T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜPERİLETKEN MANYETİK YATAKLI VOLAN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMASI

BAYRAM MEMİŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜPERİLETKEN MANYETİK YATAKLI VOLAN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMASI

BAYRAM MEMİŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

GEBZE
2018

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

MODELLING AND EXPERIMENTAL STUDY OF SUPERCONDUCTING MAGNETIC BEARING FLYWHEEL SYSTEM

BAYRAM MEMİŞ

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU

GEBZE

2018

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02/05/2018 tarih ve 2018/24 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15/05/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Bayram MEMİŞ'in tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI)	: Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU	Selim Sivrioğlu
ÜYE	: Prof. Dr. Erkan ZERGEROĞLU	
ÜYE	: Prof. Dr. Ercan ERTÜRK	

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tezin hazırlanmasındaki deney ve çalışmaların çoğu Tübitak (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) destekli 213M581 no'lu "Süperiletken Manyetik Yataklarda Donmuş Görüntü Esaslı Katılık Modellemesi Ve Deneysel Çalışması" projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında tek bir halka şeklindeki yüksek sıcaklık süperiletkeni (YSS) ve özgün olarak tasarlanmış bir volan-rotor üzerine yerleştirilmiş sabit mıknatıslar (SM) kullanılarak deneysel test sistemi oluşturulmuştur. Süperiletken manyetik levitasyonundaki YSS-SM etkileşimi donmuş görüntü (frozen image) yaklaşımı ile modellenerek levitasyon kuvvetleri ve yay katsayısı değerlerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Süperiletken manyetik levitasyonunda birden çok sabit mıknatıs kullanılması ve sabit mıknatıslar arasındaki farklı kutuplardaki yerleşimler elde edilen levitasyon kuvvetlerini etkilemektedir.

Süperiletken manyetik levitasyonu mühendislik anlamında sürtünmesiz bir yataklama sağladığından büyük bir kullanım potansiyeli içermektedir. Temel problem, böyle bir yataklama durumunda levitasyon yay katsayısının makine sistemleri için gerekli büyüklükte olmamasıdır. Özellikle levitasyon esnasında yay katsayısını arttırmak için farklı süperiletken sabit mıknatıs konfigürasyonları geliştirilmektedir. Bu nedenle süperiletken ile mıknatıs arasındaki etkileşiminin matematiksel olarak modellenmesi ve deneysel olarak doğrulanması önem arz etmektedir.

Tez çalışması kapsamında, YSS ile özgün volan-rotor arasında levitasyon durumunda eksenel ve radyal kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Süperiletken deneylerinin tekrarlanabilirliğini kolaylaştıran ve ölçümlerin hassasiyetini artıran deney düzeneği geliştirilmiştir. Tekrarlanan deneylerin neticesinde, süperiletken ile volan arasındaki maksimum levitasyon kuvvetinin, volan üzerinde üç mıknatıs bulunduğu ve mıknatısların çekme-çekme polarizasyonunda yerleştirildiği levitasyon durumunda oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca süperiletken manyetik yataklanan volan-rotorun matematiksel modellemesi yapılmıştır. Volan-rotorun doğal frekans analizleri deneysel olarak yapılmış ve volan hava jeti ile kararlı bir şekilde döndürülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Süperiletken, Volan, Levitasyon, Rotor, Modelleme.

SUMMARY

Most of the experiments and studies preparing this thesis have been carried out under The Project 213M581 “Frozen Image Based Stiffness Modelling At Superconductive Magnetic Bearings And Experimental Study” funded by Tübitak (The Scientific and Technological Research Council of Turkey). In the project, the interaction in an experimental superconducting magnetic levitation generated by a single ring shaped high temperature superconductor (HTS) and fixed permanent magnets (PM) placed on a specially designed flywheel rotor is modeled mathematically.

A multi surface levitation concept using three permanent magnets and one high temperature superconductor in a levitation configuration is studied experimentally for different cases to increase the levitation forces. For this reason, mathematical modeling and experimental verification of the interaction between superconductor and magnet is important.

Within the scope of the thesis study, axial and radial force measurements were made in the case of levitation between HTS and original flywheel-rotor. An experimental setup has been developed that facilitates the repeatability of superconductor experiments and increases the sensitivity of the measurements. As a result of many experiments, it was observed that the maximum levitation force between the superconductor and the flywheel is in the levitation state where there are three magnets on the flywheel and the magnets are placed in the pull-pull polarization.

In this study, mathematical modeling of flywheel-rotor with superconducting magnetic bearing was also done. The natural frequency analysis of the flywheel-rotor was experimentally conducted and the flywheel was steadily rotated by air jet.

Key Words: Superconductor, Flywheel, Levitation, Rotor, Modelling.

TEŞEKKÜR

Tübitak projesinde görev almama imkân tanıyarak, deneysel çalışmalara katılıp tezi hazırlamama olanak tanıyan ve tezi yazmamda yardımcı olan, hayata dair tavsiye ve teşvikleriyle yol göstericim olan saygıdeğer hocam, danışmanım Prof. Dr. Selim Sivrioğlu'na,

Tez sürecinde ve deneysel çalışmalarda yardımlarını hiç esirgemeyen Arş. Gör. Ali Suat Yıldız ve Arş. Gör. Sinan Başaran'a, yüksek lisans eğitimime desteklerinden dolayı Bertrandt Otomotiv Türkiye müdürü Salih Yılmaz'a ve bugünlere gelebilmemde büyük emeği geçen ve manevi destekleriyle güç veren, her anlamda bana güvenen ve yardımlarını esirgemeyen aileme, tez sürecinde desteğini hiç eksik etmeyen sevgili eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. SÜPERİLETKEN MANYETİK YATAKLARIN ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Süperiletkenliğin Temel Özellikleri	3
2.2. Süperiletken Manyetik Yataklar	5
3. DENEYSEL SİSTEMİN TANITILMASI	7
3.1. Deneysel Sistem Yapısı	9
3.1.1. Rotor Yapısı	11
3.2. Sıvı Nitrojen Kabı	14
3.3. Destek Plakası Ve Düşey Hareket Sistemi	15
3.4. Kuvvet Ölçüm Sistemi	15
3.4.1. Yatay İtici Mekanizması	15
3.4.2. Dikey İtici Mekanizması	16
3.5. Sensörler	17
3.6. Döndürme Sistemi	17
4. VOLAN-ROTOR DİNAMİK MODELİ VE SİMÜLASYONU	19
4.1. Dinamik Modelin Elde Elde Edilmesi (Sönümsüz)	19
4.2. Dinamik Modelin Elde Elde Edilmesi (Sönümlü)	30
4.3. Volan-rotor Sisteminin Simülasyonu	33
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
5.1. Eksenel Yönde Yay Katsayılarının Bulunması	41
5.2. Radyal Yönde Yay Katsayılarının Bulunması	45
5.3. Döndürme Deneyi Sonuçları	50

6. DOĞAL FREKANS ANALİZİ 55
6.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistem (SDOF) Yaklaşımı 56
6.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistem (MDOF) Yaklaşımı 57
6.3. Deneysel Modal Analiz Çalışması 58
7. SONUÇLAR VE YORUMLAR 67

KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ 73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
θ	:	SM'nin simetri ekseni ve dikey yön (z) arasındaki açı
ψ	:	SM'nin dönme açısı
m	:	SM'nin kütlesi
I_r	:	Radyal atalet momenti
I_p	:	Eksenel atalet momenti
H_c	:	Kritik manyetik alan
J_c	:	Kritik akım yoğunluğu
T	:	Toplam kinetik enerji
T_c	:	Kritik sıcaklık
P	:	Toplam potansiyel enerji
a_1	:	SM-1 ile kütle merkezi arasındaki dikey mesafe
a_2	:	SM-2 ile kütle merkezi arasındaki dikey mesafe
a_3	:	SM-3 ile kütle merkezi arasındaki dikey mesafe
b_1	:	SM-1 ile kütle merkezi arasındaki yatay mesafe
b_2	:	SM-2 ile kütle merkezi arasındaki yatay mesafe
b_3	:	SM-3 ile kütle merkezi arasındaki yatay mesafe
K_{xx}	:	x yönündeki yanal katılık
K_{yy}	:	y yönündeki yanal katılık
K_{zy}	:	zy düzleminde dikey katılık
K_{zx}	:	zx düzleminde dikey katılık
K_r	:	Radyal katılık
K_e	:	Eksenel katılık
C_r	:	Radyal sönüm
C_e	:	Eksenelsönüm

FRF	:	Frequency Response Function
HTS	:	High Temperature Superconductor
MDOF	:	Multi Degree of Freedom
RPM	:	Revolutions per Minute
SDOF	:	Single Degree of Freedom
SM	:	Sabit Mıknatıs
SMY	:	Süperiletken Manyetik Yatak
YSS	:	Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	II. Tip Süperiletken (Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni) H-T Faz Diyagramı.	4
2.2:	Son yıllarda yapılan ve test edilen Süperiletken Manyetik Yataklı (SMY) volan prototiplerine bazı örnekler.	6
3.1:	Süperiletken katılık deneyi temel şeması.	7
3.2:	Süperiletken katılık deneyi: Adım motorunun sürülmesi.	8
3.3:	Süperiletken katılık deneyi: Sensör verilerinin okunması.	8
3.4:	Tasarlanan deneysel sistemin 3 boyutlu görünüşü.	9
3.5:	Tasarlanan deneysel sistemin kesit görünüşü.	10
3.6:	Geliştirme aşamasında deney düzeneğinin görünüşü.	10
3.7:	Rotor kesit görünüşü.	11
3.8:	Deney düzeneği görünüşü.	12
3.9:	Volan-rotor görünüşü.	13
3.10:	Halka süperiletken ve sıvı azot haznesi	13
3.11:	Deney düzeneğinin tamamlanmış hali (radyal ölçüm).	14
3.12:	Dikey pozisyonlama mekanizması.	15
3.13:	Yatay itici mekanizması.	16
3.14:	Yatay itici mekanizması (CAD).	16
3.15:	Veri toplama ve kontrol kartı.	17
3.16:	Rotor döndürme mekanizması.	18
3.17:	Takometre (brüel & kjaer 2981).	18
4.1:	Süperiletken manyetik yataklı volan sisteminin kesit görünüşü.	20
4.2:	Modellenen sistemin z-y düzleminde görünümü.	21
4.3:	Modellenen sistemin z-x düzleminde görünümü.	22
4.4:	SM-1 Modeli. a) z-y düzleminde katılık ifadeleri gösterimi, b) z-x düzleminde katılık ifadeleri gösterimi.	23
4.5:	Tek yüzeyli levitasyon SM-2 durumu simülasyon frekans cevabı.	34
4.6:	İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1, SM-2 çekme) simülasyon frekans cevabı.	35

4.7: İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1, SM-2 itme) simülasyon frekans cevabı. 35
4.8: Üç yüzeyli Levitasyon durumu (çekme) simülasyon frekans cevabı. 36
4.9: Üç yüzeyli Levitasyon durumu (itme) simülasyon frekans cevabı. 36
5.1: Deneylerde uygulanan tüm levitasyon durumları. 40
5.2: Deney 1- Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 41
5.3: Deney 2 - İki yüzeyli levitasyon (1) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 42
5.4: Deney 3 - İki yüzeyli levitasyon (1) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 42
5.5: Deney 4 - İki yüzeyli levitasyon (2) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 43
5.6: Deney 5 - İki yüzeyli levitasyon (2) itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 43
5.7: Deney 6 - Üç yüzeyli levitasyon çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 43
5.8: Deney 7 - Üç yüzeyli levitasyon itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 44
5.9. Deney 8 (SM-1: 10 mm) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 45
5.10: Deney 9 (SM-1: 15 mm) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 45
5.11: Deney 10 (SM-1: 20 mm) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 46
5.12: Deney 11 (SM-2) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 46
5.13: Deney 12 - İki yüzeyli levitasyon (1) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 46
5.14: Deney-13 - İki yüzeyli levitasyon (1) itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 47
5.15: Deney 14 - İki yüzeyli levitasyon (2) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 47

5.16: Deney 15 - İki yüzeyli levitasyon (2) itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 47
5.17: Deney 16 – Üç yüzeyli levitasyon çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 48
5.18: Deney 17 – Üç yüzeyli levitasyon itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 48
5.19: Levitsyon durumlarına göre deney sonuçlarının mukayesesi. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı. 49
5.20: Süperiletken manyetik levitasyonlu volan-rotor sisteminin döndürme testi. 52
5.21: Deney 18 - Tek yüzeyli levitasyon rotor yörüngesi. 51
5.22: Deney 19 - İki yüzeyli levitasyon (1) çekme kutup yönlü rotor yörüngesi. 52
5.23: Deney 20 - İki yüzeyli levitasyon (1) itme kutup yönlü rotor yörüngesi. 52
5.24: Deney 21 - İki yüzeyli levitasyon (2) çekme kutup yönlü rotor yörüngesi. 53
5.25: Deney 22 - İki yüzeyli levitasyon (2) itme kutup yönlü rotor yörüngesi. 53
5.26: Deney 23 - Üç yüzeyli levitasyon çekme kutup yönlü rotor yörüngesi. 54
5.27: Deney 24 - Üç yüzeyli levitasyon itme kutup yönlü rotor yörüngesi. 54
6.1: Tek yüzeyli levitasyon SM-2 durumu deneysel ve eğri uydurma FRF cevabı. 59
6.2: İki yüzeyli levitasyon durumu (SM-1, SM-2 çekme)deneysel ve eğri uydurma frf cevabı. 60
6.3: İki yüzeyli levitasyon durumu (SM-1, SM-2 itme) deneysel ve eğri uydurma frf cevabı. 62
6.4: Üç yüzeyli levitasyon durumu (çekme) deneysel ve eğri uydurma frf cevabı. 63
6.5: Üç yüzeyli levitasyon durumu (itme) deneysel ve eğri uydurma frf cevabı. 64
6.6: İki yüzeyli levitasyon durumu (SM1-SM2) deneysel frekans cevapları mukayesesi. 65

6.7: Üç yüzeyli levitasyon durumu (SM1-SM2-SM3) deneysel frekans cevapları mukayesesi. 66
6.8: Tüm levitasyon durumlarının deneysel frekans cevapları mukayesesi. 66

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
3.1:	Mıknatıs Kombinasyonları.	12
4.1:	Rotor kütle ve atalet moment değerleri.	33
4.2:	Volan analitik modeli frekans cevapları.	37
5.1:	Eksenel Yönlü Deneyler.	38
5.2:	Radyal Yönlü Deneyler.	39
5.3:	Döndürme Deneyleri.	39
5.4:	Eksenel yöndeki kuvvet ve yay katsayısı değerleri.	44
5.5:	Radyal Yöndeki Kuvvet Ve Katılık Değerleri.	50
6.1:	Tek yüzeyli levitasyon (sadece SM-2 durumu) frekans ve modal parametre değerleri.	59
6.2:	İki yüzeyli levitasyon (SM-1, SM-2 çekme) frekans ve modal parametreler değerleri.	60
6.3:	İki yüzeyli levitasyon (SM-1, SM-2 itme) frekans ve modal parametreler değerleri.	61
6.4:	Üç yüzeyli levitasyon durumu (çekme) frekans ve modal parametreler değerleri.	63
6.5:	Üç yüzeyli Levitasyon durumu (İtme) frekans ve modal parametreler değerleri.	64

1. GİRİŞ

Yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS), keşfedilmesinden sonra birçok mühendislik uygulamasında yerini almaya başlamıştır. Bu uygulamalar genellikle süperiletken ile sabit mıknatıs (SM) arasındaki etkileşimin temeline dayanmaktadır. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin manyetik levitasyon uygulamalarındaki kullanımı ise yataklar, enerji depolama sistemleri ve ulaşım sistemleri gibi teknolojik bakımdan uygulama potansiyeli barındıran alanlardır [1]-[3].

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin önemli bir özelliği sıvı nitrojen sıcaklığında süperiletkenlik durumunun gerçekleştiği halde üzerlerine getirilen sabit (kalıcı) mıknatısı hiçbir temas olmadan havada asılı tutması (levitasyon) olayıdır. Süperiletken manyetik levitasyonu denilen bu durum mühendislik açısından özellikle taşımacılıkta ve makine elemanlarının yataklanması gibi kullanım potansiyeli içermektedir. Bunun yanı sıra, enerji depolama sistemleri, volanlarda (flywheel) uygulamaları farklı araştırma gurupları tarafından çalışılmaktadır [4].

Süperiletken-kalıcı mıknatıs etkileşiminin modellenmesi elde edilebilir yay katsayısı ve yay katsayısının değişimi konusunda önemli bir katkı sağlamaktadır [5], [6]. Bu modellemeler içinde donmuş görüntü (frozen image) yaklaşımı süperiletken üzerinde tek bir silindirik sabit mıknatıs bulunması durumu için uygulanmıştır [5]. Ayrıca halka şeklindeki bir süperiletkenin boş olan iç çap bölgesine yerleştirilmiş bir sabit mıknatıs ile olan etkileşimi donmuş görüntü modeli esas alınarak oluşturulmuştur [6].

Literatürde, sabit mıknatıs ile süperiletken arasındaki levitasyon kuvvetlerini hesaplamak için etkileşim modelleri geliştirilmiştir [20], [37]. Mühendislik uygulamalarında, levite olmuş sistemin dinamiklerini tahmin etmek için bu tarz modeller kullanışlı olmaktadır. Çeşitli süperiletken levitasyon sistemleri için donmuş görüntü modeli uygulanmıştır [6]. Bu yaklaşımda, manyetik dipolün, sabit mıknatısın geometrik merkezinde oluştuğu varsayılır. Donmuş görüntü dipolü ve diyamanyetik görüntü YSS içinde oluştuğu kabul edilmektedir [6], [7].

YSS yataklı volan sistemlerinde yüksek levitasyon kuvvetlerine ulaşmak önem taşıdığı için, farklı araştırma grupları tarafından çalışılmaktadır [9]. Bir süperiletken levitasyon sisteminde kuvvetler, kalıcı mıknatıs ile süperiletken arasındaki katılık etkilerinden meydana gelir. Mühendislik sistemlerinde, dönel elemanların doğal

frekansları katılık ve rotor ağırlığına bağlı olarak bulunmaktadır. Dolayısıyla, süperiletken manyetik yatakların geçerli bir katılık modellemesi, sistemin doğal frekanslarını tahmin etmek için gereklidir. Süperiletken manyetik levitasyonun mühendislik uygulamalarında, levitasyon kuvvetinin ve katılığın artırılması büyük önem taşır. Bu amaçla, boyut ve farklı SM-YSS konfigürasyonlarının etkisi literatürde araştırılmıştır [9], [32]-[35]. Yay katsayısını arttıracak şekilde değişik süperiletken mıknatıs konfigürasyonları denenmektedir [22]. Özellikle yüksek manyetik alana sahip Neodyum mıknatısları ile süperiletkenin kritik manyetik alan değeri aşılmaksızın yeterli rijitliğe sahip levitasyon oluşturmak mümkün olmaktadır [36].

Bir süperiletken manyetik sistemde levitasyon katılığı, radyal ve eksenel katılık etkilerinden oluşmaktadır. Eksenel katılık, süperiletken levitasyonun yük kapasitesini belirlerken radyal katılık, volanın rotasyonel dinamiklerini etkiler. Mühendislik uygulamaları için levitasyon sisteminin dinamikleri doğru şekilde analiz edilmelidir.

Tez çalışması, 213M581 nolu "Süperiletken Manyetik Yataklarda Donmuş Görüntü Esaslı Katılık Modellemesi Ve Deneysel Çalışması" başlıklı Tübitak 1001 projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında tek bir halka süperiletken kullanılarak birden çok yüzeyde levitasyonun sağlandığı süperiletken manyetik yataklamalı bir volan sisteminin analitik modelleme ve deneysel gerçekleme çalışması yapılmıştır. Halka süperiletkenin birden çok yüzeyi üzerinde sabit mıknatıs yerleştirerek levitasyon oluşturulması hedeflenmiştir. Çalışmanın asıl hedefi olan üç yüzeyli süperiletken-sabit mıknatıs modellemesi yapılmıştır. Bu amaçla burada orta iç çap içinde sabit mıknatıs (SM-1), süperiletken (YSS) üst yüzeyinde yer alan ikinci bir sabit mıknatıs (SM-2) ve süperiletken (YSS) alt yüzeyinde yer alan üçüncü bir sabit mıknatıs (SM-3)'ün oluşturacağı yay etkisinin matematiksel modellemesi yapılmıştır. Deneysel olarak yay etkisinin büyüklüğünü ölçen çalışmalar eksenel ve radyal olmak üzere iki ana maddeye bölünmüştür ve üç farklı levitasyon durumu için deneyler yapılmıştır. Deneylerde mıknatısların yönlerini değiştirerek farklı polarizasyon durumunun yay katılığına etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda sabit mıknatısların soğutma fazında süperiletken içindeki görüntüleri çakışacak şekilde deney düzeneği tasarımı ve özgün volan tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca levite olan volan-rotor 750 d/dk dönüş hızında döndürülerek rotor merkez ekseninin radyal doğrultudaki yer değiştirmeleri incelenmiştir. Modal analiz yöntemi ile rotor dönme ve öteleme doğal frekansları, sönüm kayıp faktörü ve modal sabit değerleri elde edilmiştir.

2. SÜPERİLETKEN MANYETİK YATAKLARIN ÖZELLİKLERİ

2.1. Süperiletkenliğin Temel Özellikleri

Süperiletkenlik belirli malzemelerde rastlanan elektriksel direncin yok olması olayıdır. Bir süperiletkenden doğru akım (*dc*) geçirildiğinde direnç sıfır olmasına rağmen süperiletkenden alternatif akım (*ac*) geçirilirse direnç sıfır değildir. Birçok metal ve alaşım kritik sıcaklık (Tc) olarak adlandırılan bir sıcaklık değeri altında süperiletkenlik durumuna geçer. Kritik sıcaklık seviyesi farklı malzemeler için değişiklik gösterir. Örneğin Niobium (Nb) için süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı 9.2 K'dir. Bu sıcaklığın altına soğutulan iletken malzeme, manyetik akımı dışlar ve bu duruma Meissner Etkisi denir [15], [30]. Manyetik alanın dışlanması, perdeleme akımları olarak bilinen, manyetik alana eşit ve zıt yönde alan oluşturacak şekilde süperiletken yüzeyinde akan elektrik akımından dolayı meydana gelir

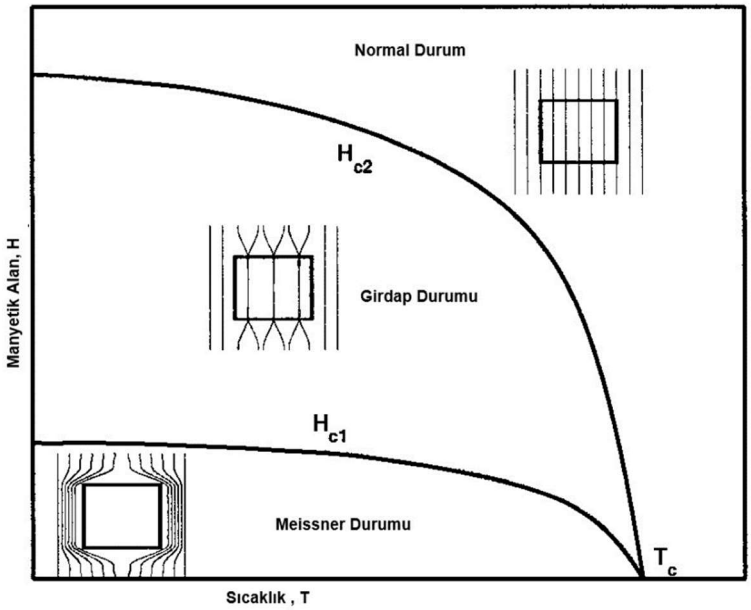
Düşük sıcaklık süperiletkenleri, süperiletkenlik durumunu sürdürmek için sıvı Helyum'a (3-4 Kelvin) gereksinim duyarken, yüksek sıcaklık süperiletkenleri sıvı Nitrojen ile (76 Kelvin) soğutulabilir. Bu durum ekonomik bakımdan yüksek sıcaklık süperiletkenleri avantajlı kılar. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin seramik malzemeden yapılıyor olması, kablo ve ince film vb. yapıların üretiminde dezavantaj sağlamaktadır [31].

Süperiletkenlik hali çok önemli üç faktörden oluşmaktadır: kritik sıcaklık (Tc), kritik manyetik alan (Hc) ve kritik akım yoğunluğu (Jc). Süperiletken elementlere süperiletkenlik durumunda uygulanan bir manyetik alan (süperiletkenliğin kaybolduğu manyetik alan) değerine kritik manyetik alan (Hc) denir [32]. Bu parametrelerin her biri diğer mevcut iki parametrenin durumuna da bağımlıdır. Süperiletkenlik durumunun sürekliliği tüm bu parametrelerin, kritik değerlerinin altında kalmasıyla mümkündür ki bu da malzemeden malzemeye değişim gösterir. Hc ve Jc için en yüksek değer sıcaklığın 0 K'de, Tc için en yüksek değer ise H ve J'nin sıfır olduğu noktada gerçekleşir.

Süperiletkenler manyetik bir alan içindeki davranış karakteristiklerine bağlı olarak Tip I (Type I) ve Tip II (Type II) olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Yüksek

sıcaklık süperiletkenleri Tip-II süperiletkenler sınıfındandır. Tip-I süperiletkenlerin aksine, Tip-II süperiletkenler iç kısımlarında manyetik akı barındırırlar [10].

Şekil 2.1'de Tip II süperiletkenlerin kritik sıcaklık (Tc) civarındaki faz diyagramı taslak olarak verilmiştir. İki boyutlu faz uzayı, sıcaklık T ve manyetik alan H ile ifade edilmek üzere üç alt bölgeye ayrılmıştır. Herbir bölge kısmi bir duruma karşılık gelir: alt kritik manyetik alanın (Hc1) altında mükemmel süperiletken (Meissner) durumu; orta kısma manyetik alanın nüfus edemediği durum, üst kritik manyetik alanın (Hc2) üzerindeki normal durum; süperiletkenin normal bir metal gibi davrandığı durum ve orta girdap durumudur. Kritik sıcaklığın (Tc) üzerinde bütün süperiletkenlik özellikleri kaybolur [10].



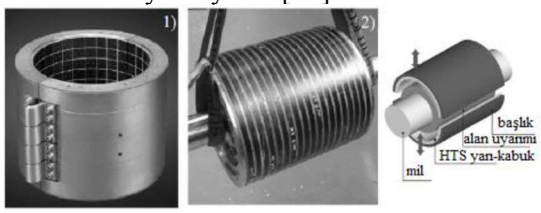
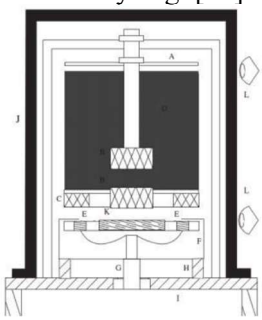
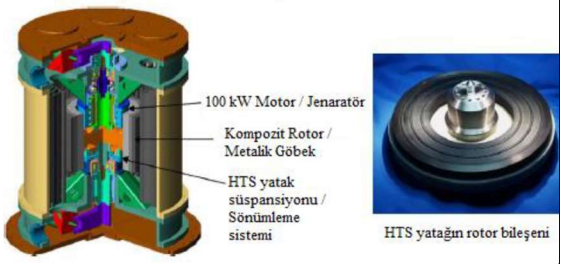
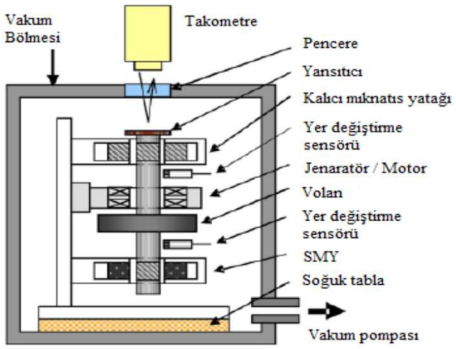
Şekil 2.1: Tip II Süperiletken (Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni) H-T Faz Diyagramı.

Süperiletken manyetik yataklar, süperiletkenlik durumuna geçerken soğutulma şekillerine göre manyetik alan içinde soğutma (Field Cooled-FC) ve manyetik alansız soğutma (Zero Field Cooled-ZFC) olarak ikiye ayrılır. Manyetik alansız soğutmalarda (ZFC) yataklar yüksek levitasyon kuvveti üretirler fakat bütün yönlerde kararsız davranış gösterdikleri için kararlı duruma gelmeleri ek bir kontrol gerektirir. Manyetik alanlı soğutmalarda (FC) ise daha düşük levitasyon kuvvetleri üretilir fakat tüm yönlerde pasif kararlılık gösterirler [11].

2.2. Süperiletken Manyetik Yataklar

Süperiletken malzemelerin kritik sıcaklık altında sabit mıknatıs içeren dönen makine elemanlarını temassız olarak havada tutma (levitasyon) durumu süperiletken manyetik yatak olarak isimlendirilmektedir. Elektromıknatıslarla oluşturulan aktif manyetik yataklara göre yapıları basittir ve kontrol gerektirmemektedir. Bu tür yataklarda herhangi bir mekanik temas olmaması ve kontrol gerektirmemesi avantajdır. Bununla birlikte kriyojenik sıcaklıklarda levitasyonun oluşması dezavantajdır. Bu yataklama yönteminin volan sistemleri gibi belirli sistemlere uygulanması aktif araştırma konularındandır. Son yıllarda seramik yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin rotor ve şaft gibi dönen makine elemanlarını herhangi bir temas olmadan ve kontrol gerektirmeden yataklaması gelecek vaat eden uygulama alanlarıdır. Elektrik enerjisine olan ihtiyaç giderek artarken gündüz ve gece boyunca ihtiyaç duyulan enerji farkı da artmaktadır. Genelde gece ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi gün boyunca ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinden düşüktür. Diğer yandan elektrik enerjisi üreten bir santral inşa edilirken maksimum talep göz önüne alınmaktadır. Dolayısı ile kapasite kullanımında düşüş meydana gelmektedir. Volan (flywheel) enerji depolama sistemindeki amaç, kapasite kullanımını arttırmak yani üretim santralini maksimum ihtiyaca göre değil belirlenen ortalama bir ihtiyaca göre kurmak ve gün içinde talep artması durumunda volan enerji depolama sistemini devreye sokmaktır. Bu amaçla gece tüketilmeyen elektrik enerjisi volanda (dönen kütle) dönme kinetik enerjisi olarak depolanacak ve gün boyu talep artması durumunda, bu kinetik enerji elektrik enerjisi olarak geri alınacaktır. Burada süperiletken levitasyon esnasında herhangi bir temas olmaması ve kayıpların çok düşük seviyelerde olması bu tarz uygulamalara olanak sağlamaktadır. Mevcut uygulamalarda volan enerji depolama sistemi motor/jeneratör olarak dizayn edilir Sistem gece boyunca fazla elektrik enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülürken motor olarak, bu enerji gün boyunca geri alınırken ise jeneratör olarak çalışır.

SMY'ların potansiyel olarak enerji depolama volanlarına uygulanması prototipler oluşturularak gösterilmiştir. Şekil 2.2'de bu uygulama çalışmalarında oluşturulan prototipler gösterilmektedir [12]. Ayrıca volanların dönme hızları, kapasiteleri ve sistemlerinde kullandıkları süperiletken mekanizmaları açıklanmıştır. Örneklerde 15000 rpm (Revolutions per Minute) hıza kadar olan volanlar verilmiştir.

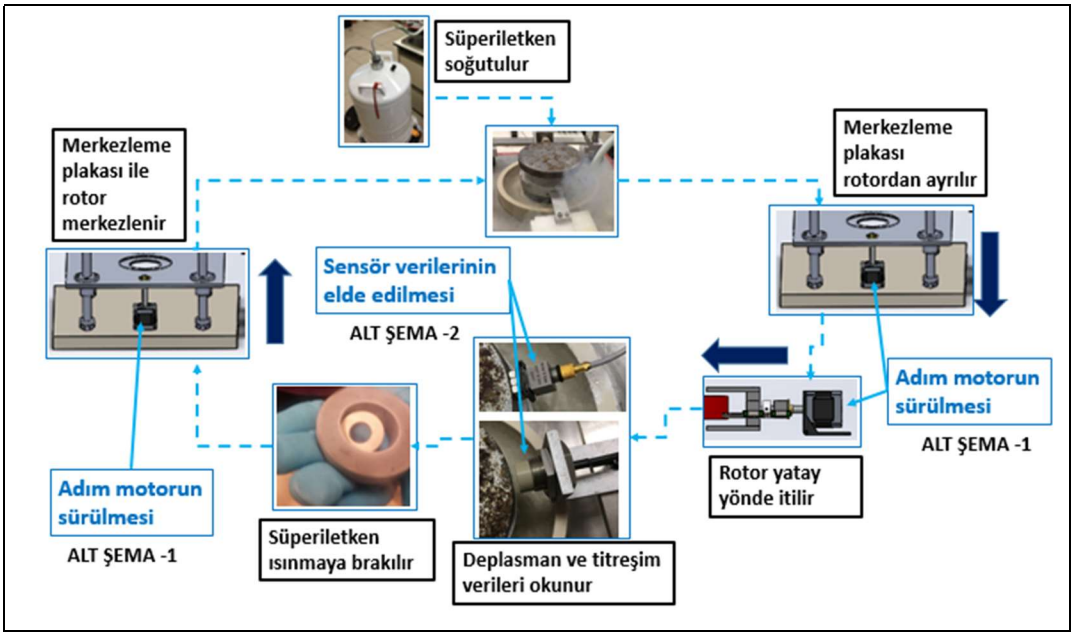
Süperiletken Manyetik Yataklı (SMY) Volan Prototipleri	Sistem Detayları
Yüksek yük kapasiteli sanayi tipi yatay eksenli manyetik yatak [13].  a)	**Tip:** Yatay Eksenli Silindirik SMY. **Uygulama:** Siemens HTS jeneratör **Yük:** 10 kN'a kadar **Dönme Hızı:** 3600 rpm **Süperiletken:** Sabit kısım toplam 270 YBCO içeren iki yarım silindirik kabuktan oluşmaktadır. Süperiletken çalışma sıcaklığı yaklaşık 30 K'dır. Çalışma mesafesi 3 mm'dir. Radyal stiffness 5,1 kN/mm'dir.
Volan (flywheel) enerji depolama için süperiletken baskı yatağı [14].  b)	**Tip:** Düşey eksen düzlemsel SMY (allta) ve rotor ağırlığını taşıması için çekici PM-PM yatak (üstte). **Uygulama:** Yüksek döngülü kullanım için volan enerji depolama. **Yük: 44 kg , Dönme Hızı:** 720 rpm (sistem kısıtlı) **Süperiletken:** Sabit kısımda dış halka numunelerden ve merkez dizilimi altıgen numunelerden yapılmıştır.
5kWh volan (flywheel) için süperiletken manyetik yatak (Boeing) [15].  c)	**Tip:** Düşey eksen düzlemsel SMY (allta) ve rotor ağırlığının çoğunu taşıyan PM-PM yatak (üstte) **Uygulama:** Kesintisiz enerji kaynağı olarak 5 kWh/100 kW'lık volan enerji depolama sistemi **Yük: 164 kg , Dönme Hızı:** 15000 rpm **Süperiletken:** Sabit kısım altıgen YBCO numunelerin dizilimi ile oluşturulmuştur. Süperiletken çalışma sıcaklığı 77 K'dir.
Süperiletken ve kalıcı mıknatıs manyetik yataklı volan enerji depolama sistemi [16-17].  d)	**Tip:** Düşey eksen silindirik SMY (allta) ve rotor ağırlığının çoğunu taşıyan PM-PM yatak (üstte) **Uygulama:** Kesintisiz enerji kaynağı olarak kullanılan volan enerji depolama **Yük: 0,32 kg** **Dönme Hızı:** 5000 rpm **Süperiletken:** Sabit kısım YBCO numunelerden oluşan halka dizilimi ile yapılmıştır. Süperiletken çalışma sıcaklığı 70 K'dir.

Şekil 2.2: Son yıllarda yapılan ve test edilen Süperiletken Manyetik Yataklı (SMY) volan prototiplerine bazı örnekler.

3. DENEYSEL SİSTEMİN TANITILMASI

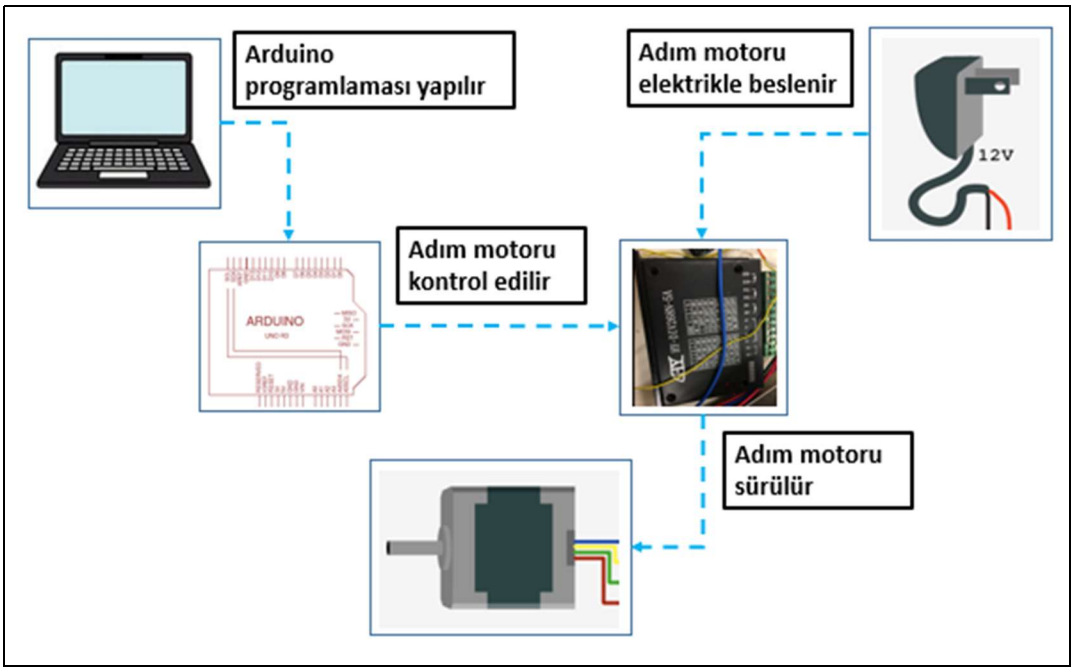
Tek bir halka süperiletkenin üç yüzeyi ve sabit mıknatıslar (SM) arasında levitasyonu oluşturacak şekilde özgün bir rotor-volan tasarımını gerçekleştirmek ve süperiletken yataklama katılıklarının artırılması tez çalışmasının amaçlarındandır.

Tez kapsamında bir adet halka süperiletken ile sabit mıknatıs-rotor arasında oluşan, süperiletkenlik durumunda sistem dinamiklerini incelemek amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. Deneyleri temel olarak, eksenel ölçüm, radyal ölçüm ve döndürme olmak üzere üç gruba ayırabiliriz [18]. Deneysel çalışmalar yapılırken süperiletkenin soğutulması kriyojenik sıcaklıklarda olduğu için iş güvenliği hususlarına dikkat edilmiştir. Bilhassa soğuk süperiletken ve sıvı azotun insan tenine temas etmemesine dikkat edilmiştir. Volan-rotor, uygun mıknatıs kombinasyonu ile bir araya getirildikten sonra deney düzeneği içinde merkezlenir ve soğutma yapıldıktan sonra levite olan volan serbest bırakılır. Ölçümler yapıldıktan sonra süperiletken oda sıcaklığında ısınmaya bırakılır. Bu prosedür radyal ve eksenel yön ile döndürme deneyleri için uygulanmıştır. Deneylerin yapılışı en temel anlamda Şekil 3.1'de akış şeması şeklinde gösterilmiştir.



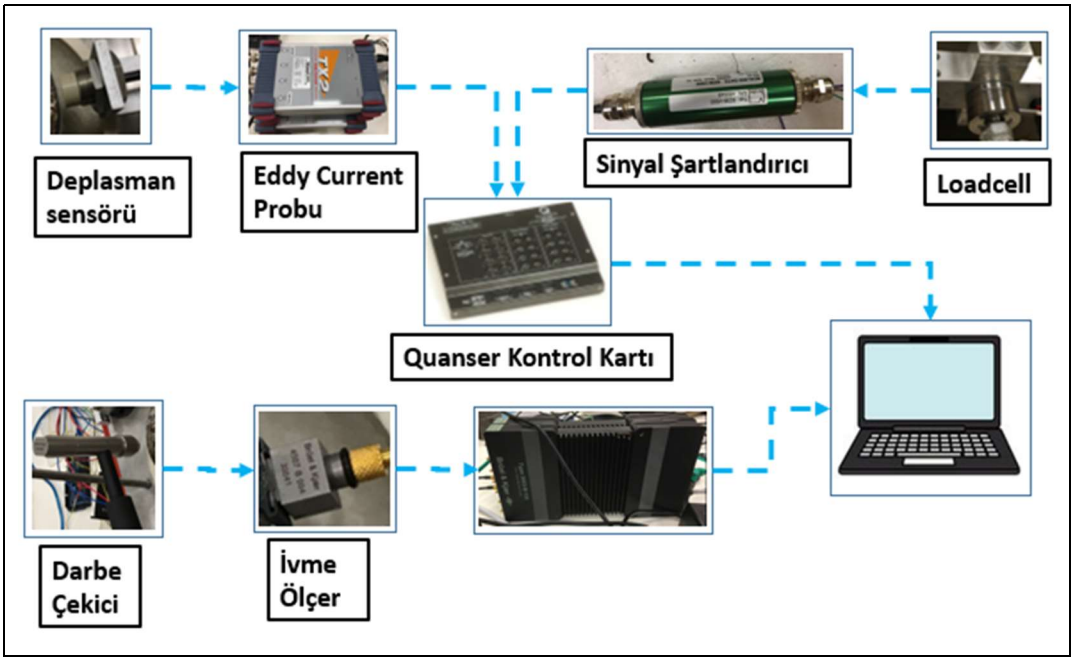
Şekil 3.1: Süperiletken katılık deneyi temel şeması.

Merkezleme plakası ve yanal itici mekanizmaya hareket veren adım motorların çalışma prensibi Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Süperiletken katılık deneyi: Adım motorunun sürülmesi.

SM-rotor sisteminin levitasyon durumunda davranışlarını analiz edebilmek için ölçümlerde birçok sensör kullanılmıştır. Sensörlerden veri elde edilmesi ve sistemin işleyişi şematik olarak Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

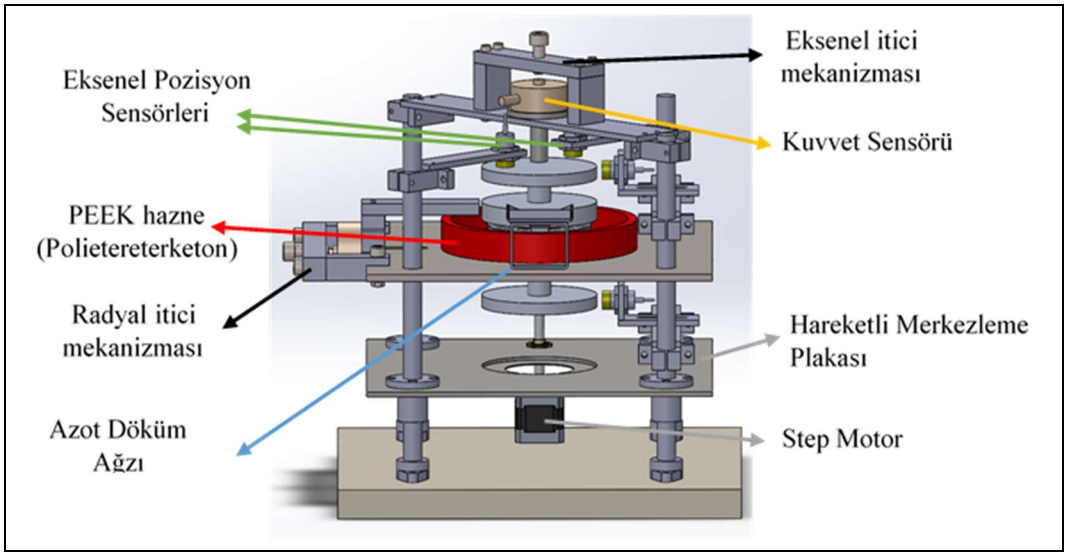


Şekil 3.3: Süperiletken katılık deneyi: Sensör verilerinin okunması.

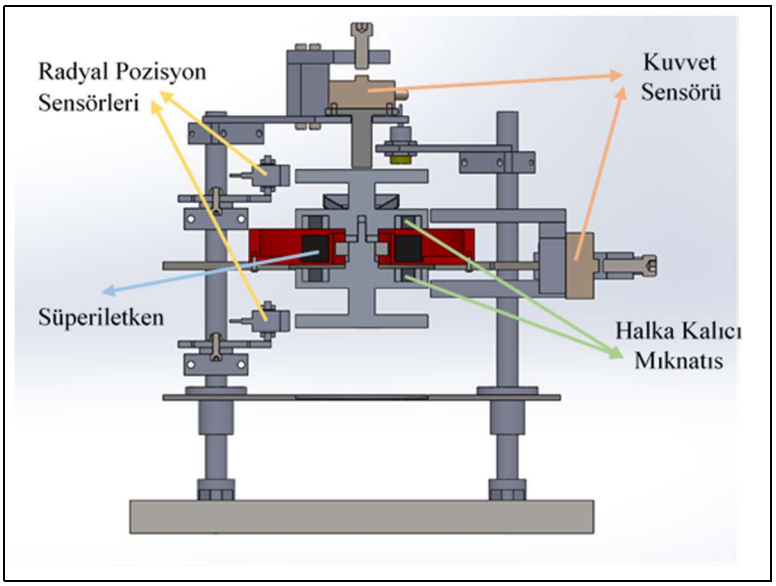
3.1. Deneysel Sistem Yapısı

Tek bir halka süperiletken kullanılarak çok yüzeyli süperiletken manyetik levitasyonlu volan sisteminin tasarımı özellikle rotor volanın ve sıvı azot kabının özgün bir tasarımını gerektirmektedir. Bu amaçla tekrarlanabilir ve doğru bir ölçüm için Şekil 3.4 ve Şekil 3.5' te görünüşleri verilen tasarımlar oluşturulmuştur. Deneysel sistemin oluşturulmasında tasarım düzeltmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Şekil 3.4 ve 3.5'de verilen tasarımlar esas alınarak oluşturulan deney düzeneğinin ilk safhası Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Deney başlangıcında rotoru tam merkezde ve süperiletken yüzeyinden istenilen seviyede tutan step motor ve hareketli plakaya bağlı vidalı mil öngörülmüştür. Ayrıca radyal yöndeki katılık değerlerinin ölçümünde, herhangi bir moment oluşturmayacak itici kol tasarımı gerekmektedir. Aynı durum eksenel yönde de geçerlidir. Levitasyonu gerçekleştirilen rotor iki parçalı ve farklı sabit mıknatıs montajlarına elverişli olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede farklı mıknatıs kombinasyonlarını içeren durumlar incelenmiştir. Alt bölümlerde deney düzeneğini oluşturan tüm elemanlar ayrı ayrı ele alınmıştır.



Şekil 3.4: Tasarlanan deneysel sistemin 3 boyutlu görünüşü.



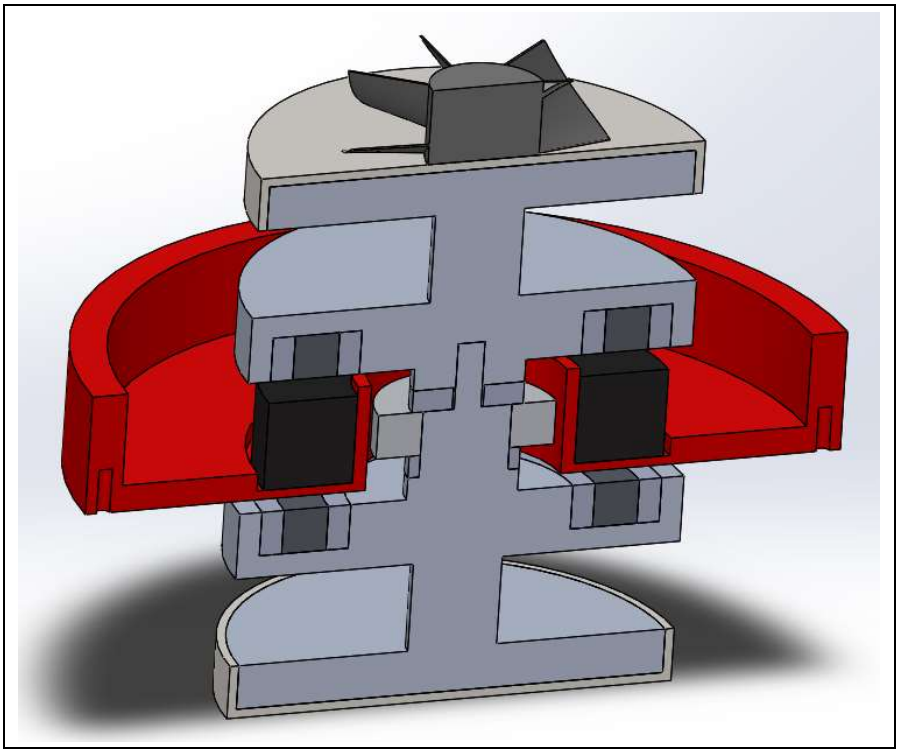
Şekil 3.5: Tasarlanan deneysel sistemin kesit görünüşü.

Şekil 3.6: Geliştirme aşamasında deney düzeneğinin görünüşü.

3.1.1. Rotor Yapısı

Farklı sabit mıktas kombinasyonlarının katılık denklemlerine etkilerini görebilmek için her durum için ayrı rotor üretmek yerine parçalı rotor üzerinde pozisyonlayıcı halkalar kullanılmıştır. Bu sayede aşağıdaki Tablo 3.1'de yer alan mıknatıs kombinasyonlarının test edilebileceği deneysel sistem oluşturulmuştur. Rotorun genel kesit görünüşü aşağıda Şekil 3.7'de verilmiştir. Sabit mıknatıslarla etkileşime girmemesi ve hafif olması sebebiyle rotor iki parça ve alüminyum olarak imal edilmiştir.

Rotorun eksenel ve radyal pozisyon ölçümlerindeki hassasiyet, katılık değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple temassız pozisyon sensörlerin kalibrasyonunun yapıldığı karşılık malzemesi olan semantasyon çeliğinden, üst ve alt rotorlara şapkalar yapılmıştır. Ayrıca, sensör kalibrasyonu için komparatör vasıtası ile 0.1 mm aralıklarla ölçümler alınmış ve bu değerler sensörlerden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

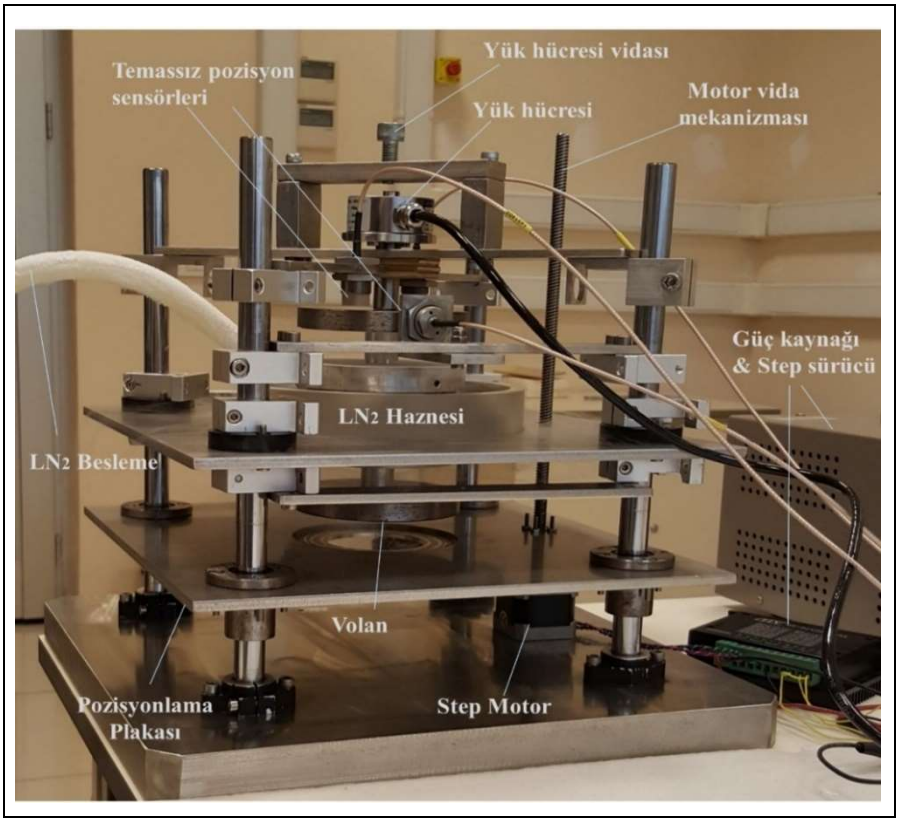


Şekil 3.7: Rotor ve süperiletken kesit görünüşü.

Tablo 3.1: Mıknatıs Kombinasyonları.

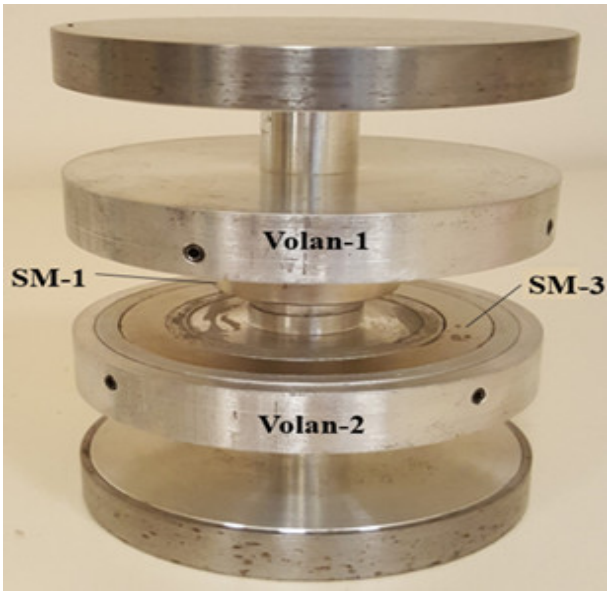
ORTA SM Boyutları	ÜST- ALT SM Boyutları
D40x20x10	D50x60x10
D40x20x15	D90x50x10
D40x20x20	

Tasarım çalışmaları ve süperiletken deneyleri halka süperiletken ve tekil mıknatıs ile başlamıştır [6]. Tasarım düzeltmeleri ile deney düzeneği son haline getirilmiştir [19]-[21]. Deney düzeneğinin kurulu hali, rotor-volan yapısı ve sabit mıknatısların volan üzerindeki konumları Şekil 3.8 ve 3.9'da gösterilmiştir.

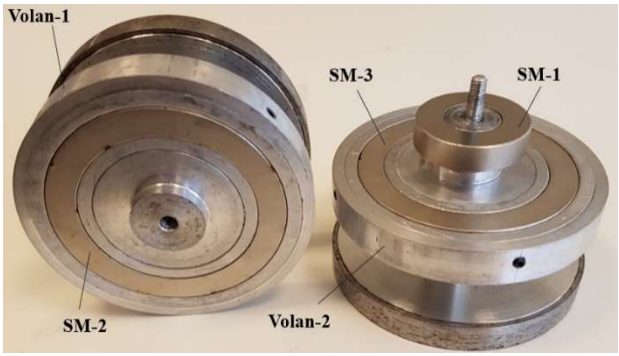


Şekil 3.8: Deney düzeneği görünüşü.

GTÜ Manyetik Levitasyon laboratuvarında kurulu olan deney düzeneği ile eksenel kuvvet ölçümü, radyal kuvvet ölçümü ve hava jetiyle döndürme deneyi yapılması mümkündür. Eksenel ölçümlerde volanı itme mekanizması düzeneğin üzerinde bulunurken, radyal ölçümlerde ise düzeneğin yan tarafında bulunan adım motorlar kullanılmıştır. Döndürme deneylerinde ise laboratuvarda bulunan basınçlı hava tesisatından volan-rotor üzerinde yer alan pervaneye hava jeti vasıtasıyla basınçlı hava gönderilmiştir.



a) Rotorun birleştirilmiş hali.

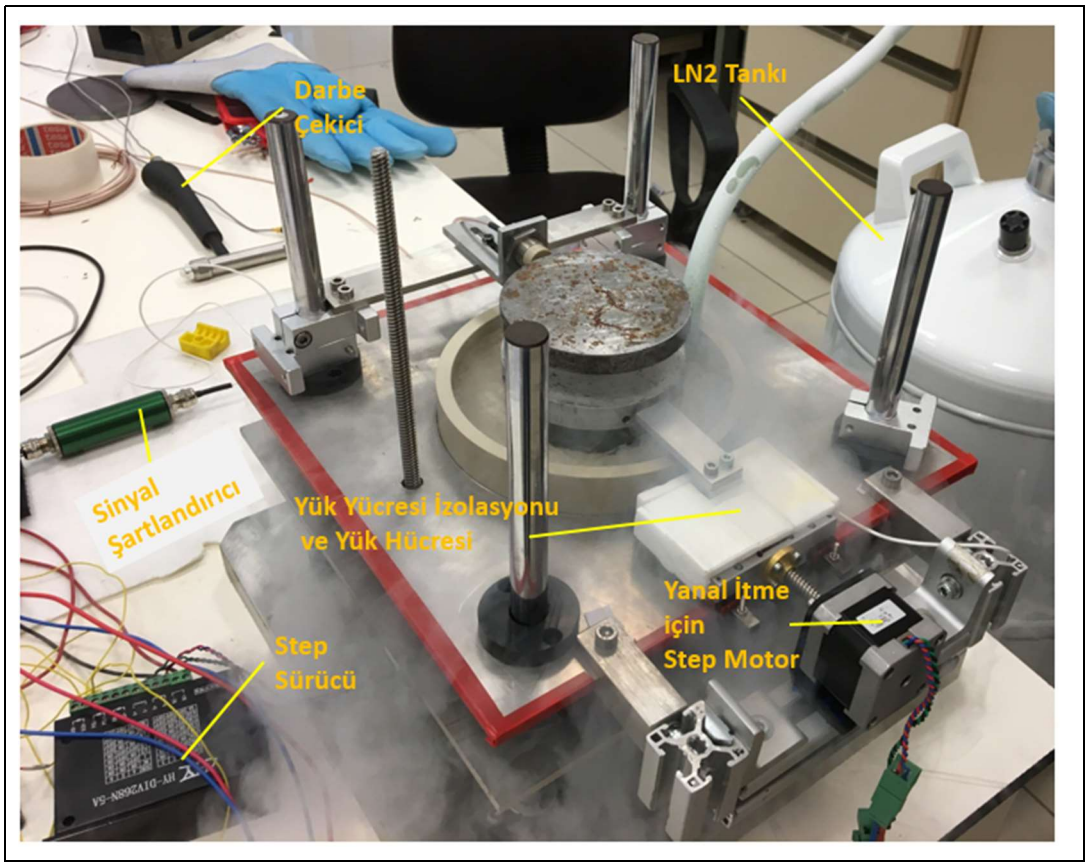


b) Rotor parçalı hali.

Şekil 3.9: Volan-rotor görünüşü. a) Rotorun birleştirilmiş hali, b) Rotor parçalı hali.

Şekil 3.10: Halka süperiletken ve sıvı azot haznesi.

Deneylerde kullanılan halka süperiletken kristal yapıda olup, YBCO malzemeden imal edilmiş ve seramik yapıya sahiptir. Süperiletken ve soğutma haznesi Şekil 3.10'da verilmiştir. Radyal ölçümler için yatay itici mekanizmanın da monte edildiği deney düzeneğinin son hali Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



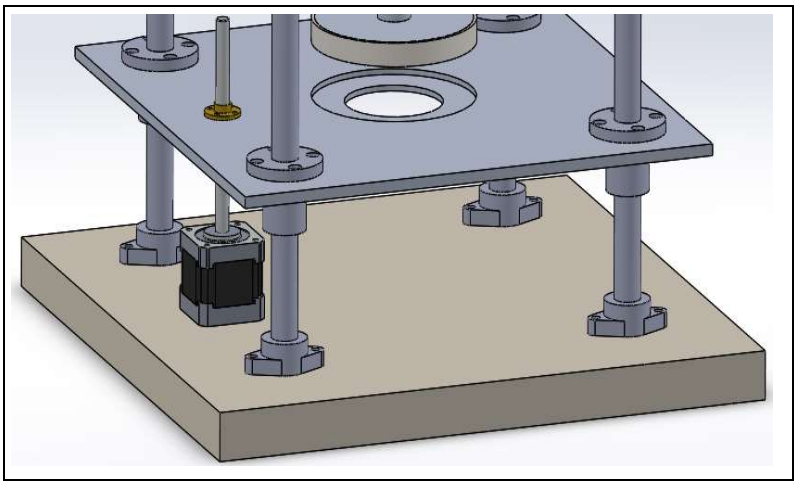
Şekil 3.11: Deney düzeneğinin tamamlanmış hali (radyal ölçüm).

3.2. Sıvı Nitrojen Kabı

Sıvı azot haznesi aynı zamanda YSS'yi de yatakladığı için, soğutma esnasında kapta oluşacak aşırı büzülmeler YSS üzerinde gerilmelere sebeb olmaktadır. Ayrıca daha önce yapılan çalışmalarda, sıvı azot haznesi ile YSS arasındaki ısıl genleşme farkı YSS' de çatlamalara sebep olduğu görülmüştür. Bu sorunların üstesinden gelmek için geniş bir çalışma sıcaklığı sunan PEEK (Polyetheretherketone) malzemesi seçilmiştir. Hazne içerisinde, YSS'nin sıvı azot ile temasını artırmak için yatak çapları geniş açılmıştır. Ayrıca soğutma esnasında doldurulan sıvı azotun YSS yüzeylerinden dökülmesini engellemek için kap iç duvar yüksekliği YSS yüzeyinden 2 mm yüksek olacak şekilde işlenmiştir.

3.3. Destek Plakası ve Düşey Hareket Sistemi

Deneysel çalışmalarda sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlamak için rotor ve YSS geometrik merkezlerini çakıştırmak üzere adım motor kullanılmıştır. Üzerinde rotor merkezlemesi için fatura bulunan plaka, vidalı mil vasıtası ile adım motora bağlanmıştır. Bu yapı Şekil 3.12'de verilmiştir. Adım motorun sürülmesi için SMD-4.2 model sürücü kullanılmıştır. Gerekli kod yapısı ise "Arduino mega 2560" mikrokontrolcü üzerinden sürücüye gönderilmiştir. Deneysel çalışmalar sistematik bir prosedüre göre gerçekleştirilmiştir. Soğutmadan önce, adım motoru ile kontrol edilen soğutma pozisyonu plakası vasıtasıyla YSS-SM arasında 5 mm'lik bir soğutma yüksekliği (CH) sağlamaktadır [21]. Step motor, rotoru merkezde tutmakta, soğutma sağlandıktan sonra merkezleme plakası rotordan ayrılmaktadır. Bu mekanizma ile levitasyon sonrası bozucu etkiler minimum seviyede olmaktadır. Ayrıca, statik çökme miktarları doğru şekilde ölçülmektedir.



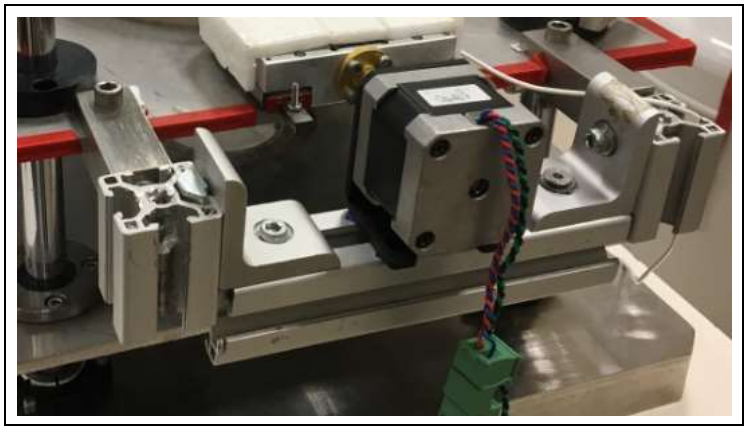
Şekil 3.12: Dikey pozisyonlama mekanizması.

3.4. Kuvvet Ölçüm Sistemi

3.4.1. Yatay İtici Mekanizması

Radyal katılık değerlerinin tespitinde rotor, radyal yönde moment oluşturulmayacak şekilde yanal pozisyonlanan adım motoru vasıtası ile itilmiştir. Adım motoruna vida ile sabitlenen kuvvet sensörü ile oluşan tepki kuvveti

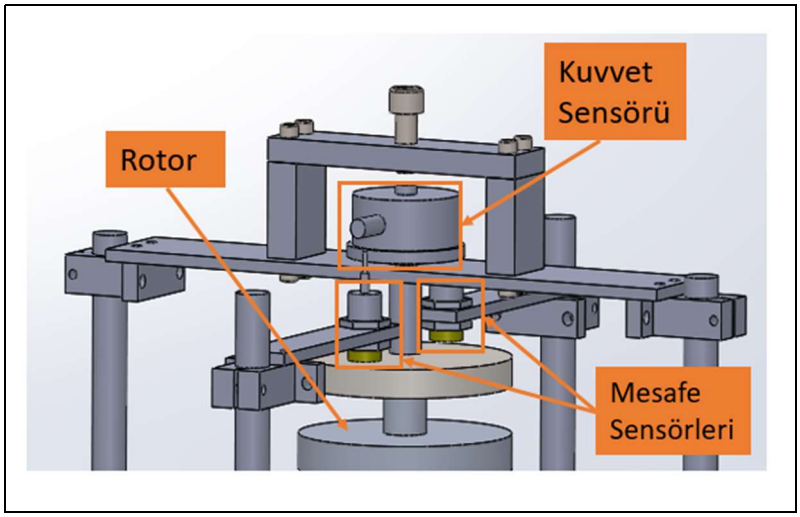
ölçülmüştür. İtme miktarları temassız mesafe sensörler ile ölçülmüştür. Yatay yöndeki deneylerde kullanılan yapının görüntüsü Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13: Yatay itici mekanizması.

3.4.2. Dikey İtici Mekanizması

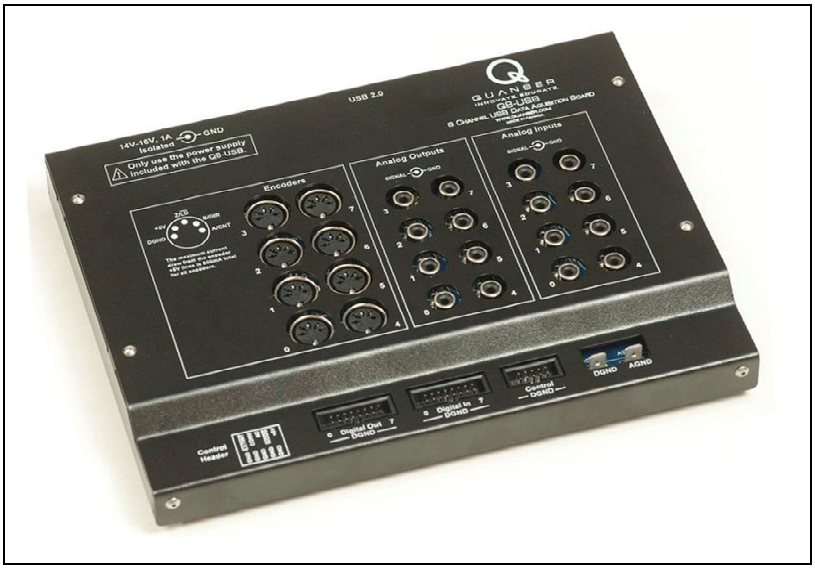
Eksenel katılık değerlerinin tespitinde kuvvet sensörü bir vida vasıtası ile itilmekte, oluşan deplasman değerleri ise iki adet temassız deplasman sensörü ile ölçülmektedir. Bu iki sensörün çıkış değerlerinin ortalaması, oluşan dikey deplasman olarak alınmıştır. Eksenel itmenin radyal yönde herhangi bir harekete sebep olup olmadığı radyal deplasman sensörleri ile kontrol edilmiştir. Burada kuvvet sensörü rotor ile temas halinde olmasından dolayı katılık hesaplarında kuvvet sensörünün kütlesi de rotor kütlesine dahil edilmiştir.



Şekil 3.14: Dikey itici mekanizması.

3.5. Sensörler

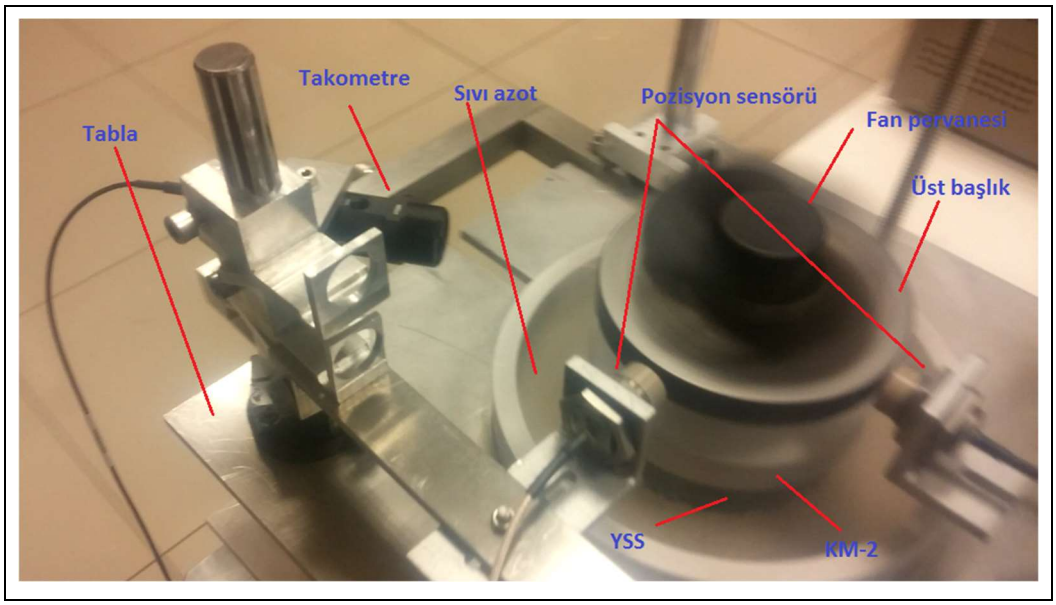
Deplasman ölçümlerinde 5 mm'ye kadar ölçüm aralığı bulunan temassız Eddy Current sensörleri kullanılmıştır. Kuvvet ölçümlerinde adım motorunun vidalı milinden aldığı itme kuvvetini rotora ileten kuvvet sensörleri (loadcell) kullanılmıştır. Doğal frekans analizi ölçümlerinde ise Brüel & Kjaer marka darbe çekici ve ivmeölçerler kullanılmıştır. Darbe çekicinin kuvvet sensörü ile ivmeölçerin bağlanacağı analizör olarak Brüel & Kjaer markasına ait PULSE yazılımı kullanılmıştır. Quanser marka Q8-USB model veri toplama ve kontrol kartı vasıtası ile deplasman sensörleri, kuvvet sensörü ve adım motor kontrolcüsü giriş-çıkış verileri toplanarak kaydedilmektedir. Matlab-Simulink arayüzünde çalışan bu program veri kaydından sonra verilerin işlenmesine (post-processing) olanak sağlamaktadır. Kontrol kartının genel görünümü Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15: Veri toplama ve kontrol kartı.

3.6. Döndürme Sistemi

Levitasyon durumunda rotor, üst yüzeyine merkezlenen çıkarılabilir kanat kullanılarak döndürülmüştür. Hava jetinin ayarlanabilir valfi vasıtası ile kanatçıklara her durumda aynı debide hava gönderilmiştir. Havanın kanatlara çarpma açısı ise hava tabancasının düzenek üzerine sabitlenmesi ile sağlanmıştır. Bu mekanizma Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16: Rotor döndürme mekanizması.

Rotor üzerinden ilk başta optik enkoder sayesinde devir ölçümü alınması planlanmıştır. Fakat sıvı azot ile çalışmanın zorluğu sebebi ile bu mümkün olmamıştır. Bunun yerine Brüel & Kjaer marka ve 2981 model temassız devir ölçer (takometre) ile rotor üzerinden ölçümler alınmıştır (Şekil 3.17). Lazer takometrenin ölçümü gerçekleştirmesi için rotor üzerine yansıtıcı bant yapıştırılmıştır. Yapılan deneylerde rotor dakikada 750 devire kadar döndürülmüştür. Rotor balansının yapılmasından sonra daha yüksek devirlere çıkılması planlanmaktadır.

Şekil 3.17: Takometre (Brüel & Kjaer 2981).

Sonuçların tekrarlanabilirliği ve sıvı azotun tehlikeli bir madde olması sebebiyle deneyler oluşturulan prosedüre göre gerçekleştirilmiştir.

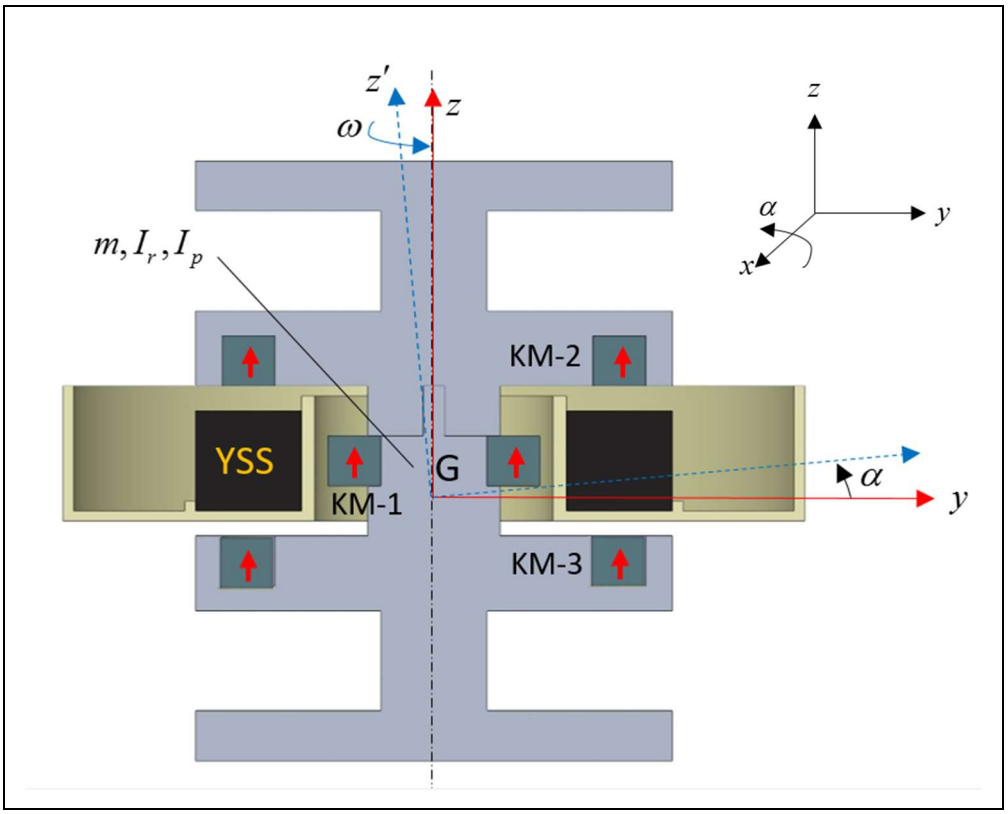
4. VOLAN-ROTOR DİNAMİK MODELİ VE SİMÜLASYONU

Bir süperiletken manyetik sisteminde, levitasyon katılığı radyal ve eksenel katılık etkilerinden oluşur. Eksenel katılık süperiletkenin yük kapasitesini belirlerken, radyal katılık volanın rotasyonel dinamiklerini belirler [19]-[20]. Süperiletken manyetik yatakların, aktif manyetik yataklara ve bilyeli yataklara kıyasla daha düşük katılıkları vardır. Sistemin hareketi esnasında katılık değişimi, süperiletken yatakları doğru bir şekilde modellemek için gereklidir [24]-[26]. Mühendislik uygulamaları için levitasyon sisteminin dinamikleri doğru şekilde analiz edilmelidir.

4.1. Dinamik Modelin Elde Elde Edilmesi (Sönümsüz)

Matematik model elde etmek için Şekil 4.1'de gösterilen $\sigma\xi\eta$ koordinat sistemine göre rotorun serbestlik derecesi düşünülmüştür. Deneysel çalışması yapılan ve modellenecek sistemde Şekil 4.1'de gösterildiği gibi SM-1 sabit mıknatısı halka süperiletkenin ortasında konumlanmıştır, SM-2 sabit mıknatısı ise halka süperiletkenin üzerinde bulunmaktadır. SM-3 sabit mıknatısı ise süperiletkenin altında yer almaktadır. Sistemde süperiletken sabit olup sabit mıknatıslar rotor üzerindedir ve hareket eden kısmı oluşturmaktadırlar. Modellemede rotorun rijit olduğu ve kütle merkezinin G noktasında bulunduğu kabul edilmektedir. Süperiletken ile sabit mıknatıs arasındaki etkileşim doğrusal yaylar ile modellenmiştir [25].

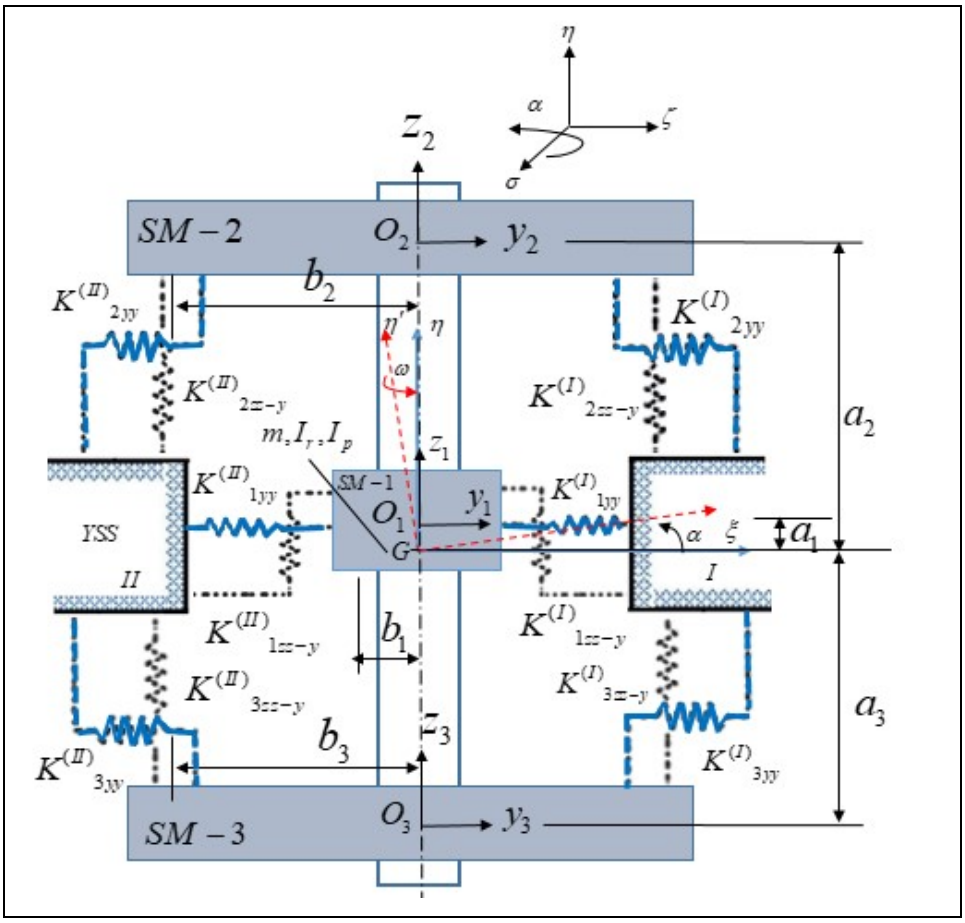
Modelleme yaparken Euler açılarından istifade edilmiştir. Bir mıknatısın radyal yönde, x-y düzlemi boyunca katılık değerinin değişmediği kabülü yapılmıştır. Benzer şekilde bir mıknatısın eksenel yönde katılık değerinin yüzey boyunca değişmediği kabulü yapılmıştır.



Şekil 4.1: Süperiletken manyetik yataklı volan sisteminin kesit görünüşü.

Modellenen sistemin z-y düzleminde görünümü Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Modelin z-y düzlemindeki ifadelerden $K^{(I)}{}_{1yy}, K^{(II)}{}_{1yy}$ SM-1 için, $K^{(I)}{}_{2yy}, K^{(II)}{}_{2yy}$ SM-2 için, $K^{(I)}{}_{3yy}, K^{(II)}{}_{3yy}$ SM-3 mıknatısları için radyal yöndeki katılık değerlerini ifade etmektedir. Benzer şekilde $K^{(I)}{}_{1zz-y}, K^{(II)}{}_{1zz-y}$ SM-1 için, $K^{(I)}{}_{2zz-y}, K^{(II)}{}_{2zz-y}$ SM-2 için, $K^{(I)}{}_{3zz-y}, K^{(II)}{}_{3zz-y}$ SM-3 mıknatısları için eksenel yöndeki katılık değerlerini ifade etmektedir. O_1, O_2 ve O_3 sabit mıknatısların kütle merkezlerini temsil etmektedir. Modellemede kolaylık sağlaması için rotor eksenin sağ ve sol bölgeleri (I) ve (II) olmak üzere kısımlara ayrılmıştır. Ağırlık merkezi G olan levitasyon durumundaki temassız rotorun 6 serbestlik derecesi vardır. Bunlar $\sigma-\xi-\eta$ yönlerinde öteleme ve $\sigma-\xi-\eta$ eksenleri etrafında sırasıyla α, β, ω açıları kadar dönmeleri şeklindedir. Halka süperiletkenin sabitlendiği modelde, rotor, ekseni süperiletkenin ekseniyle çakışacak şekilde ve alt ve üst başları simetrik olacak şekilde yataklanmıştır. Modellenen sistemin z-x düzleminde görünümü Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Volan-rotor sistemi lineer yayların bağlantı noktaları yatay ve dikey düzlemde YSS içinde kesişecek şekilde tasarlanmıştır.

Radyal yönde mıknatısların x ve y eksneleri aynı zamanda radyal yay eksenlerini temsil etmektedir. Rotor ağırlık merkezi (G) ile SM-1 kütle merkezi (O_1) arasındaki dikey mesafe a_1, SM-2 kütle merkezi (O_2) arasındaki dikey mesafe a_2 ve SM-3 kütle merkezi (O_3) arasındaki dikey mesafe a_3'tür. Rotor ağırlık merkezi dikey ekseni ile SM-1-YSS arasındaki eksenel yatay mesafe b_1, SM-2-YSS arasındaki eksenel yatay mesafe b_2 ve SM-3-YSS arasındaki eksenel yatay mesafe b_3'tür.

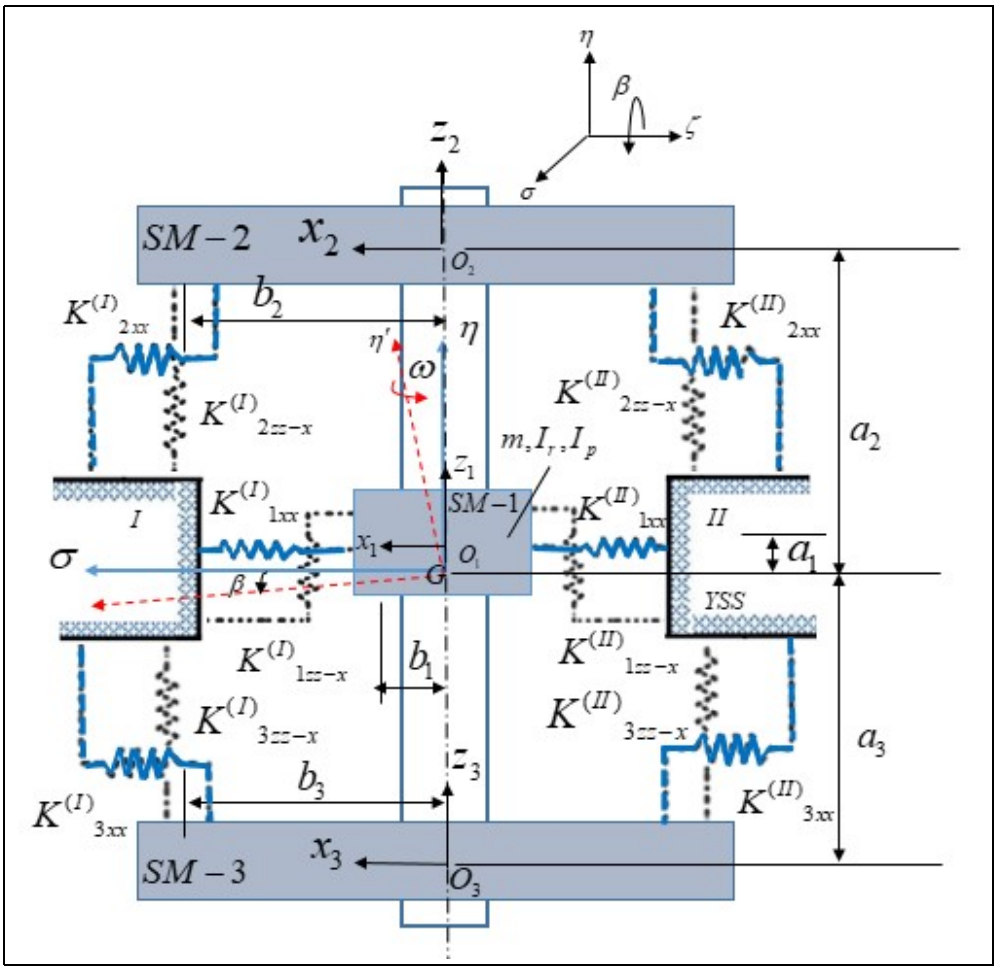


Şekil 4.2: Modellenen sistemin z-y düzleminde görünümü.

• Kinetik enerji ifadesi

Rotor için toplam kinetik enerji, rotorun dönme kinetik enerjisi ve kütle merkezinin öteleme kinetik enerjisi toplamı olarak ifade edilir.

$$T_{rot} = \frac{1}{2} I_r \left(\omega_x^2 + \omega_y^2 \right) + I_p \frac{1}{2} \omega_z^2 \tag{4.1}$$



Şekil 4.3: Modellenen sistemin z-x düzleminde görünümü.

Eşitlik 4.1'deki genel döndürme kinetik enerjisi ifadesinde ω_x, ω_y ve ω_z ifadeleri yerine koyulduğunda döndürme kinetik enerjisi T_{rot} eşitlik 4.2'deki gibi olur.

$$T_{rot} = \frac{1}{2} I_r \left[\dot{\alpha}^2 \cos^2 \beta \left(\cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right) + \dot{\beta}^2 \left(\sin^2 \phi + \cos^2 \phi \right) \right] + \frac{1}{2} I_p \left[\dot{\alpha}^2 \sin^2 \beta + 2\dot{\alpha}\omega \sin\beta + \omega^2 \right] \tag{4.2}$$

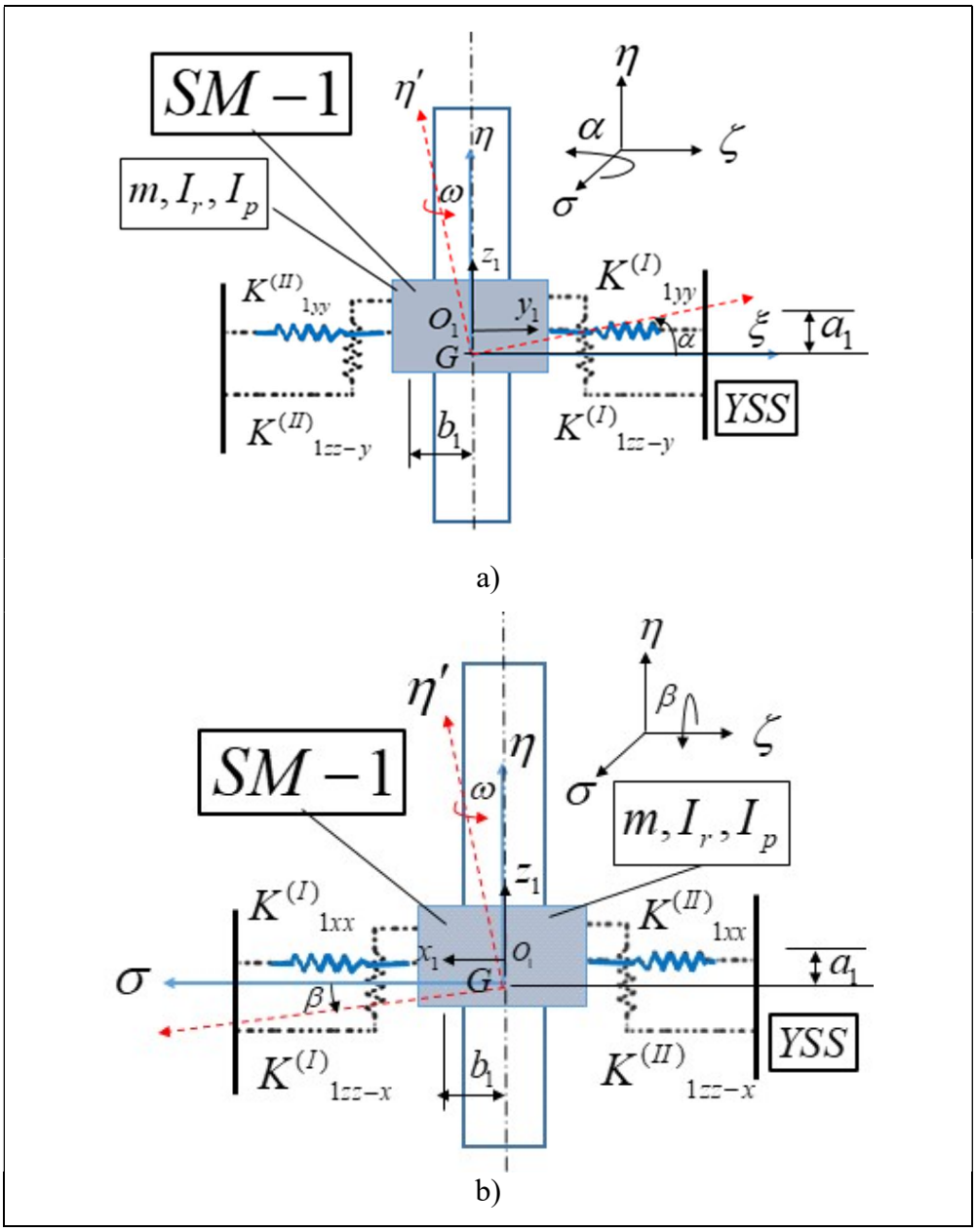
Kinetik enerji ifadesinde $\cos\beta \cong 1$, $\sin\beta = \beta$, $\sin^2\beta \ll \sin\beta$ kabülleri yapılarak lineer bir denklem elde edilebilir. Toplam kinetik enerji, döndürme kinetik enerjisi ve öteleme kinetik enerjilerinin toplamıdır. Eşitlik 4.2'deki enerji ifadesini öteleme kinetik enerjisiyle topladığımızda toplam kinetik enerji eşitlik 4.3'teki gibi olur.

$$T = T_{trans} + T_{rot}$$
$$T = \frac{1}{2} m \left(\dot{\sigma}_g^2 + \dot{\xi}_g^2 + \dot{\eta}_g^2 \right) + \frac{1}{2} I_r \left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2 \right) + \frac{1}{2} I_r \left(\omega^2 + 2\omega\dot{\alpha}\beta \right) \tag{4.3}$$

Burada m rotor toplam kütlesi, I_r rotor atalet momenti ve I_p rotor polar atalet momentini göstermektedir.

• Potansiyel enerji ifadesi (SM-1 için)

Süperiletken halkanın ortasında yataklanan SM-1 için potansiyel enerji ifadesini elde ederken yay potansiyeli yaklaşımından yararlanılmıştır. Genel sistem modelinin SM-1 için özel hali Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: SM-1 Modeli. a) z-y düzleminde katılık ifadeleri gösterimi, b) z-x düzleminde katılık ifadeleri gösterimi.

Rotor ile YSS arasındaki eksenel ve radyal yaylar şekilde gösterilmiştir. Sistemi hem z-y düzleminde hem z-x düzleminde inceleyerek kapsamlı bir model çalışması yapılmıştır. Yayların depoladığı enerjiden SM-1 için potansiyel enerji ifadesi eşitlik 4.4'te elde edilmiştir. Orta mıknatısın (SM-1) potansiyel enerjisi P_1 ile ifade edilmiştir. Benzer şekilde üst mıknatıs (SM-2) ve alt mıknatısın (SM-3) yay potansiyel enerjileri de P_2 ve P_3 ile ifade edilmiştir. SM-1 Kütle merkezinin (O_1) rotor kütle merkezine (G) bağlı yer değiştirmelerinden yararlanılarak yaylarda oluşan yay potansiyel enerjileri elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} P_1 = \frac{1}{2}[&K^{(I)}{}_{1yy}(\xi_g - a_1\alpha)^2 + K^{(II)}{}_{1yy}(\xi_g - a_1\alpha)^2 + K^{(I)}{}_{1xx}(\sigma_g + a_1\beta)^2 \\ &+K^{(II)}{}_{1xx}(\sigma_g + a_1\beta)^2 + K^{(I)}{}_{1zz-y}(\eta_g + b_1\alpha)^2 + K^{(II)}{}_{1zz-y}(\eta_g - b_1\alpha)^2 \\ &+K^{(I)}{}_{1zz-x}(\eta_g - b_1\beta)^2 + K^{(II)}{}_{1zz-x}(\eta_g + b_1\beta)^2] \end{aligned} \tag{4.4}$$

Üst ve alt mıknatıslar (SM-2, SM-3) için SM-1' benzer yöntem uygulanmıştır.

- Potansiyel enerji ifadesi (SM-2 için)

$$\begin{aligned} P_2 = \frac{1}{2}[&K^{(I)}{}_{2yy}(\xi_g - a_2\alpha)^2 + K^{(II)}{}_{2yy}(\xi_g - a_2\alpha)^2 + K^{(I)}{}_{2xx}(\sigma_g + a_2\beta)^2 \\ &+K^{(II)}{}_{2xx}(\sigma_g + a_2\beta)^2 + K^{(I)}{}_{2zz-y}(\eta_g + b_2\alpha)^2 + K^{(II)}{}_{2zz-y}(\eta_g - b_2\alpha)^2 \\ &+K^{(I)}{}_{2zz-x}(\eta_g - b_2\beta)^2 + K^{(II)}{}_{2zz-x}(\eta_g + b_2\theta)^2] \end{aligned} \tag{4.5}$$

- Potansiyel enerji ifadesi (SM-3 için)

$$\begin{aligned} P_3 = \frac{1}{2}[&K^{(I)}{}_{3yy}(\xi_g + a_3\alpha)^2 + K^{(II)}{}_{3yy}(\xi_g + a_3\alpha)^2 + K^{(I)}{}_{3xx}(\sigma_g - a_3\beta)^2 \\ &+K^{(II)}{}_{3xx}(\sigma_g - a_3\beta)^2 + K^{(I)}{}_{3zz-y}(\eta_g + b_3\alpha)^2 + K^{(II)}{}_{3zz-y}(\eta_g - b_3\alpha)^2 \\ &+K^{(I)}{}_{3zz-x}(\eta_g - b_3\beta)^2 + K^{(II)}{}_{3zz-x}(\eta_g + b_3\theta)^2] \end{aligned} \tag{4.6}$$

- Toplam potansiyel enerji ifadesi

K_{r-1}, K_{r-2} ve K_{r-3} sırasıyla rotor üzerindeki sabit mıknatıslar için levitasyon durumunda YSS ile oluşan etkileşime bağlı olarak SM-1, SM-2 ve SM-3 için radyal katılık ifadelerini göstermektedir. Benzer şekilde K_{e-1}, K_{e-2} ve K_{e-3} sırasıyla rotor

üzerindeki sabit mıknatıslar için levitasyon durumunda YSS ile oluşan etkileşime bağlı olarak SM-1, SM-2 ve SM-3 için eksenel katılık ifadelerini göstermektedir.

$$
\begin{aligned}
&K_{r-1}(\text{radyalkatılık}) = K^{(I)}{}_{1yy} = K^{(II)}{}_{1yy} = K^{(I)}{}_{1xx} = K^{(II)}{}_{1xx} \\
&K_{r-2}(\text{radyalkatılık}) = K^{(I)}{}_{2yy} = K^{(II)}{}_{2yy} = K^{(I)}{}_{2xx} = K^{(II)}{}_{2xx} \\
&K_{r-3}(\text{radyalkatılık}) = K^{(I)}{}_{3yy} = K^{(II)}{}_{3yy} = K^{(I)}{}_{3xx} = K^{(II)}{}_{3xx} \\
&K_{e-1}(\text{eksenelkatılık}) = K^{(I)}{}_{1zz-y} = K^{(II)}{}_{1zz-y} = K^{(I)}{}_{1zz-x} = K^{(II)}{}_{1zz-x} \\
&K_{e-2}(\text{eksenelkatılık}) = K^{(I)}{}_{2zz-y} = K^{(II)}{}_{2zz-y} = K^{(I)}{}_{2zz-x} = K^{(II)}{}_{2zz-x} \\
&K_{e-3}(\text{eksenelkatılık}) = K^{(I)}{}_{3zz-y} = K^{(II)}{}_{3zz-y} = K^{(I)}{}_{3zz-x} = K^{(II)}{}_{3zz-x}
\end{aligned}
\tag{4.7}
$$

Eşitlik 4.7'deki denklikleri hesaba katarak rotor üzerindeki üç mıknatsın oluşturduğu toplam potansiyel enerji ifadesi eşitlik 4.8'deki gibi elde edilmiştir.

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

$$
\begin{aligned}
P = \frac{1}{2}\Big[&\left(2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3}\right)\xi_g^2 + \left(2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3}\right)\sigma_g^2 \\
&+ \left(4K_{e-1} + 4K_{e-2} + 4K_{e-3}\right)\eta_g^2 \\
&+ \left(2K_{r-1}a_1^2 + 2K_{r-2}a_2^2 + 2K_{r-3}a_3^2 + 2K_{e-1}b_1^2 + 2K_{e-2}b_2^2 + 2K_{e-3}b_3^2\right)\alpha^2 \\
&+ \left(2K_{r-1}a_1^2 + 2K_{r-2}a_2^2 + 2K_{r-3}a_3^2 + 2K_{e-1}b_1^2 + 2K_{e-2}b_2^2 + 2K_{e-3}b_3^2\right)\beta^2 \\
&+ \left(-4K_{r-1}a_1 - 4K_{r-2}a_2 + 4K_{r-3}a_3\right)\alpha\xi_g \\
&+ \left(4K_{r-1}a_1 + 4K_{r-2}a_2 - 4K_{r-3}a_3\right)\beta\sigma_g
\end{aligned}
\tag{4.8}
$$

- Lagrange Metodu

Lagrange metodu vasıtasıyla rotor-volan sisteminin potansiyel enerji ve kinetik enerjilerini kullanarak hareket denklemleri elde edilir. Böylece sistemin dinamik analizi yapılabilir. Sistemde sönüm yoksa yani konsarvatif bir sistemse Lagrange-Euler denklemi 4.9'daki gibi ifade edilir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} = Q_i \tag{4.9}$$

Lagrangian fonksiyonu diye de adlandırılan Lagrangian L, fiziksel bir sistemin durumunu karakterize eden büyüklüktür. Mekanikte ise Lagrangian, kinetik enerji ve potansiyel enerji ifadelerinin farkı şeklinde eşitlik 4.10'da gösterilmiştir.

$$L = T - P \tag{4.10}$$

Kinetik enerji (T) ve potansiyel enerji (P) ifadeleri eşitlik 4.10'da yerine koyulduğunda Lagrangian fonksiyonu eşitlik 4.11'deki halini alır.

$$\begin{aligned}
L = {} & \frac{1}{2}\Big[m\left(\dot{\sigma}_g^2 + \dot{\xi}_g^2 + \dot{\eta}_g^2\right) + I_r\left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2\right) + I_r\left(\omega^2 + 2\omega\dot{\alpha}\beta\right)\Big] \\
& -\frac{1}{2}\Big[\left(2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3}\right)\xi_g^2 + \left(2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3}\right)\sigma_g^2 \\
& + \left(4K_{e-1} + 4K_{e-2} + 4K_{e-3}\right)\eta_g^2 \\
& + \left(2K_{r-1}a_1^2 + 2K_{r-2}a_2^2 + 2K_{r-3}a_3^2 + 2K_{e-1}b_1^2 + 2K_{e-2}b_2^2 + 2K_{e-3}b_3^2\right)\alpha^2 \\
& + \left(2K_{r-1}a_1^2 + 2K_{r-2}a_2^2 + 2K_{r-3}a_3^2 + 2K_{e-1}b_1^2 + 2K_{e-2}b_2^2 + 2K_{e-3}b_3^2\right)\beta^2 \\
& + \left(-4K_{r-1}a_1 - 4K_{r-2}a_2 + 4K_{r-3}a_3\right)\alpha\xi_g + 4\left(4K_{r-1}a_1 + 4K_{r-2}a_2 - 4K_{r-3}a_3\right)\beta\sigma_g\Big]
\end{aligned} \tag{4.11}$$

$\xi_g, \sigma_g, \eta_g, \alpha, \beta$ değişkenleri için hareket denklemleri sırayla aşağıda elde edilmiştir. $q_1 = \xi_g$ için Lagrange-Euler fonksiyonları uygulandığında ξ_g değişkeni için hareket denklemi 4.15'teki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}_g}\right) - \frac{\partial L}{\partial \xi_g} = 0 \tag{4.12}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}_g} = m\dot{\xi}_g \rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}_g}\right) = m\ddot{\xi}_g \tag{4.13}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \zeta_g} = -(2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3})\xi_g - (-2K_{r-1}a_1 - 2K_{r-2}a_2 + 2K_{r-3}a_3)\alpha \tag{4.14}$$

$$m\ddot{\zeta}_g + (2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3})\xi_g + (-2K_{r-1}a_1 - 2K_{r-2}a_2 + 2K_{r-3}a_3)\alpha = 0 \tag{4.15}$$

$q_2 = \sigma_g$ için Lagrange-Euler fonksiyonları uygulandığında σ_g değişkenine bağlı hareket denklemi 4.19'daki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\sigma}_g}\right) - \frac{\partial L}{\partial \sigma_g} = 0 \tag{4.16}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\sigma}_g} = m\dot{\sigma}_g \rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\sigma}_g}\right) = m\ddot{\sigma}_g \tag{4.17}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma_g} = -(2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3})\sigma_g - (2K_{r-1}a_1 + 2K_{r-2}a_2 - 2K_{r-3}a_3)\beta \tag{4.18}$$

$$m\ddot{\sigma}_g + (2K_{r-1} + 2K_{r-2} + 2K_{r-3})\sigma_g + (2K_{r-1}a_1 + 2K_{r-2}a_2 - 2K_{r-3}a_3)\beta = 0 \tag{4.19}$$

$q_3 = \eta_g$ için Lagrange-Euler fonksiyonları uygulandığında η_g değişkenine bağlı hareket denklemi 4.23'teki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}_g}\right) - \frac{\partial L}{\partial \eta_g} = 0 \tag{4.20}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}_g} = m\dot{\eta}_g \rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}_g}\right) = m\ddot{\eta}_g \tag{4.21}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \eta_g} = -\left(4K_{e-1} + 4K_{e-2} + 4K_{e-3}\right)\eta_g \tag{4.22}$$

$$m\ddot{\eta}_g + \left(4K_{e-1} + 4K_{e-2} + 4K_{e-3}\right)\eta_g = 0 \tag{4.23}$$

$q_4 = \alpha$ için Lagrange-Euler fonksiyonları uygulandığında α değişkenine bağlı hareket denklemi 4.27'deki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \tag{4.24}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} = I_r\dot{\alpha} + I_p\omega\beta \rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}}\right) = I_r\ddot{\alpha} + I_p\omega\dot{\beta} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \alpha} = &-2\left(K_{r-1}a_1^2 + K_{r-2}a_2^2 + K_{r-3}a_3^2 + K_{e-1}b_1^2 + K_{e-2}b_2^2 + K_{e-3}b_3^2\right)\alpha \\ &-\left(-2K_{r-1}a_1 - 2K_{r-2}a_2 + 2K_{r-3}a_3\right)\xi_g\end{aligned} \tag{4.26}$$

$$I_r\ddot{\alpha}+I_p\omega\dot{\beta}+2\left(K_{r-1}a_1^2+K_{r-2}a_2^2+K_{r-3}a_3^2+K_{e-1}b_1^2+K_{e-2}b_2^2+K_{e-3}b_3^2\right)\alpha$$
$$+\left(-2K_{r-1}a_1-2K_{r-2}a_2+2K_{r-3}a_3\right)\xi_g=0 \tag{4.27}$$

$q_5=\beta$ için Lagrange-Euler fonksiyonları uygulandığında β değişkenine bağlı hareket denklemi 4.31'deki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\beta}}\right)-\frac{\partial L}{\partial\beta}=0 \tag{4.28}$$

$$\frac{\partial L}{\partial\dot{\beta}}=I_r\dot{\beta}\rightarrow\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\beta}}\right)=I_r\ddot{\beta} \tag{4.29}$$

$$\frac{\partial L}{\partial\theta_y}=I_p\omega\dot{\alpha}-\left(2K_{r-1}a_1^2+2K_{r-2}a_2^2+2K_{r-3}a_3^2+2K_{e-1}b_1^2+2K_{e-2}b_2^2+2K_{e-3}b_3^2\right)\beta$$
$$-\left(2K_{r-1}a_1+2K_{r-2}a_2-2K_{r-3}a_3\right)\sigma_g \tag{4.30}$$

$$I_r\ddot{\beta}-I_p\omega\dot{\alpha}-\left(2K_{r-1}a_1^2+2K_{r-2}a_2^2+2K_{r-3}a_3^2+2K_{e-1}b_1^2+2K_{e-2}b_2^2+2K_{e-3}b_3^2\right)\beta$$
$$+\left(2K_{r-1}a_1+2K_{r-2}a_2-2K_{r-3}a_3\right)\sigma_g=0 \tag{4.31}$$

Durum uzayı denklemini elde etmek için eşitlik 4.32'deki gibi değişken dönüşümü yapılarak yeni değişkenler tanımlanmıştır.

$$x_1=\zeta_g,\ x_2=\dot{\zeta}_g, x_3=\sigma_g,\ x_4=\dot{\sigma}_g,\ x_5=\eta_g,\ x_6=\dot{\eta}_g,\ x_7=\alpha,\ x_8=\dot{\alpha},$$
$$x_9=\beta,\ x_{10}=\dot{\beta} \tag{4.32}$$

Eşitlik 4.15 – eşitlik 4.31 arasında verilen hareket denklemlerindeki değişkenlerin katsayıları eşitlik 4.33'teki gibi kısaltmalarla gösterilerek daha sade ifade edilmiştir.

$$\lambda_1=\left(2K_{r-1}+2K_{r-2}+2K_{r-3}\right)$$
$$\lambda_2=(2K_{r-1}a_1+2K_{r-2}a_2-2K_{r-3}a_3)$$
$$\lambda_3=\left(4K_{e-1}+4K_{e-2}+4K_{e-3}\right)$$
$$\lambda_4=2\left(K_{r-1}a_1^2+K_{r-2}a_2^2+K_{r-3}a_3^2+K_{e-1}b_1^2+K_{e-2}b_2^2+K_{e-3}b_3^2\right) \tag{4.33}$$

• Durum uzayı yapısı

Durum uzayı yapısını temsil eden A, B, C ve D matrislerine bağlı yapının genel ifadesi eşitlik 4.34'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \tag{4.34}$$

$$\begin{matrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{matrix} = \begin{matrix} x_2 \\ \ddot{x}_1 = -\frac{\lambda_1}{m}x_1 + \frac{\lambda_2}{m}x_7 \\ x_4 \\ \ddot{x}_3 = -\frac{\lambda_1}{m}x_3 - \frac{\lambda_2}{m}x_9 \\ x_6 \\ \ddot{x}_5 = -\frac{\lambda_3}{m}x_5 \\ x_8 \\ \ddot{x}_7 = \frac{\lambda_2}{I_r}x_1 - \frac{\lambda_4}{I_r}x_7 - \frac{I_p}{I_r}\omega x_{10} \\ x_{10} \\ \ddot{x}_9 = -\frac{\lambda_2}{I_r}x_3 - \frac{\lambda_4}{I_r}x_9 + \frac{I_p}{I_r}\omega x_8 \end{matrix} \tag{4.35}$$

Sönümsüz volan-rotor sistemi durum uzay yapısı eşitlik 4.36'da verilmiştir.

$$
\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\lambda_1}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\lambda_1}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_2}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_3}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{\lambda_2}{I_r} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_4}{I_r} & 0 & 0 & -\frac{I_p}{I_r}\omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{\lambda_2}{I_r} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_p}{I_r}\omega & -\frac{\lambda_4}{I_r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{4.36}
$$

$$
y = \begin{bmatrix} \sigma_g \\ \zeta_g \\ \eta_g \\ \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix}
$$

4.2. Dinamik Modelin Elde Edilmesi (Sönümlü)

Herhangi bir sönüm kuvvetini düşünmeden modelleme yapmak gerçekçi değildir ve gerçek bir levitasyon durumunu yansıtmamaktadır. Pratikte süperiletken manyetik levitasyon sistemine herhangi bir başlangıç hareketi verildiğinde levitasyondaki SM'nin belli bir süre sonra hareketinin nihayete erdiği açık şekilde gözlemlenebilir. Sadece yay etkisi ile modelleme yapma ideal bir sistem yaratacaktır ve simülasyonlarda SM'e verilen herhangi bir hareket ile sonsuza kadar salınım yapacaktır. Pratikte hava sürtünmesi ve manyetik sürtünme etkileri gibi etkiler levitasyon sisteminde küçük bir sönüme sebep olur. Buradaki modellemede süperiletken içindeki bir sönüm mekanizması düşünülmemiştir. Bilindiği gibi donmuş görüntü konsepti herhangi bir histerisiz mekanizması içermez [6]. Buradaki modellemede viskoz sönüm olarak enerjiyi dağıtan bir denklem aşağıdaki gibi tanımlandı.

$$
\begin{aligned}
D=&\frac{1}{2}[C^{(I)}{}_{1yy}(\dot{\xi}_g-a_1\dot{\alpha})^2+C^{(II)}{}_{1yy}(\dot{\xi}_g-a_1\dot{\alpha})^2+C^{(I)}{}_{1xx}(\dot{\sigma}_g+a_1\dot{\beta})^2\\
&+C^{(II)}{}_{1zz-x}(\dot{\eta}_g+b_1\dot{\beta})^2+C^{(I)}{}_{2yy}(\dot{\xi}_g-a_2\dot{\alpha})^2+C^{(II)}{}_{2yy}(\dot{\xi}_g-a_2\dot{\alpha})^2+C^{(I)}{}_{2xx}(\dot{\sigma}_g+a_2\dot{\beta})^2\\
&+C^{(II)}{}_{2xx}(\dot{\sigma}_g+a_2\dot{\beta})^2+C^{(I)}{}_{2zz-y}(\dot{\eta}_g+b_2\dot{\alpha})^2+C^{(II)}{}_{2zz-y}(\dot{\eta}_g-b_2\dot{\alpha})^2\\
&+C^{(I)}{}_{2zz-x}(\dot{\eta}_g-b_2\dot{\beta})^2+C^{(II)}{}_{2zz-x}(\dot{\eta}_g+b_2\dot{\theta})^2+C^{(I)}{}_{3yy}(\dot{\xi}_g+a_3\dot{\alpha})^2\\
&+C^{(II)}{}_{3yy}(\dot{\xi}_g+a_3\dot{\alpha})^2+C^{(I)}{}_{3xx}(\dot{\sigma}_g-a_3\dot{\beta})^2+C^{(II)}{}_{3xx}(\dot{\sigma}_g-a_3\dot{\beta})^2+C^{(I)}{}_{3zz-y}(\dot{\eta}_g+b_3\dot{\alpha})^2\\
&+C^{(II)}{}_{3zz-y}(\dot{\eta}_g-b_3\dot{\alpha})^2+C^{(I)}{}_{3zz-x}(\dot{\eta}_g-b_3\dot{\beta})^2+C^{(II)}{}_{3zz-x}(\dot{\eta}_g+b_3\dot{\theta})^2]
\end{aligned}
\tag{4.37}
$$

Burada sönüm katsayıları sabittir ve aşağıdaki gibi kabul edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
&C_{r-1}(\text{radyalsönüm})=C^{(I)}{}_{1yy}=C^{(II)}{}_{1yy}=C^{(I)}{}_{1xx}=C^{(II)}{}_{1xx}\\
&C_{r-2}(\text{radyalsönüm})=C^{(I)}{}_{2yy}=C^{(II)}{}_{2yy}=C^{(I)}{}_{2xx}=C^{(II)}{}_{2xx}\\
&C_{r-3}(\text{radyalsönüm})=C^{(I)}{}_{3yy}=C^{(II)}{}_{3yy}=C^{(I)}{}_{3xx}=C^{(II)}{}_{3xx}\\
&C_{e-1}(\text{eksenelsönüm})=C^{(I)}{}_{1zz-y}=C^{(II)}{}_{1zz-y}=C^{(I)}{}_{1zz-x}=C^{(II)}{}_{1zz-x}\\
&C_{e-2}(\text{eksenelsönüm})=C^{(I)}{}_{2zz-y}=C^{(II)}{}_{2zz-y}=C^{(I)}{}_{2zz-x}=C^{(II)}{}_{2zz-x}\\
&C_{e-3}(\text{eksenelsönüm})=C^{(I)}{}_{3zz-y}=C^{(II)}{}_{3zz-y}=C^{(I)}{}_{3zz-x}=C^{(II)}{}_{3zz-x}
\end{aligned}
\tag{4.38}
$$

Sönümlü sistemler için tanımlanan Lagrange denklemi eşitlik 4.39'da ifade edilmiştir.

$$
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_i}+\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i}=Q_i \tag{4.39}
$$

Değişkenlerin katsayıları eşitlik 4.40'taki gibi kısaltmalarla gösterilerek daha sade ifade edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
&\lambda_5=\left(2C_{r-1}+2C_{r-2}+C_{r-3}\right)\\
&\lambda_6=(2C_{r-1}a_1+2C_{r-2}a_2-2C_{r-3}a_3)\\
&\lambda_7=\left(4C_{e-1}+4C_{e-2}+4C_{e-3}\right)\\
&\lambda_8=2\left(C_{r-1}a_1^2+C_{r-2}a_2^2+C_{r-3}a_3^2+C_{e-1}b_1^2+C_{e-2}b_2^2+C_{e-3}b_3^2\right)
\end{aligned}
\tag{4.40}
$$

$$
\begin{array}{lcl}
\dot{x}_1 & & x_2 \\
\dot{x}_2 & & \ddot{x}_1 = -\frac{\lambda_1}{m}x_1 - \frac{\lambda_4}{m}x_2 + \frac{\lambda_2}{m}x_7 + \frac{\lambda_6}{m}x_8 \\
\dot{x}_3 & & x_4 \\
\dot{x}_4 & & \ddot{x}_3 = -\frac{\lambda_1}{m}x_3 - \frac{\lambda_5}{m}x_4 - \frac{\lambda_2}{m}x_9 - \frac{\lambda_6}{m}x_{10} \\
\dot{x}_5 & & x_6 \\
\dot{x}_6 & = & \ddot{x}_5 = -\frac{\lambda_3}{m}x_5 - \frac{\lambda_7}{m}x_6 \\
\dot{x}_7 & & x_8 \\
\dot{x}_8 & & \ddot{x}_7 = \frac{\lambda_2}{I_r}x_1 + \frac{\lambda_6}{I_r}x_2 - \frac{\lambda_4}{I_r}x_7 - \frac{\lambda_8}{I_r}x_8 - \frac{I_p}{I_r}\omega x_{10} \\
\dot{x}_9 & & x_{10} \\
\dot{x}_{10} & & \ddot{x}_9 = -\frac{\lambda_2}{I_r}x_3 - \frac{\lambda_6}{I_r}x_4 - \frac{\lambda_4}{I_r}x_9 - \frac{\lambda_8}{I_r}x_{10} + \frac{I_p}{I_r}\omega x_8
\end{array}
\tag{4.41}
$$

Sönümlü volan-rotor sistemi durum uzayı yapısı x değişkeni 4.42, y değişkeni 4.43’teki gibi elde edilmiştir.

$$
\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\frac{\lambda_1}{m} & -\frac{\lambda_5}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_2}{m} & -\frac{\lambda_6}{m} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{\lambda_1}{m} & -\frac{\lambda_5}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_2}{m} & -\frac{\lambda_6}{m} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_3}{m} & -\frac{\lambda_7}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
-\frac{\lambda_2}{I_r} & -\frac{\lambda_6}{I_r} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_4}{I_r} & -\frac{\lambda_8}{I_r} & 0 & -\frac{I_p}{I_r}\omega \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & -\frac{\lambda_2}{I_r} & -\frac{\lambda_6}{I_r} & 0 & 0 & 0 & \frac{I_p}{I_r}\omega & -\frac{\lambda_4}{I_r} & -\frac{\lambda_8}{I_r}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{4.42}
$$

$$
y = \begin{bmatrix} \sigma_g \\ \zeta_g \\ \eta_g \\ \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} \tag{4.43}
$$

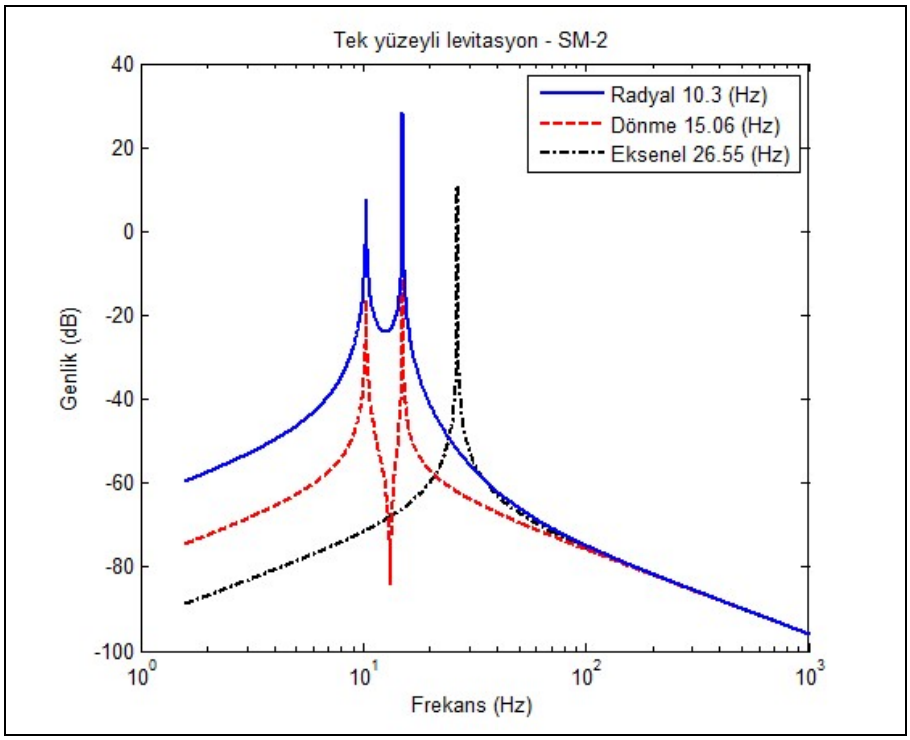
4.3. Volan-Rotor Sisteminin Simülasyonu

Bölüm 4.2'de elde edilen sistem modelinin Matlab ortamında freakans cevapları elde edilmiştir. Simülasyon için kullanılan kütle ve atalet moment değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

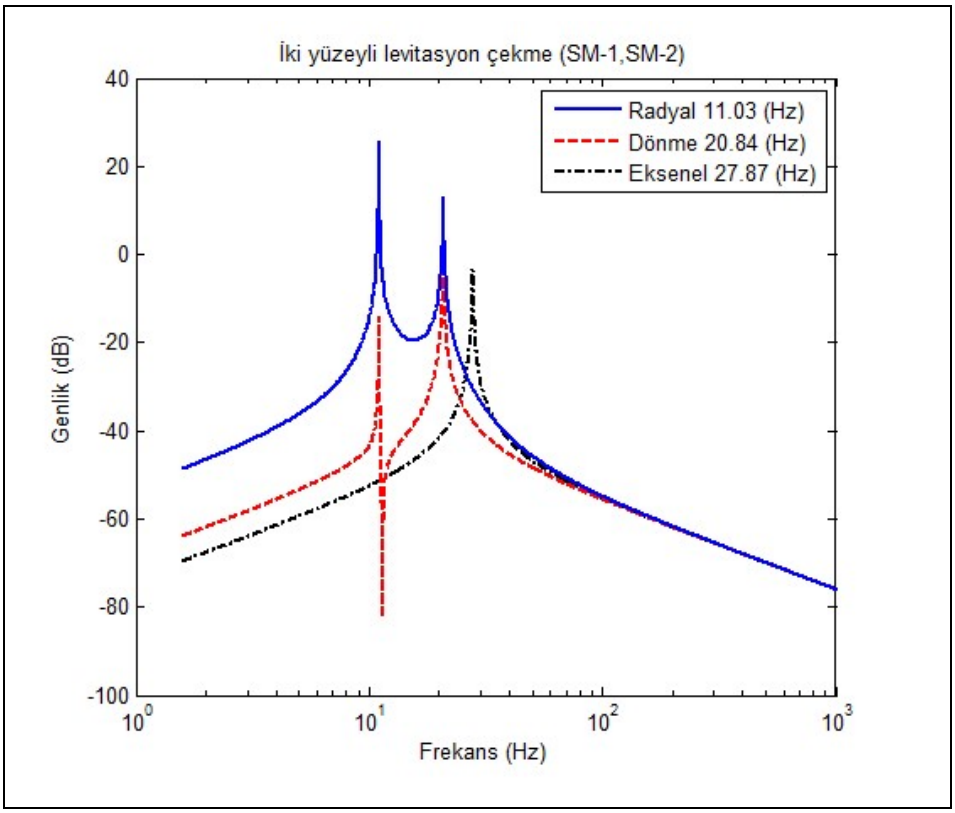
Tablo 4.1: Rotor Kütle ve Atalet Moment Değerleri.

	Kütle (kg)	Polar Atalet Momenti (kg m^2)	Radyal Atalet Momenti (kg m^2)
Tek yüzeyli levitasyon (SM-2)	1.29363	0.00159672391	0.00357750754
İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1,SM-2)	1.31384	0.00160129240	0.00358011565
Üç yüzeyli Levitasyon durumu	1.37563	0.00168183498	0.00364674492

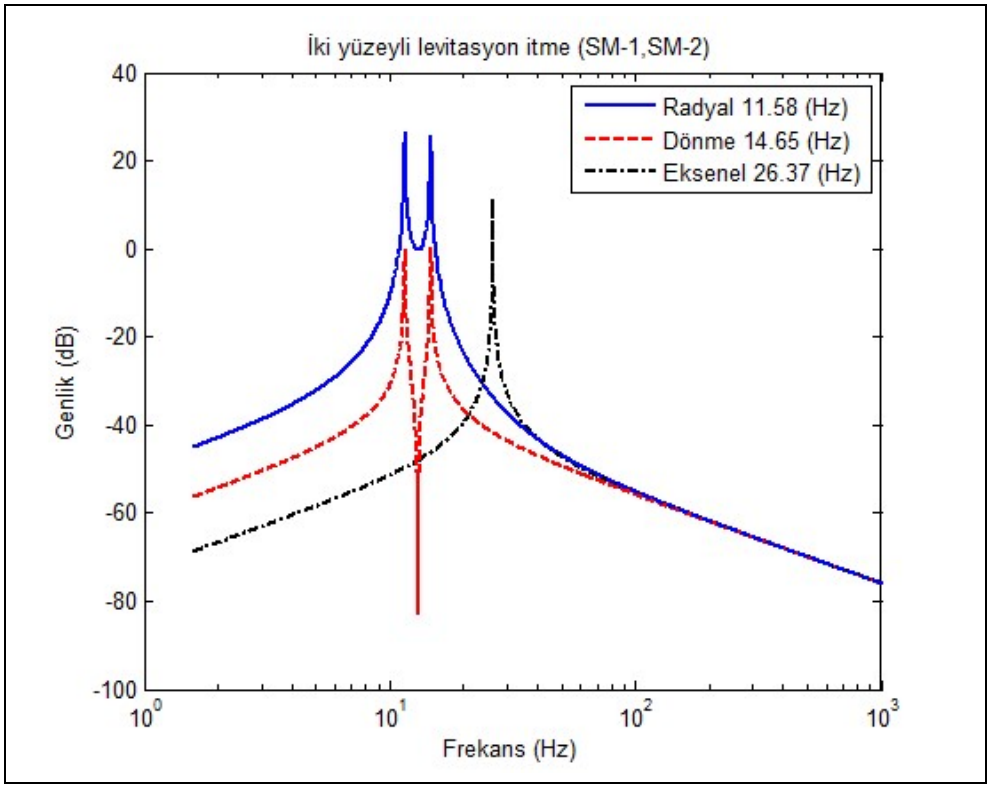
Bölüm 4.1 ve 4.2'de modelleme çalışması yapılan süperiletken manyetik yataklı volan sisteminin Tablo 4.1'de verilen kütle-atalet verilerini de kullanarak farklı mıknatıs kutup polarizasyonlarına göre levite olan rotorun frekans cevapları elde edilmiştir Şekiller 4.5-4.9.



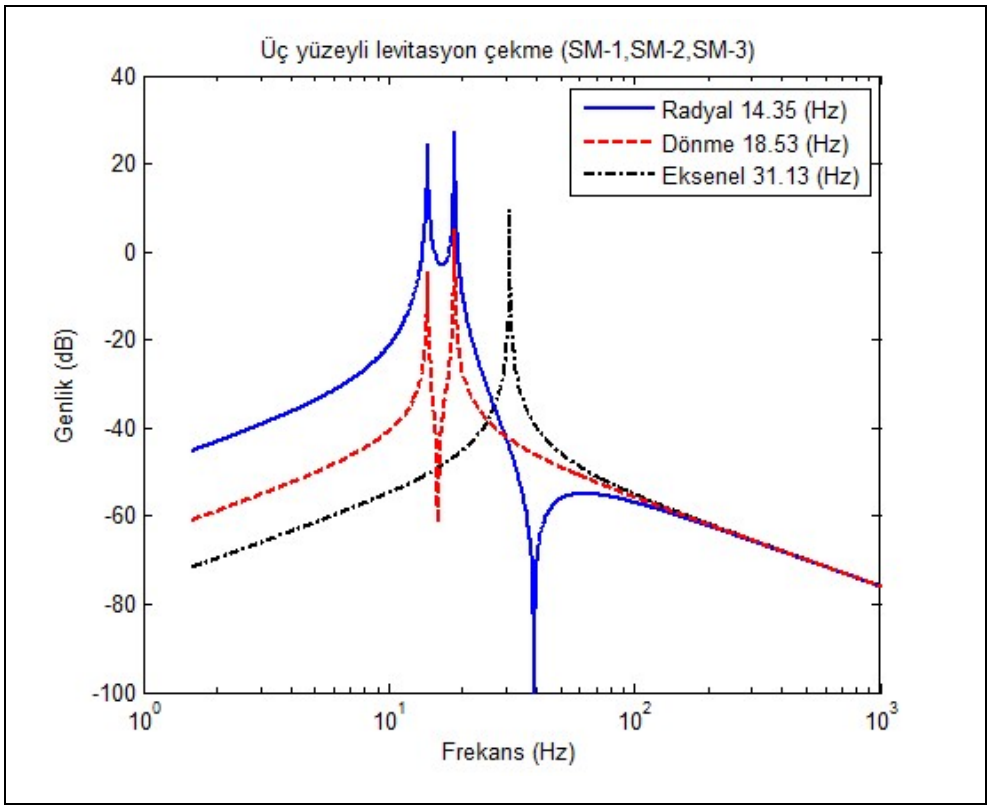
Şekil 4.5: Tek yüzeyli levitasyon SM-2 durumu simülasyon frekans cevabı.



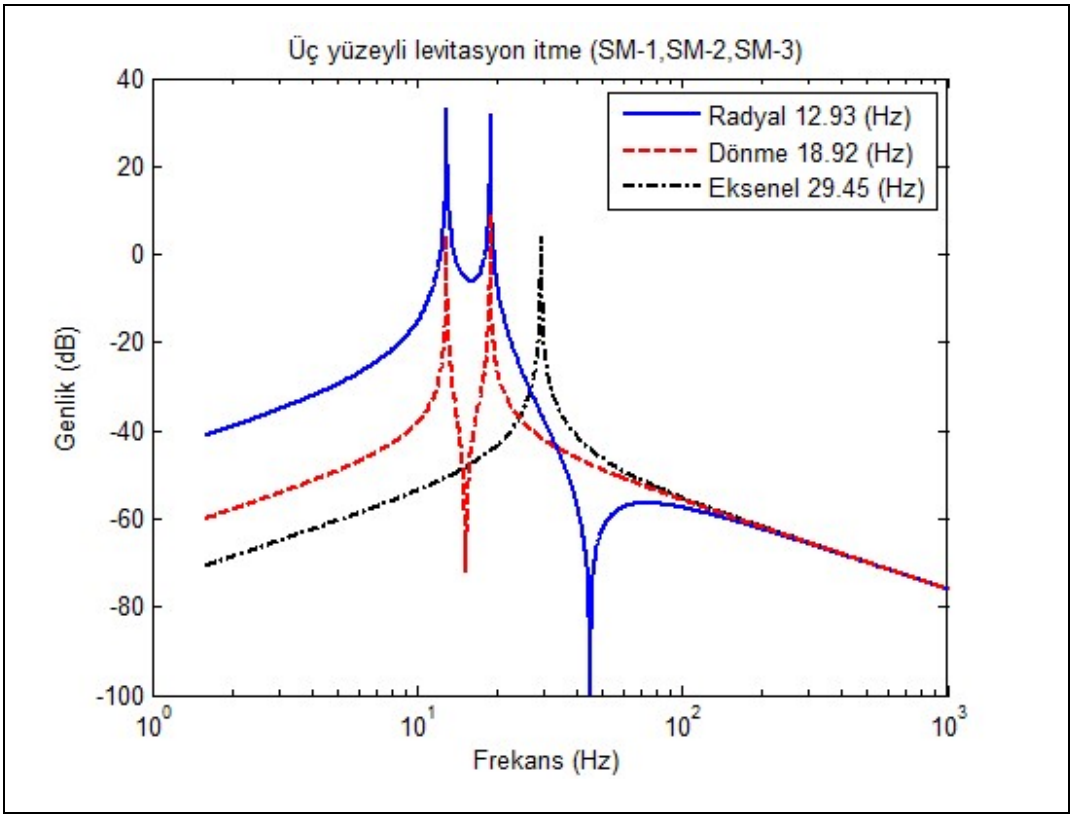
Şekil 4.6: İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1,SM-2 çekme) simülasyon frekans cevabı.



Şekil 4.7: İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1,SM-2 itme) simülasyon frekans cevabı.



Şekil 4.8: Üç yüzeyli Levitasyon durumu (çekme) simülasyon frekans cevabı.



Şekil 4.9: Üç yüzeyli Levitasyon durumu (itme) simülasyon frekans cevabı.

Rotor-volan sisteminin analitik modeli elde edildikten sonra Matlab&Simulink ortamında modelden frekans cevapları elde edilmiştir. Üç farklı levitasyon durumu ve polarizasyon durumlarına göre sistemin frekans cevaları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Volan Analitik Modeli Frekans Cevapları.

	Radyal yönde (Hz)		Dönme yönünde (Hz)		Eksenel yönde (Hz)	
Tek yüzeyli levitasyon (SM-2)	10.3		15.06		26.55	
	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme
İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1,SM-2	11.03	11.58	20.84	14.65	27.87	26.37
Üç yüzeyli Levitasyon durumu	14.35	12.93	18.53	18.92	31.13	29.45

Analitik modelin frekans cevapları incelendiğinde radyal, dönme ve eksenel yönlerde en yüksek doğal frekans değerleri üç yüzeyli levitasyon çekme polarizasyonunda elde edilmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar radyal yönlü sonuçlarda verilmiştir (Bölüm 5.2). Deneysel sonuçlar mıknatısların birbirine göre çekme-çekme veya itme-itme kutup konumlamalarına göre farklı kombinasyonlarda yapılmıştır. Levitasyon kuvveti ve katılığını değerlendirebilmek için, farklı mıknatıs kombinasyonları ve mıknatısların kutup yönleri hesaba katılmıştır [20]. Eğer bir rotor-SM, içi boş bir silindir YSS veya bir halka YSS'nin içinde bulunuyorsa, oluşan levitasyon yapısı radyal ve eksenel manyetik yatak yapısıdır [19], [21], [23]. Yapılan tüm deneysel çalışmaların özeti aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo 5.1-5.3).

Tablo 5.1: Eksenel Yönlü Deneyler.

Eksenel yönlü kuvvet ölçüm deneyleri:			
	Kullanılan Sabit mıknatıslar	**Kutup durumları**	**Deney No**
Tek yüzeyli Levitasyon	SM-2	-	**Deney-1**
İki Yüzeyli Levitasyon	SM-1 ve SM-2	Çekme	**Deney-2**
		İtme	**Deney-3**
	SM-2 ve SM-3	Çekme	**Deney-4**
		İtme	**Deney-5**
Üç yüzeyli Levitasyon	SM-1, SM-2 ve SM-3	Çekme	**Deney-6**
		İtme	**Deney-7**

Tablo 5.2: Radyal Yönlü Deneyler.

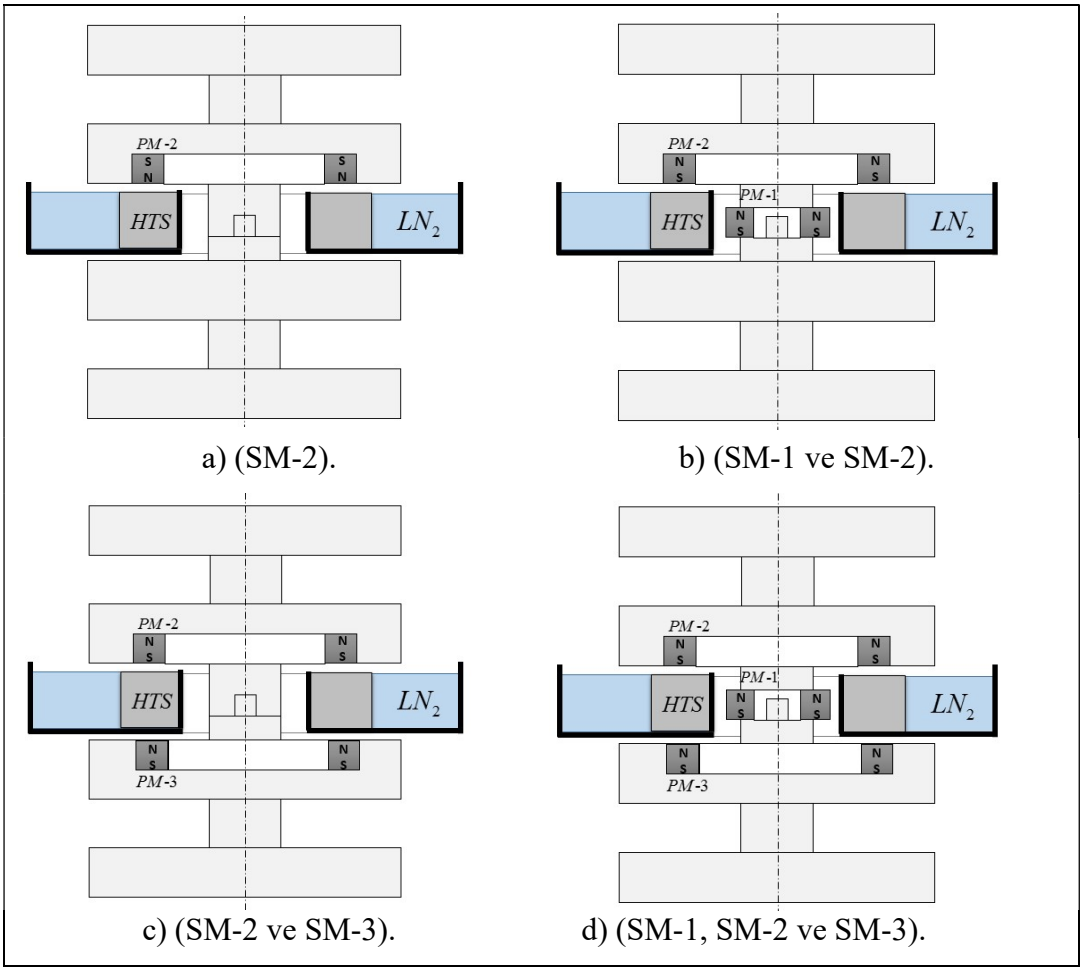
Radyal yönlü kuvvet ölçüm deneyleri:			
	Kullanılan Sabit mıknatıslar	**Kutup durumları**	**Deney No**
Tek yüzeyli Levitasyon	SM-1 (10 mm)	-	**Deney-8**
Tek yüzeyli Levitasyon	SM-1 (15 mm)	-	**Deney-9**
Tek yüzeyli Levitasyon	SM-1 (20 mm)	-	**Deney-10**
Tek yüzeyli Levitasyon	SM-2	-	**Deney-11**
İki Yüzeyli Levitasyon	SM-1 ve SM-2	Çekme	**Deney-12**
		İtme	**Deney-13**
	SM-2 ve SM-3	Çekme	**Deney-14**
		İtme	**Deney-15**
Üç yüzeyli Levitasyon	SM-1, SM-2 ve SM-3	Çekme	**Deney-16**
		İtme	**Deney-17**

Tablo 5.3: Döndürme Deneyleri.

Döndürme deneyleri:			
	Kullanılan Sabit mıknatıslar	**Kutup durumları**	**Deney No**
Tek yüzeyli Levitasyon	SM-2	-	**Deney-18**
İki Yüzeyli Levitasyon	SM-1 ve SM-2	Çekme	**Deney-19**
		İtme	**Deney-20**
	SM-2 ve SM-3	Çekme	**Deney-21**
		İtme	**Deney-22**
Üç yüzeyli Levitasyon	SM-1, SM-2 ve SM-3	Çekme	**Deney-23**
		İtme	**Deney-24**

Tek halkalı bir YSS ve üç SM (SM-1, SM-2 ve SM-3), iki parçadan oluşan volan rotoruna takılarak çok yüzlü levitasyon sistemi oluşturur [21]. Deneylerde ele alınan tek yüzeyli, iki yüzeyli ve üç yüzeyli sabit mıknatıs süperiletken konfigürasyonları

şematik olarak Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Tek yüzeyli levitasyon durumu, Şekil 5.1 (a)'da gösterildiği gibi halka bir süperiletken üzerinde sabit mıknatısın (SM-2) levite olması ve süperiletkenin üst yüzeyi ile sabit mıknatısın alt yüzeyi arasında etkileşim oluşması durumudur. İki yüzeyli levitasyon (SM-1 ve SM-2) durumu, Şekil 5.1 (b)'de gösterildiği gibi tek yüzeyli levitasyona ilave olarak, halka süperiletkenin ortasında sabit mıknatısın (SM-1) levite olmasıyla SM-2'ye ek olarak süperiletkenin iç yüzeyiyle SM-1'in dış yüzeyi arasında etkileşim oluşması durumudur. İki yüzeyli levitasyon (SM-2 ve SM-3) durumu, Şekil 5.1 (c)'de gösterildiği gibi tek yüzeyli levitasyona ilave olarak, halka süperiletkenin altında sabit mıknatısın (SM-3) levite olmasıyla SM-2'ye ek olarak süperiletkenin alt yüzeyiyle SM-3'ün üst yüzeyi arasında etkileşim oluşması durumudur. Üç yüzeyli levitasyon durumu (SM-1, SM-2 ve SM-3), Şekil 5.1 (d)'de gösterildiği gibi tek bir halka süperiletkenin üst, orta ve alt kısmında aynı anda üç farklı sabit mıknatısın levite olma durumudur.

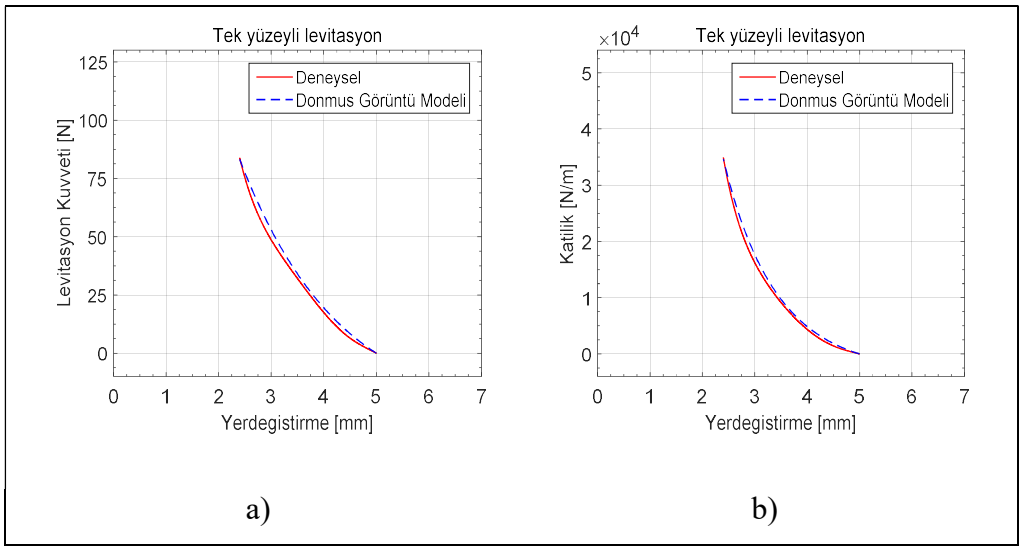


Şekil 5.1: Deneylerde uygulanan tüm levitasyon durumları.

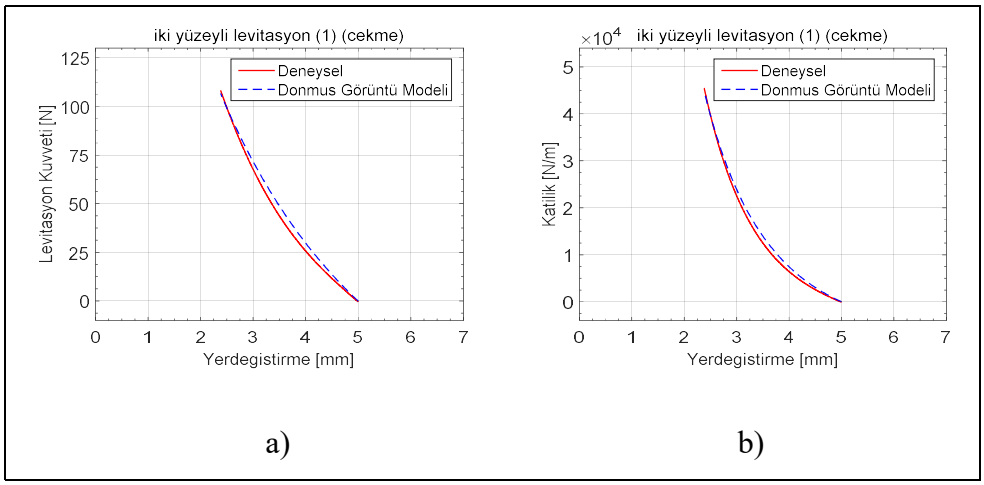
Şekil 5.1'de verilen birden fazla yüzeyli sabit mıknatıs süperiletken levitasyon durumlarında (b) İki yüzeyli levitasyon (SM-1 ve SM-2), (c) İki yüzeyli levitasyon (SM-2 ve SM-3), ve (d) Üç yüzeyli levitasyon, sabit mıknatısların kutup durumlarının itme ya da çekme olmasına göre deneyler iki guruba ayrılmıştır. Mıknatısların birbirine göre itme ya da çekme olarak dizilmesi aslında mıknatısın manyetik alan değerlerini değiştirmektedir. Bu değişimler, oluşacak yay katsayısı değerleri üzerinde etkili olmaktadır.

5.1. Eksenel Yönde Yay katsayılarının Bulunması

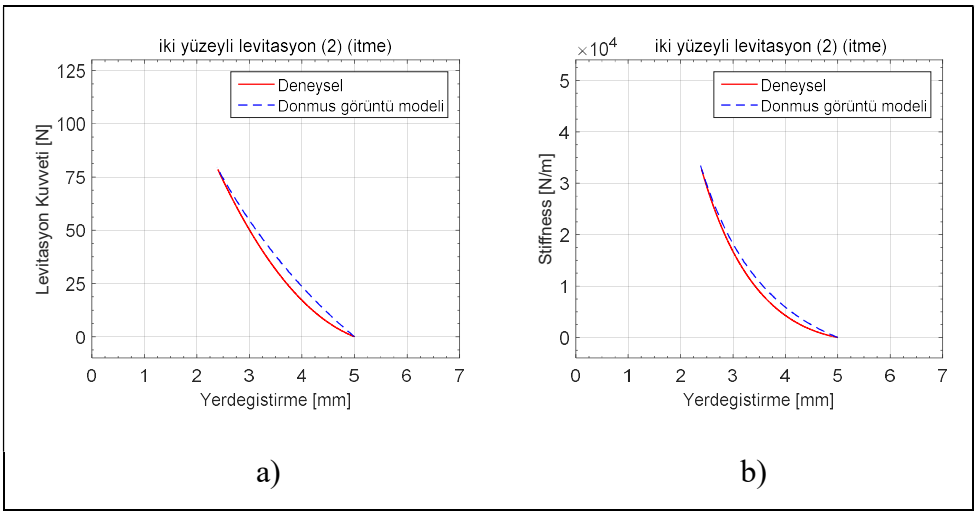
Farklı kutup etkisinin levitasyon kuvvetindeki artışını anlamak için, deneylerde sabit mıknatısın çekme ve itme konfigürasyonları çalışılmıştır [21]. Eksenel yönlü levitasyon kuvveti ölçüm sonuçları Tablo 3.1'de verilen tüm konfigürasyonlar için Şekil 5.2-Şekil 5.8 arasında verilmiştir. Bu şekillerde levitasyon kuvvetleri deneylerde kuvvet sensörü ile ölçülmüş ve bu deneysel verilerden yay katsayıları hesaplanmıştır. Her bir durum için önceki bölümlerde elde edilen denklemler kullanılarak donmuş görüntü modeli sonuçları elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır [18].



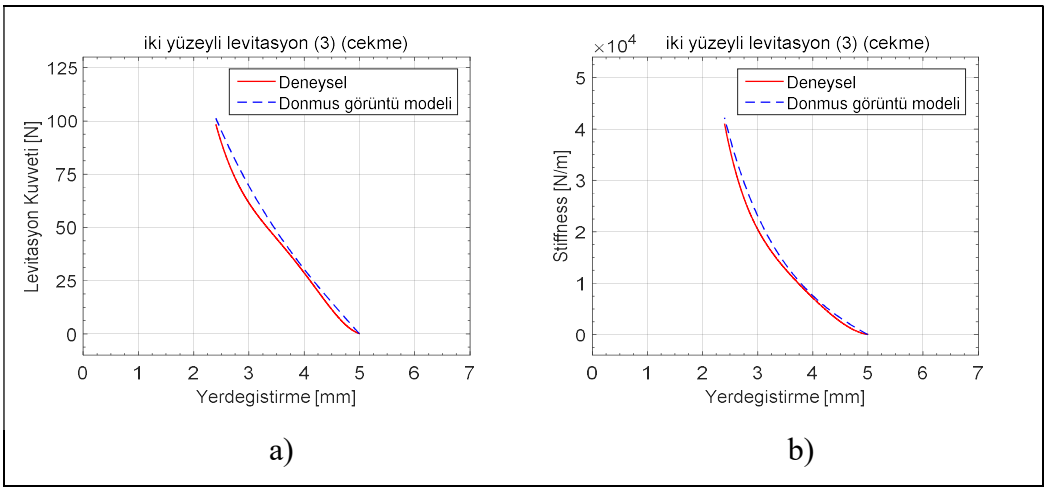
Şekil 5.2: Deney 1- Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



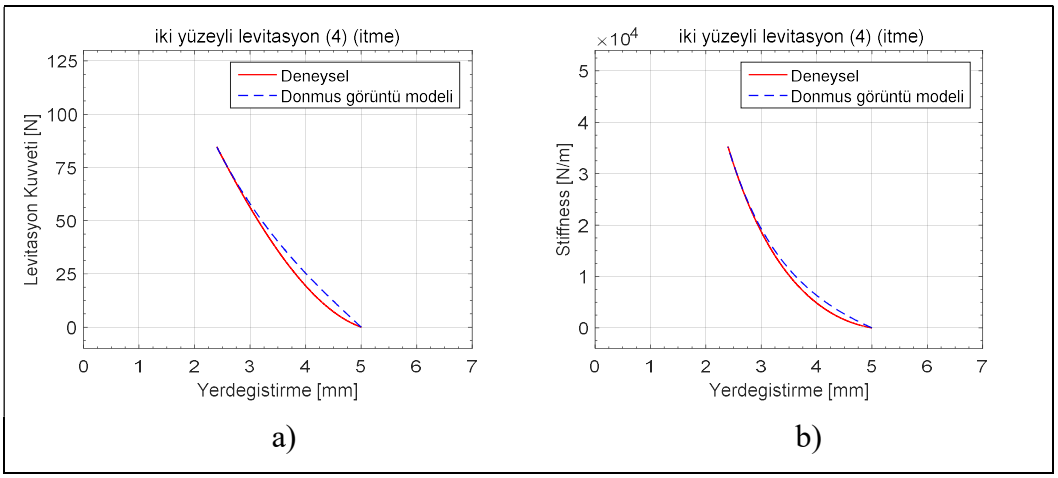
Şekil 5.3: Deney 2 - İki yüzeyli levitasyon (1) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



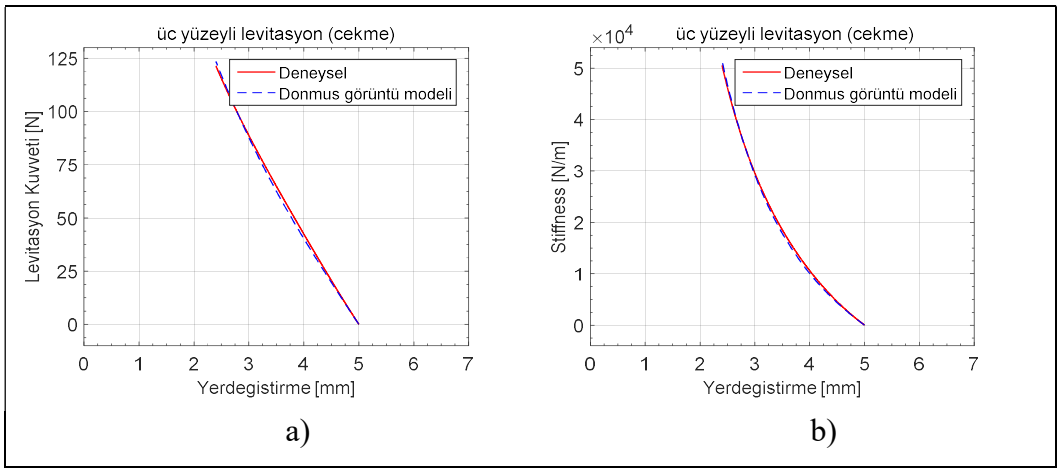
Şekil 5.4: Deney 3 - İki yüzeyli levitasyon (1) itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



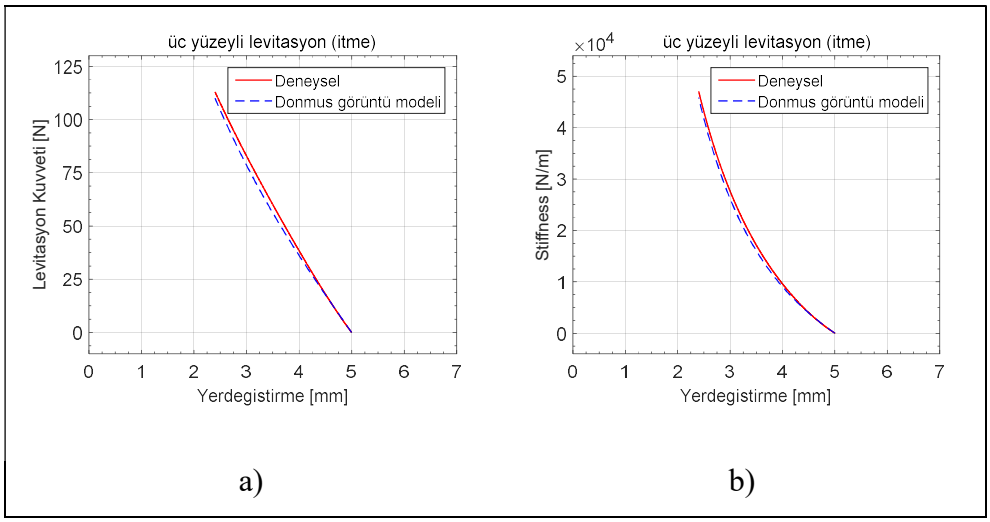
Şekil 5.5: Deney 4 - İki yüzeyli levitasyon (2) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



Şekil 5.6: Deney 5 - İki yüzeyli levitasyon (2) itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



Şekil 5.7: Deney 6 - Üç yüzeyli levitasyon çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



Şekil 5.8: Deney 7 - Üç yüzeyli levitasyon itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.

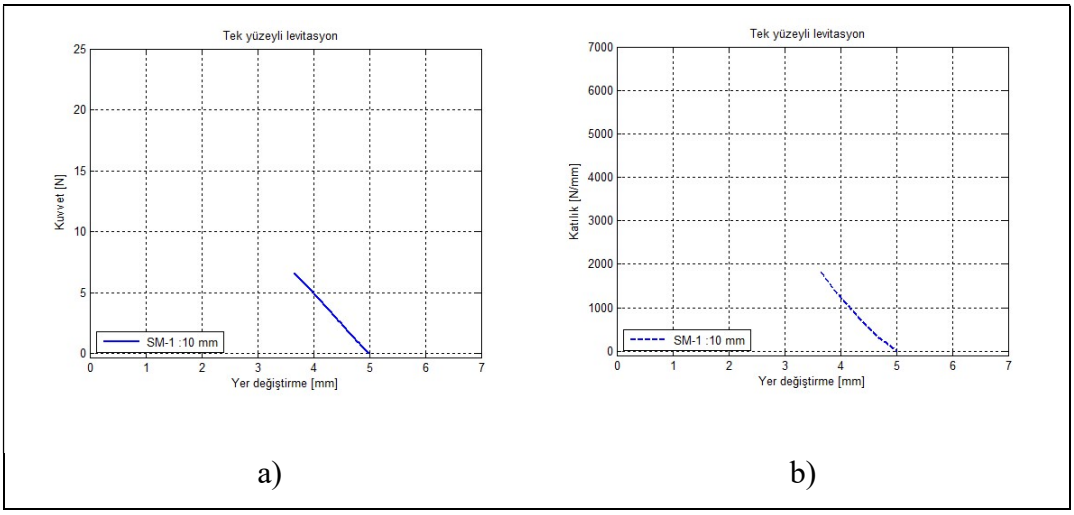
Eksenel yönlü kuvvet ölçümlerinden elde edilen maksimum kuvvet ve katılık değerleri Tablo 5.4'de özet olarak verilmiştir. Tabloda verilen maksimum kuvvetteki boşluk miktarı deneysel çalışma aşamasında kuvvet sensörünün ne kadar ileriye itildiğini göstermektedir.

Tablo 5.4: Eksenel Yöndeki Kuvvet ve Yay Katsayısı Değerleri.

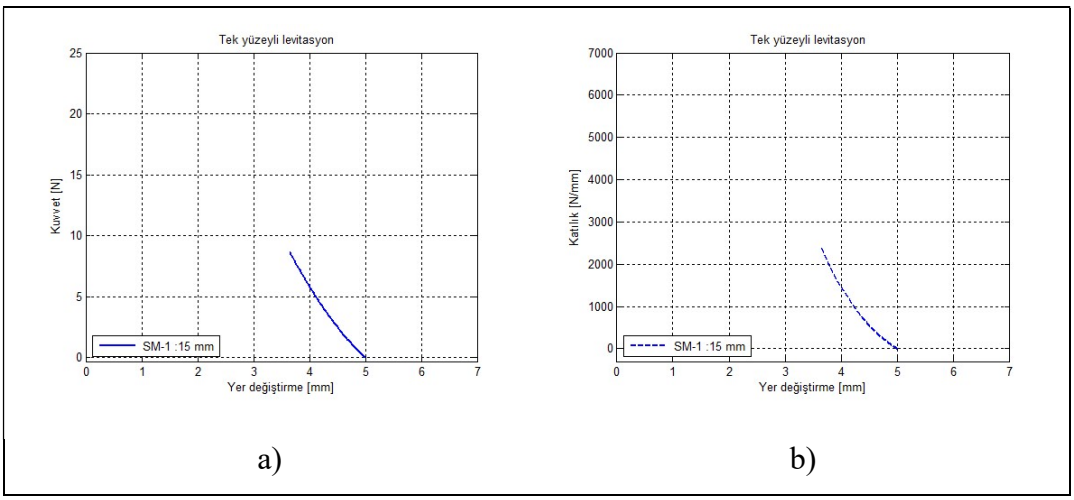
Durum	Maksimum kuvvetteki boşluk [m]	Makismum levitasyon kuvveti [N]		Maksimum yay katsayısı değeri [N/m]	
Tek yüzeyli levitasyon SM-2	SM-2 = 2.4×10^{-3}	84.85		3.50×10^{4}	
		Çekme	İtme	Çekme	İtme
İki yüzeyli levitasyon SM-1, SM-2	SM-1 = 5×10^{-3} SM-2 = 2.4×10^{-3}	109.20	78.06	4.55×10^{4}	3.27×10^{4}
İki yüzeyli levitasyon SM-2, SM-3	SM-2 = 2.4×10^{-3} SM-3 = 7.6×10^{-3}	100.40	84.70	4.10×10^{4}	3.53×10^{4}
Üç yüzeyli levitasyon SM-1, SM-2 and SM-3	SM-1 = 5×10^{-3} SM-2 = 2.4×10^{-3} SM-3 = 7.6×10^{-3}	122.40	113.90	5.06×10^{4}	4.71×10^{4}

5.2. Radyal Yönde Yay Katsayılarının Bulunması

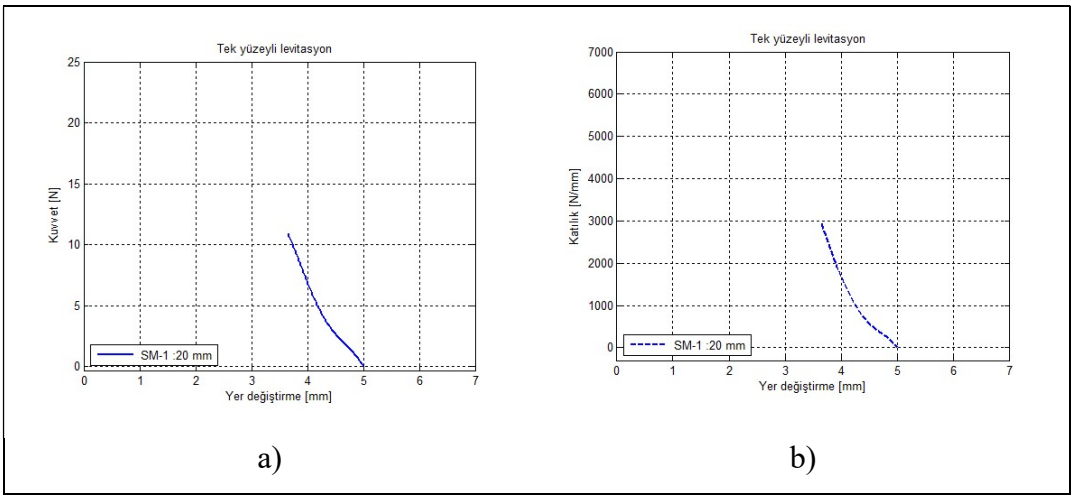
Radyal yönlü levitasyon kuvveti ölçüm sonuçları ve bu deneysel sonuçlardan elde edilen yay katsayısı değerleri Tablo 5.2'de verilen tüm konfigürasyonlar için için Şekil 5.9-Şekil 5.19 arasında verilmiştir.



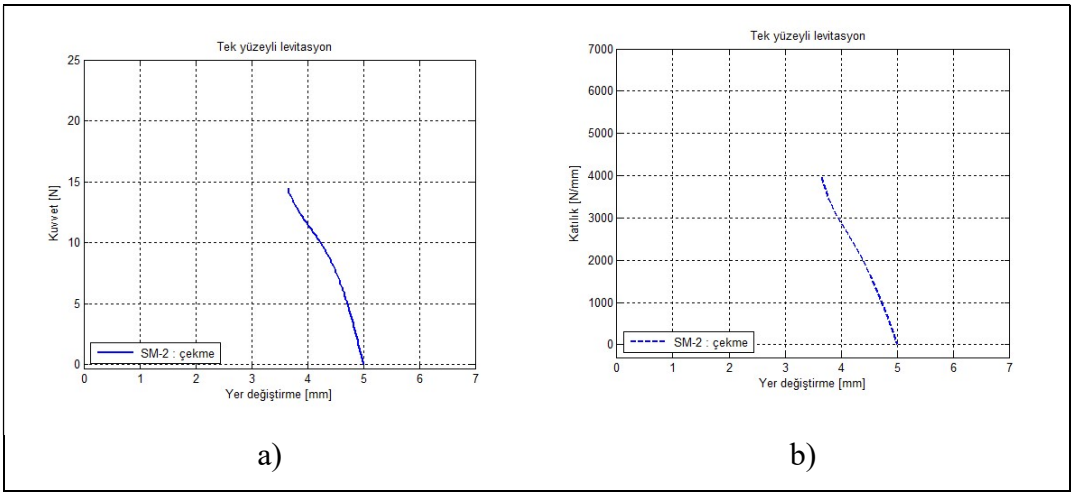
Şekil 5.9: Deney 8 (SM-1: 10 mm) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



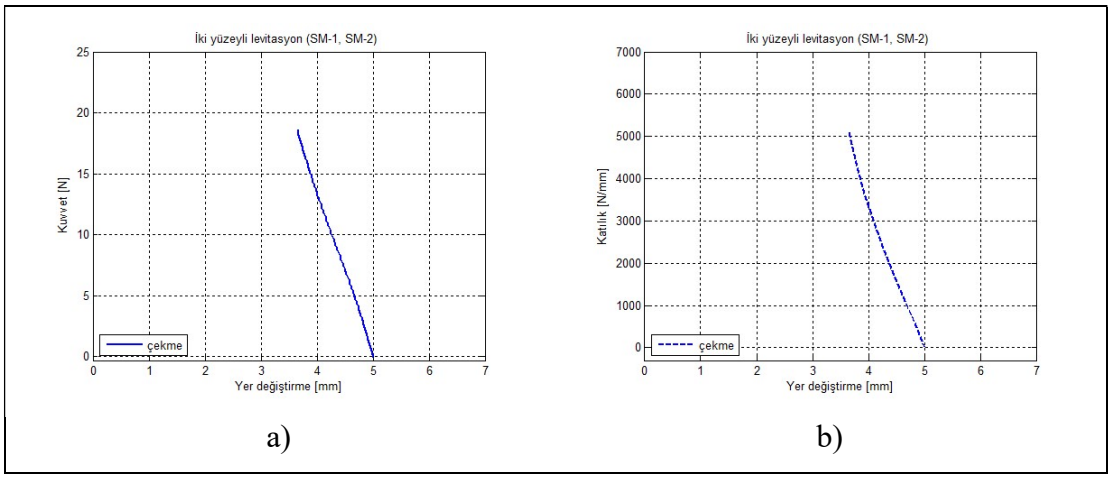
Şekil 5.10: Deney 9 (SM-1: 15 mm) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



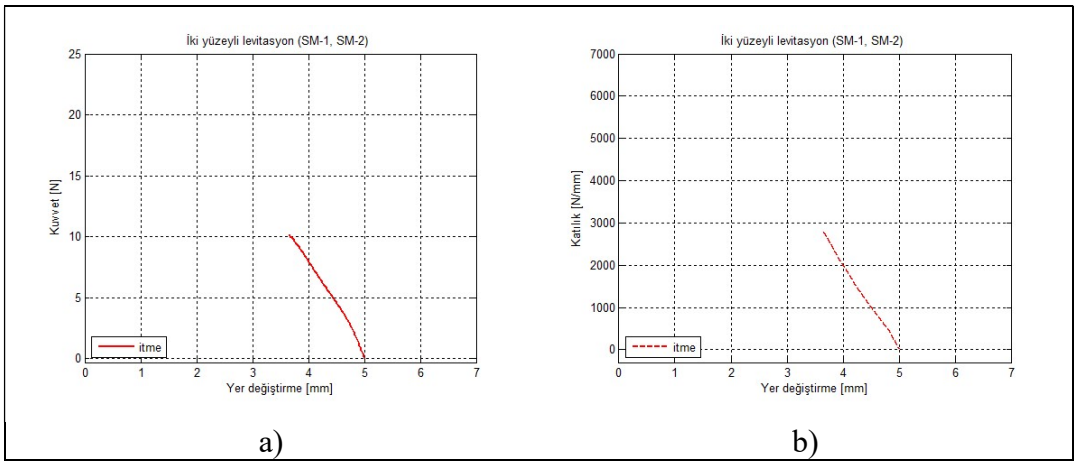
Şekil 5.11: Deney 10 (SM-1: 20 mm) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



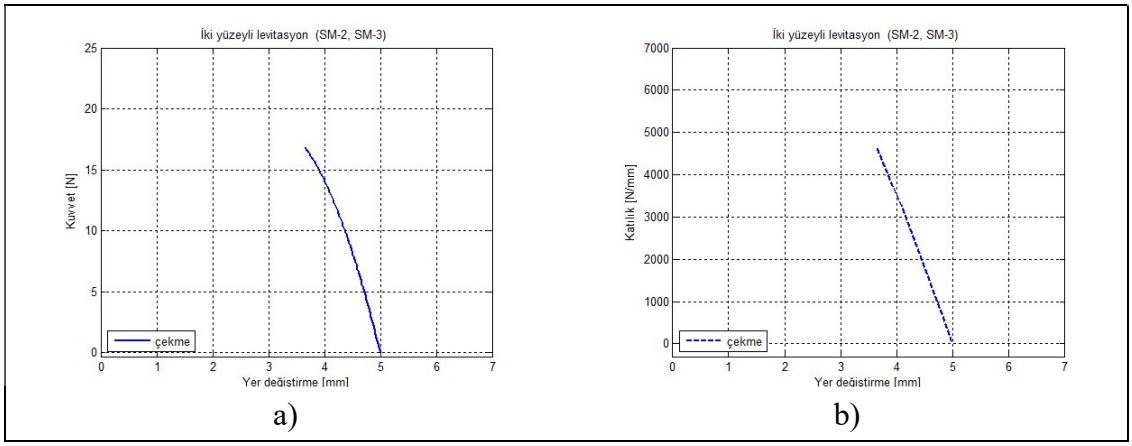
Şekil 5.12: Deney 11 (SM-2) - Tek yüzeyli levitasyon. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



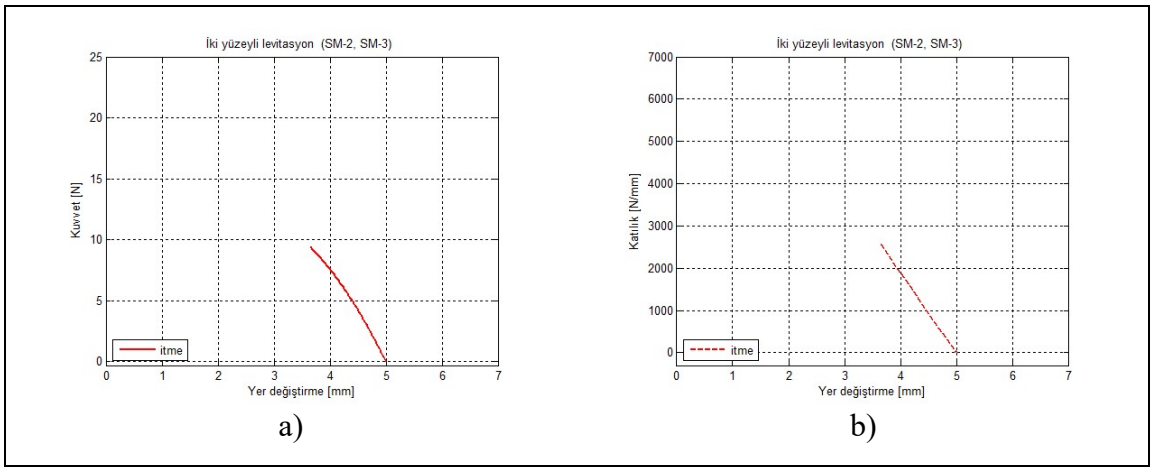
Şekil 5.13: Deney 12 - İki yüzeyli levitasyon (1) çekme kutup yönlü.
a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



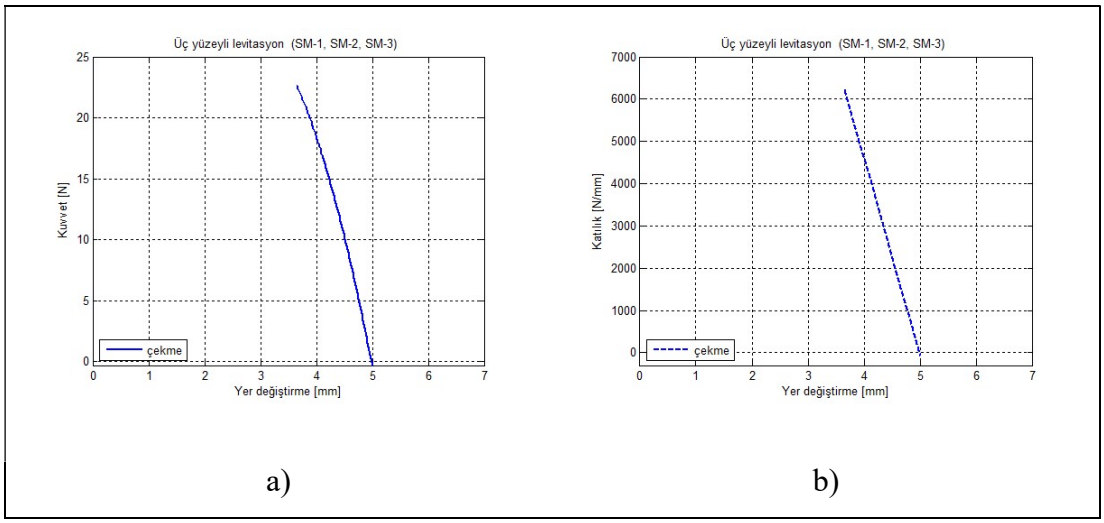
Şekil 5.14: Deney-13 - İki yüzeyli levitasyon (1) itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



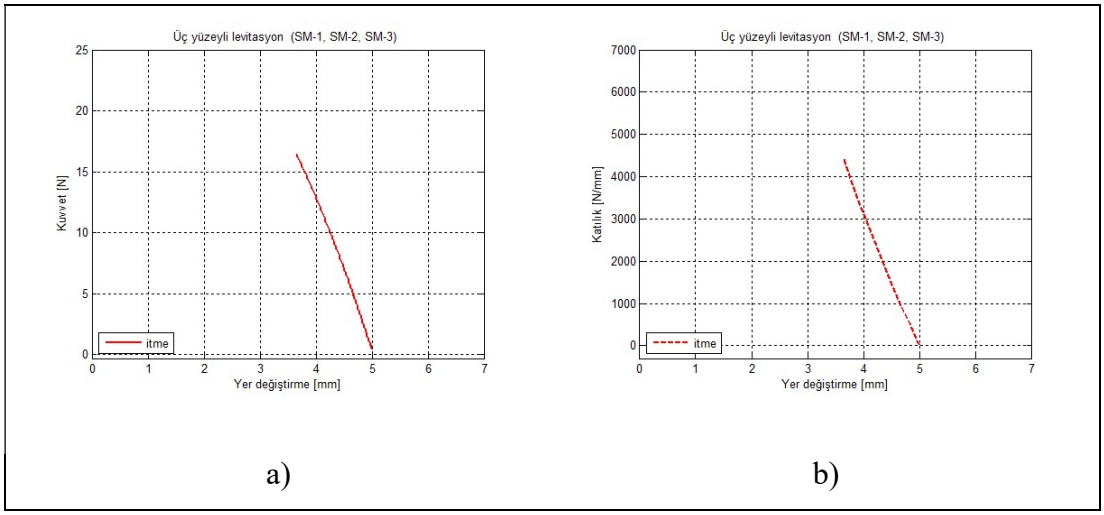
Şekil 5.15: Deney 14 - İki yüzeyli levitasyon (2) çekme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



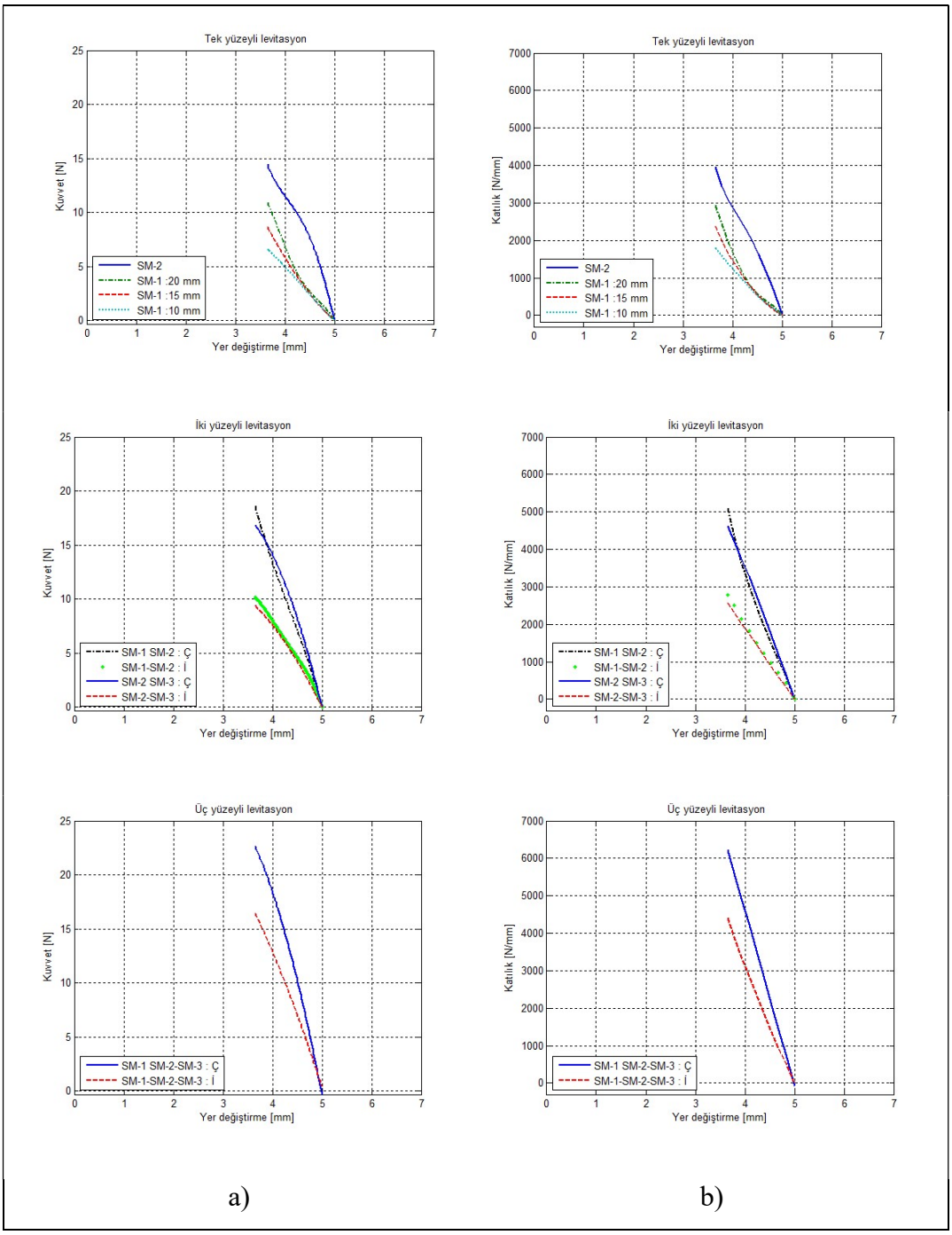
Şekil 5.16: Deney 15 - İki yüzeyli levitasyon (2) itme kutup yönlü. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



Şekil 5.17: Deney 16 – Üç yüzeyli levitasyon çekme kutup yönlü.
a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



Şekil 5.18: Deney 17 - Üç yüzeyli levitasyon itme kutup yönlü.
a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.



Şekil 5.19: Levitsyon durumlarına göre deney sonuçlarının mukayesesi. a) Kuvvet, b) Yay katsayısı.

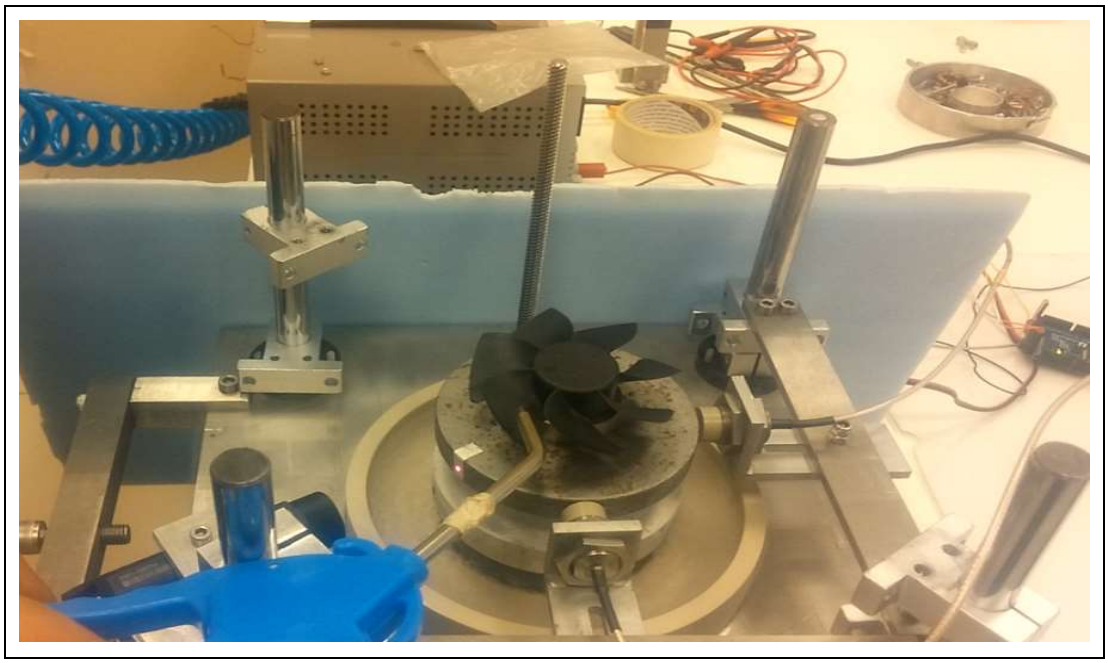
Radyal yönlü kuvvet ölçümlerinden elde edilen maksimum kuvvet ve katılık değerleri Tablo 5.5'de özet olarak verilmiştir. Tabloda verilen maksimum kuvvetteki boşluk miktarı deneysel çalışma aşamasında kuvvet sensörünün ne kadar ileriye itildiğini göstermektedir. Alt ve üst mıknatıs süperiletkenin üzerinde bulunduğu için bu mesafe bu iki mıknatıs için nominal boşluk 5 mm'ye eşittir.

Tablo 5.5: Radyal Yöndeki Kuvvet ve Katılık Değerleri.

Durum	Maksimum kuvvetteki boşluk [m]	Makismum levitasyon kuvveti [N]		Maksimum yay katsayısı değeri [N/m]	
Tek yüzeyli levitasyon SM-1:10 mm	SM-1 = 3.65×10^{-3}	6.6109		1.8112×10^{3}	
Tek yüzeyli levitasyon SM-1:15 mm	SM-1 = 3.65×10^{-3}	8.6698		2.3753×10^{3}	
Tek yüzeyli levitasyon SM-1:20 mm	SM-1 = 3.65×10^{-3}	10.1651		2.7849×10^{3}	
Tek yüzeyli levitasyon SM-2	SM-2 = 5×10^{-3}	14.4247		3.9520×10^{3}	
		Çekme	İtme	Çekme	İtme
İki yüzeyli levitasyon SM-1, SM-2	SM-1 = 3.65×10^{-3} SM-2 = 5×10^{-3}	18.580	10.172	5.0904×10	2.7869×10^{3}
İki yüzeyli levitasyon SM-2, SM-3	SM-2 = 5×10^{-3} SM-3 = 5×10^{-3}	16.857	9.4018	4.6184×10	2.5758×10^{3}
Üç yüzeyli levitasyon SM-1, SM-2 ve SM-3	SM-1 = 3.65×10^{-3} SM-2 = 5×10^{-3} SM-3 = 5×10^{-3}	22.673	16.099	6.2120×10	4.4108×10^{3}

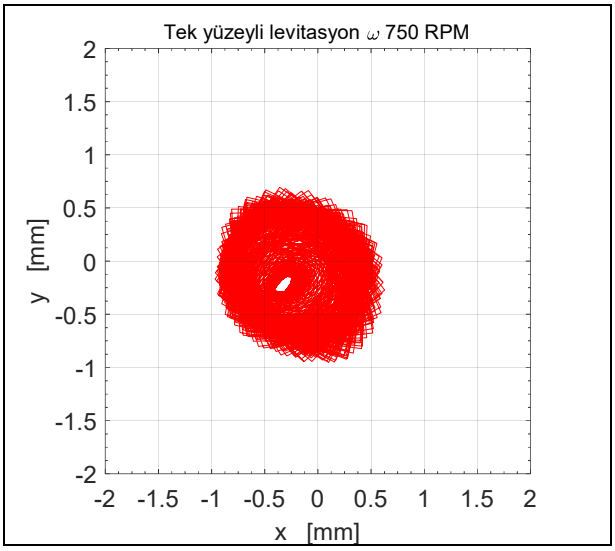
5.3. Döndürme Deneyi Sonuçları

Süperiletken manyetik levitasyonlu volan-rotor sisteminin döndürme testi Şekil 4.20'de gösterildiği gibi deneysel sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Volanın belirli bir devir sayısında döndürülmesi ile elde edilen radyal doğrultulardaki yerdeğiştirme sonuçları Tablo 5.3'te verilen tüm konfigürasyonlar için Şekiller 5.21-5.27 arasında verilmiştir. Şekiller döndürme deneylerinde rotor merkez ekseninin x ve y doğrultusunda sensörlerden ele edilen yerdeğiştirmeler esas alınarak elde edilmiştir. Yörünge çapı azalması yay katsayısının artması ile orantılıdır ve rotorun dönme kararlılığı artmaktadır. Rotor tüm durumlar için 750 RPM hıza kadar döndürülmüştür. Rotoru döndürmek için üzerine bağlanan pervaneye hava jeti yardımıyla hava verilerek dönüş sağlanmıştır. Belli devirden sonra hava jeti balanssızlık yaratmaktadır. Bu yüzden tüm deney sonuçları 750 RPM için yapılmıştır.

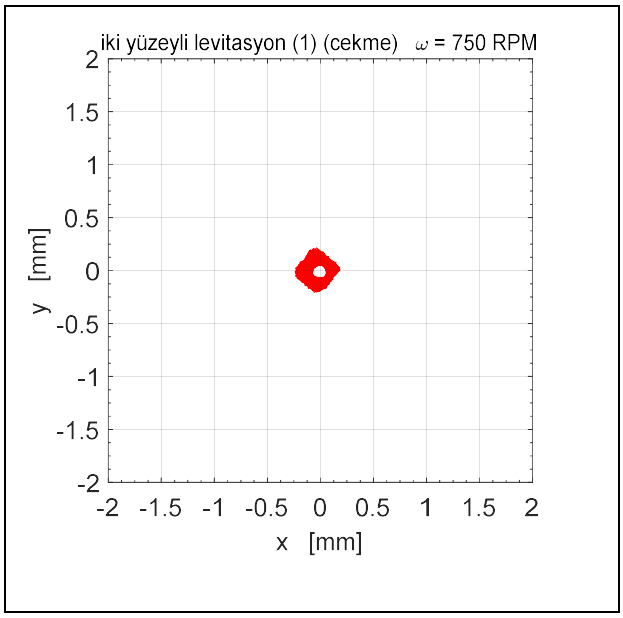


Şekil 5.20: Süperiletken manyetik levitasyonlu volan-rotor sisteminin döndürme testi.

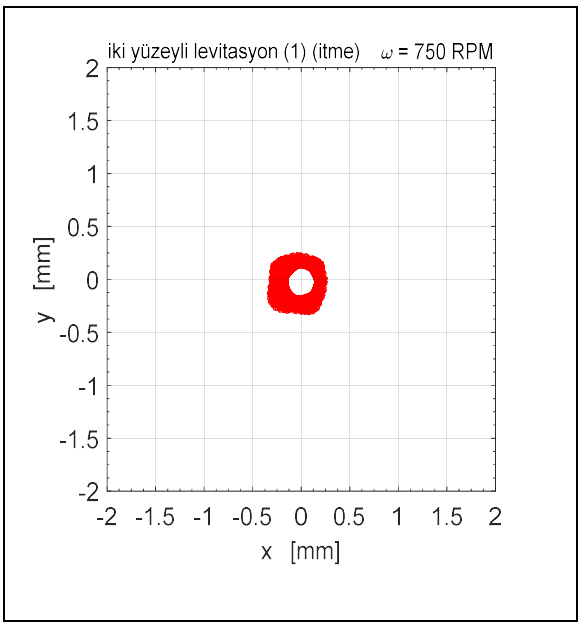
Tablo 5.3'te verilen tüm konfigürasyonlar için Rotorun ölçülen radyal yer değiştirme değerleri aynı düzlemde çizilebilir. Bu tür bir gösterim rotorun yörüngesi (orbit) olarak adlandırılır ve döndürme esnasında rotorun merkez ekseninin anlık konumunu gösterir. Farklı sabit mıknatıs kombinasyonları ile levite olan volanın dönme testlerinde, rotorun radyal deplasmanları ölçüldü ve 750 RPM dönme hızında rotorun yörüngeleri elde edildi. Küçük yörünge çapı büyük katılık değerleri ilgilidir ve yörünge sonuçları şekiller Şekiller 5.21-5.27 arasında verilmiştir [9].



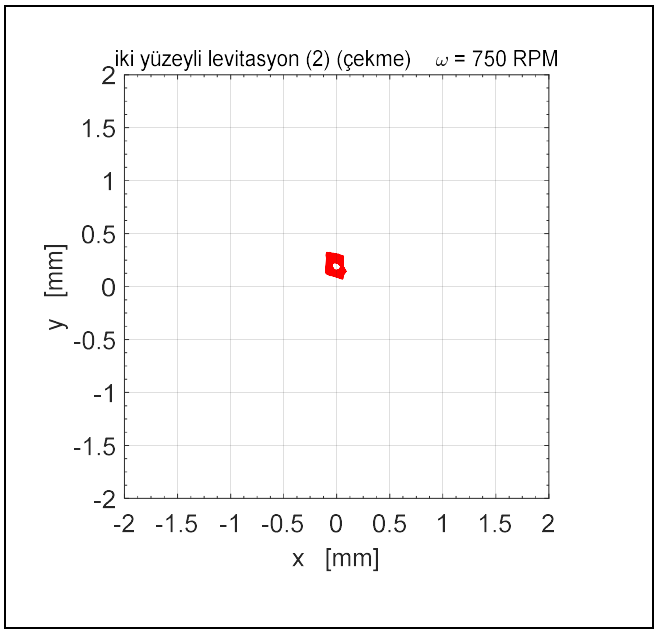
Şekil 5.21: Deney 18 - Tek yüzeyli levitasyon rotor yörüngesi.



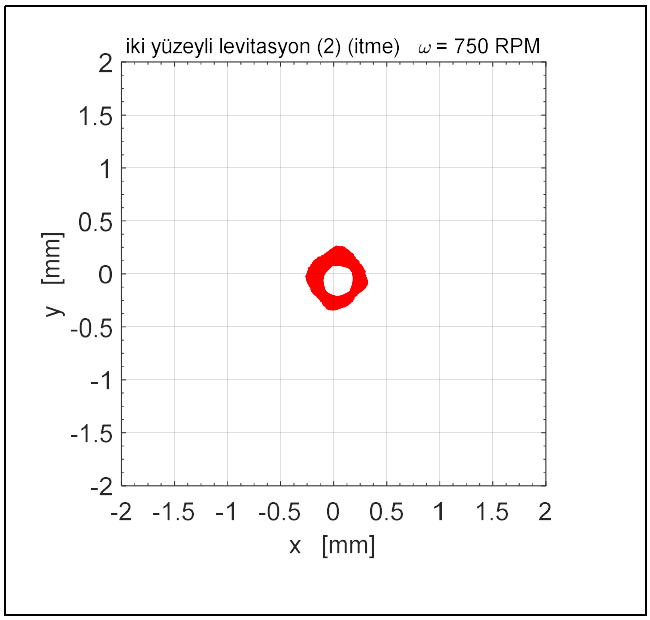
Şekil 5.22: Deney 19 - İki yüzeyli levitasyon (1) çekme kutup yönlü rotor yörüngesi.



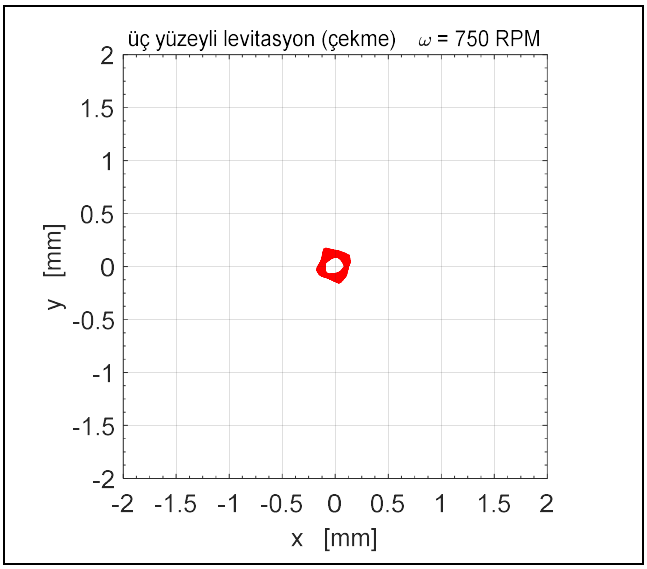
Şekil 5.23: Deney 20 - İki yüzeyli levitasyon (1) itme kutup yönlü rotor yörüngesi.



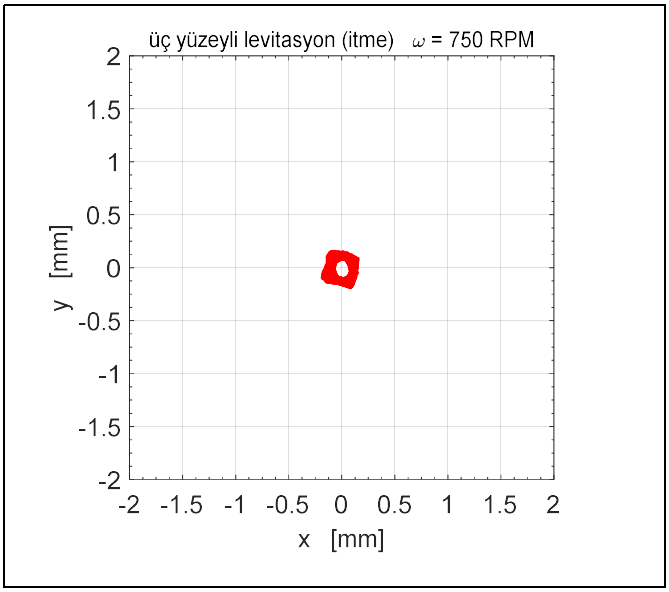
Şekil 5.24: Deney 21 - İki yüzeyli levitasyon (2) çekme kutup yönlü rotor yörüngesi.



Şekil 5.25: Deney 22 - İki yüzeyli levitasyon (2) itme kutup yönlü rotor yörüngesi.



Şekil 5.26: Deney 23 - Üç yüzeyli levitasyon çekme kutup yönlü rotor yörüngesi.



Şekil 5.27: Deney 24 - Üç yüzeyli levitasyon itme kutup yönlü rotor yörüngesi.

6. DOĞAL FREKANS ANALİZİ

Modal analiz yöntemi, ölçülen titreşim verilerinden sisteme ait doğal frekans, sönüm kayıp faktörü ve modal sabit gibi değerlerin elde edilme işlemidir. Bu işlemde uygulanacak yöntem ölçülen verilerin zaman ya da frekans düzleminde olmasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Mekanik ve yapısal sistemler tek serbestlik dereceli (SDOF) veya çok serbestlik dereceli (MDOF) sistemler olarak modellenebilirler. Bunun yanında çok serbestlik dereceli sistemler de tek serbestlik dereceli sistemlerin toplamı şeklinde modellenebilmektedir. Bu yaklaşım deneysel olarak elde edilen frekans cevap fonksiyonlarının tahmininde de kullanılmaktadır. Ölçülen cevap fonksiyonları tek ya da çok serbestlik dereceli sistemlere benzetilmeye çalışılmaktadır.

Tek serbestlik dereceli yaklaşım metodunda hızlı cevap alımı ve kolay uygulanabilir olması sebebiyle en çok kullanılan yöntem, "tepe seçme" yöntemidir [27]. Bu yöntem "yarı-güç yöntemi" olarak da bilinir. Yöntemde modal parametreler reseptanstaki bir rezonans frekansında yeterince geniş bir bantta yapılan analiz ile elde edilir.

Çok serbestlik dereceli yaklaşımda ise en çok kullanılan yöntem eğri geçirme yöntemidir. Deneysel olarak elde edilen frekans cevap fonksiyonlarına, farklı yapıdaki matematiksel ifadelerle yakınsanmaya çalışılır. Genellikle rasyonel kesir polinomları veya karmaşık üstel fonksiyonlar gibi eğri yapıları kullanılır. Numerik işlemlerle polinom katsayıları belirlenir ve bu katsayılar ile modal parametreler arasında bağlantı kurulur.

Bu bölümde rotorun frekans cevap fonksiyonları darbe testi ile deneysel olarak elde edilerek üç serbestlik dereceli modal modeli matematiksel olarak oluşturulmuştur. Uygulanan yöntemin doğruluğu doğal frekansları analitik olarak bilinen bir ankastre kiriş için gösterilmiştir [18]. Simetri testleri ve anti-rezonans gibi yöntemlerle de ölçümlerin güvenilirliği test edilmiştir. Farklı polarizasyon durumlarında çok serbestlik dereceli yaklaşım metodu kullanılarak rotor frekans cevap fonksiyonlarının benzetimi gerçekleştirilmiştir.

6.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistem (SDOF) Yaklaşımı

Kütle, sönüm ve yay elemanları ile modellenen bir sistemin harmonik dış zorlanma altındaki frekans cevap fonksiyonu aşağıdaki şeklidedir.

$$\alpha(\omega)=\frac{X(\omega)}{F(\omega)}=\frac{1}{k-\omega^2 m+j\omega c} \tag{6.1}$$

Burada *k*, *m* ve *c* sırasıyla sistemin katılık, kütle ve sönüm değerleridir. Bu oran ayrıca reseptans olarak da bilinir. Yukarıdaki denklem modal parametreler cinsinden yazılabilir.

$$\alpha(\omega)=\frac{1/m}{\omega_0^{\,2}-\omega^2+2j\omega\omega_0\zeta} \tag{6.2}$$

Burada ω_0 tek serbestlik dereceli sistemi doğal frekansı, ζ ise viskoz sönüm oranıdır. Birden çok mod sayısına sahip bir sistem, yukarıda verilen tek serbestlik dereceli sistem özellikleri kullanılarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\alpha(\omega)=\sum_{n=1}^{N}\frac{A_r}{\omega_n^{\,2}-\omega^2+2j\omega\omega_n\zeta_n} \tag{6.3}$$

Bu yaklaşımda her bir rezonans frekansı, tek bir serbestlik dereceli sistemi ifade ediyormuş gibi düşünülür ve diğer frekansların bu moda etkileri göz ardı edilir. Bu yöntem "yarı güç" yöntemi olarak da bilinmektedir. Rezonans noktalarının birbirinden yeterince uzak olduğu ve az sönüm içeren sistemlerde hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Yöntemin uygulanışı aşağıdaki gibi prosedüre edilebilir [28].

Doğal frekanslar: Cevap fonksiyonunun maksimum noktalarından her bir rezonans frekansı belirlenir.

$$\alpha_{maks}=\left|\alpha_n(\omega_n)\right|_{maks} \tag{6.4}$$

Sönüm oranı: Merkez frekansı ω_n olan bandın alt ve üst frekans değerleri belirlenir.

$$\zeta_r = \frac{\omega_b^{\ 2} - \omega_a^{\ 2}}{4\omega_n^{\ 2}} \tag{6.5}$$

ω_a ve ω_b frekanslarının genlikleri $\frac{\alpha_{maks}}{\sqrt{2}}$ şeklindedir.

Modal Sabit**:** Tek serbestlik dereceli sistemden

$$A_r = 2\alpha_{maks}\zeta_n\omega_n^{\ 2} \tag{6.6}$$

6.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistem (MDOF) Yaklaşımı

Bu yaklaşımda rasyonel kesir polinomları kullanılarak deneysel olarak elde edilen FRF değerleri için eğri geçirme işlemi gerçekleştirilir. Pay ve payda dereceleri sırası ile m ve n olmak üzere sistem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\alpha(\omega) = \left.\frac{\sum_{k=0}^{m} a_k s^k}{\sum_{k=0}^{n} b_k s^k}\right|_{s=j\omega} \tag{6.7}$$

Bu yaklaşımda referans [29]'da verilen karmaşık dik polinomlar oluşturularak rasyonel kesir katsayıları elde edilir. Daha sonra bu değerlere bağlı sönüm ve modal parametreler elde edilir.

Sistem reseptans cevabı dik polinomlar cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\alpha(\omega_i) = \left.\frac{\sum_{k=0}^{m} c_k \phi_{i,k}^{\ +}}{\sum_{k=0}^{n} d_k \theta_{i,k}^{\ +}}\right|_{s=j\omega} \quad (i = 1,\ldots,L) \tag{6.8}$$

Burada $\phi_{i,k}^{+}$ ve $\theta_{i,k}^{+}$ fonksiyonları pay ve payda dik fonksiyonlarının sağ yarı fonksiyonları olarak adlandırılır. Dik fonksiyonlar, rasyonel kesir katsayıları cinsinden aşağıdan verilmiştir.

$$\begin{aligned}
&\phi_{i,0} = a_0 \\
&\phi_{i,1} = a_1\left(j\omega_i\right) \\
&\phi_{i,2} = a_2\left(j\omega_i\right) + a_3\left(j\omega_i\right)^2 \\
&\phi_{i,3} = a_4\left(j\omega_i\right) + a_5\left(j\omega_i\right)^3 \\
&\vdots
\end{aligned} \tag{6.9}$$

Herhangi bir frekans değerindeki hata analitik ve ölçülen FRF değerleri arasındaki fark şeklinde tanımlanabilir.

$$e_i = a_k\left(j\omega_i\right)^k - h_i\left[\sum_{k=0}^{n} b_k\left(j\omega_i\right)^k + \left(j\omega_i\right)^n\right] \tag{6.10}$$

Burada h_i ilgili frekansta ölçülen FRF değeridir. Hatanın karesi kriteri ise aşağıdaki gibidir.

$$J = \sum_{i=1}^{L} e_i^* e_i = \left\{E^*\right\}^T \left\{E^*\right\} \tag{6.11}$$

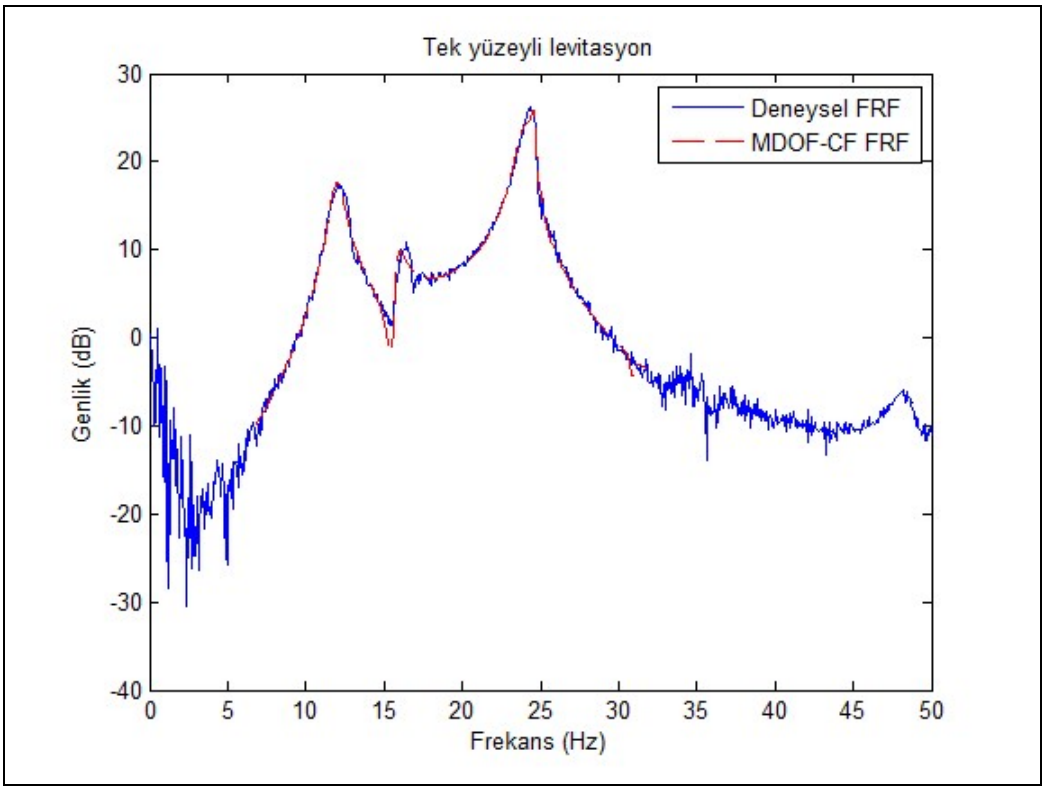
6.3. Deneysel Modal Analiz Çalışması

• Süperiletken Levitasyonlu Volan Modal Analizi

Tekli ve çoklu yüzey süperiletken levitasyon durumları için sabit mıknatısların farklı kutup koşulları da göz önüne alınarak volan-rotor üzerinde modal analizi çalışılmıştır. Elde edilen frekans değerleri deneysel olarak tespit edilen yay katsayısı değerleri ile orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Tek yüzeyli levitasyon durumundaki frekans cevabı ve uydurulan eğri Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Elde edilen modal parametreler ise Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1: Tek Yüzeyli Levitasyon (Sadece SM-2 Durumu) Frekans ve Modal Parametre Değerleri.

	MDOF Doğal Frekanslar (Hz)	MDOF Viskoz Sönüm	MDOF Modal Sabit
Radyal yönde	11.9904	0.0396	86.5615
Dönme yönünde	15.8291	0.0189	22.7543
Eksenel yönde	24.5917	0.0070	105.8357



Şekil 6.1: Tek yüzeyli levitasyon SM-2 durumu deneysel ve eğri uydurma FRF cevabı.

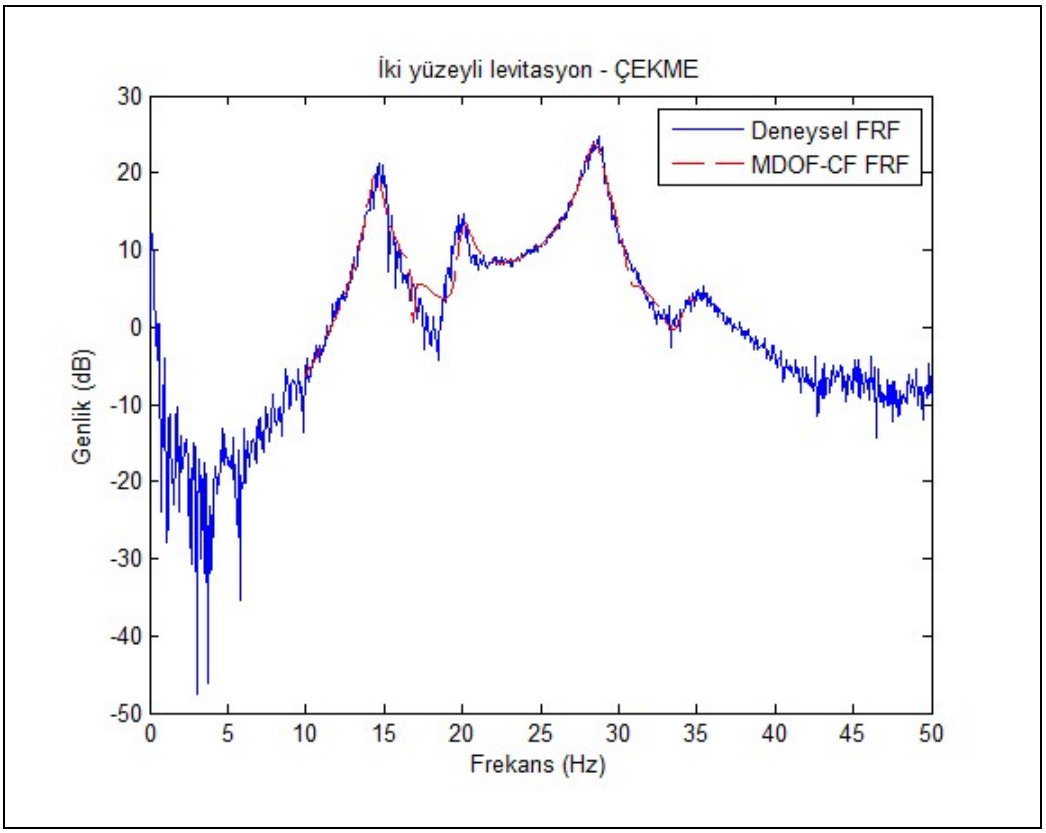
Elde edilen modal parametreler denklem (6.3)'de yerine yazıldığında sistem cevabı aşağıdaki denklem (6.12)'deki yapı ile tanımlanabilir.

$$\alpha_{tek}(\omega)=\frac{86.5615}{4\pi^2(11.9904)^2-\omega^2+4\pi j\omega(11.9904)0.0396}+\frac{22.7543}{4\pi^2(15.8291)^2-\omega^2+4\pi j\omega(15.8291)(0.0189)}-\frac{105.8357}{4\pi^2(24.5917)^2-\omega^2+4\pi j\omega(24.5917)(0.0070)} \tag{6.12}$$

İki yüzeyli levitasyon (SM-1,SM-2 çekme) durumundaki frekans cevabı ve uydurulan eğri Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Elde edilen modal parametreler ise Tablo 6.2'da verilmiştir. Tek yüzeyli levitasyon durumuyla kıyaslandığında artan katılık değerleri ile birlikte frekans cevaplarında bir ötelenme söz konusudur.

Tablo 6.2: İki Yüzeyli Levitasyon (SM-1,SM-2 Çekme) Frekans ve Modal Parametreler Değerleri.

	MDOF Doğal Frekanslar (Hz)	MDOF Viskoz Sönüm	MDOF Modal Sabit
Radyal yönde	14.4567	0.0301	124.2801
Dönme yönünde	20.0593	0.0176	49.1123
Eksenel yönde	28.4841	0.0212	549.2424



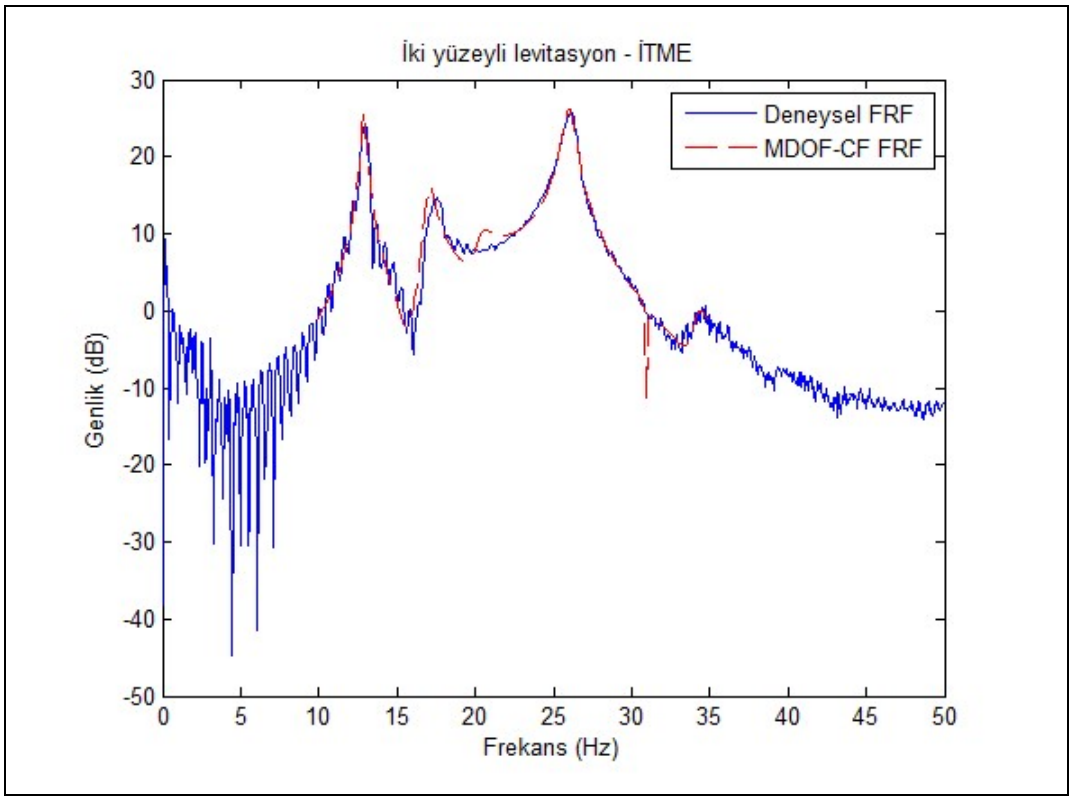
Şekil 6.2: İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1,SM-2 çekme)deneysel ve eğri uydurma FRF cevabı.

$$\alpha_{2m-çekme}(\omega)=\frac{124.2801}{4\pi^2(14.4567)^2-\omega^2+4\pi j\omega(14.4567)(0.0301)}+\frac{49.1123}{4\pi^2(20.0593)^2-\omega^2+4\pi j\omega(120.0593)(0.0176)}-\frac{549.2424}{4\pi^2(28.4841)^2-\omega^2+4\pi j\omega(28.4841)(0.0212)} \quad (6.13)$$

İki yüzeyli levitasyon (SM-1,SM-2 itme) durumundaki frekans cevabı ve uydurulan eğri Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Elde edilen modal parametreler ise Tablo 6.3'te verilmiştir. İki yüzeyli levitasyon durumu (SM-1,SM-2 çekme) durumuyla kıyaslandığında rezonans frekansları radyal ve dönme modları için az bir miktar düştüğü görülmektedir. Eksenel yönde ise 2.45 Hz'lik bir azalış söz konusu olmuştur.

Tablo 6.3: İki Yüzeyli Levitasyon (SM-1,SM-2 İtme) Frekans ve Modal Parametreler Değerleri.

	MDOF Doğal Frekanslar (Hz)	MDOF Viskoz Sönüm	MDOF Modal Sabit
Radyal yönde	12.8669	0.0118	74.9186
Dönme yönünde	14.1241	0.0202	66.8147
Eksenel yönde	26.0066	0.0142	389.1556



Şekil 6.3: İki yüzeyli Levitasyon durumu (SM-1,SM-2 itme) deneysel ve eğri uydurma FRF cevabı.

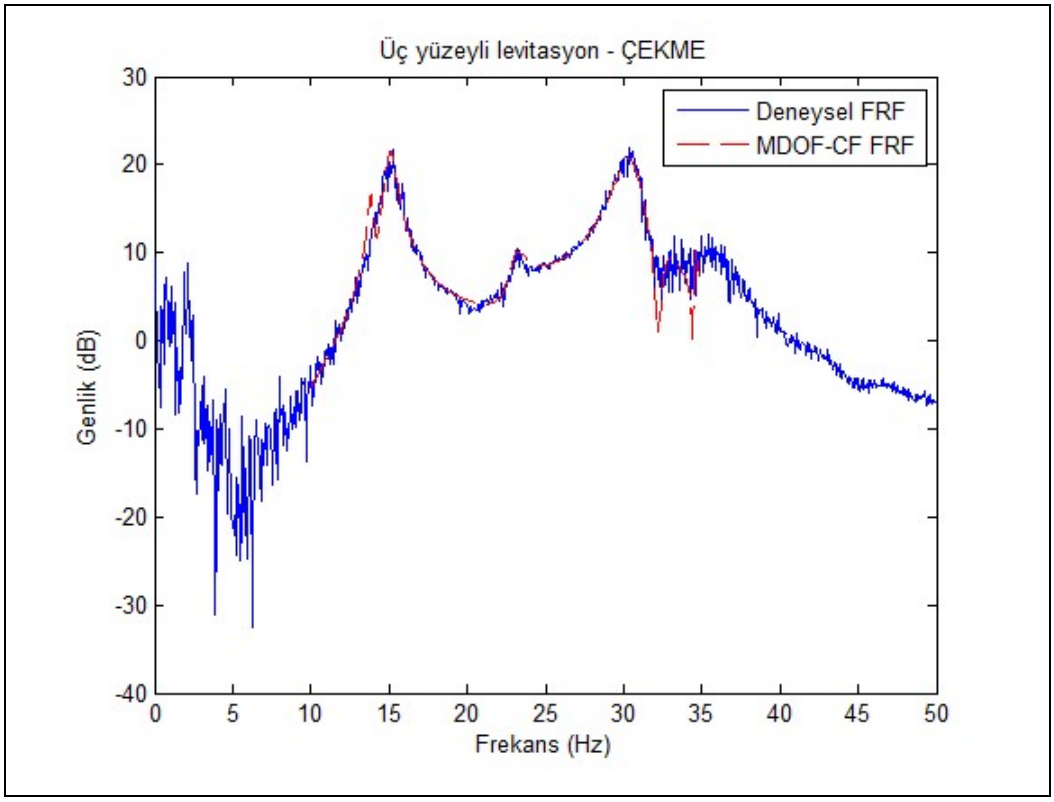
Elde edilen modal parametreler denklem (6.3)'de yerine yazıldığında sistem cevabı aşağıdaki denklem (6.14)'deki yapı ile tanımlanabilir.

$$\begin{aligned}\alpha_{2m-itme}(\omega) = & \frac{74.9186}{4\pi^2(12.8669)^2 - \omega^2 + 4\pi j\omega(12.8669)(0.0118)} \\ & + \frac{66.8147}{4\pi^2(14.1241)^2 - \omega^2 + 4\pi j\omega(14.1241)(0.0202)} \\ & - \frac{389.1556}{4\pi^2(26.0066)^2 - \omega^2 + 4\pi j\omega(26.0066)(0.0142)}\end{aligned} \tag{6.14}$$

Üç yüzeyli levitasyon durumu (çekme) durumundaki frekans cevabı ve uydurulan eğri Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Elde edilen modal parametreler ise Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4: Üç Yüzeyli Levitasyon Durumu (Çekme) Frekans ve Modal Parametreler Değerleri.

	MDOF Doğal Frekanslar (Hz)	MDOF Viskoz Sönüm	MDOF Modal Sabit
Radyal yönde	15.1488	0.0227	110.4703
Dönme yönünde	22.7062	0.0201	31.1176
Eksenel yönde	30.5401	0.0273	636.3364



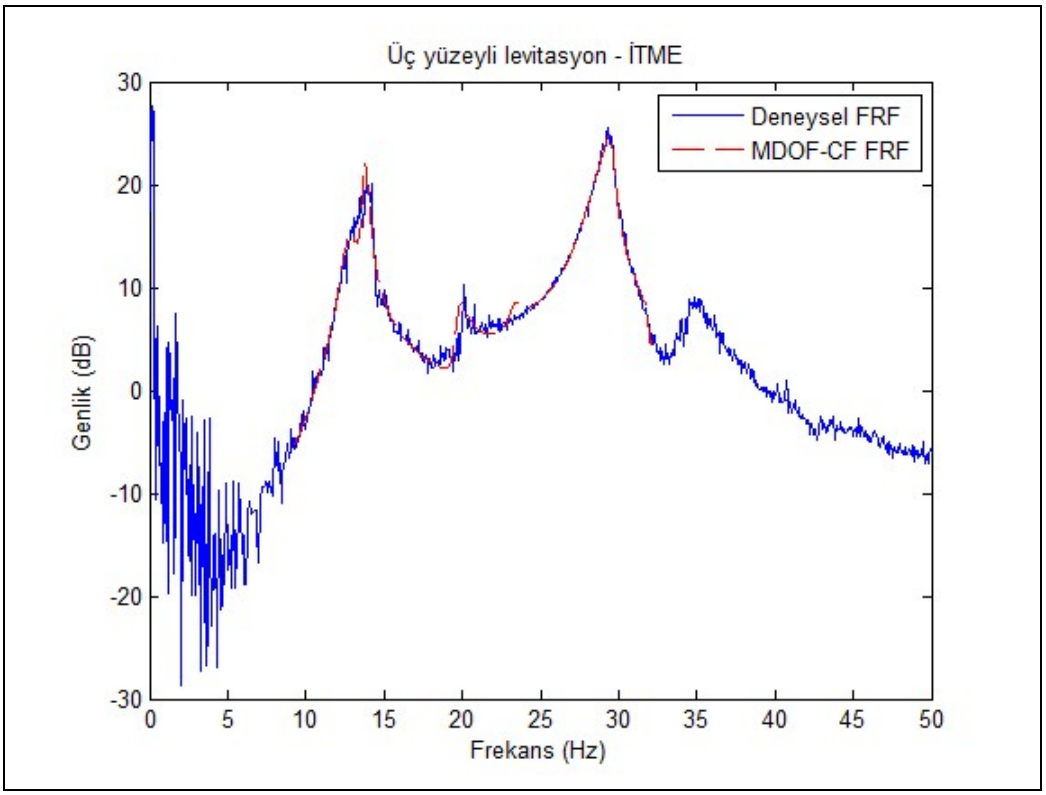
Şekil 6.4: Üç yüzeyli Levitasyon durumu (çekme) deneysel ve eğri uydurma FRF cevabı.

$$\alpha_{3m-çekme}(\omega) = \frac{110.4703}{4\pi^2(15.1488)^2 - \omega^2 + 4\pi j\omega(15.1488)(0.0227)} + \frac{31.1176}{4\pi^2(22.7062)^2 - \omega^2 + 4\pi j\omega(22.7062)(0.0201)} - \frac{636.3364}{4\pi^2(30.5401)^2 - \omega^2 + 4\pi j\omega(30.5401)(0.0273)} \tag{6.15}$$

Üç yüzeyli levitasyon durumu (itme) durumundaki frekans cevabı ve uydurulan eğri Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Elde edilen modal parametreler ise Tablo 6.5'de verilmiştir.

Tablo 6.5: Üç Yüzeyli Levitasyon Durumu (İtme) Frekans ve Modal Parametreler Değerleri.

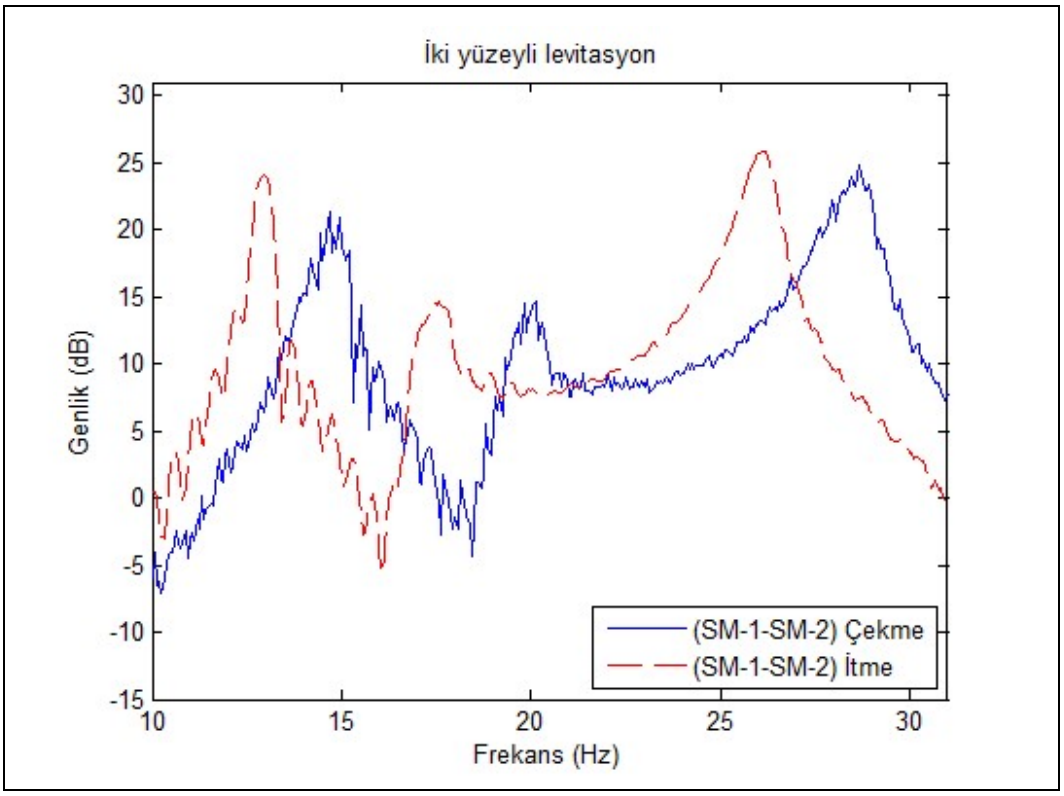
	MDOF Doğal Frekanslar (Hz)	MDOF Viskoz Sönüm	MDOF Modal Sabit
Radyal yönde	13.8366	0.0067	25.9776
Dönme yönünde	19.7971	0.0203	19.9225
Eksenel yönde	29.4660	0.0078	111.0446



Şekil 6.5: Üç yüzeyli Levitasyon durumu (itme) deneysel ve eğri uydurma FRF cevabı.

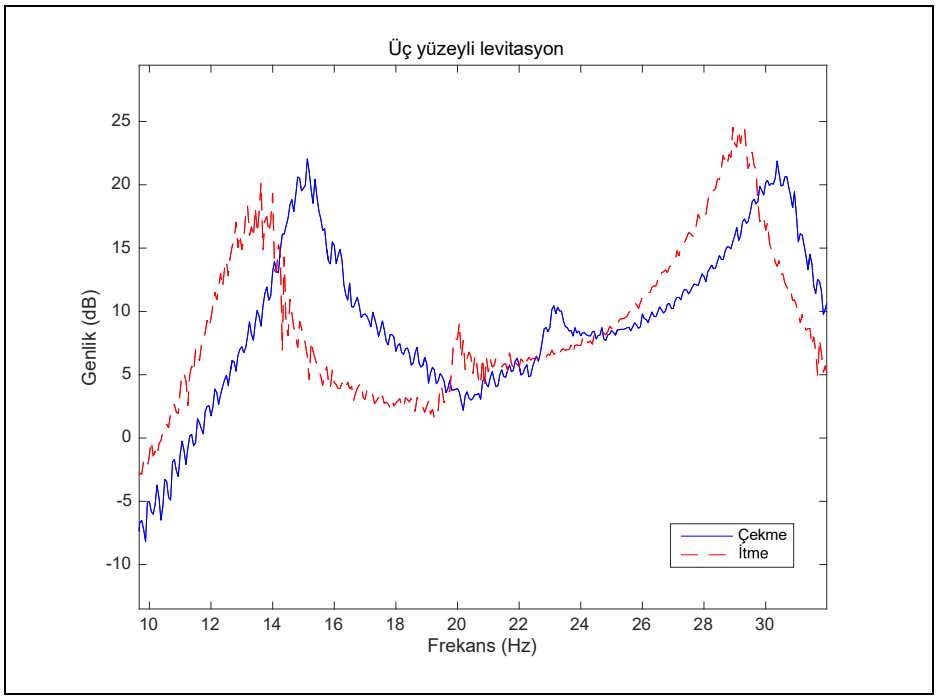
$$\alpha_{3m-itme}(\omega)=\frac{25.9776}{4\pi^2(13.8366)^2-\omega^2+4\pi j\omega(13.8366)(0.0067)}+\frac{19.9225}{4\pi^2(19.7971)^2-\omega^2+4\pi j\omega(19.7971)(0.0203)}-\frac{111.0446}{4\pi^2(29.4660)^2-\omega^2+4\pi j\omega(29.4660)(0.0078)} \tag{6.16}$$

Üst ve orta (SM1-SM2) sabit mıknatısların dikkate alındığı iki yüzeyli levitasyon durumunda çekme polarizasyonun eksenel ve radyal yönde daha yüksek katılık değeri sağladığı Bölüm 4'te deneysel olarak elde edilmişti. Bu durum Şekil 6.6'da sistem frekans cevabında da doğrulanmıştır.



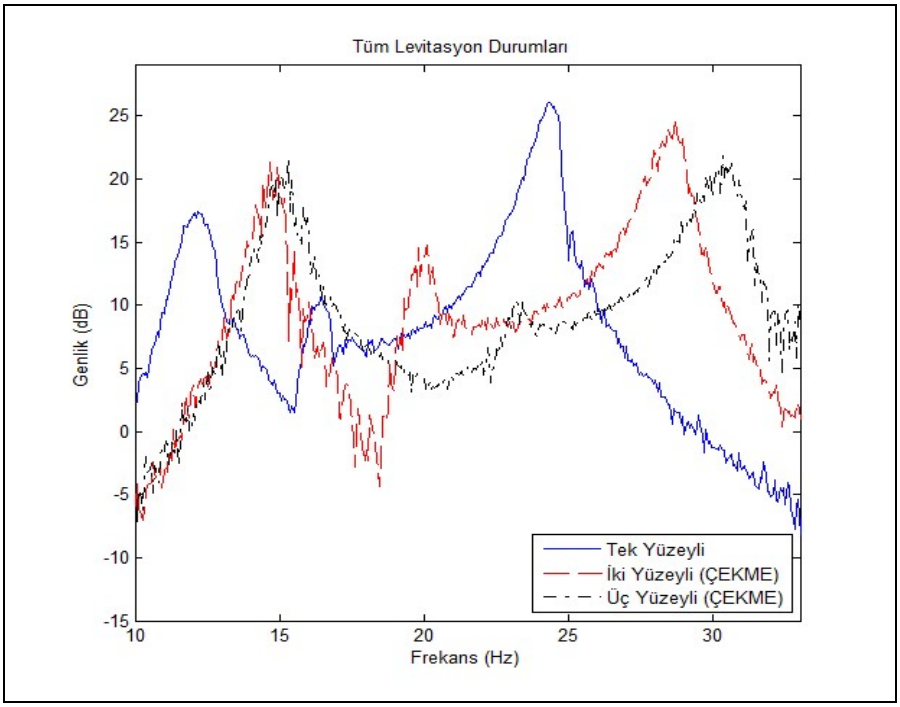
Şekil 6.6: İki yüzeyli levitasyon durumu (SM1-SM2) deneysel frekans cevapları mukayesesi.

İki yüzeyli durumda elde edilen sonuca benzer şekilde çekme polarizasyonu üç yüzeyli levitasyon durumunda da doğal frekanslar daha yüksek değerlerde oluşmaktadır. Bu durum Şekil 6.7'de görülmektedir.



Şekil 6.7: Üç yüzeyli levitasyon durumu (SM1-SM2-SM3) deneysel frekans cevapları mukayesesi.

Üç farklı levitasyon durumu Şekil 6.8'de bir arada verilmiştir. Üç yüzeyli çekme polarizasyonlu kalıcı mıknatıs durumunun karşılaştırıldığı diğer durumlara göre rezonans frekansı yüksek çıkmaktadır.



Şekil 6.8: Tüm levitasyon durumlarının deneysel frekans cevapları mukayesesi.

7. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Tez çalışması kapsamında çalışılan süperiletken manyetik levitasyonlu volan sisteminin araştırma sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Referans [6]'da sunulan halka şeklinde bir süperiletkenin ortasında yer alan bir sabit mıknatıs için donmuş görüntü yaklaşımı esaslı modelleme çalışma kapsamında genişletilmiştir. İlk olarak sabit mıknatıs ortasına bir rotor sabitlenmiş kabul edilerek modelleme tekrarlanmış ve yay katsayısı değerleri eksenel ve radyal bileşenlerine ayrıştırılarak modelleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları analiz edilerek referans makalelerde yayınlanmıştır [19]-[21].

Tek bir halka süperiletkenin iç yüzeyi, üst yüzeyi ve alt yüzeyi levitasyon yüzeyleri olacak şekilde sabit mıknatısların yerleştirildiği özgün bir volan tasarımı gerçekleştirilerek çok yüzeyli levitasyon sistemi oluşturulmuştur.

Süperiletken manyetik yataklı volan sistemi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Değişik sabit mıknatıs kombinasyonları ve farklı kutup düzenlemeleri için levitasyon kuvveti ölçümleri elde edilmiştir. Her bir deney farklı olmak üzere; eksenel ölçümler için 7, radyal ölçümler için 10 ve döndürme ölçümleri için 7 deney yapılmış ve sonuçları analiz edilmiştir.

Eksenel doğrultudaki ve radyal doğrultudaki deneysel levitasyon kuvvetleri her bir sabit mıknatıs düzenlemesi için elde edilmiştir. Elde edilen deneysel verilerden yay katsayısı değerleri eksenel ve radyal doğrultular için hesaplanmıştır. Donmuş görüntü modellemesinden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Genel olarak deneysel verilerin hesaplanan verilere yakın çıktığı gözlemlenmiştir.

Deneysel eksenel levitasyon kuvvetlerinin volan ağırlığını karşılayan tek sabit mıknatıs levitasyonu ve üç sabit mıknatıs levitasyonu çekme-çekme durumu için karşılaştırıldığında üçlü durumda levitasyon kuvvetlerinde %44 artış sağlandığı görülmüştür. Radyal levitasyon kuvvetlerinde tek sabit mıknatıs levitasyonu ve üç sabit mıknatıs levitasyonu çekme-çekme durumu için karşılaştırıldığında üçlü durumda levitasyon kuvvetlerinde %58 artış sağlandığı görülmüştür. Halka süperiletkenin içinde yataklanan 40 mm çaplı orta mıknatısın çapı ve malzemesi değişmeden 10 mm, 15 mm ve 20 mm yükseklikteki varyasyonları için deneyler yapılmıştır. Yüksekliği 10 mm'den 20 mm'ye artırdığımızda orta mıknatıs ile süperiletken arasındaki radyal levitasyon kuvvetinde kuvvetlerinde %53 artış

sağlandığı görülmüştür. Yani süperiletkenin kritik manyetik alan değeri aşılmaması kaydıyla sabit mıknatıslar tarafından uygulanan manyetik alan arttıkça süperiletken-mıknatıs arasındaki etkileşimin parabolik olarak arttığı tespit edilmiştir. Analitik modelin frekans cevapları gerçek modele yakınsak olup üç yüzeyli levitasyon çekme durumu için doğal frakanslarda radyal yönde %6 dönme yönünde %18 eksenel yönde ise %1,6 fark gözlemlenmiştir.

Volan sisteminin döndürme testleri gerçekleştirilmiştir. Volanın kararlı şekilde döndüğü gözlemlenmiştir. Hava jeti kullanılarak sağlanan döndürme testinde 750 d/d da elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Volan sisteminin hareket denklemleri elde edilmiştir. Durum uzayı denklemlerine dönüşümü yapılarak rotorun dinamik özellikleri Matlab-Simulink ortamında incelenmiştir. Deneysel sonuçlar ve analitik model karşılaştırılarak modelin gerçek sisteme yakınsadığı görülmüştür.

Deneysel olarak volan sisteminin levitasyonu esnasında doğal frekans analizi yapılmıştır. Farklı sabit mıknatıs konfigürasyonlarında yay katsayısı değişiminin doğal frekanslara olan etkisi araştırılmıştır.

Çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen çok yüzeyli levitasyon volan sistemindeki levitasyon kuvvetlerindeki artış çalışmanın somut sonuçları olarak verilebilir. Ayrıca sabit mıknatısların kutuplarına bağlı kuvvet artışı mühendislik sistemlerindeki uygulamalarda kullanılabilecek bir bilgi olarak ortaya çıkmaktadır. Çok yüzeyli süperiletken levitasyon yaklaşımı sadece volan sistemlerinde değil aynı zamanda Maglev sistemlerinde de kullanılabilecek yaklaşımdır.

KAYNAKLAR

[1] Werfel F. N., Floegel-Delor U., Riedel T., Rothfeld R., Wippich D., Goebel B., Reiner G., Wehlau N., (2010), "Towards high-capacity HTS flywheel system", IEEE Transactions on Applied Superconductivity., 20(4), 2272–2275.

[2] Sotelo G. G., Dias D. H. N., Andrade R., Stephan R. M., Del-Valle N., Sanchez A., Navau C., Chen D. X., (2011), "Experimental and theoretical levitation forces in a superconducting bearing for a real-scale Maglev system", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21(5), 3532–3540.

[3] Tang J., Fang J., (2012), "Superconducting magnetic bearings and active magnetic bearings in attitude control and energy storage flywheel for spacecraft", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 22, 6.

[4] Werfel F. N., Floegel-Delor U., Rothfeld R., Riedel T., Goebel B., Wippich D., Schirrmeister P., (2012), "Superconductor bearings, flywheels and transportation", Superconductor Science and Technology, 25, 014007.

[5] Cansiz A., Hull J. R., Gundogdu O., (2005) "Translational and rotational dynamic analysis of a superconducting levitation system", Superconductor Science and Technology, 18, 990-996.

[6] Sivrioglu S., Cinar Y., (2007), "Levitation analysis of a ring shaped permanent magnet-high temperature superconductor vertical bearing system", Superconductor Science and Technology, 20, 559–563.

[7] Cansız A., (2003), "Correlation between free oscillation frequency and stiffness in high temperature superconducting bearings," Physics C, 390, 356–362.

[8] Hull J. R., Cansiz A., (1999), "Vertical and lateral forces between a permanent magnet and a high-temperature superconductor," Journal of Applied Physics, 86(11), 6396–6404.

[9] Del-Valle N., Sanchez A., Navau C., Chen D. X., (2008), "A theoretical study of the influence of superconductor and magnet dimensions on the levitation force and stability of maglev systems", Superconductor Science and Technology, 21, 125008.

[10] Kaper H. G., Nordborg H., (2001), "The frozen-field approximation and the Ginzburg–Landau equations of superconductivity", Journal of Engineering Mathematics, 39, 221–240.

[11] Tang J. Q., Fang J. C., Ge S. S., (2012), "Roles of superconducting magnetic bearings and active magnetic bearings in attitude control and energy storage flywheel", Physics C, 483, 178–185.

[12] Patel A., (2013), “Pulsed Field Magnetization of Composite Superconducting Bulks for Magnetic Bearing Applications”, Doktora Tezi, University of Cambridge.

[13] Walter H., Bock J., Frohne C., Schippl K., May H., Canders W. R., Kummeth P., Nick W., Neumueller H. W., (2006), “First heavy load bearing for industrial application with shaft loads up to 10 kN”, Journal of Physics: Conference Series, 43, 995-8.

[14] Coombs T. A., Cansiz A., Campbell A. M., (2002), “A superconducting thrust-bearing system for an energy storage flywheel”, Superconductor Science and Technology, 15, 831-835.

[15] Strasik M., Hull J. R., Mittleider J. A., Gonder J. F., Johnson P. E., McCrary K. E., McIver C. R., (2010), “An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings”, Superconductor Science and Technology, 23, 034021(5s).

[16] Mitsuda H., Inoue A., Nakaya B., Komori M., (2009), “Improvement of energy storage flywheel system with SMB and PMB and its performances”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19, 2091-2094.

[17] Murakami K., Komori M., Mitsuda H., Inoue A., (2007), “Design of an energy storage flywheel system using permanent magnet bearing (PMB) and superconducting magnetic bearing (SMB)”, Cryogenics, 47, 272-277.

[18] Sivrioğlu S., Başaran S., Yıldız A. S., (2016), “Süperiletken Manyetik Yataklarda Donmuş Görüntü Esaslı Katılık Modellemesi Ve Deneysel Çalışması,” Proje No: 213M581(Tübitak 1001), Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu – TÜBİTAK, Türkiye.

[19] Sivrioglu S., Basaran S., (2015), “A dynamical stiffness evaluation model for a ring-shaped superconductor magnetic bearing system”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 25(4), 1-7.

[20] Basaran S., Sivrioglu S., (2017), “Radial stiffness improvement of a flywheel system using multisurface superconducting levitation”, Superconductor Science and Technology, 30(3).

[21] Sivrioglu S., Basaran S., Yıldız A. S., (2016), “Multisurface HTS-PM levitation for a flywheel system”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26(8).

[22] Sivrioglu S., Basaran S., Yıldız A. S., Memis B., (2016), “Flywheel system levitation using multi surface ring HTS-PM setup”, The 5th International Conference on Superconductivity and Magnetism- ICSM2016, Fethiye, Turkey, 19-23 April.

[23] Kim S. B., Matsunaga J., Fujii Y., Onodera H., (2013), “The levitation characteristics of ferromagnetic materials by ring-shaped HTS bulks with two trapped field distributions”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(3), 4603204.

[24] Werfel F. N., Floegel-Delor U., Riedel T., Rothfeld R., Wippich D., Goebel B., Kummeth P., Neumueller H.-W., Nick W., (2003), “Progress toward 500 kg HTS Bearings”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 13, 2173–2178.

[25] Hull J. R., (2000), “Effect of permanent-magnet irregularities in levitation force measurements”, Superconductor Science and Technology, 13, 854–856.

[26] Lee H., Iwasa Y., (2001), “Levitation force in YBCO/Nd–Fe–B permanent magnet system”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 11, 1805-1807.

[27] Seçgin A., (2013), "Bir uç-değer tabanlı modelleme ile belirsiz yapıların titreşim cevap sınırlarının tahmin edilmesi", Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(1), 15-23.

[28] He J., Fu Z. F., (2001), “Modal Analysis”, 1st Edition, Butterworth Heinemann.

[29] Richardson M. H., Formenti, D. L., (1982), “Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials”, 1. IMAC Conference, Orlando, FL, USA, November.

[30] Meissner W., Ochsenfeld R. (1933), “Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit”, Naturwissenschaften, 21(44), 787–788.

[31] Web 1, (2018), http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspirational/resources/4.5.1.pdf, (Erişim Tarihi: 10.05.2018).

[32] Kittel C., (1986), “Introduction to Solid State Physics”, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc.

[33] Xu K. X., Wu D. J., Jiao Y. L., Zheng M. H., (2016), “A fully superconducting bearing system for flywheel applications”, Superconductor Science and Technology, 29, 064001.

[34] Komori M., Hamasaki T., (1998), “Improvement of Dynamics for a superconducting magnetic bearing (SMB) system”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 8, 158–63.

[35] Komori M., Hamasaki T., (2001), “Improvement and evaluation of bearing stiffness in high Tc superconducting magnetic bearing”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 11, 1677–80.

[36] Ma K. B., Postrekhin Y. V., Chu W. K., (2003), “Superconductor and magnet levitation devices”, Review of Scientific Instruments, 74, 12.

[37] Johansen T. H., Yang Z. J., Bratsberg H., Helgesen G., Skjeltorp A. T., (1991), "Lateral force on a magnet placed above a planar YBa2Cu3Ox superconductor", Applied Physics Letters 58, 179–81.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılı Giresun doğumlu Bayram Memiş, 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne başlayarak, 2013 yılında başarıyla mezun olmuştur. 2014 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında lisansüstü eğitimine başlamıştır. 2015 yılında Prof. Dr. Selim Sivrioğlu danışmanlığındaki 213M581 no'lu Süperiletken Manyetik Yataklarda Donmuş Görüntü Esaslı Katılık Modellemesi Ve Deneysel Çalışması projesinde proje asistanı olarak görev yapmıştır. 2016 yılından itibaren otomotiv sektöründe ürün geliştirme ve araştırma-geliştirme alanlarında çalışmaktadır. Tez kapsamında yapılan yayınlar:

- ICSM 2016- "Flywheel System Levitation Using Multi Surface Ring HTS-PM Setup" The 5th International Conference on Superconductivity and Magnetism-Fethiye.