q , R_z , R_{max}) [103]	32
Şekil 2.14: Temas yöntemiyle pürüzlülük ölçümü [104].....	33
Şekil 2.15: Lazer işleme şeması (a) darbeli delme, (b) trepan delme [119].....	38
Şekil 2.16: Sprey kaplama yöntemi [125].....	40
Şekil 2.17: Basit harmonik hareket	41
Şekil 2.18: Bir yay-kütle sisteminin titreşim hareketi: (a) sistem dengede (yay deforme olmamış); (b) sistem en sağ konumda (yay gerilmiş); (c) sistem en sol konumda (yay sıkıştırılmış). [127].....	43
Şekil 2.19: Zorlamalı ve sönümlü kütle yay sistemi	44
Şekil 2.20: Titreşimli bir sistemin girdi-çıkışı ilişkisi	45
Şekil 2.21: Örnek mesh ağ yapısı gösterimi	47
Şekil 3.1: (a) Deney düzeneğine ait gözenekli plakanın şematik gösterimi, (b) Deney düzeneğine ait gözenekli bir plaka	49
Şekil 3.2: Gözenekli plakanın gerçek delik çapları; 400 μ m gözenekli plaka üst yüzey (a) ve alt yüzey (b), 160 μ m gözenekli plaka üst yüzey (c) ve alt yüzey (d), 80 μ m gözenekli plaka üst yüzey (e) ve alt yüzey (f).....	50
Şekil 3.3: Hidrofobik sprej kaplamanın şematik gösterimi.....	52

Şekil 3.4: Su damlalarının hidrofobik solüsyon uygulanan plaka yüzeyindeki görüntüsü.....	52
Şekil 3.5: Su damlalarının hidrofobik olmayan plaka yüzeyi üzerindeki görüntüsü .	53
Şekil 3.6: Dokunarak taramalı yüzey pürüzlülük ölçümü.....	54
Şekil 3.7: Temas açısı ölçümü sırasında kamera yerleşimi [130].....	54
Şekil 3.8: “ImageJ” programı görünümü	55
Şekil 3.9: Manuel nokta seçimi yöntemiyle noktaların seçilmesi.....	56
Şekil 3.10: (a) Hidrofobik olmayan pirinç plaka üzerindeki su damlası (b) Hidrofobik pirinç plaka üzerindeki su damlası.....	56
Şekil 3.11: Deneysel düzeneğin görünümü.....	57
Şekil 3.12: Damla atomizasyonu sırasında damlayı üstten görüntülemek için fotoğraf makinesi yerleşimi [130].....	58
Şekil 3.13: Piezo seramik diskin görünümü ve ölçüleri [132].....	59
Şekil 3.14: Atomizasyon sırasında su damlasının 10 farklı andaki izdüşüm alanı	62
Şekil 3.15: (a) 30 µl hacminde durgun saf su damlası, (b) titreşim etkisindeki saf su damlasının gözenekli plakanın altına emilmesi, (c) emilen damlanın titreşim etkisi ile plakanın alt yüzeyinden uzaklaştırılması	63
Şekil 3.16: Analizi yapılan düzenek ve elemanları.....	65
Şekil 3.17: Ağ örgüsü.....	68
Şekil 4.1: Pürüzlülük ölçüm sonuçları grafiği.....	69
Şekil 4.2: Deneysel frekans-ivme grafiği.....	71
Şekil 4.3: Gözeneksiz ve hidrofobik olmayan plaka üzerine yerleştirilen 20 µl su damlasının boyutsuz damla alanı – zaman grafiği	72
Şekil 4.4: Gözenekli ve gözeneksiz plakalara ait izdüşüm alanı değişimi grafikleri. 73	
Şekil 4.5: Hidrofobik ve hidrofobik olmayan plakalara ait izdüşüm alan değişimi... 74	
Şekil 4.6: 80 µm gözenekli plakadaki 20 µl hacmindeki saf su damlasının boyutsuz zaman - boyutsuz damla alanı değişimi grafiğine uydurulan eğriler	75
Şekil 4.7: Gözeneksiz hidrofobik olmayan plakadaki 20 µl hacmindeki saf su damlasının boyutsuz zaman – boyutsuz damla alanı değişimi grafiğine uydurulan eğriler	76
Şekil 4.8: Hidrofobisite etkisine göre 20 ve 30 µl su damlasının alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan eğrilerin katsayılarının karşılaştırılması.....	78
Şekil 4.9: Gözenek boyutunun etkisine göre 20 µl su damlasının alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan eğrilerin katsayılarının karşılaştırılması.....	80

Şekil 4.10: Gözenek boyutunun etkisine göre 30 µl su damlasının alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan eğrilerin katsayılarının karşılaştırılması.....	81
Şekil 4.11: Nümerik analiz ile elde edilen ivme-frekans grafiği	82
Şekil 4.12: Gözeneksiz plakanın mod şekilleri	85
Şekil 4.13: Plaka kalınlığının şematik gösterimi.....	86
Şekil 4.14: Plaka kalınlığına göre en yüksek ivmenin frekansı grafiği.....	86



TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1: Gözenekli plakaların gerçek delik çapları	51
Tablo 3.2: Piezoelektrik malzeme özellikleri [132].....	60
Tablo 3.3: Piezo seramik malzeme özellikleri [133]	66
Tablo 3.4: Pirinç malzemesinin özellikleri [134].....	67
Tablo 3.5: Plaka destek elemanının malzeme özellikleri [135]	67
Tablo 4.1: Pürüzlülük ölçüm sonuçları	69
Tablo 4.2: Temas açısı ölçüm sonuçları.....	70
Tablo 4.3: Numunelerin ivme değerleri	72
Tablo 4.4: Hidrofobisitenin fonksiyon katsayılarına etkisi.....	77
Tablo 4.5: Gözenek boyutuna göre fonksiyon katsayıları	79
Tablo 4.6: Birleştirilmiş alan modal analiz sonuçlarına göre gözeneksiz plakanın ilk 100 modu.....	84

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Gözde Sarı'ya ve her zaman arkamda olduklarını bildiğim, maddi ve manevi her konuda desteklerini esirgemeyen sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Mehmet Bartu GÖL

Manisa, 2023



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Mehmet Bartu GÖL

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gözde SARI

Titreşim kaynaklı damla atomizasyonu, sıvıların titreşim enerjisi kullanılarak küçük damlacıklara bölünmesini içerir. Bu yöntem, havacılıkta, elektronik soğutmada, kumaş kurutmada, tarımda, ilaç endüstrisinde, tıp alanında ve endüstriyel üretim gibi çok çeşitli diğer uygulamalara sahiptir. Bu çalışmada, yüksek frekansla titreşim yapan hidrofobik ve gözenekli yüzeyler üzerine yerleştirilen su damlalarının davranışı deneysel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, hidrofobik ve gözenekli plakalar üzerine yerleştirilen iki farklı hacimdeki su damlasının davranışını incelemek ve plaka özelliklerinin atomizasyon davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

Bu amaçla, pirinç plaka hidrofobik su itici sprey kullanılarak kaplanmıştır. Plakanın hidrofobik özelliklerini kontrol etmek için profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür ve hidrofobik yüzey üzerindeki su damlasının temas açısı ölçülmüştür. 80, 160 ve 400 µm boyutunda gözeneklere sahip olmak üzere tasarlanan plakalar lazer ile işlenerek gözeneklendirilmiştir. Gözenekli plakaların gerçek çap ölçüleri mikroskop ile ölçülmüştür. Atomizasyon deneyleri için piezoelektrik seramik disk deney plakalarının alt yüzeyine bağlanarak sinüs giriş voltajı ile uyarılmıştır. Plaka yüzeyi ile temas halindeki damlanın üstten görüntüsü kamera ile kaydedilmiştir. Kaydedilen görüntülerden görüntü analizi programıyla su damlasının zamana göre izdüşüm alanı ölçülerek grafikler halinde sunulmuştur. Deneylere ek olarak, sonlu elemanlar yöntemi ile piezoelektrik disk tarafından zorlanan pirinç plakanın atomizasyon için en uygun frekans değeri nümerik olarak belirlenmiştir ve farklı plaka kalınlıklarında bu frekans değerinin nasıl değiştiği simüle edilmiştir.

Bu tez çalışması ile damlacıkların iki farklı hacimde, hidrofobik, gözenekli ve gözeneksiz plakalar üzerindeki davranışı gösterilmiştir. Hidrofobik özelliklere sahip kaplamaların su damlalarının atomizasyonundaki etkinliği artırabileceği yapılan bu tez çalışması ile gösterilmiştir. Elde edilen genel sonuçlara göre, gözenekli plakalarda gözenek boyutu arttıkça atomizasyonun hızı artmıştır. Hidrofobik plakada ise hidrofobik olmayan plakaya kıyasla daha hızlı atomizasyon gerçekleşmiştir. Büyük su hacmine sahip su damlasının daha geç atomize olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, nümerik analiz ile plakanın uygulanan frekansa karşılık verdiği tepki (ivme, hız ve

deplasman) belirlenmektedir. Bu çalışmada, plakanın geometrik özelliklerine bağlı olarak frekans tepkisi elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, suyun atomizasyonu alanında, tarım, kimya, ilaç endüstrisi gibi alanlarda sıvıların dağıtılması veya püskürtülmesi gereken durumlarda gözenekli elemanlar veya hidrofobik yüzeylerin kullanımı konusunda değerlendirilebilir. Ayrıca daha gelişmiş hidrofobik kaplama malzemeleri ve teknikleri üzerinde çalışmalar yapılabilir.

Anahtar Kelimeler: Atomizasyon, Hidrofobik Yüzey, Gözenekli Plaka, Su Damlası, Piezoelektriksel Etki, Görüntü Analizi, Titreşim Analizi

2023, 102 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Mehmet Bartu GÖL

Manisa Celal Bayar University

Graduate School of Applied and Natural Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Dr. Gözde SARI

Vibration-induced drop atomization involves breaking liquids into small droplets using vibrational energy. This method has a wide range of other applications such as aerospace, electronics cooling, fabric drying, agriculture, pharmaceutical industry, medical field and industrial production. In this study, the behavior of water drops placed on hydrophobic and porous surfaces vibrating at high frequency was experimentally investigated.

The aim of this study is to investigate the behavior of two different volumes of water drops placed on hydrophobic and meshed plates and to reveal the effects of plate properties on the atomization behavior.

For this purpose, a brass plate was coated using a hydrophobic water repellent spray. In order to check the hydrophobic properties of the plate, the surface roughness was measured with a profilometer and the contact angle of the water drop on the hydrophobic surface was measured. The plates designed to have 80, 160 and 400 μm sized meshes were porosized by laser processing. The actual diameter dimensions of the mesh plate were measured with a microscope. For atomization experiments, a piezoelectric ceramic disc was attached to the bottom of the test plates and excited with a sine input voltage. The top view of the drop in contact with the plate surface was recorded with a video camera. From the recorded images, the projection area of the water drop with respect to time was measured with an image analysis program and presented as graphs. In addition to the experiments, the optimal frequency value for atomization of the brass plate forced by the piezoelectric disc was determined numerically by the finite element method and how this frequency value changes at different plate thicknesses was also simulated.

In this thesis, the behavior of droplets on hydrophobic, porous and nonporous plates in two different volumes was demonstrated. It has been shown in this thesis that coatings with hydrophobic properties can increase the efficiency of water droplet atomization. According to the general results obtained, the speed of atomization increased as the pore size increased in porous plates. In the hydrophobic plate, faster atomization occurred compared to the non-hydrophobic plate. It was concluded that the water drop with large water volume was atomized later. In addition, numerical analysis is used to determine the response (acceleration, velocity and displacement) of

the plate to the applied frequency. In this study, the frequency response is obtained depending on the geometrical properties of the plate.

These results can be evaluated for the use of porous elements or hydrophobic surfaces in the field of water atomization, agriculture, chemistry, pharmaceutical industry, etc. where liquids need to be dispersed or sprayed. In addition, more advanced hydrophobic coating materials and techniques can be studied.

Keywords: Atomization, Hydrophobic surface, Perforated plate, Water drop, Piezoelectric excitation, Image analysis, Vibration analysis

2023, 102 pages



1. GİRİŞ

Titreşim kaynaklı damla atomizasyonu işlemi, sıvıların titreşim enerjisi kullanılarak küçük damlacıklara bölünmesini içerir. Temel titreşim kaynaklı damla atomizasyonu süreci, piezoelektrik seramik bir disk kullanılarak sinüzoidal bir şekilde titreşim yapması için uyarılan ince metal bir plaka üzerine bir sıvı damlasının yerleştirilmesini içerir. Bu titreşimler, damla yüzeyinde sabit bir eksenel simetrik dalga oluşturur. Uyarma genliği kritik bir eşiği aştıktan sonra, damla yüzeyi kararsız hale gelir. Uyarma genliği arttıkça, küçük ikincil damlacıklar bu dalgaların tepelerinden fırlatılmaya başlar ve sonunda tüm birincil damla, daha küçük ikincil damlacıklardan oluşan bir sprej halinde ani ve hızlı bir şekilde parçalanır. Bazı durumlarda damlacık fırlatma o kadar hızlı gerçekleşir ki, damla neredeyse anında atomize olmuş gibi görünür.

Bu yöntem, tekstil endüstrisinde, sıvıları kumaş yüzeyinden uzaklaştırarak kumaş kurutma sürecinde kullanılır. Uzay ve havacılıkta, sıvıları atomize ederek uçak yüzeylerinde buz oluşumunu önlemek için kullanılır. Elektronik soğutmada, bir soğutma sıvısını atomize ederek elektronik bileşenleri ve cihazları soğutmak için kullanılır. Endüstriyel üretimde, ince ve düzgün boya, sprej kaplama ve diğer malzeme katmanlarını uygulamak için kullanılır. Tarımda, ince sprejler şeklinde böcek ilacı, yabancı ot ilacı ve gübre uygulamak için kullanılır. İlaç endüstrisinde ince sprejler veya tozlar şeklinde ilaçların ve diğer tıbbi ürünlerin üretiminde kullanılır. Tıp alanında, inhalasyon tedavisi için sıvı ilaçları ince bir buğuya dönüştürmek için klinik nebulizörlerde kullanılır. Yanma verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak için sıvı yakıtların yanmasında kullanılır. Bu çok yönlü teknik, sıvı yakıt sprejleri, nükleer reaktörler, brülörler, mürekkep püskürtmeli baskı, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme gibi çok çeşitli diğer uygulamalara da sahiptir.

Bu uygulamalarda atomizasyon, aerodinamik, elektrostatik, akustik ve ultrasonik kuvvetler dahil olmak üzere çeşitli kuvvetler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Her bir kuvvet türü atomizasyon etkisi yaratmak için farklı bir mekanizma kullanır, ancak hepsi sıvının küçük damlacıklara bölünmesiyle sonuçlanır.

Michael Faraday [1], 1831 yılında, dikey titreşime maruz bırakılan bir sıvı kolonun atomizasyonu sırasında oluşan yüzey dalgaları üzerinde öncü deneyler gerçekleştirmiş ve titreşim kaynaklı sıvı atomizasyonu alanının gelişmesine öncülük

etmiştir. O zamandan beri, literatürde titreşim kaynaklı sıvı atomizasyonu üzerine birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, altta yatan fiziğin anlaşılmasına ve çeşitli uygulamalar için atomizasyon sürecinin optimizasyonuna katkıda bulunmuştur.

1871 yılında Lord Kelvin [2] ve 1883 yılında Lord Rayleigh [3], yüzeyde oluşan kılcak dalgalarıyla ilgili matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Bu modeller, hidrodinamik ve dalga teorisi ilkelerine dayanarak farklı kuvvetlerin etkisi altındaki sıvıların davranışını daha iyi anlamamıza yardımcı olmuştur. Bu modeller, sıvı atomizasyonu alanında daha ileri araştırma ve gelişmeler için temel oluşturmuş ve çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır.

1962 yılında Lang [4], atomizasyon işlemi sırasında damlacıkların boyutunun nicel ölçümünü rapor etmiş ve yavru damlacıkların ortalama çapı, yüzey gerilimi, akışkanın yoğunluğu ve uyarma frekansı arasında bir ilişki önermiştir. Bu ilişki, Lang yasası olarak da bilinir ve atomizasyon alanında damlacıkların boyutunu tahmin etmek için yaygın bir şekilde kullanılır. Lang denklemindeki 0.34 katsayısı deneysel olarak belirlenmiş ve bu alanda yapılan sonraki çalışmalarla doğrulanmıştır.

Denklem şu şekilde verilir:

$$D = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1.1)$$

Burada, D, damlacıkların ortalama çapı, σ , akışkanın yüzey gerilimi, ρ , akışkanın yoğunluğu, f, uyarma frekansını ifade eder.

Araştırmacılar viskozite, yüzey gerilimi, yoğunluk gibi akışkan özelliklerinin atomizasyon süreci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu özelliklerin akışkanın davranışını ve üretilen damlacıkların boyut ve dağılımını nasıl etkilediğini anlamak, farklı uygulamalar için atomizasyon sürecini optimize etmek açısından önemlidir.

Goodridge ve ark. [5] viskozite ve yüzey gerilimi gibi akışkan özelliklerinin atomizasyonun gerçekleşmesi için gereken eşik ivmeleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yule ve Suleimani [6] bir sıvı tabakasının yüksek frekanslı titreşimi üzerine araştırma yapmış ve çeşitli damlacık oluşum modlarını gözlemlemişlerdir. Damlacık fırlatma mekanizmalarını tanımlamışlar ve atomizasyon süreci için temel bir teorik model önermişlerdir. Araştırmaları, titreşim kaynaklı atomizasyon fiziğinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur.

Vukasinovic ve ark. [7] araştırmalarında, salınımlı bir diyafram tarafından atomize edilen damlacıkların parçalanma mekanizmasını incelemişlerdir. Sıçrama mekanizmaları ve ortaya çıkan sprey sıvı viskozitesinden etkilenmiştir. Avvaru ve ark. [8] atomizasyon mekanizmasını anlamak için deneyler yapmış ve hem Newtonian hem de Newtonian olmayan akışkanlar için damlacık boyutunu tahmin etmek için bir korelasyon önermiştir. Titreşime bağlı damla atomizasyonunun hızlı damlacık püskürtmenin bir yolu olduğunu belirtmişlerdir. Deepu ve ark. [9] çeşitli viskoz akışkanlar için damlacık atomizasyon sürecini yüksek hızlı kameralar aracılığıyla yakalamış ve viskoz dağılımın kararsız modun dalga boyunu belirlemede önemli bir faktör olduğunu bildirmişlerdir.

Titreşim özelliklerinin damlanın dinamikleri üzerindeki etkisi birçok çalışmada incelenmiştir. Titreşim özellikleri damlanın dinamikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Damlanın dinamikleri üzerindeki titreşim etkileri, damlanın parçalanması ve atomizasyonunun verimliliği üzerinde de etkilidir. Ancak, titreşimlerin etkileri karmaşık olabilir ve doğru titreşim frekansı ve genliği seçilmelidir. Titreşim kaynaklı atomizasyon işlemi sırasında frekans, genlik ve mod şekli gibi titreşim özelliklerinin damlanın dinamikleri üzerindeki etkisi birçok araştırma çalışmasının odak noktası olmuştur.

Goodridge ve ark. [10] çalışmalarında, parametrik olarak uyarılan yüzey dalgalarının kırılma durumunu incelerken, dalga tepelerinden küçük damlacıkların çıktığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, artan ivme ile kırılma olaylarının arttığını ve azalan ivme ile kademeli olarak sıfıra yaklaştığını rapor etmişlerdir. Fırlatma oranının ivmeye bağımlılığının analizi, fırlatma eşiğinin belirlenmesine ve dalga yüksekliği dağılımı hakkında bir çıkarım yapılmasına olanak tanır. Fırlatmalar arasındaki süreler için bir Poisson dağılımı bulunmuştur.

Vukasinovic ve ark. [11] titreşim yapan bir diyafram üzerinde zorlanan su damlasının mod şekillerini göstermiştir. Düşük zorlama genliklerinde damlanın yüzeyinde aksenal simetrik dalgalar gelişmiştir. Zorlama genliği arttığça damlanın yüzeyinde önce azimutal bir kararsızlık ortaya çıkmış ve ardından damla atomize olmuştur.

Rajan ve Pandit [12] damlanın fiziko-kimyasal özelliklerinin ve ultrasonik özelliklerinin etkilerini dikkate alan genel bir korelasyon önermişlerdir. Yüksek

küreselliğe ve düzgün boyut dağılımına sahip çok küçük damlacıklar ultrasonik atomizörler tarafından oluşturulabilir. Ayrıca deneysel verilere dayanan ampirik bir korelasyon da önerilmektedir.

Barreras ve ark. [13] ultrasonik dönüştürücü üzerindeki sıvı kütlesi azaldıkça atomizasyon özelliklerinin değiştiğini bildirmişlerdir. Bu değişikliğin nedeni sıvının yüzeyinde meydana gelen eğriliktir. Yazarlar, geleneksel dalga teorisini kullanmak yerine, damlacık oluşumu gözlemlerini açıklamak için kavitasyon teorisini kullanmışlardır.

James ve arkadaşları [14] titreşim kaynaklı damla atomizasyonu ve patlaması olgusunu açıklamak için deneysel ve matematiksel bir model sunmuşlardır. Titreşim kaynaklı damla atomizasyonu ve patlaması, titreşimli bir diyafram üzerine yerleştirilen bir sıvı damlasının daha küçük ikincil damlacıklardan oluşan ince bir spreye dönüşmesi sürecidir. Uyarım genliği açıkça tanımlanmış kritik bir değerin üzerine çıkarıldığında, damla patlaması gerçekleşir. Damla patlama sürecini açıklayan matematiksel bir model sunulmuştur.

James ve ark. [15] bir diğer makalesinde ise titreşim kaynaklı damlacık fırlatma olgusu ve düşük frekanslı tek damlacık fırlatmanın sayısal simülasyonu ele almaktadır. Titreşim kaynaklı damlacık fırlatma kullanarak bir spre oluşturmak yeni bir tekniktir. Bu süreç, zorlama frekansının değerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Zorlama frekansı düşük olduğunda aksel simetrik dalga modlarının, yüksek olduğunda ise aksel simetrik olmayan modların meydana geldiğini ileri sürmüşlerdir.

Vukasinovic ve ark. [16] yüksek hızlı görüntüleme kullanarak küçük damlacıkların püskürtülmesini incelemişlerdir. Püskürtme damlacıklarının fırlatma hızının hem büyüklüğe hem de zorlama genliğinin değişme hızına bağlı olduğunu ve damlacıkların ortalama çapının $f^{2/3}$ gibi zorlama frekansına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Palan ve Shepard [17] su damlasını atomize etmek için titreşim ve akustik tabanlı yöntemler üzerinde çalışmıştır. Damlacık atomizasyonu için gerekli ivme seviyelerini belirlemişlerdir.

Donnelly ve ark. [18] yaptıkları çalışmada, damlacık çapı dağılımı ile zorlama frekansı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu çalışmada, suyun atomize edilmesiyle oluşan su damlacıklarının çapı ölçülmüştür. Sonuç olarak, atomizerin frekansı arttıkça damlacık çapı dağılımının azaldığı gözlenmiştir.

Ramisetty ve ark. [19] ise bir görüntü analiz programı kullanarak bir ultrasonik atomizörde damlacık boyutu dağılımını ölçtüler. Bu çalışmada da atomizerin frekansı arttıkça damlacık boyutunun azaldığı gözlemlendi. Bu sonuçlar, ultrasonik atomizörlerin frekansı arttıkça daha küçük damlacıklar üretildiğini göstermektedir.

Chen ve ark. [20] sabit veya hareketli perfloroalkoksi (PFA) film üzerindeki damla dinamiklerini araştırmıştır. Damlacık fırlatma işlemi sırasında plakalar üzerindeki damlacıkları ölçmüş ve kaydetmişlerdir. Sabit ve hareketli plakalar üzerindeki damlacık davranışlarını karşılaştırarak, hareketli plakadan damlacıkların hızla atıldığı sonucuna varmışlardır.

Deepu ve ark. [21] farklı damla özellikleri için damlacığın ortalama atomizasyon süresini ölçmek için yüksek hızlı bir kamera kullanmıştır. Atomizasyon hızı ilk damla boyutuyla birlikte artmış ve viskozitedeki değişikliklere duyarlı olmuştur.

Literatürde damlanın yayılması ve atomizasyonu üzerine deneysel analizler yapılmıştır. Deepu ve ark. [22] salınlı bir yüzey üzerindeki bir damlanın küçük ölçekli salınım rejimini, damla yayılma rejimini, iki lob rejimini ve tabaka yayılma, atomizasyon rejimini göstermiştir. Yayılma hızının viskozite ile değiştiğini ve kılcak mod gelişiminin engellenmesiyle parçalanmanın önlendiğini keşfetmişlerdir.

Bir görüntü işleme programı kullanan Munoz ve ark. [23], yüksek frekanslı titreşimle uyarılan damla yarıçapını ve temas açısını zamana bağlı olarak ölçmüşlerdir. Titreşim genliği arttıkça damlanın yarıçapının arttığını ve temas açısının azaldığını keşfetmişlerdir.

Boscario ve ark. [24], katı bir yapıya bağlı gözenekli metal üzerindeki damla darbelerinin davranışını incelemişlerdir. Yüksek hızlı darbelerin damlacık sıçraması, birikme, kısmi emilim ve penetrasyon ile sonuçlandığı sonucuna varmışlardır. Zhang ve ark. [25] damlacıkların dinamik davranışlarını ve buzlanmayı önleme özelliklerini araştırmışlardır. Maksimum yayılma faktörünün ultrasonik titreşim genliği üzerindeki değişimini göstermişlerdir.

Titreşime maruz kalan hidrofobik katı bir plaka üzerindeki bir damlanın tepkisine ilişkin çok sayıda kapsamlı araştırma yapılmış ve rapor edilmiştir.

Kim ve ark. [26] hidrofobik bir yüzeye yerleştirilmiş bir su damlacığına rezonans uygulayarak su damlacığının içinde gerçek bir akış olup olmadığını doğrulamak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Titreşim uygulayarak su damlacığının dört tip su modunu (yani 2, 4, 6 ve 8) tanımlamışlar ve bunların iç akış modellerini ve hız alanlarını göstermişlerdir.

Wejrzanowski ve ark. [27] makalelerinde, yüzey akustik dalgaları (SAW) ile titreşim yapan bir tabaka üzerindeki su ve buz arasındaki etkileşimi incelemek için moleküler dinamik simülasyonlarını kullanmışlardır. Hidrofobik yüzeylerin suyun uzaklaştırılmasında ve buzun eritilmesinde daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Wang ve ark. [28] çalışmalarında moleküler dinamik simülasyonu kullanarak pürüzlü yüzeylerin nano ölçekte su nanofilmlerinin akustotermal atomizasyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Su nanofilminin titreşim kaynaklı buharlaşma ve kaynama performansı daha çok pürüzlü yüzeyin neden olduğu ıslanabilirlik değişimine bağlı olarak olumlu olarak artmıştır.

Jiang ve ark. [29] makalesinde su damlalarının farklı geometrilerde çeşitli çıkıntılara sahip süperhidrofobik yüzeyler üzerindeki darbe davranışını yüksek hızlı kamera ile incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, düz yüzeye kıyasla çıkıntılı yüzeylerin damla deformasyonunu büyük ölçüde artırdığını ve aynı zamanda damlanın parçalanmasını kolaylaştırdığını ortaya koymaktadır.

Galleguillos-Silva ve ark. [30] makalelerinde katı yüzey ıslanabilirliğinin titreşim durumuna bağımlılığını incelemiştir. Daha yüksek titreşim hızının temas açısını düşürdüğü ve bu nedenle daha fazla yüzey ıslanabilirliğine neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Dong ve ark. [31] makalesinde, Navier-Stokes denkleminin üç boyutlu sayısal simülasyonunu kullanarak yanal titreşime maruz kalan bir su damlasının rezonans modlarını tanımlamış, temas açısı değişimini ve bunun titreşim frekansına bağımlılığını araştırmışlardır.

Sarasua ve ark. [32] makalesinde, ultrasonik titreşimin üç fazlı bir ıslatma sisteminin temas açısı üzerindeki etkisini tartışmaktadır. Ultrasonik titreşim, ıslatma sistemlerinde temas açısını azaltarak ıslanabilirlikte anlık bir artışa neden olur.

Yu ve ark. [33] çalışmalarında damlacık-yüzey etkileşimlerinin altında yatan fizik, yüzeyin kendi kendini temizlemesi, damlacık taşınması, püskürtmeli soğutma ve daha fazlası dahil olmak üzere su damlacıklarının sıçramasının dinamiklerini, teorilerini ve potansiyel uygulamalarını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Damlacık sıçraması teorileri arasında yüzey ıslanabilirliği, arayüzey gerilimleri, yüzey pürüzlülüğü ve damlacık/buhar/hava deformasyonunun yer aldığını belirtmişlerdir. Damlacık sıçrama dinamiklerinden esinlenen gelişmiş uygulamalar arasında yüzey kendi kendini temizleme, yönlü damlacık taşıma, ısı transferini geliştirme, damlacık mantıksal kapıları ve elektrik üretiminin yer aldığını vurgulamışlardır.

Hassan ve ark. [34] çalışmalarında bir manyetik alan etkisi altında hidrofobik bir yüzey üzerindeki bir çift damlacığın dinamiklerinin sayısal incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, homojen olmayan bir manyetik alanın, genellikle daha düşük yüzey enerjisine ve damla ile katı yüzey arasında ara yüzey gerilimine sahip olan hidrofobik bir yüzeyin ıslanabilirliğini artırabildiğini göstermektedir.

Milne ve ark. [35] çalışmalarında, hidrofilik PMMA, hidrofobik teflon ve süperhidrofobik-teflon kaplamalı aşındırılmış alüminyumdan su damlalarının dökülmesine ilişkin sonuçlar ve analizler sunmaktadırlar. Damlaların katı yüzeylerden dökülmesi, ıslanma ve yapışma ilkelerinin yanı sıra akışkanlar mekaniği ilkelerinden de etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Noblin ve ark. [36] titreşime maruz kalan katı hidrofobik yüzey üzerindeki damlanın yüzey modlarına odaklanan bir çalışma yürütmüşlerdir. Düşük genliklerde temas açısı histerezisi nedeniyle temas hattı sabit kalmış ve sadece damla yüzey modları gözlemlenmiştir. Dong ve ark. [37], hesaplamalı akışkan dinamiği modellenmesi kullanarak küçük genlikli yanal titreşime maruz kalan hidrofobik bir tabaka üzerindeki su damlalarının rezonans modlarını araştırmışlardır.

Literatürde son zamanlarda gözenekli metal tabanlı bir dönüştürücü üzerinde sıvı damla atomizasyonu üzerinde deneysel analiz gerçekleştirilmiştir.

Peng ve ark. [38] Dupuis ve ark. [39,40] ve Patel ve ark. [41] doğrudan temaslı ultrasonik titreşim kullanarak kumaş kurutmayı deneysel olarak araştırmışlardır. Susuzlaştırma işlemi için dairesel gözenekli plaka kullanmışlar ve kumaşın kuruma oranını ölçmüşlerdir. Suyun titreşim yapan gözenekli plakadan hem havaya hem de gözeneklere alındığını belirtmişlerdir.

Yan ve ark. [42] delik içi titreşimlerden etkilenen tıbbi bir piezoelektrik atomizasyon cihazında damlacıkların oluşumunu ve ayrılmasını simüle etmek için yeni bir yöntem tanıtımışlardır. Damlacıkların ayrılma suresinin artan giriş hızı ve sıvı sıcaklığı ile azaldığını, yuksek sıvı konsantrasyonu ile arttığını göstermişlerdir.

Yan ve ark. [43] makalesinde, atomizrdeki atomizasyon oranını etkileyen faktörleri araştırmayı ve temel çalışma mekanizmalarını araştırmışlardır. Atomizasyon hızı artan mikro-konik diyafram çapı ile arttığını belirtmişlerdir.

Yan ve ark. [44] tıbbi piezoelektrik atomizasyon cihazlarının, titreşim özelliklerinin atomizasyon hızı, atomizasyon yuksekligi ve atomizasyon parçacık boyutu üzerindeki etkisini deneylerle doğrulanmışlardır.

Hsieh ve ark. [45] yuksek güçlü elektronik cihazların soğutulmasında kullanılabilir piezoelektrik atomizrl, mikro spre y tabanlı bir soğutma sistemi üzerine yapılan deneysel bir çalışmayı ele almışlardır. Piezoelektrik atomizörün belirli koşullar altında elektronik soğutma uygulaması için iyi bir seçim olabileceğini belirtmişlerdir.

Kuo ve ark. [46] makalesinde stabilitesi, taşınabilirliği, enerji verimliliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle ilaç tedavisinde popüler hale gelen titreşimli gözenekli spre y retelerinin özellikleri ve performansını ele almaktadır. Bulgulara göre, damlacık boyutunun delik çapı ile arttığı, delikler arasındaki aralığın ise üretilen damlacıkların sayı konsantrasyonunu veya boyut dağılımını önemsiz lde etkilediği gözlemlenmiştir. Damlacık boyutu, rezonans frekansı arttığı, beklenenden daha az bir lde de olsa azalmıştır.

Lee ve ark. [47] makalesinde sistemin performansını en st düzeye çıkarmak için atomizasyon hızının ısıtıcı yüzeyindeki damlacık büyümesi üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadırlar. Atomizasyon işlemi sırasında ısıtıcı yüzeyinde damlacık büyümesi gözlemlenmiştir. Atomizrn titreşim modlarını analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon, sistemin rezonans frekansını doğru bir şekilde tahmin etmiş ve bu frekans daha sonra piezoelektrik halka için tahrik frekansı olarak seçilmiştir. FEM analizinde voltajın artırılması, diskin merkezindeki yer değiştirmede doğrusal bir artışla sonuçlanmıştır.

Guerra-Bravo ve ark. [48] sonlu elemanlar modellemesi ve sayısal simülasyonlar kullanarak atomizasyon için bir piezoelektrik halkanın ve gözenekli ince plakanın dinamik davranışını karakterize etmişler, mikro gözeneklerin şeklinin titreşim yapan ince plakanın rezonans frekans spektrumları üzerindeki etkisini araştırmışlar ve deneyler yaparak atomizasyon oranının sayısal simülasyon sonuçlarını doğrulamışlardır.

Sarı ve ark. [49] yaptıkları çalışmada, uyarılmış mikro gözenekli plaka üzerine yerleştirilen damlanın davranışını ele almışlardır. Damlanın hem plakanın gözeneklerinden hem de havaya doğru atomize olduğu gözlemlenmiştir. İvmenin, damlanın yüzeye izdüşüm alanı üzerindeki etkileri niteliksel ve niceliksel olarak sunulmuştur. Damlanın yüzeye izdüşüm alanının önce yayıldığı ve daha sonra zamana bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, başlangıç ivmesinin alan değişim hızı üzerindeki etkileri nicel olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada, hidrofobik ve gözenekli pirinç plakalar üzerinde yüksek frekansla uyarılan damla atomizasyonuna odaklanıldı. Yapılan çalışmalarda gözenekli plaka ve hidrofobik plaka üzerindeki bir su damlasının davranışının incelenmesi vardır, ancak yüksek frekansla titreşim yapan hidrofobik özellikli bir plaka üzerindeki su damlasının davranışının deneysel olarak incelenmesi ve karşılaştırılması bulunmamaktadır. Aynı zamanda gözenekli plakalarda farklı çap ölçülerinin karşılaştırılması literatürde bulunmamaktadır.

Yapılan bu tezin amacı, çeşitli çaplarda gözenekler içeren plaka üzerindeki su damlasının, gözeneksiz plaka üzerindeki su damlasının ve hidrofobik özellikli plaka üzerindeki su damlasının yüksek frekansla uyarıldığında ortaya çıkan davranışını saptamak ve karşılaştırmaktır. Hidrofobik yapının ve gözenekli yapının atomizasyon üzerindeki etkilerini tartışmaktır. Plakaların atomizasyon davranışını kontrol etmek için kamera ile kayıt alınıp deneysel karşılaştırma yapılmaktadır. Aynı zamanda gözeneksiz plakanın atomizasyon frekansının bulunması nümerik olarak da desteklenmektedir ve farklı plaka kalınlıklarındaki frekans değerleri nümerik olarak saptanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Atomizasyonun Fiziksel Mekanizması

Sıvı yüzeylerden damlacık püskürtülmesi doğada her yerde görülen bir olgudur. Okyanusların ve göllerin kıyılarında veya yüzeylerinde dalga kırılmaları, bir su birikintisine çarpan yağmur damlasının sıçraması, sıvının ana gövdesinden çıkan ve daha sonra yeniden katılan küçük, yüksek enerjili damlacıkların oluşumunu içerir [50].

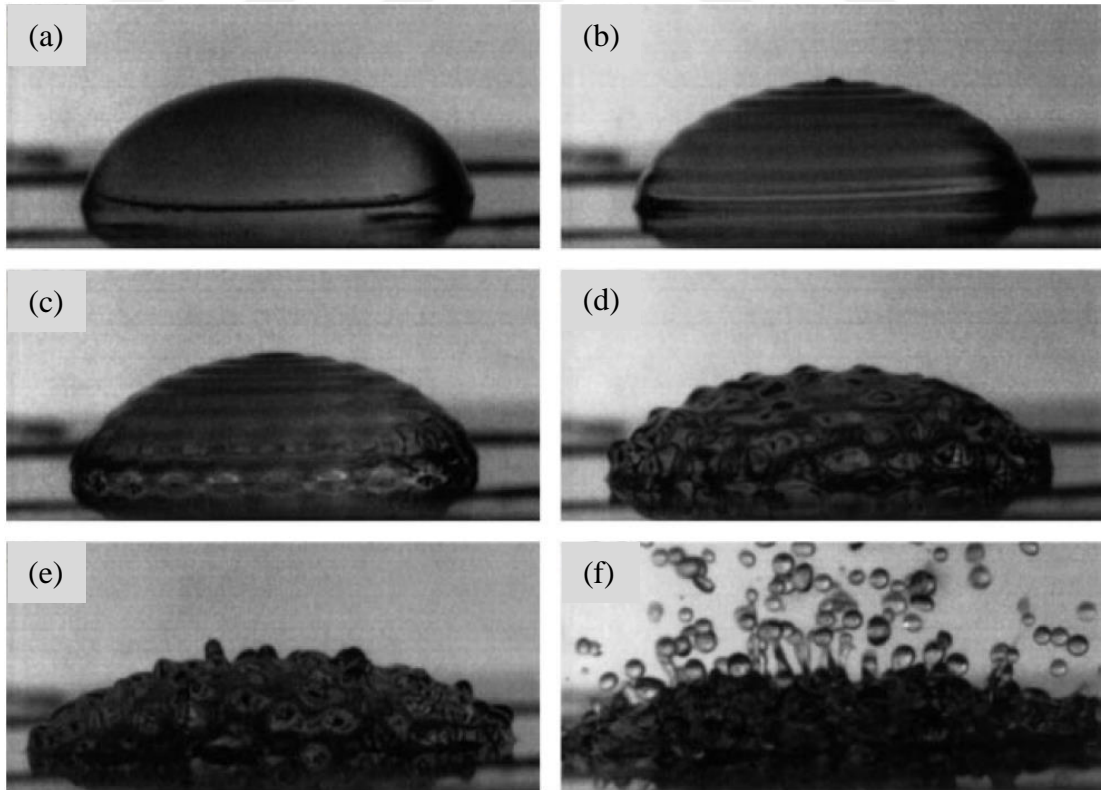
Ultrasonik atomizasyon, bir sıvıyı küçük damlacıklara veya buğuya ayırmak için yüksek frekanslı dalgaların kullanılması sürecini ifade eder. Ultrasonik atomizasyonun fiziksel mekanizması araştırmacılar arasında hala tartışma konusu olup, bu sürecin nasıl gerçekleştiğini açıklayan iki teori vardır. İlk teori olan kılcal dalga teorisi, ultrasonik dalgaların sıvının yüzeyinde dalgalar oluşturduğunu ve bu dalgaların sonunda kararsız hale gelerek damlacıkların oluşmasına neden olduğunu öne sürer. İkinci teori olan kavitasyon teorisi ise ultrasonik dalgaların sıvı içinde küçük kabarcıklar oluşturduğunu ve bunların daha sonra çökerek sıvıyı damlacıklar halinde parçalayan hidrolik şoklar ürettiğini öne sürer.

Kılcal dalga hipotezi, sıvıların atomize olmadan önceki dönemlerinde, yüzeylerindeki titreşimlerin neden olduğu kılcal dalgaları dikkate alarak, Taylor kararsızlık kriterlerine [51] dayanmaktadır. Bu hipoteze göre, sıvı yüzeyinde oluşan tepe ve çukurlardan oluşan kapillerler, Lang [52] tarafından fotografik ölçümler kullanılarak doğrulanmıştır. Damlacıklar, kılcal dalga tepelerinin yüzey bozuklukları nedeniyle sıvı tabakasından uzaklaştırılmasıyla oluşur, dolayısıyla damlacık boyutu kılcal dalga boyuyla orantılıdır [53].

Kılcal yüzey dalgalarında damlacık çıkarıcı durumlara geçiş, Rayleigh-Taylor kararsızlığı, dalga tepelerinin damlacıklara ayrılmasına neden olana kadar uygulanan basıncın artırılmasıyla sağlanır. Damla fırlatma durumuna geçişten önce dikey olarak salınan dalgalar bir dizi dalgalanma yaşar [54–56]. Başlangıçta yüzeyde görülen bir dalga durumu, zorlama arttıkça periyodik bir kararlı dalga durumuna dönüşecektir. Bu daha sonra, yeterince büyük bir zorlamada, genellikle damlacıklara dönüşecek yukarı doğru jetlerle veya sivri uçlarla birlikte büyük genlikli dalgalar üretecek olan düzensiz bir duruma dönüşecektir [57–61].

Kavitasyon, bir sıvının statik basıncının sıvının içindeki gaz basıncının altına düşerek sıvı içinde gaz dolu küçük boşlukların oluşmasına yol açtığı bir olgudur. Kavitasyon hipotezi, titreşimli yüzeydeki sıvı filmdeki kavitasyon aktivitesinin mikro damlacıkların oluşumuna yol açtığını belirtir [62]. Kavitasyon aktivitesi, ultrasonik enerjinin dağılması nedeniyle bir titreşimli yüzeydeki sıvı tabakasında çekirdeklenme, büyüme ve ardından patlamayla çok sayıda mikro kabarcığın oluşmasıdır. Atomizasyon sırasında kavitasyonun varlığı, iyot salınım yöntemi [63-67] salisilik asit doz ölçümü [68,69] ve parçacık görüntü hız ölçümü (PIV) tekniği [70-73] gibi bazı çalışmalarla doğrulanmıştır.

Kavitasyon yoğunluğunu, giriş gücü, sıvı akış hızı ve atomize edilecek sıvının fizikokimyasal özellikleri gibi çalışma parametreleri etkilediği belirtilmiştir [74]. Bouguslavskii [75], kılcak dalgaların oluşumu ve sıvı filmde kavitasyon aktivitesinin meydana gelmesine ilişkin iki hipotezi ilişkilendiren bir birleşme teorisi önermiştir. Bu teoriye göre damlacıkların oluşumu, kavitasyon bozukluğundan kaynaklanan rastgele hidrolik şok dalgaları ile kılcak dalgalar arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.1: Titreşim yapan bir diyafram üzerindeki su damlasının hareketi [14]

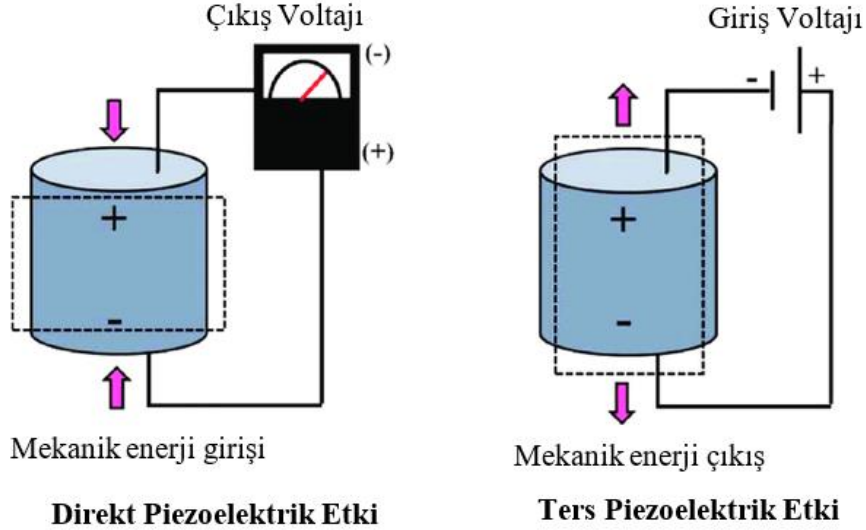
Şekil 2.1'de, 100 µl hacimli su damlası piezoelektrik seramik bir disk tarafından uyarılan metal bir diyafram üzerinde bulunur ve uyarma genliği arttıkça gözlenen farklı durumlar, video karelerinden oluşan bir dizi şeklinde gösterilmiştir [14]. Şekil 2.1(a), referans için zorlanmamış damlayı göstermektedir. Uyarma genliğinin küçük değerleri için, Şekil 2.1(b)'de gösterildiği gibi damlanın serbest yüzeyinde aksel simetrik kararlı dalgalar mevcuttur. Bu dalgalar uyarma ile aynı frekansa sahiptir ve uyarma genliğinin çok küçük değerlerinde bile mevcuttur. Kritik bir uyarma genliğinin üzerinde, damlanın temas hattı boyunca azimutal bir kararsızlık modu tetiklenir. Bu mod mevcut aksel simetrik dalgalarla birleşerek damlanın serbest yüzeyinde azimutal olarak yüksek dalga sayısına ulaşan bir dalga üretir (Şekil 2.1c). Bu dalga ilk başta sabittir, ancak daha sonra deneydeki kusurlar dalganın damlanın çevresi boyunca saat yönünde ya da saat yönünün tersine yavaşça dönmesine neden olur. Bu kararsızlık, klasik Faraday dalgası kararsızlığının işareti olan serbest yüzey hareketinde bir alt harmonik frekansın ortaya çıkmasıyla da belirtilir. Uyarma genliği daha da artırıldığında, serbest yüzey dalgalarının büyüklüğü ve karmaşıklığı artar ve zamana bağlı hale gelir (Şekil 2.1d). Zamana bağlı olarak sürekli hareket halinde olan farklı çukurların ve sivri uçların gelişimi Şekil 2.1(e)'de gösterilmektedir. Son olarak, Şekil 1(f) patlama sürecinin başlangıç aşamasını göstermektedir.

2.2 Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler, mekanik bir etki altında elektriksel tepki gösteren ve aynı şekilde elektriksel bir etki altında da mekanik tepki veren seramiklerden oluşan malzemelerdir. Bu malzemelerin kendine özgü özellikleri, üzerlerine uygulanan basınç ile elektrik üretmeleri ve elektriksel etki ile de mekanik tepki vererek boylarının değişmesidir. Bu özellikleri, malzemelerin atomik yapılarındaki simetri bozukluklarından kaynaklanmaktadır. Genellikle kristallerde birim hücreler simetriktir ancak piezoelektrik kristallerde bu böyle değildir. Atomların kafes içindeki asimetrik dizilimine rağmen, piezoelektrik kristaller elektriksel olarak nötrdür çünkü pozitif yükler, komşu negatif yükler tarafından yok edilir. Ancak, bir piezoelektrik kristal sıkıştırılıp veya gerdirilirse, atomlar orijinal pozisyonlarından uzaklaşarak tüm kristal boyunca net bir elektrik yükü oluştururlar. Sonuç olarak, kristalin karşılıklı ve dış yüzeylerinde net pozitif ve negatif yükler oluşur [76,77].

Merkez simetrisinden yoksun olan çinko oksit (ZnO) kristal yapısı, Zn^{2+} katyonlarının ve O^{2-} anyonlarının tetrahedral olarak koordine edilmediği ve merkezlerinin örtüşmediği durumdadır. Bu durum kristalin kendiliğinden polarizasyona neden olmaz. Ancak, kristale dışarıdan bir stres uygulandığında, Zn^{2+} katyonları ve O^{2-} anyonları arasındaki konumlar birbirine göre kayarak bir çift kutuplu moment oluşturur. Bu nedenle, tüm kristaldeki yüklerin toplu polarizasyonu yaşanır ve piezoelektrik bir potansiyel oluşur. Bu, tüm kristalde toplu polarizasyona ve piezoelektrik bir potansiyel oluşumuna yol açar [78]. Uygulanan mekanik basınç veya gerilim, bu polarizasyonu değiştirir, elektrik yüklerinin yeniden dağılımına neden olur ve böylece elektrik akımı üretilir.

Mekanik bir kuvvetin malzemeye uygulanması, malzeme üzerinde gerilim oluşmasına neden olur. Gerilimin etkisiyle malzeme, şekil değiştirerek mekanik tepki verir. Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi "direkt piezoelektrik etki" olarak bilinir ve bunun tersi "ters piezoelektrik etki" olarak adlandırılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Direkt ve ters piezoelektrik etki durumu [79]

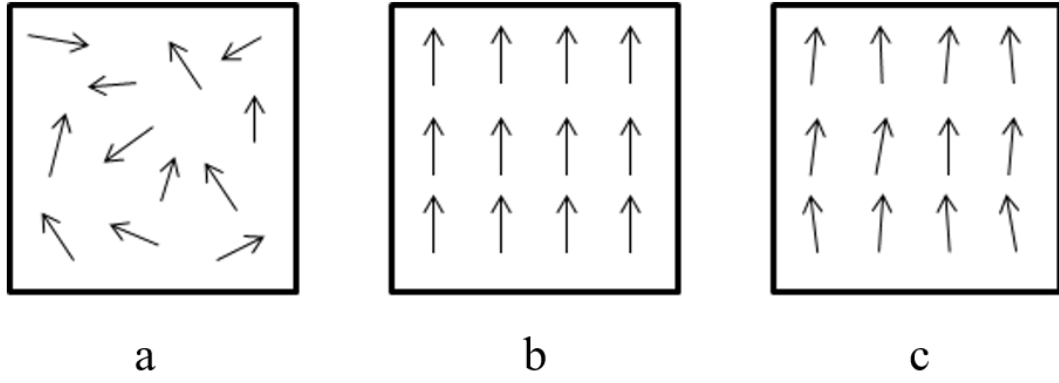
Piezoelektrik etkinin, kristal yapıdaki asimetrinin sonucu olduğu belirtilmiştir. Ancak piezoelektrik malzemelerin atomik kristal yapıları, sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Belirli bir Curie sıcaklığı (T_C) olarak adlandırılan

sıcaklık, kristal yapıdaki atomların enerjilerinin belli bir seviyeye yükseldiği için atomik düzenlemeleri değiştirir ve atomik kristal yapı simetrik bir yapıya dönüşür. Bu asimetri kaybolduğu için elektrik dipoller ortadan kalkar ve malzemenin piezoelektrik özelliği kaybolur. [80].

Piezoelektrik malzemeler, çoğunlukla kristal yapıya sahip katı maddelerdir. Tek kristalli ve çok kristalli malzemeler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Tek kristalli malzemeler, doğal olarak bulunabileceği gibi, yapay olarak da üretilirler. Çok kristalli yapılar ise, piezoelektrik özelliği sonradan eklenen malzemelerdir.

Piezoelektrik malzemelerin endüstriyel amaçlarla üretimi için yüksek şiddetli elektrik alanlara maruz bırakılan malzemenin yüksek sıcaklıklara tabi tutulması gereklidir. Bu işleme kutuplanma denir ve istenilen yönde piezoelektrik özellikleri olan malzemelerin elde edilmesini sağlar. Kutuplanma işlemi sonrasında malzemelerdeki kutup çiftleri rastgele dağılmaktadır ve piezoelektrik etkinin kaybolmasına neden olur. Ancak, kutuplanma eksenini yönünde potansiyel fark uygulamak, kutup çiftlerinin yeniden yönlendirilmesine izin verir ve malzeme bir şekil değişikliği meydana gelir. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, kutuplanma işlemi sırasında malzemenin içindeki kutupların davranışı, piezoelektrik etkinin istenilen şekilde elde edilmesini sağlar.

Başlangıçta rastgele yönelmiş kutuplar birbirlerinin yönelimlerinden bağımsız olarak sıralanmışlardır. Curie sıcaklığı altında, yüksek bir elektrik alanına maruz kalan kutup çiftleri elektrik alan yönünde hizalanmaktadır ve bu işleme kutuplaşma denir. Kutuplaşmanın ardından, yapıda bir genişleme meydana gelir. Elektrik alanın kaldırılmasıyla, kutupların yöneliminde küçük sapmalar gözlemlenebilir, ancak malzeme hala kutuplaşma etkisi altındadır. Son durumdaki kutuplaşma etkisinden dolayı uzayan yapıda meydana gelen uzama miktarı oldukça küçük ve genellikle mikrometre düzeyindedir [81].



Şekil 2.3: Kutuplanma süreci: a) Serbest durum, b) Elektrik alan etkisi altında, c) Elektrik alan kaldırıldıktan sonra [83].

Piezoelektrik malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanları piezoseramikler ve piezopolimerlerdir. PZT (Kurşun Zirkonat Titanat), piezoseramikler arasında en bilinenidir ve PVDF (Poliviniliden Florid) ise piezopolimerler arasında en iyi bilinenidir. Her iki piezoelektrik malzeme sınıfının farklı özellikleri, farklı uygulama alanlarında üstünlük sağlar. Örneğin, piezoseramik elemanların yüksek rijitliği, elektrik enerjisini etkin bir şekilde mekanik enerjiye dönüştürme yeteneği sağlar. Bu dönüşüm, piezoseramikten yapılmış parçanın iyi çalışma özellikleri kazanmasına olanak tanır [82].

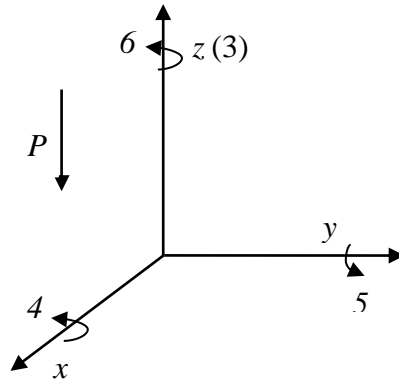
Günümüzde piezoelektrik malzemelerin kullanım alanı oldukça geniştir. Piezoelektrik malzemelerin hızlı tepki verme özelliği ve düşük enerji tüketimi avantajları, aktüatör ve sensör olarak sıklıkla kullanılmalarına sebep olmaktadır. Piezoelektrik malzemeler titreşim kontrolü için akıllı malzemelerde, havacılık ve uzay uygulamalarında esnek yüzeylerin istendiği yerlerde, robotik uygulamalarda, mekanik aktüatör ve sensör yapılarının bileşimi olan mikro yapılarda, mikro çiplere entegre edilerek kullanılmaktadır. Tüm bu uygulamalar, piezoelektrik malzemelerin çok yönlü özelliklerinden faydalanarak daha gelişmiş teknolojilerin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır.

2.2.1. Piezoelektrik Bünye Denklemleri

Bu bölümde, piezoelektrik malzemelerin elektromekanik özelliklerini tanımlayan denklemleri açıklanmıştır. Bu tanımlar, piezoelektrik malzemelerin davranışını doğru bir şekilde yansıtan IEEE standardına [84] dayanmaktadır. Bu standart, piezoelektrik malzemelerin davranışının doğrusal olduğunu varsayar. Piezoelektrik malzeme özelliklerini anlamak için yaygın olarak kabul edilen bir kaynaktır.

Kutuplanmış bir piezoelektrik seramik mekanik olarak gerildiğinde, elektriksel olarak kutuplanır ve malzemenin yüzeyinde bir elektrik yükü üretir. Bu özellik doğrudan piezoelektrik etki olarak adlandırılır ve piezoelektrik malzemelerin sensör olarak kullanılmasının temelini oluşturur. Ayrıca, piezoelektrik malzemelerin ters piezoelektrik etki adı verilen bir özelliği vardır. Bu özellikte, malzemeye uygulanan elektriksel bir alan, malzemeyi fiziksel olarak gerer ve bu gerilim sonucunda malzeme şekil değiştirir. Bu özellik, piezoelektrik malzemelerin aktüatör olarak kullanılmasının temelini oluşturur.

Piezoelektrik özelliği tanımlayan bünye denklemleri, aktüatördeki toplam gerilmenin, mekanik gerilimin neden olduğu mekanik gerilmenin ve uygulanan elektrik voltajının neden olduğu kontrol edilebilir tahrik gerilmesinin toplamı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Eksenler harfler yerine rakamlarla tanımlanır. 1, x eksenine, 2, y eksenine ve 3, z eksenine karşılık gelmektedir. Eksen 3, piezoseramiğin ilk polarizasyon yönüne atanmıştır ve eksen 1 ve 2, eksen 3'e dik düzlemde yer alır. Bu, Şekil 2.4'te daha açık bir şekilde gösterilmiştir.



#	Eksen
1	x
2	y
3	z
4	x etrafında kayma
5	y etrafında kayma
6	z etrafında kayma

Şekil 2.4: Malzeme özellikleri için belirlenen eksen takımı [83]

Piezoelektrik malzemenin sıcaklık etkisinde olmadığı varsayımı altında, doğrusal bir piezoelektrik malzeme için elektromekanik denklemler şu şekilde yazılabilir [84, 85]:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^E \sigma_j + d_{mi} E_m \quad (2.1)$$

$$D_m = d_{mi} \sigma_i + \xi_{ik}^\sigma E_k \quad (2.2)$$

Burada $i, j = 1, 2, \dots, 6$ ve $m, k = 1, 2, 3$, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi malzeme koordinat sistemi içindeki farklı yönleri ifade eder. Yukarıdaki denklemler, genellikle sensör uygulamaları için kullanılan aşağıdaki biçimde yeniden yazılabilir:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^D \sigma_j + g_{mi} D_m \quad (2.3)$$

$$E_i = g_{mi} \sigma_i + \beta_{ik}^\sigma D_k \quad (2.4)$$

Bu denklemlerde yer alan terimler, gerinim bileşenleri (ε_i), elektriksel yer değiştirme bileşenleri (D_m, D_k), normal ve kayma gerilmeleri (σ_i, σ_j), elastik rijitlik katsayıları (S_{ij}), piezoelektrik gerilim katsayıları (g_{mi}), ve elektrik alan bileşenleri (E_m, E_k, E_i) terimleridir. Ayrıca, D, E ve σ üst indisleri sabit elektrik yer değiştirmesi, sabit elektrik alanı ve sabit gerilimde alınan ölçümleri temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & e_{12}^\sigma & e_{13}^\sigma \\ e_{21}^\sigma & e_{22}^\sigma & e_{23}^\sigma \\ e_{31}^\sigma & e_{32}^\sigma & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Piezoelektrik malzeme özellikleri belirlenirken öncelikle kutuplanma yönü dikkate alınmalıdır çünkü kutuplanma yönü piezoelektrik malzemenin özelliklerini doğrudan etkiler. Ayrıca, piezoelektrik malzemenin polimer veya PZT seramik yapıda olması da malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkileyen bir faktördür.

Donanımın z eksenini boyunca kutuplandığı varsayıldığında ve piezoelektrik malzemenin piezoelektrik seramikler için de geçerli olan enine izotropik bir malzeme olduğu düşünüldüğünde, yukarıdaki matrislerdeki parametrelerin çoğu ya sıfır olacak ya da diğer parametreler cinsinden ifade edilebilecektir. Özellikle, sıfır olmayan uyumluluk katsayıları şunlardır [83]:

$$S_{11} = S_{22} \quad (2.7)$$

$$S_{13} = S_{31} = S_{23} = S_{32} \quad (2.8)$$

$$S_{12} = S_{21} \quad (2.9)$$

$$S_{44} = S_{55} \quad (2.10)$$

$$S_{66} = 2(S_{11} - S_{12}) \quad (2.11)$$

Sıfır olmayan piezoelektrik gerinim sabitleri şunlardır;

$$d_{31} = d_{32} \quad (2.12)$$

$$d_{15} = d_{24} \quad (2.13)$$

Son olarak, sıfır olmayan dielektrik katsayıları şunlardır;

$$e_{11}^\sigma = e_{22}^\sigma = e_{33}^\sigma \quad (2.14)$$

Daha sonra, (2.5) ve (2.6) denklemleri şu şekilde basitleştirilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & e_{22}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Denklemlerde gösterilen bazı piezoelektrik katsayılarının fiziksel anlamları aşağıda açıklanmıştır.

"Piezoelektrik gerinim sabiti" d , serbest gerinimin uygulanan elektrik alanına oranı olarak tanımlanır. d_{ij} alt simgesi, j yönünde bir deplasman veya kuvvet için i yönünde elektrik alanının uygulandığını ifade eder. Piezoelektrik gerinim katsayısı d_{ij} , tüm dış gerilmeler sabit tutulduğunda j eksenindeki gerilmenin i eksenini boyunca uygulanan elektrik alanına oranıdır [83].

"Piezoelektrik gerilim sabiti", g_{ij} , malzeme j eksenini boyunca gerildiğinde i eksenini boyunca gelişen elektrik alanını ifade eder. Piezoelektrik potansiyel fark katsayısı olarak da ifade edilir [83].

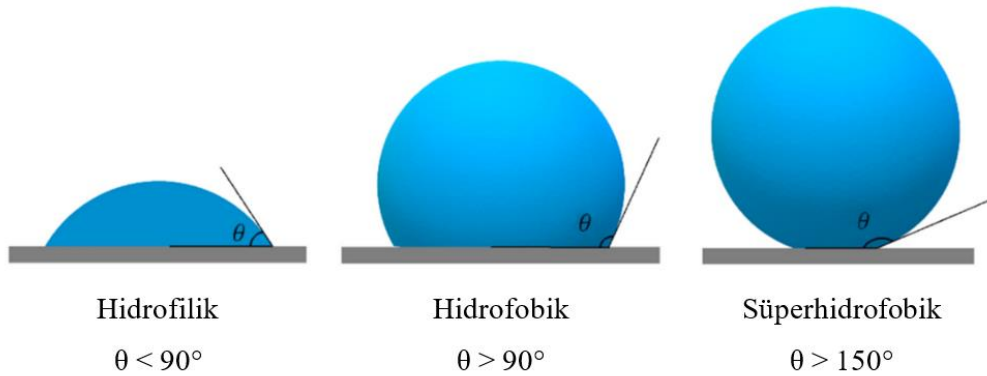
"Elastik rijitlik katsayısı", S_{ij} , diğer iki yönde herhangi bir gerilme değişikliği olmadığı varsayıldığında, i yönündeki gerilmenin j yönündeki gerilmeye oranıdır. Doğrudan gerinim ve gerilmeler 1 ile 3 arasındaki indislerle, kayma gerinim ve gerilmeleri ise 4 ile 6 arasındaki indislerle gösterilir [83].

Dielektrik katsayısı e_{ij} , j ekseninde uygulanan bir elektrik alanı nedeniyle i eksenindeki birim alan başına yükü belirler. Çoğu piezoelektrik malzemede, j eksenini

boyunca uygulanan bir alan yalnızca bu yönde elektriksel yer değiştirmeye neden olur [83].

2.3 Hidrofobik Özellik, Temas Açısı ve Yüzey Pürüzlülüğü

Temas açısı, bir sıvı damlasının katı bir yüzey ile temas ettiği noktada oluşan katı-sıvı-hava kesişim bölgesindeki teğetin iç açısıdır. Bu açı, sıvının molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetleri ile sıvı ile katı yüzey arasındaki adezyon kuvvetleri arasındaki ilişkiye bağlıdır. Su molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetleri, su ile hidrofobik yüzey arasındaki adezyon kuvvetlerinden daha güçlüdür ve su damlaları bu tür ıslanmayan ve düz hidrofobik yüzeylerde 90° 'den daha büyük bir temas açısına sahiptir.



Şekil 2.5: Sıvı damlanın hidrofilik, hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyler üzerindeki genel görünüşü [86]

Temas açısı (θ) 90° 'den az olan bir yüzey hidrofilik yüzey olarak bilinirken, temas açısı 90° veya daha fazla olan bir yüzey hidrofobik yüzey olarak adlandırılır. Temas açısı 150° 'den büyük ve oda sıcaklığında yuvarlanma açısı 10° 'den küçük olan bir yüzey süperhidrofobik yüzey olarak kabul edilir. Şekil 2.5'te bu üç durum gösterilmiştir. Bu, süperhidrofobik bir yüzey üzerindeki su damlacıklarının yayılmak ve yüzeyi ıslatmak yerine toplanma ve kolayca yuvarlanma eğiliminde olduğu anlamına gelir. Bu tanımlar, yüzeylerin ıslanabilirliğini tanımlamak için bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve malzeme bilimi, mühendislik ve biyoloji dahil olmak üzere çeşitli alanlarda önemli etkileri vardır [87].

Doğada bir lotus yaprağı süperhidrofobik özellikleri nedeniyle kir ve çamuru geri iter ve su itici özelliklerinin yaprak yüzeyindeki iki farklı boyut aralığındaki pürüzlülüğünden kaynaklandığı bulunmuştur [88,89]. Lotus yaprağı üzerinde 5 ile 9 µm çaplarında papillalar ve ortalama 124±3 nm çaplarında nano boyutlu çıkıntılar bulunmaktadır. Lotus yaprağındaki papillalar üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ve yüzey mumu kaplamasının bu benzersiz kombinasyonu, su damlacıklarının boncuklanmasına ve yaprak yüzeyinden yuvarlanmasına neden olan düşük bir serbest yüzey enerjisi sağlandığı belirtilmiştir. Bu etki "lotus etkisi" olarak bilinir ve hem doğal hem de sentetik yüzeylerde gözlemlenmiştir. [88,89].

Süperhidrofobik yüzeylerin laboratuvar ölçeğinde elde edilmesi 1990'lardan sonra iki ana yöntem kullanılarak başarıyla gerçekleştirilmiştir. Birincisi, düşük yüzey serbest enerjisine sahip hidrofobik maddeler üzerine mikro ve nano ölçekli pürüzlülüğün eklenmesi, ikincisi ise düşük yüzey serbest enerjisine sahip hidrofobik bir tabaka ile kaplanarak önceki mikro ya da nano yapıları pürüzlü yüzeyin modifikasyonudur [90-92].

Süperhidrofobik yüzeyler için endüstride kendi kendini temizleyen dış cephe boyaları, şeffaf pencereler, aynalar, ön cam camı; güneş enerjisi endüstrisinde paneller için şeffaf kaplamalar; tekstil endüstrisinde leke ve suya dayanıklı giysiler; optik endüstrisinde gözetleme kameraları, lensler ve teleskoplar; havacılık ve rüzgar türbini endüstrisinde buz tutmayan kaplamalar; metal ve boru hattı endüstrisinde korozyon koruma kaplaması ve denizcilik endüstrisinde biyolojik kirlenme önleyici boyalar gibi çeşitli potansiyel uygulamalar geliştirilmiştir [87].

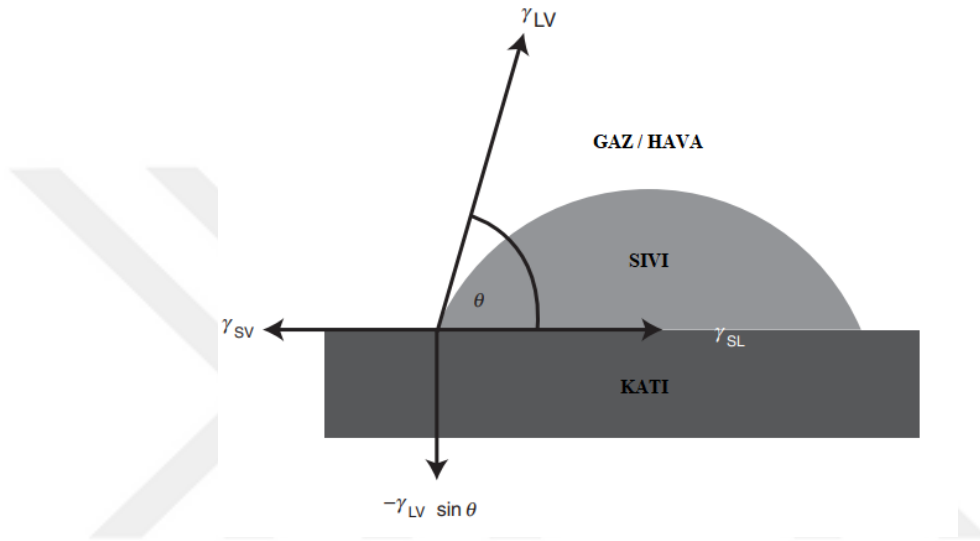
2.3.1 Hidrofobi Teorileri

1. Young Teorisi: Thomas Young, 1805 yılında temas açısı dengesini tanımlayan ilk kişidir. Literatürde bazen Young açısı teması olarak da adlandırılan dengedeki temas açısı (θ), yüzey ve arayüzey enerjileri ile ilişkili bir denklem olan Young denklemi (2.17) ile ifade edilir Su damlası ile katı yüzeyin temas bölgesinde, katı-sıvı, sıvı-gaz ve gaz-katı ara yüzeyleri oluşturur. Bu üç fazlı kesişme noktasındaki kuvvetlerin vektörel toplamı olarak ifade edilir [93].

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2.17)$$

Burada γ yüzey gerilimi (veya yüzey serbest enerjisi) terimidir. θ , sıvı damlası ile katı yüzey arasında ölçülen Young temas açısını gösterir.

Şekil 2.6'da katı bir yüzey üzerinde durağan bir sıvı damlası görülmektedir. Damlaya etki eden üç ana kuvvet söz konusudur: Katı ve sıvı arasındaki, SL olarak adlandırdığımız arayüzey gerilimi, katı ve gaz arasındaki SV olarak adlandırdığımız arayüzey gerilimi ve sıvı ve gaz arasındaki LV olarak adlandırdığımız arayüzey gerilimidir [93].



Şekil 2.6: Katı bir yüzey üzerinde durağan bir sıvı damlası [93]

Young denklemindeki (2.17) formüle bakıldığında, sıvı ve gaz arasındaki arayüzey geriliminin sabit olduğu varsayımı altında, temas açısının değişmesi, katı malzemenin serbest yüzey enerjisinin değişmesine bağlı olacaktır. Yüksek yüzey enerjili bir katının varlığını gösteren [$\gamma_{SV} > (\gamma_{SL} + \gamma_{LV})$] ise, Young denklemi ($\cos \theta = 1$)'i gösterir, bu da ($\theta = 0$)'a karşılık gelir, bu da sıvının bu katı üzerinde tamamen yayılması anlamına gelir.

2. Wenzel Teorisi: Wenzel'in 1930'lu yıllarda yaptığı çalışmalar sonucunda sunduğu modelde, yüzey pürüzlülük faktörünün (r) etkisini hesaba katacak şekilde Young denklemini modifiye etmiştir. Pürüzlü bir yüzeyin ıslanabilirliği kavramı ilk olarak Wenzel tarafından tanımlanmıştır [94].

Termodinamik argümanları kullanarak, bir sıvı katı bir yüzeyi düzgün bir şekilde ıslatırsa, pürüzlü yüzeyde ıslanabilirliğinin daha da artacağı belirtilmiştir.

Benzer şekilde, yüzey ıslanmaya direnç gösteriyorsa, yüzey pürüzlü hale geldiğinde ıslanmaya karşı direnci artacaktır. İlkinde ıslanabilirlikteki veya ikincisinde ıslanmaya karşı dirençteki artış, yüzey pürüzlendirildikçe yüzey alanındaki artışa bağlanır. Tamamen ıslatılmış pürüzlü bir yüzey üzerindeki görünür temas açısı Wenzel denklemi Denklem (2.18) ile verilir.

$$\cos \theta_w = r \cdot \cos \theta \quad (2.18)$$

Burada; θ_w , Wenzel açısıdır; θ , aynı malzemenin pürüzsüz yüzeyinin temas açısıdır ve r , pürüzlülük faktörüdür. Pürüzlülük faktörü denklem (2.19)'da şu şekilde verilmiştir:

$$r = \text{gerçek yüzey alanı} / \text{izdüşüm yüzey alanı} \quad (2.19)$$

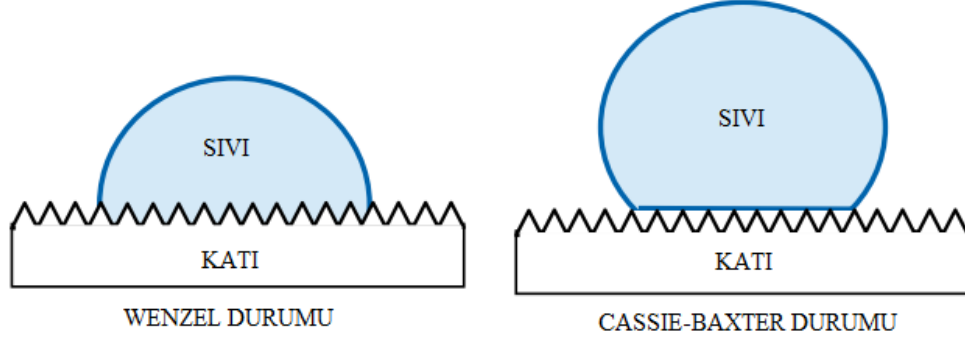
3. Cassie-Baxter Teorisi: 1944 yılında Cassie ve Baxter [95], giysilerdeki tekstil ürünlerinde ve kuşlardaki tüylerde karşılaşılanlara benzer gözenekli yüzeylerin ıslanması için görünür temas açılarının analizini genişletmiştir. Bir sıvı gözenekli bir yüzeyi ıslattığında, hava boşlukları oluşur ve sıvı-yüzey arayüzü karma bir arayüz haline gelir. Yine basit bir termodinamik argümana dayanarak, görünür temas açısı, iki bileşeni olan sıvı damlacığının altındaki temas alanının enerjisiyle belirlenir: bunlardan biri katının alan kesri, diğeri ise havanın alan kesridir. Cassie-Baxter temas açısı (θ_{CB}) için genel ifade denklem (2.20) de verilmiştir:

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cdot \cos \theta_1 + f_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (2.20)$$

Burada f_1 ve f_2 alan kesirleri ve θ_1 ve θ_2 sırasıyla sıvı-katı-hava bileşik arayüzündeki iki bileşen için temas açılarıdır. Bileşenlerden biri (f_2) hava olduğundan, $\cos 180^\circ = -1$ olur. Eşitlik (2.21) ünlü Cassie-Baxter denklemi haline gelir:

$$\cos \theta_{CB} = f \cdot \cos \theta + (f - 1) \quad (2.21)$$

Burada θ_{CB} , Cassie-Baxter açısı; f ise katı alan kesridir ve θ aynı malzemenin pürüzsüz yüzeyinin temas açısıdır [96].



Şekil 2.7: Wenzel ve Cassie-Baxter durumları [99]

Bir sıvı pürüzlü bir yüzeyi ıslattığında, iki olası ıslatma durumu vardır: biri sıvının pürüzlü yüzeyin her alanını tamamen ıslattığı durum, diğeri ise sıvının kısmen ıslattığı ve pürüzlü yüzeyin pürüzleri üzerinde sabitlendiği, sıvı-katı-hava bileşik arayüzü olduğu durumdur. Eğer yüzey pürüzlülüğünün büyüklüğü artarak kılcal yarı çapından daha büyük pürüzler olursa, su pürüzlerin arasına nüfuz eder ve model Wenzel teorisine dönüşür. Bu durumda, yüzeyin ıslanma özelliği artar ve sıvı yüzeye daha fazla yapışır. Cassie-Baxter modelinde ise sıvı sadece pürüzlülüğün tepe noktalarında asılı kalır. Bu iki durum sırasıyla Wenzel ve Cassie-Baxter durumları Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

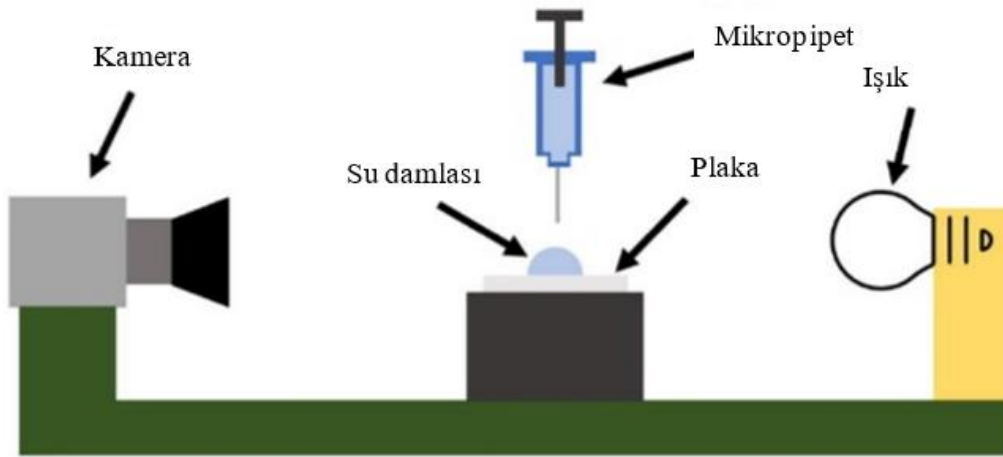
2.3.2 Temas Açısı ve Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri

Temas açılarının ölçümü ilk başta kolay görünebilir, ancak termodinamik olarak anlamlı olan temas açılarını doğru bir şekilde ölçmek aslında oldukça zor olabilir. Bunun nedeni, yüzeyin hazırlanması, kullanılan sıvıların saflığı ve damlanın buharlaşması ve iğnenin damladaki konumu gibi pratik konular da dahil olmak üzere birçok faktörün ölçümü etkileyebilmesidir. Temas açılarını doğru bir şekilde ölçmek için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir, ancak günümüzde yalnızca birkaçı yaygın olarak kullanılmaktadır. İki popüler yaklaşım, bir video kamera veya gonyometre kullanılarak statik temas açılarının ölçülmesi ve tansiyometri kullanılarak dinamik temas açısı ölçüm yöntemidir. Statik temas açısı ölçüm yöntemi, gözeneksiz düz bir katı üzerinde hareketsiz bir damla tarafından oluşturulan açının ölçülmesini içerirken,

dinamik temas açısı yöntemi, hareketli düz bir katı plaka ile bir test sıvısı arasındaki etkileşim kuvvetlerinin ölçülmesini içerir [93].

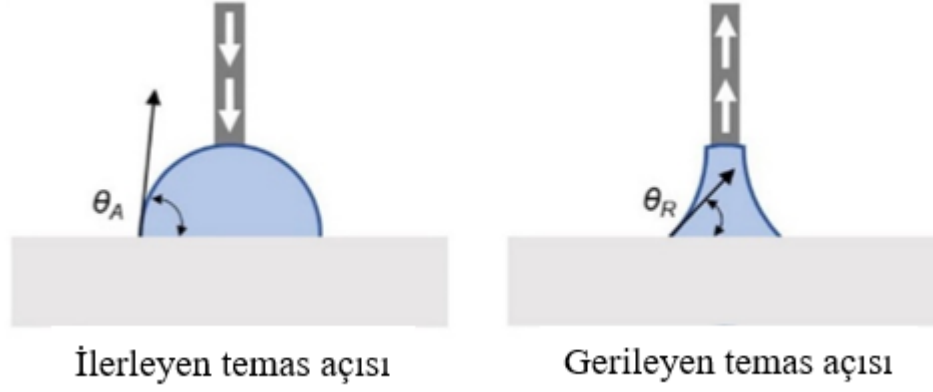
2.3.2.1 Kamera Kullanarak Statik Temas Açısı Ölçümü

Düz bir yüzey üzerindeki bir damlanın temas açısını ölçmek için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında gonyometre-mikroskop veya bir kamera kullanma bulunmaktadır. Bir gonyometre-mikroskop kullanarak, damlanın açısını belirlemek için açı ölçen bir mercekle kullanılır ve bu sayede damlanın açısının tanjant değeri hesaplanabilir. Alternatif olarak, bir kamera kullanarak damlanın görüntüsü yakalanabilir ve daha sonra görüntü analiz yazılımı kullanılarak bu görüntü analiz edilerek teğet değeri belirlenebilir ve temas açısı ölçülebilir. Bu yöntem, damlanın açısını hassas ve doğru bir şekilde ölçmeyi mümkün kılar. Kamera ile temas açısı ölçümü sırasında kurulan sistem Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Kamera kullanarak statik temas açısı ölçümü yönteminin şematik gösterimi [97]

Kamera ile alınan görüntüden teğet değeri belirlenebilir ve temas açısı ölçülebilir, ancak tek bir statik temas açısının ölçülmesi yeterli değildir çünkü yüzey kusurları ve heterojenlik nedeniyle gerçek bir katı yüzeyde tek bir denge temas açısı yoktur. Bu nedenle, damlanın konumuna ve ölçümün uygulama türüne bağlı olarak bir dizi statik temas açısı olabilir.



Şekil 2.9: İlerleyen temas açısı ve gerileyen temas açısı [97]

Temas açılarını ölçmek için iki standart teknik vardır: ilerleyen temas açısı (θ_a) ve gerileyen temas açısı (θ_r) (Şekil 2.9). İlerleyen temas açısı, sıvının bir şırıngaya bağlı bir iğneden temiz bir katı yüzeye enjekte edilmesiyle ölçülür ve ölçülen açı, uç fazlı çizgi kırılmadan önce θ_a 'nın maksimum değeridir. Gerileyen temas açısı, önceden oluşmuş bir damladan, damla sıvısının iğneden emilmesi yoluyla büzüldüğünde ölçülür, ancak θ_r 'nin hassas ölçümü damla buharlaşma etkileri nedeniyle zor olabilir.

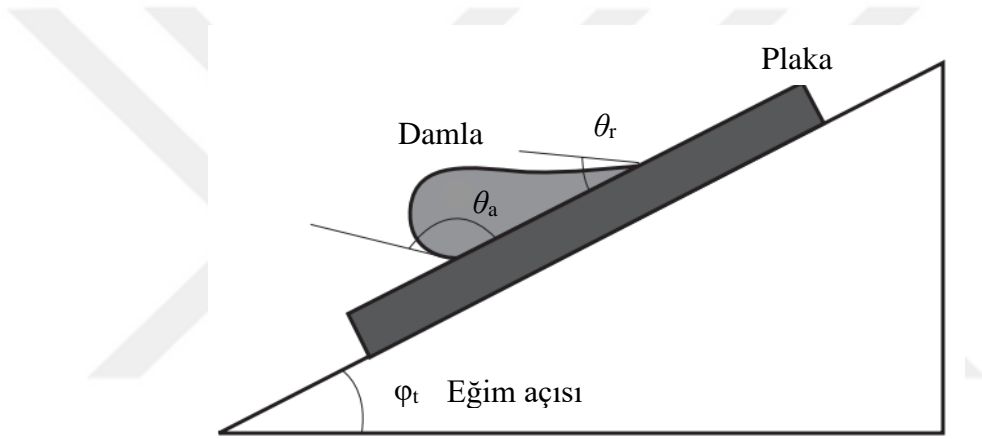
Genel olarak θ_a , θ_r 'den daha büyüktür ve bu da θ_a ile θ_r arasındaki fark ($H = \theta_a - \theta_r$) olarak tanımlanan temas açısı histerezisi (H) adı verilen bir olguya yol açar. H'nin büyüklüğü önemli olabilir, çoğu durumda 5-20 derece arasında ve bazı istisnai durumlarda 50 dereceye kadar değişebilir. θ_a ve θ_r değerleri yüzey pürüzlülüğünden ve katı yüzeyin kimyasal heterojenliğinden etkilenir [93].

2.3.2.2 Diğer Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri

Diğer temas açısı ölçüm yöntemlerinden bazıları sabit kabarcık yöntemi, eğimli plaka üzerinde kayan damla yöntemi, damla boyutundan temas açısı ölçüm yöntemi ve Wilhelmy plaka yöntemidir.

Maksimum kabarcık yönteminde, plakanın altında ters çevrilmiş katı bir yüzeyle temas halindeki sıvının içinde mikrometrik şırınga kullanılarak küçük bir hava veya gaz kabarcığı oluşturulur. Katı yüzey ile sıvı arasındaki temas açısı daha sonra bir gonyometre mikroskobu veya video kamera kullanılarak ölçülür [93].

Eğimli plaka üzerinde kayan damla yönteminde bir ucundan tutulan katı bir alt plaka üzerinde, damlanın başlangıç hareket noktasına kadar eğilebilen motorlu bir yatay tabla üzerinde hareketsiz bir damla konumlandırılır. Katı yüzeyin düzlemi kritik bir eğime ulaştığında, damla kaymaya başlar. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, damlanın aşağı kenarındaki ölçülen açı θ_a 'ya ve yukarısındaki açı θ_r 'ye yaklaşmaktadır. Açılar, damla kaymaya başlamadan hemen önce ölçülmelidir. Eğim açısı, φ_t , termodinamik sonuçlar elde etmek için de kullanılabilir; ancak bu yöntem çok güvenilir değildir, çünkü kayma anında net ve keskin bir damla görüntüsünün belirlenmesi zordur ve ayrıca sıvı damlasıyla güçlü bir sabitleme davranışı gösteren pürüzlü alt tabakalarda tutarsız sonuçlar verir, böylece $\varphi_t=90^\circ$ 'lik bir eğim açısında bile damla kayması meydana gelmez [93].

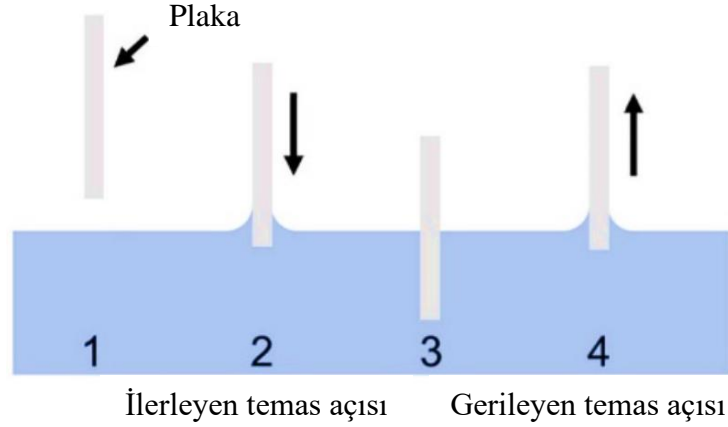


Şekil 2.10: Eğimli plaka üzerinde kayan damla yöntemi ile temas açısı ölçme [93]

Şekil 2.11'de gösterilen Wilhemy plakası kullanarak temas açılarını ölçme yönteminde, Guastalla ve Neumann farklı yöntemler kullanarak teknikler geliştirmiştir. Guastalla temas açılarını ölçmek için bir terazi ve iki asılı Wilhemy plakası kullanan bir yöntem geliştirmiştir. Plakalar, aynı sıvıya daldırılmış ve biri incelenen yüzeyi, diğeri ise sıvı tarafından tamamen ıslatılmış referans bir katıyı temsil eder. Plakalar terazilere asılır ve test numunesi üzerindeki aşağı doğru çekmenin tamamen ıslak plaka üzerindeki aşağı doğru çekmeye oranı sadece $(\gamma_{LV} \cos \theta / \gamma_{LV})$ veya $(\cos \theta)$ şeklinde ifade edilir. Böylece temas açısı, numunenin ve referans katının aynı sıvı içindeki yapışma farklılıklarından bulunabilir.

Neumann, θ değerini ölçmek için kılcal yükselmeye dayanan statik Wilhemy plakası yöntemini geliştirdi. Yüzeyi sert bir madde ile kaplanmış bir Wilhemy plakası

kısmen test sıvısına daldırılır ve dikey plakanın duvarındaki kılcal yükselmeye bağlı olarak oluşan menisküsün yüksekliği, hareketli bir mikroskop veya katetometre aracılığıyla hassas bir şekilde ölçülür [93].



Şekil 2.11: Wilhemy plakası kullanarak temas açısı ölçme yöntemi [97]

Temas açısı, bir damlanın boyutlarının ölçümünden dolayı olarak hesaplanabilir. Böyle bir hesaplamanın yapılabilmesi için, damlanın küresel şekilden sapmamış olması gerekir. Damlanın yüksekliği $h=R(1-\cos\theta)$, düzlem trigonometriden, R küresel kesitin yarıçapı olmak üzere Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Sıvı damlasının temas yarıçapı, r_b , ($r_b = R\sin\theta$) olarak verilir. O zaman şöyle yazabiliriz:

$$\frac{h}{r_b} = \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.22)$$

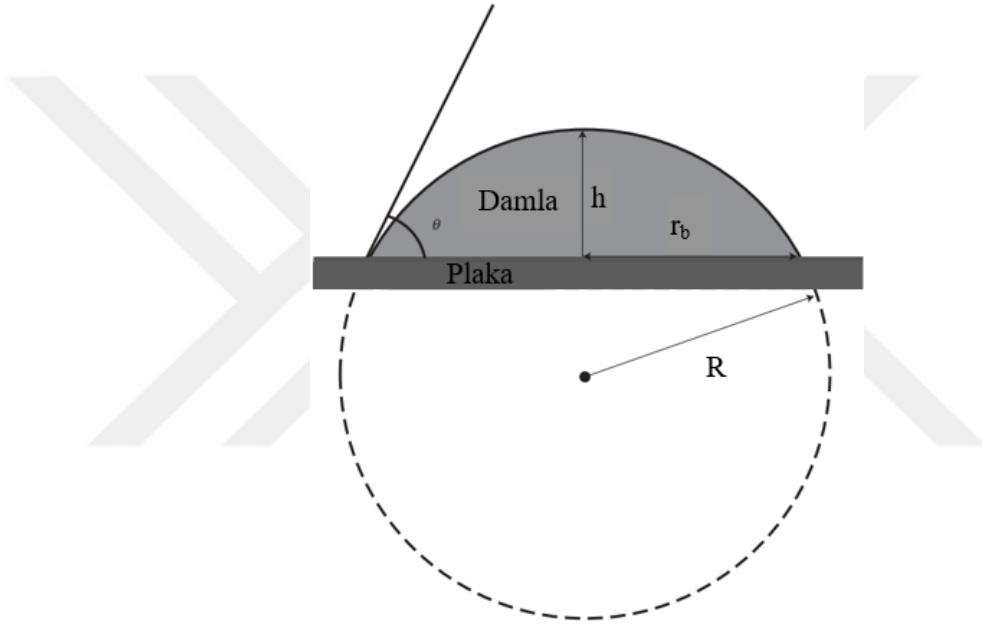
Eğer h ve r_b ölçülürse, θ , denklem (2.22)'den hesaplanabilir. Büyük damlalar için h ve r_b yerçekimi nedeniyle bozulabilir bu yüzden denklem (2.22) kullanılamayabilir ve çok daha ayrıntılı hesaplamalar gerekebilir. Öte yandan, damla hacmi gelişmiş enjektörler kullanılarak deneysel olarak ölçülebiliyorsa temas açısı hesaplanabilir. Hacmi bilinen sıvı damlasının temas yarıçapı r_b ölçülürse, θ üç boyutlu küresel trigonometriden elde edilen boyutsuz orandan hesaplanabilir. V_s , sıvı damlasının hacmidir.

$$\frac{r_b^3}{V_s} = \frac{3 \sin^3 \theta}{\pi(2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)} \quad (2.23)$$

Alternatif olarak hem r_b hem de h ölçülebiliyorsa, tercihen şunları kullanabiliriz:

$$\frac{r_b^2 h}{V_s} = \frac{3(1 + \cos \theta)}{\pi(2 + \cos \theta)} \quad (2.24)$$

Denklem (2.22)-(2.24) damlanın tabanının tam bir daire olduğunu kabul eder, ancak katı yüzeylerin çoğunun tekdüze olmaması nedeniyle nadiren daireseldir. Bu, bu yöntemdeki ana hata kaynağıdır [93].



Şekil 2.12: Damla boyutundan temas açısı ölçümü [93]

2.3.3 Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi

Bir yüzeyin pürüzlü olması halinde, gerçek yüzey alanı düz yüzey alanından daha büyüktür ve dolayısıyla belirli bir damla hacmi için toplam sıvı-katı etkileşimi pürüzlü yüzeyde düz yüzeye kıyasla daha fazladır. Pürüzsüz malzeme 90° 'den daha büyük bir temas açısı veriyorsa, yüzey pürüzlülüğünün varlığı bu açığı daha da artırır, ancak θ , 90° 'den küçükse, yüzey pürüzlülüğü açığı azaltır. Wenzel, 1936 yılında, sıvı damlanın pürüzlü bir yüzeydeki çukurları doldurduğunu varsaymış ve yüzey pürüzlülüğünü temas açısı ile basit bir ifade ile ilişkilendirmiştir [93].

$$r_w = \frac{\cos \theta_e^r}{\cos \theta_e^s} = \frac{A^r}{A^s} \quad (2.25)$$

Burada r_w ; A^r , gerçek yüzey alanının, görülen makroskopik düz alana (A^s) oranıdır, $\cos \theta_e^r$, gerçek katının denge temas açısıdır ve $\cos \theta_e^s$, düz, pürüzsüz bir yüzeydeki denge temas açısıdır. Bu bağıntı sadece submikroskopik pürüzlendirme için geçerlidir ve kaba pürüzlendirmeye uygulanamaz. Young denklemi (Denklem 2.17) ile birleştirildiğinde, pürüzlü bir yüzey üzerindeki temas açısı için şunları yazabiliriz.

$$\cos \theta_e^r = r_w \cos \theta_e^s = r_w \left(\frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \right) \quad (2.26)$$

Wenzel'in denklemi termodinamiğin ilk iki yasası açısından doğrulanmıştır. Huh ve Mason [98], Wenzel denklemini yüzey dokusuna uygularken Young-Laplace denklemini çözmek için bir pertürbasyon yöntemi kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, küçük genlikli rastgele pürüzlülük için Wenzel denklemine indirgenebilir. Histerezisin üç fazlı temas hattının izotropik olmayan denge konumlarından kaynaklandığını varsaymışlar ve bu hareketin sıçramalar halinde gerçekleşeceğini öngörmüşlerdir. Öte yandan, 1966'da Timmons ve Zisman [99] histerezisi katıların mikro gözenekli olmasına bağladılar, çünkü histerezisin sıvı moleküllerinin veya ilişkili molekül kümesinin boyutuna bağlı olduğunu buldular (suyun altı molekülden oluşan ilişkili bir küme gibi davranması gibi).

Yüzey pürüzlülüğü etkilerinin ölçülmesi zor ve biraz da tartışmalıdır. Denge temas açısı, yarı kararlı durumların varlığı nedeniyle doğrudan ölçülemez. Bu nedenle, temel parametre setindeki belirsizlikler nedeniyle ıslanma olaylarını tanımlamak için titiz bir termodinamik ilişkinin uygulanması zordur. Son zamanlarda, elektron ışınıyla aşındırma, mikro temaslı baskı ve fotorezist yapılandırma gibi çeşitli modern teknikler kullanılarak mikro veya nano desenli model yüzeyler hazırlanmış ve Wenzel denkleminin geçerliliği test edilmiştir. Katı yüzeyi iyi ıslatan sıvılar ile mikro pürüzlülüğe sahip yüzeyler için iyi uyumlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, ıslatmayan sıvılar için, bunlar bir yüzeyin gözeneklerine nüfuz edemediğinden, bu yüzey gözeneklerinde hava cepleri kalır ve katı-sıvı etkileşiminin olmaması nedeniyle Wenzel denklemi uygulanamaz.

2.3.3.1. *Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Yöntemleri*

Yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmede birçok yöntem vardır. Yüzey profil analizi, atomik kuvvet mikroskobu, tarayıcı optik elektron mikroskobu ve enerji dağılım spektrometresi analizi (EDS) bu amaçla kullanılacak analizlerdir.

Fizikçiler ve fizikokimyacılar genellikle sadece hassas ölçeklerde görülebilen moleküler pürüzlülük de dahil olmak üzere yüzeyler hakkında detaylı bilgiye ihtiyaç duyarlar. Bu ayrıntı düzeyini elde etmek için düşük enerjili elektron kırınımı, moleküler ışın yöntemleri, tarayıcı optik elektron mikroskobu ve atomik kuvvet mikroskobu gibi çeşitli yöntemler kullanılır. Bu teknikler, yüzey özelliklerinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini ve ölçümlerini sağlayarak bilim insanlarının yüzey özelliklerini ve davranışlarını moleküler düzeyde incelemelerine olanak tanır. Öte yandan, çoğu mühendislik ve endüstriyel yüzey için mikroskobik yöntemler yeterlidir ve bunlar genellikle mekanik veya optik yöntemlerdir.

Ölçüm tekniği iki geniş kategoriye ayrılabilir; ilki ölçüm sırasında ölçüm aletinin bir bileşeninin ölçülecek yüzeye gerçekten temas ettiği temaslı tip ve ikincisi temassız tip [100]. İlk kullanışlı iğneli aletler 1933 yılında Abbott ve Firestone tarafından geliştirilmiştir. 1939 yılında İngiltere'nin Leicester kentinde Rank Taylor Hobson, Talysurf adlı ilk ticari aleti tanıtmıştır. Günümüzde yüzey pürüzlülüğünün ölçümü için çeşitli cihazlar ve yöntemler mevcuttur.

Yüzey profil analizi, profilometre adı verilen cihazlarla gerçekleştirilir. Yüzey pürüzlülüğünün tespitinde en çok kullanılan yöntemdir. Profilometreler, mekanik ve optik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Profilometre analizi, bir malzemenin yüzey özelliklerini inceleme yöntemi olarak malzeme biliminde yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, yüzeyin pürüzlülüğünü belirlemek için yüzeydeki düzensizliklerin ölçülmesini içerir.

Mekanik profilometre, yüzey üzerinde hareket eden bir test aparatının elmas ucu aracılığıyla yüzey düzensizliklerinin neden olduğu yer değiştirme hareketleri kaydedilir. Uç x-y eksenini boyunca hareket ederken z boyutu veya dikey yer değiştirme ölçülür [101]. Bu yöntem standartlaştırılmıştır ve metalürji ve endüstriyel laboratuvarlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Mekanik profilometre aletleri, yüzey ölçümlerinde genellikle 2 boyutlu ölçümler yapmak için kullanılır. Ancak, optik profilometre cihazları optik prensipler kullanarak temas etmeden 3 boyutlu ölçümler yapabilir. Bu sistem özellikle ışığın yüzeyden yansımısını kullanarak yüzey özelliklerini hassas ve hızlı bir şekilde analiz eder [102].

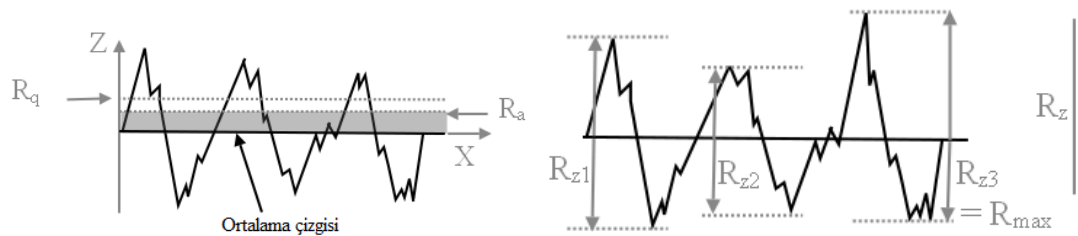
Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde R_a , R_q , R_z ve R_{max} parametreleri bulunmaktadır (Şekil 2.13).

R_a parametresi, bir yüzeyin ortalama pürüzlülüğü olarak tanımlanır ve profilde tüm pürüzlülük mesafesinin merkez çizgiye göre uzaklığı ölçülerek aritmetik ortalamasının alınmasıyla saptanır. R_a , genel mühendislik uygulamalarında yaygın olarak benimsenen en etkili yüzey pürüzlülüğü ölçütlerinden biridir. Yüzeydeki yükseklik değişimlerinin iyi bir genel tanımını verir. R_a birimleri mikrometre veya mikro inçtir.

R_q , bir yüzeyin pürüzlülük profiline karşılık gelen y-koordinatlarının kuadratik ortalamasını ifade eder. R_q verilen alana dağıtılmış profil çıkıntılarındaki ve boşluklardaki standart sapmayı ifade ettiği için, yüzeyin istatistiksel olarak nasıl bir profil sergilediği hakkında bilgi verir.

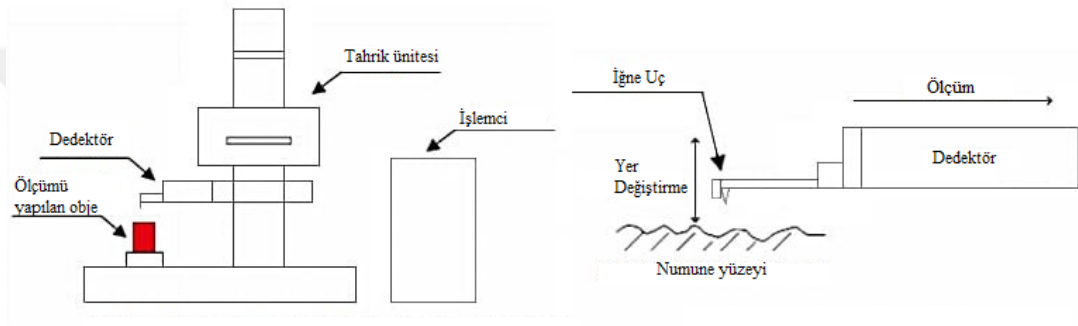
R_z , örnekleme uzunluğundaki birbirini takip eden belirli bir sayıdaki en yüksek tepe nokta ile en derin çukur arasındaki yükseklik farkının ortalamasıdır.

R_{max} , profilin en yüksek ve en alçak noktasıyla temas eden çizgiler arasındaki dikey mesafeyi ifade etmektedir.



Şekil 2.13: Yüzey pürüzlülüğü parametreleri (R_a , R_q , R_z , R_{max}) [103]

Temas yöntemi ile pürüzlülük ölçümünde, uç boyutu yüzeyin ayrıntılı geometrisine nüfuz edebilecek şekilde olan bir elmas kalem yüzey üzerinde sürüklenir. Şekil 2.14'te gösterildiği gibi iğne uç, diğer ucunda bir dönüştürücü bulunan bir kola monte edilir. Yüzey özelliklerine bağlı olarak iğne ucunun yüksekliğindeki herhangi bir değişiklik, dönüştürücü ve sonraki elektronikler tarafından algılanan ve güçlendirilen bir sinyal değişimine karşılık gelir. En yaygın transdüser türü indüktans prensibine dayanır ve sağlam bir yapıya sahip olmasının yanı sıra geniş bir aralık-çözünürlük sunar.



Şekil 2.14: Temas yöntemiyle pürüzlülük ölçümü [104]

2.4 Plakaların Genel Özellikleri

Plakalar öncelikle düz yapı elemanları olup, kalınlıkları diğer boyutlarından çok daha küçüktür. Plakaların en bilinen örnekleri arasında masa tablaları, sokak rögar kapakları, binaların yan panelleri ve çatıları, türbin diskleri ve tank tabanları yer alır. Plakalar mimari yapılarda, uçaklarda, köprülerde, füzelerde, denizaltılarda, gemilerde ve makine bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Plakalar üç grupta sınıflandırılabilir: küçük sehimli ince levhalar, büyük sehimli ince levhalar ve kalın levhalar. Teknik hesaplamalar için ince bir plakayı tanımlamak için yaygın olarak kullanılan kriter gere kalınlığın daha küçük kenar uzunluğuna oranı 1/20'den az olmalıdır [105].

Plakaların farklılık göstermesine sebep olan faktörler, plakaların kalınlıkları ve mesnetlenme şekilleridir. Dolayısıyla, plakaların analiz sürecinde plakaların geometrisi ve mesnetlenme şekilleri, kullanılan malzemenin özellikleri, uygulanan

yükler ve uygulama şekilleri gibi unsurlar dikkate alınmalıdır. Bu faktörler birlikte ele alındığında, plakaların dayanıklılığı ve performansı hakkında önemli bilgiler elde edilebilir. Ancak, analiz süreci, plakaların kullanım alanına göre değişebilir ve etkileyen faktörler de farklılık gösterebilir. Sonuç olarak, plakaların analizi, tüm bu unsurların doğru bir şekilde ele alınmasıyla gerçekleştirilerek, plakaların sağlamlığı ve işlevselliği hakkında kapsamlı bir bilgi sağlanabilir.

Plaka ve kabuk teorisinin gelişimi deney ve teorisinin bir karışımıdır. Birçok ünlü matematikçi, bilim insanı ve mühendis tarafından yapılan katkılarla zengin bir geçmişe sahiptir. Plaka davranışının araştırılması serbest titreşimlerin incelenmesiyle başlamıştır.

Leonard Euler 1776'da bu tür araştırmaları başlatan ilk kişiydi; bu araştırmalar öğrencisi ve torunu Jacob (II) Bernoulli tarafından daha da genişletildi. Euler, çok ince plaklar için membran teorisini geliştirmiştir. Ayrıca dairesel, üçgen ve dikdörtgen şekilli çok ince plaklar için serbest titreşim analiz problemlerini çözmüştür. 1811 yılında ünlü matematikçi Joseph-Louis Lagrange, levha titreşimlerini tanımlamak için dördüncü dereceden bir kısmi diferansiyel denklem geliştirerek takdir toplamıştır.

Simeon Denis Poisson (1781-1840) ve Claude-Louis Navier (1785-1836) gibi diğer birçok önde gelen bilim insanı da levha teorisinin geliştirilmesinde yer almıştır. İlki matematik alanında kısmi diferansiyel denklemler konusundaki çalışmalarıyla, fizik ve mühendislik alanlarında ise Poisson oranı ile tanınır; ikinci mühendis ve fizikçi ise Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılan, sıvıların ve gazların hareketini tanımlayan bağıntıları geliştirmesiyle ünlüdür [105].

Navier'in çalışmalarından sonra, elektrik devreleri üzerine yaptığı çalışmalarla tanınan Alman fizikçi Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), 1890 yılında, ince plakalar teorisi hakkında önemli bir tez yayınlamıştır. Kirchhoff, Bernoulli'nin giriş hipotezlerine dayanarak, plakaların eğilmesi için Navier'in denklemlerine benzeyen farklı bir enerji yaklaşımı kullanarak diferansiyel denklemler türetti [105].

Daha çok Sir Lord Kelvin adıyla tanınan İngiliz fizikçi William Thomas Kelvin (1824-1907), ilk olarak plakaların kenarlarına etki eden burulma momentlerinin kesme kuvvetlerine ayrıştırılabileceğini göstermiştir. Önde gelen İngiliz matematikçi Augustus Edward Hough Love (1863-1940), Love'ın yaklaşık kabuk teorisi olarak

bilinen basit kabuk analizini tanıttı. Love, Kirchhoff'un klasik büyük sehim analizini kalın plaklara uygulamıştır [106].

Plakaların ilk önemli ele alınışı 1800'lerde gerçekleşmiştir. O zamandan beri, çok sayıda plaka eğilme problemi üzerinde çalışılmıştır: temel teoriler esas olarak Navier, Kirchhoff ve Lévy tarafından ve sayısal yaklaşımlar Galerkin ve Wahl ve diğerleri tarafından çalışılmıştır. Plaka ve kabuk analizi ile ilgili literatür oldukça geniştir. Prescott, orta düzlemdeki gerilmeleri dikkate alarak plakaların eğilmesi için daha doğru bir teori başlatmıştır [107]. Enine kesme kuvvetlerinin neden olduğu deformasyonları dikkate alan detaylı bir plak teorisi Reissner tarafından tanıtılmıştır [108]. 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Topp, karmaşık plak ve kabuk problemlerinin ekonomik bir şekilde sayısal çözümüne izin veren sonlu elemanlar yöntemini tanıtmıştır [109]. Plaka teorilerinin geliştirilmesindeki son eğilim, yüksek hızlı bilgisayarlara büyük ölçüde güvenilmesi ve daha titiz teorilerin ortaya konması ile ortaya çıkmaktadır.

2.4.1 Pirinç Malzemesinin Genel Özellikleri

Pirinç malzemeler yüksek mukavemeti, sertlik, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, kolay şekillendirilebilmesi, korozyon dayanımı ve güzel görünüşü nedeniyle endüstride ve mühendislik uygulamasında ilk tercih edilen malzemelerdendir. Bunun yanında pirinçler maliyet açısından ucuz malzemelerdendir. Çok geniş bir alanda uygulama şansına sahiptir.

Pirinç malzemeler; metal para, madalya, mermi kovanı; süs eşyası, bilgisayar vs. soketleri, yangın söndürme aksamı, çeşitli radyatörler, eşanjör boruları, pil kapsülleri, müzik aletleri, ışıklandırma aksesuarları, dekoratif eşyalar, pimler, perçinler, pompa gövde ve kanatları, hassas cihazlar tekniği, saat aksamları, elektrik bağlantı elemanları, genel amaçlı vidalı küçük parçalar yapımında vb. kullanılır. Ayrıca alüminyum ve silisyum içerenleri yatak malzemesi olarak kullanılabilir.

Pirinç, bakır ve çinkonun karışımıyla elde edilen bir malzemedir. Bazı pirinç alaşımlarında, az miktarda kurşun, silisyum, mangan, nikel ve alüminyum gibi farklı alaşım elementleri de bulunabilir. Bu alaşım elementleri, pirincin özelliklerini değiştirir. Örneğin, sadece %1 veya %2 oranında alüminyum ilavesi bile, alaşımın

deniz suyu korozyonuna karşı direncini artırabilirken, kurşun ilavesi talaşlı işlenebilirliği artırabilir [110,111]. Uygun kimyasal bileşendeki bakır ve çinko alaşımının yani pirincin seçilmesiyle istenilen özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir.

Bu çalışmada plaka malzemesi olarak pirinç malzeme seçilmiştir. Pirinç malzeme tercih edilmesinin pek çok nedeni bulunmaktadır. Bu nedenler arasında, mükemmel işlenebilirlik özelliği, kolayca kaplanabilme özelliği, süneklik özelliği, farklı boyutlarda temin edilebilme özelliği, güçlü korozyon dayanımı, bakırdan daha yüksek mukavemete sahip olması, yüksek aşınma dayanımı, 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda birçok fiziksel özelliğini koruyabilmesi ve güneş ışığından etkilenmeme özelliği sayılabilir. Ayrıca, pirinç malzemenin bakırdan daha uygun fiyatlı olması da tercih edilme sebepleri arasındadır.

2.4.2 Delme ve Gözenek Oluşturma Yöntemleri

Malzemeler üzerinde silindirik boşluklar oluşturma işlemine delme denir. Bu işlemin amacı, bağlantı elemanlarının takılması, mil ve aks gibi makine elemanlarının yataklanması için gerekli boşlukları oluşturmaktır. Endüstride delme işlemi, üretim sürecinin her aşamasında kullanıldığından büyük önem taşımaktadır. Deney düzeneğimizdeki pirinç levhaya açılan gözenekler, lazer ile açılabilmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada lazer ile gözenek oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Lazer tekniği, saatler, türbin kanatları, devre kartları vb. gibi çeşitli bileşenlerde mikro gözenekler oluşturmak için potansiyel endüstriyel gereksinimlerin büyük çoğunluğunu karşılamak için tercih edilen yöntem haline gelmektedir [112].

Lazer ışığı sıradan ışıktan farklıdır çünkü aynı frekans, dalga boyu ve fazda fotonlara sahiptir. Bu nedenle, sıradan ışığın aksine lazer ışınları oldukça yönlüdür, yüksek güç yoğunluğuna ve daha iyi odaklanma özelliklerine sahiptir. Lazer ışınının bu benzersiz özellikleri malzemelerin işlenmesinde faydalıdır. Farklı lazer türleri arasında neodimyum katkılı itriyum alüminyum garnet (Nd:YAG) ve karbondioksit (CO₂), lazer ışını işleme uygulaması için en yaygın kullanılanlardır. CO₂ lazerler kızılötesi bölgede 10 mm dalga boyuna sahiptir. Yüksek ortalama ışın gücüne, daha

iyi verimliliğe ve iyi ışın kalitesine sahiptir. Sac metalin yüksek hızda ince kesimi için uygundur [113].

Nd:YAG lazerler düşük ışın gücüne sahiptir, ancak darbeli modda çalışırken yüksek tepe güçleri daha kalın malzemeleri bile işlemesini sağlar. Ayrıca, daha kısa darbe süresi daha ince malzemelerin işlenmesi için uygundur. Daha kısa dalga boyu (1 mm) nedeniyle CO₂ lazerler tarafından işlenmesi zor olan yüksek yansıtıcı malzemeler tarafından absorbe edilebilir [114].

Lazer ışını ile işleme sırasında malzeme kaldırma mekanizması; eritme, buharlaştırma ve kimyasal bozunma (malzemelerin bozulmasına neden olan kimyasal bağlar kırılır) gibi farklı aşamaları içerir. Yüksek enerji yoğunluklu bir lazer ışını çalışma yüzeyine odaklandığında, termal enerji emilir ve bu da çalışma hacmini ısıtır ve yüksek basınçlı yardımcı gaz jeti akışı ile kolayca çıkarılabilen erimiş, buharlaşmış veya kimyasal olarak değiştirilmiş bir duruma dönüştürür [115].

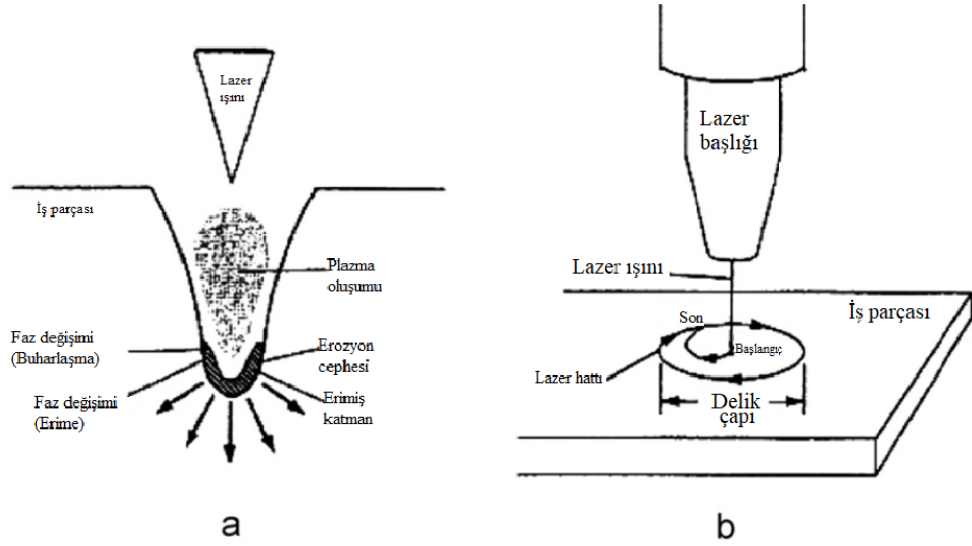
Lazer ışını ile işleme termal bir süreçtir. Bu işlemin etkinliği, işlenecek malzemenin mekanik özelliklerinden ziyade termal özelliklerine ve bir dereceye kadar optik özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, yüksek derecede kırılma veya sertlik sergileyen ve düşük termal yayılım ve iletkenlik gibi uygun termal özelliklere sahip malzemeler lazer işleme için özellikle uygundur. Lazer ve malzeme arasındaki enerji transferi ışınlama yoluyla gerçekleştiğinden, lazer tarafından hiçbir kesme kuvveti oluşturulmaz ve bu da mekanik olarak indüklenen malzeme hasarı, takım aşınması ve makine titreşiminin olmamasına yol açar.

Lazer ışınıyla işleme esnek bir süreçtir. Çok eksenli bir iş parçası konumlandırma sistemi veya robot ile birleştirildiğinde, lazer ışını tek bir makinede delme, kesme, kanal açma, kaynak ve ısı işleme süreçleri için kullanılabilir [116].

Başlıca lazer ışını işleme sınıflandırmaları şunlardır: delme, kesme ve kanal açma, tornalama, frezeleme ve farklı iş parçası malzemelerinin mikro işleme, lazer ışını işleme sınıflandırmalarıdır.

Lazer ışını ile delme, yapılarda binlerce sık aralıklı gözeneklerin oluşturulması için kabul gören ekonomik bir süreç haline gelmiştir. Trepan ve darbeli (percussion) lazer ışınlı delme olmak üzere iki tür lazer ışınlı delme mevcuttur [117].

Trepan delme, oluşturulacak deliğin çevresini kesmeyi içerirken (Şekil 2.15b), darbeli delme, lazer veya iş parçasının göreceli hareketi olmadan doğrudan iş parçası malzemesini 'deler' (Şekil 2.15a). Lazer darbeli delme işleminin doğal avantajı, işlem süresindeki kısalmadır [118]. Bu çalışmada pirinç plakalar lazer darbeli delme yöntemi kullanılarak gözeneklendirilmiştir.



Şekil 2.15: Lazer işleme şeması (a) darbeli delme, (b) trepan delme [119]

2.4.3 Yüzey Kaplama

Birçok günlük kullanım aracı ve eşya, kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Bu malzemeler arasında elektronik cihazlar, diş fırçaları, mutfak aletleri, buzdolapları, bilgisayarlar, mobilyalar ve arabalar gibi örnekler yer alır. Askeri uygulamalarda görünmez radarlar, araçlar, top ve benzeri silahlar ile hava-uzay uygulamalarında kullanılan uçaklar ve uydular gibi araçlarda yüzey kaplama teknolojileri oldukça önemlidir ve önemi giderek artmaktadır.

Kaplama işlemi genellikle bir sıvının yüzeye uygulanması ve kuruduktan sonra sürekli veya kesintili bir film tabakası oluşmasıdır. Sıvı kaplamanın kuruması genellikle evaporatif yöntemler, termal, oksidatif veya UV ışığı gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleşir [120].

Hidrofobik yüzeyler kendi kendini temizleme, buzlanma ve buğulanma önleme, korozyon ve kir oluşumunu engelleme gibi avantajlar sunarlar. Bu özellikleri

sayesinde, hidrofobik yüzeyler günlük hayatta ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Hidrofobik yüzeyler oluşturmak için araştırmacılar genellikle iki aşamalı bir süreç kullanırlar: yüzeyi pürüzlendirmek ve düşük yüzey enerjisine sahip bir malzeme ile kaplamak.

Hidrofobik yüzeylerin elde edilmesinde su bazlı kimyasal reaksiyon, elektrokimyasal çöktürme, plazma uygulamaları, kimyasal buhar çöktürme, sol-jel yöntemleri, polimerleştirme tepkimesi, şablonlama, elektro spre ve kumlama son yıllarda kullanılan en popüler yöntemler olmuştur [121].

Hidrofobik yüzey oluşturmanın temel amacı, yüzeyde mikro ve nano yapıların oluşturulması ve ardından düşük yüzey enerjili bir malzeme ile kaplanmasıdır. Yüzey pürüzlülüğünü artırmak için kullanılan prosesler genellikle hızlı, kolay ve ekonomiktir. Ancak, yüzey kaplama işleminde kullanılan malzemelerin sınırlı olması bu yöntemin dezavantajlarından biridir.

Hidrofobik yüzeyler elde etmek için yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında düşük yüzey enerjisine sahip olan florokarbonlar öne çıkmaktadır. Bu polimerler, yüzey pürüzlülüğü artırıldığında kolayca hidrofobik özellikler kazanabilirler. Ayrıca silikonlar, silika, polikarbonat ve karbon nanotüpler gibi malzemeler de yüzeylerine pürüzlülük kazandırılarak hızlı bir şekilde hidrofobik hale getirilebilirler [122].

Yüzey enerjisi az olan malzemelerin pürüzlülük kazandırma prosesi sınırlı malzeme seçeneği ile gerçekleştirildiği için, pürüzlü yüzeylerin düşük yüzey enerjili malzemelerle kaplanması yöntemleri tercih edilir. Bu yöntemlerde, yüzey enerjisi düşük malzemelerin üst yüzeyi pürüzlü hale getirilir. Yüzey pürüzlülüğü sağlamak için sol-jel, elektrokimyasal reaksiyon ve çöktürme, plazma ve lazer aşındırma, kimyasal buhar çöktürme gibi yöntemler kullanılabilir. Ayrıca, kovalent ve fiziksel bağlanma ile yüzey kaplama gibi kimyasal modifikasyon yöntemleri de yüzey enerjisini azaltmada kullanılabilir [122].

Yaygın hidrofobik yüzey hazırlama yöntemleri aşağıdaki gibidir:

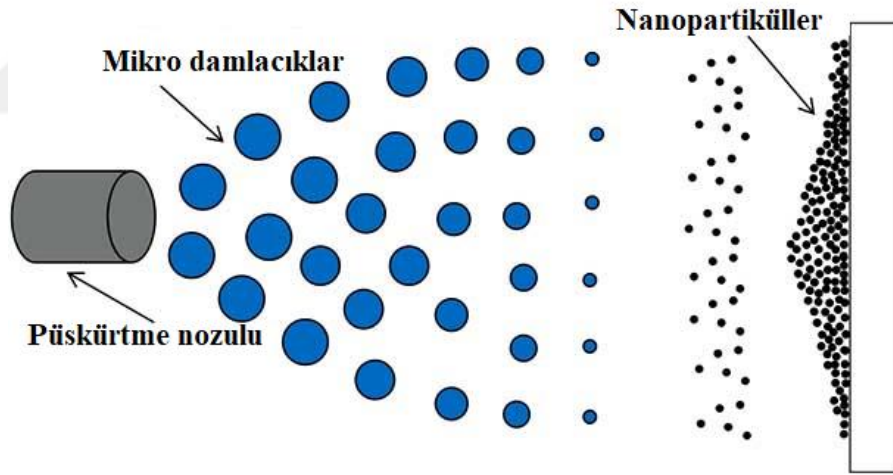
Kimyasal Aşındırma: İş parçalarının yüzeyinin güçlü bir asit veya baz ile aşındırılması, böylece yüzeyin pürüzlü mikro ve nano kompozit yapılar olarak görünmesidir.

Kimyasal Çöktürme: Bir film oluşturmak için bir veya daha fazla malzemenin yüzey üzerine biriktirilmesi. Bu proses, yüzeyin ıslanabilirliğini farklı şekillerde etkileyebilir. Düşük yüzey enerjili malzemelerin bir yüzey üzerine biriktirilmesiyle hem hidrofilik hem de hidrofobik yüzeylerin oluşturulmasında kullanılabilir.

Anodizasyon: Elektrolitik bir hücrede, iş parçasını bir güç kaynağının anoduna bağlayın ve anodizasyon ile mikro ve nano kompozit yapıların hazırlanması sağlanır [123].

Sprey Kaplama Yöntemi: Sprey kaplama yöntemi boyamada, grafik sanatlarında ve endüstriyel kaplamada kullanılan köklü bir tekniktir. Yüksek verimliliğe sahip bu basit süreç, çeşitli yüzeyler için uygulanabilir ve küçük alanlarla sınırlı değildir. Çeşitli yüzey kaplama teknikleri arasında sprey kaplama en olgun teknolojidir ve modern yüzey kaplama endüstrisinde güncel tercihtir [124].

Sprey kaplama yöntemi, her zaman homojen dağılıma sahip olamaması ve tekrarlanabilir kalınlık problemleri nedeniyle kısıtlamalara da sahiptir.



Şekil 2.16: Sprey kaplama yöntemi [125]

Sprey (püskürtme) kaplama yönteminde hidrofobik kaplama üretmek amacıyla bir solüsyon, basınçlı bir nozul yardımıyla atomize edilerek ince damlacıklara ayrılır. Bu damlacıklar, kaplanacak yüzeye püskürtülerek ince bir film tabakası oluştururlar (Şekil 2.16). Hidrofobik kaplamanın yüzey özellikleri birçok faktöre bağlıdır. Nano partikül tipi ve boyutu, nano partikül konsantrasyonu, uygulama süresi, hava tabancası nozulu ile uygulama yapılan yüzey arasındaki mesafe, hava tabancasının nozul çapı,

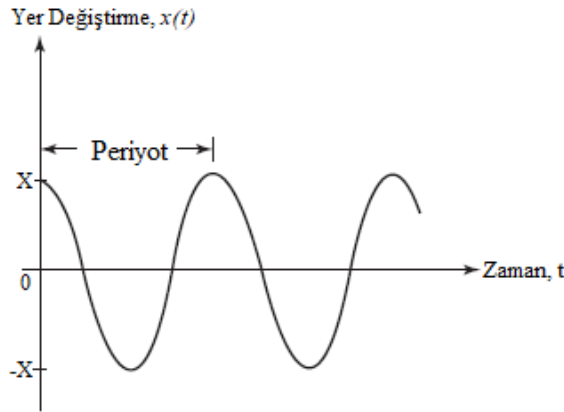
kompresör basıncı gibi parametreler kaplamanın yüzey enerjisini ve pürüzlülüğünü belirleyen önemli faktörlerdir. Ayrıca, kaplamanın hidrofobik özelliklerini artırmak için kullanılan kimyasal bileşiklerin özellikleri ve konsantrasyonu, uygulama sayısı gibi diğer faktörler de önemlidir [126].

2.5 Titreşim Analizi

Tekrarlayan her türlü harekete titreşim veya salınım denir. Bir gitar telinin hareketi, engebeli bir yolda seyahat eden bir otomobildeki yolcuların hissettiği hareket, rüzgar veya deprem nedeniyle yüksek binaların sallanması ve türbülans içindeki bir uçağın hareketi tipik titreşim örnekleridir. Titreşim teorisi, cisimlerin salınım hareketi ve ilgili kuvvetlerin incelenmesi ile ilgilidir. Şekil 2.17'de gösterilen salınım hareketi basit harmonik hareket olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklem (2.27) ile ifade edilebilmektedir.

$$x(t) = X \cos \omega t \quad (2.27)$$

Burada X hareketin genliği, ω hareketin frekansı ve t ise zamandır.

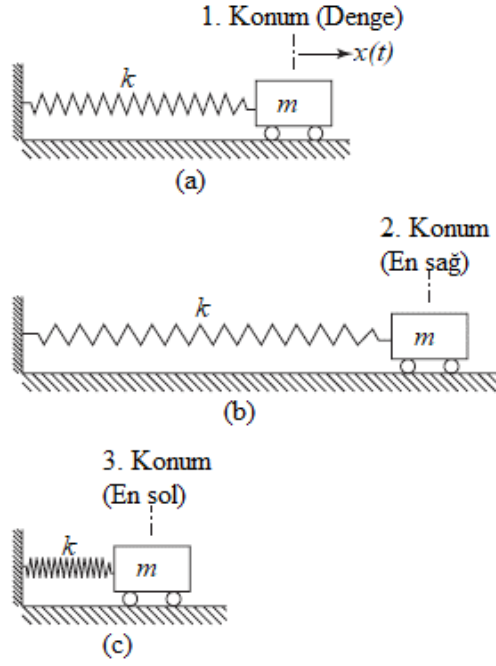


Şekil 2.17: Basit harmonik hareket

Titreşim olgusu, potansiyel enerjinin kinetik enerjiye ve kinetik enerjinin potansiyel enerjiye dönüşümlü değişimini içerir. Dolayısıyla, titreşim yapan her sistemde potansiyel enerji depolayan bir bileşen ve kinetik enerji depolayan bir bileşen bulunmalıdır. Potansiyel ve kinetik enerjileri depolayan bileşenler sırasıyla yay veya

elastik eleman ve kütle veya eylemsizlik elemanı olarak adlandırılır. Elastik eleman potansiyel enerjiyi depolar ve her hareket döngüsünde bunu kinetik enerji olarak atalet elemanına verir ve bunun tersi de geçerlidir [127].

Şekil 2.18'de bir kütle yay sisteminin denge konumu etrafındaki hareketi görülmektedir. Kütle doğrusal bir yaya bağlıdır ve 1 konumunda dengede veya hareketsiz olduğu varsayılır. Konum 2'de yay maksimum uzamış durumdadır ve dolayısıyla yayın potansiyel enerjisi maksimumdur ve ilk hızın sıfır olduğu varsayıldığından kütlekin kinetik enerjisinin sıfır olduğu bilinmektedir. Kütle 2 konumundan serbest bırakıldığında m kütlesi 1 konumuna doğru artan bir hızla hareket eder. Yayın gerilmemiş durumuna dönme eğilimi nedeniyle, m kütleinin sola doğru hareket etmesine neden olan bir kuvvet olacaktır. Kütlekin hızı, 2. konumdan 1. konuma doğru hareket ettikçe giderek artacaktır. Kütlekin 1. konuma ulaşmasıyla yay uzamamış boyuna ulaşır ve depoladığı potansiyel enerjiyi tamamen m kütleine aktarır. Ancak, kinetik enerji ve dolayısıyla kütlekin hızı, enerjinin korunumu nedeniyle 1. konumda maksimum olacaktır. Kütle 1. konumdan sola doğru hareket ettikçe, hızı 3. konumda sıfır değerine ulaşana kadar kademeli olarak azalacaktır. Ancak kütlekin hareketi, yay direncinin artmasıyla yavaşlayacak ve 3. konumda hız sıfıra ulaşacaktır. Sonunda, kütlekin sıfır hızla ikinci konuma geri dönmesiyle bir döngü tamamlanır ve bu süreç tekrarlanır ve böylece kütle salınım hareketine sahip olur [127].



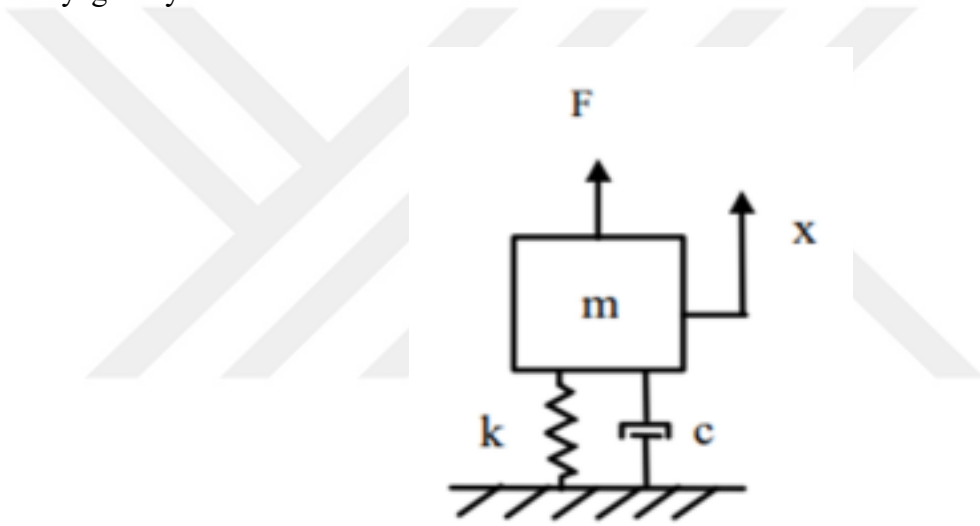
Şekil 2.18: Bir yay-kütle sisteminin titreşim hareketi: (a) sistem dengede (yay deforme olmamış); (b) sistem en sağ konumda (yay gerilmiş); (c) sistem en sol konumda (yay sıkıştırılmış). [127]

Titreşim yapan sistemlere uygulanan başlangıç zorlaması kütleye uygulanan başlangıç deplasmanı ve/veya hızı şeklinde olabilir. Bu sisteme potansiyel ve/veya kinetik enerji kazandırmak anlamına gelir. İlk uyarım sistemi serbest titreşim olarak adlandırılabilir salınım hareketine sokar. Serbest titreşim sırasında, potansiyel ve kinetik enerjiler arasında değişim olacaktır. Eğer sistem korunumlu ise sistemin potansiyel ve kinetik enerjisinin toplamı her zaman sabittir ve zamana göre değişimi sıfırdır. Bu durumda sistem teorik olarak sonsuza dek titreşim yapar. Pratikte, çevredeki ortam (örneğin hava) nedeniyle bir miktar sönümlenme veya sürtünme olacaktır, böylece hareket sırasında bir miktar enerji kaybına neden olacaktır. Bu da sistemin toplam enerjisinin sıfır değerine ulaşana kadar sürekli olarak azalmasına neden olur ve bu noktada hareket durur. Sistemin titreşiminin sabit bir durumda tutulması isteniyorsa, harici bir kaynak sönümlenme nedeniyle dağılan enerjiyi sürekli olarak yerine koymalıdır.

Titreşimler, serbest titreşimler ve zorlamalı titreşimler olarak iki kategoriye ayrılır. Serbest titreşimler, sönümlü ve sönümsüz olmak üzere kendi içinde çeşitlendirilebilirken, zorlamalı titreşimler de sönümlü ve sönümsüz olarak

sınıflandırılabilir. Rezonans durumu, bir sistemin doğal frekansının dış kuvvet frekansına eşit olduğu zamanlarda ortaya çıkan bir olgudur. Bu nedenle, zorlanmış titreşimlerin önemi bu durumda artar ve titreşim analizlerinde rezonans durumunun tespiti kritik bir öneme sahiptir.

Zorlamalı titreşimler, bir sistemde harici bir kuvvetin varlığından kaynaklanan salınımlardır. Makinelerdeki titreşimlerin büyük çoğunluğu bu şekilde oluşur. Bu titreşimler, dışarıdan gelen bir etki ya da kuvvet tarafından oluşturulur ve devam ettirilir. Zorlamalı titreşimlerde titreşim frekansı, uygulanan dış kuvvetin frekansına bağlıdır. Ancak titreşim genliği, sistemin mekanik özellikleri ile ilgilidir. Şekil 2.19'da, sönümlü zorlamalı titreşimlerin kütle-yay sistemi üzerindeki hareketini gösteren bir diyagram yer almaktadır.



Şekil 2.19: Zorlamalı ve sönümlü kütle yay sistemi

Newton'un 2. Kanunu'ndan ve kuvvet dengesi denkleminin kullanımından yararlanarak, kütle-yay sisteminin sönümlü zorlamalı titreşimi için 2. dereceden adi diferansiyel denklem şu şekilde elde edilebilir:

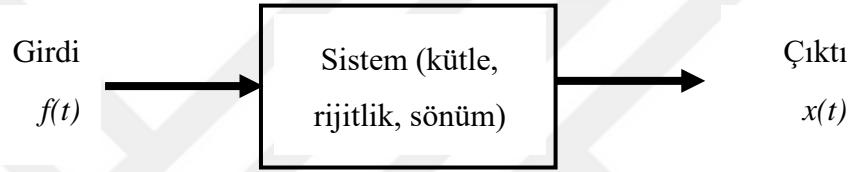
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (2.28)$$

$$\ddot{x} + \left(\frac{c}{m}\right)\dot{x} + \left(\frac{k}{m}\right)x = \frac{F}{m} \quad (2.29)$$

$$\left(\frac{c}{m}\right) = 2\xi\omega_n \quad (2.30)$$

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

Titreşimli sistemler, Şekil 2.20'de gösterildiği gibi çıktının (yanıtın) girdilere ve sistem özelliklerine (kütle, sertlik ve sönümlenme gibi) bağlı olduğu dinamik sistemlerdir. Sistemin uyarılması ve tepkisi zamana bağlıdır. Belirli bir sistemin titreşim analizi, belirli bir uyarım için yanıtın belirlenmesini içerir. Analiz genellikle matematiksel modellemeyi, hareket denklemlerinin türetilmesini, hareket denklemlerinin çözümünü ve tepki sonuçlarının yorumlanmasını içerir [127].



Şekil 2.20: Titreşimli bir sistemin girdi-çıkı ilişkisi

Matematiksel modellemenin amacı, sistemin davranışını yöneten matematiksel denklemleri türetmek amacıyla bir sistemin tüm önemli özelliklerini temsil etmektir. Matematiksel model genellikle sistemi çok karmaşık olmayan denklemlerle tanımlamaya yetecek kadar ayrıntı içerecek şekilde seçilir.

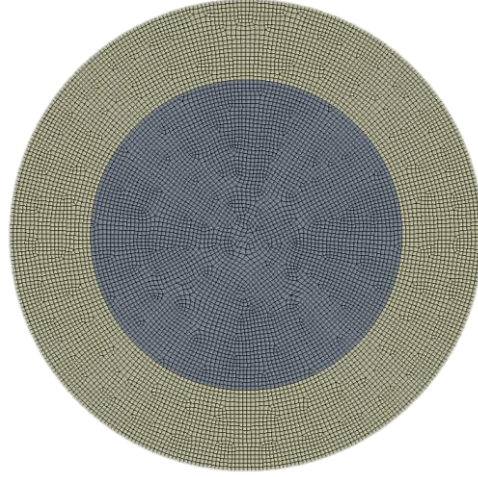
Matematiksel model, sistem özelliklerinin doğasına bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan olabilir. Doğrusal modeller hızlı çözümlere izin verse ve ele alınması kolay olsa da doğrusal olmayan modeller bazen doğrusal modeller kullanılarak tahmin edilemeyen sistemin bazı önemli davranışlarını ortaya çıkarır. Bu nedenle, titreşimli bir sistemin uygun bir matematiksel modelini geliştirmek için büyük ölçüde mühendislik bilgisi gereklidir [127].

Sistemin matematiksel modeli doğrusal ise, süperpozisyon ilkesi kullanılabilir. Bu, sistemin $f_1(t)$ ve $f_2(t)$ uyarımları altındaki tepkileri sırasıyla $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ olarak gösterilirse, $f(t) = c_1f_1(t) + c_2f_2(t)$ uyarımına maruz kaldığında sistemin tepkisinin $x(t) = c_1x_1(t) + c_2x_2(t)$ olacağı anlamına gelir; burada c_1 ve c_2 sabitlerdir. Matematiksel model seçildikten sonra, titreşim yapan sistemin hareket denklemlerini türetmek için

dinamik ilkeleri kullanılır. Bunun için, dışarıdan uygulanan tüm kuvvetleri (uyarımlar), tepki kuvvetlerini ve eylemsizlik kuvvetlerini gösteren kütlelerin serbest cisim diyagramları kullanılabilir. Sistemin hareket denklemlerini türetmek için D'Alembert ilkesi, Newton'un ikinci hareket yasası ve Hamilton ilkesi gibi çeşitli yaklaşımlar kullanılabilir. Hareket denklemleri, ilgili denklemlerin karmaşıklığına bağlı olarak analitik veya sayısal çözümler elde etmek için çeşitli teknikler kullanılarak çözülebilir. Hareket denklemlerinin çözümü, sistemin yer değiştirme, hız ve ivme tepkilerini sağlar. Yanıtların ve analiz sonuçlarının, analizin amacına ve olası tasarım çıkarımlarına ilişkin net bir görüşle yorumlanması gerekir [127].

2.6 Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Yapılan Analizler

Sonlu elemanlar analizi (FEA), bilgisayar ortamında sistemlerin modellenmesini sağlayarak, sanal ortamda simülasyonlarla sorunların tespitinde kullanılan bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi, ilk kez 1950'lerde geliştirilmiş ve o zamandan beri sürekli olarak geliştirilmeye devam edilmiştir. Hesaplama gücündeki hızlı ilerlemeler ve maliyetteki ciddi düşüş, sonlu elemanlar yöntemini ekonomik hale getirmiştir. Bu yöntem artık çeşitli problemleri çözmek için yaygın olarak kullanılmakta olup, büyük potansiyel taşımaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, havacılık, otomotiv, elektrik, hidrolik, biyomedikal, nükleer ve yapı mühendisliği alanlarındaki birçok problemin çözümünde kullanılır. Sonlu elemanlar çözüm prosedüründeki ilk adım, etki alanını sonlu boyutta çok sayıda elemanlara bölmektir. Her bir elemandaki değişken dağılımı doğrusal, ikinci dereceden veya trigonometrik fonksiyon ile tanımlanabilir. Etki alanındaki eleman dağılımına sonlu elemanlar ağı denir. Elemanlar düğüm adı verilen noktalara bağlanır. Bu düğüm dizisinin birleşimi ile oluşan yapı mesh olarak adlandırılır. Şekil 2.21'de bir mesh atılmış yapı örneği verilmiştir.



Şekil 2.21: Örnek mesh ağ yapısı gösterimi

ANSYS yazılımı, çeşitli endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılan geniş kapsamlı bir bilgisayar destekli mühendislik (CAE) programıdır. Buna ek olarak ANSYS, sınıfının en iyisi çözücü teknolojilerine, karmaşık simülasyonlar için birleştirilmiş bir fiziğe, fizik için özelleştirilebilir ağ oluşturma teknolojilerine sahiptir. Bu program, yapısal, termal, akışkan, akustik ve diğer fiziksel çözümleme fonksiyonlarını sunmakla kalmaz, aynı zamanda çoklu fiziksel analizler de gerçekleştirebilir.

Birleştirilmiş alan analizi, en az iki farklı mühendislik alanı arasındaki etkileşimi inceleyen bir tür analizdir. Piezoelektrik analizi, yapısal ve elektriksel alanlar arasındaki etkileşimleri dikkate alır ve uygulanan voltajın neden olduğu deformasyonları çözmeye çalışır. Piezoelektrik analizi, sabit modlu, önceden gerilimli modlu, harmonik, önceden gerilimli harmonik ve geçici analiz gibi çeşitli türleri içerebilir [128].

Bir yapıdaki dinamik davranışı analiz etmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Modal analiz ve harmonik analiz gibi yöntemler, bir yapının doğal frekanslarını, mod şeklini ve rezonans frekansını tespit ederek dinamik davranışı ortaya çıkarabilirler. Dış uyarımdan kaynaklanan titreşim doğal frekansla aynı ise aşırı sapmaya ve arızaya yol açabilecek rezonans adı verilen bir olguya neden olacaktır. Sistemin doğal frekansları veya rezonans, yapılarda ve makinelerde meydana gelen titreşim ve gürültü ile ilgili sorunlara katkıda bulunan faktörlerden biridir. Dinamik karakteristikler, deney ve

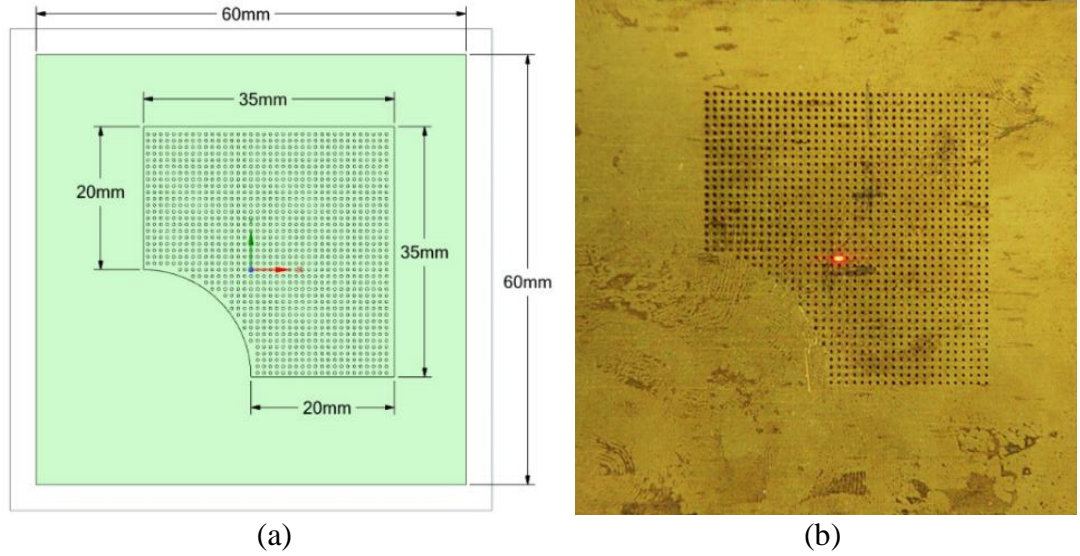
simülasyon yoluyla analiz edilebilir. Mekanik yapılar üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, giriş değeri olarak genellikle kuvvet seçilmekte olup, çıkış değişkenleri ise ivme, hız veya deplasman gibi büyüklüklerdir. Deneysel analizde giriş değeri aktüatörler ve sarsıcılar yardımıyla uygulanabilir ve cevap ise ivme ölçerler lazerler gibi yüksek hassasiyete sahip ölçüm araçları kullanılarak elde edilmektedir. Bilgisayar donanımındaki ilerlemeyle birlikte sonlu eleman analizi simülasyonları, deney tabanlı analizleri tamamlayıcı olarak kullanılabilir [129].



3. MATERYAL VE METOT

3.1 Gözenekli Pirinç Plaka Tasarımı

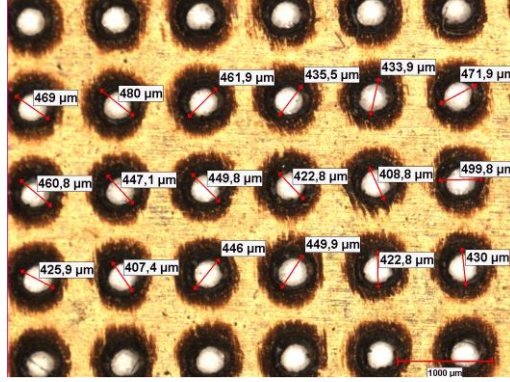
Bu çalışmada, 60 mm kenar uzunluğa ve 0.15 mm kalınlığa sahip kare pirinç plakalardan oluşan numuneler kullanılmıştır. Deney kapsamında toplamda beş numune mevcuttur. Bu numunelerin üçü gözenekli, ikisi gözeneksiz olup, gözeneksiz numunelerden bir tanesi hidrofobik yüzeye sahiptir. Gözenekli numuneler, lazer markalama yöntemiyle hazırlanmıştır ve gözenek çapları 80 μm , 160 μm , 400 μm olarak değişmektedir. Gözeneklerin plaka üzerindeki konumu özel olarak tasarlanmıştır. Gözeneklerin konumu ve plaka ölçüleri Şekil 3.1(a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Özel gözenek tasarımı sayesinde su damlası plakanın ortasında yer alan gözeneklerin üzerine yerleştirilebilmektedir. Piezoelektrik disk ile bağlantı planlanan noktada gözenek bulunmaması tercih edilmiştir. Bu sayede piezoelektrik diskin plakaya sağlam bir şekilde yapışması sağlamaktadır. Elde edilen gözenekli numune Şekil 3.1(b)'de gösterilmiştir.



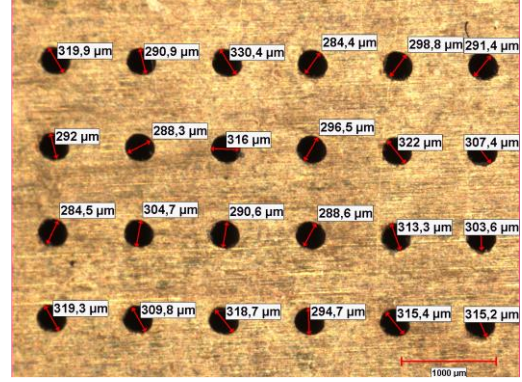
Şekil 3.1: (a) Deney düzeneğine ait gözenekli plakanın şematik gösterimi, (b) Deney düzeneğine ait gözenekli bir plaka

Gözenekli numuneler, darbeli lazer işleme yöntemiyle delinmiştir. Ancak, bu yöntemden kaynaklanan özellikler nedeniyle, lazer ile delinen plakaların alt ve üst yüzeyleri arasında gözenek çaplarında farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar,

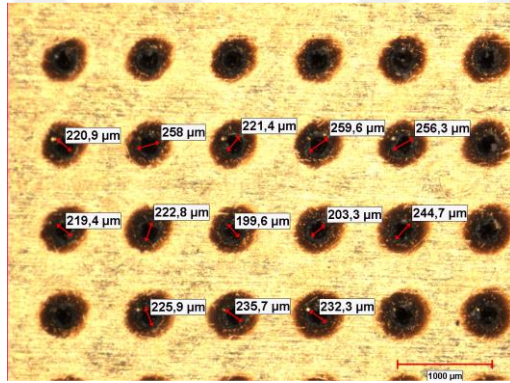
kesitte konik bir yapı oluşumuna neden olmuştur. Bu farklılıkları ölçmek için Nikon SMZ 745T model stereo mikroskop kullanılarak plakaların gözenekleri görüntülenmiştir.



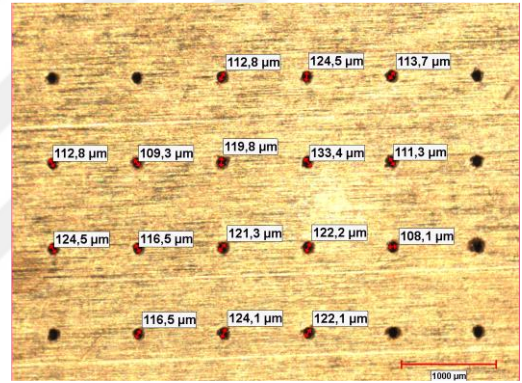
(a)



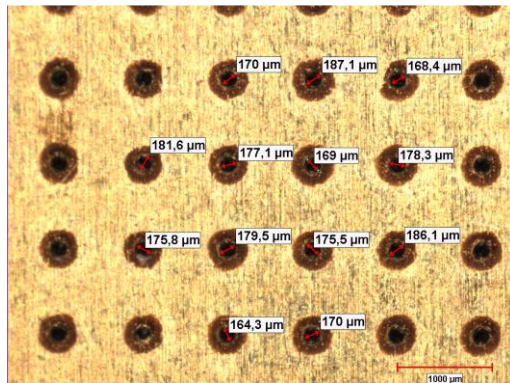
(b)



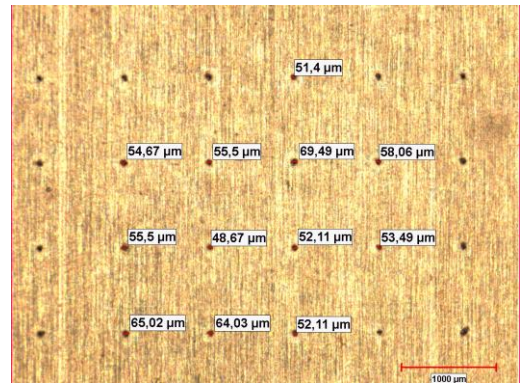
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.2: Gözenekli plakanın gerçek delik çapları; 400 µm gözenekli plaka üst yüzey (a) ve alt yüzey (b), 160 µm gözenekli plaka üst yüzey (c) ve alt yüzey (d), 80 µm gözenekli plaka üst yüzey (e) ve alt yüzey (f)

Şekil 3.2’de, 400 µm gözenekli olması tasarlanan plakanın üst yüzeyi (a) ve alt yüzeyi (b), 160 µm gözenekli olması tasarlanan plakanın üst yüzeyi (c) ve alt yüzeyi (d) ile 80 µm gözenekli olması tasarlanan plakanın üst yüzeyi (e) ve alt yüzeyi (f) gösterilmektedir. Görülen tüm deliklerin ölçüsü görüntü işleme programıyla alınarak bu değerlerin aritmetik ortalaması tüm gözenekli plakalar için hesaplanmıştır.

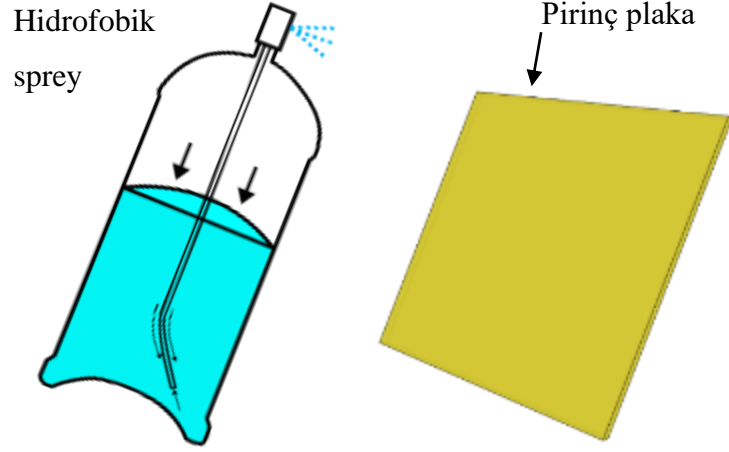
Tablo 3.1’de, tüm gözenekli numuneler için elde edilen alt ve üst yüzey delik çapları ve bu değerlerin ortalaması verilmiştir. Gözenek oluşturma süreci sonrasında, 80 µm, 160 µm ve 400 µm çaplı tasarlanan gözeneklerin ölçüleri sırasıyla yaklaşık 120 µm, 170 µm ve 370 µm olarak belirlenmiştir. Deneyleerde küçük çaplı yüzey üst tarafa gelecek şekilde konumlandırılmıştır [44,48].

Tablo 3.1: Gözenekli plakaların gerçek delik çapları

Numune	Üst Yüzeydeki Delik Çapı	Alt Yüzeydeki Delik Çapı	Ortalama (µm)
400 µm gözenekli	435.55	303.37	369.46
160 µm gözenekli	220.45	114.32	167.38
80 µm gözenekli	179.08	57.45	118.27

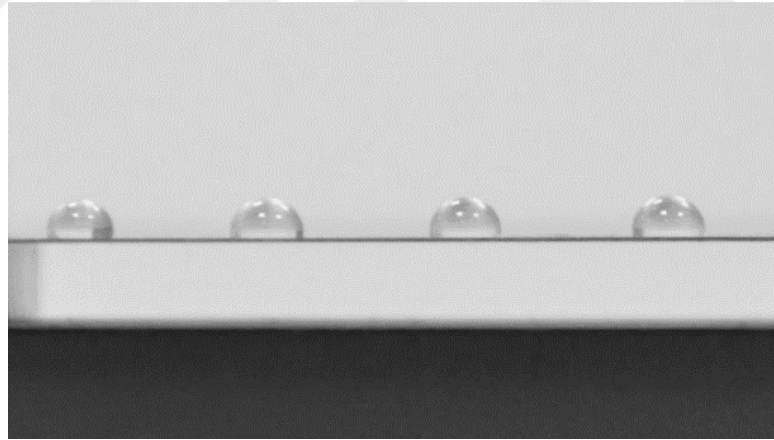
3.2 Hidrofobik Plakanın Hazırlanması

Bu çalışmada plakalara hidrofobik özellik kazandırmak için sprej kaplama yöntemi kullanılmıştır. Bunun için ulaşılabilirliği ve uygulanabilirliği kolay olduğu için yüzey kaplaması ticari bir su itici sprej olan “Vodaseal” marka su itici sprej ile yapılmıştır. Şekil 3.3’te gösterildiği gibi hidrofobik solüsyon temiz ve kuru olan numunelere 20 cm uzaktan püskürtülerek uygulanmıştır. Sprej kaplamasının tam olarak yüzeyi kaplaması için 4 saat sonra ikinci bir kat uygulanmıştır ve daha sonra iyi havalandırılan bir alanda 24 saat kurumaya bırakılmıştır.

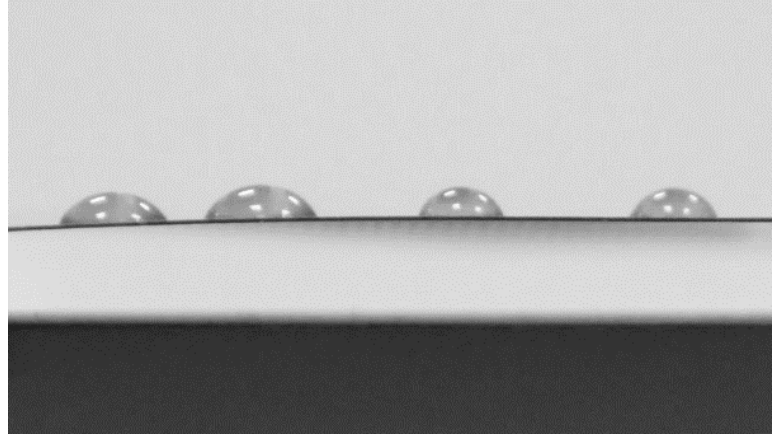


Şekil 3.3: Hidrofovik sprej kaplamanın şematik gösterimi

Kaplama uygulanan plaka üzerindeki su damlasının görüntüsü Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Kaplama yapılmayan plaka üzerindeki su damlasının görüntüsü ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir



Şekil 3.4: Su damlalarının hidrofovik solüsyon uygulanan plaka yüzeyindeki görüntüsü



Şekil 3.5: Su damlalarının hidrofobik olmayan plaka yüzeyi üzerindeki görüntüsü

Kaplama etkilerini görmek ve yüzeyin hidrofobik özellik kazanıp kazanmadığının kontrolü için numunelere yüzey pürüzlülük ölçümü ve temas açısı ölçümleri yapılmıştır.

3.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü “Mitutoyo SurfTest SJ-301” model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu profilometre cihazı, bir yüzeyin pürüzlülüğünü mikrometre (μm) seviyesinde ölçerek, yüzey değerlendirmelerinde kullanılan önemli bir araçtır. Şekil 3.6’da profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülüğü ölçümü gösterilmiştir. Gözeneksiz hidrofobik olmayan plaka ve gözeneksiz hidrofobik plakalardan 5 kez ölçüm alınmıştır. Alınan ölçümler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) mikrometre cinsinden kaydedilmiştir. Ölçüm alımı sırasında profilometre cihazının iğnesini plakanın suyla temas eden orta bölgesinden alınmasına dikkat edilmiştir. Alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak plakaların ortalama yüzey pürüzlülüğü çıkarılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları sonuçlar bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.6: Dokunarak taramalı yüzey pürüzlülük ölçümü

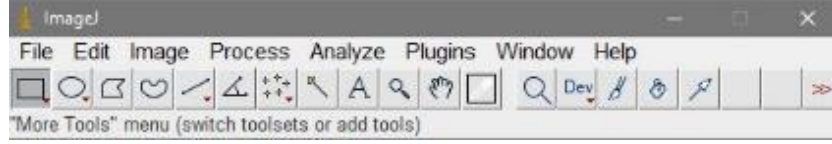
3.4 Temas Açısı Ölçümü

Hazırlanan hidrofobik plaka ve aynı özelliklere sahip standart bir pirinç plaka üzerine 2 farklı hacimde saf su damlası damlatılarak temas açısı ölçümü alınmıştır. Ölçüm için pirinç plaka üzerine damlatılan 20 ve 30 mikrolitre (μl) su damlalarının fotoğraf makinesi ile yandan görüntüsü alınmıştır. Ölçümü almak için Nikon D700 model fotoğraf makinesiyle Şekil 3.7’de gösterildiği gibi yandan su damlası fotoğraflanmıştır. Daha sonra bu fotoğraflardan görüntü analizi yazılımı ile temas açısı ölçümü yapılmıştır.



Şekil 3.7: Temas açısı ölçümü sırasında kamera yerleşimi [130]

Temas açısının fotoğrafı çekildikten sonra temas açısını ölçmek için birçok program kullanılmaktadır. Bunlardan en bilineni “ImageJ” programıdır. Şekil 3.8’de program gösterilmiştir. ImageJ görüntü analizi programıyla çalışan “Contact Angle” eklentisi sayesinde temas açısı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Temas açısı ölçümü alınması için ilk olarak alınan görüntüler ImageJ programına yüklenir.



Şekil 3.8: “ImageJ” programı görünümü

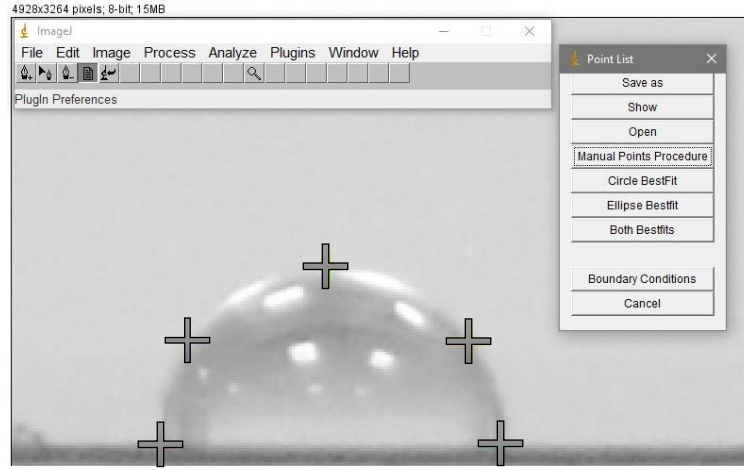
ImageJ programıyla temas açısını belirlemek için 4 farklı seçenek mümkündür;

- Manuel nokta seçimi
- Dairesel eğri uydurma yöntemi kullanılarak ölçüm
- Elips uydurma yöntemi kullanılarak ölçüm
- Ve her iki yöntemi uygulayan bir ölçüm

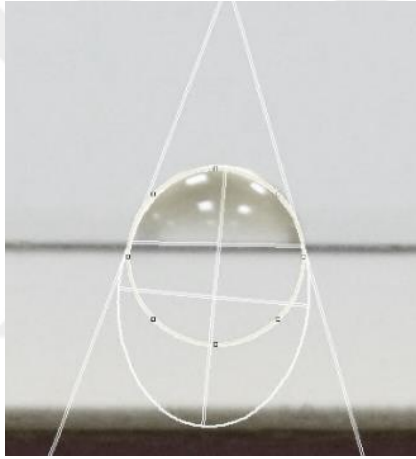
Manuel nokta seçimi seçildiğinde, kullanıcının damla kenarı boyunca bazı noktaları manuel olarak yerleştirerek profili tespit etmesi gerekir. Noktalardan geçen daire ve elips hesaplanır. Bazı durumlarda damla mükemmel simetrik olmayabilir ya da yerçekiminin hafif bir etkisi olabilir. Bu durumda neredeyse daire analizi faydalı sonuçlar sağlayabilir [131].

Bu çalışmada manuel nokta seçimi yapılarak temas açıları ölçülmüştür. Bu yöntemde damla etrafında noktalar manuel olarak seçilerek bu noktalardan geçen daire ya da elips şekli program tarafından uydurularak damlanın temas açısı hesaplanmıştır.

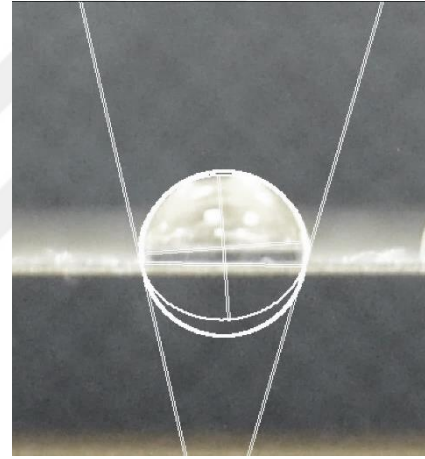
Ölçüm almak için damlanın tabanını belirlemek ve en az 5 nokta ile damlanın sınırlarını belirlemek gerekmektedir. Bunun için damlanın levha ile temas eden köşelerine ilk 2 nokta manuel olarak konulur. Bu 2 noktanın düz bir çizgide olmasına dikkat edilir yoksa program hata verebilir. Diğer 3 nokta ise damlanın sınırlarını belirlemek için istenilen yere konulabilir. Şekil 3.9’da manuel olarak konulan noktalar gösterilmiştir. Noktalar konulduktan sonra program noktalardan geçen bir eğri uydurarak temas açısı ölçme işlemini gerçekleştirir. Şekil 3.10(a)’da hidrofobik olmayan pirinç plaka üzerindeki su damlasının temas açısı için uydurulan eğrileri, Şekil 3.10(b)’de ise hidrofobik kaplanan pirinç plaka üzerindeki su damlasının temas açısı ölçümü için program tarafından oluşturulan eğriler gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Manuel nokta seçimi yöntemiyle noktaların seçilmesi



(a)



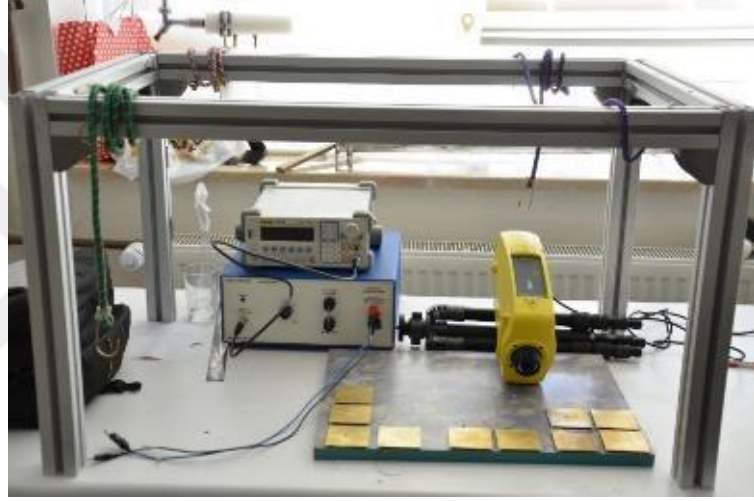
(b)

Şekil 3.10: (a) Hidrofobik olmayan pirinç plaka üzerindeki su damlası (b) Hidrofobik pirinç plaka üzerindeki su damlası

“Manuel points procedure” komutu kullanılarak noktalar seçildikten sonra ölçüm alınır ve sonuç sekmesi açılır. Programın verdiği temas açısının bütünleyeni gerçek temas açısı değerini vermektedir. Damlanın mükemmel simetrik olmayabileceği için sonuçlar dairesel eğri uydurma sonucunda çıkan temas açısını dikkate alınarak hesaplanmıştır.

3.5 Damla Atomizasyon Analizi

Damla atomizasyonu deneylerine geçmeden önce gözenekli plakaların tasarımı ve gözenek çapı kontrolü, plakalara hidrofobik özelliklerin kazandırılması, yüzey pürüzlülüğü ile suyun plakalar üzerindeki temas açısının ölçülmesi ve kontrolleri yapılmıştır. Bu kontrollerin ardından, atomizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon deneyleri yapılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bu bölümde, deney düzeneği, deney ekipmanları ve deneysel sonuçların elde edilmesi açıkça anlatılacaktır.



Şekil 3.11: Deneyel düzeneğin görünümü

Atomizasyon deneyleri için kurulan deney düzeneği Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Düzeneğin ana bileşenleri, gözenekli ve hidrofobik plakalar, saf su, mikropipet, Murata 7BB-35-3L0 piezoelektrik seramik disk, Ometron VQ-400-A lazer vibrometre, Rigol Technologies DG1022A sinyal jeneratörü, Piezo Systems EPA-104 piezo doğrusal amplifikatör, Brüel & Kjaer-3050-B-040 veri kaydedici ve Nikon D7000 kamera sistemidir.

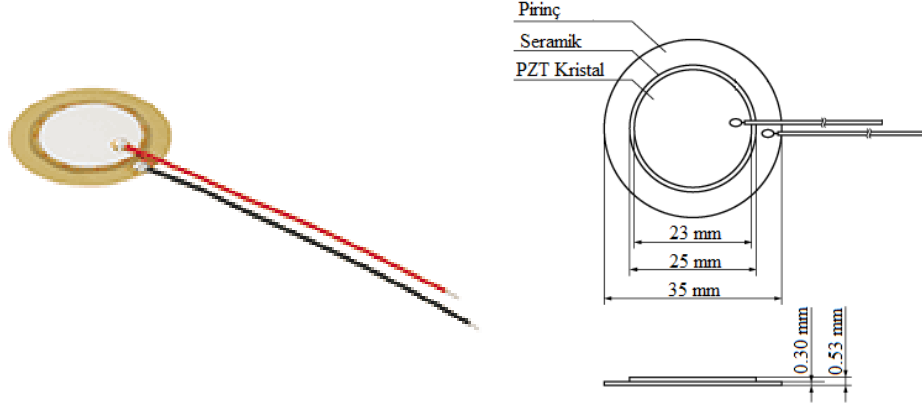
Gözenekli plakalar ve hidrofobik plakalar önceden hazırlanmıştır. Suyun eşit hacimlerde damlatılması mikropipet kullanılarak sağlanmaktadır. Mikropipetin çözünürlüğü 10-100 μ l arasındadır. 20 μ l ve 30 μ l hacimli damlalar mikropipet yardımıyla plakanın ortasına konumlandırılmıştır. Su davranışlarının görsel olarak incelenmesi için bir kamera sistemi kullanılmaktadır. Kamera, plaka yüzeyine dik

konumda yerleştirilerek, atomizasyon işlemi sırasında damlanın üstten görüntüleri kaydedilir (şekil 3.12).

Temas açısı ölçümünün yanı sıra atomizasyon deneyleri sırasında da su damlası kamera ile kaydedilmiştir. Kamera seçimi, elde edilen görüntülerin kalitesi açısından oldukça önemlidir ve net görüntüler elde etmek, ölçümlerin doğruluğunu arttırmaktadır. Bu nedenle, yüksek çözünürlüklü bir fotoğraf makinesi olan Nikon D7000 modeli tercih edilmiştir. Bu makine, 16.2 megapiksel (MP) çözünürlüğe sahiptir ve görüntü analizi için yeterli netlikte görüntüler sağlamaktadır. Su damlasının atomizasyonu sırasında elde edilen gözlemler, yine aynı kamera tarafından video formatında kaydedilmiştir. Video kalitesi, yüksek çözünürlük (HD) seviyesinde ve 1280x720 en-boy oranına sahip olup, saniyede 30 kare hızında çekim yapılmıştır.



şekil 3.12: Damla atomizasyonu sırasında damlayı üstten görüntülemek için fotoğraf makinesi yerleşimi [130]



Şekil 3.13: Piezo seramik diskin görünümü ve ölçüleri [132]

Plakanın altına yapıştırılmış olan piezo seramik disk, sinyal jeneratörü ve piezo doğrusal amplifikatör ile harmonik olarak zorlanmaktadır. Piezo seramik disk Şekil 3.13'te gösterildiği gibi pirinçten yapılmış bir dairesel plaka ve plaka üzerine yerleştirilmiş bir piezo seramikten oluşmaktadır, ayrıca piezo seramik diskin boyutları da gösterilmiştir. Piezo seramik diskin fiziksel özellikleri Tablo 3.4'te belirtilmiştir. Pirinç plakanın merkezi diğer noktalara kıyasla daha yüksek genlikte hareket etmektedir. Bu sebeple, lazer ışığı plakanın merkezine odaklanarak fiziksel frekans ve genlik değerleri temas etmeden ölçülebilmektedir. Lazer vibrometreden alınan analog veriler, Brüel&Kjaer veri toplayıcısı aracılığıyla dijital sinyale dönüştürülmüş, Pulse LabShop yazılımı ile sayısal olarak kaydedilmiştir.

Tablo 3.2: Piezoelektrik malzeme özellikleri [132]

Özellikler	Değerler
Rezonans frekansı	2.8 kHz
Kapasite (sığa)	30 nF
Plaka çapı	35 mm
Plaka kalınlığı	0.3 mm
Piezoelektrik eleman çapı	25 mm
Piezoelektrik eleman kalınlığı	0.23 mm
Plaka elastisite modülü	103 GPa
Piezoelektrik seramik malzemesi	Kurşun titanyum zirkonyum oksit

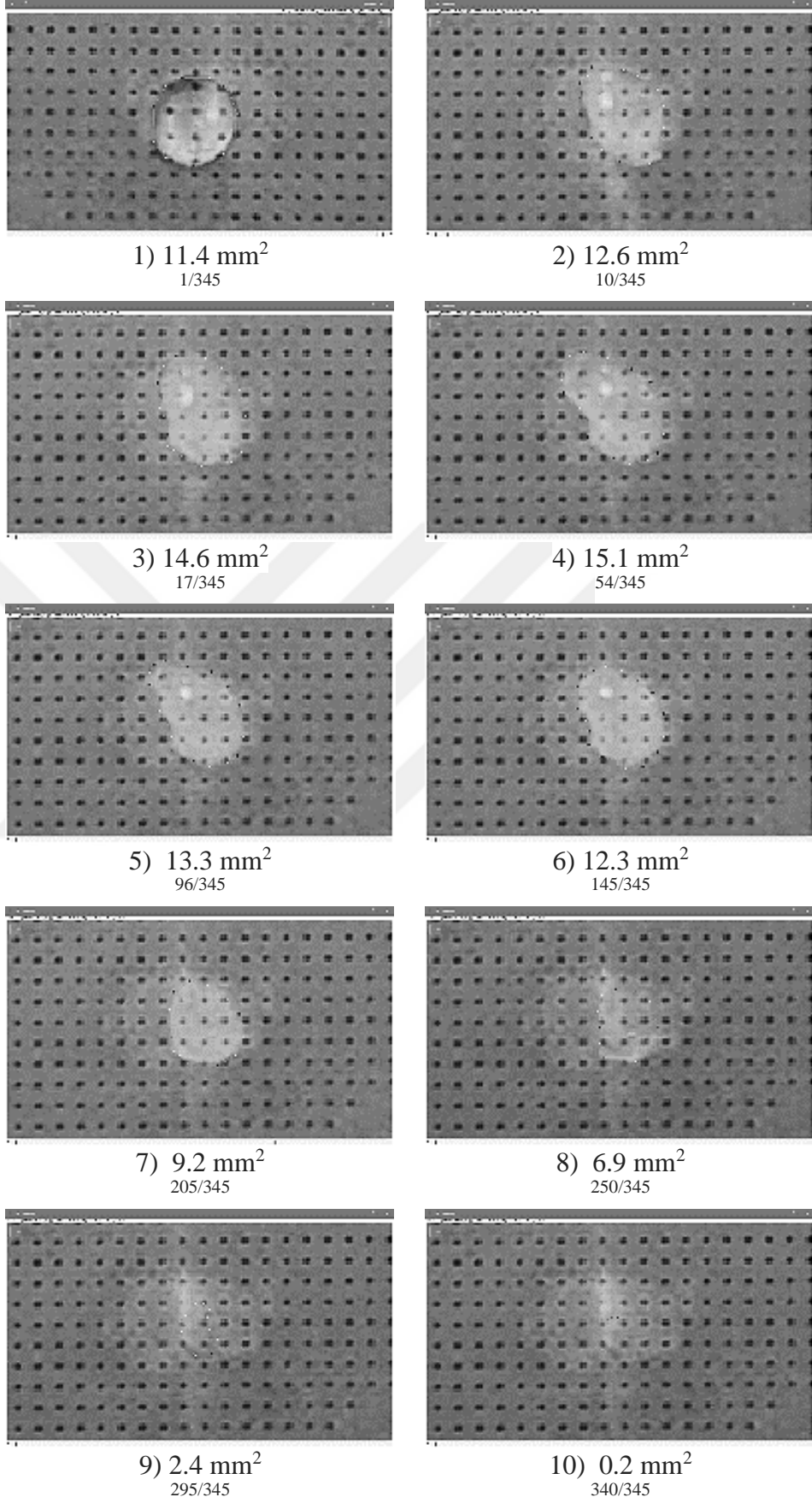
Tüm örnekler üzerinde, su damlatılmaksızın 0-50 kHz aralığında harmonik frekans taraması yapılarak frekans-ivme grafiği oluşturulmuştur. Titreşim davranışını karakterize edebilmek için, plakaların doğal frekans bölgesindeki cevapları belirlenmektedir. Bu amaçla, frekans süpürme yöntemi kullanılarak 0 kHz'den 50 kHz'e kadar olan frekans aralığında titreşim uygulanmıştır. Her frekans değeri için ölçülen ivme değerleri, sistemin zorlandığı doğal frekans bölgelerinde sıçramalar göstermektedir. Bu sıçramalar, test yapılan yapının doğal frekanslarını temsil etmektedir. Deneyde zorlayıcı kuvvetin genliği sabit tutularak frekans arttırılmış ve plakaların merkez noktasındaki ivme değerleri ölçülmüştür. Elde edilen frekans tepki grafiği sonuçları 50 Volt için elde edilmiştir ve sonuçlar bölümünde verilmiştir.

3.5.1 Damla İzdüşüm Alanı Görüntü Analizi

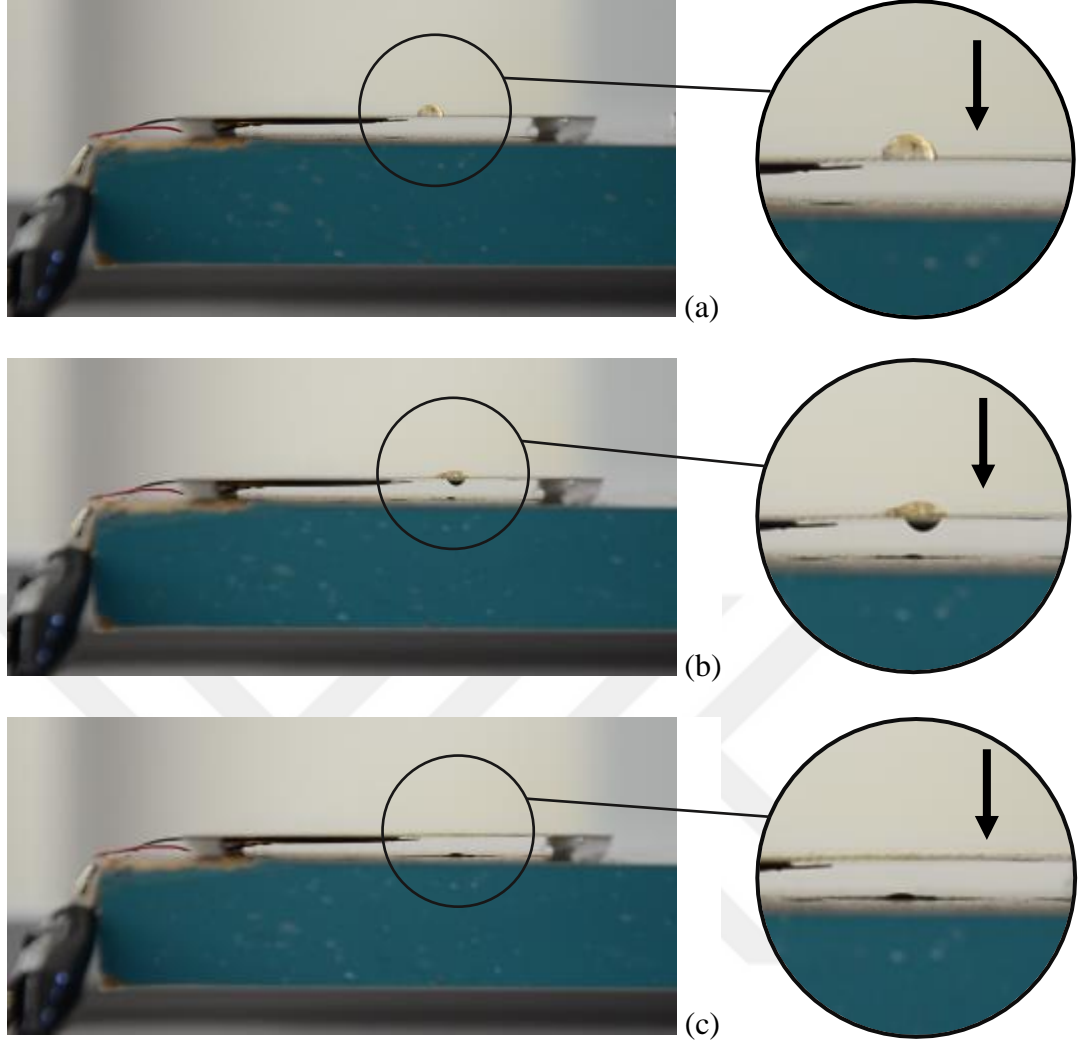
ImageJ açık kaynak kodlu görüntü işleme paket programı ile su damlasının izdüşüm yüzey alanı ölçülmüştür. Fotoğraflardan analiz yapmak için, öncelikle deney sırasında kaydedilen videolar sıralı bir şekilde fotoğraf serisine dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm işlemi sırasında, özellikle hızlı değişimler içeren videoların saniyedeki kare sayısı önemlidir. Yüksek kare sayısı, daha ayrıntılı analizler yapılmasına olanak tanır. Bu çalışmada kullanılan kamera ile çekilen videolar saniyede 30 kare görüntü içermektedir. Elde edilen bu videolardan her 10 karede bir kare alınarak fotoğraf serisi oluşturulmuştur ve bu fotoğraf serisinin analizi ImageJ görüntü işleme programıyla yapılmıştır.

İlk adımda, ImageJ programında elde edilen fotoğraf serisi açılır. Su damlasının detaylarının daha belirgin hale getirilmesi amacıyla, görüntülerin siyah-beyaz formata dönüştürülmesi tercih edilmiştir. Daha sonra ölçüm yapmak için, ölçek ayarlama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında, fotoğraflarda plaka kenar uzunluğumuz 60 mm olarak bilinmektedir. Plaka kenarı boyunca düz bir çizgi çizilerek bu çizginin gerçek uzunluğunun 60 mm olduğu programda girilir ve program ölçüm için hazır hale getirilir. Kuş bakışı görüntüsü bulunan su damlasının çevresi çizgi komutları kullanılarak kullanıcı tarafından belirlenir ve alan değeri program tarafından hesaplanır. Su damlasının izdüşüm alan değişimlerinin gözlemlenmesiyle birlikte, çizim yenilenecek fotoğraf serisinin tamamı için ölçüm yapılır. Sonuç olarak elde edilen veriler, Matlab yazılımı kullanılarak grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.14'te 400 µm çapındaki gözenekli bir plaka üzerine yerleştirilen ve hacmi 30 µl olan su damlasının atomizasyonuna ait görüntüler bulunmaktadır. Bu görüntüler deneyin ikinci tekrarının videosuna ait olup video süresi 2 dakika 55 saniye uzunluğundadır ve 29.97 kare/saniye hızında kaydedilmiştir. Görüntü serisi oluşturmak için, videodan 15 karede bir görüntü alınmıştır ve toplam 345 görüntü elde edilmiştir. Damlanın 10 farklı andaki görüntüsü, izdüşüm alanı ve hangi kareye ait olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Atomizasyon sırasında su damlasının 10 farklı andaki izdüşüm alanı



Şekil 3.15: (a) 30 µl hacminde durgun saf su damlası, (b) titreşim etkisindeki saf su damlasının gözenekli plakanın altına emilmesi, (c) emilen damlanın titreşim etkisi ile plakanın alt yüzeyinden uzaklaştırılması

Gözenekli plakalarda gerçekleştirilen deneylerde su damlasının gözenek yoluyla plakanın alt yüzeyine emilmesi kamera ile kaydedilmiştir. Şekil 3.15(a)'da plaka üzerine yerleştirilmiş bozulmamış saf su damlası gösterilmektedir. Şekil 3.15(b)'de, gözenekli plaka piezoelektrik aktüatör tarafından dikey olarak zorlanmaktadır. Bu zorlama damlanın temas açısını ve temas yarıçapını değiştirir dolayısıyla katı-sıvı arayüzey alanı ve hava-sıvı arayüzey alanı değişir [23]. Kritik bir eksenel kuvvetin üzerinde, damlanın temas hattı boyunca azimutal kararsızlık başlar. Damla yüzeyinde belirgin kraterler ve sıvı sivri uçları gelişir ve küçük su damlacıkları damla yüzeyinden ayrılır [14]. Ayrıca, plaka uyarıldığında, gözeneklerdeki havanın hızı artar ve basınç azalır. Bu nedenle, gözenek içinde bir emme kuvveti oluşur ve bu

kuvvet damla üzerine etki eder. Damla, emme kuvvetinin [38, 41] etkisiyle gözenekler yoluyla plakanın alt yüzeyine emilir (Şekil 15b). Atomizasyon, gözeneksiz plakada uyarılan damlanın sadece hava-sıvı arayüzeyinde meydana gelirken gözenekli plakanın katı-sıvı arayüzeyinde sıvı emilmekte ve alt yüzeye emilen damlanın hava-sıvı arayüzeyinde atomizasyon meydana gelmektedir.

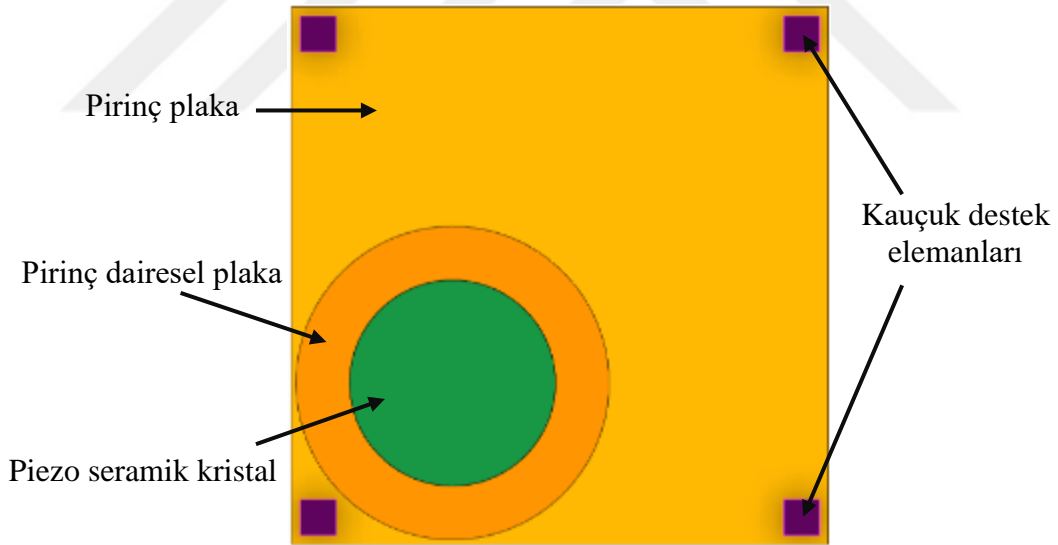
Atomizasyon işlemi sonrasında yüzeyden fırlatma ve gözeneklerden emme gerçekleşmiş yüzeyde su damlası kalmamıştır bu durum Şekil 3.15(c)'de gösterilmiştir.

Matlab programı kullanılarak, zamana göre damlanın plaka üzerindeki izdüşüm alanındaki değişim grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerde izdüşüm alanı değerleri boyutsuz olarak elde edilmiştir ve bunların 3 tekrar deney sonucundaki ortalaması hesaplanmıştır. Her deney tekrarı aynı zamanda bitmemekte ve aynı alan değişimini içermediğinden bu deney tekrarlarındaki veriler farklı boyutlarda olmaktadır. Bu farklı boyutlardaki fonksiyonların ortalamasının alınabilmesi için verilerin aynı boyutlarda olması gerekmektedir. Bunun için az veri içeren fonksiyon, daha çok veri içeren fonksiyon sayısına artırılmıştır bunun için interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. İnterpolasyon yöntemi, belirli bir aralıkta değişkenlik gösteren bir fonksiyonun bilinmeyen ek değerlerini belirlemek amacıyla kullanılır. Matlab'da bunun için interp1 ve interp2 fonksiyonları kullanılır. Bu çalışmada interp1 fonksiyonu kullanılarak tek boyutlu ara değer hesabı yapılmıştır. Bu yöntem sayesinde farklı boyutlardaki verilerin aritmetik ortalaması alınabilmiştir. Deneyin verileri, interpolasyon yöntemiyle elde edilen ara değerler ve grafiklerin ortalaması araştırma bulguları ve tartışma bölümünde yer almaktadır.

3.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plakanın Uygulanan Frekansa Tepkisinin Bulunması

Bu çalışma kapsamında, ANSYS 2021 R1 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz gerçekleştirilmiştir. ANSYS birleştirilmiş alan harmonik analiz modülü kullanılarak piezoelektrik disk tarafından zorlanan titreşim altında plakanın yapısal tepkileri simüle edilmiştir. Analiz süreci model oluşturma, malzeme özelliklerinin tanımlanması, mesh oluşturma ve sınır şartlarının belirlenmesi, hesaplamaların çözülmesi ve sonuçların analizi adımlarından oluşmaktadır. Analiz sonuçları ayrı bir başlık altında sunulacaktır.

Bu tezde analizleri yapılan pirinç plaka ve tasarlanan düzenek Şekil 3.16'da görülmektedir. Piezo seramik disk pirinç plakanın altına rijit bir şekilde bağlanmıştır. Plaka piezoelektrik zorlayıcı etkisi altında titreşim yapmaktadır.



Şekil 3.16: Analizi yapılan düzenek ve elemanları

Piezo seramik disk iki ayrı bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, pirinç dairesel plaka ve plaka üzerine yapıştırılmış piezo seramiktir. Piezo seramik zorlayıcının malzemesi PZT 5H'dir ve zorlayıcının fiziksel ve elektriksel özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir. Üretici firmaların malzeme özelliklerini matris formunda sunmaları analiz

sürecinde kolaylık sağlamaktadır. Bu malzeme özellikleri, farklı üreticiler arasında değişiklik gösterebilir. [133].

Tablo 3.3: Piezo seramik malzeme özellikleri [133]

PZT-5H Piezo seramik malzeme özellikleri	
Yoğunluk (kg/m³)	7500
Sabit elektrik alanda elastik rijitlik matrisi (N/m²)	
S₁₁	126.0 x10 ⁹
S₁₂	79.5 x10 ⁹
S₁₃	84.1 x10 ⁹
S₃₃	117.0 x10 ⁹
S₄₄	23.3 x10 ⁹
Piezoelektrik uzama matrisi (C/m²)	
d₃₁	-6.5
d₃₃	23.3
d₁₅	17
Sabit uzamada dielektrik matrisi (F/m)	
e₁₁	15.03 x10 ⁻⁹
e₂₂	15.03 x10 ⁻⁹
e₃₃	13.0 x10 ⁻⁹

Bu özellikler program içinde malzeme tanımlama kısmında matrisler şeklinde girilmiştir. Programa girilen matrisler sırasıyla sabit elektrik alanda elastik rijitlik matrisi, sabit uzamada dielektrik matrisi, piezoelektrik uzama matrisi verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} 126 \times 10^9 & & & & & & \\ 79.5 \times 10^9 & 126 \times 10^9 & & & & & \\ 84.1 \times 10^9 & 84.1 \times 10^9 & 117 \times 10^9 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 23.3 \times 10^9 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 23.3 \times 10^9 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23.25 \times 10^9 & \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

(Sabit elektrik alanda elastik rijitlik matrisi)

$$\begin{bmatrix} 15.03 \times 10^{-9} & 0 & 0 \\ 0 & 15.03 \times 10^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 13 \times 10^{-9} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{(Sabit uzamada} \\ \text{dielektrik matrisi)} \end{array} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -6.5 \\ 0 & 0 & -6.5 \\ 0 & 0 & 23.3 \\ 0 & 17 & 0 \\ 17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{(Piezoelektrik uzama matrisi)} \end{array} \quad (3.13)$$

Analizlerde kullanılan malzemeler arasında piezo seramik kristal ve pirinç plaka yer almaktadır. Suyun atomizasyonu için plakanın genlik değerinin yüksek olması gerekmektedir ve genliği etkileyen faktörlerden birisi de kullanılan plakanın malzemesidir. Tercih edilen pirinç malzemesinin özellikleri Tablo 3.4’de verilmiştir [134].

Tablo 3.4: Pirinç malzemesinin özellikleri [134]

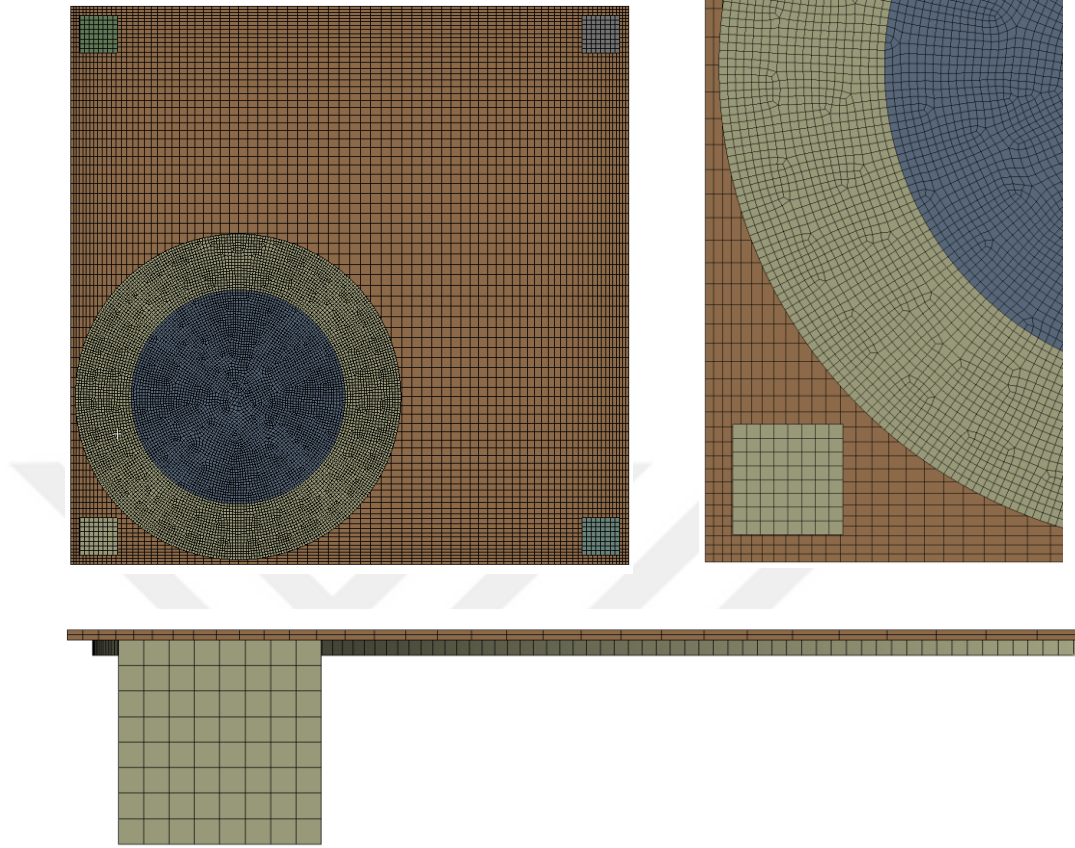
Pirinç malzeme özellikleri	
Yoğunluk	8390 kg/cm ³ @ 20°C
Elastisite Modülü	117 GPa
Poisson oranı	0.34

Ayrıca, plakanın dört köşesinden desteklenerek üzerinde durduğu kauçuk elemanın malzeme özellikleri de Tablo 3.9’da verilmiştir [135].

Tablo 3.5: Plaka destek elemanının malzeme özellikleri [135]

Nitril Kauçuk Malzeme Özellikleri	
Yoğunluk	1000 kg/cm ³
Elastisite Modülü	0.003 GPa
Poisson oranı	0.5

Şekil 3.17’de plakanın 26229 eleman ve 53995 düğümünden oluşan ağ örgüsü görüntüsü sonlu elemanlar modeli görülmektedir.



Şekil 3.17: Ağ örgüsü

Model içerisindeki her nesnenin malzeme özellikleri, model içinde bulunan cisimlerin temas yüzeylerinde oluşan davranış biçimi ve zorlayıcıların tüm fiziksel ve elektriksel özellikleri programa girilmiştir. Analizlerde plaka dört köşesinden kauçuk destek elemanına yapıştırılmıştır ve bu destek elemanı da zemine yapıştırılmıştır. Plakanın üç eksen boyunca hareket etmesine izin verilmiştir. Analiz 0 ile 20 kHz arasında 400 eşit frekans noktasına bölünmüş ve bu frekanslarda plakanın davranışı elde edilmiştir. Genliğin büyüklüğünü etkileyen bir faktör voltaj değeridir. Programda voltaj değeri 50V olarak girilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

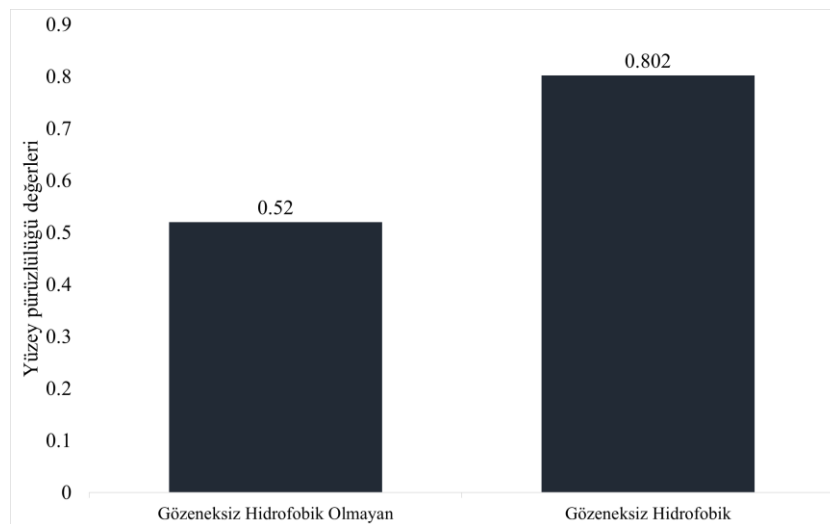
4.1 Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada, gözeneksiz pirinç plaka hidrofobik solüsyon ile kaplanmıştır. Yapılan kaplama sonrası hidrofobik plakaların yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve gözeneksiz hidrofobik olmayan plaka ile karşılaştırılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1: Pürüzlülük ölçüm sonuçları

Numune	Ortalama R_a Değeri
Gözeneksiz Hidrofobik Olmayan Plaka	0.520
Gözeneksiz Hidrofobik Plaka	0.802

Araştırma bulgularına göre, hidrofobik plakaların yüzey morfolojisi su damlasının davranışını etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm analizlerinin sonuçlarına göre hidrofobik kaplı olan plakanın yüzey pürüzlülüğü hidrofobik olmayan plakaya göre daha fazladır. Yüzey pürüzlülük değerleri grafik halinde Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Plakanın hidrofobik hale getirilmesi ile yüzey pürüzlülüğü hidrofobik olmayan plakaya göre %54.2 oranında artmıştır.



Şekil 4.1: Pürüzlülük ölçüm sonuçları grafiği

4.2 Temas Açısı Ölçüm Sonuçları

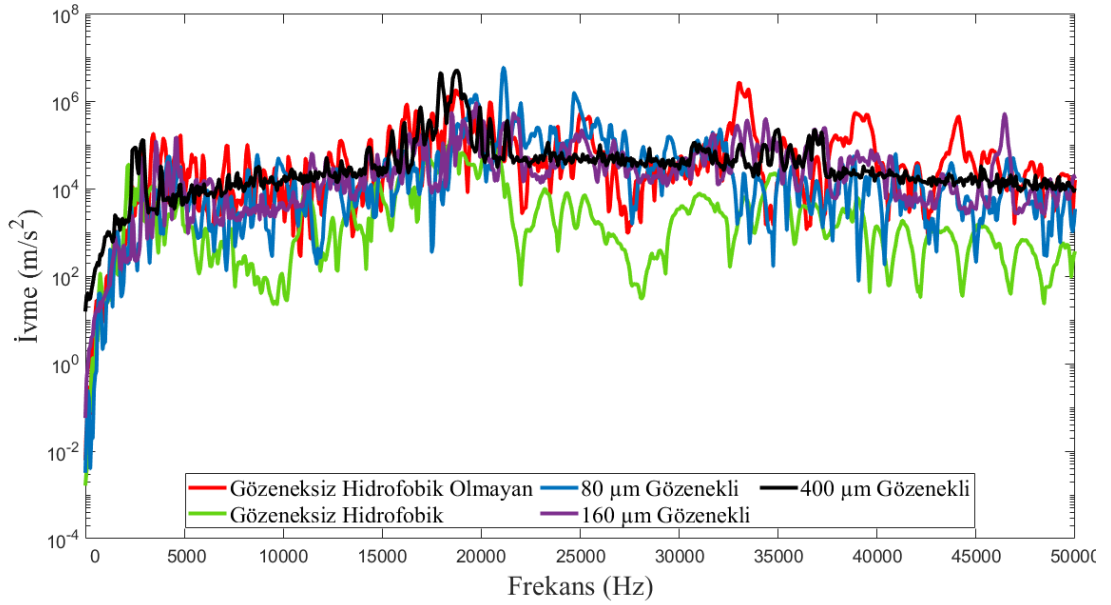
Gözeneksiz plakalar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda hidrofobik ve hidrofobik olmayan plakaların üzerindeki 20 µl ve 30 µl hacmindeki su damlalarının temas açıları Tablo 4.2’de verilmiştir. Hidrofobik kaplama uygulanmış plakadaki su damlasının temas açısı 90°’den büyük olduğu gösterilmiştir. 20 µl için hidrofobik kaplama temas açısını %14.98 ve 30 µl için hidrofobik kaplama temas açısını %16.35 arttırmıştır. Böylece plakalara yapılan kaplama işlemi ile hidrofobik özellik sağlanmıştır.

Tablo 4.2: Temas açısı ölçüm sonuçları

Numune	Su Hacmi	Temas Açısı Ölçüleri			Ortalama
Hidrofobik olmayan plaka	20 µl	80.8°	85.6°	80.6°	82.33°
	30 µl	81°	76.4°	83°	80.13°
Hidrofobik plaka	20 µl	98.3°	92.4°	93.3°	94.67°
	30 µl	93.1°	93.8°	92.8°	93.23°

4.3 Yüzeylerin Frekans-İvme Analizi

Tüm numuneler üzerine su damlatılmaksızın 0-50 kHz aralığında harmonik frekans taraması yapılarak frekans-ivme grafiği oluşturulmuştur. Deneysel olarak elde edilen frekans-ivme grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Deneysel frekans-ivme grafiği

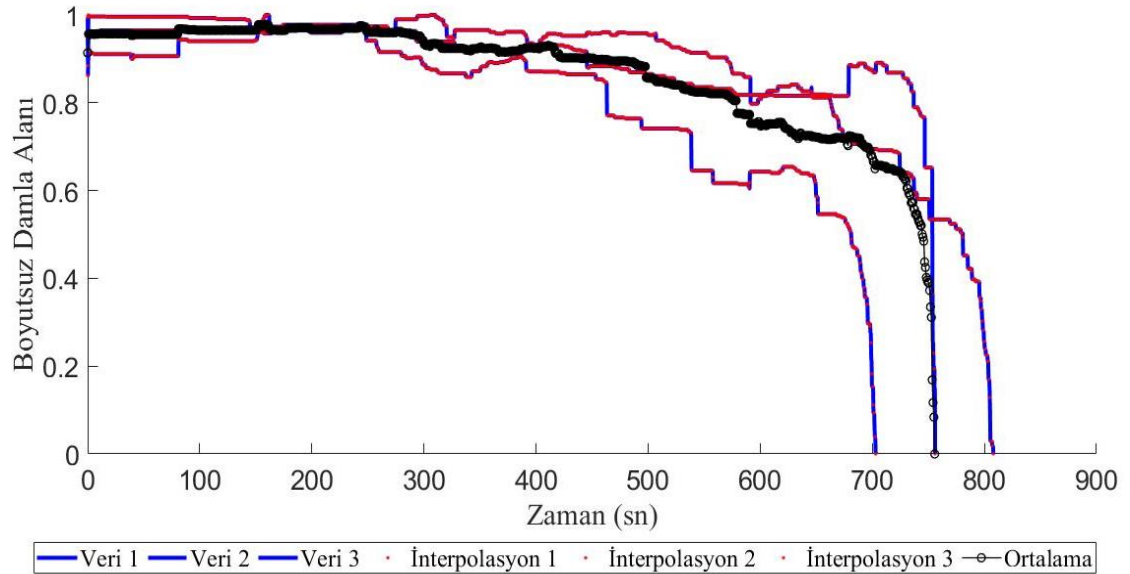
Şekil 4.2’de görüldüğü gibi tüm numuneler için en yüksek ivme değerlerinin genellikle 17.5-20 kHz arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu nedenle, deneyde çalışma frekansı bu yüksek ivme değerlerine yakın bir bölgeden seçilmelidir. Yapılan frekans tarama çalışmalarından sonra, deneysel olarak çalışma frekansı 18.7 kHz olarak belirlenmiştir. Plakalar 18.7 kHz frekansında çalıştırılıp yeterli süre beklemiş ve plaka kalıcı durum davranışı gösterdiğinde ivme değerleri ölçülmüştür (Tablo 4.3). Plakaların ivme değerlerinin gözeneksiz ve hidrofobik olmayan plakada en düşük, diğer plakalarda ise birbirlerine çok yakın değerler olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3: Numunelerin ivme değerleri

Numune	İvme değeri (km/s ²)
Gözeneksiz Hidrofobik Olmayan Plaka	2.30
Gözeneksiz Hidrofobik Plaka	2.41
80 µm Gözenekli Plaka	2.44
160 µm Gözenekli Plaka	2.45
400 µm Gözenekli Plaka	2.45

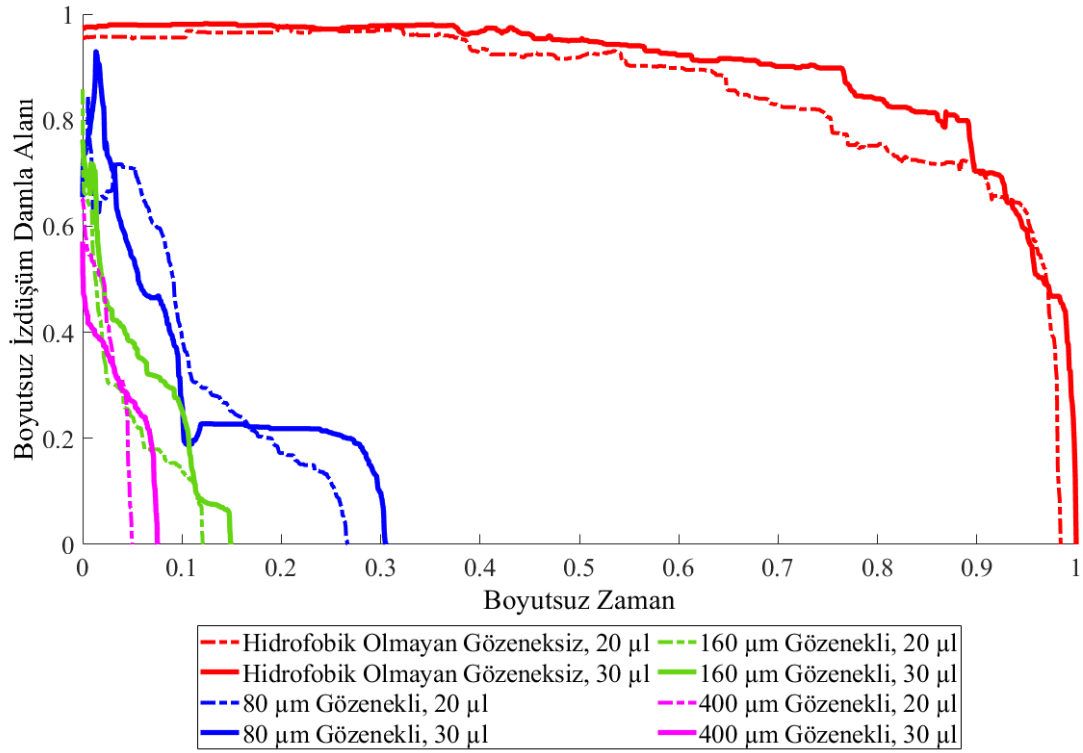
4.4 Damla İzdüşüm Alanı Ölçümleri Sonuçları

Gözeneksiz ve hidrofobik olmayan plaka üzerine yerleştirilen 20 µl su damlasının boyutsuz izdüşüm damla alanı değişimi deneysel olarak 3 tekrar yapılarak ölçülmüştür. Deneyin verileri, interpolasyon yöntemiyle elde edilen ara değerler ve grafiklerin ortalaması Şekil 4.3'te yer almaktadır.



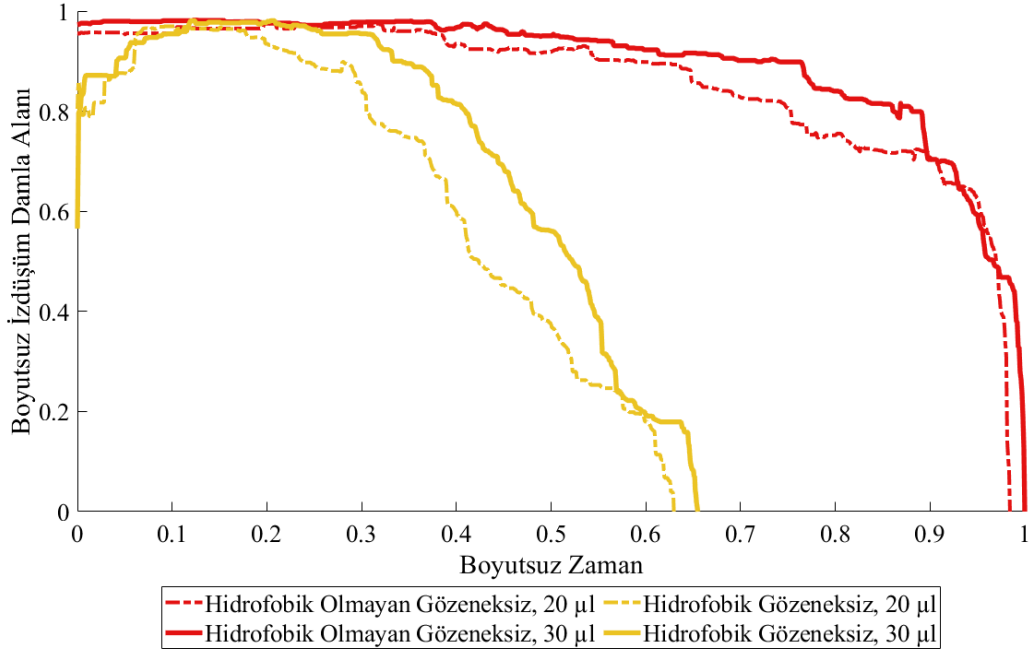
Şekil 4.3: Gözeneksiz ve hidrofobik olmayan plaka üzerine yerleştirilen 20 µl su damlasının boyutsuz damla alanı – zaman grafiği

Hidrofobik olmayan gözeneksiz plaka ve 80, 160, 400 μm gözenekli plakalar üzerinde 20 μl ve 30 μl hacimli su damlalarının deney tekrarlarından elde edilen ortalama izdüşüm alan – zaman grafikleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Gözenekli plakaların yer aldığı bu grafikte zaman değerleri boyutsuz olarak ifade edilmiştir. Boyutsuzlaştırma işlemi, zaman değerlerini, tüm deneylerdeki en büyük zaman değerine bölünerek elde edilmiştir. Aynı şekilde alan değerlerinin boyutsuzlaştırılması da tüm alan değerlerinin, en büyük alan değerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Gözenekli plakalardaki izdüşüm alan değişimi, gözeneksiz plakaya göre daha hızlı gerçekleşmiştir. Gözenek boyutu arttıkça izdüşüm alanın daha hızlı azaldığı gözükmektedir.



Şekil 4.4: Gözenekli ve gözeneksiz plakalara ait izdüşüm alanı değişimi grafikleri

Hidrofobik olmayan gözeneksiz plaka ve hidrofobik gözeneksiz plaka üzerinde 20 μl ve 30 μl hacimli su damlalarının deney tekrarlarından elde edilen ortalama izdüşüm alanı – zaman grafikleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Hidrofobik plakalardaki izdüşüm alan değişimi, hidrofobik olmayan plakaya göre daha hızlı gerçekleşmiştir.



Şekil 4.5: Hidrofobik ve hidrofobik olmayan plakalara ait izdüşüm alan değişimi

Bu deneyde, damlanın izdüşüm alanı üzerindeki başlangıç ivmesinin etkisini incelemek için beş farklı fonksiyon ($y_i(t)$) kullanılmıştır. Bu fonksiyonlar damlanın alanının zamanla nasıl değiştiğini ifade eder ve her bir fonksiyon belirli bir zaman aralığında geçerlidir (Şekil 4.6).

$$y_1 = c_{11}t^2 + c_{12}t + c_{13} \quad (0 < t < t_1) \quad (4.1)$$

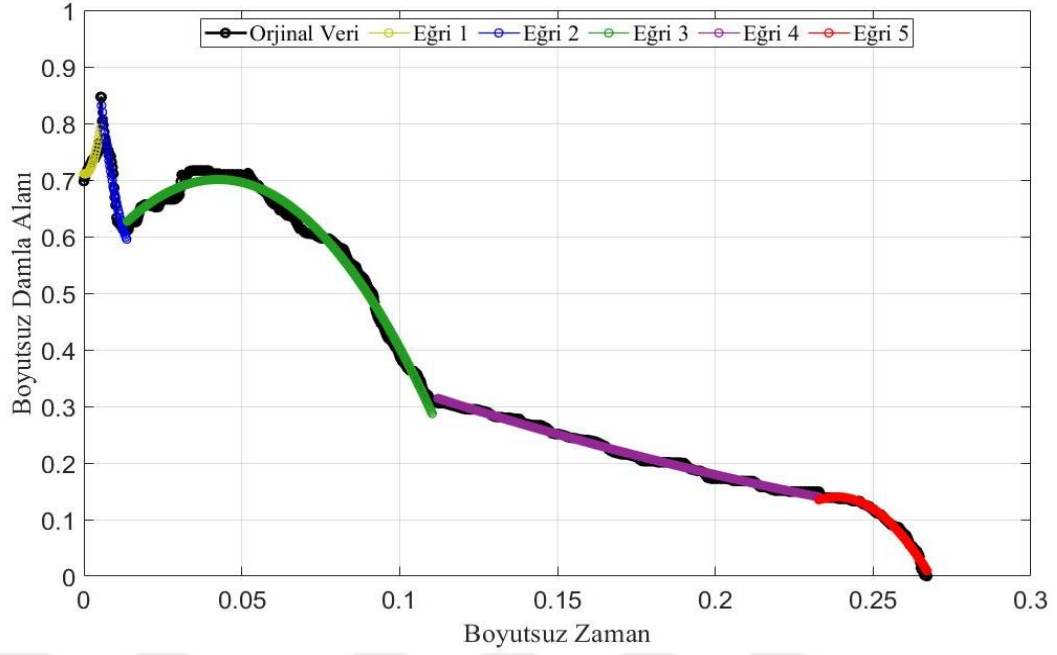
$$y_2 = c_{21}t^2 + c_{22}t + c_{23} \quad (t_1 < t < t_2) \quad (4.2)$$

$$y_3 = c_{31}t^2 + c_{32}t + c_{33} \quad (t_2 < t < t_3) \quad (4.3)$$

$$y_4 = c_{41}t^2 + c_{42}t + c_{43} \quad (t_3 < t < t_4) \quad (4.4)$$

$$y_5 = c_{51}t^2 + c_{52}t + c_{53} \quad (t_4 < t < t_5) \quad (4.5)$$

Burada y_i , damlanın zamanla değişen alanının fonksiyonlarıdır ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), t_i , fonksiyonlarının boyutsuz zamanıdır, c_{ij} , sabit katsayılar deneysel analizden belirlenmiştir. 80 µm çapındaki gözenekli bir plaka üzerine yerleştirilen ve hacmi 20 µl olan su damlasının atomizasyonuna ait alan değişim grafiği 5 bölgeye ayrılmıştır. Şekil 4.6'da bu bölgelere uydurulan eğriler gösterilmektedir.



Şekil 4.6: 80 µm gözenekli plakadaki 20 µl hacmindeki saf su damlasının boyutsuz zaman - boyutsuz damla alanı değişimi grafiğine uydurulan eğriler

Damlanın izdüşüm alanı önce hızla doğrusal olmayan bir şekilde artar (y_1), sonra doğrusal olmayan hızlı bir şekilde azalır (y_2), sonra doğrusal olmayan bir şekilde değişir (y_3), sonra doğrusal olmayan bir şekilde yavaşça azalır (y_4) ve sonra doğrusal olmayan bir şekilde azalır (y_5). 80 µm gözenekli plaka üzerinde bulunan 20 µl hacmindeki saf su damlasının alan değişim grafiğine uydurulan eğrilerin fonksiyonları şu şekildedir:

$$y_1 = 3257.53 t^2 - 2.14t + 0.71 \quad (4.6)$$

$$y_2 = 2005.54 t^2 - 67.97 t + 1.15 \quad (4.7)$$

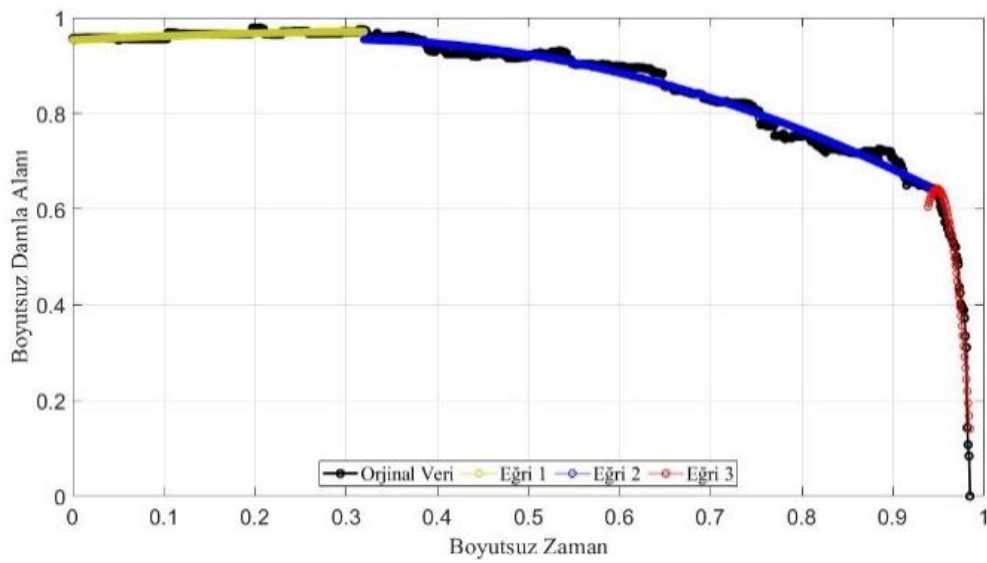
$$y_3 = -89.87t^2 + 7.64t + 0.54 \quad (4.8)$$

$$y_4 = 2.75 t^2 - 2.39t + 0.55 \quad (4.9)$$

$$y_5 = -160.02t^2 + 76.33t - 8.96 \quad (4.10)$$

Bu deneylerde 80 µm gözenekli plaka üzerinde bulunan su damlasının alan değişim fonksiyonlarına 5 eğri uydurulmuştur, bunun nedeni su damlasına uygulanan ilk ivme anında plaka üzerindeki suyun izdüşüm alanını hızlı bir şekilde arttırıp

ardından azaltmasıdır. 160 ve 400 μm gözenekli plakalarda bulunan su damlasının izdüşüm alanı değişimi grafiklerine 4 eğri uydurulmuştur, bunun nedeni, bu plakalarda su damlası ilk ivme anında izdüşüm alanını hızlı bir şekilde azaltmış olmasıdır. Gözeneksiz plakalarda bulunan su damlalarının izdüşüm alanı grafiklerine ise 3 eğri uydurulmuştur. Bu plakalarda ilk ivme anında hızlı bir değişim gözlenmemiştir. Gözeneksiz hidrofobik plakadaki 20 μl hacmindeki saf su damlasının boyutsuz zaman - boyutsuz damla alanı değişimi grafiğine uydurulan eğriler Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Aynı şekilde tüm deney plakalarında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen ortalama alan değişimi fonksiyonlarına eğri uydurulmuştur.



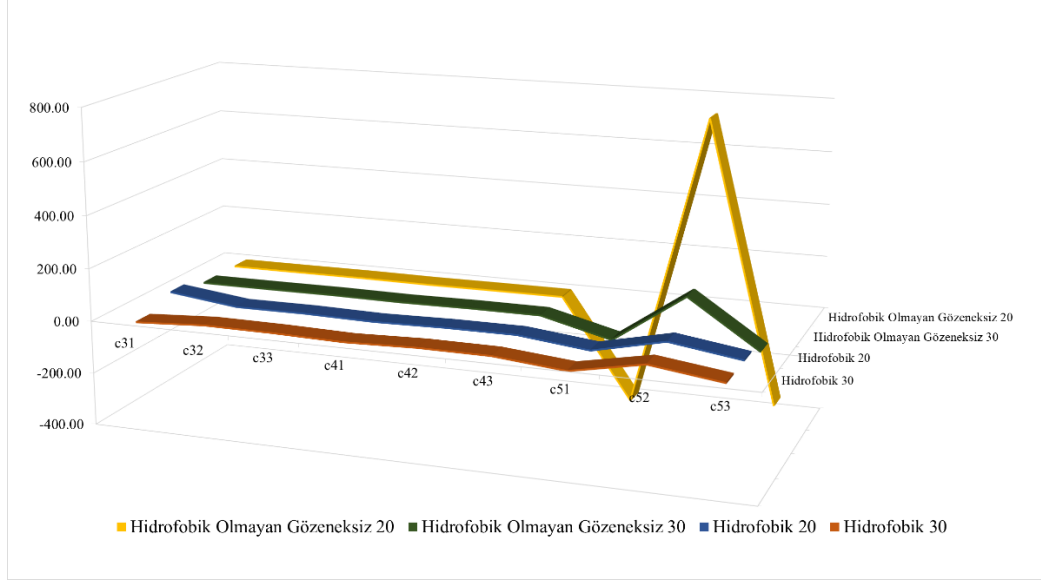
Şekil 4.7: Gözeneksiz hidrofobik olmayan plakadaki 20 μl hacmindeki saf su damlasının boyutsuz zaman – boyutsuz damla alanı değişimi grafiğine uydurulan eğriler

Tüm deneyi yapılan plaka ve su hacimlerinin alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan eğrilerin katsayıları tablolar halinde verilmiştir. Tablo 4.4’te hidrofobisite etkisinin kıyaslanması amacıyla hidrofobik plaka ve hidrofobik olmayan plakaya ait fonksiyonlara uydurulan eğrilerin katsayıları verilmiştir. Bu gözeneksiz hidrofobik ve hidrofobik olmayan plakalarda gerçekleştirilen deneylerde suyun izdüşüm alanının zamana göre değişimi ilk ivme uygulandığı anda ani bir değişim gözlenmeden gerçekleşmiştir, bunun için y_3 , y_4 , y_5 eğrilerini uydurmak yeterli olmuştur.

Tablo 4.4: Hidrofobisitenin fonksiyon katsayılarına etkisi

Denklem	Katsayı	Hidrofobik Olmayan Gözeneksiz 20 µl Hacimli	Hidrofobik Olmayan Gözeneksiz 30 µl Hacimli	Hidrofobik Gözeneksiz 20 µl Hacimli	Hidrofobik Gözeneksiz 30 µl Hacimli
y ₃	c ₃₁	-0.13	-0.09	32.61	-12.48
	c ₃₂	0.10	0.02	-0.06	2.77
	c ₃₃	0.95	0.98	0.81	0.81
y ₄	c ₄₁	-0.73	-1.25	-4.10	-5.39
	c ₄₂	0.42	1.26	0.87	2.30
	c ₄₃	0.89	0.63	0.93	0.74
y ₅	c ₅₁	-386.2	-67.36	-29.27	-24.60
	c ₅₂	732.54	124.35	31.82	28.52
	c ₅₃	-346.7	-56.74	-8.39	-8.05

Şekil 4.8’de hidrofobik ve hidrofobik olmayan gözeneksiz plakalara ait 20 ve 30 µl hacme sahip su damlalarının izdüşüm alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan 2. dereceden eğrilerin katsayılarının grafiği gösterilmiştir. Bu katsayılara bakarak atomizasyon başlangıç anında, hidrofobik yüzeyde bulunan su damlasının alanını arttırdığı görülmektedir. Bunun nedeni temas açısı yükselen su damlasının yüzeyde hareket etme eğiliminde olmasıdır. Deneyin ortalarında hidrofobik plakada bulunan suyun izdüşüm alanı daha hızlı azalmıştır. Hidrofobik olmayan plakada başlangıç anında ve deneyin ortalarında değişim hızı oldukça düşüktür su damlası uzun bir süre alanını koruyup ardından hızla azalmıştır. Hidrofobik olmayan gözeneksiz plakada su damlasının temas açısı düşüktür ve yüzeyi daha fazla ıslatma eğilimindedir, gözenek olmaması dolayısıyla atomizasyon sadece bir yöndeki hava-sıvı arayüzünde gerçekleşmek zorundadır, bu nedenle uzun bir süre alanını korumuştur.



Şekil 4.8: Hidrofobisite etkisine göre 20 ve 30 µl su damlasının alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan eğrilerin katsayılarının karşılaştırılması

Tablo 4.5'te gözenek boyutlarının damlanın izdüşüm alan değişimi üzerindeki etkisinin kıyaslanması amacıyla gözeneksiz plaka ve gözenekli plakalara ait fonksiyonlara uydurulan eğrilerin katsayıları verilmiştir. Bu plakalarda suyun izdüşüm alanının zamana göre değişimini göstermek için hidrofobik olmayan gözeneksiz plakaya 3 eğri uydurulmuştur. Gözeneksiz plakada suyun hareketi farklıdır ilk anda damla izdüşüm alanında değişim gözlenmeksizin atomizasyon başlamış deneyin son anlarında hızlı bir şekilde azalmıştır.

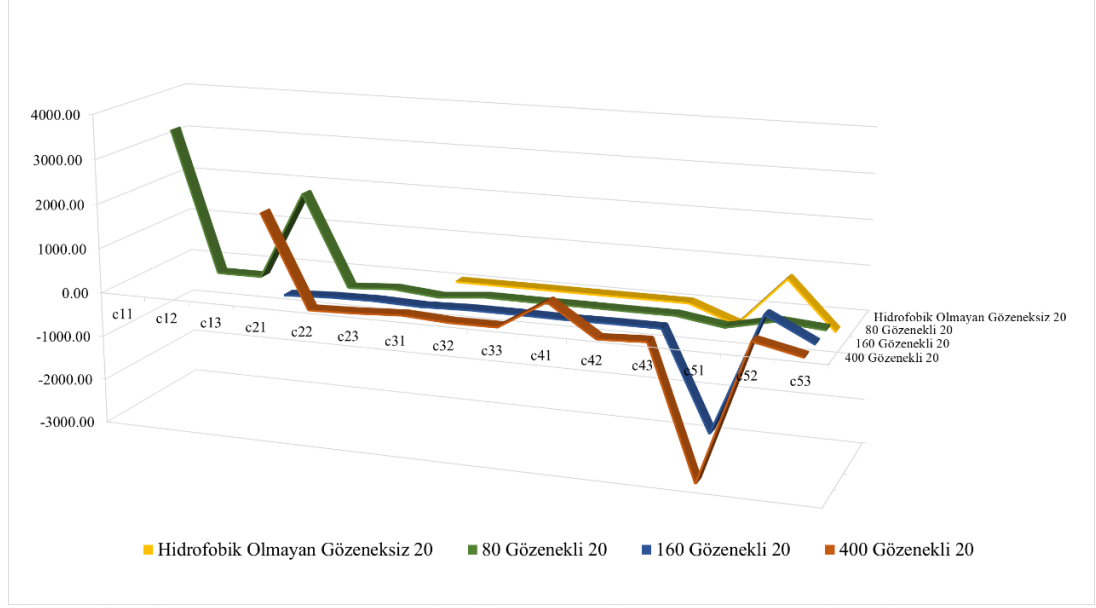
Tüm gözenekli plakalarda su damlası hem hava-sıvı arayüzünde atomize olabilmekte hem de gözeneklerden emilebilmektedir. Bu durumda plakanın gözenekli yapısı su damlasının izdüşüm alan değişimi üzerindeki etkisini karmaşıklaştırdığı söylenebilir. 80 µm gözenekli plaka, gözenek boyutunun en küçük plaka olması sebebiyle su damlası ilk ivme anında yüzeyde hareket ederek alanını arttırmış ardından uygun gözeneklerden geçerek ve havaya atomize olarak izdüşüm alanını azaltmıştır. Bu nedenle 80 µm gözenekli plakada gerçekleştirilen izdüşüm alan değişimi grafiklerine 5 eğri uydurulması gerekmiştir.

160 ve 400 µm gözenekli plakalarda ise gözenek boyutu su damlasının doğrudan gözeneklerden emilmesi için yeterli büyüklükte olduğu için izdüşüm alanı deneyin başında azalan bir etki göstermiştir. Bu nedenle 160 ve 400 µm gözenekli

plakada gerçekleştirilen izdüşüm alan değişimi grafiklerine 4 eğri uydurulması yeterli olmuştur.

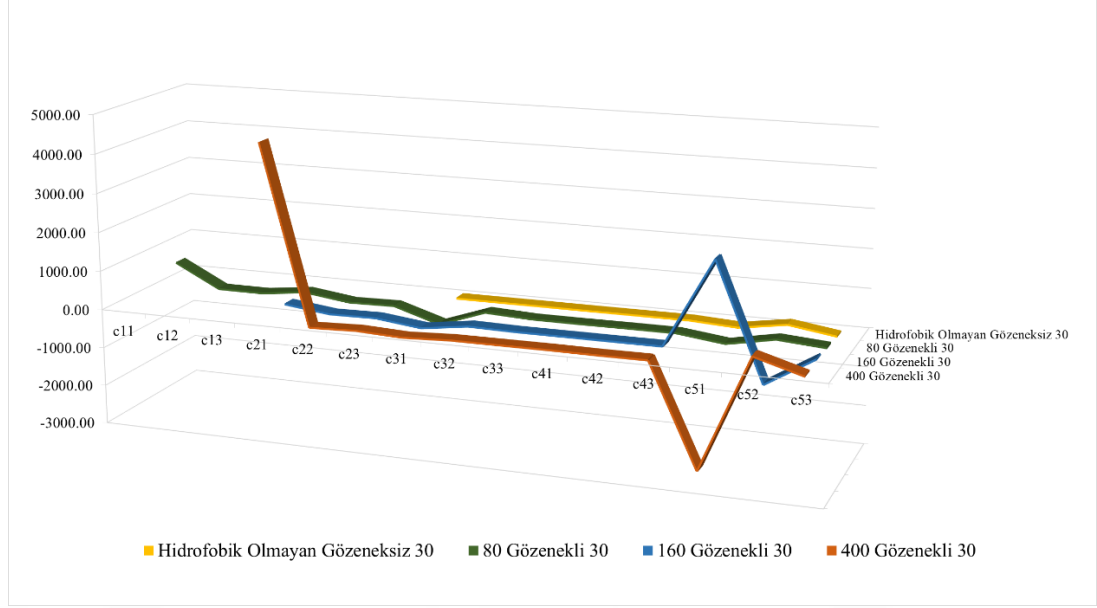
Tablo 4.5: Gözenek boyutuna göre fonksiyon katsayıları

Denklem	Katsayı	Hidroforik Olmayan Gözeneksiz		80 µm Gözenekli		160 µm Gözenekli		400 µm Gözenekli	
		20 µl Hacimli	30 µl Hacimli	20 µl Hacimli	30 µl Hacimli	20 µl Hacimli	30 µl Hacimli	20 µl Hacimli	30 µl Hacimli
y1	c11			3257.5	609.82				
	c12			-2.14	5.18				
	c13			0.71	0.72				
y2	c21			2005.5	137.75	-66.39	130.58	2040.3	4522.4
	c22			-67.97	-19.64	-15.53	-14.71	-31.78	-39.87
	c23			1.15	1.17	0.73	0.77	0.66	0.52
y3	c31	-0.13	-0.09	-89.87	-366.4	-32.81	-141.5	56.22	-53.88
	c32	0.10	0.02	7.64	56.48	-0.44	21.44	-4.97	-1.18
	c33	0.95	0.98	0.54	-1.72	0.35	-0.49	0.58	0.42
y4	c41	-0.73	-1.25	2.75	-3.40	-10.29	-0.35	643.45	4.40
	c42	0.42	1.26	-2.39	1.23	0.34	-0.62	-48.88	-3.26
	c43	0.89	0.63	0.55	0.11	0.21	0.16	1.24	0.42
y5	c51	-386.2	-67.36	-160.0	-149.6	-2190	2249.1	-2932	-2589
	c52	732.54	124.35	76.33	81.45	502.89	-699.3	229.10	344.14
	c53	-346.7	-56.74	-8.96	-10.88	-28.77	54.27	-4.16	-11.22



Şekil 4.9: Gözenek boyutunun etkisine göre 20 µl su damlasının alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan eğrilerin katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 4.9’da gözenekli ve gözeneksiz plakalara ait 20 µl hacimli su damlalarının izdüşüm alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan 2. dereceden eğrilerin katsayılarının grafiği gösterilmiştir. Bu uydurulan eğrilerin katsayılarına bakarak 80 µm gözenekli yüzeyde bulunan su damlasının, diğer gözenekli yüzeylerdeki su damlasına kıyasla atomizasyona başlangıç anında hızlı bir şekilde alanını artırıp hızlı bir şekilde tekrar azalttığı söylenebilir. 160 ve 400 µm gözeneklere sahip plakalarda ise su damlasının alanı artış göstermeksizin doğrudan azalmaktadır. 160 µm plaka üzerinde su damlasının izdüşüm alanının azalışı 400 µm gözeneklere sahip plaka üzerindeki su damlasının izdüşüm alanının azalışından daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu durum, grafikte uydurulan 2. dereceden eğrilerin katsayılarında açıkça görülmektedir. Deneyin ortalarında damla izdüşüm alanı azalmaya devam etmiştir ve gözenekler büyüdükçe daha hızlı azalma gözlenmiştir. Deneyin son kısmında ise daha büyük gözeneklere sahip plakalarda bulunan su damlası diğer plakalardaki su damlasına göre daha hızlı azalmıştır.



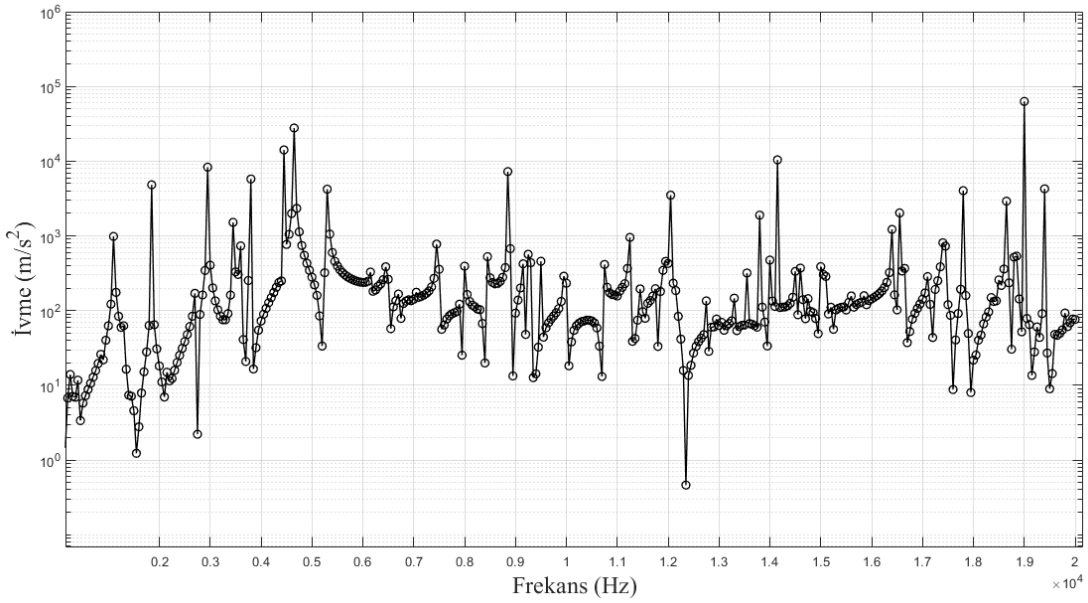
Şekil 4.10: Gözenek boyutunun etkisine göre 30 µl su damlasının alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan eğrilerin katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 4.10’da gözenekli ve gözeneksiz plakalara ait 30 µl hacimli su damlalarının izdüşüm alan değişimi fonksiyonlarına uydurulan 2. dereceden eğrilerin katsayılarının grafiği gösterilmiştir. Bu eğrilerin katsayılarına bakarak, 20 µl su hacmine sahip damlada görülen duruma benzer durumların, su hacmi 30 µl olduğunda da gözlenmiştir. Yani, 80 µm gözenekli yüzeylerdeki su damlalarının izdüşüm alanı atomizasyon başlangıcında hızla artmakta ve daha sonra hızla azalmaktadır. 160 ve 400 µm gözenekli plakalarda ise su damlasının izdüşüm alanı doğrudan azalmaktadır. Gözeneksiz plakada ise su damlasının ilk durumdan deneyin ortalarına kadar neredeyse sabit kalır ve ardından yavaşça azalmaya başlar. Bu sonuçlar, 30 µl su hacmine sahip damlalarda ve 20 µl su hacmine sahip damlalarda benzer şekilde gerçekleşmiştir. 20 µl su hacmine sahip damlaların izdüşüm alan değişimine uydurulan eğrilerin katsayıları genellikle 30 µl su hacmine sahip damlalardan daha büyük olmuştur. Bu yüzden 20 µl hacimli damlanın atomizasyonu 30 µl hacimli damlaya göre daha hızlı gerçekleştiği sonucuna varılabilir.

4.5 Plakanın Uygulanan Frekansa Tepkisinin Nümerik Olarak Eldesi

Bu çalışmada, ANSYS Birleştirilmiş Alan Harmonik Analiz modül ile piezoelektrik disk tarafından zorlanan titreşim altında plakanın yapısal tepkileri simüle edilmiştir. Harmonik analiz, deney düzeneğinin yapısının bir frekans aralığında periyodik bir yüklemeye tepkisini hesaplamak için kullanılmıştır ve sonuç, deney plakasının yapısıyla ilgili değerli dinamik karakteristik bilgiler sağlamak için ivme - frekans grafiğinde çizdirilmiştir.

Elektriksel özellikler girildikten sonra, harmonik analiz ile plakanın piezoelektrik disk etkisi altındaki tepkisi ivme frekans grafiği şeklinde Şekil 4.11’de elde edilmiştir.



Şekil 4.11: Nümerik analiz ile elde edilen ivme-frekans grafiği

Birleştirilmiş alan harmonik analizi sonuçlarına göre, frekans ivme grafiği incelendiğinde 19000 Hz’de en yüksek ivme değerine ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 4.11’de gösterilen deneysel olarak elde edilen frekans ivme grafiğinden atomizasyon için çalışma frekansı 18700 Hz değeri elde edilmiştir. Bu frekans değerleri sistemin çalışma frekansları olarak hem sonlu elemanlar analizi ile hem de deneysel analiz ile elde edilmiştir. Bulunan iki değer de birbirine yakın değerlerdir. Nümerik analiz

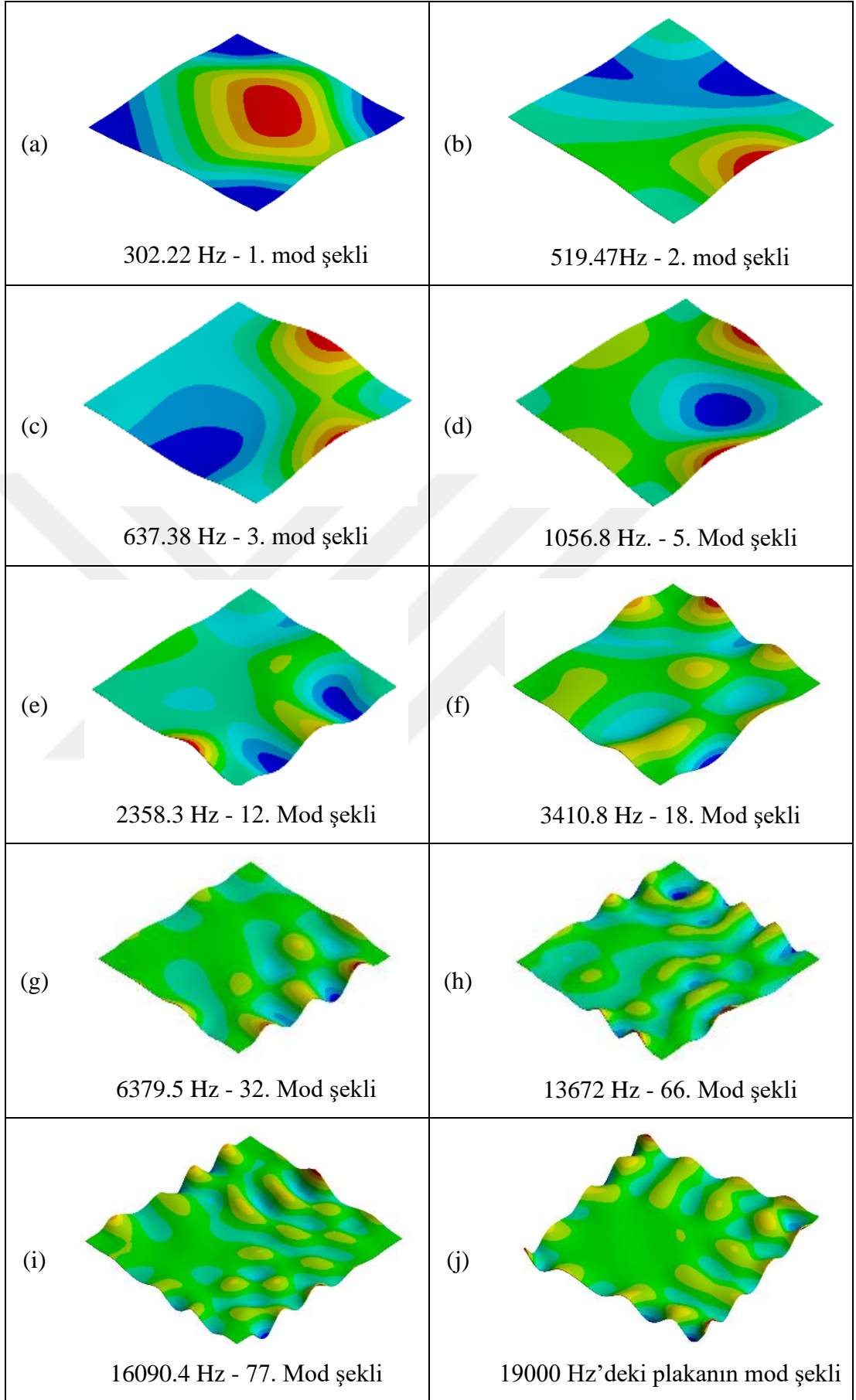
sonucu deneysel analizi desteklemiştir. Analiz için kullanılan modelde, gerçek sistemde bulunan bazı faktörlerin tam olarak yansıtılamaması mümkündür. Deney sırasında ortaya çıkan dış etkenler, örneğin ortam şartları veya diğer elektriksel veya mekanik etkileşimler, sonuçları etkileyebilir ve seçilen frekansta farklılıklara neden olabilir. Kullanılan ölçüm cihazları, hassasiyetleri veya kalibrasyon durumlarına bağlı olarak sapma gösterebilir. Bu sebeplerle deneysel ile nümerik analiz arasındaki fark göz ardı edilebilir.

Deney sisteminin rezonans frekanslarını ifade eden doğal frekans noktaları birleştirilmiş alan modal analiz yapılarak belirlenmiştir. Tablo 4.6'da listelenen frekans değerleri, deney sisteminizin titreşim özelliklerini ve rezonans noktalarını anlamamıza yardımcı olmaktadır. Her bir frekans değeri, sistemin belirli bir titreşim modunu temsil etmektedir.

Mod şekli, bir sistem veya malzeme üzerindeki titreşim desenini ifade eder. Analiz süreçlerinde büyük öneme sahip olan mod şekilleri, sistem veya malzemenin dinamik davranışını anlamamıza yardımcı olur. Mod şekilleri, titreşim enerjisinin nasıl dağıldığını ve kritik bölgeleri belirlememizi sağlar. Şekil 4.12'de, birleştirilmiş alan modal analiz ile belirlenen plakanın bazı doğal frekans değeri için mod şekilleri gösterilmektedir. Şekil 4.12(a)'da, 302.22 Hz frekansında 1. mod şekli, (b)'de 519.47Hz'de 2. mod şekli, (c)'de, 637.38 Hz frekansında 3. mod şekli, (d)'de 1056.8 Hz frekansındaki 5. Mod şekli, (e)'de 2358.3 Hz frekansındaki 12. Mod şekli, (f)'de 3410.8 Hz frekansındaki 18. Mod şekli, (g)'de 6379.5 Hz frekansındaki 32. Mod şekli, (h)'de 13672 Hz frekansındaki 66. Mod şekli, (i)'de 16090.4 Hz frekansındaki 77. Mod şekli, (j)'de ise 19000 Hz'deki plakanın mod şekli gösterilmiştir

Tablo 4.6: Birleştirilmiş alan modal analiz sonuçlarına göre gözeneksiz plakanın ilk 100 modu

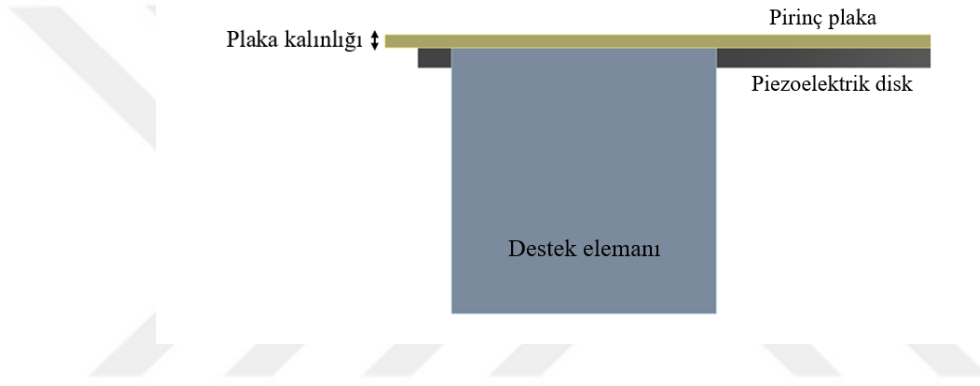
Mod	Frekans (Hz)	Mod	Frekans (Hz)	Mod	Frekans (Hz)	Mod	Frekans (Hz)
1	302.22	26	5036.6	51	10396	76	15788
2	519.47	27	5312.3	52	10670	77	16090
3	637.38	28	5344.9	53	10840	78	16145
4	653.31	29	5761.5	54	11012	79	16345
5	1056.8	30	5845.7	55	11285	80	16454
6	1255.3	31	6129.6	56	11371	81	16664
7	1425.5	32	6379.5	57	11576	82	17008
8	1688.9	33	6555.2	58	11848	83	17089
9	1734.1	34	6760.5	59	12105	84	17604
10	1983.9	35	6874.6	60	12155	85	17692
11	2190.8	36	7153.2	61	12388	86	17828
12	2358.3	37	7368.5	62	12680	87	18248
13	2486.7	38	7406.7	63	13064	88	18413
14	2572.2	39	7530.9	64	13313	89	18564
15	2821	40	7941.6	65	13614	90	18761
16	3191.4	41	8003.9	66	13672	91	19181
17	3281.5	42	8443.3	67	13837	92	19245
18	3410.8	43	8701.1	68	14061	93	19481
19	3542.6	44	8849.8	69	14152	94	19654
20	3811.1	45	8918.8	70	14585	95	20000
21	4049.9	46	9300.8	71	14797	96	20041
22	4295.5	47	9364.9	72	15009	97	20341
23	4447.2	48	9698.9	73	15117	98	20771
24	4867.2	49	9766.6	74	15361	99	20852
25	4937	50	10090	75	15613	100	21202



Şekil 4.12: Gözeneksiz plakanın mod şekilleri

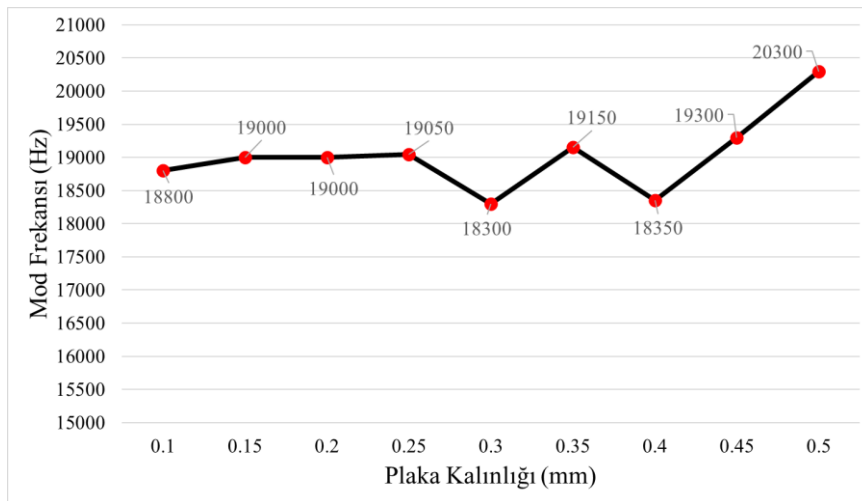
4.5.1 Plakanın Tepkisinin Plaka Kalınlığına Göre Değişimi

Deneyde kullanılan plaka 0.15 mm kalınlığa sahip plakadır ve yapılan birleştirilmiş alan harmonik analizi ile 19 kHz değerinde en yüksek tepe noktasına ulaşarak, deneysel olarak elde edilen 18.7 kHz değerindeki çalışma frekansına yaklaşmıştır. Ayrıca, bu analiz sayesinde plaka kalınlığı değişikçe plakanın en yüksek ivme değerinin hangi frekanslarda ortaya çıkacağı durumu nümerik olarak değerlendirilmiştir. Plaka kalınlığı Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Plakanın boyutları, malzeme özellikleri ve sınır koşullarının değiştirilmesi ile daha çeşitli analizler de gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.13: Plaka kalınlığının şematik gösterimi

Plaka kalınlığı değiştirilip birleştirilmiş alan harmonik analizi yapılmıştır ve ivme-frekans değerleri elde edilmiştir. Her bir kalınlık için maximum ivme değerinin olduğu frekans değerleri Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14: Plaka kalınlığına göre en yüksek ivmenin frekansı grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yüksek frekans ile titreşim yapan gözenekli ve hidrofobik plakalar üzerinde su damlalarının davranışı deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, gözeneksiz plaka ve 80 µm, 160 µm ve 400 µm çaplara sahip gözenekli pirinç plakalar üretilmiştir. Hidrofobik sprej kullanılarak gözeneksiz pirinç plaka hidrofobik kaplanmış ve su damlasının hidrofobik özellikli yüzey üzerindeki davranışı da incelenmiştir. Ayrıca, hidrofobik özelliklerin su damlası ve plaka yüzeyi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Araştırma bulguları ve tartışmalar şu şekilde belirtilmiştir.

Araştırma bulgularına göre, gözenekli plakaların yüzey morfolojisi ve gözenek çapı su damlasının davranışını etkilemektedir. Su damlası, yüksek frekanslı titreşimlerin etkisiyle küçük parçalara ayrılarak atomize olabilmekte, gözeneklerden geçebilmekte ve plaka yüzeyinde hareket edebilmektedir. Literatürde benzer bulguları Sarı ve ark. [49] da elde etmiştir. Çalışmalarında gözenekli plaka üzerine yerleştirilen damla yüzeyinden küçük damlacıkların bir kısmının damla yüzeyinden havaya fırlatıldığı, bir kısmının ise gerekli ilk ivme değeri sağlandığında gözeneklerden plakanın alt yüzeyine emildiğini gözlemlemişlerdir.

Gözenekli plakaların üretim yönteminden kaynaklanan, plakanın alt yüzeyi ve üst yüzeyi arasındaki çap farkı, plaka kesitinde konik bir yapı oluşturur. Plaka uyarıldığında, gözeneklerdeki havanın hızı artar ve basınç azalır. Bu nedenle, gözenek içinde bir emme kuvveti oluşur ve bu kuvvet damla üzerine etki eder. Damla, emme kuvvetinin etkisiyle plakanın içine doğru emilir ve suyun gözeneklerden çekilmesi sağlanır. Bu durum Peng ve ark. [38], Dupuis ve ark. [39], Patel ve ark. [41] ve Sarı ve ark. [49] çalışmalarında görüldüğü gibi bu tez çalışmasında da gözlenmiştir.

Gözenek çapları arttıkça suyun atomize olma süresi azalmıştır. Gözeneksiz plakanın suyu üzerinden uzaklaştırması en uzun süren plaka olmuştur. Gözeneklerin varlığı bu süreyi azaltmaktadır. En ufak gözeneklere sahip plaka olan 80 µm çaplı gözeneklere sahip plakadaki su damlası, gözeneksiz plakadaki su damlasına göre yaklaşık %70 daha hızlı atomize olmuştur. Gözenek çapı 400 mikrometreye yaklaştıkça, gözeneksiz plakaya göre %90'ın üzerinde daha hızlı atomizasyon gerçekleşme hızlarına ulaşmıştır.

Araştırma bulgularına göre, hidrofobik plakaların yüzey morfolojisi su damlasının davranışını etkilemektedir. Hidrofobik kaplama, plakada yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Profilometre ile yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm analizlerinin sonuçlarına göre hidrofobik kaplı gözeneksiz plakanın yüzey pürüzlülüğü hidrofobik olmayan gözeneksiz plakaya göre daha fazladır.

Hidrofobik kaplama ayrıca su damlasının temas açısını artırmıştır. Deneyle elde edilen verilere göre hidrofobik plaka ile hidrofobik olmayan plaka arasında ortalama olarak 12°'lik bir temas açısı farkı bulunmaktadır. Hidrofobik kaplanan plakalardan alınan tüm damlacıkların temas açıları 90° 'den daha büyüktür. Bu nedenle kaplanmış plakanın hidrofobik davranış sergilediği kesinlikle söylenebilir. Hidrofobik kaplanan plaka üzerindeki su damlası, hidrofobik olmayan plaka üzerindeki su damlasına göre yaklaşık %35 daha hızlı atomize olmuştur.

20 µl ve 30 µl olmak üzere iki farklı su hacminde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu durum temas açısında ve atomizasyon davranışını etkilemektedir. Hem hidrofobik yüzeyde hem de normal yüzeyde küçük hacimli damlacığın temas açısı, büyük hacimli damlacıklara kıyasla daha yüksek ölçülmüştür. Ayrıca, küçük hacimli damlacıklar, tüm plakalarda büyük hacimli damlacıklara göre daha hızlı atomizasyon gerçekleştirmiştir. Bu yüzden, damlacık hacmi azaldıkça damlanın temas açısı artmakta ve atomizasyon süreci daha hızlı tamamlanmaktadır.

Deney numunelerinin yüzeyinden lazer vibrometre kullanılarak alınan ivme değerleri 2.3 km/s² ile 2.45 km/s² arasında değişmekle beraber birbirlerine yakın değerlerdir. Gözeneksiz plaka en düşük ivme değerine sahiptir ve gözeneksiz pirinç plakada su damlası uzun bir süre boyunca kararlı halini korumuş ve ardından atomize olmuştur. Bu durum, Sarı ve ark. [49] çalışması ile gösterdikleri ivme değerinin arttıkça özellikle deneyin başlangıcında damlanın yayılmasında önemli bir rol oynadığı gözlemlerine uyumluluk göstermiştir. Bunun nedeni ise, James ve ark. [14] ile Sarı ve Aydın'ın da [136] incelediği enine yönde harmonik olarak zorlanan plakanın deney başlangıcında geçici davranış sergilemesidir. Bu çalışmalarda, sistem geçici davranış sergilediğinde damla atomizasyon hızının arttığı, ancak kararlı durum davranışı sergilediğinde hızın azaldığı sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışmasında 80, 160 ve 400 µm gözenekli plakalarda ivme değerleri neredeyse aynıdır, dolayısıyla başlangıçtaki damla yayılması durumu gözenek

boyutları ve hidrofobik özelliğın varlığında kaynaklandığı söylenebilir. 80 µm gözenekli bir plakada, su damlasının izdüşüm alanının önce arttığı ve daha sonra azaldığı gözlemlenmiştir. Bu plakada, başlangıçta hızlı bir artış ve azalma meydana gelmiş, ardından düzenli bir azalma gerçekleşmiştir. 160 ve 400 µm gözenekli plakalarda ise başlangıçtan itibaren sürekli bir azalma gözlenmiştir. Bunun nedeni başlangıçta suyun gözeneklerden emilmesi için 80 µm gözeneklerin küçük olmasıdır. 160 ve 400 µm gözenekli plakalarda ise başlangıçta su gözeneklerden emilebilmiştir. Hidrofobik kaplama yapılmış gözeneksiz pirinç plakada ise su damlasının izdüşüm alanının önce arttığı ardından hidrofobik olmayan plakaya göre daha hızlı bir şekilde alanının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemlere dayanarak, şu sonuçlara ulaşılabilir:

- Hidrofobik plakada gerçekleştirilen atomizasyon, hidrofobik olmayan plakada gerçekleştirilen atomizasyona göre daha hızlı sona ermiştir, hidrofobiklik atomizasyon süresini azaltmıştır [27,29]. Hidrofobik plakada gerçekleştirilen deneylerde, plakaya verilen ilk ivme ile birlikte su damlasının yapısı bozulmuş, buna bağlı olarak izdüşüm alanında artış gözlemlenmiş ve ardından hidrofobik olmayan plakaya göre daha hızlı bir şekilde alanının azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise suyun temas açısını artırılarak katı yüzeye daha az temas etmesinin sağlanması ve dolayısıyla suyun sıvı-hava arayüzündeki atomizasyonunun hızlandırılması olmuştur.
- Gözenekli plakalarda gözenek boyutu arttıkça atomizasyon süresi azalmıştır. Yan ve ark. [43] makalelerinde belirttiği atomizasyon hızının artan mikrokonik gözenek çapı ile sonucu ile uyumluluk göstermiştir. Gözenekli plakada gerçekleşen atomizasyonda saf su damlası hem gözeneklerden emilmiş hem de sıvı-hava arayüzünde atomize olmuştur. Peng ve ark. [38] Dupuis ve ark. [39,40] ve Patel ve ark. [41]. Ayrıca, gözeneksiz plakada su damlasının herhangi bir gözenekten geçememesi durumu atomizasyonun sadece havaya damlacık fırlatarak gerçekleşmesinden dolayı deney süresi en uzun olan deney olmuştur.

Birleştirilmiş alan harmonik analizi sonuçlarına göre, frekans ivme grafiği incelendiğinde 19 kHz'de en yüksek ivme değerine ulaşıldığı görülmüştür. Deneysel analizle elde edilen atomizasyonun çalışma frekasının seçimi için plakanın merkezinden lazer vibrometre ile frekansa karşılık ivme değerleri alınmıştır. Elde

edilen sonuçlara göre çalışma frekansı 18.7 kHz olarak elde edilmiştir. Yapılan nümerik analiz ile bulunan 19 kHz değeri de deneysel sonuca yakın bir değerdir.

Bu deneylerin sonuçlarına dayanarak şu sonuçlar çıkarılabilir. Bu çalışma, plakanın hidrofobik kaplamasının ve gözenekli plakanın su damlasının davranışını etkilediğini göstermektedir. Bu bulgular, suyun atomizasyonu konusunda gözenekli bileşenlerin kullanılması veya kullanılmaması durumunda hidrofobik yüzeylerin elde edilmesi için önemli bir adım olabilir.

Bu konuyla ilgili gelecekte yapılacak çalışmalar aşağıdaki alanlara odaklanabilir:

Gözenekli plakaların suyun atomizasyonunda etkinliğini artırmak için daha fazla deneysel ve hesaplamalı çalışmalar yapılabilir. Gözenek boyutu, şekli, düzenlemesi ve dağılımı gibi faktörlerin su damlalarının davranışı üzerindeki etkileri daha ayrıntılı olarak incelenebilir.

Su itici özelliklere sahip kaplamaların su damlalarının atomizasyonundaki etkinliği artırabileceği yapılan bu tez çalışması ile gösterilmiştir. Gelecekte, daha gelişmiş hidrofobik kaplama malzemeleri ve teknikleri üzerinde çalışmalar yapılabilir.

Bu çalışmanın sonuçları, suyun atomizasyonu dışında başka uygulama alanlarında da değerli olabilir. Örneğin, tarım, kimya, ilaç endüstrisi gibi alanlarda, sıvıların hassas bir şekilde dağıtılması veya püskürtülmesi gereken durumlarda gözenekli elemanlar veya hidrofobik yüzeylerin kullanımı değerlendirilebilir. Bu alanlarda yapılabilecek çalışmalar, daha verimli ve kontrollü sıvı dağıtımını sağlayan yeni yöntemlerin geliştirilmesine odaklanabilir.

Bu çalışmanın sonuçları, endüstriyel süreçlerde suyun atomizasyonunun iyileştirilmesi için potansiyel olarak kullanılabilir. Endüstriyel üretim, enerji üretimi, kimyasal işlemler gibi alanlarda, gözenekli elemanların veya hidrofobik yüzeylerin uygulanabilirliği ve avantajları daha fazla araştırılabilir.

Sonuç olarak, gelecekteki çalışmalar bu konuyla ilgili daha derinlemesine anlayış sağlayabilir, yeni teknikler ve malzemeler geliştirebilir ve potansiyel uygulama alanlarını keşfedebilir. Bu çalışmalar, suyun atomizasyonu ile ilgili sorunları çözmek ve daha verimli çözümler sunmak için önemli bir adım olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] Kelvin, W. (1871). Hydrokinetic solutions and observations. *Phil. Mag. Series 4*.
- [3] Rayleigh, L. (1883). 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.
- [4] Lang, R. J. (1962). Ultrasonic atomization of liquids. *The journal of the acoustical society of America*, 34(1), 6-8.
- [5] Goodridge, C. L., Shi, W. T., Hentschel, H. G. E., & Lathrop, D. P. (1997). Viscous effects in droplet-ejecting capillary waves. *Physical Review E*, 56(1), 472.
- [6] Yule, A. J., & Al-Suleimani, Y. (2000). On droplet formation from capillary waves on a vibrating surface. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 456(1997), 1069-1085.
- [7] Vukasinovic, B., Glezer, A., & Smith, M. K. (2002). Droplet formation during the atomization of a viscous liquid. *Physics of Fluids*, 14(9), S6-S6.
- [8] Avvaru, B., Patil, M. N., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2006). Ultrasonic atomization: effect of liquid phase properties. *Ultrasonics*, 44(2), 146-158.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Vukasinovic, B., Glezer, A., & Smith, M. K. (2001). Mode shapes of a sessile drop in forced vibration. *Physics of Fluids*, 13(9), S14-S14.
- [12] Rajan, R., & Pandit, A. B. (2001). Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation. *Ultrasonics*, 39(4), 235-255.
- [13] Barreras, F., Amaveda, H., & Lozano, A. (2002). Transient high-frequency ultrasonic water atomization. *Experiments in Fluids*, 33, 405-413.

- [14] James, A. J., Vukasinovic, B., Smith, M. K., & Glezer, A. (2003). Vibration-induced drop atomization and bursting. *Journal of Fluid Mechanics*, 476, 1-28.
- [15] James, A. J., Smith, M. K., & Glezer, A. (2003). Vibration-induced drop atomization and the numerical simulation of low-frequency single-droplet ejection. *Journal of Fluid Mechanics*, 476, 29-62.
- [16] Vukasinovic, B., Smith, M. K., & Glezer, A. (2004). Spray characterization during vibration-induced drop atomization. *Physics of Fluids*, 16(2), 306-316.
- [17] Palan, V., & Shepard Jr, W. S. (2006). Enhanced water removal in a fuel cell stack by droplet atomization using structural and acoustic excitation. *Journal of power sources*, 159(2), 1061-1070.
- [18] Donnelly, T. D., Hogan, J., Mugler, A., Schommer, N., Schubmehl, M., Bernoff, A. J., & Forrest, B. (2004). An experimental study of micron-scale droplet aerosols produced via ultrasonic atomization. *Physics of Fluids*, 16(8), 2843-2851.
- [19] Ramisetty, K. A., Pandit, A. B., & Gogate, P. R. (2013). Investigations into ultrasound induced atomization. *Ultrasonics sonochemistry*, 20(1), 254-264.
- [20] Chen, X., Doughramaji, N., Betz, A. R., & Derby, M. M. (2017). Droplet ejection and sliding on a flapping film. *AIP Advances*, 7(3), 035014.
- [21] Deepu, P., Peng, C., & Moghaddam, S. (2018). Dynamics of ultrasonic atomization of droplets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 92, 243-247.
- [22] Deepu, P., Basu, S., Saha, A., & Kumar, R. (2012). Spreading and atomization of droplets on a vibrating surface in a standing pressure field. *Applied Physics Letters*, 101(14), 143108.
- [23] Candia-Muñoz, N., Gaete-Garretón, L., Vargas-Hernández, Y., & Meneses-Díaz, J. (2017, December). Spreading of water drop on a vibrating surface. In *Proceedings of Meetings on Acoustics 6ICU (Vol. 32, No. 1, p. 032005)*. Acoustical Society of America.
- [24] Boscariol, C., Chandra, S., Sarker, D., Crua, C., & Marengo, M. (2018). Drop impact onto attached metallic meshes: liquid penetration and spreading. *Experiments in Fluids*, 59, 1-13.
- [25] Zhang, H., Zhang, X., Yi, X., He, F., Niu, F., & Hao, P. (2020). Dynamic behaviors of droplets impacting on ultrasonically vibrating surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 112, 110019.

- [26] Kim, H., & Lim, H. C. (2015). Mode pattern of internal flow in a water droplet on a vibrating hydrophobic surface. *The Journal of Physical Chemistry B*, 119(22), 6740-6746.
- [27] Wejrzanowski, T., Jacob, S., Winkler, A., González-Elipe, A. R., & Borrás, A. (2022). Atomic scale modeling of water and ice behavior on vibrating surfaces: towards design of Surface Acoustic Wave anti-icing and de-icing systems.
- [28] Wang, M., Wan, Y., & Xin, G. (2023). Vibration-induced evaporation and boiling of water nanofilm on rough surfaces. *Applied Surface Science*, 607, 155017.
- [29] Jiang, X., Xu, E., Wu, G., & Li, H. Z. (2020). Drop impact on superhydrophobic surface with protrusions. *Chemical Engineering Science*, 212, 115351.
- [30] Galleguillos-Silva, R., Vargas-Hernández, Y., & Gaete-Garretón, L. (2017). Wettability of a surface subjected to high frequency mechanical vibrations. *Ultrasonics sonochemistry*, 35, 134-141.
- [31] Dong, L., Chaudhury, A., & Chaudhury, M. K. (2006). Lateral vibration of a water drop and its motion on a vibrating surface. *The European Physical Journal E*, 21, 231-242.
- [32] Sarasua, J. A., Rubio, L. R., Aranzabe, E., & Vilela, J. L. V. (2021). Energetic study of ultrasonic wettability enhancement. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79, 105768.
- [33] Yu, X., Zhang, Y., Hu, R., & Luo, X. (2021). Water droplet bouncing dynamics. *Nano Energy*, 81, 105647.
- [34] Hassan, M. R., Zhang, J., & Wang, C. (2021). Digital microfluidics: Magnetic transportation and coalescence of sessile droplets on hydrophobic surfaces. *Langmuir*, 37(19), 5823-5837.
- [35] Milne, A. J. B., & Amirfazli, A. (2009). Drop shedding by shear flow for hydrophilic to superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, 25(24), 14155-14164.
- [36] Noblin, X., Buguin, A., & Brochard-Wyart, F. (2009). Vibrations of sessile drops. *The European Physical Journal Special Topics*, 166(1), 7-10.
- [37] Dong, L., Chaudhury, A., & Chaudhury, M. K. (2006). Lateral vibration of a water drop and its motion on a vibrating surface. *The European Physical Journal E*, 21, 231-242.

- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Dupuis, E. D., Momen, A. M., Patel, V. K., & Shahab, S. (2018, September). Ultrasonic piezoelectric atomizers: electromechanical modeling and performance testing. In *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* (Vol. 51944, p. V001T04A027). American Society of Mechanical Engineers.
- [41] 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).
- [42] Yan, Q., Sun, W., & Zhang, J. (2022). Study on the formation and separation process of droplets in the medical piezoelectric atomization device induced by intra-hole fluctuation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 1-12.
- [43] Yan, Q., Sun, W., & Zhang, J. (2020). Study on the influencing factors of the atomization rate in a piezoceramic vibrating mesh atomizer. *Applied Sciences*, 10(7), 2422.
- [44] Yan, Q., Sun, W., Zhang, L., Wang, H., & Zhang, J. (2021). 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.
- [45] Hsieh, S. S., Huang, C. F., & Lu, Y. M. (2020). Water spray heat transfer through a piezoelectric atomizer with a single-hole micronozzle. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34, 3427-3436.
- [46] Kuo, Y. M., Chan, W. H., Lin, C. W., Huang, S. H., & Chen, C. C. (2019). Characterization of vibrating mesh aerosol generators. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(8), 1678-1687.

- [47] Lee, H. J., Guerra-Bravo, E., Baltazar, A., & Loh, K. J. (2021). Atomization control to improve soft actuation through vaporization. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 747440.
- [48] Guerra-Bravo, E., Lee, H. J., Baltazar, A., & Loh, K. J. (2021). Vibration analysis of a piezoelectric ultrasonic atomizer to control atomization rate. *Applied Sciences*, 11(18), 8350.
- [49] Sari, 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.
- [50] Goodridge, C. L., Shi, W. T., Hentschel, H. G. E., & Lathrop, D. P. (1997). Viscous effects in droplet-ejecting capillary waves. *Physical Review E*, 56(1), 472.
- [51] Taylor, G. I. (1950). The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 201(1065), 192-196.
- [52] Lang, R. J. (1962). Ultrasonic atomization of liquids. *The journal of the acoustical society of America*, 34(1), 6-8.
- [53] Zhang, Y., Yuan, S., & Wang, L. (2021). Investigation of capillary wave, cavitation and droplet diameter distribution during ultrasonic atomization. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 120, 110219.
- [54] Ezerskii, A. B., Korotin, P. I., & Rabinovich, M. I. (1985). Random self-modulation of two-dimensional structures on a liquid surface during parametric excitation. *JETP Lett*, 41(4), 129-131.
- [55] Tuffillaro, N. B., Ramshankar, R., & Gollub, J. P. (1989). Order-disorder transition in capillary ripples. *Physical review letters*, 62(4), 422.
- [56] Ciliberto, S., & Gollub, J. P. (1985). Chaotic mode competition in parametrically forced surface waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 158, 381-398.
- [57] Longuet-Higgins, M. S. (1983). Bubbles, breaking waves and hyperbolic jets at a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 127, 103-121.
- [58] Tjahjadi, M., Stone, H. A., & Ottino, J. M. (1992). Satellite and subsatellite formation in capillary breakup. *Journal of Fluid Mechanics*, 243, 297-317.

- [59] Eggers, J., & Dupont, T. F. (1994). Drop formation in a one-dimensional approximation of the Navier–Stokes equation. *Journal of fluid mechanics*, 262, 205-221.
- [60] Brenner, M. P., Shi, X. D., & Nagel, S. R. (1994). Iterated instabilities during droplet fission. *Physical review letters*, 73(25), 3391.
- [61] Goodridge, C. L., Shi, W. T., & Lathrop, D. P. (1996). Threshold dynamics of singular gravity-capillary waves. *Physical review letters*, 76(11), 1824.
- [62] Neppiras, E. A., & Noltingk, B. E. (1951). Cavitation produced by ultrasonics: theoretical conditions for the onset of cavitation. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(12), 1032.
- [63] Gogate, P. R., Shirgaonkar, I. Z., Sivakumar, M., Senthilkumar, P., Vichare, N. P., & Pandit, A. B. (2001). Cavitation reactors: efficiency assessment using a model reaction. *AIChE journal*, 47(11), 2526-2538.
- [64] Koda, S., Kimura, T., Kondo, T., & Mitome, H. (2003). A standard method to calibrate sonochemical efficiency of an individual reaction system. *Ultrasonics sonochemistry*, 10(3), 149-156.
- [65] Feng, R., Zhao, Y., Zhu, C., & Mason, T. J. (2002). Enhancement of ultrasonic cavitation yield by multi-frequency sonication. *Ultrasonics sonochemistry*, 9(5), 231-236.
- [66] Wayment, D. G., & Casadonte Jr, D. J. (2002). Design and calibration of a single-transducer variable-frequency sonication system. *Ultrasonics Sonochemistry*, 9(4), 189-195.
- [67] Chakinala, A. G., Gogate, P. R., Chand, R., Bremner, D. H., Molina, R., & Burgess, A. E. (2008). Intensification of oxidation capacity using chloroalkanes as additives in hydrodynamic and acoustic cavitation reactors. *Ultrasonics sonochemistry*, 15(3), 164-170.
- [68] Chakinala, A. G., Gogate, P. R., Burgess, A. E., & Bremner, D. H. (2007). Intensification of hydroxyl radical production in sonochemical reactors. *Ultrasonics sonochemistry*, 14(5), 509-514.
- [69] Arrojo, S., Nerin, C., & Benito, Y. (2007). Application of salicylic acid dosimetry to evaluate hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation process. *Ultrasonics sonochemistry*, 14(3), 343-349.

- [70] Lanier, N. E., Barnes, C. W., Perea, R., & Steckle, W. (2003). Feasibility of fluorescence-based imaging of high-energy-density hydrodynamics experiments. *Review of scientific instruments*, 74(3), 2169-2173.
- [71] Kouda, T., & Hagiwara, Y. (2005). An experimental study on turbulent swirling water flow with immiscible droplets. In *Fourth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*. Begel House Inc.
- [72] Kumar, A., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2007). Mapping of acoustic streaming in sonochemical reactors. *Industrial & engineering chemistry research*, 46(13), 4368-4373.
- [73] Boldo, P., Renaudin, V., Gondrexon, N., & Chouvellon, M. (2004). Enhancement of the knowledge on the ultrasonic reactor behaviour by an interdisciplinary approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(1), 27-32.
- [74] Sutkar, V. S., & Gogate, P. R. (2009). Design aspects of sonochemical reactors: techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters. *Chemical Engineering Journal*, 155(1-2), 26-36.
- [75] Boguslavski, Y. Y. (1969). Physical mechanism of the acoustic atomization of a liquid. *Sov. Phys. Acoust.*, 15, 14-21.
- [76] Mantini, G., Gao, Y., D'amico, A., Falconi, C., & Wang, Z. L. (2009). Equilibrium piezoelectric potential distribution in a deformed ZnO nanowire. *Nano Research*, 2(8), 624-629.
- [77] Gao, Z., Zhou, J., Gu, Y., Fei, P., Hao, Y., Bao, G., & Wang, Z. L. (2009). Effects of piezoelectric potential on the transport characteristics of metal-ZnO nanowire-metal field effect transistor. *Journal of applied physics*, 105(11), 113707.
- [78] Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242-246.
- [79] Mishra, S., Unnikrishnan, L., Nayak, S. K., & Mohanty, S. (2019). Advances in piezoelectric polymer composites for energy harvesting applications: a systematic review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 304(1), 1800463.
- [80] Kocaer, S. (2015). *Piezoelektrik Tahrikli Doğrusal Hareket Mekanizma Tasarımı*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2015, 83s., (Yüksek Lisans)

- [81] Sevgi, H. E. Piezoelektrik Yamalı Katmanlı Kompozit Bir Kirişin Titreşim Analizi ve Kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2009,149 s., (Yüksek Lisans)
- [82] Gandhi, M. V., & Thompson, B. D. Smart materials and structures. Springer Science & Business Media, 1992.
- [83] Moheimani, S. R., & Fleming, A. J. (2006). Piezoelectric transducers for vibration control and damping (Vol. 1). London: Springer.
- [84] Meitzler, A. H. H. F., Tiersten, H. F., Warner, A. W., Berlincourt, D., Couqin, G. A., & Welsh III, F. S. (1988). IEEE standard on piezoelectricity.
- [85] Fuller, C. C., Elliott, S. J., & Nelson, P. A. Active control of vibration. Academic press, 1996
- [86] Elzaabalawy, A., & Meguid, S. A. (2022). Advances in the development of superhydrophobic and icephobic surfaces. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 18(3), 509-547.
- [87] Erbil, H. Y. (2020). Industrial applications of superhydrophobic coatings: Challenges and prospects. Hacettepe Journal of Biology and Chemistry, 48(5), 447-457.
- [88] Barthlott, W., & Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202, 1-8.
- [89] Fürstner, R., Barthlott, W., Neinhuis, C., & Walzel, P. (2005). Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, 21(3), 956-961.
- [90] Roach, P., Shirtcliffe, N. J., & Newton, M. I. (2008). Progress in superhydrophobic surface development. *Soft matter*, 4(2), 224-240.
- [91] Erbil, H. Y., Demirel, A. L., Avcı, Y., & Mert, O. (2003). Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface. *Science*, 299(5611), 1377-1380.
- [92] Dorrer, C., & Rühle, J. (2009). Some thoughts on superhydrophobic wetting. *Soft Matter*, 5(1), 51-61.
- [93] Erbil, H. Y. Surface chemistry of solid and liquid interfaces. Wiley-Blackwell, 2006
- [94] Wenzel, R. N. (1936). Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28 (8), 988-994.

- [95] Cassie ABD, Baxter S (1944) Wettability of porous surfaces. *Trans Faraday Soc* 40:546–551
- [96] Law, K. Y., & Zhao, H. (2016). *Surface wetting: characterization, contact angle, and fundamentals*. Basel, Switzerland:: Springer International Publishing.
- [97] Han, W., Shin, J., & Shin, J. H. (2022). Low-cost, open-source contact angle analyzer using a mobile phone, commercial tripods and 3D printed parts. *HardwareX*, 12, e00327.
- [98] Huh, C., & Mason, S. G. (1977). Effects of surface roughness on wetting (theoretical). *Journal of colloid and interface science*, 60(1), 11-38.
- [99] Timmons, C. O., & Zisman, W. A. (1966). The effect of liquid structure on contact angle hysteresis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 22(2), 165-171.
- [100] Bhushan, B. (2000). Surface roughness analysis and measurement techniques. In *Modern tribology handbook, two volume set* (pp. 79-150). CRC press.]
- [101] Underwood, E. E. (1987). The analysis of nonplanar surfaces using stereological and other methods. *Acta Stereol.*, 6(3), 855-876]
- [102] Joniot, S., Salomon, J. P., Dejoui, J., & Grégoire, G. (2006). Use of two surface analyzers to evaluate the surface roughness of four esthetic restorative materials after polishing. *Operative dentistry*, 31(1), 39-46.
- [103] Measurement THOS Roughness parameters Mean roughness. 2023, “<http://www.rubert.co.uk/faqs/roughness-parameters/>”.
- [104] Contact-type surface roughness/profile measuring instruments, 2023, https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/equipment/surface_01.jsp
- [105] Ugural, A. C. *Plates and shells: theory and analysis*. CRC Press, 2017
- [106] Love, A. E. H. (1944). *A treatise on the mathematical theory of elasticity*, Dover Publications. New York, 1, 320.
- [107] J. Prescott, *Applied Elasticity*, Dover, New York, 1946
- [108] Reissner, E. (1945). The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates.
- [109] Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Topp, L. J. (1956). Stiffness and deflection analysis of complex structures. *journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805-823.

- [110] Vernon, J., 1992. "Introduction to Engineering Materials", pp. 203-205, Macmillan Pres Ltd., Hong Kong.
- [111] Meran, C. Piriñ Malzemelerin Kaynak Edilebilirliđi ve Uygun Kaynak Parametrelerinin Tespiti, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli, 2001, 211 s., (Doktora Tezi)
- [112] Leong, K. (2000). Drilling with lasers industrial applications for laser drilling depends on the reliability, cost, power. *Industrial laser solutions for manufacturing*, 39-46.
- [113] Tabata, N., Yagi, S., & Hishii, M. (1996). Present and future of lasers for fine cutting of metal plate. *Journal of materials processing technology*, 62(4), 309-314.
- [114] Meijer, J. (2004). Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *Journal of materials processing technology*, 149(1-3), 2-17.
- [115] Sundar, J. K. S., & Joshi, S. V. (2009). Laser cutting of materials, Centre for Laser Processing of Materials. International Advance Research Centre for Powder Metallurgy and New Materials, Hyderabad.
- [116] Pham, D. T., Dimov, S. S., & Petkov, P. V. (2007). Laser milling of ceramic components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3-4), 618-626.
- [117] Dubey, A. K., & Yadava, V. (2008). Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6), 609-628.
- [118] Chryssolouris, G. (2013). *Laser machining: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- [119] Rajurkar, K. P., Levy, G., Malshe, A., Sundaram, M. M., McGeough, J., Hu, X., ... & DeSilva, A. (2006). Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes. *CIRP annals*, 55(2), 643-666.
- [120] Arıca, B. Hidrofobik/Oleofobik Esaslı Fonksiyonel Yüzey Kaplama Materyallerinin Hazırlanması ve Geliştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2011, 87 s. (Yüksek Lisans)
- [121] Momen, G., & Farzaneh, M. (2011). Simple process to fabricate a superhydrophobic coating. *Micro & Nano Letters*, 6(6), 405-407.
- [122] Ma, M. ve Hill, R.M. (2006). Superhydrophobic surfaces. *Current opinion in colloid & interface science*. 11 (4). 193–202.

- [123] Weng, R., Zhang, H., & Liu, X. (2014). Spray-coating process in preparing PTFE-PPS composite super-hydrophobic coating. *Aip Advances*, 4(3), 031327.
- [124] Hwang, H.S., Kim, N.H., Lee, S.G., Lee, D.Y., Cho, K., ve Park, I. (2011). Facile fabrication of transparent superhydrophobic surfaces by spray deposition. *ACS applied materials & interfaces*. 3 (7). 2179–2183.
- [125] Eslamian, M., & Shekarriz, M. (2009). Recent advances in nanoparticle preparation by spray and microemulsion methods. *Recent Patents on Nanotechnology*, 3(2), 99-115.
- [126] Dağlı, S. Hidrofobik Yüzeylerin Isı Değiştirici Performansı Üzerine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun, 2023, 146 s. (Doktora Tezi)
- [127] Rao, S. S. *Vibration of continuous systems*. John Wiley & Sons, 2019
- [128] ANSYS, Inc. *ANSYS Couple Field Analysis Guide*, Release (1999) 36-3.
- [129] Marzuki, M. A. B., Abd Halim, M. H., & Mohamed, A. R. N. (2015). Determination of natural frequencies through modal and harmonic analysis of space frame race car chassis based on ANSYS. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(4), 538-548.
- [130] Nikon D700 Camera, 2023 “<https://www.nikonusa.com/en/nikon-products/product-archive/dslr-cameras/d7000.html>”
- [131] ImageJ, Contact Angle, 2023, “<https://imagej.nih.gov/ij/plugins/contact-angle.html>”
- [132] Piezoelectric Diaphragms, 7BB-35-3L0, Appearance & Shape, Specifications, 2023 “<https://www.murata.com/en-eu/products/productdetail?partno=7BB-35-3L0>”
- [133] Malgaca, L., & Uyar, M. (2018). Farklı Karakteristikli Piezoelektrik Algılayıcıların Dinamik Performanslarının Karşılaştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 840-851.
- [134] Brass UNS C28000, Mechanical and Physical Properties, 2023 “<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6380>”

- [135] Nitrile Rubber, Mechanical and Physical Properties, 2023
https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=75d3830136414f58802f3f8a1a1ed9a3
- [136] 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

