T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ÇOKLU FREKANSLI ATOMİK KUVVET MİKROSKOPİ TEORİSİNİN AKUSTİK KUVVETİN HASSAS ÖLÇÜMÜ İÇİN UYGULANMASI

Çağrı YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2022

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ÇOKLU FREKANSLI ATOMİK KUVVET MİKROSKOPİ TEORİSİNİN AKUSTİK KUVVETİN HASSAS ÖLÇÜMÜ İÇİN UYGULANMASI

Çağrı YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOKLU FREKANSLI ATOMİK KUVVET MİKROSKOPİ TEORİSİNİN AKUSTİK KUVVETİN HASSAS ÖLÇÜMÜ İÇİN UYGULANMASI

Çağrı YILMAZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 17/05/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL (Danışman)

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Prof. Dr. Sadettin ORHAN

Doç. Dr. Gültekin BASMACI

Dr. Öğretim Üyesi Mustafa HAMAMCI

ÖZET

ÇOKLU FREKANSLI ATOMİK KUVVET MİKROSKOPİ TEORİSİNİN AKUSTİK KUVVETİN HASSAS ÖLÇÜMÜ İÇİN UYGULANMASI

Çağrı YILMAZ

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

Mayıs 2022; 67 sayfa

Çoklu Frekanslı Atomik Kuvvet Mikroskobu (ÇF-AKM) ile kantilever ucu ile yüzey arasındaki etkileşim kuvvetleri ölçülebilmektedir. Etkileşim kuvvetlerinin yanısıra, ÇF-AKM tekniği ile akustik kuvvet ölçümü yapmak mümkündür. Akustik dalgalar, sahip oldukları enerji ile birlikte mikro yapıların yüzeylerine kuvvet uygulayabilmektedir. Çoklu frekanslı operasyonlarda rezonans frekanslarında sürülen kantileverin yüzeyinde akustik kuvvetten kaynaklı düzenli basınç yükleri etkili olmaktadır. Tez çalışmasında tek frekanslı ve ÇF-AKM operasyonları kullanılarak statik ve dinamik akustik kuvveti ölçüm hassasiyeti araştırılmıştır.

Statik akustik kuvvet ölçümünün hassasiyetinin arttırılması için kantilever tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ile sürülmektedir. Kantileverin yer değiştirmelerine dayalı olarak farklı akustik kuvvet şiddetleri için salınım genlikleri ve faz kaymaları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kantileverin her bir özmodu için bulunan virial ve güç yayılımı ile ilişkilendirilmiştir. Buna ilaveten, farklı tahrik kuvveti oranları için tek ve iki frekanslı operasyonlarda elde edilen akustik kuvvet şiddetine göre salınım gözlenebilirleri hassasiyeti araştırılmıştır.

Dinamik akustik kuvvetlerin varlığında kantileverin sürülmesi için tek ve iki frekanslı tahrik şemaları kullanılmıştır. Kantileverin ilk iki özmod frekansında aynı anda sürülmesi özmod frekanslarının etrafında olan akustik kuvvetlerin ölçümünde elde edilen gözlenebilirlerin ve enerji değişkenlerinin hassasiyetini arttırmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre 307.2 kHz frekansında ve 100 pN değerinde kuvvet şiddetine sahip dinamik akustik kuvvetin ölçümünde 178 derecede en yüksek faz kayması elde edilmiştir. Ayrıca, dinamik akustik kuvvetlerin varlığında kantileverin sürülmesi için çoklu frekanslı tahrik şemaları olarak iki frekanslı, üç frekanslı ve dört frekanslı tahrik şemaları kullanılmıştır. Nümerik çözümleme sonucu olarak kantileverin akustik kuvvetlere olan zaman alanındaki tepkileri, farklı tahrik şemaları için sunulmuştur, böylece serbest salınımlar, akustik kuvvetlere maruz kalan ve tahrik edilen kantileverin salınımları ile karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten, çeşitli kuvvet şiddetleri için akustik kuvvet frekanslarına göre ilk dört özmoddaki genlik tepkilerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre 1740 kHz frekansındaki 2900 pN'lik kuvvet şiddeti için dördüncü özmodda yaklaşık 0.303 nm'lik bir genlik tepkisi elde edilmiştir. Bu sonuç megahertz frekanslarındaki akustik kuvvetlerin, tetramodal operasyon altındaki

rezonanslı Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) kantileveri kullanılarak ölçülebildiğini kanıtlamaktadır.

Tez çalışmasında, ayrıca, ikinci özmodda tek ve iki frekanslı operasyonlar altındaki kantilever dizini kullanılarak dinamik akustik kuvvet ölçüm hassasiyeti incelenmiştir. Akustik kuvvet şiddetine bağlı olarak belirli frekans bandındaki akustik kuvvetlerin ölçümünde iki frekanslı tahrik şeması ile faz kayması hassasiyeti arttırılmıştır. Her iki tahrik şeması için salınım gözlenebilirleri farklı akustik kuvvet şiddetleri için akustik kuvvet frekansına göre hesaplanmıştır. Rezonans frekanslarında sürülen kantilever dizini kullanarak daha geniş yüksek hassasiyetli frekans bandı elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre 126-1138.5 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddeti için yaklaşık olarak 200-270 ve 440-570 kHz aralığında yüksek hassasiyetli frekans bantları elde edilmiştir. Akustik kuvvet etkileşimi sonucu yayılan enerji, çalışma ortamına iletilen enerji ve çoklu frekanslı tahrik şemasındaki mod etkileşimi dikkate alınarak açıklanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: AKM kantilever, Dinamik akustik kuvvet ölçümü, Faz kayması hassasiyeti, Genlik cevabı, Statik akustik kuvvet ölçümü, Tahrik şemaları, Virial teoremi.

JÜRİ: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Prof. Dr. Sadettin ORHAN

Doç. Dr. Gültekin BASMACI

Dr. Öğretim Üyesi Mustafa HAMAMCI

ABSTRACT

APPLICATION OF MULTIFREQUENCY ATOMIC FORCE MICROSCOPY THEORY FOR SENSITIVE ACOUSTIC FORCE MEASUREMENT

Çağrı YILMAZ

PhD Thesis in MECHANICAL ENGINEERING

Supervisor: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

May 2022; 67 pages

Interaction forces between the cantilever tip and the surface can be measured using Multi-Frequency Atomic Force Microscope (MF-AFM). In addition to the interaction forces, it is possible to measure acoustic force with the MF-AFM technique. Acoustic waves with their energy contents can exert forces on the surfaces of micro-structures. In multi-frequency operations, regular pressure loads originating from acoustic force are effective on the surface of the cantilever driven at resonance frequencies. In the thesis study, measurement sensitivity of static and dynamic acoustic forces is investigated using single-frequency and MF-AFM operations.

In order to increase the sensitivity of the static acoustic force measurement, the cantilever is driven with single and two frequency excitation schemes. Based on displacements of the cantilever, the oscillation amplitudes and phase shifts are calculated for different acoustic force strengths. The results are correlated with the virial and power dissipation for each eigenmode of the cantilever. In addition, the sensitivity of the oscillation observables is investigated with respect to the acoustic force strength in single and bimodal frequency operations for different driving force ratios.

Single and bimodal frequency excitation schemes are used to drive the cantilever in the presence of dynamic acoustic forces. Driving the cantilever at the first two eigenmode frequencies simultaneously increases the sensitivity of the observables and energy variables obtained in the measurement of acoustic forces around the eigenmode frequencies. According to the simulation results, the highest phase shift of 178 degrees is obtained in the measurement of the dynamic acoustic force with the frequency of 307.2 kHz and the force strength of 100 pN. In addition, two-frequency, three-frequency and four-frequency excitation schemes are used as multi-frequency excitation schemes to drive the cantilever in the presence of dynamic acoustic forces. As a result of the simulation, the time domain responses of the cantilever to acoustic forces are presented for different excitation schemes, so that the free oscillations are compared with the oscillations of the driven cantilever subjected to acoustic forces. Furthermore, the results of the amplitude responses at the first four eigenmodes for various force strengths are evaluated with respect to the acoustic force frequencies. According to the simulation results, the amplitude response of approximately 0.303 nm is obtained at the fourth eigenmode for the force strength of 2900 pN at the frequency of 1740 kHz. This result proves that acoustic forces at megahertz frequencies can be measured using a resonant Atomic Force Microscopy (AFM) cantilever under tetramodal operation.

In the thesis work, the sensitivity of dynamic acoustic force measurement is also investigated by using the cantilever array under single frequency operations at the second eigenmode frequency and bimodal frequency operations. In the measurement of acoustic forces within a certain frequency band, the phase shift sensitivity is increased using the bimodal frequency excitation scheme, depending on the acoustic force strength. Oscillation observables for both excitation schemes are calculated with respect to acoustic force frequency for different acoustic force strengths. A wider high-sensitivity frequency band is obtained using the cantilever array driven at resonance frequencies. According to the simulation results, high-sensitivity frequency bands in the range of approximately 200-270 and 440-570 kHz are acquired for the acoustic force strength in the range of 126-1138.5 pN. The energy dissipated as a result of the acoustic force interaction is described by considering the energy transmitted to the working environment and the mode interaction in the multi-frequency excitation scheme.

KEYWORDS: AFM cantilever, Amplitude response, Dynamic acoustic force measurement, Excitation schemes, Phase shift sensitivity, Static acoustic force measurement, Virial theorem.

COMMITTEE: Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

Prof. Dr. Volkan KOVAN

Prof. Dr. Sadettin ORHAN

Assoc. Prof. Dr. Gültekin BASMACI

Asst. Prof. Dr. Mustafa HAMAMCI

ÖNSÖZ

Doktora çalışması sürecinde çalışmalarıma yol gösterici olan, olumlu ve kararlı tutumları ile beni cesaretlendiren, bilimsel alandaki bilgi, birikim ve deneyimiyle çalışmalarıma farklı açılardan bakmamı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmayı yapmamda önemli katkıları bulunan ve tüm bilgi ve birikimleriyle, her şartta yanımda desteğini hissettiğim değerli hocam Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN'e sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana çalışma ortamı sağlayan Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü başta olmak üzere, mensubu olmaktan mutluluk ve gurur duyduğum Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu ve Fen Fakültesi Fizik Bölümü personel ve hocalarına da ayrı ayrı teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca benim yanımda olan, aldığım kararları ve doktora çalışmalarımı her zaman destekleyen ve başarılı olmam için beni cesaretlendiren annem Nazan YILMAZ'a, babam Dr. Ali YILMAZ'a ve kardeşim Mehmet Kağan YILMAZ'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Son olarak sadece bu çalışma sürecinde değil, evliliğimiz boyunca her türlü destek ve yardımını esirgemeyerek hayatıma ışık saçan sevgili eşim Dr. Seda YILMAZ'a ve varlığı ile hayatımıza renk ve anlam katan kızım Işıl YILMAZ'a sevgilerimi iletirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÖNSÖZ v
AKADEMİK BEYAN ix
SİMGELER VE KISALTMALAR x
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xvii
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 3
2.1. Atomik Kuvvet Mikroskobunun Çalışma Prensibi ve Temel Bileşenleri 3
2.1.1. Kantileverin özellikleri 4
2.1.2. Kantilever sapmasını ölçme 6
2.1.3. Kontrol elektroniği 8
2.1.4. Tarayıcılar ve ızgara tarama tekniği 9
2.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu ile Ölçülen Kuvvetler 11
2.2.1. Kısa menzilli itici kuvvetler 11
2.2.2. Kimyasal bağ kuvvetleri 12
2.2.3. Van der walls kuvvetleri 12
2.2.4. Manyetik kuvvetler 13
2.2.5. Elektrostatik kuvvetler 13
2.3. Atomik Kuvvet Mikroskobunun Temel Çalışma Modları 14
2.3.1. Kontak mod 14
2.3.2. Genlik modülasyonu 15
2.3.3. Frekans modülasyonu 16
2.4. Çoklu Frekanslı Atomik Kuvvet Mikroskobu 17
2.5. Literatür Özeti 18
3. MATERYAL VE METOD 22
3.1. Dinamik Model 22
3.1.1. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ile sürülen kantilever ile statik akustik kuvvet ölçümü 23

3.1.2. Tek ve çoklu frekanslı tahrik şemaları ile sürülen kantilever ile dinamik akustik kuvvet ölçümü 24
3.1.3. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ile sürülen kantilever dizini ile dinamik akustik kuvvet ölçümü 25
3.2. Enerji Korunumu Yasası ve Virial Teoreminin Uygulanması 26
3.3. Nümerik Hesaplama 27
3.3.1. Statik akustik kuvvet ölçümünde kantileverin tek ve iki frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri 27
3.3.2. Dinamik akustik kuvvet ölçümü 28
3.3.2.1. Kantileverin tek ve iki frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri 28
3.3.2.2. Kantileverin çoklu frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri 29
3.3.2.3 Kantilever dizininin tek ve iki frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri 30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 32
4.1. Tek ve İki Frekanslı Operasyonlardaki Kantileverin Statik Akustik Kuvvete Karşı Cevapları 32
4.1.1. Zaman alanı salınımları 32
4.1.2. Genlik ve faz kayması tepkileri 32
4.1.3. Virial ve yayılan güç 36
4.2. Tek ve Çoklu Frekanslı Operasyonlardaki Kantileverin Dinamik Akustik Kuvvete Karşı Cevapları 38
4.2.1. Tek ve iki frekanslı operasyonlar 38
4.2.1.1. Zaman alanı salınımları 39
4.2.1.2. Genlik ve faz kayması tepkileri 41
4.2.1.3. Enerji değişkenleri 42
4.2.1.4. Virial ve yayılan güç 43
4.2.2. Çoklu frekanslı operasyonlar 45
4.2.2.1. Zaman alanı salınımları 45
4.2.2.2. Genlik tepkileri 46

4.3. Tek ve İki Frekanslı Operasyonlardaki Kantilever Dizininin Dinamik Akustik Kuvvete Karşı Cevapları 47
4.3.1. Zaman alanı salınımları 48
4.3.2. Genlik ve faz kayması tepkileri 48
4.3.3. Virial ve yayılan güç 51
5. SONUÇLAR 56
6. KAYNAKLAR 59
7. EKLER 65
EK-1 Kantileverin etkili kütlesi 65
EK-2 Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları için yer değiştirmenin dönüştürülmesi 66
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Çoklu Frekanslı Atomik Kuvvet Mikroskopi Teorisinin Akustik Kuvvetin Hassas Ölçümü için Uygulanması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

17/05/2022

Çağrı YILMAZ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a_0	: Kütle orantılı sönümleme
a_1	: Yay sabiti orantılı sönümleme
A_{etkili}	: Kantileverin etkili yüzey alanı
A_i	: i özmodundaki genlik
b	: Özmod alt sınırı
c	: Özmod üst sınırı
d	: Piezo malzemenin birim uzama katsayısı
dB	: Desibel
D	: Silindirik piezo malzemenin dış çapı
E	: Young modülüsü
$E_{ortam,\ i}$	: i özmodunda çalışma ortamına iletilen enerji
$E_{tahrik,\ i}$	: i özmodunda tahrik kuvveti tarafından yapılan iş
$E_{yay,\ i}$	: i özmodunda akustik kuvvet etkisi ile yayılan enerji
$f_a, f_b, f_c, f_d, f_e, f_f, f_g, f_h, f_i$	: Simülasyondaki akustik kuvvet frekansları
f_{Ak}	: Akustik kuvvet frekansı
f_{ei}	: i özmodunda rezonans frekansı
F	: Net kuvvet
F_{Ak}	: Akustik kuvvet şiddeti
$F_{Akustik}$	: Akustik kuvvet
F_{di}	: i özmodundaki genelleştirilmiş dış kuvvet
F_{eb}	: Euler-Bernoulli toplam etkili kuvveti
F_i	: i özmodundaki tahrik kuvvet şiddeti
F_{tahrik}	: Tahrik kuvveti
$F_{tahrik,\ i}$	: i özmodundaki tahrik kuvveti

F_{ts} : Etkileşim kuvveti

G : Elektrostatik kuvvet gradyanı

I : Eylemsizlik momenti

J : Joule

k : Yay sabiti

k_g : Kilogram

kHz : Kilohertz

k_i : i özmodundaki yay sabiti

L : Kantilever uzunluğu

L_p : Silindirik piezo malzemenin boyu

m : Metre

m_k : Kantileverin toplam kütlesi

m_e : Kantileverin etkili kütlesi

m_{eff} : Gerinim sertleşme üssüne bağlı kantileverin etkili kütlesi

ms : Milisaniye

MHz : Megahertz

M_i : i özmodundaki genelleştirilmiş kütle

M_1 : Kantilever dizinindeki birinci kantilever

M_2 : Kantilever dizinindeki ikinci kantilever

M_3 : Kantilever dizinindeki üçüncü kantilever

n : Gerinim sertleştirme üssü

nm : Nanometre

nN : Nanonewton

N : Newton

O : Yüksek harmonikteki yer değiştirmeler

pN : Pikonewton

P	: Yayılan güç
P_a	: Ses basıncı seviyesi
P_i	: i özmodundaki yayılan güç
Q	: Kalite faktörü
Q_i	: i özmodundaki kalite faktörü
r	: Tahrik kuvveti oranı
s	: Kantilever ucu ile fotodiyot arasındaki mesafe
t	: Kantileverin kalınlığı
t_p	: Silindirik piezo malzemenin kalınlığı
V	: Voltaj
V_i	: i özmodundaki virial
V_p	: Piezo malzemeye uygulanan voltaj
w	: Kantileverin genişliği
w_{eb}	: Euler-Bernoulli yer değiştirmesi
W	: Watt
z	: Yer değiştirme
z_b	: İki frekanslı operasyondaki toplam yer değiştirme
z_i	: i özmodundaki yer değiştirme
z_n	: Mod genliği
z_s	: Tek frekanslı operasyondaki yer değiştirme
z_{total}	: Çoklu frekanslı operasyondaki toplam yer değiştirme
γ_i	: i özmodundaki mod sönümleme parametresi
Δa	: Lazer spotun yer değiştirmesi
$\Delta Ø$	: Faz kayması
Δx	: Piezo malzemenin uzama miktarı
ε_s, σ_s	: Malzeme sabitleri

λ_n : Mod şekli

κ_i : Kantileverin karakteristik denkleminin gerçek kökü

μ_{eff} : Etkili kütle katsayısı

µm : Mikrometre

ρ : Kütle yoğunluğu

$Ø_i$: i özmodundaki faz kayması

ω_{Ak} : Akustik kuvvetin açısal frekansı

ω_{ei} : i özmodundaki açısal rezonans frekansı

ω_o : Açısal rezonans frekansı

Kısaltmalar

AFM : Atomic Force Microscopy

AKM : Atomik Kuvvet Mikroskobu

ÇF-AKM : Çoklu Frekanslı Atomik Kuvvet Mikroskobu

DNA : Deoksiribo Nükleik Asit

DSP : Digital Signal Processing

FPGA : Field Programmable Gate Array

MEMS : Mikro Elektro Mekanik Sistem

MF-AFM : Multi-Frequency Atomic Force Microscopy

MKM : Manyetik Kuvvet Mikroskobu

OIS : Optik Işın Sapması

PDFD : Pozisyon Duyarlı Foto Detektör

PID : Proportional Integral Derivative

SEM : Scanning Electron Microscope

TTM : Taramalı Tünelleme Mikroskobu

TUM : Taramalı Uç Mikroskobu

YH-AKM : Yüksek Hızlı Atomik Kuvvet Mikroskobu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. AKM'nin temel bileşenleri 3

Şekil 2.2. AKM kantileverinin SEM görüntüsü 4

Şekil 2.3. a) AKM kantileverinin üç boyutlu modeli; **b)** Kantileverin A-A kesiti; **c)** Kantileverin kütle-yay modeli 4

Şekil 2.4. Tünelleme yöntemi ile kantilever sapmasının ölçülmesi 6

Şekil 2.5. OIS tekniği ile kantilever sapmasının algılanması 7

Şekil 2.6. Geri besleme mekanizmalı dinamik PID kontrolörün şeması 8

Şekil 2.7. Stack piezonun kullanıldığı bir AKM tarayıcısı 10

Şekil 2.8. Kantilever ucu ile yüzey arasında oluşan etkileşim kuvveti 11

Şekil 2.9. Temel çalışma modlarında etkileşim kuvvetlerinin kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeye göre değişimi 14

Şekil 2.10. ÇF-AKM'nin kontrol şeması 17

Şekil 3.11. Kantileverin sürülmesi için uygulanan tahrik şemaları ve statik akustik kuvvete verilen kantilever cevapları 23

Şekil 3.12. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ve dinamik akustik kuvvete maruz kalan kantileverin cevapları 24

Şekil 3.13. Dinamik akustik kuvvet altındaki kantilever dizininin sürülmesi için tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ve kantilever dizininin dinamik cevapları 25

Şekil 4.14. Tek ve iki frekanslı tahriklerde elde edilen serbest salınımlar ve statik akustik kuvvetler altındaki kantileverin salınımları. Tahrik kuvveti şiddeti **a)** F_1=35 pN; **b)** F_1=49 pN; **c)** F_1=60 pN için tek frekanslı tahrikte birinci özmoddaki kantileverin z_1 yer değiştirmeleri. Tahrik kuvvetlerinin şiddetleri **d)** F_1 = F_2=35 pN; **e)** F_1 = F_2=49 pN; **f)** F_1 = F_2=60 pN için iki frekanslı tahrikte ikinci özmoddaki kantileverin z_2 yer değiştirmeleri 33

Şekil 4.15. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı tahrik kuvvetlerinin şiddetleri için elde edilen birinci ve ikinci özmoddaki genlikler ve faz kaymaları. **a)** Birinci özmoddaki genlik cevapları; **b)** Birinci özmoddaki faz kayması cevapları; **c)** İkinci özmoddaki genlik cevapları; **d)** İkinci özmoddaki faz kayması cevapları 34

Şekil 4.16. İki frekanslı tahrikte farklı tahrik kuvveti oranları için birinci özmoddaki akustik kuvvete bağlı salınım gözlenebilirleri. **a)** F_1=35 pN için genlik cevapları; **b)** F_1=35 pN için faz kayması cevapları; **c)** F_1=53 pN için genlik cevapları; **d)** F_1=53 pN için faz kayması cevapları; **e)** F_1=78 pN için genlik cevapları; **f)** F_1=78 pN için faz kayması cevapları 35

Şekil 4.17. İki frekanslı tahrikte farklı tahrik kuvveti oranları için ikinci özmoddaki akustik kuvvete bağlı salınım gözlenebilirleri. **a)** F_1=35 pN için genlik cevapları; **b)** F_1=35 pN için faz kayması cevapları; **c)** F_1=53 pN için genlik cevapları; **d)** F_1=53 pN için faz kayması cevapları; **e)** F_1=78 pN için genlik cevapları; **f)** F_1=78 pN için faz kayması cevapları 37

Şekil 4.18. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı tahrik kuvvetlerinin şiddetleri için elde edilen birinci ve ikinci özmoddaki virial ve yayılan güçler. **a)** Birinci özmoddaki virial eğrileri; **b)** Birinci özmoddaki yayılan güç eğrileri; **c)** İkinci özmoddaki virial eğrileri; **d)** İkinci özmoddaki yayılan güç eğrileri 38

Şekil 4.19. Tek frekanslı tahriklerde **a)** f_a; **b)** f_b; **c)** f_c; **d)** f_d; **e)** f_e; **f)** f_f; **g)** f_g; **h)** f_h; **ı)** f_i frekanslarındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantileverin birinci özmod frekansındaki z_1 salınımları 39

Şekil 4.20. İki frekanslı tahriklerde **a)** f_a; **b)** f_b; **c)** f_c; **d)** f_d; **e)** f_e; **f)** f_f; **g)** f_g; **h)** f_h; **ı)** f_i frekanslarındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantileverin ikinci özmod frekansındaki z_2 salınımları 40

Şekil 4.21. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı frekanslardaki akustik kuvvetlerin etkisindeki kantileverin salınım gözlenebilirleri. **a)** Birinci özmoddaki genlik cevapları; **b)** Birinci özmoddaki faz kayması cevapları; **c)** İkinci özmoddaki genlik cevapları; **d)** İkinci özmoddaki faz kayması cevapları 41

Şekil 4.22. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları için B ve D bölgesindeki frekanslara sahip dinamik akustik kuvvet altındaki kantilevera dış sürücü kuvvetler tarafından sağlanan enerji miktarları, çalışma ortamına transfer edilen enerji miktarları ve akustik kuvvet etkisi ile dinamik sistemden yayılan enerji miktarları. **a)** f_b; **b)** f_c; **c)** f_d; **d)** f_f; **e)** f_g; **f)** f_h; frekansındaki akustik kuvvetler için enerji değişkenlerinin miktarları 43

Şekil 4.23. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı frekanslardaki akustik kuvvetlerin etkisindeki kantilever dinamiğinin enerji değişkenleri. **a)** Birinci özmoddaki virial eğrileri; **b)** Birinci özmoddaki yayılan güç eğrileri; **c)** İkinci özmoddaki virial eğrileri; **d)** İkinci özmoddaki yayılan güç eğrileri 44

Şekil 4.24. Serbest salınımlar ve çoklu frekanslı tahriklerde 60 pN kuvvet şiddetindeki dinamik akustik kuvvetlerin etkisindeki kantileverin salınımları. **a)** Serbest salınımlar ve 50 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde birinci özmod frekansındaki salınımlar; **b)** Serbest salınımlar ve 320 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde ikinci özmod frekansındaki salınımlar; **c)** Serbest salınımlar ve 890 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde üçüncü özmod frekansındaki salınımlar; **d)** Serbest salınım ve 1740 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde dördüncü özmod frekansındaki salınım 46

Şekil 4.25. Çoklu frekanslı operasyonlardaki kantileverin farklı kuvvet şiddetlerine sahip akustik kuvvetlere olan frekans alanındaki genlik cevapları. **a)** Birinci özmoddaki genlik cevapları; **b)** İkinci özmoddaki genlik cevapları; **c)** Üçüncü özmoddaki genlik cevapları; **d)** Dördüncü özmoddaki genlik cevapları 47

Şekil 4.26. Tek ve iki frekanslı tahrikteki ikinci özmod frekansındaki serbest salınımlar ve farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetler etkisindeki salınımlar. **a)** 225 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M1'in z_2 salınımları; **b)** 295 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M1'in z_2 salınımları; **c)** 360 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M2'nin z_2 salınımları; **d)** 495 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M2'nin z_2 salınımları; **e)** 190 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M3'ün z_2 salınımları; **f)** 530 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M3'ün z_2 salınımları..... 49

Şekil 4.27. Farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetler altındaki osilasyonların genlik ve faz kayması. **a)** Kantilever M1 için genlik cevapları; **b)** Kantilever M1 için faz kayması cevapları; **c)** Kantilever M2 için genlik cevapları; **d)** Kantilever M2 için faz kayması cevapları; **e)** Kantilever M3 için genlik cevapları; **f)** Kantilever M3 için faz kayması cevapları..... 50

Şekil 4.28. Farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetlere göre virial ve yayılan güç eğrileri. **a)** Kantilever M1 için virial eğrileri; **b)** Kantilever M1 için yayılan güç eğrileri; **c)** Kantilever M2 için virial eğrileri; **d)** Kantilever M2 için yayılan güç eğrileri; **e)** Kantilever M3 için virial eğrileri; **f)** Kantilever M3 için yayılan güç eğrileri..... 52

Şekil 4.29. İki frekanslı tahrikte farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetlerin frekanslarına göre virial ve yayılan güç eğrileri. **a)** Kantilever M1 için virial eğrileri; **b)** Kantilever M1 için yayılan güç eğrileri; **c)** Kantilever M2 için virial eğrileri; **d)** Kantilever M2 için yayılan güç eğrileri; **e)** Kantilever M3 için virial eğrileri; **f)** Kantilever M3 için yayılan güç eğrileri..... 53

Şekil 4.30. İki frekanslı tahrikte farklı frekanslara sahip dinamik akustik kuvvetlerin kuvvet şiddetlerine göre virial ve yayılan güç eğrileri. **a)** Kantilever M1 için virial eğrileri; **b)** Kantilever M1 için yayılan güç eğrileri; **c)** Kantilever M2 için virial eğrileri; **d)** Kantilever M2 için yayılan güç eğrileri; **e)** Kantilever M3 için virial eğrileri; **f)** Kantilever M3 için yayılan güç eğrileri..... 54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kantileverin özellikleri 27

Çizelge 3.2. A, B ve C spektral bölgelerdeki akustik kuvvet frekansları..... 28

Çizelge 3.3. D ve E spektral bölgelerdeki akustik kuvvet frekansları 28

Çizelge 3.4. Kantileverin i özmodundaki frekans, yay sabiti ve kalite faktörü 29

Çizelge 3.5. Kantilever dizini spesifikasyonu..... 30

1. GİRİŞ

Taramalı Uç Mikroskopları (TUM), malzemelerin yüzeyinin topografik şeklini ve malzeme özelliklerini elde etmek amacı ile kullanılmaktadır. Mekanik, elektrik ve manyetik özellikler gibi birçok özelliklerin haritası TUM tekniği ile çıkartılabilmektedir. TUM'un ilk üyesi olan Taramalı Tünelleme Mikroskobu (TTM)'nun çalışma alanının kısıtlı olmasından dolayı yeni bir tekniğe ihtiyaç duyulmuştur ve bu amaç ile birlikte AKM geliştirilmiştir. Günümüzde AKM tekniği, nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanında sıklıkla kullanılmaktadır. AKM operasyonlarında kantilever, etkileşim kuvvetlerinin ölçülmesinde bir sensör olarak kullanılmaktadır. AKM operasyonlarında kantilever ucu ile yüzey arasındaki etkileşim kuvvetini ölçerek iletken, yarı-iletken, yalıtkan, vb. her türlü malzemenin atomik çözünürlükteki görüntüleri elde edilebilmektedir. Kantilever ucu tarafından yüzeye uygulanan kuvvetin azaltılması ile birlikte yumuşak malzemelerin incelenmesinin önü açılmıştır. DNA, protein ve polimer gibi yumuşak maddelerin üzerinde AKM operasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Yüksek çözünürlükteki AKM görüntüleri malzeme yüzeyinden daha fazla bilgi alınmasını sağlamaktadır. Buna ilaveten, AKM tekniği ile sıvı içerisinde biyolojik malzemelerin görüntülerinin alınabilmesi tıp alanında önemli gelişmelere neden olmuştur. Bunun dışında, kantilever ucu ile yüzey arasında etkin olan kuvvetin azaltılması ile birlikte birçok ortamda atomik ve moleküler çözünürlükteki görüntüler elde edilebilmiştir. Ayrıca, yüzeyde meydana gelen yüksek hızlı dinamik olayları izleyebilmek için Yüksek Hızlı AKM (YH-AKM) geliştirilmiştir. AKM operasyonları statik ve dinamik olmak üzere iki ana modda gerçekleştirilmektedir. Statik modda AKM kantilever ucu malzeme ile devamlı kontak halinde iken yüzeyde tarama işlemi yapılmaktadır. Dinamik modda ise AKM kantileveri, temel rezonans frekansında ya da onun yakınındaki bir frekansta piezoelektrik tahrik elemanı tarafından titreştirilmektedir. Yüksek yay sabiti ve rezonans frekansına sahip kantileverler, dinamik mod AKM operasyonları için daha uygun olmaktadır. Ayrıca, dinamik mod AKM, elektrostatik veya manyetik özellikler ile birlikte yüzey topografisinin elde edilmesini sağlayan deneysel kuruluma imkan vermektedir.

Tek frekanslı AKM ile elde edilen görüntülerin çözünürlüğünü ve etkileşim kuvvetinin ölçüm hassasiyetini arttırmak için ÇF-AKM geliştirilmiştir. ÇF-AKM'de kantilever birden fazla rezonans frekansında sürülmektedir. Bu şekilde, eş zamanlı olarak yüksek özmodlardaki salınım gözlenebilirleri ile yüzeyden tamamlayıcı bilgiler toplanabilmektedir. ÇF-AKM tekniği ile lineer olmayan etkileşim kuvveti bölgesindeki bilgiler elde edilebilmektedir. Bir ÇF-AKM olan bimodal (iki frekanslı) AKM'de kantilever ilk iki özmod frekansında eş zamanlı sürülmektedir. Temel özmod gözlenebilirleri yüzeyin topografisini oluşturmak için kullanılmaktadır. İkinci özmod gözlenebilirleri ile de Young modülüsü ve sönümleme gibi özellikler elde edilebilmektedir. Bimodal AKM'de lineer olmayan kantilever ucu-yüzey etkileşim kuvvetinden dolayı ilk iki özmodlar birbiri ile etkileşime girmektedir. Bunun dışında, birinci ve ikinci özmodlar farklı yay sabiti, kalite faktörü ve rezonans frekanslarına sahiptir. Bu durum, farklı etkileşim kuvveti hassasiyetinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

ÇF-AKM ile birlikte birçok etkileşim kuvveti ölçülebilmektedir. Kısa menzilli itici kuvvet, kimyasal bağ kuvveti, Van der Walls kuvveti, manyetik kuvvet ve elektrostatik kuvvet, ÇF-AKM'de ölçülebilen etkileşim kuvvetleri olarak

sayılabilmektedir. Bu etkileşim kuvvetlerine ilaveten, akustik kuvvetin de ÇF-AKM tekniği ile ölçülebilmesi mümkündür.

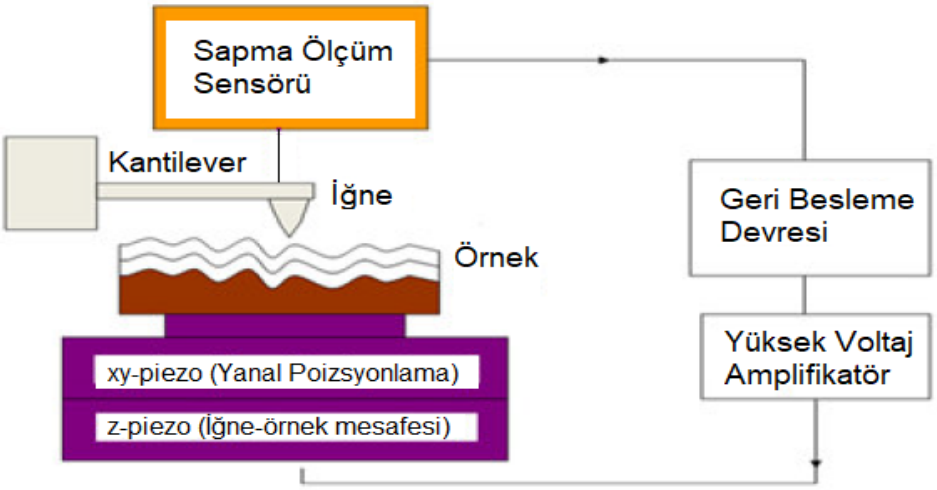
Belirli frekans ve genlikteki akustik dalgalar taşıdıkları enerji ile kantilever yüzeyine kuvvet uygulayabilmektedir. Kantilever ucu ile yüzey arasındaki etkileşim kuvveti AKM operasyonlarında kantileverin ucunda etkin olmaktadır. Kantileverin tek geniş yüzeyinde etkili olduğu düşünülen akustik kuvvetin kantileverin ucuna etki ettiği varsayılmıştır. ÇF-AKM operasyonlarında birden fazla rezonans frekanslarında sürülen kantileverin akustik kuvvet etkisi ile birlikte salınım gözlenebilirlerinde değişimler meydana gelebilecektir. Akustik kuvvetin etkisindeki kantileverin salınım genliği ve faz kayması, sadece tahrik kuvvetinin etkisindeki serbest salınımın gözlenebilirlerinden farklı davranışlar göstermesi beklenmektedir. Ayrıca, virial ve yayılan güç gibi enerji değişkenleri, akustik kuvvet ölçümündeki enerji yayılımı ve depolama süreçlerini açıklamak için kullanılabilecektir.

Bu tez çalışmasında akustik kuvvet, statik ve dinamik akustik kuvvet olarak ikiye ayrılmıştır. Statik akustik kuvvet ölçümünde tek ve iki frekanslı AKM operasyonlarında elde edilen salınım gözlenebilirleri ve enerji değişkenleri karşılaştırılmıştır. Tek frekanslı tahrik ile (birinci ya da ikinci özmod frekansı) iki frekanslı tahrik sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır ve ilk iki özmod için farklı sürücü kuvvetlerinin gözlenebilirlere olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, ilk iki özmodda virial ve yayılan güç sonuçları farklı sürücü kuvvetler için elde edilmiştir. Bu şekilde, tahrik parametreleri ile statik akustik kuvvet etkisindeki kantileverin salınımı ve enerji yayılımı süreci arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bunun dışında, tek AKM kantileveri kullanılarak dinamik akustik kuvvet hassasiyeti araştırılmıştır. Bu durumda farklı akustik kuvvet frekansları için akustik kuvvet şiddetine göre ilk iki özmoddaki gözlenebilir hassasiyeti incelenmiştir. Ayrıca, kritik akustik kuvvet frekansları için tahrik kuvveti tarafından yapılan iş, çalışma ortamına iletilen enerji ve akustik kuvvet tarafından yayılan enerji miktarları hesaplanmıştır. Bunun dışında, virial ve yayılan güç sonuçları mod etkileşimi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, tek frekanslı ve iki frekanslı tahrik ile elde edilen salınım gözlenebilirleri ve enerji değişkenleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Dinamik akustik kuvvetin etkisindeki kantileverin ikinci, üçüncü ve dördüncü özmodları gibi yüksek özmodlarındaki salınım genlikleri hesaplanmıştır. Mod etkileşimi dikkate alınarak yüksek operasyon modlarının özmodlardaki genlik cevaplarına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, AKM'de kullanılan kantileverlerden oluşan kantilever dizini, dinamik akustik kuvvet sensörü olarak düşünülmüştür. Tek ve iki frekanslı AKM operasyonlarında kantilever dizini rezonans frekanslarında sürülerek ikinci özmodda salınım gözlenebilirleri ve enerji değişkenleri elde edilmiştir. İkinci özmod frekanslarında sürülen dizin içerisindeki AKM kantileverlerinin daha yüksek frekanstaki akustik kuvvetlere karşı cevapları araştırılmıştır. Bunun dışında, enerji depolama ve yayılımı sürecini ifade eden virial ve yayılan güç değişkenlerinin de davranışları akustik kuvvet frekansı alanında incelenmiştir. AKM operasyonları hem tek frekanslı (ikinci özmod frekansı) hem de iki frekanslı olarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, belirli akustik kuvvet frekanslarına bağlı olarak iki frekanslı operasyonun gözlenebilir hassasiyetine olan etkisi gözlemlenmiştir. Mod etkileşimi dikkate alınarak çoklu frekanslı tahrik ile enerji yayılımı ilişkisi de incelenmiştir. Sonuç olarak, bu tez kapsamında ÇF-AKM tekniğinin akustik kuvvet ölçümündeki etkinliği araştırılmıştır. Tek frekanslı operasyonlar ile ÇF-AKM operasyonları sonuçları karşılaştırılarak akustik kuvvet hassasiyeti incelenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Atomik Kuvvet Mikroskobunun Çalışma Prensibi ve Temel Bileşenleri

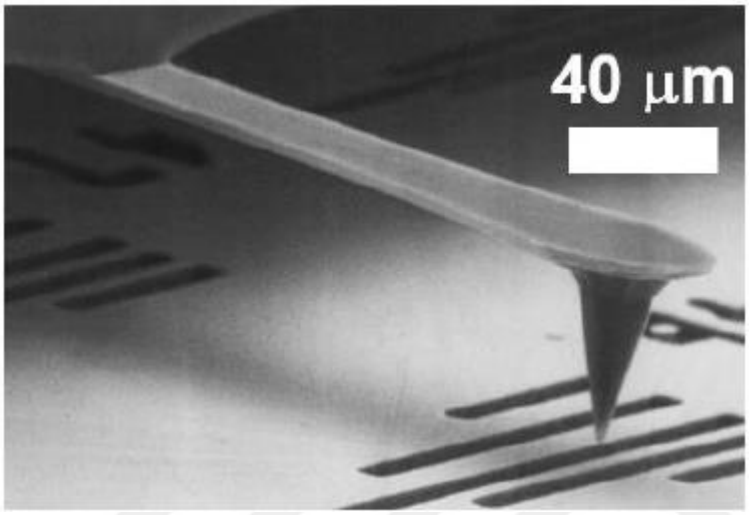
TUM'ların ilk üyesi olan TTM ile iletken yüzeylerde atomik boyutta görüntü alınabilmiştir. İletken yüzey ile kantilever ucu arasına gerilim uygulanarak örnek yüzeyine birkaç atom çapı mesafe kadar yaklaştırıldığında uç ile yüzey arasında tünel akımı oluşmaktadır. Kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeye göre tünel akımda değişimler meydana gelmektedir. Tünel akımdaki bu değişimlere bağlı olarak yüzeyin şekil özellikleri elde edilebilmektedir. Yalıtkan örneklerin yüzeylerinde de atomik boyutta çözünürlüğe ulaşabilmek için Binning, Quate ve Gerber 1986 yılında AKM'yi geliştirdiler. AKM'nin geliştirilmesi ile birlikte yansıtıcı, yalıtkan, yarı iletken ve iletken vb. birçok malzemenin yüzeyleri incelenmeye başlandı. AKM'de kantilever-iğne sistemi, örnek yüzeyine yerleştirilen piezoelektrik malzeme sayesinde tarama yapmaktadır. Kantilever ucu ile yüzey arasında oluşan etkileşim kuvvetlerinden ötürü kantileverin salınım gözlenebilirleri değişmektedir. Meydana gelen sapmalar, elektrik ya da optik metodlar ile tespit edilebilmektedir. Optik algılama sisteminde kantilevera düşürülen lazer ışığı bir fotodetektör ile algılanmaktadır. AKM'de kantilever-iğne sistemi bir kuvvet sensörü olarak tasarlanmıştır. Yüzey ile kantilever ucu arasında oluşan etkileşim kuvvetindeki değişim, kantileverin titreşiminin frekansındaki ve genliğindeki değişime bağlı olarak bulunmaktadır. Ölçülen kuvvetler sayesinde örnek yüzeyinin topografisi ve manyetik özellikleri, elektrostatik özellikleri gibi malzeme özellikleri belirlenebilmektedir. Kantileverin ucundaki iğne yüzeye yaklaştırıldığında etkileşim kuvvetinin referans değerine bağlı olarak çalışan geri besleme devresi yardımıyla yüzey topografisi elde edilmektedir. Diğer mikroskobi tekniklerinden farklı olarak AKM tekniği, direkt görüntüleme, yüksek atomik boyutta çözünürlük, 3 boyutlu görüntüleme ve aynı anda sıvı ortamda çalışabilme özelliklerine sahiptir. AKM teknolojisi hava, vakum ve sıvı ortamlarında geniş yelpazedeki malzemelerin karekterizasyonuna imkan vermektedir. AKM'yi oluşturan temel bileşenler Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Çelik 2017).



Şekil 2.1. AKM'nin temel bileşenleri

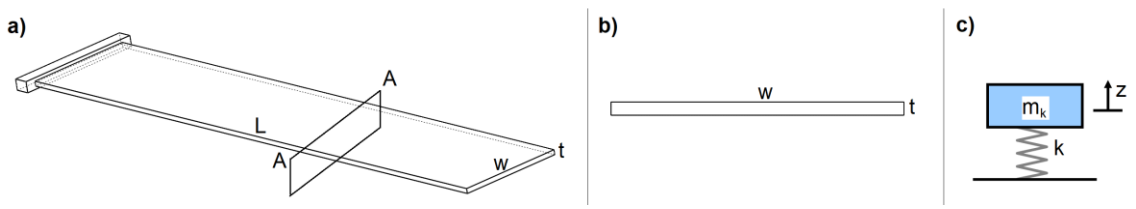
2.1.1. Kantileverin özellikleri

Birçok uygulama alanında çeşitli kuvvet ölçümleri için kantilever sensörleri kullanılmaktadır (Alunda ve Lee 2020). AKM'de kantileverin titreşimine dayalı olarak etkileşim kuvvetlerinin hassas ölçümü gerçekleştirilmektedir. AKM kantileverleri MEMS teknikleri kullanılarak silikon ve silikon nitrid'den imal edilmektedir. Kantileverin uç kısmına yerleştirilen iğnelerin eğrilik yarıçapı yaklaşık olarak 10 nm civarındadır. Şekil 2.2'de AKM'de sensör ucu olarak kullanılan kantileverin Scanning Electron Microscope (SEM) görüntüsü verilmiştir (Çelik 2017).



Şekil 2.2. AKM kantileverinin SEM görüntüsü

Optik Işın Sapması (OIS) yönteminde lazer ışığının daha etkili yansıtılması için kantileverin foto detektör tarafına bakan arka yüzeyi alüminyum ya da altın ile kaplanmaktadır. Altın kaplı kantileverlerin sıvıda oksitlenme direnci daha fazla olduğu için bu kantileverler daha çok tercih edilmektedir. AKM ile elde edilen atomik boyuttaki çözünürlükler etkin kantilever boyutları ile değişebilmektedir. Kantileverler esnek ve bükülgen olmalı ve yay sabiti ortalama 0.01-100 N/m civarında seçilmelidir (Şahin 2009). Kantileverlerin bu özellikleri nN hassasiyetinde etkileşim kuvveti ölçümü imkanı sağlamaktadır. Yatay yöndeki sürtünme kuvvetleri itici kuvvetler aralığında görüntü oluşumunu bozmaktadır. Bu durumu engellemek için kantilever yatay ve düşey yönlerde farklı bükülmezliklerde olmalıdır.



Şekil 2.3. a) AKM kantileverinin üç boyutlu modeli; **b)** Kantileverin A-A kesiti; **c)** Kantileverin kütle-yay modeli

$$F = -kz \tag{2.1}$$

$$k = -\frac{3EI}{L^3} \tag{2.2}$$

$$I = \frac{1}{12}\, w\, t^3 \tag{2.3}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_k}} = 2\pi f \tag{2.4}$$

$$m_k = \rho\, L\, w\, t \tag{2.5}$$

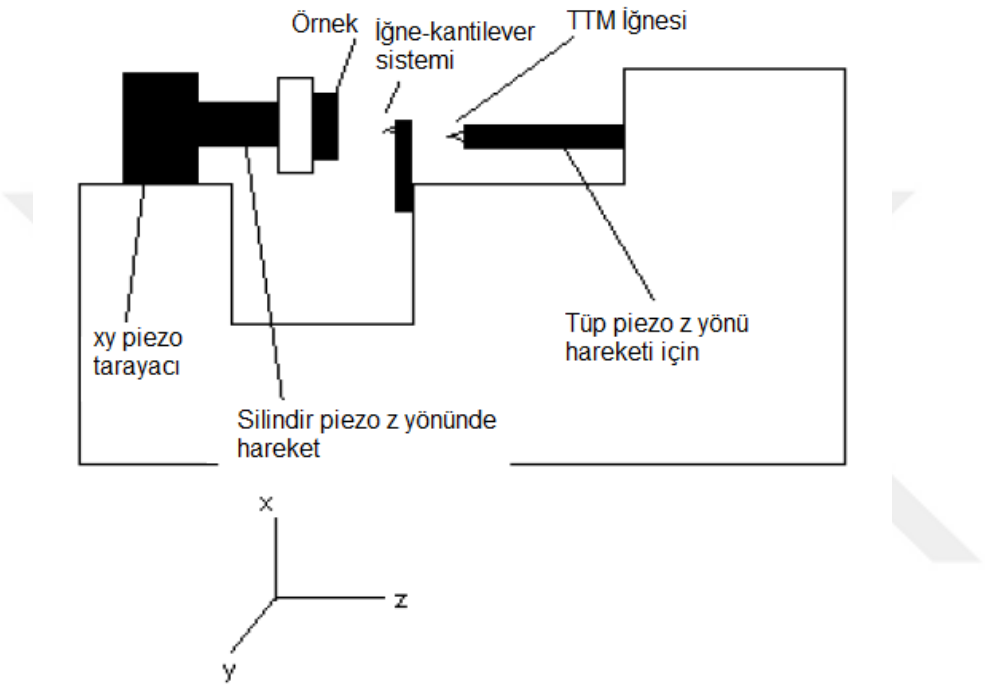
$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m_k}} \approx 0.56\frac{t}{L^2}\sqrt{\frac{E}{12\rho}} \tag{2.6}$$

Denklem 2.1 - 2.6'da verilmiş olan F, k, z, E, I, f, L, t, ρ, m_k ve ω_n ifadeleri sırasıyla kuvvet, yay sabiti, kantileverin sapması, Young modülüsü, alan atalet momenti, rezonans frekansı, kantileverin uzunluğu, kantileverin kalınlığı, malzeme yoğunluğunu, kantileverin toplam kütlesini ve rezonans frekansını göstermektedir. Şekil 2.3c'de kantileverin kütle-yay modeli gösterilmiştir. Kantilever ucu ile yüzey arasındaki etkileşim kuvveti Hook yasasına göre kantileverin sapmasına neden olmaktadır. Yay sabiti azaltılarak daha küçük etkileşim kuvvetleri ölçülebilmektedir. Bu durumda mekanik gürültülerin etkisinin azaltılması için rezonans frekansını artırmak gerekmektedir. Kantilever ne kadar küçük seçilirse rezonans frekansı kütledeki azalış ile birlikte daha büyük olacaktır. Standart AKM kantileverlerin rezonans frekansları 300 kHz'e kadar çıkmaktadır (Voigtlander 2019). Kantileverlerin yatay kuvvetlere karşı olan direnci de görüntü oluşumunu etkileyen bir faktördür. Yatay direnç, yanal yay sabitinin normal yay sabitine oranı olarak tanımlanmaktadır. Sader ve Sader (2003)'in çalışmasında dikdörtgen kesite sahip kantileverlerin yatay direncinin daha fazla olduğu gösterilmiştir. Diğer bir faktör olan kalite faktörü Q, kantilever salınımının enerji kaybından dolayı sönümlemesini ifade etmektedir. Yüksek kalite faktörü, düşük sönümleme ortamı anlamına gelmektedir.

Yay sabiti; termal tuning yöntemi, kantilever geometrisi, kütle ekleme yöntemi ve direkt ölçme yöntemi ile hesaplanabilmektedir (Şahin 2009). Kantileverin uzunluğu ve genişliği optik mikroskop ile ölçülebilirken kalınlığı ise elektron mikroskobu ile ölçülebilmektedir. Termal tuning yönteminde ortam sıcaklığından kaynaklı termal enerjinin kantileveri ne kadar salındırdığı ölçülmektedir ve bu ölçümden yay sabiti elde edilebilmektedir (Kageshima vd. 2009). Deneysel bir yöntem olan statik sapma yönteminde etkileşim kuvvetinden ötürü meydana gelen sapmalar ölçülmektedir ve referans bir değer ile karşılaştırılmaktadır. Bu şekilde yay sabiti hesaplanabilmektedir. Diğer bir deneysel yöntem olan dinamik sapma yönteminde kantilever rezonans frekansında piezo ile titreştirilmektedir ve sapma genlikleri kullanılarak yay sabiti hesaplanmaktadır. Ayrıca, dinamik modda kantileverin titreşim genliği sabit tutularak sürücü kuvvetinin genliğindeki değişimler ile yay sabiti elde edilebilmektedir.

2.1.2. Kantilever sapmasını ölçme

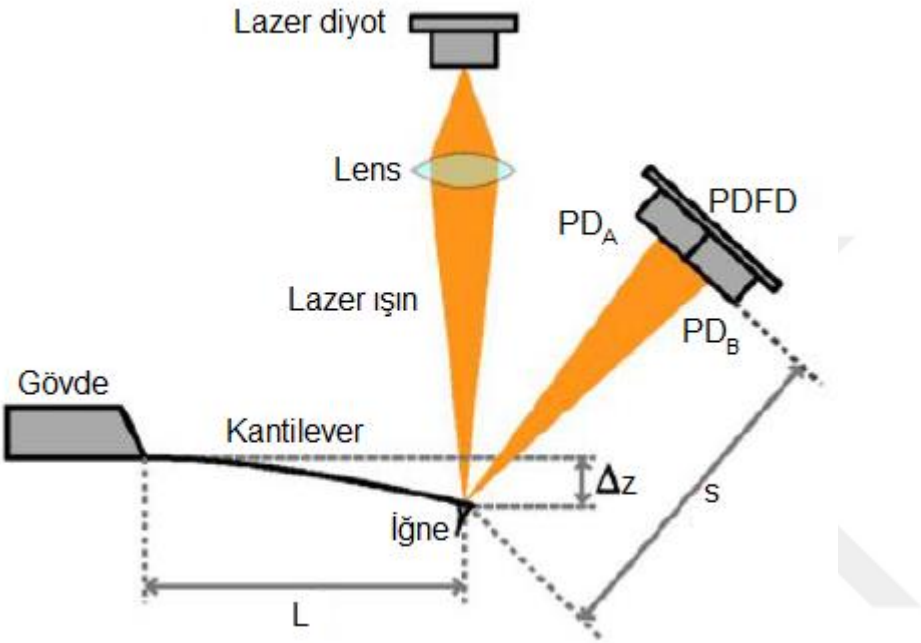
AKM'de kantilever sapması ne kadar hassas ölçülebilirse o kadar küçük etkileşim kuvveti algılanabilmektedir. Kantilever salınımını algılamak için tünelleme sensörü, optik interferometre ve OIS yöntemleri kullanılmıştır. İlk geliştirilmiş olan AKM'de kantilever ile TTM iğnesi arasında oluşan tünelleme akımı ölçülerek kantilever sapması algılanmıştır. Tünel akımı, fermi enerji seviyeleri farklı olan iki iletken arasındaki mesafe ile ters orantılıdır ve mesafe arttıkça akım monoton şekilde azalmaktadır. Şekil 2.4'de tünelleme yöntemi ile sapma ölçümünün şematik gösterimi verilmiştir (Şahin 2009).



Şekil 2.4. Tünelleme yöntemi ile kantilever sapmasının ölçülmesi

Tünelleme yönteminde kuvvet etkisinde kantilever, sapma yaptıkça kantilever ile TTM iğnesi arasındaki mesafe değişecektir. Mesafeye bağlı olarak da tünel akımı da değişecektir. Tünelleme yöntemindeki birinci çalışma şeklinde tünelleme akımını sabit tutmak için iki iletken arasındaki mesafe, geri besleme mekanizması ile sabit tutulmaktadır. Diğer bir çalışma şeklinde sabit yükseklikte akım değişimleri ölçülerek sapmalar tespit edilebilmektedir. Tünelleme yöntemindeki bazı problemler bu yöntemin kullanabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Tünelleme yönteminde gerçekleştirilen sapma ölçümleri için sadece iletken malzemeler kullanılabilmektedir. Buna ilaveten, yüksek genlikli salınımlarda iletkenler arası mesafe fazla olduğundan dolayı tünelleme akımı zayıf oluşmaktadır ve bundan dolayı kantilever sapması ölçülememektedir. Bunun dışında, TTM iğnesinin kantilevera çok yakın olduğu durumlarda kantilever ile TTM iğnesi arası etkileşim kuvveti, kantilever ucu ile yüzey arası etkileşim kuvvetine katkıda bulunmaktadır. Bundan dolayı da yanlış sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca, ölçüm esnasında oluşan gürültü genliğinin sinyaller arasındaki etkileşimlerden dolayı artması tünelleme yönteminin uygulanmasını zorlaştırmaktadır.

Optik interferometrenin kullanıldığı yöntemde fiber optik kablo metal kantileverin arka tarafına yaklaştırılmaktadır. Fiberin ucundan yansıyan ışık ile kantileverin arka kısmından yansıyan ışık arasındaki girişim deseni kullanılarak sapmalar algılanmaktadır. Rezonans frekansında sürülen kantilever-iğne sisteminin yüzey ile arasındaki etkileşiminden dolayı rezonans frekansında kayma meydana gelmektedir. Ayrıca, etkileşim kuvveti etkisinden ötürü oluşan salınım genliğindeki azalmalar da lazer interferometre ile ölçülebilmektedir (Voigtlander 2019).



Şekil 2.5. OIS tekniği ile kantilever sapmasının algılanması

OIS yöntemi ilk olarak Meyer ve Amer tarafından geliştirilmiştir (Çelik 2011). Şekil 2.5'de OIS yöntemi ile kantileverin sapmasının ölçüm şeması gösterilmektedir (Çelik 2017). OIS yönteminde lazer ışını açılı bir şekilde kantileverin arka yüzeyine odaklandırılmaktadır. Geri yansıyan lazer ışını Pozisyon Duyarlı Foto Detektör (PDFD) tarafından algılanmaktadır. Fotodiyota gelen lazer ışını kantileverin farklı pozisyonları için farklı ışın demetleri olarak belirlenmektedir. Kantilever salınım yaparken PDFD üzerine düşen lazer ışınının konumu değişmektedir. Kantilever sapması fotodiyot elemanlarındaki ışık şiddetlerinin farkı ile orantılıdır. Lazer ışık demeti yarı iletken olan fotodiyotun iletkenliğini değiştirmektedir ve bundan dolayı ışık demetinin şiddetine göre fotodiyottan geçen akım değişmektedir. Her fotodiyot bileşeninden geçen akım dönüştürücü kullanılarak voltaja dönüştürülmektedir. OIS yönteminde fotodiyot, mekanik salınımların elektrik sinyallerine dönüştürülmesinde kullanılmaktadır. Sadece dikey salınımları algılayabilmek için bitişik iki fotodiyota (PD_A ve PD_B) sahip olan bir PDFD kullanılmaktadır. Lazer ışınının yanal ve dikey sapmaları dört fotodiyot elemanını içeren bir PDFD ile ölçülebilmektedir. Algılanan yanal ve dikey sapmalar kullanılarak yanal ve dikey kuvvetler ölçülmektedir.

Kantilever Δz kadar saptığında fotodiyot üzerindeki lazer spot Δa kadar yer değiştirmektedir (Karcı vd. 2009).

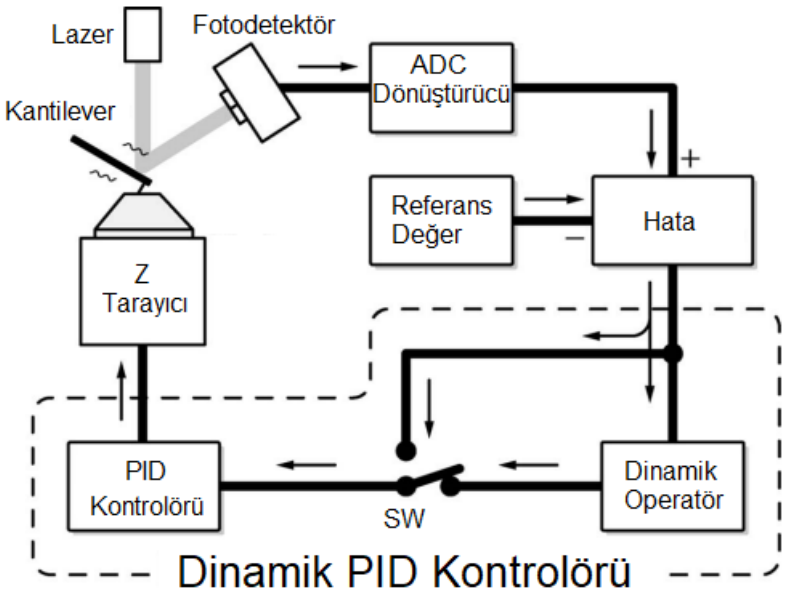
$$\Delta a = 3\frac{s}{L}\Delta z \tag{2.7}$$

Denklem 2.7'de verilmiş olan s ve L sırasıyla fotodiyot arasındaki mesafeyi ve kantileverin boyutunu ifade etmektedir (Şekil 2.5). Büyütme faktörü ($\beta=\frac{\Delta a}{\Delta z}$) arttıkça sapma ölçümünün hassasiyeti de artmaktadır. Kantilever ile fotodiyot arasındaki mesafe optimize edilerek büyütme faktörü arttırılabilmektedir (Fukuma vd. 2005).

2.1.3. Kontrol elektroniği

AKM kontrol elektroniği dijital tabanlı Field Programmable Gate Array (FPGA) veya Digital Signal Processing (DSP) teknolojisine dayalı tasarlanmaktadır (Kaveh vd. 2020). AKM'deki kontrol elektroniğinde gerçekleştirilen tüm işlemler işlemci tarafından yürütülmektedir. Mekanik döngünün temel bileşenleri olarak örnek tutucu, kantilever, XYZ motor ve XYZ tarayıcı olarak sıralanmaktadır.

Kaba yaklaşma ve pozisyonlama için XYZ motor sürücüleri kullanılmaktadır. Z motoru kantileveri örnek yüzeye doğru yaklaştırmaya ya da yüzeyden uzaklaştırmaya imkan vermektedir. Z eksenindeki hareketi sağlamak için birçok elektronik sinyal işlenmektedir. Z voltajı, Z hata sinyali, Z sensörü, genlik demodülasyonu ve faz demodülasyonu sinyalleri analog-dijital dönüştürücü tarafından digital sinyallere dönüştürülmektedir (West 2007). XY motoru örneği kantilevera göre konumlandırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, mekanik döngüdeki bileşenlerin dış çevre etkisi ile titreşmesi elde edilen sonuçlarda hataya sebep olmaktadır. Bundan dolayı, etkileşim kuvvetinin yüksek hassasiyet ile ölçülebilmesi için kullanılan mekanik komponentlerin titreşmeyecek şekilde sağlam kurulması gerekmektedir.



Şekil 2.6. Geri besleme mekanizmalı dinamik PID kontrolörün şeması

Yüksek voltaj amfisi kullanılarak XY tarama piezoları ve kuvvet sensöründen analog veriye bağlı olan Z piezosu için sinyaller üretilmektedir. Tüp piezoları +/- 200 V ve stack piezoları -20 V/ +150 V ile sürülerek istenen hareket elde edilmektedir. XYZ piezoları analog sinyaller ile sürüldüğünden dolayı hareketi sağlamak için dijital-analog dönüştürücüler kullanılmaktadır. Kantileveri dinamik modda rezonans frekansında sürebilmek için ve algılanan salınımların genlik ve fazını elde edebilmek için kilitlemeli yükseltici (Lock-in amfi) kullanılmaktadır.

Kapalı kontrol sistemindeki geri besleme mekanizması dijital Proportional Integral Derivative (PID) kontrol ile gerçekleştirilmektedir. AKM için tasarlanmış olan bir dinamik PID kontrolörün şeması Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Kodera vd. 2006). Geri besleme mekanizması kantilever ucu ile yüzey arasındaki etkileşim kuvvetini ya da çalışma modlarına bağlı olarak salınımın genliğini, fazını veya frekansını referans değerde tutmak amacı ile kullanılmaktadır. Z geribesleme döngüsünün uygulanması analog ya da dijital elektronik ile gerçekleştirilebilmektedir. Dijital elektronik daha esnek uygulamalara imkan vermektedir ve birçok fonksiyonu sağlamak için konfigüre edilebilmektedir. Buna karşın, analog elektronik ile daha az gürültü sinyalleri ortaya çıkmaktadır.

AKM tekniğinde iki farklı konfigürasyon ile çalışabilmek mümkündür. Birinci konfigürasyonda kantileverin konumu sabit tutulmaktadır ve tarama esnasında örnek tarayıcılar ile hareket ettirilmektedir. İkinci konfigürasyonda örneğin pozisyonu sabit tutulurken kantilever hareket ettirilmektedir. İkinci konfigürasyonun bir avantajı her boyutta örnek üzerinde çalışılmasına imkan vermesidir.

2.1.4. Tarayıcılar ve ızgara tarama tekniği

TUM sınıfındaki mikroskopların tümünde örnek üzerinde tarama gerçekleştirmek için piezoelektrik tarayıcılar kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemeler kolay ulaşılabilirlik, istenen şekillerde üretilebilirlik ve uygun maliyetlerden dolayı AKM tarayıcıların üretiminde tercih edilmektedir. Piezoelektrik seramikler bir kuvvet ile sıkıştırıldıklarında potansiyel fark üretmektedir. Tam tersi durumda piezoelektrik seramiklerin üzerine potansiyel fark uygulandığında seramik genişlemektedir. Seramik piezoelektrik malzemelerin boyutuna ve şekline bağlı olarak değişen rezonans frekansları AKM'lerin tarama hızlarını belirlemektedir. Piezoelektrik malzemeler ile elde edilen hareketler ile atomik seviyelerde hassasiyet sağlanabilmektedir.

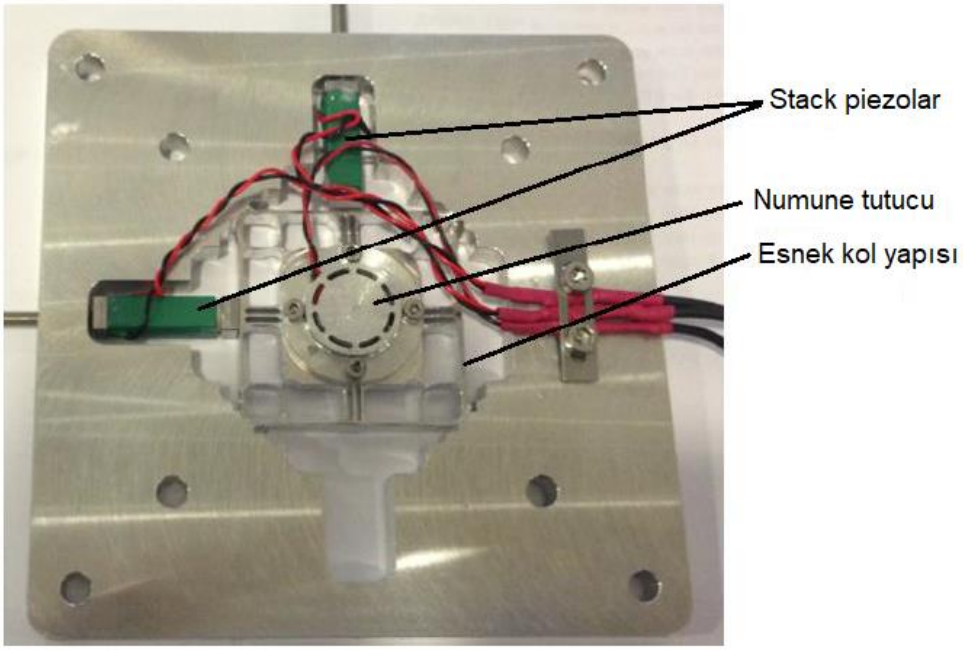
AKM tarayıcıları için silindirik şeklinde tüp ve stack piezolar kullanılmaktadır. Silindir şeklindeki tüp piezoelektrik tarayıcının iç ve dış elektrotları arasına potansiyel fark uygulandığında tüpün boyu uzamaktadır ya da kısalmaktadır. Bu piezolar yatayda x ve y yönlerinde pikometrenin altında bir hassasiyet ile tarama yapabilmektedir. 4 eşit parçaya bölünmüş olan tüp piezo voltaj uygulanan elektroda göre bükülmektedir. Tüp piezonun her bir parçasına verilen voltaj ile yatay yönde hareket elde edilebilmektedir. Karşılıklı elektrotlara zıt voltajlar uygulandığında tüp piezo iki kat daha fazla bükülmektedir. Buna ilaveten, piezonun Z yönündeki hareketi yüzeyin topografisini elde etmek için kullanılmaktadır. Kırılgan yapıları ve düşük rezonans frekanslarına sahip olmaları, tüp piezoların dezavantajlarıdır.

Silindirik piezo malzemenin uzama miktarı, verilen voltaja ve piezo malzemenin boyutlarına bağlıdır.

$$\Delta x = \frac{0.45\ d\ V_p\ {L_p}^2}{D\ t_p} \tag{2.8}$$

Denklem 2.8'de verilmiş olan Δx, d, V_p, L_p, D ve t_p sırasıyla uzama miktarı, birim uzama katsayısı, uygulanan voltaj, silindirik piezo malzemenin boyu, silindirik piezonun dış çapı ve silindirik piezonun kalınlığını ifade etmektedir (Şahin 2009).

Stack piezolar birbirlerine yapıştırılmış ince piezo tabakalarından oluşmaktadır. Stack piezolar, yüksek kuvvet oluşturabilme özelliği, yüksek kırılma direnci ve yüksek rezonans frekanslarına sahip olma avantajlarına sahiptir. Ayrıca, kapasitansları yüksek olduğundan dolayı karmaşık sürücü mimarisi ile yüksek frekanslarda titreşim elde edilebilmektedir. Bunun dışında, flexure sisteme dayalı mekanik bir sistem ile AKM tarayıcılarda kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de stack piezonun kullanıldığı bir AKM tarayıcısı gösterilmiştir (Çelik 2017).



Şekil 2.7. Stack piezonun kullanıldığı bir AKM tarayıcısı

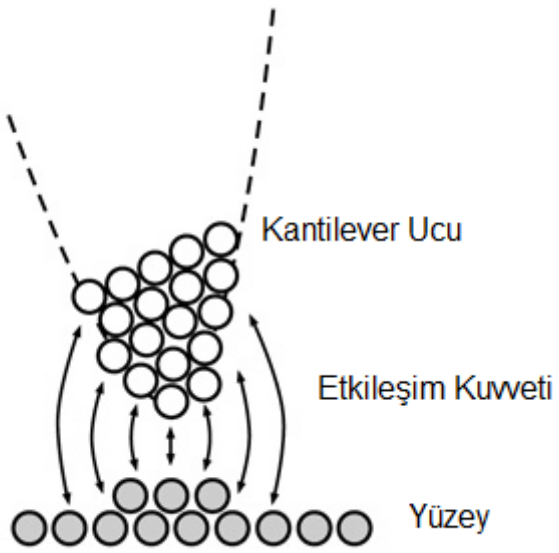
Piezo malzemelerde görülen hysterisis ve creep etkisi tarayıcıların performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Hysterisis etkisinde piezoya lineer voltaj uygulandığında lineer olmayan bir hareket oluşmaktadır. Voltaj uygulandıktan sonra piezonun bir süre daha harekete devam etmesi creep etkisi ile açıklanmaktadır. Geri beslemeli kapalı kontrol sistemi ile piezo malzemelerin davranışlarındaki bu olumsuzluklar aşılmaktadır.

Izgara tarama tekniğinde tarama alanı piksellerden oluşan yatay çizgilerden oluşmaktadır. Tarama yüzey üzerinde çizgi boyunca ileri ve geri hareketler ile gerçekleştirilmektedir. X ve Y ekseninde tarayıcılara sırasıyla testere dişi sinyali ve lineer

bir sinyal uygulanmaktadır. Testere dişi yöntemi yerine çift yönlü tarama yöntemi ile kapalı kontrol sistemi kullanılarak daha hızlı görüntü almak mümkündür. Referans değer voltajı ve PID parametreleri gibi tarama parametreleri çizgi taraması boyunca ayarlanmaktadır. Geri beslemeli kontrol devresinde Z hata sinyali minimum değere getirilerek çizgi takibi gerçekleştirilmektedir (West 2007).

2.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu ile Ölçülen Kuvvetler

AKM'de kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeye bağlı olarak kısa ve uzun menzilli etkileşim kuvvetlerinin ölçümü yapılabilmektedir. Etkileşim kuvvetleri, mesafe ve geometriye bağlı olarak intermoleküler, yüzey ve makroskopik etkiler ile birlikte ortaya çıkmaktadır (Kayım 2014). Etkileşim kuvvetleri çekici ve itici kuvvetler olarak da sınıflandırılmaktadır. Çeşitli AKM çalışma modlarında itici ve çekici olan etkileşim kuvvetlerinin tanımlamasına bağlı olarak örnekleme gerçekleştirilmektedir. AKM operasyonlarında kantilever, kısa ve uzun menzilde farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Kısa menzilli etkileşim kuvvetlerinden kaynaklı osilasyon genliğindeki azalışdan ötürü kantilever doğrusal olmayan bir dinamiğe sahip olabilmektedir.(Raman vd. 2008). Örnek olarak, kimyasal bağ kuvveti, kısa menzilde etkin olan bir etkileşim kuvvetidir. Şekil 2.8'de kantilever ucu ile yüzey arasında meydana gelen etkileşim kuvveti şematize edilmiştir (Wiesendanger 2021).



Şekil 2.8. Kantilever ucu ile yüzey arasında oluşan etkileşim kuvveti

Eğer mesafe 1 nm'den büyük ise uzun menzilli kuvvetler etkindir ve bu kuvvetler çekici kuvvet olarak da bilinmektedir. Van der Walls, manyetik ve elektrostatik kuvvetler ise uzun menzilde etkin olan etkileşim kuvvetleridir. Bu bölümde bahsedilen kısa ve uzun menzildeki önemli etkileşim kuvvetleri aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1. Kısa menzilli itici kuvvetler

Pauli dışarlama ilkesine dayalı olarak kantilever ucu ile yüzey arasındaki kısa mesafede itici kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Atomların birbirine yaklaşması sonucunda

elektron bulutları birbirinin içine girerek elektron-elektron etkileşimi ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen bu etkileşim, itici kuvvetlerin etkinleşmesine neden olmaktadır. Elektron yoğunluğu itici kuvvetlerin oluşmasında belirleyici bir etkendir. İtici kuvvetlerin etkileşim potansiyelinde en yakın komşu atomların etkileşimi ve atomların yer değiştirmeleri dikkat edilmesi gereken diğer konulardır. Pauli dışarlama ilkesine göre aynı kuantum sayılarına sahip iki elektron, aynı enerji seviyesinde bulunmamaktadır. Bu ilkeden yola çıkarak kantilever ucu ile yüzey arasında güçlü bir itici etkileşme olduğu bilinmektedir. Bir çift atomun etkileşmesini açıklayan Lennard Jones potansiyel modeli de kısa menzilli itici kuvvetlerin tanımlanmasında kullanılmaktadır.

2.2.2. Kimyasal bağ kuvvetleri

Kimyasal bağ kuvvetinin büyüklüğü atomların birbirine olan uzaklıklarına ve açısal yönelimlerine bağlıdır. Kantilever ucu yüzeye yaklaşırken kimyasal bağ kuvveti çekicidir ancak bu mesafe azaldıkça bu kuvvet itici olmaktadır. Mesafedeki çok küçük bir değişim kimyasal bağ kuvvetinde büyük değişimlere neden olmaktadır. Atom manipülasyonuna neden olabilen bu kuvvet, yüzeyin atomik yapısı hakkında bilgi sağlamaktadır. Frekans modülasyon çalışma modunda yüzeye yakın bölgede ve küçük salınımlı titreşimlerde kimyasal bağ kuvveti etkinleşmektedir. Kimyasal bağ kuvvetinin, yüksek genlikli salınımların üzerindeki etkisi çok azdır. Yüzeye yakın bölgede düşük genlikli salınımlar ile kuvvet ölçümünün hassasiyeti arttırılabilmektedir. Buna rağmen, düşük genlikli salınımlar kısa mesafedeki güçlü etkileşim kuvvetlerinden dolayı kararsız davranış sergilemektedir. Büyük yay sabitine sahip kantileverler kullanılarak yüzeye yakın bölgede düşük genlikli salınımlar elde edilebilmektedir.

2.2.3. Van der walls kuvvetleri

Atomların elektrik yükünün dağılımı elektronların simetrik olmamasından dolayı elektriksel olarak nötraldır (Kayım 2014). Van der Walls kuvveti, dengesiz yük dağılımı olan dipollerinin titreşiminden dolayı meydana gelen elektromanyetik bir etkileşim kuvvetidir. Atomik seviyedeki bu zayıf kuvvet, gaz moleküllerini bir arada tutmaktadır. Uzun menzilde çekici bölgede etkin olan Van der Walls kuvveti, kimyasal kuvvetten daha büyüktür. AKM operasyonlarında çekici bölgedeki Van der Walls etkisi ile kantilever, yüzeye doğru bükülme göstermektedir.

Lennard-Jones fonksiyonu olarak da bilinen çift-potansiyel enerji fonksiyonu $E^{çift}(z)$ kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeye bağlıdır (Kayım 2014).

$$E^{çift}(z) = 4\varepsilon_s[\left(\frac{\sigma_s}{z}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma_s}{z}\right)^{6}] \tag{2.9}$$

Denklem 2.9'da verilmiş olan ε_s ve σ_s malzemeye bağlı olan sabitlerdir. Van der Walls kuvvetlerinin etkin olduğu çekici bölgelerde $\frac{1}{z^6}$ terimi daha yavaş değişimden sorumludur. Van der Walls kuvvetleri, kantileverin yay sabitinden güçlü olduğunda kantilever ucu yüzeye aniden yapışabilmektedir. Bu olumsuz durumun meydana gelmemesi için kantilever ucunun Lennard-Jones eğrisindeki minimum kuvvet mesafesine gelmesi gerekmektedir (Çelik 2017).

2.2.4. Manyetik kuvvetler

Kantilever ucu ile numunenin ferromanyetik özelliklere sahip olduğu durumlarda manyetik kuvvetler etkin olmaktadır. Manyetik Kuvvet Mikroskopu (MKM) ile yüzeyin manyetik haritası ve topografisi hakkında bilgi edinilebilmektedir. Yüksek çözünürlük (~ 50 nm) ve değişken ortam sıcaklığında çalışabilme özelliği MKM'nin avantajlarından sayılmaktadır. Ferromanyetik malzeme ile kaplı olan kantilever ucu, örnek yüzeyindeki manyetik kuvvet dağılımını elde etmeye imkan vermektedir. Kantilever ucu ile örnek arasındaki manyetik etkileşimi belirleyebilmek için iğnenin özelliklerinin ve davranışlarının önceden bilinmesi gerekmektedir (Kazakova vd. 2019). Kantilever ucu ile yüzey arasındaki uzun menzilli manyetik etkileşimi, salınım yapan kantileverin başlangıç tahrik parametreleri ve genlik, frekans ve fazdaki kaymalar ile ilişkilendirilmektedir.

$$\Delta\emptyset(\omega_0) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{k}{Q\frac{dF_{ts}}{dz}}\right) \approx \frac{Q}{k}\frac{dF_{ts}}{dz} \tag{2.10}$$

Faz kayması ile manyetik etkileşim kuvveti gradyanı arasındaki bağlantı Denklem 2.10'da gösterilmektedir. Denklem 2.10'da verilmiş olan $\Delta\emptyset$, ω_0, Q, k, $\frac{dF_{ts}}{dz}$ sırasıyla faz kayması, açısal rezonans frekansı, kalite faktörü, yay sabiti ve manyetik kuvvet gradyanını ifade etmektedir (Kazakova vd. 2019).

2.2.5. Elektrostatik kuvvetler

Elektrostatik kuvvetler kantileverin yalıtkan ucu ile yüzeyin yerleşik yükleri arasında etkin olmaktadır. Kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeye bağlı olarak değişen elektrostatik kuvvetin büyüklüğü Couloumb yasası ile açıklanmaktadır. Elektrostatik kuvvet, artan yüzey yük yoğunluğu ile artmaktadır ve mesafe ile birlikte katlanarak azalmaktadır. İyon püskürtme yöntemi kullanılarak ve örnek dilimleyerek yükler yüzeye yerleştirilebilmektedir. Yüzey yükleri karşıt iyonları çekmektedir ve yüzeyin yakınında artan iyon konsantrasyonu elektrik alanı oluşturmaktadır. Kantileverin ucu her ne kadar elektrik yükü taşımasa da elektrik alanı tarafından tetiklenen kantilever ucundaki polarizasyon yükleri elektrostatik bir etkileşime neden olmaktadır. Kantilever ucu etrafındaki iyon konsantrasyonu dengede olduğu varsayılarak elektrostatik etkileşim kuvveti hesaplanabilmektedir (Butt 1991). Bu varsayımı doğrulamak için AKM tarama hızı, iyon mobilitesi ve difüzyon katsayısı ile karşılaştırılmaktadır. Vakum ortamında yüzeydeki yüklenmeler, hava ortamına göre daha uzun süre kararlılığını korumaktadır. İletken olan kantilever ucu ve yüzey arasında oluşan potansiyel fark ile de elektrostatik kuvvetler etkinleşmektedir. Yük yoğunluğuna ve türüne bağlı olarak elektrostatik kuvvetler kantileveri itebilmektedir ya da çekebilmektedir.

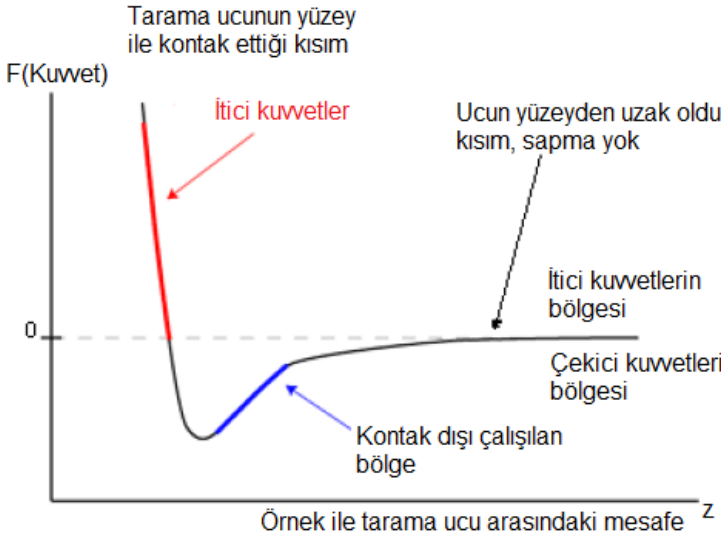
Elektrostatik etkileşim kantilever salınımının frekansında kaymaya neden olabilmektedir (Khoury 2017). Rezonans frekansındaki kayma $\Delta\omega_0$ ile elektrostatik kuvvet gradyanı G arasındaki bağlantı Denklem 2.11'de verilmiştir.

$$\Delta\omega_0 \cong -\frac{\omega_0}{2k}G \tag{2.11}$$

Denklem 2.11'de verilmiş olan k kantileverin yay sabitini ifade etmektedir.

2.3. Atomik Kuvvet Mikroskobunun Temel Çalışma Modları

AKM'lerin statik ve dinamik mod olmak üzere iki tane temel çalışma modu bulunmaktadır. Şekil 2.9'da AKM'nin çalışma bölgelerinin gösterildiği kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeye göre değişen etkileşim kuvveti eğrisi verilmiştir (Şahin 2009). Statik mod yani kontak modda kantilever ucu örnek yüzeye temas halinde iken sürülmektedir ve yüzey eğilimleri kantileverin sapması olarak kaydedilmektedir. Kontak modda çalışabilen mikroskoplara örnek olarak piezoelektrik etki ölçüm mikroskobu, taramalı kapasitans mikroskobu ve yanal kuvvet mikroskobu verilebilir.



Şekil 2.9. Temel çalışma modlarında etkileşim kuvvetlerinin kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeye göre değişimi

Dinamik modda kantilever, yüzeye belirli bir mesafe uzaklıkta rezonans frekansında titreştirilmektedir. AKM dinamik modlarında kantilever ucu ile yüzey arasındaki etkileşim kuvvetlerine göre değişen salınım genliğindeki, rezonans frekansındaki ve fazındaki kaymalar hesaplanmaktadır (Kayım 2014). Dinamik modda yarı değen tarama kipine örnek olarak da kelvin prob kuvvet mikroskobu, elektrostatik kuvvet mikroskobu, dinamik tarama kipi ve manyetik kuvvet mikroskobu sıralanabilmektedir (Çelik 2017). Bu kısımda kontak mod ve dinamik mod olarak da genlik modülasyonu ve frekans modülasyonu açıklanacaktır.

2.3.1. Kontak mod

Kontak mod çalışma modunda kantileverin statik sapmaları ölçülmektedir. Bu modda kantilever ucu yüzeye dokunarak iki boyutlu olarak yüzey taranmaktadır ve her bir konum için yükseklik değişimi kaydedilerek yüzey topografisi elde edilmektedir. Kantilever ucu yüzeye yaklaşık birkaç angstrom kadar yaklaştırılmaktadır. Bu mesafelerde kantilever ucu ile yüzey arasındaki itici etkileşim kuvveti etkindir ve bu kuvvet kantilever ucu ile yüzey arasındaki atomların birbirine temas etmesini engellemektedir. Kontak modda kantilever ucu ile yüzey taranırken sapma

göstermektedir ve bu sapma tünelleme sensörü, optik interferometre ve OIS yöntemleri ile ölçülebilmektdir. OIS yönteminde diyot lazer kaynağından çıkan ışınlar toplayıcı mercek ile toplanmaktadır ve odaklayıcı mercek ile de kantilevere odaklanmaktadır. Kantileverden yansıyan lazer ışınları PDFD'de toplanmaktadır. Tarama esnasında geri beslemeli kontrol algoritması kullanılarak ölçülen sapma sinyali, hedeflenen sinyal ile karşılaştırılmaktadır ve numunenin ya da kantileverin dikey hareketleri ile hata sinyali minimize edilmektedir. Z dikey eksendeki hareket için sağlanan elektrik sinyalleri ve kalibrasyon verileri kullanılarak yüzey topografisi çıkartılmaktadır. Kantileverin yay sabiti ve kantilever ucu ile yüzey arasındaki etkileşim kuvvetinin değişimi, görüntüde renk kontrast farklarını oluşturmaktadır (Kayım 2014).

Kontak moddaki AKM operasyonları esnasında bazı problemler ortaya çıkabilmektedir. Örnek yüzeyi yanal tarandığında yanal yay sabitinin yüksek olmasından dolayı yüzeyin zarar görme ihtimali yüksektir. Buna rağmen, yanal taramada kantilever ucunda etkin olan yanal kuvvetler de ölçülebilmektedir. Kantilever ucu yüzey ile az da olsa temas halinde olduğu için bükülmezliği fazla olan kantilever kullanıldığında yüzey bozulabilmektedir. Kontak modda biyomoleküller ve hücreler gibi yumuşak örneklere zarar verilmemesi için kullanılan kantileverin esnek ve yay sabiti pikonewton seviyelerinde olmalıdır. Bu sayede zayıf olan kuvvetler de ölçülebilmektedir. Ayrıca, biyolojik örneklerin görüntülemesinde yüzeyden sanal görüntüler alınabilmektedir. Uygulanan kuvvet azaltılarak bu durum engellenebilmektedir ancak küçük kuvvetlerdeki azalma, görüntü alımında problemlere neden olabilecektir (Şahin 2009). Buna ilaveten, kantilever ucunun yüzeye yaklaştırılması esnasında çekici kuvvetlerden dolayı kantilever ucu, yüzeye hızlı bir şekilde çekilebilmektedir. Kontak modda itici aralıkta çalışılarak bu durumdan kaçınılabilecektir.

2.3.2. Genlik modülasyonu

Genlik modülasyonunda kantilever, yüzeye dikey yönde rezonansa yakın bir frekansta ya da rezonans frekansında titreştirilmektedir. Genlik modülasyonu aynı zamanda yarı-temas modu olarak da bilinmektedir. Bu çalışma modunda kantilever ucu ile yüzey arasındaki belirli mesafede yüksek titreşim genliğinde salınımlar sağlanmaktadır. Yüksek titreşim genliklerinde lineer olmayan etkileşim kuvvetinin değişimi düzensiz olduğu için lineer olmayan salınımlar elde edilebilmektedir. Kantilever ucu ile yüzey arasındaki itici etkileşim kuvvetlerinden dolayı salınımın genliği küçülmektedir. Tarama esnasında titreşimin genliğindeki değişim ve faz kayması görüntü oluşumunda referans sinyal olarak kullanılmaktadır. Genlik modülasyonunda yüksek kalite faktörüne sahip kantileverlerin kullanılması görüntü oluşumunda oluşabilecek termal ve mekanik gürültüyü azaltacaktır. Titreşim genliği, yataydaki çözünürlük kalitesini ve görüntü netliğini etkilemektedir. Geri beslemeli kontrol algoritması sayesinde kantilever dikey yönde hareket ettirilerek salınımın genliği referans değerde tutulmaktadır. Bu çalışma modunda kantilever ucunun yüzeye dokunduğu süre, kontak moddaki süreden oldukça azdır. Kantileverin tarama esnasında yüzeye yapışmaması için kantileverin enerjisinin etkileşim kuvvetinden fazla olması gerekmektedir. Kantileverin yüzeye yapışmasının engellenmesi için düşük genlikli salınımların kullanılması gereklidir. Bu çalışma modunda yüksek harmoniklerin genlikleri de yüzey hakkında bilgi sağlayabilmektedir. Yüksek harmoniklerde çok küçük genliklerdeki salınımlar gürültü seviyesinin altında kalabilmektedir ya da çabuk sönümlenebilmektedir (Şahin 2009).

Kantileverin geometrisi ve şekli değiştirilerek yüksek harmoniklerin salınım genlikleri gürültü seviyelerinin üstüne çıkartılabilmektedir.

Genlik modülasyonunda etkileşim kuvvetlerinden dolayı rezonans frekansında kaymalar meydana gelmektedir (Tamayo ve Garcia 1996). Etkileşimden dolayı değişen kantileverin efektif kütlesi, rezonans frekansının ve fazın kaymasına neden olmaktadır. Elde edilen görüntüdeki her nokta için sürücü kuvvet ile etkileşim kuvvetinin etkisindeki cevabın arasındaki faz farkı belirlenmektedir. Yüzey kompozisyonu, tarama esnasında kaydedilen faz kayması verilerinden elde edilebilmektedir. Yüzeyin aynı kimyasal özelliklerine sahip bölgelerin tanımlanmasında faz kayması verileri kullanılabilmektedir. Ancak, viskoelastisite ve elektronik kayıplardan ötürü meydana gelen enerji kayıpları faz kayması verilerinin yüzeyin fiziksel özellikleri ile ilişkilendirilmesini engellemektedir. Salınımın genliği yerine faz kaymasına göre geribesleme kontrol devresi çalıştığında bu çalışma moduna faz modülasyonu denmektedir. Bu modülasyonda geribeslemeli kontrol algoritması referans değere göre faz kaymalarını dikkate alarak düşey eksendeki hareketi kontrol etmektedir. Bunun dışında, genlik modülasyonunda biyolojik moleküller gibi örneklerin yüzeylerinin görüntülemesinde kantilever ucunun örnek ile teması yüzeyde bozulmalara yol açabilmektedir (San Paulo ve Garcia 2000).

2.3.3. Frekans modülasyonu

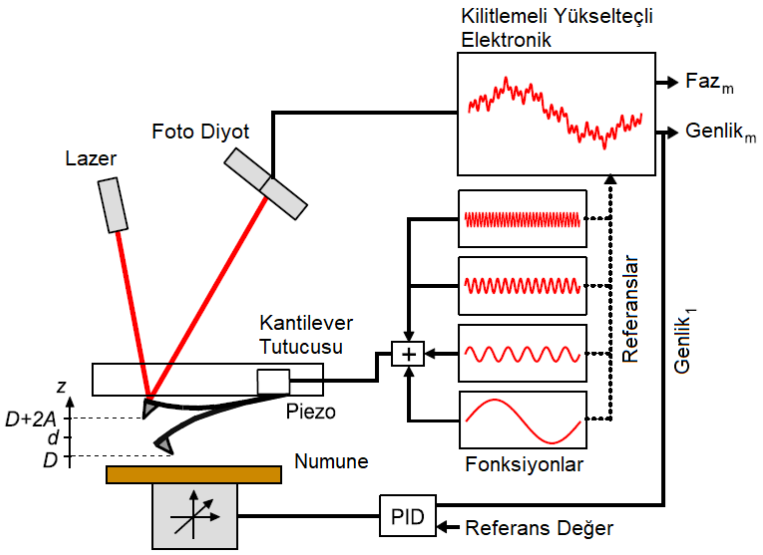
Frekans modülasyonunu ilk defa Albrecht ve arkadaşları kullanmışlardır (Albrecht vd. 1991). Kontak dışı mod olarak da bilinen bu çalışma modu ile yalıtkan veya iletken yüzeylerde atomik çözünürlük elde edilebilmiştir. Frekans modülasyonu ile iki farklı şekilde çalışılabilmektedir. Birinci yöntemde kantilever, yüzeye çok yakın bir mesafeye getirilerek küçük genlikte salınımlar oluşturulmaktadır. Küçük genlikli salınımlar ile çalışıldığında düşük kalite faktörlü kantilever kullanılabilmektedir. Bunun dışında, küçük genlikli salınımlar ile kısa menzilli kuvvetlerin ölçüm hassasiyeti arttırılabilmektedir. İkinci yöntemde kantilever, yüzeye biraz daha uzak bir mesafeye konumlandırılarak daha büyük genlikteki salınımlar ile tarama gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde gürültü miktarları azaltılabilmektedir ve rezonans dışı frekanslardaki salınımlar ile yüksek ölçüm hassasiyeti elde edilebilmektedir. Ancak, yüksek titreşim genliklerinde çalışıldığında lineer olmayan dış etkiler ve enerji kayıplarından dolayı bazı problemler ortaya çıkabilmektedir. Frekans modülasyonunda kantilever, kapalı kontrol devresi ile sabit bir genlikte rezonans frekansında sürülmektedir. Yüzeye yakın mesafede etkileşim kuvvetlerinden dolayı salınımların frekansları kantileverin yay sabitinin karekökü ile orantılı olarak değişmektedir. Kuvvet gradyenine bağlı olan frekans kayması, geri besleme devresi tarafından sağlanan dikey eksendeki hareketler ile referans değere göre sabit tutulmaktadır ve bu şekilde yüzey topografisi oluşturulmaktadır. Ayrıca, çekici ve itici etkileşim kuvvetlerin değişiminden dolayı kantileverin yay sabiti değişmektedir.

Frekans modülasyonu ile yüksek yatay çözünürlüğü elde edilebilmiştir. Küçük genlikli salınımlar ile (< 1 nm) yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturulabilmektedir. Bu modülasyon ile yüzeye çok yakın mesafede tarama gerçekleştirildiği için sıvı içerisinde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilmektedir (Kayım 2014). Frekans modülasyonu ile ultra yüksek vakum ve hava ortamlarında atomik çözünürlük elde etmek mümkündür. Frekans modülasyonu ile çalışabilmek için daha karmaşık bir deneysel düzenek gerekebilmektedir. Bu çalışma modunda frekans kayması ve salınım genliği gibi fiziksel gözlenebilirleri, etkileşim kuvvetleri ile ilişkilendirilebilmektedir.

2.4. Çoklu Frekanslı Atomik Kuvvet Mikroskobu

Düzlemsel çözünürlüğü ve kuvvet ölçümü hassasiyetini arttırmak için ÇF-AKM kullanılabilmektedir. Kantileveri ÇF-AKM operasyonunda tahrik ederek daha yüksek çözünürlüklü atomik boyutta görüntüler elde edilebilmektedir. ÇF-AKM'de kantileveri tahrik eden sürücü kuvveti sinyali, birden fazla özmod frekansını içeren sinyallerden oluşmaktadır. Birden fazla frekansta sürücü sinyalleri kullanarak yüzeyden tamamlayıcı bilgiler toplanabilmektedir. ÇF-AKM operasyonları ile hem yüzey topografisi ve hem de mekanik, elektrik ve manyetik özellikler gibi malzeme özellikleri hakkında bilgi edinilebilmektedir. ÇF-AKM operasyonlarında görüntüler eş zamanlı oluşturulmaktadır ve daha yüksek dereceden özmoddaki malzeme özellikleri temel özmodda elde edilen yüzey topografisinden ayırt edilebilmektedir. ÇF-AKM'de birinci ve daha yüksek dereceden olan özmod frekansları arasındaki ilişki kantileverin geometrisine bağlıdır (Damircheli ve Eslami 2020). ÇF-AKM'nin kontrol şeması Şekil 2.10'da verilmiştir (An vd. 2014).

İki frekanslı AKM operasyonunda (bimodal) kantilever ilk iki özmod frekansında titreştirilerek birinci özmodda yüzey topografisi ve ikinci özmodda ise malzeme özellikleri elde edilebilmekedir. Bu durumda birinci (temel) özmod frekansı kantilever ucu ile yüzey arasındaki mesafeyi kontrol etmek amacı ile kullanılmaktadır. İki frekanslı tahrik şemasının kullanıldığı ÇF-AKM operasyonunda ikinci özmodda salınım genliği ve faz kayması hassasiyeti elde edilmiştir (Rodriguez ve Garcia 2004). Lozano ve Garcia (2008)'nın çalışmasında iki frekanslı AKM operasyonunda pikoNewton seviyesinde etkileşim kuvveti hassasiyetine ulaşılmıştır. Bunun dışında, ikinci özmod frekansının kullanılması uzun menzilli kuvvetlerin ölçüm hassasiyetini arttırmaktadır.



Şekil 2.10. ÇF-AKM'nin kontrol şeması

ÇF-AKM operasyonunda kantileveri süren tahrik kuvveti ve i özmodu için hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$F_{tahrik} = \sum_{i=1}^{c} F_{tahrik,i} = \sum_{i=1}^{c} F_i \cos(\omega_{ei} t) \quad (2.12)$$

$$m_e \ddot{z}_i(t) = -k_i z_i(t) - \frac{m_e \omega_{ei}}{Q_i} \dot{z}_i(t) + F_{tahrik} + F_{ts}(\sum_{i=1}^{c} z_i) \quad (2.13)$$

Denklem 2.12 ve Denklem 2.13'de verilmiş olan $F_{tahrik,i}$, F_i, ω_{ei}, z_i, m_e, k_i, Q_i and F_{ts} ifadeleri sırasıyla i özmodu için tahrik kuvveti, tahrik kuvveti şiddeti, açısal rezonans frekansı, yer değiştirme, etkili kütle, yay sabiti, kalite faktörü ve etkileşim kuvvetini belirtmektedir.

ÇF-AKM operasyonlarında Denklem 2.12'deki c değişkeni 1'den büyük olmaktadır. Örnek olarak, c'nin üçe eşit olması kantileverin ilk üç özmod frekansında sürüldüğünü belirtmektedir. Solares ve Chawla (2010)'nın çalışmasında üç frekanslı AKM operasyonunda yüksek özmodlardaki frekans kayması cevapları araştırılmıştır. Denklem 2.13'ün çözülmesi ile kantileverin dikey eksendeki (z) yer değiştirmeleri elde edilebilmektedir. ÇF-AKM operasyonunda yüksek dereceden özmoddaki faz kaymalarının birinci özmoddaki faz kaymalarından daha fazla olabildiği bilinmektedir. Bu durum için etkileşim kuvvet hassasiyeti, daha hassas faz kayması çıktıları ile arttırılabilmektedir. Buna ilaveten, yüksek dereceli kuvvet gradyenleri kullanılarak kimyasal bağ kuvvetleri gibi küçük şiddete sahip kuvvetler hakkında daha çok bilgi edinilebilmektedir. ÇF-AKM'de kimyasal bağ kuvvetleri, diğer uzun menzilli kuvvetlerden izole edilerek düzlemsel çözünürlük arttırılabilmektedir. Ayrıca, yüksek dereceden harmoniklerin titreşim genlikleri birinci özmod titreşim genliğine göre küçük olmaktadır. Frekans modülasyonunda rezonans artırma yöntemi ile daha yüksek özmoddaki titreşim genlikleri arttırılırsa daha fazla bilgi alınabilmektedir (Sahin vd. 2004).

2.5. Literatür Özeti

Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) teknolojileri ile geliştirilen akustik emisyon sensörleri makine parçalarının durumlarının ve malzeme kusurlarının tespiti için kullanılmaktadır. Yüzey hasarları ve malzemelerin özellikleri, piezoelektrik sensörler tarafından algılanan akustik emisyon sinyallerinin işlenmesi sonucu belirlenebilmektedir (Mclaskey ve Glaser 2012). Akustik emisyonlar, malzemelerdeki lokalize gerilim-gerinim bölgeleri tarafından tetiklenen elastik dalgaların enerji yayılımlarına bağlıdır (Saboonchi ve Ozevin 2013). Çatlak çekirdeklenmesi, faz dönüşümleri ve kristal kafesteki dislokasyonlar gibi yapısal düzensizlikler ve plastik deformasyon, akustik emisyonların kaynak mekanizmalarından bazılarıdır (Feng vd. 2012). Endüstriyel uygulamalarda elastik akustik dalgalar, dinamik yükler altındaki depo tankları ve uçaklar gibi yapıların ve gaz boru hatlarının durumlarını incelemek için kullanılmaktadır (Feng ve Tsai 2010). Ayrıca, akustik emisyon sinyalleri farklı yükleme koşulları altındaki kompozit malzemelerin matris çatlaması, ayrılma ve kopma gibi bozulma modları hakkında bilgi içermektedir (Lee ve Tsuda 2005). Farklı bozulma türleri için akustik emisyonların frekansları ve genlikleri değişmektedir. 90-180 kHz frekans aralığındaki akustik dalgalar matris çatlamasından (matrix cracking) dolayı yayılmaktadır. Bunun yanısıra, ayrılma (pull-out) frekansları 180 ile 240 kHz frekans aralığındadır (De Groot

vd. 1995). Ayrıca, karbon/epoksi malzemelerin kopması (debonding) sonucu 240-310 kHz frekans aralığındaki akustik dalgalar, spektrum analizörü ile tespit edilebilmektedir (De Groot vd. 1995). Cam/polipropilen kompozit malzemelerin farklı bozulma modlarından kaynaklı yayılan akustik emisyonların genlikleri ölçülmüştür (Barre ve Benzeggagh 1994). Kopma için akustik emisyon genlikleri 60 ile 65 dB aralığında değişmektedir. Buna ilaveten, ayrılma bozulma modu, genlikleri 65 ile 85 dB aralığında değişen akustik emisyonlar oluşturmaktadır. Genel olarak, belirli frekans ve genliğe sahip akustik sinyal sahip olduğu enerji ile birlikte mikro yapıların yüzeylerine kuvvet uygulamaktadır. Akustik sinyallerin basınç dalgaları etkileşimi için kullanılan düzlem dalga yaklaşımı mikro yapıların yüzeylerinde etkili olan düzenli basınç yüklerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır (Demirkıran vd. 2018). Bunla ilgili olarak akustik sinyallerin genlikleri mikro yapıların yüzeylerine uygulanan akustik kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılan ses basıncı seviyelerine dönüştürülebilmektedir. Sonuç olarak, mikro yapılar kullanılarak genis frekans aralığında belirli genliklere sahip akustik dalgalar, yüksek hassasiyet ile ölçülebilecektir.

Literatürdeki çalışmalarda değinildiği üzere bir mikro yapı olan AKM kantileverinin sürülmesi için akustik radyasyon, tahrik kuvveti olarak kullanılabilmektedir. Akustik kuvvet ile sürülen kantileverin transfer fonksiyonunun, vakum, hava ve sıvı ortamındaki AKM operasyonları ile belirlenen kalite faktörüne olan hassasiyeti gösterilmiştir (Penedo vd. 2014). Operasyon ortamının kantileverin dinamiğine olan etkileri genlik ve faz cevap eğrileri ile gösterilmiştir. Angstrom altı osilasyon genlikleri ile malzeme yüzeylerinin görüntülendiği işlemlerde kantilever rezonans frekansında akustik kuvvet ile tahrik edilmiştir (Maali vd. 2006). Başka bir çalışmada düşük kalite faktörleri için genlik ve faz kaymalarının analitik ifadeleri verilmiştir (Jai vd. 2007). Buna ilaveten, AKM kantilever, 100-300 MHz frekans aralığında çalışan akustik sensör tarafından üretilen lokalize kuvvet ile sıvı ortamında tahrik edilmiştir (Degertekin vd. 2001). Ayrıca, konvansiyonel tahrik ve ultrason radyasyon kuvvet kullanılarak tahrik edilen kantileverin frekans cevapları karşılaştırılmıştır ve sonuçlar akustik tahrik yönteminin kantileverin sürülmesinde kullanılabilirliğini göstermiştir (Hueber vd. 2010). Buna ilaveten, foto-akustik tahrik yöntemi kantileverin etkili bir şekilde temassız sürülmesi için uygulanmaktadır (Gao vd. 2016). Foto akustik dalgalar ile ortaya çıkan termal etki yenilikçi tahrik yöntemi ile ortadan kaldırılmıştır. Diğer bir çalışmada manyetik, akustik ve termal olarak sürülen kantileverin cevapları farklı çevre koşulları için incelenmiştir (Xu ve Raman 2014). Genlik ve faz kayması cevaplarının teorik ve deneysel farkları verilmiştir ve bu sonuçlar her bir tahrik mekanizması için değerlendirilmiştir. Akustik kuvvet ile tahrik edilebilen kantilever aynı zamanda akustik kuvvetin yüksek hassasiyet ile ölçülmesi için de kullanılmaktadır. Literatürde birçok çalışma, kantileverin dinamiğinin akustik emisyonların ölçülmesindeki kullanımını ele almıştır. Akustik kaynağın kuvvet büyüklüğü serbest ya da piezo ile sürülen kantilever dinamiği ile belirlenebilmektedir. Kantileverin ultra kısa lazer palsleri ile tetiklenen akustik kuvvetlere olan cevapları, kararlı halde osilasyonlar sağlamaktadır (Demirkıran vd. 2018). Öte yandan, kantilever statik moddaki ultrason sensörünün akustik radyasyonunun mekansal dağılımını ölçmek için kullanılmıştır (Hueber vd. 2016). MEMS teknikleri kullanılarak yüksek hassasiyetli frekans bantlarında çalışan kantilever dizinine dayalı akustik sensörler geliştirilmiştir. Hava sönümleme etkisinin dikkate alındığı akustik emisyonların ölçümünde farklı rezonans frekanslarında salınım yapan kantileverler kullanılmıştır (Takata vd. 2016).

Başka bir çalışmada, farklı geometrik ölçülere sahip altı kantileveri içeren koklear benzeri akustik sensör geliştirilmiştir ve hassasiyetinin araştırılması için ses basıncı frekanslarına maruz bırakılmıştır (Hur vd. 2010). Buna ilaveten, günlük akustik band aralığında çalışan kantilever dizinine dayalı akustik sensör, koklear implantı olarak kulak zarına yerleştirilmek üzere geliştirilmiştir (İlik vd. 2018). Ayrıca, bimorf kantilever dizinine dayalı çok kanallı piezoelektrik akustik sensörü, viskoz akışkan ortamında çalışması için MEMS teknolojileri kullanılarak geliştirilmiştir (Zhao vd. 2018). Buna ilaveten, duyulabilir frekans bandında baziler zarların sinyal işleme fonksiyonlarını taklit etmesi için farklı rezonans frekanslara sahip piezoelektrik kantileverler kullanılmıştır (Hur vd. 2012). Bunun dışında, 0.1-1 MHz aralığında rezonans frekanslarına sahip kantilever dizini akustik sinyallerin tespit edilmesi için kullanılmıştır (Kawashima vd. 2012).

Literatürdeki birçok çalışmada kantilever ucu-malzeme etkileşim kuvveti etkisindeki kantileverin genlik, faz kayması ve frekans cevapları iki frekanslı AKM operasyonlarında araştırılmıştır. ÇF-AKM tekniği, osilasyon ölçülebilirlikleri ile topografik ölçüm ve malzeme özelliklerinin kontrastını haritalamada etkili bir yöntemdir (Herruzo ve Garcia 2012). Birçok çalışmada genlik değişimleri ve faz kaymaları dokunma modlu AKM'deki yüksek dereceli tahrik şemaları için elde edilmiştir (Solares 2012; Solares ve Chawla 2012; Ebeling vd. 2013). İki frekanslı tahrik şeması kullanılarak AKM gözlenebilirlerinde daha yüksek hassassiyet elde edilmektedir (Rodriguez ve Garcia 2004; Damircheli vd. 2015). Kantileverin yüksek dereceli frekans tahriği, kantilever ucu-malzeme mesafesine göre etkileşim kuvvet değişimini elde etmeye imkan vermektedir (Aksoy ve Atalar 2011). Kantilever ucu-malzeme etkileşim kuvveti kantilever dinamiğini doğrusal olmayan bir şekilde etkilemektedir ve bu durum daha yüksek özmod frekanslarında daha büyük faz kaymalarına sebep olmaktadır (Eslami ve Damircheli 2019; Payam vd. 2015; Damircheli 2019). Bir çalışmada, AKM kantileverlerinin sürülmesi için üç tür iki frekanslı tahrik şemaları uygulanmıştır ve hesaplamalı simülasyonlar kullanılarak tahrik şemalarının dinamik davranışları karşılaştırılmıştır (Huang vd. 2021). Buna ilaveten, iki yaylı osilatör modeline dayalı kantilever dinamiği, iki frekanslı operasyonlar uygulanarak gözlemlenmiştir (Dou vd. 2020). AKM kantilever cevapları üzerindeki bir histerezis araştırmasında iki frekanslı tahrik, ikinci rezonans frekansının uygulanmasından dolayı salınım genliğinde ve görüntüleme hızında artışa neden olmaktadır (Korayem vd. 2016). Başka bir çalışmada, iki frekanslı AKM operasyonunda öz modların maksimum gözlenebilir kontrastını elde etmek için tahrik frekansı optimize edilmektedir (Eslami vd. 2015). Ayrıca, iki frekanslı AKM operasyonunda özmodlardaki kantilever dinamiği kullanılarak oluşturulan teorik çerçeve, kantilever ucu-yüzey etkileşim kuvveti parametrelerini hesaplamak için verilmiştir (Forchheimer vd. 2014). Frekans modülasyonlu AKM'de iki frekanslı tahrik altında çalışan küçük kantileverler, görüntüleme kuvvetleri ve daha iyi yanal çözüm elde edilmesine imkan vermektedir (Dietz vd. 2015). Bir çalışmada, kantileverin iki frekanslı tahriği altında faz kayması değişimleri dikkate alınarak 0.2 pN kuvvet hasassiyetine ulaşılmıştır (Lozano ve Garcia 2008). Literatürdeki bazı çalışmalardaki AKM operasyonlarında gözlenebilirler hassasiyetini arttırmak için ikiden fazla frekanslı tahrik şemaları kullanılmıştır. Tıklatma modundaki AKM operasyonlarında beş frekanslı tahrik şeması kullanılarak elde edilen genlik ve faz kayması cevapları Solares vd. (2014) çalışmasında verilmiştir. Diğer bir çalışmada, ilk dört ve beş özmodlardaki salınım gözlenebilirlerini elde etmek için dört ve beş frekanslı kantilever dinamiğinin hesaplamalı simülasyonu gerçekleştirilmiştir (An vd. 2014). Ayrıca, iki ve üç frekanslı operasyonlarda

yüksek özmodlarda frekans cevaplarında değişimler elde edilmiştir (Solares ve Chawla 2010).

Literatürde AKM operasyonlarında kantilever ucu-malzeme etkileşim kuvvetlerinden dolayı oluşan enerji yayılımı üzerine birçok çalışma yürütülmüştür. AKM uygulamalarında yüksek genliklerdeki karmaşık olan kantilever ucu-malzeme etkileşimi virial ve yayılan güç ile araştırılabilmektedir. Virial ve yayılan güç değişkenleri analitik ifadeler kullanılarak kantilever cevaplarının genlikleri ve faz kaymaları ile elde edilebilmektedir (Lozano ve Garcia 2009). Faz kayması ve yayılan enerji arasındaki bağlantı, nümerik ve analitik hesaplamalara dayalı olarak düşük kalite faktörlü tıklatma modundaki (Tapping) taramalı kuvvet mikroskopisi için elde edilmiştir (Tamayo 1999). Ayrıca, enerji yayılmı ve özmodlar arasındaki enerji transferi, ÇF-AKM'de faz kontrastı teorisi sunularak değerlendirilmiştir (Santos 2014). Korunumlu ve korunumsuz kantilever ucu-malzeme etkileşimleri için kullanılan virial ve yayılan güç, iki frekanslı AKM'de lazer nokta konumlarına göre belirlenmiştir (Putnam vd. 2020). Diğer bir çalışmada, genlik modülasyonlu AKM'de genliğe göre malzeme yüzeyindeki yayılan enerjiyi belirlemek için bir metod geliştirilmiştir ve uygulanmıştır (Gomez ve Garcia 2010). Viriallerin işaretlerine ve ortalama kantilever ucu-malzeme etkileşim kuvvetlerine göre faz kayması geçişleri incelenmiştir. Buna ilaveten, iki frekanslı AKM'deki genlik oranlarına göre ilk iki özmodun virialleri belirlenmiştir (Diaz vd. 2014). Özmod frekansındaki serbest salınım genliği osilasyon genliklerinin virialleri ve yayılan gücü üzerindeki etkilerini incelemek için ayarlanabilmektedir (Tan vd. 2019).

Sunulan doktora çalışmasında statik ve dinamik akustik kuvvetlerin ölçümlerinde salınım gözlenebilirleri olan genliğin ve faz kaymasının elde edildiği tek frekanslı ve ÇF-AKM tahrik şemalarına dayalı dinamik modeller geliştirilmiş ve nümerik yöntem ile çözümlenmiştir. Doktora çalışmasında ayrıca akustik kuvvetin ölçümü için virial teoremine ve enerji korunumu prensibine dayalı olarak enerji yayılımı ve salınım gözlenebilirleri arasında bağlantılar kurulmuştur. Enerji depolaması ve yayılımı süreçlerini açıklamak için virial ve yayılan güç gibi enerji değişkenleri bu çalışmada elde edilmiştir. Literatürdeki araştırmalar genel olarak kantilever ucu ile malzeme arasındaki etkileşim kuvveti hassasiyetinin ölçülmesini ele almaktadır. ÇF-AKM teorisinin statik ve dinamik akustik kuvvetin ölçümünde kullanılması, bu doktora çalışmasının özgün tarafıdır.

3. MATERYAL VE METOD

Rezonans frekanslarında dinamik olarak tahrik edilen kantilever, farklı genliklere sahip akustik emisyonları ölçmek için kullanılmıştır. Statik ve dinamik akustik kuvvet ölçümünde farklı tahrik şemaları AKM kantileverinin sürülmesi için kullanılmıştır.

3.1. Dinamik Model

Bu bölümde AKM kantileveri süren tahrik kuvvetlerinin ve etki eden akustik kuvvetin düşünüldüğü bir dinamik model oluşturulmuştur. Statik ve dinamik akustik kuvvet ölçüm hassasiyetini arttırmak için kantileverin dinamiğinin potansiyeli araştırılmıştır. Zorlanmış ve sönümlü harmonik osilatör dinamik modelinde kantilever nokta kütle olarak düşünülerek hareket denklemi oluşturulmuştur (Lozano ve Garcia 2008). Tek frekanslı tahrik şemasında kantilever sadece bir özmod frekansında sürülmektedir. Çoklu frekanslı tahrik planında ise kantilever aynı anda birden fazla özmod frekansında sürülmektedir. Tek ve çoklu frekanslı tahrik işleminde $z_i(t)$ yer değiştirmesini elde etmek için hareket denklemi olan ikinci mertebeden lineer diferansiyel denklem aşağıda verilmiştir.

$$m_e \ddot{z}_i(t) = -k_i z_i(t) - \frac{m_e \omega_{ei}}{Q_i} \dot{z}_i(t) + F_{tahrik} + F_{Akustik} \tag{3.14}$$

Denklem 3.14'de verilmiş olan k_i, ω_{ei} ve Q_i sırasıyla i özmodu için yay sabiti, açısal rezonans frekansı ve kalite faktörünü ifade etmektedir. Özmodlardaki kalite faktörleri osilasyon genliğini etkileyen ortam hava basıncının bir fonksiyonu olan ortam sönümlemesini ifade etmektedir (Takata vd. 2016). Akustik kuvvet etkisindeki kantilever hava ortamında tahrik kuvvetleri ile sürülmektedir. F_{tahrik} ve $F_{Akustik}$ sırasıyla kantileveri süren tahrik kuvveti ve akustik kuvveti ifade etmektedir. m_e kantileverin etkili kütlesidir. Kantileverin etkili kütlesi aşağıdaki Denklem 3.15 kullanılarak hesaplanmaktadır (Skrzypacz vd. 2019). Kantileverin etkili kütlesi, Hollomon gerilim-gerinme denklemine dayanmaktadır (EK-1).

$$m_e = \frac{33}{140} Lwt\rho \tag{3.15}$$

Denklem 3.15'de verilmiş olan L, w, t ve ρ sırasıyla kantileverin uzunluğu, genişliği, kalınlığı ve kütle yoğunluğunu ifade etmektedir. i özmodu için açısal rezonans frekansının denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\omega_{ei} = \sqrt{\frac{k_i}{m_e}} = 2\pi f_{ei} \tag{3.16}$$

Denklem 3.16'da verilmiş olan f_{ei} kantileverin i özmod için rezonans frekansını ifade etmektedir. Kantileveri süren toplam tahrik kuvvetinin denklemi aşağıda verilmiştir.

$$F_{tahrik} = \sum_{i=b}^{c} F_{tahrik,i} = \sum_{i=b}^{c} F_i \cos(\omega_{ei} t) \tag{3.17}$$

Denklem 3.17'de verilmiş olan $F_{tahrik,i}$ ve F_i sırasıyla i özmod için kantileveri süren tahrik kuvveti ve tahrik kuvvetinin şiddetini ifade etmektedir. b ve c değişkenleri sırasıyla çoklu frekanslı operasyonlarda özmodların alt ve üst sınırlarını ifade etmektedir.

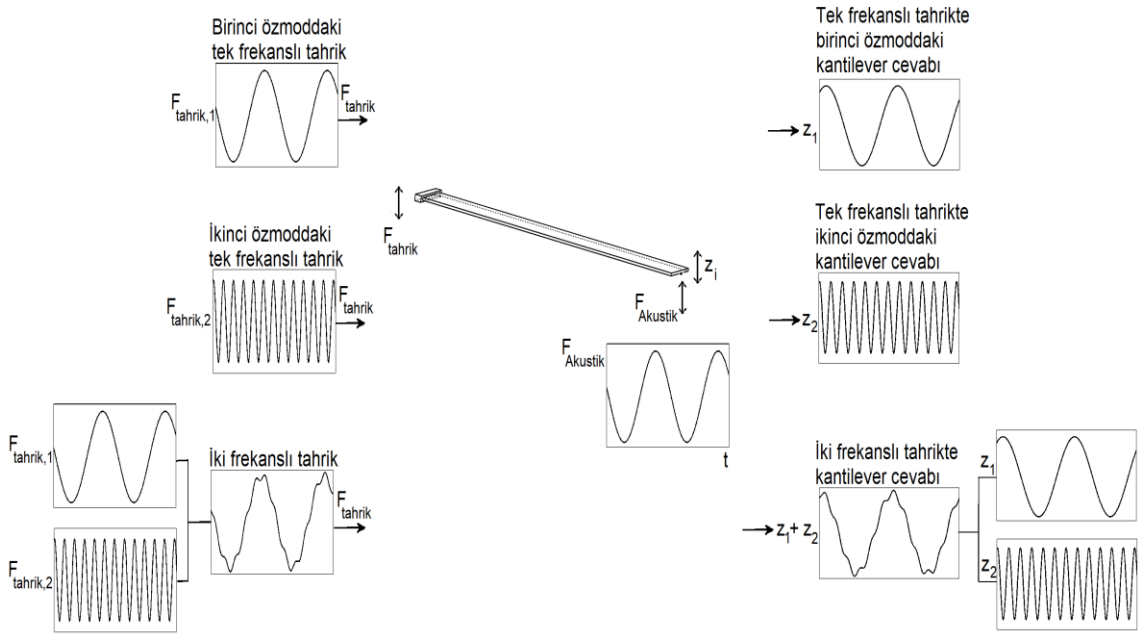
$$z_{total}(t) = \sum_{i=b}^{c} z_i(t) + O(\epsilon) \approx \sum_{i=b}^{c} A_i \cos(\omega_{ei} t - \emptyset_i) \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'de verilmiş olan z_{total}, Denklem 3.14'ün çözülmesi sonucu elde edilen toplam yer değiştirmeyi ifade etmektedir. A_i ve $\emptyset_i$, i özmodu için sırasıyla osilasyon genliğini ve faz kaymasını ifade etmektedir. $O(\epsilon)$ terimi yüksek harmoniklerdeki yer değiştirmelerinin katkısını ifade etmektedir. Tek ve çoklu frekanslı olarak iki frekanslı operasyonlar için kantileverin yer değiştirmesi bir boyutlu Euler-Bernoulli denkleminden elde edilmiştir (EK-2). Kantileverin rezonans dinamiği araştırıldığı için kantileverin özmod frekansı tahrik kuvvetinin frekansı olarak kullanılmıştır.

3.1.1. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ile sürülen kantilever ile statik akustik kuvvet ölçümü

Tek frekanslı tahrikte kantilever birinci ya da ikinci özmod frekansında sürülmektedir. İki frekanslı tahrikte kantilever eş zamanlı olarak birinci ve ikinci özmod frekansında sürülmektedir. Denklem 3.19'da verilen $F_{Akustik}$ eşitliği F_{Ak} akustik kuvvet şiddetini içeren akustik kuvveti ifade etmektedir (Yilmaz vd. 2021a).

$$F_{Akustik} = F_{Ak} \quad (3.19)$$



Şekil 3.11. Kantileverin sürülmesi için uygulanan tahrik şemaları ve statik akustik kuvvete verilen kantilever cevapları

Denklem 3.17'de belirtilmiş olan b ve c değişkenleri tek frekanslı tahrik şeması için 1 veya 2 değerini almaktadır. İki frekanslı tahrik şeması için b ve c değişkenleri sırasıyla 1 ve 2 değerini almaktadır.

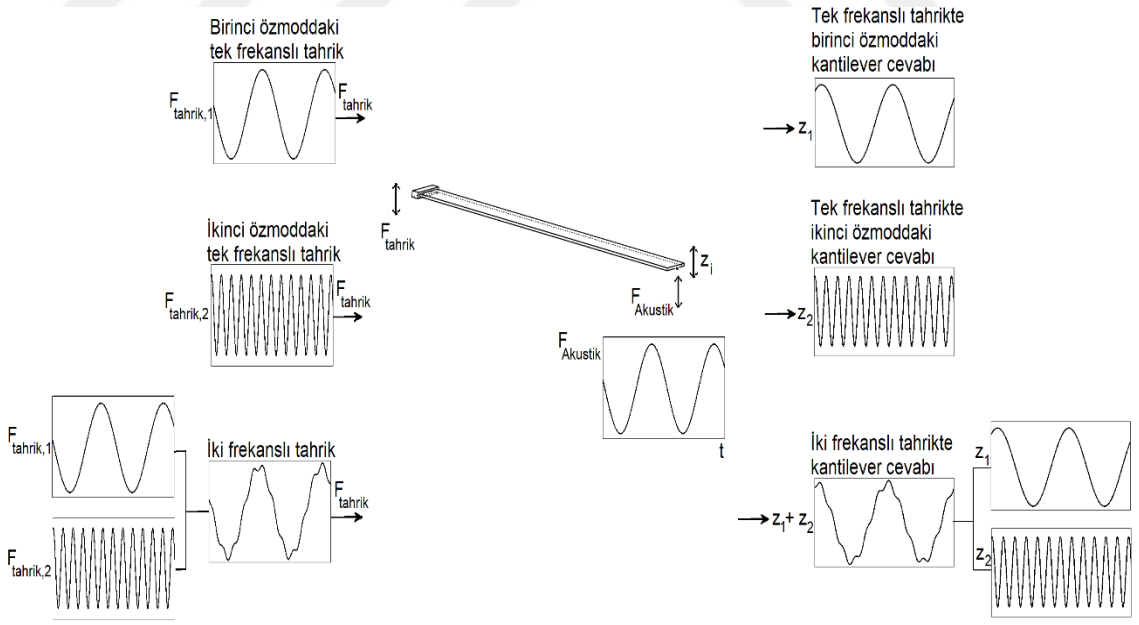
Bu çalışmada ayrıca, artan tahrik kuvveti oranı ile birlikte akustik kuvvet şiddetine göre genlik ve faz kayması cevaplarının hassasiyeti araştırılmıştır. Böylece, statik akustik kuvvetin ölçümünde en yüksek gözlenebilir hassasiyetini elde etmek için iki frekanslı tahrikte optimum tahrik parametrelerinin bulunması mümkün hale gelmiştir (Yilmaz ve Topal 2021a). Tahrik kuvveti oranı r, Denklem 3.20'de verilmiştir.

$$r = \frac{F_1}{F_2} \tag{3.20}$$

Şekil 3.11'de statik akustik kuvvet ölçümünde kantileverin sürülmesi için uygulanan tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ve akustik kuvvet etkisindeki kantileverin cevapları şematize edilmiştir.

3.1.2. Tek ve çoklu frekanslı tahrik şemaları ile sürülen kantilever ile dinamik akustik kuvvet ölçümü

Tek frekanslı tahrik şemasında kantilever birinci veya ikinci özmod frekansında sürülmektedir. Çoklu frekanslı operasyonlar için iki (bimodal), üç (trimodal) ve dört (tetramodal) frekanslı tahrik şemaları kullanılmıştır (Yilmaz ve Topal 2021b). Çoklu frekanslı operasyonlarda kantilever eş zamanlı olarak birden fazla özmod frekanslarında sürülmektedir.



Şekil 3.12. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ve dinamik akustik kuvvete maruz kalan kantileverin cevapları

Dinamik akustik kuvvet $F_{Akustik}$, belirli açısal frekansta ($\omega_{Ak}=2\pi f_{Ak}$) bir kuvvet şiddetine F_{Ak} sahip bir kosinüs dalgası olarak formüle edilmiştir (Denklem 3.21).

$$F_{Akustik} = F_{Ak}\cos(\omega_{Ak}t) \quad (3.21)$$

Tahrik kuvvetinin analitik ifadesi olan Denklem 3.17'de belirtilmiş olan b ve c değişkeni tek frekanslı tahrik için 1 veya 2 değerini almaktadır. Çoklu frekanslı tahrik planlarında b değişkeni 1 değerini almaktadır ve c değişkeni iki, üç ve dört frekanslı operasyonlar için sırasıyla 2, 3 ve 4 değerini almaktadır.

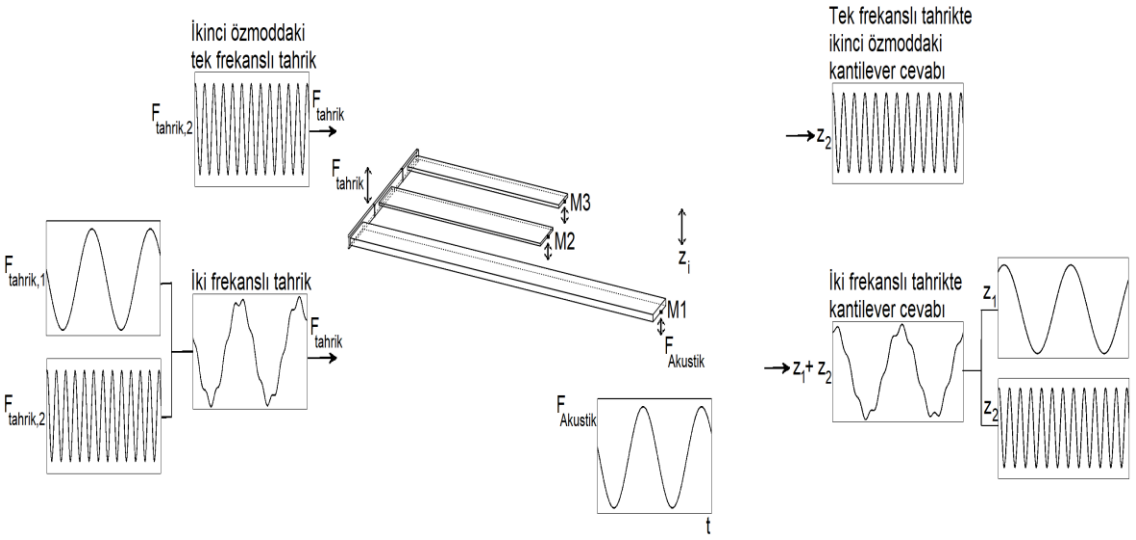
Şekil 3.12'de dinamik akustik kuvvet ölçümünde kantileverin sürülmesi için uygulanan tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ve akustik kuvvet etkisindeki kantileverin cevapları şematize edilmiştir.

3.1.3. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ile sürülen kantilever dizini ile dinamik akustik kuvvet ölçümü

Tek frekanslı tahrik şemasında kantilever dizini ikinci özmod frekansında sürülmektedir. İki frekanslı tahrik planında eş zamanlı olarak birinci ve ikinci özmod frekansında sürülmektedir.

Bu tahrik şemaları için kantilever dizini üzerine etki eden dinamik akustik kuvvet $F_{Akustik}$ Denklem 3.21'de belirtilmiştir.

Denklem 3.17'de belirtilmiş olan b ve c değişkenleri tek frekanslı tahrik şemasında 2 değerini almaktadır. İki frekanslı tahrik şeması için b ve c değişkenleri sırasıyla 1 ve 2 değerini almaktadır.



Şekil 3.13. Dinamik akustik kuvvet altındaki kantilever dizininin sürülmesi için tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ve kantilever dizininin dinamik cevapları

Şekil 3.13'de dinamik akustik kuvvet ölçümünde kantilever dizininin sürülmesi için uygulanan tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ve akustik kuvvet etkisindeki kantilever dizininin cevapları şematize edilmiştir.

3.2. Enerji Korunumu Yasası ve Virial Teoreminin Uygulanması

Rezonans frekanslarında sürülen kantilever üzerinde etkili olan akustik kuvvetler, salınımların karakteristiklerini belirlemektedir. Genlik ve faz kayması gibi zamana bağlı olan gözlenebilirlerdeki değişimler analitik olarak enerji korunumu ve yayılımı süreçleri ile ilişkilendirilmektedir (Lozano ve Garcia 2009). Akustik kuvvet etkisindeki kantileverin yaydığı güç ve depoladığı enerji, ölçüm hassasiyeti için gösterge parametreleridir. Tahrik şemalarına göre kararlı halde tahrik kuvvetleri tarafından kantilevere enerji sağlanmaktadır. Kantileverin çalışma ortamı ve akustik kuvvetler ile etkileşimi sonucunda enerji kayıpları yaşanmaktadır. Serbest salınım ve akustik kuvvet etkisindeki salınım dikkate alınarak hesaplanan faz kayması yayılan enerji miktarı ile ilişkilendirilmektedir.

Bir salınım periyodunda ($T = \frac{2\pi}{\omega_i}$) i özmodu için tahrik kuvveti tarafından yapılan iş $E_{tahrik,i}$ ve çalışma ortamına iletilen enerji $E_{ortam,i}$ denklemleri aşağıda verilmiştir (Tamayo 1999).

$$E_{tahrik,i} = \int_0^T F_{tahrik,i}\, \dot{z}_i(t)\, dt = \pi A_i F_i \sin(\emptyset_i) \tag{3.22}$$

$$E_{ortam,i} = \frac{k_i}{\omega_{ei} Q_i} \int_0^T \dot{z}_i(t)^2\, dt = \frac{\pi\, {A_i}^2 k_i}{Q_i} \tag{3.23}$$

Salınım periyodu başına enerji yayılımı, enerji korunumu yasası kullanılarak hesaplanabilmektedir (Denklem 3.24). i özmodu için akustik kuvvet etkisi ile yayılan enerji $E_{yay,i}$ Denklem 3.25 kullanılarak hesaplanabilmektedir (Tamayo 1999).

$$E_{yay,i} = E_{tahrik,i} - E_{ortam,i} \tag{3.24}$$

$$E_{yay,i} = \pi A_i \left(F_i \sin(\emptyset_i) - \frac{k_i A_i}{Q_i} \right) \tag{3.25}$$

Akustik etkisi ile dinamik sistemden yayılan güç, enerji yayılımının bir göstergesi olarak kullanılabilmektedir. Kantileverin yer değiştirmeleri, periyotlara bağlı olarak farklı karakteristiklere sahip oldukları için yayılan enerji terimi yerine yayılan güç terimi tanımlanmıştır (Lozano ve Garcia 2009). Buna ilaveten, virial terimi V_i dinamik akustik kuvvet etkisindeki kantileverin depoladığı enerjiyi ve enerji korunum sürecini ifade etmektedir.

$$P_i = \frac{E_{yay,i}}{T} \tag{3.26}$$

$$P_i = \frac{1}{2} F_i A_i \omega_{ei} \sin(\emptyset_i) - \frac{k_i {A_i}^2 \omega_{ei}}{2Q_i} \quad (3.27)$$

$$V_i = -\frac{1}{T}\int_0^T F_{tahrik,i}\, z_i(t)\, dt = -\frac{1}{2} A_i F_i \cos(\emptyset_i) \quad (3.28)$$

Tahrik şemalarında i özmodu için analitik ifadeler kullanılarak (Denklem 3.27 ve Denklem 3.28) yayılan güç ve virial hesaplanabilmektedir (Yilmaz vd. 2021b).

3.3. Nümerik Hesaplama

3.3.1. Statik akustik kuvvet ölçümünde kantileverin tek ve iki frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri

Kantileverin geometrik parametreleri olan uzunluğu (L), genişliği (w), kalınlığı (t) ve kütle yoğunluğu (ρ) sırasıyla 225 µm, 40 µm, 1.8 µm ve 2320 $\frac{kg}{m^3}$ olarak alınmıştır (Lozano ve Garcia 2008). Her bir özmod için yay katsayısı, kalite faktörü ve tahrik frekansı Çizelge 3.1'de verilmiştir (Lozano ve Garcia 2008).

Çizelge 3.1. Kantileverin özellikleri

Parametreler	Birinci özmod	İkinci özmod
$\mathbf{k_i}$ (N/m)	0.9	35.2
$\mathbf{Q_i}$	255	1000
$\boldsymbol{f_{ei}}$ (kHz)	48.9	306.2

Nümerik çözümlemeler 200-1100 pN aralığındaki akustik kuvvetler için gerçekleştirilmiştir. Akustik kuvvet şiddeti, etkili ses basıncı seviyesinin (P_a) kantileverin geniş yüzeyi ile çarpılması ile bulunmaktadır ($F_{Akustik} = P_a \times A_{etkili}$) (Demirkıran vd. 2018; Yilmaz vd. 2021a). Kantileverin geniş yüzeyi 9 x 10^{-9} m^2'dir (A_{etkili}= L x w). 200-1100 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddetleri 60.9-75.7 dB aralığındaki ses basıncı seviyelerine karşılık gelmektedir (Svoren vd. 2021). Tahrik kuvvetlerinin büyüklükleri F_1 ve F_2 tek ve iki frekanslı tahrikler için 35-78 pN aralığındaki sürücü kuvvetlerine ayarlanmıştır. Statik akustik kuvvetin kantileverin yüzeyinde etkili olduğu nümerik çözümleme zaman aralığının başlangıcı ve bitişi sırasıyla 19.10 ile 19.20 ms'dir. Başlangıç sınır koşulları olan başlangıç yer değiştirmesi ve hız değeri sıfır olarak alınmaktadır ve Denklem 3.14 dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ile nümerik olarak çözülmektedir. Tüm hesaplamalar Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir.

3.3.2. Dinamik akustik kuvvet ölçümü

3.3.2.1. Kantileverin tek ve iki frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri

Akustik kuvvet frekansları ve özmod frekanslarına göre belirlenen spektral bölgeler Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Bölge A'daki akustik kuvvet frekansı, f_a, birinci özmod frekansından daha düşük bir değerdedir. Bölge E'deki akustik kuvvet frekansı f_i, ikinci özmod frekansından daha yüksek bir değerdedir. Bölge C'deki akustik kuvvet frekansı, f_e, birinci ve ikinci özmod frekansları f_{e1} ve f_{e2}'nin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Bölge B ve D sırasıyla birinci ve ikinci özmod frekansları ve onların etrafındaki iki frekansı içermektedir. Bölge B, f_b, f_c ve f_d olmak üzere üç tane akustik kuvvet frekansı içermektedir. Bölge D ise f_f, f_g ve f_h olmak üzere üç tane akustik kuvvet frekansı içermektedir. Kritik bölge olarak tanımlanan bölge B ve D'deki f_c ve f_g sırasıyla birinci ve ikinci özmod frekanslarına eşittir. Bu çalışmada özmod frekansları etrafındaki frekanslardaki akustik kuvvetlere olan kantilever cevapları araştırılmaktadır. Frekans aralıklarının özmod frekanslarına göre belirlenmesi iki frekanslı tahrikteki özmod etkileşimlerinin daha etkin bir şekilde değerlendirilmesine imkan vermektedir.

Çizelge 3.2. A, B ve C spektral bölgelerdeki akustik kuvvet frekansları

f_a (kHz)	f_b (kHz)	f_c (kHz)	f_d (kHz)	f_e (kHz)
4.8	48.7	48.9	49.3	177.5
Bölge A	Bölge B	Bölge B	Bölge B	Bölge C

Çizelge 3.3. D ve E spektral bölgelerdeki akustik kuvvet frekansları

f_f (kHz)	f_g (kHz)	f_h (kHz)	f_i (kHz)
305.6	306.2	307.2	334.2
Bölge D	Bölge D	Bölge D	Bölge E

Kantileverin geometrik parametreleri olan uzunluğu (L), genişliği (w), kalınlığı (t) ve kütle yoğunluğu (ρ) sırasıyla 225 µm, 40 µm, 1.8 µm ve 2320 $\frac{kg}{m^3}$ olarak alınmıştır. Tek ve iki frekanslı tahrik şemalarının hareket denklemlerinin katsayıları Çizelge 3.1'de verilmiştir (Lozano ve Garcia 2008).

Akustik kuvvet şiddeti, kantileverin geniş yüzeyinin alanı ile etkili ses basıncı seviyesinin çarpılması ile hesaplanmaktadır (Demirkiran vd. 2018). 34.9-54.9 dB aralığındaki ses basıncı seviyeleri 10-100 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddetlerine denk gelmektedir (Svoren vd. 2021). Nokta kütle modelinin geçerliliği için dinamik

akustik kuvvetin kantileverin serbest ucunda etkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 3.12). Tek ve iki frekanslı tahrikte birinci ve ikinci özmod frekanslarındaki tahrik kuvvetlerinin şiddetleri (F_1 ve F_2) sırasıyla 10.6 ve 35.2 pN değerlerindedir. Nümerik çözümleme zaman aralığı sınırları 19.0 ile 19.20 ms'dir. Hesaplamalarda hareket denklemi (Denklem 3.14) nümerik olarak dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ile çözülmektedir. Başlangıç koşulları olan başlangıç yer değiştirmeleri ve hızları sıfır değerindedir ve bu koşullar ikinci dereceden lineer diferansiyel denklemin Matlab ortamında nümerik olarak çözülmesi için uygulanmaktadır.

3.3.2.2. Kantileverin çoklu frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri

Kantileverin uzunluğu (L) 225 µm, genişliği (w) 40 µm, kalınlığı (t) 1.8 µm ve kütle yoğunluğu (ρ) 2320 $\frac{kg}{m^3}$ olarak alınmıştır (Lozano ve Garcia 2008). İlk dört özmod için kantileverin özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir. κ_i aşağıda verilmiş olan kantileverin karekteristik denkleminin gerçek köküdür (Garcia ve Herruzo 2012).

$$1 + \cos(\kappa_i)\cosh(\kappa_i) = 0 \tag{3.29}$$

Nümerik simülasyonda akustik kuvvet frekansları 0-1800 kHz frekans aralığında 10 kHz arttırım ile oluşturulmuştur. 60, 1400 ve 2900 pN olan dinamik akustik kuvvetlerinin şiddetleri, 50.5-84.1 dB ses basıncı seviyesi aralığından seçilmiştir ve nümerik hesaplamalarda kullanılmıştır (Svoren vd. 2021). İlk dört özmoddaki tahrik kuvvetlerinin şiddetleri sırasıyla 35.3, 66.4, 185.8 ve 364.2 pN'dur. Hareket denklemi (Denklem 3.14) Matlab ortamında dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ile çözülmüştür. Başlangıç koşulları olan başlangıç yer değiştirmesi ve hızı, hareket denkleminin (Denklem 3.14) nümerik çözülmesi için sıfır olarak alınmıştır. Nümerik çözümleme süresi 19.12-19.19 ms aralığındadır.

Çizelge 3.4. Kantileverin i özmodundaki frekans, yay sabiti ve kalite faktörü

Özmod-i	**κ_i**	**Frekans - f_{ei}** (kHz)	**Yay sabiti - k_i** (N/m)	**Kalite faktörü - Q_i**
1	1.875	48.9	0.9	255
2	4.694	306.7	35.4	1598.9
3	7.855	858.4	277.2	4475.3
4	10.996	1682.1	1064.7	8769.5

İlk dört özmoddaki frekans, yay sabiti ve kalite faktörlerinin hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Garcia ve Herruzo 2012).

$$f_i = f_1(\frac{\kappa_i}{\kappa_1})^2 \quad (3.30)$$

$$k_i = k_1(\frac{f_i}{f_1})^2 \quad (3.31)$$

$$Q_i = Q_1 \frac{f_i}{f_1} \quad (3.32)$$

3.3.2.3 Kantilever dizininin tek ve iki frekanslı operasyonları için nümerik simülasyon verileri

Kantilever dizini, MPP-3310, AC240TS ve Multi75 model olarak toplamda üç tane farklı kantileverden oluşmaktadır (Ehsanipour vd. 2019). MPP-3310 (M1) kantileverinin geometrik ölçüleri olan uzunluğu (L), genişliği (w) ve kalınlığı (t) sırasıyla 450 µm, 40 µm ve 6.5 µm 'e eşittir. AC240TS (M2) kantileverinin geometrik ölçüleri olan uzunluğu (L), genişliği (w) ve kalınlığı (t) sırasıyla 240 µm, 40 µm ve 2.3 µm 'e eşittir. Multi75 (M3) kantileverinin geometrik ölçüleri olan uzunluğu (L), genişliği (w) ve kalınlığı (t) sırasıyla 225 µm, 28 µm ve 3 µm 'e eşittir. Birinci ve ikinci özmod için dinamik modellerin katsayıları gibi kantileverlerin özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir. Silikon malzemeden yapılan kantileverlerin kütle yoğunlukları ρ, 2320 $\frac{kg}{m^3}$'a eşittir.

Çizelge 3.5. Kantilever dizini spesifikasyonu

Kantilever modeli	$\mathbf{k_1}$ (N/m)	$\mathbf{k_2}$ (N/m)	$\mathbf{Q_1}$	$\mathbf{Q_2}$	$\mathbf{f_{e1}}$ (kHz)	$\mathbf{f_{e2}}$ (kHz)
MPP-3310 (M1)	3.5	137	240	365	45.1	279.9
AC240TS (M2)	2.9	106.8	147	289	68.8	403.1
Multi75 (M3)	3.2	118.7	215	325	75.2	475.1

Akustik kuvvetlerin şiddetleri, etkili ses basıncının kantileverlerin geniş yüzeyinin çarpılması ile hesaplanmaktadır (Demirkiran vd. 2018; Yilmaz vd. 2021a). 60, 65 ve 70 dB seviyelerindeki ses basıncı seviyeleri akustik kuvvetlerin şiddetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Nümerik hesaplamalarda dinamik akustik kuvvetlerin frekansları 100-800 kHz aralığında 5 kHz artırım ile oluşturulmaktadır. Tek frekanslı tahrikte kantilever M1, M2 ve M3 için ikinci özmod frekansındaki tahrik kuvvetinin şiddeti sırasıyla 375.3, 369.6 ve 365.2 pN'dur (Şekil 3.13). İki frekanslı tahrik için birinci özmod frekansının tahrik kuvveti şiddeti kantilever M1, M2 ve M3 için sırasıyla 145.8, 197.3 ve 148.8 pN olarak ayarlanmıştır. Nümerik çözümleme zaman aralığı sınırları 19.12 ve 19.20 ms'dir. Kantileverlerin z_2 anlık yer değiştirmelerini elde etmek için ikinci dereceden diferansiyel denklem (Denklem 3.14) dördüncü dereceden Runge-Kutta metodu ile çözülmektedir. Başlangıç koşulları olan başlangıç yer değiştirmesi ve hızı sıfır

olarak ayarlanmış ve bu koşullar ikinci dereceden lineer diferansiyel denklemin Matlab ortamında nümerik olarak çözülmesinde uygulanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Tek ve İki Frekanslı Operasyonlardaki Kantileverin Statik Akustik Kuvvete Karşı Cevapları

Bu bölümde ilk olarak statik akustik kuvvet altındaki kantileverin osilasyonlarının zaman alanı analizleri gerçekleştirilmişir. Daha sonra, farklı sürücü kuvvetler için akustik kuvvet şiddetine bağlı osilasyon genlikleri ve faz kaymaları değerlendirilmiştir. Virial ve yayılan güç sonuçları, enerji yayılımı ve depolaması süreçlerini açıklamak için verilmiştir. Bu bölüm ile ilgili sonuçlar "Measurement Science and Technology" adlı bilimsel dergide makale olarak yayınlanmıştır (Yilmaz vd. 2021a). Buna ilaveten, iki frekanslı tahrikte farklı tahrik kuvveti oranları için ilk iki özmodda osilasyon genlik ve faz kayması sonuçları analiz edilmiştir. Analiz sonuçları bir uluslararası konferansta tam metin bildiri olarak yayınlanmıştır (Yilmaz ve Topal 2021a).

4.1.1. Zaman alanı salınımları

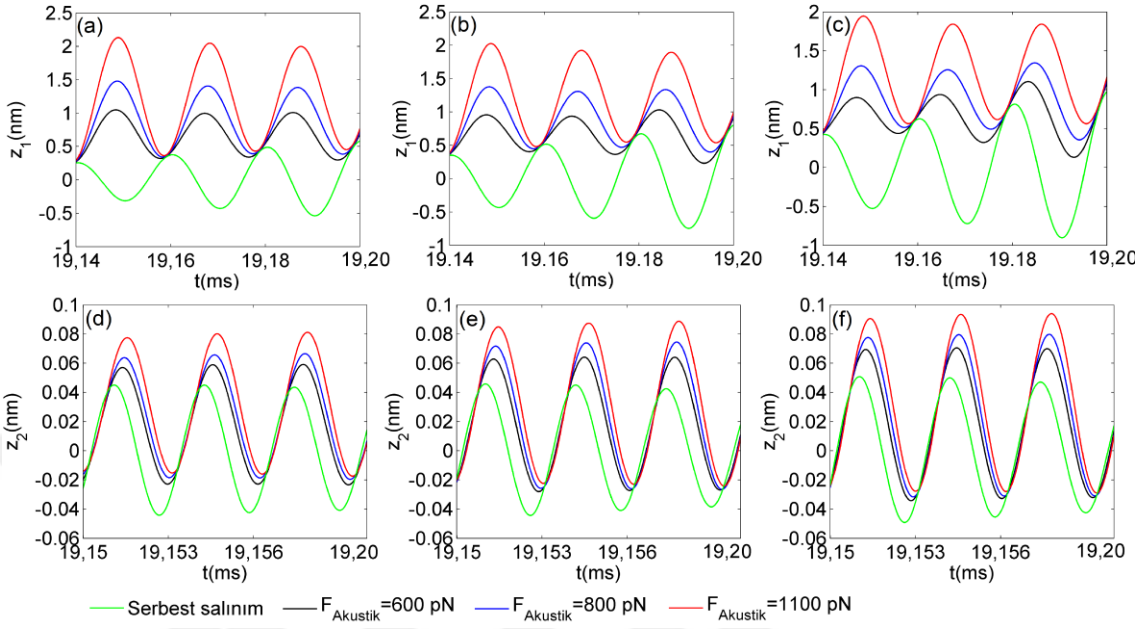
Şekil 4.14a, b, c'de tek frekanslı tahrikte 35 pN, 49 pN ve 60 pN sürücü kuvvetleri için zaman alanında birinci özmodda kantileverin z_1 yer değiştirmeleri gösterilmiştir. Şekil 4.14d, e, f iki frekanslı tahrikte birinci ve ikinci rezonans frekanslarında tahrik edilen sürücü kuvvetler için ikinci özmoddaki kantileverin z_2 yer değiştirmelerini göstermektedir. Rezonans frekanslarındaki tahrik kuvvetleri ile sürülen kantileverin serbest salınımları, statik akustik kuvvetin etki etmediği durumlarda elde edilmiştir. İki tahrik şemasındaki akustik kuvvet şiddeti arttıkça, z_1 ve z_2 osilasyonlarında daha yüksek genlikler elde edilmektedir. Şekil 4.14a'da gösterildiği gibi statik akustik kuvvet 600 pN'dan 1100 pN'a arttırıldığı zaman osilasyon genliği 0.3 nm'den 0.8 nm'ye çıkmaktadır. Benzer şekilde, denge noktası 0.7 nm'den 1.2 nm'ye çıkmaktadır. Bu sonuç toplam etkili kuvveti artıran daha yüksek statik akustik kuvvetin denge noktasında ve osilasyon genliğinde kayda değer bir artışa neden olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.14d'de gösterildiği üzere iki frekanslı tahrikte ikinci özmod için 600 pN, 800 pN ve 1100 pN statik akustik kuvvetlerin etkisi ile denge noktası yukarıya kaymaktadır. Osilasyonun belirli bir periyodu için zaman ile birlikte değişen osilasyon gözlenebilirleri elde edilebilmektedir (Şekil 4.14d) (Lopez Guerra vd. 2019). İki frekanslı tahrik için farklı akustik kuvvet altındaki osilasyonların faz kaymaları Şekil 4.14d, f'de açıkça gözlemlenebilmektedir.

4.1.2. Genlik ve faz kayması tepkileri

Zamana bağlı olan genlik ve faz kayması kantileverin yer değiştirmelerinden anlık olarak elde edilebilmektedir. 19.14 ve 19.20 ms zaman aralığı için z_1 osilasyonlarının ortalama genlik ve faz kaymaları elde edilmiştir. Benzer şekilde, 19.15 ve 19.16 ms zaman aralığı için z_2 osilasyonlarının gözlenebilirleri hesaplanmıştır. Akustik kuvvet etkisindeki kantileverin cevapları ve serbest salınımları dikkate alınarak faz kaymaları elde edilmiştir. Şekil 4.15, tek ve iki frekanslı tahriklerde 35-78 pN aralığındaki sürücü kuvvetler için birinci ve ikinci özmoddaki kantileverin cevaplarını göstermektedir (Yilmaz vd. 2021a). Şekil 4.15'de gösterilen kesikli çizgiler, sürücü kuvvetlerin birinci ya da ikinci özmod frekansındaki tahrik kuvvetlerinin büyüklüklerine eşit olduğu tek frekanslı tahrik şeması kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Düz çizgiler ise

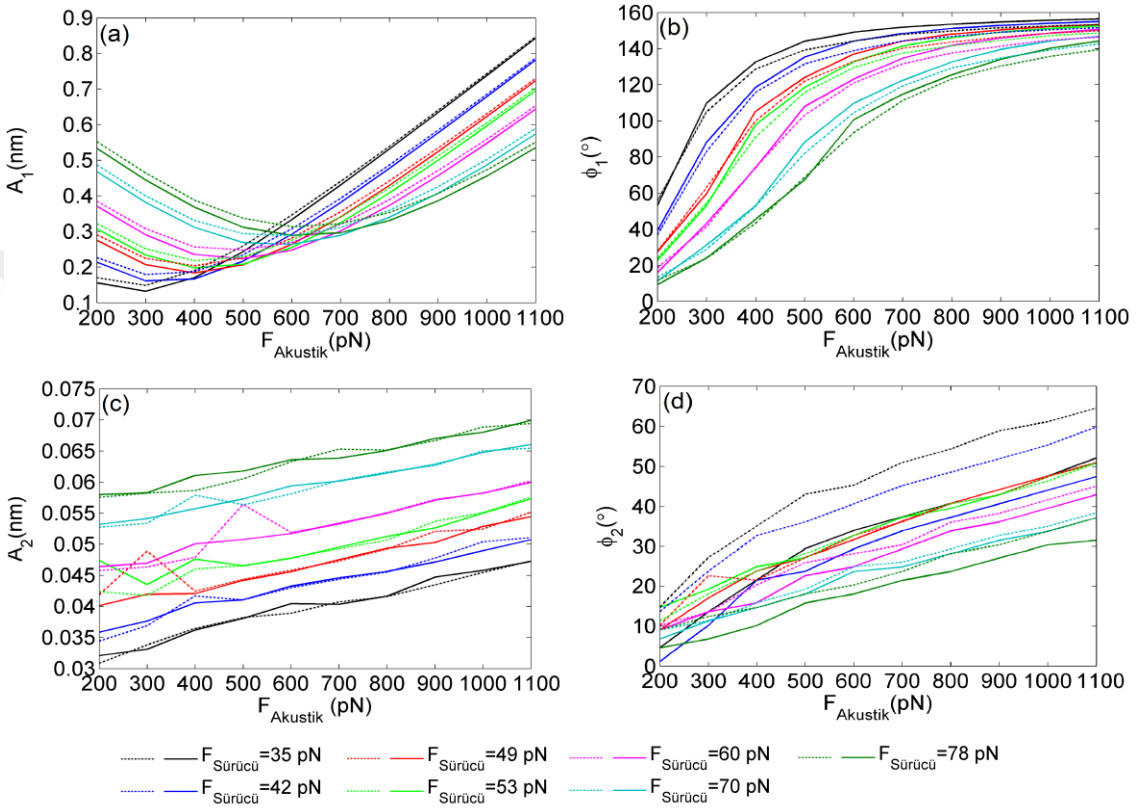
sürücü kuvvetlerin birinci ve ikinci özmod frekanslarındaki tahrik kuvvetlerinin şiddetlerine eşit olduğu iki frekanslı tahrik şeması kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.14. Tek ve iki frekanslı tahriklerde elde edilen serbest salınımlar ve statik akustik kuvvetler altındaki kantileverin salınımları. Tahrik kuvveti şiddeti **a)** F_1=35 pN; **b)** F_1=49 pN; **c)** F_1=60 pN için tek frekanslı tahrikte birinci özmoddaki kantileverin z_1 yer değiştirmeleri. Tahrik kuvvetlerinin şiddetleri **d)** $F_1 = F_2$=35 pN; **e)** $F_1 = F_2$=49 pN; **f)** $F_1 = F_2$=60 pN için iki frekanslı tahrikte ikinci özmoddaki kantileverin z_2 yer değiştirmeleri

Şekil 4.15a'da gösterildiği üzere üç farklı osilasyon genlik bölgesi elde edilmiştir. Birinci bölge 200 ile 300 pN aralığındaki akustik kuvvetleri içermektedir. Bu bölgede en büyük sürücü kuvvet için en yüksek genlik cevabı elde edilmiştir. 300-700 pN akustik kuvvet aralığını kapsayan ikinci bölge, her bir genlik cevabının en düşük değere sahip olduğu bir geçiş bölgesidir. Bu kayda değer eğilim, sürücü kuvvetlerin ve akustik kuvvet şiddetlerinin toplamı olan etkili kuvvetin büyüklüğüne bağlıdır. 700-1100 pN akustik kuvvet aralığını içeren üçüncü bölgede daha küçük tahrik kuvvetleri uygulanarak daha yüksek genlik cevapları bulunmuştur. Kantilever daha düşük genliklerde salınım yaparken daha büyük akustik kuvvetler ile daha fazla etkileşim koşulları oluşmaktadır. Buna ilaveten, iki tahrik modunun arasındaki genlik cevaplarında kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir. Şekil 4.15b'de gösterildiği gibi daha küçük sürücü kuvvetler uygulayarak daha yüksek faz kayması bulunabilmektedir. Birinci özmoddaki daha küçük sürücü kuvvetler için daha dik faz kayması geçişleri meydana gelmiştir. Bu sonuçlara dayalı olarak sürücü kuvveti 78 pN'dan 35 pN'a düşürüldüğünde belirli akustik kuvvetler için faz kayması hassasiyeti arttırılmıştır. Daha küçük sürücü kuvvetler, 200-1100 pN aralığındaki akustik kuvvetlere daha duyarlı davranan düşük genlikli serbest salınımlara neden olmaktadır. Buna ilaveten, artan akustik kuvvet şiddeti ile birlikte birinci özmoddaki faz kayması artmaktadır ve bir üst limite yaklaşmaktadır. Akustik kuvvet şiddeti arttıkça faz kayması hassasiyeti daha da azalmaktadır. Bununla birlikte, sonuçlar, tek frekanslı tahrik şeması ile karşılaştırıldığında iki frekanslı tahrik şemaları ile birinci özmoddaki faz kayması hassasiyetinin geliştirildiğini göstermektedir. Daha yüksek

modda dış sürücü kuvvet eklemek 200-1100 pN aralığındaki akustik kuvvetlerin ölçüm hassasiyetini arttırmaktadır. Şekil 4.15c ikinci özmod için akustik kuvvet şiddetinin bir fonksiyonu olan genlik cevabı eğrilerini göstermektedir. Daha büyük sürücü kuvvetler ekleyerek belirli akustik kuvvet şiddetleri için daha yüksek genlik cevapları elde edilmektedir. Aslında, daha büyük tahrik kuvvetleri ile kantileverin sürülmesi, mekanik olarak salınım yapan sistemde biriken yüksek kinetik enerjiden dolayı ikinci özmodda daha yüksek genliklere neden olmaktadır. Ayrıca, iki tahrik şeması ile elde edilen genlik cevaplarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

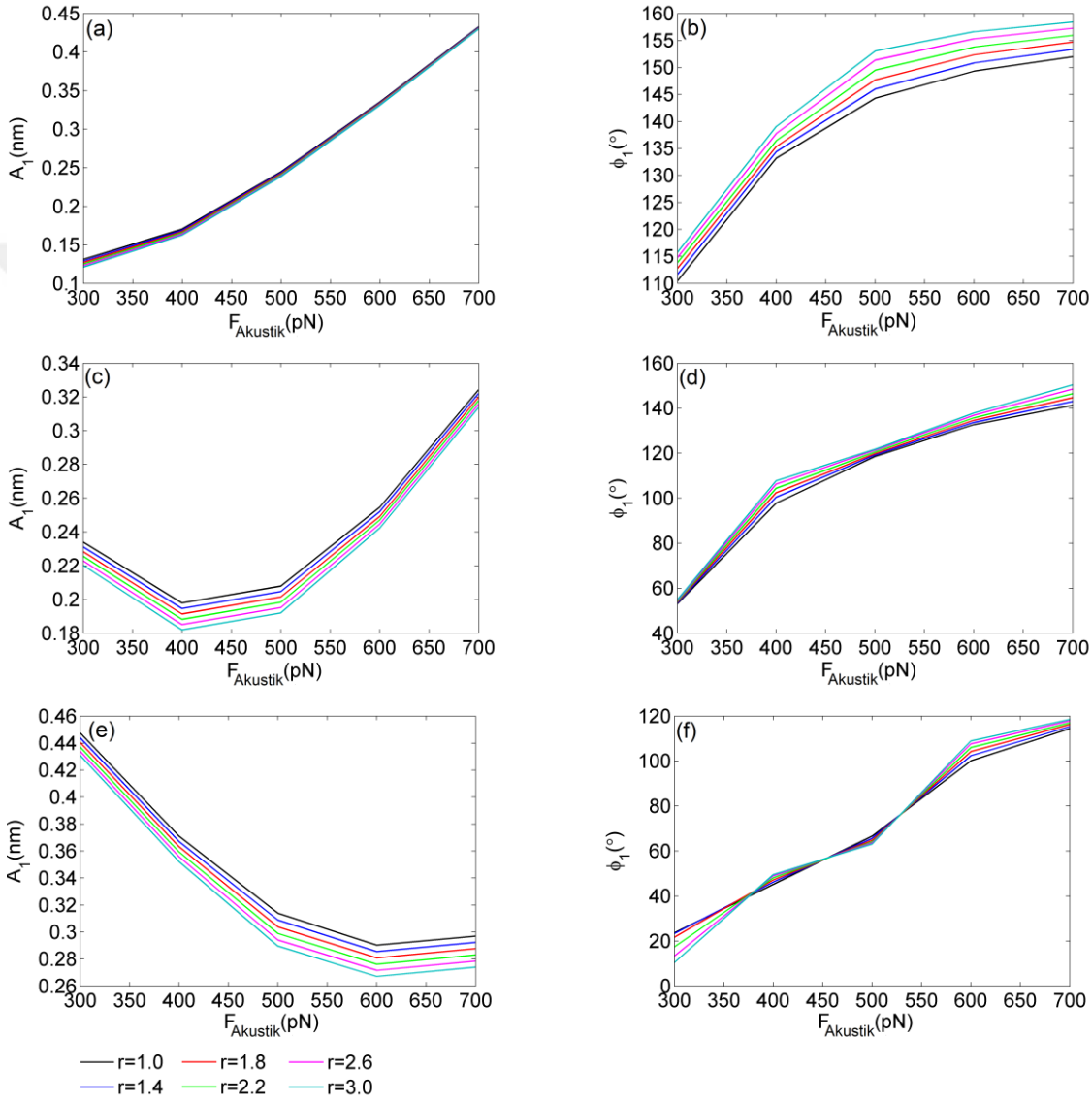


Şekil 4.15. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı tahrik kuvvetlerinin şiddetleri için elde edilen birinci ve ikinci özmoddaki genlikler ve faz kaymaları. **a)** Birinci özmoddaki genlik cevapları; **b)** Birinci özmoddaki faz kayması cevapları; **c)** İkinci özmoddaki genlik cevapları; **d)** İkinci özmoddaki faz kayması cevapları

Şekil 4.15d'de görüldüğü gibi akustik kuvvet şiddeti artıkça faz kayması da artmaktadır. Daha büyük akustik kuvvetler salınım yapan kantileverin enerjisini değiştirmektedir ve bu durum ikinci özmoddaki faz kayması sonuçları ile belirtilmektedir. Daha yüksek özmodlar için kantileverin kinetik enerjisinin yayılımı, AKM operasyonlarındaki kantilever ucu-malzeme etkileşim potansiyelinin itici bölgesindeki enerji yayılımına benzemektedir (Solares ve Chawla 2010). Burada vurgulamak gerekir ki iki frekanslı tahriklerde kayda değer seviyelerde birinci ve ikinci özmodların etkileşimi mevcuttur. Tek frekanslı tahrik sonuçları ile karşılaştırıldığında iki frekanslı tahrikte daha büyük sürücü kuvvetler ile daha düşük faz kaymaları elde edilmektedir. Bu sonuca göre daha yüksek özmoddaki faz kayması hassasiyetinin geliştirilmesi sürücü parametrelerinin optimizasyonunu gerektirmektedir. Birinci özmodda olduğu gibi, iki frekanslı tahrikte dış

tahrik kuvetlerinin optimum şiddetlerinin uygulanması ikinci özmoddaki gözlenebilirlerin hassasiyetini arttırmaya imkan vermektedir.

Tahrik kuvveti oranı r Denklem 3.20'de verilmiştir. Farklı sürücü kuvvetler ve akustik kuvvetler altındaki salınımlar geçiş bölgesinde farklı davranışlar sergilemektedir. Bundan dolayı, bu bölge için tahrik kuvveti oranının gözlenebilirler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Birinci ve ikinci özmod tahrik kuvvetleri arasındaki oran 1.0-3.0 aralığındaki değerleri almaktadır.



Şekil 4.16. İki frekanslı tahrikte farklı tahrik kuvveti oranları için birinci özmoddaki akustik kuvvete bağlı salınım gözlenebilirleri. **a)** F_1=35 pN için genlik cevapları; **b)** F_1=35 pN için faz kayması cevapları; **c)** F_1=53 pN için genlik cevapları; **d)** F_1=53 pN için faz kayması cevapları; **e)** F_1=78 pN için genlik cevapları; **f)** F_1=78 pN için faz kayması cevapları

Genlik cevapları, farklı tahrik kuvvetleri için artan akustik kuvvet ile birlikte farklı eğilimler göstermektedir (Şekil 4.16a, c, e). Şekil 4.16a'da gösterildiği üzere farklı tahrik

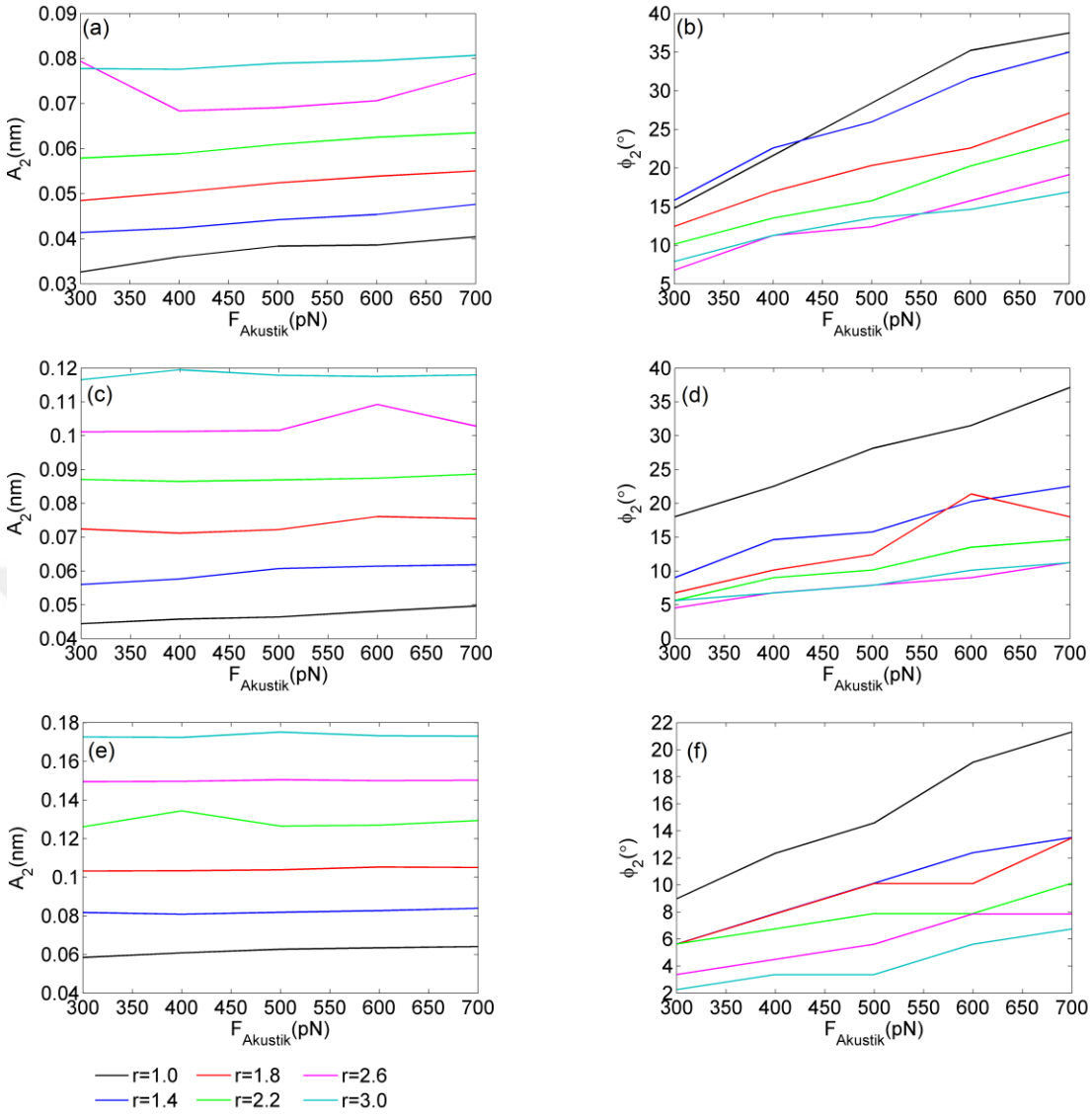
kuvveti oranları arasında kayda değer bir fark tespit edilmemiştir. Buna rağmen, birinci özmod frekansındaki daha büyük tahrik kuvvetleri için elde edilen genlikler arasında önemli derecede farklar mevcuttur (Şekil 4.16c, e). Bu sonuçlar göstermiştir ki daha büyük tahrik kuvvetleri altındaki salınımların akustik kuvvetlere olan hassasiyetleri daha fazladır. Şekil 4.16b'de göründüğü üzere 35 pN değerindeki F_1 tahrik kuvveti için farklı tahrik kuvveti oranları ile elde edilen faz kayması cevapları arasında kayda değer farklar bulunmaktadır. Tahrik kuvveti şiddeti daha küçük değere ayarlandığında rezonans frekanslarında sürülen kantileverin akustik kuvvetler ile etkileşimi daha yüksek olmaktadır. Şekil 4.16c'de gösterildiği üzere farklı tahrik kuvveti oranları için geçiş bölgesindeki akustik kuvvetlerin ölçümünde genlik cevapları azalmaktadır. Şekil 4.16f'de gösterildiği gibi daha büyük sürücü kuvvetler, 300-700 pN aralığında değişen akustik kuvvetler ile birlikte faz kayması cevaplarında düzensiz davranışlara neden olmaktadır.

Şekil 4.17a, c, e'de gösterildiği üzere genlik cevaplarının statik akustik kuvvete olan kayda değer bir hassasiyeti tespit edilmemiştir. Daha büyük tahrik kuvveti oranları için geçiş bölgesindeki akustik kuvvetlerin ölçümünde daha yüksek genlik cevapları elde edilmiştir. 500 pN değerindeki akustik kuvvetin ölçümünde 3.0 değerindeki tahrik kuvveti oranı ve 78 pN değerindeki tahrik kuvveti için 0.173 nm değerinde en yüksek genlik cevabı elde edilmiştir (Şekil 4.17e). Şekil 4.17b, d, f'de akustik kuvvet şiddeti arttıkça tüm tahrik kuvvetleri için faz kayması da artmaktadır. Çoğu durum için geçiş bölgesinde daha küçük tahrik kuvveti oranları için ikinci özmodda daha yüksek faz kayması cevapları mevcuttur. 700 pN değerindeki akustik kuvvetin ölçümünde 1.0 değerinde tahrik kuvveti oranı ve 35 pN değerinde tahrik kuvveti için yaklaşık 37 derece değerinde olan en yüksek faz kayması cevabı elde edilmiştir (Yilmaz ve Topal 2021a). Aynı kuvvet şiddetine sahip birinci ve ikinci özmod frekanslarındaki tahrik kuvvetleri ile aynı anda sürülen kantilever ile en yüksek faz kayması hassasiyeti elde edilebilmektedir.

4.1.3. Virial ve yayılan güç

Virial teoremi ve enerji korunumu prensibi, rezonans frekanslarında tahrik edilen kantileverin nokta kütle modeli dikkate alınarak akustik kuvvet hassasiyetinin incelenmesi için uygulanmıştır (Yilmaz vd. 2021a). Birinci ve ikinci özmodlarda virial ve yayılan güç sırasıyla Denklem 3.28 ve Denklem 3.27 kullanılarak farklı tahrik kuvvetleri için hesaplanmıştır. Tek ve iki frekanslı tahriklerde birinci ve ikinci özmodlar için sonuçlar Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Şekil 4.18'de gösterilen kesikli çizgiler, sürücü kuvvetlerin birinci veya ikinci özmod frekansındaki tahrik kuvvetlerinin şiddetlerine eşit olduğu tek frekanslı tahrik şeması kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Düz çizgiler ise sürücü kuvvetlerin birinci ve ikinci özmod frekanslarındaki tahrik kuvvetlerinin şiddetlerine eşit olduğu iki frekanslı tahrik şeması kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekil 4.18a'da görüldüğü üzere virial sonuçları negatif değerler ile başlamaktadır ve artan akustik kuvvet ile birlikte bütün sürücü kuvvetler için pozitif aralıkta artmaktadır.

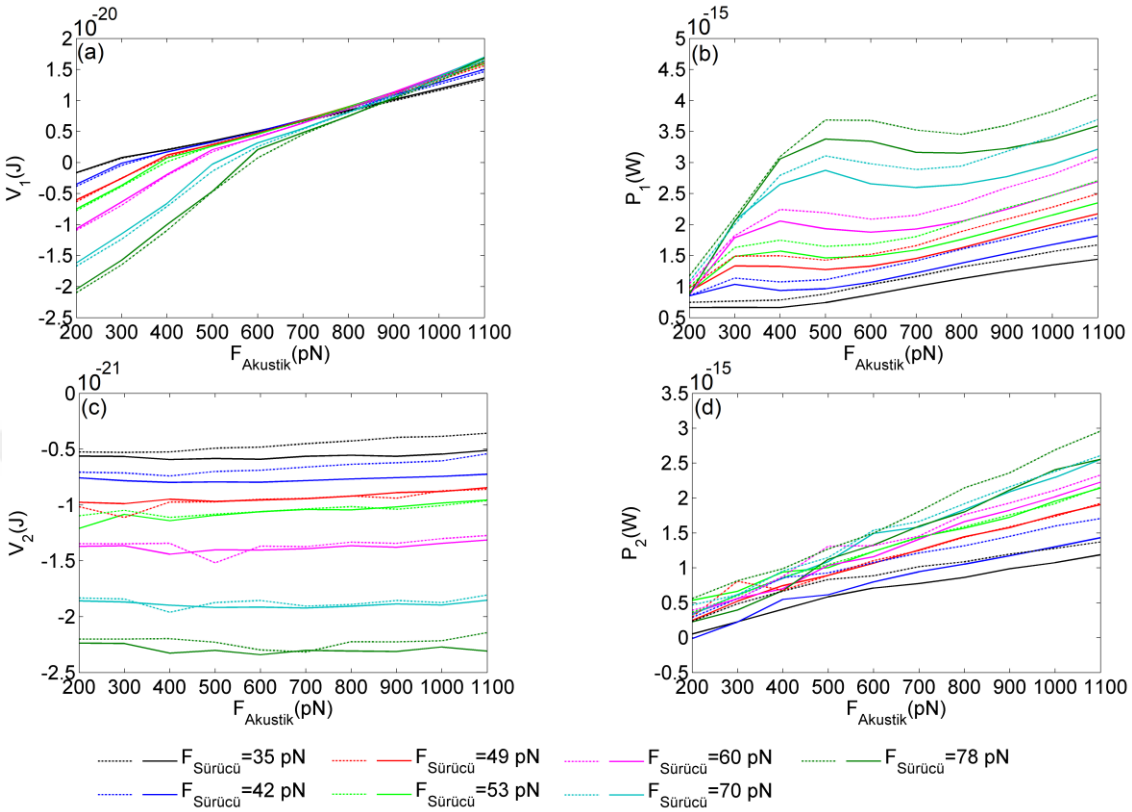
Daha düşük akustik kuvvetler için elde edilen virialin negatif değerleri akustik kuvvetin ölçümünde enerji yayılımını belirtmektedir. Virialin pozitif değerleri sürülen kantileverin daha büyük akustik kuvvetler ile etkileşimi sonucu depolanan kinetik enerjiyi işaret etmektedir.



Şekil 4.17. İki frekanslı tahrikte farklı tahrik kuvveti oranları için ikinci özmoddaki akustik kuvvete bağlı salınım gözlenebilirleri. **a)** F_1=35 pN için genlik cevapları; **b)** F_1=35 pN için faz kayması cevapları; **c)** F_1=53 pN için genlik cevapları; **d)** F_1=53 pN için faz kayması cevapları; **e)** F_1=78 pN için genlik cevapları; **f)** F_1=78 pN için faz kayması cevapları

Şunu vurgulamak gerekir ki Şekil 4.15a'da gösterilen geçiş bölgesinde virial sonuçları işaret değiştirmektedir. Genel olarak, etki eden akustik kuvvetlerden dolayı depolanan enerjideki değişim genlik cevaplarında önemli değişimlere neden olmaktadır. Şekil 4.18b'de gösterildiği gibi, daha büyük sürücü kuvvetler için akustik kuvvetlerden kaynaklı daha büyük güç yayılımı mevcuttur. Şekil 4.18c, d ikinci özmodda farklı sürücü kuvvetler için virial ve yayılan güç eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.18c'de göründüğü gibi virial, akustik kuvvet şiddetine bağlı olarak önemli miktarda değişmemektedir. Daha yüksek özmodda 200-1100 pN aralığındaki akustik kuvvetin etki ettiği durumlarda tahrik kuvveti tarafından sağlanan enerji azalmaktadır. Birinci özmoddaki yayılan güçlere benzer olarak (Şekil 4.18b), ikinci özmoddaki yayılan güç, artan akustik kuvvet ile birlikte artmaktadır (Şekil 4.18d). Ayrıca, birinci ve ikinci özmodlar için tek ve iki

frekanslı tahriklerdeki yayılan güçlerin arasında kayda değer bir fark mevcuttur. Bu fark çoklu frekanslı tahriklerdeki özmodların arasındaki enerji transferleri ve özmod etkileşimleri ile açıklanabilmektedir (Solares vd. 2014).



Şekil 4.18. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı tahrik kuvvetlerinin şiddetleri için elde edilen birinci ve ikinci özmoddaki virial ve yayılan güçler. **a)** Birinci özmoddaki virial eğrileri; **b)** Birinci özmoddaki yayılan güç eğrileri; **c)** İkinci özmoddaki virial eğrileri; **d)** İkinci özmoddaki yayılan güç eğrileri

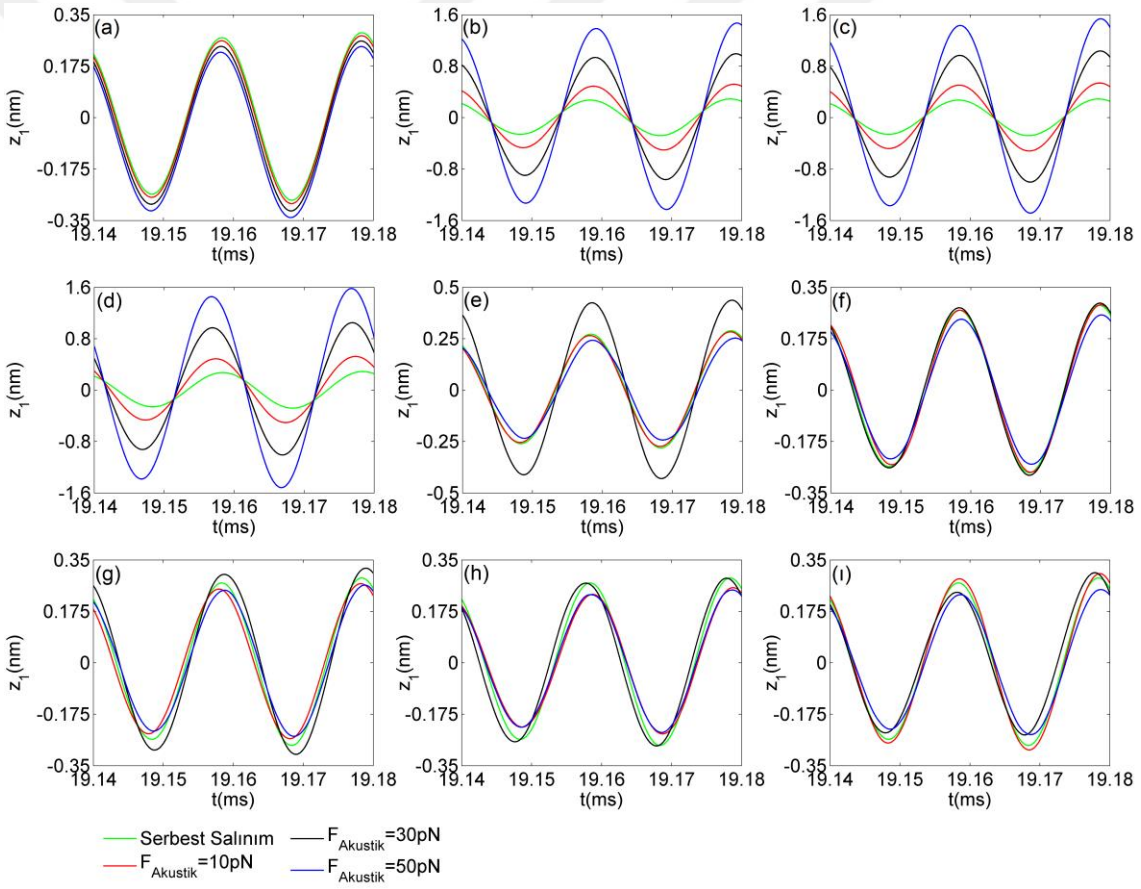
4.2. Tek ve Çoklu Frekanslı Operasyonlardaki Kantileverin Dinamik Akustik Kuvvete Karşı Cevapları

4.2.1. Tek ve iki frekanslı operasyonlar

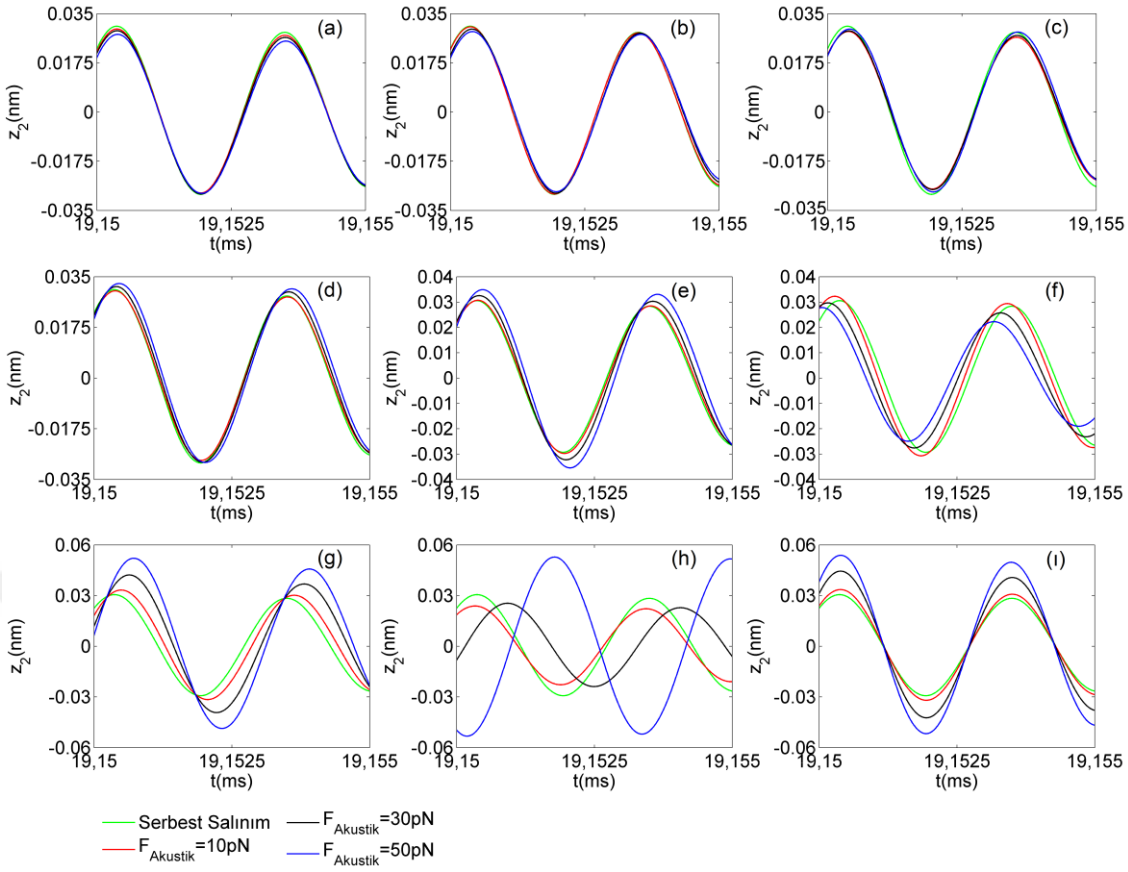
Bu bölümde ilk olarak dinamik akustik kuvvet altındaki kantileverin salınımları üzerinde zaman alanı analizleri gerçekleştirildi. Ayrıca, tek ve iki frekanslı tahrik için birinci ve ikinci özmoddaki salınım gözlenebilirleri olan genlik ve faz kayması sonuçları verilmiştir. Buna ilaveten, tahrik kuvveti tarafından sağlanan enerji miktarları, çalışma ortamına iletilen enerji mikarları ve akustik kuvvet etkisi ile yayılan enerji miktarları kritik bölgeler için verilmiştir. Son olarak, kantilever dinamiğinin virial ve yayılan güç sonuçları iki frekanslı tahrikteki mod etkileşimleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu bölüm ile ilgili sonuçlar "Engineering Research Express" adlı bilimsel dergide makale olarak yayınlanmıştır (Yilmaz vd. 2021b).

4.2.1.1. Zaman alanı salınımları

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de sırasıyla tek ve iki frekanslı tahrik şemaları için 10-50 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvet altındaki kantileverin z_1 ve z_2 salınımlarını göstermektedir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'deki her bir alt şekil, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilmiş olan bir akustik kuvvet frekansı için elde edilen salınımları göstermektedir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de gösterilen serbest salınımlar, dinamik akustik kuvvetinin etkisi olmadan sadece tahrik kuvvetinin uygulanması ile elde edilen yer değiştirmelerdir. Bölge B'deki frekanslara sahip akustik kuvvetler için kayda değer genlik değişimleri mevcuttur (Şekil 4.19b, c, d). Akustik kuvvet şiddeti 10 pN'dan 50 pN'a arttırıldığında genlik kayda değer miktarda artmaktadır. Diğer bölgeler için salınım gözlenebilirlerinde önemli derecede bir değişim tespit edilememiştir. Buna ilaveten, akustik kuvvet frekansı f_d ve 50 pN'luk akustik kuvvet şiddeti için önemli miktarda faz kayması elde edilmiştir (Şekil 4.19d). Sonuç olarak, z_1 serbest salınımları, kantileverin birinci özmod frekansı etrafındaki frekanslara sahip akustik kuvvetlerden önemli derecede etkilenmektedir.



Şekil 4.19. Tek frekanslı tahriklerde **a)** f_a; **b)** f_b; **c)** f_c; **d)** f_d; **e)** f_e; **f)** f_f; **g)** f_g; **h)** f_h; **ı)** f_i frekanslarındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantileverin birinci özmod frekansındaki z_1 salınımları



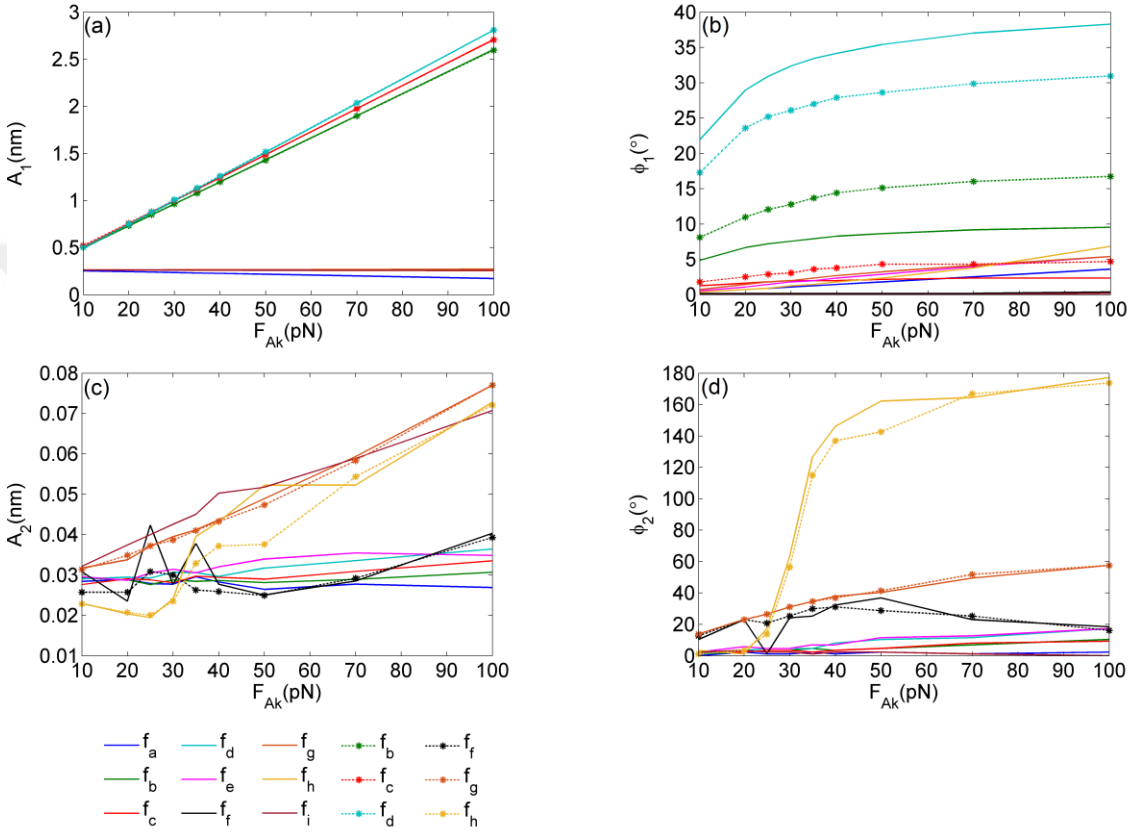
Şekil 4.20. İki frekanslı tahriklerde **a)** f_a; **b)** f_b; **c)** f_c; **d)** f_d; **e)** f_e; **f)** f_f; **g)** f_g; **h)** f_h; **ı)** f_i frekanslarındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantileverin ikinci özmod frekansındaki z_2 salınımları

Şekil 4.20f, g, h'de gösterildiği üzere D bölgesindeki frekanslara sahip akustik kuvvetlerin ölçümünde yüksek genlik değişimleri ve faz kaymaları elde edilmiştir. Bölge E'de 50 pN'luk akustik kuvvet şiddeti için genlikte kayda değer bir değişim gözlemlenmektedir (Şekil 4.20ı). Kantilever, ÇF-AKM operasyonlarında ikinci özmod frekansından yüksek frekansa sahip akustik kuvvetlere önemli miktarda cevap verebilmektedir. Buna ilaveten, genlikler bölge D'deki akustik kuvvet şiddetine göre düzensiz bir şekilde değişmektedir.

Serbest salınımların akustik sinyaller ile etkileşimi önemli ölçüde akustik kuvvet frekansına bağlıdır. Bu noktada sürücü kuvvetlerin şiddetleri gibi tahrik parametrelerinin optimizasyonu düzensiz tepkilerin karmaşıklığının ortadan kaldırılmasına destek olacaktır. Bunun dışında, Şekil 4.20h'de gösterildiği üzere 50 pN'luk akustik kuvvet şiddeti için kayda değer bir faz kayması mevcuttur. Buna rağmen, bölge D'deki frekanslara sahip akustik kuvvetler için 10 pN'luk akustik kuvvet şiddetine olan cevap ayırt edilememektedir. Bu sonuçlar yüksek hassasiyetli frekans bölgesindeki akustik kuvvet şiddetinin salınım gözlenebilirlerindeki değişimleri belirlediğini göstermektedir (Yilmaz vd. 2021b).

4.2.1.2. Genlik ve faz kayması tepkileri

Bir salınımın zamana bağlı değişen genliği ve faz kayması belirli bir period için hesaplanabilmektedir (Lopez Guerra vd. 2019). z_1 salınımları için 19.14 ile 19.18 ms zaman aralığında salınımların ilk iki genliğinin ortalaması alınarak genlik değeri hesaplanmıştır (Lozano ve Garcia 2008). z_2 salınımları için 19.15 ile 19.16 ms zaman aralığında salınımların ilk iki genliğinin ortalaması alınarak genlik değeri hesaplanmıştır. Buna ilaveten, serbest salınım ile akustik kuvvet etkisi altındaki kantileverin cevabı dikkate alınarak faz kayması elde edilmiştir.



Şekil 4.21. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı frekanslardaki akustik kuvvetlerin etkisindeki kantileverin salınım gözlenebilirleri. **a)** Birinci özmoddaki genlik cevapları; **b)** Birinci özmoddaki faz kayması cevapları; **c)** İkinci özmoddaki genlik cevapları; **d)** İkinci özmoddaki faz kayması cevapları

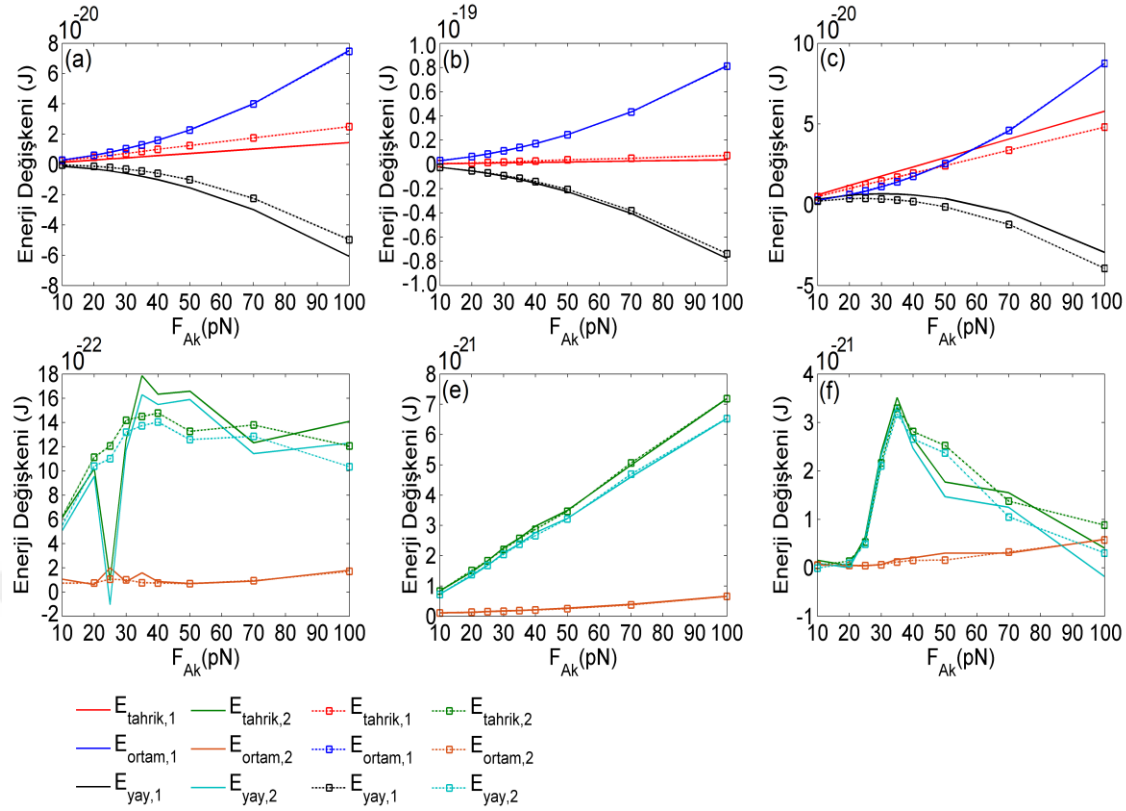
Şekil 4.21, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilen frekanslar için akustik kuvvet şiddetine göre genlik ve faz kayması eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.21'de gösterilen düz çizgiler, iki frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen akustik kuvvet şiddetine bağlı sonuçları göstermektedir. Yıldız işaretli kesikli çizgiler ise tek frekanslı tahrik şemasının kullanıldığı B ve D bölgelerindeki akustik kuvvet frekansları için elde edilen akustik kuvvet şiddetine bağlı sonuçları göstermektedir. Çoklu frekanslı tahrikteki özmod etkileşimini gözlemleyebilmek için kritik frekanslar için Şekil 4.21'deki alt şekillerde iki tahrik şeması ile elde edilen sonuçlar birlikte verilmiştir. Akustik kuvvet şiddeti 10 pN'dan 100 pN'a çıkarıldığında akustik kuvvet frekansı f_c için her iki tahrik şeması kullanılarak elde edilen birinci özmod genliğinde yaklaşık 2.2 nm bir artış tespit edilmiştir (Şekil 4.21a). Bölge B'deki diğer frekanslar için (f_b ve f_d) genlik eğrilerinde

benzer davranış gözlemlenmektedir. Diğer bölgelerdeki akustik kuvvet frekansları için bir genlik hassasiyeti mevcut değildir. Buna ilaveten, Şekil 4.21b'de gösterildiği üzere f_d akustik kuvvet frekansı için iki frekanslı tahrikte 100 pN'luk akustik kuvvet şiddeti için birinci özmodda yaklaşık 38.5 derece faz kayması gözlemlenmiştir. Bu sonuç daha yüksek akustik kuvvet şiddetlerinde daha yüksek faz hassasiyeti elde edilebileceğini göstermektedir.

Akustik kuvvet şiddeti 10-100 pN aralığında arttırıldığında frekans f_g ve f_i için ikinci özmod genliği devamlı olarak artmaktadır (Şekil 4.21c). Çoklu frekanslı operasyon altındaki kantilever, ikinci özmod frekansından yüksek frekanslardaki dinamik akustik kuvvetlere önemli derecede cevap verebilmektedir. Şekil 4.21d'de gösterildiği üzere akustik kuvvet frekansı f_h için yaklaşık 178 derece maksimum faz kayması elde edilmiştir. Buna ilaveten, iki frekanslı tahrikte akustik kuvvet frekansı f_h ve 25-50 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddeti için yaklaşık 148 derece dik faz kayması geçişi gözlemlenmiştir. Bu noktada serbest salınımlar f_h frekansındaki dinamik akustik kuvvetler ile daha çok etkileşim koşullarına sahiptir. Bu durum daha keskin ve büyük faz kaymalarına neden olmaktadır. Şekil 4.21c, d'de görüldüğü üzere iki frekanslı tahrik şeması kullanılarak f_h akustik kuvvet frekansında 35-65 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddeti için ikinci özmoddaki gözlenebilirlerin hassasiyeti arttırılmıştır. Bu durum için kantileveri daha yüksek özmod frekansında sürerek ölçüm hassasiyeti arttırılabilmiştir. Buna ilaveten, Şekil 4.21c'de gösterildiği üzere f_f akustik kuvvet frekansı için genlikte dalgalı davranış ve daha düşük hassasiyet gözlemlenmektedir.

4.2.1.3. Enerji değişkenleri

Enerji değişkenleri olan tahrik kuvveti tarafından sağlanan enerjinin, çalışma ortamına iletilen enerjinin ve dinamik akustik kuvvet etkisi ile yayılan enerjinin analitik ifadeleri (Denklem 3.22, Denklem 3.23 ve Denklem 3.24) virial teoremi ve enerji korunumu yasası ile oluşturulmuştur. Bu denklemler kullanılarak bölge B ve D'deki kritik akustik kuvvet frekansları için enerji değişkenleri hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Şekil 4.22'de gösterilen düz çizgiler, iki frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen akustik kuvvet şiddetine bağlı enerji değişkenlerinin miktarlarını göstermektedir. Kare işaretli kesikli çizgiler ise tek frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen akustik kuvvet şiddetine bağlı enerji değişkenlerinin miktarlarını göstermektedir. Analitik ifadelere dayalı olarak kantilever ucu-malzeme etkileşim kuvveti altındaki kantilever dinamik sisteminin enerji değişkenlerinin miktarları faz kayması ile ilişkilendirilmektedir (An vd. 2014). Akustik kuvvet frekansı f_h için tahrik kuvveti tarafından sağlanan enerjinin çoğu dinamik akustik kuvvet ile etkileşimden dolayı yayılmaktadır (Şekil 4.22f). Diğer bir taraftan, Şekil 4.22a'da gösterildiği üzere birinci özmoddaki daha küçük faz kaymaları dikkate alındığında (Şekil 4.22b) akustik kuvvet frekansı f_b için tahrik kuvveti tarafından sağlanan enerjinin çalışma ortamına iletildiği düşünülmektedir. Ayrıca, her iki tahrik şeması için çalışma ortamına iletilen enerji miktarları arasında kayda değer bir fark belirlenememiştir (Şekil 4.22).

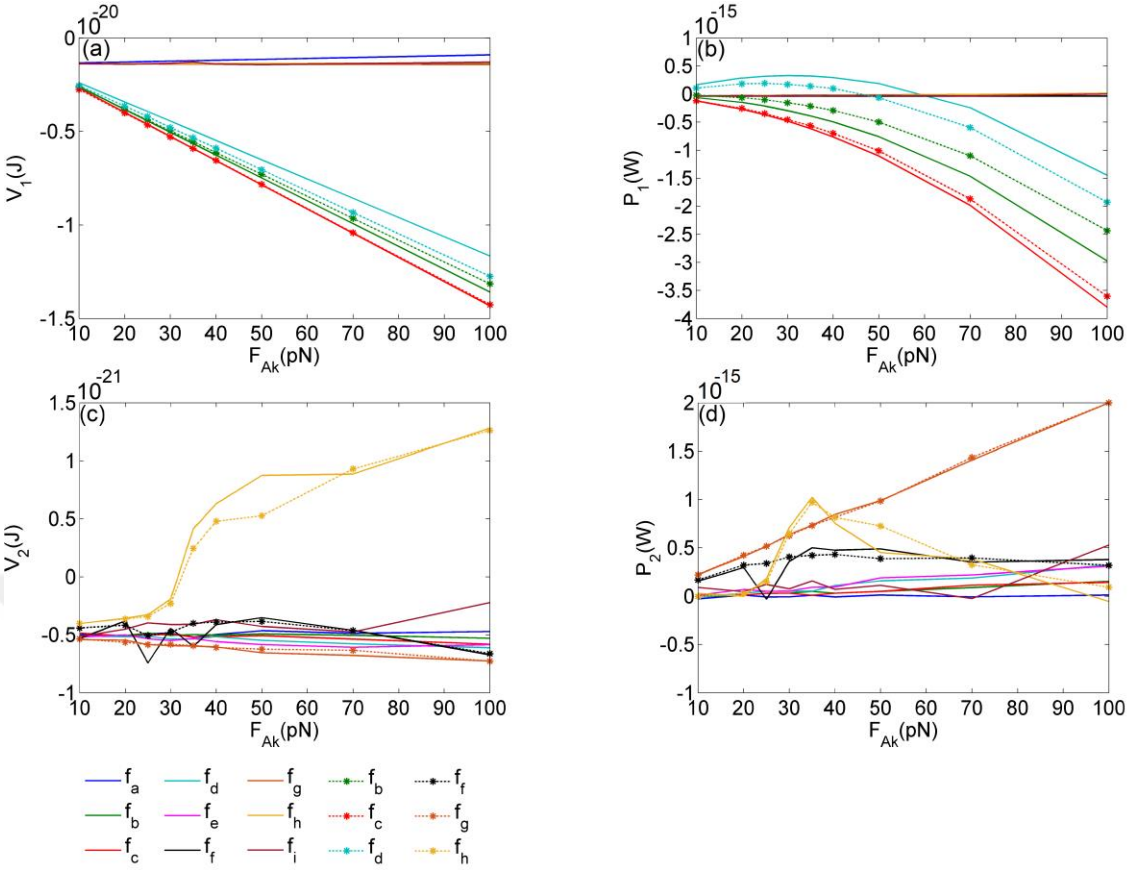


Şekil 4.22. Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları için B ve D bölgesindeki frekanslara sahip dinamik akustik kuvvet altındaki kantilevera dış sürücü kuvvetler tarafından sağlanan enerji miktarları, çalışma ortamına transfer edilen enerji miktarları ve akustik kuvvet etkisi ile dinamik sistemden yayılan enerji miktarları. **a)** f_b; **b)** f_c; **c)** f_d; **d)** f_f; **e)** f_g; **f)** f_h; frekansındaki akustik kuvvetler için enerji değişkenlerinin miktarları

Nokta kütle modeli dikkate alındığında yer değiştirmelerden farklı olarak çoklu frekanslı operasyonlar altındaki kantileverin hızları mod etkileşiminden etkilenmemektedir. B bölgelerindeki frekanslar için akustik kuvvet şiddeti arttıkça tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ile elde edilen $E_{tahrik,i}$ ve $E_{yay,i}$ miktarları arasındaki fark artmaktadır (Şekil 4.22a, b, c). Bu akustik kuvvet frekansları için iki frekanslı tahrikte enerji seviyelerine bağlı olarak öz mod etkileşimi mevcuttur. Burada vurgulamak gerekir ki birinci ve ikinci özmoddaki enerji seviyeleri akustik kuvvet şiddetinden etkilenen salınım genliklerine önemli ölçüde bağlıdır.

4.2.1.4. Virial ve yayılan güç

Virial teoremi ve enerji korunumu yasası dinamik akustik kuvvetin ölçümü sırasında ortaya çıkan enerji yayılımını açıklamak için kullanılmaktadır. Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilen akustik kuvvet frekansları için akustik kuvvet şiddetine göre virial ve yayılan güç sonuçları Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Şekil 4.23'de gösterilen düz çizgiler, iki frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen akustik kuvvet şiddetine bağlı sonuçları göstermektedir. Yıldız işaretli kesikli çizgiler ise tek frekanslı tahrik şemasının kullanıldığı B ve D bölgelerindeki akustik kuvvet frekansları için elde edilen akustik kuvvet şiddetine bağlı sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.23. Tek ve iki frekanslı tahriklerde farklı frekanslardaki akustik kuvvetlerin etkisindeki kantilever dinamiğinin enerji değişkenleri. **a)** Birinci özmoddaki virial eğrileri; **b)** Birinci özmoddaki yayılan güç eğrileri; **c)** İkinci özmoddaki virial eğrileri; **d)** İkinci özmoddaki yayılan güç eğrileri

Şekil 4.23a'da gösterildiği üzere tek ve iki frekanslı tahriklerde B bölgesindeki akustik kuvvet frekansları için birinci özmoddaki virial devamlı olarak azalmaktadır. Virialin negatif değerleri, kantileverin daha büyük akustik kuvvet şiddetleri ile etkileşimi sonucu depoladığı kinetik enerjiden yayılan enerjiyi ifade etmektedir. B bölgesindeki akustik kuvvet frekansları için akustik kuvvet şiddeti arttıkça birinci özmodda yayılan gücün eğimi negatif aralıkta azalmaktadır (Şekil 4.23b). Enerji korunumu yasasına dayalı olarak yayılan gücün negatif değeri dinamik akustik kuvvetin ölçümünde tahrik kuvveti tarafından depolanan enerjiden çalışma ortamına iletilen enerjiyi ifade etmektedir (Denklem 3.24). Şekil 4.23d'de gösterildiği üzere f_g frekansı için akustik kuvvet şiddeti arttıkça ikinci özmoddaki yayılan güç devamlı olarak artmaktadır. AKM operasyonlarında kantilever ucu-malzeme etkileşim kuvvetinin etkisi altındaki kantileverdan yayılan enerji faz kayması ile ilişkilendirilmektedir (San Paulo ve Garcia 2001). Bu çalışmada kayda değer miktarda genliğin ve faz kaymasının gözlemlendiği f_g akustik kuvvet frekansı için önemli ölçüde akustik kuvvetten kaynaklı güç yayılımı tespit edilmiştir (Şekil 4.21c, d ve Şekil 4.23d). Buna karşın, akustik kuvvet şiddeti arttıkça f_h akustik kuvvet frekansı için ikinci özmodda yayılan güç önce artmaktadır sonra azalmaktadır (Şekil 4.23d). Bu düzensiz davranış, mekanik olarak salınım yapan kantileverin kinetik enerjisinden yayılan farklı seviyelerdeki enerji miktarlarından kaynaklanmaktadır.

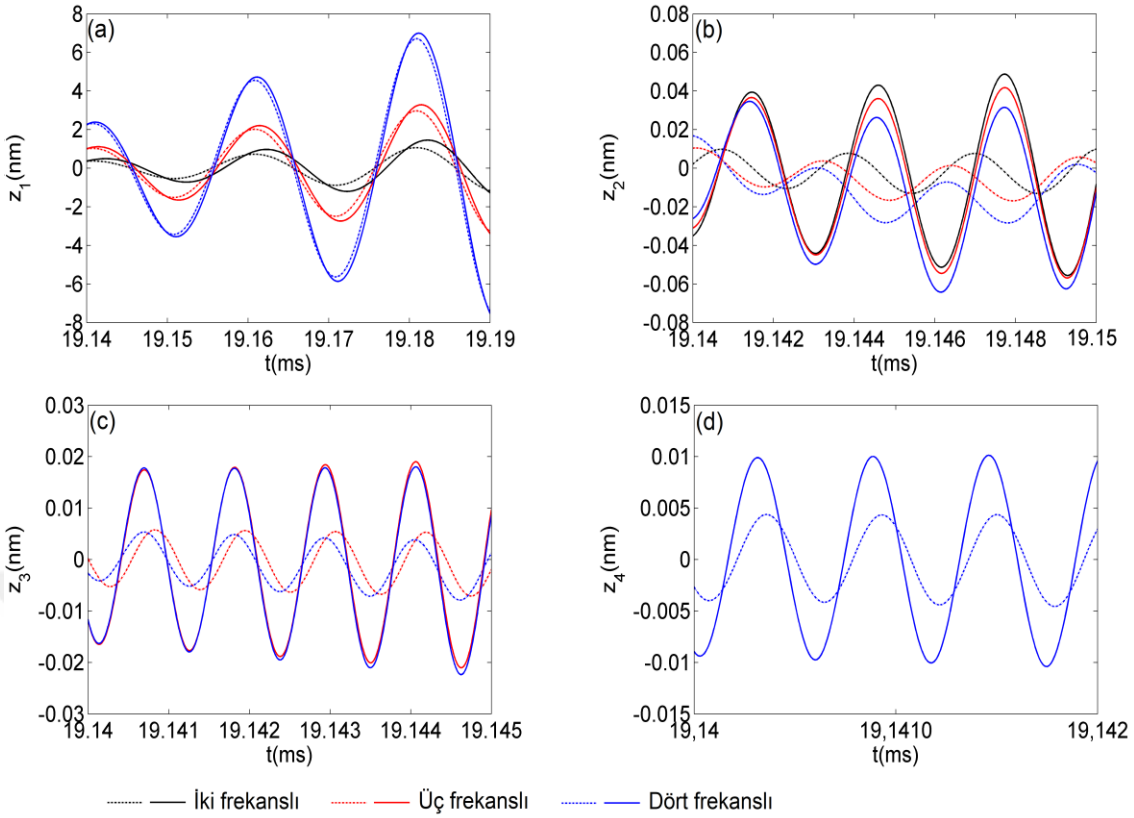
4.2.2. Çoklu frekanslı operasyonlar

Bu kısımda iki, üç ve dört frekanslı tahrikler için serbest salınımlar ve dinamik akustik kuvvet etkisindeki salınımlar verilmiştir. Ayrıca, farklı akustik kuvvet şiddetleri için frekans alanında akustik kuvvete karşı genlik hassasiyeti araştırılmıştır. Bu bölüm ile ilgili sonuçlar "European Journal of Science and Technology" adlı bilimsel dergide makale olarak yayınlanmıştır (Yilmaz ve Topal 2021b). Çoklu frekanslı tahrik şemaları kullanılarak elde edilen ilk dört özmoddaki salınımlar Şekil 4.24'de gösterilmektedir. Şekil 4.24'de gösterilen düz çizgiler, akustik kuvvet altındaki ve sürülen kantileverin salınımlarını göstermektedir. Serbest salınımlar, akustik kuvvet etkisi olmadan sadece tahrik kuvvetleri ile sürülen kantileverin yer değiştirmeleridir. Zamana bağlı genlik değerleri salınımların periyotlarına bağlı olarak belirlenebilmektedir (Lopez-Guerra vd. 2019). 19.14-19.19 ms zaman aralığındaki ilk iki genliğin ortalaması alınarak salınımın bir periyottaki genliği hesaplanabilmektedir. Şekil 4.25'de akustik kuvvet frekansı alanında ilk dört özmoddaki genlik cevapları gösterilmiştir.

4.2.2.1. Zaman alanı salınımları

Şekil 4.24a'da gösterildiği üzere dört frekanslı tahrik şeması kullanılarak en yüksek genlik cevabı elde edilmiştir. Bu sonuç aynı anda daha yüksek özmod frekanslarındaki tahrik kuvvetlerinin uygulanması ile birinci özmoddaki genlik hassasiyetinin arttırılabildiğini göstermiştir. Buna ilaveten, bu durum için çoklu frekanslı tahrik şemaları arasında az miktarda faz kayması mevcuttur. Ayrıca, 50 kHz akustik kuvvetin ölçümünde elde edilen salınımlar ve serbest salınımlar arasında ihmal edilebilecek ölçüde genlik farkları bulunmaktadır. Buna bağlı olarak, çoklu frekanslı tahrik şemasından bağımsız olarak 60 pN şiddete sahip akustik kuvvetlere serbest salınımlar önemli miktarda bir cevap vermemektedir. Buna rağmen, akustik kuvvet frekansı 50 kHz'den 320 kHz'e arttırıldığında genlik değişiminin serbest salınım genliğine oranı düşünüldüğünde genlik cevabının önemli miktarda arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.24b). Bu noktada, çoklu frekanslı tahrikte özmodların etkileşiminden dolayı rezonans frekanslarda sürülen kantilever, akustik kuvvetin etkili olmadığı durumda negatif alanda salınım yapmaktadır. Diğer çoklu frekanslı tahrik şemalarına kıyasla iki frekanslı tahrik şeması ile daha fazla genlik hassasiyeti elde edilmektedir. Bu noktada, akustik kuvvete karşı genlik hassasiyetini arttırmak için sürücü kuvvet şiddetleri gibi tahrik parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir (Yilmaz ve Topal 2021b).

Şekil 4.24c'de gösterildiği üzere üç ve dört frekanslı operasyonlardaki genlik cevaplarında önemli miktarda artış mevcuttur. 890 kHz frekansındaki akustik kuvvetlerin ölçümünde bu operasyonlar arasında kayda değer faz kaymaları tespit edilmiştir. Dört frekanslı tahrikte 1740 kHz frekanstaki akustik kuvvet etkisindeki salınım ile serbest salınım arasında genlik farkı açıkça gözlemlenmiştir. Yüksek frekanslarda akustik kuvvete karşı salınım gözlenebilirlerin hassasiyeti mevcuttur. Farklı akustik kuvvet şiddetleri için frekans alanında akustik kuvvetlere karşı genlik cevapları hesaplanmıştır.



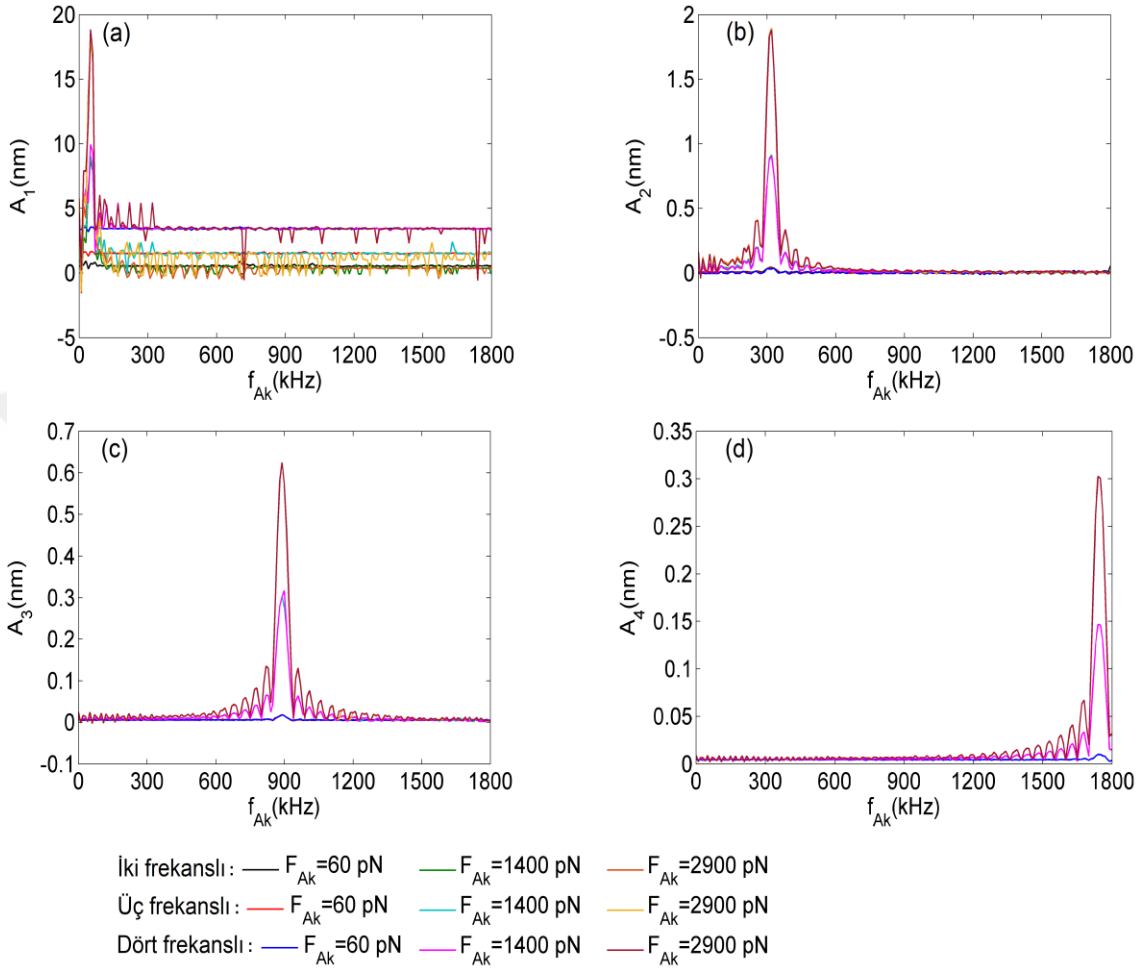
Şekil 4.24. Serbest salınımlar ve çoklu frekanslı tahriklerde 60 pN kuvvet şiddetindeki dinamik akustik kuvvetlerin etkisindeki kantileverin salınımları. **a)** Serbest salınımlar ve 50 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde birinci özmod frekansındaki salınımlar; **b)** Serbest salınımlar ve 320 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde ikinci özmod frekansındaki salınımlar; **c)** Serbest salınımlar ve 890 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde üçüncü özmod frekansındaki salınımlar; **d)** Serbest salınım ve 1740 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde dördüncü özmod frekansındaki salınım

4.2.2.2. Genlik tepkileri

Şekil 4.25'de görüldüğü üzere ilk dört özmodda en yüksek genlik cevapları sırasıyla 50, 320, 890 ve 1740 kHz frekansı ve 2900 pN şiddete sahip akustik kuvvetlerin ölçümünde elde edilmiştir. Bu akustik kuvvetlerin etkisindeki salınımlar Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Genliklerin negatif değerleri kantileverin denge noktasının altında salınım yaptığını göstermektedir. Birinci özmoddaki genlik cevapları iki, üç ve dört frekanslı operasyonlarda farklı akustik kuvvet şiddetleri için ayırt edilebilmektedir.

Her bir çoklu frekanslı tahrikteki mod etkileşiminin frekans alanında birinci özmoddaki genlik hassasiyetine kayda değer bir etkisi vardır (Şekil 4.25a). Buna ilaveten, Şekil 4.25b, c, d'de gösterildiği üzere çoklu frekanslı tahriklerdeki genlik cevapları arasında herhangi bir fark bulunmamaktadır. Çoklu frekanslı tahrikte sürücü kuvvetlerin aynı anda sürülmesi ile etkili olan mod etkileşimi, özmod frekanslarına ve kalite faktörlerine bağlı olarak daha yüksek frekanslarda mevcut değildir. Ayrıca, beklenildiği üzere çoklu frekanslı operasyondan bağımsız olarak akustik kuvvet şiddetindeki artış genlik cevabında artışa neden olmaktadır. 1740 kHz frekansında ve 2900 pN kuvvet

şiddetine sahip akustik kuvvetin ölçümünde yaklaşık 0.303 nm değerinde genlik cevabı elde edilmiştir. Bu sonuç dört frekanslı tahrik şeması ile sürülen AKM kantilever ile megahertz frekansındaki akustik kuvvete karşı kayda değer bir genlik hassasiyeti elde edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 4.25. Çoklu frekanslı operasyonlardaki kantileverin farklı kuvvet şiddetlerine sahip akustik kuvvetlere olan frekans alanındaki genlik cevapları. **a)** Birinci özmoddaki genlik cevapları; **b)** İkinci özmoddaki genlik cevapları; **c)** Üçüncü özmoddaki genlik cevapları; **d)** Dördüncü özmoddaki genlik cevapları

4.3. Tek ve İki Frekanslı Operasyonlardaki Kantilever Dizininin Dinamik Akustik Kuvvete Karşı Cevapları

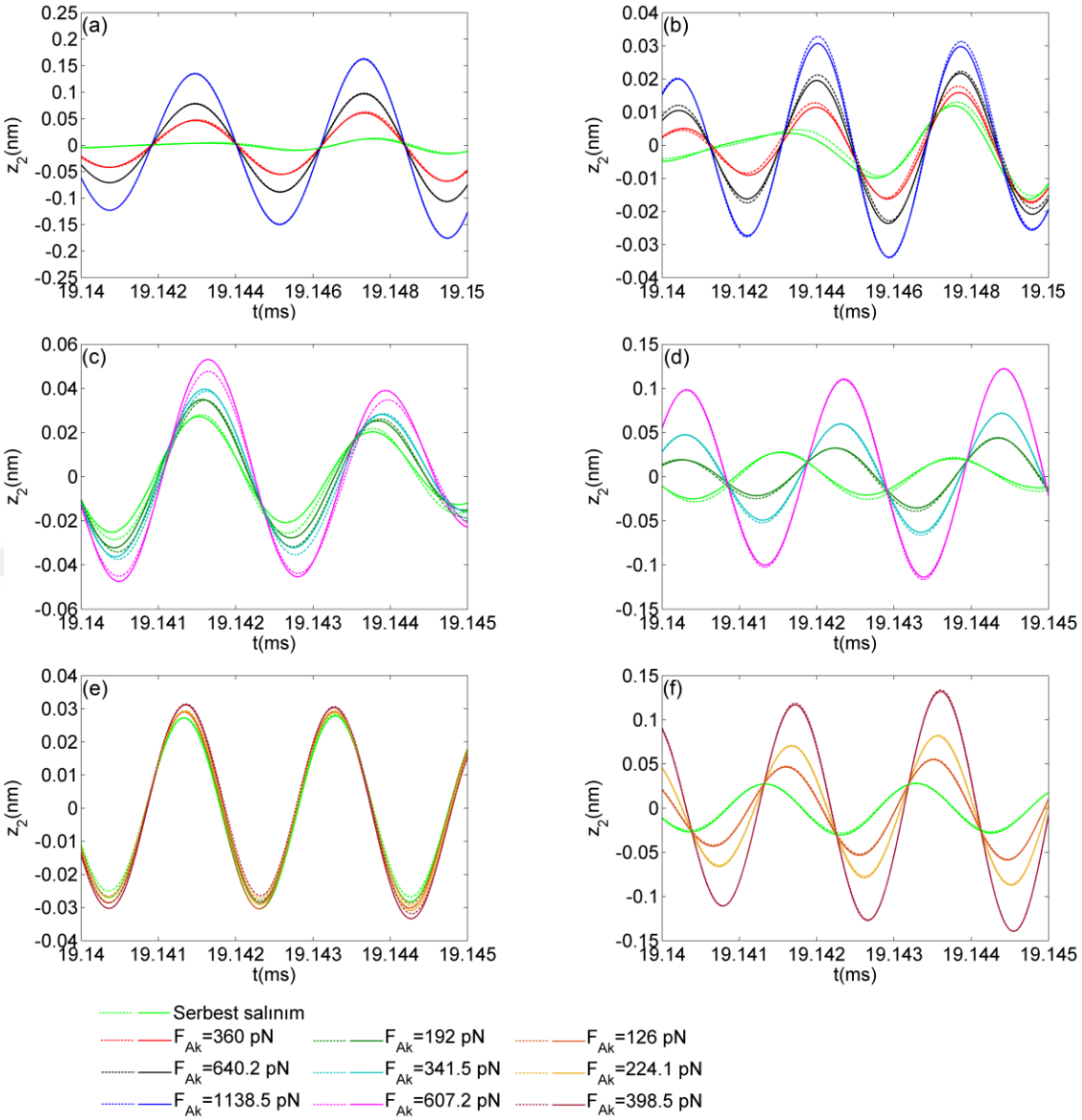
Bu bölümde akustik kuvvet şiddeti ve frekansına göre zaman alanında dizin içerisindeki kantileverlerin z_2 yer değiştirmeleri analiz edilmiştir. Daha sonra, her bir kantilever için ikinci özmodda genlik cevapları kullanılarak yüksek hassasiyetli frekans bölgeleri belirlenmiştir. Bu bölüm ile ilgili sonuçlar bir uluslararası konferansta sunulmuştur (Yilmaz vd. 2021c). Buna ilaveten, virial ve yayılan güç sonuçları enerji yayılımı ve depolaması süreci ile ilişkilendirilmiştir. Bu bölüm ile ilgili sonuçlar "Academic Perspective Procedia" adlı bilimsel dergide makale olarak yayınlanmıştır (Yilmaz ve Topal 2021c).

4.3.1. Zaman alanı salınımları

Şekil 4.26 farklı dinamik akustik kuvvet altındaki kantileverlerin ikinci özmod frekansındaki yer değiştirmelerini göstermektedir. Şekil 4.26'da gösterilen her bir kantileverin serbest salınımları, dinamik akustik kuvvetin etkili olmadığı durumlarda ve sadece tahrik kuvvetlerinin uygulanması ile elde edilmiştir. Düz çizgiler, iki frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen salınımları göstermektedir. Kesikli çizgiler ise tek frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen salınımları göstermektedir. Şekil 4.26a, b'de gösterildiği üzere akustik kuvvet frekansı 225 kHz'den 295 kHz'e arttırıldığında genlik cevabında kayda değer miktarda bir azalış tespit edilmiştir. Bu durumda bütün akustik kuvvet şiddetleri için faz kaymasında önemli miktarda bir değişim mevcuttur. Şekil 4.26c, d'de görüldüğü üzere akustik kuvvet frekansı 360 kHz'den 495 kHz'e arttırıldığında hem genlik cevabında hem de faz kayması cevabında bir artış gözlemlenmiştir. 190 kHz frekansındaki akustik kuvvet altında salınım gözlenebilir cevaplarında kayda değer bir değişim mevcut değildir (Şekil 4.26e). Buna karşın, akustik kuvvet frekansı 530 kHz'e ayarlandığında genliklerde ve faz kaymalarında artış tespit edilmiştir (Şekil 4.26f). Her bir kantilever için ikinci özmoddaki yay sabitine ve kalite faktörüne dayalı olarak akustik kuvvetlere olan gözlenebilir cevapları önemli miktarda değişmektedir. Farklı rezonans frekanslara sahip kantileverler için elde edilen zamana bağlı salınım gözlenebilirleri önemli ölçüde akustik kuvvetlerin şiddetine ve frekansına bağlıdır. Şekil 4.26'de gösterilen tüm durumlar için akustik kuvvet şiddeti arttıkça akustik kuvvet frekansından bağımsız olarak genlik cevabı da artmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.26b, c'de görüldüğü üzere iki operasyon modundaki genlik cevapları arasında küçük farklılıklar mevcuttur. Bu farklılığın akustik kuvvet ve kantileverlerin özmod frekanslarına bağlı olan iki frekanslı tahrikteki özmod etkileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

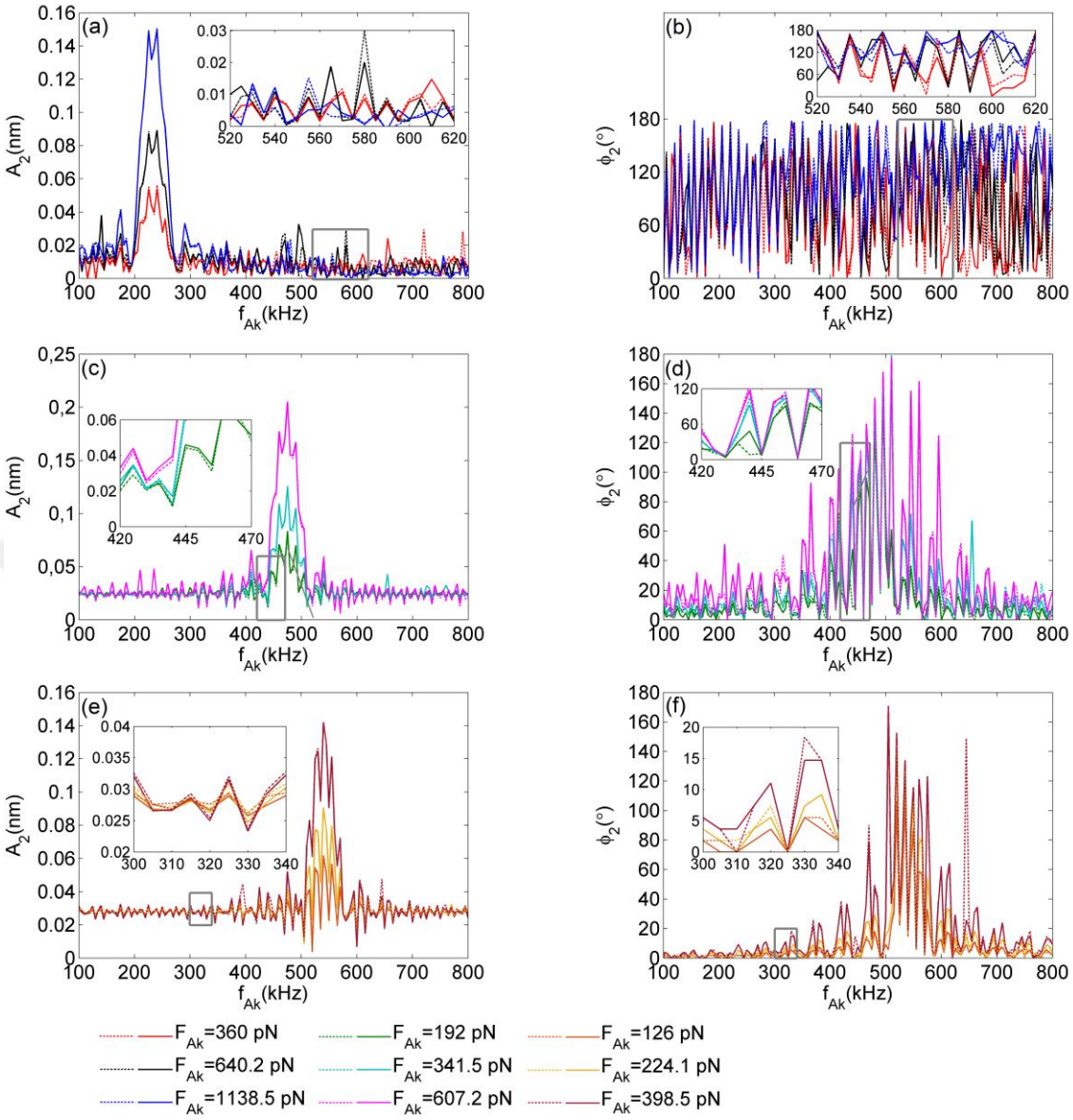
4.3.2. Genlik ve faz kayması tepkileri

Bu bölümde ikinci özmoddaki genlik ve faz kayması cevapları akustik kuvvet frekansı alanında verilmiştir. Hesaplamalarda 19.14-19.18 ms zaman aralığında kantilever M1 için ilk iki genliklerin ortalaması alınarak ortalama genlik değeri hesaplanmaktadır. Kantilever M2 ve M3 için 19.14-19.165 ms zaman aralığındaki ilk iki genliklerin ortalaması alınarak ortalama genlik hesaplanmaktadır. Serbest salınım ve akustik kuvvet etkisindeki salınımın arasındaki periyot farkı kullanılarak faz kayması hesaplanmaktadır. Şekil 4.27 dizin içerisindeki kantileverlerin tek ve iki frekanslı tahrikleri için elde edilen ikinci özmoddaki genlikleri ve faz kaymalarını göstermektedir. Şekil 4.27'de gösterilen düz çizgiler, iki frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen salınım gözlenebilirlerini göstermektedir. Kesikli çizgiler ise tek frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen salınım gözlenebilirlerini göstermektedir. Ekli küçük şekiller, düşük ve yüksek hassasiyetli frekans bölgelerindeki daha dar frekans bantlarına ait sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.26. Tek ve iki frekanslı tahrikteki ikinci özmod frekansındaki serbest salınımlar ve farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetler etkisindeki salınımlar. **a)** 225 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M1'in z_2 salınımları; **b)** 295 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M1'in z_2 salınımları; **c)** 360 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M2'nin z_2 salınımları; **d)** 495 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M2'nin z_2 salınımları; **e)** 190 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M3'ün z_2 salınımları; **f)** 530 kHz frekansındaki dinamik akustik kuvvetler altındaki kantilever M3'ün z_2 salınımları

Bütün akustik kuvvet şiddetleri için akustik kuvvet frekansına göre hesaplanmış yüksek genlik cevaplarına dayalı olarak yüksek hassasiyetli frekans bölgeleri elde edilmiştir. Şekil 4.27a'da gösterildiği üzere kantilever M1 kullanılarak 200-270 kHz aralığında yüksek hassasiyet elde edilmiştir.



Şekil 4.27. Farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetler altındaki osilasyonların genlik ve faz kayması. **a)** Kantilever M1 için genlik cevapları; **b)** Kantilever M1 için faz kayması cevapları; **c)** Kantilever M2 için genlik cevapları; **d)** Kantilever M2 için faz kayması cevapları; **e)** Kantilever M3 için genlik cevapları; **f)** Kantilever M3 için faz kayması cevapları

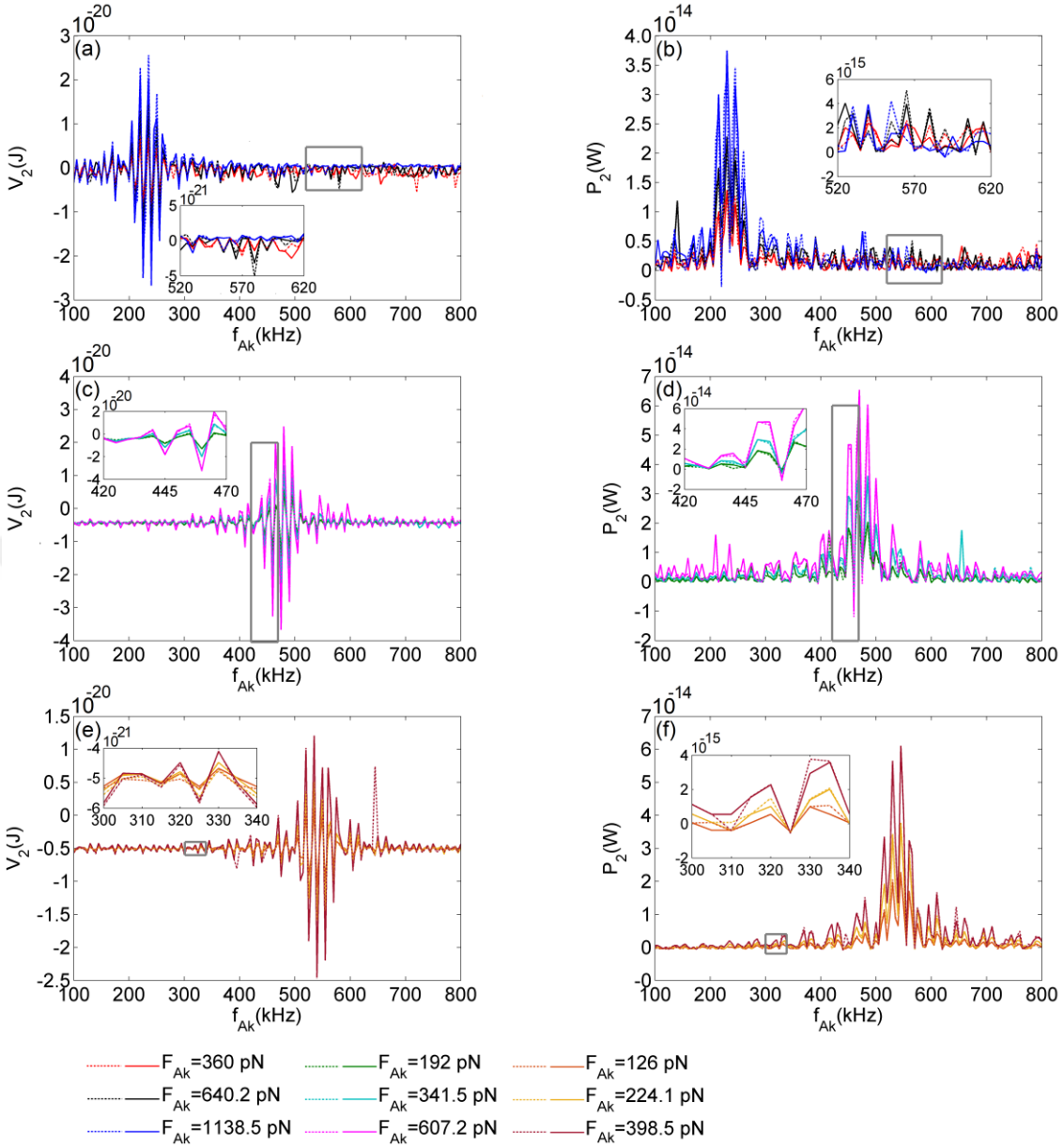
Şekil 4.27c'de gösterilen sonuçlara göre yaklaşık olarak belirlenmiş olan 440-505 kHz frekans aralığı, kantilever M2 için yüksek hassasiyetli akustik kuvvet frekansı aralığıdır. Kantilever M3'ün genlik cevaplarına göre belirlenmiş olan yüksek hassasiyetli akustik kuvvet frekansı aralığı yaklaşık olarak 505-570 kHz frekans aralığıdır. Faz kayması sonuçları dikkate alındığında kantilever M1 için faz kayması cevabı, 100-800 kHz frekans alanında düzensiz davranış göstermektedir (Şekil 4.27b). Buna karşın, kantilever M2 ve M3 için daha yüksek genlik hassasiyetinin elde edildiği akustik kuvvet frekansı bölgelerinde (Şekil 4.27d, f) daha yüksek faz kayması hassasiyeti elde edilmiştir. Ayrıca, kantileverleri yüksek özmod frekanslarında sürerek daha yüksek akustik kuvvet

frekans aralıklarına ulaşılmıştır. Buna ilaveten, yüksek hassasiyetli frekans aralıklarında akustik kuvvet şiddeti arttıkça genlik cevabı da artmaktadır. Şekil 4.27'da gösterilen ekli küçük şekillerde tek ve iki frekanslı tahrik şemaları kullanılarak elde edilen salınım gözlenebilirleri arasındaki fark daha belirgin görülmektedir. Akustik kuvvet frekansına bağlı olarak iki frekanslı tahrikte meydana gelen mod etkileşiminden ötürü genlik ve faz kayması cevaplarında kayda değer farklar mevcuttur. Örnek olarak, iki frekanslı tahrik şeması kullanılarak 555 kHz frekansı ve 1138.5 pN kuvvet şiddetine sahip dinamik akustik kuvvet için faz kaymasında 50 derece artış elde edilmiştir (Şekil 4.27b). Kantilever dizinini iki frekanslı tahrik şemasında sürmek faz kayması hassasiyetini arttırmıştır. Buna ilaveten, yüksek hassasiyetli bölgeler kantileverlerin ikinci özmod frekanslarının yakınında yer almaktadır. Özmod frekanslarına dayalı olarak yüksek hassasiyetli bölgelerin aralık sınırları değişmektedir. Sonuç olarak, üç tane AKM kantileverinin tek ve iki frekanslı tahrik şemaları ile eşzamanlı sürülmesi ile birlikte yaklaşık olarak 200-270 kHz ve 440-570 kHz yüksek hassasiyetli akustik kuvvet frekansı aralıkları elde edilmiştir.

4.3.3. Virial ve yayılan güç

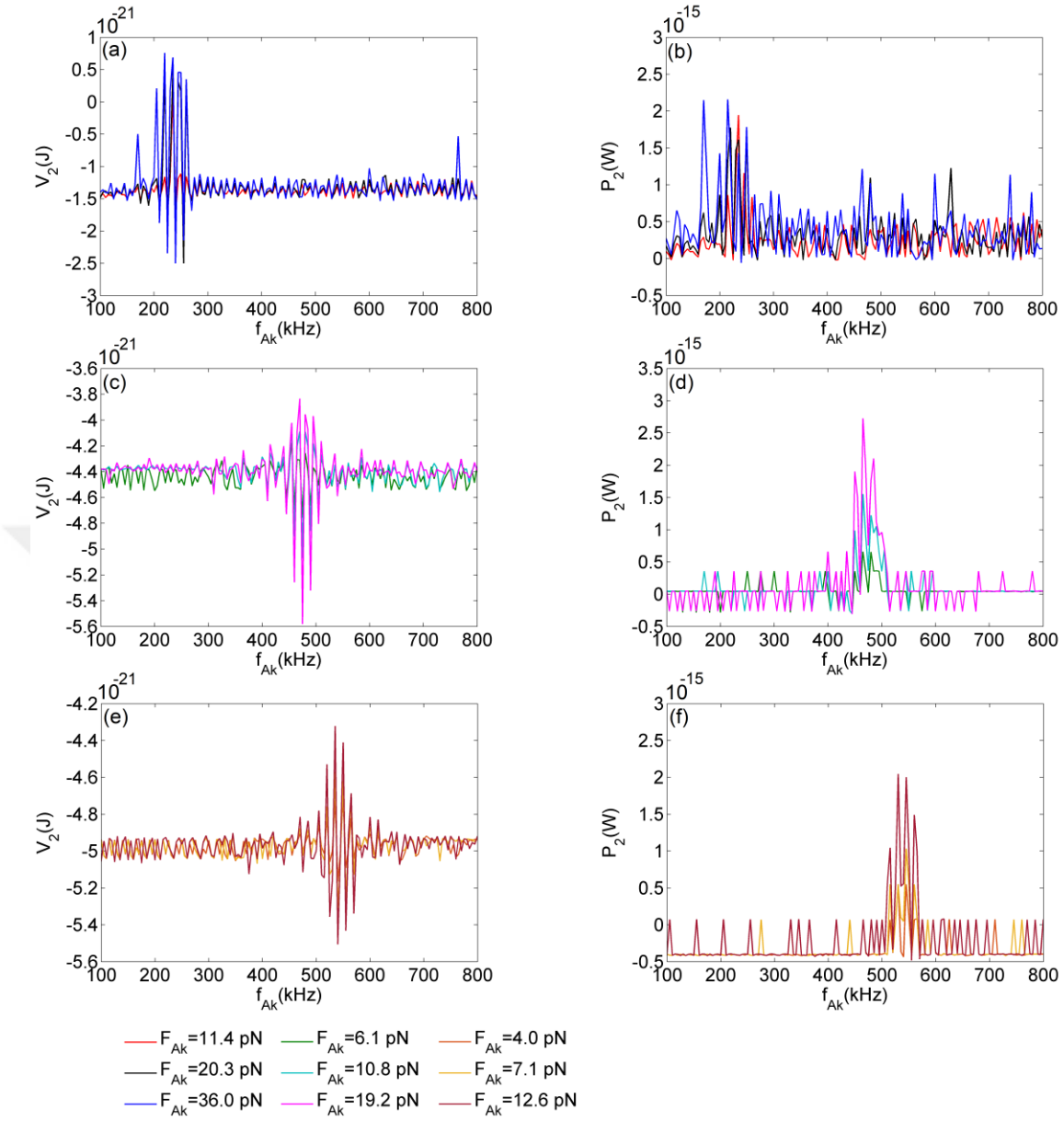
Enerji değişkenleri olan virial ve yayılan güç, dinamik akustik kuvvetlerin ölçümünde ortaya çıkan enerji yayılımı ve depolama süreçlerini açıklamak için kullanılmaktadır. Tek ve iki frekanslı tahrikler için ikinci özmoddaki virial ve yayılan güç sonuçları Şekil 4.28'de gösterilmektedir. Şekil 4.28'de gösterilen düz çizgiler, iki frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen enerji değişkenlerini göstermektedir. Kesikli çizgiler ise tek frekanslı tahrik şemasının kullanılması ile elde edilen enerji değişkenlerini göstermektedir. Ekli küçük şekiller düşük ve yüksek hassasiyetli frekans bölgelerindeki daha dar frekans bantlarına ait sonuçları göstermektedir. Genlik cevaplarına göre belirlenmiş olan yüksek hassasiyetli frekans bölgelerinde virial, düzensiz davranışlar göstermektedir (Şekil 4.28a, c, e). Negatif ve pozitif değerler arasındaki dalgalanma, mekanik olarak sanılınım yapan dinamik sistemdeki farklı seviyelerdeki enerji yayılımı ve depolamayı göstermektedir. Yüksek hassasiyetli bölgelerde yayılan güç de tüm akustik kuvvet şiddetleri için benzer davranışı göstermektedir (Şekil 4.28b, d, f). Yayılan gücün pozitif değeri, tahrik kuvveti tarafından sağlanan enerjiden akustik kuvvetin etkisi ile bir enerji kaybını ifade etmektedir (Yilmaz vd. 2021b). Farklı frekanslardaki akustik kuvvet altındaki kantilever dinamiğinden yayılan güç, salınım gözlenebilirleri ile ilişkilidir. Şekil 4.28'de gösterilen ekli küçük şekillerde tek ve iki frekanslı tahrik şemaları kullanılarak elde edilen enerji değişkenleri arasındaki farklar daha belirgin görülmektedir. Şekil 4.28b'deki ekli küçük şekilde görüldüğü üzere çalışma ortamına iletilen farklı sevilerdeki enerji miktarından ve özmodlar arasındaki enerji transferinden dolayı iki tahrik şeması sonuçları arasında kayda değer farklar mevcuttur (An vd. 2014).

Daha düşük akustik kuvvet şiddet aralığı için virial ve yayılan güç sonuçları elde edilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.29'da gösterilmiştir. 30-75 dB aralığındaki ses basıncı seviyeleri kullanılarak akustik kuvvet şiddetleri hesaplanmıştır (Svoren vd. 2021). 30 dB ses basıncı seviyesinin dikkate alındığı farklı akustik kuvvet şiddetleri için virial ve yayılan güçteki yüksek dalgalanmaların olduğu akustik kuvvet frekansı aralıkları belirlenmiştir.



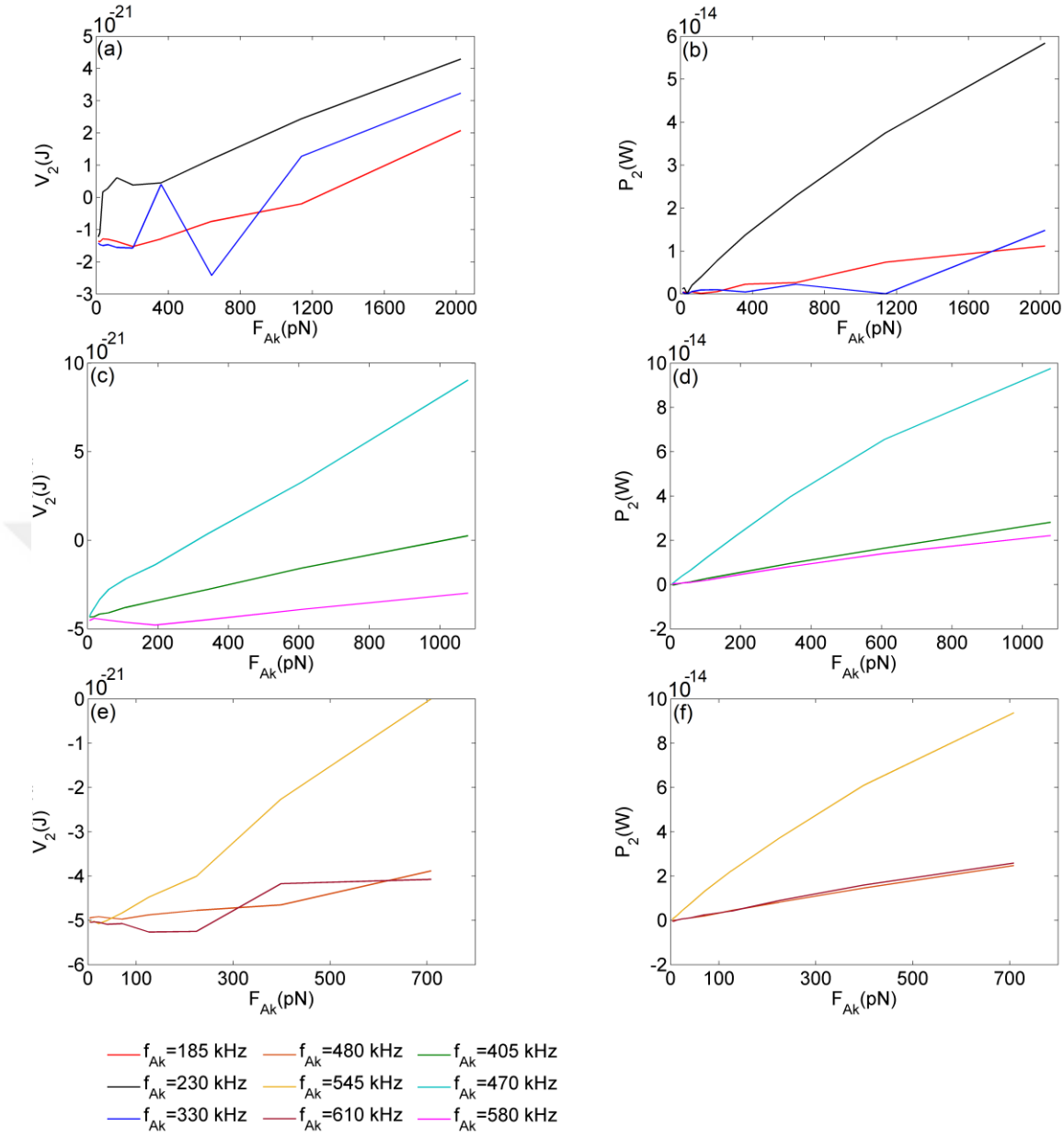
Şekil 4.28. Farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetlere göre virial ve yayılan güç eğrileri. **a)** Kantilever M1 için virial eğrileri; **b)** Kantilever M1 için yayılan güç eğrileri; **c)** Kantilever M2 için virial eğrileri; **d)** Kantilever M2 için yayılan güç eğrileri; **e)** Kantilever M3 için virial eğrileri; **f)** Kantilever M3 için yayılan güç eğrileri

Kantilever M1 için 11.4-36.0 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddeti için 200-270 kHz aralığında yüksek hassasiyetli frekans bandı elde edilmiştir (Şekil 4.29a, b). Kantilever M2 için 6.1-19.2 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddeti için 440-505 kHz aralığında yüksek hassasiyetli frekans bandı elde edilmiştir (Şekil 4.29c, d). Kantilever M3 için 4.0-12.6 pN aralığındaki akustik kuvvet şiddeti için 505-570 kHz aralığında yüksek hassasiyetli frekans bandı elde edilmiştir (Şekil 4.29e, f). Yüksek hassasiyetli akustik kuvvet frekansı bantlarının kantileverlerin ikinci özmod frekanslarının yakınlarında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.29. İki frekanslı tahrikte farklı kuvvet şiddetlerine sahip dinamik akustik kuvvetlerin frekanslarına göre virial ve yayılan güç eğrileri. **a)** Kantilever M1 için virial eğrileri; **b)** Kantilever M1 için yayılan güç eğrileri; **c)** Kantilever M2 için virial eğrileri; **d)** Kantilever M2 için yayılan güç eğrileri; **e)** Kantilever M3 için virial eğrileri; **f)** Kantilever M3 için yayılan güç eğrileri

Kantilever M1 için akustik kuvvet şiddetinden bağımsız olarak virialde negatif ve pozitif değerler arasında dalgalanmalar gözlenmiştir (Şekil 4.29a). Virialin pozitif değeri akustik kuvveti etkisindeki ve rezonans frekanslarında sürülen kantileverin enerji depolama sürecini ifade etmektedir (Yilmaz ve Topal 2021c). Buna ilaveten, Şekil 4.29c, e'de gösterildiği üzere yüksek hassasiyetli frekans bantlarında virialin negatif değerleri arasında dalgalanmalar tespit edilmiştir.



Şekil 4.30. İki frekanslı tahrikte farklı frekanslara sahip dinamik akustik kuvvetlerin kuvvet şiddetlerine göre virial ve yayılan güç eğrileri. **a)** Kantilever M1 için virial eğrileri; **b)** Kantilever M1 için yayılan güç eğrileri; **c)** Kantilever M2 için virial eğrileri; **d)** Kantilever M2 için yayılan güç eğrileri; **e)** Kantilever M3 için virial eğrileri; **f)** Kantilever M3 için yayılan güç eğrileri

Yayılan gücün pozitif değeri mekanik olarak salınım yapan dinamik sistemden akustik kuvvetin etkisi ile meydana gelen enerji yayılımını ifade etmektedir (Şekil 4.29b, d, f). Virial teoremi ve enerji korunumu prensibine dayalı olarak yayılan gücün negatif değeri, tahrik kuvveti tarafından sağlanan enerjinin çalışma ortamına iletildiğini işaret etmektedir (Tamayo 1999). Enerji değişkenlerinin sonuçlarına dayalı olarak iki frekanslı tahrikte ilk iki özmodun etkileşimi mevcuttur (Yilmaz vd. 2021b). Ayrıca, yüksek hassasiyetli frekans bölgesinde akustik kuvvet şiddeti arttırıldıkça enerji değişkenlerinde yüksek dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Düşük hassasiyetli frekans bölgelerinde farklı

akustik kuvvet şiddetleri için virialler ve yayılan güçler arasında kayda değer bir farklılık tespit edilmemiştir.

Akustik kuvvet şiddetine göre virial ve yayılan güçteki değişim Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Virial ve yayılan güç hesaplamaları için 30-75 dB aralığındaki ses basıncı seviyeleri ile akustik kuvvet şiddetleri belirlenmiştir. 230, 470 ve 545 kHz frekanslarındaki akustik kuvvetler sırasıyla kantilever M1, M2 ve M3 için yüksek hassasiyetli frekans bölgesinde yer almaktadır. Buna karşın, Şekil 4.30'da gösterilen diğer akustik kuvvet frekansları düşük hassasiyetli frekans bölgelerinde yer almaktadır. Düşük hassasiyetli frekans bölgeleri ile karşılaştırıldığında, yüksek hassasiyetli frekans bölgelerindeki akustik kuvvet şiddetindeki artış ile birlikte enerji değişkenleri daha fazla yükseliş eğilimi göstermektedir. Enerji değişkenlerine dayalı olarak serbest salınımların yüksek hassasiyetli frekans bölgelerindeki akustik kuvvetlere olan hassasiyetleri oldukça yüksektir. Yüksek hassasiyetli frekans bölgelerinde daha yüksek akustik kuvvet şiddetleri için virialler doğrusal davranışlar göstermektedir (Şekil 4.30a, c, e). Tahrik kuvvetleri ve akustik kuvvetler etkisinden dolayı meydana gelen genlik cevaplarındaki artış viriallerde de artışlara neden olmaktadır. Ayrıca, yayılan güç sonuçlarına dayalı olarak düşük ve yüksek hassasiyetli frekans bölgeleri arasında farklılıklar oldukça belirgindir (Şekil 4.30b, d, f). Yüksek hassasiyetli frekans bölgelerinde akustik kuvvet şiddeti arttıkça akustik kuvvet etkisi nedeni ile meydana gelen enerji yayılımı da artmaktadır (Yilmaz ve Topal 2021c).

5. SONUÇLAR

Simulasyon sonuçlarına göre statik akustik kuvvet ölçümünde birinci özmoddaki genlik cevapları akustik kuvvetlerin şiddetlerine son derece bağlıdır. Sürücü kuvveti 78 pN'dan 35 pN'a düşürülerek 200-1100 pN aralığındaki akustik kuvvetlerin ölçümünde birinci özmoddaki faz kayması arttırılmıştır. Nümerik simülasyon sonuçları göstermiştir ki daha yüksek genlik ve faz kayması hassasiyeti için ölçülen akustik kuvvetin şiddetine göre optimum tahrik kuvveti şiddeti belirlenmelidir. Buna ilaveten, iki frekanslı tahrik, birinci özmoddaki faz kayması hassasiyetini arttırmaktadır. İki frekanslı tahrik şeması ile kantileverin sürülmesi birinci özmodda ölçüm hassasiyetini arttırmaktadır. Diğer yandan, tek frekanslı tahrik şeması ile elde edilen ikinci özmoddaki faz kaymaları, iki frekanslı tahrikteki faz kaymalarından daha büyüktür. Bu sonuç, gözlenebilir hassasiyetini arttırmak için her bir özmodda optimum sürücü kuvvet şiddetinin belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Virial teoremi ve enerji korunumu prensibi açısından değerlendirildiğinde virial ve yayılan güç değişkenleri statik akustik kuvvetin ölçümünde enerji depolaması ve yayılımını açıklamak için kullanılmaktadır. İki frekanslı tahrikteki özmodların etkileşimi ve özmodların arasındaki enerji transferi, enerji değişkenleri kullanılarak değerlendirilebilmektedir.

İki frekanslı tahrikte tahrik parametrelerinin optimizasyonu özmodlarda gözlenebilir hassasiyetinin artmasına imkan vermektedir. Kantileverin birinci özmodda daha küçük tahrik kuvvetleri ile sürülmesi daha küçük genliklerde serbest salınımlara neden olmaktadır. Birinci özmoddaki bu salınımlar akustik kuvvetler ile daha çok etkileşime girmektedir. Buna ilaveten, daha büyük tahrik kuvvetlerinden dolayı birinci özmoddaki faz kayması cevaplarında düzensiz eğilimler mevcuttur. Bu sonuç, birinci özmodda daha kararlı faz kayması cevapları elde etmek için optimum tahrik kuvveti şiddetlerinin seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. İkinci özmod için geçiş bölgesinde farklı tahrik kuvveti oranları için akustik kuvvete karşı kayda değer bir genlik hassasiyeti mevcuttur. Buna karşın, artan akustik kuvvet ile birlikte 1.0-1.8 aralığındaki tahrik kuvveti oranları için ikinci özmodda faz kayması cevaplarında kayda değer artışlar gözlemlenmiştir. Nümerik simülasyon sonuçlarına göre iki frekanslı tahrikteki tahrik kuvvetlerinin optimizasyonu akustik kuvvete karşı gözlenebilirlerin hassasiyetini arttırmaktadır.

Dinamik akustik kuvvet ölçümünde kantileverin özmod frekanslarına göre belirlenmiş farklı frekanslardaki akustik kuvvetlere karşı gözlenebilirlerin hassasiyetleri ve enerji değişkenlerindeki değişimler araştırılmıştır. Nümerik simülasyon sonuçlarına göre kantileverin özmod frekanslarının etrafındaki frekanslara sahip akustik kuvvetler için daha yüksek salınım gözlenebiliri ve enerji değişkeni hassasiyeti elde edilmiştir. Buna ilaveten, dinamik akustik kuvveti ölçümünde iki frekanslı tahrik şeması kullanılarak yüksek hassasiyetli frekans aralığının genişliğini arttırmak mümkündür. Kantileveri iki frekanslı tahrik şeması ile sürerek ikinci özmoddaki faz kayması hassasiyeti arttırılabilmektedir. Bunla ilgili olarak iki frekanslı tahrikte özmod etkileşimi mevcuttur. Akustik kuvvet ölçümünde dikdörtgensel keside sahip bir kantilever kullanıldığı için ikinci özmod frekansının birinci özmod frekansına oranı 6.27 olarak alınmıştır (Garcia ve Herruzo 2012). Nümerik simülasyon sonuçlarına göre ikinci özmodda yaklaşık olarak 178 derece faz kayması cevabı elde edilmiştir ve bu sonuç, uygulanan yöntemin akustik kuvvetlerin ölçümünde oldukça kullanışlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, birinci özmodda elde edilmiş olan 2.8 nm genlik cevabı, uygulanan tekniğin sensör tasarımı için

kullanışlı olabileceğini işaret etmektedir. Virial teoremi dikkate alındığında daha yüksek moddaki enerji yayılımı miktarı faz kayması ile ilişkilendirilmektedir. Akustik kuvvet altında salınım yapan kantileverden yayılan enerji miktarı, akustik kuvvet şiddetine bağlı olan iki frekanslı tahrikteki özmod etkileşiminden etkilenmektedir. Sonuç olarak, salınım gözlenebilirlerine bağlı olan enerji değişkenleri, dinamik akustik kuvvet ölçümündeki enerji yayılımı sürecini açıklamak için kullanılmıştır.

Çoklu frekanslı operasyonlarda ilk dört özmoddaki genlikler, akustik kuvvet frekansı alanında farklı cevaplar göstermektedir. Birinci özmoddaki genlik cevapları dikkate alındığında çoklu frekanslı operasyonlarda özmodların etkileşimi olduğu düşünülmektedir. Bunun dışında, iki, üç ve dört frekanslı tahriklerde yüksek özmodlardaki genlikler arasında kayda değer bir fark görülmemektedir. Buna ilaveten, tahrik şemasından bağımsız bir şekilde akustik kuvvet şiddeti arttıkça dinamik akustik kuvvete karşı kantileverin cevabı da önemli bir miktarda artmaktadır. Ayrıca, kantileverin özmod frekansları etrafında yüksek hassasiyetli frekans bölgeleri elde edilmiştir. Bunla ilgili olarak özmod frekansları gibi mekanik özellikler optimize edilerek istenilen frekans bantlarında akustik kuvvete karşı yüksek hassasiyet elde edilebilmektedir. Bunun dışında, megahertz frekanslardaki akustik kuvvetler dört frekanslı operasyon altındaki kantileveri kullanılarak ölçülebilmektedir. 60-2900 pN kuvvet şiddeti aralığı için 1740 kHz frekansındaki akustik kuvvetlere karşı önemli derecede genlik hassasiyeti elde edilmiştir. Sonuç olarak, çoklu frekanslı tahrik şemaları ile rezonans frekanslarında sürülen kantilever, dinamik akustik kuvvetlere karşı genlik hassasiyetlerini arttırmak için kullanılabilmektedir.

Dizin içerisindeki kantileverlerin ikinci özmod frekanslarının yakınındaki akustik kuvvet frekansları için daha yüksek genlik hassasiyetleri elde edilmiştir. Genlik cevaplarına göre belirlenmiş frekans bantlarında kantilever M1 için faz kayması cevapları hassasiyet göstermemektedir. Buna karşın, diğer kantileverler için faz kayması hassasiyetleri tespit edilmiştir. Kantileverlerin yay sabitine ve sönümleme etkisine bağlı olarak gözlenebilir cevapları akustik kuvvet frekansına ve şiddetine göre önemli ölçüde değişmektedir. Nümerik simülasyon sonuçlarına göre iki frekanslı tahrik şeması, belirli şiddet ve frekansa sahip akustik kuvvetlerin ölçüm hassasiyetini arttırmıştır. Tek ve iki frekanslı tahrikte akustik kuvvet şiddeti arttıkça yüksek hassasiyetli frekans bölgelerinde kantileverlerin genlik cevapları da artmaktadır. Kantilever dizinini kurarken yüksek özmod frekanslarına göre kantileverler seçilmelidir. Böylece, dinamik akustik kuvvet ölçümünde yüksek hassasiyetli frekans bölgelerinin istenilen lokasyonu ve genişliği elde edilebilmektedir. Buna ilaveten, dizin içinde kullanılan farklı özmod frekanslarına sahip kantileverlerin sayısı, ortaya çıkması beklenen yüksek hesaplama karmaşıklığına rağmen arttırılabilir. Böylece, daha geniş yüksek hassasiyetli akustik kuvvet frekans aralığı elde edilebilecektir. Daha yüksek gözlenebilir hassasiyeti için özmod frekansının belirleyici faktörleri olan kantileverlerin malzeme özellikleri ve geometrik ölçüleri optimize edilmeldir (Ehsanipour vd. 2019). Buna ilaveten, optimum mekanik karakteristiği elde etmek için AKM kantileveri üzerinde mikro işleme gerçekleştirilmektedir. Delik açmak gibi kantileverin tasarımını değiştiren işlemler yapmak kantileverin rezonans dinamiğini değiştirmektedir (Eslami ve Damircheli 2019). Buna ilaveten, kantilever dizininin tek ve iki frekanslı tahrikleri için hesaplanan enerji değişkenleri, salınım gözlenebilirleri ve enerji yayılım süreci arasındaki bağlantıyı kurmak için kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyetli frekans bölgesinde yaklaşık olarak 400-2000 pN aralığındaki akustik kuvvet

şiddetleri için enerji değişkenleri devamlı olarak yükselen bir eğilim sergilemektedir. Sonuç olarak, dinamik akustik kuvvetin ölçümünde akustik kuvvet şiddeti ve frekansına göre hesaplanan enerji değişkenlerindeki değişimler, ölçüm hassasiyeti için kullanılabilmektedir.

6. KAYNAKLAR

Aksoy, M. D. and Atalar, A. 2011. Force spectroscopy using bimodal frequency modulation atomic force microscopy. *Physical Review B*, 83(7): 075416.

Albrecht, T. R., Grütter, P., Horne, D. and Rugar, D. 1991. Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity. *Journal of Applied Physics*, 69(2): 668-673.

Alunda, B. O., Lee, Y. J. 2020. Review: Cantilever-Based Sensors for High Speed Atomic Force Microscopy. *Sensors*, 20(17): 4784.

An, S., Solares S., Santos, S. and Ebeling, D. 2014. Energy transfer between eigenmodes in multimodal atomic force microscopy. *Nanotechnology*, 25(47): 475701.

Barre, S. and Benzeggagh, M.L. 1994. On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology*, 52(3): 369-376.

Butt, H. J. 1991. Electrostatic interaction in atomic force microscopy. *Biophysical Journal*, 60(4): 777-785.

Çelik, Ü. 2011. Sıvıda Çalışan Atomik Çözünürlüklü Yüzeye Değmeyen Atomik Kuvvet Mikroskobu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. 65 s.

Çelik, Ü. 2017. Yüksek Hızlı Atomik Kuvvet Mikroskobu (YH-AKM) Geliştirilmesi ve Çeşitli Uygulamaları. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 110 s.

Damircheli, M. 2019. Enhancing phase contrast for bimodal AFM imagining in low quality factor environments. *Ultramicroscopy*, 204(38): 18-26.

Damircheli, M. and Eslami, B. 2020. Design of V-shaped cantilevers for enhanced multifrequency AFM measurements. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 11(1): 1525-1541.

Damircheli, M., Payam A. F. and Garcia, R. 2015. Optimization of phase contrast in bimodal amplitude modulation AFM. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1): 1072-1081.

Dareing, D. W., Thundat, T., Jeon, S. and Nicholson, M. 2005. Modal analysis of microcantilever sensors with environmental damping. *Journal of Applied Physics*, 97(8): 084902.

Degertekin, F. L., Hadimoglu, B., Sulchek, T. and Quate, C. F. 2001. Actuation and characterization of atomic force microscope cantilevers in fluids by acoustic radiation pressure. *Applied Physics Letters*, 78(11): 1628.

De Groot, P. J., Wijnen, P. A. M. and Janssen, R. B. F. 1995. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 55(4): 405-412.

Demirkiran, A., Karakuzu, A., Erkol, H., Torun, H. and Unlu, M. B. 2018. Analysis of microcantilevers excited by pulsed-laser-induced photoacoustic waves. *Optics Express*, 26(4): 4906-4919.

Diaz, A. J., Eslami, B., Lopez-Guerra, E. A. and Solares, S. D. 2014. Selection of higher eigenmode amplitude based on dissipated power and virial contrast in bimodal atomic force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 116(10): 104901.

Dietz, C., Shulze, M., Voss, A., Riesch, C. and Stark, R. W. 2015. Bimodal frequency-modulated atomic force microscopy with small cantilevers. *Nanoscale*, 7(1): 1849-1856.

Dou, Z., Qian, J., Li, Y., Wang, Z., Zhang, Y., Lin, R. and Wang, T. 2020. Molecular dynamics simulation of bimodal atomic force microscopy. *Ultramicroscopy*, 212(1): 112971.

Ebeling, D., Eslami, B. and Solares, S. D. J. 2013. Visualizing the subsurface of soft matter: Simultaneous topographical imaging, depth modulation and compositional mapping with triple frequency atomic force microscopy. *ACS Nano*, 7(11): 10387-10396.

Ehsanipour, M., Damircheli, M. and Eslami, B. 2019. Effect of cantilevers' dimensions on phase contrast in multifrequency atomic force microscopy. *Microscopy Research and Technique*, 82(9): 1438-1447.

El Khoury, D., Fedorenko, V., Castellon, J., Bechelany, M., Laurentie J. C., Balme, S., Frechette, M., Ramonda, M. and Arinero, R. 2017. Characterization of dielectric nanocomposites with electrostatic force microscopy. *Scanning*, 2017(1): 4198519.

Eslami, B. and Damircheli, M. 2019. Biharmonic versus bimodal AFM: Numerical and experimental study on soft matter. *Applied Physics*, 126(9): 095301.

Eslami, B., Lopez-Guerra, E. A., Diaz, A. J. and Solares, S. D. 2015. Optimization of the excitation frequency for high probe sensitivity in single-eigenmode and bimodal tapping-mode AFM. *Nanotechnology*, 26(16): 165703.

Feng, G. H. and Tsai, M. Y. 2010. Acoustic emission sensor with structure-enhanced sensing mechanism based on micro-embossed piezoelectric polymer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 162(1): 100-106.

Feng, G. H., Tsai, M. Y. and Jeng, Y. R. 2012. A micromachined, high signal-to-noise ratio, acoustic emission sensor and its application to monitor dynamic wear. *Sensors and Actuators A: Physical*, 188(1): 56-65.

Forchheimer, D., Borysov, S. S., Platz, D. and Haviland, D. B. 2014. Determining surface properties with bimodal and multimodal AFM. *Nanotechnology*, 25(48): 485708.

Fukuma, T., Kimura, M., Kobayashi, K., Matsushige, K. and Yamada, H. 2005. Development of low noise cantilever deflection sensor for multienvironment frequency-modulation atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 76(5): 053704.

Gao, N., Zhao, D., Jia, R. and Liu, D. 2016. Microcantilever actuation by laser induced photoacoustic waves. *Scientific Reports*, 6(1): 19935.

Garcia, R. and Herruzo, E. T. 2012. The emergence of multifrequency force microscopy. *Nature Nanotechnology*, 7(4): 217-226.

Gomez, C. J. and Garcia, R. 2010. Determination and simulation of nanoscale energy dissipation processes in amplitude modulation AFM. *Ultramicroscopy*, 110(6): 626-633.

Herruzo, E. T. and Garcia, R. 2012. Theoretical study of the frequency shift in bimodal FM-AFM by fractional calculus. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 3(1): 198-206.

Huang, Z., Wen, P. and Zhaou, X. 2021. Comparison of different excitation schemes in bimodal atomic force microscopy in air and liquid environments. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 34(6): 163-173.

Huber, T. M., Abell, B. C., Mellema, D. C., Spletzer and M., Raman, A. 2010. Mode-selective noncontact excitation of microcantilevers and microcantilever arrays in air using the ultrasound radiation force. *Applied Physics Letters*, 97(21): 214101.

Huber, T. M., Algren, M. and Raisbeck, C. 2016. Spatial distribution of acoustic radiation force for non-contact modal excitation. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 10(1): 155-162.

Hur, S., Kwak, J. H., Jung, Y. and Lee, Y. H. 2012. Biomimetic acoustic sensor based on piezoelectric cantilever array. *IEICE Electronics Express*, 9(11): 945-950.

Hur, S., Lee, S. Q. and Choi, H. S. 2010. Fabrication and characterization of PMN-PT single crystal cantilever array for cochlear-like acoustic sensor. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(1): 181-184.

Ilik, B., Koyuncuoglu, A., Sukas, O. Ş. and Kulah, H. 2018. Thin film piezoelectric acoustic transducer for fully implantable cochlear implants. *Sensors and Actuators A: Physical*, 280(1): 38-46.

Jai, C., Cohen-Bouhencina, T. and Maali, A. 2007. Analytical description of motion of an acoustic-driven atomic force microscope cantilever in liquid. *Applied Physics Letters*, 90(11): 113512.

Kageshima, M., Chikamoto, T., Ogawa, T., Hirata, Y., Inoue, T., Naitoh, Y., Li, Y. J. and Sugawara, Y. 2009. Development of atomic force microscope with wide-band magnetic excitation for study of soft matter dynamics. *Review of Scientific Instruments*, 80(2): 023705.

Karcı, Ö., Atalan, H., Dede, M., Çelik, Ü. and Oral, A. 2009. Sub-10 nm resolution in MFM at ambient conditions, MRS Fall Meeting, 30 Kasım – 4 Aralık, Boston USA.

Kaveh, O., Coskun, M. B., Mahdavi, M. and Moheimani, S. O. R. 2020. FPGA-based characterization and Q-control of an active AFM cantilever. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 6-9 Temmuz, Boston, USA.

Kawashima, T., Matsui, A., Muto, K., Nagai, M. and Shibata, T. 2012. Fabrication of acoustic emission sensor integrated with cantilever array for detection of signals divided into frequency domain. *Key Engineering Materials*, 523(1): 575-580.

Kayım, D. Ç. 2014. Atomik Kuvvet Mikroskobu ile Biyomoleküllerin Doğal Ortamlarında Tayini ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 134 s.

Kazakova, O., Puttock, R., Barton, C., Corte-Leon, H., Jaafar, M., Neu, V. and Asenjo, A. 2019. Frontiers of magnetic force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 125(6): 060901.

Kodera, N., Sakashita, M. and Ando, T. 2006. Dynamic proportional-integral-differential controller for high-speed atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 77(8): 083704.

Korayem, M. H., Korayem, A. H. and Hashemi, S. H. 2016. Analysis of hysteresis effect on the vibration motion of a bimodal non-uniform micro-cantilever using MCS theory. *Applied Physics A*, 122(1): 96.

Lee, J. R. and Tsuda, H. 2005. A novel fiber bragg grating acoustic emission sensor head for mechanical tests. *Scripta Materialia*, 53(10): 1181-1186.

Lopez-Guerra, E. A., Somnath S., Solares, S. D., Jesse, S. and Ferrini, G. 2019. Few-cycle regime atomic force microscopy. *Scientific Reports*, 9(1): 12721.

Lozano, J. R. and Garcia R. 2008. Theory of multifrequency atomic force microscopy. *Physical Review Letters*, 100(7): 076102.

Lozano, J. R. and Garcia R. 2009. Theory of phase spectroscopy in bimodal atomic force microscopy. *Physical Review B*, 79(1): 014110.

Maali, A., Hurth, C., Cohen-Bouhancina, T., Couturier, G. and Aime, J. P. 2006. Improved acoustic excitation of atomic force microscope cantilevers in liquid. *Applied Physics Letters*, 88(16): 163504.

McLaskey, G. C. and Glaser, S. D. 2012. Acoustic emission sensor calibration for absolute source measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31(2): 157-168.

Patil, S., Martinez, N. F., Lozano, J. R. and Garcia, R. 2007. Force microscopy imaging of individual protein molecules with sub-pico Newton force sensitivity. *Journal of Molecular Recognition*, 20(6): 516-523.

Payam, A. F., Martin-Jimenez, D. and Garcia, R. 2015. Force reconstruction from tapping mode force microscopy experiments. *Nanotechnology*, 26(18): 185706.

Penedo, M., Raman, A., Hormeno, S., Fernandez-Martinez, I., Luna, M. and Briones F. 2014. Enhanced efficiency in the excitation of higher modes for atomic force microscopy and mechanical sensors operated in liquids. *Applied Physics Letters*, 105(17): 173102.

Putnam, J., Damircheli, M. and Eslami, B. 2020. Effects of laser spot positioning with optical beam deflection method on tapping mode and bimodal AFM. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 234(4): 675-690.

Raman, A., Melcher, J. and Tung, R. 2008. Cantilever dynamics in atomic force microscopy. *nanotoday*, 3(1-2): 20-27.

Rodriguez, T. R. and Garcia, R. 2004. Compositional mapping of surfaces in atomic force microscopy by excitation of the second normal mode of the microcantilever. *Applied Physics Letters*, 84(3): 449.

Saboonchi, H. and Ozevin, D. 2013. MEMS acoustic emission transducers designed with high aspect ratio geometry. *Smart Materials and Structures*, 22(9): 095006.

Sader, J. E. and Sader, R. C. 2003. Susceptibility of atomic force microscope cantilevers to lateral forces: Experimental verification. *Applied Physics Letters*, 83(15): 3195.

Sahin, O., Quate, C. F., Solgaard, O. and Atalar, A. 2004. Resonant harmonic response in tapping-mode atomic force microscopy. *Physical Review B*, 69(16): 165416.

San Paulo, A. and Garcia, R. 2000. High-resolution imaging of antibodies by tapping-mode atomic force microscopy: Attractive and repulsive tip-sample interaction regimes. *Biophysical Journal*, 78(3): 1599-1605.

San Paulo, A. and Garcia, R. 2001. Tip-surface forces, amplitude, and energy dissipation in amplitude-modulation (tapping mode) force microscopy. *Physical Review B*, 64(19): 193411.

Santos, S. 2014. Phase contrast and operation regimes in multi-frequency atomic force microscopy. *Applied Physics Letters*, 104(14): 143109.

Skrzypacz, P., Nurakhmetov D. and Wei, D. 2019. Generalized stiffness and effective mass coefficients for power-law Euler-Bernoulli beams. *Acta Mechanica Sinica*, 36(3): 160-175.

Solares, S. D. 2012. Exploring dynamic non-idealities in multi-frequnency atomic force microscopy. 6th International Conference on Micro- and Nanosystems; 17th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference, pp. 291-296, 12-15 August, Chicago, İllinois, USA.

Solares, S. D., An, S. and Long C. J. 2014. Multi-frequency tapping-mode atomic force microscopy beyond three eigenmodes in ambient air. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 5(1): 1637-1648.

Solares, S. D. and Chawla, G. 2010. Frequency response of higher cantilever eigenmodes in bimodal and trimodal tapping mode atomic force microscopy. *Measurement Science and Technology*, 21(12): 125502.

Solares, S. D. and Chawla, G. 2012. Multi-frequency atomic force microscopy combining amplitude- and frequency-modulation techniques. *MRS Online Proceedings*, 1422(1): 19-23.

Stark, R. W. and Heckl, W. M. 2000. Fourier transformed atomic force microscopy: tapping mode atomic force microscopy beyond the Hookian approximation. *Surface Science*, 457(1): 219-228.

Svoren, J., Nascak, L., Koleda, P., Barcik, S. and Nemec, M. 2021. The circular saw blade body modification by elastic material layer effecting circular saws sound pressure level when idling and cutting. *Applied Acoustics*, 179(1): 108028.

Şahin, R. 2009. Çoklu Frekanslı Atomik Kuvvet Mikroskobu ve Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 77 s.

Takata, K., Sasaki, T., Tanaka, M., Saito, H., Matsuura, D. and Hane, K. 2016. Fabrication of ultrasonic sensors using micro cantilevers and characteristic measurement in vacuum for acoustic emission sensing. *Electronics and Communications in Japan*, 99(4): 68-74.

Tamayo, J. 1999. Energy dissipation in tapping-mode scanning force microscopy with low quality factors. *Applied Physics Letters*, 75(22): 3569.

Tamayo, J. and Garcia, R. 1996. Deformation, contact time, and phase contrast in tapping mode scanning force microscopy. *Langmuir*, 12(18), 4430–4435.

Tan, X., Guo, D. and Luo, J. 2019. Different directional energy dissipation of heterogenous polymers in bimodal atomic force microscopy. *RSC Advances*, 9(47): 27464-27474.

Voigtlander, B. 2019. Atomic force microscopy. Springer, pp. 177-197, Switzerland.

West, P. E. 2007. Introduction to atomic force microscopy: theory, practice, applications. Pacific Nanotechnology. Santa Clara. pp. 1-159.

Xu, X. and Raman, A. 2014. Comparative dynamics of magnetically, acoustically, and Brownian motion driven microcantilevers in liquids. *Journal of Applied Physics*, 102(3): 034303.

Yilmaz, C., Sahin, R. and Topal, E. S. 2021a. Exploring the static acoustic force sensitivity using AFM micro-cantilever under single- and bimodal-frequency excitation. *Measurement Science and Technology*, 32(11): 115001.

Yilmaz, C., Sahin, R. and Topal, E. S. 2021b. Theoretical study on the sensitivity of dynamic acoustic force measurement through monomodal and bimodal excitations of rectangular micro-cantilever. *Engineering Research Express*, 3(4): 045035.

Yilmaz, C., Sahin, R. and Topal, E. S. 2022c. Observable responses of micro-cantilever array to dynamic acoustic forces at higher mode in the broadband frequency window. Fourth International Engineering Research Symposium, 04 - 06 Mart, Düzce, Türkiye.

Yilmaz, C. and Topal, E. S. 2021a. Influence of driving force ratio on oscillation observables at flexural eigenmodes in static acoustic force measurement. 6th International Mediterranean Science and Engineering Congress, ss. 54-58, 25 - 27 Ekim, Antalya, Türkiye.

Yilmaz, C. and Topal, E. S. 2021b. Amplitude responses at flexural eigenmodes in dynamic acoustic force measurement using multimodal excitation schemes. *European Journal of Science and Technology*, 28(1): 120-125.

Yilmaz, C. and Topal, E. S. 2021c. Virial and energy dissipation in measurement of dynamic acoustic forces using bimodal-frequency excitation of micro-cantilever array. *Academic Perspective Procedia*, 4(1): 332-340.

Zhao, C., Knisely, K. E. and Grosh, K. 2018. Design and fabrication of a piezoelectric MEMS xylophone transducer with a flexible electrical connection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 275(1): 29-36.

Anonymous 1: Atomic force microscopy. http://www.nanoscience.de/HTML/methods/afm.html [Son erişim tarihi: 10.01.2022]

7. EKLER

EK-1 Kantileverin etkili kütlesi

Hollomon gerilim-gerinme denklemine dayalı olarak kantileverin etkili nokta kütlesi birinci ve ikinci özmod için belirlenmiştir (Yilmaz vd. 2021b). m_k kütlesinin güç yasasına göre oluşturulmuş etkili kütlesinin denklemi aşağıda verilmiştir (Skrzypacz vd. 2020).

$$\mathrm{m_{eff}(n)} = \mu_{\mathrm{eff}}(\mathrm{n})\ \mathrm{m_k} \tag{7.33}$$

Denklem 7.33'de verilmiş olan $\mu_{\mathrm{eff}}(n)$, n gerinim sertleştirme üssü için etkili kütle katsayısını ifade etmektedir. Etkili kütle katsayısının denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\mu_{\mathrm{eff}}(\mathrm{n}) = \frac{36\mathrm{n}^3 + 44\mathrm{n}^2 + 17\mathrm{n} + 2}{180\mathrm{n}^3 + 177\mathrm{n}^2 + 57\mathrm{n} + 6} \tag{7.34}$$

Gerinim sertleştirme üssü n, kantileverin lineer elastik malzemesi için 1 değerini almaktadır. Sonuç olarak, kantileverin etkili kütlesinin denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\mathrm{m_e} = \mathrm{m_{eff}}(1) = \frac{33}{140}\ \mathrm{m_k} \tag{7.35}$$

EK-2 Tek ve iki frekanslı tahrik şemaları için yer değiştirmenin dönüştürülmesi

Dikdörtgensel keside sahip kantileverin dinamiği bir boyutlu Euler-Bernoulli denklemi ile açıklanabilmektedir (Dareing vd. 2005; Patil vd. 2007). Kantileverin yer değiştirmesinin elde edildiği hareket denklemi aşağıda verilmiştir (Stark vd. 2000).

$$\mathrm{E(x)\ I(x)}\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}^4}\left[\mathrm{w_{eb}(x,t)} + \mathrm{a_1}\frac{\partial \mathrm{w_{eb}(x,t)}}{\partial \mathrm{t}}\right] + \rho(\mathrm{x})\frac{\partial^2 \mathrm{w_{eb}(x,t)}}{\partial \mathrm{t}^2} + \mathrm{a_0}\rho(\mathrm{x})\frac{\partial \mathrm{w_{eb}(x,t)}}{\partial \mathrm{t}} = \mathrm{F_{eb}(x,t)} \quad (7.36)$$

Denklem 7.36'da verilmiş olan $\mathrm{w_{eb}(x,t)}$, $\rho(\mathrm{x})$, $\mathrm{I(x)}$ ve $\mathrm{E(x)}$ sırasıyla yer değiştirme, malzemenin kütle yoğunluğu, atalet momenti ve Young modülünü ifade etmektedir. $\rho(x)$, $I(x)$ ve $E(x)$ sabit olarak düşünülmektedir. $\mathrm{a_0}$ ve $\mathrm{a_1}$ katsayıları sırasıyla kütle orantılı sönümleme ve yay sabiti orantılı sönümlemeyi ifade etmektedir. $\mathrm{F_{eb}(x,t)}$, kantileverin uzunluğu boyunca tanımlanmış pozisyonu olan x değişkeninden bağımsızdır ve böylece $\mathrm{F_{eb}(x,t)}$, tahrik kuvveti ve akustik kuvvetin toplamı olan toplam etkili kuvvet olan $\mathrm{F_{eb}(t)}$ 'ye eşittir. Tahrik kuvvetleri ile sürülen ve akustik kuvvetin etkisinde olan kantileverin dinamiğini araştırmak için Denklem 7.36 bir grup ayrılmış harmonik osilatöre dönüştürülmüştür. Aşağıdaki denklemde kantileverin yer değiştirmesi verilmiştir.

$$\mathrm{w_{eb}(x,t)} = \sum_{\mathrm{n=1}}^{\infty} \lambda_{\mathrm{n}}(\mathrm{x})\,\mathrm{z_n(t)} \quad (7.37)$$

Denklem 7.37'de verilmiş olan $\lambda_n(x)$ ve $\mathrm{z_n}(t)$ sırasıyla mod şekli ve zaman ile değişen mod genliğini ifade etmektedir. Denklem 7.37'nin Denklem 7.36'da yerine koyulması ve ortogonallik bağıntısının uygulanması sonucu aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\mathrm{M_i\ddot{z}_i(t)} + \sum_{\mathrm{n=1}}^{\infty} \mathrm{\dot{z}_i(t)} \int_0^{\mathrm{L}} \lambda_{\mathrm{n}}(\mathrm{x})\left[\mathrm{a_0}\lambda_{\mathrm{n}}(\mathrm{x}) + \mathrm{a_1 EI}\frac{\partial^4 \lambda_{\mathrm{n}}(\mathrm{x})}{\partial \mathrm{x}^4}\right]\mathrm{dx} + {\omega_{\mathrm{ei}}}^2 \mathrm{M_i z_i(t)} = \mathrm{F_{di}(t)} \quad (7.38)$$

Denklem 7.38'de verilmiş olan $\mathrm{M_i}$ ve $\mathrm{F_{di}}$ sırasıyla genelleştirilmiş kütle ve genelleştirilmiş dış kuvveti ifade etmektedir. Denklem 7.38'in ayrılmış diferansiyel denkleme dönüştürülmüş hali aşağıda verilmiştir.

$$\mathrm{M_i\ddot{z}_i(t)} + 2\mathrm{M_i}\gamma_{\mathrm{i}}\omega_{\mathrm{ei}}\mathrm{\dot{z}_i(t)} - \mathrm{M_i}{\omega_{\mathrm{ei}}}^2 \mathrm{z_i(t)} = \mathrm{F_{di}(t)} \quad (7.39)$$

Denklem 7.39'da verilmiş olan γ_i, mod sönümleme parametresini ifade etmektedir. Mod sönümleme parametresi ile ilgili denklem aşağıda verilmiştir.

$$\gamma_{\mathrm{i}} = \frac{\mathrm{a_0}}{2\omega_{\mathrm{ei}}} + \frac{\mathrm{a_1}\omega_{\mathrm{ei}}}{2} \quad (7.40)$$

Tek frekanslı tahrik şemasında i özmodundaki dış kuvvet aşağıda formüle edilmiştir.

$$F_{di}(t) = F_{tahrik,i} + F_{Akustik} \tag{7.41}$$

İki frekanslı tahrik şeması için dış kuvvet aşağıda formüle edilmiştir.

$$F_{di}(t) = F_{tahrik,1} + F_{tahrik,2} + F_{Akustik} \tag{7.42}$$

Ayrılmış diferansiyel denklemin diğer katsayıları aşağıda verilmiştir.

$$M_i = m_e \tag{7.43}$$

$$2\gamma_i = \frac{1}{Q_i} \tag{7.44}$$

$$M_i {\omega_{ei}}^2 = k_i \tag{7.45}$$

Nokta kütle modeli dikkate alındığında kantileverin yer değiştirmesi x'den bağımsızdır. Zamana bağlı olan kantileverin yer değiştirme denklemi aşağıda verilmiştir.

$$z(t) = \sum_{i=1}^{\infty} z_i(t) \tag{7.46}$$

Yer değiştirme, etkili nokta kütlesinin denge noktasına göre belirlendiği için tek ve iki frekanslı tahrik şemaları için elde edilen yer değiştirmeler sırasıyla Denklem 7.47 ve Denklem 7.48 ile formüle edilmiştir (Lozano ve Garcia 2008; Damircheli vd. 2015).

$$z_s(t) = z_i(t) \approx A_i \cos(\omega_{ei} t - \emptyset_i) \tag{7.47}$$

$$z_b(t) \approx \sum_{i=1}^{2} z_i(t) \approx \sum_{i=1}^{2} A_i \cos(\omega_{ei} t - \emptyset_i) \tag{7.48}$$

Denklem 7.47 ve Denklem 7.48'de verilmiş olan A_i ve $\emptyset_i$, kantileverin i özmodu için sırasıyla salınım genliği ve faz kaymasını ifade etmektedir. İki frekanslı tahrikte ilk iki özmod frekanslarındaki yer değiştirmeler elde edildiği için daha yüksek modlar ihmal edilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

ÇAĞRI YILMAZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2016-2022	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2008-2010	Duisburg Essen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Duisburg, Almanya
Lisans 2002-2007	Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi 2016-Devam Ediyor	Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Mekatronik Programı, Antalya
Araştırma Görevlisi 2011-2014	Berlin Teknik Üniversitesi Dağıtılmış Yapay Zeka Araştırma Enstitüsü (Dai-Labor), Berlin, Almanya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Yilmaz, C., Sahin, R., Topal, E. S. (2021). Theoretical study on the sensitivity of dynamic acoustic force measurement through monomodal and bimodal excitations of rectangular micro-cantilever. Engineering Research Express, 3(4), 045035. Doi:10.1088/2631-8695/ac3a55

2- Yilmaz, C., Sahin, R., Topal, E. S. (2021). Exploring the static acoustic force sensitivity using AFM micro-cantilever under single- and bimodal-frequency excitation. Measurement Science and Technology, 32 (11), 115001. Doi:10.1088/1361-6501/ac0eb1

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Yilmaz, C., Sahin, R. Topal, E. S. (2022). Observable responses of micro-cantilever array to dynamic acoustic forces at higher mode in the broadband frequency window, The Fourth International Engineering Research Symposium (Özet Bildiri).

2- Yilmaz, C., Topal, E. S. (2021). Influence of Driving Force Ratio on Oscillation Observables at Flexural Eigenmodes in Static Acoustic Force Measurement, The Sixth International Mediterranean Science and Engineering Congress (Tam Metin Bildiri).

3- Yilmaz, C., Topal, E. S. (2021). Amplitude Responses at Flexural Eigenmodes in Dynamic Acoustic Force Measurement Using Multimodal Excitation Schemes, The First International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (Tam Metin Bildiri).

4- Yilmaz, C., Topal, E. S. (2021). Virial and Energy Dissipation in Measurement of Dynamic Acoustic Forces Using Bimodal-frequency Excitation of Micro-cantilever Array, The Ninth International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (Tam Metin Bildiri).

5- Yilmaz, C., Albayrak, S., Lützenberger, M. (2014). Smart Grid Architectures and the Multi-Agent System Paradigm, The Fourth International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies (Tam Metin Bildiri).