T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

ARAÇ KORNA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BİR ELEKTROMIKNATISIN TASARIMI VE ANALİZİ

Nurhan YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

ARAÇ KORNA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BİR ELEKTROMIKNATISIN TASARIMI VE ANALİZİ

Nurhan YILDIRIM

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARAÇ KORNA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BİR ELEKTROMIKNATISIN TASARIMI VE ANALİZİ

Nurhan YILDIRIM
0009-0000-0313-1979

Doç. Dr. Gürsel ŞEFKAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2025

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ARAÇ KORNA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BİR ELEKTROMIKNATISIN TASARIMI VE ANALİZİ

Nurhan YILDIRIM

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gürsel ŞEFKAT

Bu tez çalışmasında elektromekanik korna tasarımı yapılarak kornanın çıkaracağı ses basınç seviyesi ön görülmeye çalışılmış ve prototip üzerinde test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk aşamasında bobinin oluşturduğu manyetik alan analizi sonlu elemanlar programı olan ANSYS/Maxwell ile yapılmıştır. Diyafram kısmının analizi için modal analiz yapılarak diyaframın doğal frekansları belirlenmiştir. Ardından frekans cevap analizi ile dış etki sinüs dalga formunda korna içindeki frekansı simüle ederek diyaframda oluşan rezonans frekansı elde edilmiştir. Düşük frekanslarda sistemin daha kararlı bir yanıt verdiği, rezonans frekanslarında ise genliklerin hızlıca arttığı tespit edilmiştir. Tüm bu analizler harmonik akustik analizin temellerini oluşturmuştur. Oluşan manyetik kuvvetin diyaframa olan etkisi ve diyaframın çıkaracağı ses seviyesi harmonik akustik analiz yapılarak tayin edilmiştir. Prototip üretimi yapılarak analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Analiz ve prototip sonuçları benzer sonuçlar vermiştir. Böylelikle tasarım aşamasında kornanın analizi yapılarak tasarımın doğruluğu teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromekanik korna, ses basınç seviyesi, manyetik alan analizi, harmonik akustik analiz
2025, xii+41 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND ANALYSIS OF AN ELECTROMAGNET USED IN VEHICLE HORN SYSTEMS

Nurhan YILDIRIM

Bursa Uludağ University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Mechanical Engineering**,**
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gürsel ŞEFKAT

This thesis study has been carried out in a way that prevents the sound pressure levels that the horn will produce in the electromechanical horn design and the test results on the prototype have been compared. In the first stage, the magnetic field analysis in which the coil is created has been obtained using the ANSYS/Maxwell finite element program. The natural frequencies of the modal analysis distribution have been determined for the analysis of the diaphragm sections. In addition, the resonance sections formed in the diaphragm have been obtained by simulating the horn Integrity in the form of external effects sine waves with the harmonic response system. It has been determined that the system gives a more stable response at low frequencies, and the amplitudes increase rapidly at resonance frequencies. All these analyzes have formed the basis of harmonic acoustic analysis. The effect of the magnetic force on the diaphragm and the sound level that the diaphragm will produce can be adjusted with harmonic acoustic analysis. The prototype production results and analysis results have been compared. The analysis and prototype results give similar results. In addition, it has been confirmed that the analysis of the horn has been performed at the design stage.

Key words: Electromechanical horn, sound pressure level, magnetic field analysis, harmonic acoustic analysis

2025, xii+41 page.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı yöneterek gerçekleştirilmesinde büyük katkı sağlayan ve her türlü yardımı ile çalışmayı destekleyen, ayrıca bilgi ve tecrübelerini her zaman paylaşan değerli danışman hocam Doç. Dr. Gürsel Şefkat'e teşekkür ederim.

Beni ANSYS Harmonik Analiz metodu ile tanıştıran ve analiz için her türlü desteği sağlayarak bana yardımcı olan kıymetli hocam Arş. Gör. Mert Ali Özel'e teşekkür ederim.

Yüksek Lisans ders sürecimde desteklerinden dolayı değerli hocam Prof. Dr. Elif Erzan Topçu'ya teşekkür ederim.

Sevgisi ve desteğiyle her zaman yanımda olan çok değerli sevgili eşim Mesut Yıldırım'a ve canımdan çok sevdiğim biricik oğlum Eymen'e teşekkür ederim.

Büyük emeklerle ve fedakarlıklarla beni yetiştiren ve bugünlere getiren çok sevdiğim annem Meryem Düzen'e ve canım kardeşim Ferhan Düzen'e teşekkür ederim.

Katkılarından dolayı Seger A.Ş'ye teşekkür ederim.

Nurhan YILDIRIM
17/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....vi
ABSTRACT.....vii
TEŞEKKÜR viii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....xi
ŞEKİLLER DİZİNİ…….....xii
ÇİZELGELER DİZİNİ……..…xiii
1.GİRİŞ.....1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI...……..……...…2
3. METARYAL VE METOD ……7
3.1.Elektromekanik Korna ……7
3.2. Elektromanyetik Alan Kavramı ……..9
3.3. Maxwell Denklemleri ……...10
3.3.1. Faraday kanunu ……..10
3.3.2 Manyetizma için gauss kanunu ……...10
3.3.3. Ampere kanunu……...11
3.3.4. Elektrik için gauss kanunu ……11
3.4. Elektromekanik Kornanın Manyetik Sistem Analizi ……11
3.4.1.Manyetik Alan Hesaplamaları için Ansys Maxwell Uygulaması …14
3.5. ANSYS Workbench Ortamında Modal–Harmonik–Akustik ……..……14
3.5.1. Modal Analiz ……15
3.5.2. Frekans cevabı Analizi (Harmonic response) ……...15
3.5.3. Akustik Analiz (Harmonic Acoustics) ……16
3.6. Akustik Test İşlemleri ……...16
3.7. Elektromekanik Korna Mekanizmasının Matematik Modeli ……18
3.8. Elektromekanik Kornanın Elektriksel Alt Sistemi ……18
4.BULGULAR ……18
4.1 Sınır Koşullarının Belirlenmesi ……22
4.2. ANSYS Workbench Ortamında Modal–Harmonik–Akustik Analiz AdımlarınınAçıklaması..……..27
4.2.1. Modal Analiz ……27
4.2.2. Frekans cevabı (Harmonic Response) Analizi ……..31
4.2.3. Harmonik Akustik Analizi ……33
4.3. Prototip ve Test Aşaması ……...37
5. TARTIŞMA VE SONUÇ ……39
KAYNAKLAR ……40
ÖZGEÇMİŞ ……42

SİMGELER DİZİNİ

A	: Mıknatıs devresinin etkin kesit alanı	[m^2]
A_b	: Bobin telinin kesit alanı	[m^2]
b	: Sürtünme katsayısı	[N/(m/s)]
B_b	: Kutup çekirdeğinin akı yoğunluğu	[Wb/m^2]
B_d	: Hareketli elemanın akı yoğunluğu	[Wb/m^2]
B_h	: Hava aralığındaki akı yoğunluğu	[Wb/m^2]
dB(A)	: Ses basınç seviyesi	[dB(A)]
e, e_c, e_t	: Gerilim	[V]
f	: Boşluk faktörü	[-]
F_m	: Net mıknatıs çekim kuvveti	[N]
G	: Mıknatıs iletkenliği	[-]
H	: Mıknatıs alan şiddeti	[A-s/m]
i, i_c, i_t	: Akım	[A]
L	: Elektrik alt sisteminin indüktansı	[H]
l	: Hava aralığı mesafesi	[m]
ltb	: Bobin telinin uzunluğu	[m]
lt	: Toplam hava aralığı mesafesi	[m]
m	: Toplam hareketli kütle	[kg]
N	: Bobin sarım sayısı	[-]
NI, F_a	: Magnetomotor kuvveti	[A-s]
P_a	: Hareketli eleman boyunca toplam etkili geçirgenlik	[Wb/(A-s)]
P_f	: Kutup geçirgenliği	[Wb/(A-s)]
P_{fd}	: Dış kutup geçirgenliği	[Wb/(A-s)]
P_{fi}	: İç kutup geçirgenliği	[Wb/(A-s)]
P_l	: Kutup çekirdekleri arasındaki kayıp geçirgenlik	[Wb/(A-s)]
P_u	: Toplam kullanılır aralığın geçirgenliği	[Wb/(A-s)]
P_{uh}	: Kullanılır aralığın geçirgenliği	[Wb/(A-s)]
r_0,r_1,r_2,r_3	: Mıknatıs devresinin geometrik boyutları	[m]
r_4,r_5,r_6	: Mıknatıs devresinin geometrik boyutları	[m]
R	: Bobin direnci	[Ω]
R_m	: Mıknatıs direnci	[(A-s)/Wb]
T	: Harmonik salınım hareketinin periyodu	[s]
x	: Hareketli elemanın yer değiştirmesi	[m]
x_h	: Hareketli elemanın hareket mesafesi	[m]
x_t	: Tutma aralığı mesafesi	[m]
z	: Hava aralığı sayısı	[-]
ρ	: Bobin teli özgül direnci	[$\Omega m^2/mm$]
τ	: Elektrik alt sisteminin zaman sabiti	[s]
ωn	: Doğal frekans	[rad/s]
μo	: Havanın geçirgenliği	[H/m]

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 3.1.	Elektromekanik korna mekanizması	9
Şekil 3.2.	Elektrik Alan Çizgileri	10
Şekil 3.3.	Düz yüzlü piston tipi mıknatıs devresinde geçirgenlik yolları	12
Şekil 3.4	ANSYS Workbench arayüz görüntüsü Modal–Harmonik–Akustik	15
Şekil 3.5.	Test Odası Korna Bağlantı Şeması	17
Şekil.3.6.	Elektromekanik korna alt sistemleri	18
Şekil 3.7.	Elektrik alt sistemi	18
Şekil 4.1.	Maxwell programı 2D tasarım	21
Şekil 4.2.	Malzeme seçimi	22
Şekil 4.3.	Hareket Bandının Tanımlanması	22
Şekil 4.4.	Bobin tanımlanması	23
Şekil 4.5.	Analiz için mesh tanımlanması	24
Şekil 4.6.	Ağ haritası	24
Şekil 4.7.	Çözüm ayarları	25
Şekil 4.8.	Validasyon doğrulaması	25
Şekil 4.9.	Manyetik akı yoğunluğu	26
Şekil 4.10.	Manyetik alan çizgileri	26
Şekil 4.11.	Kuvvetin zamana bağlı değişimi	27
Şekil 4.12.	Diyaframın Zamana Bağlı Hareket Hız Eğrisi	27
Şekil 4.13.	Diyaframın modele aktarılması	28
Şekil 4.14.	Malzeme Özellikleri	28
Şekil 4.15.	Mesh ayarları	29
Şekil 4.16.	Diyafram Mesh Ağ Yapısı	29
Şekil 4.17.	Sabitleme yüzeyinin belirlenmesi	30
Şekil 4.18.	Parçanın doğal frekansı	30
Şekil 4.19.	Doğal Frekanslar ve Total Deformasyon	31
Şekil 4.20.	Harmonik Analiz Ayarları	32
Şekil 4.21.	Rezonans Frekansı	33
Şekil 4.22.	Harmonik analizde yüzeyin tanımlanması	34
Şekil 4.23.	Harmonik analizde ikinci yüzeyin tanımlanması	34
Şekil 4.24.	Harmonik analiz sonuçları	35
Şekil 4.25.	Korna test ekipmanları	36
Şekil 4.26.	Korna akustik test sonuçları	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Akustik Test Sonuçları 36

1. GİRİŞ

Araç kornası otomobiller, tramvaylar ve trenler gibi çeşitli araçlara monte edilebilen ses üreten elektromanyetik bir cihazdır. Kornanın amacı, diğerlerine bir aracın varlığını veya yaklaşmakta olduğunu bildirmek veya çarpışma tehlikesine dikkat çekmek için kullanılır. Araçların korna bulundurması yasal olarak zorunlu kılınmıştır (Sim, Kim et al. 2017).

Araç kornalarının çalışma prensibi, içlerinde bulunan kontağının açılıp kapanmasıyla bobin sürülmesine dayanır. Bu anahtarlama durumu, bobinden geçen akımın oluşturduğu manyetik alanın korna içindeki diyaframın salınımını başlatarak ses üretimini sağlar (Setrekli, Koral et al.).

Elektromanyetik korna, istenen etkiyi oluşturmak için etkileşime giren farklı fiziksel yasalarının bir araya geldiği çoklu fizik sistemidir. Mekanik sistem titreşim sistemi, esnek bir diyafram üzerine monte edilmiş bir kütleden (hareketli pim) ve kontak grubundan oluşur. Elektromanyetik sistem, titreşim sistemini uyarmak için kullanılan bir bobin ve sabit bir çekirdekten oluşur. Titreşim sistemi ve elektromanyetik sistem, korna motorunu oluşturur ve bu iki sistem kontaklar aracılığıyla etkileşime girer. Son olarak, titreşimlerin mekanik enerjisini akustik enerjiye dönüştürmeyi amaçlayan bir akustik sistem vardır. Bu sistem iki farklı tipte olabilir. İlk sistem, bir salyangoz kornasından oluşur; bu durumda ses, diyafram tarafından yayılır ve salyangoz korna tarafından güçlendirilir. İkinci sistem ise sesin metal bir disk ile yayılmasıdır; hareketli pim sabit pim hareketinde, disk periyodik bir kuvvetle uyarılır, titreşir ve ses yayar (Medè, Doria et al. 2019).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektromanyetik teorinin endüstriyel ürünlerde kullanım alanları ile ilgili birçok akademik çalışma mevcuttur. Bunlarda bazılarından bahsetmek gerekir.

Yüksel (1981), disk tipli mıknatıs devresinde tek ve çift bobinli anahtarlama valfleri üzerine yaptığı çalışmada, valfleri teorik ve deneysel inceleyerek mıknatıs devrelerini incelemiştir (Yuksel 1981).

Şefkat (2000) disk tipi mıknatıs devreleriyle ilgili yaptığı çalışmasında, mıknatıs devrelerini inceleyerek bu devreler ile oluşan elektromekanik sistem tasarımını araştırmış ve sistem optimizasyonunu sağlamaya çalışmıştır. Sistem tasarımda gereken kuvvet, çekme kuvveti, bobin sıcaklığı ve mıknatıs hacmi gibi ifadeleri oluşturmuştur. Mıknatıs hacmi ve gereken gücün optimizasyonu için tasarım parametrelerini irdelemiştir. Tasarım aşamasında ısı, güç ve boyut gibi parametleri incelemiştir. Bu optimizasyonunu da elektromekanik fren sistemlerinde çözümlemiştir (Şefkat 2000).

Bıçakçı ve ark. (2023) çalışmalarında ANSYS Maxwell programını kullanarak halka ve silindirik sabit mıknatıslardan oluşan manyetik fırlatıcı tasarımını gerçekleştirmiştir. ANSYS Maxwell programı, elektromanyetik ve elektromekanik cihaz tasarımının ve analizlerinin gerçekleştirildiği bir elektromanyetik alan simülasyonu yazılımıdır. Bu yazılım, malzeme, sınır ve kaynak sınırlamalarını belirledikten sonra uzayda tanımlanan bölge içerisinde tanımlanan model üzerine Maxwell denklemleri kullanarak manyetik alan analizini gerçekleştirmektedir. ANSYS Maxwell programı, Electrostatic, AC Conduction and DC Conduction olmak üzere üç elektrik alanı çözücüsü ve Magnetostatic, Eddy Current and Transient Magnetic olmak üzere üç farklı ayrı manyetik alan analizi gerçekleştirir (Bıçakçı and Çıtak 2023).

Mede (2019), araçlarda yaygın olarak kullanılan disk kornaların elektromanyetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü yoluyla çalıştığını belirtmiştir. Bu dönüşüm, titreşen ve birbirine çarpan iki çekirdeğin hareketiyle darbeler oluşturarak sesi yayan diski harekete geçirmektedir. Çalışma, farklı uyarma voltajları ve montaj braketlerine sahip kornalar üzerinde yapılan akustik testlerin sonuçlarını analiz etmeyi amaçlamıştır. Çekirdek titreşimlerinde gözlemlenen birçok doğrusal olmayan olgu nedeniyle, ayrıntılı

bir elektromekanik model geliştirilmiştir. Araştırma sonuçları, çalışma frekansının giriş voltajına bağımlılığını ve çeşitli mekanik ile elektriksel parametrelerin kornanın dinamikleri üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca, alt harmonik uyarma gibi doğrusal olmayan etkiler sunulmuş ve tartışılmış, deneysel bulgular ile sayısal simülasyonlar arasında genel bir uyum olduğu belirtilmiştir (Medè, Doria et al. 2019).

Sim (2017) makalesinde, bir araç kornasının, katı çekirdeklerdeki malzeme etkisini göz önüne alınarak, elektromanyetik devreyle bağlantılı analitik modellemesini sunmaktadır. Bağlantılı devre modeli, yalnızca iletken ortamda yayılan elektromanyetik alanların malzeme etkisini değil, aynı zamanda manyetikleşme eğrilerindeki doğrusal olmayan davranışları da dikkate almıştır. "Bağlantılı" kavramı, manyetik akıyı ve ters elektromotor kuvvetini hesaplamak için elektrik devresindeki manyetikleşme akımını ve manyetik devredeki relüktansı belirlemek amacıyla tanıtılmıştır. Ayrıca, eşdeğer demir kaybı direnci ve endüktansa yönelik analitik yaklaşımlar da araştırılmıştır. Son olarak, bir prototip üretilmiş, deneyler yapılmış ve önerilen yöntemin doğrulanması için sonlu elemanlar analizinden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır (Sim, Kim et al. 2017).

Şefkat (2011), elektromekanik sistem tasarlayarak simülasyon sonuçlarını elde etmiştir. Öncelikle, elektromekanik cihazın türü seçilmiş ve tasarım süreçleri açıklanmıştır. Sonrasında, cihazın statik ve dinamik analizleri, çalışma koşulları dikkate alınarak MATLAB ve SIMULINK yazılımları kullanılarak gerçekleştirmiştir. Farklı gerilim seviyelerine karşılık sistemin gerçek çalışma koşullarındaki davranışını gösteren simülasyon sonuçları; akım, kuvvet ve yer değiştirme eğrileriyle sunulmuştur. (Şefkat 2011).

Bonfiglio (2017), araştırmasında amacı, araç kornalarının ses emisyonunu optimize etmek ve en üst düzeye çıkarmaktır. Bu çalışmada, salyangoz tipi kornanın boşluk modlarını belirlemek ve akustik bir kaynak uyarımı için kornadan yayılan ses basıncını tahmin etmek amacıyla bir akustik sonlu eleman modeli sunulmakta ve tartışılmaktadır. Önerilen sayısal yaklaşım doğrulandıktan sonra, mevcut salyangoz geometrisi otomatik bir optimizasyonu yapılmıştır (Bonfiglio and Pompoli 2017).

Kang (2014) sonlu elemanlar yöntemi ve transfer yolu analizi (TPA) kullanılarak iyi ses kalitesine sahip salyangoz tipi araç kornasının tasarım yöntemini açıklamaktır. Salyangoz

tipi kornanın iki temel frekansını belirlemek için algılanan ses kalitesine yönelik bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Yeni bir korna tasarımına yönelik sınır eleman modeli de incelenmiş ve elde edilen sonuçlar, bir prototip araç kornasının uygulanmasına yönelik çizime uygulanmıştır (Kang, Shin et al. 2015).

Smith ve ark. (1994) doğrusal olmayan elektromekanik eyleyicinin kalıcı olmayan durum davranışının analizi için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Hidrolik bir eyleyiciyi için ABS sistemi ele alınmışlar ve ilgili eyleyiciye ait deneysel ölçümler yapılmış ve sistem davranışı gözlemlenmiştir. Modelleme ile elde edilen verilerin, deneysel sonuçlarla yüksek düzeyde örtüştüğü ortaya konmuştur.(Smith, Jenkins et al. 1994).

Bottauscio ve ark. (2003) silindirik geometrili elektromekanik bileşenler üzerinde histerezis ve çevrinti akımı etkileri, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, çevrinti akımının manyetik ve elektriksel alt yapılar üzerinde histerezise kıyasla daha baskın bir etki oluşturduğunu göstermiştir. Bunun yanında, çevrinti akımının eyleyicinin zamana bağlı yanıtını olumsuz etkilediği ve oluşan manyetik kuvvetlerin büyüklüğünü azalttığı ifade edilmiştir. (Bottauscio, Chiampi et al. 2003).

Kamış (2005) tarafından yapılan çalışmada, elektromekanik supap mekanizmasına ilişkin bir matematiksel model geliştirilmiş ve sistemde tercih edilebilecek en uygun mıknatıs devresinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, literatürde disk ve piston tipi olarak adlandırılan mıknatıs devrelerinden yararlanılarak üç farklı model oluşturulmuş, tasarım parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve her bir modelin statik ve dinamik özellikleri kuramsal olarak analiz edilerek en uygun mıknatıs devresi seçilmiştir (Kamış 2005).

Özdemir (2022) çalışmasında elektromanyetik kavramanın tasarım ve analizini gerçekleştirmiştir. Analize giriş bölümünde, elektromanyetik kavramlar temel alınarak Maxwell denklemleri tanıtılmış; ardından manyetik devre çözümlerinde başvurulacak yöntemler açıklanmıştır. Bunu yanında malzeme özellikleri, kullanılan alanlar incelenmiştir. Sonuç olarak bu çalışma elektromanyetik kavramaların kullanımı hakkında

daha sonra yapılacak çalışmalar için bilgilendirici ve yol gösterici bir kaynak olmuştur (Özdemir 2022).

Uçar S. (2019), çalışmasında Maxwell'in alan denklemlerini esas alarak kapsamlı bir değerlendirme sunmuştur. Maxwell, başlangıçta birbirinden bağımsız olgular olarak değerlendirilen elektrik ve manyetizmanın, aslında tek bir fiziksel olayın iki farklı yönü olduğunu geliştirdiği alan denklemleri aracılığıyla ortaya koymuştur. Bununla birlikte, yalnızca elektromanyetizmanın temel matematiksel altyapısını oluşturmakla kalmamış; aynı zamanda bu denklemleri kullanarak elektromanyetik dalgaların varlığını teorik olarak öngörmüş ve ışığın da bir elektromanyetik dalga olduğunu bilimsel olarak açıklamıştır. Bu araştırmada, Maxwell'in alan denklemlerinin ortaya konuluş süreci ile fiziksel bilimler üzerindeki etkileri, tarihsel perspektiften analiz edilmiştir (Uçar 2019).

Ercan ve ark. (2024) yaptığı çalışmada ağır taşıma araçlarında kullanılan elektropnömatik fren sistemlerinde yer alan orantılı bir selenoidin tasarımını ve değerlendirilmesini ele almaktadır. Solenoid, geleneksel bir yöntemle geliştirilmiş ve statik ve dinamik performans özellikleri hem teorik hem de deneysel açıdan incelenmiştir. Teorik statik analiz için ANSYS 2024 R1 Maxwell kullanılmış, burada sabit ve hareketli kutup bölgelerindeki geometrik parametrelerin kuvvet-yer değiştirme ilişkilerine etkisi üzerinde yoğunlaşılmıştır. Orantılılık için en uygun boyutlar, belirli kısıtlamalar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Statik analiz sonuçları, MATLAB R2024b-Simulink ile dinamik bir model oluşturmak için kullanılan mıknatıslanma eğrisi verilerini sağlamış, bu sayede simülasyon süresi kısaltılmış ve dinamik simülasyon doğruluğu artırılmıştır (Düzgün ve Şefkat 2024).

Topçu ve ark. (2008) yaptığı çalışmada, elektromekanik sistemler için bir parametre modeli geliştirilmiş ve çözüm süreci, arama tabloları (LT) kullanılarak daha pratik hale getirilmiştir. Çalışmada geliştirilen model, iki kademeli bir yaklaşımla oluşturulmuştur. Çalışmanın başlangıcında, elektromekanik sistemin davranışını yansıtmak amacıyla, doğrusal olmayan manyetik devre denklemleri kullanılarak bir Simulink modeli hazırlanmıştır. İkinci aşamada ise, doğrusal olmayan etkileri değiştiren LT'ler aracılığıyla model sadeleştirilmiştir. LT'ler, MATLAB ortamında geliştirilen bir programla üretilmiştir. Bu sadeleştirilmiş modelin simülasyon süreleri, doğruluğu koruyarak orijinal

modele göre yaklaşık %50 oranında kısaltılmıştır. Yeni modelin doğruluğunu test etmek için iki farklı elektromekanik sistem üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış ve simülasyon sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılmış, aralarında yüksek uyum sağlanmıştır (Topçu E. ve Ark. 2008).

Literatürdeki çalışmalar, elektromanyetik alan oluşumu ile çalışan sistemlerin sürekli gelişim içinde olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, birçok sektörde elektromanyetik teoriye dayalı teknolojik ürünler geliştirilmiş ve bu alanda çeşitli bilimsel araştırmalar yürütülmüştür (Şefkat ve Yüksel 2003). CAD ve CAE gibi bilgisayar destekli araçlardaki teknolojik ilerlemeler, modern ürün tasarımında hassasiyet ve verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Bu kapsamda, geometrik optimizasyon, topoloji optimizasyonu ve üretken tasarım (generative design) gibi yeni teknolojiler ortaya çıkmıştır. Bu araştırmada, söz konusu teknolojik ilerlemeler doğrultusunda bir yöntem geliştirilmiştir. Elektromanyetik sistemlerde önemli bir bileşen olan elektromanyetik kornanın geometrik optimizasyonu ele alınarak geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

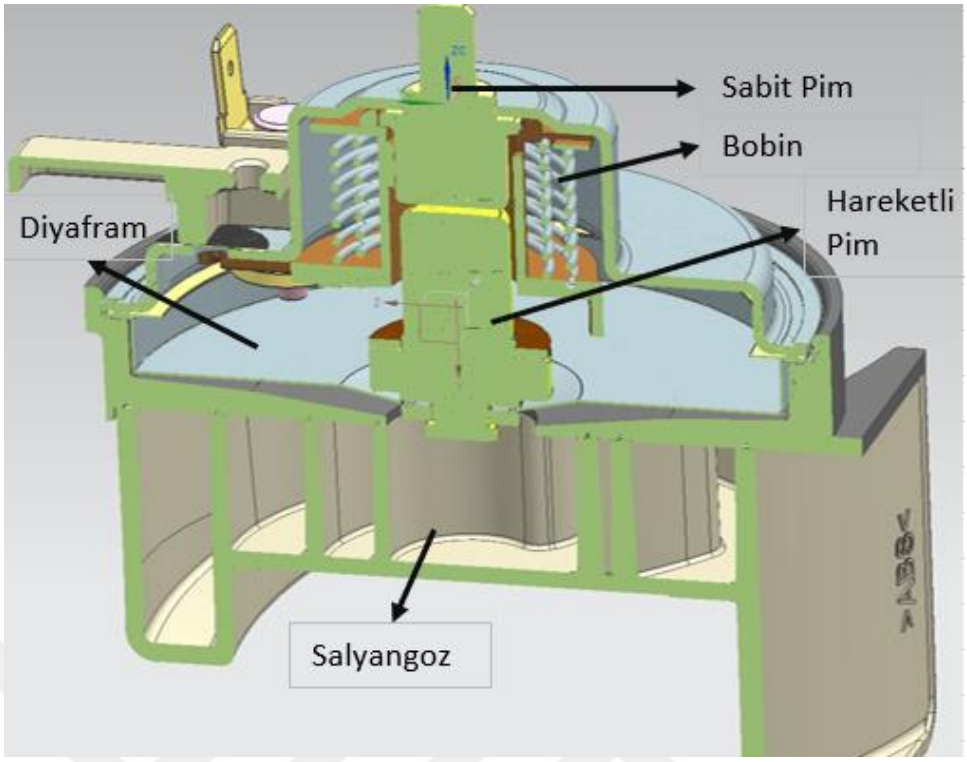
3. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında elektromekanik kornanın manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarım için parametreler gerçek korna modelinden alınmış olup parametreler belirlendikten sonra Ansys Maxwell programında tasarım gerçekleştirilmiştir. ANSYS Maxwell, elektromanyetik sistemlerin analizinde kullanılan ve sonlu elemanlar yöntemine dayanan ileri düzey bir mühendislik yazılımıdır. Elektriksel ve manyetik alanlara ilişkin çeşitli problemlerin çözümünde; malzeme özellikleri ile birlikte sınır ve kaynak koşulları dikkate alınarak belirli bir uzay bölgesine ait model üzerinde Maxwell denklemleri uygulanmaktadır. Yazılım, elektrik alanı için elektrostatik, alternatif akım iletkenliği ve doğru akım iletkenliği; manyetik alan içinse manyeto statik, girdap akımı ve zamana bağlı manyetik çözücüleri destekleyen alt modüller içermektedir.

Tez çalışmasında, incelenen yapının titreşim ve akustik performansını değerlendirmek için üç temel analiz adımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, yapının doğal frekansları ve mod şekillerini belirlemek amacıyla modal analiz yapılmıştır. Ardından, modal analiz sonuçları kullanılarak, yapının belirli bir frekans aralığında sinüzoidal yüklemelere karşı tepkisi frekans cevabı (Harmonik Response) analizi ile incelenmiştir. Son olarak, yapısal titreşimlerden kaynaklanan akustik etkileri belirlemek için, çevredeki hava ortamında oluşan ses basıncı seviyelerini hesaplayan harmonik akustik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz adımları birlikte kullanılarak, yapıdan kaynaklanan titreşim ve akustik davranışlar kapsamlı biçimde değerlendirilmiş ve potansiyel tasarım iyileştirmelerine yönelik temel bilgiler elde edilmiştir (ANSYS).

3.1.Elektromekanik Korna

Araba kornaları, yakındaki araç yolcularının veya yayaların dikkatini çekmek için yüksek, duyulabilir sesler üreten basit elektromanyetik cihazlardır. Şekil 3.1 de gösterilen korna sistemi, elektrik, manyetik ve mekanik alt sisteminden oluşur. Manyetik alanı bir bobin oluşturur, mekanik sistem diyafram ile pimden oluşur, bir çift elektrik kontağı anahtar görevi görür.



Şekil 3.1. Elektromekanik korna mekanizması

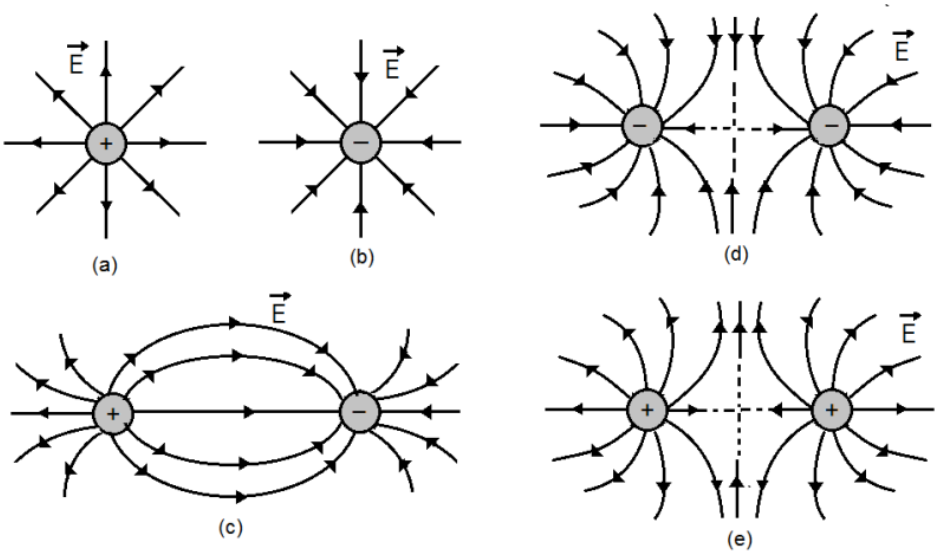
Korna devresi başlangıçta kapalı konumda olduğundan, terminal uçlarına çalışma gerilimi uygulandığında, bu gerilim bobin üzerinden akarak bir manyetik alan oluşturur. Bu alan, bobin içinde konumlanan alt pimin mıknatıslanmasına neden olur ve alt pim elektromıknatıs gibi davranmaya başlar. Oluşan manyetik kuvvet, hareketli kontağı çekerek devreyi kısa süreliğine açar ve bu açılma titreşimli bir çalışma döngüsünü başlatır. Alt pimin mıknatıs haline gelmesiyle birlikte, hava aralığı boyunca konumlanan üst pim, manyetik çekim kuvvetinin etkisiyle alt pime doğru hareket eder. Üst pim bu doğrultuda yer değiştirirken, merkezinde bulunan şapka biçimindeki parça fiber malzemeye temas eder ve bu temas aracılığıyla sisteme bağlı olan yay üzerinde bir basınç oluşturur. Oluşan bu mekanik etki, platin yayı ile platin sacı arasında yer alan volfram kontakların ayrılmasına neden olur. Aynı zamanda, pime perçinlenmiş olan diyafram da bu hareketle birlikte titreşime geçer ve ses üretimi başlar. Volfram kontakların birbirinden ayrılmasıyla birlikte, başlangıçta kapalı olan korna devresi açık hale gelir ve devre üzerinden akım geçişi engellenir. Bu durumda bobin içerisindeki manyetik alan kaybolur ve alt pimin mıknatıs özelliği ortadan kalkar. Manyetik çekim kuvvetinin sona ermesiyle, üst pim yay kuvveti etkisiyle eski konumuna geri döner. Üst pimin geri dönmesiyle

birlikte yay üzerindeki mekanik baskı ortadan kalkar, böylece volfram kontaklar tekrar temas eder ve devre yeniden kapanır. Bu döngü, sistem çalıştığı sürece periyodik olarak tekrarlanır ve korna titreşimli bir şekilde ses üretmeye devam eder. Bu işlem, araca gerilim uygulandığı sürece yani sürücü korna butonuna bastığı müddetçe döngüsel olarak devam eder. Bu sürekli açılıp kapanma hareketi, korna sisteminin çalışma frekansını belirler. İnce ses üreten kornalarda bu titreşim frekansı genellikle 500 Hz civarındayken, daha kalın tonlu kornalarda yaklaşık 400 Hz seviyesindedir. Bu yüksek frekansta tekrarlayan mekanik salınım, diyaframın periyodik olarak ileri-geri hareket etmesine neden olur ve bu hareket sonucu ortamda ses dalgaları üretilir.

Sürücü anahtarı etkinleştirdiğinde, kapalı elektrik kontağı bobinden bir akım geçmesine izin vererek pim ve metal diyaframı çeken manyetik bir kuvvet oluşturur. Bu eylem elektrik kontağını keserek akımı keser ve pim ile diyaframı serbest bırakır. İlk konumlarına geri döndüklerinde, elektrik kontağı yeniden kurulur ve döngü tekrarlanır. Bu sürecin hızlı tekrarı diyaframda bir salınım yaratır ve kornanın sesini oluşturur (Setrekli veKoral, 2022).

3.2. Elektromanyetik Alan Kavramı

Elektromanyetik teori, çeşitli endüstriyel ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamış ve bu ürünler geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Elektromekanik alan teorisine ile çalışan ürünlerden bazıları araç korna sistemleri, elektromanyetik frenler, kavramalar, subap mekanizması olarak gösterilebilir. Endüstri için oldukça kritik bir teori olan bu kavram, öncelikle manyetik alanın açıklanmasıyla ele alınabilir. Manyetik ve elektrik alanlar, elektriksel yüklerle doğrudan bağlantılıdır. Eğer yüklü parçacıklar durağan konumdaysa, gözlemci yalnızca elektrik alanı algılar. Ancak yükler hareket ettiğinde, gözlemci yalnızca elektriksel değil, aynı zamanda manyetik alanın etkilerine de maruz kalır. Faraday ve Maxwell, yüklerin hareket durumunda değişen bu fenomenleri analiz ederek, zamanla değişen manyetik alanın bir elektrik alanı (Şekil 3.2), elektrik alanın değişimine bağlı bir manyetik alan meydana getirdiğini formüllerle göstermiştir. Bu bağlamda, elektromanyetik alan, elektrik ve manyetik alanların birleşiminden oluşan temel bir olgudur (Yıldız 2013).



Şekil 3.2. Elektrik Alan Çizgileri

3.3. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri, elektromanyetik alanların davranışını tanımlayan temel fiziksel kuralları içerir. Faraday Kanunu, Manyetizma için Gauss Kanunu, Ampere-Maxwell Kanunu ve Elektrik için Gauss Kanunu olmak üzere dört temel denklemden oluşurlar. Bu denklemler hem diferansiyel hem de integral formda ifade edilebilir ve elektromanyetik alanların uzaydaki ve zamandaki dağılımını kapsamlı biçimde açıklar.

3.3.1. Faraday kanunu

Faraday Kanunu, değişen manyetik alanların elektrik alan oluşturduğunu belirtir. Bu durum elektromanyetik indüksiyonun temelini oluşturur. Bu denklem, bir iletken döngü içerisinden geçen manyetik akı değiştiğinde indüklenen elektromotor kuvvetin ortaya çıkacağını belirtir (Griffiths 2023).

$$\nabla X\, E = -\frac{\partial B}{\partial t} \qquad \oint E.dl = -\frac{\partial}{\partial t}\int B.dA \tag{3.1}$$

3.3.2 Manyetizma için Gauss kanunu

Bu kanun, doğada izole manyetik yüklerin (monopoller) bulunmadığını ifade eder. Manyetik alan çizgileri her zaman kapalı döngüler oluşturur, yani bir kaynaktan çıkıp bir

sonlanma noktasına varmazlar. Denklem, herhangi bir hacmin sınırından geçen toplam manyetik akının sıfır olduğunu belirtir (Sadiku and Nelatury 2001).

$$\nabla . \mathrm{B}E = 0 \qquad \oint \; B.dA = 0 \tag{3.2}$$

3.3.3. Ampere kanunu

Ampere Kanunu, elektrik akımlarının manyetik alan oluşturduğunu belirtirken, Maxwell bu yasaya zamanla değişen elektrik alanların da katkı yaptığını eklemiştir. Bu denklem sayesinde elektromanyetik dalgaların varlığı teorik olarak öngörülmüş ve daha sonra deneylerle doğrulanmıştır (Ulaby 2004).

$$\nabla \, X \, E = J + \frac{\partial D}{\partial t} \qquad \oint \; H.dl = \int \left(J + \frac{\partial D}{\partial t}\right).dA = NI \tag{3.3}$$

3.3.4. Elektrik için Gauss kanunu

Elektrik yüklerinin elektrik alanların kaynağı olduğunu açıklayan bu kanun, kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısının, o yüzeyin içindeki toplam yük miktarıyla orantılı olduğunu belirtir. Elektriksel alan dağılımını incelemek için özellikle simetrik sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır (Cheng 1989).

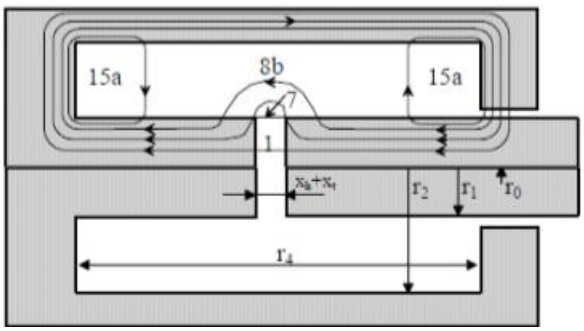
$$\nabla . \mathrm{D} = \rho \qquad \oint \; D.dA = \int \rho.dV \tag{3.4}$$

3.4. Elektromekanik Kornanın Manyetik Sistem Analizi

Manyetik devreler, elektrik enerjisinin manyetik enerjiye dönüştürülerek belirli bir alan içerisinde kuvvet, hareket veya etkileşim oluşturulmasını sağlayan sistemlerdir. Elektrik devrelerindeki gerilim-akım ilişkisine benzer şekilde, manyetik devrelerde de manyetik zorlayıcı kuvvet (magnetomotive force, MMF), manyetik akı ve manyetik direnç (relüktans) kavramları kullanılarak analiz yapılır. Bu tür devrelerde, manyetik alanın oluşturulması ve yönlendirilmesi genellikle ferromanyetik malzemeler yardımıyla sağlanır. Manyetik akının geçişi sırasında karşılaşılan zorluk, malzemenin relüktansı ile ifade edilir ve bu özellik sistemin toplam manyetik davranışını doğrudan etkiler.

Genel olarak bir mıknatıs devresi; bobin (sargı), ferromanyetik çekirdek, hava aralıkları ve manyetik yol boyunca tanımlı elemanlardan oluşur. Devre içindeki manyetik alan dağılımı, hem geometrik yapı hem de malzeme özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Özellikle hava aralığı içeren sistemlerde manyetik kaçak akıları ve doygunluk etkileri, sistemin doğrusal olmayan davranışlarını ortaya çıkarır ve bu etkiler dikkate alınmadan yapılan analizler hatalı sonuçlara yol açabilir.

Bu bağlamda, piston tipi mıknatıs devresi, doğrusal hareket üretimi amacıyla tasarlanmış özel bir manyetik yapı olarak öne çıkar. Bobin içerisine yerleştirilmiş hareketli bir pistonun, uygulanan akımın etkisiyle meydana gelen manyetik kuvvet aracılığıyla konum değiştirmesi prensibine dayanır. Korna mekanizmasında piston tipi mıknatıs devresi mevcuttur. Şekil 3.3'te piston tipi mıknatısın temel matematiksel modeli sunulmaktadır.



Şekil 3.3. Düz yüzlü piston tipi mıknatıs devresinde geçirgenlik yolları

Kutup bölgesinin manyetik akıyı iletme yeteneği; 7 ve 8b ile gösterilen manyetik yol bileşenlerinin ayrı ayrı geçirgenliklerinin toplamı alınarak hesaplanır. Bu bileşenler, manyetik alanın kutup yüzeyi üzerinden geçerken izlediği ana akı yollarını temsil eder ve sistemin toplam relüktansına doğrudan etki eder.

$$P_7 = 1{,}63\ \mu_0 \left(r_1 + \frac{(x_h+x_t-x)}{4}\right) \tag{3.5}$$

$$P_{8b} = 2\ \mu_0 r_1 \ln\left(\frac{4(r_2-r_1)}{\pi(x_h+x_t-x)}\right) \tag{3.6}$$

$$P_f = P_7 + P_{8b} \tag{3.7}$$

Kullanılır aralığın geçirgenliği:

$$P_u = P_{uh} = \frac{\pi\mu_0(r_1^2 - r_0^2)}{(x_h + x_t - x)} \tag{3.8}$$

Pim boyunca toplam etkili geçirgenlik:

$$P_a = P_u + P_f \tag{3.9}$$

Kutup çekirdekleri arasında meydana gelen kayıplara ilişkin geçirgenlik, 15a yolu esas alınarak tanımlanmaktadır.

$$P_1 = \mu_0 \left[\frac{\pi r_4(r_1 + r_2)}{8(r_2 - r_1)} - (r_1 + r_2) + \frac{2(r_2^2 - r_1^2)}{\pi r_4}\right] \tag{3.10}$$

Akı yoğunluğu (hava):

$$B_h = \frac{P_u}{P_a + P_1} B_p \tag{3.11}$$

Hareketli pimin akı yoğunluğu;

$$B_d = B_h \frac{P_a + P_1}{P_u} \tag{3.12}$$

Kutup çekirdeğinin akı yoğunluğu:

$$B_b = B_d \frac{r_1^2 - r_0^2}{r_3^2 - r_2^2} \tag{3.13}$$

Hesaplanan akı yoğunluklarından B-H eğrisinden alınan veriler ile mıknatıs alan şiddeti H hesaplanır. Burada bulunan H değerleri aşağıdaki eşitlikten pim kısmı için gerekli magnetomotor kuvveti bulunur.

$$\sum H_n l_n = H_b l_b + H_h l_h \tag{3.14}$$

Gerekli toplam magnetomotor kuvvet (NI), hava aralığının etkisi de dahil edilerek aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$NI = \frac{zB_h x_h}{\mu_0} + \sum H_n l_n \tag{3.15}$$

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 A (NI)^2}{z (x_h + x_t - x)^2} \tag{3.16}$$

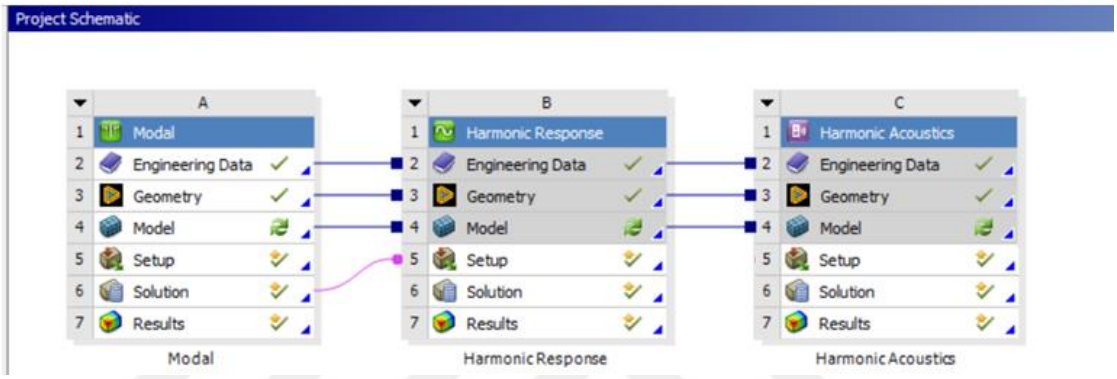
Yukarıda bulunan matematik formüllerden Fm manyetik kuvvet bulunur. Matematik işlemlerinin karmaşıklığı ve daha önce yapılan birçok çalışma da mevcut olduğu için manyetik alan hesaplaması ve manyetik kuvvet hesaplaması ANSYS Maxwell programında yapılmıştır.

3.4.1.Manyetik Alan Hesaplamaları için Ansys Maxwell Uygulaması

Elektromanyetik alan analizleri için ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmaktadır. Yazılım, seçilen malzeme özellikleri altında sınır koşulları ve giriş kaynaklarına göre Maxwell denklemleriyle sınırlı bir uzayda çözüm yapabilme yeteneğine sahiptir. Hem 2D hem de 3D geometri oluşturma seçenekleri mevcuttur ve bu, Kartezyen (XY) ve Asimetrik (RZ) koordinat sistemlerini içermektedir. ANSYS Maxwell, manyetik ve elektriksel alan analizlerinin yanı sıra, Magnetostatik, Eddy Current ve Geçici Manyetik çözücüleri ile ilgili kapsamlı analizler yapmayı sağlar. Sorunun doğasına göre uygun geometri modu ve çözücü seçilerek analiz gerçekleştirilir. Ayrıca, yazılımın parametreli analizler için sunduğu parametreli boyutlar sayesinde, birden fazla manyetik analiz tanımlaması aynı anda yapılabilmektedir. Parametreli analizlerde, yazılım bağımsız olarak her analiz problemi için ağ yapısını oluşturabilmekte ve böylece adaptif ağ oluşturma yönteminden faydalanılmaktadır. Manyetik kuvvet, tork, kapasitans, indüktans, direnç, empedans gibi elektromanyetik alan analiz sonuçları çıkarılmaktadır. (Düzgün 2015).

3.5. ANSYS Workbench Ortamında Modal–Harmonik–Akustik

Sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method – FEM), yapısal ve akustik sistemlerin titreşim davranışlarının analizinde sıkça tercih edilen sayısal bir yaklaşımdır. Bu bağlamda, modal analiz, frekans cevabı analizi ve akustik analiz, dinamik davranışların frekans alanında değerlendirilmesine olanak sağlayan ardışık analiz türleri olarak öne çıkmaktadır. ANSYS Workbench yazılımı, bu analizlerin entegre bir biçimde yürütülmesine olanak sunan güçlü bir platformdur.



Şekil 3.4. ANSYS Workbench arayüz görüntüsü Modal–Harmonik–Akustik

3.5.1. Modal Analiz

Modal analiz, bir yapının serbest titreşim koşullarında sahip olduğu doğal frekansların ve bu frekanslardaki mod şekillerinin belirlenmesini amaçlar. Yapıya herhangi bir dış yük uygulanmaksızın gerçekleştirilen bu analiz, sistemin rezonans potansiyelinin anlaşılmasında kritik rol oynamaktadır. Elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri, sonraki dinamik analizlerin temelini oluşturmaktadır. Analiz sürecinde, malzeme özelliklerinin doğru tanımlanması ve uygun sınır koşullarının atanması, sonuçların güvenilirliği açısından önem arz etmektedir.

3.5.2. Frekans Cevabı Analizi (Harmonic response)

Frekans cevabı analizi, yapıya belirli bir frekans aralığında sinüzoidal bir yük uygulanarak sistemin kararlı hal tepkisinin belirlenmesine yönelik bir yöntemdir. Modal analiz çıktıları referans alınarak gerçekleştirilen bu analizde; yapının yer değiştirme, hız

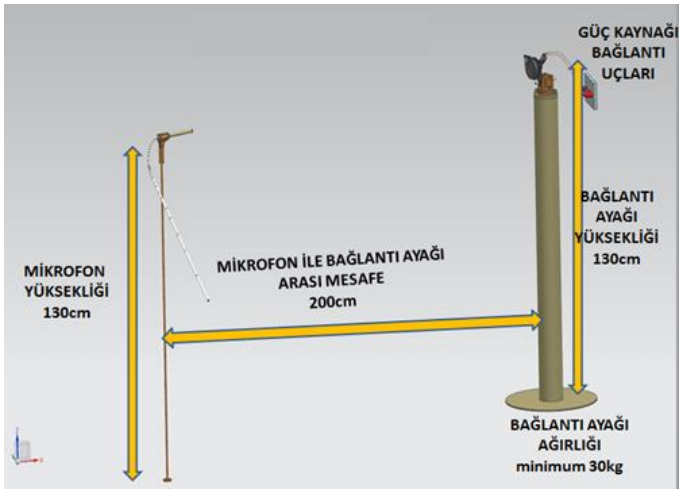
veya ivme büyüklüklerinin frekansa bağlı olarak nasıl değiştiği hesaplanmaktadır. Ayrıca, sönüm oranları ve yükleme koşullarının doğru biçimde tanımlanması, analiz doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu analiz, özellikle titreşim kaynaklı hasarların önlenmesi ve yapısal optimizasyon süreçlerinde önemli bilgiler sunar.

3.5.3. Akustik Analiz (Harmonic Acoustics)

Akustik analiz, yapısal titreşimlerin neden olduğu ses dalgalarının çevresel ortama nasıl yayıldığını incelemek amacıyla gerçekleştirilir. Özellikle harmonik akustik analiz, yapının titreşim kaynaklı ses üretimini frekans alanında değerlendirir. Bu süreçte genellikle katı-akışkan etkileşimi (FSI) dikkate alınır. Yapıdan kaynaklanan yüzey titreşimleri, çevresindeki akustik ortama (genellikle hava) ses enerjisi olarak iletilir ve ses basınç düzeyleri hesaplanır. Bu tür analizler, otomotiv sektörü başta olmak üzere pek çok alanda ses konforu ve düzenlemelere uyum açısından önem arz etmektedir.

3.6. Akustik Test İşlemleri

Bu çalışmada analiz edilen korna modeli, prototip olarak üretilmiş ve Şekil 3.5'te yer alan test düzeneği kullanılarak akustik laboratuvarda test edilmiştir. Tasarımda kullanılan hava aralığı, malzeme ve bobin gibi parametreler, analiz sırasında kullanılan değerlerle birebir aynı olacak şekilde belirlenmiş ve test sürecine yansıtılmıştır.



Şekil 3.5. Test Odası Korna Bağlantı Şeması

Kornalar; ses karakteristiklerinin ölçümü için, yarı yansımalı bir akustik oda da test edilir. Regülasyon 28 gereği çevre gürültü seviyesi, ölçülen ses basınç seviyesinden en az 10 dB daha az olmalıdır. Akustik Odanın ortam sıcaklığı (15 – 30° C) arasında olmalıdır. Kornalar ağırlığı min.30 kg olan rijit bir gövdeye orijinal braketleriyle sabitlenmelidir. Kornaların, ölçüm için bağlandığı gövdenin yüksekliği ile mikrofonun yüksekliği aynı olup, 1.2 m. dir. Mikrofon; diyaframı kornanın ses çıkış düzleminden 2 ± 0.01 m. mesafede olacak şekilde yerleştirilir. Mikrofonun ekseni, kornanın ses seviyesindeki yönü ile uyuşmalıdır. Korna bağlantı ayağına ses çıkış yönü mikrofonu görecek şekilde bağlanmalıdır. Ses karakteristiklerini ölçen cihazlar akustik odanın dışında, Laboratuvar ortamında bulunmalıdır. Ses karakteristiklerinin ölçümü için korna bağlantı şeması şekil 3.5'te gösterilmiştir. Ölçümler esnasında kornanın ihtiyacı olan elektrik akımını sağlayan güç kaynağı ile korna uçları arasındaki gerilim değişimi, 0.1 V.' u aşmamalıdır. Kornaların çalıştırılması esnasında; sırasıyla 6V, 12V veya 24V. anma gerilimlerine karşılık, güç kaynağından uygulanan gerilim 6.5 V, 13V ve 26V olmalıdır. (TSE – ECE R28). Analizini gerçekleştirdiğimiz korna 12V gerilimde olup güç kaynağından 13V uygulayarak ölçümleri yapılmıştır.

3.7. Elektromekanik Korna Mekanizmasının Matematik Modeli

Elektromekanik korna mekanizmasında alt sistemlere ayrıldığında; elektriksel, manyetik ve mekanik alt sistemlerin bir araya gelmesiyle oluşur (Şekil 3.6). Bu alt sistemler birbirleriyle sürekli etkileşim içerisindedir ve kontakların açılıp kapanması sırasında benzer işleyiş özellikleri sergilerler.

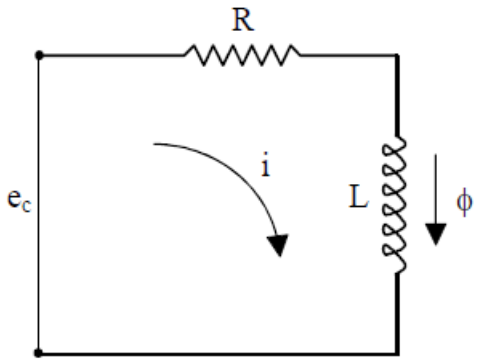


Şekil 3.6. Elektromekanik korna alt sistemleri

3.8. Elektromekanik Kornanın Elektriksel Alt Sistemi

Elektriksel yapının temelini oluşturan bobin, teorik olarak seri şekilde bağlanmış bir direnç ve bir endüktans elemanından meydana gelir (Şekil 3.7). Bobine bir gerilim uygulandığında, devrede akan akımda bir değişim gözlemlenir ve bu durum manyetik akının değişmesine yol açar. Kirchhoff'un yasaları dikkate alındığında, bu durum 3.17'deki matematiksel ilişkiyle ifade edilebilir:

$$e(t) = e_R(t) + e_L(t) \tag{3.17}$$



Şekil 3.7. Elektrik alt sistemi

Bir manyetik devrede bobine uygulanan elektriksel gerilim, akımda bir değişim oluşturur ve bu değişim sonucunda devrede bir manyetik akı farklılığı meydana gelir. Kirchhoff'un gerilim yasası temel alınarak, bu durum sarım sayısı N ve manyetik akı Φ ile ilişkili olarak, iletim hâlindeki bir manyetik devre için matematiksel olarak ifade edilebilir. (Roters 1941).

$$e_c = e_R + e_L = Ri_c + \frac{d(N\emptyset_c)}{dt} \tag{3.18}$$

Çözüm açısından temel teşkil eden (3.18) numaralı elektriksel alt sistem denklemi, kapalı formda tanımlanmış doğrusal olmayan bir diferansiyel denklem niteliğindedir. Bu bağıntıdan manyetik akı Φ izole edildiğinde formül aşağıdaki (4.19) gibi elde edilir.

$$\emptyset_c = \frac{1}{N}\int (e_c - Ri_c)dt \tag{3.19}$$

(3.18) ve (3.19) numaralı ifadelerde, manyetik akı Φ akım ve hareketli elemanın konumundaki değişimin bir fonksiyonu olarak tanımlanırken (Φ=f(i, x), akım ise tersine, manyetik akı ve konum değişiminin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir (i=f(Φ,x)). Ayrıca burada yer alan Φ, i ve x değişkenlerinin tamamı, açıkça zamanın bir fonksiyonudur.

(3.18) nolu ifadede N sarım sayısı sabitliğinde;

$$\frac{d(N\phi)}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \tag{3.20}$$

$$e_c = Ri_c + \frac{d\lambda_c}{dt} = Ri_c + L\frac{di_c}{dt} + i_c\frac{dL}{dx}\frac{dx}{dt} \tag{3.21}$$

şeklinde yazılabilir. Bu bağlamda, manyetik devrenin endüktansı L, manyetik akının sabit kabul edildiği durumda konumun bir fonksiyonu olarak değerlendirilir (L=f(x)). Bu tür bir yaklaşımla yapılan analizlerde, malzemenin manyetik doyma etkisi ile sızıntı akıları göz ardı edilmiş olur. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar gerçek sistemin dinamik tepkisini tam olarak yansıtmayabilir.

Hareketli elemanın durağan durumda olması, yani dx/dt=0 koşulu sağlandığında, (3.18)–(3.21) numaralı denklemlerin analitik çözümü, üstel gecikmeli devre tepkisine karşılık gelir ve (1-e $^{-t/\tau}$)formuyla ifade edilebilir. Bu bağlamda, akımın zamana bağlı değişimi, elektriksel alt sistemin zaman sabiti ile belirlenmektedir. (τ =L/R). Sistemdeki zaman sabiti azaldıkça, akım daha kısa sürede maksimum seviyeye ulaşır.

Bobin direnci (3.22) da ifade edilen elektrik alt sisteminin zaman sabiti (3.23) şeklinde bulunur.

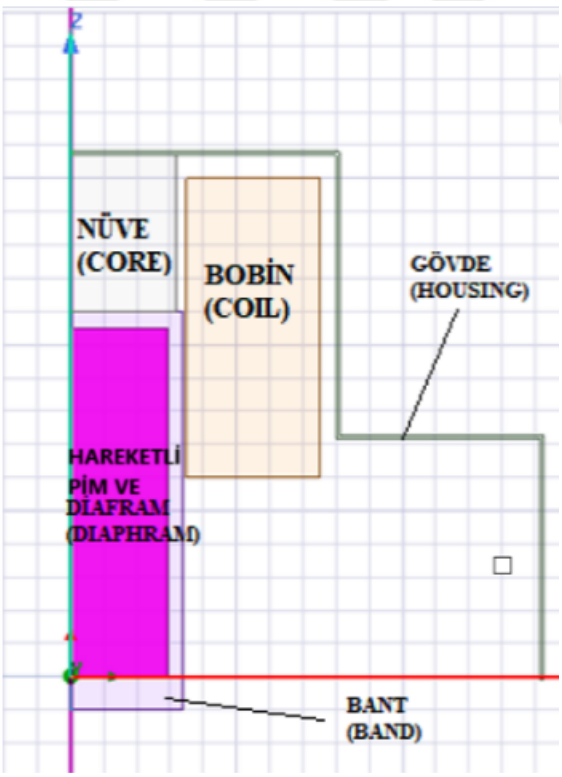
$$R = \rho \frac{(r_1+r_2)4N}{d^2} \tag{3.22}$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{\mu_0 A\, f\, (r_2-r_1-l_m-l_b)(r_4-2t_m)}{z\, x\, \rho\, (r_1+r_2)\pi} \tag{3.23}$$

(3.23) numaralı denklem incelendiğinde, sistemin zaman sabitinin tel çapından bağımsız olduğu görülmektedir. Zaman sabiti, esas olarak manyetik devrenin geometrik boyutları ve hava aralığı mesafesi gibi fiziksel parametrelere bağlıdır (Kamış 2005).

4. BULGULAR

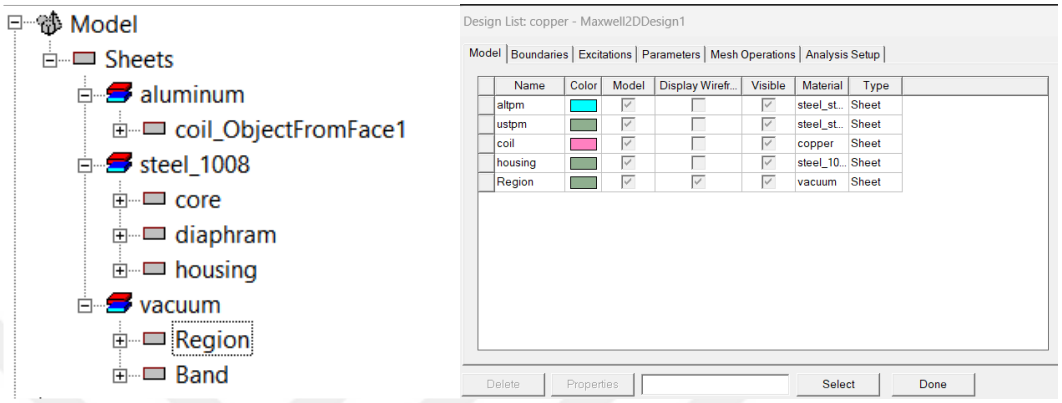
Tasarım için parametreler gerçek korna modelinden alınmış olup parametreler belirlendikten sonra Ansys Maxwell programında analiz gerçekleştirilmiştir. Seger A.Ş. tarafından üretilen çembersiz kornanın kesiti Şekil 3.1'de sunulmuştur. Geometriyi analiz için hazırlamak adına her bir bileşen ayrı ayrı modellenip montajı yapılmıştır. Model, analiz aşamasına gelindiğinde Ansys Maxwell modülüne aktarılmıştır. Ansys Maxwell yazılımında modelin analiz sürecini karmaşıklaştırmasından dolayı sadeleştirme yapılmıştır. Yani analizin sürecini kolaylaştırmak ve programın kısıtlamalarından dolayı daha doğru sonuçlar elde edebilmek için vida, perçin ve plastik parçalar 2D modelde çıkarılmıştır. Sadeleştirilen korna modeli Maxwell programı 2D modelinde gösterilmiştir (Şekil 4.1). Bir adet bobin, kornanın hareketsiz kısmı, nüve ve hareketli kısmı pim ile diyafram ve tastan oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Maxwell programı 2D tasarım

Modelin kurulumu sırasında, her bir bileşene uygun bir malzemenin atanması gerekmektedir. Malzeme seçimi; "assign material" sekmesine tıklanarak açılan

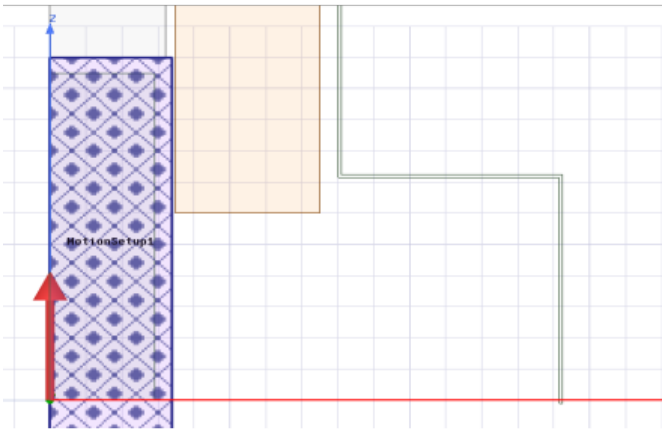
pencerede, daha önce kaydedilmiş malzemeler arasından birinin seçilmesiyle yapılır. Bu çalışmada; bobin teli ilk olarak alüminyum seçilmiş daha sonrasında bakır seçilmiştir. Nüve, pim ve housing (tas) malzemesi steel_1008 olarak Şekil 4.2'te görüldüğü gibi seçilmiştir.



Şekil 4.2. Malzeme seçimi

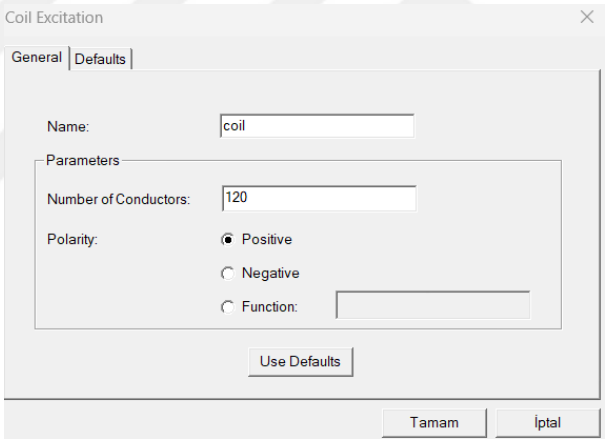
4.1. Sınır Koşullarının Belirlenmesi

İki boyutlu analizin yapılabilmesi için alanın sınırlandırılması gerekmektedir. Analiz alanı olarak tanımlanan bölge "region" olarak belirlenmiştir. Region alanına, 0 Weber/m olacak şekilde vektör potansiyeli tanımlanmıştır. Region alanının materyali olarak "vacuum" (boşluk) seçilmiştir. Benzer şekilde, diyaframın hareketinin tanımlanabilmesi için hareketli diyaframı kapsayan bir bant bölgesi tanımlanmış olup, burada da materyal tipi olarak "vacuum" seçilmiştir. Hareketli cismin vektör yönü tanımlanarak veri girişleri tamamlanmıştır. Pim hareket yönü de analizde Şekil 4.3'te ki gibi tanımlanmıştır.



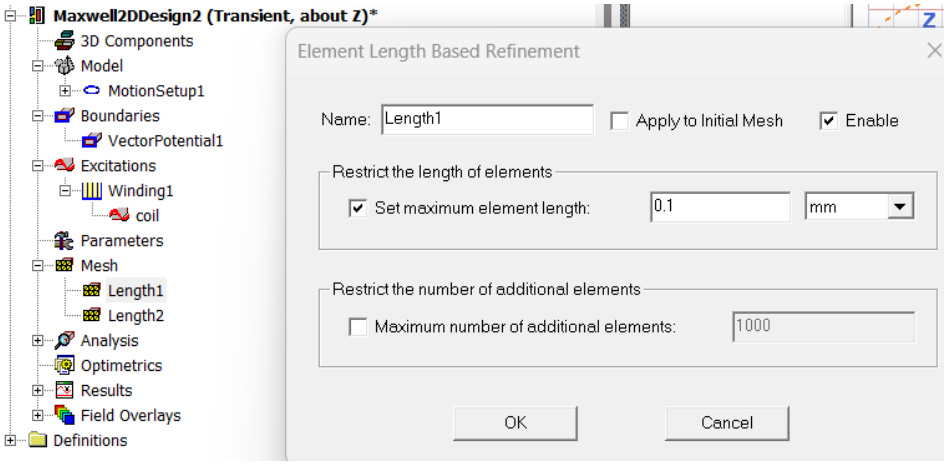
Şekil 4.3. Hareket Bandının Tanımlanması

Manyetik kuvveti oluşturan bobin ile ilgili bobin malzemesini bakır, sarım sayısını 120 spir olarak tanımlanmıştır. Bobin ile ilgili tasarım şartları girilirken başlangıç akımı 0 olarak seçilir (Şekil 4.4).



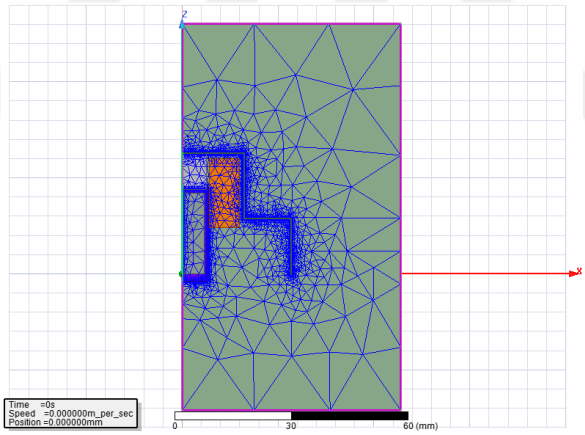
Şekil 4.4. Bobin tanımlanması

Analize konu olan model içerisinde yer alan tüm temel yapılar, genel olarak modelin ağ yapısı (mesh) olarak tanımlanır. Mesh oluşturma, analiz sürecinin kritik adımlarından biridir ve bu işlem, yapılacak analiz türüne uygun parametrelerle gerçekleştirilmelidir (Şekil 4.5). Gereğinden fazla sayıda elemana sahip bir ağ yapısı, analiz süresinin uzamasına neden olabilir ve sistem kaynaklarının (işlemci ve bellek) yetersiz kalması durumunda sürecin tamamlanamamasına yol açabilir. Öte yandan, çok az sayıda eleman kullanılarak yapılan bir ağlama işlemi, analiz doğruluğunu düşürerek elde edilecek sonuçların güvenilirliğini azaltabilir (Çoramık 2018).



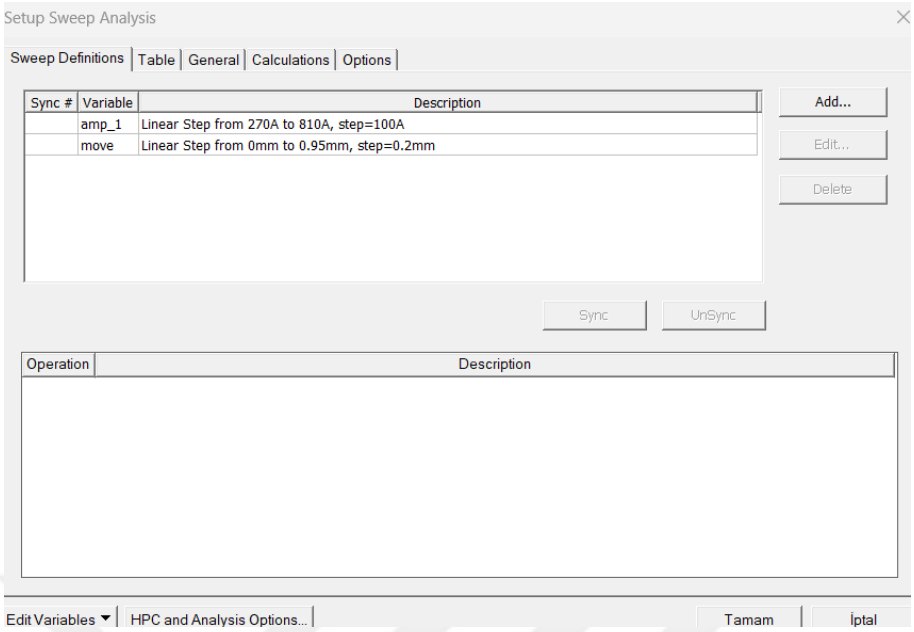
Şekil 4.5. Analiz için mesh tanımlanması

Şekil 4.6'de ağ haritası gözükmektedir. Analiz yapılacak alanda mesh boyutu daha küçük sayısı fazla iken, analizi etkilemeyecek alanlarda mesh boyutu büyük ve mesh sayısı azdır. Bu analizin optimum olmasını sağlar.



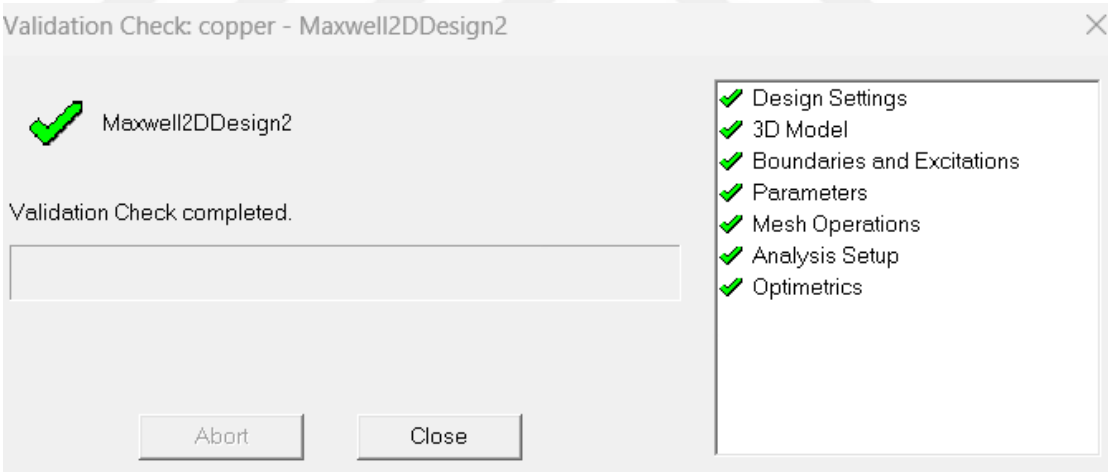
Şekil 4.6. Ağ haritası

Şekil 4.7'da çözüm ayarlarını tanımlarken 0 ile 1 mm arasında olan hava aralığının 0.2 mm'de bir çözülmesi ve analiz edilmesi için ayar tanımlanmıştır. Ayrıca farklı akım değerlerinde sisteme girilerek analizin detaylı olması sağlanmıştır.



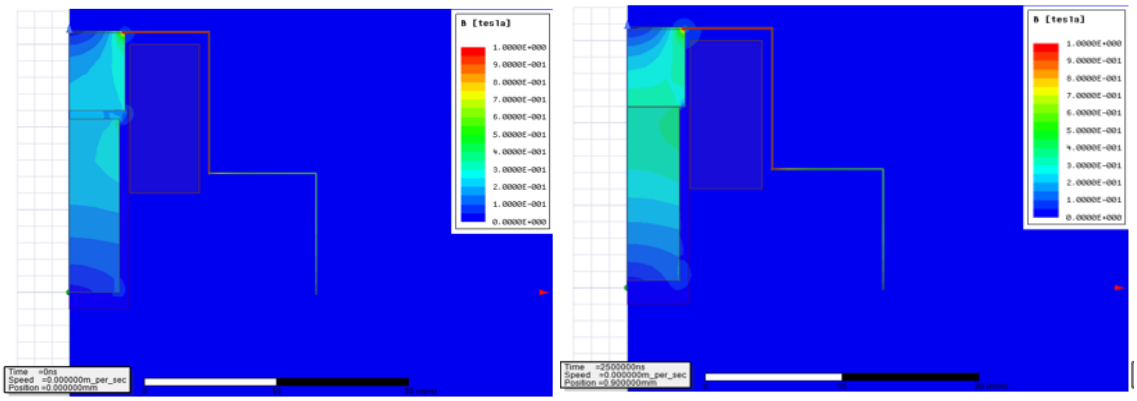
Şekil 4.7. Çözüm ayarları

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi tüm işlem adımlarının doğrulanması yapılır. Tüm işlem adımları uygun ise analiz başlar.



Şekil 4.8. Geçerlilik doğrulaması

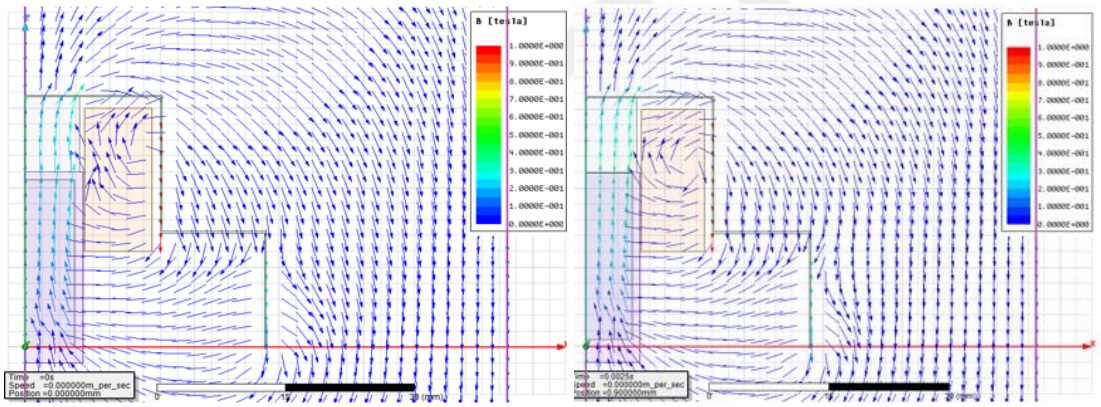
Modellenen korna manyetik mekanizmasının ANSYS/Maxwell programındaki analiz sonuçlarından; manyetik alan haritası şekil 4.9'da verilmiştir. Korna 0 ms de iki pim arasındaki mesafe maksimum iken yapılan analizdir. Bu analizde korna manyetik akı yoğunluğunun pimler arası mesafe en uzak iken (1mm) ve en yakın iken 0 mm t=2.5ms iken manyetik akı yoğunluğunun görülmesidir. Bu analizde pimler arasındaki mesafe en yakın konumda iken manyetik akı yoğunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür.



a) t=0 ms **b)** t=2.5 ms

Şekil 4.9. Manyetik akı yoğunluğu

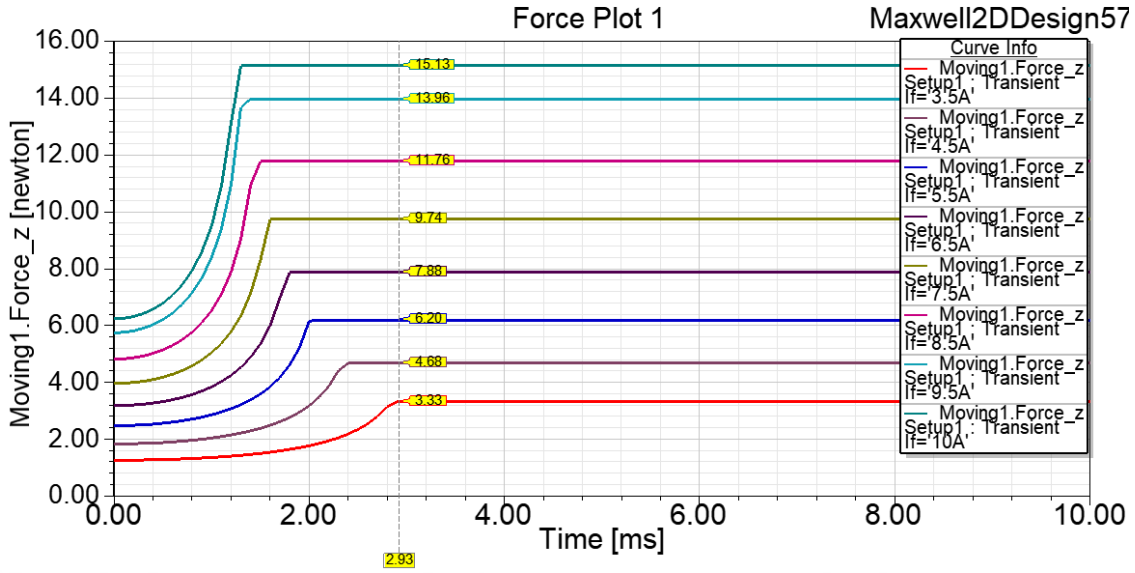
Şekil 4.10'da manyetik alan çizgilerinin bobine göre ilerlediği ve genel dağılımı gösterilmiştir.



a) t=0 ms **b)** t=2.5 ms

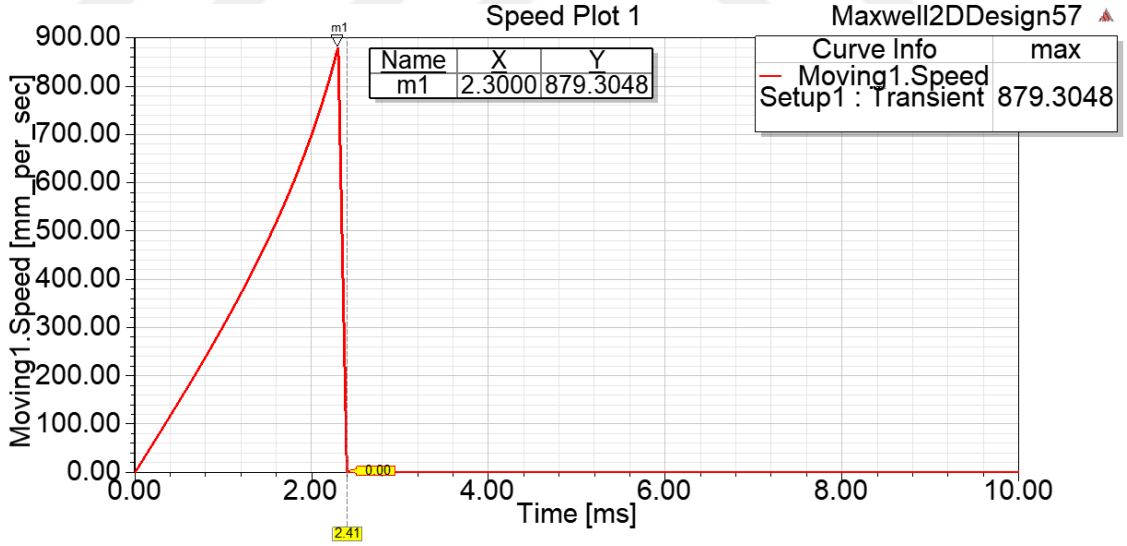
Şekil 4.10. Manyetik alan çizgileri

Şekil 4.11'de analiz sonucunda kuvvetin zamana bağlı ve akıma göre değişimi görülmektedir. Bobin teli üzerinden geçen akım artıkça diyaframa uygulanan kuvvet artmaktadır. Aynı şekilde diyafram nüveye yaklaştığında diyafram üzerine uygulanan kuvvet artmaktadır. Hava boşluklarının çok olması ve manyetik alanın kılavuzlanması için takip ettiği manyetik akı yollarıyla çevrili olmadığı için korna için kayıp oluşmaktadır.



Şekil 4.11. Kuvvetin zamana bağlı değişimi

Bobinin pime uyguladığı manyetik kuvvet etkisi ile pim ve diyaframın hareket hızı gösterilmiştir (Şekil 4.12).



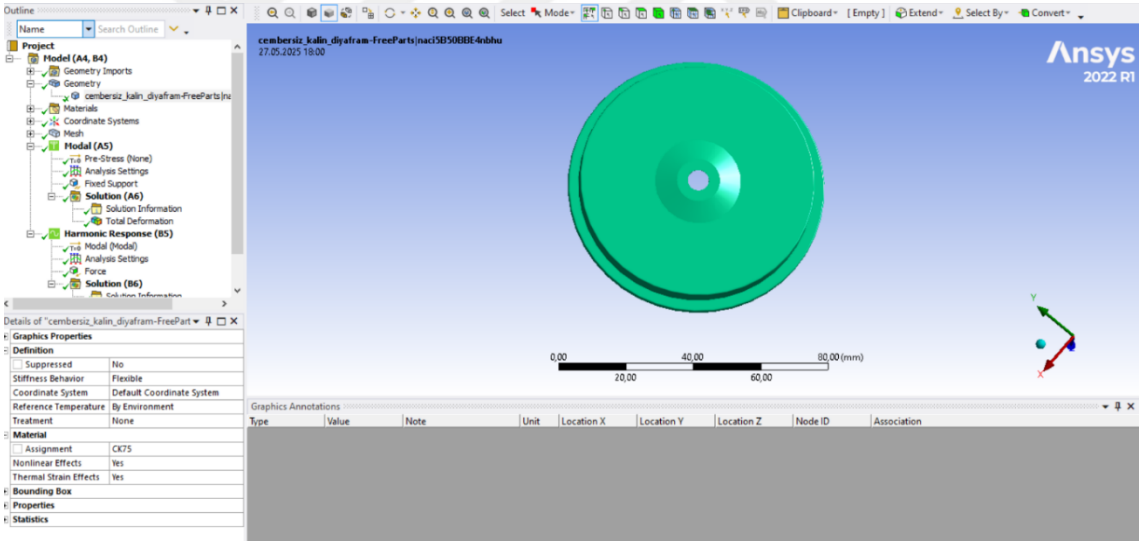
Şekil 4.12. Diyaframın Zamana Bağlı Hareket Hız Eğrisi

4.2. ANSYS Workbench Ortamında Modal–Harmonik–Akustik Analiz Adımlarının Açıklaması

Bu çalışmada, yapısal titreşimlerin oluşturduğu ses etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla çok aşamalı bir sayısal analiz süreci gerçekleştirilmiştir. ANSYS Workbench platformu kullanılarak sırasıyla Modal, Harmonik ve Akustik analizleri birbirine bağlı şekilde uygulanmıştır. Bu analizler, yapıdan kaynaklanan mekanik titreşimlerin çevreye yaydığı ses üzerindeki etkilerini tahmin etmeye olanak tanımaktadır.

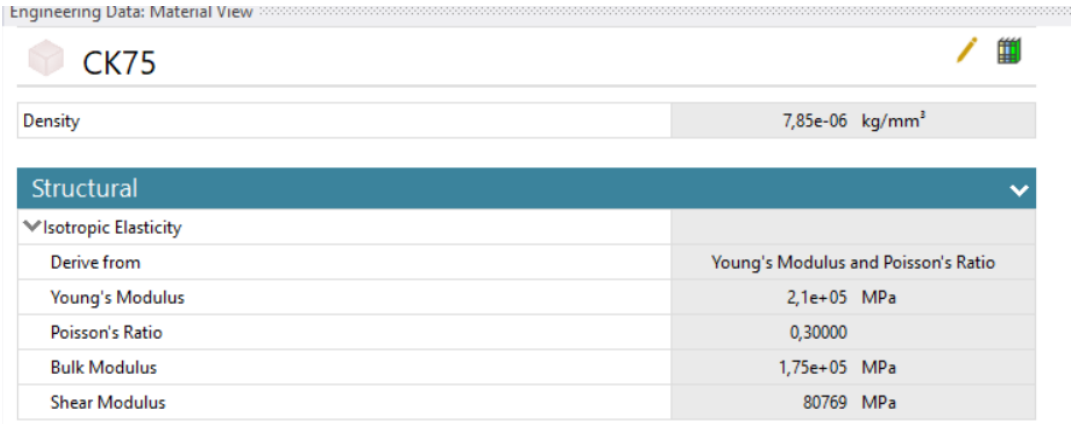
4.2.1. Modal Analiz

İlk adımda yapı üzerindeki doğal titreşim modlarının ve frekanslarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bunun için öncelikle analiz yapılacak geometrik model korna diyaframı sisteme tanıtılmıştır (Şekil 4.13).



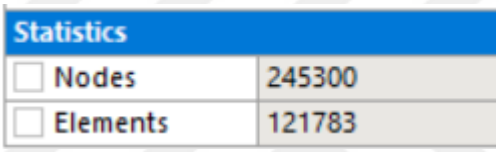
Şekil 4.13. Diyaframın modele aktarılması

Diyafram malzemesi Ck75 olup malzeme özellikleri (elastisite modülü, yoğunluk vb.) tanımlanmıştır. Şekil 4.14'deki gibi gösterilmiştir.



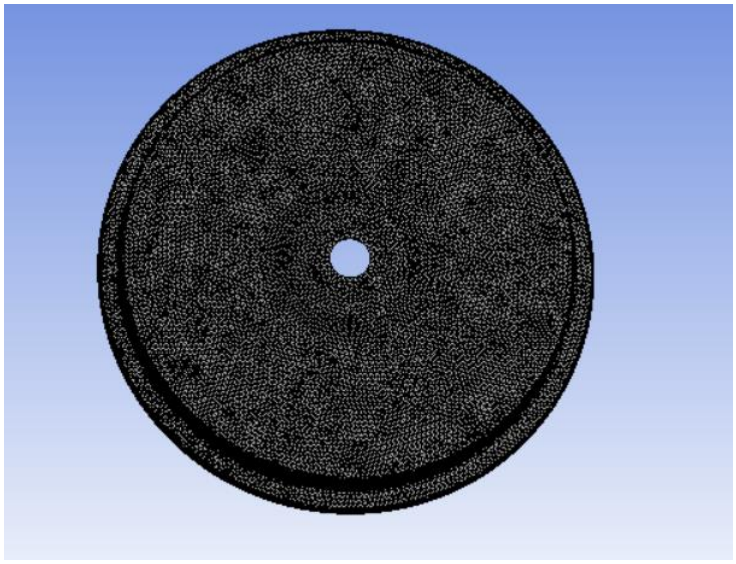
Şekil 4.14. Malzeme Özellikleri

Daha sonra ağ yapılandırması (mesh) gerçekleştirilmiş olup şekil 4.15 ve 4.16'de gösterilmiştir.



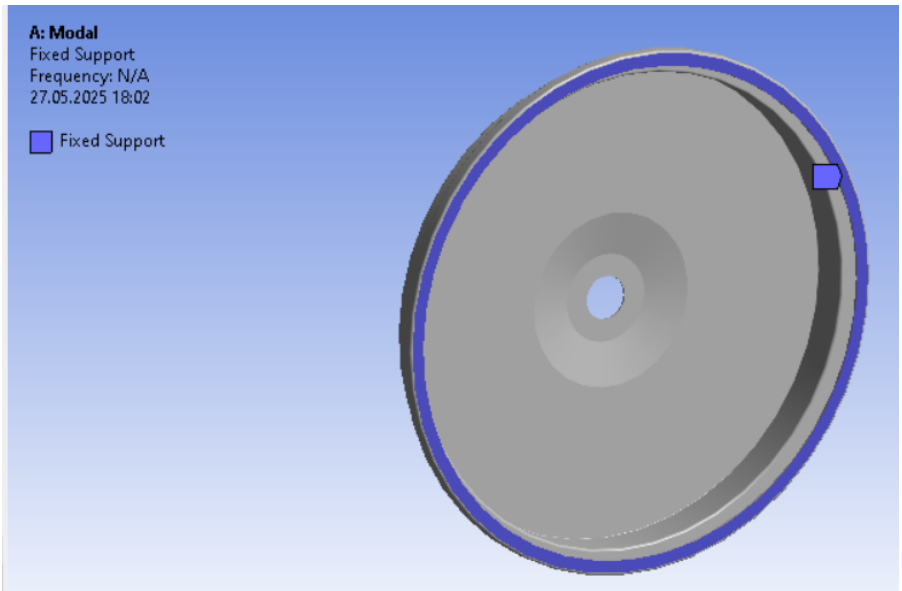
Şekil 4.15. Mesh ayarları

Sonlu elemanlar yönteminde güvenilir sonuçlar elde edebilmek için uygun eleman türünün seçilmesi ve yeterli sayıda eleman kullanılması önemlidir. Eleman boyutlarının, analiz yapılan alandaki değişimleri doğru şekilde yansıtacak kadar küçük olması gerekir. Mesh ayarları yapılırken eleman sayısı ne kadar fazla olursa sonucumuz o kadar doğru olur. Eleman sayısı arttıkça çözüm süresi arttığından optimum eleman sayısı deneme yapılarak bulunmaktadır. Bu noktada ağdan bağımsız mesh ataması yapılır. Bu demektir belirli bir eleman sayısından sonra sonuçlar arasında fark çok minimum düzeyde olduğu için mesh sayısını arttırmayı durdurup o analiz için optimum meshi tanımlamaktır. İlk aşamada kaba mesh atıp modal analiz sonuçları incelenir daha sonra eleman sayısı arttırılarak orta bir mesh atılır. Sonrasında sık mesh atılır orta mesh ve sık mesh arasında belirgin bir fark yok ise orta mesh kabul edilir. Bu analizde eleman sayısı 121.783 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Diyafram Mesh Ağ Yapısı

Mesh ayarlarından sonra sınır koşulları belirlenir. Sınır koşulları belirlenirken parçanın çalışma koşulları göz önünde bulundurularak parçanın sabitleme yüzeyi, hareket yüzeyi ve analiz ayarları bu işlem adımında yapılmıştır. Şekil 4.17'de göründüğü gibi diyaframın sabitleme yüzeyi belirlenmiştir. Diyafram kenarlardan sabitlenip orta kısmından pim yardımıyla hareket etmektedir.



Şekil 4.17. Sabitleme yüzeyinin belirlenmesi

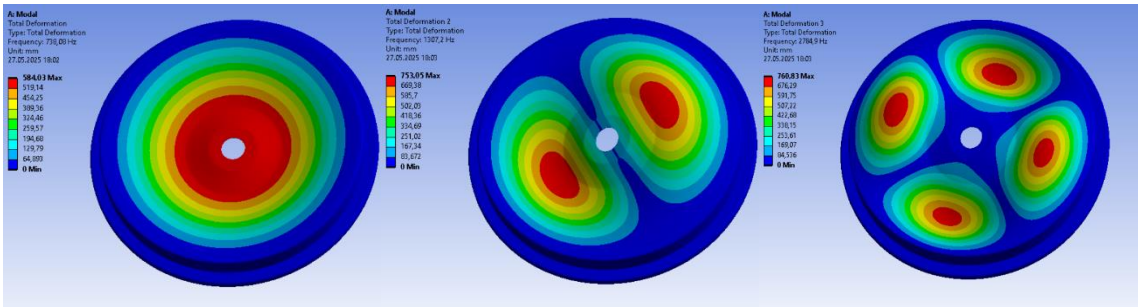
Ardından belirlenen mod sayısına göre çözüm işlemi başlatılmış ve yapıdaki doğal frekanslar ile mod şekilleri elde edilmiştir (Şekil 4.18).

Tabular Data

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	738,08
2	2.	1307,2
3	3.	1307,3
4	4.	2784,9
5	5.	2785,
6	6.	3367,6
7	7.	3537,3
8	8.	3537,4
9	9.	4125,9
10	10.	4126,9

Şekil 4.18. Parçanın doğal frekansı

Şekil 4.19'da modal analiz sonucu parçanın doğal frekansı ve çözüm kısmında toplam deformasyonu ve parçanın doğal frekansı farklı modlarda bulunmuştur. Malzemenin doğal frekansı gösterilmiştir. Bu veriler, bir sonraki adım olan frekans cevabı analizine aktarılmıştır. Modal analiz sonucu parçanın doğal frekansı bulunmuştur. Şekil 4.18'da malzemenin doğal frekansı gösterilmiştir. Bu veriler, bir sonraki adım olan frekans cevabı analizine aktarılmıştır. Modal analiz sonucunda bulunan ilk üç doğal frekans için malzemenin davranışları Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Maksimum yer değiştirme ve titreşim yoğunluğu oluşan noktalar analiz sonucu elde edilmiştir.



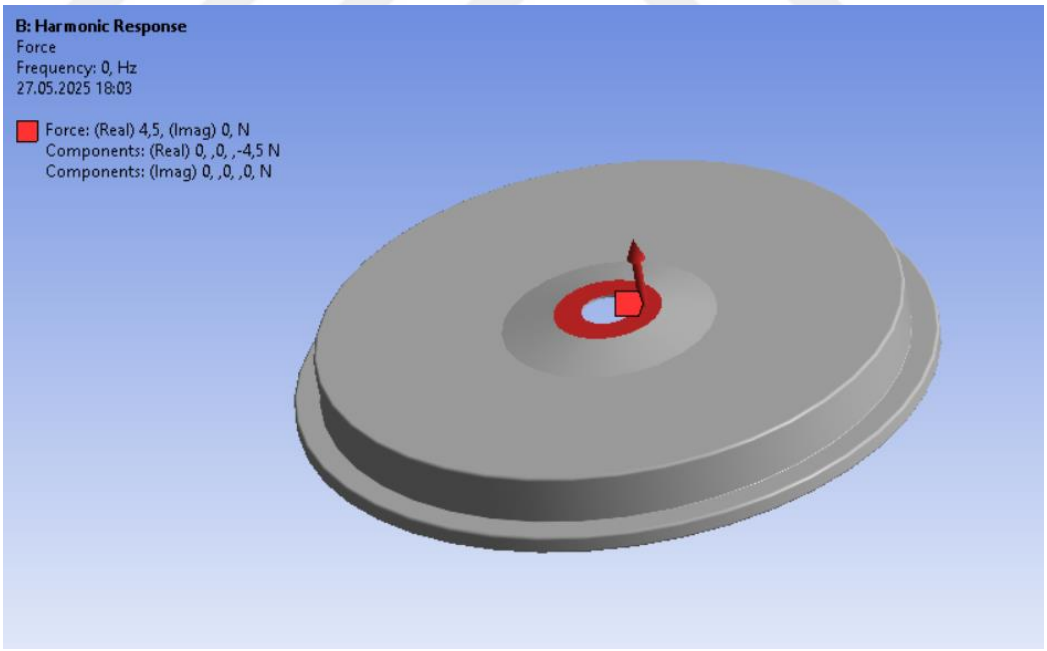
Şekil 4.19. Doğal Frekanslar ve Total Deformasyon

4.2.2. Frekans Cevabı (Harmonic Response) Analizi

Yapıların periyodik kuvvetlere maruz kaldığında gösterdiği dinamik davranışı incelemek amacıyla frekans cevabı analizi uygulanmaktadır. Bu analiz, belirli bir frekans aralığında değişen zamana bağlı yüklerin yapı üzerindeki titreşim etkisini hesaplamak için kullanılmaktadır. Böylece yapının hangi frekanslarda rezonansa girme eğiliminde olduğu, hangi bölgelerde maksimum yer değiştirme veya hız oluştuğu tespit edilebilmektedir.

Analiz kurgusunun temelleri

Frekans cevabı analizinde yapı, belirli frekanslarda tekrarlayan bir dış kuvvet etkisine maruz bırakılır. Bu dış etki sinüzoidal olarak tanımlanır. Bunun sebebi korna içindeki kontakların 1 saniyede frekans sayısınca açılıp kapanmasını simüle etmektir. Yapıdaki tepkiler ise frekansa bağlı olarak değişkenlik gösterir. Düşük frekanslarda sistemin daha kararlı bir yanıt verdiği, rezonans frekanslarında ise genliklerin hızlıca arttığı gözlemlenir. Şekil 4.20'de harmonik analiz için kuvvet tanımlaması yapılmıştır.



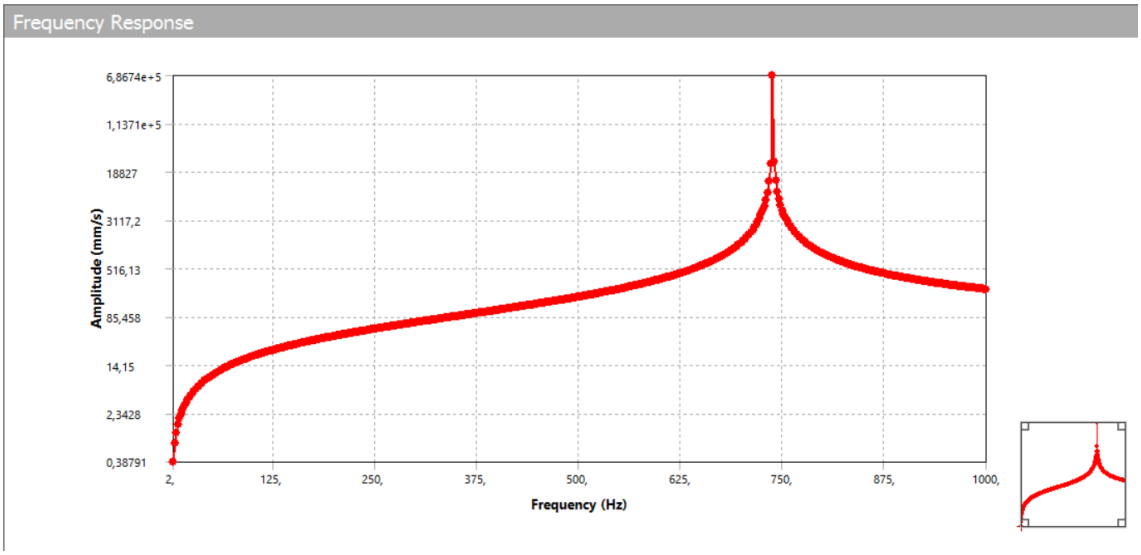
Şekil 4.20. Harmonik Analiz Ayarları

Bu analiz türü, zamana göre çözümleme yapan zaman alanında analizlerinden farklı olarak doğrudan frekans alanında da çalışır. Bu sayede her bir frekans noktasında sistemin

kararlı yanıtı doğrudan elde edilebilir ve zamana bağlı çözümlerle kıyaslandığında çok daha hızlıdır.

ANSYS Workbench ortamında uygulama adımları

Modal analiz ile elde edilen mod şekilleri ve doğal frekanslar, frekans cevabı analizinin temelini oluşturur. Bu nedenle analiz süreci, modal analizden gelen verilerin aktarılmasıyla başlar. Yapıya etkiyen harmonik yük tanımlanır. Bu kuvvet frekansa göre değişen bir formda girilir. Kuvvet uygulama yönü, büyüklüğü ve uygulama noktası bu aşamada korna çalışma prensibi ve modeli dikkate alınarak belirlenmiştir. Kuvvet büyüklüğü seçilirken Ansys Maxwell de çıkan sonuçlar dikkate alınmıştır. Analiz ayarları kısmından frekans aralığı ve adım sayısı çözümleme yapılacak frekans aralığı modal analizden gelen sonuçlara göre belirlenir. Çözüm sonrası frekans cevapları bulunmuştur. Bu çözümlere bağlı olarak diyafram üzerindeki frekans cevapları belirlenmiştir. İlgili grafikler yardımıyla rezonans bölgeleri ve kritik frekanslar belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda diyafram üzerindeki her bir nokta ilgili frekans değerlerinde nasıl hangi hızlarda titreşiyor. Burada çıkan sonuçlar bir sonraki akustik analizde girdi olarak analizde yer alacaktır. Analiz sonuçlarına göre rezonans frekansı Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Rezonans Frekansı

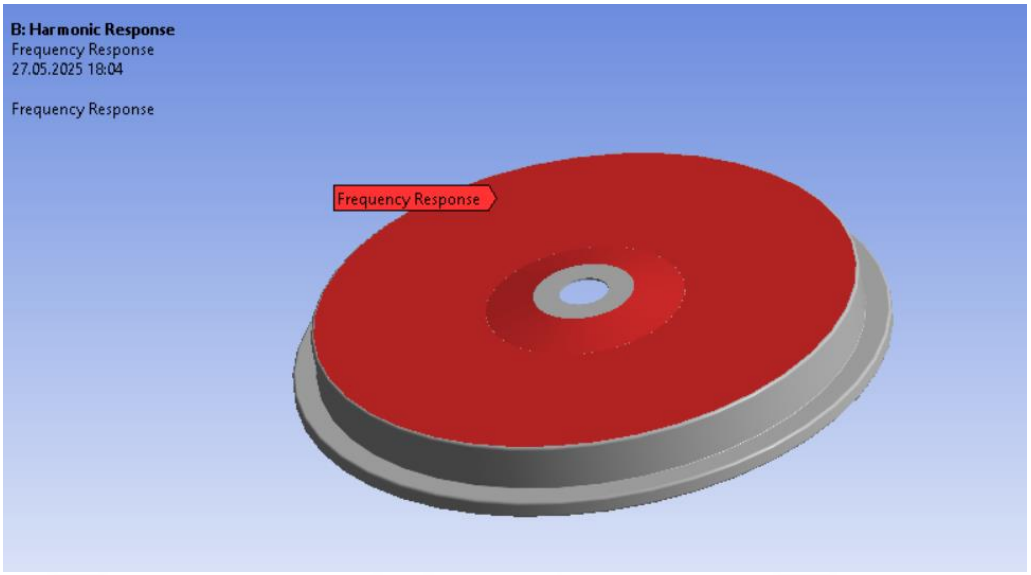
4.2.3. Harmonik Akustik Analizi

Harmonik akustik analizi, mekanik sistemlerin belirli frekanslarda oluşturduğu titreşimlerin çevreye yaydığı ses alanını hesaplamaya yönelik bir yöntemdir. Bu analiz türü, özellikle periyodik (harmonik) yapısal uyarıların neden olduğu ses dalgalarının modellenmesi ve ses basıncı seviyelerinin (SPL – Sound Pressure Level) değerlendirilmesi amacıyla kullanılır. Analiz, frekans domeinin de gerçekleştirilir ve sistemin her bir frekanstaki kararlı akustik tepkisini ortaya koyar.

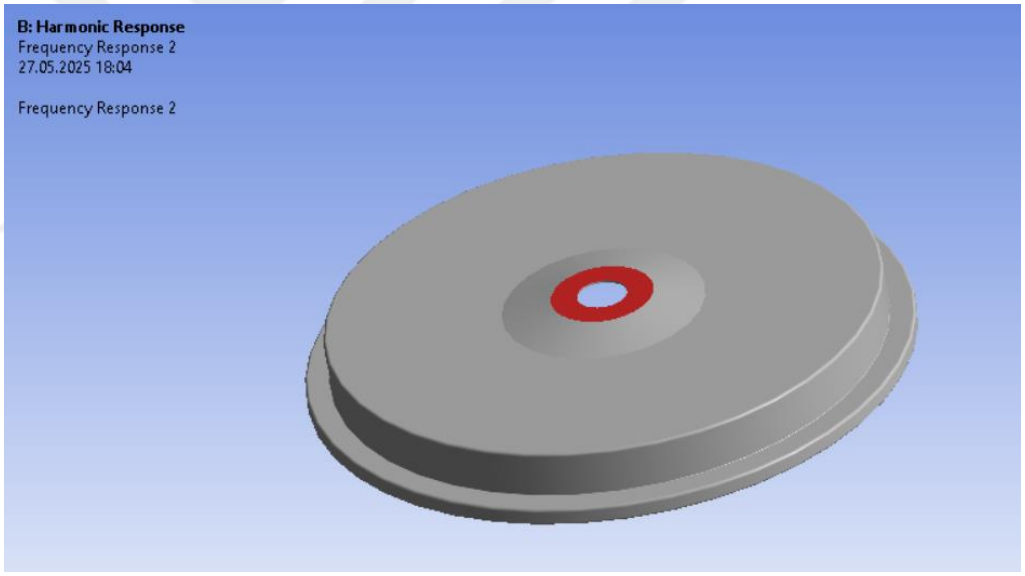
Yapısal bir sistem üzerinde oluşan titreşim hareketleri, çevresindeki akustik ortama mekanik enerji aktararak basınç dalgalarına neden olur. Bu dalgaların büyüklüğü, dağılımı ve frekans içeriği; yapının titreşim karakteristiklerine, malzeme özelliklerine, çevre koşullarına ve uygulanan uyarıya bağlı olarak değişir.

Harmonik akustik analiz, bu etkileşimi çözümlemek için yapı-akustik sınır koşullarını kullanarak belirli bir frekans aralığında ses basıncı dağılımını sayısal olarak hesaplar. Genellikle hava ortamı içerisinde çözüm yapılır, ancak farklı akustik ortamlara da uyarlanabilir.

Analize yapının çevresine, sesin yayılabileceği bir akustik hacim tanımlanarak başlanır. Bu hacme enclosure denir. Bu hacim esasında hava ortamıdır ve bu analizde enclosure tasarımı deney yapılacak akustik odanın gerçek boyutlarına göre tasarlanmıştır. Akustik ortam için malzeme olarak hava tanımlanır; yoğunluk değeri sisteme girilir. Aşağıda fotoğrafta enclosure tasarımı mevcuttur. Daha sonra akustik alan için mesh oluşturulur. Ağ (mesh) oluşturulurken çözüm yapılacak en yüksek frekansa göre eleman boyutu belirlenmiştir. Mesh yapısı tanımlandıktan sonra sınır koşullarının uygulanarak bir önceki aşamada yapılan Frekans cevabı Analizi'nden elde edilen yapısal titreşim verileri bu adımda sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Bu, titreşen yüzeyin "vibrating surface" tanımlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de parçada frekans cevabı verecek yüzey tanımlanması gösterilmiştir.

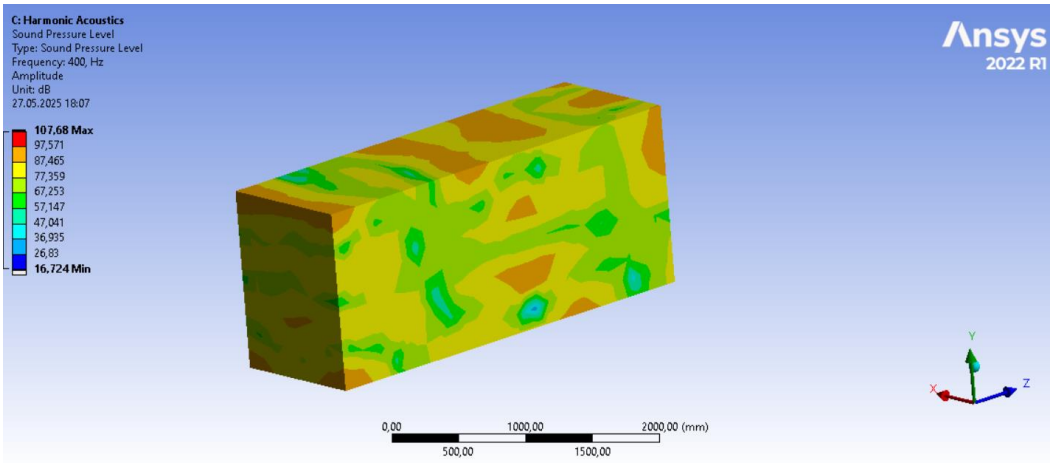


Şekil 4.22. Harmonik analizde yüzeyin tanımlanması



Şekil 4.23. Harmonik analizde ikinci yüzeyin tanımlanması

Bir sonraki aşamada frekans aralığı belirlenmiştir. Akustik çözüm yapılacak frekans aralığı ve çözüm adım sayısı girilmiştir. Bu adımda, frekans cevabı analizinden gelen frekans aralığı girilmiştir. Hesaplamalar sonucunda frekansa bağlı olarak ses basıncı dağılımı elde edilmiştir. Bu dağılım, akustik hacim içinde ses şiddeti seviyelerinin belirlenmesini sağlamıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Harmonik analiz sonuçları

4.3. Prototip ve Test Aşaması

Bu çalışmada analizi yapılan korna modeli, üretilerek akustik laboratuvarda Şekil 3.30'da gösterilen test düzeneği kullanılarak test edilmiştir. Tasarım, hava aralığı, malzemeler ve bobin ile ilgili parametreler analiz ayarları ile birebir aynı kornaları prototip olarak üretilerek akustik laboratuvarda test edilmiştir.

Akustik laboratuvarda yapılan test işlemleri sırasında korna 30 kg'lık bir kütleye sabitlenmiş olup 2 metre uzaklığa mikrofon yerleştirilmiştir (Pejakušić, Liermann-Zeljak et al. 2022). Test düzeneği ve ekipmanları şekil 4.25'de gösterilmiştir. Güç kaynağı 13 V değerine ayarlanarak akım, frekans ve ses şiddeti(desibel) parametreleri kaydedilmiştir.



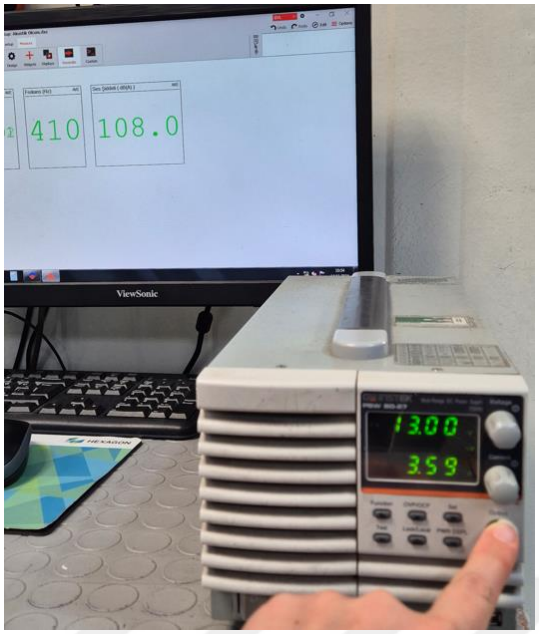
Şekil 4.25. Korna test ekipmanları

Güç kaynağı 13V'a ayarlanarak test yapılmıştır. Tablo 4.1 de akustik test sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Akustik Test Sonuçları

Voltaj Değeri	Frekans Değeri	Ses Basınç Seviyesi	Akım
13V	410 Hz	108 dB(A)	3.59 Amper

Test sonucuna göre imalatı yapılan prototip korna sisteminin bu uyarı geriliminde 410 Hz Frekans, 108 dB(A) Ses şiddeti, 3.59 Amper akım değerleri olduğu ölçülmüştür (Şekil 4.26).



Şekil 4.26. Korna akustik test sonuçlar

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Ansys Maxwell programında korna bobinin oluşturduğu manyetik akı, manyetik alan çizgilerinin dağılımı, manyetik kuvvet ve tepki süresi bulunmuştur. Şekil 4.11'de analiz sonucunda kuvvetin zamana bağlı ve akıma göre değişimi görülmektedir. Bobin teli üzerinden geçen akım artıkça diyaframa uygulanan kuvvet artmaktadır. Aynı şekilde diyafram nüveye yaklaştığında diyafram üzerine uygulanan kuvvet artmaktadır. Akım değeri 3.5 A-10 A arasında değişirken, kuvvet değeri 3.5 N-15.5 N arasında değişmektedir.

Ansys Maxwell analizi sonucunda bulunan bobin kuvveti harmonik akustik analizinin girdisi olmuştur. Harmonik akustik analizi gerçekleştirebilmek için modal analiz ve frekans cevabı analizi yapılmıştır. Modal analiz sonucunda diyaframın doğal frekansı belirlenmiş olup, sonucunda bulunan ilk üç doğal frekans için malzemenin davranışları Şekil 4.19'te gösterilmiştir. Maksimum yer değiştirme ve titreşim yoğunluğu oluşan noktalar analiz sonucunda elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda frekans arttıkça malzeme üzerindeki total deformasyonun arttığı gözlemlenmiş olup bu deformasyon artışının tasarım aşamasında dikkate alınması önerilir.

Frekans cevabı analizinde çözüm sonrası frekans cevapları bulunmuştur. Bu çözümlere bağlı olarak diyafram üzerindeki frekans cevapları belirlenmiştir. Analiz sonucunda rezonans frekansı Şekil 4.21'de 750 Hz olarak tespit edilmiştir. Bu analiz sonucunda diyafram üzerindeki her bir nokta ilgili frekans değerlerinde nasıl hangi hızlarda titreşiyor elde edilmiştir.

Harmonik akustik analiz sonucunda, SPL (dB(A) cinsinden haritaları oluşturulmuştur. Analiz sonucunda kornanın 400 Hz'de 107.68 dB(A) ses verdiği görülmüştür.

Prototip kornanın akustik analizi sonucunda 108 dB(A) ses verdiği görülmüş olup bu doğrultuda yapılan tüm tasarım ve analiz girdilerinin birbirleri ile örtüştüğü görülmüştür. Bu analiz yöntemi sayesinde, kornanın oluşturduğu ses seviyesi önceden öngörülebilir hale gelmiştir. Ayrıca bu analiz, fiziksel prototip oluşturulmadan önce sanal ortamda değerlendirme ve tasarım yapılmasına imkân tanıyarak zaman, malzeme ve maliyet tasarrufu sağlayabilir.

KAYNAKLAR

ANSYS. from https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/mech_acous/mech_acous_harmonic_acoustics.html.

Bıçakçı, S. and H. Çıtak (2023). "Yeni bir manyetik fırlatıcı tasarımı ve analizi: Bir ANSYS Maxwell uygulaması." Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi **25**(2): 472-482.

Bonfiglio, P. and F. Pompoli (2017). "A numerical approach for the analysis of car snail horn performance." Noise Control Engineering Journal **65**(3): 147-157.

Bottauscio, O., M. Chiampi and A. Manzin (2003). "Diffusion and hysteresis in axisymmetric electromechanical devices." IEEE transactions on magnetics **39**(2): 990-997.

Cheng, D. K. (1989). Field and wave electromagnetics, Pearson Education India.

Çoramık, M. (2018). Örnek Bir Analiz Üzerinden Ansys Maxwell Kullanımında Karşılaşılan Güçlüklere Detaylı Çözüm Önerileri. International Necatibey Educational and Social Sciences Research Congress.

Duzgun, E. (2015). Ağır taşıt, elektro-pnömatik fren valfi için oransal solenoid tasarımı ve analizi, Bursa Uludag University (Turkey).

Düzgün, E. and G. Şefkat (2024). "The Design and Analysis of a Proportional Solenoid with Experimental Validation of Static and Dynamic Behavior." Applied Sciences **14**(24): 11990.

Griffiths, D. J. (2023). Introduction to electrodynamics, Cambridge University Press.

Kamış, Z. (2005). Supaplar için elektromekanik eyleyici tasarımı ve denetiminin araştırılması, Bursa Uludag University (Turkey).

Kang, H.-S., T. Shin, S.-K. Lee and D. C. Park (2015). "Design optimization of a dual-shell car horn for improved sound quality based on numerical and experimental methods." Applied Acoustics **90**: 160-170.

Medè, C., A. Doria, P. Munaretto and J. SG Valdecasas (2019). "Multi-physics phenomena influencing the performance of the car horn." Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control **38**(2): 544-557.

Özdemir, M. (2022). "Elektromanyetik kavramaların tasarım parametrelerinin analitik ve nümerik yöntemlerle optimizasyonu."

Pejakušić, D., Y. Liermann-Zeljak and H. Glavaš (2022). "APPLICATION OF ISO–IEC 80000–6: 2008 IN THE DESCRIPTION OF TECHNICAL SYSTEMS." Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara **20**(2): 111-115.
Roters, H. C. (1941). Electromagnetic devices, John Wiley & Sons, Inc.

Sadiku, M. N. and S. Nelatury (2001). Elements of electromagnetics, Oxford university press New York.

Setrekli, G., M. Koral and V. D. Çayır "Araç Kornalarında Sıcaklık Etkisi ve Kontrolü Temperature Effect and Control in Vehicle Horns."

Sim, J.-H., D.-Y. Kim, S.-I. Kim and J.-P. Hong (2017). "Analytical electromagnetic modeling and experimental validation of vehicle horn considering skin effect in its solid cores." IEEE Transactions on Magnetics **53**(6): 1-4.

Smith, D., M. Jenkins and D. Howe (1994). "The transient time domain analysis of non-linear electro-mechanical systems." IEEE transactions on magnetics **30**(5): 3260-3263.

Şefkat, G. (2000). "Elektromekanik sistemlerin optimum tasarımı ve denetiminin incelenmesi."

Şefkat, G. (2011). "BİR ELEKTROMEKANİK AYGITIN STATİK VE DİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI." Pamukkale University Journal of Engineering Sciences **8**(3).

Şefkat, G. and İ. Yüksel (2003). "BİR ELEKTROMEKANİK SİSTEMİN STATİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ."

Topçu, E. E., Z. Kamış and İ. Yüksel (2008). "Simplified numerical solution of electromechanical systems by look-up tables." Mechatronics **18**(10): 559-565.

Uçar, S. (2019). "Maxwell'in Alan Denklemleri Üzerine Bir Değerlendirme." Felsefe Arkivi(51): 261-270.

Ulaby, F. T. (2004). Fundamentals of applied electromagnetics, Pearson.

Yıldız, İ. (2013). Elektromanyetik Silah Sistemlerinin Incelenmesi Ve Bir Uygulama Örneği, Marmara Universitesi (Turkey).

Yuksel, I. (1981). An investigation of electro-hydraulic floating disc switching valves, University of Surrey (United Kingdom).