

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

JİROSKOP YARDIMIYLA YAPILARDA TİTREŞİMİN KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Faruk ÜNKER

**EYLÜL - 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Faruk ÜNKER Tarafından Hazırlanan

JİROSKOP YARDIMIYLA YAPILARDA TİTREŞİMİN KONTROLÜ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 07 /08/2018 gün ve 1765 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

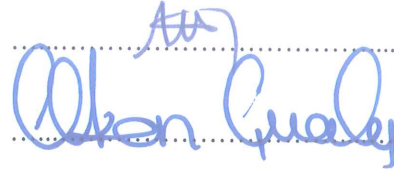
Başkan : Prof. Dr. Mustafa YAMAN

Üye : Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI

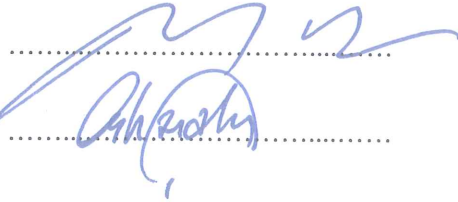
Üye : Prof. Dr. Erhan COŞKUN

Üye : Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN

Üye : Doç. Dr. Orhan ÇAKAR







Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Doktora Tezi olarak hazırladığım “Jiroskop Yardımıyla Yapılarda Titreşimin Kontrolü” isimli tez çalışmasını Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda, seçmeme vesile olarak önemli bir bilgi birikimine sahip olmamı sağladığı, çalışmalarım sırasında bilgisini ve tecrübesini paylaştığı için Sayın danışman Hocam Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI’ya içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN ve Sayın Prof. Dr. Erhan COŞKUN’a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen kıymetli eşime, çocuklarıma ve ailemin bütün fertlerine müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca, tez çalışmam boyunca 3001 Programı kapsamında beni burslu statüde maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) da teşekkürlerimi sunarım.

Faruk ÜNKER
Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Jiroskop Yardımıyla Yapılarda Titreşimin Kontrolü” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/09/2018

Faruk ÜNKER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması.....	3
1.2.1. Titreşim Sönümleyiciler	3
1.2.1.1. Pasif Titreşim Sönümleyiciler.....	4
1.2.1.2. Aktif Titreşim Sönümleyiciler	6
1.2.1.3. Hibrid Kontrol Sistemleri	7
1.2.2. Jiroskoplar ve Jiroskobik Titreşim Yutucular	8
1.3. Tezin Konusu ve Amacı	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	13
2.1. Ankastre Kolon ve Kolonun Serbest Ucunda Bağlı Jiroskop Modeli.....	13
2.1.1. Kolonun Küçük Yer Değiştirmeleri İçin Hareket Denklemleri.....	23
2.2. Jiroskopun Tek Katlı Yapıya Uygulanışı	27
2.2.1. Tek Katlı Yapının Deneysel Modeli.....	27
2.2.2. Yapının Matematiksel Modeli	31
2.2.2.1. Uyarlanmış Jiroskopun Serbest Uçtaki Hareket Denklemi.....	36
2.2.2.2. Tek Katlı Yapının Hareket Denklemi	38
2.2.2.3. Jiroskopun Hareket Denklemi.....	40
2.2.2.4. Tek Katlı Yapının Küçük Yer Değiştirmeleri İçin Hareket Denklemleri.....	40
2.2.3. Tek Katlı Yapının Teorik Bulguları	43
2.2.3.1. Açısal Momentumun Sönümlenme Üzerindeki Etkisi.....	44
2.2.3.2. Jiroskopun Doğal Frekansının Sönümlenmeye Etkisi	48

2.2.3.3.	Uyarlanmış Jiroskopa Ait Doğal Frekansın Sönümlenmeye Etkisi.....	53
2.2.3.4.	Sabit Kat Yüksekliğinde Uyarlanmış Jiroskop Boyunun Sönümlenmeye Etkisi .	56
2.2.4.	Tek Katlı Yapının Deneysel Bulguları	58
2.2.4.1.	Sabit Kat Yüksekliğinde Uyarlanmış Jiroskop Boyunun Sönümlenmeye Etkisi .	59
2.2.4.2.	Disk Kütlesi $m=0.023$ kg İçin Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi	63
2.2.4.3.	Disk Kütlesi $m = 0.069$ kg İçin Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi	66
2.2.4.4.	Disk Kütlesi $m=0.115$ kg İçin Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi	70
2.2.4.5.	Disk Kütlesinin Sönümlenmeye Etkisi	73
2.2.4.6.	Ani Hızın Sönümlenmeye Etkisi.....	76
2.2.4.7.	Tek Katlı Yapının Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi	78
2.2.4.8.	Uyarlanmış Jiroskopun Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi	83
2.2.4.9.	Jiroskopun Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi.....	88
2.3.	Uyarlanmış Jiroskopun (Jirostabilizerin) Çok Katlı Yapıya Uygulanışı	91
2.3.1.	Çok Katlı Yapının Deneysel Modeli	91
2.3.2.	Çok Katlı Yapının Matematiksel Modeli	95
2.3.2.1.	Çok Katlı Yapının Hareket Denklemleri	97
2.3.2.2.	Jiroskopun Hareket Denklemi.....	100
2.3.2.3.	Çok Katlı Yapının Küçük Yer Değiştirmeleri İçin Hareket Denklemleri	100
2.3.3.	Çok Katlı Yapının Teorik Bulguları	107
2.3.3.1.	Optimum Frekans Oranının Belirlenmesi	109
2.3.4.	Çok Katlı Yapının Deneysel Bulguları.....	112
2.3.4.1.	Disk Kütlesinin Sönümlenmeye Etkisi	112
2.3.4.2.	Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi	115
2.3.4.3.	Optimum Frekans Oranının Belirlenmesi	117
2.3.4.4.	Jiroskopun Bina Üzerindeki Optimum Yerinin Belirlenmesi.....	121
2.3.4.5.	Çok Katlı Yapının Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi.....	123
2.3.4.6.	Jiroskopun Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi.....	126
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	129
4.	KAYNAKLAR	134

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

JİROSKOP YARDIMIYLA YAPILARDA TİTREŞİMİN KONTROLÜ

Faruk ÜNKER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI
2018, 139 Sayfa

Bu tez çalışmasında, jiroskopun yapılardaki titreşimleri sönmülmesi amacıyla, ankastre kolon ile bir jiroskop birleşiminden oluşan bir dinamik titreşim yutucu modeli geliştirilmiştir. Bu titreşim yutucu model, sırasıyla tek ve çok katlı yapılara uygulanarak, jiroskopun farklı açısai momentumları ve farklı frekans oranları için tepkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Teorik çalışmada, zeminden harmonik yer değiştirme ile uyarılmış tek katlı ve çok katlı yapının hareket denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen bu nonlinear hareket denklemleri liner hale dönüştürülmüş ve sayısal simülasyonları Matlab paket programı içinde yer alan Runge-Kutta metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması sonucunda, jiroskopun açısai momentumu yapıların titreşiminin azaltılmasında oldukça etkili olduğu ve jiroskopun belli bir açısai momentumunda ve frekans oranında, yapının 1.mod frekansındaki yer değiştirmesinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Bu tez çalışması başlıca üç bölümden oluşmakta olup, birinci bölümde; tez konusu ile ilgili genel bilgiler ve literatür sunulmaktadır. İkinci bölüm ise iki kısımdan oluşmakta olup, birinci kısımda; laboratuvar ortamında inşa edilen tek katlı yapının dinamik davranışları deneysel ve analitik yöntemlerle incelenmiş ve sönmüleyicinin (jiroskopun) optimum parametreleri elde edilmiştir. İkinci kısımda ise; 6 katlı bina modeli incelenmiş ve elde edilen sonuçlar tek katlı binada elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Üçüncü bölümde ise; tez çalışması ile ilgili sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jiroskoplar, Cayroskoplar, Jirostatlar, Cayrostatlar, Jirostabilizerler, Titreşim söndürücüler, Binalarda titreşim söndürücüler, Pasif titreşim söndürücüler, Aktif titreşim söndürücüler.

PhD. Thesis

SUMMARY

VIBRATION CONTROL IN STRUCTURES WITH GYROSCOPE

Faruk ÜNKER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Program
Supervisor: Prof. Olkan ÇUVALCI
2018, 139 Pages

In this thesis, a dynamic vibration absorber model consisting of fixed-ended column with a gyroscope assembly was developed in the mitigation of vibrations of the structures. This vibration absorber model is applied to single and multi-storey structures, respectively. and then its response to different frequency ratios and the different angular momentum of the gyroscope were examined theoretically and experimentally. In the theoretical study, the equations of motion of the single-storey and multi-storey structures with harmonic base excitation were obtained. These nonlinear motion equations are transformed into liner and then numerical simulations were performed using the Runge-Kutta method included in the Matlab package program. At the end of the thesis study, it has been observed that the angular momentum of a gyroscope is significantly effective in the mitigation of vibrations of the structures and the displacement of the structure at the first mod frequency was significantly reduced at a certain angular momentum and frequency ratio of the gyroscope.

This thesis consists of three main parts and the general information and literature studies related to the topic have been presented in the first part. The second part of the thesis is divided into two subsections. In the first subsection; the dynamic behavior of one-story building has been investigated for the laboratory conditions using experimental and analytical methods and the optimum parameters of the absorber (gyroscope) have been obtained. In the second subsection; the six-story building has been investigated and the obtained results have been compared with the results of the one-story building. The third part has been devoted to conclusions and suggestions related to the thesis study.

Keywords: Gyroscopes, Gyrostats, Gyrostabilizers, Vibration absorbers, Vibration absorber on the building, Passive vibration absorber, Active vibration absorbers.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Ayarlı kütle sönümleyicinin (TMD) modeli	5
Şekil 1.2. Jiroskopun genel görünümü	9
Şekil 1.3. Tek eksenli jiroskop	9
Şekil 2.1. Uç kütle, jiroskop ve temelden tahrikli ankastre kolon modeli.....	15
Şekil 2.2. Uç kütleye (M_t) bağlanmış tek eksenli jiroskop.....	15
Şekil 2.3. Deney modelinin (tek katlı yapı) genel görünümü.....	29
Şekil 2.4. Deney düzeneğinin şematik resmi.....	29
Şekil 2.5. Tek katlı yapı ve uyarlanmış jiroskop modeli.	32
Şekil 2.6. Uç kütleye (M_1) bağlı tek eksenli jiroskop modeli.	32
Şekil 2.7. Uyarlanmış jiroskopun etkisiz (jiroskopu taşıyan kolonun sabit) olduğu durum için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrisi.....	44
Şekil 2.8. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 4.0$ Hz, $\omega_{jiro} = 4.8$ Hz ve $m = 0.023$ kg)	45
Şekil 2.9. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 4.0$ Hz, $\omega_{jiro} = 4.8$ Hz ve $m = 0.023$ kg)	45
Şekil 2.10. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 4.0$ Hz, $\omega_{jiro} = 4.8$ Hz ve $m=0.046$ kg)	46
Şekil 2.11. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 4.0$ Hz, $\omega_{jiro} = 4.8$ Hz ve $m = 0.046$ kg)	46
Şekil 2.12. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 4.0$ Hz, $\omega_{jiro} = 4.8$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	47
Şekil 2.13. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 4.0$ Hz, $\omega_{jiro} = 4.8$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	47
Şekil 2.14. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 2000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)	49
Şekil 2.15. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 2000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	49
Şekil 2.16. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)	50

Şekil 2.17. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	50
Şekil 2.18. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak, $\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	51
Şekil 2.19. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak, $\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	51
Şekil 2.20. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jiro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$, $\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	52
Şekil 2.21. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jiro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$, $\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	52
Şekil 2.22. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak, $\omega_{\text{jiro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	54
Şekil 2.23. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{\text{jiro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	55
Şekil 2.24. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{\text{jiro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	55
Şekil 2.25. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak, $L_2 = 200$ mm, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	57
Şekil 2.26. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans–Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $L_2 = 200$ mm, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	57
Şekil 2.27. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	60
Şekil 2.28. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 2000$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	60
Şekil 2.29. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	61
Şekil 2.30. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg).....	61
Şekil 2.31. Jiroskopun farklı disk hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{\text{jiro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$).....	62
Şekil 2.32. Jiroskopun farklı disk hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{\text{jiro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$).....	64

Şekil 2.33. Jiroskopun farklı disk hızları (Ω) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$)	65
Şekil 2.34. Zorlayıcının Farklı frekansları (ω) için tek katlı yapının Disk hızı (Ω) – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	65
Şekil 2.35. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	67
Şekil 2.36. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	68
Şekil 2.37. Zorlayıcının Farklı frekansları (ω) için tek katlı yapının Disk hızı (Ω) – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	68
Şekil 2.38. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.115$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	71
Şekil 2.39. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.115$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	72
Şekil 2.40. Zorlayıcının Farklı frekansları (ω) için tek katlı yapının Disk hızı (Ω) – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.115$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	72
Şekil 2.41. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$)	74
Şekil 2.42. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	74
Şekil 2.43. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	75
Şekil 2.44. Deneysel olarak jiroskopun aktifleştirilmesi ile sönümlenmesi arasındaki dinamik ilişki ($z_0 = 5$ mm, $m = 0.069$ kg, $\Omega_{ani} = 4000$ dev/dak ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$)	77
Şekil 2.45. Deneysel olarak jiroskopun aktifleştirilmesi ile sönümlenmesi arasındaki dinamik ilişkinin ayrıntılı gösterimi. ($z_0 = 5$ mm, $m = 0.069$ kg, $\Omega_{ani} = 4000$ dev/dak ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$).....	77
Şekil 2.46. Serbest titreşim için kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak)	79
Şekil 2.47. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)	80
Şekil 2.48. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)	80
Şekil 2.49. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)	81
Şekil 2.50. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)	81

Şekil 2.51. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)	82
Şekil 2.52. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)	82
Şekil 2.53. Serbest titreşim altında uyarlanmış jiroskopa ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak)	84
Şekil 2.54. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)	85
Şekil 2.55. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)	85
Şekil 2.56. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)	86
Şekil 2.57. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)	86
Şekil 2.58. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)	87
Şekil 2.59. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)	87
Şekil 2.60. Serbest titreşim altında jiroskopa ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak)	89
Şekil 2.61. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)	89
Şekil 2.62. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)	90
Şekil 2.63. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)	90
Şekil 2.64. Deney modelinin (6 katlı yapının) genel görünümü	92
Şekil 2.65. Deney düzeneğinin şematik resmi	93
Şekil 2.66. Çok katlı bina ve uyarlanmış jiroskop modeli.	96
Şekil 2.67. Çok katlı yapının mod şekilleri	108
Şekil 2.68. Uyarlanmış jiroskopun etkisiz (jiroskopu taşıyan kolonun sabit) olduğu durum için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında altı katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrisi	110
Şekil 2.69. Farklı frekans oranları için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında çok katlı yapının teorik Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak) ..	110
Şekil 2.70. Farklı frekans oranları için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında çok katlı yapının teorik Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak)	111

Şekil 2.71.Farklı frekans oranları için çok katlı yapının teorik Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak)	111
Şekil 2.72.Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega_{jirokolon} = \omega_{bina}$).....	113
Şekil 2.73. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega_{jirokolon} = \omega_{bina}$).....	114
Şekil 2.74.Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega_{jirokolon} = \omega_{bina}$).....	114
Şekil 2.75. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{jirokolon} = 1.25\omega_{bina}$)	116
Şekil 2.76.Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{jirokolon} = 1.25\omega_{bina}$)	116
Şekil 2.77. Farklı frekans oranları için çok katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak).....	118
Şekil 2.78. Farklı frekans oranlarında binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 6000$ dev/dak)	119
Şekil 2.79. Farklı frekans oranlarında jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 6000$ dev/dak)	119
Şekil 2.80. Farklı frekans oranlarında binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 10000$ dev/dak)	120
Şekil 2.81. Farklı frekans oranlarında jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 10000$ dev/dak)	120
Şekil 2.82. Jiroskopun farklı katlardaki konumu için çok katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg, $\omega_{jirokolon} = \omega_{bina}$ ve $\Omega = 0$ dev/dak)	122
Şekil 2.83. Jiroskopun farklı katlardaki konumu için çok katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg, $\omega_{jirokolon} = \omega_{bina}$ ve $\Omega = 4000$ dev/dak)	122
Şekil 2.84. Serbest titreşim altında binaya ait FFT analizi ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak)	124
Şekil 2.85. Serbest titreşim altında uyarlanmış jiroskopa ait FFT analizi ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak)	124
Şekil 2.86. Zorlanmış titreşim altında binanın FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)	125
Şekil 2.87. Zorlanmış titreşim altında binanın FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)	125
Şekil 2.88. Zorlanmış titreşim altında binanın FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)	126
Şekil 2.89. Serbest titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak)	127

- Şekil 2.90. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)..... 128
- Şekil 2.91. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)..... 128



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Tek katlı deney modelinin fiziksel değerleri.....	30
Tablo 2. Çok katlı deney modelinin fiziksel değerleri	94



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Jiroskopu taşıyan kolonun kesit alanı
A_1	Tek katlı bina modelinde jiroskopu taşıyan kolonun kesit alanı
A_2	Tek katlı yapıyı taşıyan kolonların toplam kesit alanı
AMD	Aktif kütle sönümleyici
APTMD	Aktif-pasif ayarlı kütle sönümleyici
B	Birim kuvvet matrisi
C	Çok katlı yapıya ait sönüm matrisi
c_g	Jiroskop sönüm katsayısı
c_n	n katlı yapının n. katındaki sönüm katsayısı
\tilde{C}	Kütleye normalize edilmiş sönüm matrisi
D	Sönümleme sonucunda oluşan enerji kaybı
e	Euler
E	Çelik kolonun elastisite modülü
F(t)	Çok katlı yapıya ait kuvvet matrisi
f_d	Ayarlı Kütle Sönümleyicinin (TMD) optimum doğal frekansı
f_n	Ana yapının doğal frekansı
G	İntegral sabiti
g	Yer çekimi ivmesi
h	Kolonun kalınlığı
h_1, h_2	Sırasıyla L_1 ve L_2 uzunluklarına sahip kolonların kalınlıkları
I	Birim matrisi
I_{fx}	Mafsalın x yönündeki atalet momenti
I_{fy}	Mafsalın y yönündeki atalet momenti
I_{fz}	Mafsalın z yönündeki atalet momenti
I_o	Disk in atalet momenti
I_p	Disk in polar atalet momenti
I_t	Jiroskopun bağlı olduğu platformun atalet momenti
I_1	Jiroskopu taşıyan kolonun alan atalet momenti
I_2	Tek katlı yapıda alan atalet momenti
I_{2t}	Tek katlı yapının serbest ucundaki kütle nin atalet momenti

j	Sanal sayı
K	Çok katlı yapıya ait rijitlik matrisi
k_g	Jiroskop yayının rijitlik katsayısı
k_n	n katlı yapının n . katındaki rijitliği
\tilde{K}	Kütleye normalize edilmiş rijitlik matrisi
L	Jiroskopu taşıyan kolonun boyu
L_1	Tek katlı bina modelinde jiroskopu taşıyan kolonun boyu
L_2	Yapıya ait en son katın yüksekliği
M	Çok katlı yapıya ait kütle matrisi
M_t	Jiroskopun bağlı olduğu platformun kütlesi
m	Jiroskopun disk kütlesi
m_n	n -katlı yapının n . katındaki kütle
m_f	Mafsal ve motorun toplam kütlesi
M_1	Jiroskopu taşıyan kolonun uç kütlesi
M_2	Tek katlı yapıda serbest ucundaki kütle
m_1	Ana yapının kütlesi
m_2	Ayarlı Kütle Sönümleyicinin (TMD) kütlesi
q	Kolonun eğilme eğriliği
P	Öz vektörler matrisi
R	Mafsal ve motor ağırlık merkezi yarıçapı
r	Disk in yarıçapı
S	Mod şekilleri matrisi
s_1, s_2	Sırasıyla L_1 ve L_2 uzunluklarına sahip kolonların kavis uzunlukları boyunca mesafeler
T	Kinetik enerji
t	Zaman
TMD	Ayarlı kütle sönümleyici
u	Kolonun dikey elastik yer değiştirmesi
u_1, u_2	Sırasıyla L_1 ve L_2 uzunluklarının dikey yer değiştirmeleri
V	Potansiyel enerji
v	Kolonun yatay elastik yer değiştirmesi
\bar{v}	Kolonun yatay elastik yer değiştirmesinin genliği
v_i	i -serbestlik dereceli yapının öz vektörleri

v_1, v_2	Sırasıyla L_1 ve L_2 uzunluklarının yatay yer değiştirmeleri
ω	Zorlayıcı yer değiştirmenin frekansı
ω_1	Jiroskopu taşıyan kolonun doğal frekansı
ω_2	Tek katlı yapının doğal frekansı
ω_{bina}	Çok katlı binanın doğal frekansı
ω_i	i-serbestlik dereceli yapının mod frekansları
ω_{jiro}	Jiroskopun doğal frekansı
$\omega_{jirokolon}$	Çok katlı yapıda jiroskopu taşıyan kolonunun doğal frekansı
ω_{kat}	Tek katlı yapının doğal frekansı
ω_{kolon}	Kolonunun doğal frekansı
x_n	n-katlı yapının her bir katının zemine göre yatay yer değiştirmeleridir
$z(t)$	Zemin tablasının zorlayıcı yer değiştirmesi
z_0	Sarsıcı genliği
\bar{z}	Zorlayıcı yer değiştirmenin genliği
φ	Kolonun eğimini
φ_1	Jiroskopu taşıyan kolonun dikeyle olan açısal yer değiştirmesi
φ_2	Jiroskopu destekleyen kolonun yapının altında kalan kısmının dikeyle yaptığı açısal yer değiştirmesi
ψ	şekil fonksiyonu
Δ_1, Δ_2	İntegral sabitleri
Λ	Öz değerlerin köşegen matrisi
λ_i	i-serbestlik dereceli yapının öz değerleri
μ	Kütle oranı
Ω	Disk in dönme hızı
Ω_{min}	Disk in minimum dönme hızı
ρ	Kolonlara ait malzemenin yoğunluğu
θ	Jiroskopun presesyon açısı
$\bar{\theta}$	Jiroskopun presesyon açısının genliği
$\bar{\theta}_{max}$	Jiroskopun maksimum presesyon genliği
ζ_{opt}	Sönümleyicinin optimum sönüm oranı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hareket halinde olan birçok makine parçasında çeşitli nedenler yüzünden titreşimler olduğu gibi hareket halinde olmayan, örneğin; binalarda, kulelerde ve büyük çelik yapılarda dış etkenlerin (kuvvetli rüzgâr veya deprem) neden olduğu titreşimler ve salınımlar meydana gelebilmektedir. Günümüzde artan talebe göre binaların yüksekliklerinin artması, yapılara gelen rüzgar ve deprem yüklerini arttırmakta, binaların daha çok risk altında olması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Özellikle depremin neden olduğu titreşimler binanın ya da çelik yapının dayanabileceği sınırlar içerisinde kalması durumunda herhangi bir teknik sorun olmazken, söz konusu sınırların dışına çıkılması durumunda yapıya büyük zararlar verebileceği gibi, yapıyı tamamen tahrip de ederek can kaybının artmasına sebep olabilir.

Günümüze kadar yapılardaki titreşimleri sönmüleyebilmek için hem pasif hem de aktif birçok titreşim sönmüleyiciler tasarlanmış ve her biri çeşitli yapılara uygulanmıştır. Pasif ve aktif sönmüleyicilerin kendi yapıları gereği birbirlerine karşı bir takım avantajları veya dezavantajları mevcuttur. Ancak, her iki tipteki sönmüleyici sistemlerinin dezavantajlarından kurtulmak için bu sönmüleyicilerin birlikte kullanıldığı hibrid sistemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı ise yapılarda titreşimleri kısa sürede sönmülemek için jiroskopun özelliklerinden faydalanılarak daha hafif ve az yer kaplayan bir titreşim sönmüleyici geliştirmektir. Bu da titreşim sönmüleyicinin daha ekonomik ve güvenli olmasını sağlayacaktır. Jiroskopun yapılardaki titreşimleri sönmülemesi amacıyla, ankastre kolon ile bir jiroskop birleşiminden oluşan bir dinamik titreşim yutucu modeli geliştirilmiştir. Bu modelde jiroskop, iki kısımdan oluşmakta olup, birinci kısmı elektrik motoru ve motor şaftına monte edilmiş dönen bir kütle oluştururken (aktif titreşim yutucu kısım), ikinci kısmı ise, elektrik motoru gövdesinin montaj edildiği ve yatay doğrultudaki eksenini etrafında salınım hareketi yapan bir kütleden (pasif titreşim yutucu kısım) oluşturmaktadır. Aktif ve pasif titreşim sönmüleyicilerin kombinasyonu olarak tasarlanan jiroskopun aktif olan kısmı montaj edildiği ankastre kolonda titreşimlerin hissedilmesi ile eş zamanlı ve otomatik olarak harekete geçerek titreşimlerin etkisini yapıda tahribata sebep

olacak boyutlara ulaşmadan azaltmaya çalışırken, pasif kısmın harekete geçmesiyle birlikte yapıda oluşan titreşimler daha etkili bir şekilde emniyetli sınırlara indirilebilecektir. Bunun yanında, parametrelerin çok iyi ayarlanması durumunda (açısal momentum, frekans oranları vb.) titreşimleri yok denecek kadar azaltılabilecektir. Tasarlanan jiroskobik titreşim sönümleyici, hem aktif hem de pasif titreşim sönümleyicilerin bir bileşeni olacağından, tek başına aktif ya da pasif titreşim sönümleyiciye oranla daha etkili olacağı düşünülmüştür. Yapılan literatür araştırmalarında, bu tez kapsamında düşünülen tipteki titreşim sönümleyiciye hiç rastlanılmamış olup, yapıların (yüksek binalarda, büyük çelik yapılarda veya vinç kollarında) titreşimlere karşı dayanıklı olarak tasarlanması aşamasında son derece faydalı olacağı düşünülmektedir.

Bu araştırmada, bir jiroskopun yapılardaki titreşimlerin sönümlenmesinde uygulanabileceğinin teorik ve deneysel incelenmesi amacıyla, ilk aşamada uç kütle taşıyan ankastre kolon modeli ile jiroskop arasındaki teorik bağıntılar elde edilmiştir. İkinci aşamada, jiroskopun dinamik titreşim sönümleyici olarak kullanılabilirliği, tek katlı bir bina üzerinde hem teorik hem de deneysel olarak incelenerek etken parametreler belirlenmiştir. Çalışmanın devamında ise jiroskopun dinamik sönümleyici etkisi, nihai hedef olan çok katlı binalara uyarlanarak hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Bahsi geçen sistemlerin her birinin dinamik denklemleri elde edilirken, öncelikle enerji yöntemi kullanılarak her bir sistemin potansiyel ve kinetik enerji denklemleri tek tek yazılmıştır. Elde edilen kinetik ve potansiyel enerji denklemleri sistemi tanımlayan Lagrange denkleminde yerine konularak, sistemin hareket denklemleri (kısmi diferansiyel denklemler) elde edilmiştir. Elde edilen hareket denklemleri üzerinde birinci mod göz önünde bulundurularak yapılan matematiksel işlemler sonucunda, tüm sistemin hareketini tanımlayan ve içinde integral sabitleri bulunan adi diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Elde edilen bu nonlinear hareket denklemleri liner hale dönüştürülmüş ve sayısal simülasyonları Matlab paket programı içinde yer alan Runge-Kutta metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

1.2.1. Titreşim Sönümleyiciler

Birçok mühendislik uygulamasında, sistemin kendi yapısı, çalışma koşulları ve/veya dış etkenler nedeniyle titreşimler oluşmaktadır ve bu titreşimler değişik şekillerde tasarlanmış titreşim sönümleyiciler tarafından azaltılmaya çalışılmaktadır. Özellikle titreşim şeklinde oluşan büyük yer değiştirmeler sistem elemanlarının görevlerini yerine getirememesine veya zarar görmesine neden olmaktadır. Bu durum yapılarda da geçerli olup, oluşan büyük genlikli titreşimlerin yapıya vereceği zararı azaltmak için ya gereğinden daha kuvvetli olacak şekilde inşa edilmekte ya da yapı normal koşullar için inşa edilip, titreşim durumları için ise yapıda yüksek genlikli titreşimlerin etkisini en aza indirecek dinamik titreşim sönümleyiciler kullanılmaktadır. Titreşim sönümleyiciler değişik tiplerde tasarlanmakta olup genelde pasif ve aktif olarak sınıflandırılmakta ve yaygın olarak inşaat ve makine mühendisliği uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar.

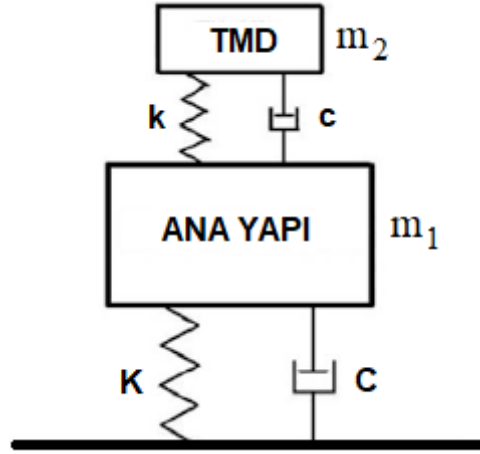
Titreşim, bir kütlelin belirli bir referans eksenine etrafında salınım hareketi olarak da ifade edilmektedir. Bu salınım hareketinin genliği zorlayıcının frekansına ve genliğine bağlı olmakla birlikte, zorlayıcının frekansı ile sistemin doğal frekansının birbirine yakınlığı ile de önemli oranda ilişkilidir. Titreşim hareketine maruz kalan sistemlerde, zorlayıcının genliği sabit kalsa bile, zorlayıcının frekansı sistemin doğal frekansına yaklaşması ile sistemin salınım genliği giderek artarak sistemin rezonans bölgesine girmesi gerçekleşmiş olur. Sistemin doğal frekansı ile zorlayıcının frekansı çakışması durumunda ise "rezonans" gerçekleşir ve bu durumda sistemin genliği en büyük değerine ulaşır. Ulaşılan genlik düzeylerinin sistemin taşıyabileceği değerleri aşması durumunda ise, sistemde büyük hasarların oluşmasına, bazen can ve mal kayıplarına neden olur. Bu nedenle, titreşime maruz kalacak yapıların tasarımı için rezonans durumu dikkate alınmalıdır. Belli bir frekans altında çalışacak sistem için rezonansdan korunmanın ilk yolu, sistemin doğal frekansını değiştirmektir. Sistemin doğal frekansını belirleyen temel parametreler ise, sistemin kütlesi ve rijitliğidir. Bir makinenin imalatı veya bir yapının inşaatı tamamlandığında, bu yapıların kütlesi ve rijitliği sabitlenmiş olduğundan bu değerler titreşim sırasında değiştirilemez. Bu nedenle, titreşim esnasında rezonans genliğini en aza indirgeyecek ve sisteme gelebilecek hasarı engelleyecek dinamik sönümleyiciler kullanılır. Dinamik sönümleyiciler, ana sistemin titreşiminden kaynaklanan

enerjiyi yutarak sönümleyen alt sistemlerdir. Ana sistemin doğal frekansının zorlayıcının frekansına eşit ya da çok yakın olduğu durumlarda dinamik sönümleyiciler devreye girerek sistemin enerjisinin büyük bir kısmını kendi üzerlerine aktararak rezonans durumunda oluşan büyük yer değiştirmeleri en aza indirebilmektedirler. Bu amaçla geliştirilmiş olan dinamik titreşim sönümleyici sistemler pasif, aktif ve hibrid olmak üzere genelde üç isimle adlandırılırlar.

1.2.1.1. Pasif Titreşim Sönümleyiciler

Sönüm kapasitesini artırma yollarından biri olan pasif dinamik titreşim sönümleme sistemleri, sönümleme yapmak için dışarıdan enerjiye ihtiyaç duymazlar. Tam aksine hareket edebilmeleri için tüm enerjilerini sönümleme yapacağı sistemden alırlar. Bu nedenle bu sistemler maliyeti düşük sistemlerdir [1]. Ancak, pasif titreşim sönümleyicilerdeki en büyük dezavantaj, sönümleyicinin harekete geçmesi ve aktif hale gelmesi için belli bir sistem titreşimine (yer değiştirmesine) ve zamana ihtiyaç duymasındır. Mühendislikte en yaygın olarak kullanılan pasif titreşim sönümleyiciler olarak ayarlı kütle sönümleyiciler (Tuned Mass Damper), kiriş tipi sönümleyiciler, sarkaç tipi sönümleyiciler, hatta sıvı sönümleyiciler vb. sönümleyiciler olarak sıralayabiliriz. Literatürde, pasif sönümleyici tiplerini ayrıntılı olarak açıklayan birçok kaynak mevcuttur [2]–[5].

Pasif kontrol sistemlerine verilebilecek ilk örnekler ayarlı kütle sönümleyicileridir (TMD). Şekil 1.1’de TMD sisteminin çalışma prensibi gösterilmektedir. TMD, en basit haliyle kütle, yay ve viskoz sönümleyicilerden oluşan pasif kontrol sistemidir. Yapının rezonans durumundaki enerjisini sönümlemek amacıyla TMD sönümleyicisinin parametreleri ayarlanır. TMD’nin temelleri, 1900’lü yılların başında Frahm tarafından titreşim kuvvetlerinin etkilerini araştırmak ve bu etkileri sönümlemek için yaptığı çalışmalarla ortaya koymuştur [6]. Den Hartog [7] yaptığı çalışmada harmonik bir kuvvetle tahrik edilen yapıda TMD sisteminin optimum kütle ve sönümleyici parametrelerini bulmuştur. Ancak, Den Hartog’a [7] ait bu formülasyon, sönümlü ana kütleli sistemlerde kullanılamamıştır ve sayısal yöntemlerle çözülebilecek bir optimizasyon problemine dönüşmüştür [8].



Şekil 1.1. Ayarlı kütle sönümleyicinin (TMD) modeli

Şekil 1.1’de verilen ayarlı kütle sönümleyicinin en önemli dizayn parametresi denklem (1.1)’de belirtilen kütle oranıdır (μ). Kütle oranı arttıkça sönümleyici daha etkili çalışmaktadır [9]. Çoğu uygulama için kütle oranı 1-10% arasında seçilmektedir.

$$\mu = \frac{m_2}{m_1} \quad (1.1)$$

Eğer ana yapının doğal frekansı (f_n) biliniyorsa, sönümleyicinin (TMD) optimum doğal frekansı (f_d) aşağıdaki bağıntıyla bulunabilir.

$$f_d = \frac{f_n}{1 + \mu} \quad (1.2)$$

Denklem (1.2)’den sönümleyicinin optimum sönüm oranı (ζ_{opt}) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (1.3)$$

İbrahim ve Bar [10] deneysel ve teorik olarak, su depolarındaki suyun çalkalanması ile zorlayıcının frekansı arasındaki etkiyi araştırmışlardır. İlk iki normal modun (veya herhangi biri), üçüncü mod için otoparametrik sönümleyici gibi davrandığını bulmuşlardır.

Hitchcock ve arkadaşları [11] tarafından da binalarda su tanklarının titreşim sönümleyici olarak kullanılması durumunu hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada sönümleme oranının, Reynold sayısına, akışkanın geçtiği kesit alan oranına ve orifis çıkış oranına bağlı olduğu bulunmuştur.

Çuvalcı ve çalışma arkadaşları [12], [13] esnek yapılarda ve tek katlı esnek bir binada birleştirilmiş (coupled) pasif titreşim sönümleyicileri rezonans bölgesinde sinüs ve rastgele frekanslar için incelemiş ve titreşim sönümleyicinin rezonans bölgesinde, binanın titreşimlerini %80 oranında azalttığını gözlemişlerdir. Mustafa ve Ertaş [14], sarkacı, titreşim sönümleyici olarak esnek kolonlara uygulamış ve yaptıkları çalışmalarda sarkacın frekansı ile sistem frekansı arasındaki $\frac{1}{2}$ oranının titreşim sönümleyicinin enerji değişiminde çok etkili olduğunu göstermişlerdir. Çuvalcı ve çalışma arkadaşları [15] sarkacın parametrik titreşim sönümleyici olarak esnek kirişlerde son derece etkili olduğunu deneysel ve teorik olarak göstermiştir. Çuvalcı [13], periyodik zorlayıcı yer değiştirme altında kiriş-uç kütle-sarkaç sisteminin kiriş ve sarkacın arasında otoparametrik etkileşim içindeki dinamik davranışını araştırmıştır. Aynı zamanda frekans tarama eğrilerindeki kararsız bölgeler de deneysel olarak elde etmişlerdir.

Wirching ve Campbell [16] çok katlı binalarda, binanın tavanına monte edilmiş düzgün titreşim sönümleyiciden oluşan sistemin davranışını zorlayıcının rastgele frekanslarında inceleyerek, titreşim sönümleyicinin 5 ve 10 katlı binalarda son derece etkili olduğunu göstermişlerdir. Daha sonraki çalışmalarda Dahlberg [17], titreşim sönümleyici olarak kullanılan sürekli sistemlerin ayırık sistemlerden daha etkili olduğunu matematiksel olarak ispatlamıştır.

1.2.1.2. Aktif Titreşim Sönümleyiciler

Aktif kontrol sistemi, temel olarak zorlayıcı titreşimleri ve yapı üzerinde meydana getirdiği titreşimleri ölçmeye yarayan alıcılardan (sensörlerden), bu ölçümlerden elde edilen verileri analiz eden bilgisayardan ve yapılan hesaplar sonunda dış enerji kaynağı kullanarak gerekli kontrol kuvvetlerini üreten aktüatörlerden meydana gelir. Pasif titreşim sönümleyiciler basit olmaları ve düşük maliyetleri nedeniyle oldukça etkili ve tercih sebebi olabilmektedirler. Ancak, aktif sönümleyiciler belli sınırlandırmalara ihtiyaç duymadıklarından aktif titreşim sönümleyicilerin geliştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif kontrol sistemlerinin değişen dış etkilere karşı her zaman cevap verebilmesi ve hızlı

çalışması, aktif kontrol sistemlerinin gerekliliğini ortaya koymuştur [18]–[23]. Aktif kontrol sistemlerinin bu avantajlarının yanında dezavantajları; dış enerji kaynakları kullanmaları, büyük ölçekte enerjiye ihtiyaç duymaları ve kullanılan teknoloji ve gerekli enerji kaynağı temininin yüksek maliyetli olmasıdır.

Özellikle yapısal sistemler için tasarlanmış verimli ve güçlü kontrol yöntemleri Gattulli ve arkadaşları [24] tarafından incelenmiştir. Lim Chae-Wook [25] ve Gosiewski Z, ve çalışma arkadaşları [26] liner yapının deneysel sonuçlarını incelemişlerdir. Günümüzde tasarımcılar, güçlü rüzgarlar ve sismik yer hareketleri gibi yüklerin belirsiz etkilerine maruz kalan yapıların dinamik kontrolü ile ilgilenmişlerdir. Örneğin, Ohtake [27], Nagashima [28] ve çalışma arkadaşları, binalar için çeşitli kontrol sistemlerinin üzerine araştırmalar yapmışlardır. Günümüze kadar aktif sönümleyiciler üzerine yazılmış birçok kaynak mevcuttur [2], [3], [5], [28], [29]. Ayrıca, son zamanlarda aktif yapısal kontrol üzerine kaydedilen gelişmeler Korkmaz'ın çalışmasında [30] özetlenmiştir.

1.2.1.3. Hibrid Kontrol Sistemleri

Yapılara etkiyen mekanik titreşim etkilerini en aza indirmek için geliştirilen aktif ve pasif kontrol yöntemlerinden her ikisinde de olumsuz durumlar mevcuttur. Pasif kontrol yöntemlerinde sistem önceden öngörülen büyüklükteki mekanik titreşimlere göre ayarlanmakta ve değişken titreşim yüklerine karşı sistem cevap verememektedir. Aktif kontrol yöntemlerinde ise büyük ölçekte enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır ve kullanılan teknoloji maliyeti yüksektir. Bu nedenle, her iki tipteki kontrol sistemlerinin dezavantajlarından kurtulmak için bu sönümleyicilerin birlikte kullanıldığı hibrid sistemler geliştirilmiştir [23], [31]–[33]. Her iki sistemin birlikte kullanıldığı durumlarda, kontrol sisteminin gereksinim duyduğu kuvvet azalmaktadır. Örneğin, APTMD (Active Passive Composite Tuned Mass Damper) sisteminde AMD (Active Mass Damper)'nin ataleti ile oluşturulan kontrol kuvveti ile TMD'nin hareketi değiştirilerek, kontrol sisteminin gereksinim duyduğu kuvvet azaltılmıştır. Cheung ve arkadaşları [34], tek serbestlik dereceli sistemin rezonans titreşim genliğini ve kontrol gücünü azaltmak için optimum kontrol parametrelerini belirlemişlerdir. Bu parametrelerin, sönümleyicinin geri besleme kazancı, frekans oranı, sönüm oranı ve kütle oranı olduğunu belirtmişlerdir. Chesné ve arkadaşları, geleneksel pasif amortisörlü elektromanyetik rezonatörün kütle cevabını aktif

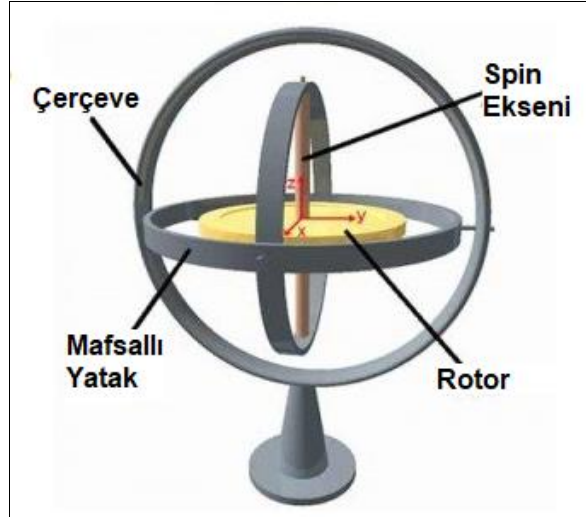
olarak kullanarak [35], çift döngülü kontrolcü yardımıyla, sönümleyicinin verimini arttırmışlardır ve tek serbestlik dereceli sistemin titreşim genliğini düşürmüşlerdir.

Piezoelektrik (aktif) ve viskoelastik (pasif) malzemeleri kullanan hibrid sönümleyiciler de mevcuttur [36]. Bu çalışmalara göre hibrid sönümleme davranışı, kontrolcünün uyardığı modların stabilite sınırını arttırmaktadır ve pasif olanlara göre daha efektif olduğu tespit edilmiştir. Hibrid kontrol, sadece aktif veya pasif kontrole göre, daha hafiftir (daha az viskoelastik malzeme) [37] ve daha az kontrol gücüne (daha düşük kontrol voltajı) [38] ihtiyaç duymaktadır. Ancak, viskoelastik katmanın esnekliği, piezoelektrik aktüatör ve yapı arasında sönümleme geçirkenliğini olumsuz etkilemektedir [39], [40].

1.2.2. Jiroskoplar ve Jiroskobik Titreşim Yutucular

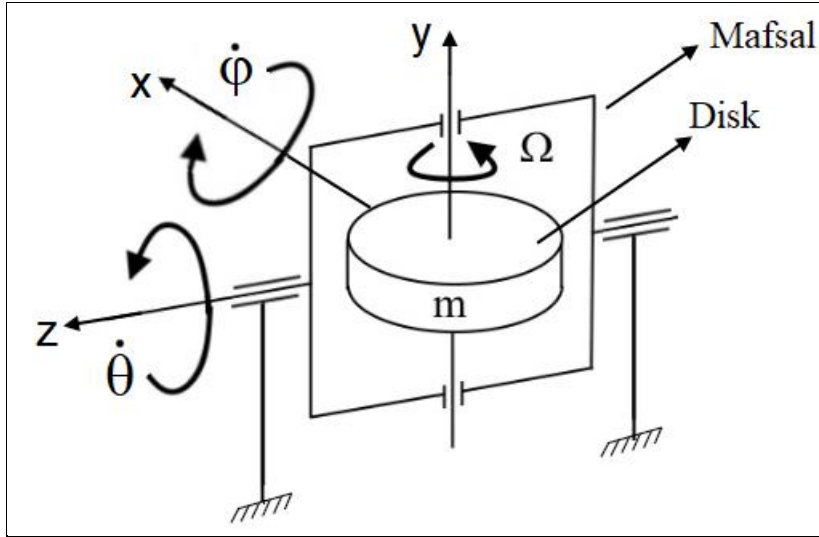
Kütle merkezi sabit olan jiroskop en basit haliyle Şekil 1.2'den de anlaşılacağı üzere, bir mafsallı yatak içerisinde dönen bir rotordan oluşur. Jiroskop hareketinin temeli, fizik kurallarına ve açısal momentumun korunumu ilkesine dayanır. 1909'da Sperry, jiroskopun doğrultu koruma özelliğinden faydalanarak uçak rotalarını sabit tutma amacıyla ilk defa devrim sayılabilecek bir oto pilot düzeneğini geliştirmiştir. Bu sayede, roket, füze ve güdümlü nükleer füzelerin hassas hız ve ivme ölçümlerinde jiroskop vazgeçilmez bir araç olmuştur. Günümüzde, jiroskop gemi ve uçaklardaki pusula ve oto pilot gibi çeşitli aygıtlarda, torpillerin dümen mekanizmalarında, büyük gemilerin yalpa giderici donanımlarında ve güdüm sistemlerinde hala kullanılır.

Klasik mekaniğin ilginç bir nonliner problemi olan jiroskopun dinamik davranışı, ilk olarak 19. yüzyılın sonunda Volterra [41] tarafından çalışılmıştır. 1915'te Sperry Corporation, iki mafsallı bir jiroskopu kullanarak, gemilerin yalpalamasını azaltan, (salınımını sönümleyen) böylece yükün zarar görmesini engelleyen, tekne gövdesi üzerindeki gerilimleri azaltan ve yolcuların gemilerde rahatça dolaşabilmesini sağlayan jiroskopu geliştirmiştir. Ayrıca, jiroskopun karmaşık hareketlerini araştıran ve onun hareket kontrolü sayesinde efektif bir araç olabileceğini savunan çeşitli çalışmalar yürütülmüştür; örneğin, bisiklet [42], araba [43], [44], tek raylı demir yolları [45], bina rüzgar titreşimleri [46] ve tekneler [47]–[50] gibi değişik uygulama alanlarında birçok araştırmalar yapılmıştır.



Şekil 1.2. Jiroskopun genel görünümü

Şekil 1.3' de tek eksenli jiroskop modeli görülmekte olup, modelden de anlaşılacağı gibi jiroskop, θ açısıyla serbest salınım hareketi yapabilen bir mafsal (gimbal), üzerine yerleştirilmiş ve kendi geometrik eksenini etrafında sabit bir Ω devir sayısında dönen bir diskten oluşmaktadır.



Şekil 1.3. Tek eksenli jiroskop

Jiroskopun hareketi Euler açıları θ ve ϕ ile tarif edilmektedir. Bu jiroskopun kinetik enerjisi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$T = \frac{1}{2} I_o \left[\dot{\theta}^2 + (\dot{\phi} \cos \theta)^2 \right] + \frac{1}{2} I_p (\Omega + \dot{\phi} \sin \theta)^2 \quad (1.4)$$

Jiroskopa ait hareket denkleminin Lagrange formu en genel haliyle aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (1.5)$$

Kinetik enerji denklemi Langrange denkleminde yerine konulduğunda ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında jiroskopun ϕ ' ye bağlı presesyon hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I_o \ddot{\theta} - \frac{1}{2} (I_p - I_o) \dot{\phi}^2 \sin 2\theta - I_p \Omega \dot{\phi} \cos \theta = 0 \quad (1.6)$$

Jiroskopun kaotik hareket kavramı üzerine öncü çalışma, ilk olarak iki garip çekicilerin varlığını gösteren, Leipnik ve Newton [51] tarafından sunulmuştur. Zorlanmış harmonik hareket altındaki jiroskopun nonliner davranışı ve kaotik hareketi, Ge ve arkadaşları tarafından da incelenmiştir [52]–[55]. GE ve arkadaşı [54], jiroskopun dönme hızının, jiroskopun dinamik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir ve jiroskopun kaotik hareketinin, dönme hızı arttıkça ortadan kalktığını göstermişlerdir. Jiroskopların periyodik ve kaotik dinamik davranışlarını inceleyen çeşitli çalışmalar da mevcuttur [33], [56]–[61]. Bu çalışmalar içinde, titreşimli zemin üzerinde monte edilmiş nonliner sönümlenmiş simetrik bir jiroskopun nonliner hareketi ise Chen [56] ve Van Dooren [57] tarafından incelenmiştir. Chen [56], Liapunov methodunu kullanarak jiroskopun denge noktalarındaki stabilite şartlarının elde etmiştir. Van Dooren [57], Chen'in nümerik sonuçlarını kontrol etmiş ve doğru ve tam parametrik değerlerini elde etmiştir. Polo ve arkadaşları [58], bifurkasyon teorisini kullanarak PID (Proportional-Oransal, Integral-İntegral ve Derivative-Türevsel) kontrollü mafsallara sahip jiroskobik sönümleyicinin PID parametrelerini belirlemişlerdir. Yan ve arkadaşları [60], adaptif kayan mod kontrol (adaptive sliding mode controller (ASMC)) metoduyla kaotik

jiroskopların senkronizasyonunu sağlamışlardır. Yau [33], enerji yutan jiroskobik sistemlerde, senkronizasyon ve anti-senkronizasyonun birlikte oluştuğunu göstermiştir.

Yamada ve arkadaşları [46], [62] aktif titreşim sönümleyici olarak, jiroskobik titreşim sönümleyiciyi, rüzgar etkisi altındaki 108 metrelik bir kulede incelemiştir. Yaptıkları nümerik ve deneysel çalışmalarda, jiroskobik titreşim sönümleyicinin, kulenin titreşim genliğini etkin bir şekilde azalttığını gözlemlemiştir. Geleneksel aktif kütle sönümleyiciler ile karşılaştırıldığında, titreşimlerin azaltılmasında jiroskobik titreşim sönümleyici kullanılması, ağırlık ve hacim tasarrufu sağlamaktadır. Moon ve arkadaşları [63], esnek yapılarda jiroskobik titreşim sönümleyicilerin etkisini, sismik etkiler altında teorik olarak incelemiştir ve esnek yapının eğilme miktarının azaldığını göstermiştir. Townsend ve Sheno [64] jiroskobik titreşim sönümleyiciyi taşıt sistemlerinin dinamiği ve kontrolü açısından detaylı olarak incelemiştir. Yaptıkları çalışmalarda, jiroskobik titreşim sönümleyicinin genel denklemlerini türetmişlerdir. Ayrıca, bu denklemlerin uygulama alanındaki örneklerini de göstermişlerdir. Scheurich ve arkadaşları [65], binek araçlar üzerinde liner sönümleyiciler ile jiroskobik sönümleyicileri teorik olarak karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre jiroskobik sönümleyiciler, klasik liner sönümleyicilerin tüm görevini yerine getirebildiğini, daha hızlı toparlandığını ve geniş sönüm oranlarında çalışabildiğini göstermişlerdir. Yoshino ve arkadaşları [66], raylı sistemlerde tekerlek üzerinde oluşan titreşimleri sönümlemek için geliştirdikleri jiroskobik sönümleyiciyi teorik ve deneysel olarak incelemiştir ve tekerleklerde oluşan hunting hareketinin kritik hızını artırmayı başarmışlardır. Bu jiroskobik sönümleyicinin en önemli avantajı jiroskopun dönmesi için ayrı bir motora gerek duyulmaması ve hareketini trenin tekerleklerinden elde etmesidir.

1.3. Tezin Konusu ve Amacı

Şekil 1.1’de verilen ayarlı kütle sönümleyicinin en önemli dezavantajı denklem (1.1)’de belirtilen kütle oranıdır (μ). Kütle oranı arttıkça sönümleyici daha etkili çalışmaktadır ve genellikle kütle oranı 1-10% arasında seçilmektedir. Ancak, jiroskobik titreşim yutucularda en önemli parametre açısal momentumdur. Jiroskopun disk kütlesi azalsa dahi disk hızı arttırılırsa açısal momentum korunur. Böylece daha hafif ve daha az hacimli titreşim yutucular geliştirilebilir.

Bu çalışmanın amacı binalarda, çelik yapılarda, kulelerde, yüksek antenlerde ve bunlara benzer yapılarda deprem ve/veya rüzgar sırasında oluşan titreşimleri kısa sürede sönmölemek için jiroskopun açısai momentumundan faydalanılarak daha hafif ve daha az hacimli bir titreşim sönmöleyici geliştirmektir. Bu çalışmada jiroskop, iki kısımdan oluşmakta olup, birinci kısmı elektrik motoru ve motor şaftına monte edilmiş dönen bir kütle oluştururken (aktif titreşim yutucu kısım), ikinci kısmı ise, elektrik motoru gövdesinin montaj edildiği ve düşey doğrultudaki ekseni etrafında salınım hareketi yapan bir kütle (pasif titreşim yutucu kısım) oluşturmaktadır. Aktif ve pasif titreşim sönmöleyicilerin kombinasyonu olarak tasarlanan jiroskopun aktif olan kısmı montaj edildiği yapıda titreşimlerin hissedilmesi ile eş zamanlı ve otomatik olarak harekete geçerek titreşimlerin etkisini yapıda tahribata sebep olacak boyutlara ulaşmadan azaltmaya çalışırken, pasif kısmın harekete geçmesiyle birlikte yapıda oluşan titreşimler daha etkili bir şekilde emniyetli sınırlara indirilebilecektir. Bunun yanında, bazı durumlarda (parametrelerin çok iyi ayarlanması durumunda) titreşimleri yok denecek kadar azaltabilecektir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Giriş bölümünde de belirtildiği gibi tez çalışması hem teorik hem de deneysel olarak bir arada yürütülmüştür. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar üç kısma ayrılmıştır. İlk kısımda bir kolonun üzerine yerleştirilmiş tek eksenli bir jiroskopun kolonun eğim açısıyla olan bağıntısı açıklanmıştır. Ayrıca, hareket denklemleri ve bu hareket denklemlerinden frekans denklemleri elde edilmiş ve optimum parametreler belirlenmiştir. İkinci kısımda, jiroskopun tek katlı yapıda kullanılabilirliği teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu kısımda, tek katlı yapının teorik modeli üzerinden elde edilen hareket denklemleri ve doğal frekanslar ışığında hazırlanan deneysel model, teorik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Üçüncü kısımda ise bir taraftan jiroskopun çok katlı binada dinamik titreşim sönümleyici olarak kullanılabilirliği teorik olarak incelenirken diğer taraftan oluşturulan deney düzeneğinde deneysel olarak incelemeler sürdürülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sayede, tek katlı ve çok katlı model binalardan elde edilen deneysel ve analitik dinamik karakteristikler birbiriyle kıyaslanarak aralarındaki farklılıklar irdelenmiştir. Böylece yapılan teorik ve deneysel çalışmalar ile jiroskobik titreşim sönümleyicinin, bir yapının hareket kontrolü ve titreşiminin azaltılması için etkili bir araç olduğu gösterilmiştir.

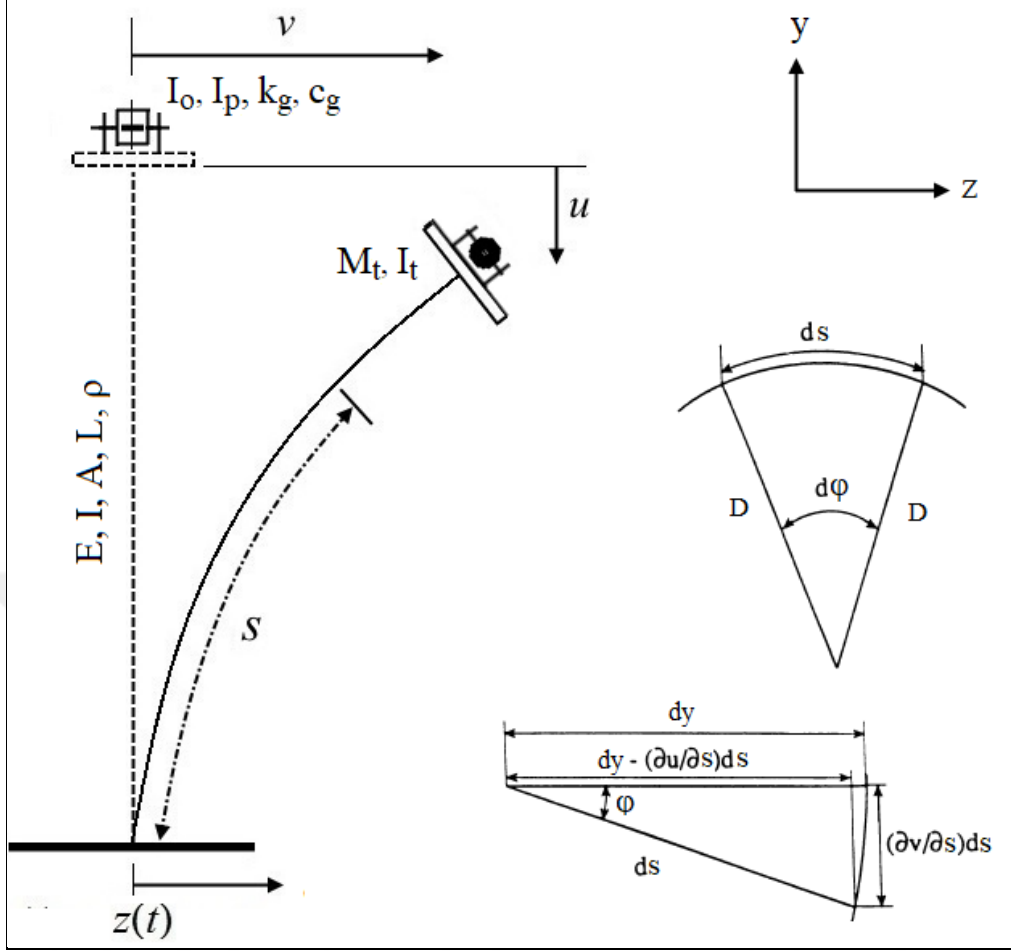
2.1. Ankastre Kolon ve Kolonun Serbest Ucunda Bağlı Jiroskop Modeli

Yüksek binalar, kuleler, antenler veya uçakların uzun uzantıları gibi benzeri birçok mühendislik uygulamalarının modellenmesinde, döner ataletli veya ataletsiz, bir uç kütle taşıyan kirişi ve/veya kolonu düşünmek oldukça başvurulan bir metottur. Hem teorik hem de pratik talepler nedeniyle, son birkaç yılda çeşitli sınır ve yük koşullarına tabi bu tür kiriş modellerinin nonliner dinamik hareketi üzerinde birçok araştırmalar yapılmıştır. Bhat and Wagner [67] bir uç kütle taşıyan ve üniform özelliğe sahip konsol kirişin, küçük yer değiştirmeler için hareket denklemini Bernoulli-Euler kiriş modeline göre elde etmişlerdir. Bu hareket denkleminde, sistemin mod frekanslarını pertübasyon yöntemiyle çözmüşlerdir. Bazı çalışmalarda da, tekil kütleli ve kiriş boyunca değişik yaylara sahip dikey konsol kiriş probleminin araştırılması için, Bernoulli-Euler kiriş modeli kullanılmıştır [68]–[72].

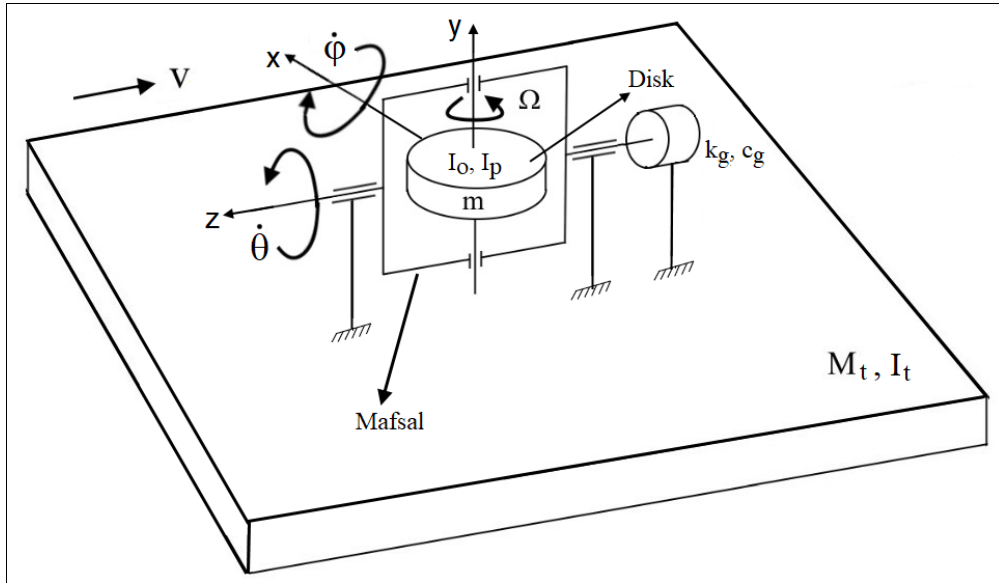
Jiroskopun nonliner dinamik hareketinin çeşitli sınır ve yük koşullarına tabi bu tür kiriş modelleri üzerindeki etkisi henüz araştırılmamıştır. Bu nedenle, hem teorik hem de pratik talepler nedeniyle, bir jiroskopun yapılardaki titreşimlerin sönümlenmesinde uygulanabileceğinin teorik ve deneysel incelenmesi amacıyla uç kütle taşıyan kirişi ve/veya kolon modeli düşünülmüştür (Şekil 2.1). Aşağıdaki çalışmanın temelinde, tek eksenli jiroskop presesyon hareketi ile kolon eğilme açısı arasındaki bağıntı kurularak kolonun titreşimi azaltılmaya çalışılmıştır.

Bu bölümde, bir uç kütlesi olan bir kolon-jiroskop sisteminin hareket denklemlerini elde etmek için, uzunluğun kalınlığı oranı yüksek olması nedeniyle Euler-Bernoulli kolon teorisi kullanılmıştır. İnce kolonlar ($L/h > 20$) için kolonun kayma deformasyonunun ve rotatif ataletin etkileri ihmal edilebilir. Şekil 2.1’de tek eksenli jiroskop sisteminin bağlı olduğu bir uç kütleli (M_1) dikey bir kolon gösterilmektedir. Burada, kolon kütle yoğunluğu ρ , kesit alanı A , eşdeğer bir elastisite modülü E ve düzlem alanı atalet momentine I ve bir uç kütle atalet momentine I_1 sahiptir. L uzunluğundaki kolonun başlangıçta düz olduğu varsayılmaktadır. Serbest uçtaki yatay ve dikey elastik yer değiştirmeler sırasıyla v ve u olarak belirtilmiştir. Kolonun elastik deformasyonundan kaynaklanan s , kolonun kavis uzunluğu boyunca olan mesafeyi ifade eder.

Jiroskop sistemi kolonun uç kütlesine monte edilmiş ve mafsalsal ile kendi geometrik eksenini etrafında serbestçe dönebilen tek diskten oluşmaktadır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, jiroskop sistemi θ açısıyla serbest hareket edebilen bir mafsalsal (gimbal) içine yerleştirilmiş ve kendi geometrik eksenini etrafında serbestçe dönebilen bir diskten oluşmaktadır. Serbest uçtaki jiroskopun disk kütlesi m ve devir sayısı Ω ile belirtilmiştir. Bunlarla birlikte, teorik modelimizde jiroskopun θ salınımını kontrol eden k_g yay katsayısı ve c_g sönüm katsayısı hesaba katılmıştır.



Şekil 2.1. Uç kütle, jiroskop ve temelden tahrikli ankastre kolon modeli.



Şekil 2.2. Uç kütleyle (M_t) bağlanmış tek eksenli jiroskop

Burada, kolonun eğilme miktarı, q , denklem (2.1)'deki gibi ifade edilir. [73]–[75]

$$q(s, t) = \frac{\partial \varphi}{\partial s} = \varphi' \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'deki (φ) üssü değişken s konumuna göre kısmi türevi gösterir. Eğilmiş kolonun geometrisi kullanılarak, kolonun eğimi φ , ile elastik yer değiştirmeler (u ve v) arasındaki bağıntılar aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir.

$$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1 \quad (2.2)$$

Burada,

$$\sin \varphi = v' \quad (2.3)$$

$$\cos \varphi = 1 - u' \quad (2.4)$$

Ayrıca, denklemler (2.3) ve (2.4)'de belirtilen geometrik bağıntılar denklem (2.2)'de yerine konursa, denklem (2.5) elde edilmiş olur.

$$v'^2 + (1 - u')^2 = 1 \quad (2.5)$$

Aşağıda $\sqrt{1 - v'^2}$ teriminin binom açılımı verilmiştir.

$$\left(1 - v'^2\right)^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2}v'^2 - \frac{1}{2 \times 4}v'^4 - \frac{1 \times 3}{2 \times 4 \times 6}v'^6 - \dots \quad -1 < -v'^2 \leq 0 \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da belirtilen binom açılımının ikinci dereceden daha yüksek terimleri ihmal edilirse ve denklem (2.5) kullanılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$u' = 1 - \sqrt{1 - v'^2} \approx \frac{1}{2} v'^2 \quad (2.7)$$

Böylece, denklem (2.7)'nin s konumuna göre integrali alınır ise kolonun dikey elastik yer değiştirmesi, u, aşağıdaki gibi elde edilir. [73], [75]

$$u(s, t) = \frac{1}{2} \int_0^s (v'(\Gamma, t))^2 d\Gamma \quad (2.8)$$

Denklem (2.9)' da $\sin^{-1}v'$ teriminin binom açılımı verilmiştir.

$$\sin^{-1}v' = v' + \frac{1}{2} \frac{v'^3}{3} + \frac{1 \times 3}{2 \times 4} \frac{v'^5}{5} + \frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6} \frac{v'^7}{7} + \dots \quad v' < 1 \quad (2.9)$$

Kolonun eğimini, φ , kolonun yatay elastik yer değiştirmesi, v, cinsinden ifade edebilmek için, denklem (2.9)'da belirtilen binom açılımının üçüncü dereceden daha yüksek terimleri ihmal edilerek ve denklem (2.3)'de kullanılarak aşağıdaki denklem bulunur.

$$\varphi(s, t) = \sin^{-1} v' \approx v' + \frac{1}{6} v'^3 \quad (2.10)$$

Böylece, denklem (2.10)'un s konumuna göre türevi alınır ise, kolonun eğilme miktarı, q, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q(s, t) = \varphi' = \frac{v''}{\cos \varphi} = \frac{v''}{\sqrt{1 - v'^2}} \approx v'' \left(1 + \frac{1}{2} v'^2 \right) \quad (2.11)$$

Kolonun uç kütesinin, kolonun kendi kütesinden çok daha büyük olduğu düşünülürse, problemin çözümünde kullanılacak denklemler için birinci mod yeterli

olmaktadır. Kolonun her hangi bir noktasındaki yer değiştirmesi Şekil fonksiyonu, $\psi(s)$, cinsinden denklem (2.12)'deki gibi ifade edilir. [76]

$$v(s,t) = v(t)\psi(s) \quad (2.12)$$

Burada, yer değiştirmenin $s=0$ da sınır Şartlarını sağlayan yaklaşık Şekil fonksiyonu denklem (2.13)'de olduğu gibi ifade edilir [76]

$$\psi(s) = 1 - \cos\left(\frac{\pi s}{2L}\right) \quad (2.13)$$

Böylece, denklem (2.12)'de belirtilen yer değiştirme modeli, denklem (2.10)'da yerine konularak, gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra kolonun eğiminin yer değiştirme, hız ve ivme cinsinden denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \varphi &= v' + \frac{1}{6}v'^3 = v\psi'(s) + \frac{1}{6}v^3\psi'^3(s) \\ \dot{\varphi} &= \dot{v}\psi'(s) + \frac{1}{2}v^2\dot{v}\psi'^3(s) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\ddot{\varphi} = \ddot{v}\psi'(s) + \frac{1}{2}(v^2\ddot{v} + 2v\dot{v}^2)\psi'^3(s)$$

Burada, $v(t)$ ve $u(t)$, kolonun yer değiştirmesinin atalet yönleri boyunca bileşenlerini belirtmektedir ve nokta, zamana (t) göre türevi ifade etmektedir. Böylece, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, kolon-jiroskop sisteminin kinetik enerjisi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}\rho A \int_0^L \left[(\dot{v}(s,t) + \dot{z}(t))^2 + u(s,t)^2 \right] ds + \frac{1}{2}M_t \left[(\dot{v}(L,t) + \dot{z}(t))^2 + \dot{u}(L,t)^2 \right] \\ &+ \frac{1}{2}I_t \dot{\varphi}^2 + T_{jyro} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Jiroskopun hareketi Euler açıları θ ve φ ile tarif edilmektedir. Burada, jiroskopun kinetik enerjisi disk için aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_{Jiro} = \frac{1}{2} I_o \left[\dot{\theta}^2 + (\dot{\varphi} \cos \theta)^2 \right] + \frac{1}{2} I_p (\Omega + \dot{\varphi} \sin \theta)^2 \quad (2.16)$$

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, kolon-jiroskop sisteminin potansiyel enerjisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V = \frac{1}{2} EI \int_0^L q(s,t)^2 ds - \rho Ag \int_0^L u(s,t) ds - M_t g u(L,t) + \frac{1}{2} k_g \theta^2 \quad (2.17)$$

Jiroskop hareketinin sönümlenmesi sonucunda oluşan enerji kaybı, D, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$D = \frac{1}{2} c_g \dot{\theta}^2 \quad (2.18)$$

Denklemler (2.8) ve (2.12) kullanılarak, enerji denklemlerinde yerine konduğunda ve gerekli işlemler yapıldıktan sonra, sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T = \frac{1}{2} \rho A \left(G_1 \dot{v}^2 + 2G_2 \dot{v} \dot{z} + \dot{z}^2 L_1 + G_3 v^2 \dot{v}^2 \right) + \frac{1}{2} M_t \left[\left(\dot{v}(t) + \dot{z}(t) \right)^2 + G_4^2 v^2 \dot{v}^2 \right] + \frac{1}{2} I_t \dot{\varphi}^2 + T_{jiro} \quad (2.19)$$

$$V = \frac{1}{2} EI \left(G_6 v^2 + G_7 v^4 + \frac{1}{4} G_8 v^6 \right) - \frac{1}{2} G_9 \rho Ag v^2 - \frac{1}{2} G_4 M_t g v^2 + \frac{1}{2} k_g \theta^2 \quad (2.20)$$

Burada, denklem (2.13)’teki yer değiştirme modeli kullanarak, G_1 ’den G_9 ’a kadar olan sabitler aşağıda olduğu gibi elde edilir.

$$G_1 = \int_0^L (\psi(s))^2 ds = L \left(\frac{3}{2} - \frac{4}{\pi} \right)$$

$$G_2 = \int_0^L \psi(s) ds = \frac{L}{\pi} (\pi - 2)$$

$$G_3 = \int_0^L \left(\int_0^s (\psi'(\Gamma))^2 d\Gamma \right)^2 ds = \frac{\pi^2}{384L} (2\pi^2 - 9)$$

$$G_4 = \int_0^L (\psi'(s))^2 ds = \frac{\pi^2}{8L}$$

$$G_5 = \psi'(L) = \frac{\pi}{2L} \tag{2.21}$$

$$G_6 = \int_0^L (\psi''(s))^2 ds = \frac{\pi^4}{32L^3}$$

$$G_7 = \int_0^L (\psi'(s)\psi''(s))^2 ds = \frac{\pi^6}{512L^5}$$

$$G_8 = \int_0^L (\psi'(s))^4 (\psi''(s))^2 ds = \frac{\pi^8}{4096L^7}$$

$$G_9 = \int_0^L \left(\int_0^s (\psi'(\Gamma))^2 d\Gamma \right) ds = \frac{1}{16} (\pi^2 - 4)$$

Ayrıca, yukarıdaki $\psi'(L) = \frac{\pi}{2L} = G_5$ kullanılırsa, denklem (2.14) sırası ile yatay yer değiştirme cinsinden aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$\varphi = vG_5 + \frac{1}{6}v^3G_5^3$$

$$\dot{\varphi} = \dot{v}G_5 + \frac{1}{2}v^2\dot{v}G_5^3 \quad (2.22)$$

$$\ddot{\varphi} = \ddot{v}G_5 + \frac{1}{2}(v^2\ddot{v} + 2v\dot{v}^2)G_5^3$$

Oluşturulan modelin yatay yer değiştirmeye göre sürekli moddaki hareket denklemi genel anlamda aşağıda verilen Lagrange denklemi kullanılarak bulunabilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{v}} \right) - \frac{\partial T}{\partial v} + \frac{\partial D}{\partial \dot{v}} + \frac{\partial V}{\partial v} = 0 \quad (2.23)$$

Enerji denklemleri (2.18), (2.19) ve (2.20), Denklem (2.23)'de yerine konup gerekli işlemler ve sadeleştirmeler yapıldıktan sonra aşağıdaki hareket denklemi elde edilir:

$$\begin{aligned} & \ddot{v} \left[\rho AG_1 + M_t + I_t G_5^2 + (\rho AG_3 + M_t G_4^2 + I_t G_5^4) v^2 + \frac{1}{4} I_t G_5^6 v^4 \right] \\ & + v \ddot{v}^2 \left(\rho AG_3 + M_t G_4^2 + I_t G_5^4 + \frac{1}{2} I_t G_5^6 v^2 \right) \\ & + v \left(EIG_6 - \rho AgG_9 - M_t gG_4 + 2EIG_7 v^2 + \frac{3}{4} EIG_8 v^4 \right) \\ & + I_o \left[\ddot{\varphi} \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} \cos^2 \theta + \dot{\varphi} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} \right) \cos^2 \theta + \dot{\varphi} \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} (-2\dot{\theta} \cos \theta \sin \theta) \right] \\ & + I_p \Omega \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} \right) \sin \theta + \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} \dot{\theta} \cos \theta \right] \\ & + I_p \left[\ddot{\varphi} \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} \sin^2 \theta + \dot{\varphi} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} \right) \sin^2 \theta + \dot{\varphi} \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial \dot{v}} (2\dot{\theta} \cos \theta \sin \theta) \right] \\ & - \left[I_o \dot{\varphi} \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial v} \cos^2 \theta + I_p \Omega \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial v} \sin \theta + I_p \dot{\varphi} \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial v} \sin^2 \theta \right] = -\ddot{z} (\rho AG_2 + M_t) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Burada,

$$\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial \dot{v}} = G_5 + \frac{1}{2} v^2 G_5^3 \quad (2.25)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial \dot{v}} \right) = \frac{\partial \dot{\phi}}{\partial v}$$

Denklem (2.25)'deki denklemler kullanılarak gerekli sadeleştirmeler yapıldığında, sistemin hareket denklemi (2.24) en sade haliyle aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} & \ddot{v} \left(\alpha_1 + \alpha_2 v^2 + \alpha_3 v^4 + \left(G_5 + \frac{1}{2} v^2 G_5^3 \right)^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right) \\ & + v \ddot{v}^2 \left[\alpha_2 + 2\alpha_3 v^2 + G_5^3 \left(G_5 + \frac{1}{2} v^2 G_5^3 \right) (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] \\ & + v (\alpha_4 + \alpha_5 v^2 + \alpha_6 v^4) \\ & + \left(G_5 + \frac{1}{2} v^2 G_5^3 \right) \left\{ \begin{array}{l} (I_p - I_o) \left[\dot{v} \left(G_5 + \frac{1}{2} v^2 G_5^3 \right) \right] \dot{\theta} \sin 2\theta \\ + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \end{array} \right\} \\ & = -\gamma \ddot{z} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Burada,

$$\alpha_1 = \rho A G_1 + M_t + I_t G_5^2$$

$$\alpha_2 = \rho A G_3 + M_t G_4^2 + I_t G_5^4$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{4} I_t G_5^6$$

$$\alpha_4 = E I G_6 - \rho A g G_9 - M_t g G_4 \quad (2.27)$$

$$\alpha_5 = 2 E I G_7$$

$$\alpha_6 = \frac{3}{4} EIG_8$$

$$\gamma = \rho AG_2 + M_t$$

Oluşturulan modelin jiroskopun presesyon hareketine θ göre hareket denklemi genel anlamda aşağıda verilen Lagrange denklemi kullanılarak bulunabilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (2.28)$$

Enerji denklemleri (2.18), (2.19) ve (2.20), denklem (2.28)'de yerine konup gerekli işlemler ve sadeleştirmeler yapıldıktan sonra aşağıdaki hareket denklemi elde edilir:

$$I_o \ddot{\theta} - \frac{1}{2} (I_p - I_o) \left(\dot{v} G_5 + \frac{1}{2} v^2 \dot{v} G_5^3 \right)^2 \sin 2\theta - I_p \Omega \left(\dot{v} G_5 + \frac{1}{2} v^2 \dot{v} G_5^3 \right) \cos \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0 \quad (2.29)$$

2.1.1. Kolonun Küçük Yer Değişimleri İçin Hareket Denklemleri

Kolonun küçük yer değiştirme değerleri için ($v \approx 0$), denklemler (2.26) ve (2.29)'da bulunan yüksek dereceden yer değiştirme terimleri ihmal edilirse, aşağıdaki gibi daha sade hale indirgenir.

$$\ddot{v} \left[\alpha_1 + G_5^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + v^2 \left[\alpha_2 + G_5^4 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + v \alpha_4 + G_5 \left[(I_p - I_o) \dot{v} G_5 \dot{\theta} \sin 2\theta + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \right] = -\gamma \ddot{z} \quad (2.30)$$

$$I_o \ddot{\theta} - \frac{1}{2} (I_p - I_o) (\dot{v} G_5)^2 \sin 2\theta - I_p \Omega \dot{v} G_5 \cos \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0 \quad (2.31)$$

Elde edilen bu denklemlere yaklaşımın en kolay yolu hareketin denge pozisyonunda kinetik enerjisinin sıfır olduğunu düşünmektir. Denge pozisyonunda $\dot{v} \approx 0$ and $\dot{\theta} \approx 0$ olduğunu farz edersek, denlemler (2.30) ve (2.31) aşağıdaki ifadelere indirgenmiş olur.

$$\ddot{v} \left[\alpha_1 + G_5^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + v \alpha_4 + G_5 I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta = -\gamma \ddot{z} \quad (2.32)$$

$$I_o \ddot{\theta} - I_p \Omega \dot{v} G_5 \cos \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0 \quad (2.33)$$

Böylece, denklemler (2.32) ve (2.33) kullanılarak kolonun ve jiroskopun doğal frekansları sırasıyla aşağıda belirtildiği şekilde elde edilir;

$$\omega_{kolon}^2 = \frac{\alpha_4}{\alpha_1 + G_5^2 I_o} \quad (2.34)$$

$$\omega_{jiro}^2 = \frac{k_g}{I_o} \quad (2.35)$$

Kolonun ankastre ucunda zorlayıcı yer değiştirmenin $z = \bar{z} e^{j\omega t}$ şeklinde harmonik olduğunu farzedelim. Harmonik yer değiştirmenin yatay deplasmanı \bar{z} ile ifade edilmiştir. Böylece, jiroskopun ve kolonun söz konusu zorlayıcının frekansı altında oluşacak frekans cevapları aşağıdaki biçimde yazılabilir;

$$\theta = \bar{\theta} e^{j\omega t} \quad (2.36)$$

$$v = \bar{v} e^{j\omega t}$$

Böylece, (2.32) ve (2.33)'de belirtilen denklemler aşağıda belirtilen matris forma dönüştürülebilir;

$$\begin{aligned} \bar{\theta} & \begin{bmatrix} j\omega G_5 I_p \Omega \cos \theta \\ -I_o \omega^2 + jc_g \omega + k_g \end{bmatrix} + \bar{v} \begin{bmatrix} -\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + \alpha_4 \\ -j\omega G_5 I_p \Omega \cos \theta \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \omega^2 \gamma \bar{z} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Denklem (2.37)'nin çözümünden, kolonun ve jiroskopun frekansa bağlı yer değiştirme denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\bar{v} = \frac{-\omega^2 \gamma \bar{z} (-I_o \omega^2 + jc_g \omega + k_g)}{\left\{ \begin{aligned} & (\omega G_5 I_p \Omega \cos \theta)^2 - (-I_o \omega^2 + k_g) \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 \begin{pmatrix} I_o \cos^2 \theta \\ +I_p \sin^2 \theta \end{pmatrix} \right] + \alpha_4 \right) \\ & -jc_g \omega \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 \begin{pmatrix} I_o \cos^2 \theta \\ +I_p \sin^2 \theta \end{pmatrix} \right] + \alpha_4 \right) \end{aligned} \right\}} \quad (2.38)$$

$$\bar{\theta} = \frac{-j\omega^3 \gamma \bar{z} G_5 I_p \Omega \cos \theta}{\left\{ \begin{aligned} & (\omega G_5 I_p \Omega \cos \theta)^2 - (-I_o \omega^2 + k_g) \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 \begin{pmatrix} I_o \cos^2 \theta \\ +I_p \sin^2 \theta \end{pmatrix} \right] + \alpha_4 \right) \\ & -jc_g \omega \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 \begin{pmatrix} I_o \cos^2 \theta \\ +I_p \sin^2 \theta \end{pmatrix} \right] + \alpha_4 \right) \end{aligned} \right\}} \quad (2.39)$$

Denklemler (2.38) ve (2.39) kompleks ifadeler olup, kompleks yapıdan kurtarılması için gerekli işlemler yapıldıktan sonra kolonun ve jiroskopun yer değiştirme denklemleri aşağıda gösterildiği gibi elde edilir.

$$|\bar{v}| = \omega^2 \gamma \bar{z} \sqrt{\frac{(-I_o \omega^2 + k_g)^2 + (c_g \omega)^2}{\left\{ \left(\omega G_5 I_p \Omega \cos \theta \right)^2 - \left(-I_o \omega^2 + k_g \right) \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + \alpha_4 \right) \right\}^2 + \left\{ -c_g \omega \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + \alpha_4 \right) \right\}^2}} \quad (2.40)$$

$$|\bar{\theta}| = \frac{\omega^3 \gamma \bar{z} G_5 I_p \Omega \cos \theta}{\sqrt{\left\{ \left(\omega G_5 I_p \Omega \cos \theta \right)^2 - \left(-I_o \omega^2 + k_g \right) \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + \alpha_4 \right) \right\}^2 + \left\{ -c_g \omega \left(-\omega^2 \left[\alpha_1 + G_5^2 (I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta) \right] + \alpha_4 \right) \right\}^2}} \quad (2.41)$$

Buradan, kolonun serbest ucundaki yer değiştirimin sıfır ($|\bar{v}| = 0$) olabilmesi için, yayla desteklenmiş jiroskop sisteminin doğal frekansı ile zorlayıcının frekansına eşit olması gerekir. Ayrıca, jiroskopun sönüm elemanını ihmal edersek, denklem (2.41) aşağıdaki bağıntıya indirgenebilir;

$$|\bar{\theta}| = \frac{\omega_{kolon} \gamma \bar{z}}{G_5 I_p \Omega \cos \theta} \quad (2.42)$$

Oto-parametrik rezonans oluşması için kolonun doğal frekansı ile jiroskopun doğal frekansı eşit olması yeterlidir ($\omega_{kolon}^2 = \omega_{jiro}^2$). Zorlayıcının frekansının $\omega \leq \omega_{kolon}$ değerleri olduğu ve jiroskopun kararlı hareketi için $\theta = \bar{\theta} e^{j\omega t} = \bar{\theta}_{max}$ olması gerektiğini kabul edersek, denklem (2.42) aşağıdaki formda yazılabilir;

$$\bar{\theta}_{max} \cos \bar{\theta}_{max} = \pm \frac{\omega_{kolon} \gamma \bar{z}}{G_5 I_p \Omega_{min}} \quad (2.43)$$

Buradan jiroskopun kararlı hareketi için izin verilen maksimum yer değiştirme değerini kullanarak, gerekli olan minimum disk hızının da bağıntısını elde edilmiş olur;

$$\Omega_{\min} = \pm \frac{\omega_{kolon} \gamma \bar{z}}{G_5 I_p \bar{\theta}_{\max} \cos \bar{\theta}_{\max}} \quad (2.44)$$

Böylece, zorlayıcının frekansı $\omega \leq \omega_n$ değerleri ve jiroskopun kararlı hareketi için gerekli minimum disk hızı, jiroskopun maksimum izin verilen yer değiştirmesi ($\bar{\theta}_{\max}$) elde edilerek bulunabilir. $|\bar{\theta}_{\max}| = 0.86$ rad olduğu açı bize $|\bar{\theta}_{\max} \cos \bar{\theta}_{\max}|$ değerinin ulaşabileceği maksimum değer olduğunu göstermektedir. Bu açı, diskin minimum gerekli hız değerinin bulunmasında yardımcı olur. Jiroskopun $-\pi/2 \leq \bar{\theta} \leq \pi/2$ açıları arasında karalı salınım yapacağı düşünülerek müsaade edilen $|\bar{\theta}_{\max} \cos \bar{\theta}_{\max}| = 0.5611$ rad değerini geçemeyeceği sonucuna varılır.

2.2. Jiroskopun Tek Katlı Yapıya Uygulanışı

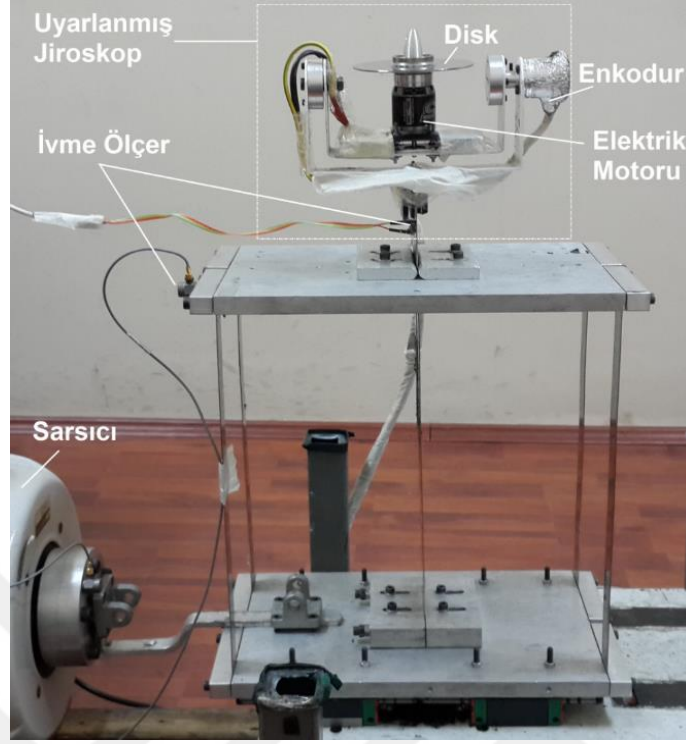
2.2.1. Tek Katlı Yapının Deneysel Modeli

Tek katlı bina için oluşturulan deneysel model, Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Tek katlı bina modeli Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de görüldüğü gibi alt ve üst tablolardan oluşan iki alüminyum blok ve bu blokları birbirine bağlayan dört adet yaylanabilir çelik kolondan oluşmaktadır. Bu yapı temel olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır. Uyarlanmış jiroskop dediğimiz birinci kısım; jiroskopu taşıyan yaylanabilir çelik kolonun binanın üst bloğundan (tablasından) yukarı çıkan kısım ve diğer serbest uçta bağlı olan jiroskoptan oluşmaktadır. İkinci kısım ise jiroskopu taşıyan yaylanabilir çelik kolonun binanın üst bloğundan (tablasından) aşağı uzanan kısım ve üst bloğu taşıyan diğer dört adet yaylanabilir kolonların diğer uçtan alt bloğa (alt katın zeminine) ankastre bağlanmasıyla oluşan tek katlı yapıdır. Binanın zemin tablası birbirine paralel iki kızak üzerine oturtularak, sadece yatay doğrultuda istenilen yer değiştirme hareketini yapabilecek şekilde monte edilmiştir. Dikdörtgen kesitli çelik kolonların malzeme yoğunluğu, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ve eksenel yöndeki Elastisite modülü, $E = 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olarak kabul edilmiştir. Tek katlı bina modeline ait diğer tüm fiziksel veriler Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi tek katlı bina modelinin zemin katı hiçbir esnemeye müsaade etmeyecek şekilde metal bir bağlantı ile sarsıcıya (LDS V450) civatalar ile bağlanmıştır. Böylelikle sarsıcıdan belli bir frekans ve zorlayıcı genlikle gelen hareket yatay olarak hiçbir kayba uğramadan binanın alt

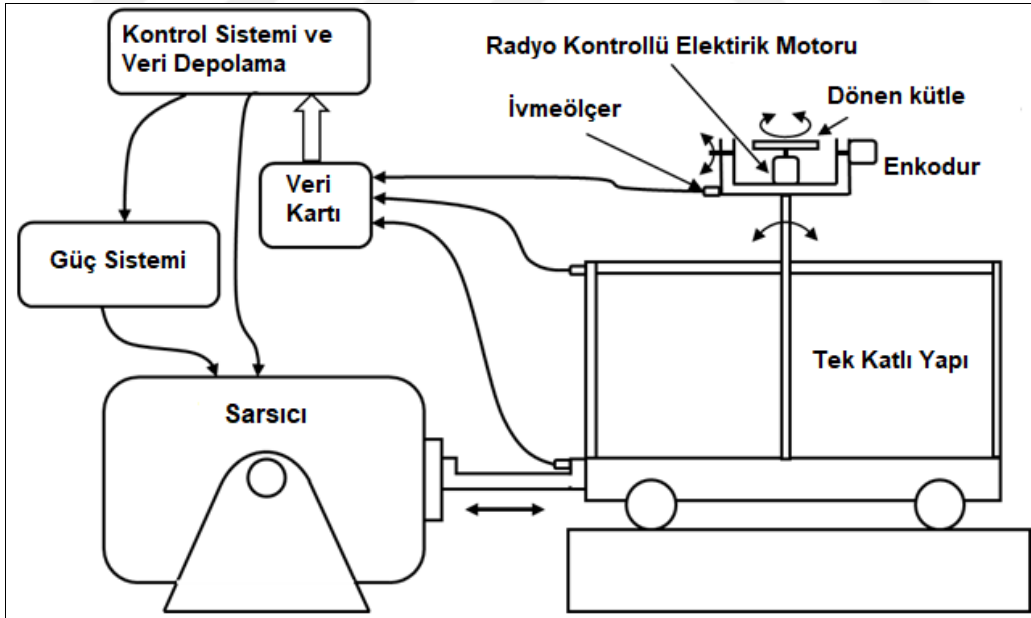
zeminine iletilmektedir. Sarsıcının kontrolü Brüel & Kjaer / LDS CometUSB vibrasyon kontrol cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, bu cihaz yardımıyla deneyler için uygun zorlayıcının frekans aralıkları, zorlayıcının yer değiştirme genlikleri ve taramada zorlayıcının frekans artım miktarı belirlenmiştir. Tüm deneysel çalışmalarda zorlayıcı kuvvet olarak “harmonik”, tarama tipi olarak “doğrusal” ve artım oranı olarak ise “0.01 Hz/sn” seçilmiş ve sabit tutulmuştur.

Yapıda oluşan yer değiştirmeler ivmeölçerler kullanılarak kaydedilmiş olup, ivmeölçerlerin (DeltaTron accelerometers - Type 4513), yapıdan aldıkları elektrik sinyalleri doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullandırma ünitelerinden (PA500L amplifier) geçirildikten sonra veri toplama ünitesine aktarılmıştır. Şekil 2.4’deki deney düzeneğinin şematik resminden de anlaşılacağı üzere veri toplama ünitesi (Brüel & Kjaer / LDS Comet USB), ivmeölçerlerden gelen sinyallerin ölçüm geometrisini de dikkate alarak yer değiştirme, hız ve ivme olarak derlenmesini (multiple channel control, SCO-02V-01 ve filtre edilmesini, SCO-02V-02) sağlamaktadır. Sinyaller içeriklerine göre uygun hızda ve çözünürlükte örneklendikten sonra bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Jiroskop salınımının açısal yer değiştirmesine ait enkodur (RI 30-O, incremental encoder) sinyalleri ise doğrudan veri toplama sistemine kaydedilmiştir. Jiroskop disklerini taşıyan elektrik motorunun (NTM Prop Drive Series 35-36A 1800Kv / 875w) devir sayısı ise uzaktan radyo kontrol sistemiyle (FlySky FS-T6B) kumanda edilmiştir.

Tek katlı yapı sabit tutularak jiroskopu taşıyan kolonun doğal frekansı (ω_1) deneysel olarak ölçülmüştür. Ayrıca, jiroskopu taşıyan kolonu da tek katlı yapıya sabitledikten sonra, tek katlı yapının doğal frekansı (ω_2) deneysel olarak ölçülmüştür. Tek katlı yapıyı taşıyan kolonların uzunlukları ayarlanarak binanın doğal frekansı değiştirilebilmektedir. Ancak, verileri karşılaştırabilmek için kat yüksekliği tüm deneylerde sabit olacak şekilde jiroskopu taşıyan kolonun uzunluğu değiştirilerek farklı frekans oranları elde edilmiştir. Böylece, bu iki frekansın birbirine göre olan farklı oranları için yapı, değişken disk hızı, disk kütlesi ve zorlayıcının frekansı için teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.



Şekil 2.3. Deney modelinin (tek katlı yapı) genel görünümü



Şekil 2.4. Deney düzeneğinin şematik resmi

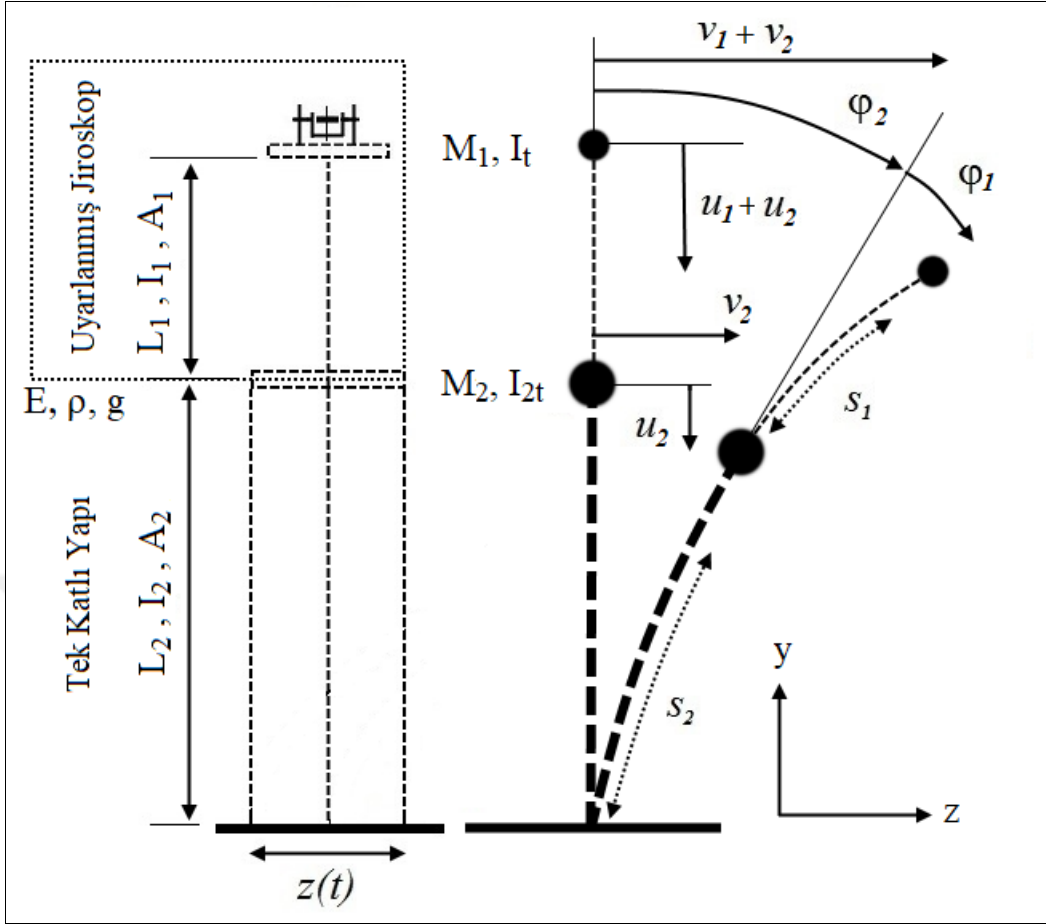
Tablo 1. Tek katlı deney modelinin fiziksel değerleri

Sembol	Sayısal Değer	Açıklama
ρ	7850 kg/m ³	Kolonlara ait malzemenin yoğunluğu
z_0	0.005 m	Sarsıcı genliği
E	210e9 N/m ²	Elastisite modülü
L_1	0.10 - 0.20 m	Jiroskopu taşıyan kolonun boyu
L_2	0.10 - 0.21 m	Tek katlı yapının yüksekliği
h_1	0.002 m	Jiroskopu taşıyan kolonun kalınlığı
h_2	0.001 m	Tek katlı yapıyı taşıyan kolonların kalınlığı
M_1	0.65 kg	Jiroskopu taşıyan kolonun uç kütlesi
M_2	2.75 kg	Tek katlı yapının serbest ucundaki kütle
m_f	0.311 kg	Mafsal ve motorun toplam kütlesi
I_1	2.5333e-11 m ⁴	Jiroskopu taşıyan kolonun geometrik atalet momentini
I_2	3.3667e-11 m ⁴	Tek katlı yapıda geometrik atalet momentini
I_t	1e-2 kg.m ²	Jiroskopu taşıyan kolonun serbest ucundaki kütlelerin atalet momentini
I_{2t}	12e-2 kg.m ²	Tek katlı yapının serbest ucundaki kütlelerin atalet momentini
A_1	7.6000e-05 m ²	Jiroskopu taşıyan kolonun kesit alanı
A_2	1.7600e-04 m ²	Tek katlı yapıyı taşıyan kolonların toplam kesit alanı
R	0.04 m	Mafsal ve motor ağırlık merkezi yarıçapı
g	9.81 m/s ²	Yer çekimi ivmesi
k_g	0 N.m /rad	Jiroskop yayının rijitlik katsayısı
c_g	0.0005 N.m.s/rad	Jiroskop sönüm katsayısı
m	0.023-0.115 kg	Jiroskopun disk kütlesi
r	0.05 m	Disk yarıçapı
I_p	$(mr^2)/2+2.66e-5$ kg.m ²	Disk polar atalet momentini
I_o	$(mr^2)/4$ kg.m ²	Disk atalet momentini
I_{fx}	6.74e-4 kg.m ²	Mafsalın x yönündeki atalet momentini
I_{fy}	6.29e-4 kg.m ²	Mafsalın y yönündeki atalet momentini
I_{fz}	3.60e-4 kg.m ²	Mafsalın z yönündeki atalet momentini
Ω	0-10000 dev/dak	Disk dönme hızı

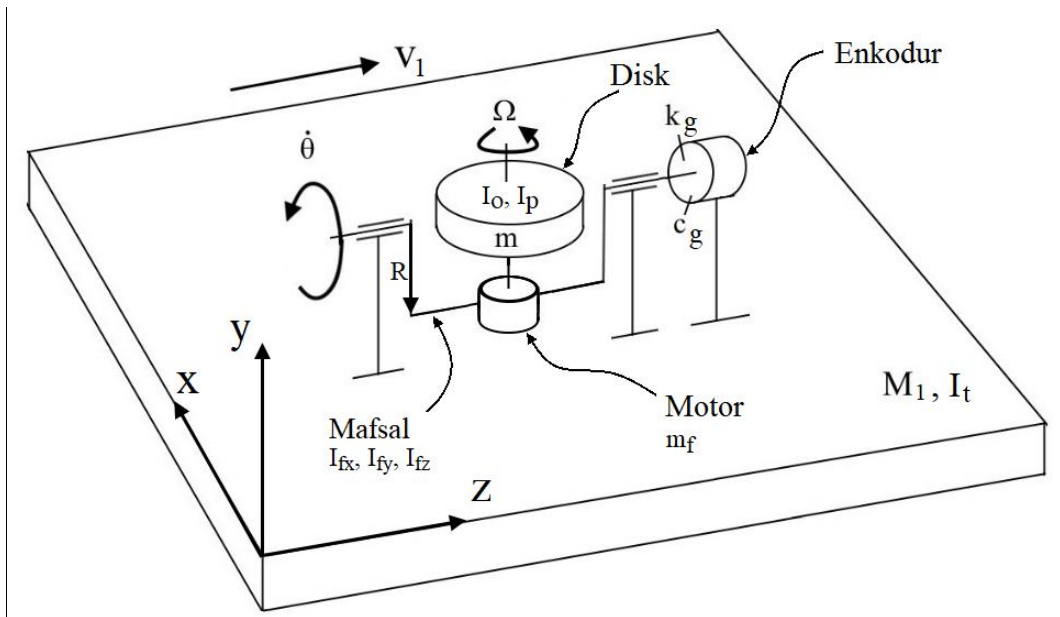
2.2.2. Yapının Matematiksel Modeli

Teorik analizin yapılabilmesi için, modelin herhangi bir andaki davranışı Şekil 2.5'deki gibi olduğu kabul edilmiştir. Şekil 2.5'de, L_1 ve L_2 uzunlukları sırası ile jiroskopu taşıyan kolonun boyunu ve tek katlı yapının yüksekliğini gösterirken, L_1 ve L_2 uzunluklarının serbest uçlarındaki yatay ve dikey yer değiştirmeler ise sırasıyla v_1 , u_1 , v_2 ve u_2 ile gösterilmiştir. Bunlara ilave olarak Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, jiroskopu taşıyan kolonun dikeyle olan açısız yer değiştirmesi φ_1 ve binayı taşıyan kolonların dikeyle yaptığı açısız yer değiştirme ise φ_2 ile gösterilirken, L_1 ve L_2 uzunluklarına sahip kolonların kavis uzunlukları boyunca mesafeler sırasıyla s_1 ve s_2 ile gösterilmiştir. Kullanılan kolonların boyunun kalınlığına oranının büyük olması nedeniyle ($L_1/h_1 > 20$ ve $L_2/h_2 > 20$) hareket denklemlerinin elde edilmesinde Euler-Bernoulli teorisi kullanılmıştır. $L_1/h_1 > 20$ ve $L_2/h_2 > 20$ durumunda kolon ince olarak kabul edilip, kayma deformasyonu ve burulma ataletleri de ihmal edilmiştir. Kolonların toplam kesit alanları A_1 ve A_2 , düzlem alan atalet momentleri I_1 ve I_2 ile gösterilmiştir. Tüm kolonların kütle yoğunluğu ve eşdeğer elastisite modülü aynı değerlere sahip olup, sırasıyla ρ ve E ile belirtilmiştir. Tek katlı yapının zemin tablasına uygulanan ve $z(t)$ ile ifade edilen zorlayıcı yer değiştirmesi ise, harmonik olarak kabul edilmiştir.

Şekil 2.6'da ise sadece uyarlanmış jiroskopun modeli görülmekte olup, modelden de anlaşılacağı gibi jiroskop, M_1 kütle sine ve I_1 atalet momentine sahip bir platformun üzerine yerleştirilmiştir. Jiroskop, θ açısıyla serbest salınım hareketi yapabilen bir mafsal (gimbal), üzerine yerleştirilmiş elektrik motoru ve elektrik motorunun şaftına montaj edilmiş kendi geometrik eksenini etrafında ve ayarlanabilen devir sayılarında serbestçe dönebilen bir diskten oluşmaktadır. Elektrik motorunun şaftına montaj edilmiş diskin kütlesi m ve diskin devir sayısı Ω ile ifade edilirken, mafsal ve elektrik motorunun toplam kütlesi ise m_f ile ifade edilmiştir. Bunlarla birlikte, matematiksel modelde jiroskopun θ salınımına etki ettiği düşünülen yay katsayısı k_g ve sönüm katsayısı c_g matematiksel modele ilave edilmiştir.



Şekil 2.5. Tek katlı yapı ve uyarlanmış jiroskop modeli.



Şekil 2.6. Uç kütleye (M_1) bağlı tek eksenli jiroskop modeli.

Şekil 2.5’de görülen uyarlanmış jiroskop – tek katlı bina modelinin kinetik ve potansiyel enerji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Aşağıdaki denklemlerde nokta işareti ile zamana (t) göre türev ifade edilmiştir.

Kinetik enerji denklemi,

$$\begin{aligned}
T &= \frac{1}{2} \rho A_1 \int_0^{L_1} \left\{ \left[\dot{v}_1(s_1, t) + \dot{z}(t) + \dot{v}_2(L_2, t) \right]^2 + \left[\dot{u}_1(s_1, t) + \dot{u}_2(L_2, t) \right]^2 \right\} ds_1 \\
&+ \frac{1}{2} \rho A_2 \int_0^{L_2} \left\{ \left[\dot{v}_2(s_2, t) + \dot{z}(t) \right]^2 + \dot{u}_2(s_2, t)^2 \right\} ds_2 \\
&+ \frac{1}{2} M_1 \left\{ \left[\dot{v}_1(L_1, t) + \dot{z}(t) + \dot{v}_2(L_2, t) \right]^2 + \left[\dot{u}_1(L_1, t) + \dot{u}_2(L_2, t) \right]^2 \right\} \\
&+ \frac{1}{2} M_2 \left\{ \left[\dot{v}_2(L_2, t) + \dot{z}(t) \right]^2 + \dot{u}_2(L_2, t)^2 \right\} \\
&+ \frac{1}{2} I_t (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 + \frac{1}{2} I_{2t} \dot{\phi}_2^2 + T_{jiro} + T_{mafsal}
\end{aligned} \tag{2.45}$$

Burada,

$$T_{jiro} = \frac{1}{2} I_o \left\{ \dot{\theta}^2 + \left[(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \cos \theta \right]^2 \right\} + \frac{1}{2} I_p \left[\Omega + (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \sin \theta \right]^2 \tag{2.46}$$

$$T_{mafsal} = \frac{1}{2} I_{fx} \left[(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \cos \theta \right]^2 + \frac{1}{2} I_{fy} \left[(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \sin \theta \right]^2 + \frac{1}{2} I_{fz} \dot{\theta}^2 \tag{2.47}$$

Potansiyel enerji denklemi,

$$\begin{aligned}
V &= \frac{1}{2} EI_1 \int_0^{L_1} q_1(s_1, t)^2 ds_1 - \rho A_1 g \int_0^{L_1} \left[u_1(s_1, t) + u_2(L_2, t) \right] ds_1 \\
&+ \frac{1}{2} EI_2 \int_0^{L_2} q_2(s_2, t)^2 ds_2 - \rho A_2 g \int_0^{L_2} u_2(s_2, t) ds_2 \\
&- M_1 g \left[u_1(L_1, t) + u_2(L_2, t) \right] - M_2 g u_2(L_2, t) + m_f g R (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} k_g \theta^2
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Ayrıca, jiroskop hareketinin sönümlenmesi sonucunda oluşan kayıp fonksiyonu D;

$$D = \frac{1}{2} c_g \dot{\theta}^2 \quad (2.49)$$

Kolonun uç kütlesinin, kolonun kendi kütlesinden çok daha büyük olduğu düşünülürse, problemin çözümünde kullanılacak denklemler için birinci mod yeterli olmaktadır. Böylece, kolonun n-serbestlik noktasındaki yer değiştirmesi, şekil fonksiyonu, $\psi(s_n)$, cinsinden denklem (2.50)'deki gibi ifade edilir [76]

$$v(s_n, t) = v(t) \psi(s_n) \quad (2.50)$$

Burada, yer değiştirmenin $s_n=0$ da sınır şartlarını sağlayan yaklaşık şekil fonksiyonu denklem (2.51)'de gibi ifade edilebilir [76].

$$\psi(s_n) = 1 - \cos\left(\frac{\pi s_n}{2L_n}\right) \quad (2.51)$$

Böylece, denklem (2.50)'de belirtilen yer değiştirme modeli, enerji denklemleri (2.45) ve (2.48)'de yerine konarak, gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra hareket denklemlerinin integral işlemlerinin sonucu denklem (2.52)'de görüldüğü gibi elde edilir. Burada, $n=1$ için $i=0$ ve $n=2$ için $i=1$ olarak ifade edilmiştir.

$$G_{i1} = \int_0^{L_n} (\psi(s_n))^2 ds_n = L_n \left(\frac{3}{2} - \frac{4}{\pi} \right)$$

$$G_{i2} = \int_0^{L_n} \psi(s_n) ds_n = \frac{L_n}{\pi} (\pi - 2)$$

$$G_{i3} = \int_0^{L_n} \left(\int_0^{s_n} (\psi'(\Gamma_n))^2 d\Gamma_n \right)^2 ds_n = \frac{\pi^2}{384L_n} (2\pi^2 - 9)$$

$$G_{i4} = \int_0^{L_n} (\psi'(s_n))^2 ds_n = \frac{\pi^2}{8L_n}$$

$$G_{i5} = \psi'(L_n) = \frac{\pi}{2L_n} \quad (2.52)$$

$$G_{i6} = \int_0^{L_n} (\psi''(s_n))^2 ds_n = \frac{\pi^4}{32L_n^3}$$

$$G_{i7} = \int_0^{L_n} (\psi'(s_n)\psi''(s_n))^2 ds_n = \frac{\pi^6}{512L_n^5}$$

$$G_{i8} = \int_0^{L_n} (\psi'(s_n))^4 (\psi''(s_n))^2 ds_n = \frac{\pi^8}{4096L_n^7}$$

$$G_{i9} = \int_0^{L_n} \left(\int_0^{s_n} (\psi'(\Gamma_n))^2 d\Gamma_n \right) ds_n = \frac{1}{16} (\pi^2 - 4)$$

Denklem (2.52)'deki integral sabitleri, enerji denklemlerinde yerine konulduğunda sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri sırası ile aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
T = & \frac{1}{2} \rho A_1 \left(G_1 \dot{v}_1^2 + 2G_2 \dot{v}_1 \dot{z} + \dot{z}^2 L_1 + \dot{v}_2^2 L_1 + 2G_2 \dot{v}_1 \dot{v}_2 + 2\dot{z} \dot{v}_2 L_1 + G_3 v_1^2 \dot{v}_1^2 \right) \\
& + 2G_9 G_{14} v_1 \dot{v}_1 v_2 \dot{v}_2 + G_{14}^2 v_2^2 \dot{v}_2^2 L_1 \\
& + \frac{1}{2} \rho A_2 \left(G_{11} \dot{v}_2^2 + 2G_{12} \dot{v}_2 \dot{z} + \dot{z}^2 L_2 + G_{13} v_2^2 \dot{v}_2^2 \right) \\
& + \frac{1}{2} M_1 \left\{ \left[\dot{v}_1(t) + \dot{z}(t) + \dot{v}_2(t) \right]^2 + G_4^2 v_1^2 \dot{v}_1^2 \right\} \\
& + 2G_4 G_{14} v_1 \dot{v}_1 v_2 \dot{v}_2 + G_{14}^2 v_2^2 \dot{v}_2^2 \\
& + \frac{1}{2} M_2 \left\{ \left[\dot{v}_2(t) + \dot{z}(t) \right]^2 + G_{14}^2 v_2^2 \dot{v}_2^2 \right\} \\
& + \frac{1}{2} I_t (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 + \frac{1}{2} I_{2t} \dot{\phi}_2^2 + T_{jyro} + T_{mafsal}
\end{aligned} \tag{2.53}$$

$$\begin{aligned}
V = & \frac{1}{2} EI_1 \left(G_6 v_1^2 + G_7 v_1^4 + \frac{1}{4} G_8 v_1^6 \right) - \rho A_1 g \left(\frac{1}{2} G_9 v_1^2 + \frac{1}{2} G_{14} v_2^2 L_1 \right) \\
& + \frac{1}{2} EI_2 \left(G_{16} v_2^2 + G_{17} v_2^4 + \frac{1}{4} G_{18} v_2^6 \right) - \rho A_2 g \left(\frac{1}{2} G_{19} v_2^2 \right) \\
& - M_1 g \left(\frac{1}{2} G_4 v_1^2 + \frac{1}{2} G_{14} v_2^2 \right) - M_2 g \left(\frac{1}{2} G_{14} v_2^2 \right) + m_f g R (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} k_g \theta^2
\end{aligned} \tag{2.54}$$

2.2.2.1. Uyarlanmış Jiroskopun Serbest Uçtaki Hareket Denklemi

Uyarlanmış jiroskopun hareket denkleminin Lagrange formu en genel haliyle aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{v}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial v_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{v}_1} + \frac{\partial V}{\partial v_1} = 0 \tag{2.55}$$

Kinetik, potansiyel ve kayıp fonksiyonuna ait denklemler yukarıdaki Lagrange denkleminde (2.55) yerine konur ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, uyarlanmış jiroskopun yatay yer değiştirmesi v_1 için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \ddot{v}_1 \left[\alpha_1 + \alpha_2 v_1^2 + \alpha_3 v_1^4 + \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right)^2 \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \right] \\
& + v_1 \dot{v}_1^2 \left[\alpha_2 + 2\alpha_3 v_1^2 + G_5^3 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \right] \\
& + v_1 \left\{ \begin{array}{l} \alpha_4 + \alpha_5 v_1^2 + \alpha_6 v_1^4 + \alpha_7 (v_2 \ddot{v}_2 + \dot{v}_2^2) \\ + \frac{1}{2} I_t \left[\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2 (v_2 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_2^2) G_{15}^3 \right] G_5^3 v_1 \end{array} \right\} \\
& + \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} I_p - I_o \\ + I_{fy} - I_{fx} \end{array} \right) \left[\begin{array}{l} \dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \\ + \dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \end{array} \right] \dot{\theta} \sin 2\theta \\ + \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \left[\begin{array}{l} \ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2 (v_2 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_2^2) G_{15}^3 \\ + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (2.56) \\
& = -I_t \left[\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2 (v_2 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_2^2) G_{15}^3 \right] G_5 - \gamma_1 (\ddot{v}_2 + \ddot{z})
\end{aligned}$$

Burada,

$$\alpha_1 = \rho A_1 G_1 + M_1 + I_t G_5^2$$

$$\alpha_2 = \rho A_1 G_3 + M_1 G_4^2 + I_t G_5^4$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{4} I_t G_5^6$$

$$\alpha_4 = EI_1 G_6 - \rho A_1 g G_9 - M_1 g G_4 \quad (2.57)$$

$$\alpha_5 = 2EI_1 G_7$$

$$\alpha_6 = \frac{3}{4} EI_1 G_8$$

$$\alpha_7 = \rho A_1 G_9 G_{14} + M_1 G_4 G_{14}$$

$$\gamma_1 = \rho A_1 G_2 + M_1$$

2.2.2.2. Tek Katlı Yapının Hareket Denklemi

Tek katlı yapının hareket denkleminin Lagrange formu en genel haliyle aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{v}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial v_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{v}_2} + \frac{\partial V}{\partial v_2} = 0 \quad (2.58)$$

Kinetik, potansiyel ve kayıp fonksiyonuna ait denklemler yukarıdaki Lagrange denkleminde (2.58) yerine konur ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, tek katlı yapının yatay yer değiştirmesi v_2 için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \ddot{v}_2 \left[\alpha_8 + \alpha_9 v_2^2 + \alpha_{10} v_2^4 + \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right)^2 \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \right] \\
& + v_2 \dot{v}_2^2 \left[\alpha_9 + 2\alpha_{10} v_2^2 + G_{15}^3 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \right] \\
& + v_2 \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{11} + \alpha_{12} v_2^2 + \alpha_{13} v_2^4 + \alpha_7 (v_1 \ddot{v}_1 + \dot{v}_1^2) \\ + \frac{1}{2} I_t \left[\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1 (v_1 \ddot{v}_2 + 2\dot{v}_1^2) G_5^3 \right] G_{15}^3 v_2 \end{array} \right\} \\
& + \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} I_p - I_o \\ + I_{fy} - I_{fx} \end{array} \right) \left[\begin{array}{l} \dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \\ + \dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \end{array} \right] \dot{\theta} \sin 2\theta \\ + \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \left[\begin{array}{l} \ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1 (v_1 \ddot{v}_1 + 2\dot{v}_1^2) G_5^3 \\ + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (2.59) \\
& = -I_t \left[\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1 (v_1 \ddot{v}_1 + 2\dot{v}_1^2) G_5^3 \right] G_{15} - \gamma_1 \ddot{v}_1 - \gamma_2 \ddot{z}
\end{aligned}$$

Burada,

$$\alpha_8 = \rho A_1 L_1 + \rho A_2 G_{11} + M_1 + M_2 + (I_t + I_{2t}) G_{15}^2$$

$$\alpha_9 = \rho A_1 G_{14}^2 + \rho A_2 G_{13} + (M_1 + M_2) G_{14}^2 + (I_t + I_{2t}) G_{15}^4$$

$$\alpha_{10} = \frac{1}{4} (I_t + I_{2t}) G_{15}^6$$

$$\alpha_{11} = EI_2 G_{16} - \rho A_1 g G_{14} L_1 - \rho A_2 g G_{19} - (M_1 + M_2) g G_{14} \quad (2.60)$$

$$\alpha_{12} = 2EI_2 G_{17}$$

$$\alpha_{13} = \frac{3}{4} EI_2 G_{18}$$

$$\gamma_2 = \rho A_1 L_1 + \rho A_2 G_{12} + M_1 + M_2$$

2.2.2.3. Jiroskopun Hareket Denklemi

Jiroskopa ait hareket denkleminin Lagrange formu en genel haliyle aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (2.61)$$

Kinetik, potansiyel ve kayıp fonksiyonuna ait denklemler yukarıdaki Lagrange denkleminde (2.61) yerine konur, gerekli matematiksel işlemler ve sadeleştirmeler yapılırsa, jiroskopa ait hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Denklem (2.62)).

$$\begin{aligned} & (I_o + I_{fx}) \ddot{\theta} - \frac{1}{2} (I_p - I_o + I_{fy} - I_{fx}) \left[\begin{array}{l} \dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \\ + \dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \end{array} \right]^2 \sin 2\theta \\ & - I_p \Omega \left[\begin{array}{l} \dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \\ + \dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \end{array} \right] \cos \theta + m_f g R \sin \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0 \end{aligned} \quad (2.62)$$

2.2.2.4. Tek Kath Yapının Küçük Yer Değişimleri İçin Hareket Denklemleri

Yukarıda elde ettiğimiz hareket denklemlerine yaklaşımın en kolay yolu hareketin denge pozisyonunda kinetik enerjisinin sıfır olduğunu düşünmektir. Sistemin denge pozisyonunda, bir başka deyişle $t = 0$ anında, $v_1 \approx 0$, $v_2 \approx 0$ ve $\dot{\theta} \approx 0$ olduğu kabul edilirse,

denklemler (2.56), (2.59) ve (2.62) ile ifade edilen hareket denklemleri sırasıyla aşağıdaki formlara indirgenmiş olur.

$$\begin{aligned}
& \ddot{v}_1 \left[\alpha_1 + \alpha_2 v_1^2 + \alpha_3 v_1^4 + \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right)^2 \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \right] \\
& + v_1 \left[\alpha_4 + \alpha_5 v_1^2 + \alpha_6 v_1^4 + \alpha_7 v_2 \ddot{v}_2 + \frac{1}{2} I_t \left(\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 \ddot{v}_2 G_{15}^3 \right) G_5^3 v_1 \right] \\
& + \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) \left[\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \\ + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \end{array} \right] \left(\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 \ddot{v}_2 G_{15}^3 \right) \\
& = -I_t \left(\ddot{v}_2 G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 \ddot{v}_2 G_{15}^3 \right) G_5 - \gamma_1 (\ddot{v}_2 + \ddot{z})
\end{aligned} \tag{2.63}$$

$$\begin{aligned}
& \ddot{v}_2 \left[\alpha_8 + \alpha_9 v_2^2 + \alpha_{10} v_2^4 + \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right)^2 \left(\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{array} \right) \right] \\
& + v_2 \left[\alpha_{11} + \alpha_{12} v_2^2 + \alpha_{13} v_2^4 + \alpha_7 v_1 \ddot{v}_1 + \frac{1}{2} I_t \left(\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 \ddot{v}_1 G_5^3 \right) G_{15}^3 v_2 \right] \\
& + \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \left[\begin{array}{l} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \\ + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \end{array} \right] \left(\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 \ddot{v}_1 G_5^3 \right) \\
& = -I_t \left(\ddot{v}_1 G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 \ddot{v}_1 G_5^3 \right) G_{15} - \gamma_1 \ddot{v}_1 - \gamma_2 \ddot{z}
\end{aligned} \tag{2.64}$$

$$\begin{aligned}
& (I_o + I_{fx}) \ddot{\theta} - I_p \Omega \left[\dot{v}_1 \left(G_5 + \frac{1}{2} v_1^2 G_5^3 \right) + \dot{v}_2 \left(G_{15} + \frac{1}{2} v_2^2 G_{15}^3 \right) \right] \cos \theta \\
& + m_f g R \sin \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0
\end{aligned} \tag{2.65}$$

Jiroskopun doğal frekansını elde edebilmek için denklem (2.65)'deki $m_f g R \sin \theta$ teriminde bulunan sinüs fonksiyonu yerine θ 'nın küçük değerleri için $\sin \theta = \theta - \theta^3/3!$ Maclaurin açılımı kullanılabilir. Ayrıca, uyarlanmış jiroskop, tek katlı yapı ve jiroskop modeli için elde edilen hareket denklemleri (denklemler (2.63), (2.64) ve (2.65)) yüksek dereceden nonliner denklemlerdir. Bu denklemlerdeki yer değiştirmelerin çok küçük

olduğu kabulü yapılarak, yüksek dereceli terimlerin harekete etkisi yaklaşık sıfıra indirilmiş olacağından, bu terimler ihmal edilebilirler. Böylece uyarlanmış jiroskop – tek katlı bina modeli için yeni hareket denklemleri aşağıda görüldüğü gibi (denklemler (2.66), (2.67) ve (2.68)) elde edilmiş olur.

$$\dot{v}_1 \mu_1 + v_1 \alpha_4 + (\varepsilon + \gamma_1 + I_t G_5 G_{15}) \dot{v}_2 + G_5 \Psi \dot{\theta} = -\gamma_1 \ddot{z} \quad (2.66)$$

$$\dot{v}_2 \mu_2 + v_2 \alpha_{11} + (\varepsilon + \gamma_1 + I_t G_5 G_{15}) \dot{v}_1 + G_{15} \Psi \dot{\theta} = -\gamma_2 \ddot{z} \quad (2.67)$$

$$(I_o + I_{fx}) \ddot{\theta} - \Psi (\dot{v}_1 G_5 + \dot{v}_2 G_{15}) + m_f g R \left(1 - \frac{\theta^2}{3!} \right) \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0 \quad (2.68)$$

Burada,

$$\Psi = I_p \Omega \cos \theta$$

$$\varepsilon = G_5 G_{15} \begin{pmatrix} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

$$\mu_1 = \alpha_1 + G_5^2 \begin{pmatrix} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (2.69)$$

$$\mu_2 = \alpha_8 + G_{15}^2 \begin{pmatrix} (I_o + I_{fx}) \cos^2 \theta \\ + (I_p + I_{fy}) \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

Doğal frekans belirlenirken jiroskopun presesyon açısı yaklaşık sıfıra eşit olacağından $\theta \cong 0$, denklemler (2.66), (2.67) ve (2.68)'den sırasıyla uyarlanmış jiroskopun, tek katlı yapının ve jiroskopun doğal frekansları aşağıda belirtildiği şekilde elde edilir;

$$\omega_{jirokolon}^2 = \frac{\alpha_4}{\alpha_1 + G_5^2 (I_o + I_{fx})} \quad (2.70)$$

$$\omega_{kat}^2 = \frac{\alpha_{11}}{\alpha_8 + G_{15}^2 (I_o + I_{fx})} \quad (2.71)$$

$$\omega_{jiro}^2 = \frac{m_f g R + k_g}{I_o + I_{fz}} \quad (2.72)$$

2.2.3. Tek Katlı Yapının Teorik Bulguları

Aşağıdaki teorik çalışmada uyarlanmış jiroskopun yapılardaki titreşimlerin sönümlenmesinde uygulanabilirliğinin incelenmesi amacıyla yapının ve uyarlanmış jiroskopun frekans – yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Frekans – yer değiştirme eğrilerini elde etmek amacıyla sistemin doğal frekansını içerecek şekilde zorlayıcının frekans aralığı belirlenmiş ve bu aralıkta zorlayıcının frekans değeri 0.01 Hz artırılarak seçilen frekans bölgesi taranmıştır. Simülasyonun başlangıcında ve zorlayıcının her bir frekans artımında, 0.01 saniyelik zaman adımı ile toplam 100 saniyelik (100 saniye sistemin kararlı hale gelmesi için yeterli bir süre olduğundan seçilmiştir) zaman – yer değiştirme simülasyonu yapılmış ve simülasyonun son 2 saniyelik kısmındaki maksimum yer değiştirme alınarak frekans – yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Bu simülasyonların başlangıcında yer değiştirme ve hız için sıfır başlangıç koşulları kullanılırken, sistemin fiziksel değerleri içinse Tablo 1’de verilen değerler kullanılmıştır. Hareket denklemleri (2.56), (2.59) ve (2.62)’ye ait bu simülasyonlar için matlab programı ve içindeki 4. mertebeden Runge-Kutta-Fehlberg açık (explicit) metoduna göre yazılmış ode45 paket programı kullanılmıştır.

Sistemin hareket denklemleri ikinci mertebeden adi differansiyel denklemler olup, bu denklemler birinci mertebeden adi diferansiyel denklem serisine indirgenerek Runge-Kutta-Fehlberg metodu ile çözülebilecek hale dönüştürülmüştür.

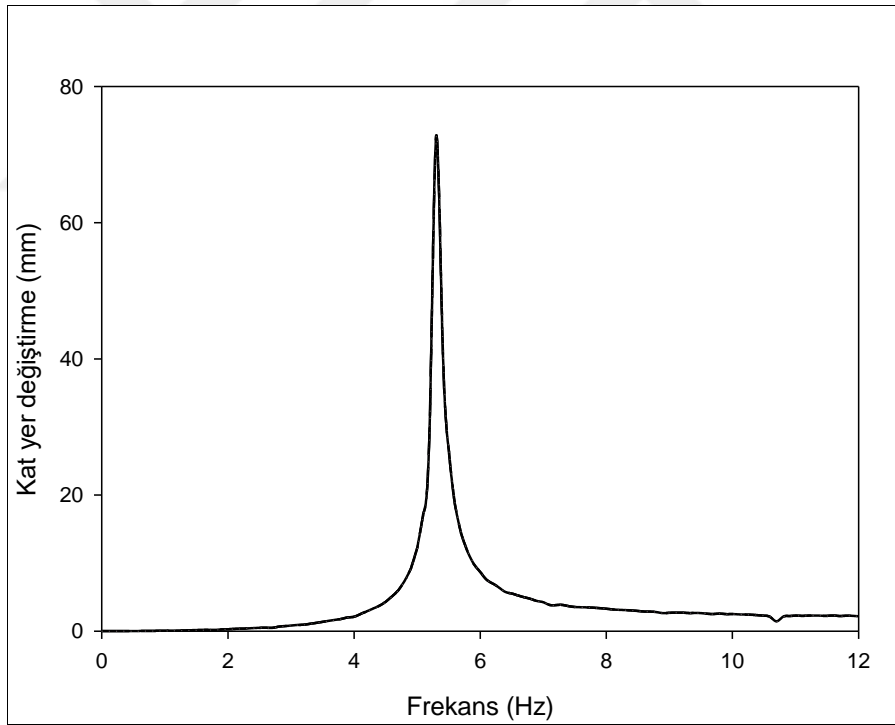
Tek katlı yapının deneysel ve teorik çalışmalarında sistemin ilk iki modu 0-12 Hz aralığında oluşmaktadır. Deney düzeneği, sarsıcının kapasitesine (311 Newton) uygun olarak 1.2:0.1:12 Hz aralığında kararlı çalışması için en uygun maksimum zorlayıcının yer

değiştirme genliği $z_0 = 0.005$ m olduğu belirlenmiş ve teorik analizlerde de bu yer değiştirme genliği seçilmiştir.

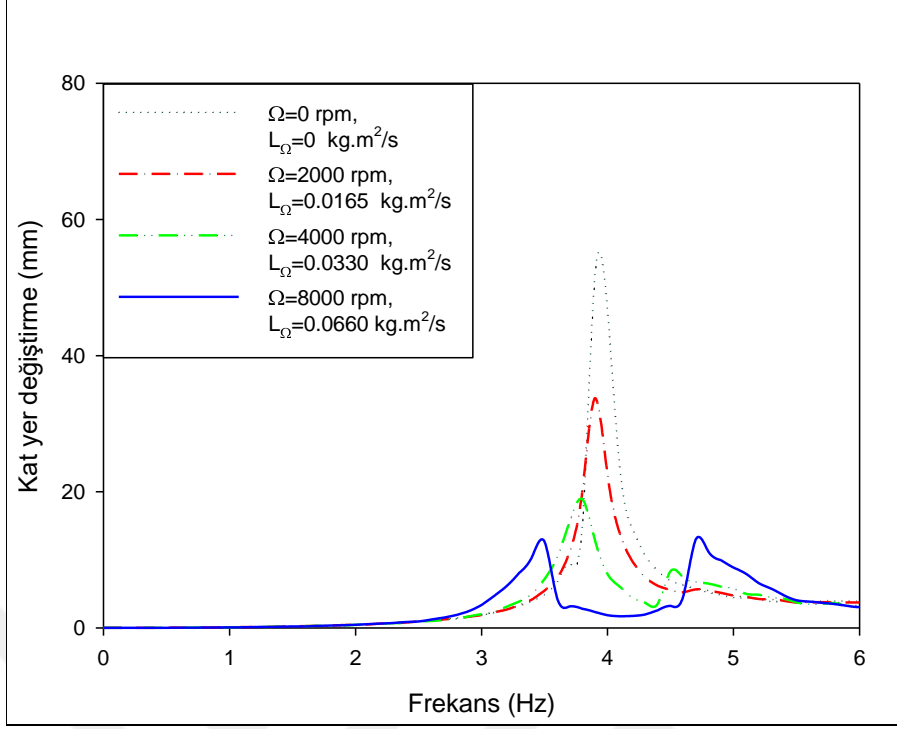
2.2.3.1. Açısal Momentumun Sönümlenme Üzerindeki Etkisi

Bu teorik çalışmada, sabit zorlayıcı yer değiştirme ($z_0 = 0.005$ m) ve tek katlı yapının doğal frekansı bir başka deyişle L_2 boyu sabit tutularak, jiroskopun kütlesi ve devir sayıları (açısal momentumu, $L_\Omega = I_p \Omega$) değiştirilerek, diskin kütlesinin ve dönme hızının bir başka deyişli diskin açısal momentumunun sönümlenmeye olan etkisi araştırıldı.

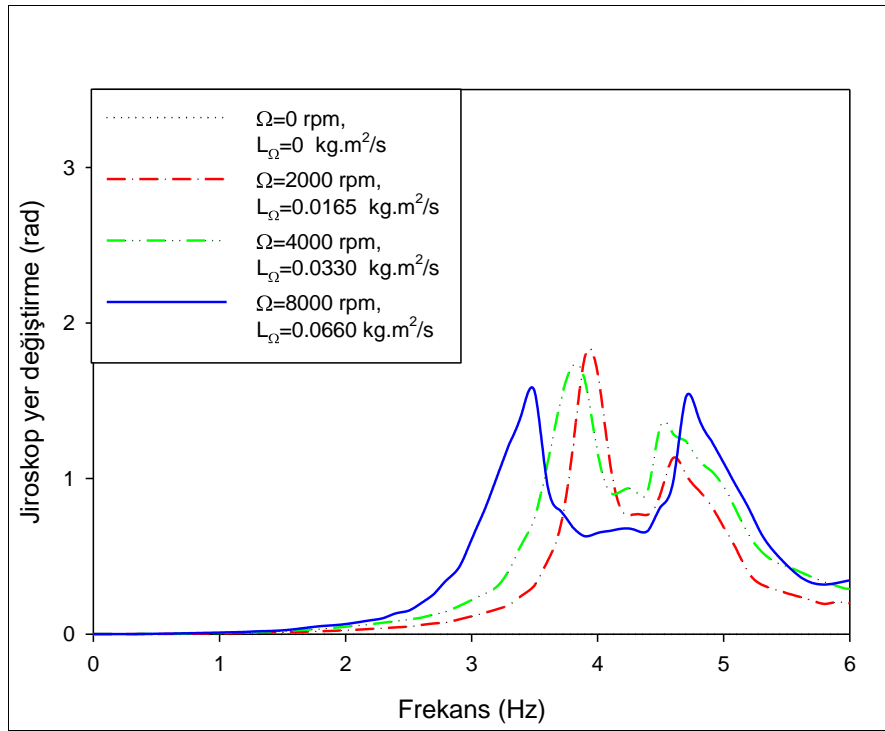
Tek katlı yapının üst katına montajlanan uyarlanmış jiroskop kolonunun sabitlenmesi (uyarlanmış jiroskopun etkisizleştirilmesi) durumunda yapının yer değiştirmesinin maksimum olduğu ve birinci modun son derece etkili olduğu Şekil 2.7’de görülmektedir.



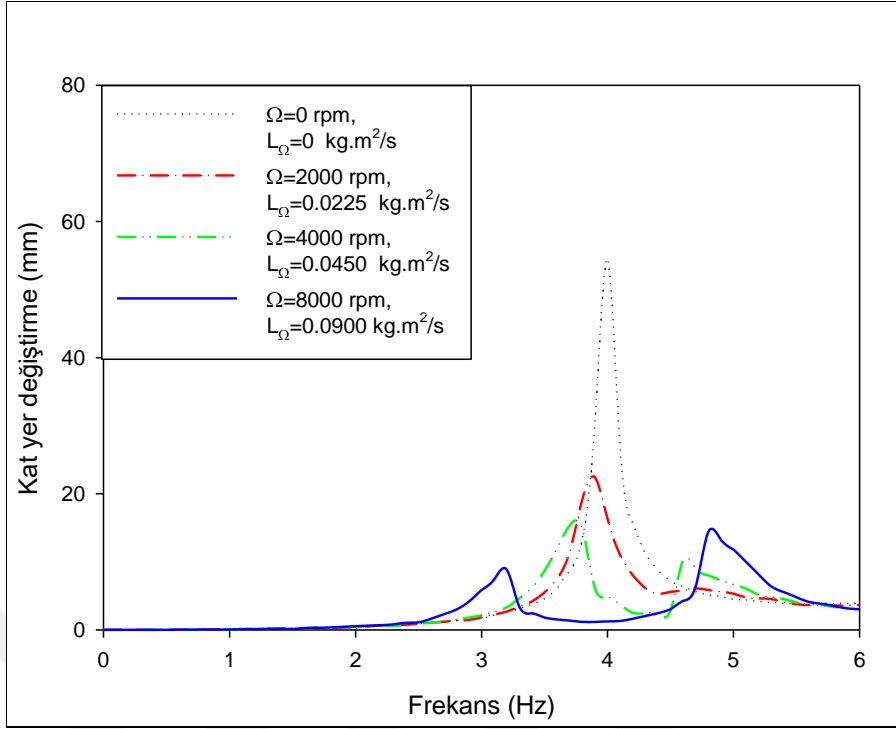
Şekil 2.7. Uyarlanmış jiroskopun etkisiz (jiroskopu taşıyan kolonun sabit) olduğu durum için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrisi



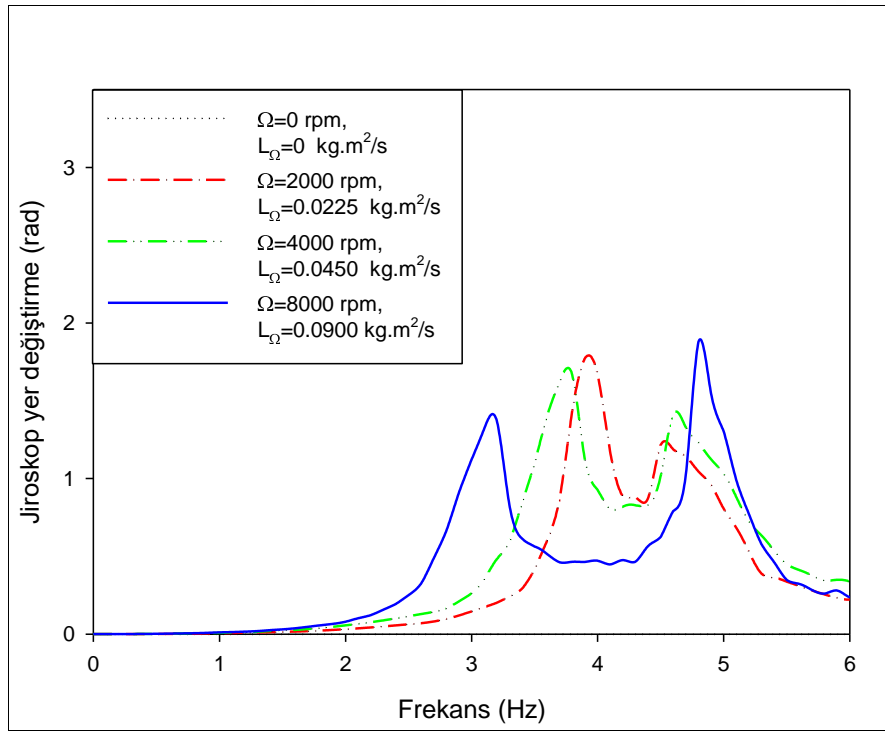
şekil 2.8. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 4.0$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 4.8$ Hz ve $m = 0.023$ kg)



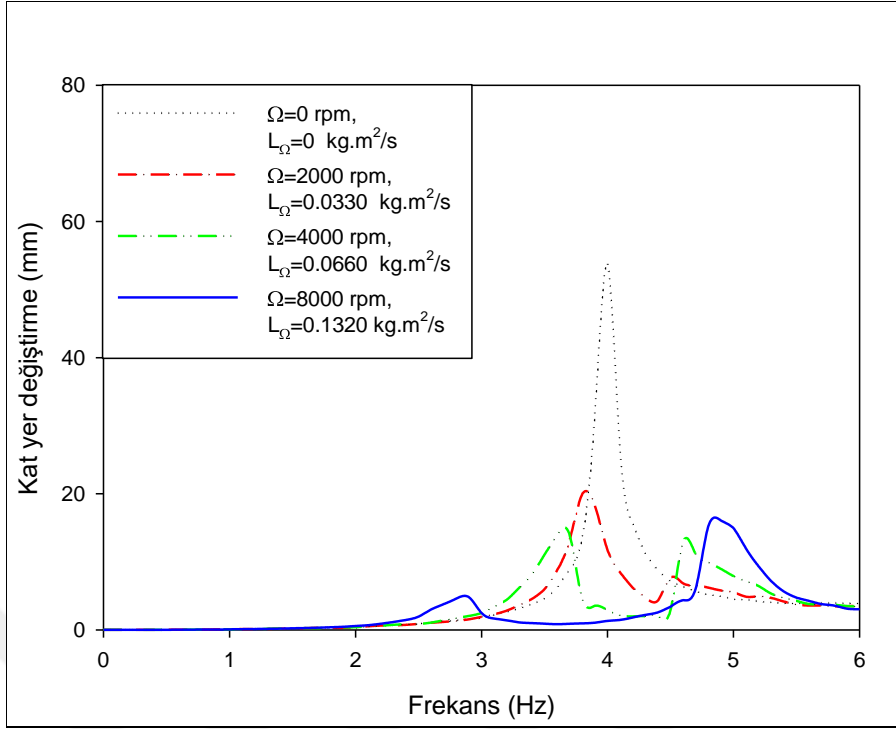
şekil 2.9. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 4.0$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 4.8$ Hz ve $m = 0.023$ kg)



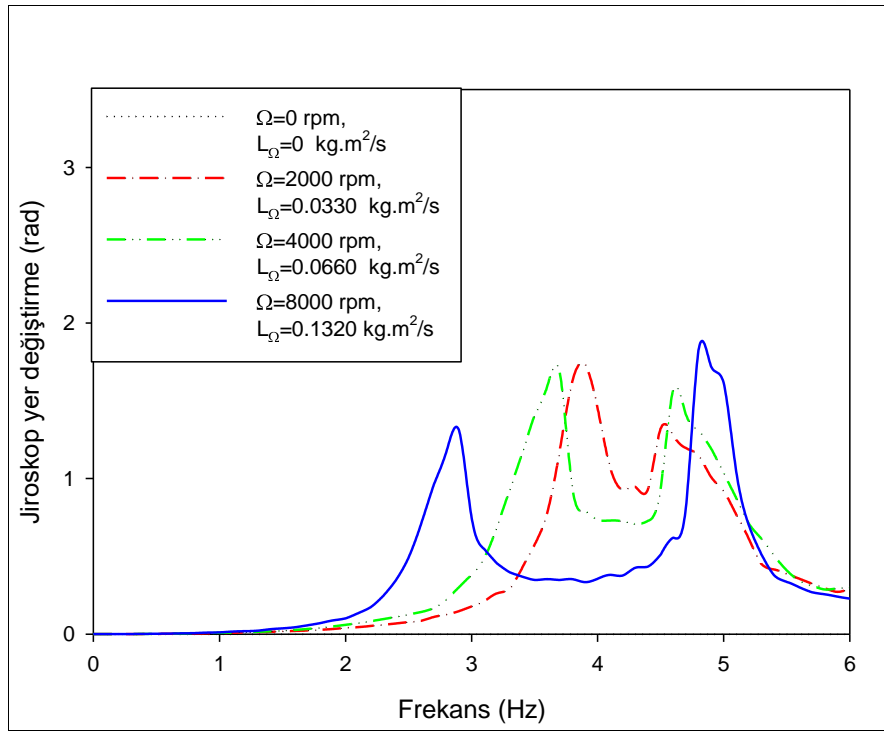
şekil 2.10. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 4.0$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 4.8$ Hz ve $m=0.046$ kg)



şekil 2.11. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 4.0$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 4.8$ Hz ve $m = 0.046$ kg)



şekil 2.12. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 4.0$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 4.8$ Hz ve $m = 0.069$ kg)

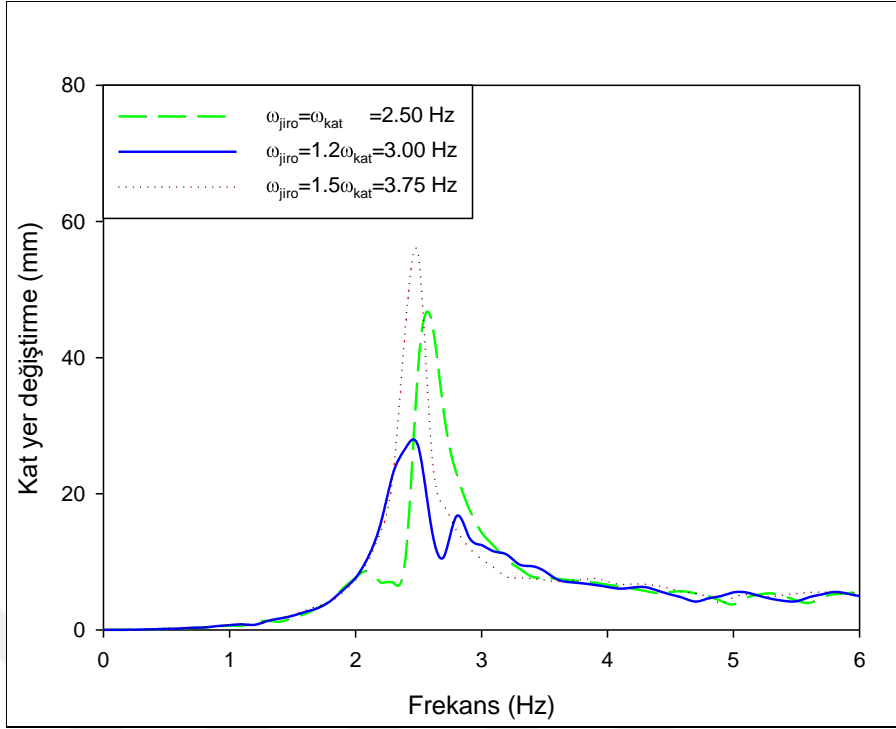


şekil 2.13. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{\text{jirokolon}} = 7.5$ Hz, $\omega_{\text{kat}} = 4.0$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 4.8$ Hz ve $m = 0.069$ kg)

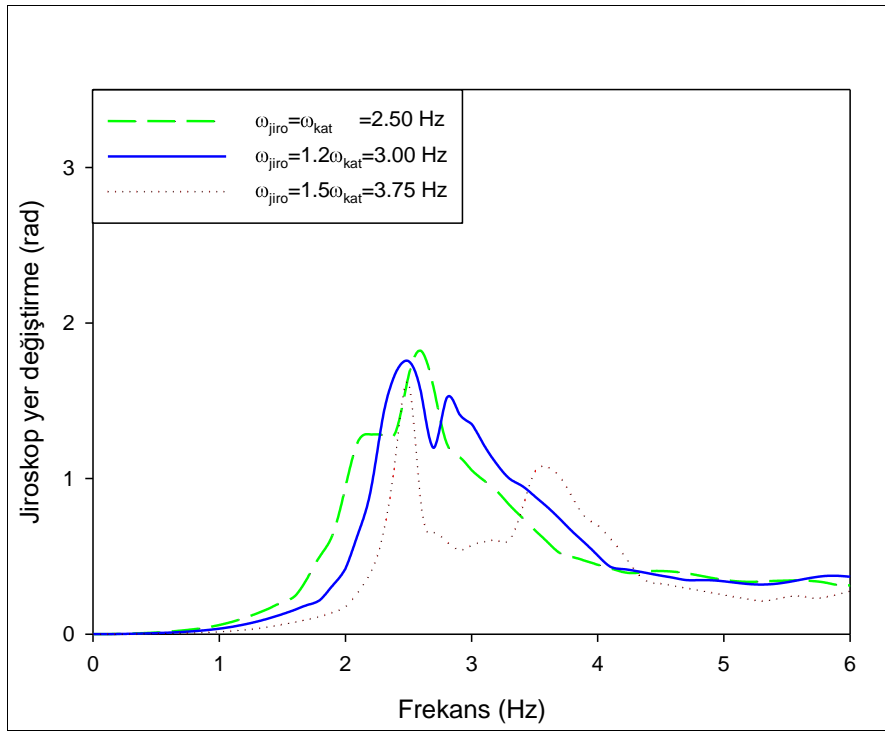
Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12 ile verilen frekans – yer değiştirme eğrileri ise jiroskopun disk kütlelerinin sırasıyla $m = 0.023$ kg, $m = 0.046$ kg ve $m = 0.069$ kg olarak sabit tutulup, bu sabit kütlelerin değişik devir sayılarında döndürülmesinin sönümleme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 2.9, Şekil 2.11 ve Şekil 2.13 ise sırasıyla Şekil 2.8, Şekil 2.10 ve Şekil 2.12 koşullarında teorik olarak jiroskopun frekans – yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Şekil 2.8’den görüldüğü üzere jiroskopun diski $\Omega = 8000$ dev/dak ile döndürülmesi, binanın yer değiştirmesini 1.mod frekansı ($\omega = 4.0$ Hz) için yaklaşık 10 kat azaltmaktadır. Şekil 2.10 ve Şekil 2.12’den de anlaşılacağı üzere disk kütlelerinin artırılması ile (açısal momentumun artması ile) binanın yer değiştirmesi 1.mod frekansı için daha da azalmaktadır. Ayrıca, 4 Hz’in sol ve sağında oluşan mod frekansları arasındaki açıklık en fazla yine 8000 dev/dak’dadır. Bu açıklığın fazla olması rezonanstan uzaklaşıldığını gösterir ve bu aralığın açıklığı yutucunun açısal momentumu ile doğru orantılıdır. Buna dayanarak sistem yüksek açısal momentum ile daha iyi çalıştığı anlaşılmaktadır. Şekil 2.9, Şekil 2.11 ve Şekil 2.13 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımının jiroskopun açısal momentumunun değişimi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

2.2.3.2. Jiroskopun Doğal Frekansının Sönümlemeye Etkisi

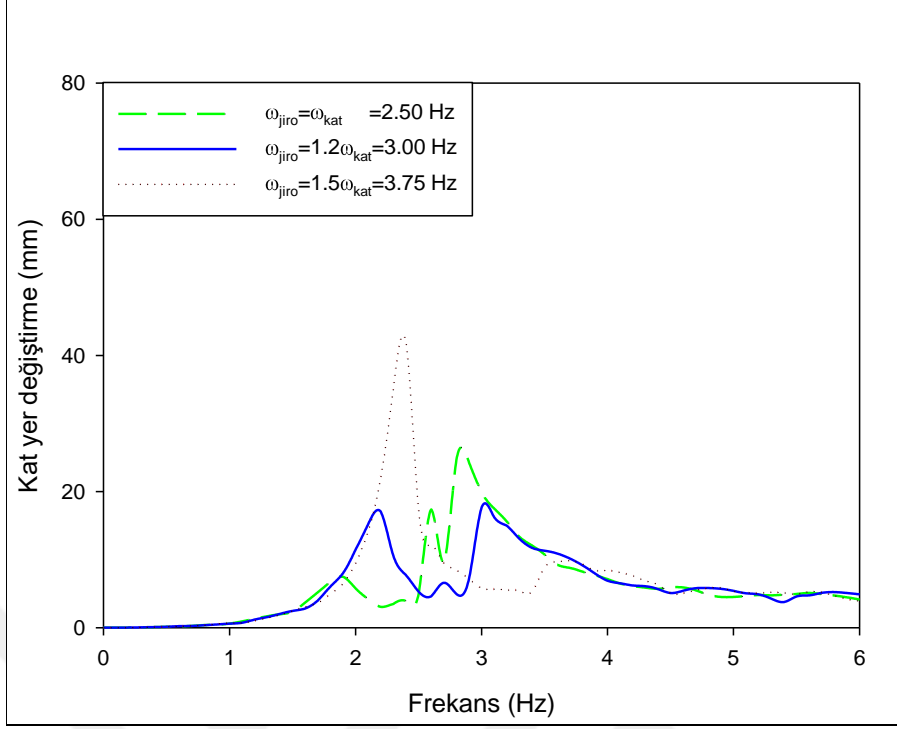
Bu çalışmada, jiroskopun doğal frekansı ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümleme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, katın doğal frekansı sabit tutulup ($\omega_{kat} = 2.5$ Hz), jiroskopun doğal frekansı (ω_{jiro}) takip eden oranlarda $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.0, 1.2$ ve 1.5 değiştirilerek sönümlemeye etkisi teorik olarak incelenmiştir. Ayrıca bu teorik analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz) ve disk kütleleri ($m = 0.069$ kg) sabit tutulmuştur. Bu teorik çalışma için kullandığımız disk kütleleri (0.069 kg), deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için bu bölümdeki analizler için de kullanılmıştır.



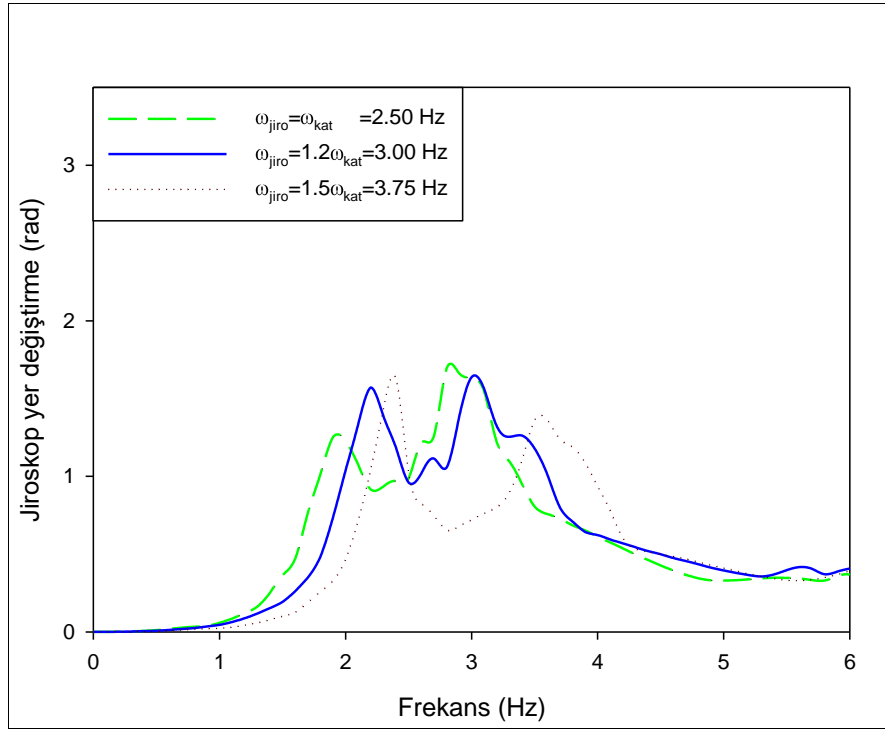
Şekil 2.14. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 2000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



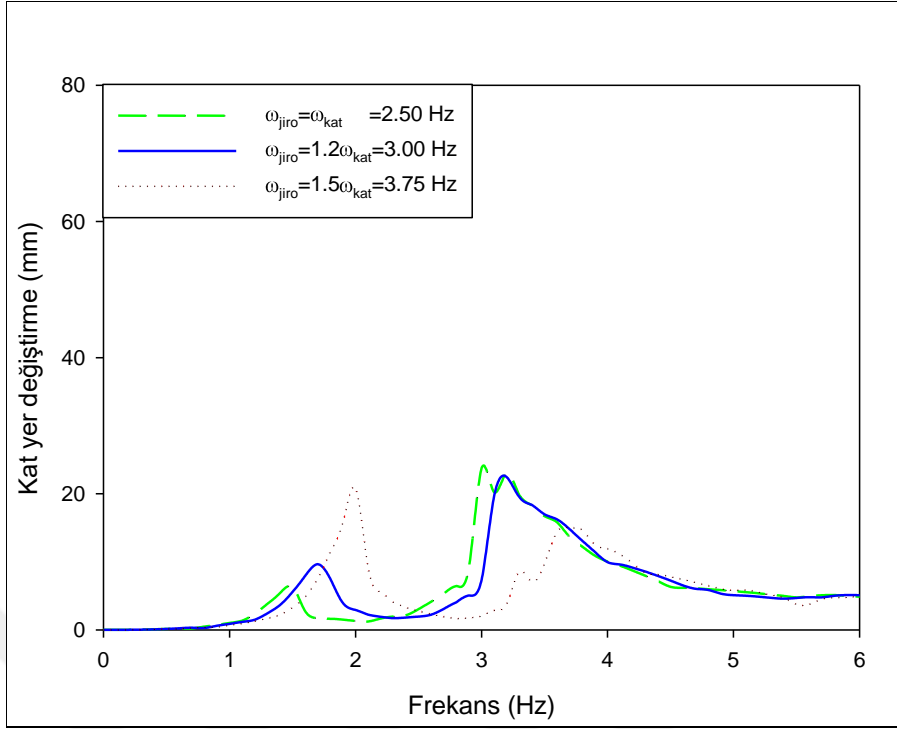
Şekil 2.15. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 2000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



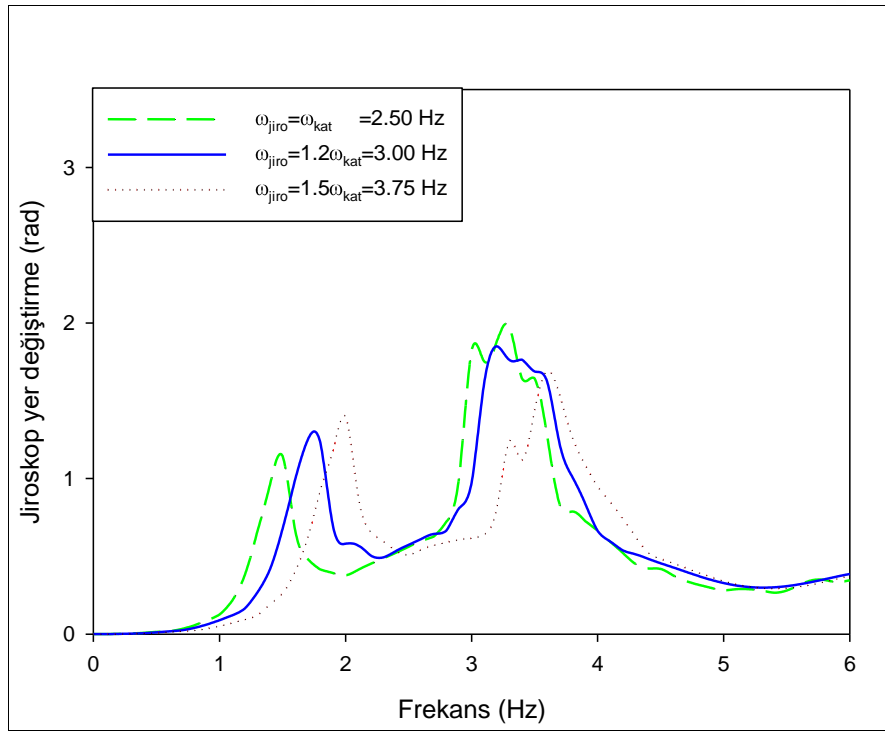
Şekil 2.16. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



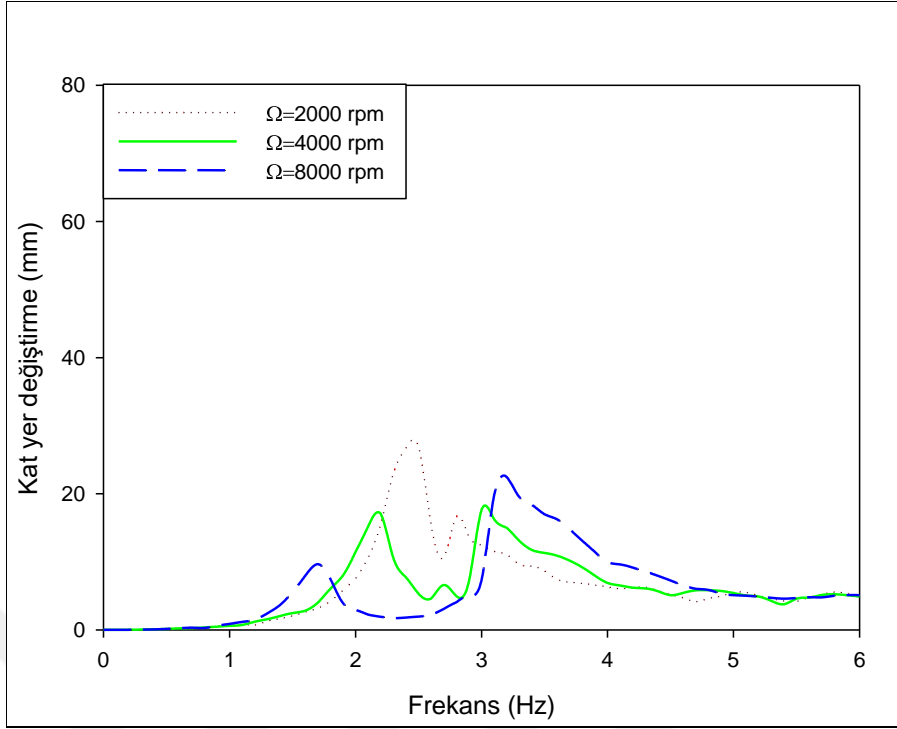
Şekil 2.17. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



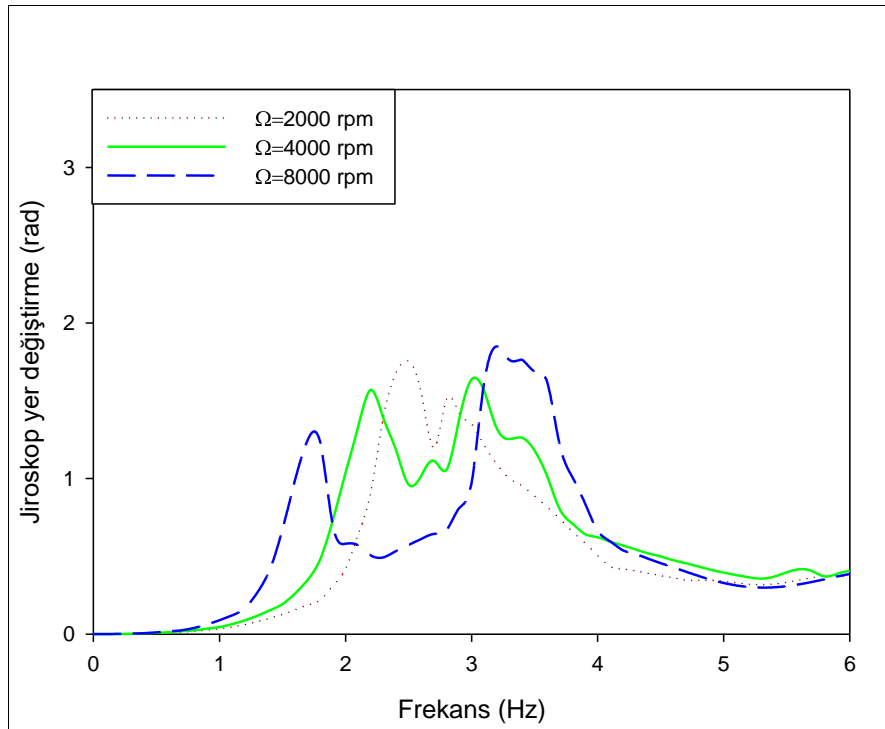
Şekil 2.18. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



Şekil 2.19. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



Şekil 2.20. Farklı disk hızları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



Şekil 2.21. Farklı disk hızları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$, $\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)

Şekil 2.14’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 2000$ dev/dak’da sabit tutulup, bu değişik frekans oranlarının ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.0, 1.2$ ve 1.5) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.16 ve Şekil 2.18 ile verilen frekans – yer değiştirme eğrileri ise jiroskopun disk hızının sırasıyla $\Omega = 4000$ dev/dak ve $\Omega = 8000$ dev/dak’da sabit tutulup, bu değişik frekans oranlarının sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, frekans oranının $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 2.15, Şekil 2.17 ve Şekil 2.19 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımının, jiroskopun doğal frekansının değişimi ile uyumlu olduğu göstermektedir; tek katlı yapının salınımıyla doğru orantılı olarak, jiroskopun salınımı da artmakta veya azalmaktadır.

Şekil 2.20’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun frekans oranının $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ ’de sabit tutulup, değişik disk hızlarının ($\Omega = 2000, 4000$ ve 8000 dev/dak) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.20’den de anlaşılacağı üzere $m=0.069$ kg disk kütlesine ve optimum frekans oranına ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sahip jiroskopun yüksek açısal momentum için disk hızının $\Omega = 8000$ dev/dak olması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 2.21 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımının, jiroskopun disk hızının (açısal momentumun) değişimi ile uyumlu olduğu ve en iyi sönümün gerçekleştiği durumda jiroskop açısının $\theta = \pi/2$ radian değerini geçmediği görülmektedir.

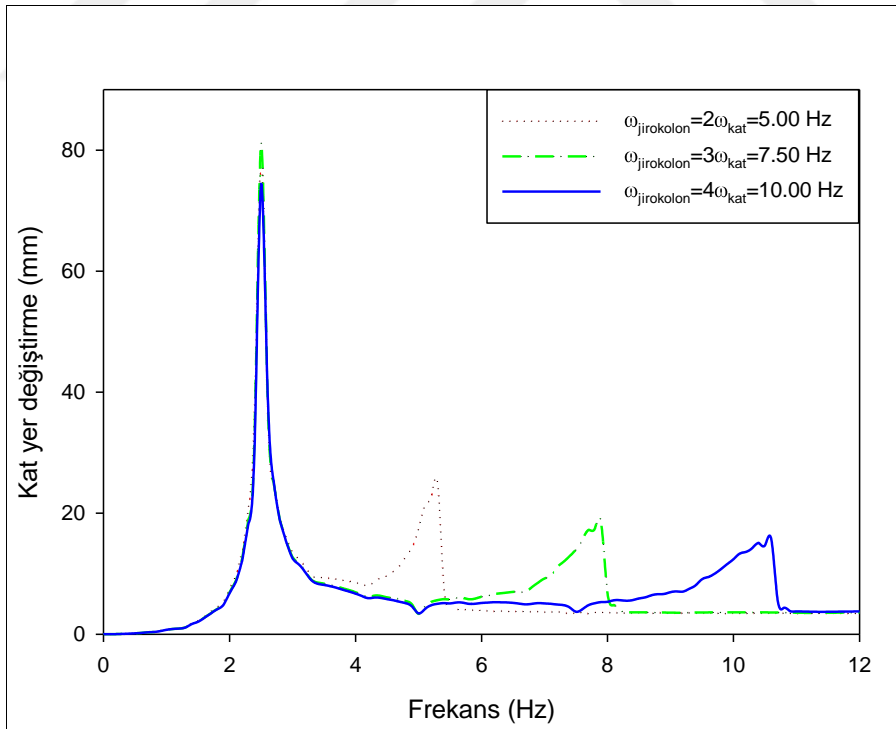
Bu çalışmalardan anlaşılacağı üzere teorik modelimiz için en uygun sönümlenme, frekans oranının $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ olduğu durumda gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca, disk hızının artırılması ile (açısal momentumun artması ile) tek katlı yapının yer değiştirmesi 1.mod frekansı (2.5 Hz) için daha da azalmaktadır. 2.5 Hz’in sol ve sağında oluşan mod frekansları arasındaki açıklık en fazla yine 8000 dev/dak’dadır ve jiroskobik titreşim yutucunun yüksek açısal momentum sayesinde daha iyi çalıştığı anlaşılmaktadır.

2.2.3.3. Uyarlanmış Jiroskopa Ait Doğal Frekansın Sönümlenmeye Etkisi

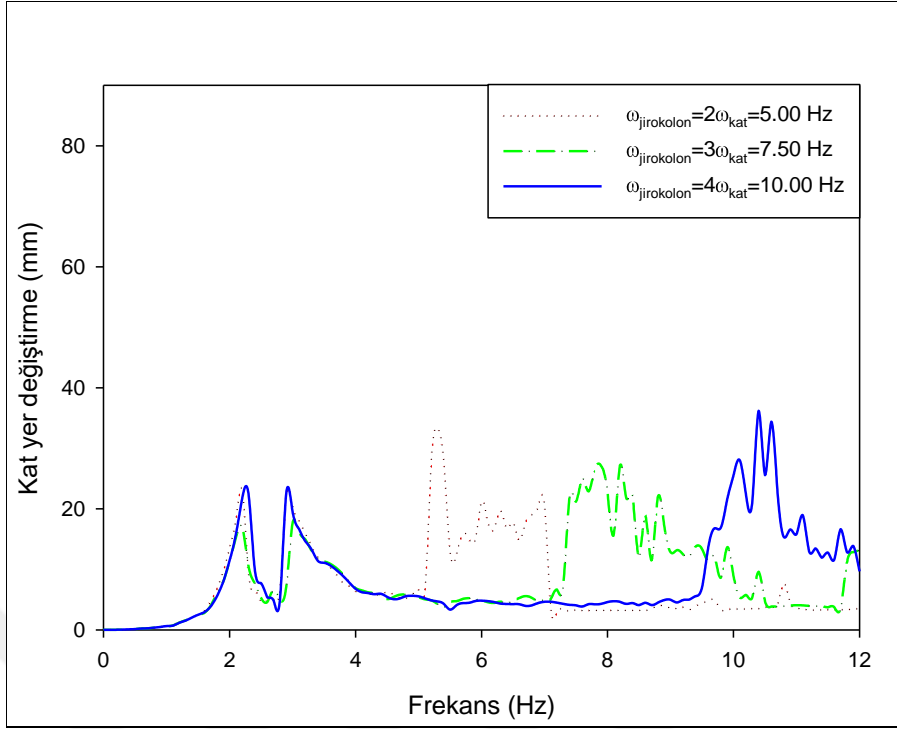
Bu çalışmada, uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}}$) değiştirilerek, $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{kat}} = 2, 3$ ve 4 frekans oranları için teorik analizler yapılmıştır. Uyarlanmış jiroskopun fiziksel özelliklerinden dolayı $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{kat}} = 1$ frekans oranı, jiroskopu taşıyan kolonda

burkulmaya yol açtığından dolayı deneysel olarak incelenememiştir. Bu nedenle teorik analizlerde, $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{kat}} = 1$ frekans oranı için dinamik inceleme yapılamamıştır. Ayrıca bu teorik analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), tek katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sabit tutulmuştur. Bu teorik çalışma için jiroskolla kat arasındaki frekans oranı $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$, önceki bölümde elde ettiğimiz en iyi değer olup bu bölümdeki analizler için de kullanılmıştır.

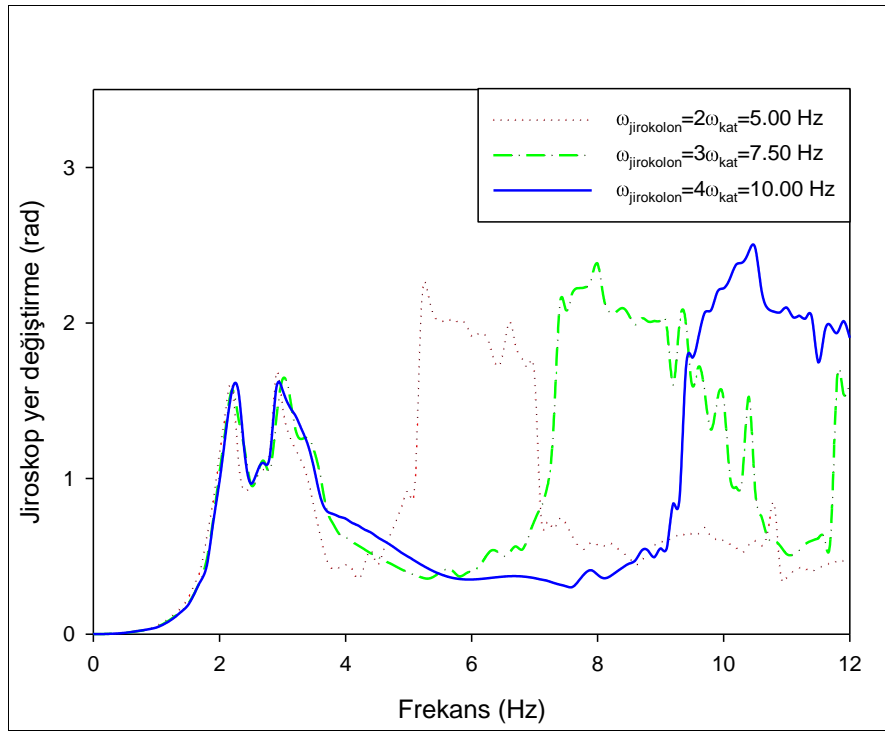
Şekil 2.22’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 0$ dev/dak için sabit tutulup, farklı frekans oranlarının ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{kat}} = 2, 3$ ve 4) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.22’de görüldüğü üzere uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı arttıkça, bu frekansa ait yer değiştirmesi azalmıştır. Bu durum, jiroskopu taşıyan kolonun tek katlı yapıdan yukarıya doğru uzanan yüksekliğinin (L_1) mümkün olduğunca kısa tutulması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 2.22. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak, $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz, $\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



şekil 2.23. Farklı frekans oranları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



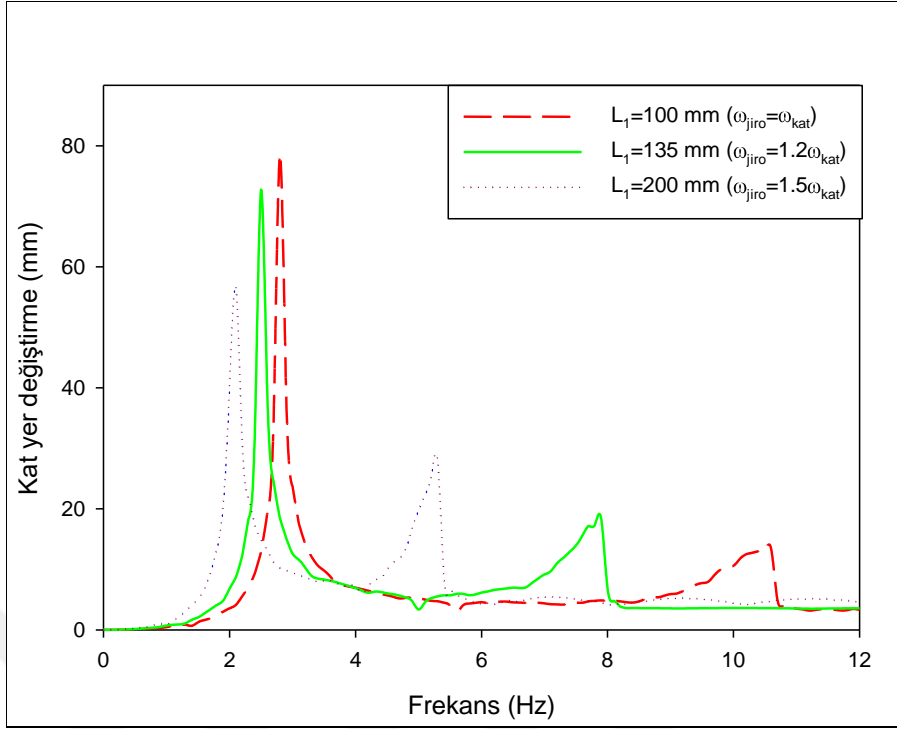
şekil 2.24. Farklı frekans oranları için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz ve $m = 0.069$ kg)

Şekil 2.23’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak için sabit tutulup, bu değişik frekans oranlarının ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{kat}} = 2, 3$ ve 4) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.23’de görüldüğü üzere, disk döndüğü ($\Omega = 4000$ dev/dak) durumda, uyarlanmış jiroskopla kat arasındaki frekans oranlarının ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{kat}} = 2, 3$ ve 4) sönümlenme üzerindeki etkisinin olmadığı görülmektedir.

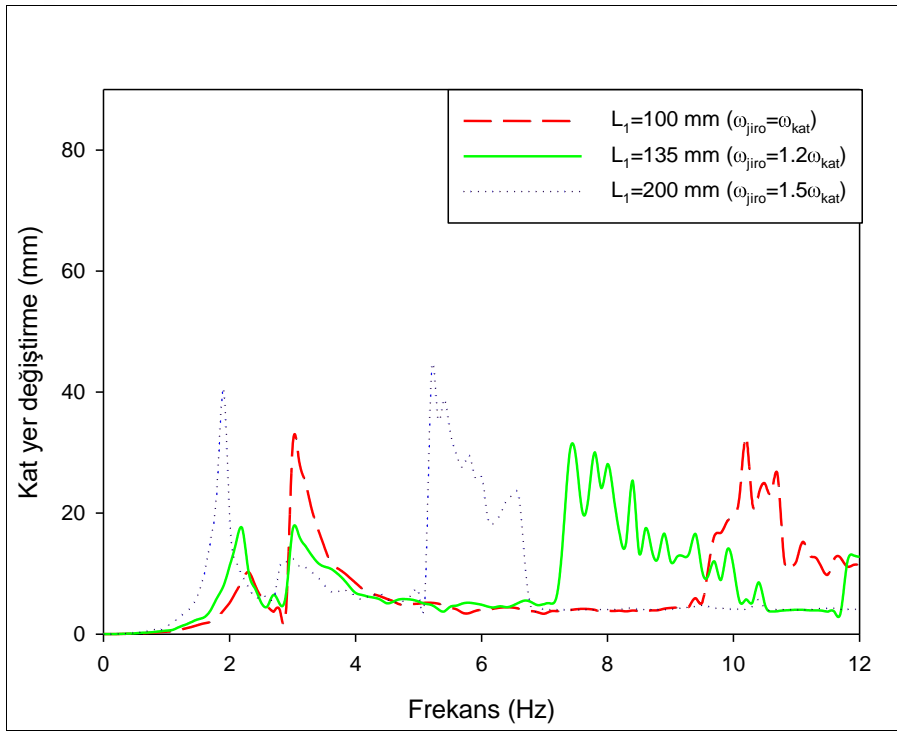
Şekil 2.23’deki eğrilere karşılık jiroskopun hareketine ait frekans – yer değiştirme eğrileri de Şekil 2.24’de verilmiştir. Şekil 2.24 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımının, jiroskopun doğal frekansının değişimi ile uyumlu değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle, tek katlı yapının salınımıyla doğru orantılı olarak, jiroskopun salınımı da artmakta veya azalmaktadır. Ayrıca, jiroskopun salınımının, jiroskopun disk hızının (açısal momentumun) değişimi ile uyumlu olduğu ve jiroskop açısının $\theta = \pi/2$ radian değerini geçmediği görülmektedir.

2.2.3.4. Sabit Kat Yüksekliğinde Uyarlanmış Jiroskop Boyunun Sönümlenmeye Etkisi

Bu çalışmada, uyarlanmış jiroskopun boyu (L_1) ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, uyarlanmış jiroskopun boyu değiştirilerek, $L_1 = 100, 135$ ve 200 mm için teorik analizler yapıldı. Ayrıca bu teorik analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), tek katlı yapının boyu ($L_2 = 200$ mm) ve jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz) sabit tutuldu.



şekil 2.25. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak, $L_2 = 200$ mm, $\omega_{jyro} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



şekil 2.26. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans–Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $L_2 = 200$ mm, $\omega_{jyro} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg)

Şekil 2.25’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 0$ dev/dak için sabit tutulup, uyarlanmış jiroskopun farklı boylarının ($L_1 = 100, 135$ ve 200 mm) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.25’de görüldüğü üzere uyarlanmış jiroskopun boyu (L_1) arttıkça, uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı (2. mod frekansı, $\omega_{\text{jirokolon}}$) düşmüştür ve bu frekansa ait yer değiştirmesi artmıştır. Bu nedenle, bir önceki bölümde jiroskopu taşıyan kolonun tek katlı yapıdan yukarıya doğru uzanan yüksekliğinin (L_1) mümkün olduğunca kısa tutulması gerektiğini söylemiştik. Ancak, uyarlanmış jiroskopu taşıyan kolonun boyundaki artış, tek katlı yapının doğal frekansını (1.mod frekansı, ω_{kat}) ve bu frekanstaki yer değiştirme miktarını düşürmüştür. Bu nedenle, jiroskopu taşıyan kolonun tek katlı yapıdan yukarıya doğru uzanan boyunun (L_1) mümkün olduğunca uzun tutulması gerektiğini göstermektedir.

Şekil 2.26’da verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak için sabit tutulup, uyarlanmış jiroskopun farklı boylarının ($L_1 = 100, 135$ ve 200 mm) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.26’dan görüldüğü üzere, disk döndüğü ($\Omega = 4000$ dev/dak) durumda en uygun sönümlenme, kolon boyunun $L_1 = 135$ mm olduğu durumda görülmektedir. Çünkü, uyarlanmış jiroskop kolon boyu $L_1 = 135$ mm için frekans oranının $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ olmaktadır. Bu durum, uyarlanmış jiroskop boyunun değişmesiyle, tek katlı yapının doğal frekansının (ω_{kat}) ve dolayısıyla frekans oranının ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}}$) değiştirdiğini de göstermektedir.

2.2.4. Tek Katlı Yapının Deneysel Bulguları

Yukarıdaki teorik çalışmalar ışığında deney düzeneğinin karakterizasyonu için $z_0 = 0.005$ m zorlayıcının yer değiştirme genliği ve sistemin birinci mod doğal frekansını içerecek şekilde $1.2 - 12$ Hz zorlayıcının frekans aralığı seçilerek sistemin dinamik davranışları test edilmiştir. Tek katlı binanın, jiroskopun ve uyarlanmış jiroskopun dinamik davranışlarının hem zaman hem de frekans taramaları yapılmıştır.

Yapılan bu ölçümlerle kurulan sistemde tüm cihazların, ölçü aletlerinin ve modelin doğru çalıştığı ve matematik modelle iyi bir uyum içinde olduğu yapılan ön deneylerde tespit edilmiştir. Teorik modelde kullanılan uyarlanmış jiroskopun ve binanın fiziksel özellikleri mümkün olduğu kadar deneysel sisteme yansıtılmakla birlikte, teorik analizlerde

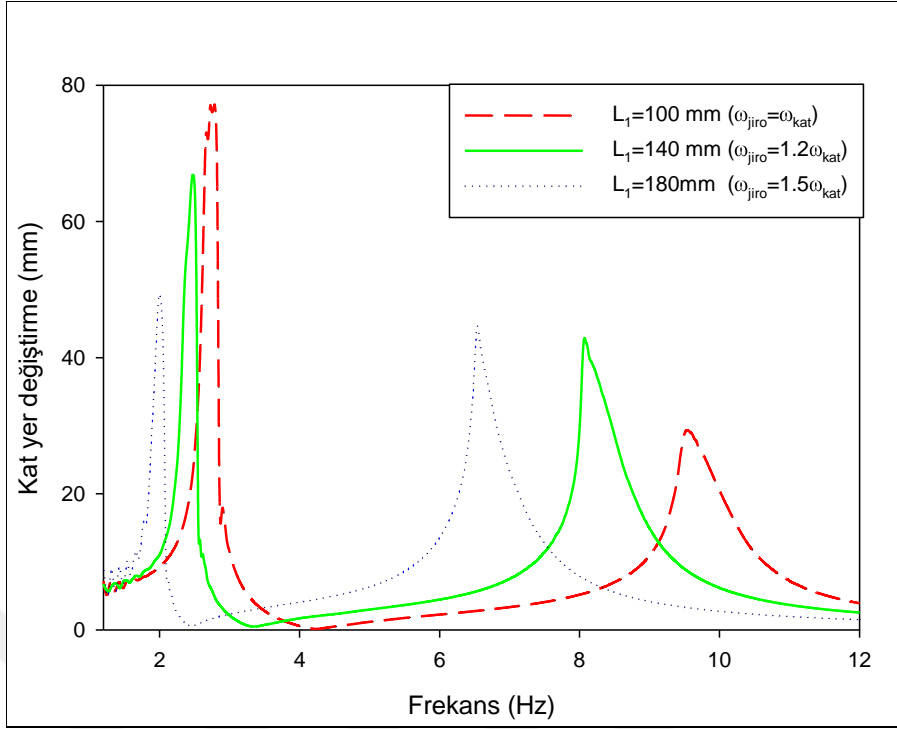
kullanılan, kütle, devir sayısı ve frekans ilişkileri aynı şekilde deneysel çalışmaya yansıtılmıştır.

2.2.4.1. Sabit Kat Yüksekliğinde Uyarlanmış Jiroskop Boyunun Sönülemeye Etkisi

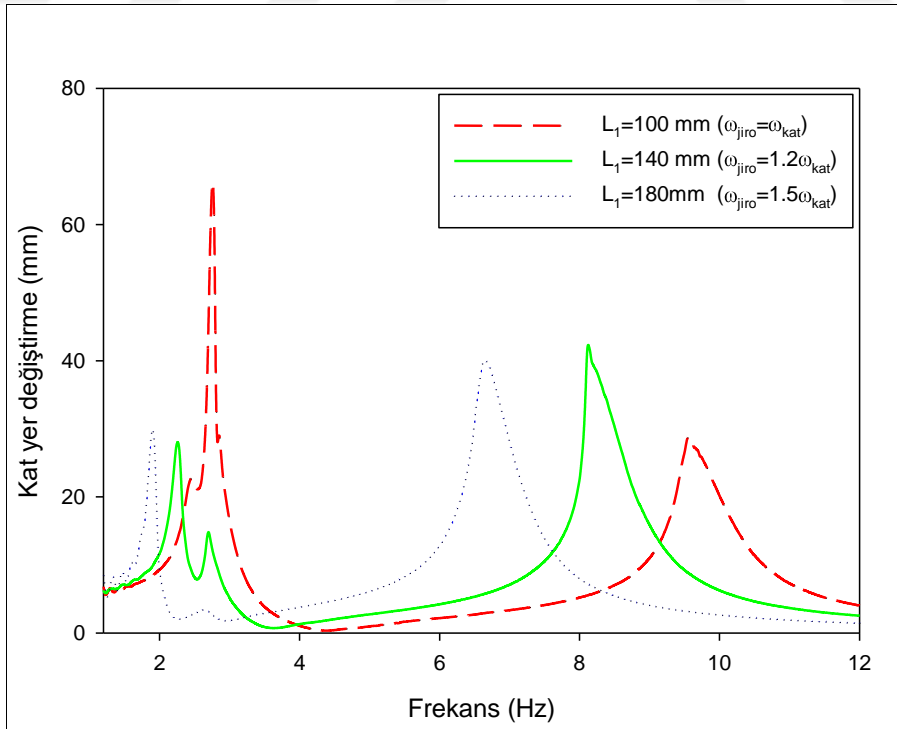
Bu deneysel çalışmada, uyarlanmış jiroskopun boyu (L_1) ile jiroskopun açısız momentumu arasındaki ilişkinin sönüleme ve tek katlı yapının doğal frekansı (ω_{kat}) üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, uyarlanmış jiroskopun takıldığı kolonun boyu değiştirilerek (doğal frekansı değiştirilerek), $L_1 = 100, 140$ ve 180 mm kolon boyları için analizler yapıldı. Ayrıca bu deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), tek katlı yapının boyu ($L_2=210$ mm) ve jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3.0$ Hz) sabit tutuldu. Bu deneysel çalışma için disk kütlesi $m = 0.069$ kg ve disk hızı $\Omega = 4000$ dev/dak, jiroskopun elektrik motorunun kapasitesine göre en uygun değerler olup, önceki teorik çalışmalarımızda da kullanmıştık.

Şekil 2.27’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 0$ dev/dak için sabit tutulup, bu değişik boyların ($L_1 = 100, 140$ ve 180 mm) sönüleme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.27’de görüldüğü üzere uyarlanmış jiroskopu taşıyan kolonun boyundaki artış, 1.mod frekansını (tek katlı yapının doğal frekansını, ω_{kat}) düşürmüştür ve binadan uyarlanmış jiroskopa enerji transferini (uyarlanmış jiroskop binayla birlikte ama ters yönde salındığından) arttırdığından binanın 1.moddaki yer değiştirme miktarını azaltmıştır. Ancak, uyarlanmış jiroskopun boyu (L_1) arttıkça, 2.mod frekansı (uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı, $\omega_{jirokolon}$) azalmıştır ve binanın 2.modundan uyarlanmış jiroskopa enerji transferini azalttığı için bu frekansa ait yer değiştirmesi artmıştır. Benzer sonuçları teorik çalışmada da bulunmuştur.

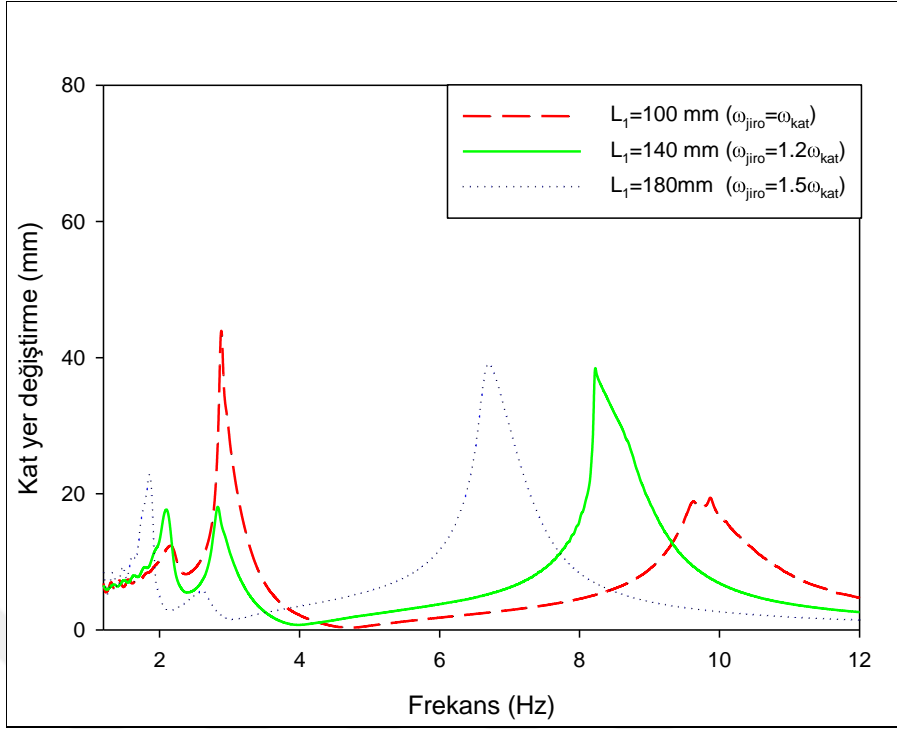
Şekil 2.28’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 2000$ dev/dak için sabit tutulup, bu değişik boyların ($L_1 = 100, 140$ ve 180 mm) sönüleme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.28’den görüldüğü üzere, disk 2000 dev/dak hızla döndüğü durumda 1.moddaki en iyi sönüleme, kolon boyunun $L_1 = 140$ mm ($\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$) olduğu durumda görülmektedir.



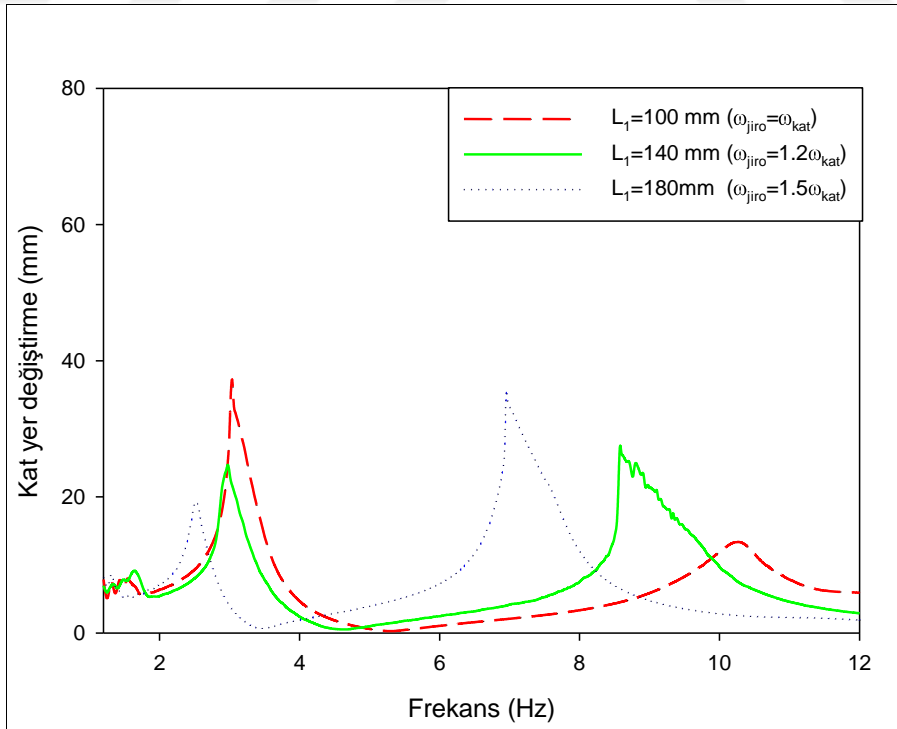
Şekil 2.27. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{jiro} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



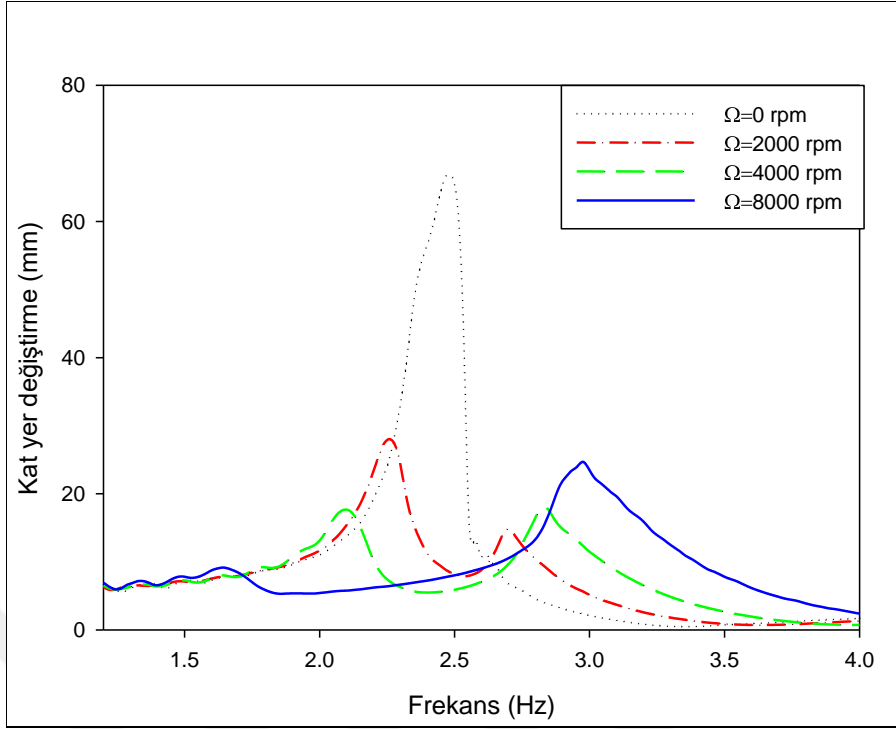
Şekil 2.28. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 2000$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{jiro} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



şekil 2.29. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{jiro} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



şekil 2.30. Farklı uyarlanmış jiroskop uzunlukları için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak, $L_2 = 210$ mm, $\omega_{jiro} = 3.0$ Hz ve $m = 0.069$ kg)



Şekil 2.31. Jiroskopun farklı disk hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$)

Şekil 2.29'da verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak için sabit tutulup, bu değişik boyların ($L_1 = 100, 140$ ve 180 mm) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.29'dan görüldüğü üzere, disk 4000 dev/dak hızla döndüğü durumda en uygun sönümlenme, kolon boyunun $L_1 = 140$ mm ($\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$) olduğu durumda görülmektedir.

Şekil 2.30'da verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 8000$ dev/dak için sabit tutulup, bu değişik boyların ($L_1 = 100, 140$ ve 180 mm) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.30'dan görüldüğü üzere, disk 8000 dev/dak hızla döndüğü zaman 1. moddaki en iyi sönümlenmenin $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.5$ frekans oranında olduğu durumda görülmektedir. Ancak, 2. moddaki sönümlenmenin, en iyi $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1$ frekans oranında gerçekleşmiştir.

Şekil 2.31'de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun frekans oranının $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$ 'de sabit tutulup, değişik disk hızlarının ($\Omega = 2000, 4000$ ve 8000 dev/dak) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.31'den de anlaşılacağı üzere $m = 0.069$ kg disk kütlelerine ve belli frekans oranına ($\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$) sahip uyarlanmış jiroskopta en iyi sönüm, 1.mod için disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olması

durumunda, 2.mod için ise disk hızının $\Omega = 8000$ dev/dak olması durumunda olduğu belirlenmiştir.

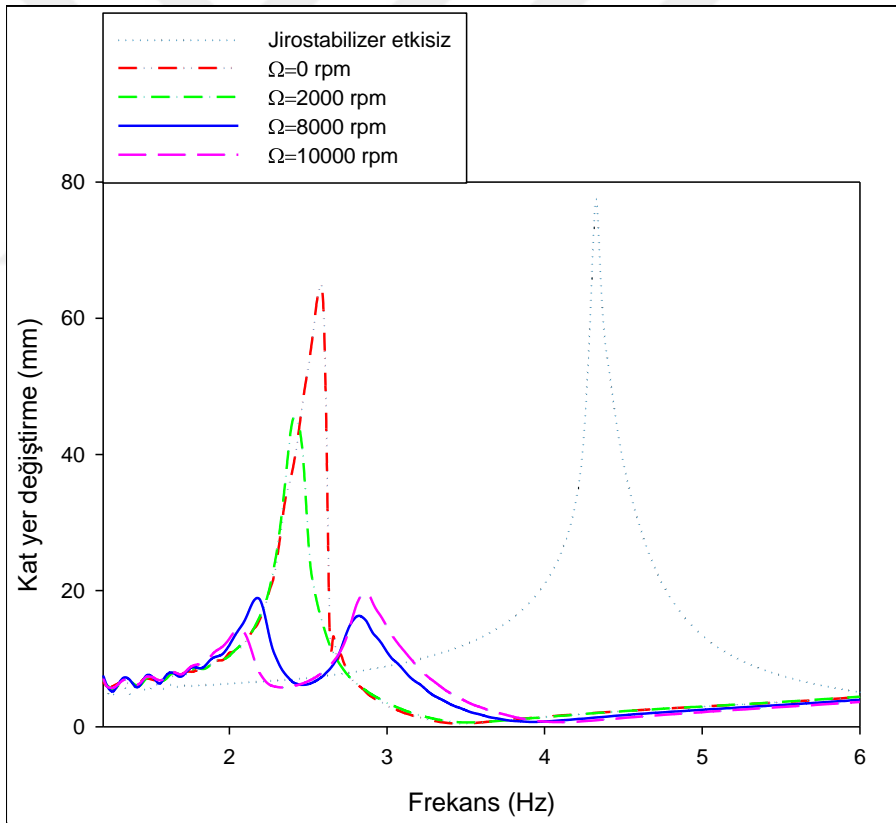
Yukarıdaki şekillerden anlaşılacağı üzere, jiroskop hiç dönmediği durumda ($\Omega = 0$ dev/dak) uyarlanmış jiroskop boyu arttıkça, tek katlı yapının 1.moddaki yer değiştirme miktarı en düşük değerdedir. Bu nedenle, jiroskopu taşıyan kolonun tek katlı yapıdan yukarıya doğru uzanan boyunun (L_1) mümkün olduğunca uzun tutulması gerektiğini göstermektedir. Ancak, jiroskop belli hızlarda ($\Omega = 2000, 4000$ ve 8000 dev/dak) döndüğünde 1.moddaki en iyi sönümlenme, $L_1 = 140$ mm kolon boyuna karşılık gelen $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ frekans oranında oluşmaktadır. Bu deneysel çalışmalardan anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, frekans oranının $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ olduğu durumda gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca, disk hızının artırılması ile (açısal momentumun artması ile) tek katlı yapının yer değiştirmesi 1.mod frekansı (2.5 Hz) için daha da azalmaktadır. 2.5 Hz'in sol ve sağında oluşan mod frekansları arasındaki açıklık en fazla yine 8000 dev/dak'dadır. Bu açıklığın fazla olması rezonanstan uzaklaşıldığını gösterir ve bu aralığın açıklığı yutucunun açısal momentumu ile doğru orantılıdır. Jiroskobik titreşim yutucunun yüksek açısal momentum sayesinde daha iyi çalıştığı anlaşılmaktadır. Benzer sonuçlar daha önceki teorik çalışmalarımızda da elde edilmiştir.

2.2.4.2. Disk Kütlesi $m=0.023$ kg İçin Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi

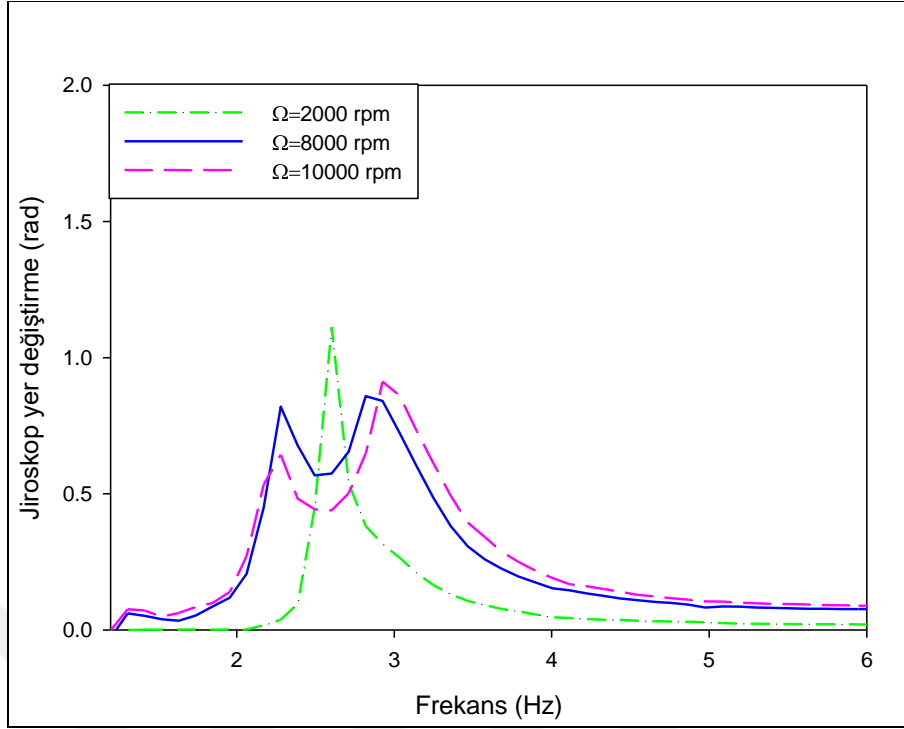
Bu çalışmada, jiroskopun disk hızı ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, jirostabilizerin etkisiz (uyarlanmış jiroskop sabit) olduğu durum ve uyarlanmış jiroskopun serbest olup, jiroskopun disk hızı değiştirilerek $\Omega = 0, 2000, 8000, 10000$ dev/dak hızlarda döndüğü durumlar için deneysel analizler yapılmıştır. Ayrıca, uyarlanmış jiroskopun serbest olduğu durumdaki deneysel analizlerde zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), yapının doğal frekansı ($\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.023$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}} = 8.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sabit tutulmuştur.

Şekil 2.32'de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk kütlelerinin $m = 0.023$ kg için sabit tutulup, bu değişik disk hızlarının ($\Omega = 0, 2000, 8000, 10000$ dev/dak) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.32'den görüldüğü üzere

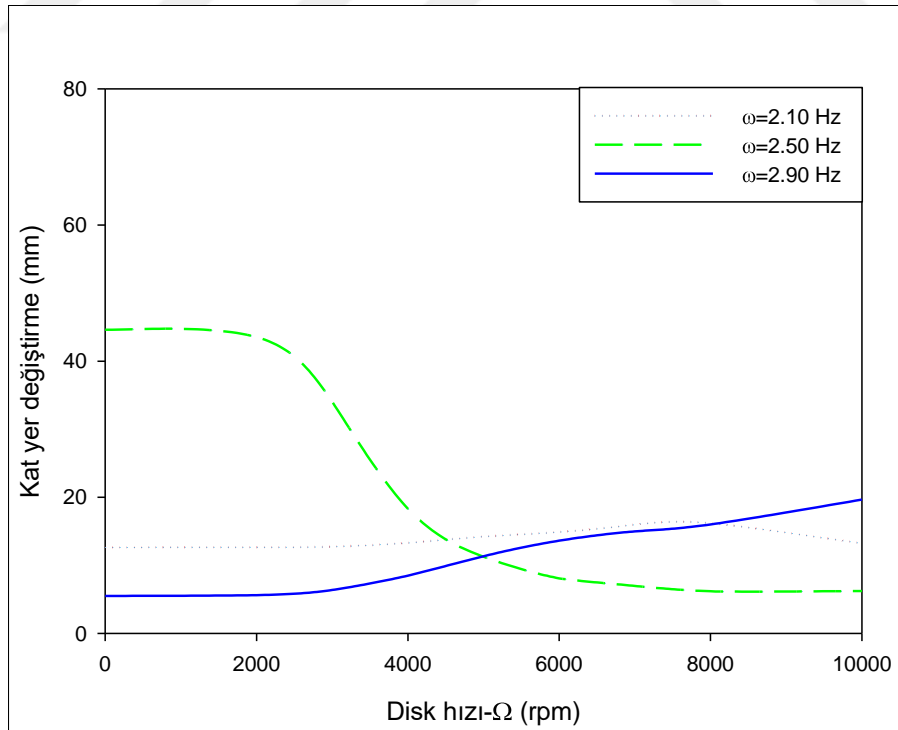
uyarlanmış jiroskopun sabit olduğu durumda bina ile uyarlanmış jiroskop (sönümleyici eleman) arasında herhangi bir enerji transferi söz konusu olmadığından (uyarlanmış jiroskop salınmamakta) binanın yer değiştirmesi en büyük değerine ulaşmıştır. Yine aynı grafikte gözlemlendiği üzere, uyarlanmış jiroskopun kolunu serbest bırakıldığında fakat jiroskopun diski dönmediği ($\Omega = 0$ dev/dak) durumda, binadan uyarlanmış jiroskopa bir miktar enerji transferi söz konusu olduğundan (uyarlanmış jiroskop binayla birlikte ama ters yönde salındığından) binanın yer değiştirme miktarında azalma olmuştur. Yine aynı grafikte (Şekil 2.32) gözlemlendiği üzere, uyarlanmış jiroskopun kolunu serbest bırakıldığında ve jiroskopun diski değişen devir sayılarında döndürüldüğünde, binadan uyarlanmış jiroskopa, diskin devir sayısı ile ilişkili olarak enerji transferi söz konusu olduğundan binanın yer değiştirme miktarında azami miktarlarda azalma olmuştur.



Şekil 2.32. Jiroskopun farklı disk hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{\text{jro}}/\omega_{\text{kat}} = 1.2$)



Şekil 2.33. Jiroskopun farklı disk hızları (Ω) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$)



Şekil 2.34. Zorlayıcının Farklı frekansları (ω) için tek katlı yapının Disk hızı (Ω) – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{jiro}/\omega_{kat} = 1.2$)

Şekil 2.32'den anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, disk hızının $\Omega = 8000$ dev/dak olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir. Çünkü, disk kütlesi $m=0.023$ kg ve disk hızı $\Omega = 8000$ dev/dak için bu sönümlenme etkisi, teorik çalışmalarda elde ettiğimiz optimum frekans oranı ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) için disk hızının artırılması ile (açısal momentumun artması ile) tek katlı yapının yer değiştirmesi 1.mod frekansı (2.5 Hz) için daha da azalmaktadır. 2.5 Hz'in sol ve sağında oluşan mod frekansları arasındaki açıklık en fazla yine 8000 dev/dak'dadır. Bu açıklığın fazla olması rezonanstan uzaklaşıldığını gösterir ve bu aralığın açıklığı yutucunun açısal momentumu ile doğru orantılıdır.

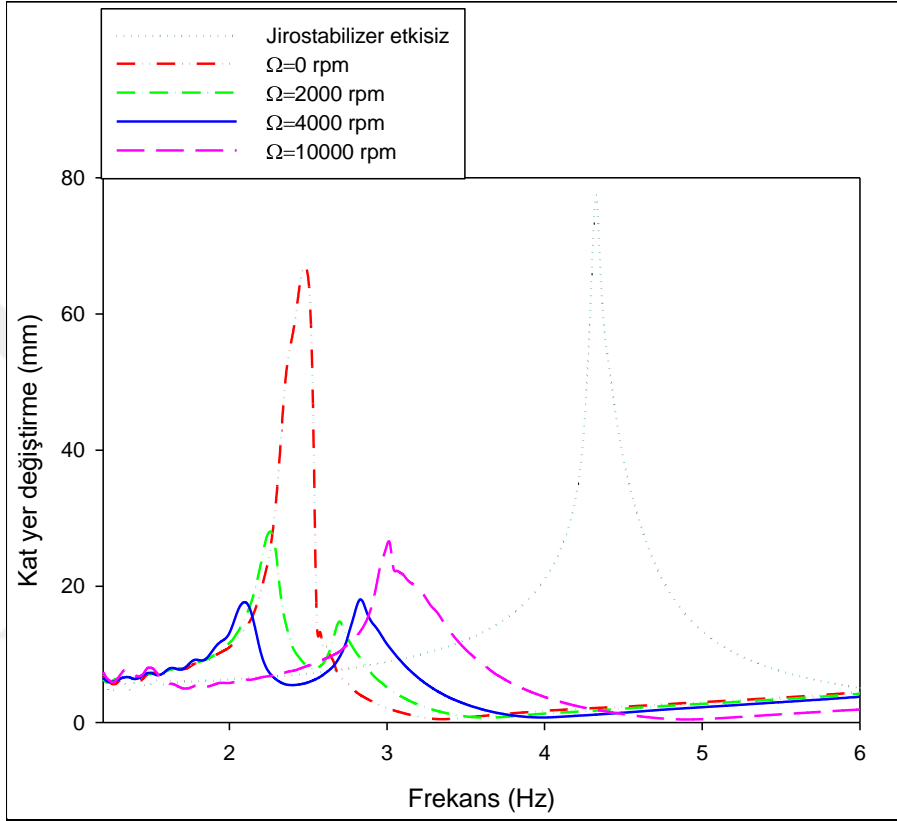
Şekil 2.33 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımı, tek katlı yapının salınım genliğinin etkisiyle doğru orantılı olarak, jiroskopun salınımı da artmış veya azalmıştır. En iyi sönümün gerçekleştiği durumda (8000 dev/dak) jiroskop açısının $\theta = 0.86$ rad civarında salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum, Bölüm 2.1.1'de elde ettiğimiz maksimum sönümlenme için gerekli optimum salınım açısını (0.86 rad) doğrulamıştır. Jiroskopun maksimum kararlı sönümü için 0.86 rad salınım açısının geçilmemesi tavsiye edilmiştir.

Şekil 2.34'de verilen disk hızı – yer değiştirme eğrileri, jiroskopun disk kütlesinin $m = 0.023$ kg için sabit tutulup, bu üç farklı mod frekansı için ($\omega = 2.10, 2.50$ ve 2.90 Hz) sönümlenme etkisini göstermektedir. Şekil 2.34'den açıkça görüldüğü üzere sistem belli bir açısal momentuma ($L_{\Omega} = 0.0660$ kg.m²/s için $m = 0.023$ kg disk kütlesi için $\Omega = 8000$ dev/dak disk hızında) ulaştığında 1.mod frekansının yerine ($\omega=2.50$ Hz) simetrik oluşan $\omega=2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz frekanslarının genlikleri birbirine eşitlenmiştir. Ayrıca, bu disk hızı ($\Omega = 8000$ dev/dak) için 1.mod frekansındaki genlik minimumdur ve bu hızdan sonra 1.mod frekansının ($\omega = 2.50$ Hz) genliği değişmemiştir.

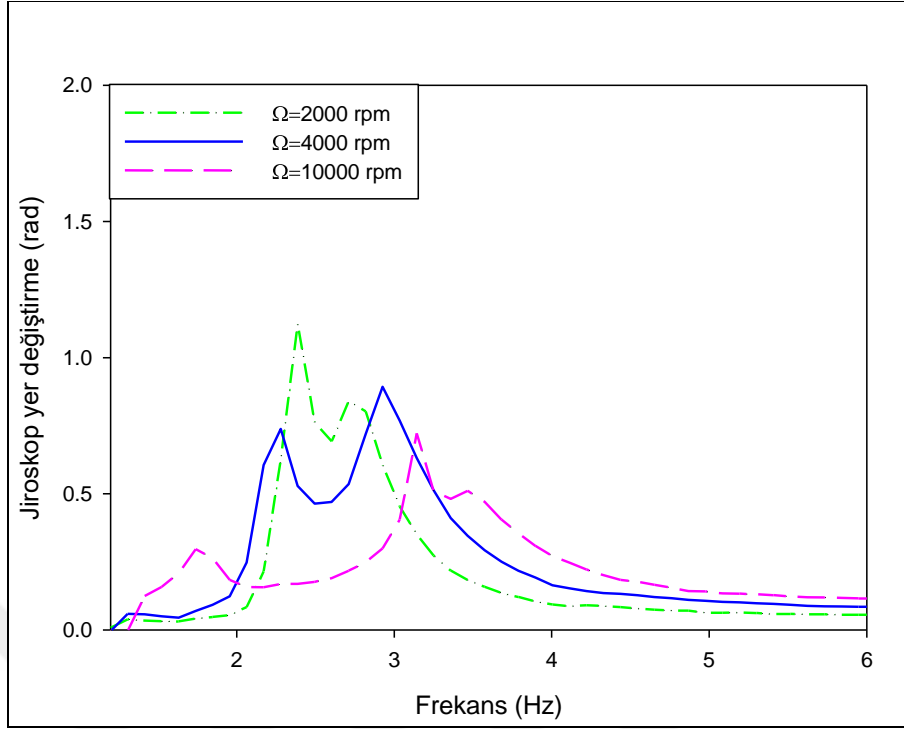
2.2.4.3. Disk Kütlesi $m = 0.069$ kg İçin Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi

Bu çalışmada, jiroskopun disk hızı ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, jirostabilizerin etkisiz (uyarlanmış jiroskop sabit) olduğu durum ve uyarlanmış jiroskopun serbest olup, jiroskopun disk hızı değiştirilerek $\Omega = 0, 2000, 4000, 10000$ dev/dak hızlarda döndüğü durumlar için deneysel analizler yapılmıştır. Ayrıca uyarlanmış jiroskopun serbest olduğu durumdaki deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), tek

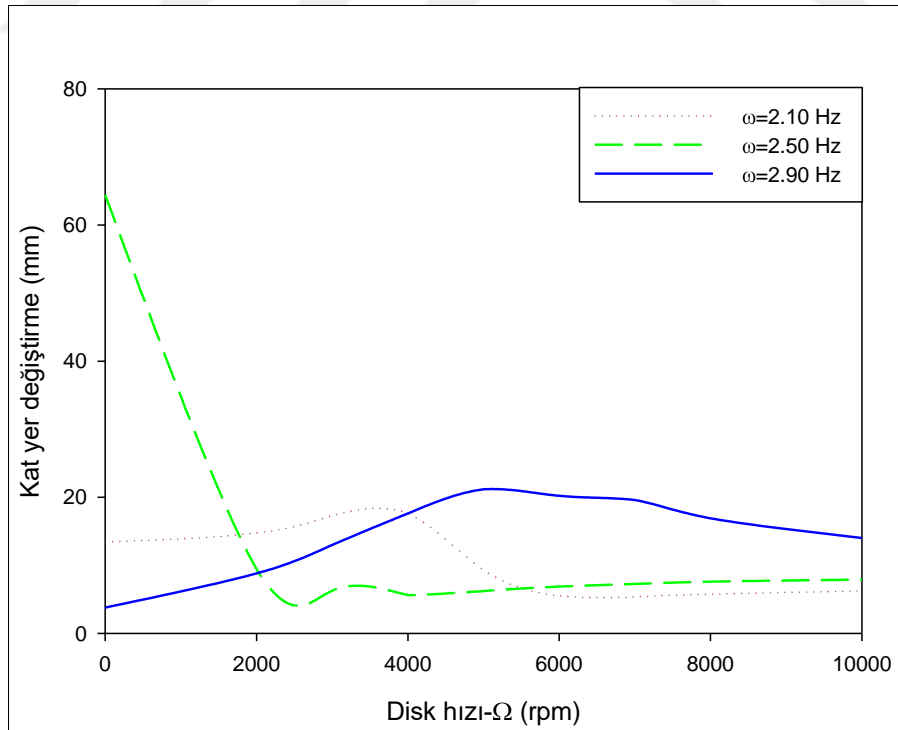
katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}} = 8.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sabit tutulmuştur.



Şekil 2.35. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$)



Şekil 2.36. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$)



Şekil 2.37. Zorlayıcının Farklı frekansları (ω) için tek katlı yapının Disk hızı (Ω) – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.069$ kg ve $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$)

Şekil 2.35’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk kütlelerinin $m = 0.023$ kg için sabit tutulup, bu değişik disk hızlarının ($\Omega = 0, 2000, 4000, 10000$ dev/dak) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.35’den görüldüğü üzere jirostabilizerin etkisiz (uyarlanmış jiroskop sabit) olduğu durumda binanın yer değiştirmesi ve doğal frekansı, uyarlanmış jiroskopun serbest olup jiroskopun diski dönmediği ($\Omega = 0$ dev/dak) duruma göre artmıştır. Şekil 2.35’den anlaşılacağı üzere 1.mod frekansı (2.5 Hz) için en uygun sönümlenme, disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir. Çünkü, bu disk hızı ($\Omega = 4000$ dev/dak) için 1.mod frekansındaki genlik minimumdur. Ayrıca, 1.mod frekansının sol ve sağında oluşan mod frekansları arasındaki açıklık en fazla disk hızı $\Omega = 10000$ dev/dak’da elde edilmiştir. Bu açıklığın fazla olması rezonanstan uzaklaştığını gösterir ve bu aralığın açıklığı yutucunun açısal momentumu ile doğru orantılıdır.

Jiroskopun diski dönmediği durumda 1.mod frekansı $\omega = 2.50$ Hz olup, jiroskopun diski $\Omega = 4000$ dev/dak döndürülmesi ile binanın yer değiştirmesi 1.mod frekansı için yaklaşık 10 kat sönümlenmiştir. Ayrıca, jiroskopun diski $\Omega = 4000$ dev/dak döndürülmesi ile 1.mod frekansının yerine bu frekansa göre simetrik yerde ($\omega = 2.50$ Hz frekansına eşit uzaklıktaki frekanslarda) ve aynı yer değiştirme genliğinde iki ayrı mod frekansı ($\omega = 2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz) oluşmuştur. Çünkü bu sönümlenme etkisi, önceki çalışmalarda da elde ettiğimiz optimum frekans oranı ($\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$) için optimum açısal momentumun ($L_{\Omega} = 0.066$ kg.m²/s) sonucudur ve bu disk hızı ($\Omega = 4000$ dev/dak) için 1.mod frekansındaki genlik minimumdur.

Şekil 2.36 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımı, tek katlı yapının salınım genliğinin etkisiyle doğru orantılı olarak, jiroskopun salınımı da artmış veya azalmıştır. En iyi sönümün gerçekleştiği durumda (4000 dev/dak) jiroskop açısının $\theta = 0.86$ rad civarında salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum, Bölüm 2.1.1’de elde ettiğimiz maksimum sönümlenme için gerekli optimum salınım açısını (0.86 rad) doğrulamıştır. Jiroskopun maksimum kararlı sönümü için 0.86 rad salınım açısının geçilmemesi tavsiye edilmiştir.

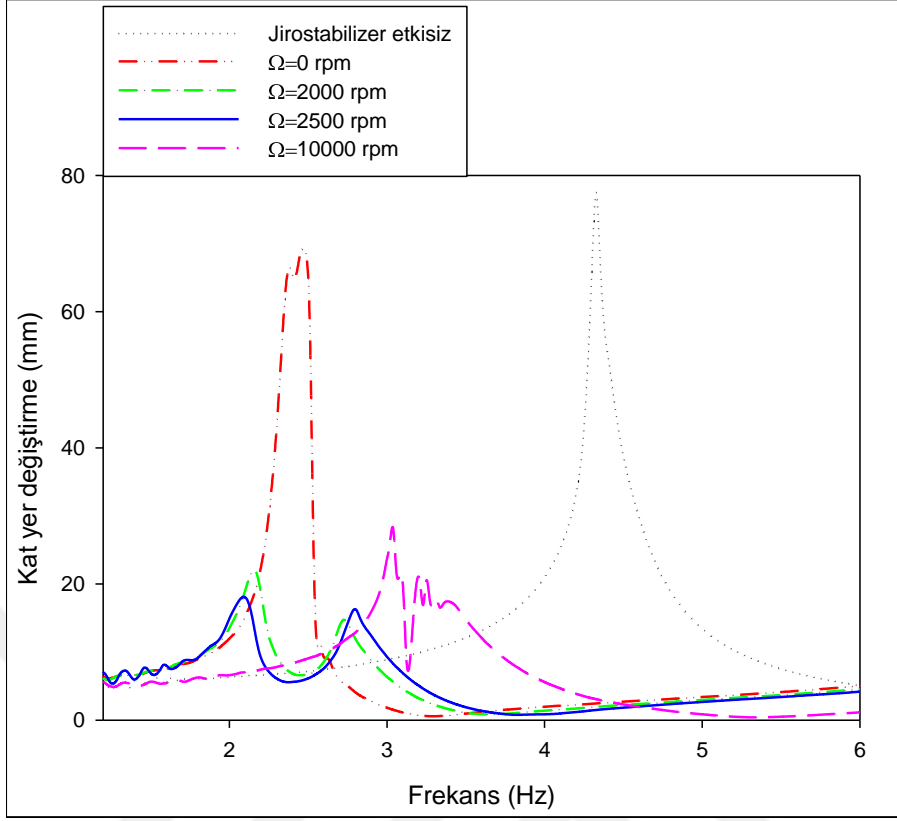
Şekil 2.37’de verilen disk hızı – yer değiştirme eğrileri, jiroskopun disk kütlelerinin $m = 0.069$ kg için sabit tutulup, bu üç farklı mod frekansı için ($\omega = 2.10, 2.50$ ve 2.90 Hz) sönümlenme etkisini göstermektedir. Şekil 2.37’den açıkça görüldüğü üzere sistem belli bir açısal momentuma ($L_{\Omega} = 0.0660$ kg.m²/s için $m = 0.069$ kg disk kütlesi için $\Omega = 4000$

dev/dak disk hızında) ulaştığında 1.mod frekansının yerine ($\omega=2.50$ Hz) simetrik oluşan $\omega=2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz frekanslarının genlikleri birbirine eşitlenmiştir. Ayrıca, bu disk hızı ($\Omega = 4000$ dev/dak) için 1.mod frekansındaki genlik minimumdur ve bu hızdan sonra 1.mod frekansının ($\omega = 2.50$ Hz) genliği artmıştır.

2.2.4.4. Disk Kütlesi $m=0.115$ kg İçin Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi

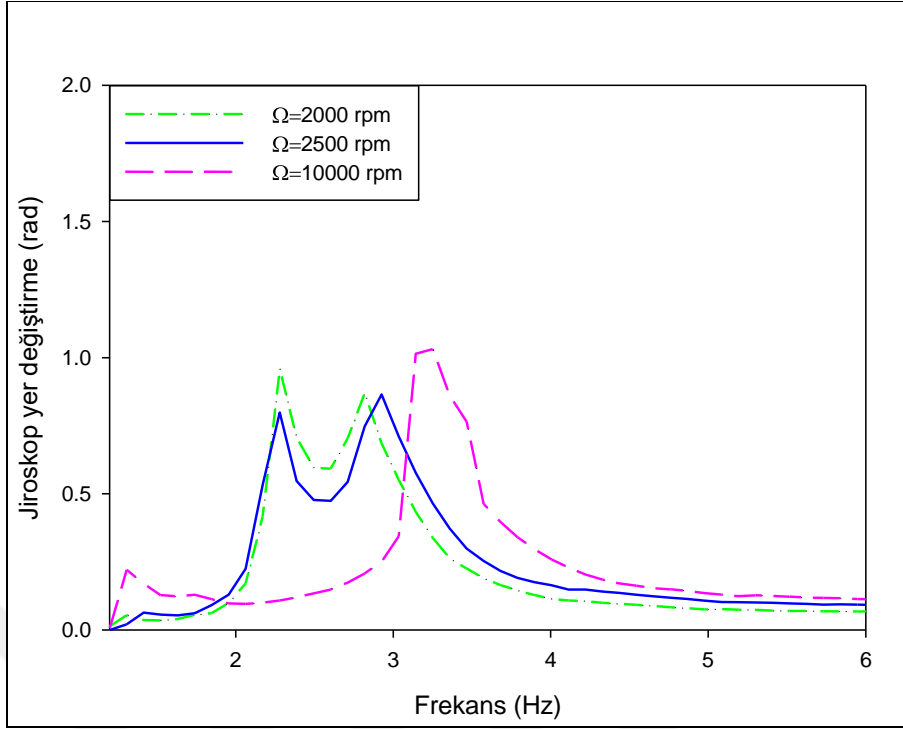
Bu çalışmada, jiroskopun disk hızı ile jiroskopun açısız momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, jirostabilizerin etkisiz (uyarlanmış jiroskop sabit) olduğu durum ve uyarlanmış jiroskopun serbest olup, jiroskopun disk hızı değiştirilerek $\Omega = 0, 2000, 2500, 10000$ dev/dak hızlarda döndüğü durumlar için deneysel analizler yapılmıştır. Ayrıca uyarlanmış jiroskopun serbest olduğu durumdaki deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), tek katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.115$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jirokolon} = 8.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$) sabit tutulmuştur.

Şekil 2.38’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk kütlesinin $m = 0.023$ kg için sabit tutulup, bu değişik disk hızlarının ($\Omega = 0, 2000, 2500, 10000$ dev/dak) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.38’den görüldüğü üzere jirostabilizerin etkisiz (uyarlanmış jiroskop sabit) olduğu durumda binanın yer değiştirmesi ve doğal frekansı, uyarlanmış jiroskopun serbest olup jiroskopun diski dönmediği ($\Omega = 0$ dev/dak) duruma göre artmıştır. Şekil 2.38’den anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, disk hızının $\Omega = 2500$ dev/dak olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir. Jiroskopun diski dönmediği durumda 1.mod frekansı $\omega = 2.50$ Hz olup, jiroskopun diski $\Omega = 2500$ dev/dak döndürülmesi ile binanın yer değiştirmesi 1.mod frekansı için yaklaşık 10 kat sönümlenmiştir. Ayrıca, jiroskopun diski $\Omega = 2500$ dev/dak döndürülmesi ile 1.mod frekansına göre simetrik yerde ve aynı genlikte iki ayrı mod frekansı ($\omega = 2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz) oluşmuştur. Çünkü bu sönümlenme etkisi, teorik çalışmalarda elde ettiğimiz optimum frekans oranı ($\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$) için optimum açısız momentum ($L_{\Omega} = 0.066$ kg.m²/s) değerine karşılık gelmektedir.

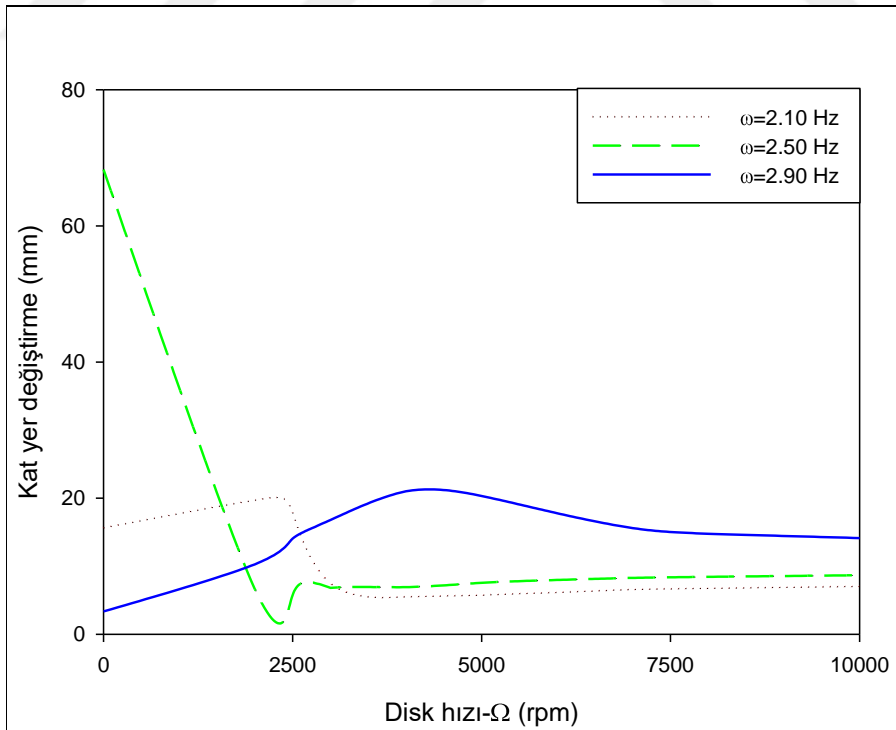


Şekil 2.38. Jirostabilizer etkisiz (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.115$ kg ve $\omega_{jyro} / \omega_{kat} = 1.2$)

Şekil 2.39 ise aynı koşullarda jirostabilizer etkisiyle, tek katlı yapının salınım genliğinin etkisiyle doğru orantılı olarak, jirostabilizer etkisiyle artmış veya azalmıştır. En iyi sönümün gerçekleştiği durumda (2500 dev/dak) jirostabilizer açısının $\theta = 0.86$ rad civarındaki bölgede salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum, Bölüm 2.1.1'de elde ettiğimiz maksimum sönümleme için gerekli optimum salınım açısını (0.86 rad) doğrulamıştır. Jirostabilizer maksimum kararlı sönümü için 0.86 rad salınım açısının geçilmemesi tavsiye edilmiştir.



Şekil 2.39. Jiroskopun farklı dönme hızları (Ω) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.115$ kg ve $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$)



Şekil 2.40. Zorlayıcının Farklı frekansları (ω) için tek katlı yapının Disk hızı (Ω) – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.115$ kg ve $\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$)

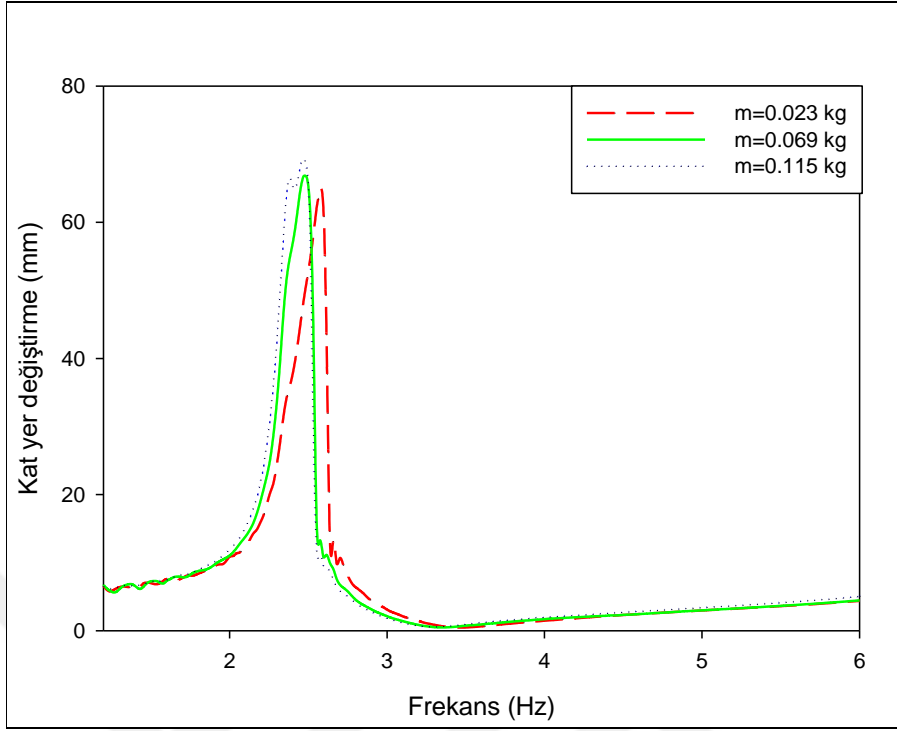
Şekil 2.40'da verilen disk hızı – yer değiştirme eğrileri, jiroskopun disk kütlelerinin $m = 0.115$ kg için sabit tutulup, bu üç farklı mod frekansı için ($\omega = 2.10, 2.50$ ve 2.90 Hz) sönümlenme etkisini göstermektedir. Şekil 2.40'dan açıkça görüldüğü üzere sistem optimum hıza ($m = 0.115$ kg için $\Omega = 2500$ dev/dak) ulaştığında 1.mod frekansındaki ($\omega=2.50$ Hz) genlik minimumdur. Disk hızı $\Omega = 2500$ dev/dak için elde edilen açısal momentum ($L_{\Omega} = 0.0660$ kg.m²/s), jiroskopun en iyi enerji transferi için gerekli optimum açısal momentumdur. Eğer açısal momentum, bu optimum değerden fazla olursa, 1.mod frekansının ($\omega = 2.50$ Hz) genliği artmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere, jiroskopun açısal momentumunun optimum değeri ($L_{\Omega} = 0.0660$ kg.m²/s), $m = 0.115$ kg disk kütlesi için yaklaşık $\Omega = 2500$ dev/dak disk hızında sağlanmıştır.

Yukarıdaki deneysel çalışmalardan da görüldüğü üzere sönümlenme etkisinin optimum değeri için jiroskopun kütlelerinin artması ile disk hızı azalmıştır. Jiroskop kütlelerinin $m = 0.023$ kg olması durumunda optimum disk hızı $\Omega = 8000$ dev/dak civarında iken, jiroskopun kütlelerinin beş katına ($m = 0.115$ kg) çıkarılması ile optimum disk hızı 2500 dev/dak'ya kadar düşmüştür. Sönümleyicilerde az hacim ve az kütle istendiğinden, mümkün olduğu kadar jiroskopun kütlelerinin azaltılması ve devir sayısının artırılması tercih edilmelidir.

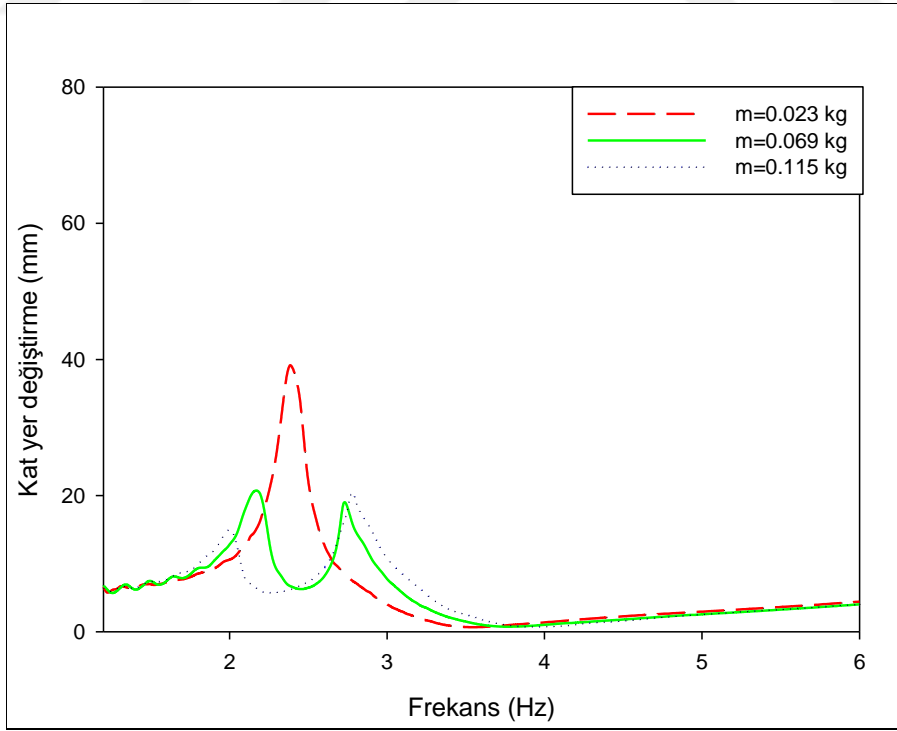
2.2.4.5. Disk Kütlelerinin Sönümlenmeye Etkisi

Bu çalışmada, jiroskopun disk kütlesi ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, jiroskopun disk kütlesi değiştirilerek, $m = 0.023, 0.069$ ve 0.115 kg disk kütleleri için deneysel analizler yapılmıştır. Ayrıca bu deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), tek katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jirokolon} = 7.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$) sabit tutulmuştur.

Şekil 2.41'de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 0$ dev/dak'da sabit tutulup, bu değişik disk kütlelerinin ($m = 0.023, 0.069$ ve 0.115 kg) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Disk kütleleri sistemin külesine oranla çok az olduğundan, Şekil 2.41'den anlaşılacağı üzere sistemin doğal frekanslarına dolayısı ile sistemin genliğine etkisi çok az olmuştur.

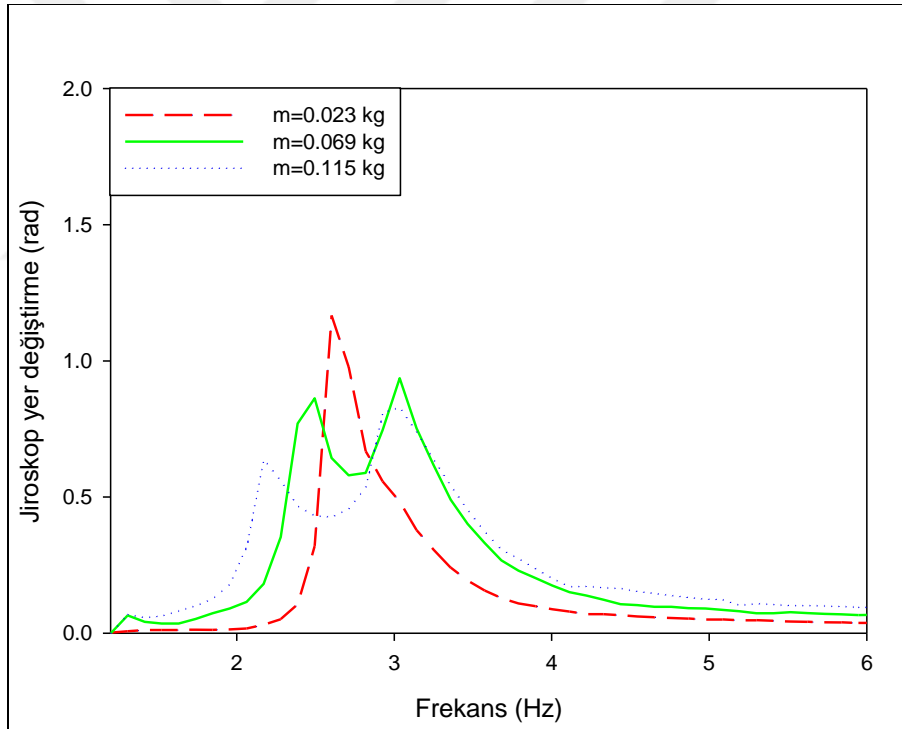


Şekil 2.41. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$)



Şekil 2.42. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$)

Şekil 2.42 ile verilen frekans – yer değiştirme eğrileri ise jiroskopun disk hızının $\Omega = 3000$ dev/dak için sabit tutulup, bu değişik disk kütlelerinin sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, disk kütlelerinin $m = 0.069$ kg ve 0.115 kg olduğu durumda gerçekleştiği görülmekte olup, pratik kolaylık nedeniyle kütlelerden hafif olan (0.069 kg) tercih edilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 2.43 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımı, tek katlı yapının salınım genliğinin etkisiyle doğru orantılı olarak, jiroskopun salınımı da artmış veya azalmıştır. En iyi sönümün gerçekleştiği durumda (3000 dev/dak) jiroskop açısının $\theta = 0.86$ rad civarındaki bölgede salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum, Bölüm 2.1.1’de elde ettiğimiz maksimum sönümlenme için gerekli optimum salınım açısını (0.86 rad) doğrulamıştır.



Şekil 2.43. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$)

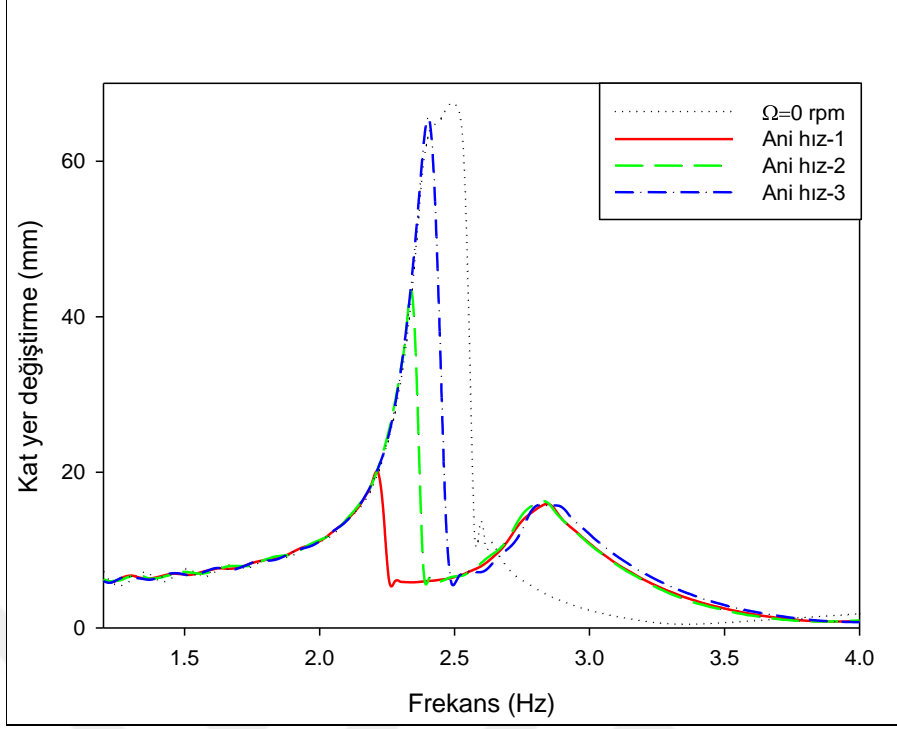
2.2.4.6. Ani Hızın Sönümlemeye Etkisi

Bu çalışmada, jiroskopun ani disk hızı ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümleme üzerindeki etkisini (optimum sönümlemeye en kısa sürede ulaşması için gerekli süreyi) incelemek amacıyla, 1.2 - 4.0 Hz aralığında frekans taraması yapılırken jiroskopun diski, belli frekans noktalarında aniden belli bir açısal momentuma ($m = 0.069$ kg için $\Omega = 4000$ dev/dak) arttırılarak deneysel analizler yapılmıştır. Ayrıca deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), tek katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{kat} = 2.5$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jirokolon} = 8.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{jiro} / \omega_{kat} = 1.2$) sabit tutulmuştur.

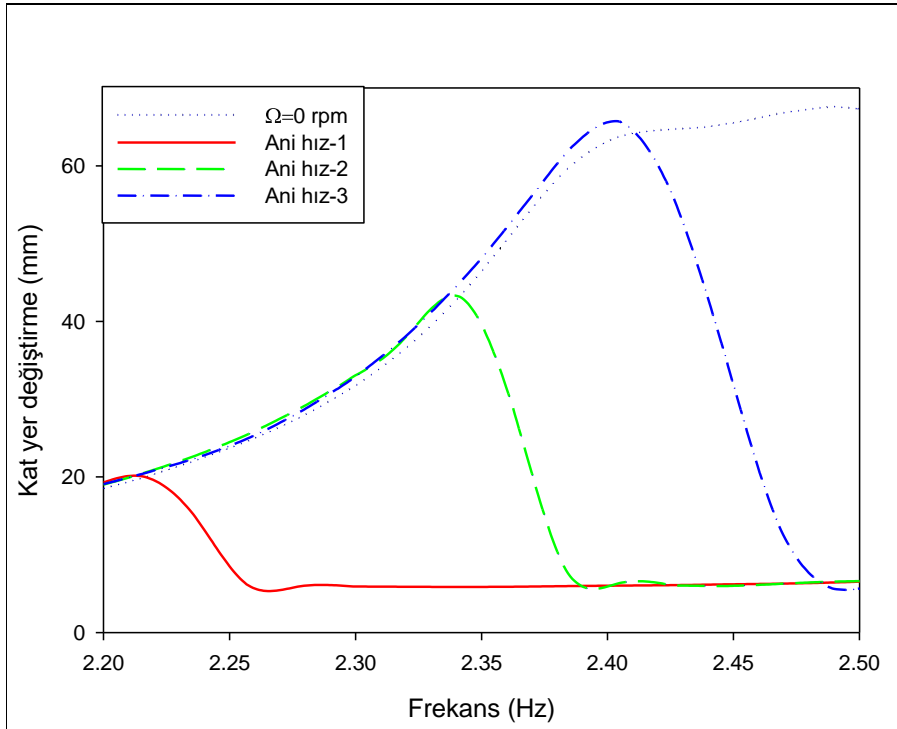
Şekil 2.44 tek katlı binanın yer değiştirmesi ile zorlayıcının frekansıyla ilişkisi, uyarlanmış jiroskopun aktif olmadığı durum ile farklı frekans değerlerinde ani hızlarda çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar deneysel olarak gösterilmektedir. Şekil 2.45’de de bu sonuçların büyütülmüş grafiği gösterilmektedir. Sistemim dinamik şartları değiştirilmeksizin aynı deney koşullarında, farklı frekans değerlerinde uyarlanmış jiroskop, aniden aktif hale getirilerek 4000 dev/dak ile döndürülmüştür. Bir nolu deneyde (Ani hız-1), tek katlı yapının doğal frekansı rezonans frekansına ulaşmadan hemen önce uyarlanmış jiroskop, frekans taraması 2.20 Hz’e geldiğinde aktif hale getirilerek 4000 dev/dak ile döndürülmeye başlanmış ve elde edilen grafik dolu çizgi ile gösterilmiştir. Büyütülmüş detaylı şekilden de (Şekil 2.45) görüleceği üzere, jiroskopun hareketiyle birlikte binanın yer değiştirmesi yaklaşık 3 saniye sonra hızlı bir şekilde minimize edilmiştir.

Deneylerin üçüncüsünde (Ani hız-3) ise, tek katlı binanın doğal frekansı rezonans frekansına ulaştığında (maksimum yer değiştirme anında) uyarlanmış jiroskop aktif hale getirilerek 4000 dev/dak ile döndürülmeye başlanmış ve elde edilen grafik noktalı-kesik çizgi ile gösterilmiştir. Şekil 2.45’de görüleceği üzere, jiroskopun hareketiyle birlikte binanın yer değiştirmesi hızlı bir şekilde minimize edilmiş ve yaklaşık 6 saniyede 10 kat sönümleme gerçekleşmiştir.

Bu deneyler göstermektedir ki, deprem veya herhangi bir dış etken sonucunda yapının titreşmeye başladığı sırada uyarlanmış jiroskopun harekete geçirilmesi ile birlikte sistemin yer değiştirmesi hızlı bir şekilde minimize edilebilir ve yapı zarara uğramadan kurtarılabilir. Bu durum bize uyarlanmış jiroskopun efektif bir titreşim yutucu olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.44. Deneyel olarak jiroskopun aktifleştirilmesi ile sönümlemesi arasındaki dinamik ilişki ($z_0 = 5$ mm, $m = 0.069$ kg, $\Omega_{\text{ani}} = 4000$ dev/dak ve $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$)



Şekil 2.45. Deneyel olarak jiroskopun aktifleştirilmesi ile sönümlemesi arasındaki dinamik ilişkinin ayrıntılı gösterimi. ($z_0 = 5$ mm, $m = 0.069$ kg, $\Omega_{\text{ani}} = 4000$ dev/dak ve $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$)

2.2.4.7. Tek Katlı Yapının Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi

Bu deneysel çalışmada, jiroskopun açısal momentumunun sönümlenme üzerindeki etkisi, tek katlı yapının zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri yardımıyla incelenmiştir. Bu analizlerde, tek katlı yapının doğal frekansından ($\omega = 2.50$ Hz) ve jiroskopun açısal momentumundan kaynaklanan simetrik frekansların ($\omega = 2.10$ ve 2.90 Hz) dinamik davranışlarını incelemek amacıyla, $\Omega = 0$, 4000 dev/dak disk hızları ve her bir disk hızı için sırasıyla zorlayıcının $\omega = 2.10$, 2.50 ve 2.90 Hz frekansları için deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), tek katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}} = 8.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sabit tutulmuştur.

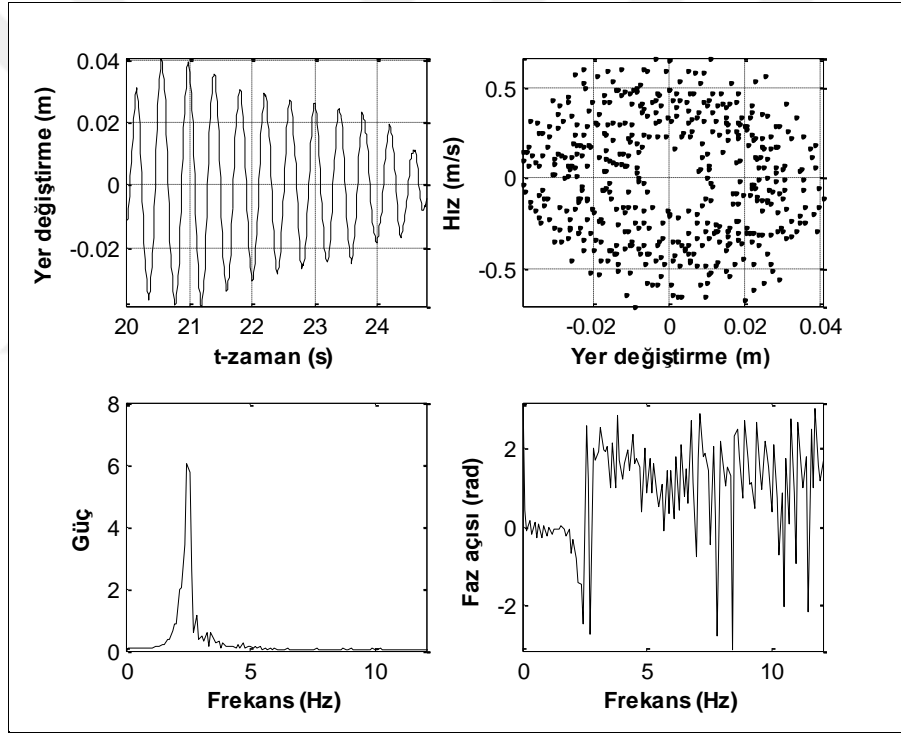
Şekil 2.46’da serbest titreşim yapan tek katlı yapının zamana bağlı yer değiştirmesi ile buna bağlı FFT analizi gösterilmektedir. Tek katlı yapının serbest titreşimine ait FFT analizinden, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak, doğal frekansın 2.5 Hz olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

Şekil 2.47 ve Şekil 2.50’de sırasıyla jiroskopun $\Omega = 0$ ve 4000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2.10$ Hz için zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, zorlayıcının frekansı $\omega = 2.10$ Hz için disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olduğu durumda tek katlı yapının genliği, dönmediği durumdakine göre artmıştır.

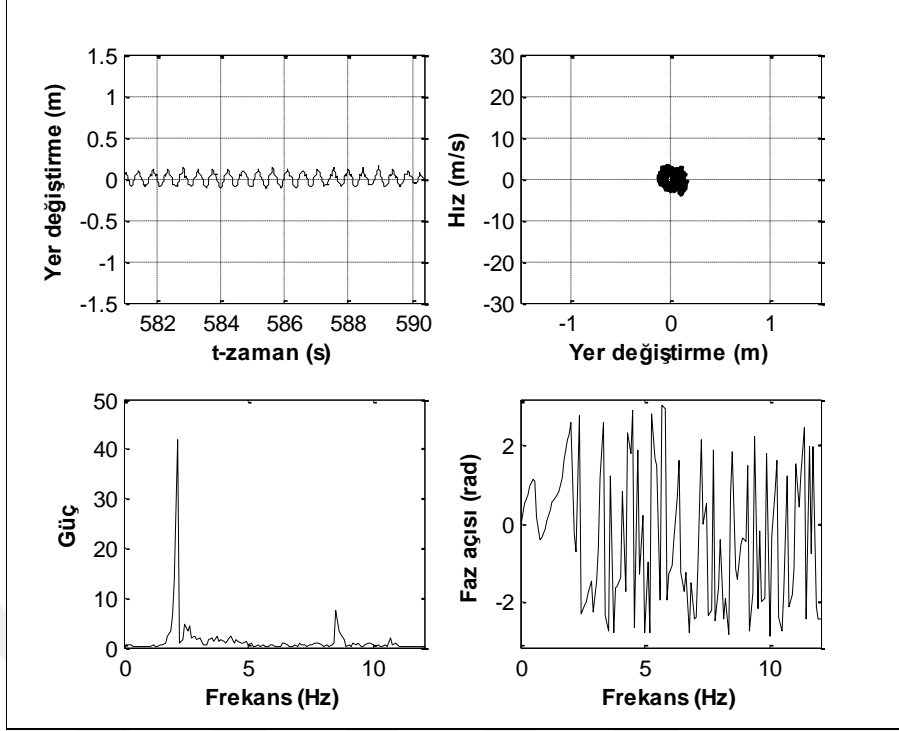
Şekil 2.48 ve Şekil 2.51’de sırasıyla jiroskopun $\Omega = 0$ ve 4000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2.50$ Hz (tek katlı yapının doğal frekansı) için zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, zorlayıcının frekansı $\omega = 2.50$ Hz için disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olduğu durumda tek katlı yapının genliği, dönmediği durumdakine göre azalmıştır.

Şekil 2.49 ve Şekil 2.52’de sırasıyla jiroskopun $\Omega = 0$ ve 4000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2.90$ Hz için zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, zorlayıcının frekansı $\omega = 2.90$ Hz için disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olduğu durumda tek katlı yapının genliği, dönmediği durumdakine göre artmıştır.

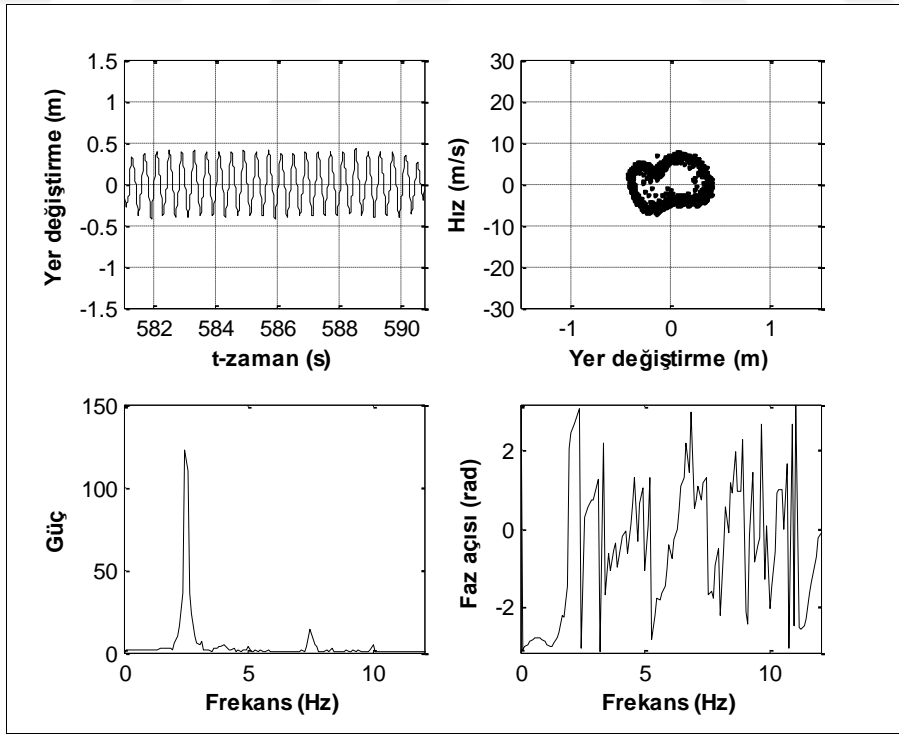
Aşağıdaki sonuçlardan anlaşılacağı üzere jiroskopun diski dönmediğinde tek katlı yapının 1.mod frekansı $\omega = 2.50$ Hz olup, disk dönmeye başladıktan sonra bu frekansın sönümlenip yerine bu frekansa göre simetrik iki ayrı mod frekansı ($\omega = 2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz) oluşmuştur. Bu simetrik dinamik davranış ve optimum disk hızı önceki teorik ve deneysel analizlerde de açıkça belirtilmiştir; jiroskop, belli bir açısız momentuma ($L_{\Omega} = 0.066 \text{ kg.m}^2/\text{s}$) ulaştığında, 1.mod frekansına ($\omega = 2.50$ Hz) simetrik oluşan $\omega = 2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz frekanslarının genlikleri birbirine eşitlenmiş ve bu disk hızı ($\Omega = 4000$ dev/dak) için 1.mod frekansındaki genlik minimum olmuştur. Bu hızdan sonra 1.mod frekansının ($\omega = 2.50$ Hz) genliği artmıştır.



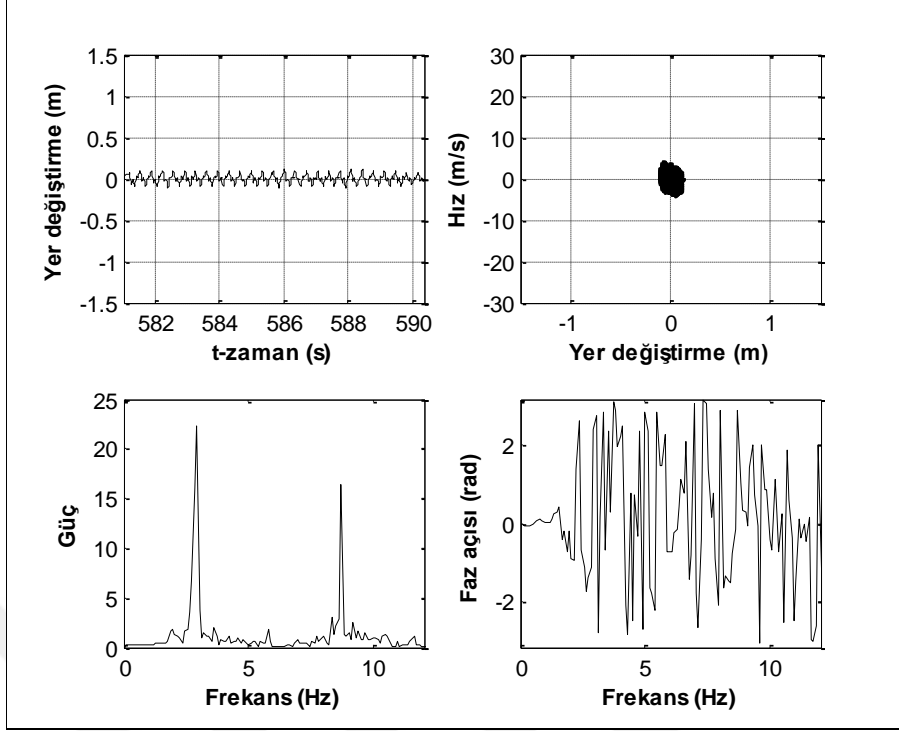
Şekil 2.46. Serbest titreşim için kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak)



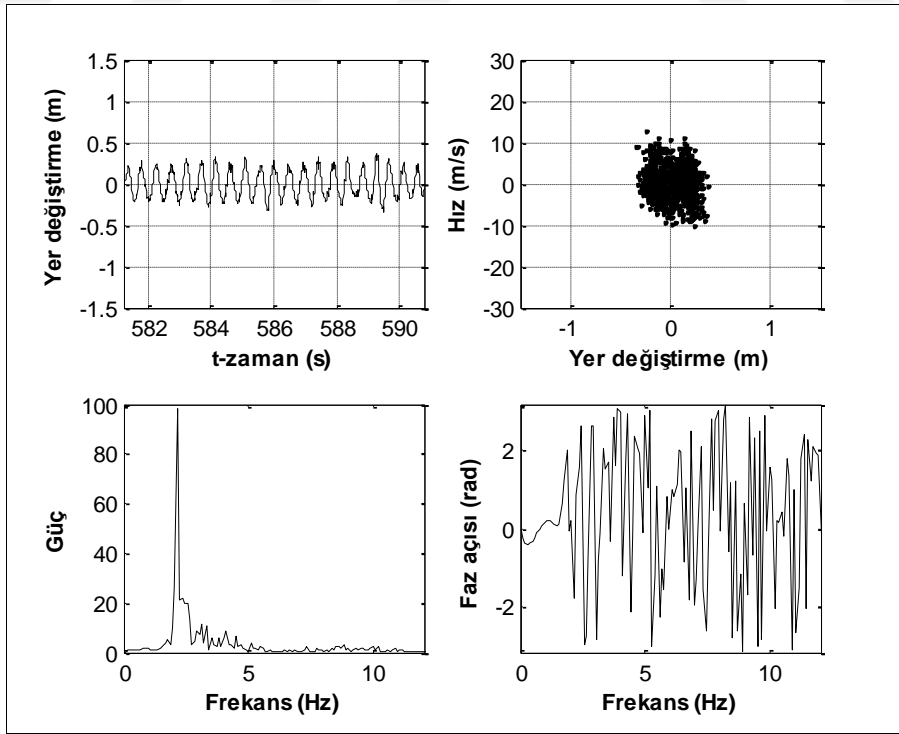
şekil 2.47. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)



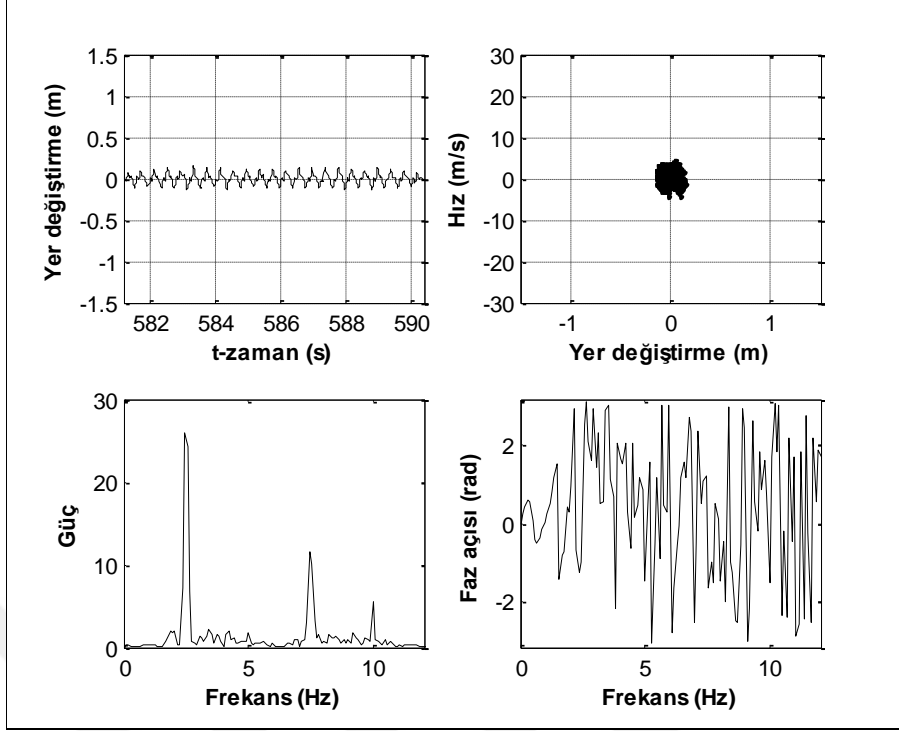
şekil 2.48. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)



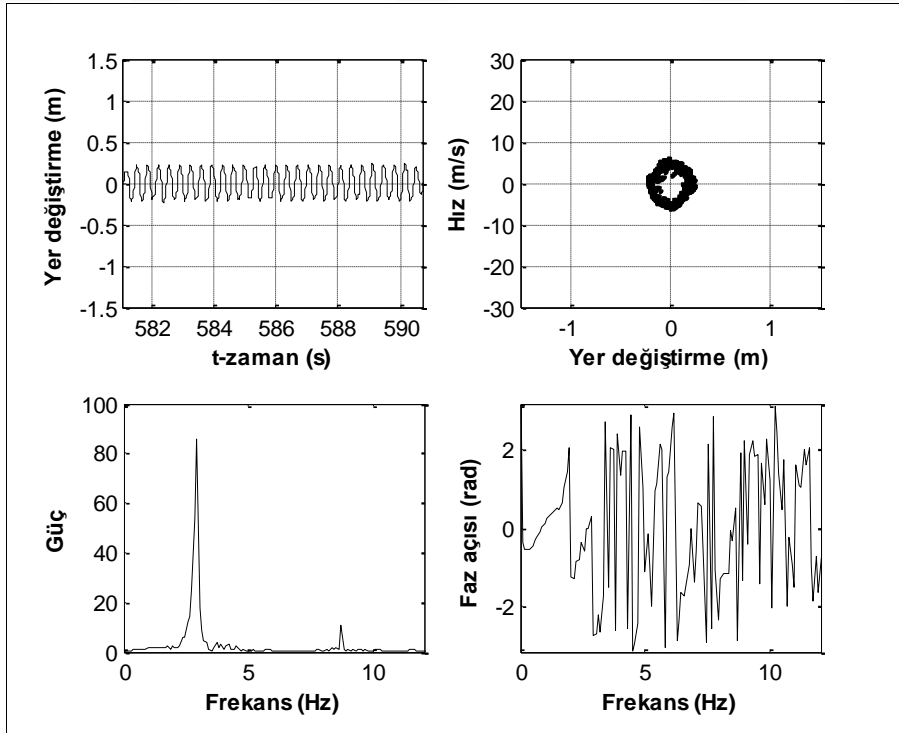
Şekil 2.49. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)



Şekil 2.50. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)



şekil 2.51. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)



şekil 2.52. Zorlanmış titreşim altında kata ait FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)

2.2.4.8. Uyarlanmış Jiroskopun Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi

Bu deneysel çalışmada, jiroskopun açısal momentumunun sönümlenme üzerindeki etkisi, uyarlanmış jiroskopun zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri yardımıyla incelenmiştir. Bu analizlerde, tek katlı yapının doğal frekansının ($\omega = 2.50$ Hz) ve açısal momentumundan kaynaklanan simetrik frekansların ($\omega = 2.10$ ve 2.90 Hz) dinamik davranışlarını incelemek amacıyla, $\Omega = 0$, 4000 dev/dak disk hızları ve her bir disk hızı için sırasıyla zorlayıcının $\omega = 2.10$, 2.50 ve 2.90 Hz frekansları için deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), tek katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}} = 8.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sabit tutulmuştur.

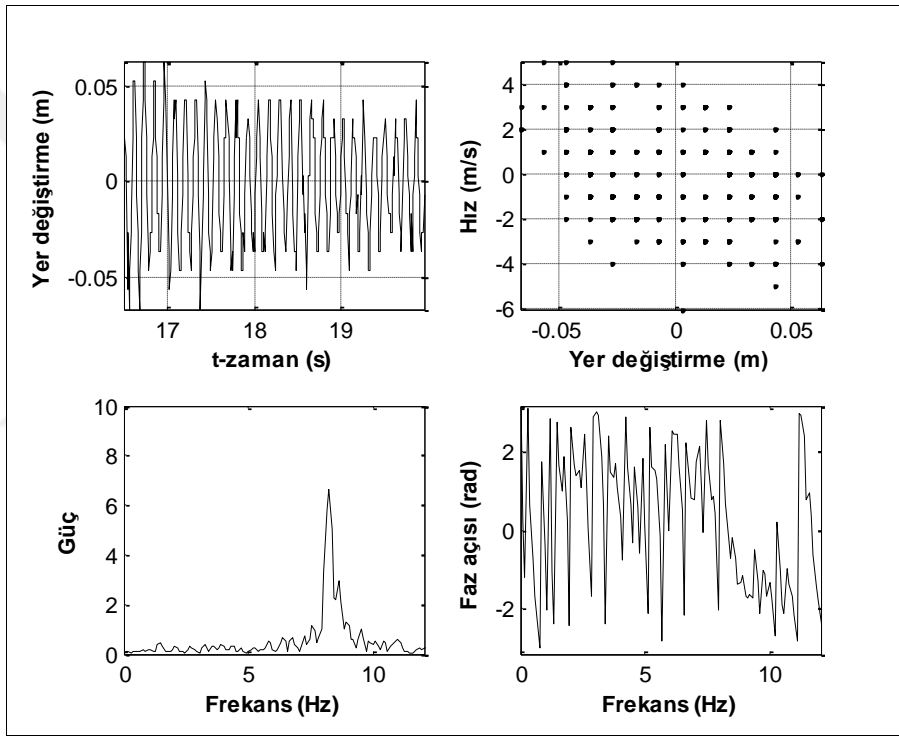
Şekil 2.53’de serbest titreşim yapan uyarlanmış jiroskopun zamana bağlı yer değiştirmesi ile buna bağlı FFT analizi gösterilmektedir. Uyarlanmış jiroskopun serbest titreşimine ait FFT analizinden, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak, doğal frekansın 8.5 Hz olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

Şekil 2.54 ve Şekil 2.57’de sırasıyla jiroskopun $\Omega = 0$ ve 4000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2.10$ Hz için zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, zorlayıcının frekansı $\omega = 2.10$ Hz için disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olduğu durumda tek katlı yapının genliği, dönmediği durumdakine göre artmıştır.

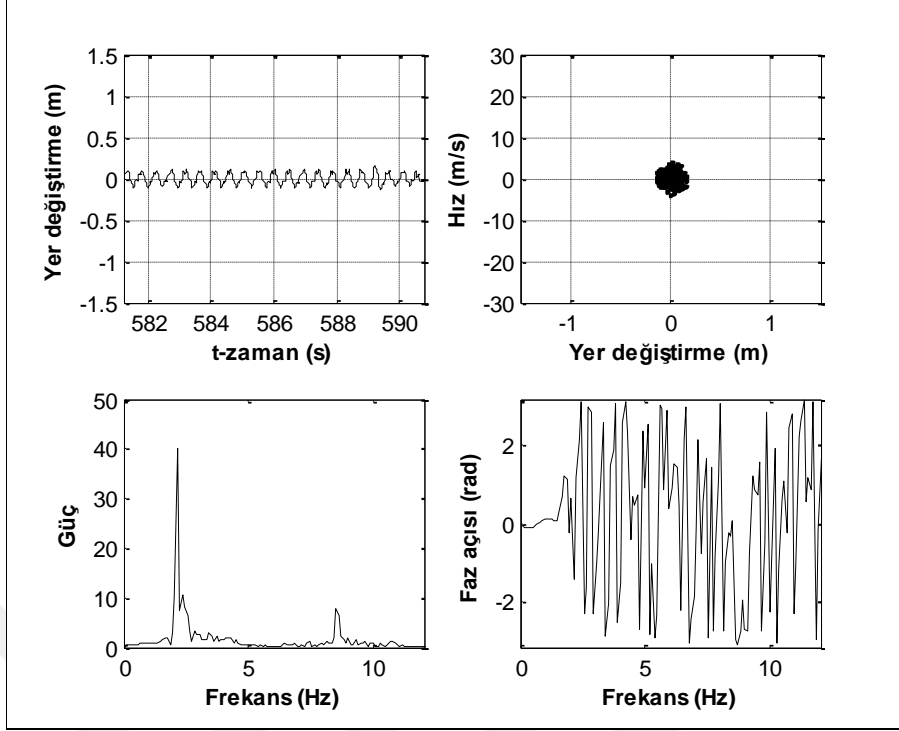
Şekil 2.55 ve Şekil 2.58’de sırasıyla jiroskopun $\Omega = 0$ ve 4000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2.50$ Hz (tek katlı yapının doğal frekansı) için zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, zorlayıcının frekansı $\omega = 2.50$ Hz için disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olduğu durumda tek katlı yapının genliği, dönmediği durumdakine göre azalmıştır.

Şekil 2.56 ve Şekil 2.59’da sırasıyla jiroskopun $\Omega = 0$ ve 4000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2.90$ Hz için zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, zorlayıcının frekansı $\omega = 2.90$ Hz için disk hızının $\Omega = 4000$ dev/dak olduğu durumda tek katlı yapının genliği, dönmediği durumdakine göre artmıştır.

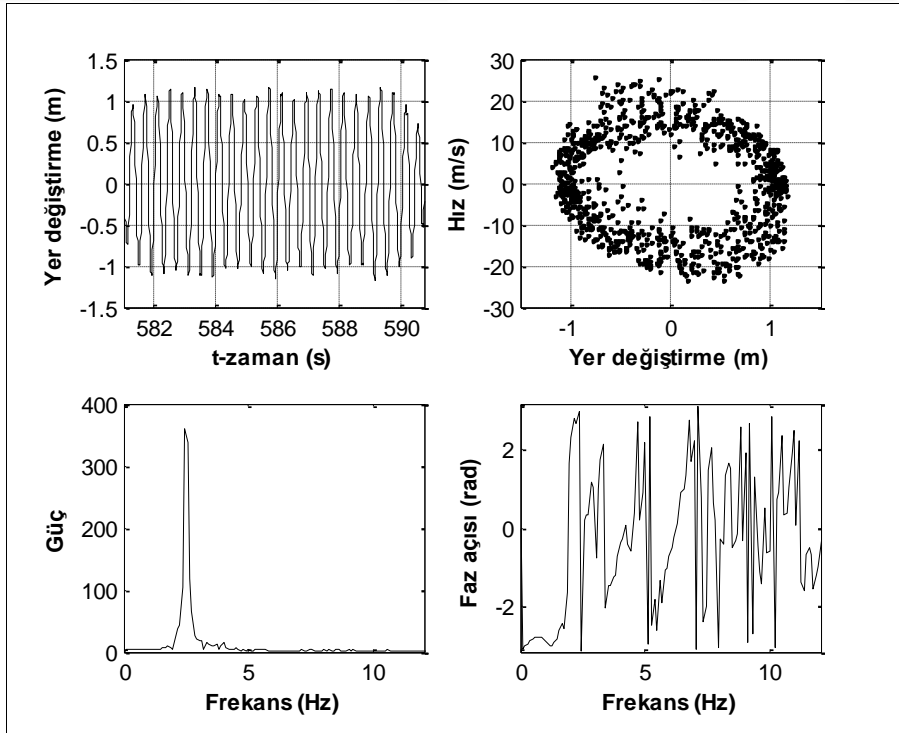
Aşağıdaki sonuçlardan anlaşılacağı üzere bir önceki bölümde tek katlı yapının zaman – yer değiştirme ve FFT analizlerine uyumlu olarak uyarlanmış jiroskopun, tek katlı yapının sönümlenmesinde etkin olduğu görülmektedir. Önceki teorik ve deneysel analizlerde de açıkça belirtilen bu simetrik dinamik davranış, tek katlı yapının doğal frekansına ($\omega = 2.50$ Hz) simetrik oluşan $\omega = 2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz frekanslarının genliklerini arttırmıştır. Ancak bu durum, tek katlı yapının 1.mod frekans genliğini düzgün olarak sönümlemiş ve bu disk hızı ($\Omega = 4000$ dev/dak) için 1.mod frekansındaki genlik minimum olmuştur.



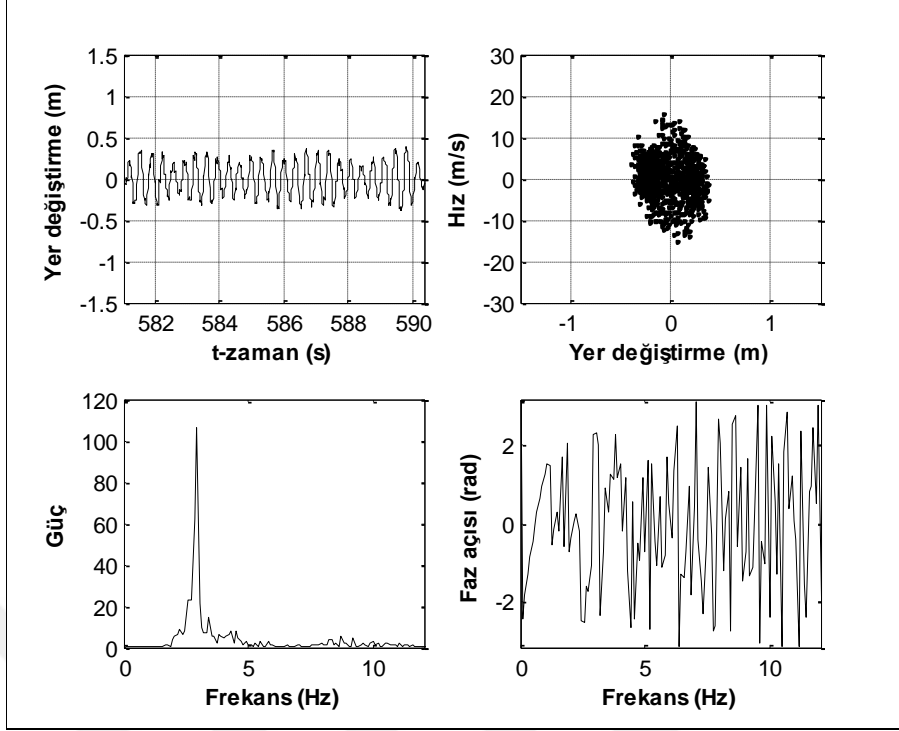
Şekil 2.53. Serbest titreşim altında uyarlanmış jiroskopa ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak)



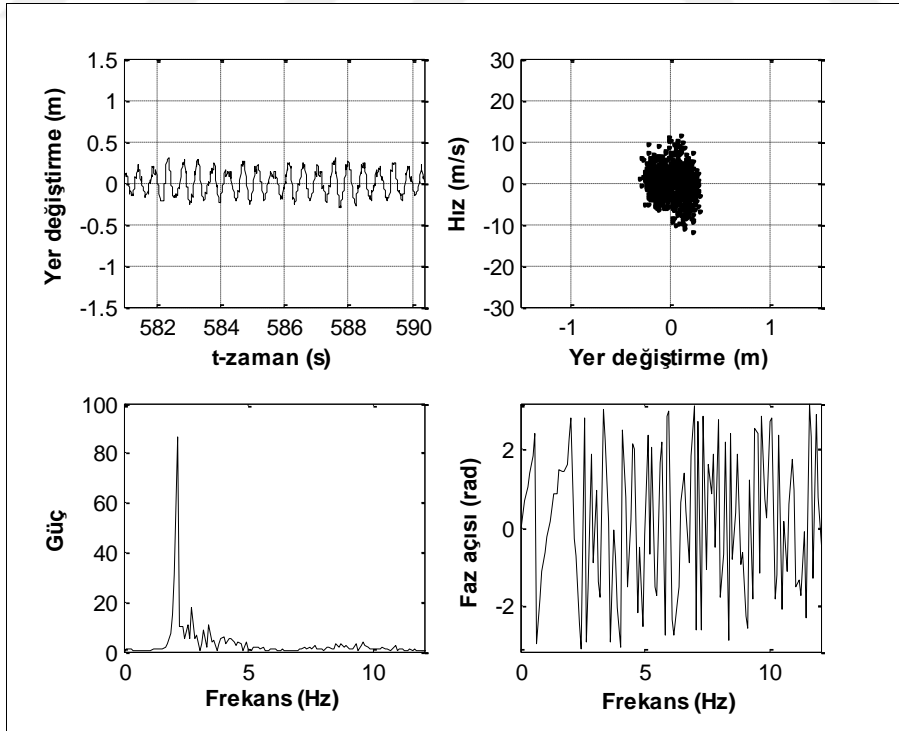
Şekil 2.54. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)



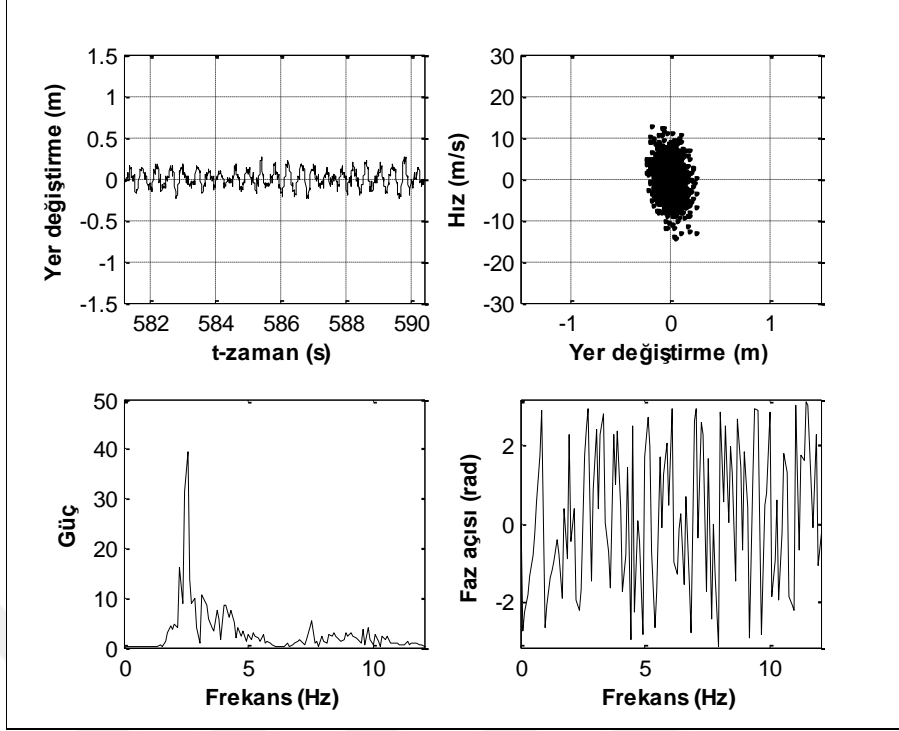
Şekil 2.55. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)



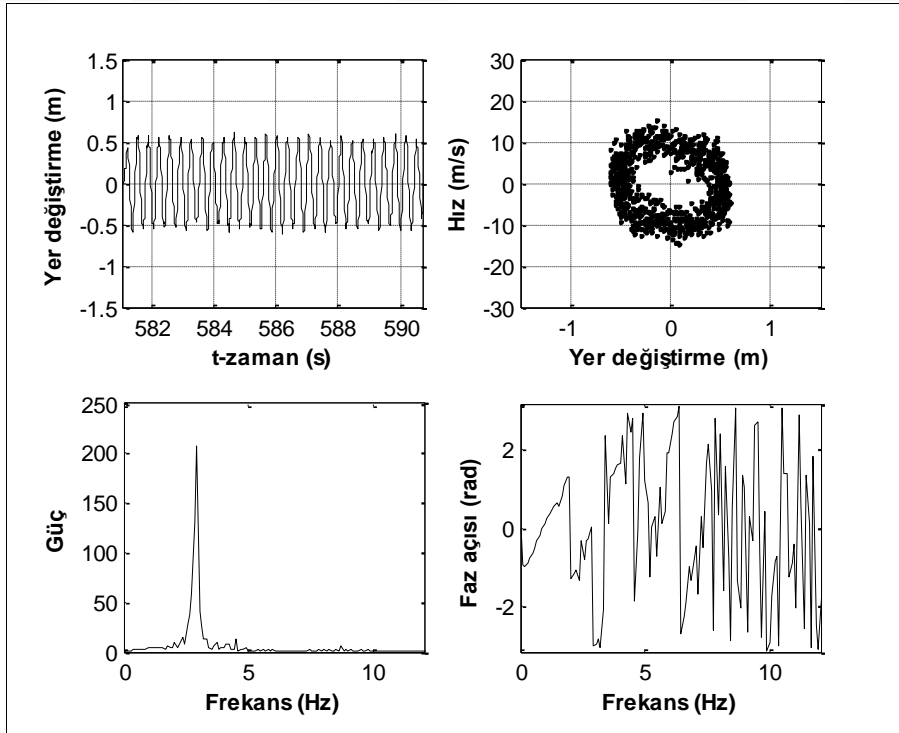
Şekil 2.56. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)



Şekil 2.57. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)



Şekil 2.58. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)



Şekil 2.59. Zorlanmış titreşim altında uyarlanmış jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)

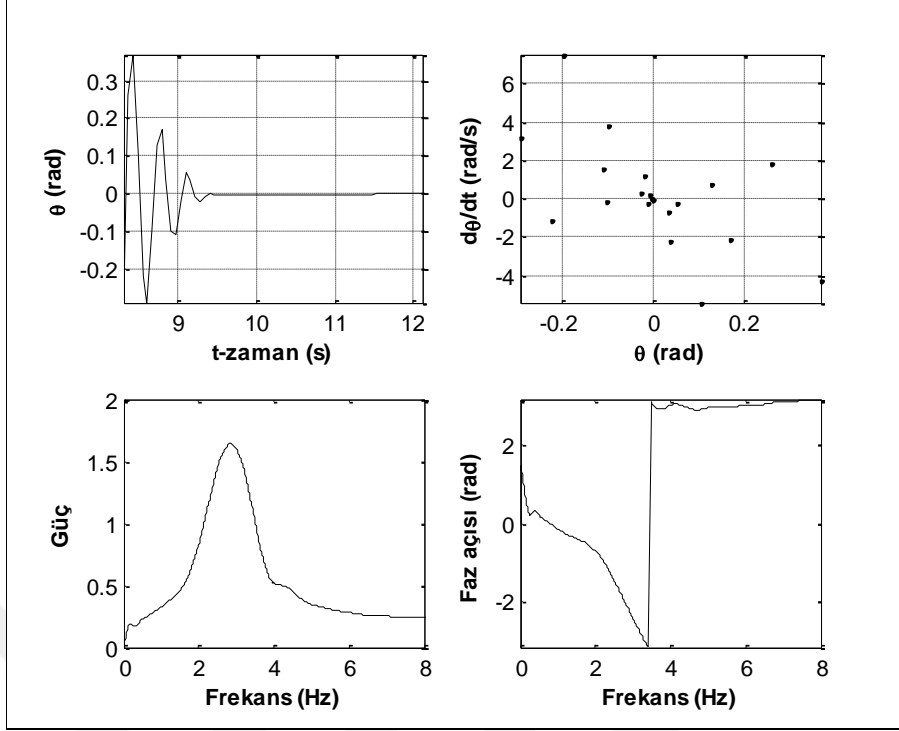
2.2.4.9. Jiroskopun Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi

Bu deneysel çalışmada, jiroskopun açısal momentumunun sönümlenme üzerindeki etkisi, jiroskopun zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri yardımıyla incelenmiştir. Bu analizlerde, tek katlı yapının doğal frekansının ($\omega = 2.50$ Hz) ve açısal momentumundan kaynaklanan simetrik frekansların ($\omega = 2.10$ ve 2.90 Hz) dinamik davranışlarını incelemek amacıyla, $\Omega = 4000$ dev/dak disk hızı ve bu disk hızı için sırasıyla zorlayıcının $\omega = 2.10$, 2.50 ve 2.90 Hz frekansları için deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), tek katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{kat}} = 2.5$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.069$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}} = 8.5$ Hz) ve jiroskop ile kat arasındaki frekans oranı ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sabit tutulmuştur.

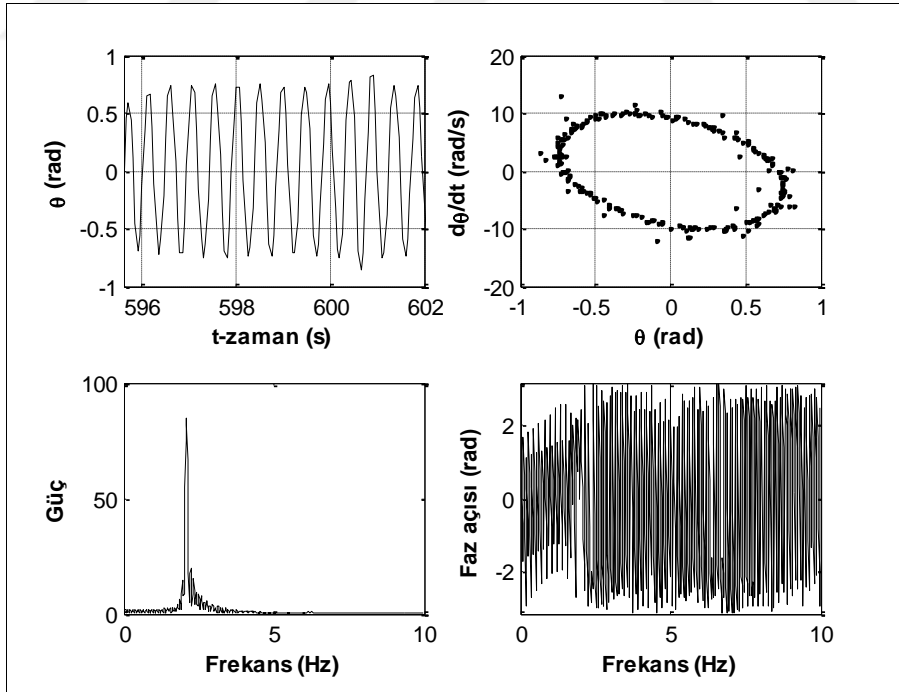
Şekil 2.60’da serbest titreşim yapan jiroskopun zaman – yer değiştirme ve FFT analizi gösterilmektedir. Jiroskopun serbest titreşimine ait FFT analizinden, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak, doğal frekansın 3 Hz olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

Şekil 2.61, Şekil 2.62 ve Şekil 2.63’de sırasıyla zorlayıcının $\omega = 2.10$, 2.50 ve 2.90 Hz frekansları için jiroskopun 4000 dev/dak disk hızında zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak jiroskopun tek katlı yapının sönümlenmesinde uyumlu bir salınım hareketine sahip olduğu tespit edilmiştir.

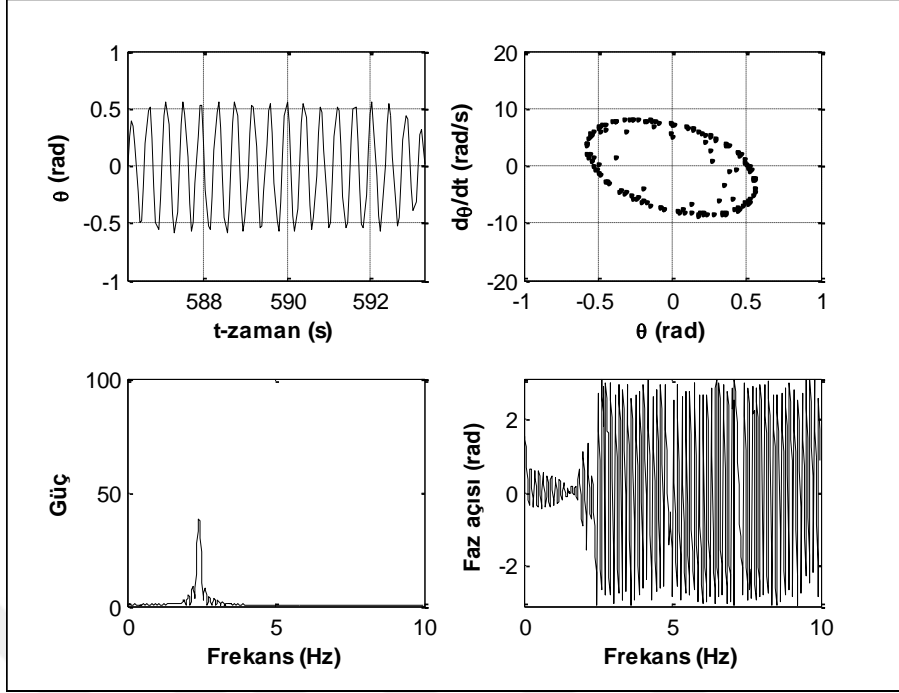
Aşağıdaki sonuçlardan anlaşılacağı üzere tek katlı yapının zaman – yer değiştirme ve FFT analizlerine uyumlu olarak uyarlanmış jiroskopun, tek katlı yapının sönümlenmesiyle uyumlu olarak hareket ettiği görülmektedir. Önceki teorik ve deneysel analizlerde de açıkça belirtilen bu simetrik dinamik davranış, tek katlı yapının doğal frekansına ($\omega = 2.50$ Hz) simetrik oluşan $\omega = 2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz frekanslarında da jiroskopun genliğinin artmasına ve tek katlı yapının doğal frekansındaki ($\omega = 2.50$ Hz) genliğin sönümlenmesine bağlı olarak jiroskopun genliğinin de düzgün olarak azalmasına neden olmuştur. Bu durum, daha önceki çalışmamızda bahsettiğimiz maksimum sönümlenme için gerekli optimum salınım açısını (0.86 rad) doğrulamıştır.



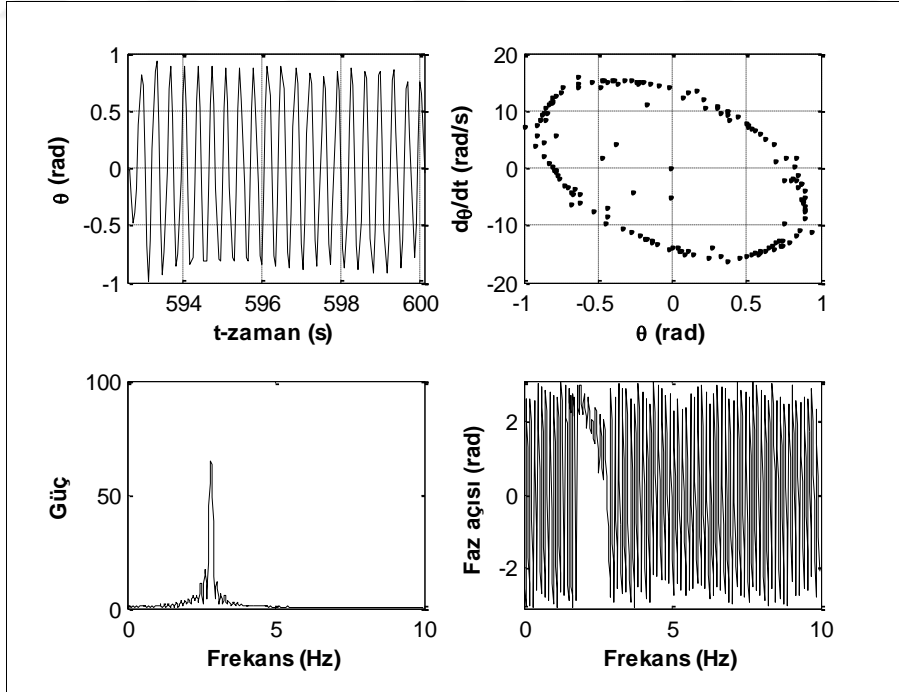
Şekil 2.60. Serbest titreşim altında jiroskopa ait FFT analizi ($\Omega = 0$ dev/dak)



Şekil 2.61. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.10$ Hz)



Şekil 2.62. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.50$ Hz)



Şekil 2.63. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($\Omega = 4000$ dev/dak ve $\omega = 2.90$ Hz)

2.3. Uyarlanmış Jiroskopun (Jirostabilizerin) Çok Katlı Yapıya Uygulanışı

2.3.1. Çok Katlı Yapının Deneysel Modeli

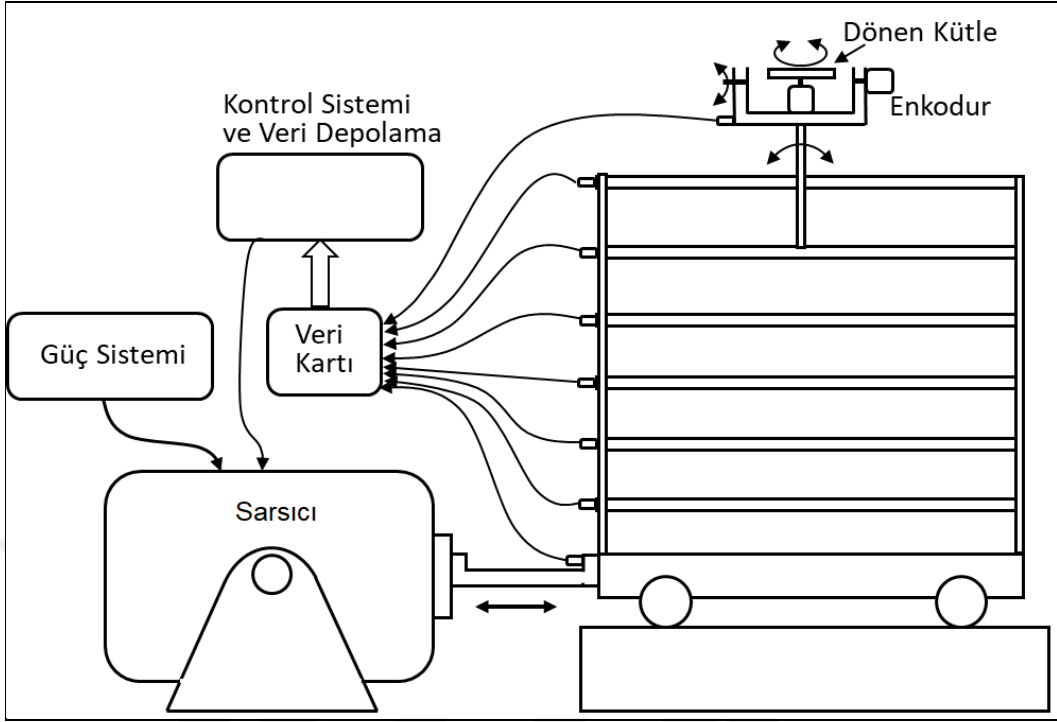
Çok katlı bina modeli, Şekil 2.64 ve Şekil 2.65’de görüldüğü gibi altta bir adet ve üstte altı adet (altı katlı model için) olmak üzere toplam yedi adet mdf (Medium-density fibreboard) levhadan ve bu levhaları birbirine bağlayan dört adet yaylanabilir çelik kolondan oluşmaktadır. Bu yapı temel olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır. Uyarlanmış jiroskop dediğimiz birinci kısım; jiroskopu taşıyan yaylanabilir çelik kolonun binanın en üst katının üst levhasından (tablasından) yukarı çıkan kısım ve diğer serbest uçta bağlı olan jiroskoptan oluşmaktadır. İkinci kısım ise jiroskopu taşıyan yaylanabilir çelik kolonun binanın en üst katının üst levhasından (tablasından) aşağı uzanan kısım ve en üst katı (bloğu) taşıyan diğer dört adet yaylanabilir kolonların diğer uçtan bir alt bloğa (bir alt katın zeminine) ankastre bağlanmasıyla oluşan altı katlı yapıdır. Binanın zemin tablası birbirine paralel iki kızak (rulmanlı liner yatak) üzerine oturtularak, sadece yatay doğrultuda istenilen yer değiştirme hareketini yapabilecek şekilde monte edilmiştir. Dikdörtgen kesitli çelik kolonların malzeme yoğunluğu $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ve eksenel yöndeki elastisite modülü $E = 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olarak alınmıştır. Çok katlı bina modeline ait diğer tüm fiziksel veriler Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 2.64’de görüldüğü gibi çok katlı bina modelinin zemin katı hiçbir esnemeye müsaade etmeyecek şekilde metal bir bağlantı ile sarsıcıya (LDS V450) civatalar ile bağlanmıştır. Böylelikle titreştiriciden zorlayıcının belli bir frekansı ve zorlayıcının yer değiştirme genliğinden gelen hareket yatay olarak hiçbir kayba uğramadan binanın alt zeminine iletilmektedir. Sarsıcının kontrolü Brüel & Kjaer / LDS CometUSB vibrasyon kontrol cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, bu cihaz yardımıyla deneyler için uygun zorlayıcının frekans aralıkları, zorlayıcının yer değiştirme genlikleri ve taramada zorlayıcının frekans artım miktarı belirlenmiştir. Tüm deneysel çalışmalarda zorlayıcı kuvvet olarak “harmonik”, tarama tipi olarak “doğrusal” ve artım oranı olarak ise “0.01 Hz/sn” seçilmiş ve sabit tutulmuştur.

Yapıda oluşan yer değiştirmeler ivmeölçerler kullanılarak kaydedilmiş olup, ivmeölçerlerin (DeltaTron accelerometers - Type 4513), yapıdan aldıkları elektrik sinyalleri doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden (PA500L amplifier) geçirdikten sonra veri toplama sistemine aktarılmıştır. Şekil 2.65’deki deney düzeneğinin şematik resminden de anlaşılacağı üzere veri toplama ünitesi (Brüel & Kjaer / LDS Comet

USB), ivmeölçerlerden gelen sinyallerin ölçüm geometrisini de dikkate alarak yer değiştirme, hız ve ivme olarak derlenmesini (multiple channel control, SCO-02V-01 ve filtre edilmesini, SCO-02V-02) sağlamaktadır. Sinyaller içeriklerine göre uygun hızda ve çözünürlükte örneklendikten sonra bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Jiroskop salınımının açısal yer değiştirmesine ait enkodur (RI 30-O, incremental encoder) sinyalleri ise doğrudan veri toplama sistemine kaydedilmiştir. Jiroskop disklerini taşıyan elektrik motorunun (NTM Prop Drive Series 35-36A 1800Kv / 875w) devir sayısı ise uzaktan radyo kumanda sistemiyle (FlySky FS-T6B) kontrol edilmiştir.



Şekil 2.64. Deney modelinin (6 katlı yapının) genel görünümü



Şekil 2.65. Deney düzeneğinin şematik resmi

Çok katlı yapıyı taşıyan kolonların uzunlukları ve katların yükseklikleri ayarlanarak binanın doğal frekansı değiştirilebilmektedir. Ancak deneysel çalışmamızda, kat yüksekliği tüm deneylerde sabit olacak şekilde jiroskopu taşıyan kolonun uzunluğu değiştirilerek farklı frekans oranları için ayarlanmıştır. Söz konusu frekans oranlarında, çok katlı yapı sabit tutularak jiroskopu taşıyan kolonun (ayarlanmış jiroskopun) doğal frekansı ($\omega_{jirokolon}$) deneysel olarak ölçülmüştür. Ayrıca, jiroskopu taşıyan kolonu da sabitledikten sonra, çok katlı yapının doğal frekansı (ω_{bina}) da deneysel olarak elde edilmiştir. Bu parametreler değişken disk hızı, disk kütlesi ve zorlayıcının değişken frekansları için incelenmiştir.

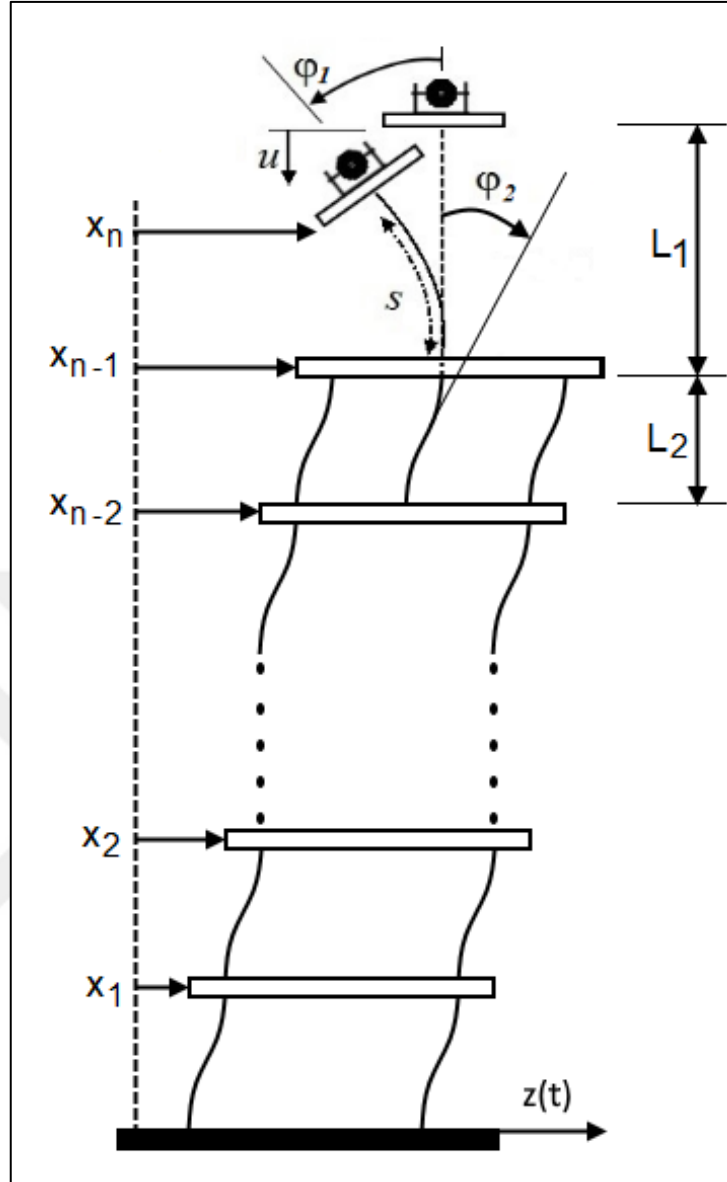
Tablo 2. Çok katlı deney modelinin fiziksel değerleri

Sembol	Sayısal Değer	Açıklama
z_0	0.005 m	Sarsıcı genliği
L_1	0.14 m	Jiroskopu taşıyan kolonun boyu
L_2	0.20 m	Yapıya ait en son katın yüksekliği
m_1	0.66 kg	1. Katın kütlesi
m_2	0.66 kg	2. Katın kütlesi
m_3	0.66 kg	3. Katın kütlesi
m_4	0.66 kg	4. Katın kütlesi
m_5	0.76 kg	5. Katın kütlesi
m_6	0.88 kg	6. Katın kütlesi
m_7	0.65 kg	Jiroskopu taşıyan kolonun uç kütlesi
c_1	0.3 N.s/m	1. Katın sönüm katsayısı
c_2	0.3 N.s/m	2. Katın sönüm katsayısı
c_3	0.3 N.s/m	3. Katın sönüm katsayısı
c_4	0.3 N.s/m	4. Katın sönüm katsayısı
c_5	0.3 N.s/m	5. Katın sönüm katsayısı
c_6	0.6 N.s/m	6. Katın sönüm katsayısı
c_7	1.0 N.s/m	Jiroskopu taşıyan kolonun sönüm katsayısı
k_1	3000 N/m	1. Katın rijitliği
k_2	3000 N/m	2. Katın rijitliği
k_3	3000 N/m	3. Katın rijitliği
k_4	3000 N/m	4. Katın rijitliği
k_5	3000 N/m	5. Katın rijitliği
k_6	4760 N/m	6. Katın rijitliği
k_7	106 N/m	Jiroskopu taşıyan kolonun rijitliği
m_f	0.311 kg	Mafsal ve motorun toplam kütlesi
R	0.04 m	Mafsal ve motor ağırlık merkezi yarıçapı
g	9.81 m/s ²	Yer çekimi ivmesi
k_g	0 N.m /rad	Jiroskop yayının rijitlik katsayısı
c_g	0.0005 N.m.s/rad	Jiroskop sönüm katsayısı
m	0.023-0.115 kg	Jiroskopun disk kütlesi
r	0.05 m	Disk yarıçapı
I_p	$(mr^2)/2+2.66e-5 \text{ kg.m}^2$	Disk polar atalet momenti
I_o	$(mr^2)/4 \text{ kg.m}^2$	Disk atalet momenti
I_{fx}	$6.74e-4 \text{ kg.m}^2$	Mafsalın x yönündeki atalet momenti
I_{fy}	$6.29e-4 \text{ kg.m}^2$	Mafsal y yönündeki atalet momenti
I_{fz}	$3.60e-4 \text{ kg.m}^2$	Mafsal z yönündeki atalet momenti
Ω	0-10000 dev/dak	Disk dönme hızı

2.3.2. Çok Katlı Yapının Matematiksel Modeli

Çok katlı bina için oluşturulan deneysel model, Şekil 2.64 ve Şekil 2.65’de görülmektedir. Bu modelin teorik analizinin yapılması için, modelin herhangi bir andaki davranışı Şekil 2.66’daki gibi olduğu kabul edilmiştir. Şekil 2.66’da, L_1 ve L_2 uzunlukları sırası ile jiroskopu taşıyan kolonun (uyarlanmış jiroskopun) boyunu ve çok katlı yapının son katına ait yüksekliğini gösterirken, L_1 ve L_2 uzunluklarının serbest uçlarındaki yatay yer değiştirmeler ise sırasıyla x_n ve x_{n-1} ile gösterilmiştir. Bunlara ilave olarak Şekil 2.66’da görüldüğü gibi, jiroskopu taşıyan kolonun dikeyle olan açısız yer değiştirmesi φ_1 ve son katı taşıyan kolonların dikeyle yaptığı açısız yer değiştirme ise φ_2 ile gösterilirken, L_1 uzunluğuna sahip kolonun kavis uzunluğu boyunca mesafe s ile gösterilmiştir. Kullanılan kolonların boyunun kalınlığına oranının büyük olması nedeniyle ($L_1 / h_1 > 20$ ve $L_2 / h_2 > 20$) hareket denklemlerinin elde edilmesinde Euler-Bernoulli teorisi kullanılmıştır. $L_1 / h_1 > 20$ ve $L_2 / h_2 > 20$ durumunda kolon ince olarak kabul edilip, kayma deformasyonu ve burulma ataletleri de ihmal edilmiştir. Çok katlı yapının zemin tablasına uygulanan ve $z(t)$ ile ifade edilen zorlatıcı yer değiştirmesi ise, harmonik olarak kabul edilmiştir.

Çok katlı yapıda kullanılan uyarlanmış jiroskop, tek katlı yapıda kullanılan Şekil 2.6’deki model ile aynı olup, modelden de anlaşıldığı gibi jiroskop, θ açısıyla serbest salınım hareketi yapabilen bir mafsal (gimbal), üzerine yerleştirilmiş elektrik motoru ve elektrik motorunun şaftına montaj edilmiş kendi geometrik eksenini etrafında ayarlanabilen devir sayılarında serbestçe dönebilen diskten oluşmaktadır. Elektrik motorunun şaftına montaj edilmiş diskin kütlesi m ve diskin devir sayısı Ω ile ifade edilirken, mafsal ve elektrik motorunun toplam kütlesi ise m_f ile ifade edilmiştir. Bunlarla birlikte, matematik modelde jiroskopun θ salınımını etki ettiği düşünülen yay katsayısı k_g ve sönüm katsayısı c_g matematik modele ilave edilmiştir.



Şekil 2.66. Çok katlı bina ve uyarlanmış jiroskop modeli.

Şekil 2.66'da çok katlı bina modelinin kinetik ve potansiyel enerji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Aşağıdaki denklemlerde nokta işareti ile zamana (t) göre türev ifade edilmiştir.

Kinetik enerji denklemi,

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 \dot{x}_4^2 + \frac{1}{2} m_5 \dot{x}_5^2 + \frac{1}{2} m_6 \dot{x}_6^2 + \frac{1}{2} m_7 \dot{x}_7^2 + T_{jiro} + T_{mafsal} \quad (2.73)$$

Burada, \dot{x}_n , n-serbestlik dereceli yapının her bir serbestliğinin zemine göre yatay hızlarıdır. Ayrıca, jiroskopun ve mafsalın kinetik enerji denklemleri sırasıyla;

$$T_{Jiro} = \frac{1}{2} I_o \left\{ \dot{\theta}^2 + [(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \cos \theta]^2 \right\} + \frac{1}{2} I_p [\Omega + (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \sin \theta]^2 \quad (2.74)$$

$$T_{mafsal} = \frac{1}{2} I_{fx} [(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \cos \theta]^2 + \frac{1}{2} I_{fy} [(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \sin \theta]^2 + \frac{1}{2} I_{fz} \dot{\theta}^2 \quad (2.75)$$

Çok katlı yapının potansiyel enerjisi denklemi,

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} k_1 (x_1 - z)^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (x_3 - x_2)^2 + \frac{1}{2} k_4 (x_4 - x_3)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_5 (x_5 - x_4)^2 + \frac{1}{2} k_6 (x_6 - x_5)^2 + \frac{1}{2} k_7 (x_7 - x_6)^2 \\ & + m_f g (R - R \cos \theta) + \frac{1}{2} k_g \theta^2 \end{aligned} \quad (2.76)$$

Burada, x_n , n-serbestlik dereceli yapının her bir serbestliğinin zemine göre yatay yer değiştirmeleridir.

Ayrıca, her bir kattan ve jiroskoptan kaynaklanan kayıp fonksiyonu D;

$$\begin{aligned} D = & \frac{1}{2} c_1 (\dot{x}_1 - \dot{z})^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2} c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 \\ & + \frac{1}{2} c_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 + \frac{1}{2} c_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)^2 + \frac{1}{2} c_7 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2 + \frac{1}{2} c_g \dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (2.77)$$

2.3.2.1. Çok Katlı Yapının Hareket Denklemleri

Çok katlı yapının hareket denkleminin Lagrange formu en genel haliyle aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_n} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_n} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_n} + \frac{\partial V}{\partial x_n} = 0 \quad (2.78)$$

Kinetik, potansiyel ve kayıp fonksiyonuna ait denklemler yukarıdaki Lagrange denkleminde (2.78) yerine konur ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, çok katlı yapının her bir serbestlik derecesi için hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$m_1\ddot{x}_1 + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - c_2\dot{x}_2 - k_2x_2 = k_1z + c_1\dot{z} \quad (2.79)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + (c_2 + c_3)\dot{x}_2 + (k_2 + k_3)x_2 - c_2\dot{x}_1 - c_3\dot{x}_3 - k_2x_1 - k_3x_3 = 0 \quad (2.80)$$

$$m_3\ddot{x}_3 + (c_3 + c_4)\dot{x}_3 + (k_3 + k_4)x_3 - c_3\dot{x}_2 - c_4\dot{x}_4 - k_3x_2 - k_4x_4 = 0 \quad (2.81)$$

$$m_4\ddot{x}_4 + (c_4 + c_5)\dot{x}_4 + (k_4 + k_5)x_4 - c_4\dot{x}_3 - c_5\dot{x}_5 - k_4x_3 - k_5x_5 = 0 \quad (2.82)$$

$$m_5\ddot{x}_5 + (c_5 + c_6)\dot{x}_5 + (k_5 + k_6)x_5 - c_5\dot{x}_4 - c_6\dot{x}_6 - k_5x_4 - k_6x_6 + \gamma \frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_5} = 0 \quad (2.83)$$

$$m_6\ddot{x}_6 + (c_6 + c_7)\dot{x}_6 + (k_6 + k_7)x_6 - c_6\dot{x}_5 - c_7\dot{x}_7 - k_6x_5 - k_7x_7 + \gamma \frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_6} = 0 \quad (2.84)$$

$$m_7\ddot{x}_7 + c_7\dot{x}_7 + k_7x_7 - c_7\dot{x}_6 - k_7x_6 + \gamma \frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_7} = 0 \quad (2.85)$$

Burada,

$$\gamma = \begin{pmatrix} I_p - I_o \\ +I_{fy} - I_{fx} \end{pmatrix} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \dot{\theta} \sin 2\theta + \begin{pmatrix} I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta \\ +I_{fx} \cos^2 \theta + I_{fy} \sin^2 \theta \end{pmatrix} (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta$$

$$\varphi_1 = (x_7 - x_6) \Delta_1 + \frac{1}{6} (x_7 - x_6)^3 \Delta_1^3$$

$$\begin{aligned}
\dot{\phi}_1 &= (\dot{x}_7 - \dot{x}_6)\Delta_1 + \frac{1}{2}(x_7 - x_6)^2 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6)\Delta_1^3 \\
\ddot{\phi}_1 &= (\ddot{x}_7 - \ddot{x}_6)\Delta_1 + \frac{1}{2}\left[(x_7 - x_6)^2 (\ddot{x}_7 - \ddot{x}_6) + 2(x_7 - x_6)(\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2\right]\Delta_1^3 \\
\phi_2 &= (x_6 - x_5)\Delta_2 + \frac{1}{6}(x_6 - x_5)^3 \Delta_2^3 \\
\dot{\phi}_2 &= (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)\Delta_2 + \frac{1}{2}(x_6 - x_5)^2 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)\Delta_2^3 \\
\ddot{\phi}_2 &= (\ddot{x}_6 - \ddot{x}_5)\Delta_2 + \frac{1}{2}\left[(x_6 - x_5)^2 (\ddot{x}_6 - \ddot{x}_5) + 2(x_6 - x_5)(\dot{x}_6 - \dot{x}_5)^2\right]\Delta_2^3 \\
\frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_5} &= -\Delta_2 - \frac{1}{2}(x_6 - x_5)^2 \Delta_2^3 \\
\frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_6} &= -\Delta_1 - \frac{1}{2}(x_7 - x_6)^2 \Delta_1^3 + \Delta_2 + \frac{1}{2}(x_6 - x_5)^2 \Delta_2^3 \\
\frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_7} &= \Delta_1 + \frac{1}{2}(x_7 - x_6)^2 \Delta_1^3
\end{aligned} \tag{2.86}$$

Burada, denklem (2.50)'de belirtilen yer değiştirme modeli kullanılarak, Δ_1 ve Δ_2 hareket denklemlerinin kısmi türev sabitleri elde edilir.

$$\begin{aligned}
\Delta_1 &= \psi'(L_1) = \frac{\pi}{2L_1} \\
\Delta_2 &= \psi'(L_2) = \frac{\pi}{2L_2}
\end{aligned} \tag{2.87}$$

2.3.2.2. Jiroskopun Hareket Denklemleri

Jiroskopa ait hareket denkleminin Lagrange formu en genel haliyle aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (2.88)$$

Kinetik, potansiyel ve kayıp fonksiyonuna ait denklemler yukarıdaki Lagrange denkleminde (2.88) yerine konur, gerekli matematiksel işlemler ve sadeleştirmeler yapılırsa, jiroskopa ait hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir (Denklem (2.89)).

$$\begin{aligned} & (I_o + I_{fz}) \ddot{\theta} - \frac{1}{2} (I_p - I_o + I_{fy} - I_{fx}) (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 \sin 2\theta - I_p \Omega (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \cos \theta \\ & + m_f g R \sin \theta + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0 \end{aligned} \quad (2.89)$$

2.3.2.3. Çok Katlı Yapının Küçük Yer Değişiklikleri İçin Hareket Denklemleri

Yukarıda elde ettiğimiz hareket denklemlerine yaklaşımın en kolay yolu hareketin denge pozisyonunda kinetik enerjisinin sıfır olduğunu düşünmektir. Sistemin denge pozisyonunda, bir başka deyişle $t = 0$ anında, $\dot{x}_n \approx 0$ ve $\dot{\theta} \approx 0$ olduğu kabul edilebilir. Ayrıca, uyarlanmış jiroskop – çok katlı bina modeli için kullanılan (2.86)'daki denklemler yüksek dereceden nonliner denklemlerdir. Bu denklemlerdeki yer değişikliklerinin çok küçük olduğu kabulü yapılarak, yüksek dereceli terimlerin harekete etkisi yaklaşık sıfıra indirilmiş olduğundan, bu terimler ihmal edilebilirler. Böylece uyarlanmış jiroskop – çok katlı bina modeli için hareket denklemleri tekrardan düzenlenerek aşağıda görüldüğü gibi (denklemler (2.90) – (2.97)) elde edilmiş olur.

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = k_1 z + c_1 \dot{z} \quad (2.90)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 + (k_2 + k_3) x_2 - c_2 \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 - k_3 x_3 = 0 \quad (2.91)$$

$$m_3\ddot{x}_3 + (c_3 + c_4)\dot{x}_3 + (k_3 + k_4)x_3 - c_3\dot{x}_2 - c_4\dot{x}_4 - k_3x_2 - k_4x_4 = 0 \quad (2.92)$$

$$m_4\ddot{x}_4 + (c_4 + c_5)\dot{x}_4 + (k_4 + k_5)x_4 - c_4\dot{x}_3 - c_5\dot{x}_5 - k_4x_3 - k_5x_5 = 0 \quad (2.93)$$

$$m_5\ddot{x}_5 + (c_5 + c_6)\dot{x}_5 + (k_5 + k_6)x_5 - c_5\dot{x}_4 - c_6\dot{x}_6 - k_5x_4 - k_6x_6 - \gamma\Delta_2 = 0 \quad (2.94)$$

$$m_6\ddot{x}_6 + (c_6 + c_7)\dot{x}_6 + (k_6 + k_7)x_6 - c_6\dot{x}_5 - c_7\dot{x}_7 - k_6x_5 - k_7x_7 + \gamma(-\Delta_1 + \Delta_2) = 0 \quad (2.95)$$

$$m_7\ddot{x}_7 + c_7\dot{x}_7 + k_7x_7 - c_7\dot{x}_6 - k_7x_6 + \gamma\Delta_1 = 0 \quad (2.96)$$

$$(I_o + I_{fx})\ddot{\theta} - I_p\Omega[(\dot{x}_7 - \dot{x}_6)\Delta_1 + (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)\Delta_2]\cos\theta + m_f gR \sin\theta + k_g\theta + c_g\dot{\theta} = 0 \quad (2.97)$$

Burada,

$$\gamma = \begin{pmatrix} I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta \\ + I_{fx} \cos^2 \theta + I_{fy} \sin^2 \theta \end{pmatrix} [(\ddot{x}_7 - \ddot{x}_6)\Delta_1 + (\ddot{x}_6 - \ddot{x}_5)\Delta_2] + I_p\Omega\dot{\theta}\cos\theta$$

$$\varphi_1 = (x_7 - x_6)\Delta_1$$

$$\dot{\varphi}_1 = (\dot{x}_7 - \dot{x}_6)\Delta_1$$

$$\ddot{\varphi}_1 = (\ddot{x}_7 - \ddot{x}_6)\Delta_1$$

$$\varphi_2 = (x_6 - x_5)\Delta_2$$

$$\dot{\phi}_2 = (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)\Delta_2$$

$$\ddot{\phi}_2 = (\ddot{x}_6 - \ddot{x}_5)\Delta_2 \quad (2.98)$$

$$\frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_5} = -\Delta_2$$

$$\frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_6} = -\Delta_1 + \Delta_2$$

$$\frac{\partial(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{\partial \dot{x}_7} = \Delta_1$$

Jiroskopun doğal frekansını elde edebilmek için denklem (2.97)'de $m_f g R \sin \theta$ teriminde bulunan sinüs fonksiyonu yerine θ 'nın küçük değerleri için $\sin \theta = \theta - \theta^3/3!$ Maclaurin açılımı kullanılabilir. Hareket denklemleri için yeniden düzenleme yapılırsa en sade şekliyle hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = k_1 z + c_1 \dot{z} \quad (2.99)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 + (k_2 + k_3) x_2 - c_2 \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 - k_3 x_3 = 0 \quad (2.100)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + (c_3 + c_4) \dot{x}_3 + (k_3 + k_4) x_3 - c_3 \dot{x}_2 - c_4 \dot{x}_4 - k_3 x_2 - k_4 x_4 = 0 \quad (2.101)$$

$$m_4 \ddot{x}_4 + (c_4 + c_5) \dot{x}_4 + (k_4 + k_5) x_4 - c_4 \dot{x}_3 - c_5 \dot{x}_5 - k_4 x_3 - k_5 x_5 = 0 \quad (2.102)$$

$$\begin{aligned} & \mu_1 \ddot{x}_5 + (c_5 + c_6) \dot{x}_5 + (k_5 + k_6) x_5 - c_5 \dot{x}_4 - c_6 \dot{x}_6 - k_5 x_4 - k_6 x_6 \\ & - \left\{ \varepsilon \left[\ddot{x}_7 \Delta_1 + \ddot{x}_6 (\Delta_2 - \Delta_1) \right] \right\} \Delta_2 + \beta \Delta_2 \dot{\theta} = 0 \end{aligned} \quad (2.103)$$

$$\begin{aligned} & \mu_2 \ddot{x}_6 + (c_6 + c_7) \dot{x}_6 + (k_6 + k_7) x_6 - c_6 \dot{x}_5 - c_7 \dot{x}_7 - k_6 x_5 - k_7 x_7 \\ & + \left[\varepsilon (\ddot{x}_7 \Delta_1 - \ddot{x}_5 \Delta_2) \right] (\Delta_2 - \Delta_1) + \beta (-\Delta_1 + \Delta_2) \dot{\theta} = 0 \end{aligned} \quad (2.104)$$

$$\begin{aligned} & \mu_3 \ddot{x}_7 + c_7 \dot{x}_7 + k_7 x_7 - c_7 \dot{x}_6 - k_7 x_6 + \left\{ \varepsilon \left[\ddot{x}_6 (\Delta_2 - \Delta_1) - \ddot{x}_5 \Delta_2 \right] \right\} \Delta_1 \\ & + \beta \Delta_1 \dot{\theta} = 0 \end{aligned} \quad (2.105)$$

$$\begin{aligned} & (I_o + I_{fz}) \ddot{\theta} - \left[(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) \Delta_1 + (\dot{x}_6 - \dot{x}_5) \Delta_2 \right] \beta + m_f g R \left(1 - \frac{\theta^2}{3!} \right) \theta \\ & + k_g \theta + c_g \dot{\theta} = 0 \end{aligned} \quad (2.106)$$

Burada,

$$\mu_1 = m_5 + \Delta_2^2 \varepsilon$$

$$\mu_2 = m_6 + (\Delta_2 - \Delta_1)^2 \varepsilon$$

$$\mu_3 = m_7 + \Delta_1^2 \varepsilon \quad (2.107)$$

$$\beta = I_p \Omega \cos \theta$$

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} I_o \cos^2 \theta + I_p \sin^2 \theta \\ + I_{fx} \cos^2 \theta + I_{fy} \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

2.3.3. Çok Katlı Yapının Teorik Bulguları

Tablo 2’de deney modelinin fiziksel değerleri linerleştirilmiş denklem (2.110)’da yerine konursa kütle ve rijitlik matrisleri sırasıyla;

$$M = \begin{bmatrix} 0.6600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6600 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8088 & 0.0635 & -0.1123 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0635 & 0.9628 & -0.1463 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1123 & 1.1463 & 0.9086 \end{bmatrix}$$

$$K = 1e3 \begin{bmatrix} 5.9955 & -2.9977 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2.9977 & 5.9955 & -2.9977 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2.9977 & 5.9955 & -2.9977 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.9977 & 5.9955 & -2.9977 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2.9977 & 7.7447 & -4.7470 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4.7470 & 4.8402 & -0.0932 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0932 & 0.0932 \end{bmatrix}$$

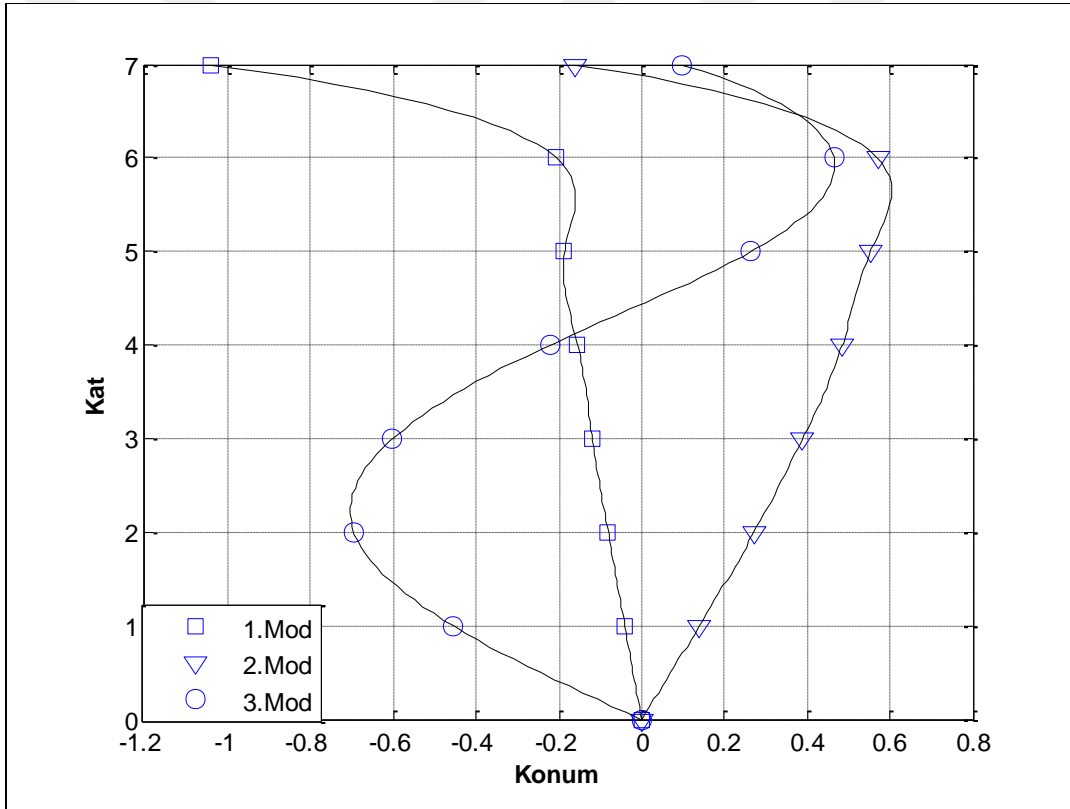
Böylece, modal vektör matrisi ve mod frekansları sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P = \begin{bmatrix} 0.2091 & 0.4187 & 0.5674 & -0.5543 & -0.3712 & 0.1150 & 0.0290 \\ -0.3827 & -0.5449 & -0.2291 & -0.3628 & -0.5649 & 0.2237 & 0.0574 \\ 0.4912 & 0.2906 & -0.4749 & 0.3168 & -0.4886 & 0.3201 & 0.0847 \\ -0.5163 & 0.1666 & 0.4209 & 0.5702 & -0.1787 & 0.3992 & 0.1104 \\ 0.4906 & -0.5475 & 0.3257 & 0.0532 & 0.2485 & 0.5299 & 0.0905 \\ -0.2472 & 0.3402 & -0.3418 & -0.3639 & 0.4577 & 0.5945 & 0.1044 \\ 0.0129 & -0.0100 & -0.0034 & -0.0201 & 0.0348 & -0.2017 & 0.9785 \end{bmatrix}$$

$$\omega_n = 1.50, \quad 2.51, \quad 7.42, \quad 12.44, \quad 16.63, \quad 19.49, \quad 20.99 \text{ Hz}$$

Mod vektörüne karşılık gelen mod şekilleri matrisi aşağıdaki gibi elde edilir. Ayrıca, ilk 3 moda ait mod şekilleri de Şekil 2.67’de verilmiştir.

$$S = \begin{bmatrix} -0.0408 & 0.1400 & -0.4566 & 0.6825 & -0.6993 & 0.5157 & -0.2544 \\ -0.0807 & 0.2722 & -0.6952 & 0.4471 & 0.2832 & -0.6734 & 0.4665 \\ -0.1189 & 0.3893 & -0.6020 & -0.3896 & 0.5846 & 0.3637 & -0.6011 \\ -0.1545 & 0.4848 & -0.2213 & -0.7024 & -0.5199 & 0.1984 & 0.6358 \\ -0.1868 & 0.5535 & 0.2649 & -0.0706 & -0.3740 & -0.6228 & -0.5648 \\ -0.2063 & 0.5701 & 0.4642 & 0.3753 & 0.3591 & 0.3641 & 0.2714 \\ -1.0414 & -0.1601 & 0.0961 & 0.0514 & 0.0128 & -0.0169 & -0.0250 \end{bmatrix}$$



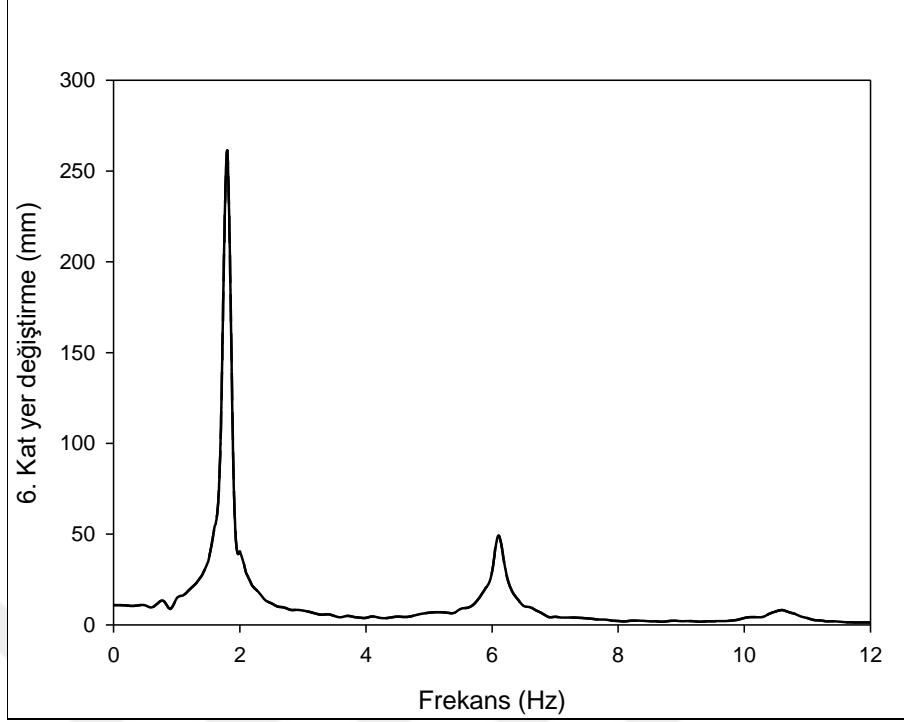
Şekil 2.67. Çok katlı yapının mod şekilleri

2.3.3.1. Optimum Frekans Oranının Belirlenmesi

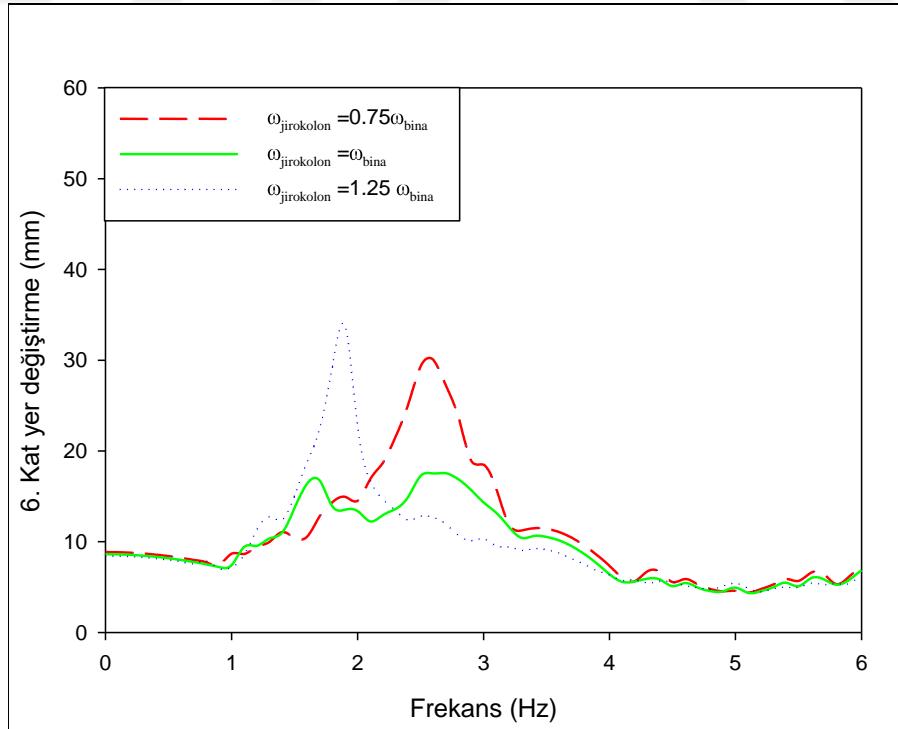
Bu çalışmada, uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}}$) ile jiroskopun açısıl momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, binanın doğal frekansı sabit tutulup ($\omega_{\text{bina}} = 2$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}}$) takip eden oranlarda $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 0.75, 1.00$ ve 1.25 değiştirilerek sönümlenmeye etkisi teorik olarak incelendi. Ayrıca bu teorik analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), disk kütlesi ($m = 0.023$ kg), çok katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{bina}} = 2$ Hz) ve jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz) sabit tutuldu. Bu teorik çalışmada, optimum frekans oranı için optimum disk hızı $\Omega = 0$ dev/dak olduğu deneysel çalışmalarda tespit edildiğinden mümkün olduğunca hafif disk kütlesi ($m = 0.023$ kg) seçilmiştir.

Çok katlı binanın üst katına montajlanan uyarlanmış jiroskopun kolonunun sabitlenmesi (uyarlanmış jiroskopun etkisizleştirilmesi) durumunda binanın en üst katının yer değiştirmesinin maksimum olduğu ve birinci modun ikinci moda göre son derece etkili olduğu Şekil 2.68'de görülmektedir.

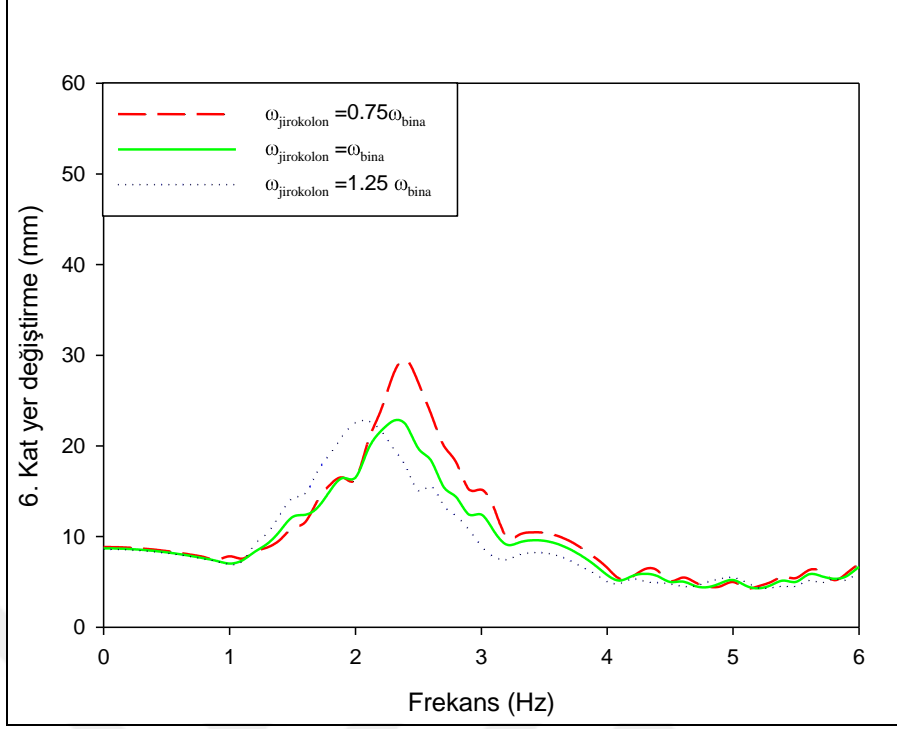
Şekil 2.69'da verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının olmadığı durumda ($\Omega = 0$ dev/dak) sabit tutulup, bu değişik frekans oranlarının ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 0.75, 1.00$ ve 1.25) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.70 ve Şekil 2.71 ile verilen frekans – yer değiştirme eğrileri ise jiroskopun disk hızının sırasıyla $\Omega = 4000$ dev/dak ve $\Omega = 8000$ dev/dak'da sabit tutulup, bu değişik frekans oranlarının sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, $\Omega = 0$ dev/dak disk hızında ve frekans oranının $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$ olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenle, bundan sonraki deneysel çalışmalarımız bu değerler üzerinden yapılacaktır.



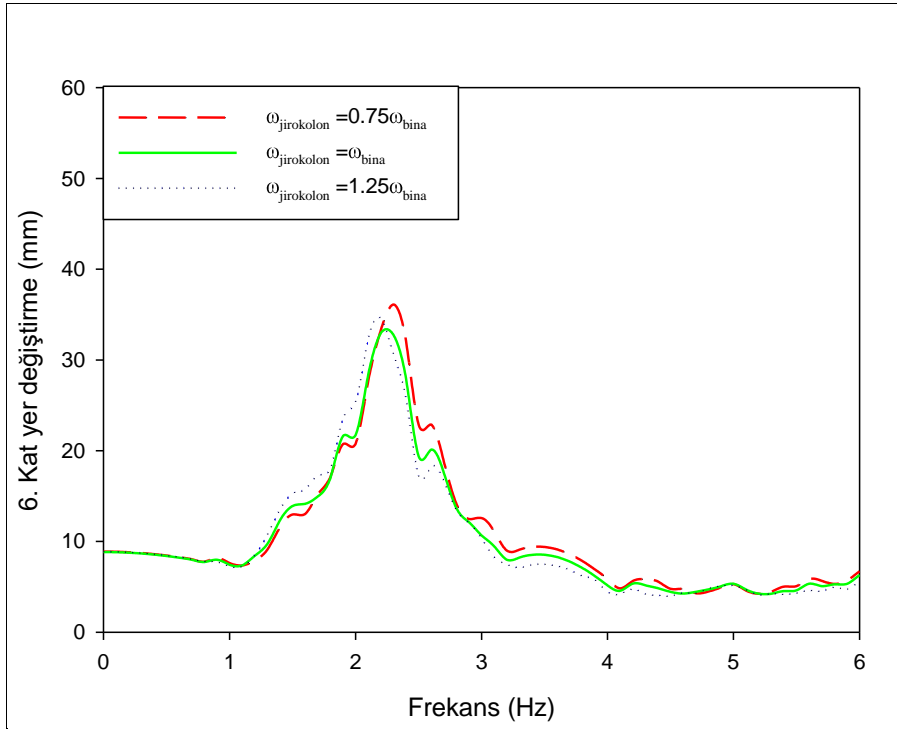
şekil 2.68. Uyarlanmış jiroskopun etkisiz (jiroskopu taşıyan kolonun sabit olduğu durum için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında altı katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrisi



şekil 2.69. Farklı frekans oranları için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında çok katlı yapının teorik Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak)



Şekil 2.70. Farklı frekans oranları için $z = z_0 \cos(\omega t)$ zorlayıcı yer değiştirme altında çok katlı yapının teorik Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 4000$ dev/dak)



Şekil 2.71. Farklı frekans oranları için çok katlı yapının teorik Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 8000$ dev/dak)

2.3.4. Çok Katlı Yapının Deneysel Bulguları

Yukarıdaki teorik çalışmalar ışığında deney düzeneğinin karakterizasyonu için $z_0 = 0.005$ m zorlayıcının yer değiştirme genliği ve sistemin birinci mod doğal frekansını içerecek şekilde 1.2 - 12 Hz zorlayıcının frekans aralığı seçilerek sistemin dinamik davranışları test edilmiştir. Çok katlı binanın, jiroskopun ve uyarlanmış jiroskopun dinamik davranışlarının hem zaman hem de frekans taramaları yapılmıştır.

Yapılan bu ölçümlerle kurulan sistemde tüm cihazların, ölçü aletlerinin ve modelin doğru çalıştığı ve matematik modelle iyi bir uyum içinde olduğu yapılan ön deneylerde tespit edilmiştir. Teorik modelde kullanılan uyarlanmış jiroskopun ve binanın fiziksel özellikleri mümkün olduğu kadar deneysel sisteme yansıtılmakla birlikte, teorik analizlerde kullanılan, kütle, devir sayısı, frekans ve frekans ilişkileri aynı şekilde deneysel çalışmaya yansıtılmıştır.

Deneysel çalışma sırasında jiroskopun monte edildiği kolonların boyları değiştirilerek, jiroskop kolonunun doğal frekansı ($\omega_{jirokolon}$) ve çok katlı yapının doğal frekansı (ω_{bina}) optimum değerleri araştırılmıştır. Bu parametreler değişken disk hızı ve disk kütlesi için incelenmiştir. Ayrıca, sönümleyicinin bina üzerindeki optimum yerinin tespiti için deneyler yapılmıştır. Uyarlanmış jiroskopun bina üzerindeki optimum yeri en son kat (6. kat) olduğu tespit edilmiş ve tüm deneyler uyarlanmış jiroskopun 6.kata bağlı olduğu bina için gerçekleştirilmiştir.

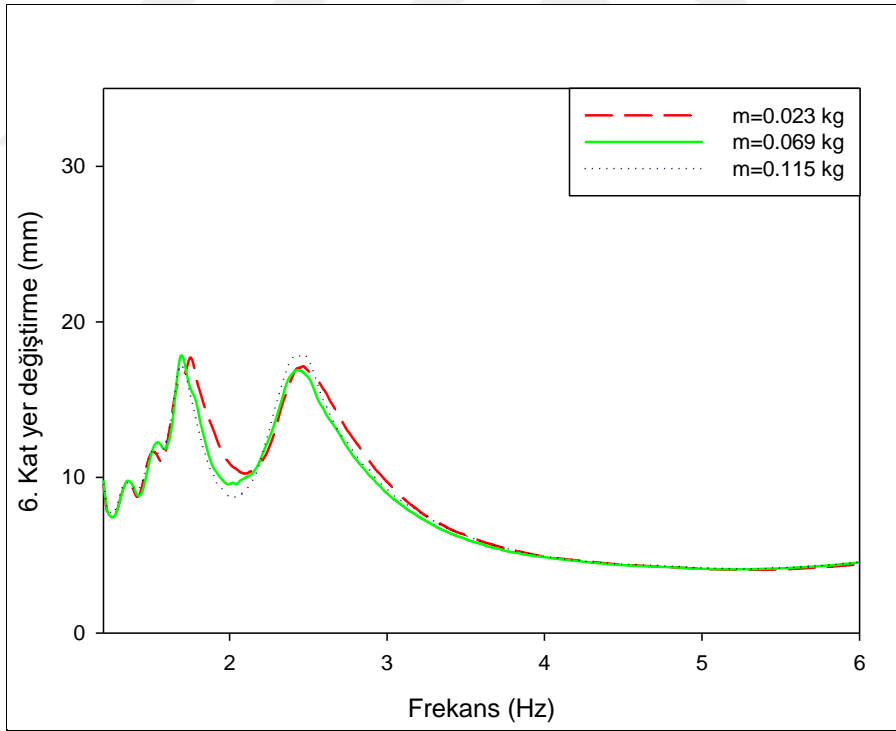
2.3.4.1. Disk Kütlesinin Sönümlenmeye Etkisi

Bu çalışmada, jiroskopun disk kütlesi ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, jiroskopun disk kütlesi değiştirilerek, $m = 0.023, 0.069$ ve 0.115 kg disk kütleleri için deneysel analizler yapılmıştır. Ayrıca bu deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), çok katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{bina} = 2$ Hz) ve jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3.0$ Hz) ve uyarlanmış jiroskopla bina arasındaki frekans oranı ($\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1.00$) sabit tutulmuştur. Bu deneysel çalışma için uyarlanmış jiroskopla bina arasındaki frekans oranı $\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1$, önceki bölümlerde elde ettiğimiz en iyi frekans oranı olup, bu bölümdeki analizler için de kullanılmıştır. Ayrıca, deneyler sırasında

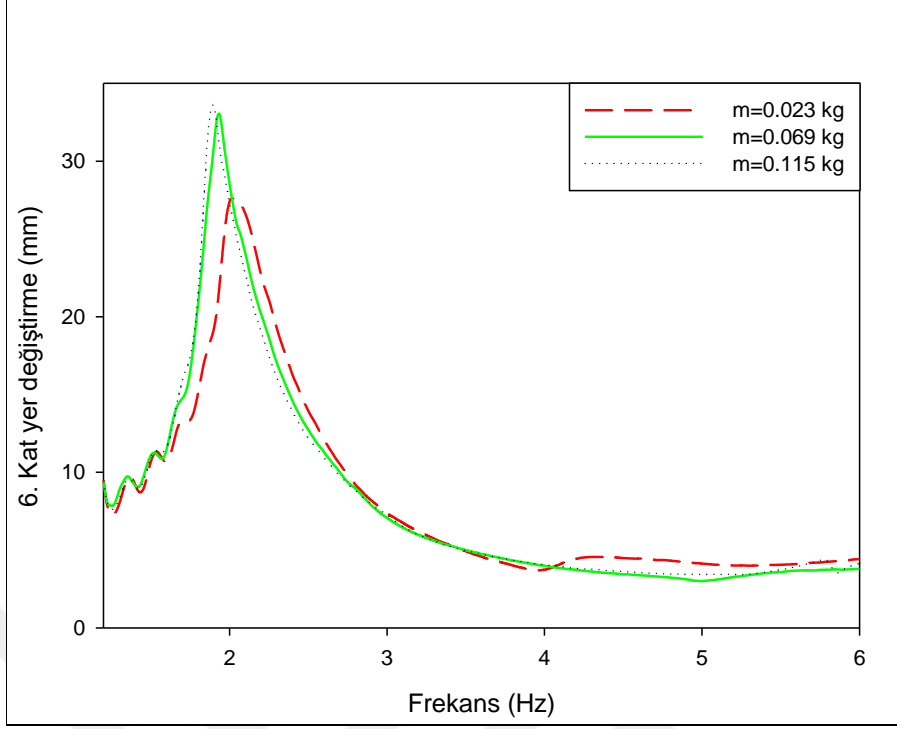
uyarlanmış jiroskop, bina içerisindeki optimum yeri olan en üst kata bağlanmıştır. Jiroskopun bina içerisindeki optimum yeri için yapılan deneyler bölüm 2.3.4.4'de verilmiştir.

Şekil 2.72'de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 0$ dev/dak'da sabit tutulup, bu değişik disk kütlelerinin ($m = 0.023, 0.069$ ve 0.115 kg) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.72'den anlaşılacağı üzere disk hızı $\Omega = 0$ dev/dak için bu disk kütlelerinin sistemin mod frekanslarına ve genliğine etkisi ihmal edilebilecek kadar azdır.

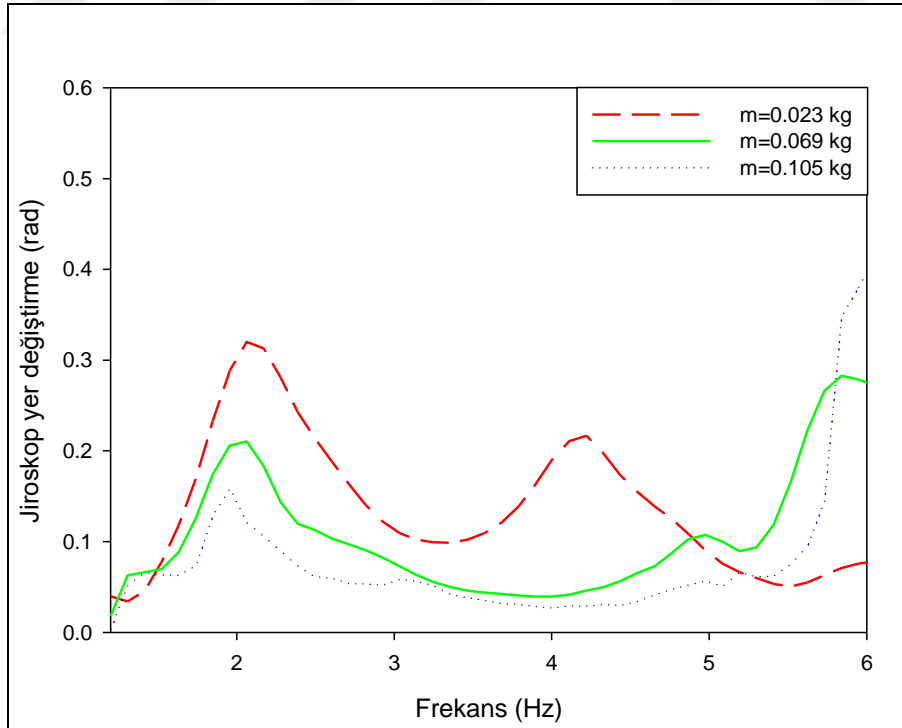
Şekil 2.73'de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının $\Omega = 10000$ dev/dak'da sabit tutulup, bu değişik disk kütlelerinin ($m = 0.023, 0.069$ ve 0.115 kg) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.73'den anlaşılacağı üzere, disk kütlesi (açısal momentum) arttıkça çok katlı yapının salınım frekansı değişmiş ve kendi doğal frekansına (2 Hz) doğru kayarak sönümlenme ortadan kalkmıştır.



Şekil 2.72. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega_{jiroskop} = \omega_{bina}$)



Şekil 2.73. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega_{\text{jirokolon}} = \omega_{\text{bina}}$)

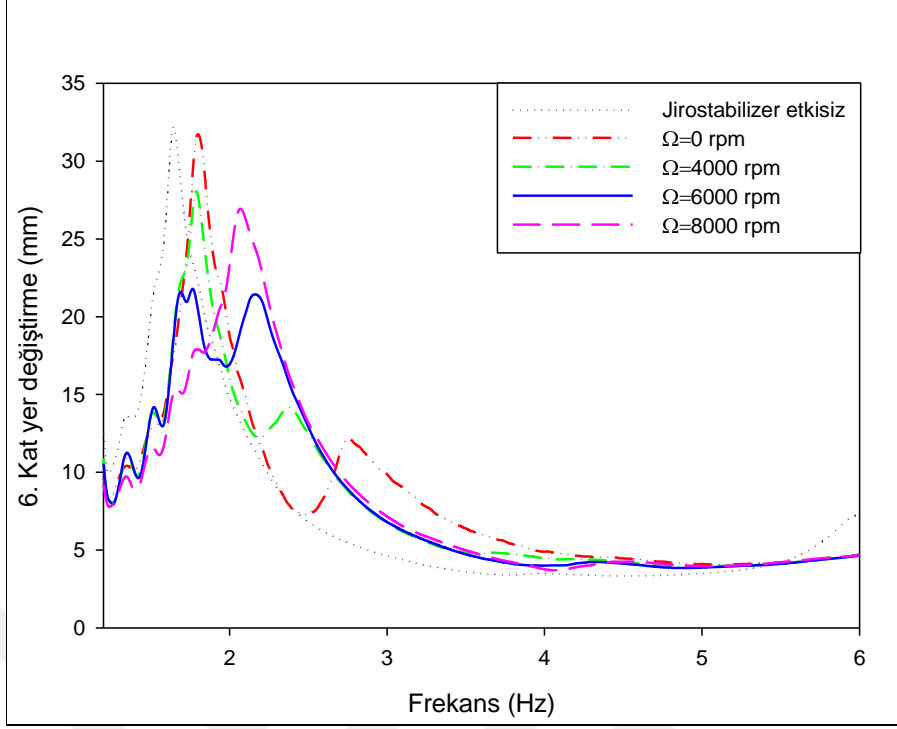


Şekil 2.74. Jiroskopun farklı disk kütleleri (m) için jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega_{\text{jirokolon}} = \omega_{\text{bina}}$)

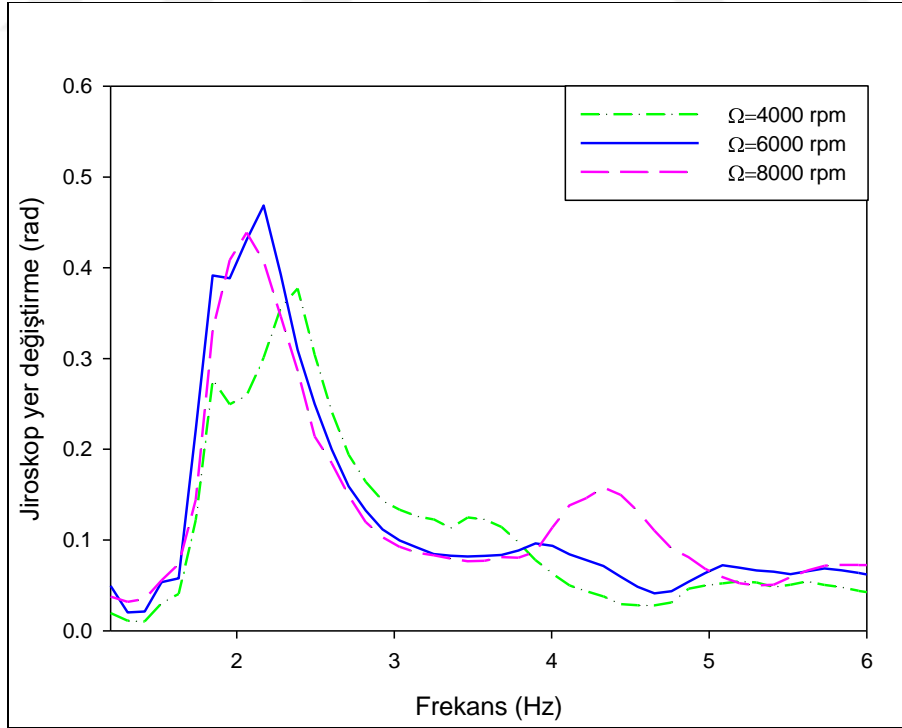
Şekil 2.74 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımı, çok katlı yapının 1.moda ait salınım genliğinin etkisiyle doğru orantılı olduğu ve kararlı hareket ettiği görülmektedir. Şekil 2.74'den görüldüğü üzere, disk kütleindeki artış (açısal momentum), 2 Hz deki salınım genliğini düşürürken, 7.4 Hz' deki salınım genliğini arttırmıştır. Ayrıca, en iyi sönümün gerçekleştiği durumda jiroskop açısının $\theta = 0.86$ rad civarında salınım yaptığını daha önceki bölümlerde söylemiştik. Ancak bu durumda, açısal momentum optimum değerinde olmadığından jiroskopun maksimum kararlı sönümü için 0.86 rad salınım açısı sağlanamamıştır.

2.3.4.2. Disk Hızının Sönümlenmeye Etkisi

Bu çalışmada, jiroskopun disk hızı ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, jiroskopun disk hızı değiştirilerek, jirostabilizerin etkisiz (uyarlanmış jiroskop sabit) olduğu durum ve uyarlanmış jiroskopun serbest olup $\Omega = 0, 2000, 4000, 6000, 8000$ dev/dak disk hızlarında döndüğü durumlar için deneysel analizler yapılmıştır. Ayrıca bu deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), disk kütlesi ($m = 0.023$ kg), çok katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{bina} = 2$ Hz) ve jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3.0$ Hz) ve uyarlanmış jiroskopla bina arasındaki frekans oranı ($\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1.25$) sabit tutulmuştur. Deneyler sırasında optimum frekans oranı için uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ile çok katlı yapının doğal frekansı birbirine eşit ($\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1$) olması gerektiğini önceki bölümlerde belirtmiştik. Ancak, bu deneysel çalışmada jiroskopun disk hızının etkisini daha iyi inceleyebilmek amacıyla optimum frekans oranı ($\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1$) yerine $\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1.25$ frekans oranı seçilmiştir. Ayrıca, deneyler sırasında uyarlanmış jiroskop, bina içerisindeki optimum yeri olan en üst kata bağlanmıştır.



Şekil 2.75. Jirostabilizer etkisiz ve farklı dönme hızları (Ω) için tek katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{\text{jirokolon}} = 1.25\omega_{\text{bina}}$)



Şekil 2.76. Jirostabilizer etkisiz ve farklı dönme hızları (Ω) için jirostabilizerin Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\omega_{\text{jirokolon}} = 1.25\omega_{\text{bina}}$)

Şekil 2.75’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk kütlelerinin $m = 0.023$ kg için sabit tutulup, bu değişik disk hızlarının ($\Omega = 0, 2000, 4000, 6000, 8000$ dev/dak) sönümlenme üzerindeki deneysel etkisini göstermektedir. Şekil 2.75’den görüldüğü üzere jirostabilizerin etkisiz (uyarlanmış jiroskop sabit) olduğu durumda binanın yer değiştirmesi ve doğal frekansı, uyarlanmış jiroskopun serbest olup jiroskopun diski dönmediği ($\Omega = 0$ dev/dak) duruma göre artmıştır. Şekil 2.75’den anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, disk hızının $\Omega = 6000$ dev/dak olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 2.76 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımı, çok katlı yapının salınım genliğinin etkisiyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.76’dan görüldüğü üzere, disk hızındaki artış (açısal momentum), jiroskopun salınım genliğini düşürmüştür. Ayrıca, en iyi sönümün gerçekleştiği durumda jiroskop açısının $\theta = 0.86$ rad civarında salınım yaptığını daha önceki bölümlerde söylemiştik. Ancak bu durumda, açısal momentum optimum değerinde olmadığından jiroskopun maksimum kararlı sönümü için 0.86 rad salınım açısı sağlanamamıştır.

2.3.4.3. Optimum Frekans Oranının Belirlenmesi

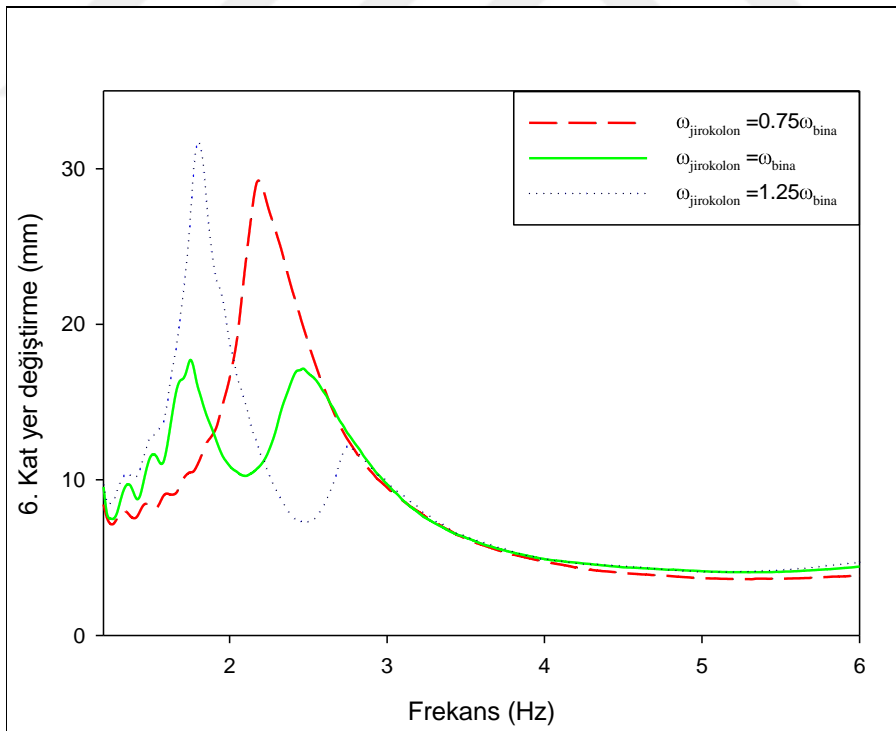
Bu çalışmada, uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}}$) ile jiroskopun açısal momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, binanın doğal frekansı sabit tutulup ($\omega_{\text{bina}} = 2$ Hz), uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jirokolon}}$) takip eden oranlarda $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 0.75, 1.00$ ve 1.25 değiştirilerek sönümlenmeye etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca bu deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), disk kütlesi ($m = 0.023$ kg), çok katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{bina}} = 2$ Hz) ve jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz) sabit tutulmuştur. Bu deneysel çalışmada, optimum frekans oranı için optimum disk hızı $\Omega = 0$ dev/dak olduğu tespit edildiğinden mümkün olduğunca hafif disk kütlesi ($m = 0.023$ kg) seçilmiştir.

Şekil 2.77’de verilen frekans – yer değiştirme eğrileri jiroskopun disk hızının olmadığı durumda ($\Omega = 0$ dev/dak) sabit tutulup, bu değişik frekans oranlarının ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 0.75, 1.00$ ve 1.25) sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Şekil 2.78 ve Şekil 2.80 ile verilen frekans – yer değiştirme eğrileri ise jiroskopun disk hızının

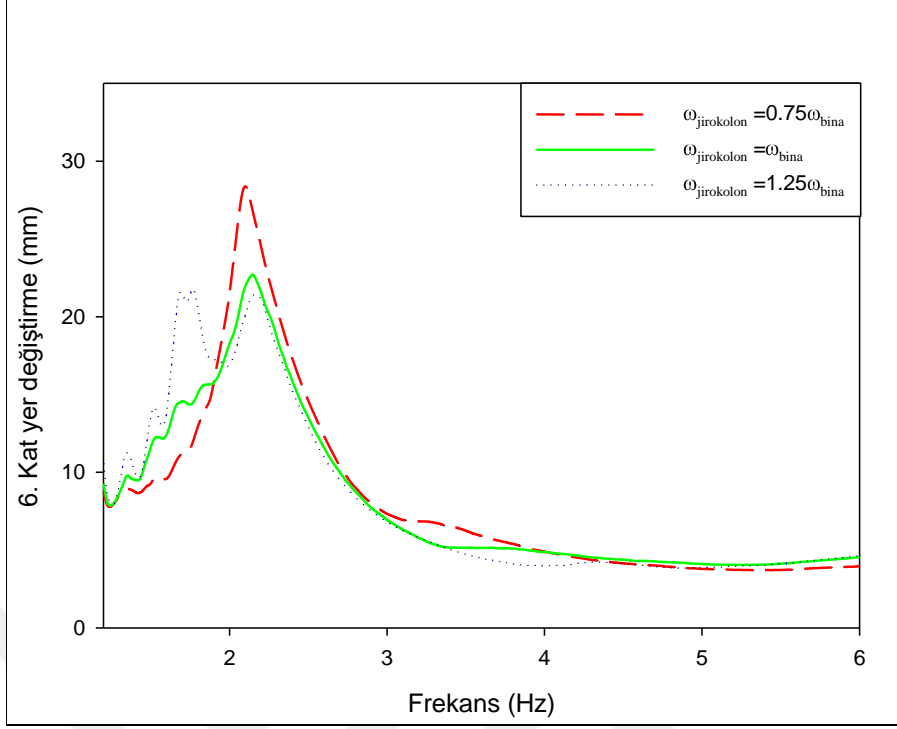
sırasıyla $\Omega = 6000$ dev/dak ve $\Omega = 10000$ dev/dak'da sabit tutulup, bu değişik frekans oranlarının sönümlenme üzerindeki teorik etkisini göstermektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere en uygun sönümlenme, $\Omega = 0$ dev/dak disk hızında ve frekans oranının $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$ olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 2.78'de görüldüğü üzere disk hızı $\Omega = 6000$ dev/dak olduğunda 6. kata ait yer değiştirmenin, $\omega_{\text{jirokolon}} = 1.25\omega_{\text{bina}}$ için azaldığı söylenebilir. Ancak, Şekil 2.77'deki $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$ frekans oranının sönümlenme etkisi, Şekil 2.78'deki $\omega_{\text{jirokolon}} = 1.25\omega_{\text{bina}}$ frekans oranının sönümlenme etkisinden daha fazladır. Ayrıca, Şekil 2.80'de görüldüğü üzere, disk hızı $\Omega = 10000$ dev/dak olduğunda, 6. kata ait yer değiştirmeler, tüm frekans oranları için artarak belli bir değere eşitlenmiştir.

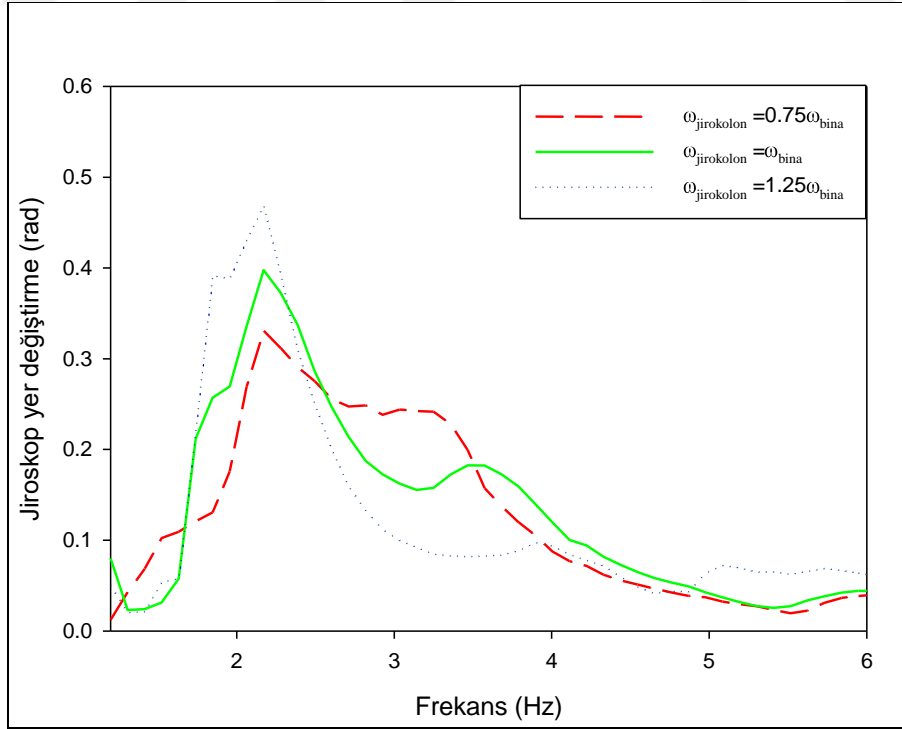
Şekil 2.79 ve Şekil 2.81 ise aynı koşullarda jiroskopun salınımının, uyarlanmış jiroskopun doğal frekansının değişimi ile uyumlu değiştiğini göstermektedir. Çok katlı yapının salınımıyla doğru orantılı olarak, jiroskopun salınımı da artmakta veya azalmaktadır.



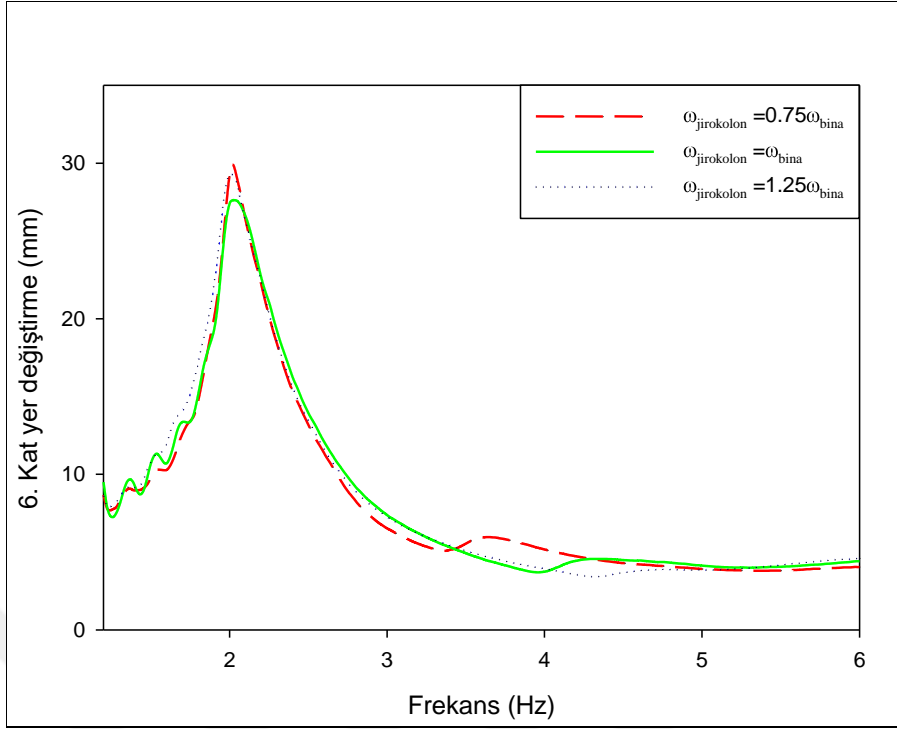
Şekil 2.77. Farklı frekans oranları için çok katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak)



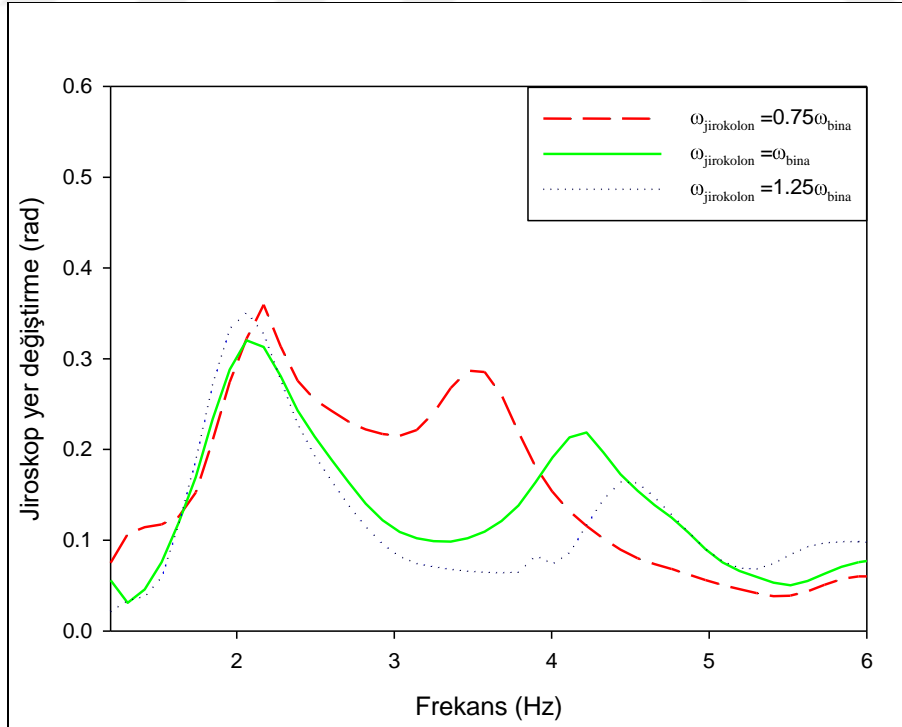
Şekil 2.78. Farklı frekans oranlarında binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 6000$ dev/dak)



Şekil 2.79. Farklı frekans oranlarında jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 6000$ dev/dak)



Şekil 2.80. Farklı frekans oranlarında binanın Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 10000$ dev/dak)

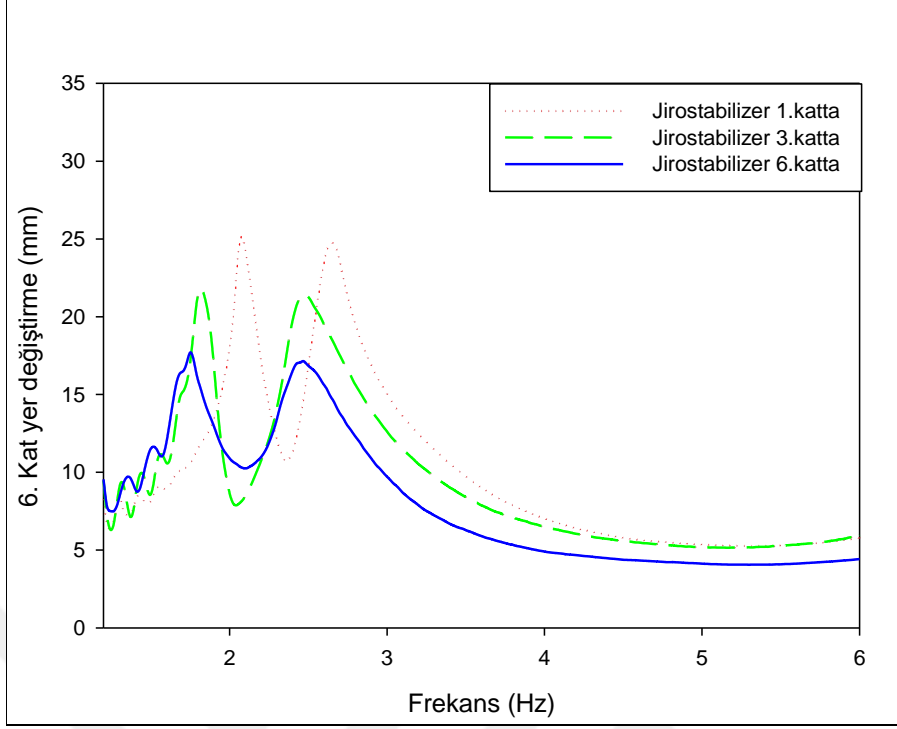


Şekil 2.81. Farklı frekans oranlarında jiroskopun Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 10000$ dev/dak)

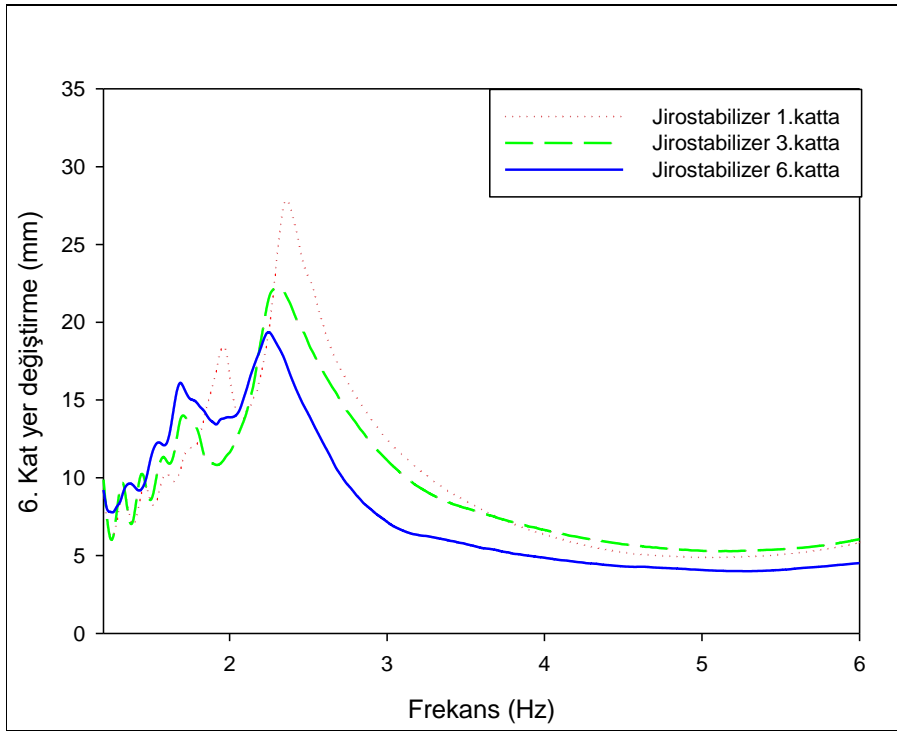
2.3.4.4. Jiroskopun Bina Üzerindeki Optimum Yerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, uyarlanmış jiroskopun bina üzerindeki yeri ile jiroskopun açısıl momentumu arasındaki ilişkinin sönümlenme üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, binanın doğal frekansı sabit tutulup ($\omega_{\text{bina}} = 2$ Hz), uyarlanmış jiroskopun bina üzerindeki yeri sırasıyla 1., 3. ve 6. kat olacak şekilde değiştirilerek sönümlenmeye etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca bu deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), disk kütlesi ($m = 0.023$ kg), çok katlı yapının boyu (yapının doğal frekansı, $\omega_{\text{bina}} = 2$ Hz) ve jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{\text{jiro}} = 3.0$ Hz) ve uyarlanmış jiroskopla bina arasındaki frekans oranı ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$) sabit tutulmuştur. Bu deneysel çalışma için uyarlanmış jiroskop ile bina arasındaki frekans oranı $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$, teorik ve deneysel sonuçlarda elde ettiğimiz en iyi frekans oranı olup, bu bölümdeki analizler için de kullanılmıştır.

Şekil 2.82 ve Şekil 2.83'de uyarlanmış jiroskopun bina modeli içerisindeki farklı katlara ait konumları için çok katlı yapının frekans – yer değiştirme eğrileri görülmektedir. Şekil 2.82'de görüldüğü üzere disk dönmediği ($\Omega = 0$ dev/dak) durumda en fazla sönümlenme, jiroskopun bina üzerinde en üst katta (6. Kat) olduğu durumdadır. Şekil 2.83'de disk döndüğü ($\Omega = 4000$ dev/dak) durumda da aynı etki görülmektedir ve uyarlanmış jiroskopun yeri üst katlara çıkarıldıkça sönümlenme etkisi artmıştır. Şekillerden anlaşılacağı üzere jiroskopun mümkün olduğunca üst katlara bağlanması gerekmektedir.



şekil 2.82. Jiroskopun farklı katlardaki konumu için çok katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg, $\omega_{\text{jirokolon}} = \omega_{\text{bina}}$ ve $\Omega = 0$ dev/dak)



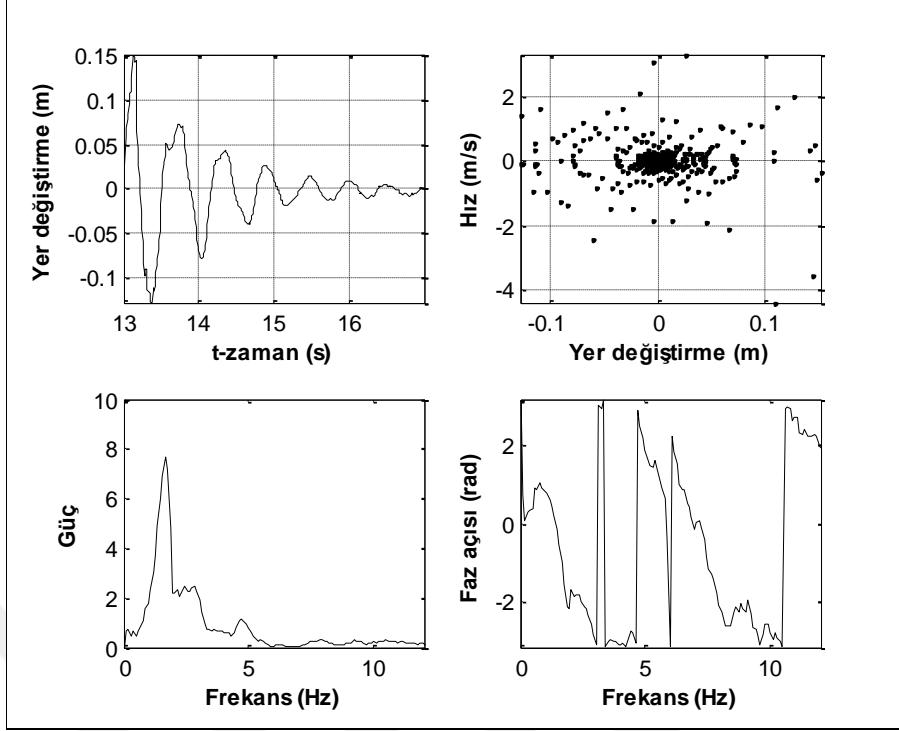
şekil 2.83. Jiroskopun farklı katlardaki konumu için çok katlı yapının Frekans – Yer değiştirme eğrileri ($m = 0.023$ kg, $\omega_{\text{jirokolon}} = \omega_{\text{bina}}$ ve $\Omega = 4000$ dev/dak)

2.3.4.5. Çok Katlı Yapının Zaman – Yer Değiştirme ve FFT Analizi

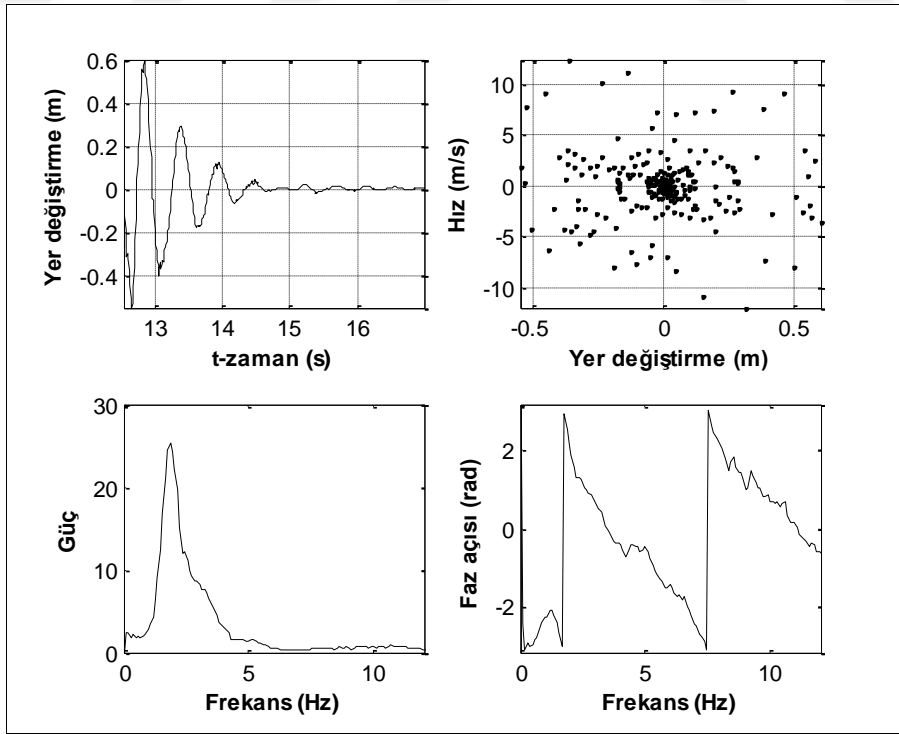
Bu deneysel çalışmada, jiroskopun açısal momentumunun sönümlenme üzerindeki etkisi, çok katlı yapının zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri yardımıyla incelenmiştir. Bu analizlerde, çok katlı yapının dinamik davranışlarını incelemek amacıyla, $\Omega = 0, 3000$ ve 10000 dev/dak disk hızları ve her bir disk hızı için $\omega = 2$ Hz zorlayıcının frekansı (binanın doğal frekansı) için deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değiştirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), çok katlı yapının boyu (çok katlı yapının doğal frekansı, $\omega_{bina} = 2$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.023$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3$ Hz) ve uyarlanmış jiroskopla bina arasındaki frekans oranı ($\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1$) sabit tutulmuştur. Bu deneysel çalışma için uyarlanmış jiroskopla bina arasındaki frekans oranı $\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1$, teorik ve deneysel çalışmalarımızda elde ettiğimiz en iyi frekans oranı olup, bu bölümdeki analizler için de kullanılmıştır.

Şekil 2.84 ve Şekil 2.85’de sırasıyla çok katlı yapının ve uyarlanmış jiroskopun serbest titreşimine ait zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Çok katlı yapının serbest titreşimine ait FFT analizinden, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak, doğal frekansın 2 Hz olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, şekillerdeki FFT analizlerinden $\omega_{jirokolon} = \omega_{bina}$ frekans oranına uyumlu olduğu görülmektedir.

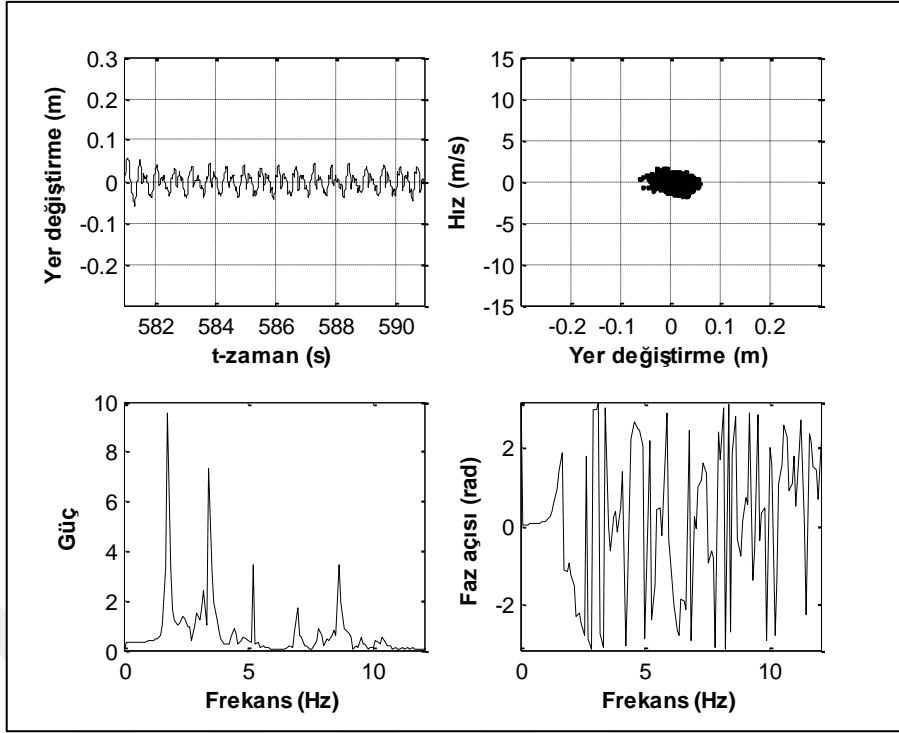
Şekil 2.86, Şekil 2.87 ve Şekil 2.88’de sırasıyla jiroskopun $\Omega = 0, 3000$ ve 10000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2$ Hz için zaman – yer değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, zorlayıcının frekansı $\omega=2$ Hz için disk hızı arttıkça çok katlı yapının genliği, dönmediği durumdakine göre artmıştır. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak, çok katlı yapı modelinin sönümlenmesinde, $\omega_{jirokolon} = \omega_{bina}$ frekans oranında $\Omega=0$ dev/dak optimum olduğu görülmektedir ve disk hızı arttıkça 6. kattaki yer değiştirmenin genliği artmıştır.



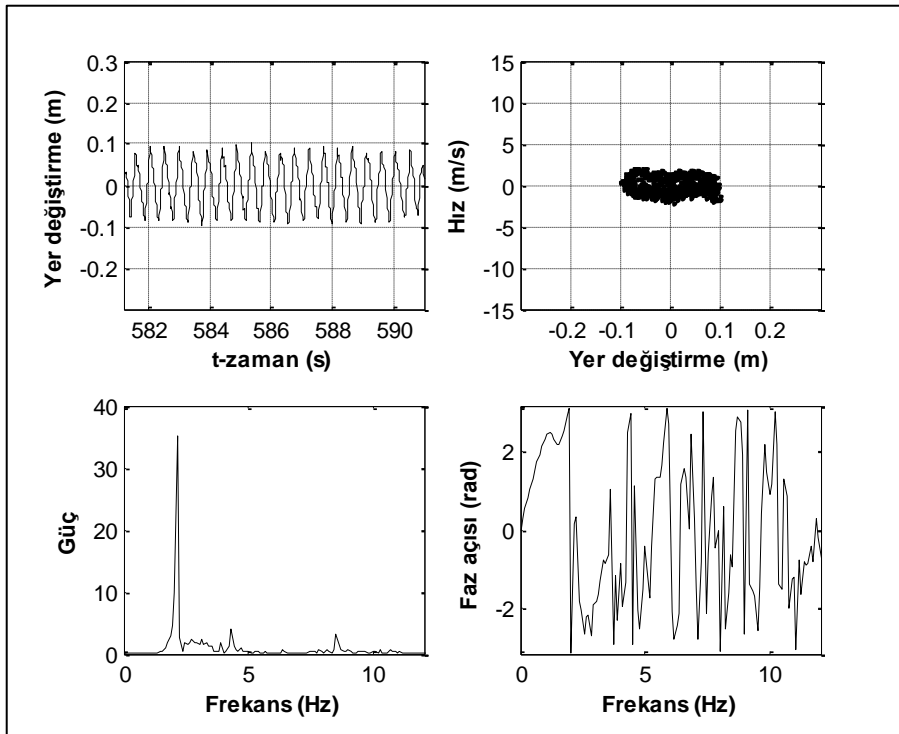
Şekil 2.84. Serbest titreşim altında binaya ait FFT analizi ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak)



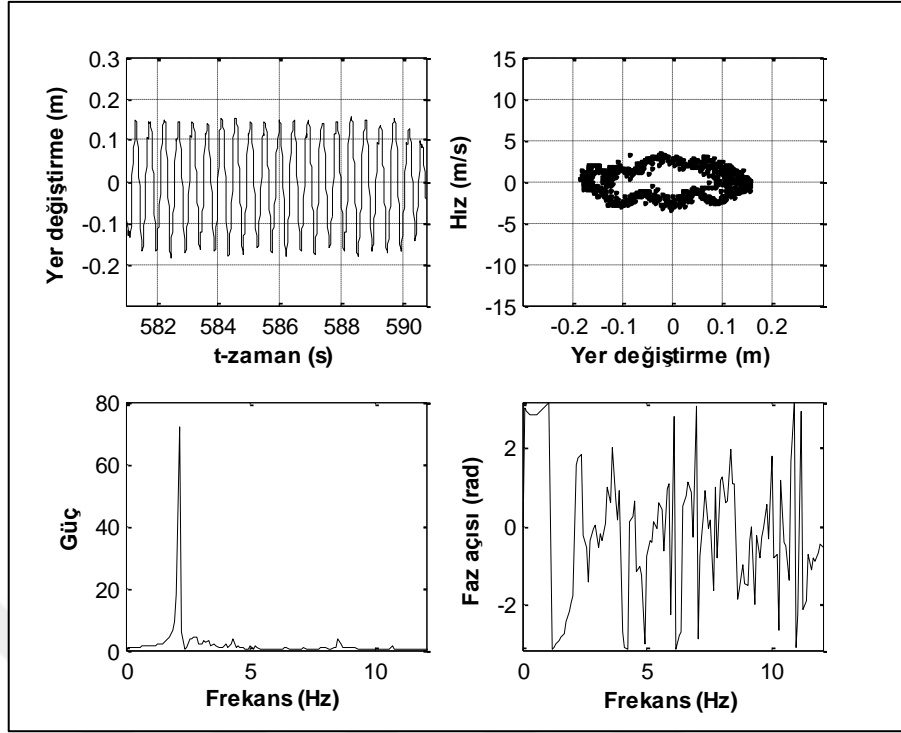
Şekil 2.85. Serbest titreşim altında uyarlanmış jiroskopa ait FFT analizi ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak)



Şekil 2.86. Zorlanmış titreşim altında binanın FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 0$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)



Şekil 2.87. Zorlanmış titreşim altında binanın FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)



Şekil 2.88. Zorlanmış titreşim altında binanın FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)

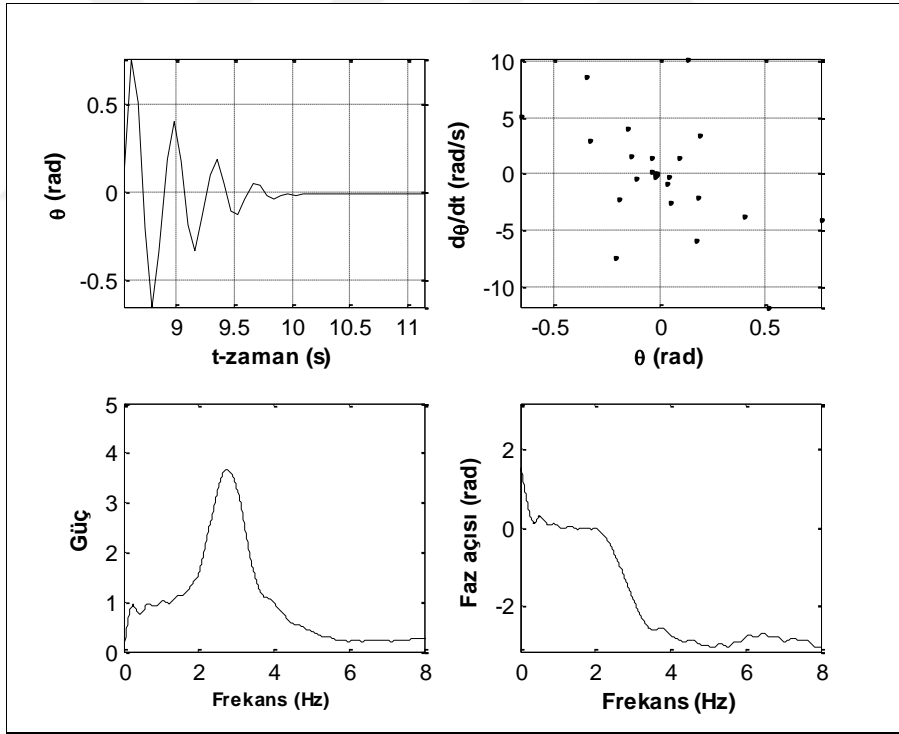
2.3.4.6. Jiroskopun Zaman – Yer Değişirme ve FFT Analizi

Bu deneysel çalışmada, jiroskopun açısal momentumunun sönümlenme üzerindeki etkisi, jiroskopun zaman – yer değişirme ve FFT analizleri yardımıyla incelenmiştir. Bu analizlerde, jiroskopun dinamik davranışlarını incelemek amacıyla, $\Omega = 3000$ ve 10000 dev/dak disk hızları ve her bir disk hızı için $\omega = 2$ Hz zorlayıcının frekansı (binanın doğal frekansı) için deneyler yapılmıştır. Ayrıca deneysel analizlerde, zorlayıcının yer değişirme genliği ($z_0 = 0.005$ m), çok katlı yapının boyu (çok katlı yapının doğal frekansı, $\omega_{bina} = 2$ Hz), jiroskopun disk kütlesi ($m = 0.023$ kg), jiroskopun doğal frekansı ($\omega_{jiro} = 3$ Hz) ve uyarlanmış jiroskopa bina arasındaki frekans oranı ($\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1$) sabit tutulmuştur. Bu deneysel çalışma için uyarlanmış jiroskopa bina arasındaki frekans oranı $\omega_{jirokolon} / \omega_{bina} = 1$, teorik ve deneysel çalışmalarımızda elde ettiğimiz en iyi frekans oranı olup, bu bölümdeki analizler için de kullanılmıştır.

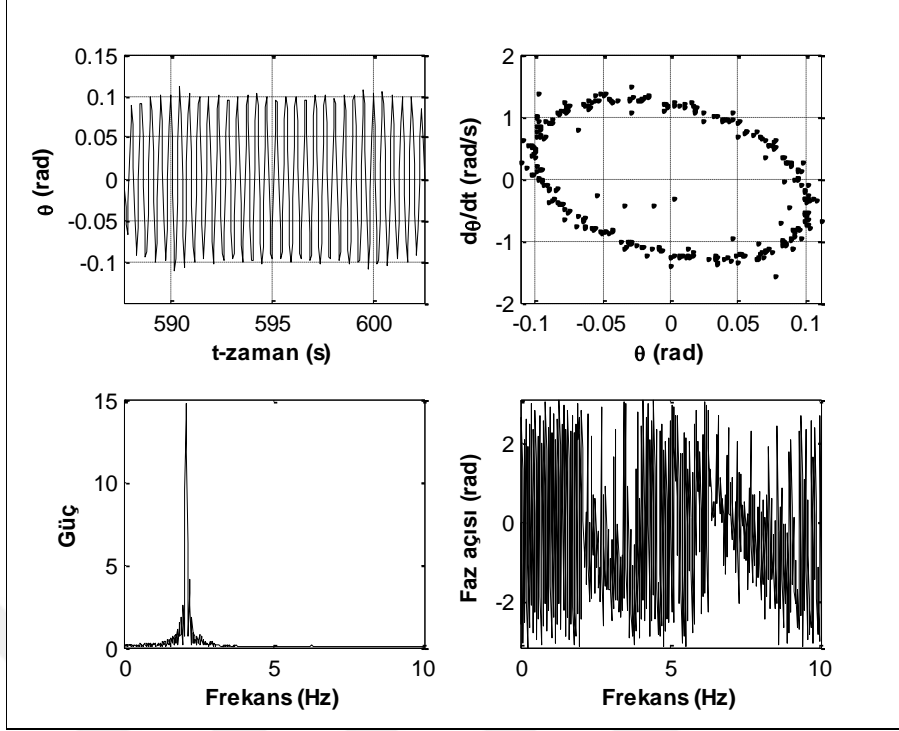
Şekil 2.89’da serbest titreşim yapan jiroskopun zamana bağlı yer değiştirmeleri ile buna bağlı FFT analizleri gösterilmektedir. Jiroskopun serbest titreşimine ait FFT

analizinden, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak, doğal frekansın 3 Hz olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

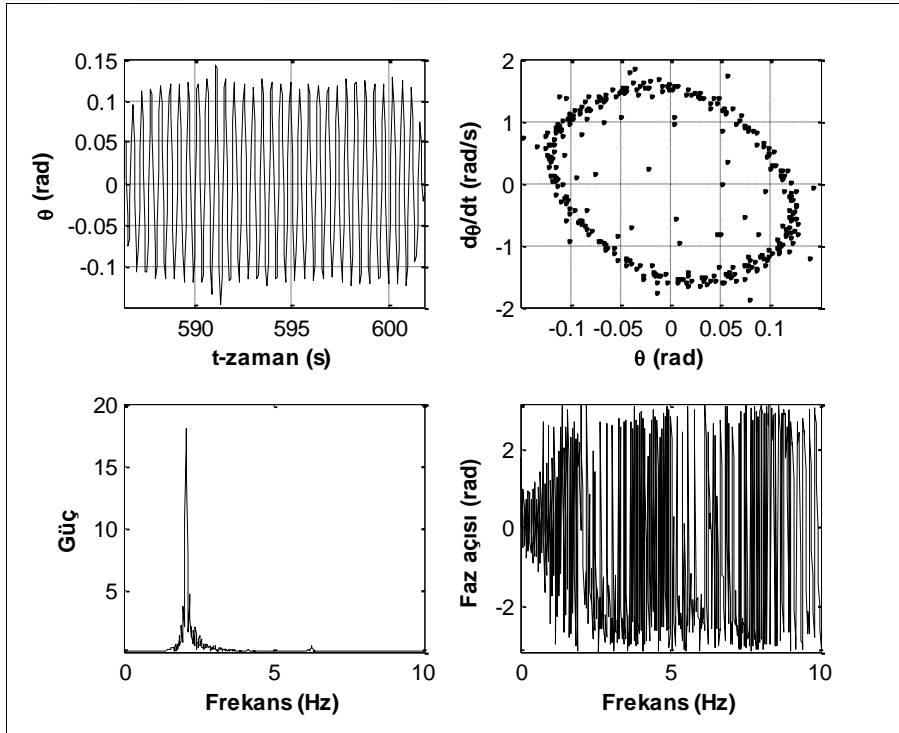
şekil 2.90 ve şekil 2.91’de sırasıyla jiroskopun $\Omega = 3000$ ve 10000 dev/dak disk hızlarında ve zorlayıcının frekansı $\omega = 2$ Hz için zaman – yer Değiştirme ve FFT analizleri gösterilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, önceki frekans-yer değiştirme grafiklerine uyumlu olarak jiroskopun çok katlı yapının sönümlenmesine uyumlu bir salınım hareketine sahip olduğu tespit edilmiştir. Aşağıdaki sonuçlardan anlaşılacağı üzere bir önceki bölümde tek katlı yapının zaman – yer değiştirme ve FFT analizlerine uyumlu olarak jiroskopun, çok katlı yapının sönümlenmesinde etkin olduğu görülmektedir. Önceki teorik ve deneysel analizlerde de açıkça belirtildiği üzere çok katlı yapının doğal frekansındaki ($\omega = 2$ Hz) genliğin sönümlenememesinden dolayı jiroskopun genliği de artmıştır.



şekil 2.89. Serbest titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($m = 0.023$ kg ve $\Omega = 0$ dev/dak)



Şekil 2.90. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 3000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)



Şekil 2.91. Zorlanmış titreşim altında jiroskopun FFT analizi ($m = 0.023$ kg, $\Omega = 10000$ dev/dak ve $\omega = 2$ Hz)

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, uyarlanmış jiroskopun tek katlı ve çok katlı binada dinamik titreşim sönümleyici olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, laboratuvar ortamında inşa edilen ölçekli model binalar (tek ve çok katlı yapılar) üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen deneysel ve analitik sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Jiroskopun belli bir açısal momentumunda yapının 1.mod frekansındaki yer değiştirmesinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.
- Tek katlı yapıda, uyarlanmış jiroskop sabit olduğu durumda bina ile uyarlanmış jiroskop (sönümleyici eleman) arasında herhangi bir enerji transferi söz konusu olmadığından (uyarlanmış jiroskop salınmamakta) binanın yer değiştirmesi en büyük değerine ulaşmıştır. Uyarlanmış jiroskopun kolonu serbest bırakıldığında fakat jiroskopun diski dönmediği ($\Omega = 0$ dev/dak) durumda, binadan uyarlanmış jiroskopa bir miktar enerji transferi söz konusu olduğundan (uyarlanmış jiroskop binayla birlikte ama ters yönde salındığından) binanın yer değiştirme miktarında azalma olmuştur. Uyarlanmış jiroskopun kolonu serbest bırakıldığında ve jiroskopun diski değişik devir sayılarında döndürüldüğünde, binadan uyarlanmış jiroskopa diskin devir sayısı ile ilişkili olarak enerji transferi söz konusu olduğundan binanın yer değiştirmesi azami miktarlarda azalmıştır.
- Tek katlı modelde, jiroskop hiç dönmediğinde ($\Omega = 0$ dev/dak) uyarlanmış jiroskop boyu arttıkça, tek katlı yapının 1.moddaki yer değiştirme miktarı en düşük değerdedir. Çünkü, uyarlanmış jiroskopu taşıyan kolonun boyundaki artış, binadan uyarlanmış jiroskopa enerji transferini (uyarlanmış jiroskop binayla birlikte ama ters yönde salındığından) artırdığından binanın 1.moddaki yer değiştirme miktarını azaltmıştır. Ancak, uyarlanmış jiroskopun boyu (L_1) arttıkça, 2. mod frekansı (uyarlanmış jiroskopun doğal frekansı, $\omega_{jirokolon}$) azalmıştır ve binanın 2.modundan uyarlanmış jiroskopa enerji transferini azalttığı için bu frekansa ait yer değiştirmesi artmıştır. Bu nedenle, 1.mod frekansındaki en iyi

sönümleme için jiroskopu taşıyan kolonun tek katlı yapıdan yukarıya doğru uzanan boyunun (L_1) mümkün olduğunca uzun tutulması gerektiği anlaşılmıştır. Ancak, jiroskop belli bir hızda ($\Omega = 2000, 4000$ dev/dak) döndüğünde 1.moddaki en iyi sönümleme, L_1 kolon boyuna karşılık gelen $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ frekans oranında gerçekleşmiştir. Bu nedenle, sabit kat yüksekliğinde (L_2), optimum frekans oranını ($\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$) sağlayan uyarlanmış jiroskop uzunluğunun belli bir L_1 boyunda olması gerekmektedir. Ayrıca, bu frekans oranı için en iyi sönümleme, $L_\Omega = 0.0660$ $\text{kg.m}^2/\text{s}$ açısal momentumunda ($\Omega = 4000$ dev/dak disk hızında) olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, $L_\Omega = 0.0660$ $\text{kg.m}^2/\text{s}$ optimum açısal momentumu için en iyi enerji transferinin (sönümlemenin) $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ frekans oranında gerçekleştiği deneysel ve teorik olarak gözlemlenmiştir.

- Tek katlı yapıda, sistem belli bir açısal momentuma ($L_\Omega = 0.0660$ $\text{kg.m}^2/\text{s}$) ulaştığında 1.mod frekansına ($\omega = 2.50$ Hz) simetrik oluşan $\omega = 2.10$ Hz ve $\omega = 2.90$ Hz frekanslarının genlikleri birbirine eşitlenmiştir. Bu açısal momentum, jiroskopun en iyi enerji transferi için gerekli optimum açısal momentumdur. Eğer açısal momentum, bu optimum değerden fazla olursa, 1.mod frekansının ($\omega = 2.50$ Hz) genliği arttığı görülmüştür.
- Tek katlı yapıda, jiroskopun disk hızının $\Omega = 0$ dev/dak'da sabit tutulduğunda, disk kütleleri sistemin kütesine oranla çok az olduğundan, sistemin doğal frekanslarına dolayısı ile sistemin genliğine etkisi çok az olmuştur. Ancak, belli bir disk hızında ve disk kütesinde 1. moddaki genlik önemli ölçüde sönümlenmiştir. Bu durum, optimum frekans oranı için optimum açısal momentum değerini doğrulamaktadır. Bu nedenle, sönümleme etkisinin optimum değeri için jiroskopun kütesinin artması ile disk hızı azalmıştır. Jiroskop kütesinin 0.023 kg olması durumunda optimum disk hızı 8000 dev/dak civarında iken, jiroskopun kütesinin beş katına (0.115 kg) çıkarılması ile optimum disk hızı 2500 dev/dak'ya kadar düşmüştür. Sönümleyicilerde genellikle küçük hacim ve düşük miktarda kütle tercih edildiğinden, mümkün olduğu kadar jiroskopun kütesinin azaltılması ve devir sayısının artırılması tercih edilmelidir. Fakat disk hızı jiroskopun motor kapasitesine bağlıdır.
- Tek katlı yapıda, aynı koşullarda jiroskopun salınımı, tek katlı yapının salınım genliğinin etkisiyle doğru orantılı olarak, jiroskopun salınımı da artmış veya

azalmıştır. En iyi sönümün gerçekleştiği durumda ($L_{\Omega} = 0.0660 \text{ kg.m}^2/\text{s}$ açısal momentumunda) jiroskop açısının $\theta = 0 - 0.86 \text{ rad}$ arasındaki bölgede salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum, teorik olarak elde ettiğimiz optimum salınım açısını (0.86 rad) doğrulamaktadır.

- Tek katlı yapıda, uyarlanmış jiroskopun diski aniden hızlandırılarak ($L_{\Omega} = 0.0660 \text{ kg.m}^2/\text{s}$ açısal momentum için $\Omega = 4000 \text{ dev/dak}$) yapının 1.moddaki yer değiştirmesi hızlı bir şekilde minimize edilmiş ve yaklaşık 6 saniyede 10 kat sönümlenme gerçekleşmiştir. Bu deney göstermektedir ki, uyarlanmış jiroskop titreşimin başlangıcında aktif olmasa bile, titreşimin oluşumu ile aktif hale geçirildiğinde yaklaşık 6 saniye gibi kısa bir sürede, yer değiştirmenin artmasına müsaade etmeden, yer değiştirmeyi minimum değere indirerek yapıyı tehlikeden koruyabilir. Bu nedenle, deprem veya herhangi bir dış etken sonucunda yapının titreşime başladığı sırada uyarlanmış jiroskopun harekete geçirilmesi ile birlikte sistemin yer değiştirmesi hızlı bir şekilde minimize edilebilir ve yapı zarara uğramadan kurtarılabilir. Bu durum bize uyarlanmış jiroskopun efektif bir sönümleyici olduğunu göstermektedir.
- Tek katlı yapıda, sayısal sonuçlara göre; titreşim yutucunun açısal momentumunun artması ile tek katlı yapının yer değiştirmesi 1.mod frekansı için daha da azalmaktadır. 1. modun sol ve sağında oluşan mod frekansları arasındaki açıklık titreşim yutucunun açısal momentumu ile doğru orantılıdır ve bu açıklığın fazla olması rezonanstan uzaklaşıldığını gösterir. Buna dayanarak sistem yüksek açısal momentum ile daha iyi çalıştığı anlaşılmaktadır. Ancak, deneysel sonuçlara göre; sistem belli bir açısal momentumda 1.mod frekansındaki genlik minimumdur. Eğer açısal momentum, bu optimum değerden fazla olursa, 1.mod frekansının genliği artmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere, jiroskop belli bir optimum açısal momentum değerinde ($L_{\Omega} = 0.0660 \text{ kg.m}^2/\text{s}$) en iyi enerji transferini gerçekleştirebilmektedir.
- Tek katlı yapıda, teorik ve deneysel sonuçlar dinamik olarak birbirine uyumlu sonuçlar olduğu gözlenmiş olup, bu sonuçlar, uyarlanmış jiroskopun efektif bir titreşim sönümleyici olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.
- Çok katlı yapıda en iyi sönümlenme, disk dönmediği ($\Omega = 0 \text{ dev/dak}$) durumda ve $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$ frekans oranında gerçekleştiği görülmüştür. Disk hızı arttığında

(açısal momentum), tüm frekans oranları için 6. kata ait yer değiştirme değeri artarak, belli bir frekansta (2 Hz) eşitlenmiştir. Aynı durum, disk kütlesi (açısal momentum) arttıkça da görülmüştür. Açısal momentum arttıkça çok katlı yapının salınım frekansı değişmiş ve kendi doğal frekansına (2 Hz) doğru kayarak sönümlenme ortadan kalkmıştır.

- Çok katlı yapıda, uyarlanmış jiroskopun bina modeli içerisindeki farklı katlara ait konumları için disk dönmediği ($\Omega = 0$ dev/dak) durumda en fazla sönümlenme, jiroskopun bina üzerinde en üst katta (6. Kat) olduğunda gerçekleşmiştir. Ayrıca, disk döndüğü ($\Omega = 4000$ dev/dak) durumda da aynı etki görülmektedir ve uyarlanmış jiroskopun yeri üst katlara çıkarıldıkça sönümlenme etkisi artmıştır. Bu nedenle, en iyi sönümlenme için jiroskop, 1. modun en fazla etkili olduğu en üst katta olması gereklidir.
- Çok katlı yapıda, jiroskopun disk hızının $\Omega = 0$ dev/dak'da sabit tutulduğunda, disk kütleleri sistemin kütlesine oranla çok az olduğundan, sistemin doğal frekanslarına dolayısı ile sistemin genliğine etkisi çok az olmaktadır.
- Çok katlı yapıda, $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$ frekans oranından farklı durumlar için jiroskopun açısal momentumu kullanılarak, sanki bina $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$ oranındaymış gibi sönümlenme yaptırılabilmiştir. Örneğin; jiroskopun disk kütlesinin $m = 0.023$ kg için sabit tutulup, $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1.25$ frekans oranındaki en uygun sönümlenme disk hızının $\Omega = 6000$ dev/dak olduğu durumda gerçekleştiği görülmüştür. Bu nedenle, $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1.25$ frekans oranındaki optimum açısal momentum için disk hızı $\Omega = 6000$ dev/dak ve disk kütlesi $m = 0.023$ kg olmuştur. Ancak, buradan da anlaşılacağı üzere çok katlı yapıdaki jiroskopun optimum açısal momentumu, tek katlı yapıdaki optimum momentumdan farklı olarak $\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}}$ frekans oranına bağlıdır ve çok katlı yapılardaki optimum frekans oranı ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$) için optimum momentum sıfırdır ($\Omega=0$ dev/dak). Sönümleyicilerde az enerji ihtiyacı istendiğinden, mümkün olduğu kadar jiroskopun hızının azaltılması ve devir sayısının artırılması tercih edilmelidir. Bu nedenle, çok katlı yapılarda, düşük disk hızlarının gerektiği optimum frekans oranına yakın ($\omega_{\text{jirokolon}} / \omega_{\text{bina}} = 1$) doğal frekanslarda çalışılmalıdır. Ancak bu frekans oranı, tek katlı yapıda fiziki olarak mümkün olamayacağından, $\omega_{\text{jiro}} / \omega_{\text{kat}} = 1.2$ frekans oranı için optimizasyon yapılmıştır.

Bu çalışmada, bir binaya uygulanmış olan uyarlanmış jiroskopun titreşim sönümleyici olarak kullanılıp kullanılmayacağı teorik ve deneysel olarak araştırılarak yukarıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir. Tüm bu teorik ve deneysel çalışmalar prensipte uyarlanmış jiroskopun iyi bir titreşim sönümleyici olduğunu ortaya koymaktadır.



4. KAYNAKLAR

1. Soong, T.,T. ve Dargush, G.,F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley and Sons, New York, 1997.
2. Kolovsky M.,Z., *Nonlinear Dynamics of Active and Passive Systems of Vibration Protection*, Springer, Berlin, 1999.
3. Kryszinski, T. ve Malburet, F., *Mechanical Vibrations: Active and Passive Control*, First Edition, ISTE Ltd., London, 2007.
4. Rivin, E.,I., *Passive Vibration Isolation*, ASME Press, New York, 2003.
5. Soong, T.,T. ve Costantinou M.,C., *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, Springer-Verlag, Wien, 1994.
6. Frahm, H., *Device for Damping Vibrations of Bodies*. US989958A (1911).
7. Den Hartog, J.,P., *Mechanical Vibrations*, Dover Publications Inc., New York, 1985.
8. Tsai, H-C. ve Lin, G-C., *Optimum Tuned-Mass Dampers for Minimizing Steady-State Response of Support-Excited and Damped Systems*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22,11 (1993) 957–973.
9. Warburton, G.B. ve Ayorinde, E.O., *Optimum Absorber Parameters for Simple Systems*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 8,3 (1980) 197–217.
10. Ibrahim, R.,A. ve Barr, A.,D.,S., *Autoparametric Resonance in a Structure Containing a Liquid, Part II: Three Mode Interaction*, Journal of Sound and Vibration, 42,2 (1975) 181–200.
11. Hitchcock, P.,A., Kwok, K.,C.,S., Watkins, R.,D. ve Samali, B., *Characteristics of Liquid Column Vibration Absorbers (LCVA)—I*, Engineering Structures, 19,2 (1997) 126–134.
12. Cuvalci, O. ve Ertas, A., *Pendulum as Vibration Absorber for Flexible Structures: Experiments and Theory*, Journal of Vibration and Acoustics, 118(4) (1996) 558–566.
13. Cuvalci, O., *Effect of Detuning Parameters on the Absorption Region for a Coupled System: a Numerical and Experimental Study*, Journal of Sound and Vibration, 229(4) (2000) 837–857.
14. Mustafa, G. ve Ertas, A., *Dynamics and Bifurcations of a Coupled Column-Pendulum Oscillator*, Journal of Sound and Vibration, 182,3 (1995) 393–413.

15. Cuvalci, O., Ertas, A., Ekwaro-Osire, S. ve Cicek, I., Non-Linear Vibration Absorber for a System under Sinusoidal and Random Excitation: Experiments. Journal of Sound and Vibration,;249,4 (2002) 701–718.
16. Wirsching, P.,H. ve Campbell, G.,W., Minimal Structural Response under Random Excitation using the Vibration Absorber, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2,4 (1973) 303–312.
17. Dahlberg, T., On Optimal Use of the Mass of a Dynamic Vibration Absorber, Journal of Sound and Vibration, 132,3 (1989) 518–522.
18. Chang, J.,C.,H. ve Soong, T.,T., Structural Control using Active Tuned Mass Dampers, Journal of the Engineering Mechanics Division, 106,6 (1980) 1091-1098;
19. Soong, T.,T. ve Spencer, B.,F., Active Structural Control: Theory and Practice, Journal of Engineering Mechanics, 118,6 (1992) 1282–1285.
20. Soong, T.,T., Masri, S.,F. ve Housner, G.,W., An Overview of Active Structural Control under Seismic Loads, Earthquake Spectra, 7,3 (1991) 483-505.
21. Housner, G.,W., Soong, T.,T. ve Masri, S.,F., Second Generation of Active Structural Control in Civil Engineering, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 11,5 (1996) 289-296.
22. Singh, M.,P., Matheu, E.,E. ve Suarez, L.,E., Active and Semi-Active Control of Structures under Seismic Excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26,2 (1997) 193-213.
23. Housner, G.,W., Bergman, L.,A., Caughey, T.,K., Chassiakos, A.,G., Claus, R.,O., Masri, S.,F., Skelton, R., E., Soong, T., T., Spencer, B., F. ve Yao, J., T.,P., Structural Control: Past, Present, and Future, Journal of Engineering Mechanics, 123,9 (1997) 897-971.
24. Gattulli, V. ve Ghanem, R., Adaptive Control of Flow-Induced Oscillations Including Vortex Effects, International Journal of Non-Linear Mechanics, 34,5 (1999) 853–868.
25. Lim, C-W., Active Vibration Control of the Linear Structure with an Active Mass Damper Applying Robust Saturation Controller, Mechatronics, 18,8 (2008) 391–399.
26. Gosiewski, Z. ve Mystkowski, A., Robust control of Active Magnetic Suspension: Analytical and Experimental results, Mechanical Systems and Signal Processing, 22,6 (2008) 1297–1303.
27. Ohtake, K., Mataka, Y., Ohkuma, T., Kanda, J. ve Kitamura, H., Full-Scale Measurements of Wind Actions on Chiba Port Tower, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 43,1–3 (1992) 2225–2236.
28. Nagasima, I., Yamada, M. ve Tujita, O., Development and Full Scale Implement of

- Passive and Active Response Control Systems to Buildings, In: International Workshop on Structural Control, DEStech Publications Inc., New York, 1993.
29. Skelton, R., Active and Passive Vibration Control of Structures Part1. International Centre for Mechanical Sciences, May 27 - 31, Udine, 2013.
 30. Korkmaz, S., A Review of Active Structural Control: Challenges for Engineering Informatics, Computers and Structures, 89,23–24 (2011) 2113–2132.
 31. Soong, T.,T. ve Spencer, B.,F., Active, Semi-Active and Hybrid Control of Structures, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 33,3 (2000) 387-402.
 32. Soong, T.,T. ve Spencer, B.,F., Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice, Engineering Structures, 24,3 (2002) 243-259.
 33. Yau, H-T., Synchronization and Anti-Synchronization Coexist in Two-Degree-of-Freedom Dissipative Gyroscope with Nonlinear Inputs, Nonlinear Analysis: Real World Applications, 9,5 (2008) 2253–2261.
 34. Cheung, Y.,L., Wong, W.,O. ve Cheng, L., Design Optimization of a Damped Hybrid Vibration Absorber, Journal of Sound Vibration, 331,4 (2012):750–766.
 35. Chesné, S., Inquieté, G., Cranga, P., Legrand, F. ve Petitjean, B., Innovative Hybrid Mass Damper for Dual-Loop Controller, Mechanical Systems and Signal Processing, 115 (2019) 514–523.
 36. Trindade, M.,A. ve Benjeddou, A., Hybrid Active-Passive Damping Treatments using Viscoelastic and Piezoelectric Materials: Review and assessment, JVC/Journal of Vibration and Control, 8,6 (2002) 699–745.
 37. Veley, D.,E. ve Rao, S.,S., A Comparison of Active, Passive and Hybrid Damping Treatments in Structural Design, Smart Materials and Structures, 5,5 (1996) 184–195.
 38. Liao, W.,H. ve Wang, K.,W., On the Active-Passive Hybrid Control Actions of Structures with Active Constrained Layer Treatments, Journal of Vibration and Acoustics, 119,4 (1997):563-572.
 39. Lam, M.,J., Inman, D.,J. ve Saunders, W.,R., Vibration Control through Passive Constrained Layer Damping and Active Control, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 8,8 (1997) 663–677.
 40. Liao, W.,H. ve Wang, K.,W., A New Active Constrained Layer Configuration with Enhanced Boundary Actions, Smart Materials and Structures, 5(5) (1996) 638–648.
 41. Volterra, V., Sur la Théorie des Variations des Latitudes, Acta Mathematica, 22 (1899) 201–357.

42. Beznos, A.,V., Formal'sky, A.,M., Gurfinkel, E.,V., Jicharev, D.,N., Lensky, A.,V, Savitsky, K.,V. ve Tchesalin, L.S., Control of Autonomous Motion of Two-Wheel Bicycle with Gyroscopic Stabilisation, In Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 16–20 May 1998, Bildiriler Kitabı, 2670–2675.
43. Schilovski, P., Gyrocar. GB12,021 (1909).
44. Schilovski, P., Gyrocar. GB12,940 (1914).
45. Tomlinson, N. , Louis Brennan: Inventor Extraordinaire, John Hallewell Publications, London, 1980.
46. Higashiyama, H., Yamada, M., Kazao, Y. ve Namiki, M., Characteristics of Active Vibration Control System using Gyro-Stabilizer, Engineering Structures, 20,3 (1998) 176-183.
47. Lewis, E., V., The Principles of Naval Architecture: Motions in Waves and Controllability, Second Edition, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, 1990.
48. Perez, T. ve Steinmann, P., Advances in Gyrostabilisation of Vessel Roll Motion, Proceedings of Pacific International Maritime Conference, Sydney: Royal Institution of Naval Architects (RINA), 29-31 January 2008, Sydney, Bildiriler Kitabı, 682-692.
49. Schlick, E., The Gyroscopic Effect of Flywheels on Board Ship, Transactions of the Institute of Naval Architects, 23 (1904) 117–134.
50. Sperry, E., A., Steadying Device for Vehicles. US907907A (1908).
51. Leipnik, R.,B. ve Newton, T.,A., Double Strange Attractors in Rigid Body Motion with Linear Feedback Control, Physics Letters A, 86,2 (1981) 63–67.
52. Ge, Z-M. ve Chen, H-H., Bifurcations and Chaotic Motions in a Rate Gyro with a Sinusoidal Velocity about the Spin Axis, Journal of Sound and Vibration, 200,2 (1997) 121–137.
53. Ge, Z-M. ve Chen, H-H., Bifurcations and Chaos in a Rate Gyro with Harmonic Excitation, Journal of Sound and Vibration, 194,1 (1996) 107–117.
54. Ge, Z-M., Chen, H-K. ve Chen, H-H., The Regular and Chaotic Motions of a Symmetric Heavy Gyroscope with Harmonic Excitation, Journal of Sound and Vibration, 198,2 (1996) 131–147.
55. Ge, Z-M. ve Chen, H-K., Stability and Chaotic Motions of a Symmetric Heavy Gyroscope, Japanese Journal of Applied Physics, 35,3 (1996) 1954–1965.
56. Chen, H-K., Chaos and Chaos Synchronization of a Symmetric Gyro with Linear-

- Plus-Cubic Damping, Journal of Sound and Vibration, 255,4 (2002) 719–740.
57. Van Dooren, R., Comments on “Chaos and Chaos Synchronization of a Symmetric Gyro with Linear-Plus-Cubic Damping”, Journal of Sound and Vibration, 268,3 (2003) 632–634.
 58. Polo, M.,P., Albertos, P. ve Galiano, J.,Á.,B., Tuning of a PID Controlled Gyro by using the Bifurcation Theory, Systems and Control Letters, 57,1 (2008) 10–17.
 59. Salarieh, H. ve Alasty, A., Chaos Synchronization of Nonlinear Gyros in Presence of Stochastic Excitation via Sliding Mode Control, Journal of Sound and Vibration, 313,3–5 (2008) 760–771.
 60. Yan, J-J., Hung, M-L. ve Liao T-L., Adaptive Sliding Mode Control for Synchronization of Chaotic Gyros with Fully Unknown Parameters, Journal of Sound and Vibration, 298,1–2 (2006) 298–306.
 61. Udawadia, F.,E. ve Han, B., Synchronization of Multiple Chaotic Gyroscopes using the Fundamental Equation of Mechanics, Journal of Applied Mechanics, 75,2 (2008), 1-10 (021011).
 62. Yamada, M., Higashiyama, H., Namild, M. ve Kazao, Y., Active Vibration Control System using a Gyro-Stabilizer, Control Engineering Practice, 5,9 (1997)1217–1222.
 63. Moon, Y., Cho, S., Park, J. ve Lee, I., Control Performance of Gyroscope System in Active Vibration Control, The Eighteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering-KAIST3, 18-20 December 2005, Taiwan, Bildiriler Kitabı.
 64. Townsend, N.,C. ve Shenoi, R.,A., Gyrostabilizer Vehicular Technology, Applied Mechanics Reviews, 64,1(2011) 1-14 (010801).
 65. Scheurich, B., Gentner, M., Frey, M. ve Gauterin, F., A Gyroscopic Damper System – A Damping Control with New Performance, Applied Mechanics and Materials, 772(2015) 178–182.
 66. Yoshino, H., Hosoya, T., Yabuno, H., Lin, S. ve Suda, Y., Theoretical and Experimental Analyses on Stabilization of Hunting Motion by utilizing the Traction Motor as a Passive Gyroscopic Damper, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 229,4 (2015) 395–401.
 67. Rama Bhat, B. ve Wagner, H., Natural Frequencies of a Uniform Cantilever with a Tip Mass Slender in the Axial Direction, Journal of Sound and Vibration, 45,2 (1976) 304–307.
 68. Kim, C.,S. ve Dickinson, S.,M., On the Analysis of Laterally Vibrating Slender Beams Subject to Various Complicating Effects. Journal of Sound and Vibration, 122,3 (1988) 441–455.
 69. Liu, W.,H. ve Huang, C-C., Free Vibration of Restrained Beam Carrying

- Concentrated Masses. Journal of Sound and Vibration, 123,1 (1988) 31–42.
70. To, C.W.S., Vibration of A Cantilever Beam with a Base Excitation and Tip Mass. Journal of Sound and Vibration, 83,4 (1982) 445–460.
71. Laura, P.,A.,A. ve Gutierrez, R.,H., Vibrations of an Elastically Restrained Cantilever Beam of Varying Cross Section with Tip Mass of Finite Length, Journal of Sound and Vibration, 108,1 (1986) 123–131.
72. Alvarez, S.,I., Ficcadenti de Iglesias, G.,M. ve Laura, P.,A.,A., Vibrations of an Elastically Restrained, Non-Uniform Beam with Translational and Rotational Springs, and with a Tip Mass, Journal of Sound and Vibration, 120,3 (1988) 465–471.
73. Ali, S.,F. ve Padhi, R., Active Vibration Suppression of Non-Linear Beams using Optimal Dynamic Inversion. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 223,5 (2009) 657–672.
74. Zavodney, L.,D. ve Nayfeh, A.,H., The Non-Linear Response of a Slender Beam Carrying a Lumped Mass to a Principal Parametric Excitation: Theory and Experiment, International Journal of Non-Linear Mechanics, 24,2 (1989)105–125.
75. Nayfeh, A.,H. ve Pai, P.,F., Linear and Nonlinear Structural Mechanics, First Edition, Wiley Interscience, New Jersey, 2004.
76. Esmailzadeh, E. ve Nakhaie-Jazar, G., Periodic Behavior of a Cantilever Beam with End Mass Subjected to Harmonic Base Excitation, International Journal of Non-Linear Mechanics, 33,4 (1998) 567–577.

ÖZGEÇMİŞ

Faruk ÜNKER, 1984 yılında Bursa’da doğdu. İlköğrenimini 1990-1995 yılları arasında Bursa/Osmangazi’de tamamladı. Orta ve Lise öğrenimini 1996-2002 yılları arasında Bursa/Nilüfer’de tamamladı. 2002 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nde başladığı “Lisans” eğitimini 2007 yılında tamamladı. 2008 yılında askerlik görevini yaptı. 2009-2010 yılları arasında hava süspansiyon körükleri üreten Continental-Contitech firmasında teknik hizmetler mühendisi olarak çalıştı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Anabilim Dalı’nda “Yüksek Lisans” eğitimine başladı. 2012 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’ne Araştırma görevlisi olarak atandı. 2012 yılında hazırladığı “Aşırı Plastik Deformasyonun Titanyumun Şekillendirilebilirlik ve Korozyon Davranışı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi” başlıklı tez ile Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Anabilim Dalı’nda “Doktora” eğitimine başladı. Halen Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’ndeki görevine devam eden ÜNKER, İngilizce bilmektedir. ÜNKER’e ait bilimsel çalışma listesi aşağıda sunulmaktadır.

Uluslararası Hakemli Dergilerde Makaleler

- Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2016. Experimental Investigation of a Gyroscopic Vibration Absorber For Vibration Control of a Vertical Cantilever Beam, International Journal of Automation, Mechatronics & Robotics, 3(1), 40-44.
- Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2016. Optimum Tuning of a Gyroscopic Vibration Absorber Using Coupled Gyroscopes for Vibration Control of a Vertical Cantilever Beam, Shock and Vibration, 2016, 1-10.
- Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Seismic Motion Control of a Column Using a Gyroscope. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 195, 2316-2325.
- Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Vibration Control of a Column Using a Gyroscope, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 195, 2306-2315.

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Nonlinear Motion Control of a Column Using a Coupled Gyroscope, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 195, 2242-2252.

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Comments on “Non Linear Piezoelectric Vibration Energy Harvesting From a Vertical Cantilever Beam with Tip Mass”, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 195, 2391-2400.

Ünker, F., Kaplan, E., ve Çuvalcı, O., 2015. Design and Optimization of Chemical Mixing System for Vacuum Chambers Base of Simulation Results, International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 4(1), 23.

Kaplan, E., Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Design of Quartz Chemical Delivery Parts for High Temperature Vacuum Chambers Base of Simulation Results, International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 4(1), 33.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceeding) basılan bildiriler

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2018. Gyroscopic Inertial Thruster, INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TECHNOLOGIES CONGRESS-OTEKON, Bursa, Türkiye. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2017. Gyroscopic Vibration Absorber For Flexible Structures, INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICS AND ENGINEERING, İstanbul, Türkiye. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2017. Gyroscopic Antigravity, INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICS AND ENGINEERING, İstanbul, Türkiye. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2016. Experimental Investigation of a Gyroscopic Vibration Absorber For Vibration Control of a Vertical Cantilever Beam, Proc. of the Fourth Intl. Conf. Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering- CSM 2016, 78-82, Birmingham, UK. (Tam Metin Bildiri/ Sözlü Sunum)

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Seismic Motion Control of a Column Using a Gyroscope, WORLD CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP, İstanbul, Türkiye. (Özet Bildiri/ Sözlü Sunum)

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Vibration Control of a Column Using a Gyroscope, WORLD CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP, İstanbul, Türkiye. (Özet Bildiri/ Sözlü Sunum)

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Comments on “Non Linear Piezoelectric Vibration Energy Harvesting From a Vertical Cantilever Beam with Tip Mass”, WORLD CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP, İstanbul, Türkiye. (Özet Bildiri/ Sözlü Sunum)

Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2015. Nonlinear Motion Control of a Column Using a Coupled Gyroscope, WORLD CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP, İstanbul, Türkiye. (Özet Bildiri/ Sözlü Sunum)

Ünker, F., Kaplan, E., ve Çuvalcı, O., 2014. Design and Optimization of Chemical Mixing System for Vacuum Chambers Base of Simulation Results, International Conference on Advanced Technology & Sciences, ICAT'14, Antalya, Türkiye (Tam Metin Bildiri/ Sözlü Sunum)

Kaplan, E., Ünker, F., ve Çuvalcı, O., 2014. Design of Quartz Chemical Delivery Parts for HighTemperature Vacuum Chambers Base of Simulation Results, International Conference on Advanced Technology & Sciences, ICAT'14, Antalya, Türkiye (Tam Metin Bildiri/ Sözlü Sunum)

