



Piezo Seramik Diskin Nonlinear Titreşimleri **Title Nonlinear Vibrations of Piezoceramic Disk**

Gözde Sarı^{1*}, **Yasemin Nur Aydın¹**

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: gozde.deger@cbu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 13.06.2019
Kabul Tarihi / Accepted: 16.09.2019

Araştırma Makalesi/Research Article
DOI: 10.21205/deufmd.2020226421

Atf şekli/How to cite: SARI, G., AYDIN, Y.N. (2020). Piezo Seramik Diskin Nonlinear Titreşimleri. DEUFMD 22(64),209-217.

Öz

Piezo elektriksel etki ile direkt olarak zorlanan piezo diskin nonlinear titreşim analizi çalışılmıştır. Piezoseramik disk; pirinç disk ve piezo tabakadan oluşmaktadır. Piezoseramik disk elastik yatak ile yere bağlanmıştır. Nonlineerlik etkisi elastik yatak etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Bu makalede piezoseramik diskin nonlinear titreşimleri için kübik nonlineeriteye sahip hareket denklemi önerilmiştir. Kübik nonlinear denklemin faz modülasyon ve frekans cevap fonksiyonlarını elde etmek için denkleme çok ölçekli metod uygulanmıştır. Analitik olarak türetilen frekans cevap eğrisi, piezo elektriksel etki ile harmonik olarak zorlanan diskin deneysel verileriyle doğrulanmıştır. Piezoelektriksel etki ile zorlanan piezoseramik diskin deneysel olarak elde edilen frekans cevap eğrileri; direkt olarak birinci modda elde edilmiştir. Sonuçlar şöyledir; zorlama genliği arttıkça nonlinear rezonans frekansında minör azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Nonlinear davranışın yumuşatıcı tipte olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlarla teorik modelin uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: *piezoseramik disk, nonlinear titreşim, deneysel analiz, çok ölçekli metod.*

Abstract

Nonlinear vibration analysis of piezo disc which is forced directly by piezo electrical effect is studied. Piezoceramic disc consists of brass disc and piezo layer. The piezoceramic disc is attached to the ground by an elastic foundation. The effect of nonlinearity occurs with the effect of elastic foundation. In this article, the equation of motion with cubic nonlinearity is proposed for the nonlinear vibrations of the piezoceramic disc. In order to obtain the phase modulation and frequency response functions of the cubic nonlinear equation, multi-scales method is applied in the equation. The analytically derived frequency response curve is confirmed by experimental data of the harmonic forced disk with piezoelectric effect. The experimentally obtained frequency response curves of the piezoceramic disk forced by the piezoelectric effect are obtained directly in the first mode. The results are as follows; It is found that as the amplitude of the force increased, minor decreases in nonlinear resonance frequency are observed. It is observed that nonlinear behavior is of softening type. It is observed that the experimental model is compatible with the experimental results.

Keywords: *piezoceramic disk, nonlinear vibration, experimental analysis, multiple scales method.*

1. Giriş

Piezoelektrik aletler yaşantımızda her geçen gün daha fazla rol almaktadır. Sensörler ve zorlayıcılar çeşitli pratik uygulamalar için önemli rol oynamaktadır. Sensörler direkt piezoelektriksel etki ile mekanik büyüklükleri elektriksel büyüklüklere dönüştürürler. Sensörlerin aksine, zorlayıcılar ters piezo elektriksel etki ile elektriksel büyüklükleri mekanik kuvvete dönüştürürler. Piezo seramikler tersinir elektriksel etkileri ile kuvvet, tork, hız, sıcaklık sensörlerinde, dizel motorlarda enjeksiyon sistemlerinde, hoparlörlerde, atomizerlerde, akıllı yapılarda, enerji üreteçlerinde ve kurutma alanında kullanılmaktadır [1]. Özellikle enerji üretici [2-11], ultrasonik kurutma [12-14] ve atomizer uygulamaları [15] son zamanlarda dikkat çekmektedir. Piezo seramik diskin ince bant genişliğine sahip olması sistemin rastgele veya çeşitli titreşim spektrumlu uygulamaları için sınır koymaktadır. Bant genişliğini arttırmanın yolları sistemin temel parametrelerini değiştirmekle sağlanabilir. Örneğin sistemin kütlesi veya yay özellikleri değiştirilebilir [2], sisteme dış kuvvet uygulanabilir [3-4], çift kararlı yapılar kullanılabilir [5-8] veya sistem nonlinear yatak ile bağlanabilir. Böylelikle yumuşatıcı ve sertleştirici nonlinear etkiler sayesinde bant genişliği arttırılabilir [9-11]. Piezoseramik uygulamaları ile ilgili çalışmalarda yapılan nonlinear analizler literatürde sunulmaktadır. Araf ve Baz, piezo zorlayıcıların nonlinear titreşimlerini teorik olarak modellemiş ve çözümü deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Nonlinear titreşim sonuçlarına göre yumuşatıcı tipte nonlinear etki belirlenmiştir [14]. Nguyen ve ark. enerji üretici sistemini lineer olmayan yay modeli ile mesnetlemiştir. Güçlü bir yumuşatıcı yay etkisi sergileyen sistem, geniş bantlı titreşim tepki grafiği sağlamıştır. Nonlinear yayın yumuşatıcı ve sertleştirici etkileri deneysel olarak sunulmuştur [10]. Uzun ve ark. manyetik etki ile periyodik olarak zorlanan piezoelektrik sarkacın nonlinear titreşimlerini deneysel ve teorik olarak elde etmişlerdir. Uygulanan manyetik etkinin sistemin nonlinear titreşimlerine etkileri sunulmuştur [15]. James ve ark. piezoseramik diskin nonlinear titreşimlerini modellemiş ve nümerik olarak veriler elde etmiştir. Deneysel sonuçlara teorik modeli sabitlediklerinde yumuşatıcı tipte nonlinear etki olduğunu

belirtmişlerdir [16]. Paralı ve Ark., piezoelektrik zorlayıcının rezonans-antirezonans frekans özellikleri lazer ölçüm ile belirlenmiştir, böylelikle ölçülen değerlere göre elektromekanik kublaj faktörü belirlenmiştir [17].

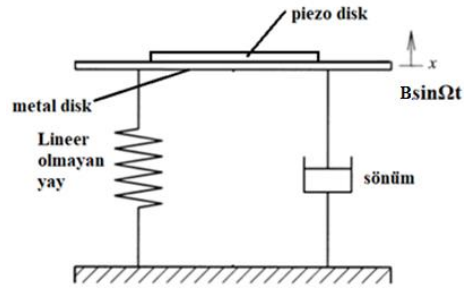
Paralı ve Ark., çalışmalarında elastisite modülünün tahmini için tek serbestlik dereceli bir mekanik model kullanmışlardır. Piezo seramik diskin deneysel titreşim yer değiştirme değerleri, lazer vibrometre kullanılarak elde edilmiştir [18].

Bu çalışmada bant genişliğini arttıran nonlinear yatakla bağlanmış piezo seramik disk için kübik nonlineariteye sahip hareket denklemi önerilmiştir. Nonlinear, homojen olmayan adi diferansiyel denklem pertürbasyon metotlarından çok ölçekli metot ile çözülmüştür. Deneysel olarak da modellenen sistemin lazer vibrometre ile tek noktadan deplasman ölçümü yapılmıştır. Teorik çözüm ve deneysel frekans cevap verileri birbiriyle uyumlu elde edilmiştir. Uygulanan elektriksel kuvvet genliğinin sistemin nonlinear davranışına etkileri belirlenmiştir. Sistem parametrelerinin titreşim eğrilerine etkileri sunulmuştur.

2. Piezo Seramik Diskin Titreşimlerinin Teorik Olarak Modellenmesi

2.1. Hareket denklemi

Zorlayıcı sistem; metal disk, lineer olmayan yay, sönüm ve piezo seramikten oluşmaktadır. Konsantre kütle; metal disk, ve piezo seramik birleşiminden oluşmaktadır. Şekil 1'de zorlayıcı sistemin matematiksel modeli görülmektedir.



Şekil 1. Titreşim Yapan bir Piezo Zorlayıcının Matematiksel Modeli

Zorlayıcı sistemin lineer olmayan titreşimlerini ifade eden diferansiyel denklem aşağıda verilmiştir:

$$m \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + c \frac{dx^*}{dt^*} + k_1 x^* + k_2 x^{*3} = B \sin \Omega^* t^* \quad (1)$$

Denklemdede; m piezo zorlayıcının kütlesi (piezo seramik ve dairesel plaka), c piezo zorlayıcının boyutlu sönüm katsayısı, k₁ zorlayıcının boyutlu lineer yay katsayısı, k₂ zorlayıcının boyutlu lineer olmayan yay katsayısı, t* boyutlu zaman, x* zorlayıcının boyutlu deplasman fonksiyonu, B boyutlu zorlama genliği, Ω* boyutlu zorlama frekansıdır. Sistem sinüzoidal dalga ile zorlanmaktadır. Genel sonuçlar elde etmek için Denklem 1'e aşağıdaki boyutsuz parametreler yerleştirilir.

$$x = \frac{x^*}{d}, \quad t = \frac{t^*}{T}, \quad \Omega = \Omega^* T \quad (2)$$

Zorlayıcının titreşimini tanımlayan boyutsuz diferansiyel denklem

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} + \omega^2 x + \alpha \omega^2 x^3 = B \omega^2 \sin \Omega t \quad (3)$$

Lineer olmayan terime sahip diferansiyel denklemin zaman ölçeği T aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$T = \omega \sqrt{\frac{m}{k_1}} \quad (4)$$

T=1 için tabi frekans elde edilir:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_1}{m}} \quad (5)$$

Sistemin boyutsuz parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sistemin boyutsuz parametreleri

Parametre	Tanımlar
$\mu = \frac{c}{\sqrt{k_1 m}}$	boyutsuz sönüm katsayısı
$b = \frac{B}{k_1 d}$	boyutsuz zorlama kuvveti genliği
$\alpha = \frac{k_2 d}{k_1}$	boyutsuz nonlinear yay katsayısı

2.2. Pertürbasyon Analizi

Nonlinear titreşim modeli önerilen piezo zorlayıcılar için yazılan boyutsuz hareket denklemini pertürbasyon analizi ile çözülecektir.

Denklem çok ölçekli metod uygulanarak çözülecektir [19,20].

Zorlayıcının titreşim denklemi aşağıdaki gibi önerilmiştir:

$$x(t, \varepsilon) = x_0(T_0, T_1) + \varepsilon x_1(T_0, T_1) \quad (6)$$

Burada T₀ hızlı zaman ölçeği ve T₁ yavaş zaman ölçeğidir. Zaman türevleri belirlenir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} &= D_0 + \varepsilon D_1 \\ \frac{d^2}{dt^2} &= D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1 \end{aligned} \quad (7)$$

burada D_n = ∂/∂T_n şeklindedir.

Lineer olmayan terimlerin küçüklüğünü temsil etmek üzere boyutsuz nonlinear yay katsayısı α = εā olarak ölçeklenir. Boyutsuz sönüm ve kuvvet genliği terimleri μ = εμ̄ ve b = εb̄ şeklinde ölçeklenir. Ölçeklenen bu terimler, Denklem (6) ve (7), Denklem (1)'de yerine yazılır ve her bir ε mertebesinde aşağıdaki denklemler elde edilir.

1. Mertebesi:

$$D_0^2 x_0 + \omega^2 x_0 = 0 \quad (8)$$

ε. Mertebesi:

$$D_0^2 x_1 + \omega^2 x_1 = -2D_0 D_1 x_0 - \omega \bar{\mu} D_0 x_0 - \bar{\alpha} \omega^2 x_0^3 + \bar{b} \omega^2 \sin \Omega t \quad (9)$$

elde edilir.

1. mertebesinin çözümü aşağıdaki gibidir,

$$x_0 = A e^{i\omega T_0} + \bar{A} e^{-i\omega T_0} \quad (10)$$

1. mertebesi çözümü Denklem (9)'da yerine yazılırsa,

$$D_0^2 x_1 + \omega^2 x_1 = -2D_0 D_1 (A e^{i\omega T_0} + \bar{A} e^{-i\omega T_0}) - \omega \bar{\mu} D_0 (A e^{i\omega T_0} + \bar{A} e^{-i\omega T_0}) - \bar{\alpha} \omega^2 (A e^{i\omega T_0} + \bar{A} e^{-i\omega T_0})^3 + \bar{b} \omega^2 \sin \Omega t \quad (11)$$

elde edilir. 1. mertebesinde baskın rezonans durumu incelenecektir. Bu yüzden zorlayıcının doğal frekansı zorlama frekansı ile yakın alınacaktır.

$$\Omega = \omega + \varepsilon \sigma \quad (12)$$

Burada σ ayar parametresidir. Bu parametrenin kullanılmasının amacı doğal frekans ile zorlama frekansının yakın olduğunu göstermektir. Zorlama frekansının Denklem (12)'deki açılımı, Denklem (11)'de yerine yazılır ve denklem düzenlenirse,

$$D_0^2 x_1 + \omega^2 x_1 = -2D_0 D_1 (Ae^{i\omega T_0} + \bar{A}e^{-i\omega T_0}) - \omega \bar{\mu} D_0 (Ae^{i\omega T_0} + \bar{A}e^{-i\omega T_0}) - \bar{\alpha} \omega^2 (A^3 e^{3i\omega T_0} + 3A^2 \bar{A} e^{i\omega T_0} + 3A \bar{A}^2 e^{-i\omega T_0} + \bar{A}^3 e^{-3i\omega T_0}) + \frac{\bar{b}}{2} \omega^2 e^{i\omega T_0} e^{i\sigma T_1} \quad (13)$$

elde edilir. Denklem (13)'te patlamalara neden olan seküler terimler sıfıra eşitlenir:

$$-2D_0 D_1 (Ae^{i\omega T_0} + \bar{A}e^{-i\omega T_0}) - \omega \bar{\mu} D_0 (Ae^{i\omega T_0} + \bar{A}e^{-i\omega T_0}) - \bar{\alpha} \omega^2 (3A^2 \bar{A} e^{i\omega T_0} + 3A \bar{A}^2 e^{-i\omega T_0}) + \frac{\bar{b}}{2} \omega^2 e^{i\omega T_0} e^{i\sigma T_1} = 0 \quad (14)$$

Denklem (14) karmaşık genlik modülasyonlarını temsil eder. Kompleks genlik tanımı polar formda yazılır:

$$A = \frac{1}{2} a e^{i\beta} \quad (15)$$

Denklem (15), Denklem (14)'te yerine yazılır ve gerçek sanal kısımlarına ayrılırsa,

$$\gamma' = \sigma - \frac{3}{8} \bar{\alpha} \omega a^2 + \frac{\bar{b} \omega}{2a} \cos \gamma \quad (16)$$

$$a' = -\omega \bar{\mu} \frac{1}{2} a + \frac{\bar{b}}{2} \omega \sin \gamma \quad (17)$$

burada γ ,

$$\gamma = \sigma T_1 - \beta \quad (18)$$

şeklinde dir. Genlik ve faz değerleri Denklem (16) ve (17)'den elde edilir. Zorlama aşamasına bağlı olarak başlangıçtaki geçici hareket ve başlangıç koşulları, piezo seramik diskin kullandığı atomizasyon, kurutma gibi uygulamaların zaman ölçeğinden çok daha küçük olan bir zaman ölçeğinde meydana gelir. Bu nedenle kalıcı durum davranışı dikkate alınmalıdır. Kalıcı durum çözümleri için $a' = \gamma' = 0$ alınır. Denklem (16) ve (17)'de γ ifadesi yok edilerek frekans genlik denklemi elde edilir. Böylelikle σ ayar parametresi bulunur ve bu parametre denklem (12)'de yerine yazılırsa

$$\Omega = \omega + \varepsilon \left(\frac{3}{8} \bar{\alpha} \omega a^2 \pm \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\bar{b}^2 \omega^2}{4} - \left(\frac{1}{2} \omega \bar{\mu} a \right)^2} \right) \quad (19)$$

elde edilir. Nonlineer frekans denklemini elde etmek için, Denklem (16) ve (17)'de $\sigma = 0$, $\mu = 0$, $\bar{b} = 0$, $\gamma = -\beta$ yerleştirilir. Böylelikle nonlineer frekans [21],

$$\omega_{nl} = \omega + \varepsilon \frac{3}{8} \bar{\alpha} \omega a^2 \quad (20)$$

elde edilir. Burada doğal frekansın deneysel olarak kıyaslanabilmesi için $\omega = 2\pi f$

eşitliğinden frekans, Hz biriminde elde edilir. Denklem (5)'e bu eşitlik yerleştirilirse:

$$2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (21)$$

elde edilir.

3. Deneysel Analiz ve Gözlemler

Bu bölümde piezo seramik disk nonlineer frekans cevap eğrileri elde edilmektedir. Piezo seramik disk Murata firması tarafından üretilmiştir. Ürün kodu 7BB 35-3L0 şeklindedir [22]. Disk; pirinç dairesel plaka ve plaka üzerine yapıştırılmış piezo seramikten oluşmaktadır. Piezo seramik diskin görünümü Şekil 2'de sunulmaktadır ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de yazılmıştır.

Şekil 3'te görülen deney düzeneği; VQ-400-A lazer vibrometre (OMETRON), 3050-B-040 veri toplayıcı (Brüel&Kjaer), EPA-104 model piezo lineer amfi (PIEZO SYSTEMS), DG1022A sinyal jeneratörü (RIGOL TECHNOLOGIES) ve bilgisayardan oluşmaktadır. Lazer vibrometreden alınan analog veriler, Pulse LabShop yazılımı ile çalışan Brüel&Kjaer veri toplayıcısına gönderilerek burada dijital sinyale dönüştürülmektedir.

Piezo seramik disk, sinyal jeneratörü ve amfi ile harmonik olarak zorlanmaktadır. Lazer vibrometre tek bir noktadan zorlayıcının titreşimlerini almak üzere kullanılmıştır. Lazer vibrometrenin ışığı zorlayıcının üzerinde odaklanarak, dokunmadan fiziksel frekans ve genlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 4). Zorlayıcının merkezi diğer noktalara kıyasla yüksek genlikte hareket etmektedir. Bu nedenle lazer ışığı zorlayıcının merkezine odaklanmıştır.

Zorlayıcının nonlineer davranışını karakterize edebilmek için, genlik sabit tutularak frekans süpürme şeklinde uygulanır. Her bir frekans değeri için elde edilen genlik değerleri elde edilir. Böylelikle doğal frekans bölgesinde zorlanan sistemin cevabı ortaya konmaktadır. Genliğin sıçrama yaptığı frekanslar ve sistemin nonlineer davranışı belirlenmiştir.

Deneyde zorlayıcı kuvvetin genliği sabit tutularak frekans artırılmış ve diskin merkez noktasındaki genlik değerleri ölçülmüştür. Böylelikle zorlayıcının frekansa karşılık vermiş olduğu nonlineer tepki belirlenmiştir. Nonlineer frekans tepki grafikleri 17, 50 ve 90 Volt için elde edilmiştir. Piezo seramik diskin doğal frekansı

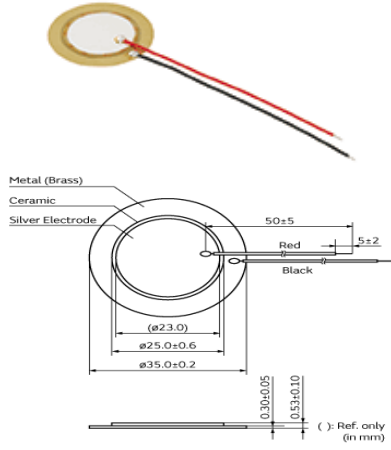
242 Hz'dir. Piezo seramik diskin lineer yay katsayısının denklemi

$$k = \frac{3EI}{D^3} \quad (22)$$

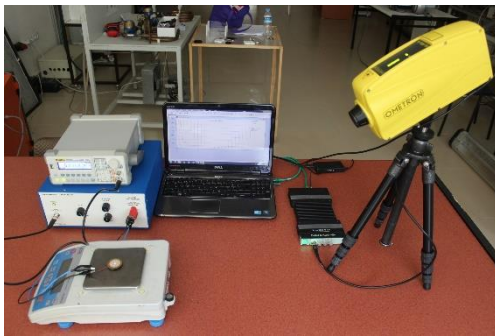
şekindedir. Burada E plakanın elastisite modülü, I plakanın atalet momenti, D ise plaka çapıdır. Burada n boyutsuz sabittir ve tabii frekans bölgesine göre değer alır. Denklem (22), Denklem (21)'de yerine yazılırsa;

$$2\pi f = \sqrt{\frac{3nEI}{mD^3}} \quad (23)$$

elde edilir. Denklem (23)'teki eşitlikte n değeri deneysel ve teorik frekans değeri karşılaştırılarak belirlenir.



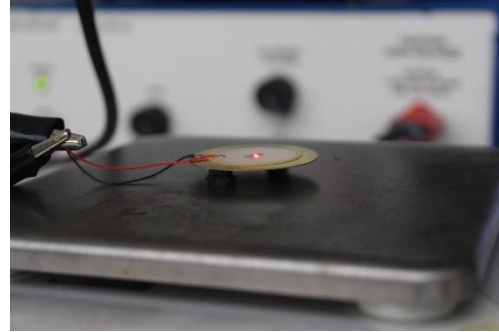
Şekil 2. Piezo Seramik Diskin Görünümü ve Ölçülendirilmesi [22]



Şekil 3. Deneysel Düzenegin Görünümü

Tablo 2. Piezo Seramik Diskin Özellikleri [22]

Özellikler	Değerler
Kapasitesi	30nF
Rezonans Frekansı	2.8kHz
Plaka çapı	35mm
Piezo çapı	25mm
Plaka malzemesi	pirinç
Plaka kalınlığı	0.3 mm
Plaka elastisite modülü	103 GPa
Piezo kalınlığı	0.23 mm
Piezo malzemesi	kurşun titanyum zirkonyum oksit



Şekil 4. Piezo Disk Seramiğin Görünümü

4. Bulgular ve Tartışma

Elastik yatak ile yere bağlanmış olan piezo diskin nonlineer titreşimleri deneysel ve teorik olarak elde edilmiştir. Sistem için deneysel olarak frekans cevap eğrileri 100 Hz'den 400 Hz'e kadar elde edilmiştir. Frekans cevap eğrisi kalıcı durum cevapları için Şekil 5'te 17, 50 ve 90 volt zorlama genlikleri için elde edilmiştir. Grafiklerde birinci rezonans şartı dikkate alınmıştır. Frekans süpürüldükçe kararlı durum cevabı başlangıçta lineerdir ancak frekans

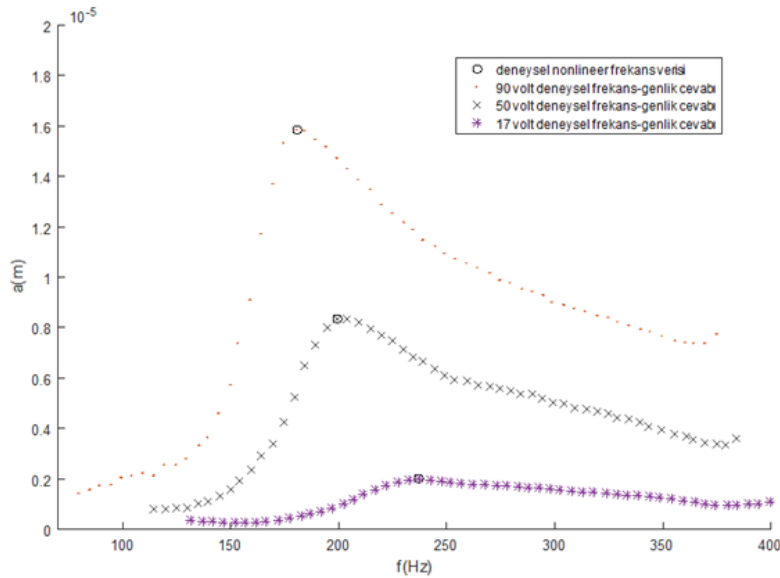
arttırıldıkça genliğin sıçrayarak yüksek değerlere arttığı görülmektedir.

Zorlama genliği arttırıldıkça nonlineer etki artmakta ve dolayısı ile genlik sıçraması daha iyi görülmektedir. Ayrıca sistemin tabi frekansı da sistemin zorlama genliği arttırıldıkça azalmaktadır. Her bir cevap eğrisi için analizde piezo disk için yumuşatıcı tipte nonlineer davranış elde etmişlerdir [14].

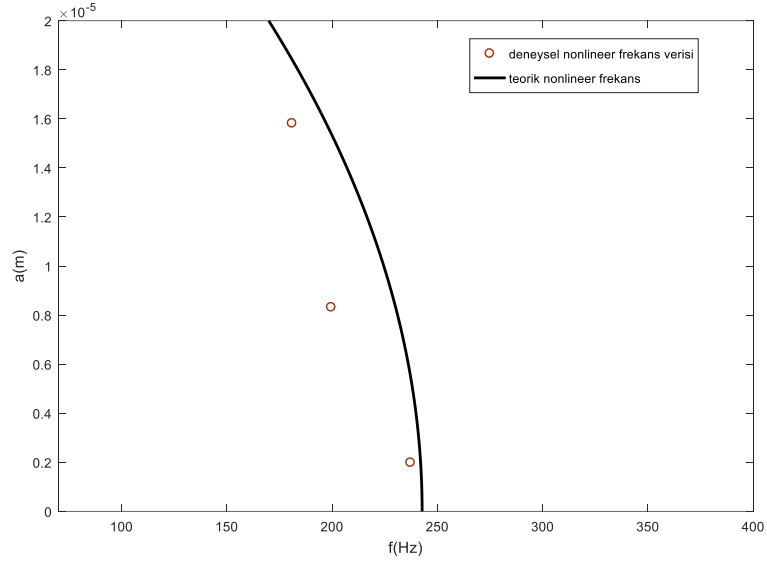
Piezo seramik disk için nonlineer hareket denklemi önerilmiş ve çok ölçekli metot ile çözülmüştür. Sistemin sönüm, kütle, zorlama kuvvetinin genliği, lineer ve nonlineer yatak katsayısı ve frekans değerleri deneysel verilerden yararlanılarak elde edilmiştir. Sistemin boyutsuz sönüm parametresi; teorik frekans tepki grafiğinin maksimum genlik değeri deneysel sonuçla karşılaştırılarak elde edilmiştir. Sistemin kütlesi; mikro terazi kullanılarak belirlenmiştir. Sistemin tabi frekansı; deneysel olarak elde edilen frekans tepki grafiğinin maksimum genliğin elde edildiği frekans değeri olarak belirlenmiştir. Teorik formülde kütle ve frekans yerine yerleştirilerek lineer rijitlik katsayısı elde edilmiştir. Zorlama kuvvetinin genliği; deneysel frekans tepki grafiğinin genlik

maksimum genliğin meydana geldiği frekanslar işaretlenmiştir. Sistemin genliğindeki sıçrama frekans arttırıldığı zaman meydana gelmektedir. Sistemin tepki grafiği incelendiğinde sistemin yumuşatıcı tipte nonlineerlik davranışı gösterdiği görülmektedir. Bu çalışma ile benzer şekilde Arafa ve Baz yaptıkları deneysel ve teorik değerleri karşılaştırılarak elde edilmiştir. Nonlineer yatak katsayısının belirlenmesi ise Şekil 6'da görülmektedir. Şekil 6'da deneysel verilerden elde edilen maksimum genlik değerleri işaretlenmiştir. Bu genliklere karşılık gelen nonlineer frekans değerleri görülmektedir. İşaretlenen maksimum genlik değerlerine en yakın bölgeden geçecek şekilde teorik olarak nonlineer frekans eğrisi çizdirilmiştir. Matematiksel model deneysel sistemin fiziğini ve nonlineer davranışını yakalamıştır. James ve ark. piezo disk için basit bir nonlineer denklem önermişlerdir. Denklemlerini nümerik metot ile çözmüşlerdir. Bu çalışma ile benzer şekilde piezo diskin yumuşatıcı tipte nonlineer davranış gösterdiğini belirtmişlerdir [16].

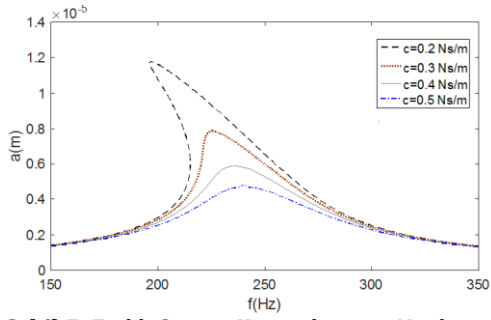
Matematiksel modelin sistemin farklı fiziksel parametreleri için vereceği cevaplar Şekil 7-10'da sunulmuştur.



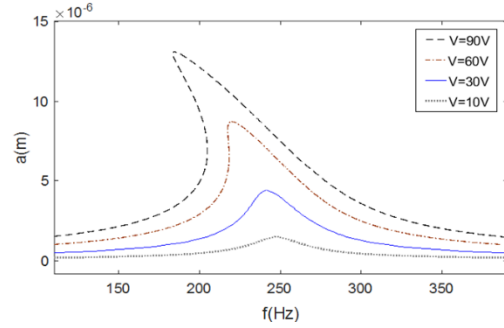
Şekil 5. Piezo Zorlayıcıya Uygulanan Farklı Voltaj Değerleri için Elde Edilen Frekans Cevap Eğrileri ve Deneysel Nonlineer Frekans



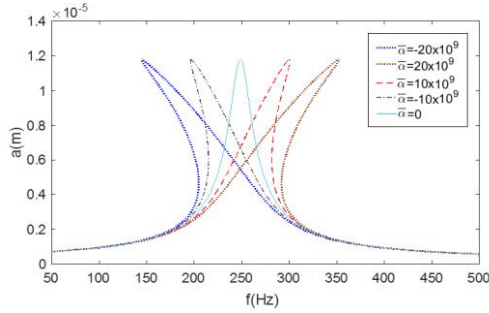
Şekil 6. Matematiksel Model ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması- Nonlineer Frekanslar
(teorik eğri için $\omega=242.77\text{Hz}$, $\bar{\alpha}=-20\text{E-}9$, $\varepsilon=0.1$, $f=0$, $\mu=0$, $\sigma=0$)



Şekil 7. Farklı Sönüm Katsayıları için Nonlineer Frekans Cevap Eğrileri $V=60\text{ Volt}$, $\omega=242.77\text{Hz}$, $\bar{\alpha}=-10 \times 10^9$, $\varepsilon=0.4$

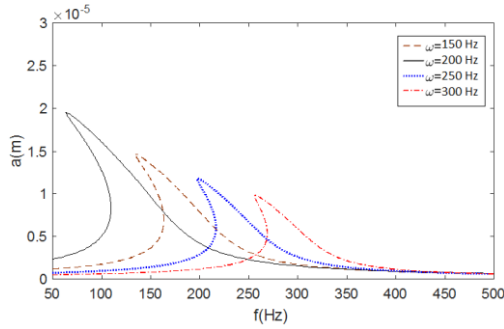


Şekil 8. Farklı Voltaj Değerleri için Nonlineer Frekans Cevap Eğrileri $c=0.27\text{ Ns/m}$, $\omega=242.77\text{ Hz}$, $\bar{\alpha}=-10 \times 10^9$, $\varepsilon=0.4$



Şekil 9. Farklı Nonlinear Yay Katsayı Değerleri için Nonlinear Frekans Cevap Eğrileri $c=0.2$ Ns/m, $\omega=242.77$ Hz, $V=60$ Volt, $\varepsilon=0.4$

Şekil 7'de farklı sönüm değerleri için sistemin verdiği cevap sunulmuştur. Sönüm değerleri arttıkça sistemin tabii frekans bölgesindeki genliği azalmaktadır. Ayrıca nonlineerlik etkisi de azalmaktadır.



Şekil 10. Farklı Doğal Frekans Değerleri için Nonlinear Frekans Cevap Eğrileri $c=0.2$ Ns/m, $V=60$ Volt, $\tilde{\alpha} = -10 \times 10^9$, $\varepsilon=0.4$

Şekil 8'de farklı zorlama genliği için alınan cevaplar görülmektedir. Zorlama genliği arttıkça sistemin genliği artmaktadır. Ayrıca zorlama genliği arttıkça nonlineerlik etkisi artmakta ve zorlama genliği azaldıkça nonlineerlik etkisi azalmaktadır. Şekil 9'da farklı nonlineer yay katsayısı değerleri için cevap eğrileri görülmektedir. Boyutsuz nonlineer yay katsayısı arttırıldıkça sistemin nonlineer davranışı artmaktadır. Boyutsuz nonlineer yay katsayısının pozitif değerler için sertleştirici nonlineer davranış görülmekteyken, negatif değerler için yumuşatıcı nonlineer davranış görülmektedir. Şekil 10'da farklı doğal frekans değerleri için cevap eğrileri elde edilmiştir. Frekans değerleri arttırıldıkça sistem cevabı sağa doğru ötelenmekte, azaltıldıkça sola doğru

ötelenmektedir. Frekansın değişimi sistemin nonlineer davranışını değiştirmemektedir.

5. Sonuç

Nonlinear piezo disk zorlayıcının tepkisi ve nonlineer davranışı sunulmuştur. Zorlayıcı lineer olmayan yatak üzerine yerleştirilmiştir. Zorlayıcının teorik modeli ortaya konmuş ve parametre değerleri deneysel veri üzerinden elde edilmiştir. Yumuşatıcı yay etkisini kullanımı temel alan bu makalede zorlayıcı disk incelenmiştir. Burada yay geometrik olarak oluşturulmuştur. Sisteme herhangi bir ön gerilme veya yükleme yapılmamıştır.

Zorlayıcının lineer olmayan frekans tepki fonksiyonlarını elde etmek için kübik nonlineer hareket denklemi ele alınmıştır. Çok ölçekli metod kullanılarak, frekans cevap ve faz modülasyon denklemleri ilk rezonans durumu için elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar teorik çözümle çok yakın şekilde elde edilmiştir. Zorlama genliği arttırıldıkça nonlineer frekanslarda küçük azalmalara neden olabildiği gösterilmiştir.

Düşük uyarma genliği periyodik hareketleri dengeleştirmek ve düzensiz hale getirmek için yeterli enerji sağlamamaktadır. Uygulanan farklı genlik değerleri için elde edilen tepki eğrileri, farklı uyarma genlikleri için üretilebilecek tutarlı bir şekilde yumuşatıcı karakter sergilemiştir. Frekans cevap eğrisinin genel davranışı, yarı analitik çözüm ile uyumlu olarak yumuşatıcı tiptedir. Nonlineerlik etkisi artmakta olduğu için genlik arttıkça doğal frekans minör olarak azalmaktadır. Sistemin bant genişliği nonlineer elastik yatak kullanımı ile arttırılmıştır. Nonlineer yay katsayısının değeri arttırıldıkça sistem cevabının nonlineerliği de artacaktır. Dolayısı ile sistemin bant genişliği artacaktır. Şekil 9'da nonlineer yay katsayısının frekans cevap eğrisine olan etkisi görülmektedir. Yumuşatıcı tipte nonlineerlik ele alındığında nonlineer yay katsayısı arttıkça grafik sola doğru daha fazla eğilmektedir. Böylelikle bant genişliği de artmaktadır. Bant genişliğinin fazla olmasının istenildiği zorlayıcı uygulamaları için elastik yatak kullanımı önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] Rupitsch, S.J. 2019. Piezoelectric sensors and actuators - fundamentals and applications, Springer, Berlin, 559.
- [2] Wu, X., Lin, J., Kato, S., Zhang, K., Ren, T. and Liu, L., 2008. A frequency adjustable vibration energy harvester, *Proceeding of PowerMEMS 2008*, 9-12 Kasım, Japan, 245-8.
- [3] Leland, E.S., Wright, P.K., 2006. Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload, *Smart Material and Structure*, Cilt. 15 s. 1413, DOI:10.1088/0964-1726/15/5/030.
- [4] Hu, H., Xue, H. and Hu, Y., 2007. A spiral-shaped harvester with an improved harvesting element and an adaptive storage circuit, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Cilt 54 s. 1177-87, DOI: 1177-87, 10.1109/TUFFC.2007.371.
- [5] Ramlan, R., Brennan, M. J., Mace, B. R. and Kovacic, I., 2009. Potential benefits of a non-linear stiffness in an energy harvesting device, *Nonlinear Dynamics*, Cilt 59 s. 545-58, DOI: 10.1007/s11071-009-9561-5.
- [6] Cottone, F., Vocca, H. and Gammaitoni, L., 2009. Nonlinear energy harvesting, *Physical Review Letters* 102 080601, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.080601>.
- [7] Mann, B. P. and Sims, N. D., 2010. On the performance and resonant frequency of electromagnetic induction energy harvesters, *Journal of Sound and Vibration*, Cilt. 329 s. 1348-61, DOI: 10.1016/j.jsv.2009.11.008.
- [8] Stanton, S. C., McGehee, C. C. and Mann, B. P., 2010. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: investigation of a bistable piezoelectric inertial generator, *Physica D: Nonlinear Phenomena* Cilt. 239 s. 640-53, DOI:10.1016/j.physd.2010.01.019.
- [9] Tvedt, L. G. W., Nguyen, D. S. and Halvorsen, E., 2010. Nonlinear behavior of an electrostatic energy harvester under wideband narrowband excitation *Journal of Microelectromechanical Systems*, Cilt. 19 s. 305-16, DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2039017.
- [10] Nguyen, D. S., Halvorsen, E., Jensen, G. U. and Vogl, A., 2010. Fabrication and characterization of a wideband MEMS energy harvester utilizing nonlinear springs, *Journal of Micromechanical Microengineering*, Cilt. 20 125009 11 s., DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/12/125009>.
- [11] Yang, B., Liu, J., Tang, G., Luo, J., Yang, C., and Li, Y., A, 2011. Generator with nonlinear spring oscillator to provide vibrations of multi-frequency, *Applied Physics Letters*, Cilt. 99 223505 3 s., DOI: 10.1063/1.3664223.
- [12] Patel, V.K., Reed, F.K., Kisne, R., Peng, C., Moghaddam, S., Momen, A. M., 2018. Novel Experimental Study of Fabric Drying Using Direct Contact Ultrasonic Vibration, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Cilt. 11(2), 021008 10s., DOI: 10.1115/1.4041596.
- [13] Dupuis, E. D., Momen, A.M., Patel, V.K., Shahab, S., 2019. Electroelastic Investigation of Drying Rate in The Direct Contact Ultrasonic Fabric Dewatering Process, *Applied Energy* Cilt. 235, (1) s. 451-462, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.100>.
- [14] Arafa, M., Baz, A., 2004. On the nonlinear behavior of piezoelectric actuators, *Journal of vibration and control*, Cilt. 10, s. 387-398, DOI:<https://doi.org/10.1177/1077546304033365>.
- [15] Uzun, Y., Kurt, E.H., Kurt, H., 2015. Explorations of displacement and velocity nonlinearities and their effects to power of a magnetically-excited piezoelectric pendulum, *Sensors and Actuators A*, Cilt. 224 s. 119-130, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.033>.
- [16] James, A. J., Vukasinovic, B., Smith, M. K. and Glezer, A., 2003. Vibration-induced drop atomization and bursting, *Journal of Fluid Mechanics*, Cilt. 476 s. 1-28, DOI:<https://doi.org/10.1017/S0022112002002835>
- [17] Paralı, L., Şahin, Ö.C., Sarı, A., Pechousek, J., Lazer Tabanlı Dijital Ölçüm Sistemi ile Piezoelektrik Eyleycilerin Rezonans ve Anti-Rezonans Frekanslarının Belirlenmesi, *CBÜ Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 13-2, s. 523-528, DOI: 10.18466/cbayarfb.319957.
- [18] Paralı, L., Sarı, A., Malgaca, L., Pechousek, J., Latal, F., Estimating elasticity modulus of the piezo ceramic disc (PCD) using basic mathematical modelling, *Optik*, Cilt 173, s. 146-156, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.07.141>.
- [19] Nayfeh, A.H., 1973. *Perturbation Methods*, A. Wiley Interscience, Jhn Wiley & Sons, New York, 1973.
- [20] Nayfeh, A.H. 1881, *Introduction to Perturbation Techniques*, New York, Wiley, 1981.
- [21] Nayfeh, A.H., Nayfeh J.F. and Mook, D.T., 1995, *Nonlinear Oscillations*, New York, Wiley, 1995.
- [22] (Erişim tarihi: 13.06.2019) <https://www.murata.com/en-eu/products/sound/diaphragm/7bbww>