T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK LEVİTASYON

ALİ CAN AKTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK LEVİTASYON

ALİ CAN AKTAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FAİK MİKAİLZADE

GEBZE
2018

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

MAGNETIC LEVITATION

ALİ CAN AKTAŞ

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. FAİK MİKAİLZADE

GEBZE

2018

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

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/01/2018 tarih ve 2018/02 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15/01/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ali Can AKTAŞ'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI)	: Prof. Dr. Faik MİKAİLZADE
ÜYE	: Prof. Dr. Mirhasan SEYİTSOY
ÜYE	: Prof. Dr. Kemal ÖZDOĞAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

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

ÖZET

Bu çalışmada oda sıcaklıklarında çalışabilen bir manyetik levitasyon cihazı geliştirdik. Bu cihazda dc manyetik kuvvetler klasik mıknatıslarla üretilirken değişken kuvvetler uygun olarak tasarlanmış elektrik akımı taşıyan bobinlerlerle sağlanmıştır. Burada Manyetik bir cisim için statik manyetik kuvvet alanları mutlak denge noktası sunamadığı için yarı kararlı bir denge elde edebilmek için uygun bir aktif kontrol tekniği geliştirildi. Manyetik olarak yüzdürülecek cismin manyetik kısmı düşey eksene göre simetrik olarak seçildi. Bu cismin manyetik olmayan kısımlarının kütlesel dağılımının da bu eksene göre olabildiğince simetrik olmasına dikkat edildi. Cihaz için bir matematiksel model önerildi ve böylece dinamik özellikleri başarılı bir şekilde analiz edildi. Yüzen cismin hareketini simüle etmek için geliştirilen model mekanik ve manyetik parametreler kullanır. Yatay düzlemde ve düşey eksen etrafında birbirlerine göre 90 derece açılarla yerleştirilmiş bobin çiftlerine uygulanan değişken akım ile oluşturulan manyetik alanlarla yüzen cisim için yarı kararlı (quasi-stationary) duruma başarıyla ulaşıldı. Yarı kararlı pozisyonu yüzen cismin simetri ekseni üzerine ve eksene oldukça paralel olarak yerleştirilen dar bir lazer demet kaynağı ile adreslendi. Astray field force diye adlandırılan ve sistemdeki manyetik alan kaynaklarından fışkıran manyetik akıyla ilişkili olarak ortaya çıkan kuvvetlerden ötürü yüzmekte olan cisim her zaman denge konumundan ve denge yöneliminden uzaklaşmaya çalışır. O nedenle modelde kullanılan dörtlü ışık sensörleri uçmakta olan cismin denge konumundan sapma miktarını ölçerek anında elektronik kontrol kısmına bildirir. Böylece elektronik kontrol bileşeni gerekli olan akım şiddet ve yönünü hesaplayıp ilgili bobin çiftine uygulayarak yatay düzlemde uçan cismi tekrar denge konumuna doğru çağırıcı kuvvet üretir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik Levitasyon Sistemleri, Süperiletkenler, Aktif Kontrol.

SUMMARY

In this study we developed a magnetic levitation devices which can operates at room temperatures. In this device the magnetic forces were induced by classical permannent magnets and electrical current flowing through coils desined in proper ways. Since the static magnetic force field does not have absolute static equilibrium position for a body containing a ferromagnetic object an active technique has been developed to reach quasi-static state as well. The magnetic part of the floating body was assumed to be magnetically symmetric about a perpendicular axis. The non magnetic part of the flying body has to be as symmetric as possible with respect to its weight as well. A mathematical model for the device has been proposed and its dynamic properites succesfully analized. The model uses mechanical and magnetic parameters to simulate the motion of the flying body. The quasi-equilibrium (quisi-stationary) position of the floating body has been succesfully reached by applying ac magnetic fields produced by two mutually perpendicular current coil pairs in horizontal plane. The quasi-equilibrium position is addressed by well-oriented narrow laser beam source located at the symmetry axis of the flying body. Due to the astray magnetic force field lines, the body always tries to go far from its equilibrium location and equilibrium orientation. Therefore in the model, a quadratic light sensor measures the deviation of the flying object from its equilibrium position and instantly informs the electronic control unit. Thus the electronic control unit calculate the needed amount of the A\C current to apply into the coil pairs to produce necessary restoring magnetic field on the flying body to bring it back its quasi-equilibrium position in horizontal plane.

Key Words: Magnetic Levitation Systems, Super Conductors, Active Control

TEŞEKKÜR

Üniversite hayatımda yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli danışmanım Prof. DR. Faik MİKAİLZADE'ye,

Çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Dr. Yavuz ÖZTÜRK, Dr. Mehmet KAYA ve Kamil KAYA'ya

İlkokuldan, yüksek lisans eğitimime kadar beni hiçbir imkandan mahrum etmeyen ve gerek özel sektör gerekse akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen olağanüstü emeği ve bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan babam Prof. Dr. Bekir AKTAŞ'a ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı annem Betül AKTAŞ ve kardeşim Şule AKTAŞ'a

Ve nihayet çalışmalarım sırasında zorluklara göğüs gererek bana her zaman desteklerini veren eşim Kübra AKTAŞ a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL BİLGİLER	3
2.1. Mekaniğin Temelleri	3
2.2 Temel Kuvvetler	6
2.2.1 Kütle Çekim Kuvveti	7
2.2.2 Elektromanyetik Kuvvetler	8
2.2.3 Çekirdek Kuvvetler	15
2.2.4 Dış Kuvvet Alanı Etkisi Alanındaki Sistemlerin Denge Noktası	16
2.2.5 Manyetik Kuvvetler ve Ters Kare Kuvvetlerin Denge Noktasının Olmaması	18
3. TEORİ	22
3.1 Cihazın Ön Tasarım Yönteminin Belirlenmesi	22
3.2 Teorik Hesaplamalar	24
4. CİHAZIN İMALATI	29
4.1 Cihazın Ayrıntılı Tasarımı	29
4.1.1 Mekanik Tasarım	29
4.1.2 Elektronik Tasarım	30
4.1.3 Elektronik Kontrol	30
4.2 Cihaz Prototipinin İmalatı	32
4.2.1 Cihazın Kasa Kısımlarının İmalatı	32
4.2.2 Cihazın Sensör Tutucularının İmalatı	34
4.2.3 Cihazın Optik Kaynak Tutucusunun İmalatı	34
4.2.4 Cihazın Elektronik Kartlarının İmalatı	35

4.2.5 Elektrik Bobinlerin İmalatı 36
4.2.6 Cihaz Bileşenlerinin Montajı 37
5. DENEYSEL ÖLÇÜMLER 39
5.1 Cihazın Kaldırma Kuvvetinin Yükseklikle Değişimi 39
5.2 Manyetik Bobinlerin Mıknatıslar Arasında Etkileşme kuvvetinin Yükseklikle Değişimi 40
5.3 Optik Sensör Eleman Dizisinde Oluşan Elektrik Sinyallerinin Belirlenmesi 40
5.4 Kontrol Sinyalinin Frekanslarının Belirlenmesi 41
5.5 Askıdaki Elemanın Öz Titreşim Frekanslarının Belirlenmesi 42
6. SONUÇ ve YORUMLAR 43

KAYNAKLAR 45
ÖZGEÇMİŞ 46

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
μ	:	Kompleks manyetik geçirgenlik
E	:	Kompleks elektrik geçirgenlik (dielektrik sabiti)
Γ	:	İletim katsayısı
Θ	:	Açı
Γ	:	Yansıma Katsayısı
Λ	:	Dalgaboyu
Z	:	Empedans
EM	:	Elektromanyetik
EMR	:	Elektromanyetik Radyasyon
GHz	:	Gigahertz
MHz	:	Megahertz
Nm	:	Nanometre
SEM	:	Taramalı Elektron Mikrsokobu (Scanning Electron Microcope)
TEM	:	Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope)
TGA	:	Termogravimetrik Analiz
VNA	:	Vektör Network Analizör
VSM	:	Titreşimli Örnek Manyetometresi (Vibrating Sample Magnetometer)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:	Sayfa
2.1: Newton'un birinci yasasının keşfi	3
2.2: Newton'un ikinci yasası	3
2.3: Bir cisme etkiyen değişik kuvvetlerin döndürme etkisi	4
2.4: Newton'un üçüncü yasasının değişik sistemlerde gösterimi	6
2.5: Newton'un genel çekim yasası	7
2.6: Elektrik yüklerinin işaretlerine göre etkileşimi	9
2.7: Noktasal bir (-) yükün elektrik alanı	9
2.8: İki akım elemanının etkileşimi	10
2.9: Bir akım halkasının ekseni üzerinde oluşan manyetik alan	12
2.10: Dairesel bir akım halkasının etrafında indüklenen alan profili	13
2.11: Uzun akım kangalı ve çubuk mıknatısın alan benzerliği	15
2.12: Bir yayın gerilmesi veya sıkışması ile ortaya çıkan kuvvet	17
3.1: Hesaplamalarda kullanılan levitasyon cihazının tasarlanan şekli	23
3.2: Manyetik alan vektörlerinin uzaysal dağılımı	25
3.3: Manyetik alan vektörlerinin logaritmik olarak çizimi	26
3.4: Manyetik alan vektörlerinin normalize edilmiş hali	26
3.4: Askıdaki elemana etkiyen kuvvetin "z" bileşenin değişimi d(x)	27
3.5: Askıdaki elemana etkiyen kuvvetin z bileşeninin konuma göre değişimi	28
4.1: İmal edilen cihazın bazı parçalarının resimleri	33
4.2: Tasarlanıp imal edilen elektronik kartlardan birisinin resmi	36
4.3: Üretilen bobinlerden tipik birisinin resmi	38
4.4 Montajı yapılmış cihazın genel görünümü	38
5.1: Ağırlığa göre mesafenin değişimi	40
5.2: Kullanılan sensörün foto akımının gelen ışık şiddeti ile değişimi	42

1.GİRİŞ

Manyetik Levitasyonun uzun bir tarihi var. İnsanlar sürekli D.C Manyetik alanını kullanarak cisimlerin havada süzülmesi için büyük bir çaba sarf etti. Bu denemeler sonucunda fark ettilerki D.C Manyetik alanı içerisinde mutlak bir denge noktasına ulaşmak imkansızdı. Bunun sebebi ise insani hatalar değil fiziksel olarak böyle bir olayın mümkün olmamasıydı. Psikolojik olarak insanlar sürekli olarak bu denge noktasına ulaşmanın mıknatıslar ile birlikte karşıt güçleri süper pozisyona getirip cisimlerin havada durmasının mümkün olduğu yanılgısında olabilirler. Fakat fizikle uğraşanların çoğunun bildiği üzere manyetik dipol momentin üzerindeki manyetik kuvvet, manyetik alanın dipol bölgesinde uzaysal değişiminden kaynaklanır. Diğer yandan manyetik alanın diverjansı her zaman sıfırdır. Başka bir deyişle manyetik alanın 3 kartezyen kordinatın hepsine göre türevi aynı anda negatif olamaz. Halbu ki dipolün bulunduğu konumda dengede kalabilmesi için denge konumu denen noktada manyetik alanın her bileşeninin ilgili eksene göre türevinin sıfır olması zorunludur. Diverjansı her durumda sıfır olan manyetik alan bu özellikleri sağlayamaz. Bunun anlamı hiçbir şekilde mıknatısları tek bir güç olarak ele alarak static bir denge noktası bulmanın mümkün olmadığıdır. Kısa bir süre sonra bu durumun teorik olarak ispatlanmış hali bize göstermiştir ki havada yön veya ilk hız verilmiş herhangi bir cismin manyetik alanın sürekliliği durumu gereğince dengede kalması imkansızdır.

Cisimleri havada tutma hayali ile yoğun çalışan bilim insanları bu emeklerinin karşılığını süperiletkenlik denen yeni bir efekt bularak gerçekleştirdiler. [1] Süperiletkenler bulunduğumuz çağın başlangıcında icat edildi. Birçok element karakteristik olarak belli bir sıcaklığın altına düşürüldüğünde süperiletkenlik efekti kazanmaktadır. Süperiletkenliğe ulaştığımızda elektrik direnci tam olarak 0'a düşüyor. [2] Bununla beraber bazı süperiletken malzemeler tam olarak (tip1) bazılarıda kısmı (tip2) olarak negatif permability sergileyebilirler. Bu özelliklerinden dolayı bu malzemeler kendi içlerindeki manyetik alanı reddetmeye çalışırlar. Bu yeni bulunan efekt Meisner Effect olarak adlandırılır. Bu efektle birlikte manyetik bir element süper iletken bir malzeme ile bir araya geldiklerinde birbirlerine itici bir kuvvet uygularlar. Bundan ötürü teknik olarak manyetik bir cismi çok düşük sıcaklıklarda havada süzülür pozisyona getirmek teknik olarak çok daha kolay

olur[3]. Fakat birçok uygun süperiletken malzeme için bu sıcaklığın çok düşük olmasından ve bu sıcaklıklar çerçevesindeki meisner efektinin düşük olmasından dolayı, bu teknik için günlük kullanım ve uygulama alanları hem çok pahalı hem de kısıtlıdır.

İlk süperiletken keşfinden sonra da insanlar yeni manyetik malzemeleri keşfettiler[4]. Bu malzemeler çok güçlü manyetik alan üretmekle kalmayıp aynı zamanda oda sıcaklığında da bu etkiyi sergileyebiliyorlar. Şu anda nadir element ve neodmiyum bazlı magnet olarak biliniyorlar. Bu mıknatısların ürettikleri enerji miktarı oda sıcaklığının üzerinde bile oldukça yüksek olduğundan bir anda teknolojinin her alanında kullanılmaya başlandılar.

Bizim çalışmamızın asıl hedefi manyetik levitasyon cihazlarını klasik ferromanyetik malzemeler kullanarak, yani, süperiletken malzemelere ihtiyaç duymadan gerçekleştirmektir. Bugün var olan ve oda sıcaklığında çalışabilen levitasyon cihazlarının birçoğu manyetik süspansiyon sistemi ile cismin tepesine koyulmuş bir mıknatıs ile bulunduğu platform arasında bir bağ oluşturuyor. Bu şekilde yapılan cihazlarda yatay düzlemde iyi bir denge sağlanmasına karşın düşey eksende çok küçük bir esintiyle dahi dengeden kayabilecek bir olumsuzluk söz konusudur. Çünkü yukarıdan askıya alınmış cisme yukarıdan uygulanan manyetik kuvvet uzaklığın kübü ile ters orantılı olduğundan düşey yönde küçük bir pertürbasyon askıdaki elemanı dengeden hızla uzaklaştırır. Yani zaten yarı denge durumunda bulunduğu kısımdan bu cisim herhangi bir sebeple çok küçük bir kuvvete maruz kalırsa cisim denge konumundan daha da uzaklaşmak ister. Bu cismi tekrar eski konumuna getirebilmek için çok büyük bir A.C manyetik alanı üretmek gereklidir[5]. Herşeye rağmen süzülen cismi çok çok yüksek bir güç kullanmayı göze alarak tekrar eski optimum haline getirmek mümkün olsa da bu çok maliyetli ve kullanım açısından istenmez.

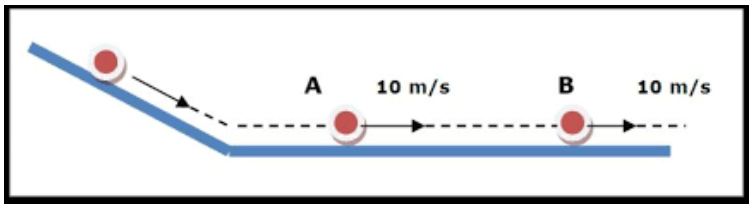
Diğer yandan eğer cismi yukarı doğru çekip havada tutmaya çalışan kuvvet yerine bu kuvvetin kaynağını yüzdürülmesini istediğiniz yüzeyin altına yerleştirip, itici bir duruma getirirseniz düşey eksende denge çok kararlı olur. Bu sefer cisim tam dengede iken yatayda bir kuvvet etkilemezken denge konumundan azıcık uzaklaştığında yatayda dengeden uzaklaştırıcı kuvvet ortaya çıkar ve cismi dengeye geri çağırmak gerekir. Ancak bu çağırıcı kuvvet nispeten daha küçüktür. Yani yatayda denge sağlamak için gerekli güç ilk örnektekine oranla çok daha zayıftır ve tercih edilebilir.

2.TEMEL BİLGİLER

Bu proje temelde mekanik bir sistemin değişik kuvvetler etkisinde istenen denge durumuna getirilebilmesini sağlamak üzere tasarımını hedeflemektedir. O nedenle fizikte mevcut olan kuvvetlerinin doğasına kısaca bir göz atmak faydalı olur.

2.1. Mekaniğin Temelleri

Eski çağlarda, Aristo felsefesine göre, cisimlerin hareketlerini devam ettirebilmeleri için sürekli olarak bir itici (veya çekici) kuvvetin etkisi altında olmaları gerektiğine inanılırdı. Bu görüş yakın çağlara kadar çok uzun bir süre doğru kabul edildi. Sonra Galileo yaptığı akıllı tasarımlanmış deneyler ile sürtünmesiz eğik düzlemde yuvarlanan bilyelerin aşağı giderken hızlandıklarını ve yukarı doğru yuvarlanırken yavaşladıkları gerçeği üzerinde düşünürken yatay bir düzlemde ne hızlanıp ve ne de yavaşlamamaları gerektiği basit gerçeğini farketti (ancak bu basit gerçek binlerce yıl insanların dikkatini çekmemiş olmalı, Şekil 2.1).

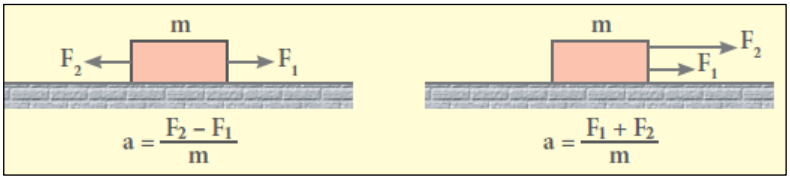


Şekil 2.1: Newton'un birinci yasasının keşfi

Böylece üzerine herhangi bir kuvvet uygulanmayan cisimlerin hareket durumlarını sonsuza kadar koruyacakları gerçeği anlaşıldı. Yani cisme bir dış kuvvet uygulanmıyorsa hızın

$$\boldsymbol{v}=sabit \tag{2.1}$$

kaldığı deneylerle saptandı ve bu olgu Newton tarafından maddi cisimlerin eylemsizliği diye ilk hareket yasası olarak adlandırıldı.

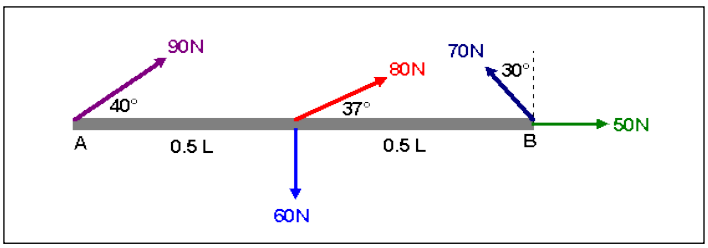


Şekil 2.2: Newton'un ikinci yasası

Daha sonra Newton yaptığı titiz deneyler sonucu maddi cisimlere itme veya çekme şeklinde sabit kuvvet uygulandığında sabit ivme ile kuvvetin yönüne paralel olarak hızlandıklarını buldu ve bu olguyu ikinci hareket yasası olarak adlandırdı. Bu meşhur yasa

$$F=ma=dp/dt \tag{2.2}$$

şeklinde ifade edilir. Burada F uygulanan kuvveti, m cismin eylemsizlik kütle büyüklüğünü, p(=mv) çizgisel momentumu ve a da ivmeyi gösterir ve hzın zaman göre türevi veya konumun zaman göre ikinci türevidir. Aslında dikkat edilirse cismin kütlesi (madde miktarı) sabit olduğundan eğer F=0 olursa ivmenin de sıfır olacağı, momentumun sabit kalacağı (korunacağı), yani ilk yasanın bu ikinci yasa içinde saklı olduğu da söylenebilir. Başka nicelikler tanımlanarak yukarıdaki ifadenin matematiksel olarak bir başka benzeri de yazılabilir.



Şekil 2.3: Bir cisme etkiyen değişik kuvvetlerin döndürme etkisi

Örneğin üzerine F kuvveti uygulanan M kütlesinin konum vektörü şekildeki referans çerçevesinde r olsun. Yukarıdaki 2.2 ifadesinin her iki tarafını da soldan r vektörü ile vektörel olarak çarparsak

$$rxF=rxma \tag{2.3}$$

elde ederiz. Eğer N=rxF kuvvetin momenti (tork), ve L= rxp cismin açısal momenti, $I=mr^2$ cismin eylemsizlik momenti ve α da açısal ivme diye bu cisim için yeni nicelikler tanımlanırsa 2a ifadesi kullanılarak

$$N=I\alpha=rxma=rxdp/dt=dL/dt \tag{2.4}$$

elde edilir. Bu ifadenin 2.2 ile benzerliğine dikkat edilmelidir. O halde cisme uygulanan tork sıfır olduğunda cismin açısal momentumu korunur ve açısal ivmesi sıfır olur. Cisme etkiyen toplam tork tüm kuvvetlerin referans noktasına göre oluşturdukları torkların toplamıdır. Yani

$$N = \sum_i R_i \mathrm{x} F_i \tag{2.5}$$

şeklinde ifade edilir. Eğer cismin değişik noktalarına etkiyen noktasal kuvvet yerine sürekli bir kuvvet dağılımı varsa yukarıdaki ifade aşağıdak integralle değiştirilir.

$$N = \int_V R\mathrm{x}FdV \tag{2.6}$$

O nedenle en genel kuvvet dağılımı için yukarıdaki vektörün tüm cisim üzerinden alınması gerekir. Bu kuvvetlerin bir kısmının cismi döndürme yönü ile diğer kısmı farklı olabilir. Yani uzaydaki her yön için döndürme kuvveti bulunabilir. Ancak tüm bu torkların bileşkesi uzayda tek bir yönde olmak zorundadır. Sonuçta cisim bu bileşke torkun etkisinde tek eksen etrafında ivmelenerek dönecektir.

Newton daha sonraki deneylerinde birbirleriyle etkileşen cisimlerin birbirlerine momentum aktardıklarını ve toplam momentumun sabit kaldığını da gösterdi. Bu etkileşim sırasında cisimlerden birincisinin ikincisine belli bir F_1 kuvveti uygularken ikincisinin de birinci cisme aynı şiddette fakat tam zıt yönde bir F_2 kuvveti uyguladığı, yani

$$F_1=-F_2 \tag{2.7}$$

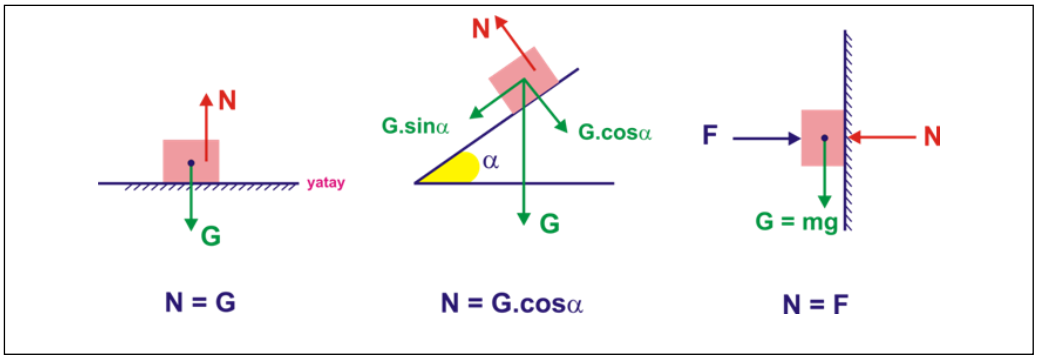
gerçeğini etki-tepki diye adlandırılan üçüncü yasa diye adlandırdı. Bu yasanın çok önemli sonuçlarından birisi dışarıdan izole edilmiş mekanik sistemleri oluşturan

ayrık cisimlerin toplam momnetumlarının değişmeden sabit kalması yani korunmasıdır.

Gene bu yasa etkileşen iki cismin birbirlerine uyguladığı torklar için

$$N_1 = N_2 \tag{2.8}$$

ifadesinin yazılabileceğini ve etkileşen cisimlerden birisinin kaybettiği açısal momentumun diğeri tarafından alındığını yani dışarıdan mekanik olarak izole edilmiş sistemlerin toplam açısal momentumlarının korunacağını söyleyebiliriz.



Şekil 2.4: Newton'un üçüncü yasasının değişik sistemlerde gösterimi

Makroskopik boyuttaki cisimlerin dinamik davranışlarını incelemek için yukarıda özetle verilen ve Newton'un ismi ile anılan üç temel klasik fizik yasası yeterlidir. Bunun için mekanik sistemlerin iyi tanımlı olması yanında cisimler üzerine etkiyen dış kuvvetlerin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Gelecek bölümde bu kuvvetlere kısaca temas edilecektir.

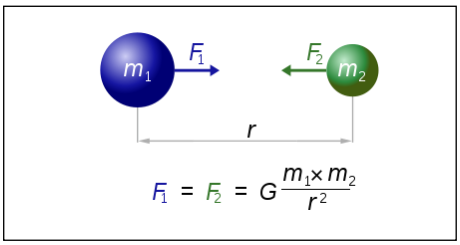
2.2. Temel Kuvvetler

Newton ve diğer bilim adamları kuvvetlerin kaynakları üzerinde de yoğun araştırmalar yaptılar. Şüphesiz ki eski çağlarda da insanlar cisimleri doğrudan iterek veya aracı olarak kullandıkları ip ve benzeri cisimlerle çekerken uyguladıkları etkiyi kendi dillerindeki karşılığı ile kuvvet diye adlandırıyorlardı. Yani güçlü ve zayıf kuvvet kavramları vardı. Mıknatısları bir tarafa bırakırsak cisimlere kuvvet

uygulayabilmek için ya doğrudan dokunmak veya ip ve çubuk benzeri diğer aracılarla cisimlere temas ederek cisimlere kuvvet uygulanabildiği düşünülürdü. Bu kuvvetin cisimlerin hareketini nasıl kontrol ettiğini matematiksel kesin ifadeleri Newton tarafından yukarıdaki denklemlerle yapılabilmişti.

2.2.1. Kütle Çekim Kuvveti

Newton cisimlerin ivmelenebilmesi ancak üzerlerine kuvvet uygulandığında mümkün olabileceği ikinci kanunu dikkate alarak yeryüzüne düşen (ağacın altında dinlenirken başına düşen meşhur elma hikayesi) cisimlerin nasıl olup ta hızlanabildiğini merak etti ve bu cisimlere bir kuvvetin etki etmiş olması gerektiği kanaatine ulaştı. Bu kuvvetin doğası ne olabilir ve havadaki bir cismi nasıl etkiyebilir diye düşünürken en yakın sebep olarak yer küresinin bu kuvveti etki ettirmiş olabileceği hükmüne vardı. Bu fikri daha da ileri götürerek dünya etrafında yaklaşık bir dairesel yörüngede dolanan ay'ın veya güneş etrafında dolanan gezegenlerin ivmeli hareket ettiklerini ve bu ivme için belli bir kuvvete gerek olduğunu ve bu ivmelerin her zaman dünya ile ay arasındaki veya gezegenlerle güneş arasındaki doğrultuya paralel olduğunu dikkate alarak kuvvetin de bu cisimler arasındaki eksene paralel olması gerektiğini öngörerek yaptığı hesaplamalarda bu kuvvetlerin her zaman çekici olduğunu, etkileşen cisimlerin her ikisinin de kütleleri ile doğru orantılı ve aralarındaki uzaklığın kareleri ile de ters orantılı olduğunu gösterdi.



Şekil 2.5: Newton'un genel çekim yasası

Newton genel kütlesel çekim diye adlandırdığı bu kuvveti, F_{12}, matematiksel olarak şöyle ifade etti;

$$F_{12}=GM_1M_2R/R^3 \qquad (2.9)$$

Burada M_1 ve M_2 etkileşen cisimlerin kütlelerini, R cisimlerin arasındaki mesafeyi, G evrensel kütle çekim sabitini göstermektedir. Astronomik cisimler için R çok büyük olduğundan örneğin yeryüzünde birçok uygulama açısından dağ ve ovalara bakılmaksızın her yükseklikte bu çekim kuvveti sabit kabul edilebilir. Yani incelenen birim kütleye etkiyen kuvvet

$$g=F/M_1=GM_2R/R^3 \tag{2.10}$$

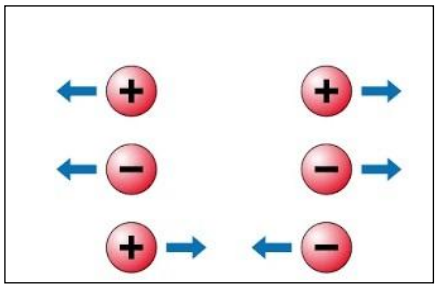
şeklinde yazılabilir ve buna yerçekim ivmesi denir. Yer çekim ivmesinin her zaman aşağıya doğru olduğuna dikkat edilmelidir. Aslında aşağı veya yukarı kavramı bu yer çekiminin günlük hayatımızda bıraktığı etkiler nedeniyle zihnimize yerleşmiş bir kavramdır. Yoksa kütleyi uzaklaştırdığımızda boş geriye kalan boş uzayda aşağı veya yukarı kavramları anlamını yitirirler. Burada M_2 yerin kütlesi ve R de yerin ortalama yarıçapıdır. Buna göre yerçekim ivmesi yerden çok yükseklere çıkınca az da olsa azalır. Sonuç olarak yeryüzüne yakın herhangi bir noktada kütlesi M olan bir cisme etkiyen kuvvet (cismin ağırlığı)

$$W=M\boldsymbol{g} \tag{2.11}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu kuvvetin iki cisim arasındaki uzaktan etkileşme kuvveti olduğu unutulmamalıdır.

2.2.2. Elektromanyetik Kuvvetler

Uzun tarihi birikimlerin sonucu olarak ortaya Newtonun yukarıdaki keşiflerini takip eden yıllarda birbirlerine sürtündükten sonra birbirlerinden uzaklaştırılan maddelerin birbirlerini uzaktan çekebildiği görüldü ve bu olaya elektriklenme adı verildi (aslında bu etki çok eski çağlarda farkedilmişti).

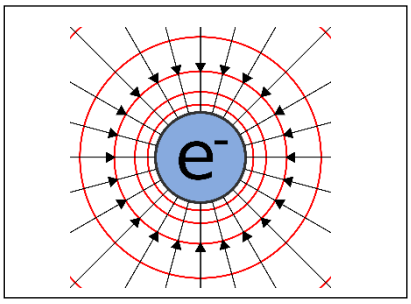


Şekil 2.6: Elektrik yüklerinin işaretlerine göre etkileşimi

Bu etki ile oluşan elektriklenme miktarına elektrik yükü adı verildi ve elektriklenen cisimlerin birbirlerini çekip veya itebildiği dikkatle araştırılarak etkileşme kuvveti Coulomb tarafından

$$F_{12}=kQ_1Q_2R/R^3 \tag{2.12}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada k etkileşme sabiti, Q_1 ve Q_2 cisimlerin yüklenme miktarlarını, R de aralarındaki mesafeyi göstermektedir. Bu kuvvetin matematiksel form olarak genel kütle çekim kuvvetine tümüyle benzediğine dikkat edilmelidir. Bu kuvvet durgun cisimlerin elektriksel yüklerinden ötürü etkileşmelerini ifade eder ve elektrostatik Coulomb etkileşmesi diye adlandırılır.



Şekil 2.7: Noktasal bir (-) yükün elektrik alanı

Uzaktan etkileşen bu yüklere etkiyen kuvvetlerin aslında etki altındaki yükün bulunduğu uzay noktasının özelliğini diğer yükün değiştirerek elektrik alan diye adlandırılan bir etki oluşturduğu ve bu elektrik alanın

$$E=kQ_2R/R^3 \tag{2.13}$$

şeklinde tanımlanabileceği önerildi. Burada E sembolü Q_2 yükünün kendisinden R kadar uzaktaki bir noktada indüklediği elektrik alanın ifade eder Yukarıdaki 2.9 ve

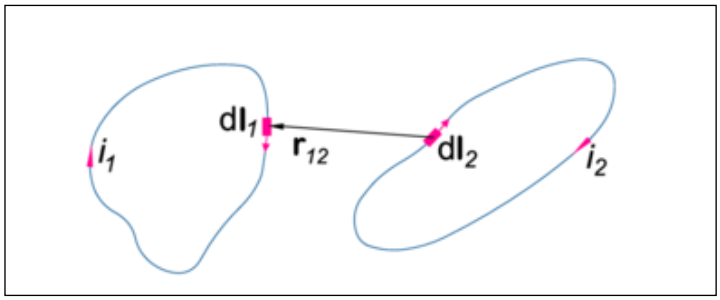
2.12 numaralı ifadeler karşılaştırılarak E ile gösterilen bir elektrik alan içindeki bir yüke bulunduğu konumdan dolayı bu alandan dolayı etkiyecek kuvvetin

$$F_Q = QE \tag{2.14}$$

biçiminde de yazılabileceği anlaşılır.

Diğer yandan çok eski tarihlerden beri bilinen ve kullanılan pusula iğnelerinin yer yüzünde yaklaşık kuzey-güney doğrultusunda yönelmeye çalıştığı ve iki pusula iğnesinin kutuplarının birbirlerini itip-veya çektiği farkedilmişti. Farklı kutuplar birbirlerini çekerken aynı kutupların birbirlerini ittiği anlaşılmıştı. Coulomb etkileşmesinin keşfinden sonra elektrik yükünün içinde aktığı akım tellerine yaklaştırılan mıknatıslara da saptırıcı bir kuvvetin etki ettiği bulundu. Bu kuvvetlerin de telden geçen akım şiddeti ve mıknatıslanma şiddeti ile doğru orantılı ve telle mıknatıs arasındaki mesafe ile ters orantılı olduğu bulundu. Daha sonra akım telleri arasında da etkileşme kuvvetlerinin doğduğu bulundu. Bu bulgular mıknatıslanmanın doğasının elektrik akımı ile ilişkili olduğu fikrini doğurdu.

Daha sonra maddenin yapısı konusundaki araştırmalar ve atom fikrinin doğması ve atomun yapısının keşfi ile yani pozitif yüklü çekirdek etrafında negatif yüklü elektronların eliptik yörüngelerde dolandığı gerçeğinin bulunması ile dolanan bu yüklerin yerel elektrik akımı oluşturduğu ve bu akımların maddenin her noktasında var olduğu ve o nedenle mıknatıs denen maddelerin her noktasında akan elektrik akımlarının etkileşmesi dolayısıyla mıknatısların etkileştiği anlaşıldı.



Şekil 2.8: İki akım elemanının etkileşmesi

Sırasıyla i_1 ve i_2 diye akım taşıyan ve dl_1 ve dl_2 diye gösterilen sonsuz kısa iki parçası arasındaki etkileşme kuvveti

$$dF_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \oiint_{l_1,l_2} \frac{d\boldsymbol{l}_1 \, x \, (d\boldsymbol{l}_2 \, x \, \boldsymbol{r}_{12})}{r_{12}^3} \tag{2.15}$$

şeklinde ifade edilir ve bu Biot-Savart yasası olarak adlandırılır. Burada μ_0 uzayın manyetik geçirgenliği, R de sonsuz kısa ve taşıdıkları akıma paralel olarak seçilen dl vektörleri arasındaki uzaklıktır ve bunlar arasındaki çarpmanın vektörel olduğuna dikkat edilmelidir. Hemen anlaşılacağı üzere tellere etkiyen toplam kuvvet her iki telin üzerinden integrasyon yapılarak bulunur[10]. Yukarıda ki ifade başka bir formda

$$dF_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \oiint_{l_1,l_2} \frac{d\boldsymbol{l}_1 . d\boldsymbol{l}_2 \, (\boldsymbol{r}_{12})}{r_{12}^3} \tag{2.16}$$

şeklinde de yazılabilir.

Burada da etki tepki yasası geçerlidir. Elektrik alan kavramında yapıldığı gibi akım elemanlarından herhangi birine etkiyen manyetik kuvvetin söz konusu elemanın bulunduğu uzay noktasının özelliklerinin diğer akım teli tarafından değiştirilerek manyetik alan diye adlandırılan bir olguya neden olduğu ve diğer akım teli elemanına bu alandan dolayı manyetik kuvvet etki ettiği de kabul edilebilir. Bu durumda herhangi bir akım elemanının kendisinden R kadar uzakta

$$dB_2 = \mu_0 i_2 dl_2 x R/(4\pi R^3) \tag{2.17}$$

diye ifade edilen bir manyetik alan oluşturduğu tanımı yapılabilir. Bu alan tüm akım teli üzerinden integre edilerek toplam alan bulunabilir. Bu tanımlar dikkate alındığında bir manyetik alan içine konmuş bir akım elemanına

$$dF_{12} = i_1 dl_1 x B_2 \tag{2.18}$$

ifadesi ile verilen bir kuvvet uygulanır. Akım taşıyan teller genellikle eğriseldir. Diğer yandan kuvvetler de vektörel olduğundan hem manyetik alan ve hem de bir tele etkiyen toplam kuvvet ilgili teller üzerinden integrasyon yapılarak bulunur. Örneğin doğrusal ve sonsuz uzun bir akım telinin R kadar uzakta oluşturduğu manyetik alan

$$B_2 = \mu_0 i_2 x R/(2\pi R^2) \tag{2.19}$$

biçiminde yazılabilir. Bu durumda bu alan içindeki dl_1 uzunluğundaki bir akım teli parçasına bu alandan dolayı uygulanan manyetik kuvvet

$$dF_1 = i_1 dl_1 x B_2 \tag{2.20}$$

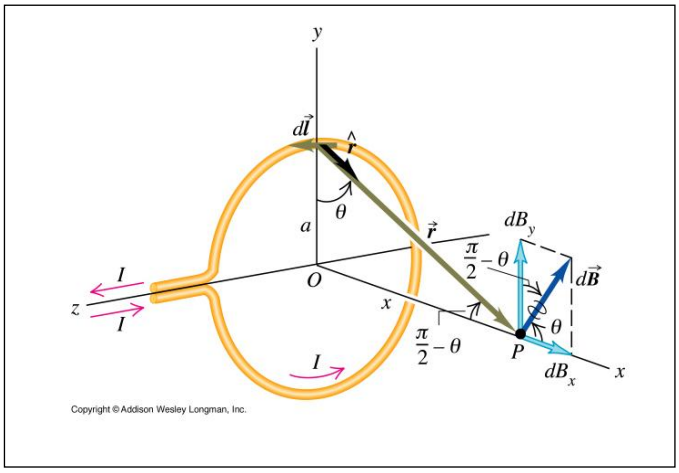
şeklinde de ifade edilebilir.

Manyetik alan oluşturan akım tellerinin geometrik sarımı, sarım sayısı ve diğer özellikleri kontrol edilerek uzayda homojen (her yerde aynı) veya istenen oranda değişen manyetik alan üretilebilir. Bu alan içine konuan diğer akım telleri veya halkalarının şekli de kontrol edilerek yapılan bu akım ilmeğine etkiyen kuvvetler de istenen biçimde kontrol edilmeğe çalışılabilir. Ancak unutulmaması gereken en önemli nokta bu kontrol için sonsuz serbestlik söz konusu olamaz, her zaman fizik yasaları ile sınırlı kalınır. Örneğin bir akım halkasının ürettiği manyetik alanı Şekil.2.9 da görüldüğü gibidir.

Yukarıdaki 2.15 nolu ifade kullanılarak a yarıçaplı dairesel kapalı bir akım halkasının simetri ekseni üzerinde merkezden x kadar uzaktaki bir noktada oluşturacağı manyetik alan

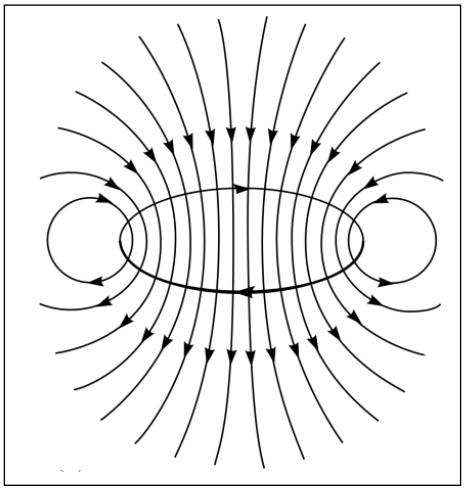
$$B_x = \mu_0 i/(2\pi(x^2+a^2)^{3/2}) \tag{2.21}$$

şeklinde hesaplanabilir. Yukarıdaki ifade akım ilmeğinin sadece simetri ekseni üzerinde ve merkezden x kadar uzakta bulunan bir noktadaki manyetik alan şiddetini vermektedir.



Şekil 2.9: Bir akım halkasının ekseni üzerinde oluşan manyetik alan

Burada manyetik alan eksene paralel ve yönü de akımın yönüne bağlı olarak ve sağ el kuralına göre ortaya çıkar. Yani akımın yönü zıt yönde alınırsa alanın yönü de zıt doğrultuda olur. Akım halkasına göre herhangi bir uzay noktasındaki alan 9 no'lu ifade ile hesaplanmalıdır. Ancak bu durumda akım elemanlarının yönü halka boyunca sürekli değiştirildiğinden her bir elemanın alana katkısı farklı yönde ve farklı büyüklükte olur. Yani bu alanı akim elemanları üzerinden vektörel olarak toplamak (burada integre etmek gerekir. Ancak bu integrasyonun analitik olarak yapılabilmesi o kadar kolay değildir. O nedenle sonlu elemanlar yöntemi ile dijital olarak bilgisayarla hesaplamak gerekir. Bu yöntemle elde edilen manyetik alan profili Şekil 3.2 deki gibi olur. Şekilde oklar o nokta civarındaki manyetik alanın yönünü gösterirler. Bu çizgilerin birbirlerinden uzaklaşarak (veya yaklaşarak) sıklıkları değişir. Çizgi sıklıkları alanın yerel olarak şiddetini gösterirler.



Şekil 2.10: Dairesel bir akım halkasının etrafında indüklenen manyetik alan profili

Bu sistemi bir atom olarak alırsak a parametresi mıknatıstan olan makroskopik uzunluk z yanında ihmal edilebileceğinden bu alan çok iyi bir yaklaşıklıkla

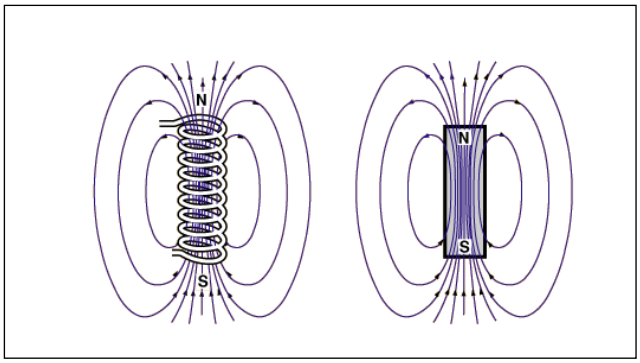
$$B_z = \mu_0 M/(2\pi x^3) \tag{2.22}$$

biçiminde hesaplanabilir. Burada A akım ilmeğinin yüzey alan vektörü olmak üzere $M=iA$ şeklinde tanımlanır ve akımın yönü yüzey alan vektörüne göre saat

istikametinin tersine olmak üzere akım ilmeğinin manyetik dipol momenti diye adlandırılır.

Yukarıdaki 2.21 ifadesi kullanılarak bir maddeyi oluşturan atomlar etrafında dolanan elektrik akımları dolayısıyla bu maddenin (burada mıknatıs denebilir) çevresinde veya kendi içinde oluşturacağı manyetik alanlar da hesaplanabilir. Bu manyetik alan maddeye göre olan göreceli konuma ve yöne bağlı olur. Eğer madde atomlarının her yerinde atomların manyetik dipolleri birbirlerine paralelse oluşan alan manyetik cismin geometrik şekline bağlı olarak homojen olabilir. Özellikle eliptik şekle sahip bir cisim için manyetik alan madde içinde dipollere antiparalel olarak homojendir. Maddenin dışında ise iyice uzaklarda gene 14 denklemine benzerdir. Plaka şeklindeki cisimde mıknatıslanma yüzeye dikse yüzeye yakın bölgelerde alan içeride sabit ve yüzeye dikken dışarıda sıfır olur. Uzun çubuk şeklindeki mıknatıs eksene paralel mıknatıslanmışsa içerideki alan sıfır iken hemen dış yüzeyde $B=4\pi m$ olur. Burada m birim hacme düşen manyetik dipol vektörüdür ve cismin mıknatıslanması olarak adlandırılır.

Örneğin Şekil 2.11 de gösterilen sonsuz uzun sarılmış homojen silindirik bir akım halkasının içinde her noktada manyetik alan şiddeti sabittir. Gene bir düzlemde birbirlerine sonsuz yakın ve paralel olarak yerleştirilmiş ve eşit akım taşıyan tellerin oluşturduğu manyetik alan şiddeti de düzlemden uzaklığa bağlı olmaksızın sabittir.



Şekil 2.11: Sonsuz uzun akım kangalının manyetik alanı ile çubuk mıknatısın alanındaki benzerlik

Manyetik kuvvetlerin de elektrik yükleri ile ilişkili olduğuna dikkat edilmelidir. Durgun yükler birbirlerine elektrostatik denen Coulomb kuvveti etkilerken bu yükler birbirlerine göre hareket ettiklerinde ek olarak manyetik kuvvet de etki ederler ve dikkat edileceği gibi bu kuvvetin büyüklüğü hem yüklerin miktarına ve hem de

hızlarıyla (yani kısaca akım şiddeti ile) orantılıdır[5]. Diğer yandan elektrostatik kuvvetler her zaman yükler arasındaki doğrultuya paralelken manyetik kuvvetler yüklerin hareket doğrultularına da sıkı sıkıya bağlıdır. Yukarıdaki (8) ifadeye göre bu yüklerden birisi hareketli olsa bile diğeri durgunsa gene manyetik kuvvetten söz edemeyiz. Diğer yandan ilginç ve şaşırtıcı olanı bu sisteme başka bir gözlem çerçevesinden bakıldığında her iki yükün de hareketli olduğu görüleceğinden bu çerçevede manyetik kuvvet ortaya çıkacaktır. Yani manyetik kuvvetler özel relativite teorisi ile açıklanabilir. Kısacası elektrik ve manyetik kuvvetler aynı orijinlidir.

2.2.3. Çekirdek Kuvvetleri

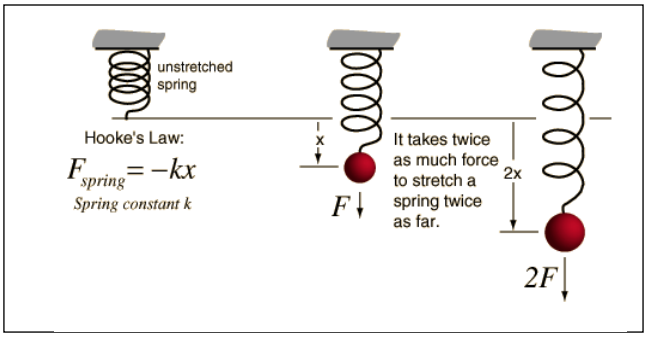
Bu kuvvetler birbirlerine çok yakın olan ve atom çekirdeğini oluşturan ve nükleon denen proton ve nötron gibi parçacıklar arasında ortaya çıkar. Bu kuvvetler parçacıkları birbirlerinden uzakta iken hem kütle çekim ve hem de elektrostatik kuvvetlerle mukayese edildiğinde yok denecek kadar zayıf kalırlar. Halbuki femtometre basamağında birbirlerine yaklaştırıldıklarında diğer kuvvetlere göre milyonlarca kez daha şiddetli olurlar. Bu kuvvetler atom çekirdeklerinin oluşmasında başat rol oynarlar. Bu kuvvetlerin büyüklüğü atom bombasında ortaya çıkan o müthiş büyük enerjinin de kaynağını oluştururlar. Temel parçacıklar arasında ortaya çıkan bir diğer kuvvet de beta bozunması ile de ilişkili olan ve zayıf kuvvet adı verilen kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin elektromanyetik kuvvetlerle de ilişkili olduğu gösterilmiştir.

Bu kuvvetlerden kütle çekim kuvvetleri astronomik cisim ve sistemlerin klasik fizik çerçevesinde ve bir düzen içinde bir arada hareket etmelerinde etkinken, nötron, proton ve elektronların bir raya gelerek kuantum fizik yasaları çerçevesinde atomu oluşturmada ve/veya atomların bir araya gelerek molekülleri, sıvıları veya katı cisimleri oluşturmasında da elektromanyetik kuvvetler ön plana çıkarlar. Diğer yandan proton ve nötronları bir araya getirerek çekirdeklerin oluşmasında da güçlü çekirdek kuvvetleri en başat rolü oynarlar. Çekirdek kuvvetleri çok yakından etkinken parçacıklar arasındaki mesafe çekirdek boyutunu aşınca çok zayıflarlar. O nedenle Coulomb itme kuvvetleri uzun erimli olmalarından ötürü çok büyük çekirdeklerde rol üstlenerek çok daha yüksek atom numaralı çekirdeklerin kararlı olarak var olmalarını engellerler. Yukarıda da bahsedildiği gibi zayıf etkileşmelerin

makroskopik cisimlerin dinamik davranışları üzerinde herhangi bir etkileri olmadığından bu tezde bu kuvvetlerin teorik modelleri üzerinde daha fazla söz etmek gereksizdir.

2.2.4. Dış Kuvvet Alanı Etkisi Altındaki Sistemlerin Statik Denge Noktası

Yukarıda bahsedildiği gibi makroskopik bir cisme dış kuvvet etki ettiğinde ivmelenerek hareket eder. Dış kuvvetler sıfırsa mevcut hızını koruyarak hareketine devam eder. O nedenle sürekli olarak bir dış kuvvetin etkisinde olmasa bile bir cisme anlık küçük bir kuvvet uygulandığında bile kazanacağı küçük de olsa bir hız ile harekete başlayarak bulunduğu ilk konumdan sürekli olarak uzaklaşır. Yani bu durumda sistem için kararlı bir statik dengeden bahsetmek mümkün olmaz. Ancak eğer uygulanan kuvvet uzayda belli bir noktada sıfırken bu noktanın zıt taraflarına gidildiğinde ortaya bir kuvvet çıkıyorsa ve bu kuvvet zıt yönlerde kendini gösteriyorsa bu durumda söz konusu nokta bu mekanik cisim için denge konumu olur. Çünkü cisim bu noktadan örneğin sağa doğru hafifçe hareket ettiğinde ters yönde bir kuvvet kendini göstererek cismi ilk konumuna doğru geri çeker. Diğer yandan cisim sol yöne doğru bir ilk hız kazanıp sola doğru harekete başladığında bu kez kuvvet sağ yönde kendini gösterir ve cismi tekrar ilk konumuna doğru çeker. Bu noktaya potansiyel enerjinin minimum olduğu nokta denir. Örneğin bir yayda durum böyledir. Yay gerildiğinde veya sıkıştırıldığında zıt yönde kuvvet ortaya çıkarak ucuna bağlı olduğu cismi denge noktasına doğru iter. Bu durum şekil.4 de tasvir edilmiştir.



Şekil 2.12: Bir yayın gerilmesi veya sıkışması ile ortaya çıkan kuvvet

Şekilden de görüldüğü gibi yayın ucuna bağlanan cisme uyguladığı kuvvetin şiddeti yaydaki gerilme veya sıkışma (cismin denge konumundan sağa veya sola yer değiştirme) miktarı ile doğru orantılı ve yönünde hep denge noktasına doğru cismi çağıracak şekildedir. Yani bu kuvvetin matematiksel formu

$$F=-kx \tag{2.22}$$

şeklinde yazılabilir. Burada k yaya özgü bir sabit ve x de yayın gerilme veya sıkışma miktarıdır. Böylece x-eksenin doğrultusunda cismin yer değiştirmesi pozitif olunca kuvvet negatif olurken yer değiştirme negatif olduğunda yayın uyguladığı kuvvet pozitif olmakta ve cismi denge konumuna doğru çekmektedir. Diğer yandan aynı kuvvetin

$$U=kx^2/2 \tag{2.23}$$

tanımlanabilecek ve yayda biriken potansiyel enerji denenen bir fonksiyonun konuma göre türevinin negatifinden de elde edilebileceği görülebilir. Yani,

$$F = -\partial U/\partial x \tag{2.24}$$

şeklinde bir kısmi türev işlemi ile, konuma bağlı olarak yazılan *U(x)* fonksiyonunun x e göre türevinden, bulunabilir. Potansiyelin konuma bağlı değişimine bakılacak olursa potansiyelin minimum olduğu noktada kuvvet sıfırdır ve sistem bu durumda dengede kalır.

Bu durum birçok kuvvet türleri ve sistemler için genellenebilir. Birçok kuvvet türü için cisme etkiyen kuvvet sadece üç boyutlu uzayda konumun fonksiyonu olarak yazılabilir ve bu kuvvetlere korunumlu kuvvetler denir. O nedenle bu kuvvetler, her fiziksel objenin enerjisi üç boyutta konuma bağlı olarak yazılabilecek, *U(x, y ,z)* potansiyel enerjisinden

$$F=-= -\nabla U(x,y,z) \tag{2.25}$$

şeklinde her üç doğrultuya göre kısmi türevlerden elde edilebilir. Burada *i, j ,k* sırasıyla x, y ,z eksenleri doğrultusunda birim vektörleri olmak üzere

$$\nabla = i\frac{\partial}{\partial y} + j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z}) \tag{2.26}$$

diye tanımlanan ve gradyent denen üç boyutta ve vektör özelliğine sahip türev operatörüdür. Ters kare kuvvetlerinin ise en genel olarak

$$U(r) = \frac{k}{r} = \frac{k}{\sqrt{x^2+y^2+y^2}} \tag{2.27}$$

şeklinde tanımlanabilecek bir potansiyel enerji fonksiyonundan yukarıda tanımlanan gradyent alma işlemi ile elde edilebilir. İlginç ve şaşırtıcı olanı elektromanyetik kaynaklı olan bu kuvvetler yayda iken denge konumu oluşturmalarına rağmen makroskopik cisimler arasındaki etkileşmeler söz konusu olduğunda denge konumu oluşturamamaktadır. Bu şaşırtıcı durumun nedeni katı maddelerde atomlar arası etkileşmelerde atomların konumu klasik fizik yasaları yerine kuantum fiziği yasaları ile belirlenmesidir. Klasik fizik yasalarına göre elektromanyetik ve/veya kütle çekim kuvvetlerinin kararlı denge noktası oluşturamayacağı aşağıdaki gibi gösterilebilir:

2.2.5. Manyetik Kuvvetler ve Ters Kare Kuvvetlerinde Denge Noktasının Olmaması

Şimdi ters kare, yani uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak etki eden kuvvet altında (kütle çekim veya elektromanyetik) bir cismin denge noktasının olamayacağını açıklayalım. Önce uzayda r noktasında diş kaynaklar nedeniyle indüklenmiş manyetik B alandaki noktasal bir $\boldsymbol{\mu}$ dipolünün potansiyel enerjisinin

$$U=-\mu.B \tag{2.28}$$

şeklinde verildiğini hatırlayalım. Yukarıda değinildiği gibi herhangi bir cisme etkiyen kuvvet bu cismin uzaydaki konumundan ötürü sahip olduğu potansiyel enerjiden

$$F = -\nabla U = \nabla\ (\mu.B) \tag{2.29}$$

işlemi ile türetilebilir. Burada sadece B konumun fonksiyonu olarak değişebildiğinden ve μ konumdan bağımsız olduğundan türev operatörü sadece B

vektörüne uygulanır ve μ türev işlemi sırasında sabit kabul edilir (not: manyetik momentin uzayla değiştiği durum ayrıca ele alınmalıdır). Matematiksel işlemlerden,

$$\nabla(\mu.B) = \mu \text{ x } (\nabla \text{xB}) + (\mu.\nabla)B \tag{2.30}$$

vektör özdeşliğini kullanıp ve boş uzayda manyetik alanın rotasyonelinin sıfır olduğunu da dikkate alarak

$$F = (\mu.\nabla)B \tag{2.31}$$

diye amaçlarımız açısından daha kullanışlı bir ifade elde ederiz. Şimdi noktasal dipol'ün uzayda bulunduğu noktayı içine alan ve sonsuz küçük yarıçaplı kapalı bir yüzey üzerinden bu kuvvetin yüzey integralini ele alalım. Parçacığın kararlı dengede olması için bu integralin negatif olması gerekir, yani kuvvet vektörleri tüm yüzey üzerinden yüzey normaline antiparalel, yani yüzeyden içeri doğru olmalıdır. Matematiksel olarak bu gerçek şöyle ifade edilebilir:

$$\oint_s F.da < 0 \tag{2.32}$$

Şimdi diverjans teoremi kullanılarak yüzey integrali yerine kapalı hacim üzerinden integral alınabilir:

$$\oint_s F.da = \int_V \nabla.F dV \tag{2.33}$$

Diğer yandan

$$\nabla.F = 0 \tag{2.34}$$

olduğu 2.25, 2.30 ve 2.33 numaralı eşitlikler kullanılarak aşağıdaki gibi gösterilebilir. Tanım gereği olarak,

$$\left.\begin{aligned} \nabla.F &= \frac{\partial F_x}{\partial_x} + \frac{\partial F_y}{\partial_y} + \frac{\partial F_z}{\partial_z} \\ &= \frac{\partial(\mu.\nabla)B_x}{\partial_x} + \frac{\partial(\mu.\nabla)B_y}{\partial_y} + \frac{\partial(\mu.\nabla)B_z}{\partial_z} \\ &= (\mu.\nabla)\frac{\partial B_x}{\partial_x} + (\mu.\nabla)\frac{\partial B_x}{\partial_x} + (\mu.\nabla)\frac{\partial B_x}{\partial_x} \\ &= (\mu.\nabla)(\nabla.B) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{2.35}$$

Burada manyetik alanın sıfır olması kuvvetin diverjansının sıfır olası sonucunu doğurmuştur. O halde denge için gerekli 2.31 numaralı şart manyetik kuvvetler tarafından sağlanamamaktadır.

Tek bir noktasal manyetik diple uygulanan kuvvet için yapılan bu analiz manyetik dipolerin katı bir maddede dağılım gösterdiği duruma da genelleştirilebilir. Çünkü sonlu bir hacme sahip katı maddede dipollerin birbirlerine göre olan göreceli konumları değişmez. Yani katı madde küçük bir öteleme yaptığında tüm dipoller aynı yönde ve aynı miktarda öteleme yapar. O nedenle bu katı maddenin bir kuvvet alanında dengede olması için, cisimdeki bir dipolün denge konumu diye farzedilen noktasında kuvvetin sıfır olması ve bu noktada ne yönde uzaklaşırsa uzaklaşsın kuvvetin cismi denge konumuna doğru çekmesi gerekir[7]. O nedenle bu madde farzedilen denge noktasını merkez alan çok küçük bir kürenin yüzeyinde hangi noktaya taşınırsa taşınsın kuvvetin merkeze doğru olması yanı kuvvetin diverjansının negatif olması gerekir. Halbuki yukarıda gösterildiği gibi manyetik tek bir dipole etkiyen kuvvetin diverjansı sıfırdır, yani negatif olamaz. Şimdi katı cismin bir dipolünü küçük bir küre yüzeyinde gezdirirken diğer tüm dipollerinde kendi ilk konumları etrafındaki küre yüzeyinde yer değiştirdikleri düşünüldüğünde hiçbir dipol için küre yüzeyinin tüm noktalarında içe doğru, yani farzedilen denge konumuna doğru, bir kuvvet söz konusu olamayacağından bu katı cismi dengeye çağıran manyetik kuvvetten söz edilemez.

Aynı sonuca dipole etki eden manyetik kuvvet yerine manyetik kutuplara etkiyen ve ters kare mahiyetinde (Biot-Savart) yazılabilecek kuvvetler kullanılarak da ulaşılabilir.

Seçilebilecek herhangi bir durgun referans eksen sistemi dikkate alınarak uzayda r noktasındaki kuvvet alanlarının kaynağının ters kare kuvveti olduğunu kabul edelim, bu durumda bu alanların diverjansı sıfır olur. Yani elektrik yüklerinden veya kütleden arındırılmış bir uzay noktasında,

$$\nabla . E = \nabla . B = \nabla . g = 0 \tag{2.36}$$

Bu demektir ki ne E, ne B ve ne de g vektörlerinin her üç bileşeninin de ilgili doğrultulara göre türevleri aynı işaretli olamaz. Çünkü divejansın tanımı gereği bu bileşenlerin türevlerinin toplamı sıfır olmak zorundadır. Dolayısıyla bu alanlardan kaynaklanan kuvvetlerin türevlerinin işaretleri aynı olamaz. Yani herhangi belli bir

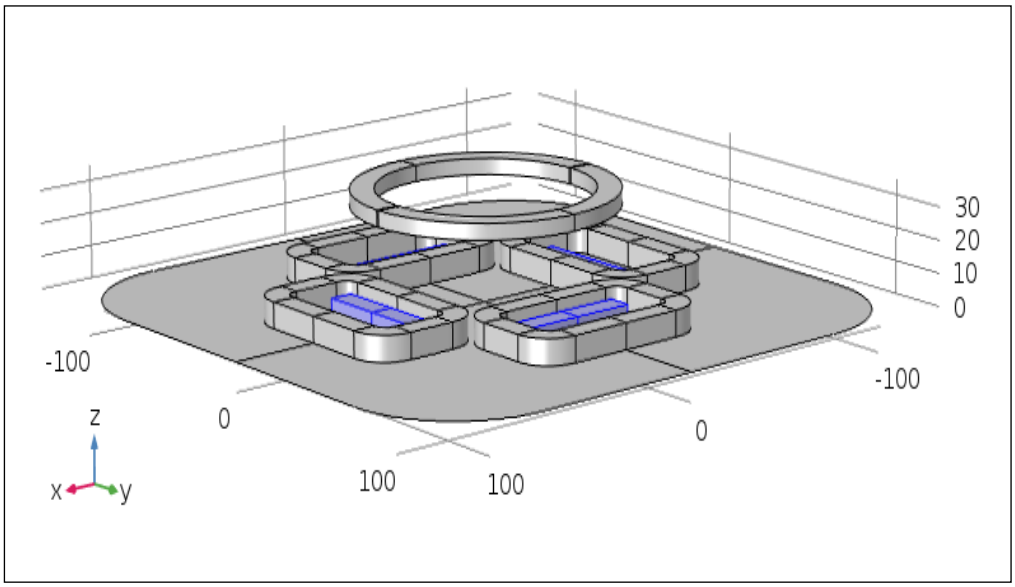
noktadaki cisme etkiyen kuvvetlerin bileşenleri cismin konumu değiştikçe bir yönde artarken diğer yönde azalmak zorundadır. O nedenle denge konumu diye farzedeceğimiz bir noktadan cisim biraz uzaklaştığında bir doğrultuda kuvvet negatif olup cismi farzedilen denge konumuna çekerken diğer yöndeki kuvvet bileşeni daha da artarak pozitif yönde cismi denge noktasından kovmaya çalışacaktır. Yani klasik fizik yasalarına gör böyle kuvvetlerin etkisindeki makroskopik boyutlu cisimler için statik kararlı denge noktasından bahsedilemez. Yukarıda da bahsedildiği gibi hem kütle çekim, hem Coulomb ve hem de Biot-Svart yaslarına göre ters kare kuvvetleri söz konusudur. O nedenle bu kuvvetlerle statik denge yakalanamaz. Başka ek kuvvetler de gerekir.

3.TEORİ

3.1 Cihazın Genel (Ön) Tasarım Yönteminin Belirlenmesi

Giriş bölümünde de kısaca bahsedildiği gibi bu tez çalışması ile bir cismin aşağıdan etkiyecek manyetik itme kuvveti ile yukarıda dengede kalacak şekilde askıya alınması amaçlanmıştır. Süperiletken malzeme kullanılarak bu işin gerçekleştirilmesi teknik açıdan çok kolay olasına rağmen süper iletkenler ancak çok düşük sıcaklıklarda bu özelliklerini kazanabildiğinden ekonomik kullanım ve pratik uygulamalar açısından büyük problemler ortaya çıkmaktadır. O nedenle geliştirmek istediğimiz manyetik levitasyon (manyetik askı) cihazında klasik mıknatıslar ve elektromagnetler kullanmayı hedefledik.

Diğer yandan yukarıda bahsedildiği gibi klasik mıknatıslar kullanıldığında askıdaki sistemin kararlı bir statik dengesinin mümkün olmadığı da bilinmektedir. O nedenle statik mıknatıs kuvvetleri yanında dinamik elektromanyetik kuvvetler uygulayarak kararsız denge noktasından uzaklaşmaya çalışan askıdaki cismi sürekli olarak denge noktasına geri çekmemiz gerekir. Bununla birlikte askıya alınacak cihaz bileşeninin sadece askıda dengede kalması yetmez. Askıda yüzecek kısmın uzaydaki konumu yanında geometrik yöneliminin de istenen yönde satatik dengeye alınması gerekmektedir. Yani hem kuvvet dengesi ve hem de tork dengesinin sağlanması gerekir. Hem kuvvetin ve hem de tork'un vektör karakterinde olduğunu hatırlarsak aslında 6 parametre açısından da sistemin dengeye alınması gerekmektedir. Bütün bu işleri düşünerek sistemin genel tasarımını aşağıdaki verilen şekildeki gibi yaptık.



Şekil 3.1: Hesaplamalarda kullanılan levitasyon cihazının tasarlanan şekli

Şekil.3.1 de şematik olarak cihazın model tasarımındaki bileşenlerin fonksiyonları şöyle düşünüldü:

i) Cihazın destek bileşeninin düşey eksene göre simetrik olması
ii) Manyetik askıya alınacak bileşenin düşey eksene göre simetrik olması
iii) Dc manyetik kuvvetlerin NdFeB permanent mıknatıslanmalarından sağlanması
iv) Ac manyetik kuvvetlerin elektrik bobinlerce sağlanması
v) Askıdaki elemanın konumunun ve yöneliminin optik sensörlerle belirlenmesi
vi) Askıdaki elemanın dengeden kaçma miktarı hesaplayarak sistemi denge konumuna çağıracak kadar kuvvet üretecek elektrik akımını sisteme sürecek uygun güç kaynağının bulunması
vii) Sistemi denge konumuna çağıracak kontrol elektroniğinin olması

Yukarıda sıralanan gereksinimler için sistemin taban ünitesinin kare veya dairesel plaka kasadan yapılmasına karar verildi. Bu kasanın merkezinden geçen dik eksene göre simetrik olmak üzere dikdörtgen kesitli çubuk şeklinde mıknatıslar yere paralel olarak tasarlandı.

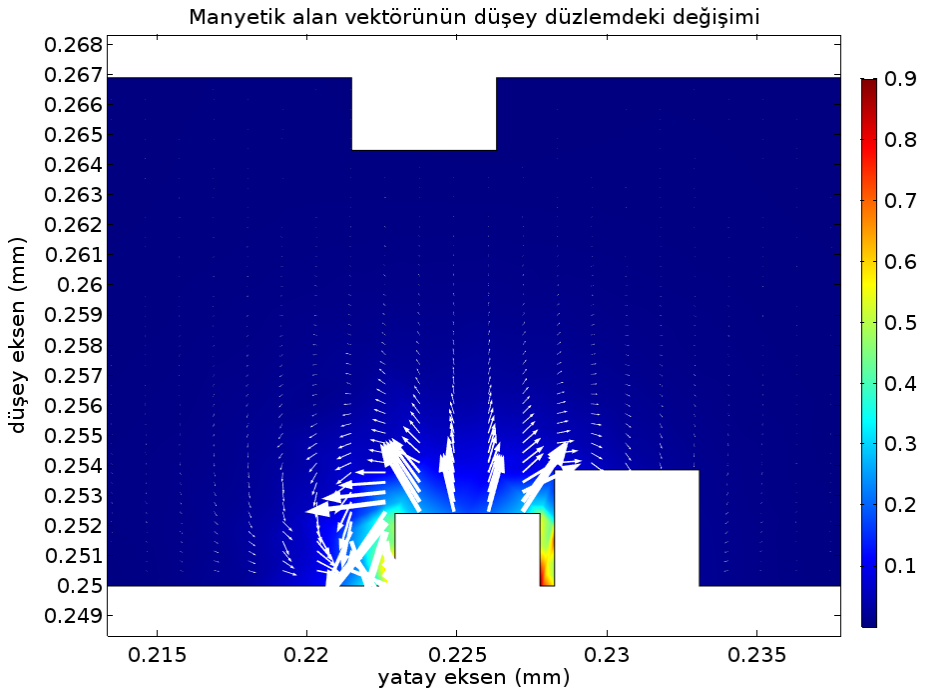
3.2. Teorik Hesaplamalar

Şekil.3.1 ön tasarım resmi verilen cihazın manyetik olarak askıda dengeye alınabilmesi için bileşenleri arasında manyetik etkileşme kuvvetleri COMSOL programı ile hesaplandı. Bilindiği gibi mıknatıslar iki kutuplu olduğundan ve zıt kutuplar birbirlerini çekerken aynı kutuplar birbirlerini ittiğinden ve bu kuvvetler etkileşen mıknatısların kutuplarındaki her noktanın birbirlerine göre uzaklığının karesiyle ters orantılı olduğundan sonlu büyüklükteki mıknatısların etkileşme kuvvetleri için uzun integrasyonlar gerekir[3]. Üstelik kuvvet vektör özelliğine sahip olduğundan etkileşen mıknatısların birbirlerine göre olan yönelimleri de dikkate alınmak zorundadır.

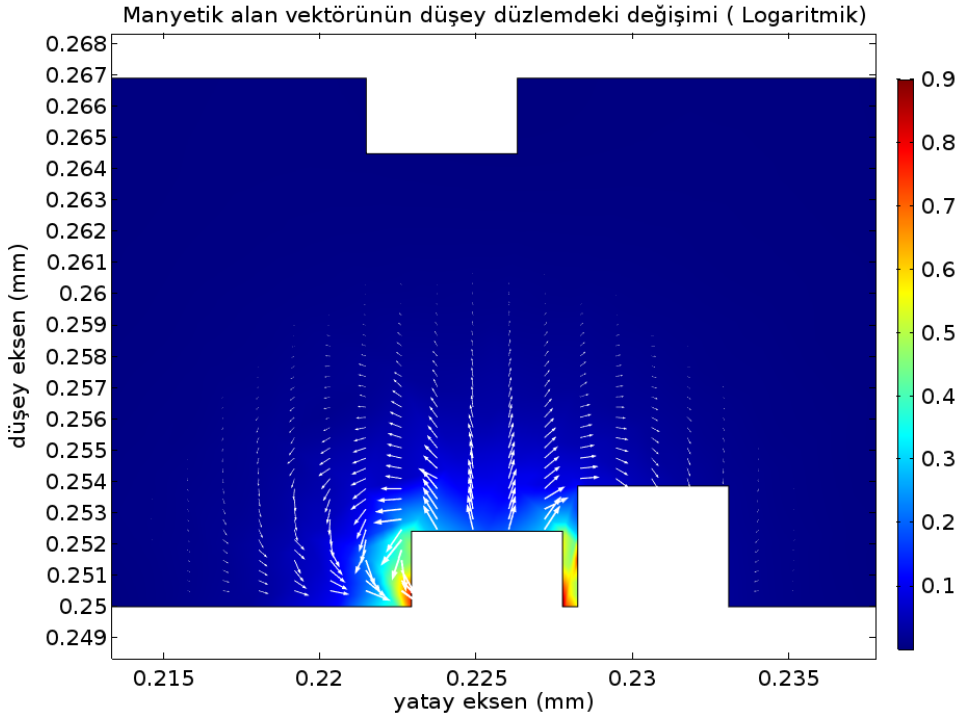
Bütün bu işlemlerin analitik integrasyon yöntemiyle yapılması pratikte imkansız hale gelmektedir. O nedenle mıknatısların her biri sonsuz küçük parçalardan (mıknatıslardan) meydana geldiği gerçeği düşünülerek bir mıknatısı oluşturan bu sonsuz küçük dipollerle diğer mıknatısı oluşturan noktasal dipollerin her biri arasındaki etkileşmeler teorik olarak hesaplanıp bu değerler tüm etkileşen dipol çiftleri üzerinden bilgisayarda toplanabilir. Buna sonsuz küçük elemanlar yöntemi denir. Yani sonlu büyüklükte ve herhangi bir geometrik şekle sahip mıknatıs yazılan bilgisayar programı aracılığı ile hayalen çok küçük parçalara ayrılarak dipol çiftleri oluşturulur ve çok sayıdaki bu çiftler arasındaki etkileşmeler bilgisayar tarafından hesaplanarak hızlıca toplanabilir. Hesapların doğruluğunun artması için elemanların olabildiğince küçük seçilmesi gerekir. Ancak gene de bilgisayar ne kadar hızlı olsa da elemanlar çok küçük seçilip sayısı çok fazla artarsa bilgisayarın zamanı da yetmeyebilir. O nedenle bir orta yol bulunmak zorunda kalınır.

COMSOL programı ile hesaplamalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada manyetik alan profili belirlenmiştir. İkinci aşamada ise bu manyetik alan değerleri kullanılmak suretiyle manyetik kuvvetler hesaplanmıştır. Hesaplamalarda z yönü Şekil 3.2'de olduğu gibi yukarıya doğru olacak şekilde kabul edilmiştir. Burada ilk aşamada her bir tasarım için dört adet bobin üzerlerinde belli bir akım ve dört adet sabit mıknatıs üzerlerinde z yönünde sabit mıknatıslanma olacak şekilde kabul yapılmıştır. Manyetik alan çözümüne, bobin ve sabit mıknatıslar dışında kalan alanda zamandan bağımsız Ampere Kanunu ($\nabla \times H = J$) kullanılarak varılmıştır. Böylelikle adı geçen bölgede sonlu eleman analizindeki her bir düğüm noktası için manyetik

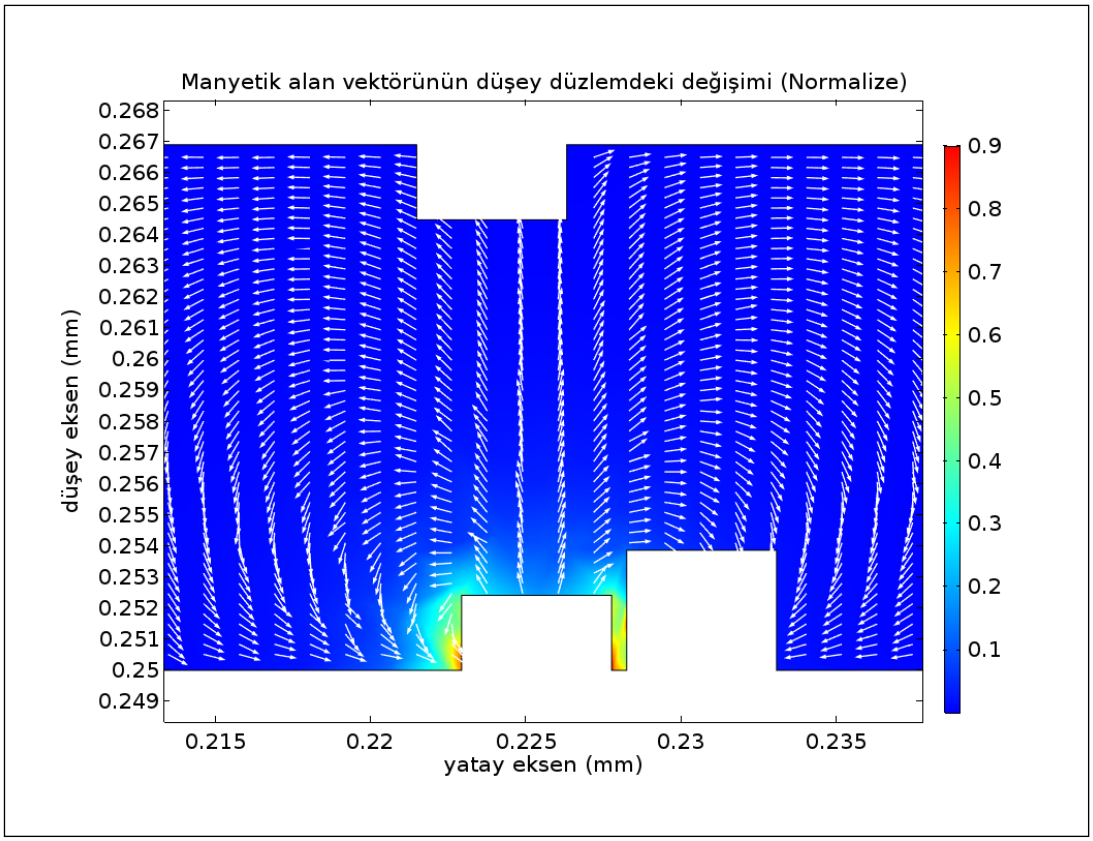
alanın üç bileşeni (H_x, H_y, H_z) elde edilmiştir. Uzayda pozisyonun fonksiyonu olarak hesaplanan manyetik alan alan değerleri ve buradan elde edilen alan profilleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.2, 3.3 ve 3.4) de verilmiştir.



Şekil 3.2: Manyetik alan vektörlerinin uzaysal dağılımı



Şekil 3.3: Manyetik alan vektörlerinin logaritmik olarak çizimi



Şekil 3.4: Manyetik alan vektörlerinin normalize edilmiş hali

Bundan sonra hesaplamalarda ikinci aşamaya geçilmiştir. Yukarıdaki halka üzerine etki eden manyetik kuvvetin hesaplanması için Denklem (2.31)'den yararlanılmıştır. Halkanın manyetizasyonu sabit ve +z olacak şekilde seçilmiştir. O nedenle manyetik kuvvetler aşağıda verilen formüllerden bulunmuştur.

$$F = (\mu.\nabla)B = \mu\frac{\partial}{\partial z}B \tag{3.1}$$

Buradan her bir nokta için kuvvetin üç bileşenine şu şekilde ulaşılır.

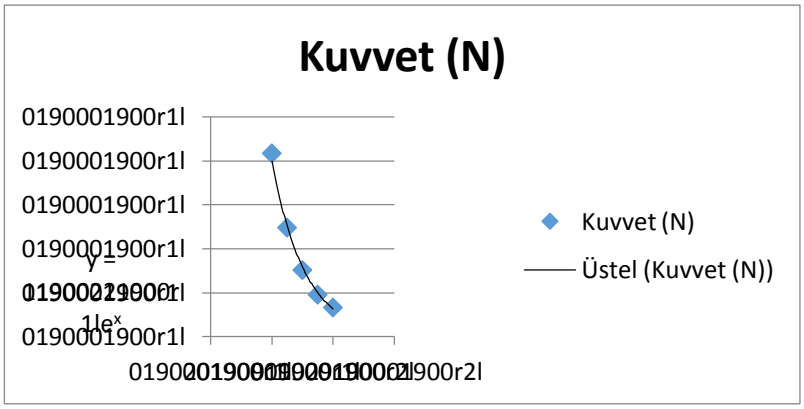
$$\left.\begin{aligned} F_x &= \mu\frac{\partial B_x}{\partial z} = B_{xz} \\ F_y &= \mu\frac{\partial B_y}{\partial z} = B_{yz} \\ F_z &= \mu\frac{\partial B_z}{\partial z} = B_{zz} \end{aligned}\right\} \tag{3.2}$$

Halka üzerindeki toplam manyetik kuvvetin hesaplanması için sonlu eleman yönteminde daha önceden ulaşılan H ve dolayısıyla B değerlerinden yararlanılmış ve ikincinin bütün çözüm noktalarında türevi alınarak istenilen B_{xz}, B_{yz} ve B_{zz} değerlerine ulaşılmıştır. Bütün bu çözümler yapılırken dikkat edilmesi gereken husus levitasyon halkasının başta sadece yeri belli olacak şekilde belirtilmesidir. Son aşamaya kadar bütün çözüm uzayında olduğu gibi – ki burada bobinler ve mıknatıslar hariç tutulmuştur – halka bölgesinde de $\mu_r = 1$ olacak şekilde çözüm yapılmıştır. Bu aşamadan sonra halka üzerine etkiyen kuvvetin üç bileşenini hesaplamak için ilgili kuvvetler halkanın toplam hacmi üzerinden entegre edilmelidir, ki bu sonlu eleman analizinde ilgili düğümler üzerinde yapılacak bir toplama işlemine denk gelmektedir. Bu işlemlerin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\left.\begin{aligned} \sum F_x &= \int_{Halka\ hacmi} F_x\, dV = \mu \sum_{Halka} B_{xz} \\ \sum F_y &= \int_{Halka\ hacmi} F_y\, dV = \mu \sum_{Halka} B_{yz} \\ \sum F_z &= \int_{Halka\ hacmi} F_z\, dV = \mu \sum_{Halka} B_{zz} \end{aligned}\right\} \qquad (3.3)$$

Böylece halka üzerine etki eden kuvvetin her üç bileşeni de hesaplanmış olur. Burada z yönündeki kuvvet yerçekimine karşı denge kuvvetidir. Diğer kuvvetlerin hesaplanması ise halka asimetrik konumlandığında geri çağırıcı kuvvetlerin hesaplanması açısından önemlidir.

Yukarıda anlatılan yöntem kullanılarak her bir mıknatıs etrafında oluşan manyetik alan profili ve mıknatısların göreceli konumları dikkate alınarak tabandaki mıknatıslar tarafından askıdaki elemanların her birine etkiyen kuvvetleri ayrı ayrı ve dolayısıyla askıdaki elemana taban tarafından etkiyen toplam kuvvetin her üç bileşeni de hesap edildi (Şekil.8).



Şekil 3.5: Askıdaki elemana etkiyen kuvvetin z bileşeninin konuma göre değişimi

Bu kuvvetlerin askıdaki elemanın simetri ekseninden saptığında nasıl değiştikleri analiz edildi. Böylece askıdaki elemanı dengeye çağırmak için şekildeki ilgili akım bobinlerine ne kadar akım sürülmesi gerektiği hesaplanarak analiz edildi. Bu işlem de gene sonlu elemanlar yöntemi ile bobinlerin çevrelerinde oluşturdukları manyetik alanlar COMSOL programıyla hesaplanarak yapıldı.

4.CİHAZIN İMALATI

Bu bölümde cihazın imalat yöntemi ve aşamalarından kısaca bahsedilmiştir

4.1.Cihazın Ayrıntılı Tasarımı

Cihaz öngörülen fonksiyonları ve dayanacağı fiziksel teorik temeller dikkate alınarak tasarlanmıştır. Cihazın fonksiyonu mekanik temas olmadan bir cismi havada askıya alabilmesidir. O nedenle mekanik temas olmadan bir cismi yerçekimine karşı boşlukta sabit tutabilmek için gene uzaktan etkisini gösteren bir kuvvet türüne gerek vardır. Bu kuvvet ya elektrik veya manyetik orjinli olmalıdır. Elektrik kuvvetler için statik yük birikimine gerek duyulur. Halbuki statik yükler uzun süre bir yerde depolanamazlar, çünkü bu yükler birbirlerini iterler ve birbirlerinden uzaklaşarak boşluğa veya elektrik devrelerin başka birimlerine dağılırlar. Halbuki manyetik kuvvet kaynakları daha güvenilirdirler. Çünkü bu kuvvetler sabit mıknatıslar veya sabit akımlarla kolayca üretilebilirler. Ayrıca bu kuvvetler için kararlı denge noktası olmadığından askıya alınacak sistemi denge noktasında kararlı tutabilmek için alternatif kuvvetlere gerek vardır. Gene askıdaki elemanın anlık konumunun sürekli olarak belirlenerek kontrol sistemine iletilmesi ve kontrol sisteminin gerekli anlık müdahaleyi yapabilmesi gerekmektedir. Bütün bu ve benzeri birçok nokta dikkate alınarak cihazın tasarımı yapılmıştır.

4.1.1.Mekanik tasarımı

Yukarıda anlatılan yöntemler kullanılarak cihazın tasarımı için bir ön kabulle ortalama büyüklüğü ve genel geometrik şekline karar verildi. Sonra bu bu ön kabulle önerilen cihaz parçaları arasındaki etkileşmeler için sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplar yapıldı. Sonra kararlı dengeye daha kolay ulaşılabilmesi için hangi parçaların ölçülerinin ve konumlarının ne yönde değişmesi ve benzeri işlemlere karar verilerek tasarım daha da geliştirildi. Bu işlemler ardışık olarak çok kez tekrarlanarak her adımda tasarım daha da mükemmelleştirilmeye çalışıldı. Yani cihaz teorik olarak

birçok açıdan optimize edildi Daha sonra karar verilen son tasarım için her parçanın üretimine geçildi.

4.1.2.Elektronik tasarımı

Cihazın elektronik tasarımını hangi temellere dayanmasına ön bilgilerle karar verildi. Yukarıda da sözü edildiği gibi statik manyetik kuvvetlerle kararlı statik dengenin sağlanması mümkün olmadığından, bu statik kuvvetlere ek olarak askıdaki bileşenin anlık durumunu (yönelimini ve konumunu) belirleyip dengeden sapmaları telafi edecek kuvvetlerin büyüklüğünün ve yönünün belirlenerek anında uygulanması gerekmektedir. Bu kuvvetlerin de olabildiğince çabuk olarak değiştirilerek uygulanabilmesi ancak elektrik akımı uygulanan bobinlerle olabilirdi. Bu amaçla hangi büyüklükte ve hangi geometride ve hangi konumlarda bobinlerin tasarlanması gerektiği gene ön bilgi ve tecrübelerle kararlaştırıldı.

Sonra bu bobinlerin taşıyabilecekleri maksimum akım şiddetleri de düşünülerek bu bobinlerle askıdaki mıknatıslar arasındaki kuvvetlerin uygulanacak akımla değişimi analiz edildi. Böylece denge konumundan sapan mıknatısa bobinler tarafından uygulanması gereken kuvvet (gene sonlu elemanlar yöntemi ile) ve dolayısıyla bobine uygulanması gereken akım şiddeti hesaplandı. Böylece bobin sayıları, bobin tel kalınlıkları, sarım sayıları ve geometrik şekilleri ardışık hesaplamalarla her aşamada daha da iyileştirilerek olabildiğince optimum parametre değerleri elde edildi. Bu arada sistemin büyüklüğüne ve taşıyacağı akım değerlerine göre soğutma ünitesine gerek olup olmadığına ve hangi durumda doğal soğutmanın yeterli olabileceğine karar verildi.

4.1.3.Elektronik Kontrol

Yukarıda anlatıldığı gibi askıdaki elemanın denge noktasından kaçma miktarının olabildiğince hızlı bir yöntemler belirlenip denge noktasına geri çağırıcı kuvvetlerin uygulanması gerekir. Bu tür işlemler genellikle sensör denen elemanlarla yapılır. Sensör probunun algılaması analitik (analog) yöntemlerle yapılabilir ve gene gerekli akım sürücü devre de analog esaslı olabilir. Bu durumda algılama ve tepki

verme neredeyse anlık denecek kadar hızlı olabilir. Ancak bu yöntemlerle kontrol parametrelerinin software aracılığı ile yapılması söz konusu olamaz. Halbuki askı elemanına yüklenecek ek yükler dolayısıyla kontrol kuvvetlerinin duruma göre pratik olarak değiştirilebilmesi gerekir. Bunun için bilgisayar programı gerekebilir. Bu durumda dijital yöntemler daha uygundur.

Yukarıdaki gerekler dikkate alınarak;

i) Askıdaki cihazın anlık konumunu belirlemek üzere optik yöntemlerin kullanılmasına karar verildi. Bu amaçla konumu olabildiğince hassas olarak algılamak üzere lazer ışık demeti ve bu demeti algılayabilecek uygun optik sensörler kullanılmaya karar verildi. Optik sensör elemanı yatay düzlemde birden çok bağımsız sensör elemanından tasarlanarak her bir eleman kendi üzerine gelen lazer ışın şiddetini algılanarak askıdaki elemanın eksenden ne kadar ve hangi yönde kaydığı tespit edilebilecekti. Lazer ışını sabit olan alt destek ünitesine yerleştirilerek askıdaki elemandan yansıyan ışın demetinin yönü askıdaki elemanın yatayda kayması ve yataya göre eğiminin değişimi her bir sensör elemanına gelen ışık miktarını değiştirir. Lazer ışını ne kadar ince olursa bu proses askıdaki elamanın konum değişimine o kadar hassas olabilir. Bütün bu parametreler tasarım sırasında optimize edildi.

ii) Her bir sensör bileşeninden gelen anlık sinyali değerlendirmek üzere ön yükselteç (OPAMP) kullanılmasının gerekli olduğu görüldü. Ayrıca algılama devrelerinde oluşabilecek gürültü sinyallerini filtrelemek için optik transistörler kullanıldı. OPAMP tan alınan sinyalleri algılayıp değerlendirmek ve bobinlere ne kadar akım sürmek gerektiğini hesaplayacak programlanabilir PBN kullanımının yeterli olacağı anlaşıldı. Duruma göre ve parametreleri pratik olarak değiştirerek tekrar dış bir bilgisayar üzerinden yükleyebilmek için PBN çipinin çıkarılıp takılabilir olmasına dikkat edildi.

iii) Sonra bobinlere sürülecek akımlar için transistör ve benzeri elemanlardan oluşan elektronik devrelere gerek olduğu anlaşıldı. Bu devreler bir karta çift taraflı olarak tasarlanarak yerden tasarruf edilmeye çalışıldı. Ayrıca güç katlarının ısınarak arızaya neden olmaması için bu kartların metal bir plaka üzerine monte edilmesinin uygun olacağı anlaşıldı. Daha büyük sistemler için ise hava ile soğutmak üzere sisteme bir fan eklendi.

iv) Son olarak gerekli devrelere gerekli elektrik güç sağlamak üzere DC güç kaynaklarının gücü ve özelliğine karar verildi. Bu sistem için algılama ve sürücü devrelerin olabildiğince birbirlerinden izole edilmesinin önemli olduğu anlaşıldı. Bu yüzden her iki devrenin farklı güç kaynaklarından beslenmesinin daha uygun olduğu anlaşılmasına rağmen tek güç kaynağının da birçok durumda yeterli olduğu anlaşıldı. Özellikle sürücü devrelerde fazla güç harcanmaması için sürücü katındaki transistörlerin hep doyumda ve fakat gereken süre kadar daha kısa çalışmasının daha uygun olduğu anlaşıldı. Ancak bu durumda mili saniyeler basamağında güç anahtarlarını açıp kapamadan oluşacak atma sinyalleri dolayısıyla bu kartta elektriksel gürültü sinyalleri oluşturması kaçınılmaz olduğundan bu sinyallerin sensör katında kendini göstererek algılamadaki hassasiyeti düşürdüğü anlaşıldı. O nedenle sensörden gelen sinyaller optik transistörle yükseltilerek kullanıldı. Böylece gelen elektriksel gürültü sinyalleri optik transistörde filtrelenmiş oldu.

4.2.Cihazın Prototipinin İmalatı

4.2.1. Cihazın Kasa Kısımlarının İmalatı

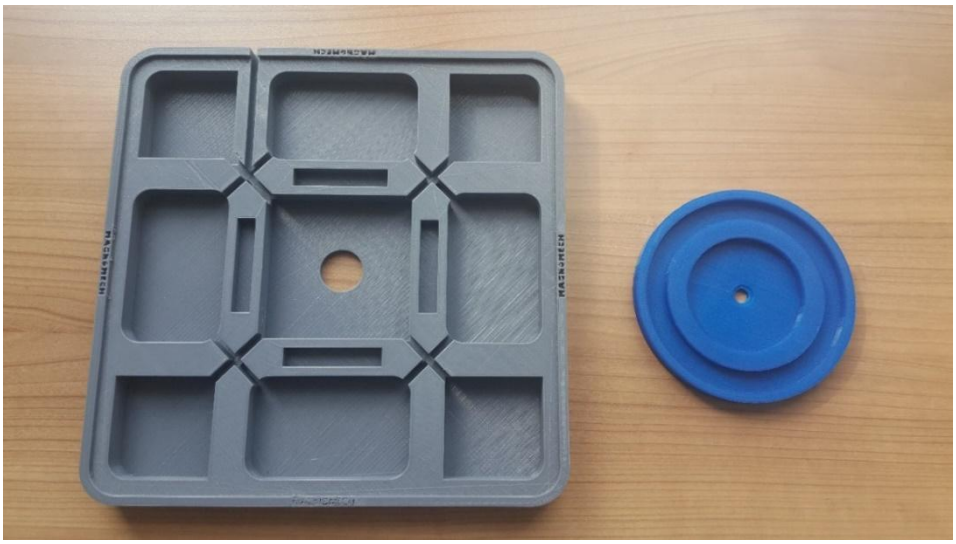
Yukarıda genişçe anlatıldığı üzere bu cihaz yerin çekim kuvvetine karşı manyetik kuvvetler kullanılarak belli ölçüde kararlı bir şekilde askıya alınmak üzere tasarlanmıştır. Halbuki bu kuvvetler mesafenin karesiyle ters orantılı olarak değiştiğinden (ters kare kuvvetleri) mesafeye çok sıkıca bağlıdır. Yani mesafedeki küçük değişimler kuvvetlerde büyük değişime neden olmakta ve o nedenle askıdaki elemanın dengeden hızla kaçmaya çalışmasına neden olmaktadır. O nedenle kuvvetlerin kaynağını oluşturan mıknatısların ve bobinlerin hesapla belirlenen yerlerine olabildiğince hassas olarak yerleştirilmesi gerekmektedir. Yani üretimin olabildiğince hassas yöntemlerle yapılması gözetilmelidir.

Yukarıda sözü edilen hassas üretim için klasik torna-tezgahlar yeterince pratik ve uygun olmayabilir. Çünkü bu tezgahlarla üretilecek parçaların geometrik şekilleri çok keyfi olarak değiştirilemez. Yani sadece tezgahın izin verdiği sınırlar içinde geometrik şekiller değiştirilebilir. Bu zorluk CNC denen tezgahlarda bir ölçüye kadar aşılabilir. Ancak bu durumda da gene tezgahın kabiliyetleri ile sınırlı kalınır. Çünkü

bu tezgahlar katı kütle malzemeleri kesip traşlayarak istenen şekilde ürün elde etmeye çalışırlar. O nedenle kesici bıçağın kesme işlemiş sırasındaki manevra kabiliyeti nihai ürünün geometrik şeklindeki keyfiliği sınırlar.

Diğer yandan 3D Printer denen üretim tezgahları katı maddeyi kesip biçmek yerine bir binayı tuğlaları üst üste dizerek inşa etmek gibi çalıştığından ürünün geometrik şekli konusunda daha fazla serbestlik sağlar. Çünkü bu tezgahlar polimer (hatta metal veya seramik) malzemeyi eriterek çok ince bir nozel içinden örülecek duvara gerektiği kadar akıtma ve neredeyse anında dondurma kabiliyetine sahiptirler. İmalatı planlanan yapı bilgisayar programları ile oluşturulur ve örme işleri bir bilgisayar üzerinden kontrol edilerek yapılır. Elde edilen ürünün yüzey pürüzlüğü nozel in çapı ile sınırlıdır. O nedenle bu yöntemle elde edilen ürünün pürüzsüslüğü de CNC de olduğu gibi çok iyi olmayabilir. Ancak gene de duruma göre pürüzlülük tolere edilebilir ve ürünün genel şekli konusunda çok daha fazla esneklik elde edilmiş olur. O nedenle bu cihazın temel kasasının ve bu kasada diğer bileşenler için hazırlanacak yuvaların yapımında 3D printer kullanıldı.

İmal edilen ürünün bazı parçaları Şekil.9.de görülmektedir. Burada taban kasası, askıya alınan parça ve içinde açılan yuva ve kablo yolları ve montaj delikleri yeterince yüksek hassasiyetle gerçekleştirildi.



Şekil 4.1: İmal edilen cihazın bazı parçalarının resimleri

4.2.2. Cihazın Sensör Tutucularının İmalatı

Daha önce de sözü edildiği gibi askıdaki elemanın yerinin hassas olarak tespit edilebilmesi için sensör sistemi geliştirildi. Bu durumda optik sensör elemanının ve optik kaynağın cihaz eksenine göre çok hassas ve yüksek bir doğrulukla yerleştirilmesi gereği ortadadır. Ayrıca sensörün aktif elemanının gerektiğinde pratik olarak değiştirilmesi de dikkate alınmalıdır. O nedenle sensörün tutucunun, bu sensör tutucuya sensör yuvasının ve tutucunun kasadaki yuvasının hassas bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bu işlem de tekrar 3D-Printer denen tezgahla yapıldı. Sensör tutucu silindirik simetriye sahip olarak yapıldı ve taban elemanının merkez eksenine eş eksenli olarak yerleştirildi. Aktif optik sensör elemanları silikon malzeme üzerine büyütülmüş ince filmlerden oluştuğundan bu elemanlar sensör tutucuya ve eksene dik olarak ve eksen etrafında simetrik olarak eşit aralıklarla dizildiler.

Böylece yukarıda askıdaki elemanın merkez eksenindeki yansıtıcılardan gelen lazer ışınları bu sensör dizisinin değişik elemanlarına değişik şiddette düştüğünden askıdaki elamanın yeri konusunda bilgi elde edilmiş oldu. Sensörler silindirik tutucunun eksenine paralel ve eksen etrafında simetrik olarak dizilmiş yuvalar açılarak yerleştirildi. Sensör elemanlarının kendi geometrik ölçüleri ile aynı ölçüde yuvalar hassas olarak işlendiği için yerlerinde sabit olarak kalabildiler. Böylece askıdaki elemanın yeri doğru olarak belirlenebildi. Ayrıca sensöre dışardan gelecek çevre ışıklarının değişken olabileceği, özellikle gece-gündüz şartlarının çok farklı olması ve aydınlanma lambalarındaki gürültü ışıklarından ötürü sensörün konum belirlemede yapacağı hataların önüne geçmek için sensör elemanları sensör tutucuda açılan deliklerin yeterince derinlerine yerleştirildi. Sensörlerin optiğe karşı kirlenerek geçirgenliğini kaybetmemeleri için bu delikler şeffaf ve silinerek temizlenebilir maddelerle kapatıldı.

4.2.3. Cihazın Optik Kaynak Tutucusunun İmalatı

Askıdaki cihazın konumunun belirlenmesinde kullanılan en önemli etki optik etkilerdir. Yani uygun optik kaynak uygun konumlara yerleştirilmelidir. Bunun için ekonomik ölçekte bir lazer diyot veya başka optik kaynaklar kullanılabilir. Yerel ışık şiddetinin yüksekliğinden ötürü daha gürültüsüz ve algılanması kolay olmasından

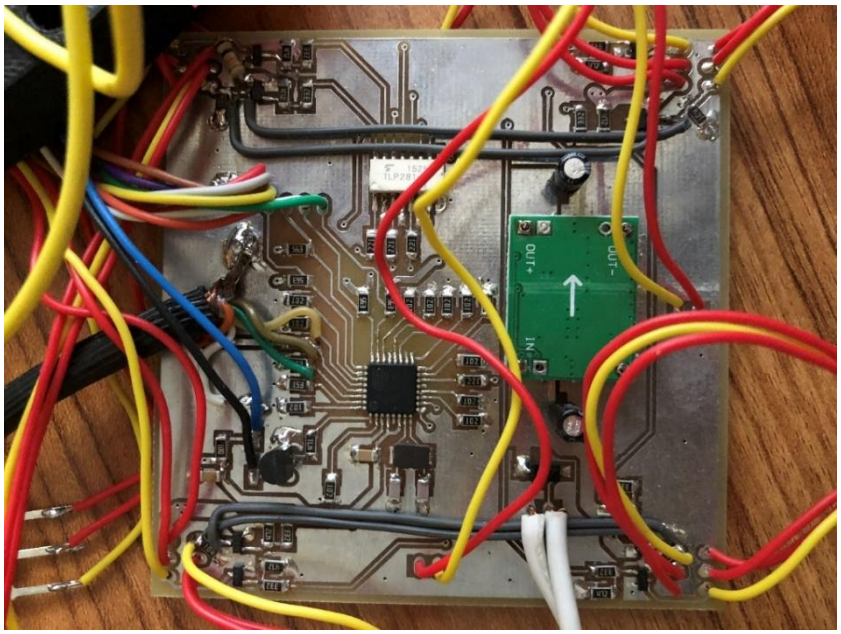
ötürü en yüksek hassasiyet için lazer büyük avantaj sağlar. Ancak ekonomik olarak diğer kaynaklara göre dezavantajı vardır. Diğer yandan LED diye anılan diğer kaynaklar da kullanılabilir. Ancak bu durumda mesafe arttıkça ışık şiddeti azaldığından arka plan optik gürültü sinyalleri daha baskın olmaya ve dolayısıyla sensörün konum seçiciliğinin belirsizleşmesine neden olabilir. Duruma göre bunlardan birisi tercih edilebilir. O nedenle optik kaynak tutucuları ve bunların yuvalarının hassas olarak açılması gerekir.

Bu iş içinde gene 3D-Printer cihazı kullanıldı. Optik kaynaklar bu tutuculara hassas olarak yerleştirildi. Değişik ölçü ve şekilde optik tutucular yapılarak en optimum parametre değerlerine ulaşılmaya çalışıldı. Optik kaynağın elektriksel beslemesi de genel besleme kaynağına bağlanarak yapıldı. Bu kaynağa uygulanan gücün gürültülü olması da bir başka problem oluşturmaktadır. O nedenle bu kaynakların olabildiğince gürültüsüz ve kaliteli olmasına dikkat edilmelidir.

4.2.4. Cihazın Elektronik Kartlarının İmalatı

Elektronik kartların ön tasarımından sonra ayrıntısı Altium Designer kullanılarak yapılıp optimize edildi. Önce ne kadar elektronik bileşen gerektiği ve bunların hangi kapasitede olması hesaplandı. Sonra bu kadar bileşen için kartın ne ölçülerde olması ve bu bileşenlerin hangi sırada yerleştirilmesi değerlendirildi. Özellikle cross talk denen etkilerden kaçınmak için bileşenleri birleştiren akım yollarının birbirlerinden yeterince uzakta olması gerektiği hesaplandı.

Ayrıca kart basan makinaların hassasiyet sınırlarına da dikkat edilerek bu yolların akım taşıma kapasiteleri ve yolların uzunluklarına da dikkat edildi. Böylece ana kasa üzerimde akım kablolarına nerelerde ve ne ölçüde yollar ve yuvalar yapılmasına karar verildi. Sonra bu programlarla çizimi elektronik (bilgisayar) ortamında yapılan kartlar ticari firmalara ürettirildi. Üretilen kartlardan birisinin resmi Şekil.10 da verilmiştir. Sonra kartlara gerekli elektronik bileşenler monte edildi. Sonra bu karlar kasa tabanındaki metal plakaya monte edildi. Bu kartın üzerindeki PBN in demontable olmasına dikkat edildi. Sonra bu taban 3D printerle imal edilen cihazın kasasına monte edildi. Gerekli elektronik kablo bağlantıları yapıldı.



Şekil 4.2: Tasarlanıp imal edilen elektronik kartlardan birisinin resmi

4.2.5. Elektrik Bobinlerin İmalatı

Bobinler tarafından uygulanacak kuvvetlerin doğru hesaplanıp uygulanabilmesi için bobinlerin çok doğru olarak tasarlanıp imal edilmesi gerekiyordu. O nedenle bilgisayar programı ile tasarlanıp optimize edilen bu bobinlerin hassas olarak imalatı için gene 3D-Printerle bu bobinlerin katı gövdeleri imal edildi. Bu arada sarım tellerinin gerekli boyutta ve hassas geometride sarılabilmesi için bobinin katı gövdesinde uygun yuvalar yapıldı. Sonra bu yuvalara kendi geliştirdiğimiz sarım makinası kullanılarak bakırdan yapılmış ticari bakır teller hesaplanan miktarda sarıldı. Sonra ardışık sarım katmanlarındaki bu teller vernikle birbirlerine yapıştırılarak sertleştirildi. İmal edilen akım bobinlerinden tipik olan birisinin resmi Şekil.11 de verilmiştir. Bu örnekte bobinler dikdörtgen biçimindedir. Ancak farklı geometrik şekle sahip bobinler de üretilebilmektedir.

Şekil 4.3: Üretilen bobinlerden tipik birisinin resmi

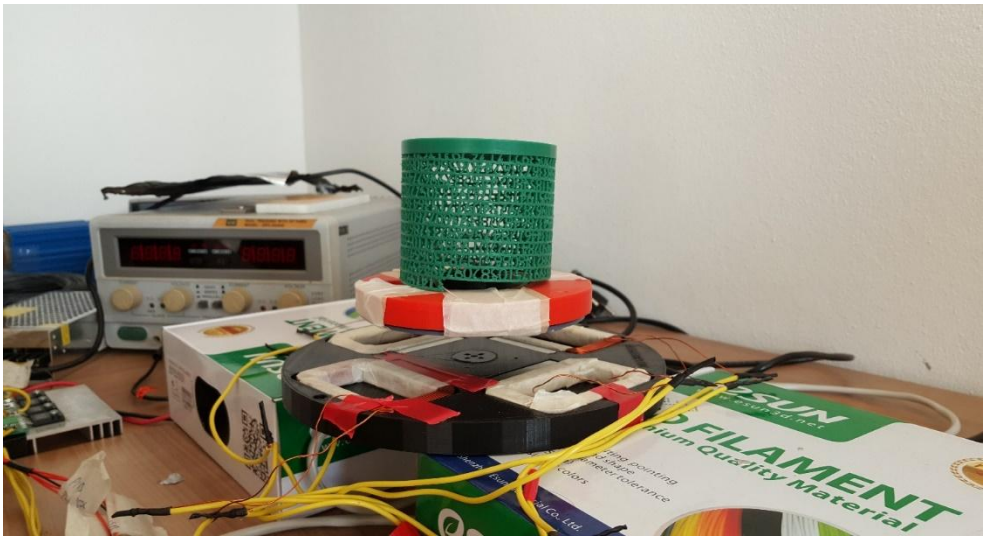
Ancak sistemi daha da iyi optimize etmenin de başka maliyetleri vardır. Çok gerekmedikçe dikdörtgen bobinlerle iktifa edilebilir. Şekildeki bobinler kendi yuvalı tutucu katı kısımları ile birlikte ana kasaya monte edilebilirdi. Ancak bu durumda bobinde oluşan ısının dışarı atılması zorlaşacaktı. O nedenle daha sonra sarım katmaları halinde sertleştirilmiş bu bobinin sarım kısmı iskeletten sıyrılarak çıkarıldı ve cihazın kasasının taban kısmında önceden açılmış yuvalarına yerleştirilerek sabitlendi. Böylece alternatif olarak uygulanan akım pulslarından kaynaklı olarak ortaya çıkacak çekme-itme kuvvetlerinden etkilenerek titreşim yapmasına karşı tedbir alındı.

4.2.6 Cihaz Bileşenlerinin Montajı

Cihaz bileşenlerinin montajı da önemli zorluklar içermektedir. Özellikle manyetik açıdan güçlü olan mıknatısların bir araya getirilerek monte edilmelerinde büyük zorluklar yaşanmıştır. Çünkü birbirlerini itip-çekmekte olan bu mıknatısların el gücü ile kontrolü problemlidir ve istenmeyen kazalara da neden olabilmektedir. O nedenle ilk aşamada daha küçük cihaz tasarlayıp imal etme gereği ortaya çıkmıştır. Bu bir zorunluluktu, çünkü büyük cihazlar daha büyük mıknatıslara gerek

duyurmakta ve bu mıknatısları diğer mıknatısların yanında uygun konumlara elle yerleştirmek mümkün olmamaktadır.

Hatta küçük cihaz bile olsa çok sayıda mıknatısı bir araya getirip kendi konumlarına sabitleyebilmek için bazı ön tedbirler alınarak mıknatıs yuvalarına mıknatısların hangi yöntemle yerleştirilecekleri de baştan değerlendirilerek gerekli ek yollar ve yuvalar ve koruyucu kapaklar da yapıldı. Böylece mıknatıslar önceden belirlenen sıralarda birbiri ardınca kendi yuvalarına yerleştirildi ve sabitlendi. Gerektiğinde sistemin nasıl demonte edilmesi gerektiği de önceden değerlendirildi. Bu arada ticari olarak satın alınan mıknatısların manyetik açıdan homojen ve özdeş olmaları da cihaz açısından çok önemlidir. O nedenle tüm mıknatıslar baştan tekrar gerekli ölçümlerle karakterize edilmeli ve uygun olmayanlar ayıklanmalıdır. Böylece cihazın doğru çalışmasında problem çıkaracak bileşenler ta baştan tesbit edilerek ayıklanmış olur. Ayrıca sonradan cihazın testi sırasında cihazın dengeye getirilememesi arasındaki sebeplerden önemli olan birisi belirlenmiş olur. Tüm elemanların monte edilmiş haliyle geliştirilerek imal edilen prototip cihaza örnek Şekil.4.4 te görülmektedir. Ayrıca bu cihaz çalışırken çekilmiş olan videolara https://youtu.be/GkVIQQgjuOA , https://youtu.be/FzfDEttqqqM adreslerinden ulaşılabilir.

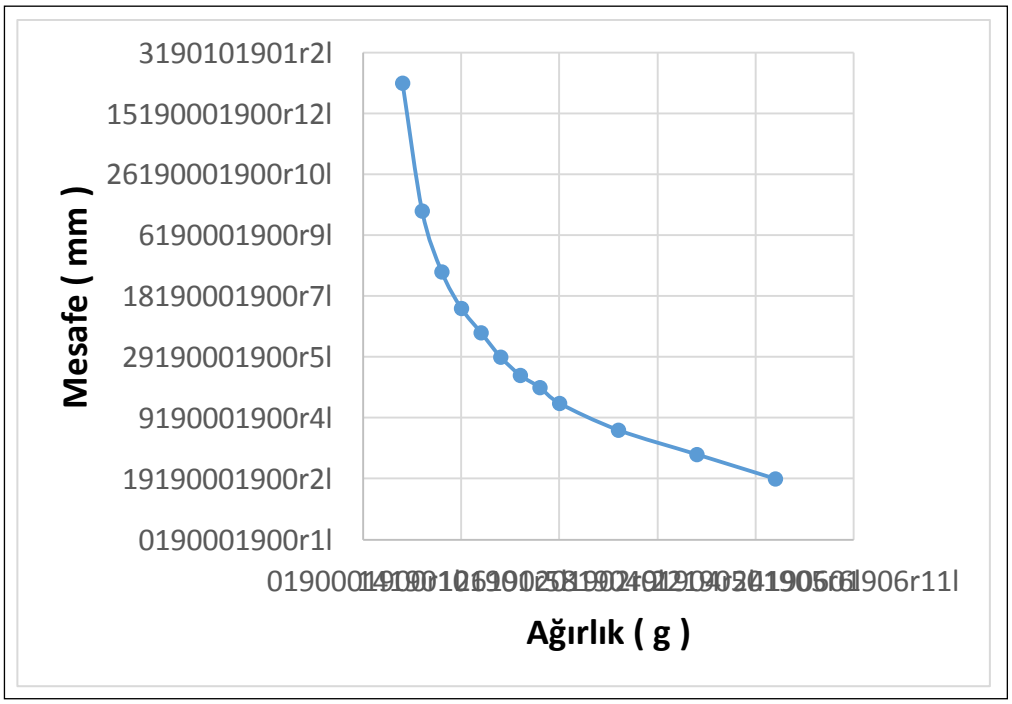


Şekil 4.4 Montajı yapılmış cihazın genel görünümü

5.DENEYSEL ÖLÇÜMLER

5.1. Cihazın Kaldırma Kuvvetinin Yükseklikle Değişimi

Önce imal edilen cihazın tabandaki mıknatıslarının birbirlerini itme ve çekme kuvvetleri ölçüldü. Sonra bu kuvvetlerin mıknatısların birbirlerine göre uzaklıkları ile nasıl değiştiği incelendi. Daha sonra yüzen elemana yerleştirilen mıknatısların birbirleri ile olan etkileşim kuvvetleri ayrıntılı olarak araştırıldı ve değişik mesafelerde kuvvetler ölçüldü. Böylece imal edilen taşıyı manyetik taban ile üzerinde askıya alınacak eleman arasındaki etkileşme, yani kaldırma kuvvetleri ayrıntılı olarak araştırıldı. Ayrıca askıya alınan elemanın ne kadar yükü ne kadar yüksekliğe kaldırabileceği ölçülerek cihazın spektleri oluşturuldu. Şekil 13 den de görülebileceği gibi, yapılan prototip cihaz ile iki kilo-gram ağırlığındaki cisimlerin bile yüzdürülebileceği anlaşıldı. Ancak taşınacak yük büyüdükçe uçan bileşenin tabana olan mesafesinin giderek küçüldüğü ve ağırlık daha da artırıldığında sistemin yatay düzlemdeki dengesinin de zorlaştığı görüldü.



Şekil 5.1: Ağırlığa göre mesafenin değişimi

5.2. Manyetik Bobinlerle Mıknatıslar Arasındaki Etkileşme Kuvvetinin Yükseklikle Değişimi

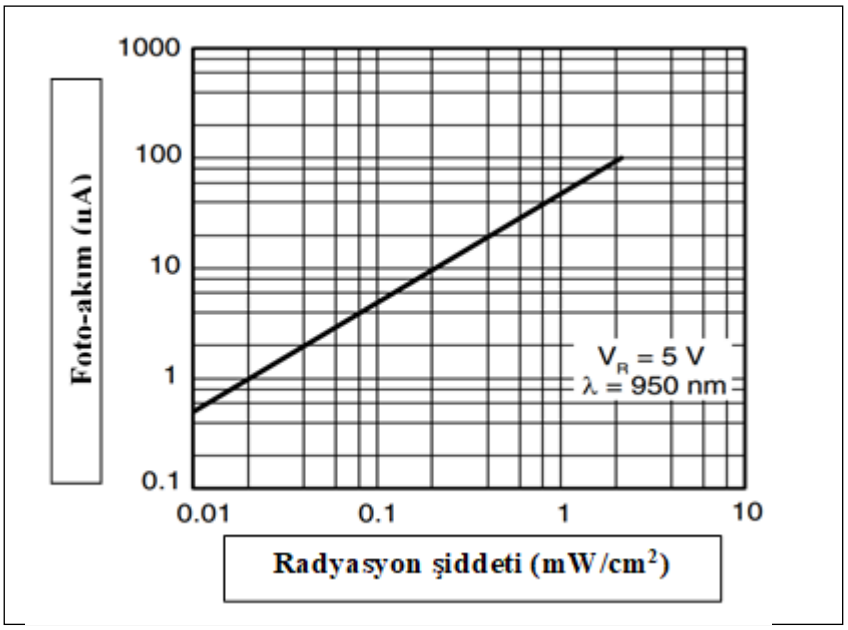
Yukarıda sözü edildiği gibi dengeden kaçmaya çalışan askıdaki elemanı tekrar denge noktasına geri çekmek için elektrik bobinlerine uygulanan elektrik akımının oluşturduğu manyetik alanın bu mıknatıslara uygulayacağı kuvvetlerden yararlanılmıştır. Bu kuvvetlerin bobinler olan uzaklık ve bobinlere uygulanan akım şiddeti ile nasıl değiştiği ölçülerek hangi durumda ne kadar akıma gerek olduğu tesbit edilmiştir. Tipik bir durum olarak 100 sarımlık bobinler kullanıldığında 1 kg ağırlık yüklendiğinde yaklaşık olarak 2 amperlik akımın dengeyi sağlamak için yeterli olduğu, askıdaki elemana bir yük konulmadığında taban ile mesafesinin yaklaşık 35 mm olduğu ve bu yükseklikte denge sağlamak için yaklaşık olarak 0.5 amperlik bir akımın yeterli olduğu görüldü. Yani taşınacak yüke göre mesafe değiştiğinden bobinlere uygulanacak akım da otomatikman değişmektedir. Bu akımım şiddetine sistem kendisi hesaplayarak karar vermektedir.

5.3. Optik Sensör eleman Dizisinde Oluşan Elektrik Sinyallerinin Belirlenmesi

Yukarıda da bahsedildiği gibi manyetik kuvvet altındaki cisimler için gerçek statik kararlı denge mümkün değildir. O nedenle cismin kararsız denge noktası bulunup bu noktadan ne kadar saptığının tesbiti ve cismi tekrar denge konumuna çekmek için ne kadar kuvvet uygulanması gerektiğine karar verilmesi gerekmektedir. Bu cihaz için cismin konumu optik sensörde oluşacak ve konumun fonksiyonu olarak şiddeti değişen elektrik sinyaller ile belirlenir. Bu sinyallerin hangi sensörde hangi şiddette oluştuğu ve çevre ışığının ne kadar etkin olduğu gibi problemlerin çok iyi analiz edilmesi gerekir. Ayrıca optik sinyal şiddeti ile uygulanması gereken kuvvet ve dolayısıyla bobinlere uygulanması gereken elektrik akım şiddetleri arasındaki kalibrasyon da yapılmalıdır. Yani optik sensörde oluşan elektrik potansiyel ve bununla beslenen transistörlerde oluşan sinyaller ölçülerek kalibrasyon değerleri gerekmektedir.

O nedenle kullanılan sensörün tüm fiziksel özellikleri iyi tanımlanarak uygun sensör seçimi gerekmiştir. Bu durum dikkate alınarak, tüm firmaların kendi geliştirdikleri sensörleri hakkında verdikleri fiziksel özellikler araştırılıp en uygun

sensör olarak foto-akımı Şekil 14 de verilen Osram Firmasının ürettiği BPW 34 sensörü belirlenmiştir.



Şekil 5.2: Kullanılan sensörün foto akımının gelen ışık şiddeti ile değişimi

5.4.Kontrol Sinyalinin Frekanslarının Belirlenmesi

Statik denge olmadığı için bu iş o anki duruma göre ilgili bobinlere uygulanacak akımla sağlanmıştır. Ancak bobinlerin sürekli olarak güç süren devrenin ısınmaması için sürücü transistörlerin hep doyumda tutulması ve görev sürelerinin olabildiğince kısa tutulması planlanmıştır. Yani sürekli olarak zayıf akım uygulamak yerine çok daha kısa süreli olmak şartıyla yüksek akım (transistörler doyumda) sürmek gerekmektedir. Ancak bu durumda akım pulslarının sıklığı nedeniyle yükselecek empedans bobinlere yüksek akım sürmeyi engelleyebilmektedir. O nedenle bobinlerin frekansa bağlı empedanslarının hesaplanması ve alternatif akım-gerilim özelliklerinin iyi değerlendirilmesi gerekmiştir. O nedenle bobinlerin empedanslarının frekans bağımlılıkları ölçülerek uygun frekanslar tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan ölçümlere göre yaklaşık 1 kHz değerinde frekansa sahip bir sinyalin kontrol sinyali olarak kullanılabileceği görüldü.

5.5.Askıdaki Elemanın Öz Titreşim Frekanslarının Belirlenmesi

Askıdaki elemanın hem öteleme ve hem de dönme titreşim frekanslarının da belirlenmesi gerekmektedir. Böylece uygun sıklıkla bobinlere dengeye çağırıcı akımlarının uygulanması mümkün olabilir. Bilindiği gibi bu frekanslar için askıdaki cismin hem kütlesi ve hem de dönme eylemsizlik momentinin bulunması gerekir. Kütle tartılarak bulunurken dönme eylemsizlik momentinin ölçümü biraz daha zordur. Gene de cisim silindirik simetriye sahip olduğundan hesaplamalar yapılarak bu büyüklük tespit edilebilmiştir.

Titreşim frekansları bir yandan askıdaki cismin özelliklerine bağlı ilen diğer yandan cisme etkiyen kuvvetlerin özellikleri ile de ilgilidir. Yukarıda sözü edildiği gibi cismin kararlı dengesi olmaması serbest bırakıldığında titreşim hareketi yapamayacağı ve sürekli olarak öteleme hareketi sergileyeceği açıktır. O nedenle cismin dengesi ac kuvvetlerle sağlanmaktadır. Bu durumda da gene cismin titreşim hızı ve genliği ile bobine uygulanan akım şiddeti arasındaki ilişki tespit edilmelidir. Bunun için bir seri deneyler yapılmış ve askıdaki cismin titreşim parametreleri bulunmaya çalışılmıştır.

Bunun için cismin hareketi kamera ile kaydedilerek kamera kayıtlarından ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlere göre askıdaki boş elemanın düşey titreşim frekansının yaklaşık olarak 3.5 Hz olduğu bulunmuştur. Ancak elektromanyetik kuvvetler ters kare kuvveti tabiatındadır. Yani basit bir harmonik hareket söz konusu olmadığından titreşim frekansı ile kütle arasında basit bir ilişki yoktur. Çünkü titreşim frekansı hem kütleye, hem titreşim genliğine ve hem de mesafeye bağlıdır. O nedenle bu büyüklükler arasında basit ilişki verecek grafikler oluşturulamamıştır. Her kütle için kullanıcı kendi ölçüm yapmak zorundadır.

Diğer yandan askıdaki elemanın yatay titreşim frekansı sanaldır. Yani pasif elemanın gerçek bir titreşim frekansı yoktur. O nedenle elektronik devre kontrol sinyali uygulamakta ve bu sinyalin osilasyonu askıdaki boş elemanı yatay düzlemde yaklaşık olarak 12 Hz lik bir frekansla titreştirmektedir. Ancak bu titreşim genliği giderek artmakta ve sonunda sistem dengeden çıkmaktadır. O nedenle titreşim genliğini düşürmek üzere söndürücü etki yapan bir sinyal bileşeni daha eklenmiştir.

6.SONUÇ VE YORUMLAR

Yukarıda ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, bu tez çalışması ile manyetik askıya alma cihazı teorik olarak tasarlanarak sonrasında ise fiziksel olarak yapımı gerçekleştirilmiştir. Cihaz manyetik kuvvetlere dayalı olarak çalışmaktadır. Manyetik kuvvetler oda sıcaklığında çalışabilen mıknatıs ve elektrik akımları ile üretilmektedir.

Manyetik olarak askıya alınan cihaz bileşeni için statik ve kararlı denge noktası yoktur. Bu durum cihaz tasarım tekniklerinden kaynaklanmamaktadır. Bu durum fiziğin temel yasalarının değiştirilemez bir sonucudur. Elektriksel ve manyetik kuvvetler için potansiyel enerjinin minimum noktası yoktur. Çünkü bu kuvvetler ters kare kuvvetleridir. Ters kare kuvvetlerinde ise kuvvetlerin diverjansları her zaman sıfırdır.

Yani uzayda hiçbir noktada bu kuvvetlerin etkisindeki cismi potansiyel enerjinin sıfır olduğu denge noktasına geri çağırıcı kuvvet yoktur. Geri çağırıcı kuvvet sadece kuvvet kaynağı olan yükün bulunduğu noktadır. Hâlbuki bu noktaya diğer cisim çekilince iki cisim birbirlerine yapışacaklarından havada askıya alma işlemi imkansızlaşmaktadır. O nedenle bu problemi aşmak için dinamik dengeye alma şartları araştırılarak manyetik askı gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Statik manyetik kuvvetler NdFeB magnetitleri ile sağlanmıştır. Yani bu sistemde manyetik levitasyon için süper iletkenlere gerek kalmamaktadır. Süper iletkenlerde kararlı durum kuvvetlerin doğası gereği her konumda mümkün olduğundan bu yapılarla levitasyon teknik açıdan çok kolaydır ve özel tasarımlar gerektirmez.

Halbuki klasik mıknatıslarda bu durum(statik kararlı denge) mümkün değildir. O nedenle klasik magnetlerle levitasyon işlemi teknik olarak çok zordur. Ancak klasik magnetikler kullanmanın bazı avantajları da vardır. Bunlardan birincisi daha güçlü kuvvetlere ulaşabilmek gibi teknik avantajıdır. Diğeri de çok pahalı bir işlem olan süper iletkenlerin gerektirdiği çok düşük sıcaklıklara kadar sürekli soğutma zorunluluğundan ekonomik olarak kurtulmuş olmaktır.

O nedenle bu tez çalışmasında süper iletkenlere gerek duymayan bir teknik araştırılmış, geliştirilmiş ve bu tekniğe dayalı cihaz ilk olarak ülkemizde gerçekleştirilmiştir.

Cihaz düşey eksen etrafında bir simetriye sahiptir. Yani hem mekanik yükler ve hem de dengeleme kuvvet kaynakları simetri ekseni etrafında yani eksenel bir simetriye sahip olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Cihaz eksenel simetriye sahip olmakla birlikte mıknatısların kendileri silindirik simetriye sahip değillerdir. Yani dikdörtgen biçiminde kesit alanına sahip çubuk mıknatıslar simetri ekseni etrafında belli açı aralıkları ile dizilerek toplamda cihazın kendisine eksenel bir simetri kazandırılmıştır.

Bu simetrik dizilim hem tabandaki destek ünitesinde ve hem de askıya alınan elemanda uygulanmıştır. Kaldırma kuvvetleri, her iki birimde farklı ölçülerde kullanılmış olsa bile, her bir mıknatısın cinsi (kimyasal yapısı), geometrik ölçüleri (kalınlık ve boyları), mıknatıs sayıları ile yaklaşık olarak doğru orantılı iken, askıdaki elamanın tabandan yüksekliği ile ters orantılıdır. Ancak kuvvetin yukarıda sözü edilen parametrik bağımlılıkları için analitik bir ifade vermek kolay değildir. O nedenle bu kuvvetler sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayarda hesaplanabilmiştir.

Sonuç olarak, bu proje ile çok yüksek manyetik kuvvetler üretebilen klasik kalıcı mıknatıslar yanında oldukça zayıf ta olsa elektrik akımı ile değişebilen kuvvetler uygulayarak manyetik cisimlerin yüzdürülebilmesi büyük bir başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Yüzdürülebilecek cismin ağırlığı için teorik olarak fiziksel bir sınır olmamakla birlikte pratikte oldukça zorlu sınırlamalar vardır. Ağırlık arttıkça kullanılacak mıknatısların büyüklüğü yanında uygulanacak akım şiddetlerinin de çok yüksek değerlere çıkması gerekir. Halbuki yüksek akım için sınır olmasa bile taşıyıcı kabloların dirençleri dolayısıyla ısınarak yanması kaçınılmazdır. O nedenle pratikte bu tür cihazların fiziksel boyutlarında her zaman aşılmaz sınırlamalar olacaktır.

Bu tez ile klasik mıknatıslarla sadece manyetik askıya alma hedeflenmiş olmakla birlikte düşey eksene göre simetrik olan taban taşıyıcının desteği ile yüzmekte olan silindirik simetriye sahip cismin döndürülebileceği de anlaşılmıştır. Ancak dönme işlemi sürekli değildir. Çünkü yüzen cisme verilen ilk dönme hareketi hava ile olan sürtünme etkilerinden ötürü zamanla sönüme yüz tutmakta ve sonunda durmaktadır. Yani dönme hareketinin sürekliliği, hızı ve hatta modu için dışardan ve uzaktan sürücü kuvvet uygulamak gerekmektedir.

Bu kuvvetin de manyetik olabileceği anlaşılmıştır. Manyetik askıya alma işlemine göre çok daha zor olacağı anlaşılsa da çalışmamızın daha sonraki evrelerinde bu işlemi gerçekleştirmeyi planlamaktayız.

KAYNAKLAR

[1] Hull, J., R., (2000) "Superconducting Bearings, Superconductor Science Technology" 13, R1R5.

[2] Perini, E. and Giunchi, G., (2009) "Field cooling of a MgB2 cylinder around a Permanent magnet stackprototype for superconductive magnetic bearing, Superconductor Science Technology" 22, 04502.

[3] S. Sivrioglu, Y. Cinar, (2007) "Levitation Analysis of a Ring Shaped Permanent Magnet High Temperature Superconductor Vertical Bearing System, Superconductor Science Technology" 20, 559 563.

[4] T. Van Duzer, C.W., (1981 Elsevier) "Turner Principles of Superconductive Devices Circuits"

[5] Yang, W., M., Zhou, L., Feng, Y., Zhang, P., X., Zhang, C., P., Nicolsky, R.AndradeJr, R., (2002) "The Effect of Different Field Cooling Processes on The Levitation Force Attractive Force of SingleDomain YBa2Cu3O7 x Bulk, Superconductor Science Technology" 15, 14101414.

[6] Jing, H., Wang, S., Jiang, M. and Wang, J., (2010) "Levitation Performance of Bulk High Temperature Superconductor Above The Permanent Magnet Guideway at Different Temperatures, Journal of Superconductivity Novel Magnetism" 23, 14551459.

[7] Ren, Z., Wang, J., Wang, S., Jiang, H., Zhu, M., Wang, X. Shen, X., (2002) A Hybrid Maglev Vehicle Using Permanent Magnets High Temperature Superconductor Bulks, Physica C, 378381, 873 876.

[8] Zeisberger, M., Gawalek, W., Giunchi, G., (2005) "Magnetic levitation using magnesium diboride, Journal of Appl. Phys." 98, 023905 14.

[9] Liu, L., Wang, J., Wang, S., Wang, L. and Li, J., (2009) Flux Concentrator Optimization of PMG for HighTemperature Superconducting Maglev Vehicle System, Journal of Low Temperature Physics, 157,6772.

[10] John Wiley Sons Inc. (1975) Classical Electrodynamics; John David Jackson.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Can AKTAŞ 1991 yılında Ankara'da doğdu. 2009 yılında başladığı Gebze Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nü 2014 yılında başarıyla tamamladı. 2015 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda başladı. Mezun olduktan hemen sonra, özel sektörde Cleanroom kurulumu yapan bir firmada Fizik Uzmanı olarak çalışan Ali Can AKTAŞ 2015'in ilk 6 ayında Tübitak 1001 projelerinde çalıştı. Akabinde Bilim Teknoloji ve Sanayi Bakanlığına Teknogirişim adı altında bir proje veren Ali Can AKTAŞ, 100.000 TL'lik Hibe almaya ve bu hibe ile bir şirket kurmaya hak kazandı. Bununla birlikte KOSGEB projesinde desteklenen Ali Can AKTAŞ'ın, şu anda firması aktif olarak çalışmaya devam etmektedir. Kendisi ise çeşitli firmalarda uzman ve yönetici olarak görev alıp tecrübelerini arttırmaktadır.