

## Ferroelektrik Mems Jiroskopun Sonlu Elemanlar Analizi İle Modellenmesi Ve Simulasyonu

Zafer ÖZER<sup>1\*</sup>, Faruk KARADAĞ<sup>2</sup>, Muharrem KARAASLAN<sup>3</sup>, Şaban YILMAZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Fizik, Adana, Türkiye

<sup>3</sup>Mustafa Kemal Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Hatay, Türkiye

<sup>4</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

**ÖZET:** Bu çalışmada sonlu elamanlar analizi (metodu kullanılarak) ile ferroelektrik (PZT) malzemeden yapılmış mikro-elektromekanik sistemlerin (MEMS) tasarımı, modellenmesi ve analizi yapılmıştır. Mikroelektro-mekanik sistemler (MEMS) günümüzde var olan mekanik ve elektrik sistemlerin entegre ve minyatürize versiyonları olup mikron boyutlarında olan sistemlerdir. MEMS yapıları termal, elektrostatik, manyetik, pnömatik ve optik olarak tahrik edilebilir. Algılama işlemi ise genellikle optik ve elektronik sinyaller vasıtası ile yapılır. Bu çalışmada, Sonlu Elemanlar Analizi (metodu kullanılarak) ferroelektrik malzemelerden yapılan MEMS jiroskopun, modal ve harmonik analizleri yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile PZT-5J ve PZT-5H malzemelerinden yapılan solid jiroskopun modellenmesi ve simulasyonu yapılmıştır. İki farklı modelin modal ve harmonik analizleri yapılmıştır (incelenmiştir). Yapılan analiz sonucunda PZT-5H den yapılan model 2 deki solid jiroskopun açışal hızlara karşı daha hassas ölçüm yaptığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Sonlu Elemanlar Analizi, MEMS, Ferroelektrik malzeme.*

## Modeling And Simulation With Finite Element Analysis Of Ferroelectric Mems Gyroscopes

**ABSTRACT:** This paper presents the design, modeling and analysis of ferroelectric material based MEMs with finite element method. Microelectromechanical systems (MEMS) (also written as micro-electro-mechanical, MicroElectroMechanical or microelectronic and microelectromechanical systems) is the technology of very small mechanical devices driven by electricity. MEMS structures can be driven by thermal, electrostatic, magnetic, optical and pneumatic drivers. Detection process is usually is made via optical and electronic signals. In this study, modal and harmonic analysis of MEMS gyroscopes composed of ferroelectric materials is realized by Finite Element Analysis, and then their results are compared. Finite element analysis of solid gyroscopes made up of PZT-5J and PZT-5H materials were modeled and simulated. Modal and harmonic analysis were performed for two different models. As a result of the analysis, model 2 of solid gyroscopes made up of PZT-5H more sensitive than the angular velocities were observed.

**Keywords:** *Finete Element Analysis, MEMS, Ferroelectric compounds.*

### 1. GİRİŞ

Mikro elektro-mekanik sistem yapıları üç bölümden oluşur. Bu bölümler mekanik bölüm, mekanik bölümü çalıştıran tahrik bölümü ve mekanik hareketin davranışını inceleyen algılama bölümü olarak özetlenebilir. MEMS tahrik mekanizmaları verilen tahrik tipine göre farklılık gösterir. MEMS yapıları termal, elektrostatik, manyetik, pnömatik ve optik olarak tahrik edilebilir. Algılama işlemi ise genellikle optik ve elektronik sinyaller vasıtası ile yapılır. MEMS,

Makina-Malzeme-Elektronik başta olmak üzere, temelde tüm mühendislik dalları ve temel bilimlerle birlikte pek çok dalı kapsayan çalışmaların yapıldığı disiplinler arası bir kavramdır.

MEMS jiroskoplar iki temel prensibe dayanırlar, bunlar ataletsel kütlelerin rezonans frekansta titreşimi ve Coriolis Etkisidir.

\*Sorumlu Yazar: Zafer ÖZER,

## Jiroskoplar

Jiroskoplar açısal momentum prensiplerine bağlı olarak yön bulma için kullanılmaktadır. Geleneksel jiroskoplar yüksek sürtünmeden dolayı yüksek oranda hata vermektedir, büyük boyutları ve imalatı gereken yüksek toleranslar yüzündende maliyetleri yüksektir. Yeni geliştirilen MEMS temelli jiroskoplar ise titreşen bir objenin destek yüzeyi değiştirilirken bile aynı düzlemde kalma eğilimine dayanarak çalışmaktadır. Temeldeki fiziksel prensip farklılığından ve boyut ve üretim yöntemi farkından dolayı MEMS jiroskoplar çok daha ucuz ve yüksek hassasiyette çalışmaktadır.

Bütün jiroskoplar Coriolis Kuvveti etkisi ile çalışır. Buna göre referans çerçevesinde  $\Omega$  açısal hızı ile dönen  $m$  kütleli cisim  $v$  hızı ile hareket ettiği zaman bu cisme bir kuvvet etkir. Bu kuvvet;

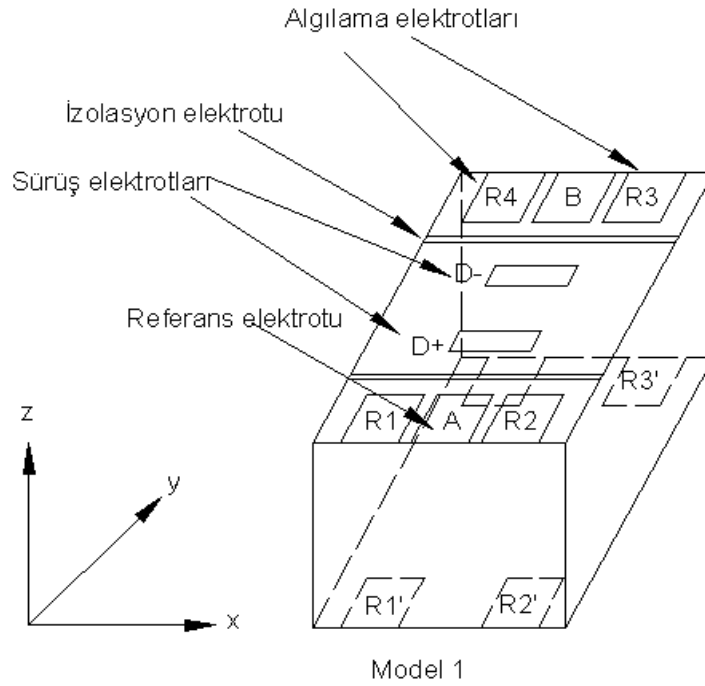
$$F = 2 \cdot m \cdot v \times \Omega \quad (1.1)$$

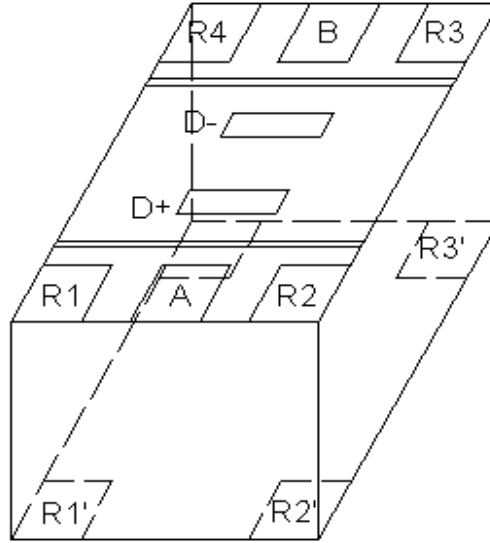
kuvvetidir.

Literatürde birçok MEMS jiroskop vardır. Hemen hemen tüm jiroskoplar yapı olarak birbirinden farklı olan titreşimli tipteki MEMS cihazlar olmasına rağmen çalışma prensipleri aynıdır. Bu cihazlar yapı olarak, birbirinden farklı yönlerde titreşen veya bükülen ve algılama sinyalleri Coriolis Kuvveti etkisi altında ataletsel kütledeki hareket olan, bir veya daha fazla ataletsel kütle ve destek yaylarından oluşmaktadır. Bu yay-kütle sistemi yapılarında, ivmeler ve şoklar algılama hatasına sebep olabilmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT

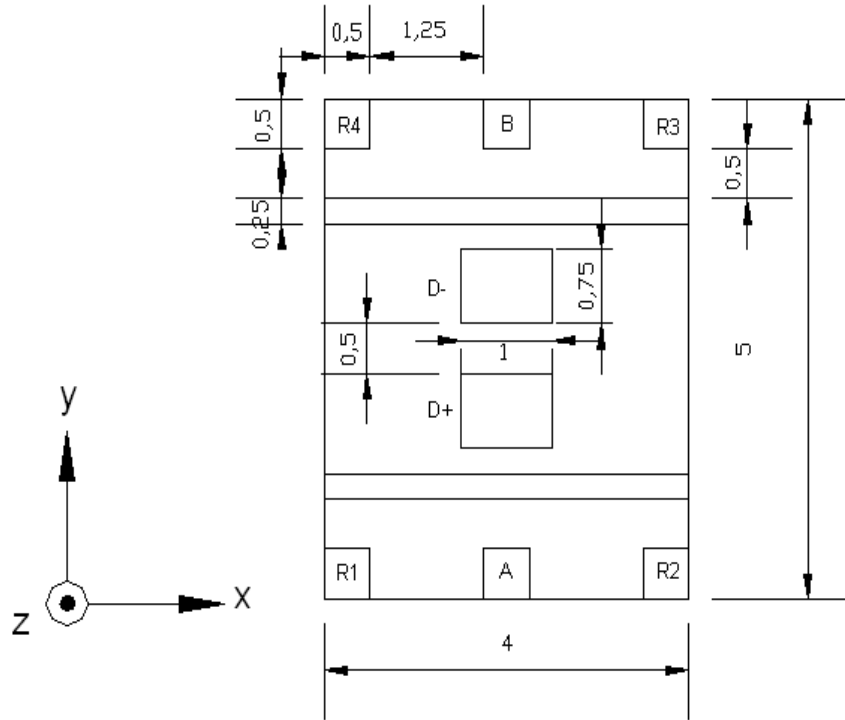
### PZT Solid Jiroskopun Yapısı





Model 2

Şekil 1. PZT jiroskop



Şekil 2. Cihazın ölçüleri (mm)

Solid Jiroskop 4x3x5 mm boyutlarında ve Z yönünde polarize olan PZT malzemeden meydana gelmektedir.

PZT malzemelere ait parametreler kullanılarak solid jiroskopun analizleri yapıldı. Şekil 1 de R1, R2, R3, R4 elektrotları algılama (sensing) elektrotları, A ve B elektrotları jiroskopun istenen frekansta çalıştığını algılamak için kullanılan referans elektrotları, D+ ve D- elektrotları rezonans frekansta sürüş (drive) elektrotları,

ayrıca referans ve algılama elektrotlarını sürüş elektrotlarından yalıtılmak için kullanılan izolasyon (guard) elektrotları vardır. Elektrotların boyutları Şekil 2 deki gibidir.

ANSYS programında PZT meshlere (Ağ) bölmek için, 8 serbestlik derecesine sahip piezoelektrik özellikteki Solid5 elemanı kullanılmıştır. CPU zamanını azaltmak için eleman boyutu 0.25 mm olarak alınmıştır. Tüm yapı meshlere bölündüğünde 3840 eleman ve 4641 node (düğüm) dan oluşmaktadır.

Üretici firmaların kataloglarındaki PZT malzemeye ait özellikler ANSYS programına uygun olmadığı için, analizde kullanılan farklı PZT malzemelere ait parametrelerin ANSYS programına uygun hale getirilmesi Microsoft EXCEL programında bir makro yardımı ile yapılmıştır.

### PZT Malzemelerin Özellikleri

Analizde kullanılan PZT malzemelere ait üretici firma sitesinden alınan özellikler Tablo 1 deki gibidir.

**Tablo 1.** PZT malzemelerin özellikleri

	PZT-5H	PZT-5J
$\epsilon$	7.50E+03	7.40E+03
$d_{31}$	-2.74E-10	-2.20E-10
$d_{33}$	5.93E-10	5.00E-10
$d_{15}$	7.41E-10	6.70E-10
$S_{11}^E$	1.65E-11	1.62E-11
$S_{33}^E$	2.06E-11	2.27E-11
$S_{12}^E$	-4.78E-12	-4.54E-12
$S_{13}^E$	-8.45E-12	-5.90E-12
$S_{44}^E$	4.35E-11	4.70E-11
$S_{66}^E$	4.26E-11	4.15E-11
$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	3.13E+03	2.72E+03
$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	3.40E+03	2.60E+03

## 4.BULGULAR

### 4.1. Analiz Aşamaları

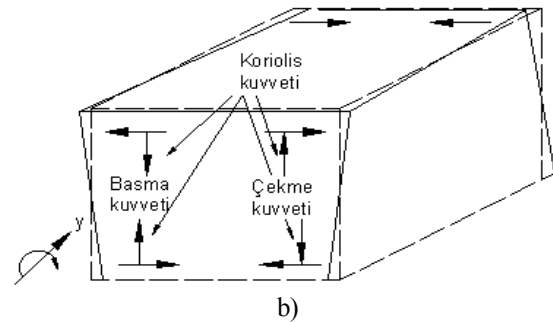
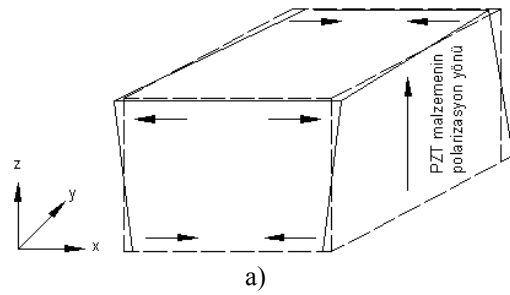
#### 4.1.1.Modal Analiz

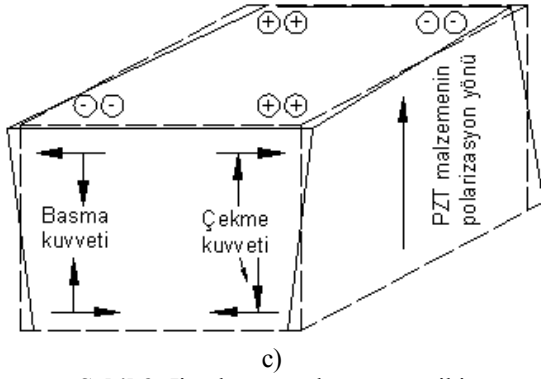
Cihaz PZT malzemeden yapılmıştır ve z yönünde polarize olduğu kabul edilmiştir. ANSYS programında modal analizle sürüş (drive) elektrolarına 0 V uygulanarak farklı PZT malzemelerden yapılan cihazın rezonans frekansları bulunmuştur (Tablo 2). Jiroskopun çalışma prensibi gereği bu mod frekanslardan, büyük oranda x ekseninde titreştiği frekanslar seçilmiştir. Bu rezonans frekansında cihaz, uygulanan açışal hızı duyarlı olmaktadır.

26	-	-
27	-	-
28	452251	-
29	-	427659

**Tablo 2.** PZT malzemelere ait uygun mod frekansları

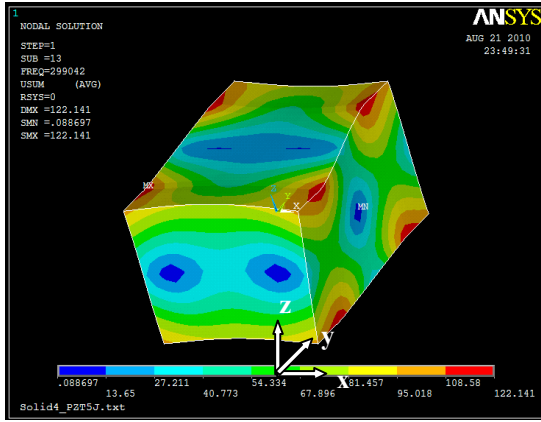
MODE	PZT-5H	PZT-5J
17	-	-
18	-	-
19	-	355681
20	-	-
21	-	-
22	-	-
23	-	-
24	-	-
25	436379	-



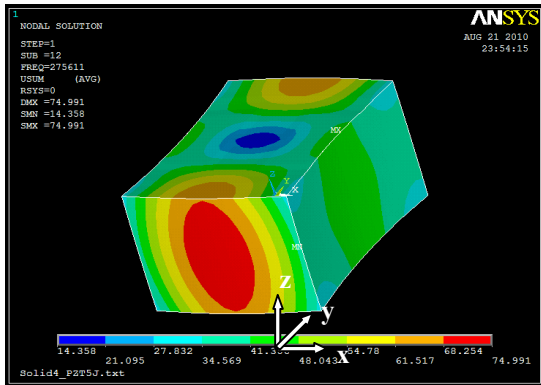


Şekil 3. Jiroskopun çalışma prensibi

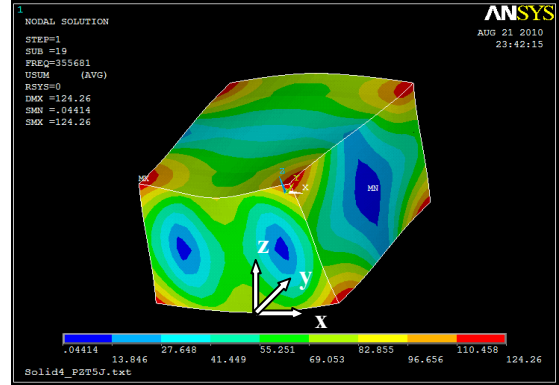
Resim 1.a da PZT-5J malzemeden yapılan cihazın 19. mod frekanstaki x yönünde titreşimi görülmektedir. Cihaz bu rezonans frekansta x yönünde titreşirken (Şekil 3.a) y yönünde açılmal hız uygulandığında (Şekil 3.b), cihaz üzerinde polarizasyon yönü olan z yönünde Coriolis kuvveti meydana gelir. Bu kuvvet PZT malzeme üzerinde basma ve çekme etkisi oluşturur. Oluşan bu kuvvet neticesinde algılama elektrotlarının gerilimleri arasında fark meydana gelir. Bu kuvvet, dolayısıyla gerilim farkı, uygulanan açılmal hız ile orantılıdır.



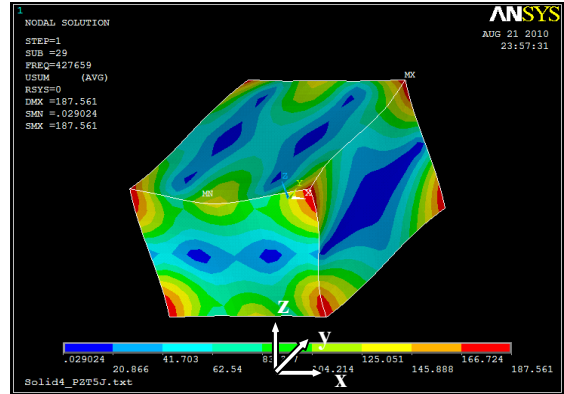
a) 13. Mod 299 KHz



b) 19. Mod 275 KHz

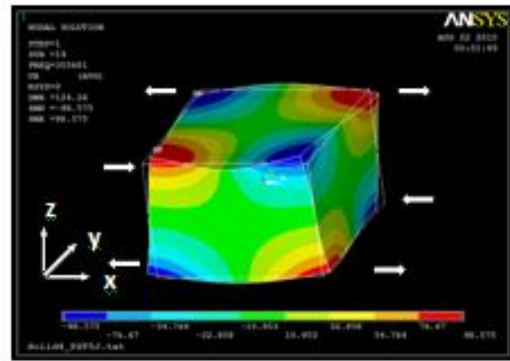


c) 19. Mod 355 KHz

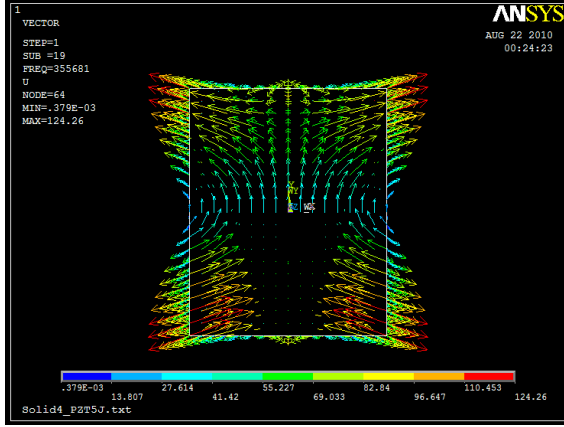


d) 29. Mod 427 KHz

Resim 1. PZT-5J malzemeden yapılan cihaz, herhangi bir serbestlik derecesi (DOF) kısıtlamasına maruz kalmadığı durumda farklı mod frekanslardaki toplam yer değiştirme konturları.



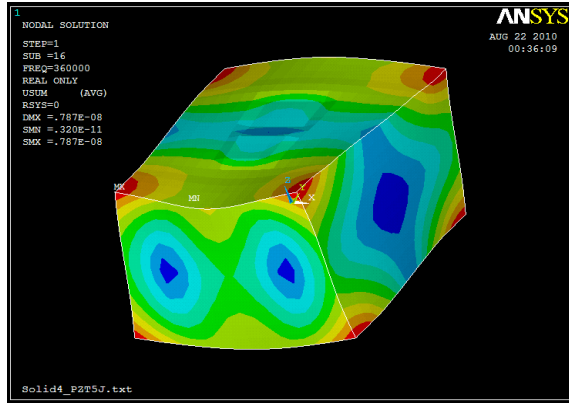
Resim 2. 19. mod frekansta cisim hemen hemen x ekseninde titreşmektedir.



**Resim 3.** 19. mod frekansta cismin üst yüzeyindeki node ların yer değıştirme (displacement) vektörü

#### 4.1.2. Harmonik Uyarıtım Analizi

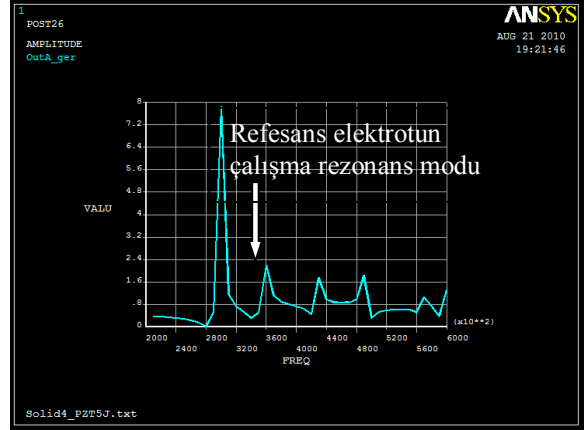
Bu aşamada cihaza herhangi açısız hız uygulanmadan, sürüş elektrotlarına gerilim verilerek 200 Khz den 600 Khz e kadar tarama yapılmış ve bu tarama sonucunda PZT malzemelerin algılama ve referans elektrotlarındaki gerilimler ve yer değıştirmeleri (displacement) gözlenmiştir.



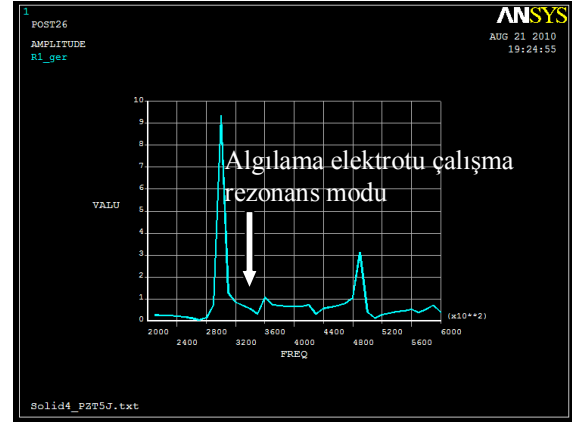
**Resim 4.** çalışma mod frekansında uyarılan cismin titreşim mod şekli

Jiroskopu rezonans modunda sürmek için D+ ve D- elektrotlarına, Vpp değeri 10 volt olan rezonans frekanslı AC gerilim uygulanmış ve damping oranı 0,002 olarak kabul edilmiştir. Resim 4. de görüldüğü gibi daha önce bulunan mod şekli ile harmonik uyarıtım ile aynı frekanslı AC gerilimle uyarılan cismin titreşimi aynı şeklidir.

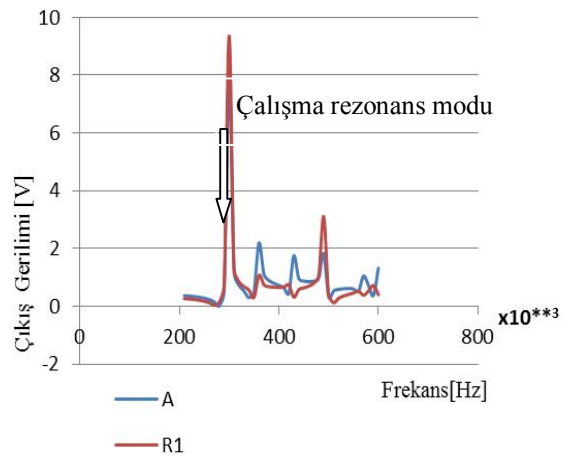
Şekil 4. de görüldüğü gibi, bu analiz sonucunda, çalışma rezonans frekansında (355 Khz) referans elektrotun genliği, algılama elektrotunda nazaran açık bir pik yapmıştır. Bu durum göstermiştir ki, referans elektrotu cihazın rezonans frekansında çalışıp çalışmadığını algılamak için kullanılabilir.



**Şekil 4.** PZT-5J ye ait harmonik analiz grafiğı (referans elektrot gerilimi)



**Şekil 5.** PZT-5J ye ait harmonik analiz grafiğı (R1 elektrot gerilimi)



**Şekil 6.** PZT-5J ye ait harmonik analiz grafiğı (Algılama (R1) ve Referans (A) elektrotları birlikte gösterimi)

Cihaz rezonans modunda titreşirken, ve herhangi bir dönüş yokken Resim 1 deki R1-R3 ve R2-

R4 elektrotlarında gerilimler aynı fakat  $180^\circ$  faz farkı

olmaktadır. Bu durumda  $V_{out}=(R1+R3)-(R2+R4)$  formülü ile Common voltaj hesaplandı. Y yönünde her hangi bir hızla dönüş olduğu zaman gerilim dönüş açısıyla orantılı olarak artmaktadır.

#### 4.1.3. Harmonik Analiz

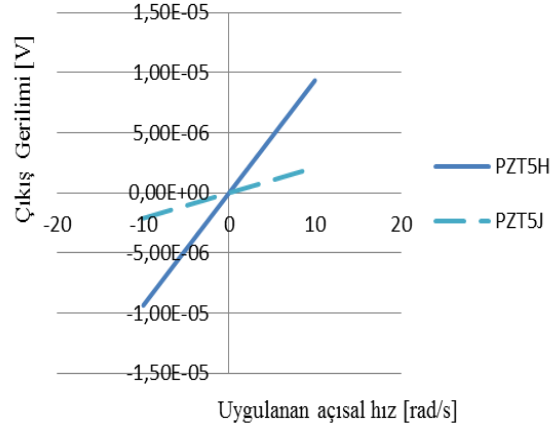
Bu aşamada ilk önce en iyi sonucu veren PZT-5H malzemesi ile model 1 deki yapı oluşturuldu. -10 dereceden +10 dereceye kadar farklı açısal hızlar uygulanarak cihazın çıkış gerilimleri gözlemlendi (Şekil7).

PZT-5H malzemesi kullanılarak model 2 deki yapı oluşturulduğunda cihaz daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle model 2 deki yapı kullanılarak farklı PZT malzemelere ait sonuçlar elde edilmiştir. Farklı PZT malzemelere ait sonuçlar aşağıdaki grafikteki gibidir.

Tablo 2 Model 2 deki yapıda kullanılan farklı PZT malzemelerin rezonans frekanslarında, algılama (R1) ve referans (A) elektrotlarının algılama eksenini yönündeki yer değiştirmeleri.

**Tablo 3.** PZT malzemelerin çalışma moda frekansları ve birim yer değiştirmeleri

	PZT5H	PZT5J
Çalışma rezonans frekansı (Hz)	452251	355681
A elektrotunun algılama yönündeki yer değiştirme miktarı (e-8 m)	1,67	3,70
R1 elektrotunun algılama yönündeki yer değiştirme miktarı (e-8 m)	1,09	3,35



**Şekil 7.** PZT-5H ve PZT-5J malzemeleri kullanıldığında uygulanan açısal hıza karşılık çıkış gerilimi

## 5.SONUÇ

Sonlu elemanlar analizi ile ferroelektrik malzemeden yapılan solid jiroskopun iki farklı şekilde modellenmesi ve analizi yapılmıştır. PZT-5J ve PZT-5H malzemeleri kullanılarak oluşturulan modellerin modal analizleri yapılarak mod frekansları bulunmuştur. Solid jiroskop, modal analiz de bulunan rezonans frekanslı AC gerilimle uyarıldığında cihazın titreşiminin modal analizdeki ile aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir. X yönünde titreşen cihaz, y yönünde meydana gelen açısal dönmelere karşı duyarlı hale gelmektedir. Rezonans frekanslı gerilimle uyarılan cihaz x eksenini yönünde titreşirken, y eksenini yönünde herhangi bir dönüş yoksa Common voltaj 0 Volt olmakta, y yönünde dönüş olduğunda ise, cihaza z yönünde Coriolis kuvveti etkimekte, bunun sonucu olarak Common voltaj açısal dönme ile orantılı olarak artmaktadır. Analiz sonucu PZT-5H malzemesinden yapılan model 2 deki cihazın açısal dönüşlere karşı daha hassas olduğu gözlemlenmiştir.

## REFERANSLAR

- [1]. Burg A. Mems Gyroscopes And Their Applications
- [2]. Katz A. Residential Piezoelectric Energy Sources
- [3]. Li D.H., Zheng X.J., Wu B., Zhou Y.C. Fracture analysis of a surface through-thickness crack in PZT thin film under a continuous laser irradiation. Engineering Fracture Mechanics 76 (2009) 525–532
- [4]. Lu Y., Zhang W., Wu X. Design and analysis of novel solid biaxial micro-gyroscope with special mode excitation
- [5]. Maenaka K, Kohara H (2006) Novel Solid Micro-Gyroscope. In: Proceedings of micro electro mechanical systems workshop (MEMS 2006, Istanbul, Turkey January 2006), pp 634–637

- [6]. Malgaca L., KARAGÜLLE H. Piezoelektrik Kumanda Elemanı ve Algılayıcı İçeren Esnek Bir Kirişin Aktif Titreşim Kontrolünün Simülasyonu
- [7]. [http://ansys.net/tips/Week13\\_TNT\\_Conversion\\_of\\_Piezoelectric\\_Material\\_Data.pdf](http://ansys.net/tips/Week13_TNT_Conversion_of_Piezoelectric_Material_Data.pdf)
- [8]. [www.efunda.com](http://www.efunda.com)
- [9]. [http://tr.wikipedia.org/wiki/Mikro\\_elektro-mekanik\\_sistemler](http://tr.wikipedia.org/wiki/Mikro_elektro-mekanik_sistemler) 17.01.2012