

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜBÜLER LİNEER İNDÜKSİYON
MOTORLARININ MANYETİK LEVİTASYON
TRENLERİNE UYGULANMASI VE
KONTROLÜ

Uğur HASIRCI
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE
2011



DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.....30.05.2011 tarih ve 2011/18 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 03/06/2011
tarihinde tez savunma sınavı yapılan Uğur HASIRCI'nın tez çalışması Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

: Prof. Dr. Muammer KALYON

ÜYE

: Doç. Dr. Recep DEMİRCİ

ÜYE

: Doç. Dr. Haluk GÖRGÜN

ÜYE

: Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : TÜBÜLER LINEER İNDÜKSİYON MOTORLARININ
MANYETİK LEVİTASYON TRENLERİNE
UYGULANMASI VE KONTROLÜ

YAZAR ADI : Uğur HASIRCI

Artan nüfus, otomobil ve hava taşımacılığına, hızlı ve güvenli alternatifleri gerekli kılmıştır. Olası alternatifler içinde manyetik levitasyon trenleri güvenilir, çevre dostu, az bakım gerektiren bir toplu taşıma aracı olarak iyi bir çözüm sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında manyetik levitasyon trenleri için yeni bir lineer motor tasarlanmış ve bu motor, tasarım parametrelerine dayalı olarak üretilip gerçek zamanlı testleri yapılmıştır. Ayrıca bu motor için model bazlı doğrusal olmayan bir kontrolör tasarlanmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar, önerilen sistemin manyetik levitasyon trenlerinde ihtiyaç duyulan üç temel kuvveti tek bir motorla üretmesi ve bunlardan levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin kontrolüne duyulan gereksinimi ortadan kaldırması nedeniyle, mevcut manyetik levitasyon trenlerine bir alternatif vasfı teşkil ettiğini göstermektedir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS : APPLICATION OF TUBULAR LINEAR INDUCTION MOTORS TO MAGNETIC LEVITATION SYSTEMS AND CONTROL OF THE SYSTEM

AUTHOR : Uğur HASIRCI

Growing population dictates some powerful alternatives to land and air transportation. Among the possible alternatives, magnetic levitation trains present a reliable, environmental-friendly, and low maintenance required solution.

In this study, a new linear motor for magnetic levitation trains is designed, implemented and real-time tested. In addition, a model-based nonlinear controller for the motor is designed.

Experimental results show that the proposed system presents an alternative to classical magnetic levitation trains since the system produces three forces required in a maglev system by using only one motor and eliminates the necessity to control of levitation and guidance forces.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasına danışmanlık eden değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya,

Çalışmanın çeşitli aşamalarında önerileri ile destek veren Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU, Dr. Şeref Naci ENGİN ve Doç. Dr. Recep DEMİRCİ'ye,

İlgili taahhüt hükümleri gereği, Yurt İçi Doktora Burs Programı'ndan burs sağlayan TÜBİTAK'a,

Bir şekilde emeği geçen herkese,

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Manyetik Levitasyon Trenleri için Yeni Bir Tasarım Modeli	2
1.2. Tezin Amacı ve Hipotezler	5
2. KLASİK MAGLEV SİSTEMLERİ	6
2.1. Levitasyon	6
2.1.1. Elektromanyetik Süspansiyon (EMS)	6
2.1.2. Elektrodinamik Süspansiyon (EDS)	7
2.2. İtme	9
2.3. Kılavuz	10
3. ELEKTROMANYETİK FIRLATICILAR	12
4. ÖNERİLEN SİSTEM: ANALİZ VE TASARIM	17
4.1. Analiz	17
4.2. Tasarım	23
5. GERÇEKLEME VE TEST	29
5.1. Gerçekleme	29
5.2. Test	32
5.2.1. Statik Stabilitate	34

	<u>Sayfa</u>
5.2.2. Dinamik Stabilite	41
5.2.3. Farklı Parametreler İçin Statik Stabilite	43
6. KONTROL	45
7. UYDU SİSTEMLERİ İÇİN YERDEN-YÖRÜNGEYE FIRLATICI TASARIMI	61
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
EK : KAYNAK KODLAR	73
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

β	:	Dalga sayısı
τ	:	Kutup adımı
ω	:	Açısal frekans
φ	:	Faz açısı
α	:	Kovan açıklık (yarık) açısı
μ_0	:	Boşluğun manyetik geçirgenliği
ξ_k	:	Kovan için kullanılan malzemenin (alüminyum) yoğunluğunu
γ	:	İletkenlik
σ	:	Kaçak indüktans katsayısı
θ	:	Kovandaki ısı artışı
Γ	:	Minimum gücün tepe gücüne oranı
ψ_d	:	Referans akı profili
λ_{ds}	:	d -eksenindeki rotor akı bileşeni
λ_{qs}	:	q -eksenindeki rotor akı bileşeni
a	:	İvme
a_s	:	Kovanın et kalınlığı
A	:	Amper
B	:	Viskoz sürtünme katsayısı Manyetik alan
B_r	:	Akı yoğunluğu radyal bileşeni
c	:	Birim hacim için ısı artış katsayısı
c_k	:	Kovanın et kalınlığını
c_n	:	Namlu bobinlerinin kalınlığı
E_k	:	Kinetik enerji
f	:	Frekans
f_r	:	Levitasyon kuvveti (radyal kuvvet)
f_z	:	İtme kuvveti
F	:	Kuvvet
F_L	:	Yük kuvveti
g	:	Hava boşluğu

g_e	:	Etkin hava boşluğu
h	:	Kutup adımı
H	:	Henry
i_{ds}	:	d -eksenindeki stator akım bileşeni
i_{qs}	:	q -eksenindeki stator akım bileşeni
I_1	:	Birinci dereceden modifiye edilmiş Bessel fonksiyonu
I_p	:	Primer akımı
K	:	Kelvin
K_f	:	Kuvvet sabiti
K_p	:	Primer akım yoğunluğu
$K_{p,max}$:	Akım yoğunluğu tepe değeri
K_s	:	Sekonder akım yoğunluğu
kA	:	Kiloamper
km	:	Kilometre
kV	:	Kilovolt
kW	:	Kilowatt
l_k	:	Kovanın toplam uzunluğu
L_m	:	Manyetizasyon indüktansı
L_r	:	Faz başına rotor indüktansı
L_s	:	Faz başına stator indüktansı
M	:	Hareket eden kısmın toplam kütlesi
m	:	Metre
mH	:	Milihenry
n	:	Namlunun parça sayısı
n_k	:	Kovan parçası sayısı
N	:	Sipir sayısı
N_t	:	Primer sipir sayısı
p	:	Kutup sayısı
P	:	Güç
R_r	:	Faz başına rotor direnci
R_s	:	Faz başına stator direnci
r_d	:	Tahrik bobinlerinin yarıçapı
r_n^d	:	Namlunun dış yarıçapı

r_p	:	Primer bobinleri yarıçapı
r_s	:	Kovan yarıçapı
r_k^{ort}	:	Kovanın ortalama yarıçapı
r_k^i	:	Kovanın iç yarıçapı
s	:	Kayma
s_c	:	Kritik kayma
sn	:	Saniye
T_r	:	Rotor zaman sabiti
v	:	Armatür oranı
V	:	Volt
V	:	Lineer hız
		Namlu ağzındaki hız
V_d	:	d -eksenindeki stator voltajı
V_q	:	q -eksenindeki stator voltajı
V_s	:	Senkron hız
V_0	:	Başlangıç hızı
W	:	Watt
W_k	:	Her bir kovan parçasının ağırlığı
W_t	:	Kovanın toplam ağırlığı
z	:	Yön değişkeni

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kuvvetler	2
1.2. Önerilen sistemin yol üzerinden enerjilendirilen konfigürasyonu	4
1.3. Önerilen sistemin araç üzerinden enerjilendirilen konfigürasyonu	4
2.1. Elektromanyetik Süspansiyon	6
2.2. Elektrodinamik Süspansiyon	8
3.1. Basit bir raylı silah	13
3.2. Tek parçalı bobinli silah	14
3.3. Çok parçalı bobinli silah	14
3.4. Lineer İndüksiyon Fırlatıcı (LIL)	16
4.1. Fiziksel büyüklükler	24
4.2. Tahrik bobinlerinden bir tanesinin görünüşü	28
5.1. Kullanılan alüminyum borunun hazırlanması	29
5.2. Kovan	30
5.3. Kullanılan alüminyum bobinlerden bir tanesi	31
5.4. Alüminyum tahrik bobini	31
5.5. Alüminyum tahrik bobini ve kovan	32
5.6. Kullanılan ivme sensörü	33
5.7. İvme sensörünün konumu	34
5.8. Statik stabilite için ivme-zaman grafiği	35
5.9. Statik stabilite için akım-zaman grafiği	36
5.10. Bobinin profil görünüşü	37
5.11. Bakır tahrik bobinlerinden bir tanesi	38
5.12. Alüminyum kovan	39
5.13. Yol üzerinden enerjilendirilen konfigürasyon	40
5.14. Akım profili	40
5.15. Dinamik stabilite için ivme ölçümleri	42
5.16. Bakır tahrik bobini	44
5.17. Bakır tahrik bobini için ivme ölçümleri	44
6.1. Referans hız profili	57
6.2. Benzetim blok diyagramı	58

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.3. Hız takip hatasının zamana göre değişimi	59
6.4. Kontrol giriş sinyallerinin zamana göre değişimi	60
7.1. Önerilen sistem	63

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Kovanın özellikleri	28
4.2. Tahrik bobinlerinin özellikleri	28
5.1. Bakır tahrik bobinlerinin özellikleri	38
5.2. Kovanın özellikleri	39
5.3. Tahrik bobinlerinin karşılaştırılması	43
7.1. Uyduların kütlelerine göre sınıflandırılması	61
7.2. Tasarım spesifikasyonları	64

1. GİRİŞ

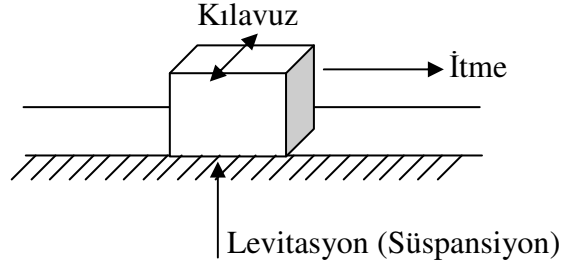
Artan nüfus, otomobil ve hava taşımacılığına, hızlı ve güvenli alternatifleri gerekli kılmıştır. Olası alternatifler içinde manyetik levitasyon (maglev) trenleri güvenilir, çevre dostu, az bakım gerektiren bir toplu taşıma aracı olarak iyi bir çözüm sunmaktadır.

Geleneksel trenler raylar üzerinde hareket eden tekerlekler aracılığıyla hareket ettirilirlir. Bu durum, raylar ve tekerlekler arasında oldukça yüksek değere sahip bir sürtünme kuvveti oluşmasına neden olur. Bu sürtünme kuvveti çok fazla enerji kaybını beraberinde getirir. Buna ek olarak, bu sürtünme rahatsız edici derecede gürültüye de sebep olur, düzenli bakımı ve bazı ekipmanların düzenli değişimini zorunlu kılar. Manyetik levitasyon trenlerinde tekerleğin yerini elektromıknatıslar alır. Bu elektromıknatıslar, treni bir kılavuz yol üzerinde kaldırarak, herhangi bir mekanik temas olmaksızın hareket ettirirler. Böyle bir tasarım sürtünmenin beraberinde getirdiği olumsuz etkileri ortadan kaldırır. Buna ek olarak trenin çok daha yüksek hızlara çıkabilmesini sağlar. Maglev trenleri, tasarımı gereği asla raydan çıkmaz, negatif ve pozitif yönde ivmelenmesi oldukça kolaydır. Ancak bunlara ek olarak zayıf yönleri de kolaylıkla görülebilir. Örneğin itme kuvvetinin manyetik indüksiyon yoluyla üretilmesi, yolcu kompartımanındaki manyetik alanın varlığını dikte eder. Buna mukabil, uygun bir ekranlama ile bu problem aşılabılır. Trenin ve yükün kütlesi arttıkça levitasyon için gereken enerji miktarı da artar. Bu durum, maglev trenlerinin yük taşımacılığı için çok ideal olmadığını gösterir. Bunlara ek olarak, yüksek değerdeki akımlar anahtarlamayı güçleştirir ve yüksek kablo kesitleri elektromekanik gerçeklemeyi zorlaştırır.

İlk manyetik levitasyon treni, 1934 yılında Alman Hermann Kemper tarafından patentlenmiş ve üretilmiştir [Kemper, 1934]. Yirminci yüzyılın ikinci yarısında hızlı bir gelişme gösteren araştırmalar sonucunda, geniş çaplı toplu taşımacılığın yapıldığı ilk maglev treni 21. yüzyılın başında, 2003 yılında Shanghai'de (Çin) üretilmiştir [Lee vd., 2006]. Günümüzde ise (2011) Almanya ve Japonya'nın manyetik levitasyon trenlerine ilişkin teknolojiye öncülük ettiği görülmektedir. Buna ek olarak İngiltere, Fransa, Kanada, İsviçre gibi ülkelerin de maglev trenleri geliştirdikleri ve

ürettikleri bilinmektedir. Ancak Amerika Birleşik Devletleri'nin maglev trenlerin yaygınlaştırılması konusunda isteksiz olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi teknik ya da ekonomik sebeplerden çok, enerji yönetim politikaları ile açıklanabilir.

Tezin amacının ve hipotezlerinin açıklanması amacıyla, bu kısımda tez çalışması kapsamında önerilen sistem konsept düzeyinde tanıtılmasından önce, düz bir hat üzerinde doğrusal olarak hareket eden bir cisimde oluşabilecek temel kuvvetler aşağıda tanımlanmıştır.



Şekil 1.1. Kuvvetler

Levitasyon ya da diğer adıyla süspansiyon kuvveti, cismi yüzeyden belli bir miktar havaya kaldıran kuvettir. İtme kuvveti, cisme ivme kazandıran ve takip edilmesi istenen yol boyunca hareket ettiren kuvettir. Kılavuz kuvvet ise cismin önceden belirlenmiş bir yolda gitmesini sağlayan ve bu yoldan çıkmasını engelleyen kuvettir. Bu kuvvetlerin her birinin üretilmesi ve kontrolü için çok farklı alternatifler mevcuttur ve bu yöntemler 2. bölümde açıklanacaktır. Genel olarak, klasik manyetik levitasyon sistemleri bu kuvvetlerin her birinin üretilmesi için, ayrı birer kuvvet üretici sistem (elektrik motoru, kalıcı mıknatıs, süperiletken sistemler) kullanırlar.

1.1. Manyetik Levitasyon Trenleri İçin Yeni Bir Tasarım Modeli

Bu bölümde, tez çalışması için üretilmesi planlanan manyetik levitasyon sisteminin konstrüksiyonundan bahsedilmiştir. Bu yeni sistem ilk defa 1993 yılında Zabar ve Levi tarafından tasarlanmış ve patentlenmiştir [Zabar ve Levi, 1993]. Ancak bu sistemin üretimi yapılmamış ve dolayısıyla dinamik modeli, kontrolü, üretim sürecindeki olası problemleri ve operasyon karakteristiği ortaya konulmamıştır. Bu

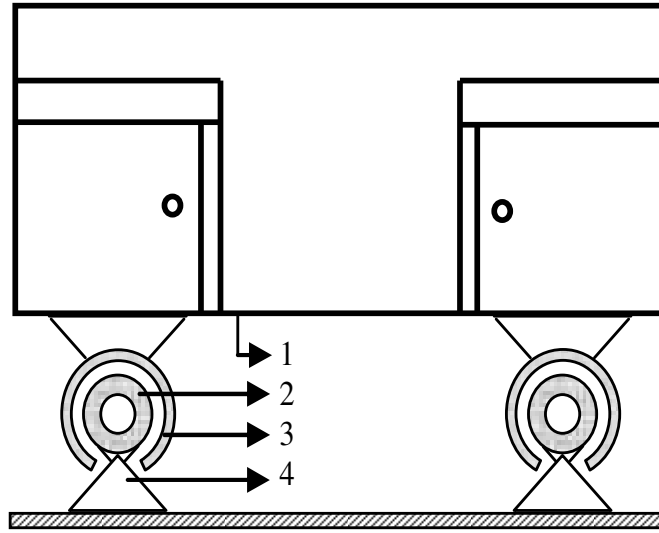
yeni sistemin temel üstünlükleri, silindirik yapıdaki lineer indüksiyon motoru kullanması sebebiyle kılavuz ve levitasyon için ayrı birer motora ihtiyaç duymaması, tüm kuvvetleri tek bir motorla üretmesi ve armatürün herhangi bir destek sistemine bağlı olarak hareket etmemesi nedeniyle sürtünme problemine sahip olmamasıdır. Zira sürtünme problemi, sistemde model belirsizlikleri yaratmakta ve ölçülemeyen doğrusal olmayan dinamikler oluşturmaktadır.

Sistemin diğer bir güçlü yanı hava nüveli olmasıdır. Çünkü bu özellik sistemin özellikle ilk yatırım maliyetini çok ciddi oranda azaltır. Ayrıca demir nüveli maglev sistemlerinde hava aralığı bir inç'in 3/8'inden fazla olmamalıdır [Zabar ve Levi, 1993]. Özellikle yüksek hızlarda bu boşluğu elde etmek zordur. Sistemin hava nüveli olması daha yüksek hava boşluğuna, yani ray ile araç arasında daha fazla mesafeye (birkaç inç) izin verir. Bu da fiziksel sürtünme, ark, erozyon, tahrip gibi riskleri azaltır. Sistemin asenkron modda çalışması diğer bir üstünlüğüdür. Zira senkron çalışma modunda, araç hızı ile güç kaynağının frekansı arasında kusursuz bir uyum bulunmalıdır ve bu gereklilik, yol boyunca ihtiyaç duyulan karmaşık güç şartlandırıcı sistemlerin kullanımını dikte eder [Zabar ve Levi, 1993]. Asenkron çalışma modu, piyasada ticari olarak satılan klasik güç kaynaklarının kullanımına olanak sağlar.

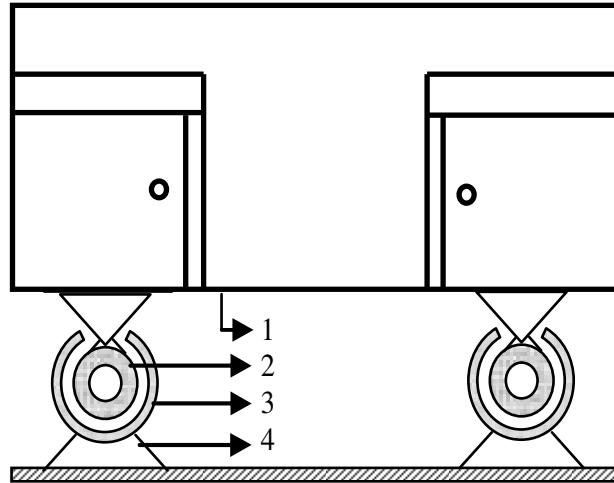
Sistemin primeri, silindirik selenoidler üzerine sarılmış koaksiyel bobin dizisinden oluşur. Primer parçalara bölünür ve bu parçalar çok fazlı AC sinyal ile beslenir. Böylece yürüyen manyetik dalga üretilir ve bu dalga sekonderle, sistemin sargı içermeyen pasif kısmıyla, etkileşimde bulunarak bu kısımda bir akım indüklenmesini sağlar. Manyetik alan içinde, içinden akım geçen iletken bir kuvvet indüklenir ve sekonder hareket etmeye başlar. Buradan anlaşılacağı üzere, sekonder, alüminyum gibi iletken bir malzemedir üretilmelidir. Şekil 1.2, bu sistemin temel bir konfigürasyonunu sunmaktadır.

Primer ile sekonderdeki yürüyen dalgalar arasındaki fark, yani kayma, sekonderde akım indükler. Primer ve sekonderdeki akımın etkileşimi, sekonderde bir kuvvet meydana getirir. Bu kuvvet, itme için kullanılan yatay bileşene ve levitasyon ile kılavuz için kullanılan, radyal merkezleyici iki bileşene sahiptir. Esasen bu motorlar için iki türlü konfigürasyon mevcuttur. Şekil 1.2'deki sistemde ray boyunca motor sargıları mevcuttur. Araç, sargı barındırmaz. Şekil 1.3'deki konfigürasyonda

ise araç üzerinde sargılar mevcuttur, yolda sargı yoktur. Açıkça görülebileceği üzere, bu konfigürasyonun maliyeti daha düşüktür. Daha az sargı gerektirir. Ancak buna mukabil verimi de düşüktür. Aynı değerde kuvveti üretmek için göreceli olarak daha fazla enerjiye ihtiyaç duyar.



Şekil 1.2. Önerilen sistemin yol üzerinden enerjilendirilen konfigürasyonu
(1- Araç, 2-Tahrik bobinleri, 3-Alüminyum kovan, 4-Destek)



Şekil 1.3. Önerilen sistemin araç üzerinden enerjilendirilen konfigürasyonu
(1- Araç, 2-Tahrik bobinleri, 3-Alüminyum kovan, 4-Destek)

Bu tasarımın yukarıda sıralanan güçlü yanları ve bazı ek güçlü özellikler şu şekilde özetlenebilir :

- İtme, levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin tek bir motorla üretilmesi
- Bu motorun, klasik indüksiyon motorlarının sahip olduğu zayıflıklarla baş edebilmesi. (Yüksek hava aralığı, sürtünme problemi barındırmaması vs.)
- Ticari olarak satılan güç kaynaklarıyla beslenebilmesi, karmaşık ve pahalı güç şartlandırıcılarına ihtiyaç duymaması
- Yüksek ivmelenmeye ve ani frenleme yeteneğine sahip olması.
- Yolcu ve personeli manyetik alanın zararlı etkilerinden koruyacak şekilde, primer ve sekonder arasında iyi bir elektromanyetik kapline sahip olması

1.2. Tezin Amacı ve Hipotezler

Burada önce tezin amacı açıklanmış, daha sonra tez çalışması için ortaya konan hipotezler sunularak tez çalışmasının bilimsel bilgi birikimine yapacağı olası katkılar vurgulanmıştır.

Tez çalışmasının en temel amacı, manyetik levitasyon trenleri için, mevcut klasik sistemlere kıyasla daha düşük maliyetli, tasarımı, üretimi ve kontrolü daha kolay olan yeni bir sistemin üretilmesi, test edilmesi ve kontrolünün yapılmasıdır. Daha önce vurgulandığı üzere, bu sistem fikrinsel bazda patentlenmiş ancak fiziksel olarak üretilmemiş ve patentte ortaya konulan iddialar deneysel olarak ispatlanmamıştır. Sistem fiziksel olarak üretildikten sonra, asenkron motor modelinin doğrusalsızlıklara sahip olması nedeniyle doğrusal olmayan bir kontrol sistemi tasarlanması amaçlanmaktadır. Araştırma sürecinin başında ortaya konan hipotezler;

- Yukarıda detayları açıklanan sistem, klasik manyetik levitasyon trenlerine göre daha basit ve çok daha gürbüz bir yapıya sahiptir.
- Tasarımın basitliğinden mütevellit, sistemin kontrolü de göreceli olarak daha kolaydır.
- Anılan sistem, mevcut manyetik levitasyon trenlerine iddialı bir alternatif teşkil eder.

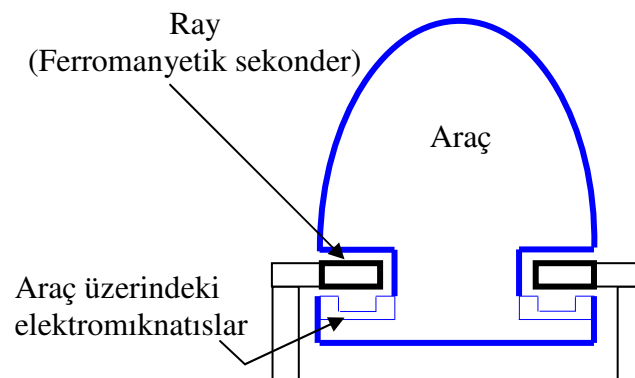
2. KLASİK MAGLEV SİSTEMLERİ

İlk bölümde anlatıldığı gibi, bir maglev sistemi üç temel kuvveti üretmelidir: Levitasyon, itme ve kılavuz kuvvetleri. Levitasyon ya da süspansiyon kuvveti, cisimi yüzeyden belli bir miktar havaya kaldıran kuvvettir. İtme kuvveti, cisme ivme kazandıran ve takip edilmesi istenen yol boyunca hareket ettiren kuvvettir. Kılavuz kuvvet ise cismin önceden belirlenmiş bir yolda gitmesini sağlayan ve bu yoldan (raydan) çıkmasını engelleyen kuvvettir. Bu kuvvetlerin her birinin üretilmesi ve kontrolü için çok farklı alternatifler mevcuttur. Bu nedenle aşağıda, her biri farklı başlıklar halinde açıklanmıştır. Bu yolla, konu ile ilgili literatürdeki mevcut yöntemler de tanıtılmaktadır.

2.1. Levitasyon

Levitasyon (süspansiyon) kuvveti, cisimi harekete geçiren itme kuvvetine normal (dik) konumlu olan ve cisimi yerden belli bir miktar yukarı kaldıran kuvvettir. Bir cismin levitasyonu ya da süspansiyonu ile, herhangi bir mekanik temas olmaksızın, bir cismin kararlı denge durumu kastedilir [Nasar ve Boldea, 1987]. Buradaki “kararlı denge” kavramı kastedilen ise, sistemin herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldığında tekrar eski durumuna dönmesidir. Manyetik levitasyon trenleri için genel olarak iki tür süspansiyondan bahsedilir:

2.1.1. Elektromanyetik Süspansiyon (EMS): Levitasyon, kılavuz yol ile araç üzerine konumlandırılmış elektromıknatıslar arasındaki çekim kuvveti ile elde edilir.



Şekil 2.1. Elektromanyetik Süspansiyon

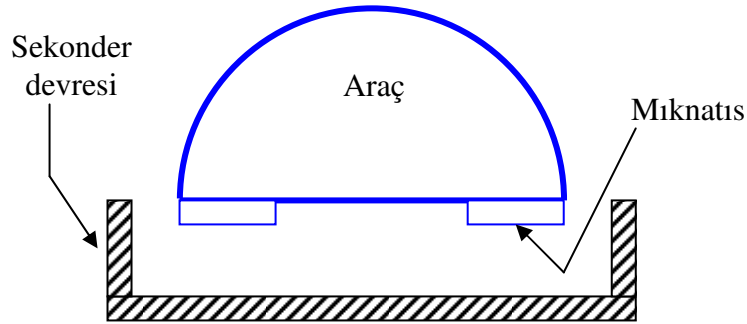
Bu metodoloji, levitasyon için çekme kuvveti kullanması ve bunun sonucu olarak manyetik devresinin karakteristiği nedeniyle kendi doğası gereği kararsızdır [Riches, 1988]. Kapalı çevrim kontrol sisteminin, mıknatıs akımını ayarlayarak sistemi kararlı hale getirmesi gerekir. Zaten bu metodolojide elektromıknatıs kullanılmasının temel sebebi de bu akım regülasyonu ihtiyacıdır. Bu nedenle EMS, ray ile elektromıknatıslar arasında küçük hava boşluklarına izin verir (10 mm) ve yüksek hızlarda bu hava boşluklarının kontrolü zordur. Ayrıca temas olasılığı nedeniyle yüksek hızlara erişmek de risklidir. Temel özelliklerinden biri sıfır hızda ya da düşük hızlarda levitasyon sağlayabilme yeteneğidir. Bu durum elektrodinamik süspansiyonda mümkün değildir. Son dönemde yapılan bazı çalışmalar, elektromanyetik süspansiyonda, klasik elektromıknatısların kullanımı yerine süperiletkenlerin kullanımının daha yüksek bir çekme kuvveti meydana getireceğini göstermiştir [Tsuchiya ve Ohsaki, 2000].

EMS için bugüne kadar geliştirilen kontrolörlerin çoğunda, bir boşluk sensörü aracılığıyla mıknatıs ile ray arasındaki hava boşluğunun uzunluğunu ölçüldüğü, bir ivmeölçer kullanarak da mıknatısın ivmesinin ölçüldüğü ve bu iki sinyalin kontrol sistemine giriş olarak kullanıldığı gözlenmektedir [Yamamura, 1976].

Araç üzerindeki mıknatıs, sekonderde (rayda) Eddy akımları üretir. Bu akım, levitasyon için gerekli olan çekme kuvvetini azaltır ve sürüklenme kuvveti (drag force) oluşturur. [Yamamura, 1976]'da, sürüklenme kuvvetinin ve çekme kuvvetinin hıza göre değişimi deneysel ve hesaplamalı olarak bulunmuş ve sonuçta elde edilen değerlere göre, çekme kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranının, EMS'nin düşük hızlarda da etkili bir şekilde çalışabileceğini ispatladığı görülmüştür.

2.1.2. Elektrodinamik Süspansiyon (EDS) : Levitasyon için EMS çekme kuvvetini kullanırken, EDS itme kuvvetini kullanır [Hogan ve Fink, 1975]. Bu itme kuvveti, araç üzerindeki süperiletken mıknatıslarla sekonder (ray) arasındaki etkileşimle üretilir. Dolayısıyla EMS'de olduğu gibi herhangi bir stabilite problemi yoktur. Sistem kendi doğası gereği kararlıdır. Bunun sonucu olarak herhangi bir mıknatıs akımı kontrol ihtiyacı da yoktur. Bu durum, mıknatıslarla ferromanyetik sekonder arasındaki mesafenin, EMS'ye kıyasla daha fazla olmasına olanak sağlar ve

mekanik temas riski azalır. Hava boşluğunun kontrolü için nisbeten daha düşük hassasiyete sahip, maliyeti daha ucuz bir kontrol sistemi kullanılabilir. Ayrıca hava boşluğunun fazla olması, ağır iklim koşullarında, yoğun kar yağın, buz oluşan bölgelerde çalışabilmeye olanak sağlar. Tüm bu sıralananlar, EDS'nin güçlü yanlarını temsil ederler. Ancak bu sistem, sekonderde yeteri kadar akım indüklenmesi ve levitasyonun sağlanması için, mıknatısın yüksek hızda hareket etmesine ihtiyaç duyar. Yani düşük hızlarda yeterli süspansiyonu sağlayamazlar. Bu nedenle belli bir hız değerinin altında (örneğin 100 km/saat) lastik bir tekerlek kullanılır. Bu durum, tekerlek kullanmanın beraberinde getirdiği bütün dezavantajları sisteme yansıtır. Aşağıdaki şekilde EDS'nin konfigürasyonu görülmektedir.



Şekil 2.2. Elektrodinamik Süspansiyon

Mıknatıs olarak kalıcı mıknatıs kullanılabilceği gibi süperiletken mıknatıs da kullanılabilir. Kalıcı mıknatıs kullanılırsa, herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmayacağı için yapı oldukça basit olur. Ancak kalıcı mıknatıslar sadece küçük çaplı sistemlerde kullanılabilir çünkü çok yüksek güçlü kalıcı mıknatıslar yoktur. Günümüzde Halbach Array gibi yeni tür kalıcı mıknatıs dizilimi maglev sistemlerinde (Inductrack, USA) kullanılmaktadır [Lee *vd.*, 2006]. Süperiletken mıknatıslarda ise yapı karmaşıktır. Ayrıca indüklenen akımlar tarafından üretilen ısıyı azaltmak için kullanılan likit helyumun söndürülmesi ve buharlaştırılması, operasyon süresince önemli bir problemdir [Andriollo *vd.*, 1995].

Literatürde, yukarıda sunulan iki levitasyon yönteminin hibrit bir formunu teşkil eden uygulamalar da görülmektedir [Onuki and Toda, 1993]. Burada amaç, özellikle EMS sistemlerde kalıcı mıknatıs kullanarak güç tüketimini azaltmaktır. Kalıcı durumda belirgin bir hava boşluğu değerinde, kalıcı mıknatısların ürettiği manyetik

alan aracı kaldırmak için yeterlidir ve elektromıknatısların hava boşluğunu kontrol etmek için harcadığı enerji değeri hemen hemen sıfırdır [Lee vd, 2006].

2.2. İtme

Maglev trenlerinde itme kuvveti bir lineer motor tarafından üretilir. Lineer motorlar, rotasyonel motorlara kıyasla yapı olarak daha basit ve daha dayanıklıdır [Sen, 1975]. Lineer motorlar, geometrileri gereği “kenar etkisi” [Lee, 2009] problemine sahiptir. Buna ek olarak hava aralığının artması verimi daha çok düşürür.

Maglev sistemlerinde genel olarak iki tür lineer motorun kullanıldığı gözlenmektedir. Bunlardan lineer asenkron motorun çalışma prensibi rotasyonel asenkron (indüksiyon) motorun çalışma prensibiyle aynıdır. Genel olarak asenkron motorların kontrolü senkron motora kıyasla nispeten daha kolaydır. Basit bir VVVF (Variable Voltage, Variable Frequency – Değişken Voltaj, Değişken Frekans) konvertör enerji kayıplarını azaltıp maglev trenin kontrolünü kolaylaştırır. Japon HSST maglev sistemi bu tarz bir motor ve bu tarz bir kontrolör kullanmaktadır. Ancak tüm bunların yanında, aynı lineer itme kuvvetini oluşturmak için gerekli akım, asenkron motorda daha yüksektir. Almanlar da maglev sistemleri üzerine çalışmaya başladıktan sonra 1974 yılına kadar bu motorları kullanmıştır [Mc Lean, 1988].

Asenkron motor kullanıldığında iki tür konfigürasyon söz konusudur. Kısa primer tipindeki lineer asenkron motorlarda stator sargıları aracın üzerindedir. Raylar ise rotor görevi görür. Uzun primer tipinde ise akımın indüklendiği rotor aracın kendisidir ve yol boyunca sarılan sargılar stator görevi görür. Bunun sonucu olarak, uzun primer tipinin ilk yatırım maliyeti daha fazladır. Çünkü yol boyunca sargılar oluşturmak ve bunların yalıtımını sağlamak masraflıdır. Buna mukabil verimleri çok daha yüksektir ve enerji tüketimleri kısa primer tipine göre daha düşüktür. Ayrıca kısa primer tipli asenkron motor kullanıldığında hız sınırı söz konusudur. Tüm bu nedenlerle, eğer maglev treni düşük veya orta hızda kullanılacaksa kısa primer tipi lineer indüksiyon motoru, yüksek hızlarda kullanılacaksa uzun primer tipi lineer asenkron motor daha kullanışlıdır.

İtme kuvveti oluşturmak için kullanılacak motora ilişkin ikinci bir alternatif, lineer senkron motordur. Senkron motorlarda rotorun mekanik hareketi, statordaki manyetik alanla senkronizasyon halindedir. Esasen ilk uygulamalar senkron motor için hız algılamayı ve dolayısıyla da bir sensörü zorunlu kılıyordu, ancak günümüz kontrol algoritmaları bu gereksinimi ortadan kaldırmış ve tıpkı asenkron motorda olduğu gibi senkron motorun da tüm türleri için sensörsüz kontrolü olanaklı kılmıştır [Chen, 2001]. Uzun ve kısa primer tipli konfigürasyonlar, tıpkı lineer asenkron motorda olduğu gibi senkron motorda da aynı karakteristik özelliklerle mevcuttur. Lineer senkron motorlar genellikle yüksek hız uygulamalarında tercih edilir, çünkü verimleri daha iyidir ve yüksek hız uygulamaları için en temel faktörlerden biri enerji tüketimidir. Ayrıca bu motorlar, daha yüksek hava aralıklarına da izin verirler. Primer akımları, indüksiyon motorlarına göre daha düşüktür [Mc Lean, 1988].

2.3. Kılavuz

Bu kuvvet, trenin raydan çıkmasını engelleyecek şekilde tasarlanır ve kontrol edilir. İtme kuvvetinden farklı olarak, süspansiyon kuvveti ile kılavuz kuvvet, tüm hız aralığı boyunca sabit değere sahip olmalıdır. Örneğin levitasyon için, tren ister hareket etsin ister dursun, raylarla araç arasındaki mesafeyi sabit tutmak için hızdan bağımsız bir kuvvete ihtiyaç duyulur. Bu nedenle de kılavuz kuvveti süspansiyon kuvveti ile benzer bir karakteristiğe sahiptir. Trenin yatayda yer değiştirmesini önlemek için, yine tıpkı süspansiyonda olduğu gibi bir itme kuvveti ya da bir çekme kuvveti üretilebilir. Çekme kuvveti yoluyla üretilen kılavuz kuvvet genellikle düşük hız uygulamaları için uygundur. Treni belirgin bir güzergah üzerinde merkezlemek ve yatayda yer değiştirmesini engellemek için, rayların kenarlarına sargı yerleştirilerek, tren gövdesinde merkezleyici bir kuvvet indüklenebilir, ya da bu sargıların yerine sabit mıknatıs da kullanılabilir [Lee, 2006]. ■

Tezin amacı, hipotezleri ve önerilen sistemin konsept düzeyinde tanıtılmasına ek olarak, karşılaştırma olanağı sağlaması açısından klasik maglev sistemleri de yukarıda tanıtılmıştır. Bu noktadan itibaren, tez çalışması kapsamında önerilen sistemin analizi, tasarımı, gerçekleştirilmesi, gerçek zamanlı testi ve önerilen sistem için tasarlanmış kontrolör tanıtılacaktır.

Önerilen sistem, oldukça gelişmiş ve olgun bir bilgi birikimine ve deneysel sonuçlara sahip Elektromanyetik Fırlatıcı teknolojisinden, bu teknoloji kapsamında önerilmiş ve üretilmiş özel bir tür olan Lineer İndüksiyon Fırlatıcı'dan esinlenmektedir. Bu nedenle Bölüm 3'de elektromanyetik fırlatıcılar ve özellikle de lineer indüksiyon fırlatıcı tanıtılmıştır. 4. Bölüm, önerilen sistemin analizini ve tasarımını, 5. Bölüm tasarlanan sistemin fabrikasyonunu ve gerçek zamanlı testini, 6. Bölüm ise bu sistem için tasarlanmış doğrusal olmayan, geriadımlamalı ve tam bilinen model bazlı bir kontrolörün tasarımını açıklamaktadır. Son bölüm ise elde edilen sonuçları değerlendirerek, bu kapsamda öneriler sunmaktadır.

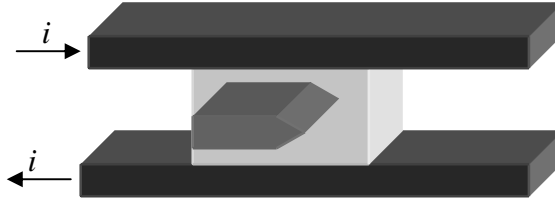
3. ELEKTROMANYETİK FIRLATICILAR

Elektromanyetik fırlatıcılar, ya da diğer adıyla elektromanyetik silahlar, sabit bir güç kaynağındaki elektromanyetik enerjiyi, bir mermi üzerinde kinetik enerjiye çeviren lineer indüksiyon motorlarının özel bir formudur. Günümüzde kullanılan elektromanyetik fırlatıcılar, temel olarak iki gruba ayrılır: Bobinli Silahlar ve Raylı Silahlar [Osher *vd.*, 1989]. Raylı silahlar, birkaç gramlık armatürleri 6.5 km/sn hıza eriştirecek kapasiteye ulaşmıştır [Hawke *vd.*, 1986]. Bobinli silahlar ise çok daha yüksek kütleli mermileri fırlatabilecek kapasiteye sahiptir.

Elektromanyetik fırlatıcıların icadı, 20. yüzyılın başında alınmış olan ilk patente dayanmaktadır. Norveçli fizikçi Kristian Birkeland, 1901 yılında 500 gramlık mermiyi 80 m/sn hıza eriştirecek bir “Elektromanyetik Top” üretmiş ve patentini almıştır [Egeland, 1989]. İkinci Dünya Savaşı yıllarında Alman, Japon ve Amerikalı araştırmacılar çok daha değişik konfigürasyonlara sahip fırlatıcılar üretmişlerdir. Ancak tüm bu çalışmaların, o günlerin beraberinde getirdiği teknolojik limitasyonlar nedeniyle, çok fazla başarıya ulaştığı söylenemez. Bu limitasyonlar; enerji depolama, materyal özellikleri ve elektronik anahtar teknolojileridir.

Günümüz teknolojileri bu limitasyonları büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Günümüzde megavolt ve megaamper akım ve gerilim değerlerine ve terawatt seviyesinde güç değerine sahip fırlatıcılar, yarıiletken güç elektroniği teknolojisinin de hızlı gelişimiyle kontrol edilebilmektedir. Ayrıca süperiletken ve kompozit malzemelerin üretimi, fırlatıcıların yüksek hızlara çıkabilmesine olanak sağlar. Son çeyrek yüzyılda, fırlatıcılar konusunda birçok araştırmacının çalıştığı ve konunun popüler bir boyut aldığı gözlenmektedir.

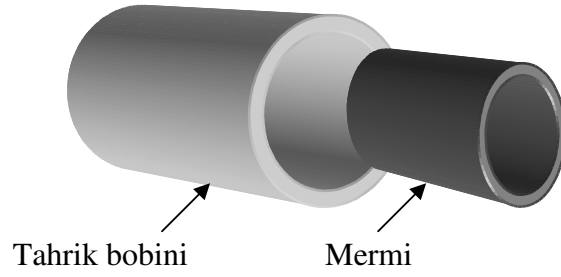
Bobinli silahların temel avantajı, mermi ve namlu üzerindeki mekanik stresin az olması nedeniyle yüksek kütleli mermileri fırlatabilme yeteneğidir. Raylı silahlarda bulunan sürtünme, bobinli silahlarda sözkonusu değildir ve bu yüzden aşınma oluşmaz. İhtiyaç duyulan akım ve gerilim seviyeleri, raylı silahlara göre çok daha düşüktür. Şekil 3.1, raylı silahlara ilişkin bir çizimi göstermektedir.



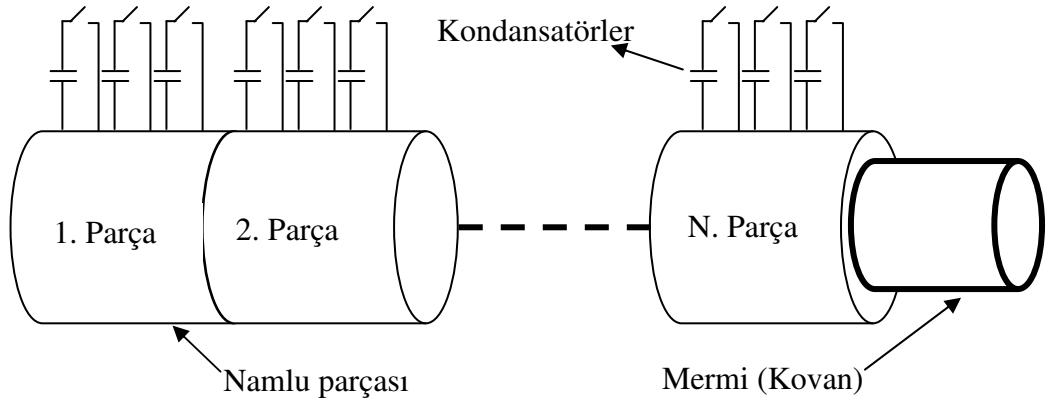
Şekil 3.1. Basit bir raylı silah

Yukarıda sıralanan nedenlerden dolayı, bobinli silahlar, savunma sistemleri için büyük önem ihtiva etmektedir. Çünkü savunma sistemlerine kullanılan mermiler yüksek kütlelerle sahiptir. Örneğin bir uçaksavar tasarımı gözönünde bulundurulduğunda, yüksek kütleli bir mermiyi yüksek hızda fırlatmak, herhangi bir barut ya da patlayıcıya gereksinim duymadan uçaksavarın fonksiyonunu yerine getirmesine yetecektir. Bir insansız hava aracının yörüngeye fırlatılması durumunda ise çok daha yüksek bir kütle söz konusudur. Tüm bu uygulama alanları için, kimyasal silahlar ve raylı fırlatıcılar oldukça zayıf bir çözüm sunmaktadır.

Bobinli silahların namluları tek bir bobinden yapılabileceği gibi, birbirinden bağımsız bobin gruplarının ardışık bağlanmasıyla da oluşturulabilir. Eğer tek bir bobinden yapılırsa (tek parçalı bobinli silah), tasarım oldukça basit bir yapıdadır ve bu nedenle tasarımın gerçekleşmesi kolaydır. Şekil 3.2, tek parçalı bobinli silaha ilişkin temel bir çizimi göstermektedir. Bununla beraber tek parçalı bobinli silahlar sınırlı hızlara erişebilirler. Çok parçalı bobinli silahlar ise, birden fazla sayıda tek parçalı bobinin namlu üzerinde ardışık konumlandırılmasıyla elde edilir ve her bir bobin müstakil olarak enerjilendirilir. Bu durumda her bir bobinin ateşleme zamanını tayin etmek için çok sayıda pozisyon sensörüne ihtiyaç duyulur. Bununla beraber, çok parçalı bobinli fırlatıcı kullanılması durumunda daha yüksek hızlar kaydedilmiştir [Zabar *vd.*, 1995]. Deneysel çalışmalar, merminin bir bobin parçasından diğerine geçtiği anlarda, ters yönde kuvvet indüklenmesi başta olmak üzere, çok sayıda problemin varlığını ortaya koymuştur [He *vd.*, 1989]. Bir parçadan diğerine geçiş problemi ile, merminin pozisyonunu belirlenmesi problemi, çok parçalı bobine sahip fırlatıcıların en temel problemlerini teşkil eder ve sistemin karmaşıklığını artırır. Şekil 3.3, kondansatörler sürülen bir çok parçalı bobinli silaha ilişkin çizimi göstermektedir.



Şekil 3.2. Tek parçalı bobinli silah

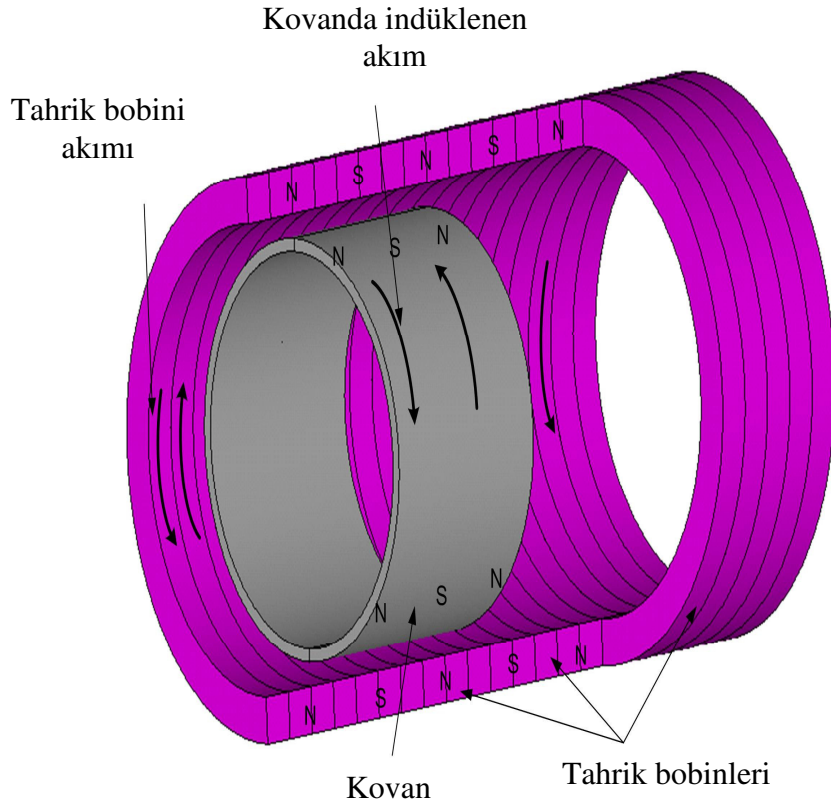


Şekil 3.3. Çok parçalı bobinli silah

Bobinli silahlar temel olarak iki tür güç kaynağı kullanmaktadır: Kapasitör grupları ve generatörler. Ancak kullanılması gereken kondansatörler, piyasada hazır olarak satılan kondansatörlerden oldukça farklıdır. En temel farklılık, yüksek akım ve gerilim anma değerleridir. Bu nedenle fırlatıcılarda kullanılan kondansatörler genellikle özel üretim siparişleriyle elde edilirler. Bu kondansatörlerin şarj edilmesi uzun süreler alır. Bu durum ardışık fırlatma uygulamalarında, kondansatör tabanlı güç kaynağının zayıflığını ortaya koymaktadır. Tek bir fırlatma işlemine ihtiyaç duyulan uygulamalarda ise, kondansatörde depolanan enerjinin tamamı, mermide kinetik enerjiye dönüştürülemez. Bu durum enerji sarfiyatına neden olur. Buna mukabil sistemin taşınabilirliği artar, ayrıca kondansatörler belli bir enerji merkezinde şarj edildikten sonra fırlatıcı operasyon alanında (örneğin gemide) harici bir kaynağa ihtiyaç duymadan çalıştırılabilir.

Generatörle sürülen fırlatıcılar ilk defa Driga ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [Driga *et al*, 1986]. İtme kuvveti, namlu üzerindeki yürüyen dalga ile mermide indüklenen akımın etkileşimiyle üretilir. Yürüyen dalga, fırlatıcı üzerindeki bobinlerden geçen akım tarafından üretilir. Bu bobin ya da bobin grubu, değişken frekanslı bir generatörle beslenir. Generatörle sürülen fırlatıcıların temel avantajı, mermi üzerindeki mekanik stres dağılımı az olduğu için yüksek kütleli mermileri fırlatmaya izin vermesidir. Bu durum, generatörle sürülen fırlatıcıları savunma sistemleri için ideal kılar. Generatörle sürülen fırlatıcılarda gözlenen temel problem, akımın dc bileşeninin ürettiği geciktirici kuvvettir. Bu problemi ortadan kaldırmak için, üç faz voltajları eş zamanlı olarak anahtarlanmaz, bunun yerine akımın sıfır geçiş noktalarına göre faz-faz ateşlenir.

Bobinli silah tipi fırlatıcılara ilişkin özgün bir tasarım, Lineer İndüksiyon Fırlatıcı (Linear Induction Launcher - LIL) adıyla Zabar ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [Zabar *vd.*, 1995]. Bu yeni tasarımın temel üstünlükleri, itme kuvvetine ek olarak, levitasyon ve kılavuz kuvvetlerini de aynı bobin grubuyla üretmesi ve bu yolla mermiyi sürekli olarak merkezlemesi, hava nüveli olması, namlunun ömrünü uzatması olarak sayılabilir. Şekil 3.4, LIL tipi fırlatıcıya ilişkin çizimi göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere, bu yeni tip fırlatıcı iki temel parçadan oluşmaktadır: Çok fazlı güç kaynağı ile enerjilendirilen tahrik bobinleri ve mermiyi çevreleyen bir alüminyum kovan. Tıpkı asenkron motorlarda olduğu gibi, primere (tahrik bobinlerine) uygulanan çok fazlı gerilim, bu bobinlerde çok fazlı akımların dolaşmasını sağlar ve bu akımların meydana getirdiği manyetik alan, sekonderde (kovanda) gerilim indükler. Sekonder, uçları kısa devre edilmiş iletken dizisi şeklinde olduğu için, indüklenen bu gerilim sekonderde kısa devre akımlarının dolaşmasını sağlar. Primer ve sekonderdeki akımların etkileşiminden itme kuvveti ve radyal kuvvet oluşur. İki bileşeni (levitasyon ve kılavuz) olan radyal kuvvet, hareket eden sekonderi merkezler. Böylece alüminyum kovan, namlu içinde merkezlenmiş bir vaziyette hareket eder ve namluyu da bu şekilde terk eder.



Şekil 3.4. Lineer İndüksiyon Fırlatıcı (LIL)

Bu tip fırlatıcı ilk kez önerildikten sonra, performansının artırılması için çeşitli öneriler sunulmuştur [Balıkcı *vd.*, 2009]. Ayrıca bu yeni tip fırlatıcılar, yukarıda anlatılan karakteristik özellikleri nedeniyle, savunma sanayine ilişkin uygulamalarına ek olarak, bazı ilginç uygulamalar için de yeni bir alternatif vasfı teşkil eder. Örneğin bu tip fırlatıcıların, mikro- ve nano ölçekli uyduların yörüngeye fırlatılması amaçlı olarak kullanılmasına ilişkin konsept düzeyinde bir çalışma [Hasirci *vd.*, 2011b]'de sunulmuştur. Ayrıca bu tür fırlatıcıların levitasyon, itme ve kılavuz kuvvetlerini tek bir kaynakla üretmesi ve hareket eden kısmı herhangi bir harici efor olmadan merkezleyebilmesi gibi vasıfları, maglev trenleri için yeni bir tasarım modeline ışık tutmaktadır [Hasirci *vd.*, 2011a]. Tez çalışması kapsamında, bu modelin uygulanabilirliği incelenmektedir.

4. ÖNERİLEN SİSTEM: ANALİZ VE TASARIM

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında önerilen ve ilk bölümde konsept olarak tanımlanan sistemin ilk önce Akım Perdeleri yöntemine dayalı manyetik analizi sunulmuş, daha sonra bu analiz sonuçlarından elde edilen tasarım kriterleri ile tasarım algoritması açıklanmış ve örnek prototip tasarımı sunulmuştur.

4.1. Analiz

Birinci bölümde tanımlanan sistem esasen bobinli silah tipi elektromanyetik fırlatıcılardan ve spesifik olarak da bu tür fırlatıcıların özel bir formunu teşkil eden “Lineer İndüksiyon Fırlatıcı” [Zabar *vd.*, 1995] isimli fırlatıcıdan esinlenmiştir. Bobinli silah tipi fırlatıcılar için, silindirik akım perdesi yöntemine dayalı bir manyetik analiz [He *vd.*, 1991] tarafından yapılmıştır. Önerilen sistemde de hem tahrik bobinleri hem de kovan silindirik geometriye sahip olduğu için, bu model önerilen sisteme uygulanabilir [Yoo, 1996]. Tez çalışmasının amaçları arasında sistemin manyetik analizi bulunmamasıyla beraber, tasarım sürecine ışık tutması açısından mevcut bir analiz burada özetlenmiştir.

Tahrik bobinlerinden geçen akım bir yürüyen dalga ile ifade edilebilir. Bu modelleme yaklaşımı tıpkı denizdeki dalga hareketinde olduğu gibi, suyun aşağı ya da yukarı doğru hareket etmesi sonucu dalganın sabit bir pozisyonda hareket etmesinden esinlenir. Modelleme yaklaşımında her bir kutup çifti için 6 bobin içeren çok fazlı bir sistem temel alınmıştır. Bu 6 bobin üç fazlı güç kaynağı ile beslenmektedir. Akım yoğunluğu sonsuza yakınsarken tahrik bobininin ve kovanın kalınlığının sıfıra yakınsadığı kabulüyle, tahrik bobinlerinden ve kovandan akan akım, bir akım perdesi kümesiyle ifade edilebilir. Kutup adımı τ ile ifade edilirse, sistem 3 fazlı olduğu için faz başına kutup adımı uzunluğu $\tau/3$ olacaktır. N faz başına düşen bobinlerin sarım sayısını ve $I_p(t)$ de bu bobinlerden akan akımı gösterirse, bu bobinlerdeki akım yoğunluğu $K_p(t) = NI_p(t)/(\tau/3)$ olacaktır. Bu durumda akım perdelerinin ifadesi aşağıda sunulan denklemlerdeki gibi olacaktır:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
K_p^1(t) = K_{p,\max} \cos(\omega t) & 0 \leq z < \frac{\tau}{3} \\
K_p^2(t) = K_{p,\max} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) & \frac{\tau}{3} \leq z < \frac{2\tau}{3} \\
K_p^3(t) = K_{p,\max} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{2\tau}{3} \leq z < \tau \\
K_p^4(t) = K_{p,\max} \cos(\omega t + \pi) & \tau \leq z < \frac{4\tau}{3} \\
K_p^5(t) = K_{p,\max} \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{4\tau}{3} \leq z < \frac{5\tau}{3} \\
K_p^6(t) = K_{p,\max} \cos\left(\omega t + \frac{5\pi}{3}\right) & \frac{5\tau}{3} \leq z < 2\pi
\end{array} \right. \quad (4.1)$$

(4.1) ifadesinde $K_p^n(t)$ n'inci bobinin lineer akım yoğunluğunun zamana bağlı fonksiyonunu, $K_{p,\max}$ bu akım yoğunluğunun tepe değerini, ω açısal frekansı ve z ise uzunlamasına yön değişkenini temsil eder. Bu denklemler bobinlerdeki akımın dalga formunu ifade eder ancak yürüyen dalgalar hakkında bilgi vermez. Bu bilgi yürüyen dalgaların Fourier seri açılımından elde edilir:

$$K_{pn}(t, z) = \begin{cases} 3K_{p,\max} \left\{ \frac{1}{n} \cos\left(\omega t - n\beta z - \frac{\pi}{3}\right) \right\} & n = 6p - 5 \\ 3K_{p,\max} \left\{ \frac{-1}{n} \cos\left(\omega t + n\beta z - \frac{\pi}{3}\right) \right\} & n = 6p - 1 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.2)$$

(4.2) ifadesinde n harmonik sayısını, p pozitif tam sayıyı ve $\beta = \pi/\tau$ da dalga sayısını ifade eder. Bu denklem, (4.1) ile aynı akım dağılımına sahiptir ancak (4.1) denklemine ek olarak yürüyen dalgalar hakkında bilgi sağlar. Motorun senkron hızı, temel akım bileşeni cinsinden ifade edilir. Böylece kutup adımı τ , açısal frekans ω , dalga sayısı β ve frekans f arasındaki ilişki elde edilir:

$$V_s = 2\tau f = \frac{\tau\omega}{\pi} = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.3)$$

Yürüyen dalgalar sistemi ile çalışırken t ve z değişkenlerine fonksiyonel bağımlılık ihmal edilebilir ve böylece genlik ve faz bilgisi korunarak akım yoğunluğu

$$K_{pn}(t, z) = \text{Re}\left(K_{pn,\max} e^{j(\omega t - n\beta z - \varphi_n)}\right) = \text{Re}\left(\sqrt{2}K_{pn} e^{j(\omega t - \beta z)}\right) \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. (4.4) ifadesinde K_{pn} dalganın efektif değerini ve fazını (φ_n) içeren bir fazördür. Bu yeni tanımlamayı kullanarak kovanda indüklenen akım yoğunluğu şu şekilde ifade edilebilir [He *et al*, 1991]:

$$\underline{K}_s = - \frac{s}{\sqrt{s^2 + s_c^2}} \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \frac{r_p}{r_s} \frac{I_1(\beta r_p)}{I_1(\beta r_s)} \angle \varphi \quad (4.5)$$

Burada r_p ve r_s sırasıyla tahrik bobinlerinin ve kovan bobinlerinin yarıçapıdır. Esasen kovan bir alüminyum borudur ve bobin içermez, ancak bir analiz yaklaşımı olarak kovan, uç uca eklenmiş bobinlerden oluşan bir yapı olarak ele alınır ve bu şekilde analiz edilir. Ayrıca bu denklemde I_1 birinci mertebeden modifiye edilmiş birinci ve ikinci tür edilmiş Bessel fonksiyonunu (βr_s modül olmak üzere), α kovandaki açıklık (yarık) açısını, s kaymayı, $\varphi = \tan^{-1}(s_c / s)$ kovan perdesindeki akım dalgası ile primerdeki akım dalgası arasındaki faz kaymasını, ve son olarak s_c ise kritik kaymayı ifade eder ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$s_c = \frac{2\pi}{(2\pi - \alpha) \mu_0 a_s V_s \gamma \beta K_1(\beta r_s) I_1(\beta r_s)} \quad (4.6)$$

(4.6) ifadesinde a_s kovanın et kalınlığını, γ kovanda kullanılan malzemenin iletkenliğini temsil eder. Kritik kayma değerinde, itme kuvveti maksimum değerine ulaşır. Bu karakteristik özellik, tıpkı klasik rotasyonel asenkron motorların temel karakteristik özelliklerinden biri olan, maksimum torkun kritik kayma değerinde elde edilmesi [Fitzgerald *vd.*, 2003] özelliğine benzer. Yani kritik kayma, indüksiyon

(asenكرون) motorun performansını belirleyen faktörlerden biridir. βr_s çarpımı arttığında kritik kayma değeri azalır, aynı kovanın yarıçapı artırılır ya da kutup adımı azaltılırsa kritik kayma değeri de azalır. Bununla beraber, kutup adımı azaltıldığında eğer senkron hız sabit tutulmak isteniyorsa, uygulanan gerilimin frekansı artırılabilir.

Şu ana kadar yapılan analiz, kovanda indüklenen akıma ilişkin analizdir. Kovanda indüklenen itme kuvvetini analiz etmek için, kovan sınırındaki akı yoğunluğunun radyal bileşeni şu şekilde tanımlanabilir:

$$\underline{B}_r = j\beta (\underline{A}_{p1} + \underline{A}_{s01}) \quad (4.7)$$

Burada \underline{A}_{p1} ve \underline{A}_{s01} tahrik bobinlerinden akan akımın temel bileşenine ilişkin vektör potansiyelleridir. Bu tanım kullanılarak, kovana etkiyen yerel kuvvet yoğunluğunun N/m^2 cinsinden ifadesi şu şekilde elde edilir [Yoo, 1996]:

$$\begin{aligned} \langle f_{zl} \rangle &= \text{Re} \left[\underline{K}_s (\underline{B}_{pr} + \underline{B}_{sr})^* \right] \\ &= \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \frac{ss_c}{s^2 + s_c^2} \frac{\mu_0 \beta r_p^2 I_1^2 (\beta r_p) K_1 (\beta r_s)}{r_s I_1 (\beta r_s)} K_{p1}^2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Bu denklemden \underline{K}_{p1} primer akım dalgasının temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir. Motor kritik kayma değerinde çalıştığında, kuvvet yoğunluğu maksimum değerine ulaşır. Kuvvet yoğunluğu ayrıca tahrik bobinleri ve kovanın yarıçaplarının oranına da bağlıdır. Bu oran ilk ve en önemli tasarım kriteridir.

Daha önce vurgulandığı gibi, akı yoğunluğu B_z 'nin yatay bileşeni kovanda radyal bir kuvvet üretir. Üretilen bu kuvveti eş merkezli olarak analiz etmek için, radyal kuvvetin birim alandaki ifadesi kullanılır:

$$\begin{aligned}
\langle f_{rl} \rangle &= \text{Re} \left[\underline{K}_s \{ \underline{B}_{pz} + \underline{B}_{sz} \}^* \right] \\
&= \text{Re} \left[\underline{K}_s \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \underline{A}_{\varphi p1})^* + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \underline{A}_{\varphi s0})^* \right\} \Big|_{r=r_s} \right] \\
&= \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \frac{s^2}{s^2 + s_c^2} \frac{\mu_0 \beta r_p^2 I_1^2 (\beta r_p) K_0 (\beta r_s)}{r_s I_1 (\beta r_s)} \underline{K}_{p1}^2
\end{aligned} \tag{4.9}$$

(4.9) ifadesinde \underline{B}_{zp1} ve \underline{B}_{zs0} sırasıyla tahrik bobinlerindeki ve kovandaki akımın temel bileşeninin manyetik vektör potansiyelleridir. Bu radyal kuvvet (levitasyon kuvveti), itme kuvveti ve kayma cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\langle f_{rl} \rangle = \frac{s}{s_c} \frac{K_0 (\beta r_s)}{K_1 (\beta r_s)} \langle f_{zl} \rangle \tag{4.10}$$

(4.8) denklemi itme kuvvetinin ifadesini, (4.9) denklemi levitasyon kuvvetinin ifadesini ve (4.10) denklemi de bu iki kuvvetinin birbiri cinsinden ifadesini sunar. Daha önce vurgulandığı gibi, sistemin analiz edilmesindeki amaç, yeni bir analiz yaklaşımı sunmak değil, mevcut bir analiz yaklaşımından tasarım sürecine ışık tutacak yorumlar elde etmektir. Anılan bu 3 denklem, tasarım süreci için oldukça aydınlatıcı çıkarımlara olanak sağlar. Örneğin ilk tasarım kriterinin tahrik bobinleri ile kovanın yarıçaplarının oranı olduğu, denklem (4.8)'in türetilmesi sürecinde vurgulanmıştı. Denklem (4.9) ise radyal kuvvetin, yani levitasyon kuvvetinin, kovanın fiziksel boyutlarına bağlı olduğunu gösterir ve bu da ikinci tasarım kriteridir. Ayrıca itme kuvvetinin maksimum değerini aldığı fiziksel boyut tercihleri için, levitasyon kuvveti maksimum değerine ulaşmaz. Örneğin $r_p/r_s=0.8$ alındığında, levitasyon kuvveti βr_s çarpımının 1.8 değeri için maksimum olurken, itme kuvveti bu çağrımın 1.5 değerini alması durumunda maksimum olur.

Bu analiz sonuçları, tasarım süreci için ilginç bazı çıkarımlara olanak sağlamasına ek olarak, önerilen sistemin maglev trenleri için bir güçlü yanını daha ortaya koyar. Tasarımcı yarıçapları ve kutup adımı itme kuvvetini optimize edecek şekilde seçtiğinde, maksimum levitasyon kuvvetini elde edemez. Bu durumun tam

tersi de geçerlidir. İkinci bir ilginç sonuç, levitasyon kuvvetinin maksimum değerinin, kaymanın $\pm\infty$ değerleri için elde edildiği ve bu kuvvetin yönünün (işaretinin) her zaman pozitif olduğu sonucudur. Yani sistem pozitif yönde ivmelense de, frenleme bölgesinde çalışsa da, rejeneratif modda çalışsa da levitasyon kuvveti her zaman pozitifdir (yani sistem her durumda kendiliğinden levite olur) ve bu özellik önerilen sisteme maglev trenleri için güçlü bir alternatif vasfı katar. Klasik maglev sistemlerinde tren frenleme bölgesinde çalışırken levitasyonun sürekliliğinin sağlanması bir kontrol sistemine olan gereksinimi ortaya çıkarır.

Daha önce de vurgulandığı gibi, önerilen sistem Lineer İndüksiyon Fırlatıcı isimli bir elektromanyetik fırlatıcıdan esinlenmiştir. Yukarıda en son vurgulanan analiz sonucu, bu tip fırlatıcıların temel karakteristik özelliklerinden birinin bir yansımasıdır. Bu karakteristik özellik, “Yineleyici Kuvvet” [Kim *vd.*, 1996] adı verilen bir kuvvetin, hareket eden kısmı sürekli merkezlemesi özelliğidir. Yani bu kuvvet, hareket eden kısmın, levitasyon ve kılavuz eksenlerinde sürekli merkezlenmesini sağlar ve bu merkezleme karakteristiği için harici efor gereksinimi söz konusu değildir. Daha da yalın bir ifadeyle, önerilen sistemde levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin kontrol edilmesine gerek yoktur, zira Yineleyici Kuvvet nedeniyle, sistem harici bir bozucu etkiye maruz kalsa bile hareket eden sistem kendiliğinden merkezlenecektir. Bu analiz sonucu, önerilen sistemin test sonuçlarının sunulduğu bölümde deneysel olarak da gösterilecektir.

Anılan bu merkezleme karakteristiği, önerilen sistemin üç kuvveti (itme, levitasyon ve kılavuz) tek bir motorla üretmesi özelliğine ek olarak, ikinci güçlü yönünü ortaya koymaktadır; levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin kontrolüne gerek duyulmaması. Zira klasik maglev sistemlerindeki en zor görevlerden biri, levitasyon kuvvetinin kontrol edilmesidir. Özellikle tren frenleme bölgesinde çalışırken bu işlem daha da karmaşık bir hal alır. Önerilen sistemin hava nüveli olması, yüksek hava aralıklarına olanak sağlaması gibi bazı ek güçlü özelliklerinin yanında, bu iki temel özellik, yani üç kuvvetin tek motorla üretilmesi ve bunlardan ikisinin (levitasyon ve kılavuz) kontrol gereksiniminin bulunmaması, önerilen sistemin en güçlü yenilikleridir.

4.2. Tasarım

Makinanın senkron hızı (4.11) ifadesiyle tanımlanır :

$$V_s = 2\tau f = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.11)$$

Burada ;

V_s : Senkron hız (m/sn)

τ : Kutup adımı

f : Kaynak frekansı (Hz)

ω : Açısal hız (rad/sn)

$\beta = \frac{\pi}{\tau}$: Dalga sayısı

olarak isimlendirilir. Senkron hız, motorun üç fazlı sargılarına uygulanan gerilimin meydana getirdiği akımın yarattığı lineer manyetik alanın hızıdır. Motorun hareket eden kısmı, senkron hızdan daha düşük değere sahip bir hızda hareket eder. Bu iki hız arasındaki göreceli fark, “kayma” olarak isimlendirilir. Kritik kayma (s_c), itme kuvvetinin maksimum değere ulaştığı kayma değeridir ve (4.12) ifadesiyle hesaplanır:

$$s_c = \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \frac{2}{\mu_0 \gamma_s a_s V_s} \quad (4.12)$$

Bu denklemde ;

α : Kovanın açıklık (yarık) açısı ($^\circ$)

γ_s : Kovanda kullanılan malzemenin elektriksel iletkenliği (mho ya da Siemens)

a_s : Kovanda kullanılan malzemenin kalınlığı (m)

V_s : Senkron hız (m/sn)

Motor sargılarına uygulanan gerilimin meydana getirdiği üç fazlı zamanla değişen akım, yine zamanla değişen bir manyetik alan üretir ve bu manyetik alan kovanda akım indükler. Kovanda indüklenen akım, sürücü bobinler ve kovandaki

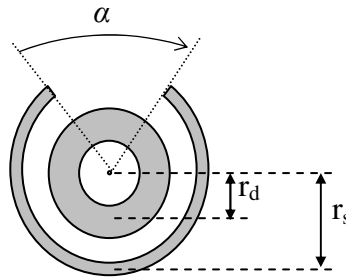
bobinler¹ tarafından üretilen akıyı çizgisel olarak ayrıştırır. Akı yoğunluğu (B), iki yöne ayrıştırılır; bir bileşeni radyal yönde, diğer bileşeni dikey yöndedir. Akının radyal yöndeki bileşeni, kovandaki akımla etkileştiğinde itme kuvvetini üretir. Akının dikey yöndeki bileşeni ise kovanda radyal yönde bir kuvvet, ya da diğer adıyla stres oluşturur². Kovanda α açısıyla temsil edilen açıklık, bu radyal strese dengesizlik oluşmasına neden olur ve bu dengesizlik levitasyon ve kılavuz kuvvetlerini üretir.

Denklem (4.11) ve (4.12) ile, motorun çalışma prensibini açıklayan son paragraf bir arada incelendiğinde, motorun tasarımı için, yani istenen levitasyon ve itme kuvveti değerlerini elde etmek için göz önünde bulundurulması gereken parametreler, aşağıda sıralandığı gibi belirlenir :

- r_s : Kovanın yarıçapı
- r_d : Sürücü bobinlerin ortalama yarıçapı
- τ : kutup adımı
- α : Kovanın açıklık açısı

İtme kuvveti en çok $\frac{r_d}{r_s}$ oranına bağlıdır. Levitasyon kuvveti ise $\beta r_s = \frac{\pi}{\tau} r_s$

çarpımının, yani kutup adımına ve sürücü bobinlerin yarıçapına bağlıdır. Sonuncu tasarım parametresi α , levitasyon kuvveti ile doğru, itme kuvveti ile ters orantılıdır. Şekil 4.1, fiziksel büyüklüklerin görsel sunumunu göstermektedir.



Şekil 4.1. Fiziksel büyüklükler

¹ Esasen kovanda bobin yoktur. Kovan alüminyum bir borudan ibarettir. Ama bir analiz yöntemi olarak kovan, uçları kısa devre edilmiş tek sipirli bobinlerin uç uca eklenmiş hali gibi düşünülür.

² Kuvvetlerin kovanda meydana gelmesi, hareket edecek kısmın her zaman kovan olacağı anlamına gelmez. Eğer kovan sabit tutulursa, kuvvetler bobinleri taşıyan kısımda meydana gelir ve bu kısım hareket eder.

Bu motorun karakteristiği, rotasyonel olarak hareket eden indüksiyon motorlarına büyük ölçüde benzemektedir. Bu nedenle, bu motorun analizinde ve tasarımında, rotasyonel olarak hareket eden indüksiyon motorlarına ilişkin formülasyon kullanılabilir. Tek fark, kovandaki açıklıktır. Bu açıklıktan kaynaklanan farklılık, formüllerde kendini bir çarpanla, yani bir faktörle belli eder ve bu faktöre “açıklık faktörü” denir. Açıklık faktörü, (4.13) ifadesindeki gibi hesaplanır:

$$f(\alpha) = \frac{2\sin(\alpha/2)}{2\pi - \alpha} \quad (4.13)$$

Bu ifadede görüldüğü üzere, α açısı arttıkça açıklık faktörü artmakta ve bu açı 360 dereceye yaklaştıkça, açıklık faktörü 1'e asimptotik olarak yakınsamaktadır. Buna mukabil, ihtiyaç duyulan değerde kılavuz kuvvetinin elde edilebilmesi için, bu açının kabul edilebilir maksimum değeri 180° dir. 180° 'ye kadar α açısı arttıkça levitasyon kuvveti artar, ancak itme kuvveti azalır.

[Yoo, 1996]'da, yukarıda açıklanan sisteme ilişkin iki adet tasarım sunulmuştur. Bu tasarımlardan biri gerçek bir maglev treninin fiziksel ölçülerinde olup, diğeri laboratuvar ölçeğinde bir prototiptir. Ancak burada sunulan tasarımlar, trenin hareket yolu boyunca sargı içerir. Hareket eden kısım ise alüminyum kovandır. Bu tür bir tasarım, yol boyunca bakır iletkenler kullanılması sebebiyle yüksek ilk yatırım maliyetine ve bakır kayıplarından dolayı düşük verime sahiptir. Aşağıda ayrıntıları sunulan tasarım ise, yol boyunca alüminyum kovan içerir ve hareket eden kısım, bobinlerin bulunduğu kısımdır. Böyle bir tasarım tercihi, ilk yatırım maliyetinin düşmesine ek olarak kayıpları azaltıp verimi yükseltirken, hareket eden kısmın bobinleri de içermesi nedeniyle laboratuvar ölçeğinde bir prototipte, levitasyon için göreceli olarak daha fazla akım ihtiyacını beraberinde getirir. Ancak gerçek fiziksel ölçülerde bir maglev treni için, insanların ve yükün oluşturacağı ağırlık bobinlerin ağırlıklarına kıyasla çok daha fazladır. Ayrıca bu tasarımda, hareket eden kısma yol boyunca enerji iletimi yapılmalıdır. Bu durum, yıpranma/aşınma riski yüksek ve bakım gerektiren bir dizi elektrik kontak birimlerinin gerekliliğini dikte eder. Her ne kadar üretilen ilk prototip, sadece hareket eden kısımda sargılar içerse de, çalışmanın ilerleyen aşamalarında şebekeden çekilen akımı azaltmak için yol boyunca sargı içeren konfigürasyon da üretilecektir.

Motorun ihtiyaç duyduğu enerjinin büyük bir kısmı levitasyon kuvveti içindir. Zira sistemin kalıcı durumda levitasyon için çok fazla akım çekeceği aşıkardır. Bu nedenle tasarım, maksimum levitasyon elde edilecek şekilde planlanmalıdır. Bu amaçla maksimum levitasyon için, motorun fiziksel büyüklerinin belirlenmesinde kullanılan iki temel tasarım kriteri (4.14) ifadesinde sunulmuştur [Yoo, 1996]:

$$\frac{r_d}{r_s} = 0.7 \quad \text{ve} \quad \beta r_s = \frac{\pi}{\tau} r_s = 1.5 \quad (4.14)$$

Tasarım, bu iki kriteri göz önünde bulundurarak, kutup adımının (τ) seçilmesiyle başlar. Bu tez çalışması için tasarlanıp gerçekleştirilecek motor, laboratuvar ölçeğinde bir prototip olduğu için kutup adımı küçük değerlerde seçilebilir. Kutup adımının 2 katı (2τ), bobinlerin toplam uzunluğunu verir. Yüksek seçilen kutup adımı, daha fazla iletken kullanılmasına ve hareket eden kısmın ağırlaşmasına neden olur. Kutup adımı seçildikten sonra tahrik bobinlerinin ortalama yarıçapı (r_d) ve alüminyum kovanın yarıçapı (r_s), (3.14) ifadesinde belirlenen iki kriter denklem yardımıyla hesaplanır. Buna mukabil, seçilen bir kutup adımı değeri için, özellikle kovanın yarıçapı olarak hesaplanan değere sahip bir yarıçapta ticari olarak satılan alüminyum boru bulmak zor olabilir. Böyle bir borunun özel olarak üretilmesi gerekir ve az miktarda boru için kalıp hazırlanması maliyeti artırıp gerçekleştirme süresini de uzatacaktır. Tasarım süreci boyunca, istisnasız her türlü malzemenin ticari olarak kolay bulunabilir olmasına özen gösterilmiştir. Böyle bir tasarruf, sistemin gerçekleştirilebilirliğini ve günlük yaşamda da kullanılabilir olma niteliğini güçlendirecektir. Bu nedenle ilk önce ticari olarak bulunabilir alüminyum boru çaplarına göre r_s değeri seçilmiş ve bu değer 33 mm olarak belirlenmiştir. Yani 70 mm dış çapa ve 2 mm et kalınlığına sahip alüminyum boru kullanılması planlanmıştır. Daha sonra (4.14) ifadesindeki ilk denklemden, bobinlerin ortalama yarıçapı $r_d=23$ mm olarak elde edilir. Elde edilen bu değere göre bobinlerin iç yarıçapı 18 mm ve dış yarıçapı 28 mm olarak seçilmiştir. Bu durumda (4.14) ifadesindeki ikinci denklemden $\tau=70$ mm bulunur. Bunun anlamı, kullanılacak olan 6 bobinin toplam uzunluğunun (2τ) 140 mm olacağıdır. Bu tasarıma göre hava boşluğu $33-28=5$ mm olmaktadır. Senkron makinaların kullanıldığı Maglev sistemleri çok düşük hava aralığına izin verirken (2-3 mm), indüksiyon motorlarının kullanıldığı Maglev sistemleri daha yüksek hava

aralığına sahip bulunmakta ve bu açıdan daha senkron makinalara kıyasla daha güçlü olmaktadır. Zira düşük hava aralığı sürtünme, temas gibi olayların ve bunların sonucu oluşabilecek mekanik hasarların oluşma riskini artırmaktadır. Bu tez çalışması için laboratuvar ölçeğinde tasarlanan prototip sistem 5 mm gibi yüksek bir hava aralığına sahiptir ve bu değer gerçek ölçülerde yani günlük yaşamda kullanılan birçok senkron motor tahrikli Maglev sistemlerinden bile fazladır. Kullanılan alüminyum borunun et kalınlığının, üretim hassasiyeti gereği 0.5 mm fazla olması ve kullanılacak bobinlerin yalıtım malzemelerinin de kalınlığının göz önünde bulundurulmasıyla bu değer 4 mm'ye düşmesi bile yeterli bir hava aralığı sağlar.

Kullanılacak 6 bobinin toplam uzunluğu belirlendiğine göre, her bir bobinin fiziksel boyutları ve bobinlerde kullanılacak iletkenin çapı hesaplanabilir. Hareket eden kısımda alüminyum bobin kullanılmıştır. Böyle bir tercihin iki sebebi vardır. Bunlardan birincisi, alüminyumun özgül ağırlığı bakıra göre daha düşüktür ve aynı hacimdeki (aynı fiziksel boyutlardaki) alüminyum daha hafif olacağı için hareket eden sistem de görece daha hafif olacaktır ve böylece levitasyon için ihtiyaç duyulan akım miktarı azalacaktır. İkinci sebep ise alüminyumun ısı dayanımının daha iyi olmasıdır. Hareket eden kısmın fazla akım çekmesi umulduğundan, her ne kadar operasyon süresi kısa tutulacak olsa da yüksek ısı oluşacağı tahmin edilmektedir.

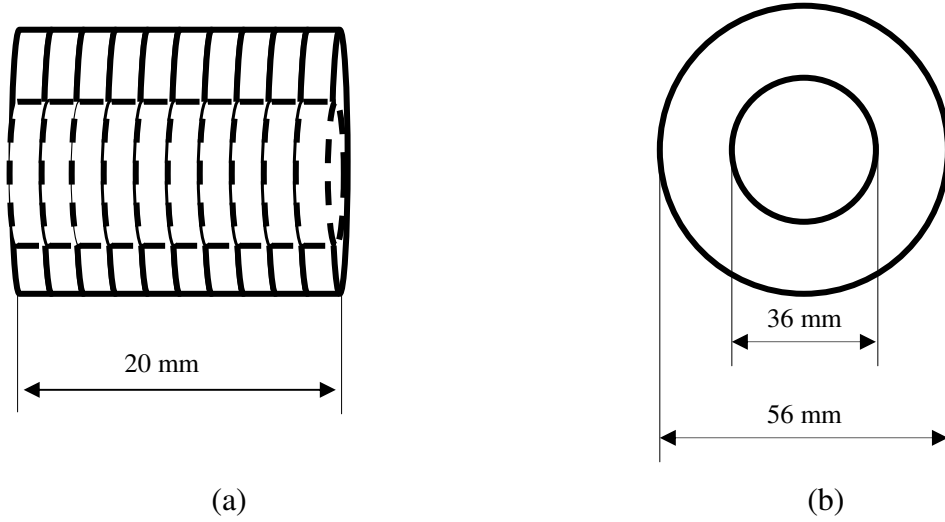
Yukarıda bobinlerin dış yarıçapının 28, iç yarıçapının 18 mm olarak hesaplandığı gösterilmişti. 6 bobinin toplam uzunluğu 140 mm olduğuna göre, alüminyum bobinlerin cam ipliğinden izolesi ve üzerlerine sarılacak bez tiretin kalınlığı da göz önünde bulundurulduğunda, her bir bobinin uzunluğunu 20 mm olarak seçilmiştir. Bu durumda 1.5 mm çapında bakır iletken kullanılması durumunda, yine iletkenin emaye izolasyonunun ve bobinin her bir katına yerleştirilecek yalıtım malzemesinin kalınlığı göz önünde bulundurulduğunda, bobinlerin her bir katı 12 siperden oluşacak şekilde toplam 10 kat sarılması planlanmıştır. Son olarak, alüminyum kovanın toplam uzunluğu 3 m ve kovanın açıklık açısı 90° olarak seçilmiştir. Tablo 4.1 tasarlanan kovanın özelliklerini, Tablo 4.2 tasarlanan tahrik bobinlerinin özelliklerini özetler. Şekil 4.2 ise bobinlerin bir tanesine ilişkin boyutları canlandıran çizimdir.

Tablo 4.1. Kovanın özellikleri

Uzunluk	3 m
Kalınlık	2 mm
Dış çap	70 mm
Açıklık açısı	90°
Malzeme	Alüminyum

Tablo 4.2. Tahrik bobinlerinin özellikleri

Kutup adımı	70 mm
Kalınlık	20 mm
Dış yarıçap	28 mm
İç yarıçap	18 mm
Kutup adımı başına bobin sayısı	3
Bobin başına siper sayısı	120
Malzeme	Alüminyum

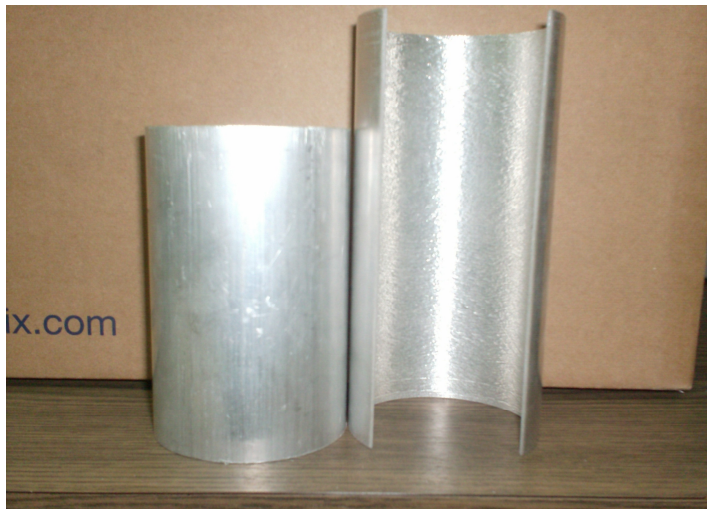


Şekil 4.2. Tahrik bobinlerinden bir tanesinin görünüşü
(a) Bobinin yan görünüşü (b) Bobinin kesit görünüşü
(Ölçeksiz çizilmiştir)

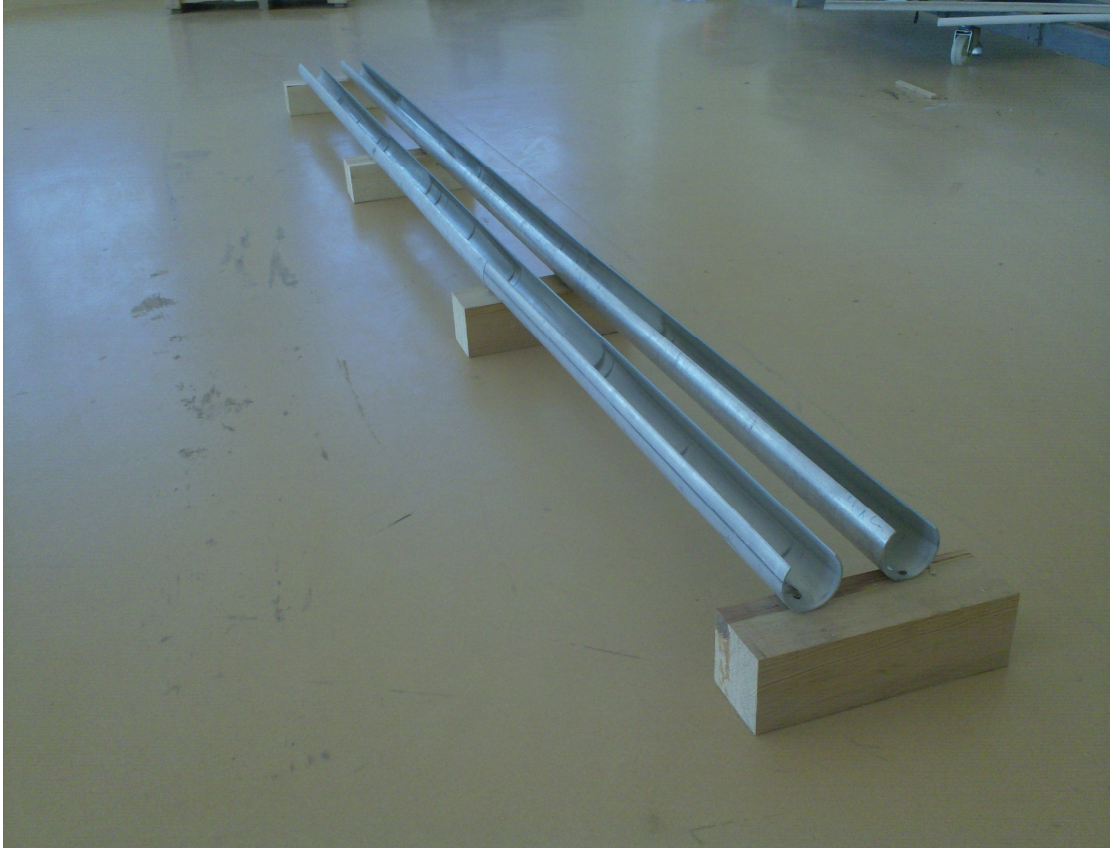
5. GERÇEKLEME VE TEST

5.1. Gerçekleme

Burada gerçekleme süreci aşamalar halinde açıklanmıştır. İlk aşamada, kovan olarak kullanılacak alüminyum borular tedarik edilmiş ve hazırlanmıştır. Bu hususta, tasarım sürecinin başında, kolay bulunan çaplarda alüminyum boru seçilmiş ve tasarım kriterlerinde ifadesini bulmuş parametreler buna dayalı olarak hesaplanmıştır. Bu amaçla 70 mm dış çapa ve 2 mm kalınlığa sahip alüminyum borular, merkez noktasıyla 90° açı oluşturacak şekilde *su jeti* ile kestirilmiştir. Böyle bir tercih, her ne kadar üretim maliyetini küçük bir miktarda artırsa da, su jeti çapak bırakmayacak şekilde ve doğrusal yörüngede boruyu kestiği için, hem 90 derecelik açının düzenli yapısı korunmuş, hem de boruların birbirine uç uca eklenmesi sonucu meydana gelebilecek olası açıklık farklarını büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Kovanın toplam uzunluğu 3 m olarak seçilmiş ancak, su jetinin aktif kesim alanı yaklaşık 2.5 m olduğu için, kovan birer metrelik parçalar halinde kesilmiş ve daha sonra tek bir gövde üzerinde birleştirilmiştir. Şekil 5.1, kullanılan alüminyum borunun kısa bir parçasının kesilmemiş halini ve bu borunun numune olarak kesilmiş halini göstermektedir. Şekil 5.2, toplam 3 m uzunluğuna sahip kovanın iki paralel koluna ilişkin fotoğrafı gösterir.

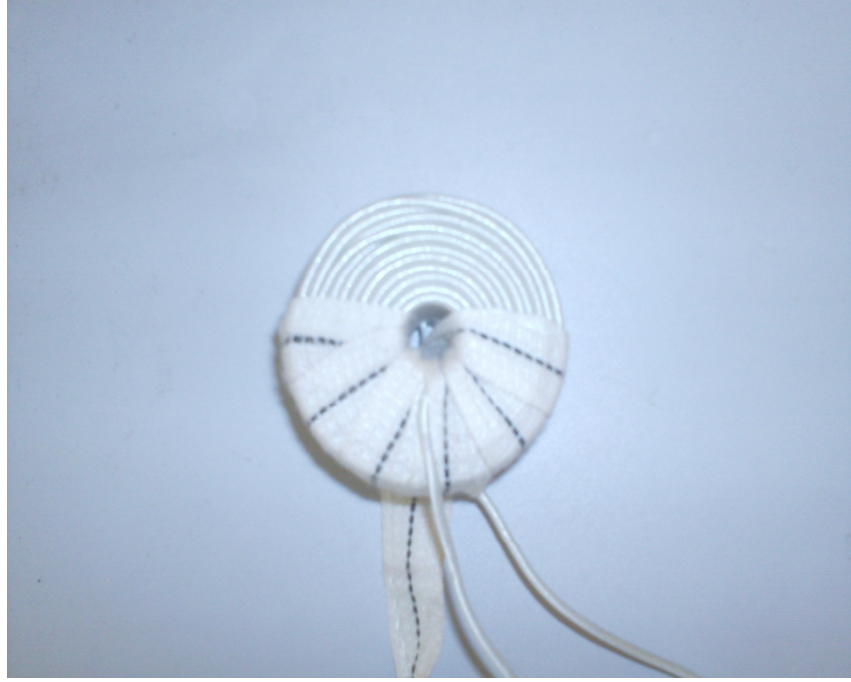


Şekil 5.1. Kullanılan alüminyum borunun hazırlanması

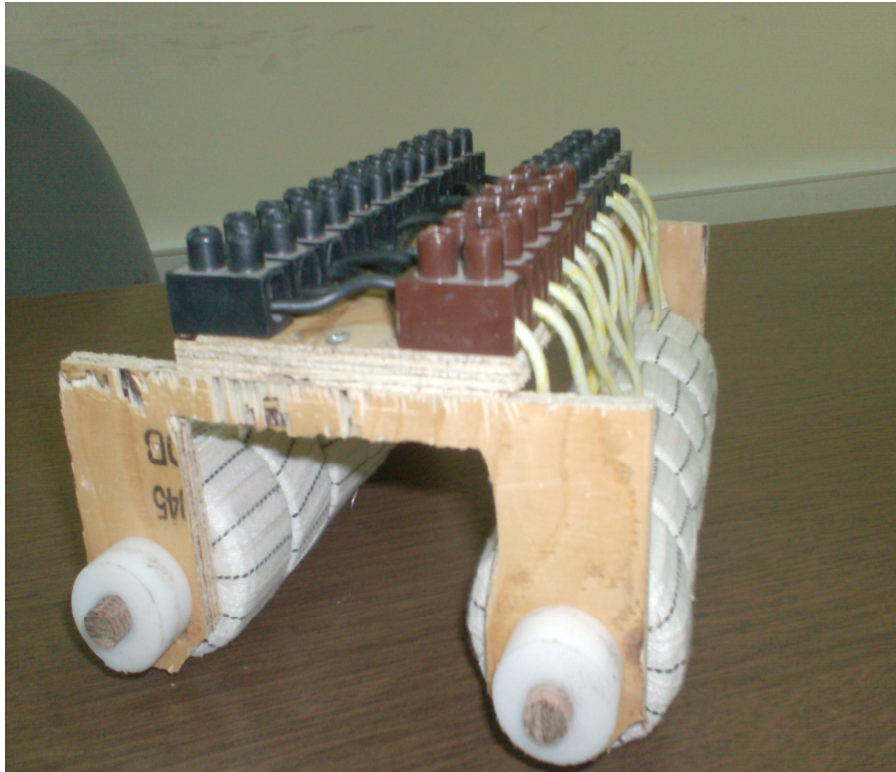


Şekil 5.2. Kovan

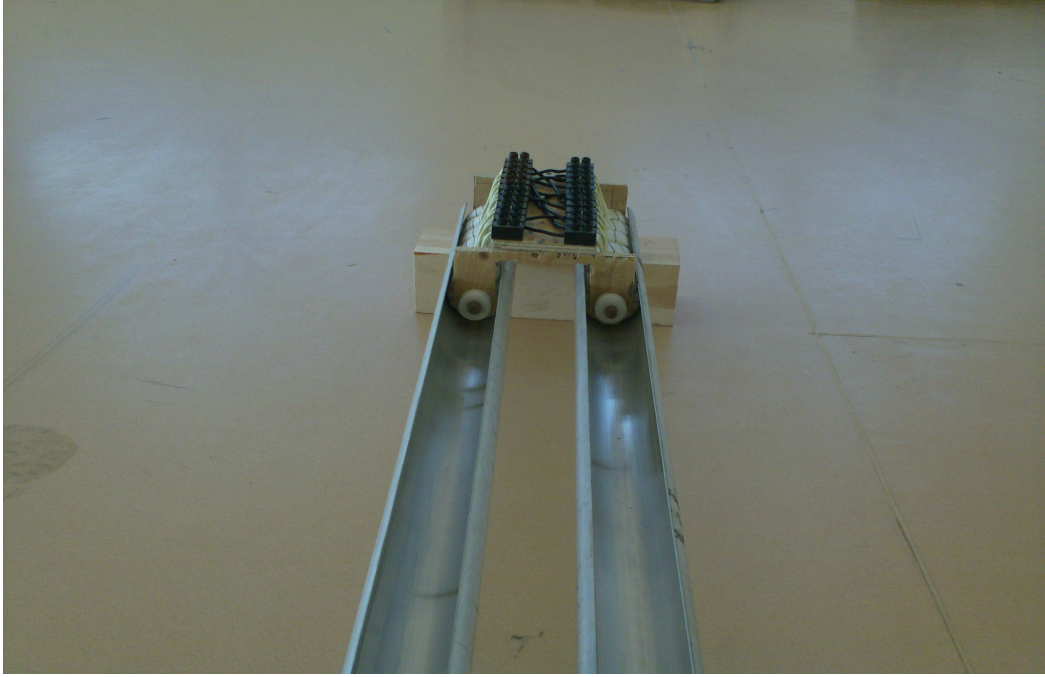
Bobinlerin sarılması için değişik ahşap kalıplar hazırlanmış ve farklı çaplarda bobinlerin sarılmasına olanak sağlayacak bir düzenek oluşturulmuştur. Kullanılan alüminyum iletken, kendi üzerinde cam bezinden izolasyon barındırdığı için bobinler sarılırken her bir kat arasına lak ya da presbant konulmamıştır. Ancak bobinlerin harici mekanik etkilerden korunmasını sağlamak ve bobinin alüminyum kovana sürtünmesini engellemek amacıyla, bobinin etrafına turet sarılmıştır. Şekil 5.3, kullanılan alüminyum iletkenli bobinlerden bir tanesine ilişkin fotoğrafı, Şekil 5.4 bobinlerin birleştirilmiş halini, yani hareket eden sistemi ve son olarak da Şekil 5.5 kovan ve tahrik bobinlerini içeren tüm sisteme ilişkin bir fotoğrafı göstermektedir. Toplam 12 tane bobini içeren hareket eden sistemin ağırlığı 2478 gramdır. Şekil 5.3'de görülen alüminyum bobinlerden birinin indüktansı 0.263 mH ve direnci 0.186 Ω 'dur. 3 faz için toplam 6 bobin içeren sistem faz başına 2 bobin içermektedir ve dolayısıyla parametre değerleri $R=0.372 \Omega/\text{faz}$ ve $L=0.526 \text{ mH}/\text{faz}$ şeklindedir. Eğer yan yana iki altılı bobin grubu paralel bağlanırsa bu değerlerin yarısı, seri bağlanırsa bu değerlerin iki katı alınır.



Şekil 5.3. Kullanılan alüminyum bobinlerden bir tanesi



Şekil 5.4. Alüminyum tahrik bobini



Şekil 5.5. Alüminyum tahrik bobini ve kovan

5.2. Test

Tasarım ve gerçekleştirme süreci yukarıda anlatılan sistem üzerinde 3 adet test uygulanmıştır. Testlerin temel amacı sistemin şebekeden çektiği akımı ve hareket eden kısmın kovan içindeki pozisyonunu ölçerek sistemin performansını belirlemektir. Testlerden her birinin alt amacı, aşağıda ilgili testin sonuçlarının detaylandırıldığı alt bölümlerde açıklanmıştır.

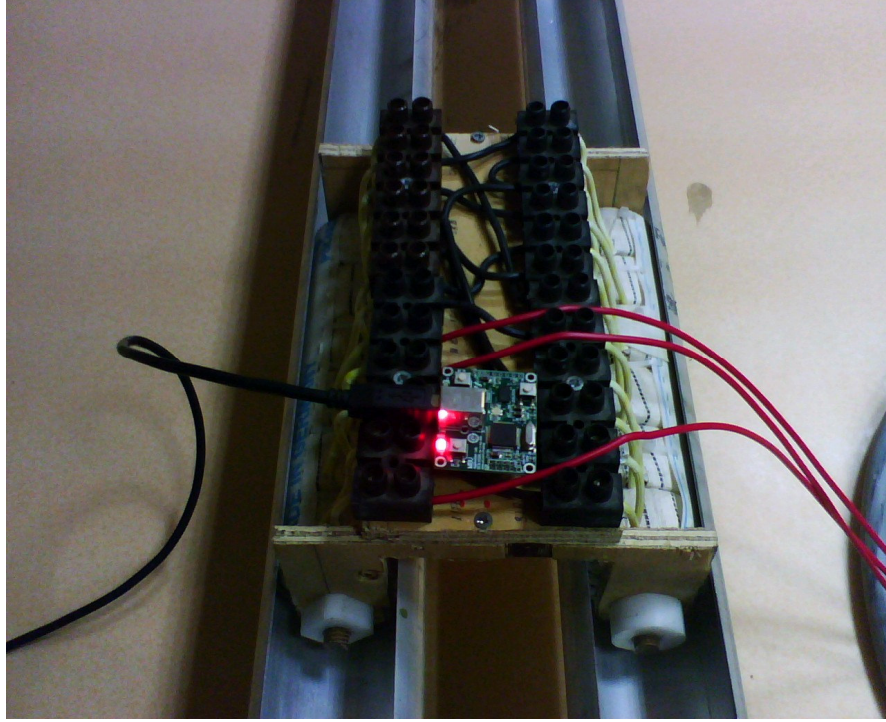
Testler üç faz şebeke voltajında (380 V) uygulanmıştır. Faz akımları, 3 ayrı akım probu ve 4 kanallı bir osiloskop vasıtasıyla ölçülerek, osiloskopun hem ekran çıktısı alınmış hem de ürettiği veri dosyası kullanılarak tüm operasyon süresince akımın değişiminin grafiği çizdirilmiştir. Akım ölçümü temel konfigürasyonun test edildiği ilk deney için yapılmıştır. Hareket eden kısmın yer değiştirmesini belirlemek amacıyla bir ivme sensörü kullanılmıştır ve ivme ölçümleri her üç test için de yapılmıştır. Hareket lineer olduğu için, ölçülen bir ivmenin bir sabitle (kütle) çarpımı aynı zamanda kuvvet bilgisini de verir. Kütle skaler bir büyüklük olduğu için ölçülen

ivme profilleri ile kuvvet arasında sadece genlik farkı mevcuttur, kuvvetin zaman profili ivme profili ile aynı olacaktır.

Kullanılan ivme sensörü üç eksenlidir ve dolayısıyla itme, levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin ayrı ayrı ölçümüne olanak sağlar. Aşağıda Şekil 5.6'da bir fotoğrafı görülen USB haberleşmeli bu sensör ticari olarak erişilebilir (ST72F651), mikro elektromekanik sistem (MEMS) teknolojinine göre üretilmiş bir sensördür. 3 eksenli ivme ölçümü için etkili ve ucuz (50 \$) bir çözüm sağlar. Fiyatının pahalı olmaması nedeniyle bu sensör üç boyutlu oyun konsollarında ve kişisel bilgisayarlarla kullanılmak üzere tasarlanmış üç boyutlu farelerde yer değiştirmeyi algılamak için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Sensör, beraberinde verilen PC arayüzünde 3 eksende ivme değişimini gerçek zamanlı olarak gösterdiği gibi, ayrıca periyodik örnekleme aralıklarında anlık ivme değerlerini de bir veri dosyasına yazar. Üç eksendeki ivme değişimleri, bu veri dosyası kullanılarak çizdirilmiştir. Şekil 5.7 bu sensörün ölçümler süresince hareket eden kısım üzerindeki konumunu göstermektedir.



Şekil 5.6. Kullanılan ivme sensörü

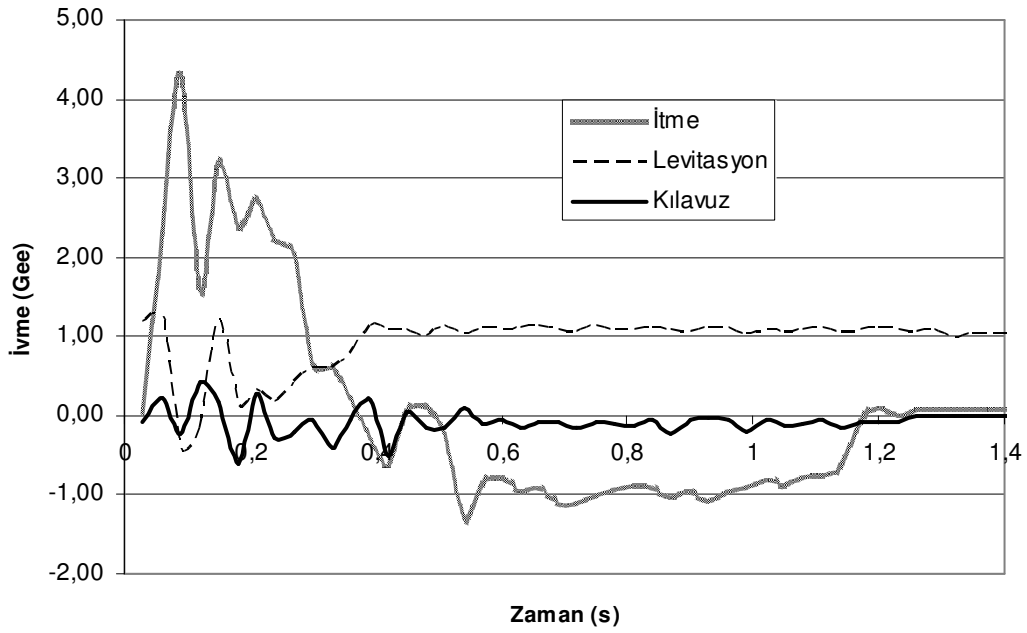


Şekil 5.7. İvme sensörünün konumu

5.2.1. Statik Stabilite

Bu test levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin sistemde sürekli mevcut olduğunu ve yineleyici kuvvetin [Kim *vd.*, 1996] hareket eden sistemi sürekli merkezlediğini deneysel olarak ispatlamak amacıyla yapılmıştır. Şekil 5.8 üç eksenle ivme değişimi göstermektedir.

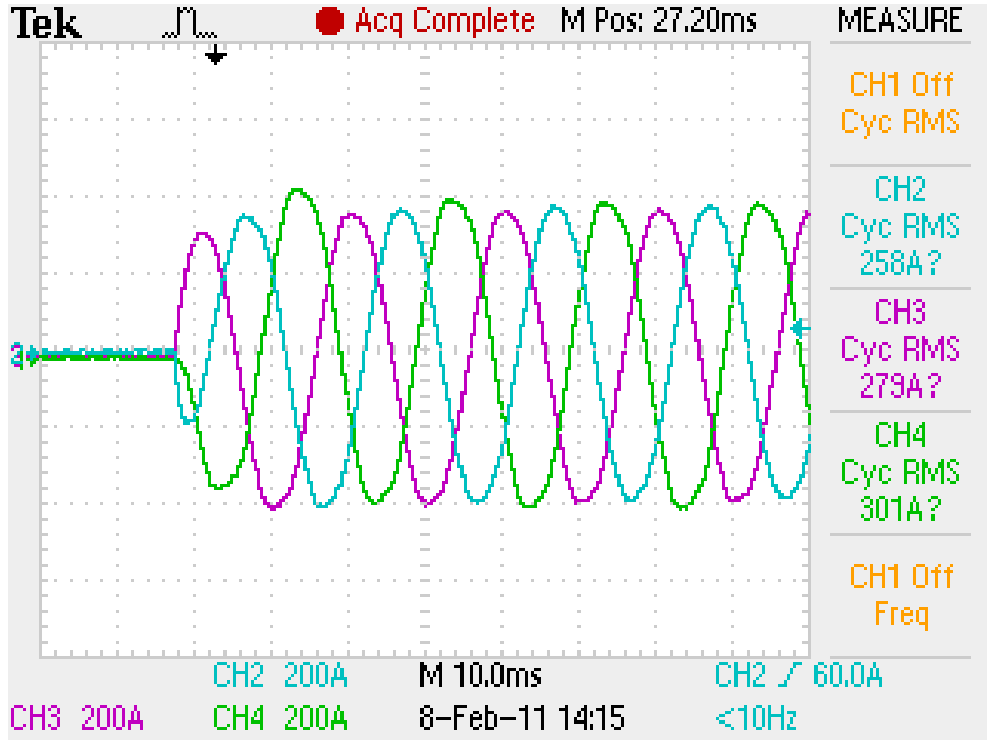
Grafikten görüleceği üzere ivme kuvvetinin değişimi, klasik rotasyonel asenkron motorun tork-hız eğrisine benzemektedir. Bu grafik ayrıca herhangi bir harici kontrol eforu olmadan levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin varlığını, sürekliliğini ve sınırlılığını deneysel olarak ispatlamaktadır. Operasyon süresinin en başında ve operasyon sona erdiğinde yerçekimi ivmesi kadar bir ivme (1 Gee) grafikte görülmektedir. Operasyon süresince yerçekimi ivmesinden daha fazla bir levitasyon ivmesi (dolayısıyla kuvveti) mevcuttur. Kılavuz kuvvet ise operasyon süresince sürekli yön değiştirmekte, yani hareket eden sistem sağa yaklaştığında sola doğru bir kuvvetle onu merkezlemeye çalışmakta ve hareket eden sistem sola yaklaştığında da ters yönlü bir kuvvet üreterek onu merkezlemektedir.



Şekil 5.8. Statik stabilite için ivme-zaman grafiği

İtme kuvvetinin ise operasyon süresince birkaç kez polarizasyon değiştirdiği gözlenmektedir. Bunun sebebi üç faz gerilimlerinin eş zamanlı olarak doğrudan sisteme uygulanmasıdır. Bu tarz bir enerjilendirme, kovanda indüklenen akımda yüksek genlikli bir DC bileşen oluşturur. Bu DC bileşen de şekildeki gibi ters yönlü bir kuvvet oluşturarak sistemi yavaşlatmaya çalışır. Kovanda indüklenen akımın DC bileşeninin sebep olduğu bu yavaşlatıcı etkiyi azaltmak için, [Balıkcı *vd.*, 2003] bobinlere uygulanan voltajın başlangıçtaki fazını, kalıcı durumda akım ile gerilim arasındaki faz farkına eşit olacak şekilde anahtarlanmasını önermiş ve bu problemi detaylandırmıştır.

Sistemin şebekeden çektiği akım 3 ayrı akım probu ve 4 kanallı bir osiloskop aracılığıyla ölçülmüştür. Şekil 5.9 sistemin enerjilendirildiği ilk andan akımın mevcut bulunduğu son ana kadar (operasyon süresince) akımın değişimi ve faz akımlarının efektif değerlerini gösteren osiloskop ekranının bir çıktısıdır. Şekilden görüleceği üzere faz akımları 300 A (efektif) değerine kadar ulaşmaktadır. Tepe değeri ise 425 A mertebesine ulaşmaktadır. Ölçülen bu akım değeri, bu fiziksel boyutlardaki bir prototip için oldukça yüksektir ve aşırı akım ihtiyacı önerilen sistemin temel zayıflığını temsil eder. Zira 3 faz şebeke voltajında 300 A akım çeken bir sistemde harcanan güç yaklaşık 200 kW'dır.



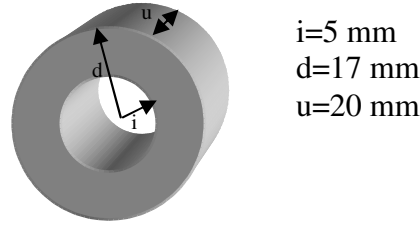
Şekil 5.9. Statik stabilite için akım-zaman grafiği

Sistemin bu derece yüksek akım çekmesinin birkaç temel sebebi vardır. Bunlardan ilki sistemin her üç kuvveti de tek bir motorla üretmesidir. Klasik maglev sistemlerinde itme ve levitasyon kuvveti için ayrı birer motor, kılavuz kuvveti için ise genellikle kalıcı mıknatıslar kullanılmaktadır. Toplam güç ihtiyacındaki bu tarz bir paylaşım, her bir güç üretici sistemin nominal güç değerini görece daha düşük bir seviyeye çekmektedir. Yüksek akımın bir diğer sebebi sistemin hava nüveli olmasıdır. Havanın relüktansı demir nüveye göre çok daha fazla olduğundan, sistemde dolaşan akıya gösterilen manyetik direnç de fazla olacak ve hava nüveli sistemin şebekeden nispeten daha fazla akım çekmesine sebep olacaktır.

Aşırı akımın üçüncü sebebi seçilen konfigürasyondur. Daha önce vurgulandığı gibi önerilen sistem için iki farklı konfigürasyon mevcuttur. Bunlardan birinde hareket eden kısım sadece alüminyum kovan iken, diğerinde hareket eden kısım bobinleri de içerir ve bu nedenle ağırlığı yüzlerce kat daha fazladır. Buraya kadar test sonuçları sunulan sistem ikinci konfigürasyona ilişkin bir prototiptir. Ölçülen akım ve güç değerleri ileride tanıtılacak olan kontrolörün gerçek zamanlı olarak uygulanmasını oldukça güçleştirmektedir. Zira bu test yapılırken tüm koruma

cihazları devre dışı bırakılmış ve sistem doğrudan transformatörden sürülmüştür. Ancak kontrol gerçekleştirilmesinde doğrultma işlemi ve PWM anahtarlama sinyalleriyle yeniden AC üretimi sürecinde biri MOSFET biri IGBT tabanlı iki ayrı sürücü aşırı akım nedeniyle yanmıştır. 300 A ve 200 kW değerleri klasik laboratuvar ortamında, üretimi ve satışı yaygın güç elektroniği elemanları ve pasif devre elemanları kullanılarak tamamlanamamıştır. Tüm bu nedenlerle, ileride tanıtılacak olan kontrolörün sadece tasarım ve benzetim düzeyinde kalmaması ve bu kontrolörün gerçek zamanlı uygulamasının yapılabilmesi amacıyla, sistemin çektiği akımı düşürmek için diğer konfigürasyona ilişkin bir prototip üretilmiştir.

Yol üzerinden enerjilendirilen, hareket eden sistemin sadece bir alüminyum boru olduğu ve tüm ray boyunca bobin içeren bu konfigürasyonun üretilmesindeki temel amaç, akımı daha kolay manipüle edilebilir bir seviyeye düşürmektir. Bu amaçla, tasarım kriterlerine de sadık kalmak şartıyla bobinlerdeki sarım sayısı mümkün olduğunca yüksek tutulmaya çalışılmış ve bu yolla sabit bir amper-sarım çarpımı için sarım sayısı artırılarak akımın düşürülmesi denenmiştir. Anılan bu konfigürasyonda, Şekil 5.10'de görüldüğü gibi iç yarıçapı 5 mm, dış yarıçapı 18 mm ve uzunluğu 20 mm olan bobinler sarılmıştır.

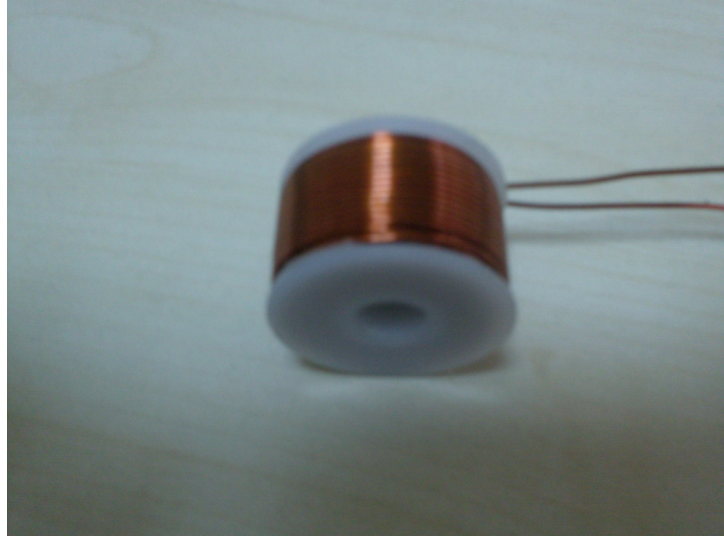


Şekil 5.10. Bobinin profil görünüşü

Bobin uzunluğu kutup adımı $\tau = 6 \text{ cm}$ ve dolayısıyla kovan uzunluğu $2\tau = 12 \text{ cm}$ olacak şekilde seçilmiştir. Bobinler sarılırken 1 mm çapında emaye izoleli bakır iletken kullanılmıştır. Her katta 19 sarım vardır ve bobin toplam 11 kat sarılmıştır. Dolayısıyla bir bobinde toplam 209 sarım vardır. Tablo 5.1 tahrik bobinlerinin özelliklerini ve Şekil 5.11 tahrik bobinlerinden bir tanesini göstermektedir. Bobinlerde kat sayısı fazla olduğu için mekanik bütünlüğün bozulmasını engellemek amacıyla, bobinler ince plastik malzemeden yapılmış karkas içine sarılmıştır.

Tablo 5.1. Bakır tahrik bobinlerinin özellikleri

Kutup adımı	60 mm
Kalınlık	20 mm
Dış yarıçap	17 mm
İç yarıçap	5 mm
Kutup adımı başına bobin sayısı	3
Bobin başına siper sayısı	209
Malzeme	Bakır



Şekil 5.11. Bakır tahrik bobinlerinden bir tanesi

Kovan için yine alüminyum boru kullanılmıştır. Uzunluğu 12 cm, dış çapı 40 mm ve et kalınlığı 2 mm bir alüminyum boru, dörtte birlik kısmı alınacak şekilde tornalanmıştır. Yani bu ek tasarım için de açıklık açısı 90° dir. Yine akımı düşürmek amacıyla hava aralığının mümkün olduğunca düşük olması amaçlanmıştır. Seçilen fiziksel boyutlara göre hava aralığı 1.5 mm olacaktır. Tablo 5.2 bu tasarım için kullanılan kovanın özelliklerini, Şekil 5.12 ise bu kovana ilişkin bir fotoğrafı göstermektedir.

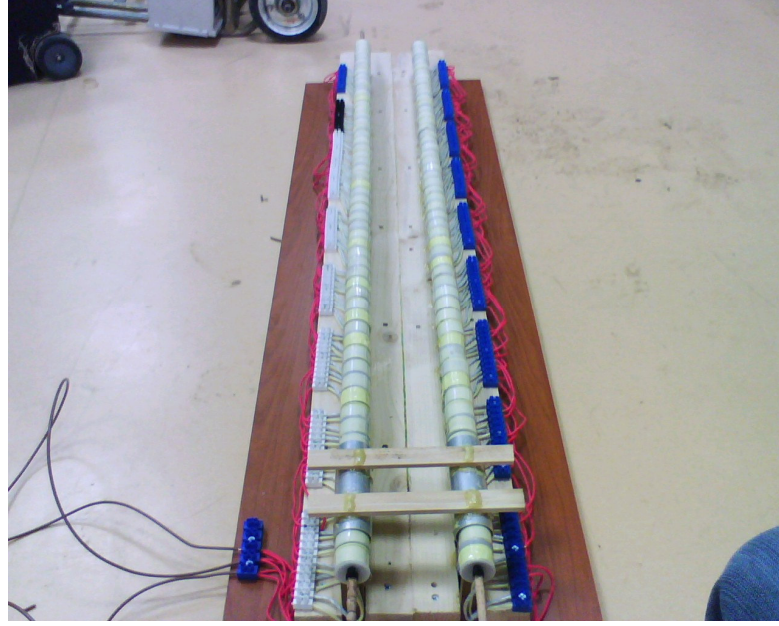
Tablo 5.2. Kovanın özellikleri

Uzunluk	12 cm
Kalınlık	2 mm
Dış çap	40 mm
Açıklık açısı	90°
Malzeme	Alüminyum



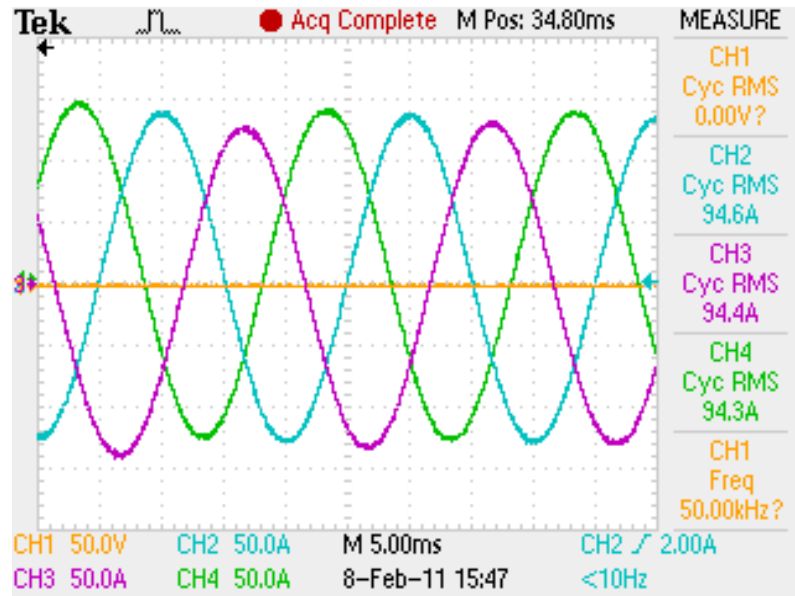
Şekil 5.12. Alüminyum kovan

Üretilen bobinlerden bir tanesinin direnci 0.258Ω ve indüktansı 0.302 mH 'dir. Üç faz için 6 bobin ve faz başına 2 bobin bulunduğu için direnç $0.516 \Omega/\text{faz}$ ve indüktans $0.604 \text{ mH}/\text{faz}$ değerlerine sahiptir. Her bir kolda 9 adet altılı bobin grubu (her bir kolda toplam 54 bobin) bulunmaktadır. Bu 9 adet altılı bobin grubu, yine akım değerini düşürmek amacıyla seri bağlanmıştır. En son altılı bobin grubunun çıkış uçları ise yıldız bağlıdır. Şekil 5.13 hem tahrik bobinlerini hem de kovanı içeren tüm sisteme ilişkin bir fotoğrafı göstermektedir.



Şekil 5.13. Yol üzerinden enerjilendirilen konfigürasyon

Şebekeden çekilen akımı düşürmek amacıyla tasarlanan ve üretilen bu sistemin son olarak testi yapılmıştır. Şekil 5.14 bu konfigürasyona ilişkin akım ölçümlerini göstermektedir. Faz akımlarının efektif değeri 94.6 A ve tepe değeri 134 A mertebesine kadar çıkmaktadır. Özet olarak bu konfigürasyonda da akım arzu edilen değerlere düşürülemediği görülmüştür.



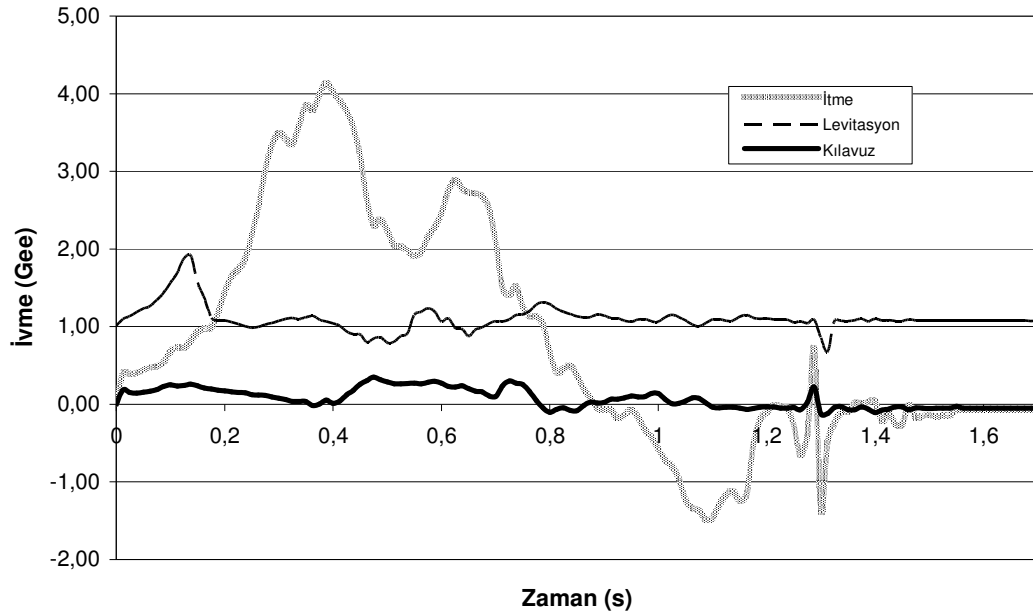
Şekil 5.14. Akım profili

5.2.2. Dinamik Stabilite

Maglev sistemleri, “Düşük Sönüm Problemi” [Rote ve Cai, 2002] ile baş edebilmelidir. Elektrodinamik süspansiyonlu sistemler kendiliğinden kararlı sistemler olarak nitelendirilirler ancak bu niteleme kalıcı durum (statik durum) için geçerlidir. İyi bir maglev sistemi, harici bozucu etkiye maruz kaldığında da tekrar denge durumuna dönmeli ve kararlı olarak çalışmasına devam edebilmelidir.

Düşük sönüm problemi, klasik maglev sistemleri için baş etmesi güç bir problem vasfı teşkil eder. Zira sistem harici bir etkiye maruz kaldığında levitasyonun sürekliliği sağlanmalı ve özellikle de sistem raydan çıkmamalıdır. İlgili kontrol sistemleri bu dinamik etkiyi de göz önüne alacak şekilde tasarlanmalıdır.

Önerilen sistemde ise, hareket eden kısmın merkezlenmesi Yineleyici Kuvvet vasıtasıyla yapılmaktadır ve daha önce de belirtildiği gibi levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin kontrol gereksiniminin söz konusu olmaması nedeniyle bu özellik önerilen sistemin temel güçlü özelliklerinden birini teşkil eder. Yineleyici kuvvetin varlığının ve stabilize edici etkisinin teorik ve deneysel ispatı [Kim *vd.*, 1996]’da verilmekle beraber, anılan deney statik koşullarda yapılmıştır. Bu nedenle harici bir bozucu etkide önerilen sistemin dinamik stabilitesinin ispatlanması gerekir. Bu amaçla daha uzun (7 m) bir ray hazırlanmıştır. Bu yeni alüminyum kovan, uzunluğu haricinde önceki (3 m) olan kovan ile aynı mekanik özelliklere sahiptir. Bu kovanın üzerinde rastgele seçilen bir noktaya elastik materyaller puntolanmıştır. Sistem enerjilendirilmeden önce bu elastik materyallerin hareket eden sistem için bozucu etki oluşturma vasfı test edilmiş ve daha sonra sistem enerjilendirilmiştir. Bu testte sınanacak temel nitelik, hareket eden kısmın bu elastik materyallere çarptıktan sonra harici bir kontrol eforu olmadan yeniden denge durumuna dönüp dönmeyeceği, yani levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin varlığının, sürekliliğinin, sınırlılığının ve stabilize edici etkisinin mevcut olup olmayacağıdır. Şekil 5.15 bu teste ilişkin ivme ölçümlerini göstermektedir.



Şekil 5.15. Dinamik stabilite için ivme ölçümleri

Zaman ekseninde $t=1.27$ anında üç eksenle eş zamanlı olarak meydana gelen olaylar, hareket eden kısmın harici bozucu etki yaratması amacıyla puntolanmış elastik materyallere çarptığı anı göstermektedir. Levitasyon kuvveti ani bir şekilde düşmekle beraber, kısa bir süre içinde yeniden kararlı duruma dönmüştür. Benzer şekilde sisteme hem sağdan hem de soldan etki eden materyaller, kılavuz kuvvetinin de kısa bir süre zarfında her iki yönde de ani ivmelenmesine neden olmuş fakat Yineleyici Kuvvet tekrar hareket eden kısmı merkezleyerek operasyonun, harici bozucu etkiden önceki denge durumuna dönmesini sağlamıştır.

Klasik manyetik levitasyon trenlerinde ise benzer bir deneyde aynı dinamik performansı elde etmek için tepki süresi oldukça kısa kontrolörlere ihtiyaç duyulur. Yüksek hassasiyetli sensörlerle ölçülen anlık pozisyon kontrol sistemine giriş verisi olarak sunulur. Kontrol algoritması sistemin yeniden denge durumuna dönmesini sağlayacak kontrol sinyallerini üretmeli, kontrol sistemi donanımı bunu çok hızlı bir şekilde kontrol edilen sisteme iletmelidir. Tüm bu yüksek hassasiyetli ve hızlı donanım ihtiyacı belli bir maliyeti de beraberinde getirir. Ancak önerilen sistem, çalışmanın teorik iddiaları ile de örtüşecek şekilde, tüm bu işlemleri harici bir kontrol eforu olmadan yapar.

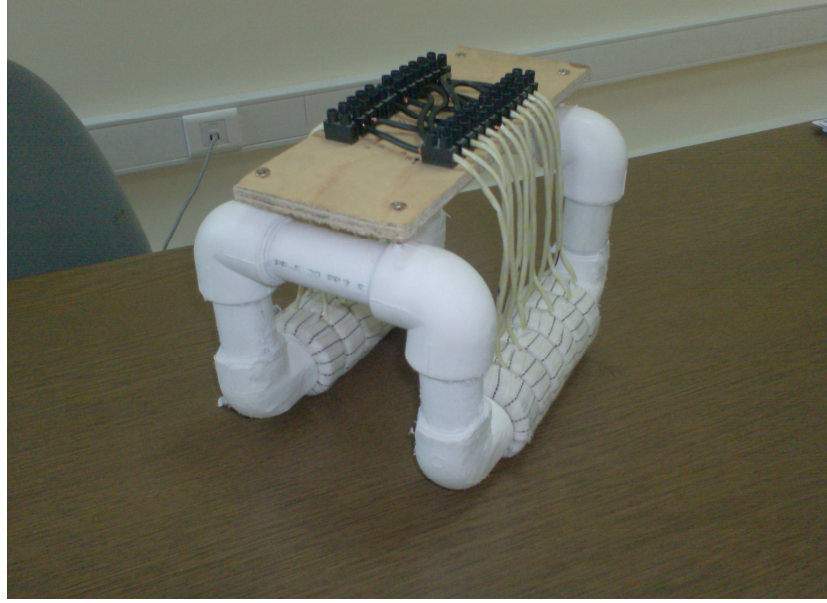
5.2.3. Farklı Parametreler İçin Statik Stabilité

Yineleyici Kuvvet, belli bir parametre kümesinin fonksiyonudur [Kim *et al*, 1996]. Dolayısıyla sistemin operasyon teorisinin, yineleyici kuvvetin varlığının ve stabilize edici etkisinin, tasarım kriterlerine bağılı kalmak koşuluyla, değişik parametre değerleri için de ispatlanması gerekir. Örneğin önerilen sistem, değişik hava aralığı değerleri için, farklı malzemeler için ve dolayısıyla farklı malzeme iletkenliği değerleri için, değişik senkron hız değerleri için, farklı kütleler için de operasyon teorisini sağlamalıdır.

Bunu test etmek için yeni bir tahrik bobini üretilmiştir. Bu tahrik bobini bakır iletkenden sarılmıştır. Bu tahrik bobini tasarlanırken en kötü durum göz önünde bulundurulmuştur: Daha geniş hava aralığı, daha düşük senkron hız, daha yüksek ağırlık ve bobin başına daha az sipir sayısı. Bu amaçla tahrik bobini kutup adımı $\tau = 60$ mm ve dolayısıyla uzunluğu $2\tau = 120$ mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Dolayısıyla senkron hız 6 m/sn olacaktır. Tablo 5.3, ilk tasarlanan alüminyum tahrik bobini ile burada anlatılan bakır tahrik bobininin özelliklerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Her iki tahrik bobini de aynı kovanda test edilmiştir. Şekil 5.16 tasarlanan ve üretilen yeni bakır tahrik bobinini göstermektedir.

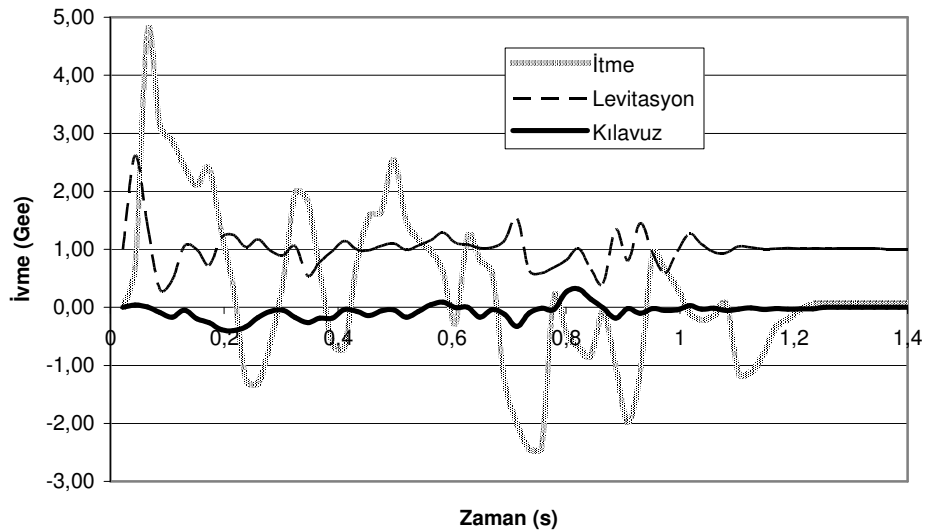
Tablo 5.3. Tahrik bobinlerinin karşılaştırılması

Malzeme	Alüminyum	Bakır
Kutup adımı	70 mm	60 mm
Kalınlık	20 mm	18 mm
Dış yarıçap	28 mm	26 mm
İç yarıçap	18 mm	16 mm
Kutup adımı başına bobin sayısı	3	3
Bobin başına sarım sayısı	120	100
Senkron hız	7 m/sn	6 m/sn
Ağırlık	2478 gr	3470 gr
Direnç	0.372 Ω /faz	0.222 Ω /faz
İndüktans	0.526 mH/faz	0.408 mH/faz



Şekil 5.16. Bakır tahrik bobini

Üretilen bu bakır tahrik bobini enerjilendirilerek üç eksende ivme ölçülmüştür. Şekil 5.17 bu test için yapılan ivme ölçümlerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi levitasyon ve kılavuz kuvvetleri bu test için de sınırlı, kararlı ve stabilize edici niteliğini korumaktadır. Yineleyici kuvvet hareket eden sistemi bu test için de merkezlemektedir. Yani değişik hava aralığı, kütle, malzeme iletkenliği ve senkron hız değerleri için operasyon teorisi ispatlanmıştır. Bununla beraber, itme kuvveti önceki testlere kıyasla daha yüksek genliğe ve daha fazla osilasyona sahiptir ve bu kuvvet için bir kontrolöre duyulan ihtiyacı daha baskın biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 5.17. Bakır tahrik bobini için ivme ölçümleri

6. KONTROL

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında önerilen sistemin doğrusal olmayan geri adımlamalı kontrolü açıklanmıştır. Aşağıda tanıtılan kontrolör, [Hasirci *vd.*, 2011a]'da özetlenen kontrolörün detaylandırılmış formunu teşkil eder. Bu kontrolör tam bilinen model bazlı bir kontrolördür ve d - q ekseninde [Vas, 1990] modellenmiş sistemin akı değişkenlerinin ölçülmediğini kabul ederek bu akı değişkenleri için bir gözlemci içermektedir. Bu kontrolör tasarlanmadan önce, silindirik yapıdaki bu tür motorlar için rotor akılarının ölçülebildiği kabulüyle tasarlanmış bir tam bilinene model bazlı ve bir de adaptif kontrolör [Hasirci *vd.*, 2009]'da sunulmuştur. Anılan bu kontrolörün temel amacı, farklı parametrelerinin sistem performansı üzerindeki etkisinin benzetim yoluyla gözlenmesi olmakla beraber, rotor akısının ticari olarak erişilebilir akı sensörleri ile ölçülebilmesi ve üretilen sinyalin geribesleme amaçlı kullanılması, bu tür motorların kontrolüne odaklı olarak çalışan bazı laboratuvarların temel stratejilerinden biridir ve buna ilişkin gerçek zamanlı bir uygulama örneği [Wu *et al.*, 2006] tarafından, iki yılda bir düzenli olarak yapılan maglev konferansında sunulmuştur. Ayrıca bu tür motorlar için, alternatif olarak, yapay sinir ağları tabanlı [Lin and Wai, 2001], adaptif [Lin and Lee, 2000], gürbüz [Hu *vd.*, 2007] ve durum değişkenlerinin birbirine bağımlılığını ortadan kaldıran [Rathore ve Mahendra, 2003] kontrolörler önerilmiştir.

Sistemin durum uzay modeli [Wai and Liu, 2003]

$$\begin{aligned}
 \dot{i}_{qs} &= -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{qs} - \frac{pL_m\pi}{\sigma L_s L_r h} \lambda_{dr} V + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \lambda_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} \\
 \dot{i}_{ds} &= -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{ds} + \frac{pL_m\pi}{\sigma L_s L_r h} \lambda_{qr} V + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \lambda_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} \\
 \dot{\lambda}_{qr} &= -\frac{1}{T_r} \lambda_{qr} + p \frac{\pi}{h} \lambda_{dr} V + \frac{L_m}{T_r} i_{qs} \\
 \dot{\lambda}_{dr} &= -\frac{1}{T_r} \lambda_{dr} - p \frac{\pi}{h} \lambda_{qr} V + \frac{L_m}{T_r} i_{ds} \\
 \dot{V} &= -\frac{B}{M} V + \frac{K_f}{M} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) - \frac{F_L}{M}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

şeklindedir. (6.1) denkleminde ifade edilen modelde;

i_{ds} ve i_{qs} : d ve q -eksenlerindeki stator akım bileşenleri

λ_{ds} and λ_{qs} : d ve q -eksenlerindeki rotor akı bileşenleri

V : doğrusal hız

R_s and R_r : Faz başına stator and rotor dirençleri

L_s and L_r : Faz başına stator and rotor indüktansları

L_m : Manyetizasyon indüktansı

p : kutup sayısı

h : kutup adımı

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$: kaçak indüktans katsayısı

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ Rotor zaman sabiti

$K_f = \frac{3 p \pi L_m}{2 h L_r}$ Kuvvet sabiti

F_L : Yük kuvveti

M : hareket eden kısmın toplam kütlesi

B : viskoz sürtünme katsayısı

V_d ve V_q : uygulanan stator voltajları

Kontrol Problemi Tanımı :

“ V_d ve V_q sinyallerini kullanarak, v değişkenini istenen değer v_{des} 'e sür.” (hız kontrol)

Bu kontrolör, tüm sistem parametrelerinin (mekanik ve elektriksel) değerinin bilindiğini, ancak akıların ölçülemediğini kabul ederek, akıyı temsil eden durumlar için gözlemleyici tasarlanması üzerine kuruludur. Tez çalışması için tasarlanan, üretilen ve testleri gerçekleştirilen sistem incelendiğinde rotorun, yani alüminyum kovanın direncinin ve indüktansının klasik rotasyonel indüksiyon motorlarına kıyasla kolaylıkla ölçülebileceği görülmektedir. Sistem doğrusal olarak hareket ettiğinden, rotasyonel sistemlerdeki eylemsizliğin yerini kütle almıştır ve dolayısıyla hareket eden kısmın kütlesi de kolaylıkla ölçülebilir.

Sistem dinamiği, aşağıdaki formda tekrar yazılabilir :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -a_1 x_1 - a_2 x_4 x_5 + a_3 x_3 + a_4 u_1 \\
 \dot{x}_2 &= -a_1 x_2 + a_2 x_3 x_5 + a_3 x_4 + a_4 u_2 \\
 \dot{x}_3 &= -b_1 x_3 + b_2 x_1 + b_3 x_4 x_5 \\
 \dot{x}_4 &= -b_1 x_4 + b_2 x_2 - b_3 x_3 x_5 \\
 \dot{x}_5 &= -c_1 x_5 + c_2 (x_1 x_4 - x_2 x_3) - c_3
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

(6.2) ifadesinde,

$$\begin{aligned}
 x_1 &= i_{qs}, & x_2 &= i_{ds}, & x_3 &= \lambda_{qr}, & x_4 &= \lambda_{dr}, & x_5 &= V \\
 a_1 &= \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right), & a_2 &= \frac{p L_m \pi}{\sigma L_s L_r h}, & a_3 &= \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r}, & a_4 &= \frac{1}{\sigma L_s} \\
 b_1 &= \frac{1}{T_r}, & b_2 &= p \frac{\pi}{h}, & b_3 &= \frac{L_m}{T_r} \\
 c_1 &= \frac{B}{M}, & c_2 &= \frac{K_f}{M}, & c_3 &= \frac{F_L}{M} \\
 u_1 &= V_{qs}, & u_2 &= V_{ds}
 \end{aligned}$$

olarak kısaltılmıştır. Sistem akısını temsil eden ve ölçülemeyen durumlar olan x_3 ve x_4 için, aşağıda verildiği gibi model tabanlı bir gözlemleyici tasarlanabilir:

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_3 &= -b_1 \hat{x}_3 + b_2 x_1 + b_3 \hat{x}_4 x_5 \\
 \dot{\hat{x}}_4 &= -b_1 \hat{x}_4 + b_2 x_2 - b_3 \hat{x}_3 x_5
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Durum gözlemeleme hatası ise aşağıdaki gibi tanımlanır :

$$\begin{aligned}
 \tilde{x}_3 &= x_3 - \hat{x}_3 \\
 \tilde{x}_4 &= x_4 - \hat{x}_4
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

(6.4) ifadesinde \hat{x}_3 ve \hat{x}_4 sırasıyla x_3 ve x_4 durumlarının tahminlerini \tilde{x}_3 ve \tilde{x}_4 ise tahmin hatalarını temsil etmektedir. Bu durumda tahmin hatalarının dinamiği şu şekilde olacaktır:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_3 &= -b_1\tilde{x}_3 + b_3\tilde{x}_4x_5 \\ \dot{\tilde{x}}_4 &= -b_1\tilde{x}_4 - b_3\tilde{x}_3x_5\end{aligned}\quad (6.5)$$

(6.5) ile verilen ikinci mertebeden sistem üstel olarak kararlıdır. Bu ifade, aşağıdaki Lyapunov fonksiyonu kullanılarak ispatlanabilir.

$$V_{obs} = \frac{1}{2}\tilde{x}_3^2 + \frac{1}{2}\tilde{x}_4^2 \quad (6.6)$$

Bu fonksiyonun zamana göre türevi,

$$\begin{aligned}\dot{V}_{obs} &= \tilde{x}_3\dot{\tilde{x}}_3 + \tilde{x}_4\dot{\tilde{x}}_4 \\ &= -b_1\tilde{x}_3^2 + b_3\tilde{x}_3\tilde{x}_4x_5 - b_1\tilde{x}_4^2 - b_3\tilde{x}_3\tilde{x}_4x_5 \\ &= -b_1\tilde{x}_3^2 - b_1\tilde{x}_4^2 \\ &= -2b_1V_{obs} \leq 0\end{aligned}\quad (6.7)$$

(6.6) ve (6.7) ifadeleri bir arada incelendiğinde, durum tahmin hatalarının üstel olarak sifıra gittiği görülmektedir.

Tasarlanacak kontrolörün performansının belirlenmesi amacıyla, hata sinyali

$$e = x_5 - x_{5d} \quad (6.8)$$

olarak tanımlansın. Bu durumda hata dinamiği

$$\dot{e} = -c_1x_5 + c_2(x_1x_4 - x_2x_3) - c_3 - \dot{x}_{5d} \quad (6.9)$$

olacaktır. Kontrol sinyalleri u_1 ve u_2 , (6.2) ile verilen sistem dinamiğinin ilk iki denkleminde bulunmaktadır, ancak kontrol amacı beşinci durum değişkenini stabilize etmektir ve bu durum değişkenine ilişkin denklem, herhangi bir kontrol sinyalini içermemektedir. Bu durumda uygulanabilecek olası çözümlerden bir “Geriadımlama” prosedürüdür [Krstic vd., 1995]. Eğer x_3 ve x_4 ölçülebilseydi, geriadımlama prosedürünün uygulayabilmek için, üretilen elektromekanik kuvvet

$F_e = (x_1x_4 - x_2x_3)$ zahiri kontrol değişkeni olarak seçilebilirdi. Bu iki durum ölçülemediği, ancak dinamiği (6.3) ifadesiyle verilen gözlemleyici yardımıyla tahmin edildiği için, üretilen elektromekanik kuvvetin tahminini temsil eden $\hat{F}_e = c_2(x_1\hat{x}_4 - x_2\hat{x}_3)$ zahiri kontrol değişkeni olarak seçilebilir. Bu değişkene erişmek için, (6.9) ile verilen hata dinamiği aşağıdaki formda tekrar yazılabilir:

$$\dot{e} = -c_1x_5 + c_2(x_1\hat{x}_4 - x_2\hat{x}_3) + c_2(x_1\tilde{x}_4 - x_2\tilde{x}_3) - c_3 - \dot{x}_{5d} \quad (6.10)$$

Bu durumda \tilde{x}_3 ve \tilde{x}_4 bilinmeyen bozucu etkiler olarak kabul edilip, bu bozucu etkinin söndürülebilmesi için “Doğrusal Olmayan Sönümleme” [Krstic *et al*, 1995] tekniği kullanılabilir. (6.10) ifadesinin sağ tarafına, stabilize edici bir α_1 fonksiyonu, aşağıda gösterildiği gibi eklenip çıkarılabilir:

$$\dot{e} = -c_1x_5 + c_2(x_1\hat{x}_4 - x_2\hat{x}_3) + c_2(x_1\tilde{x}_4 - x_2\tilde{x}_3) - c_3 - \dot{x}_{5d} \pm \alpha_1 \quad (6.11)$$

α_1 fonksiyonu aşağıdaki gibi tasarlansın:

$$\alpha_1 = -K_e e + \dot{x}_{5d} + c_1x_5 + c_3 - d_1c_2^2(x_1^2 + x_2^2)e \quad (6.12)$$

(6.12) ifadesinde K_e pozitif kontrol kazancıdır. Yine bu ifadede

$$N_d = d_1c_2^2(x_1^2 + x_2^2)e \quad (6.13)$$

ile gösterilen terim \tilde{x}_3 ve \tilde{x}_4 bozucu etkilerinin söndürmek için kullanılacak olan doğrusal olmayan sönümleme terimidir, d_1 ise sönümleme katsayısıdır, Bu aşamada üzerine geriadımılama uygulanacak olan yeni bir hata değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanır :

$$z_1 = \hat{F}_e - \alpha_1 = c_2(x_1\hat{x}_4 - x_2\hat{x}_3) - \alpha_1 \quad (6.14)$$

Elde edilen hız takip hatası dinamiği şu şekilde olacaktır:

$$\dot{e} = -K_e e + c_2 (x_1 \tilde{x}_4 - x_2 \tilde{x}_3) - d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) e + z_1 \quad (6.15)$$

Artık z_1 'in dinamiği geliştirilerek kontrol giriş sinyalleri u_1 and u_2 'ye erişilebilir.

Burada z_1 ; $x_1, x_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4, e, \dot{x}_{5d}$ ve \dot{x}_5 değişkenlerinin bir fonksiyonudur.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 = & \left(\frac{\partial \hat{F}_e}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \hat{F}_e}{\partial x_2} \dot{x}_2 \right) - \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha}{\partial x_2} \dot{x}_2 \right) \\ & + \left(\frac{\partial \hat{F}_e}{\partial \hat{x}_3} \dot{\hat{x}}_3 + \frac{\partial \hat{F}_e}{\partial \hat{x}_4} \dot{\hat{x}}_4 \right) - \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \hat{x}_3} \dot{\hat{x}}_3 + \frac{\partial \alpha}{\partial \hat{x}_4} \dot{\hat{x}}_4 \right) \\ & + \frac{\partial \hat{F}_e}{\partial e} \dot{e} + \frac{\partial \alpha}{\partial e} \dot{e} \\ & + \frac{\partial \hat{F}_e}{\partial \dot{x}_{5d}} \ddot{x}_{5d} + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{x}_{5d}} \ddot{x}_{5d} \\ & + \frac{\partial \hat{F}_e}{\partial x_5} \dot{x}_5 + \frac{\partial \alpha}{\partial x_5} \dot{x}_5 \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 = & (c_2 \hat{x}_4 + 2d_1 c_2^2 x_1 e) (-a_1 x_1 - a_2 x_4 x_5 + a_3 x_3 + a_4 u_1) \\ & + (-c_2 \hat{x}_3 + 2d_1 c_2^2 x_2 e) (-a_1 x_2 + a_2 x_3 x_5 + a_3 x_4 + a_4 u_2) \\ & + [-c_2 x_2 (-b_1 \hat{x}_3 + b_2 x_1 + b_3 \hat{x}_4 x_5)] + [c_2 x_1 (-b_1 \hat{x}_4 + b_2 x_2 - b_3 \hat{x}_3 x_5)] \\ & + [K_e + d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) - c_1] [-c_1 x_5 + c_2 (x_1 \hat{x}_4 - x_2 \hat{x}_3) + c_2 (x_1 \tilde{x}_4 - x_2 \tilde{x}_3) - c_3 + \dot{x}_{5d}] \\ & + (-c_1 \dot{x}_{5d}) - \ddot{x}_{5d} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Bu durumda e ve z_1 için nihai dinamikler aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\dot{e} = -K_e e + c_2 (x_1 \tilde{x}_4 - x_2 \tilde{x}_3) - d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) e + z_1$$

$$\begin{aligned}
\dot{z}_1 = & (c_2\hat{x}_4 + 2d_1c_2^2x_1e)a_4u_1 + (-c_2\hat{x}_3 + 2d_1c_2^2x_2e)a_4u_2 \\
& + (c_2\hat{x}_4 + 2d_1c_2^2x_1e)(-a_1x_1 - a_2\hat{x}_4x_5 + a_3\hat{x}_3) \\
& + (-c_2\hat{x}_3 + 2d_1c_2^2x_2e)(-a_1x_2 + a_2\hat{x}_3x_5 + a_3\hat{x}_4) \\
& + [-c_2x_2(-b_1\hat{x}_3 + b_2x_1 + b_3\hat{x}_4x_5)] + [c_2x_1(-b_1\hat{x}_4 + b_2x_2 - b_3\hat{x}_3x_5)] \\
& + [K_e + d_1c_2^2(x_1^2 + x_2^2) - c_1] [-K_e e - d_1c_2^2(x_1^2 + x_2^2)e + z_1] + (-c_1\dot{x}_{5d}) - \ddot{x}_{5d} \\
& + \left\{ [(c_2\hat{x}_4 + 2d_1c_2^2x_1e)a_3] + [(-c_2\hat{x}_3 + 2d_1c_2^2x_2e)a_2x_5] - [(K_e + d_1c_2^2(x_1^2 + x_2^2) - c_1)c_2x_2] \right\} \tilde{x}_3 \\
& + \left\{ [(-c_2\hat{x}_3 + 2d_1c_2^2x_2e)a_3] - [(c_2\hat{x}_4 + 2d_1c_2^2x_1e)a_2x_5] + [(K_e + d_1c_2^2(x_1^2 + x_2^2) - c_1)c_2x_1] \right\} \tilde{x}_4 \\
\dot{z}_1 = & \Omega_1 a_4 u_1 + \Omega_2 a_4 u_2 + \Omega_3 + \Omega_4 \tilde{x}_3 + \Omega_5 \tilde{x}_4
\end{aligned} \tag{6.18}$$

(6.18) ifadesinde Ω_i , $i = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ölçülebilen sinyaller ve bilinen parametrelerin kombinasyonlarını temsil eder. Bu durumda geribesleme kuralı aşağıdaki gibi seçilebilir:

$$\Omega_1 a_4 u_1 + \Omega_2 a_4 u_2 = -K_{z_1} z_1 - e - \Omega_3 - d_2 (\Omega_4^2 + \Omega_5^2) z_1 \tag{6.19}$$

(6.19) ifadesinde K_{z_1} kontrol kazancı ve d_2 ikinci bir sönümleme katsayısıdır. Eğer kontrol sinyalleri (6.19) ifadesindeki gibi seçilirse, z_1 için nihai dinamik şu şekilde olacaktır:

$$\dot{z}_1 = -K_{z_1} z_1 - e + \Omega_4 \tilde{x}_3 + \Omega_5 \tilde{x}_4 - d_2 (\Omega_4^2 + \Omega_5^2) z_1 \tag{6.20}$$

Daha önce de vurgulandığı gibi, sistem akılarını temsil eden değişkenlerin de sınırlı kalması gerekmektedir. Bu nedenle ikinci bir hata sinyali, akı izleme hatası, eğer akılar ölçülebilseydi,

$$x_3^2 + x_4^2 - \psi_d \tag{6.21}$$

şeklinde tanımlanabilirdi. Ancak bu iki durum ölçülemediği için, akı takip hatası aşağıdaki gibi tanımlanmalıdır:

$$\varepsilon = \hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^2 - \psi_d \tag{6.22}$$

Bu ifadede ψ_d arzu edilen akı profilini, ε ise akı tahmin hatasını temsil etmektedir. Bu hata değişkeni, herhangi bir bilinmeyen terim içermemektedir. Bu aşamada ε dinamiği geliştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon} &= 2\left(-b_1\hat{x}_3^2 + b_2x_1\hat{x}_3 + b_3\hat{x}_3\hat{x}_4x_5 - b_1\hat{x}_4^2 + b_2x_2\hat{x}_4 - b_3\hat{x}_3\hat{x}_4x_5\right) - \dot{\psi}_d \\ \dot{\varepsilon} &= -2b_1\left(\hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^3\right) + 2b_2\left(x_1\hat{x}_3 + x_2\hat{x}_4\right) - \dot{\psi}_d\end{aligned}\quad (6.23)$$

(6.23) ifadesindeki $2b_2\left(x_1\hat{x}_3 + x_2\hat{x}_4\right)$ terimi zahiri kontrol değişkeni olarak seçilirse, ikinci bir stabilize edici α_2 fonksiyonu (6.23) ifadesinin sağ tarafına aşağıdaki gibi eklenip çıkarılabilir:

$$\dot{\varepsilon} = -2b_1\left(\hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^3\right) + 2b_2\left(x_1\hat{x}_3 + x_2\hat{x}_4\right) - \dot{\psi}_d \pm \alpha_2 \quad (6.24)$$

Bu durumda α_2 aşağıdaki gibi tasarlanır.

$$\alpha_2 = -K_\varepsilon\varepsilon + 2b_1\left(\hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^3\right) + \dot{\psi}_d \quad (6.25)$$

Yeni bir hata değişkeni,

$$z_2 = 2b_2\left(x_1\hat{x}_3 + x_2\hat{x}_4\right) - \alpha_2 \quad (6.26)$$

ifadesi ile tanımlansın. Bu durumda akı takip hatasının dinamiği

$$\dot{\varepsilon} = -K_\varepsilon\varepsilon + z_2 \quad (6.27)$$

şeklinde olacaktır. z_2 üzerinde geriadımleme yapılırsa,

$$\begin{aligned}
\dot{z}_2 = & 2b_2\hat{x}_3(-a_1x_1 - a_2x_4x_5 + a_3x_3 + a_4u_1) \\
& + 2b_2\hat{x}_4(-a_1x_2 + a_2x_3x_5 + a_3x_4 + a_4u_2) \\
& + 2(b_2x_1 - 2b_1\hat{x}_3)(-b_1\hat{x}_3 + b_2x_1 + b_3\hat{x}_4x_5) \\
& + 2(b_2x_2 - 2b_1\hat{x}_4)(-b_1\hat{x}_4 + b_2x_2 - b_3\hat{x}_3x_5) \\
& + K_\varepsilon \left[-2b_1(\hat{x}_3^2 + \hat{x}_4^3) + 2b_2(x_1\hat{x}_3 + x_2\hat{x}_4) - \dot{\psi}_d \right] - \ddot{\psi}_d
\end{aligned} \tag{6.28}$$

eşitliği elde edilir. Bu durumda ε ve z_2 için nihai dinamikler şu şekilde olacaktır:

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon} = & -K_\varepsilon\varepsilon + z_2 \\
\dot{z}_2 = & 2b_2\hat{x}_3a_4u_1 + 2b_2\hat{x}_4a_4u_2 \\
& + 2b_2\hat{x}_3(-a_1x_1 - a_2\hat{x}_4x_5 + a_3\hat{x}_3) \\
& + 2b_2\hat{x}_4(-a_1x_2 + a_2\hat{x}_3x_5 + a_3\hat{x}_4) \\
& + 2(b_2x_1 - 2b_1\hat{x}_3)(-b_1\hat{x}_3 + b_2x_1 + b_3\hat{x}_4x_5) \\
& + 2(b_2x_2 - 2b_1\hat{x}_4)(-b_1\hat{x}_4 + b_2x_2 - b_3\hat{x}_3x_5) \\
& + K_\varepsilon(-K_\varepsilon\varepsilon + z_2) - \dot{\psi}_d \\
& + 2b_2(a_3\hat{x}_3 + a_2\hat{x}_4x_5)\tilde{x}_3 \\
& + 2b_2(a_3\hat{x}_4 - a_2\hat{x}_3x_5)\tilde{x}_4 \\
\dot{z}_2 = & \Omega_6a_4u_1 + \Omega_7a_4u_2 + \Omega_8 + \Omega_9\tilde{x}_3 + \Omega_{10}\tilde{x}_4
\end{aligned} \tag{6.29}$$

(6.29) ifadesinde Ω_i , $i = \{6, 7, 8, 9, 10\}$ değeri bilinen parametrelerin ve ölçülebilen sinyallerin kombinasyonlarını temsil eder. Bu durumda geribesleme kuralının seçimi aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$\Omega_6a_4u_1 + \Omega_7a_4u_2 = -K_{z_2}z_2 - \varepsilon - \Omega_8 - d_3(\Omega_9^2 + \Omega_{10}^2)z_2 \tag{6.30}$$

(6.30) ifadesine K_{z_2} kontrol kazancını ve d_3 üçüncü sönümleme katsayısını temsil eder. Eğer geribesleme kuralı (6.30) ifadesindeki gibi seçilirse, z_2 için nihai dinamik

$$\dot{z}_2 = -K_{z_2}z_2 - \varepsilon + \Omega_9\tilde{x}_3 + \Omega_{10}\tilde{x}_4 - d_3(\Omega_9^2 + \Omega_{10}^2)z_2 \tag{6.31}$$

(6.19) ve (6.30) ifadeleri ile tanımlanan iki kontrol sinyali denklemini kombine edilirse,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{a_4} \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 \\ \Omega_6 & \Omega_7 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -K_{z_1} z_1 - e - \Omega_3 - d_2 (\Omega_4 + \Omega_5) z_1 \\ -K_{z_2} z_2 - \varepsilon - \Omega_8 - d_3 (\Omega_9 + \Omega_{10}) z_2 \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde,

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= (c_2 \hat{x}_4 + 2d_1 c_2^2 x_1 e) \\ \Omega_2 &= (-c_2 \hat{x}_3 + 3d_1 c_2^2 x_2 e) \\ \Omega_3 &= (c_2 \hat{x}_4 + 2d_1 c_2^2 x_1 e)(-a_1 x_1 - a_2 \hat{x}_4 x_5 + a_3 \hat{x}_3) \\ &\quad + (-c_2 \hat{x}_3 + 2d_1 c_2^2 x_2 e)(-a_1 x_2 + a_2 \hat{x}_3 x_5 + a_3 \hat{x}_4) \\ &\quad + [-c_2 x_2 (-b_1 \hat{x}_3 + b_2 x_1 + b_3 \hat{x}_4 x_5)] + [c_2 x_1 (-b_1 \hat{x}_4 + b_2 x_2 - b_3 \hat{x}_3 x_5)] \\ &\quad + [K_e + d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) - c_1] [-K_e e - d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) e + z_1] + (-c_1 \dot{x}_{5d}) - \ddot{x}_{5d} \\ \Omega_4 &= \left\{ [(c_2 \hat{x}_4 + 2d_1 c_2^2 x_1 e) a_3] + [(-c_2 \hat{x}_3 + 2d_1 c_2^2 x_2 e) a_2 x_5] - [(K_e + d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) - c_1) c_2 x_2] \right\} \\ \Omega_5 &= \left\{ [(-c_2 \hat{x}_3 + 2d_1 c_2^2 x_2 e) a_3] - [(c_2 \hat{x}_4 + 2d_1 c_2^2 x_1 e) a_2 x_5] + [(K_e + d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) - c_1) c_2 x_1] \right\} \\ \Omega_6 &= 2b_2 \hat{x}_3 \\ \Omega_7 &= 2b_2 \hat{x}_4 \\ \Omega_8 &= 2b_2 \hat{x}_3 (-a_1 x_1 - a_2 \hat{x}_4 x_5 + a_3 \hat{x}_3) \\ &\quad + 2b_2 \hat{x}_4 (-a_1 x_2 + a_2 \hat{x}_3 x_5 + a_3 \hat{x}_4) \\ &\quad + 2(b_2 x_1 - 2b_1 \hat{x}_3)(-b_1 \hat{x}_3 + b_2 x_1 + b_3 \hat{x}_4 x_5) \\ &\quad + 2(b_2 x_2 - 2b_1 \hat{x}_4)(-b_1 \hat{x}_4 + b_2 x_2 - b_3 \hat{x}_3 x_5) \\ &\quad + K_e (-K_e \varepsilon + z_2) - \ddot{\psi}_d \\ \Omega_9 &= 2b_2 (a_3 \hat{x}_3 + a_2 \hat{x}_4 x_5) \\ \Omega_{10} &= 2b_2 (a_3 \hat{x}_4 - a_2 \hat{x}_3 x_5) \end{aligned}$$

olarak gösterilmiştir.

(6.32) ifadesi ile tasarlanan kontrol sinyalleri,

$$D = \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 \\ \Omega_6 & \Omega_7 \end{bmatrix} \quad (6.33)$$

matrisinin tersinin alınabilir olduğu bölgelerde iyi tanımlıdır. Ancak D matrisi global olarak tersi alınabilir bir matris değildir ve (6.32) ile tanımlanan kontrol sinyalleri hız

ve akı takip amacını global olarak sağlayamaz. Ancak arzu edilen akı profili ψ_d , demantizasyon akısı değerini aşmazsa, (6.32) ifadesi ile tanımlanan kontrol sinyallerinin, kontrol amaçlarını *başlangıç koşullarının belirgin bir kümesi için* sağladığını garanti edebiliriz [Krstic vd., 1995]. Bu ifadeyi ve (6.32) ile verilen kontrol sinyallerinin sistem kararlılığına etkisini analiz etmek için, aşağıdaki teorem ve onun ispatı kullanılabilir. Teoreme geçmeden önce, stabilize edilmesi gereken 6 adet hata değişkeninin dinamiği toplu halde aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
\dot{e} &= -K_e e + z_1 + c_2 (x_1 \tilde{x}_4 - x_2 \tilde{x}_3) - d_1 c_2^2 (x_1^2 + x_2^2) e \\
\dot{z}_1 &= -K_{z_1} z_1 - e + \Omega_4 \tilde{x}_3 + \Omega_5 \tilde{x}_4 - d_2 (\Omega_4^2 + \Omega_5^2) z_1 \\
\dot{\mathcal{E}} &= -K_e \mathcal{E} + z_2 \\
\dot{z}_2 &= -K_{z_2} z_2 - \mathcal{E} + \Omega_9 \tilde{x}_3 + \Omega_{10} \tilde{x}_4 - d_3 (\Omega_9^2 + \Omega_{10}^2) z_2 \\
\dot{\tilde{x}}_3 &= -b_1 \tilde{x}_3 + b_3 \tilde{x}_4 x_5 \\
\dot{\tilde{x}}_4 &= -b_1 \tilde{x}_4 - b_3 \tilde{x}_3 x_5
\end{aligned} \tag{6.34}$$

Teorem 6.1: Dinamiği (6.2) ifadesi ile verilen sistem için, (6.32) ifadesi ile verilen kontrol sinyali, hız ve akı takip hatasını asimptotik olarak sıfıra sürer. Buna ek olarak, kapalı çevrim sistemdeki tüm sinyallerin sınırlı kalmasını garanti eder.

İspat 6.1: Teoremde verilen ifadeyi ispatlamak için, aşağıdaki gibi negatif olmayan bir fonksiyon seçilsin.

$$V = \frac{1}{2} (e^2 + z_1^2 + \mathcal{E}^2 + z_2^2) + \frac{1}{2b_1} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} \right) (\tilde{x}_3^2 + \tilde{x}_4^2) \tag{6.35}$$

Bu fonksiyonun her bir terimi her zaman pozitifdir. Yani fonksiyon pozitif tanımlıdır. Eğer bu fonksiyonun her iki tarafının zamana göre türevi alınır ve (6.34) ifadesindeki hata dinamikleri elde edilen denklemde yerine konulursa, bazı temel matematiksel operasyonlardan sonra aşağıdaki ifade elde edilir:

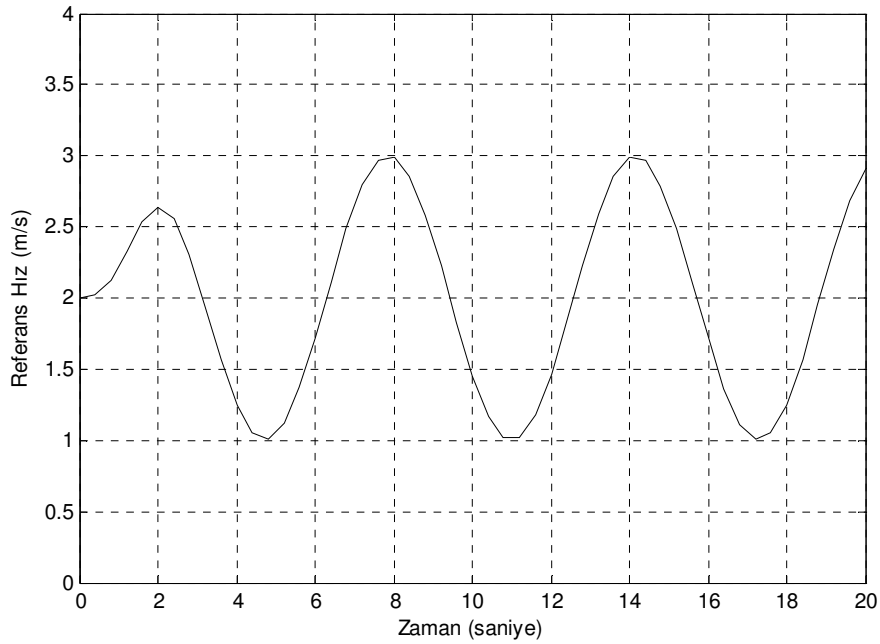
$$\begin{aligned}
\dot{V} = & -K_e e^2 - K_{z_1} z_1^2 - K_\varepsilon \varepsilon^2 - K_{z_2} z_2^2 \\
& + c_2 x_1 \tilde{x}_4 e - d_1 c_2^2 x_1^2 e^2 - \frac{1}{4d_1} \tilde{x}_4^2 + \frac{1}{4d_1} \tilde{x}_4^2 \Big\} \rightarrow -d_1 \left(\frac{1}{2d_1} \tilde{x}_4 - c_2 e x_1 \right)^2 + \frac{1}{4d_1} \tilde{x}_4^2 \\
& - c_2 x_2 \tilde{x}_3 e - d_1 c_2^2 x_2^2 e^2 - \frac{1}{4d_1} \tilde{x}_3^2 + \frac{1}{4d_1} \tilde{x}_3^2 \\
& + \Omega_4 \tilde{x}_3 z_1 - d_2 \Omega_4^2 z_1^2 - \frac{1}{4d_2} \tilde{x}_3^2 + \frac{1}{4d_2} \tilde{x}_3^2 \\
& + \Omega_5 \tilde{x}_4 z_1 - d_2 \Omega_5^2 z_1^2 - \frac{1}{4d_2} \tilde{x}_4^2 + \frac{1}{4d_2} \tilde{x}_4^2 \\
& + \Omega_9 \tilde{x}_3 z_2 - d_3 \Omega_9^2 z_2^2 - \frac{1}{4d_3} \tilde{x}_3^2 + \frac{1}{4d_3} \tilde{x}_3^2 \\
& + \Omega_{10} \tilde{x}_4 z_2 - d_3 \Omega_{10}^2 z_2^2 - \frac{1}{4d_3} \tilde{x}_4^2 + \frac{1}{4d_3} \tilde{x}_4^2 \\
& + \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} \right) (\tilde{x}_3^2 + \tilde{x}_4^2) \\
\dot{V} = & -K_e e^2 - K_{z_1} z_1^2 - K_\varepsilon \varepsilon^2 - K_{z_2} z_2^2 - \frac{3}{4} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} \right) (\tilde{x}_3^2 + \tilde{x}_4^2) \\
& - d_1 \left(\frac{1}{2d_1} \tilde{x}_4 - c_2 e x_1 \right)^2 - d_1 \left(\frac{1}{2d_1} \tilde{x}_3 + c_2 e x_2 \right)^2 \\
& - d_2 \left(\frac{1}{2d_2} \tilde{x}_3 - \Omega_4 z_1 \right)^2 - d_2 \left(\frac{1}{2d_2} \tilde{x}_4 - \Omega_5 z_1 \right)^2 \\
& - d_3 \left(\frac{1}{2d_3} \tilde{x}_3 - \Omega_9 z_2 \right)^2 - d_3 \left(\frac{1}{2d_3} \tilde{x}_4 - \Omega_{10} z_2 \right)^2 \\
\leq & -K_e e^2 - K_{z_1} z_1^2 - K_\varepsilon \varepsilon^2 - K_{z_2} z_2^2 - \frac{3}{4} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} \right) (\tilde{x}_3^2 + \tilde{x}_4^2)
\end{aligned} \tag{6.36}$$

(6.35) ve (6.36) denklemleri bir arada incelendiğinde, V fonksiyonun azalan olduğu, bu fonksiyonun parametreleri olan $e, z_1, \varepsilon, z_2, \tilde{x}_3$ ve \tilde{x}_4 sinyallerinin, zaman sonsuza giderken ve başlangıç koşulları $\{e(0), z_1(0), \varepsilon(0), z_2(0), \tilde{x}_3(0), \tilde{x}_4(0)\} \in \Delta(\cdot)$ gibi bir kümenin içindeyken sıfıra gittiği görülmektedir. Bunun sonucu olarak, sırasıyla $x_5, x_4, x_3, x_1, x_2, u_1, u_2, a_1, a_2$ sinyallerinin sınırlı olduğu görülmektedir. Özetle kapalı çevrim sistemdeki tüm sinyaller sınırlıdır. Böylece teoremden verilen ifade ispatlanmış olur. ■

Tasarımı yukarıda anlatılan kontrolörün performansını gözlemlemek amacıyla, nümerik benzetim yapılmıştır. Matlab/Simulink paket yazılımı aracılığıyla yapılan benzetimde, parametre değerleri (stator ve rotor dirençleri ve indüktansları, hareket eden kısmın kütlesi) için Bölüm 5’de sunulan gerçek değerler kullanılmıştır. Arzu edilen hız profili

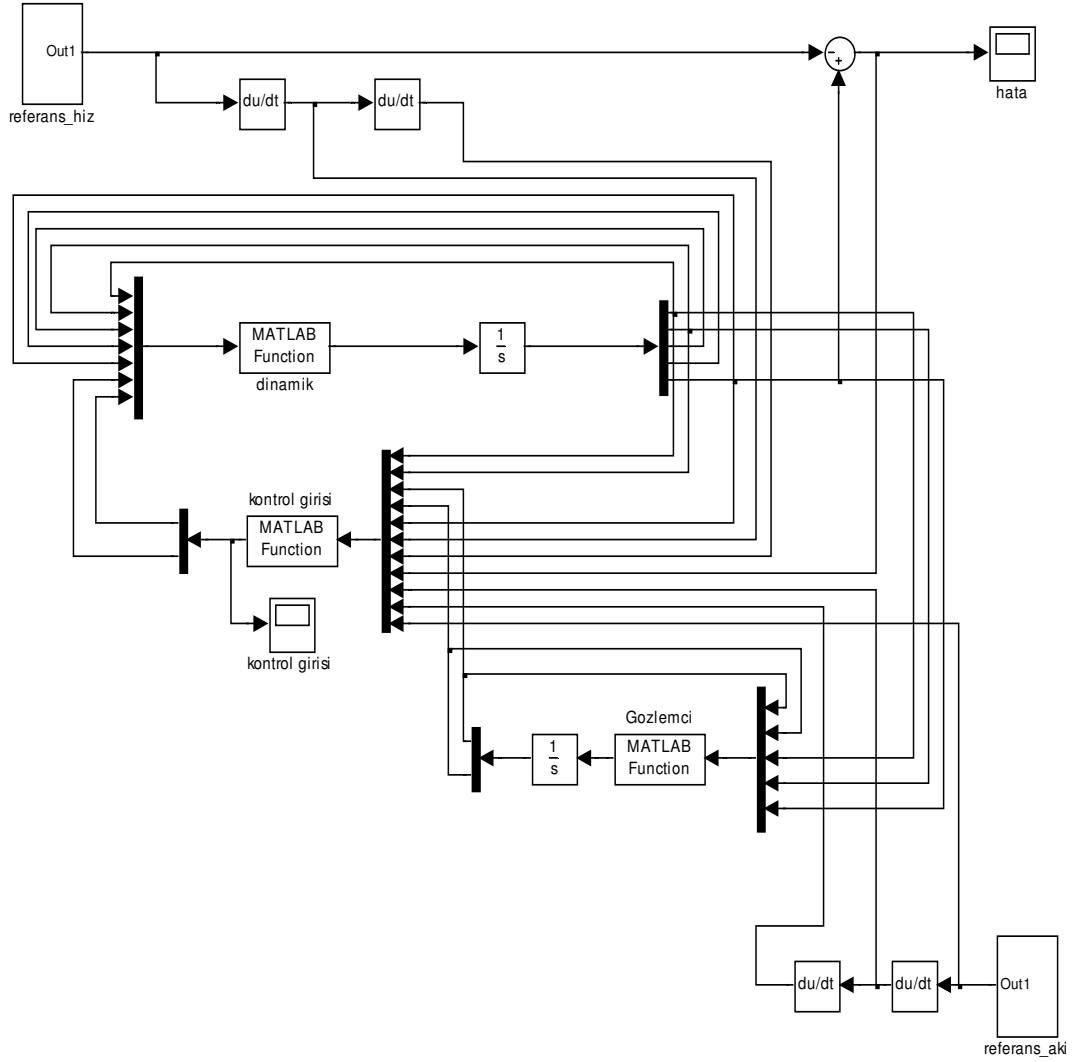
$$x_{sd} = 2 + \left[\left(1 - \exp\{-t^2\} \right) \sin(t) \right] \text{ m/sn} \quad (6.37)$$

şeklinde seçilmiştir. Bu hız profilinin zamana göre değişimi Şekil 6.1’de görülmektedir. Referans giriş için sabit bir hız değeri (örneğin 6 m/sn) seçmek yerine, bu şekilde zamana göre değişen bir profil seçilmesinin nedeni, benzetim sürecinde sistemi daha fazla zorlamak ve daha zor koşullar için kontrolör performansını gözleyebilmektir.



Şekil 6.1. Referans hız profili

Şekil 6.2 benzetim blok diyagramını göstermektedir. Buradaki “dinamik”, “kontrol girişi” ve “gözlemci” blokları sırasıyla sistem dinamiğinin, kontrolörün ve gözlemcinin gömüldüğü m-dosyalarıdır. Bu dosyaların kaynak kodu ekte sunulmuştur.



Şekil 6.2. Benzetim blok diyagramı

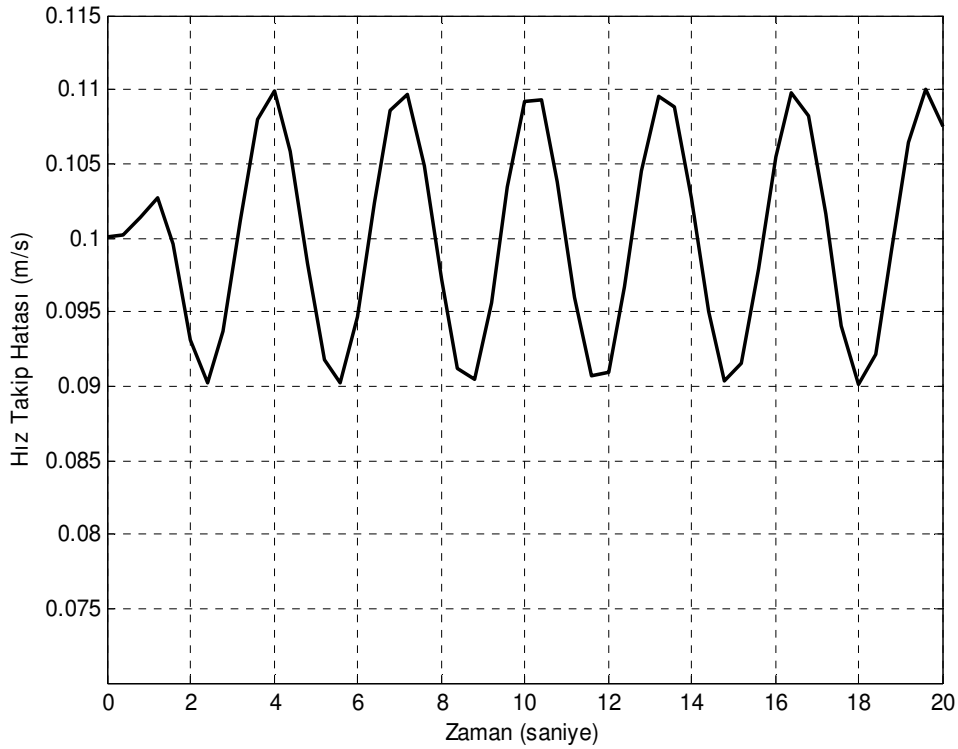
Blok diyagramda görülen referans akı profili ise

$$\psi_d = 6 + 2 \left[\left(1 - \exp\{-t^2\} \right) \right] \text{ Wb} \cdot \text{Wb} \quad (6.38)$$

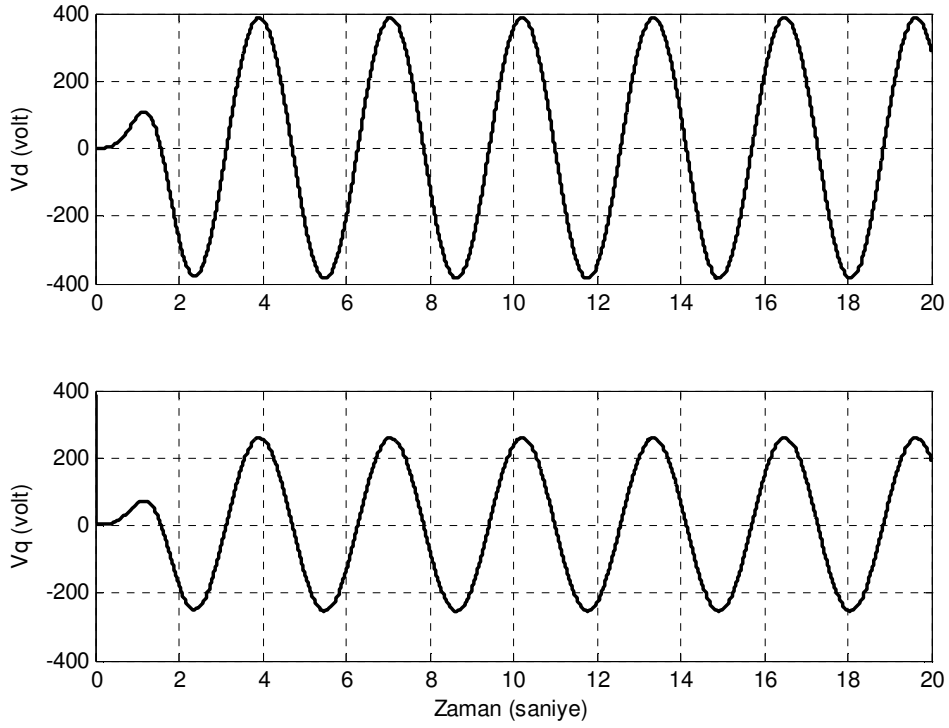
olarak seçilmiştir. Benzetim sürecinde kullanılan parametre değerleri; $p=2$, $R_s=0.372 \Omega$, $R_r=0.04 \Omega$, $L_s=0.526 \text{ mH}$, $L_r=0.0736 \text{ mH}$, $L_m=L_r$, $h=0.07 \text{ m}$, $M=2.478 \text{ kg}$, $B=0.015$, $F=0.1 \text{ kgm/sn}$ ve kontrol kazançlarıyla sönüm katsayılarının değerleri; $K_e=120$, $K_{z1}=80$, $K_e=10$, $K_{z2}=10$, $d_1=0.1$, $d_2=0.2$, $d_3=0.3$ şeklindedir.

Benzetim sürecinin kritik noktası, kontrolörün tasarım sürecinde de belirtildiği gibi, başlangıç koşullarının kararlılığı dikte eden belirgin bir kümesinin deneme-yanılma yöntemiyle (herhangi bir analitik metot olmaksızın) bulunmasıdır. Belli bir değer kümesi kararsızlığa ve kontrol girişlerinin sonsuza gitmesine neden olabileceği gibi, deneme-yanılma yoluyla elde edilmiş başka bir küme ise sistem kararlılığını ve referans hız profiline yüksek performansla takibini sağlayabilir.

Değişik çok sayıda başlangıç koşulu kümesi denendikten sonra elde edilen optimum çözüm (hız takibi sağlanırken kontrol sinyallerinin de kabul edilebilir seviyelerde kalmasını sağlayan başlangıç koşulları kümesi) için hız takip hatası değişim grafiği Şekil 6.3’de görülmektedir. Ayrıca Şekil 6.4, $d-q$ eksen takımında kontrol girişlerinin (uygulanan gerilim) değişimini göstermektedir.



Şekil 6.3. Hız takip hatasının zamana göre değişimi



Şekil 6.4. Kontrol giriş sinyallerinin zamana göre değişimi

Tasarlanan kontrolör tam bilinen model bazlı bir kontrolör olduğu için, tasarım sonuçlarına göre hız takip hatası, teorik olarak, sıfıra gitmelidir. Elde edilen benzetim sonuçları (Şekil 6.3) maksimum değeri 0.11 m/sn olan bir kalıcı-durum hatasını göstermektedir. Bu da yüzdesel olarak yaklaşık %1.5 kadar bir hataya karşılık gelmektedir. Kontrol sinyallerinin sınırlı ve uygulanabilir seviyede kalmasını sağlayacak kazanç değerleri için hatanın optimum değeri bu şekilde elde edilmiştir. Şekil 6.4’de görülen kontrol giriş sinyalleri başlangıç anındaki oldukça kısa süren bir geçici durumdan sonra ulaşılan kalıcı durumda sınırlı ve uygulanabilir seviyelerdedir.

7. UYDU SİSTEMLERİ İÇİN YERDEN-YÖRÜNGEYE FIRLATICI TASARIMI

Bu kısımda tez çalışması kapsamında önerilen konsept kullanılarak, mikro ve nano uyduların yerden-yörüngeye fırlatılması için kullanılan elektromanyetik fırlatıcılara yeni bir alternatif önerilmiştir. Önerilen alternatif, konstrüksiyon olarak tez çalışmasında tasarlanıp üretilerek test edilen sistemle aynı yapıya sahiptir, ancak burada sunulan çalışma sadece tasarım düzeyindedir [Hasirci *vd.*, 2011b].

Uzay araştırmalarına ilişkin son yıllardaki çalışmalar, mikro ve nano uyduların artan sayıları ile karakterize edilebilir. Özellikle mikro elektromekanik sistem (MEMS) teknolojisinin son yıllardaki gelişimi bu tür uyduların üretimini artırmıştır. Ancak bu tür uyduların uzaya fırlatılması hala üzerinde çalışılan bir problem olarak güncelliğini sürdürmektedir.

Aşağıdaki tablo, büyük ölçekli ve küçük ölçekli uyduların karşılaştırılmasına olanak sağlamak amacıyla, uyduların kütlelerine göre sınıflandırılmasını göstermektedir. Bu tablo ayrıca dolar cinsinden her bir uydu çeşidinin ortalama maliyetini göstermektedir.

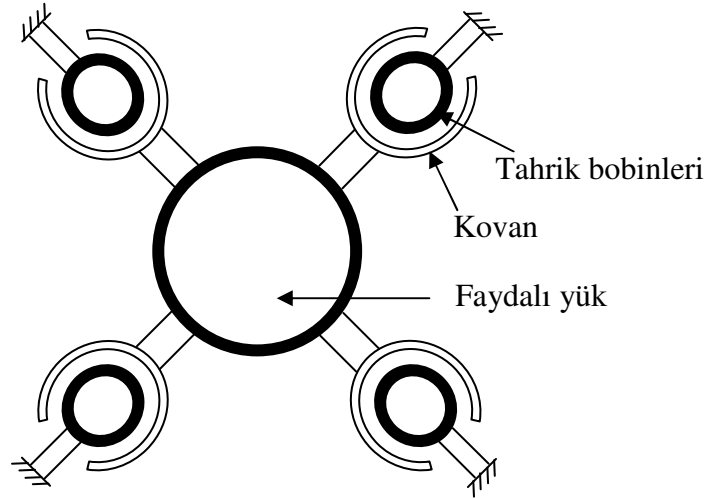
Tablo 7.1. Uyduların kütlelerine göre sınıflandırılması

Tür	Kütle (kg)	Maliyet (USD)
Büyük Uydular	>1000	0.1-2 Milyar
Orta Uydular	500-1000	50-100 Milyon
Mini Uydular	100-500	10-50 Milyon
Mikro Uydular	10-100	2-10 Milyon
Nano Uydular	1-10	0.2-2 Milyon
Piko Uydular	0.1-1	20-200 Bin
Femto Uydular	<1	0.1-20 Bin

Uyduların uzaya gönderilmesi de, tıpkı Bölüm 3'de anlatılan klasik fırlatıcı literatüründe olduğu gibi, iki temel alternatifi dikte eder; kimyasal fırlatıcılar [Liou, 2008] ve elektromanyetik fırlatıcılar [De Fair, 1989]. Yine Bölüm 3'de vurgulandığı gibi kimyasal roketler gelişmiş ve olgun bir teknolojiye sahiptir ancak fırlatma işleminin maliyetinin yüksekliği hala çözülmesi gereken bir sorun olarak varlığını sürdürmektedir [De Fair, 1989]. Elektromanyetik fırlatıcılar ise daha düşük maliyetli ve daha çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Burada tanıtılan fırlatıcı, mikro ve nano ölçekli uyduların uzaya fırlatılması için önerilmiştir ve temel tasarım amacı, fırlatma işleminin maliyetini düşürmektir. Temel tasarım kriterleri ise, 10 kilogramlık bir faydalı yük için namlu ağzında 7 km/sn hız, 30000 Gee ivmedir. Daha temel bir tasarım [Hasirci ve Balıkcı, 2009]'da, tez çalışması kapsamında yapılan tasarımın bir özeti ise [Hasirci vd., 2011b]'de sunulmuştur.

Tasarımın temel esinlenme noktası, 1993 yılında Zabar ve Levi'nin manyetik levitasyon trenlerine ilişkin yeni tasarım modeli için aldıkları patenttir [Zabar and Levi, 1993]. Buraya kadar olan kısımda uzunca tanıtılan bu sistem levitasyon, itme ve kılavuz kuvvetlerini tek motorla üretmekte ve levitasyon ile kılavuz kuvvetlerinin kontrol gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. O halde bu sistemin, bir uydunun namlu boyunca merkezlenerek ve namlu ağzında yüksek hız ve ivmeye erişmesi sağlanarak yörüngeye fırlatılması konusunda bir alternatif teşkil edebileceği bir hipotez olarak önerilmiştir. Tasarımın sonucunda, kabul edilebilir bir namlu uzunluğu ve akım-gerilim seviyeleri elde edilirse, hipotez teorik olarak ispatlanmış olacaktır. Zira önceki tasarımlar 833 metre gibi oldukça uzun namlu boylarına gereksinim duymaktadır [Zabar, Levi ve Birenbaum, 1996].

Fırlatıcı sistemi, dikey olarak pozisyonlanmış lineer motorlardan oluşur. [Zabar, Levi and Birenbaum, 1996]'da sunulan konfigürasyonun aksine, bu çalışmada aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi simetrik olarak konumlanmış 4 adet motor kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında yapılan tasarımda ayrıca, ihtiyaç duyulan enerjiye ilişkin temel düzeyde bir analiz de sunulmuştur. Simetrik olarak pozisyonlanmış 4 lineer motorun primeri, silindirik yapıdaki tahrik bobinlerini içerir. Sekonder ise primer ile eş eksenli silindirik kovana içermektedir. Yani sabit kısım bobinler, hareket eden kısım ise alüminyum kovandır.



Şekil 7.1. Önerilen sistem

Şekil 7.1’de sunulan konfigürasyonun çalışma prensibi, maglev treni ile aynıdır. Primere (tahrik bobinlerine) uygulanan çok fazlı gerilim, bu bobinlerde çok fazlı akımların dolaşmasını sağlar ve bu akımların meydana getirdiği manyetik alan, sekonderde (kovanda) gerilim indükler. Sekonder, uçları kısa devre edilmiş iletken dizisi şeklinde olduğu için, indüklenen bu gerilim sekonderde kısa devre akımlarının dolaşmasını sağlar. Primer ve sekonderdeki akımların etkileşiminden itme kuvveti ve radyal kuvvet oluşur. İki bileşeni (levitasyon ve kılavuz) olan radyal kuvvet, hareket eden sekonderi merkezler. Böylece alüminyum kovan, namlu içinde merkezlenmiş bir vaziyette hareket eder ve namluyu da bu şekilde terk eder. Asenkron operasyon, sabit kısım ile hareketli kısım arasında senkronizasyon ihtiyacını ortadan kaldırır. Ayrıca tüm akım taşıyan iletkenler, faydalı kuvvetin üretimine katkıda bulunur.

Okuyucu için tasarımın hem mikro- hem de nano boyutlu uydulara adapte edilebilmesi için, hareket eden kısmın toplam ağırlığı 15 kg seçilmiştir. Hareket eden kısım iki temel parçayı içerir, bunlardan biri faydalı yük (uydu), diğeri ise bu faydalı yükü çevreleyen kapsül ve kovana ilişkin diğer uzantılardır. Bu 15 kilogramlık ağırlığın 10 kilogramlık kısmı faydalı yükse (uyduya) aittir. Bu durumda faydalı yükün ağırlığının, kovanın toplam ağırlığına oranı $10/15=2/3$ dür. Tasarım parametreleri ve seçilen değerler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 7.2. Tasarım spesifikasyonları

Parametre	Değer
İvme (Gee)	30000
Hız (km/sn)	7
Hareket eden kısmın ağırlığı (kg)	15
Faydalı yük çapı	İhtiyaç duyulduğu kadar
Armatür oranı	2/3
Fırlatma yapısı	Dikey

Tasarım süreci namlu uzunluğunun (l_n) hesaplanması ile başlar.

$$l_n = \frac{1}{2} \frac{V^2}{a} \quad (7.1)$$

(7.1) denkleminde V hareket eden kısmın namlu ağzından çıkış hızını ve a ivmeyi temsil etmektedir. Bölüm 4'de de anıldığı üzere, kovanın toplam uzunluğu (l_k), kutup adımının (τ) iki katına eşittir.

$$l_k = 2\tau \quad (7.2)$$

Kovan uzunluğunun hesaplanmasından sonra, değeri belirlenecek olan parametre her bir kovan parçasının ağırlığıdır.

$$W_k = (1 - v) \frac{W_t}{n_k} \quad (7.3)$$

Denklem (7.3)'de W_k her bir kovan parçasının ağırlığını, W_t hareket eden kısmın toplam ağırlığını, n_k kovan parçası sayısını (bu tasarım için 4) ve v ise armatür oranını (bu tasarım için 2/3) temsil etmektedir. W_k değerinin hesaplanmasındaki amaç, kovanın fiziksel boyutlarının belirlenmesidir. Örneğin kovanın ortalama yarıçapı,

$$r_k^{ort} = \frac{W_k}{2\pi\xi_k c_k l_k} \quad (7.4)$$

ifadesi ile hesaplanır. (7.4) ifadesinde ξ_k kovan için kullanılan malzemenin (alüminyum) yoğunluğunu, c_k ise kovanın et kalınlığını temsil etmektedir. Bu durumda kovanın iç yarıçapı

$$r_k^i = r_k^{ort} - \frac{c_k}{2} \quad (7.5)$$

olacaktır. Hava boşluğu (g) için bir değer seçilerek, namlunun dış yarıçapı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r_n^d = r_k^i - g \quad (7.6)$$

Tasarım algoritmasının kalan kısmı, namlunun parça sayısını belirlemek amacını güder. Bölüm 3'de belirtildiği gibi, elektromanyetik fırlatıcıların namluları tek parçalı ya da çok parçalı olarak tasarlanabilir. Ancak çok yüksek hız gereksinimi, namlunun çok parçalı olmasını zorunlu kılar. Namlunun parça sayısını belirlemek amacıyla, namlu bobinlerinin kalınlığı (c_n) için bir değer atanır ve böylece efektif hava boşluğu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$g_e = \frac{c_k + c_n}{2} \quad (7.7)$$

Burada dalga sayısı ($\beta = \pi/\tau$) adında yeni bir değişken tanımlayarak, itme kuvvetinin maksimum değere ulaştığı kayma değeri olan kritik kayma (s_c) ile senkron hızın ($v_s = 2\tau f$) çarpımını aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$s_c v_s = \frac{1 + \coth(\beta g_e)}{c_k \mu_0} \quad (7.8)$$

(7.8) ifadesinde, γ kovan malzemesinin iletkenliğini ve μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini temsil eder. Bu çarpımın hesaplanmasındaki amaç, θ/Γ oranının değerini belirlemektir. Burada θ kovandaki ısı artışını ve Γ fırlatıcının tükettiği minimum gücün tepe gücüne oranını göstermektedir. Kovandaki ısı artışı için kabul edilebilir bir değer seçilerek, Γ oranı aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$\theta/\Gamma = \frac{v\xi_k V s_c v_s}{c} \quad (7.9)$$

(7.9) ifadesinde c birim hacim için ısı katsayısını gösteren bir katalog değeridir. Tasarım algoritması, namlunun parça sayısının aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmasıyla son bulur.

$$n = \frac{V}{2s_c v_s \sqrt{\Gamma^2 - 1}} \quad (7.10)$$

Tablo 7.2’de verilen tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak, buraya kadar anlatılan tasarım algoritması yardımıyla, ihtiyaç duyulan fırlatıcı bu noktadan itibaren tasarlanabilir. Tasarım sürecinde kullanılan sabitlerin değerleri $\xi_k = 2700$, $c=2.68 \times 10^6$ ve $\gamma=1.33 \times 10^7$ (400 °K sıcaklığında) şeklindedir. Tablo 7.2’deki tasarım spesifikasyonlarını göz önünde bulundurularak, (7.1) denklemi yardımıyla namlu uzunluğu 83.24 m olarak bulunur. Eğer kutup adımı uzunluğu 0.36 m olarak seçilirse, (7.2) denklemine göre kovan uzunluğu 0.72 m olarak bulunur. Kutup çiftleri için, bir çift tam sayı elde etmek amacıyla namlu uzunluğu 86.4 m değerine yuvarlanabilir. Şekil 7.1’de görüldüğü gibi 4 adet namlu kullanılırsa, (7.3) denklemi yardımıyla her bir kovanın ağırlığı 1.25 kg olarak bulunur. Eğer kovanın et kalınlığı, ticari olarak erişilebilir bir değer olması amacıyla 0.0067 m olarak seçilirse, bu durumda kovan yarıçapının ortalama değeri 0.16 m olarak bulunur. Kovanın iç yarıçapı ise 0.15 m olacaktır. Hava boşluğu için $g=0.02$ m seçilir ve (7.6) denklemi kullanılırsa namlu bobinlerinin dış yarıçapı 0.13 m olarak bulunur. Son olarak, (7.7) ile (7.10) arasındaki 4 denklem kullanılır ve ısı artışı 500 °K olarak kabul edilirse, namlunun parça sayısı 48 olarak hesaplanır.

Yukarıda hesaplanan fiziksel büyüklüklere ek olarak, sistemin uygulanabilirliği ispatlamak için, elektriksel büyüklüklerin de kabul edilebilir seviyelerde olduğunun gösterilmesi gerekir. Sistemde ihtiyaç duyulan kinetik enerji

$$E_k = \frac{1}{2} W_t V^2 = 245 \times 10^6 J \quad (7.11)$$

olarak hesaplanır. Sistemde kullanılacak anahtarlama elemanlarının ticari olarak erişilebilir olması gerekir. Bunu sınamak için, sistemde ihtiyaç duyulan güç

$$P = \frac{E_k}{t} = E_k \frac{a}{\Delta V} = E_k \frac{a}{V - V_0} \quad (7.12)$$

formülüyle hesaplanabilir. Burada V_0 hareket eden kısmın, sistem enerjilendirilmeden önceki hızıdır. Önerilen tasarımda, sisteme bir başlangıç hızı kazandıracak olan herhangi bir kimyasal fırlatıcı kullanılmamaktadır ve bu nedenle V_0 hızı sıfıra eşittir. Bu durumda ihtiyaç duyulan güç 107×10^6 W değerine sahiptir. Bu güç değeri, ihtiyaç duyulması olası maksimum güç değerini temsil etmektedir ve bu anma değerine sahip yarıiletken devre elemanları ticari olarak erişilebilir durumdadır.

30000 Gee değerinde bir ivme meydana getirecek olan manyetik alan (B) ve tahrik bobini akımı (I_t) değerlerini kabaca hesaplamak için,

$$F = 4BI_k l_k \quad (7.13)$$

formülü kullanılabilir. Buradaki F , Şekil 7.1'de görüldüğü gibi 4 parçalı olan hareketli kısımda ihtiyaç duyulan toplam kuvvet ve I_k kovanda akan akımdır. Kuvvet hesabı için yaygın olarak bilinen diğer ifade,

$$F = ma \quad (7.14)$$

şeklindedir ve buradaki m hareket eden kısmın toplam kütesini temsil etmektedir. (7.14) ve (7.15) denklemleri birbirine eşitlenip $W_t=15$ kg ve $l_k=0.72$ m değerleri yerine konulursa,

$$\begin{aligned} 15 \times 9.81 \times 30000 &= 4BI_k \times 0.72 \\ 1.53 \times 10^6 &= BI_k \end{aligned} \quad (7.15)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca, tahrik bobinleri ile kovanın aynı amper-sarım çarpım değerine eşit olduğu kabulüyle,

$$N_t I_t = 1 \times I_k \quad (7.16)$$

ifadesi elde edilir. Burada N_t tahrik bobinlerinin sarım sayısını göstermektedir. (7.15) ve (7.16) denklemleri bir arada kullanılırsa,

$$1.53 \times 10^6 = BN_t I_t \quad (7.17)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeye göre, örneğin $B = 6$ T ve $N_t = 10$ sarım ise, bu durumda $I_t = 25$ kA olacaktır. Elektriksel büyüklükler de (akım değeri yine yüksek olmakla beraber), bu ölçekteki bir fırlatıcı için, kabul edilebilir seviyelerdedir.

Uygulanabilirliğin ispatlanmasına ilişkin son husus, kullanılacak güç kaynağıdır. Güç kaynağı için tasarımcı iki temel opsiyona sahiptir; kapasitör grupları ve volan motor-generatör setleri. Ancak, oldukça yüksek (hiper) hız ihtiyacı volan motor-generatör setlerini daha etkin bir çözüm kılmaktadır. [Balıkcı vd., 2001] bu tür güç kaynaklarının tasarımı konusunda detaylı bir çalışma sunmuştur ve anılan bu çalışmada belirtildiği gibi, volan motor-generatör setleri, kapasitör gruplarına kıyasla birkaç kat genlikte enerji yoğunluğu oluşturabilmektedir. Yukarıda hesaplanan elektriksel büyüklüklere hakim bir tasarım da anılan bu çalışmada sunulmaktadır.

Yukarıda sunulan tasarım ve bilhassa uygulanabilirlik analizi genel olarak fırlatma işlemine ilişkin olsa da, özellikle atmosfer geçişi konusunu çok irdelemese de, yine de bu konuda önemli birkaç detayın vurgulanması gerekmektedir. Her

şeyden önce, yukarıda tanıtılan sistem uydunun ve onu çevreleyen kovanın atmosferden çıkışı sırasında yeryüzüne geri düşmesini engellemek amacıyla kullanılacak ikinci bir ivmelendirme birimi içermemektedir. [Mc Nab, 2007]'de belirtildiği üzere, elektromanyetik fırlatıcıların yerden-yörüngeye fırlatma işlemlerinde kullanılabilirliğini gösterebilmek için dört kritik konu vardır: Bunlardan birincisi, ~7 km/sn hıza kabul edilebilir bir ivme ile erişilip erişilemeyeceğidir. İkincisi, mevcut güç kaynağı teknolojisi böyle ani bir güç ihtiyacını karşılayıp karşılayamayacağıdır. Üçüncüsü, önerilen yaklaşımların atmosfer geçişini başarıp başaramayacağıdır ve son olarak dördüncüsü, mikro ve nano uyduların paketlerinin böyle bir ivmeye dayanıp dayanamayacağıdır. Bu dört kritik konudan ilk ikisi tez çalışmasının bu kısmında incelenmiştir. Son ikisi ise, önerilen konseptin uzay araştırmalarında tartışmasız uygulanabilirliğini ispatlamak için halen aşılması gereken birer görev olarak görünmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kısımda ilk önce deneysel sonuçlar göz önünde bulundurularak, önerilen sistem için güçlü yönler özetlenmiş, daha sonra yine deneysel sonuçlara göre önerilen sistemin temel zayıflıkları ve bu zayıflıklarla baş etme adına yapılabilecekler, konuyla ilgili olası gelecek çalışmalara ışık tutması açısından sıralanmıştır. Bu yolla tezin amacının ve hipotezlerin gerçekleşip gerçekleşmediği sınanmıştır.

Sistemin temel üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

- Önerilen sistem, silindirik (tüpsel) yapıda lineer indüksiyon motoru kullandığı için, bir maglev sisteminde ihtiyaç duyulan üç kuvveti tek bir motorla üretmektedir. Böyle bir tasarım tercihi, her bir kuvvet için ayrı bir sürücüye duyulan gereksinimi ortadan kaldırmaktadır.
- Yineleyici kuvvet, hareket eden kısmı operasyon süresince merkezlemektedir ve böylece levitasyon ve kılavuz kuvvetlerinin kontrolüne gerek kalmamaktadır.
- Sistemin diğer bir güçlü yanı hava nüveli olmasıdır. Çünkü bu özellik sistemin özellikle ilk yatırım maliyetini çok ciddi oranda azaltır. Ayrıca demir nüveli maglev sistemlerinde hava aralığı bir inç'in 3/8'inden fazla olmamalıdır. Özellikle yüksek hızlarda bu boşluğu elde etmek zordur. Sistemin hava nüveli olması daha yüksek hava boşluğuna, yani ray ile araç arasında daha fazla mesafeye (birkaç inç) izin verir. Bu da fiziksel sürtünme, ark, erozyon, tahrip gibi riskleri azaltır.
- Sistem, hareket eden kısmın, herhangi bir destek sistemine bağlı olarak hareket etmemesi nedeniyle sürtünme problemine sahip değildir. Böylece gürültü, ısıya dönüşerek zayi olan enerji ve sürtünmenin sisteme kattığı bilinmeyen dinamikler elimine edilmiş olur.
- Sistem, maglev trenlerinin genel problemlerinden biri olan düşük sönüm problemine karşı gürbüzdür. Harici bir bozucu etkinin mevcudiyetinde, yineleyici kuvvet sistemi tekrar merkezlemekte ve operasyon, harici kontrol eforu olmadan güvenle sürmektedir.

- Operasyon teorisi, belirli ölçüler dahilinde tasarım kriterlerine bağlı kalmak şartıyla, değişik malzeme türü, farklı senkron hız, değişik kütle ve hava aralığı değeri için de ispatlanabilir ve bu da araştırmacıya yeniden üretim için esneklik sağlar.
- Tasarım algoritması kolay anlaşılır ve basit bir yapıya sahiptir.

Yukarıda sıralanan sonuçlar, tez çalışmasının amacını ve hipotezlerini büyük ölçüde onaylamakla beraber, sistemin çektiği aşırı akım ciddi bir problem olarak kendini belli etmektedir. Laboratuvar ölçeğinde bir prototip için harcanan 200 kW güç, aşırı akım ihtiyacının çözülmesi gereken bir problem olduğunu rakamsal olarak ifade eder.

Sistemin bu derece yüksek akım çekmesinin birkaç temel sebebi vardır. Bunlardan ilki sistemin her üç kuvveti de tek bir motorla üretmesidir. Klasik maglev sistemlerinde itme ve levitasyon kuvveti için ayrı birer motor, kılavuz kuvveti için ise genellikle kalıcı mıknatıslar kullanılmaktadır. Toplam güç ihtiyacındaki bu tarz bir paylaşım, her bir güç üretici sistemin nominal güç değerini görece daha düşük bir seviyeye çekmektedir. Yüksek akımın bir diğer sebebi sistemin hava nüveli olmasıdır. Havanın relüktansı demir nüveye göre çok daha fazla olduğundan, sistemde dolaşan akıya gösterilen manyetik direnç de fazla olacak ve hava nüveli sistemin şebekeden nispeten daha fazla akım çekmesine sebep olacaktır.

Akım genliğinin bu derece yüksek olması, Bölüm 6'da tanıtılan kontrolörün gerçek zamanlı deneyinin tamamlanamamasına neden olmuştur. Bu akımı düşürmek için uygulanabilecek en temel çözüm, sistemin hava nüveli bir sistem olmasından feragat edip, manyetik geçirgenliği daha yüksek bir malzemeden yapılmış bir nüve kullanmaktır. Ayrıca hareket eden kısım üzerinden enerjilendirilen konfigürasyon yerine yol üzerinden enerjilendirilen konfigürasyonu tercih etmek akımı bir nebze olsun azaltmaktadır.

Bölüm 6'da sunulan kontrolör, akılar ölçülmediği halde hız takip hatasını üstel olarak sifıra sürmektedir. Ayrıca kontrolör doğrusallaştırma yöntemini kullanmamakta ve tasarımcıyı bu yöntemin beraberinde getirdiği bütün dezavantajlardan kurmaktadır. Bununla beraber bu kontrolör tam bilinen model bazlı

bir kontrolördür ve dolayısıyla sistemin tüm parametrelerinin değerinin bilindiği varsayar. Bu nedenle gelecek çalışmalar için, sistemin en azından mekanik parametrelerinin bilinmediği varsayımıyla bir adaptif ya da gürbüz şema ile parametre belirsizliği ile baş etme yetisine sahip bir kontrolör tasarımı, açık bir problem olarak kendini belli etmektedir. Buna ek olarak, tanıtılan kontrolör global çözüm üretmemektedir ve tekillikler içermektedir. Elde edilen kararlılık sonucu, bu tekilliklerin aşılması için başlangıç değerlerinin tamamen deneme yanılma yoluyla elde edilecek özel kümelerini oluşturmayı gerektirir. Bu nedenle, üretilen deney düzeneği de, son yıllarda asenkron motorlar için zor ancak popüler bir araştırma alanı olan tekillikten bağımsız kontrolör geliştirilmesi fikri için, tüm asenkron motorlar gibi, bir araç vasfı teşkil etmektedir.

Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin değişik birçok uygulama için hesaba katılabileceği ve hatta bu tür uygulamalar için de deneysel veri elde etmek amacıyla prototipler üretilebileceği fikrini de meşru kılar. Örneğin bu fikrin mikro ve nano uyduların yörüngeye fırlatılmasında kullanılabilirliğini araştıran konsept düzeyinde bir alışma [Hasirci *vd.*, 2011b]'de sunulmuştur. Bu çalışmada 15 kg değerine kadar bir kütleyle sahip uyduların, önerilen konsept kullanılarak 7 km/sn gibi bir hızla uzaya fırlatılması için kullanılabilir bir fırlatıcı için tasarım algoritması sunulmuştur. Her ne kadar ihtiyaç duyulan akım genliği bu uygulama için de yine dikkate değer derecede yüksek bulunmuş olsa da, bu uygulama için operasyon süresi kısadır ve herhangi kontrol gereksinimi de söz konusu değildir.

EK

Burada, benzetim sürecinde kullanılan 3 adet m-dosyasının kaynak kodları sunulmuştur. Şekil 6.2'deki blok diyagramda sunulan bu dosyalar dinamik.m, gozlemci.m ve kontrol.m dosyalarıdır. Kaynak kodlar ise aşağıdaki gibidir.

#dinamik.m#

```
function y=dynamic_d(u4) ;

p=2;
Rs=0.372;
Rr=0.04;
Ls=0.526;
Lr=0.0736*0.001;
Lm=Lr;
h=70*0.001;
M=2.478;
B=0.015;
F=0;
sigma=1-(Lm*Lm/Ls/Lr);
Tr=Lr/Rr;
Kf=1.5*p*3.14*Lm/h/Lr;

a1=(Rs/sigma/Ls)+((1-sigma)/Tr/sigma);
a2=p*Lm*3.14/Lr/h/sigma/Ls;
a3=Lm/Lr/Tr/sigma/Ls;
a4=1/(sigma*Ls);
b1=1/Tr;
b2=p*3.14/h;
b3=Lm/Tr;
c1=B/M;
c2=Kf/M;
c3=F/M;

x1=u4(1); %Iq
x2=u4(2); %Id
x3=u4(3); %Fi_q
x4=u4(4); %Fi_d
x5=u4(5); %V
u2=u4(6); %uq
u1=u4(7); %ud

x1_dot= -(a1*x1) - (a2*x4*x5) + (a3*x3) + (a4*u1) ;
x2_dot= -(a1*x2) + (a2*x3*x5) + (a3*x4) + (a4*u2) ;
x3_dot= -(b1*x3) + (b2*x4*x5) + (b3*x1) ;
x4_dot= -(b1*x4) - (b2*x3*x5) + (b3*x2) ;
x5_dot= -(c1*x5) + (c2*((x4*x1)-(x3*x2))) - c3 ;

y = [x1_dot x2_dot x3_dot x4_dot x5_dot] ;
```

#gozlemci.m#

function y1=observer_d(u5) ;

p=2;
 Rs=0.372;
 Rr=0.04;
 Ls=0.526;
 Lr=0.0736*0.001;
 Lm=Lr;
 h=70*0.001;
 M=2.478;
 B=0.015;
 F=0;

sigma=1-(Lm*Lm/Ls/Lr);
 Tr=Lr/Rr;
 Kf=1.5*p*3.14*Lm/h/Lr;

a1=(Rs/sigma/Ls)+((1-sigma)/Tr/sigma);
 a2=p*Lm*3.14/Lr/h/sigma/Ls;
 a3=Lm/Lr/Tr/sigma/Ls;
 a4=1/sigma/Ls;
 b1=1/Tr;
 b3=p*3.14/h;
 b2=Lm/Tr;
 c1=B/M;
 c2=Kf/M;
 c3=F/M;

x3_cap=u5(1);
 x4_cap=u5(2);
 x1=u5(3);
 x2=u5(4);
 x5=u5(5);

x3_cap_dot= (-b1*x3_cap) + (b2*x1) + (b3*x4_cap*x5);
 x4_cap_dot= (-b1*x4_cap) + (b2*x2) - (b3*x3_cap*x5);

y1=[x3_cap_dot x4_cap_dot];

#kontrol.m#

```

function y5=control_d(u) ;

p=2;
Rs=0.372;
Rr=0.04;
Ls=0.526;
Lr=0.0736*0.001;
Lm=Lr;
h=70*0.001;
M=2.478;
B=0.015;
F=0;

sigma=1-(Lm*Lm/Ls/Lr);
Tr=Lr/Rr;
Kf=1.5*p*3.14*Lm/h/Lr;

a1=(Rs/sigma/Ls)+((1-sigma)/Tr/sigma);
a2=p*Lm*3.14/Lr/h/sigma/Ls;
a3=Lm/Lr/Tr/sigma/Ls;
a4=1/sigma/Ls;
b1=1/Tr;
b3=p*3.14/h;
b2=Lm/Tr;
c1=B/M;
c2=Kf/M;
c3=F/M;

x1=u(1);      %Iq
x2=u(2);      %Id
x3_cap=u(3);  %Phi_q_cap
x4_cap=u(4);  %Phi_d_cap
x5=u(5);      %V
x5d_d=(6);    %V_des_dot
x5d_dd=(7);   %V_des_doubledot
e=u(8);       %e
fid_d=u(9);   %Phi_des_dot
fid_dd=u(10); %Phi_des_doubledot
fid=u(11);    %Phi_des

Ke=120;
Kz1=80;
Keps=10;
Kz2=10;
d1=0.1;
d2=0.2;
d3=0.3;

```

$$z1 = (c2*((x1*x4_cap)-(x2*x3_cap))) + (Ke*e) - x5d_d - (c1*x5) - c3 - ((d1*(c2*c2*((x1*x1)+(x2*x2))))*e);$$

$$eps = (x3_cap*x3_cap) + (x4_cap*x4_cap) - fid;$$

$$z2 = (2*b2*((x1*x3_cap)+(x2*x4_cap))) + (Keps*eps) - (2*b1*((x3_cap*x3_cap)+(x4_cap*x4_cap))) - fid_d;$$

$$o1 = (c2*x4_cap) + (2*d1*c2*c2*x1*e);$$

$$o2 = (-c2*x3_cap) + (2*d1*c2*c2*x2*e);$$

$$o3 = (((c2*x4_cap)+(2*d1*c2*c2*x1*e))*((-a1*x1)-(a2*x4_cap*x5)+(a3*x3_cap)))+(((c2*x3_cap)+(2*d1*c2*c2*x2*e))*((-a1*x2)+(a2*x3_cap*x5)+(a3*x4_cap)))+((-c2*x2)*((-b1*x3_cap)+(b2*x1)+(b3*x4_cap*x5)))+(c2*x1)*((-b1*x4_cap)+(b2*x2)-(b3*x3_cap*x5)))+(((Ke+(d1*c2*c2*((x1*x1)+(x2*x2))-c1))*((-Ke*e)-(e*d1*c2*c2*((x1*x1)+(x2*x2)))+z1)))-(c1*x5d_d)-x5d_dd);$$

$$o4 = ((a3*((c2*x4_cap)+(2*d1*c2*c2*x1*e)))+(a2*x5*((-c2*x3_cap)+(2*d1*c2*c2*x2*e)))-(c2*x2*(Ke+(d1*c2*c2*((x1*x1)+(x2*x2)))-c1));$$

$$o5 = ((a3*((-c2*x3_cap)+(2*d1*c2*c2*x2*e)))-(a2*x5*((c2*x4_cap)+(2*d1*c2*c2*x1*e)))+(c2*x1*(Ke+(d1*c2*c2*((x1*x1)+(x2*x2))-c1));$$

$$o6 = 2*b2*x3_cap;$$

$$o7 = 2*b2*x4_cap;$$

$$o8 = (2*b2*x3_cap*((-a1*x1)-(a2*x4_cap*x5)+(a3*x3_cap)))+(2*b2*x4_cap*((-a1*x2)+(a2*x3_cap*x5)+(a3*x4_cap)))+(2*((b2*x1)-(2*b1*x3_cap))*((-b1*x3_cap)+(b2*x1)+(b3*x4_cap*x5)))+(2*((b2*x2)-(2*b1*x4_cap))*((-b1*x4_cap)+(b2*x2)-(b3*x3_cap*x5)))+(Keps*(-Keps*eps+z2))-fid_dd;$$

$$o9 = 2*b2*((a3*x3_cap)+(a2*x4_cap*x5));$$

$$o10 = 2*b2*((a3*x4_cap)-(a2*x3_cap*x5));$$

$$ppp = pinv([o1 o2; o6 o7]);$$

$$u1 = (1/a4)*((ppp(1,1)*(-(Kz1*z1)-e-o1-(d2*z1*(o4+o5)))+(ppp(1,2)*(-(Kz1*z1)-e-o1-(d2*z1*(o4+o5)))));$$

$$u2 = (1/a4)*((ppp(2,1)*(-(Kz2*z2)-eps-o8-(d3*z2*(o9+o10)))+(ppp(2,2)*(-(Kz2*z2)-eps-o8-(d3*z2*(o9+o10)))));$$

$$y5 = [u1 u2];$$

KAYNAKLAR

Andriollo M., Martinelli G., Morini A., Scuttari A., (1995), "Minimization of the induced current effects in the shield of SC coils in EDS MAGLEV trains," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 5, no 2, pp 604-609.

Atherton D., (1980), "Maglev using permanent magnets," IEEE Trans. on Magn., Vol. 16, no 1, pp 146-148.

Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., (2009), "Improved energy utilization of linear induction launchers by considering each section as an individual sub-launcher" IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 241-243.

Balikci A., Zabar Z., Czarkowski C., Levi E., Birenbaum L., (2001), "Flywheel motor/generator set as an energy source for coil launchers," IEEE Trans. Magn., Vol. 39, no. 1, pp. 97-102.

Balikci A., Zabar Z., Czarkowski C., Birenbaum L., (2003), "Reduction of fluctuation in the accelerating force in linear induction launchers," IEEE Trans. Magn., Vol. 37, no. 1, pp. 280-283.

Bodson, M., Chiasson, J., Novotnak, R., (1994), High-performance induction motor control via input-output linearization," IEEE Contr. Syst. Magaz., Vol. 14, pp. 25–33.

Chen Z., Tomita M., Doki S., Okuma S., (2001), "An adaptive sliding observer for sensorless control of synchronous motor," Proceedings of the IEEE International conference on control applications, pp 738-743, Mexico city, Mexico.

De Fair H., Coose P., Meinel C. P., Tidman D. A., (1989), "Electromagnetic earth-to-space launch," IEEE Trans. on Magn., Vol 25, No. 1, pp 9-16.

Driga M. D., Weldon W. F., Woodson H. H., (1986), "Electromagnetic induction launchers" IEEE Trans. on Magn., Vol MAG-22, No. 6, pp 1453-1458.

Egeland A., (1989), "Birkeland's electromagnetic gun: A historical review," IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 17, No. 2.

Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D., (2003) Electric Machinery, Sixth Edition, McGraw-Hill Company, USA, pp 322-326.

Haghmaram, R., Shoulaie, A., (2004), Literature review of theory and technology of air-core tubular linear induction motors, 39th International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2004. Volume 2, pp. 517 – 522.

Hasirci U., Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., (2011a), "A novel magnetic levitation system: Design, implementation and nonlinear control," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, no. 1, pp. 492-497.

Hasirci U., Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., (2011b), "Concerning the design of a novel electromagnetic launcher for Earth-to-Orbit micro- and nanosatellite systems," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, no. 1, pp. 498-503.

Hasirci U., Balikci A., Ozturk A., (2009), "Nonlinear adaptive backstepping control of linear induction motors," Proceedings of 5th Int. Advanced Technologies Symposium, IATS'09, pp. 333-338, Karabuk, Turkey.

Hasirci U., Balikci A., (2009), "Design of an electromagnetic launcher for earth-to-orbit (ETO) microsatellite systems," Proc. Recent Advances in Space Technologies Conf. (RAST'09), pp. 223-226.

Hawke R. S., Nellis W. J., Newnan G. H., Rego J., Susoeff A. R., (1986), "Summary of EM Launcher Experiments Performed at LLNL" IEEE Trans. On Magn., Vol. MAG-22, pp 1510-1515.

He J. L., Levi E., Zabar Z., Birenbaum L., Naot Y., (1991), "Analysis of the induction type coilgun performance based on the cylindrical current sheet model," IEEE Trans. Magn., vol. 27, no. 1, pp. 579-584.

Hogan J., Fink H., (1975), "Comparison and optimization of lift and drag forces on vehicles levitated for eddy current repulsion for various null and normal flux magnets with one or two tracks," IEEE Trans. on Magn., Vol. 11, no 2, pp 604-607.

Hu Q., Wang J., Yu D., Cui J., (2007), "Robust H_{∞} controller of tubular linear induction motor with an artificial neural network compensator," In Proc. IEEE Int. Conf. Autom. and Logis., pp. 1988-1993.

Huang C., Fu L. C., (2002), "Adaptive Backstepping speed/position control with friction compensation for linear induction motor," Proceedings of 41st IEEE conference decision and control, Las Vegas, Nevada, USA.

Hull J. R., (1989), "Attractive Levitation for high speed ground transport with large guideway clearance and alternating-gradient stabilization," IEEE Trans. on Magn. , Vol. 25, no 5, pp 3272-3274.

Khan, W., Taylor, D. G. (1999), Adaptive control of ac motor drives with inverter nonlinearities, Int. J. Control, vol. 72, pp. 784–798.

Kemper H., (1934), "Levitated train with wheel-less vehicles," German patents, Patent number: 644303.

Kim K. B., Levi E., Zabar Z., Birenbaum L., (1996) "Restoring force between two noncoaxial circular coils," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 2, pp. 478-484.

Krstic, M., Kanellakopoulos I. and Kokotovic, P., (1995), Nonlinear and Adaptive Control Design, Wiley Inc., New York, USA.

Lee H. W., Kim K., Lee J., (2006), "Review of maglev train technologies," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 42, no. 7, pp. 1917-1925.

Lee S. G., Lee H. W., Ham S. H., Jin C. S., Park H. J., Lee J., (2009), "Influence of the construction of secondary reaction plate on the transverse edge effect in linear induction motor," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 45, no 6, pp 2815-2818.

Lin F. J., Wai R. J., (2001), "Hybrid control using recurrent fuzzy neural network for linear-induction motor servo drive," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 9, pp. 102–115.

Liou L., (2008) "Advanced chemical propulsion for sciences missions," *Proc. IEEE Aerospace Conf.*, pp 1-10.

Mc Lean G. W., (1988), "Review of recent progress in linear motors," *IEEE Proceedings-Electric Power Appl.*, Volume 135, Issue 6, pp. 380 – 416.

Mc Nab I. R., (2007), "A research program to study airborne launch to space," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 43, no. 1, pp. 486-490.

Menden W., Mayer W. J. And Rogg, D., (1989), "State of Development and Future Prospect on the Maglev System Transrapid," *Int. Conf. Maglev'89*, Yokohama, Japan, pp 11-18.

Nasar S. A., Boldea I., (1987), "Linear Electric Motors : Theory, Design and Practical Applications," Prentice Hall Inc., USA.

Onuki T., Toda Y., (1993), "Optimal design of hybrid magnet in maglev system with both permanent and electromagnets," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 29, no 2, pp 1783-1786.

Osher J. E., Barnes G., Chau H. H., Chet Lee R. S., Speer R., Weingart R. C., (1989), "Operating characteristics and modelling of the LINL 100-kV electric gun" *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. 17, No. 2, pp 392-402.

Rathore, A. K., Mahendra S. N., (2003), "Decoupled control of attraction force and propulsion force in linear induction motor drive," *IEEE Conference on Industrial Technology*, Vol. 1, pp 524-529.

Riches E., (1988), "Will Maglev Lift Off?," IEE Review, pp 427-430.

Rote D. M., Cai Y., (2002), "Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 2, pp. 1383-1390.

Sen P. C., (1975), "On linear synchronous motor (LSM) for high speed propulsion," IEEE Trans. on Magn., Vol. MAG-11, no 5, pp 1484-1486.

Tsuchiya M., Ohsaki H., (2000), "Characteristics of electromagnetic force of EMS-type maglev vehicle using bulk superconductor," IEEE Trans. on Magn., Vol. 36, no 5, pp 904-907.

Vas P., (1990), Vector control of AC machines, Oxford University Press, England.

Wai R. J., Liu W. K., (2003), "Nonlinear control for linear induction motor servo drive," IEEE Trans. on Ind. Elec., vol. 50, no. 5, pp. 920-935.

Wu, J., Zhou, W., Long, Z. and Chang, W., (2006), "Direct thrust control by direct air-gap flux measurements for linear induction motors, Proceedings of 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives – MAGLEV2006, Dresden- Germany.

Yamamura S., (1976), "Magnetic Levitation technology of tracked vehicles : Present status and prospects," IEEE Trans. on Magn., Vol MAG-12, no 6.

Yoo S. Y., (1996), "A novel maglev system driven by air-cored linear induction motors," Unpublished Ph.D. dissertation, Polytechnic Uni., NY, USA.

Zabar Z., Levi E., (1993), "Air-cored linear induction motor for magnetically levitated systems," US Patents, patent number : 5,270,593.

Zabar Z., Lu X. N., Levi E., Birenbaum L., Creedon J., (1995), "Experimental results and performance analysis of a 500 m/sec linear induction launcher (LIL)," IEEE Trans. Magn., vol. 31, no. 1, pp. 522-527.

Zabar Z., Levi E., Birenbaum B., (1996), "Air-cored linear induction motor for earth-to-orbit systems," Technical report submitted to NASA, Washington DC, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Uğur Hasırcı 1980 yılında Ankara'da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini bu şehirde tamamlamıştır. Lisans öğrenimini İzzet Baysal Üniversitesi'nde, yüksek lisans öğrenimini ise Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde tamamlamıştır. Halen bu kurumda doktora öğrencisidir ve araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.