

MIKNATIS KUVVETLERİ İLE ELEKTRODİNAMİK SÜSPANSİYON TASARIMI

Oktaý Beytekin^{1, a)}, Tolga Yiğit Duman^{1, b)}, Abdulsamet Eskiyaýla^{1, c)}, Nurhan Gürsel Özmen^{1, d)}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü TRABZON

^{a)}beytekinoktay61@gmail.com , ^{b)}dumantolgayigit@gmail.com ,
^{c)}sameteskiyaýla@gmail.com, ^{d)}gnurhan@ktu.edu.tr

Bu çalışmada geliştirilen elektrodinamik süspansiyon sistemi, klasik yay, hava veya yağ temelli süspansiyon sistemlerinden farklı olarak, NS kutup diziliminde yerleştirilen mıknatıslar aracılığıyla oluşan manyetik kuvvetlerden yararlanmaktadır. Mıknatıslar arasındaki kuvvet mıknatısların arasındaki mesafenin değişmesiyle sisteme yüksek dinamik tepki yeteneği kazandırmakta, böylece sıcaklık, zemin ve yük değişimlerine etkin şekilde yanıt verebilmektedir. Sistem, fiziksel ve matematiksel olarak modellenmiş, Ansys Elektronik ile manyetik kuvvet analizleri yapılmış, Solidworks ortamında tasarlanarak 3D yazıcı ile prototip üretilmiş ve test edilmiştir. Bu süreçler sonunda ortaya çıkan sistem, özellikle engebeli arazilerde sürüş konforunu artırmakta, off-road araçlar, motosikletler, yük taşıyıcılar ve binek otomobiller gibi birçok alanda yaygın kullanım potansiyeli sunmaktadır. Geliştirilen yapı, gelecekte araç süspansiyon teknolojisinde önemli bir alternatif olabilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Süspansiyon Sistemi, Mıknatis, Elektrodinamik, Manyetik Kuvvet.

ELECTRODYNAMIC SUSPENSION DESIGN WITH MAGNETIC FORCES

ABSTRACT

In this study, a novel electrodynamic suspension system has been developed, offering a significant alternative to conventional spring-, air-, or oil-based systems by utilizing magnetic forces generated through magnets arranged in a north-south pole configuration. The magnetic force between the magnets varies with the inverse fourth power of the distance, endowing the system with a high degree of dynamic response capability to effectively adapt to changes in temperature, terrain, and vehicle load. The system has been physically and mathematically modeled, and the magnetic interactions have been analyzed using Ansys Electronics. Based on these analyses, the suspension geometry was designed in SolidWorks, and a prototype was fabricated using 3D printing and subsequently tested. This five-stage development process resulted in a system that enhances ride comfort, particularly in rough terrain, and exhibits high potential for widespread application in off-road vehicles, motorcycles, cargo transporters, and passenger cars. The proposed suspension structure is considered a promising candidate for future advancements in vehicle suspension technology.

Keywords: Suspension System, Magnet, Electrodynamic, Magnetic Force

1. GİRİŞ

Süspansiyon sistemleri, kara taşıtlarının yol tutuşunu iyileştiren ve yol yüzeyindeki düzensizliklerin araç kabinine iletilmesini

azaltarak konfor sağlayan temel mekanik sistemlerdir. Günümüzde kullanılan konvansiyonel süspansiyon sistemleri genellikle yay, amortisör ve sönümleyici gibi bileşenlerden oluşmakta; bu bileşenler aracın

sürüş dinamiklerini sınırlı bir hassasiyetle kontrol etmektedir. Özellikle arazi şartlarının zorlu olduğu uygulamalarda, klasik sistemlerin tepkime süresi ve sönümlenme kapasitesi yetersiz kalabilmektedir.[1]

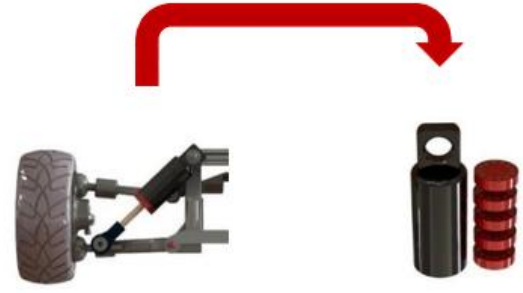
Bu çalışmada, klasik sistemlere alternatif olarak geliştirilen elektrodinamik süspansiyon sistemi ele alınmıştır. Sistem, herhangi bir aktif enerji girişine ihtiyaç duymadan, NS kutup diziliminde yerleştirilen daimî mıknatıslar aracılığıyla süspansiyon kuvveti üretmektedir. Mıknatıslar arasındaki manyetik kuvvet, aralarındaki mesafenin dördüncü kuvvetiyle ters orantılı olarak değişmekte ve bu durum, sistemin yüksek hassasiyetle çalışmasına olanak tanımaktadır [2]. Çalışmanın amacı, bu yenilikçi süspansiyon sisteminin teorik modellemesini yapmak, ANSYS Maxwell yazılımı ile manyetik kuvvet analizlerini gerçekleştirmek ve geliştirilen sistemin deneysel doğrulamasını yaparak performansını değerlendirmektir [3]. Elde edilen bulgular, elektrodinamik süspansiyon sisteminin hem mühendislik hem de çevresel açıdan gelecek vadeden bir teknoloji olduğunu ortaya koymaktadır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada geliştirilen elektrodinamik süspansiyon sisteminin performansı dört temel aşamada değerlendirilmiştir: süspansiyon sisteminin tasarlanması, mıknatıslar arasında manyetik kuvvetlerin bilgisayar destekli olarak analiz edilmesi, elde edilen analiz verilerinin deneysel yöntemlerle doğrulanması ve sistemin dinamik tepkisinin sönüm oranı üzerinde etkisinin incelenmesi şeklindedir.

2.1. Elektrodinamik Süspansiyon Sisteminin Tasarlanması

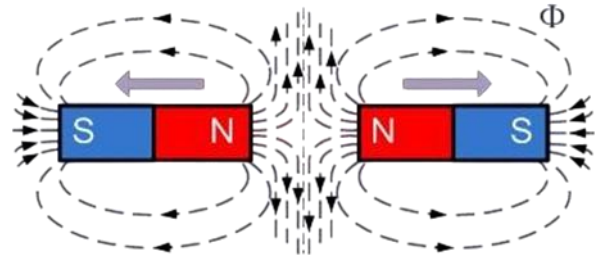
Elektrodinamik süspansiyon sisteminin tasarım süreci, SolidWorks CAD yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Tasarımda, disk yapısı üzerine simetrik olarak yerleştirilmiş kübik neodimyum mıknatıslar (10×10×10 mm) kullanılmış ve sistem, iki disk arasındaki karşılıklı manyetik itme kuvvetine göre modellenmiştir. Bu model Şekil 1.'de verilmiştir. Deney ve düzenekler için 3D yazıcıdan prototip model üretilmiştir.



Şekil 1 Elektrodinamik Süspansiyon Yapısı Örneği

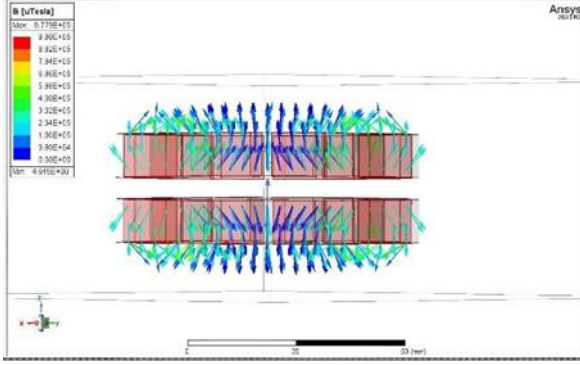
2.2. Manyetik Kuvvet Analizi

Elektrodinamik süspansiyon sistemi, NS kutup dizilimli daimi mıknatıslar kullanarak sönümlenme etkisi yaratmaktadır. Bu bağlamda, sistemde oluşan kuvvetlerin nicel olarak belirlenmesi amacıyla ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak manyetik alan ve kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında 70 mm çapında iki disk kullanılmış ve bir disk üzerine yerleştirilmiş 12 adet kübik neodimyum mıknatıs (NdFeB 35) modellenmiş ve bu mıknatıslar arası mesafe 1 mm ile 9 mm arasında değiştirilerek oluşan kuvvetler hesaplanmıştır. Kuvvetlerin mesafeye bağlı değişimi analiz edilerek, sistemin çalışma karakteristiği ortaya konmuştur. Şekil 2'de, iki mıknatısın manyetik alan çizgilerinin yönelimleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2 Mıknatısların çizgilerinin Manyetik Alan Modellenmesi

Yapılan Ansys Maxwell analizi sonucunda mıknatısların yönlendiği Şekil 3.'te verilmiştir



Şekil 3 Ansys Maxwell İki Disk İçin Mıknatıs Yönlenmesi

Analiz kapsamında iki elektrodinamik disk arasında, mesafeye bağlı olarak oluşan kuvvetler Tablo1’ de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere, mıknatıslar arasındaki mesafenin azalmasıyla mıknatısların birbirine uyguladığı kuvvetler arasında bir artış gözlenmektedir

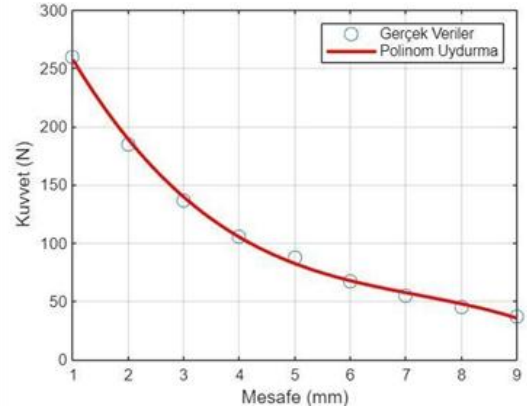
Tablo 1 Elektrodinamik Süspansiyon Sisteminde İki Disk Arasında Mesafe Kuvvet İlişkisi

İki Elektrodinamik Süspansiyon Diski Arasında Mesafe(mm)	İki Elektrodinamik Süspansiyon Diski Arasında Oluşan Kuvvet (N)
9	37,5
8	45
7	55
6	67
5	88
4	106,5
3	137
2	185
1	260

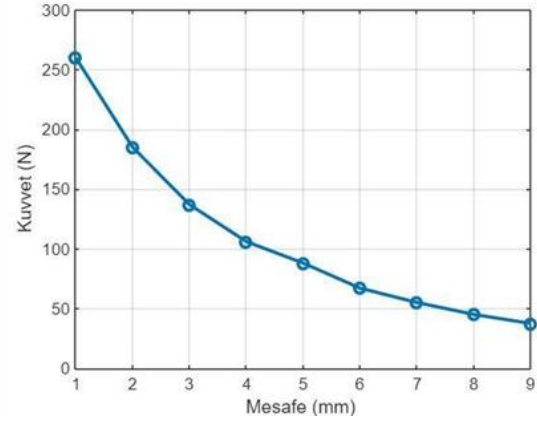
Oluşan bu mesafe kuvvet arasındaki ilişki, eğri uydurma yöntemi ile Şekil 3.’e dönüştürülmüştür. Sonuçta, diskler arasında mesafe azken, uygulanan kuvvet fazla fazla olmakta, diskler arası mesafe arttıkça, kuvvet azalmaktadır. Şekil 4.’teki verilere göre bir denklem oluşturmak için en iyi yöntem, bir eğri uydurma (curve fitting) işlemidir.

MATLAB kullanarak, bu tür bir veri seti için uygun bir polinom ya da üstel fonksiyon türetilir. MATLAB Kodu üzerinden eğrinin uyumlama kodu yazılmıştır.

Matlab fonksiyonu uyumladığı eğri ve gerçek eğri üzerindeki gerçek noktaların gösterimi Şekil 5.’te verilmiştir.



Şekil 4 Mıknatıslar Arasında Kuvvet-Mesafe İlişkisi



Şekil 5 Matlab Eğri Uyumlama ile elde edilen fonksiyon

Eğri uyumlamada oluşan polinom grafiği 3. Dereceden olup eşitlik 1.’de yer verilmiştir.

$$y = p_1 * x^n + p_2 * x^{n+1} + \dots + p_n$$

$$y = a * x^3 + b * x^2 + c * x + d$$

(1)

Matlab üzerinden hesaplanan değerleri eşitlik 1’de yerine koyarak mıknatıs kuvvetini bulmak için mesafeleri kullandığımız oluşan nihai denklemi buluruz. Buradan istenilen mesafede değerler bulunur.

$$y = -0,6044 * x^3 + 13,0732 * x^2 - 103,4891 * x + 348,3889$$

2.3. Elektrodinamik Süspansiyon Sisteminin Tasarlanması

Mıknatıslar, 3 boyutlu yazıcıda imal edilen diskler, N- S kutuplarına uygun olarak dizilmiştir. Devamında diskler diğer parçanın içine yerleştirilmiştir. Üzerinden kuvvet uygulanabilecek diğer çubuk üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra bu sistem bir tartı üzerine yerleştirilmiş ve üzerine farklı ağırlıklar takılarak sistemin ne kadar hareket ettiği hesaplanmıştır. Bu mıknatıs kuvvetlerini bulmak için kurulan test düzeneği Şekil 6.'da verilmiştir.



Şekil 6 Mıknatıs Kuvveti Hesaplama Test Düzeneği

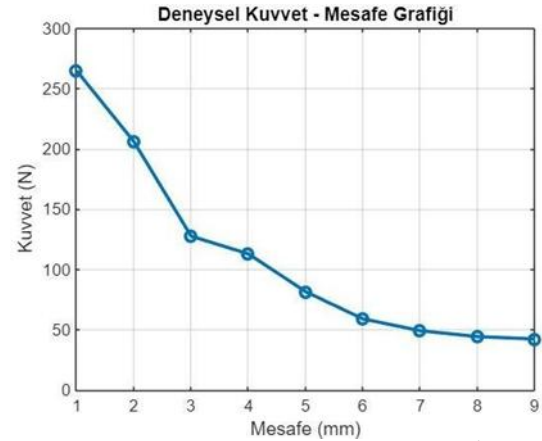
Bu bölümde, teorik hesaplamalarda kullanılan parametrelere göre, aynı şekilde deney düzeneğinde mesafeler kullanılarak, sonuçlar kaydedilmiştir. Elde edilen mıknatıs diskleri arasındaki kuvvetler Tablo 2. 'de verilmiştir.

Tablo 2 Mıknatıs Kuvvetlerinin Mesafeye Göre Deneysel Değerleri

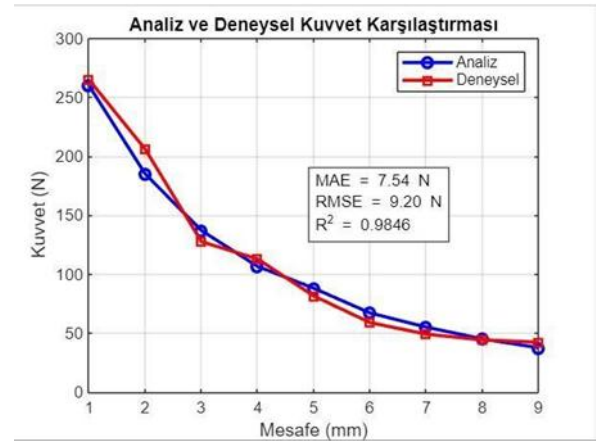
İki Elektrodinamik Süspansiyon Diski Arasında Mesafe(mm)	İki Elektrodinamik Süspansiyon Diski Arasında Oluşan Kuvvet (N) Deneysel
9	42,183
8	44,145
7	49,05
6	58,86
5	81,423
4	112,815
3	127,53
2	206,01
1	264,87

Kuvvet ve mesafe arasındaki değişim Şekil 7.'de verilmiştir. Deney verilerinde de

mesafenin azalmasıyla kuvvet artmakta ve parabolik bir hal almaktadır.



Şekil 7 Mıknatısları Arasında Kuvvet-Mesafe İlişkisi Deneysel



Şekil 8 Mıknatıs Kuvvetlerinin Analiz ve Deneysel Karşılaştırması

Şekil 8.'de analiz sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Yatay ekseninde 2 elektrodinamik süspansiyon diskisi arasındaki mesafe (mm), düşey ekseninde ise bu mesafede oluşan kuvvet (N) verilmiştir. Grafik incelendiğinde hem analiz hem de deneysel verilerin benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir: mesafe azaldıkça diskler arasındaki kuvvet belirgin şekilde artmaktadır. Bu sistemin manyetik kuvvet karakteristiğiyle tutarlıdır. Analiz ve deneysel veriler arasındaki farkı değerlendirmek amacıyla çeşitli hata ölçütleri hesaplanmıştır.

- MAE (Mean Absolute Error): Ortalama mutlak hata değeri 7.54 N'dir. Bu değer, her bir veri noktası için analiz ile deney arasında ortalama farkın yaklaşık 7.5 N olduğunu göstermektedir.
- RMSE (Root Mean Squared Error): Kök ortalama kare hata 9.20 N olup, hataların büyüklüğü hakkında daha duyarlı bir ölçüdür. RMSE değeri MAE'den biraz daha yüksek çıkmıştır, bu da bazı noktalarda daha büyük farklar olduğunu işaret eder.
- R² (Determinasyon Katsayısı): Elde edilen R² değeri 0.9846'dır. Bu, analiz modelinin deneysel verileri açıklama gücünün oldukça yüksek olduğunu gösterir. Teorik olarak R²=1 mükemmel uyumu ifade eder; bu bağlamda elde edilen sonuç, modelin geçerliliğini ve güvenilirliğini doğrulamaktadır.

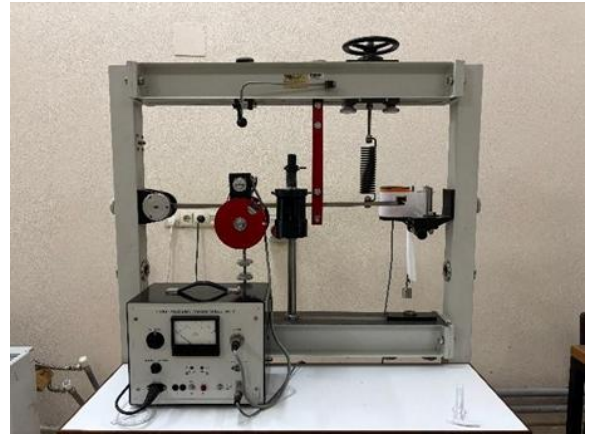
Genel olarak, analiz modeli deneysel verilerle yüksek düzeyde uyumludur. Ufak sapmaların; üretim toleransları, ortam sıcaklığı, ölçüm cihazlarının hassasiyeti veya manyetik malzeme özelliklerindeki varyasyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

2.4. Elektrodinamik Süspansiyon Sönüm Oranı Deneyi

Sadece kalıcı mıknatıslardan oluşan bir elektrodinamik süspansiyon sisteminde sönümlenme, manyetik alan değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan elektromanyetik indüksiyon prensibi ile gerçekleşir. Sistemde, karşılıklı konumlandırılmış mıknatıslar arasında araç (veya disk) hareket ettiğinde, mıknatısların görece hareketi manyetik akı değişimine neden olur. Faraday Yasası'na göre bu değişim, mıknatısların yakınında bulunan iletken malzemeler üzerinde girdap akımlarının (eddy currents) oluşmasına yol açar. Lenz Yasası gereği, bu akımlar, hareketi oluşturan değişime zıt yönde manyetik alan üretir. Bu karşı alan, mıknatısların hareketini yavaşlatan bir kuvvet doğurur. Bu kuvvet ekinde hız ile orantılıdır ve mekanik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek titreşim

genliğini azaltır. Böylece, sistem tamamen temasız bir şekilde, yalnızca manyetik alan etkileşimleri üzerinden sönümlenme sağlar.

Mühendislik uygulamalarında sistemlerin maruz kaldığı titreşimlerin karakteristikleri, sistem tasarımı ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Her iki durumda da sistemin davranışını etkileyen temel parametreler; kütle (m), yay katsayısı (k) ve sönüm katsayısı (c) olmuştur. Bu deney kapsamında, üzerinde sönümleyici bulunan bir çubuk sistemin hem serbest hem de zorlanmış titreşim davranışı incelenmiştir. Deney düzeneği, çubuğa bağlı bir yay ve damper sistemiyle oluşturulmuş; sistem, belirli başlangıç koşullarıyla serbest bırakılarak serbest titreşim hareketi gözlemlenmiştir. Bu hareket doğrultusunda mıknatıs diskleri sayısı ve mesafelerinin sönüm oranına etkisi incelenmiştir. Deneyler Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Teorisi dinamiği laboratuvarı titreşim düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 9.'da verilmiştir.



Şekil 9 . Titreşim Deney Düzeneğinde Sönüm Oranının Test Edilmesi

Sistemin sönümlü serbest titreşim hareketi yapması durumunda hareketin genliği her bir periyotta sönüm elemanının açığa çıkaracağı enerji nedeniyle belirli bir ölçüde azalır ve belli bir süre sonra da sistem başlangıçtaki statik denge konumuna dönerek durur. Tasarlanan sistem, deney düzeneğinde yer alan titreşimli çubuğa uyumlu olacak şekilde adapte edilerek montajı gerçekleştirilmiştir. Düzenek üzerinde gerçekleştirilen kontrollü titreşim

hareketleri sonucunda, sistemin sönümleme karakteristikleri hesaplanmıştır.

Logaritmik azalma (δ), bir sistemin ardışık salınımlarındaki genlik azalmasını ifade eden boyutsuz bir parametredir [4]. Bu büyüklük, sistemin ne kadar hızlı sönümlendiğini nicel olarak gösterir.

Logaritmik azalma eşitlik 2’de, sönüm oranı arasındaki ilişki de eşitlik 3.’de verilmiştir.

$$\delta = \frac{1}{n} x \ln\left(\frac{x_0}{x_n}\right) \quad (2)$$

δ = Logaritmik Azalma

n = Salınım Sayısı

X_0 = İlk Salınım Genliği

X_n = n. Salınım Sayısı

$$\delta \cong 2 \times \pi \times \xi \quad (3)$$

ξ = Sönüm Oranı

Eşitlik 2. Ve eşitlik 3. Kullanılarak deneyler yapılmış ve alınan sonuçlar Tablo 3.’te verilmiştir. Bu tabloda farklı disk sayılarında ve farklı mesafelerde çalışmalar yapılmış olup bu verilerin hepsi toplanmıştır.

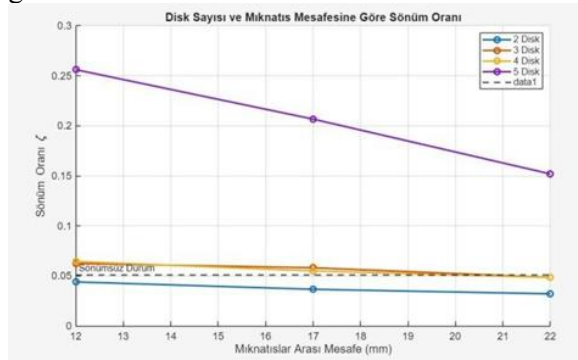
Tablo 3 Farklı Disk Sayısı ve Mesafeye Göre Sönüm Oranları

Disk Sayısı	Mıknatıs Arası mesafeler (mm)	n (Salınım Sayısı)	X_0 (mm)	X_n (mm)	δ (Log. Azalma)	ξ (Sönüm Oranı)
2 Disk	12	5	8.00	2	0.27726	0.04413
2 Disk	17	3	8.00	4	0.23105	0.03677
2 Disk	22	2	7,50	5	0.2010	0.03226
3 Disk	12	3	13.00	4	0.39288	0.06253
3 Disk	17	3	9.00	3	0.36620	0.05828
3 Disk	22	3	10.00	4	0.30543	0.04861
4 Disk	12	3	9.00	4	0,4054	0,06453
4 Disk	17	2	10.00	5	0.3465	0.0551
4 Disk	22	2	10.00	4	0,30543	0.04861
5 Disk	12	1	10.00	2	1.609	0.25615
5 Disk	17	1	11.00	3	1.299	0.20679
5 Disk	22	1	13.00	5	0,9555	0.1520
Sabit Halde	-	5	10.00	2	0.3218	0,051

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, mıknatıslar arası mesafenin ve disk sayısının sistemin sönüm oranı üzerindeki etkisi şekil 10.'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, disk sayısı arttıkça sistemin sönüm oranında belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle 5 diskli sistemlerde, mıknatıslar arası mesafe azaldığında sönüm oranı çok yüksek değerlere ulaşmış, bazı durumlarda sistem titreşimi neredeyse tamamen bastırarak düzeye gelmiştir. Bu durum, sistemin düşük frekanslı titreşimlerde etkin bir enerji sönümleyici olarak çalıştığını göstermektedir.

2 ve 3 diskli sistemlerde, sönüm oranı daha düşüktür; ancak mıknatıslar arası mesafe azaltıldığında bu değerlerde de artış gözlenmiştir. Bu yapıların, daha yumuşak sönümleme özellikleri sayesinde düşük genlikli ve daha uzun süreli salınım davranışı sergilediği söylenebilir. 4 diskli sistem, deneysel olarak hem stabil hem de orta düzeyde sönümleme sunan dengeli bir yapı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak hem mıknatıslar arası mesafenin azaltılması hem de disk sayısının artırılması, sistemin sönüm oranını artıran temel parametrelerdir. Ancak bu iki parametre arasındaki ilişki doğrusal değildir; sistemin mekanik sınırları, geometrik tasarımı ve mıknatıs konfigürasyonu bu ilişkiyi karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle optimum performansın elde edilmesi için her iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 10 Disk Sayısı ve Mıknatıslar arasındaki Mesafeye Göre Sönüm Oranı

3.SONUÇLAR

Bu çalışmada mıknatıslar arasında oluşan kuvvetin mesafeye bağlı değişimi hem sayısal analiz hem de deneysel olarak incelenmiştir. 3 boyutlu yazıcıyla üretilen disklerin N-S

kutuplarına göre hizalanmasıyla oluşturulan test düzeneği sayesinde, mıknatıslar arasındaki itme kuvvetleri farklı mesafelerde ölçülmüş ve kuvvetin uzaklıkla ters orantılı olarak arttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir.

Deneysel veriler doğrultusunda kuvvetin, mesafe azaldıkça parabolik bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Bu durum, manyetik kuvvetlerin doğası gereği beklenen bir sonuç olup, sistemin fiziksel doğruluğunu desteklemektedir. Elde edilen veriler analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir uyum gözlenmiştir. Ortalama mutlak hata (MAE) 7.54 N, kök ortalama kare hata (RMSE) 9.20 N ve determinasyon katsayısı (R^2) 0.9846 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, kurulan analiz modelinin deneysel sonuçları güçlü bir şekilde temsil ettiğini ve yüksek doğrulukla çalıştığını ortaya koymuştur.

Veriler arasında gözlemlenen küçük sapmalar; üretim kaynaklı toleranslar, ortam sıcaklığındaki değişkenlikler, mıknatısların bireysel farklılıkları ve ölçüm cihazlarının sınırlı hassasiyetinden kaynaklanmış olabilir. Ancak bu sapmalar genel eğilimi etkilememiştir. Sonuç olarak, mıknatıs kuvveti test düzeneği ile elde edilen veriler, manyetik süspansiyonlu sistemlerin modellenmesi ve benzetimi açısından geçerli ve güvenilir bir temel sağlamıştır. Sistem bileşenlerinin karakterizasyonu başarıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, ileri düzey elektromekanik sistemlerin tasarımında kullanılabilir nitelikte olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle mesafeye duyarlı kuvvet profillerinin belirlenmesi, sistemin dinamik davranışlarının modellenmesi için önemli bir adım teşkil etmektedir. Ayrıca bu çalışmada, tek serbestlik dereceli (1- DOF) bir kütle-yay-damper sisteminin serbest ve zorlanmış titreşim davranışına ait sönüm oranı disk sayısı ve mıknatıslar arasındaki mesafeye göre deneysel ve teorik olarak hesaplanmıştır.

4. KAYNAKÇA

[1] Gysen, B. L. J., Paulides, J. J. H., Janssen, J. L. G., & Lomonova, E. A. (2008). Active electromagnetic suspension system for improved vehicle dynamics. In IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008: VPPC '08; 3 - 5 Sept. 2008, Harbin, China

(pp. 1–6). Institute of Electrical and Electronics Engineers

[2] Ravaud, R., Lemarquand, G. (2009). Analytical calculation of the force and torque between two cuboidal magnets, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1260–1264.

[3] Özen, Inc. (2021). ANSYS Maxwell Magnetic Field Formulation – Application Brief. Erişim: 29 Haziran 2025. <https://www.ozeninc.com/wp-content/uploads/2021/01/ANSYS-Maxwell-Magnetic-Field-Formulation-Application-Brief.pdf>

[4] Smith, B. C. (2015). *Introduction to Linear Systems Analysis*. McGraw-Hill.