



Vehicle suspension control with magnetic force

Ergin Kılıç*^{ID}, Berkan Kuşçu^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Faculty Engineering, Süleyman Demirel University, 32260, Isparta, Türkiye

Highlights:

- Magnetic suspension design
- Calculation of magnetic forces
- Vibration control with magnetic force

Keywords:

- Magnetic force
- Magnetic levitation
- Vibration control
- Position control

Article Info:

Research Article
Received: 09.09.2022
Accepted: 25.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1173153

Acknowledgement:

This study was prepared from the master's thesis of Berkan Kuşçu, conducted under the supervision of Ergin Kılıç.

Correspondence:

Author: Ergin Kılıç
e-mail: erginkilic@sdu.edu.tr
phone: +90 246 211 1246

Graphical/Tabular Abstract

A novel magnetic suspension system created using 3 magnets is shown in Figure A. Two of the magnets have the ability to rotate (θ_1 and θ_2) with the help of DC motors, and the magnet in the middle will perform the suspension function by making free sliding movement ($\pm h$) in the linear direction under magnetic forces (F_1 and F_2).

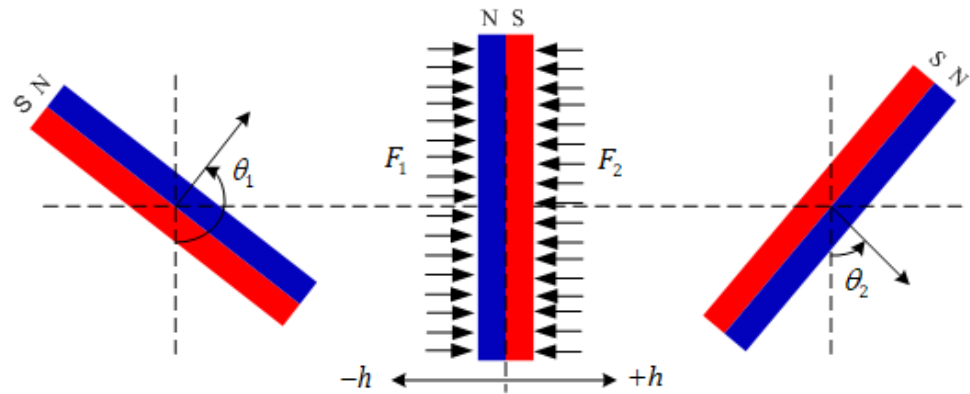


Figure A. Vehicle suspension control with magnetic forces

Purpose:

With the advancement of technology, magnetic suspensions have started to be used instead of traditional suspensions in some vehicles and structures due to their advantages such as being pollution-free, long-lasting, non-contact operation, eliminating friction forces, balancing gravity and having a high response frequency. The aim of this study is to design and control a magnetic suspension system that will eliminate undesirable effects (vibration transmitted to passengers) caused by the ground.

Theory and Methods:

The designed magnetic suspension system was replaced by magnets instead of springs. A slider-crank mechanism was used as a test platform. Vibration control was performed more precisely using the magnetic forces of the magnets (push and pull). The theory of this work is that works according to the principle of changing the polarization of natural magnets with a magnetic field against all kinds of different disturbances that may come from the ground. In this system, the controller accepts its current position as the balance point and thus tries to stay in the balance position by changing the angle of the rotating magnets despite the disturbing forces coming from the ground.

Results:

The test results showed that the acceleration values transmitted to the passengers are reduced by 2-3 times with the developed magnetic vibration control system according to the classical spring suspension system.

Conclusion:

Due to the uncertainty of the mass to be transported, actuator saturation, non-linear force characteristics with respect to the working distance, the problem of generating the appropriate magnetic force makes it difficult to control a stable magnetic suspension system. In this study, a magnetic suspension system that can provide much better vibration damping than conventional spring suspension systems in various ground conditions has been designed and successfully controlled.



Manyetik kuvvet ile taşıt süspansiyon kontrolü

Ergin Kılıç*^{ID}, Berkan Kuşcu^{ID}

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Manyetik süspansiyon tasarımı
- Manyetik kuvvetlerin hesaplanması
- Manyetik kuvvet ile titreşim kontrolü

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.09.2022

Kabul: 25.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1173153

Anahtar Kelimeler:

Manyetik kuvvet,
manyetik levitasyon,
titreşim kontrolü,
konum kontrolü

ÖZ

Bu çalışmada zeminden gelen istenmeyen etkileri (yolculara iletilen titreşimi) ortadan kaldırmaya yönelik bir manyetik süspansiyon sisteminin tasarımı ve kontrolü amaçlanmıştır. Tasarlanan manyetik süspansiyon sisteminde klasik süspansiyon sistemlerinden farklı olarak yay yerine mıknatıs kullanılmıştır. Mıknatısların manyetik kuvvetleri kullanılarak (itme ve çekme) titreşim kontrolü daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Yürütülen bu çalışmanın özgünlüğü, zeminden gelebilecek her türlü farklı bozucu etkilere karşı manyetik alana sahip doğal mıknatısların polarizasyonunu değiştirme prensibine göre çalışan bir süspansiyon tasarımı içermesidir. Bu sistemde kontrolcü bulunduğu anlık konumu denge noktası kabul eder ve bu sayede zeminden gelen bozucu kuvvetlere rağmen döner mıknatısların açısını değiştirerek sürekli denge konumunda kalmaya çalışır. Böylece yolculara iletilen ivme değerlerinin geliştirilen manyetik titreşim kontrol sistemi sayesinde azaltıldığı gözlemlenmiştir.

Vehicle suspension control with magnetic force

HIGHLIGHTS

- Magnetic suspension design
- Calculation of magnetic forces
- Vibration control with magnetic force

Article Info

Research Article

Received: 09.09.2022

Accepted: 25.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1173153

Keywords:

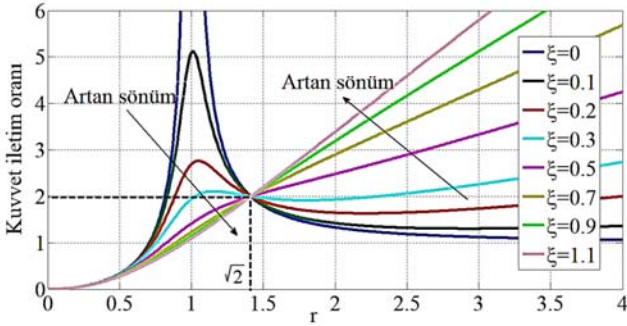
Magnetic force,
magnetic levitation,
vibration control,
position control

ABSTRACT

In this study, it was aimed to design and control a magnetic suspension system to eliminate undesirable effects from the ground (vibration transmitted to passengers). Unlike the classical suspension systems, the designed magnetic suspension system was replaced by magnets instead of springs. Vibration control was performed more precisely using the magnetic forces of the magnets (push and pull). The originality of this work is that it contains a suspension design that works according to the principle of changing the polarization of natural magnets with a magnetic field against all kinds of different disturbances that may come from the ground. In this system, the controller accepts its current position as the balance point and thus tries to stay in the balance position by changing the angle of the rotating magnets despite the disturbing forces coming from the ground. Thus, it has been observed that the acceleration values transmitted to the passengers are reduced by the developed magnetic vibration control system.

1. Giriş (Introduction)

Genellikle mühendislik sistemleri farklı frekanslarda zemin zorlamalarına maruz kalmaktadır. Rao [1] tek serbestlik dereceli bir sistemin harmonik formdaki zemin zorlaması ile yer değiştirme arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Şekil 1'de kuvvet iletim oranını frekans oranı (r) ve sönüm oranına (ξ) bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere $\sqrt{2}$ özel frekans oranına kadar artan sönümle beraber kuvvet iletim oranı düşmektedir, $\sqrt{2}$ özel frekans oranından sonra ise artan sönümle beraber kuvvet iletim oranının arttığı görülmektedir. Bu çalışmadan yola çıkarak tasarlanacak olan süspansiyon sistemlerinin ayarlanabilir bir sönüm sistemine ihtiyacı olduğu görülmektedir. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan sabit yay katsayılı süspansiyon sistemleri özellikle değişken frekanslı titreşimleri azaltma konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden süspansiyon tasarımcıları yay katsayısı ve amortisör katsayısının belirlenmesinde büyük zorluklar ile karşı karşıya kalmaktadırlar. İyi bir sürüş konforu için yay katsayısı düşük (yumuşak) yaylara ihtiyaç duyulmaktadır fakat bu durum kötü yol tutuşu anlamına gelmektedir. Sürüş konforu ve güvenliği arasındaki ödünleşimi sağlamak için aktif süspansiyon sistemleri üzerine araştırmaların devamlı olarak yürütüldüğü bilinmektedir. Sever vd. [2] bir aktif süspansiyon sistem tasarımcıları yay katsayısı ve geri beslemeli kontrol yapısını ele almıştır. Bir çeyrek araç süspansiyon sisteminin kayan kipli denetim ile aktif titreşim kontrolü Eroğlu vd. [3] tarafından çalışılmıştır. Youness ve Lobusov [4] ise tam model araba aktif süspansiyonu için PID ve LQR kontrol yöntemlerini incelemiştir. Aktif süspansiyon tasarımında ele alınan sistem için doğrusal olmayan yay ve sönüm karakteristiklerine bağlı dinamik model oluşturulması zorunluluğu yanında ileri kontrol algoritmalarının kullanılması gerektiği görülmektedir.



Şekil 1. Kuvvet iletim oranının değişimi
(Change of force transmission ratio) [1]

Teknolojinin ilerlemesiyle bazı taşıt ve yapılarda geleneksel süspansiyonlar yerine kirlilik içermeme, uzun ömürlü olma, temassız çalışma, sürtünme kuvvetlerinin ortadan kaldırılması, yer çekimi dengelenmesi ve yüksek tepki frekansına sahip olma gibi avantajları nedeniyle manyetik süspansiyonların kullanılmasına başlanmıştır. Fakat taşınacak olan kütle belirsizliği, aktüatör doygunluğu, çalışma mesafesine göre doğrusal olmayan kuvvet karakteristiği gibi nedenlerden ötürü uygun manyetik kuvvet üretme sorunu kararlı bir manyetik süspansiyon sistem kontrolünün yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bednarek vd. [5] geleneksel mekanik, doğal mıknatıs ve elektro-mıknatıs yayların statik ve dinamik karakteristiklerini karşılaştırmıştır.

Öztürk vd. [6] çalışmada bir elektro-mıknatıs sayesinde demir bir bilyenin havada asılı kaldığı bir Manyetik Levitasyon (Mag-Lev) sisteminin matematiksel modellemesini ve doğrusal olmayan bu sistemin geri-beslemeli doğrusallaştırma yöntemi ile 10 mm'lik hava

aralığında gerçek-zamanlı konum kontrolünü gerçekleştirmiştir. Bir başka Mag-Lev çalışmada ise elektromıknatıs akımına genliğe doymuş bir uyarlamalı kontrol yasası uygulanarak demir bilye kütesinin 10mm'lik hava boşluğu arasında çeşitli referans komutları takip etmeye yönelik konum kontrolü sağlanmıştır [7]. Bir takım tezgahı için yatak sürtünmesini ortadan kaldırıp tezgah hassasiyetini artırmak için H_{∞} kontrol kuramı kullanılarak 568 kg'lık bir kütleli bozucu kuvvet girişleri altında 3 mm havaya kaldırılması için bir simülasyon çalışması yapılmıştır [8]. Golob ve Tovornik [9] ise 147 gramlık bir topu 20 mm hava boşluğunda her bir 4 mm aralıklarda çalışacak farklı parametrelere sahip bir bulanık mantık tabanlı PID kontrolcü çalışması gerçekleştirilmiştir. JesúsRubio vd. [10] ise yapay sinir ağlarını kullanarak Mag-Lev sistemlerinin modellenmesini ve konum kontrolünü 30 mm'lik hava boşluğunda sağlamıştır. Literatürde daha başka birçok Mag-Lev çalışması bulunmakta olup farklı bobin boyutları ve akım değerleri kullanılarak farklı levitasyon yüksekliklerine çıkılabildiği görülmektedir. Fakat bu bahsedilen çalışmaların esas amacı konumu sabit olan elektromıknatıslara sürekli kontrol edilen bir akım uygulanarak havada asılı olan kütleli hassas bir şekilde konum kontrolünün sağlanmasıdır. Tüm bu Mag-Lev çalışmaları [6-10] literatürde her ne kadar manyetik süspansiyon olarak isimlendirilse de elektromıknatıs konumu yere göre sabit olup gerçek manada bir titreşim izolasyonu için herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Çünkü elektromıknatısın konumu sabit tutularak belirtilen hava boşluğunda asılı kütleli hassas bir konum kontrolünün yapılması aynı zamanda kusursuz bir şekilde titreşim yalıtımının yapıldığı manasına gelmemektedir. Özellikle havada asılı kalan kütleli zafiyet konumu elektromıknatısa oldukça yaklaşırsa manyetik kuvvetlerin aşırı şekilde yüksek seviyelere çıkacak olması nedeniyle kararsız durumlar yaşanmaktadır. Kullanılan mıknatısın boyutlarına ve mıknatıslar arası sabit aralığa (hava boşluğu değerine) göre asılı kütleli kararlı bir şekilde çalışabileceği mesafeler Robertson [11] tarafından normalize edilmiş grafikler halinde sunulmaktadır. Asılı kütleli değeri burada önemli bir parametre olup kullanılacak hava boşluğu değerinin ise kübik mıknatıs boyutunun en az 3-5 katından fazla olması gerektiği ve asılı kütleli kararlı bir şekilde çalışma mesafesinin ise bu hava boşluğunun yaklaşık olarak yarısına denk geldiği görülmektedir.

Manyetik süspansiyon sistemlerinin özellikle titreşim yalıtımı için kullanıldığı çalışmalara bakılır ise; Yang vd. [12] tarafından geliştirilen bir Mag-Lev sisteminde armatür bir bobine çeşitli seviyelerde yüksek akım (1-4 Amper arası) uygulanarak $\pm 4mm$ mesafe sınırları içerisinde titreşim izolasyonu sağlanabildiği görülmektedir. Mizuno vd. [13] tarafından ise benzer bir elektro-manyetik sistem bu sefer sabit bir mekanik yaya seri bağlanarak sonsuz bir eş değer sertlik değeri elde edilerek manyetik sistemde yer alan bobine PD kontrollü bir akım uygulanmış ve havada asılı 3,5 kg'lık bir kütleli $\pm 0,2mm$ sınırlar içerisinde ancak 1 Hz'e kadar yani çok düşük frekanslarda uygulanan bozucu girişler için izolasyon tablasının alt tablaya göre konum deplasmanının azaltılması sağlanabilirken 1 Hz'den yüksek frekanslı girişlerde ise izolasyon tablasının daha fazla hareket ettiği görülmektedir. Carella vd. [14] ise bir kayar mıknatıs kütleli sürekli kendine çekmeye çalışan iki karşılıklı sabit mıknatıslı sistem (negatif katsayılı bir yay) arasına aynı zamanda kararlılık sağlamak adına mekanik bir yay (pozitif katsayılı bir yay) bağlayarak eşdeğer dinamik yay katsayısını sıfır yapacak bir izolatör geliştirmiştir. İlgili çalışmada ilk önce mekanik yayın olmadığı yani sadece karşılık mıknatısların sabit şekilde bulunduğu konumda (fakat mekanik yay olmadığı için mıknatıs kutup yönleri zıt yönde değiştirilerek kararsızlık ortadan kaldırılmıştır) 1-16 Hz aralığında testler yapılmış olup ölçülen ivme iletim katsayısının (asılı kütleli ortalama karekök ivmesi / zeminin ortalama karekök ivmesi) 2-6 arasında değiştiği gösterilmiştir. Daha sonra sistemde sadece mekanik yay var (sabit mıknatıslar devre dışı) iken belirtilen frekans

aralığında iletim katsayısı 2-3 arasında değiştiği gösterilmiştir. Hem pozitif yay katsayılı mekanik yayın hem de negatif yay katsayılı üretecek şekilde konumlandırılan sabit mıknatısların birlikte devrede olduğu durumda ise iletim katsayısının 1,5-0,8 seviyelerine kadar düşürüldüğü gösterilmiştir. Xu vd. [15] tarafından ise bir önceki çalışmaya benzer mantıkla pozitif sertliğe sahip bir mekanik yay ile birlikte bir mekanizma yardımıyla birbirini sürekli çekmeye çalışan negatif sertliğe sahip mıknatısların eş güdümlü devreye alınmasıyla yarı-sıfır-sertlik katsayısına sahip bir manyetik izolator tasarlanmış olup 0-20 Hz aralığında elde edilen deneysel sonuçlardan ivme iletim katsayısının bir önceki çalışmaya benzer şekilde sadece yaylar devrede iken 2-3 arasında olduğu ve sonrasında ise geliştirilen yarı-sıfır-sertlik katsayısına sahip sistemin ise çoğu frekans bölgesinde iletim katsayısının yaklaşık 1'in altında değiştiği gösterilmiştir.

Literatürde manyetik süspansiyon üzerine başka birçok çalışma bulunsada hepsinde kullanılan mıknatısların polarizasyon açılarının sabit tutulduğu ve sadece aralarındaki doğrusal mesafe göz önüne alınarak ancak sınırlı bir çalışma mesafesi için ($<10\text{ mm}$) titreşim izolasyonu yapılabilmektedir. Manyetik kuvvetlerin mesafeye bağlı değişimi aşırı şekilde doğrusal olmadığından geniş çalışma aralıklarında titreşim kontrolünün sağlanamadığı görülmüştür. Bu çalışmanın özgünlüğü ise kullanılan mıknatısların hem polarizasyon açısı değişimleri hem de mesafe değişimleri göz önüne alınarak herhangi bir ileri kontrol algoritmasına ihtiyaç duyulmadan aktif titreşim yalıtımının ilk kez gerçekleştirilmiş olmasıdır.

2. Tasarım (Design)

Şekil 2'de tasarlanan sistemin montajlanmış hali gösterilmektedir. Bu tasarımda klasik süspansiyon sistemlerinden farklı olarak mekanik yaylar yerine 3 adet $50 \times 50 \times 25\text{ mm}$ boyutlarında Neodyum ($N35$) mıknatıs bulunmaktadır. Bir kılavuz mil üzerinden konumlandırılmış baştaki ve sondaki mıknatısların göreceli konumları sabitlenmiş olup DC motorlar yardımıyla sadece dönme hareketi yapabileceklerdir. Ortadaki mıknatıs ise dönüş açısı DC motor ile istenilen bir açıda sabit tutulacak olup bir mil (birinci kayar yatak) üzerinde serbestçe kayma hareketi yapmasına izin verilmiştir. Böylelikle mıknatısların birbirlerine uyguladıkları manyetik kuvvetler (itme-çekme kuvveti) sayesinde arada hiçbir mekanik bağlantı olmadan titreşim kontrolü yapılabilecektir. Ayrıca ortadaki kayar mıknatısın göreceli konumunu enkoder yardımıyla okuyabilmek için bir krank-biyel mekanizması tasarlanmıştır. Mıknatısların birbirleri dışında başka elemanlar ile manyetik etkileşime girmemesi için tüm mekanik parçalar Alüminyum malzemeden üretilmiş olup kılavuz mil ise Pirinç malzemeden seçilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sisteme mıknatısların birbirine çok yakınlaşması durumunda ortaya çıkacak olan çok yüksek manyetik kuvvetler neticesinde birbirlerine yapışmasını engellemek için mekanik yaylar konulmuştur, normalde bu yaylar sistem

çalışırken devrede olmayıp sadece güvenlik amaçlı kullanılmaktadır. En alt kısımda yer alan ikinci kayar yatak ise tüm zemin sistemini üzerinde taşımakta olup bu sayede dışarıdan tahrik verilerle titreşim deneyleri yapılabilecektir. Ayrıca sistemde 2 adet ivme sensörü yer almakta olup bir tanesi zemine diğeri ise ortadaki kayar mıknatısa bağlı bulunmaktadır.

3. Manyetik Hesaplamalar (Magnetic Calculations)

Literatürde ilk kez karşılıklı iki mıknatısın birbirine karşı uyguladığı çekme ve itme kuvvetini hesaplamak için Akaoun [16] tarafından oluşturulan teorik denklemler temel alınmaktadır. İlgili makalede deneysel doğrulama testleri yapılmış olup elde edilen matematiksel ifadelerin yüksek oranda geçerli olduğu gösterilmiştir. Yonnet ve Allag [17] ise bu hesaplamaları basitleştirmek için manyetik düğümler yöntemini ortaya koymuştur. Daha sonra Allag vd. [18] ise eğimli polarizasyona sahip iki mıknatıs için kuvvet ve tork hesaplamalarının manyetik düğümler üzerinden analitik olarak yapılabileceğini göstermiştir. Küçük mıknatısların matematiksel modeli Şekil 3'te gösterildiği üzere köşe noktalarında yer alan manyetik düğümler üzerine oluşturulmuştur. Birinci mıknatısın polarizasyonu J (kuzey kutup yönü) ile gösterilirken ikinci mıknatısın polarizasyonu J' ise X -ekseni etrafında eğimli bir açıda (θ) bulunabilir. Kuvvet bileşenlerini manyetik düğümler ile hesaplayabilmek için tek şartın mıknatısların polarizasyonlarının birbirlerine göre tam yatay $J'_{//}$ ya da tam dikey J'_{\perp} şekilde sabit olması gerektiğidir. Yonnet ve Allag [17] tarafından birbirlerine göre tam paralel polarizasyonda ($J'_{//}$) bulunan iki küçük mıknatıs arasındaki manyetik kuvvetler Eş. 1 üzerinden hesaplanmaktadır. Manyetik kuvvet hesaplamalarında kullanılacak olan boyutlara bağlı gerekli aracı değişkenler ise Eş. 2-Eş. 5'te sunulmaktadır.

$$F = \frac{JJ'}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^{i+j+k+l+p+q} \cdot \Phi(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) \quad (1)$$

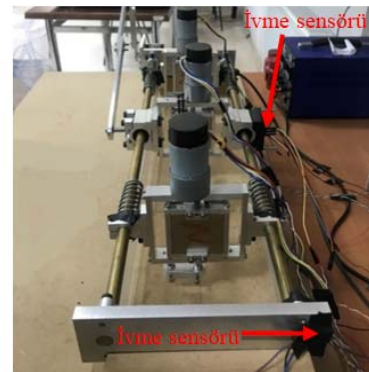
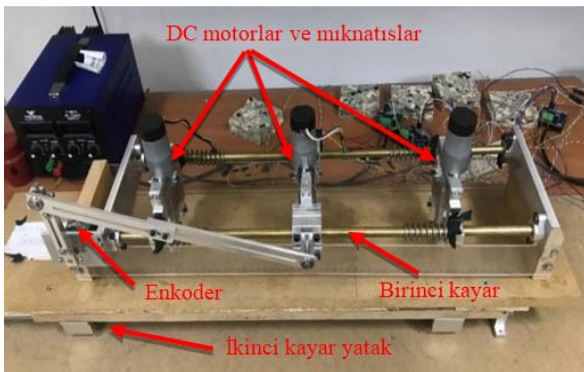
$$U_{ij} = \alpha + (-1)^j A - (-1)^i a \quad (2)$$

$$V_{kl} = \beta + (-1)^l B - (-1)^k b \quad (3)$$

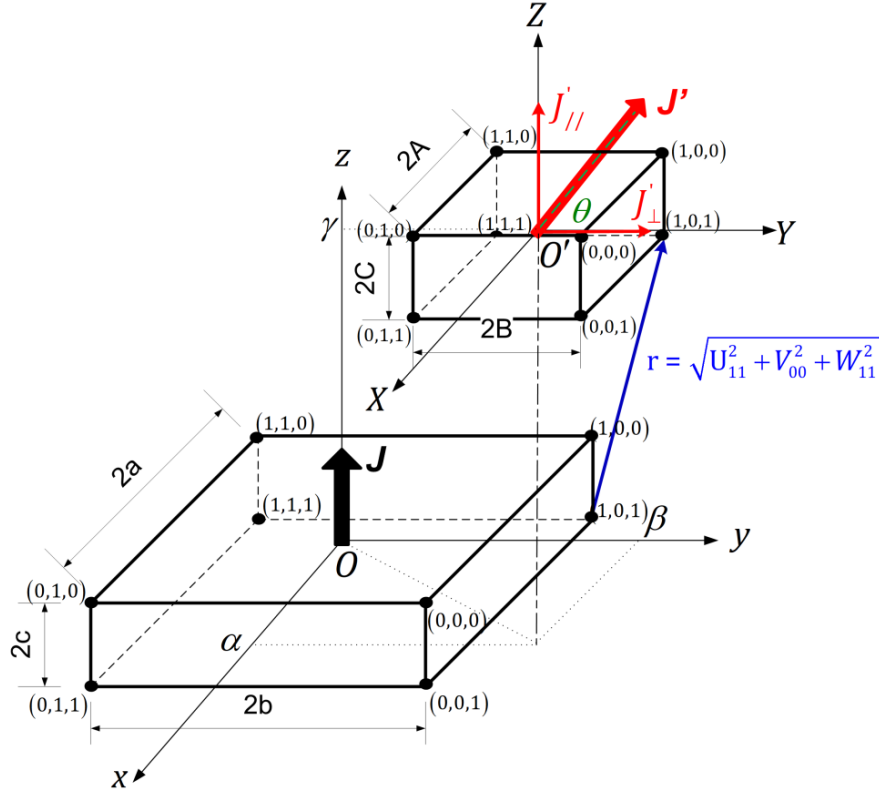
$$W_{pq} = \gamma + (-1)^q C - (-1)^p c \quad (4)$$

$$r = \sqrt{U_{ij}^2 + V_{kl}^2 + W_{pq}^2} \quad (5)$$

Şekil 3'ten görüleceği üzere küçük mıknatısların kütle merkezleri O ve O' ile gösterilmekte olup mıknatısların her bir köşesi (ya da düğümü) üçlü bir parametre ile ifade edilmektedir. Birinci mıknatıs

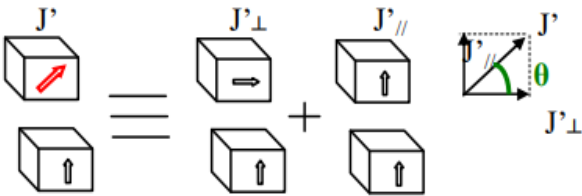


Şekil 2. Tasarlanan sistemin montajlanmış son hali (Assembled final version of the designed system)



Şekil 3. Mıknatısların matematiksel modeli (Mathematical model of magnets)

için i,k,p ve ikinci mıknatıs için ise j,l,q üçlü parametreleri kullanılmaktadır. Tüm bu parametreler dikkate alınan köşeye göre 0 veya 1'e eşittir. Birinci mıknatıs üzerinden bir örnek vermek gerekirse $(1,0,1)$ $i=1, k=0$ ve $p=1$ anlamına gelir ki, $x=(-1)^i.a = -a, y=(-1)^k.b = +b$ ve $z=(-1)^p.c = -c$ sonuçları üretilmiş olunur. Böylelikle Eş 2-4'te ifade edilen U_{ij}, V_{kl} ve W_{pq} paralel yüzölçümleri arasında sırasıyla x, y ve z eksenleri üzerindeki izdüşümlerine karşılık gelir. Eş. 5 ise birinci mıknatıs üzerinde ve ikinci mıknatıs üzerinde ele alınan iki köşe arasındaki doğrusal mesafeyi tanımlamaktadır. Allag vd. [17] ise eğimli polarizasyona sahip iki mıknatıs arasındaki manyetik kuvvetlerin hesaplanabilmesi için Şekil 4'te gösterildiği üzere eğimli mıknatıs yerine sanki hem paralel polarizasyon (J'_{\parallel}) hem de dikey polarizasyona (J'_{\perp}) sahip iki mıknatıs varmış gibi düşünülerek çözüm yapılmasını önermektedir. Ayrıca ilgili makalede bu çözümün doğruluğu ticari bir elektromanyetik sonlu elemanlar analiz programı (Flux3D) ile doğrulanmıştır.



Şekil 4. Polarizasyon ayrıştırması (Polarization decomposition) [18]

Sonuç olarak eğimli bir konumda bulunan kübik bir mıknatıs için hesaplamaları basitleştirmek adına bu mıknatısın polarizasyonu J' paralel J'_{\parallel} ve dikey J'_{\perp} bileşenlerine ayrıştırılarak hesaplanan paralel polarizasyona ve dikey polarizasyona ait manyetik kuvvetler her üç eksen (x, y ve z) için sırasıyla Eş. 6-Eş. 9 ve Eş. 10-Eş. 13 üzerinden hesaplanabilmektedir.

Paralel Polarizasyon için :

$$\Phi_{//x}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) = \frac{(V^2 - W^2)}{2} \ln(r - U) + UV \ln(r - V) + VW \tan^{-1} \left(\frac{UV}{Wr} \right) + \frac{1}{2} Ur \quad (6)$$

$$\Phi_{//y}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) = \frac{(U^2 - W^2)}{2} \ln(r - V) + UV \ln(r - U) + UW \tan^{-1} \left(\frac{UV}{Wr} \right) + \frac{1}{2} Vr \quad (7)$$

$$\Phi_{//z}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) = -UW \ln(r - U) - VW \ln(r - V) + UV \tan^{-1} \left(\frac{UV}{Wr} \right) - Wr \quad (8)$$

$$F_{//} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^{i+j+k+l+p+q} \cdot \Phi_{//}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) \quad (9)$$

Dikey Polarizasyon için:

$$\Phi_{\perp x}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) = -VW \ln(r - U) + VU \ln(r + W) + WU \ln(r + V) - \frac{U^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{VW}{Ur} \right) - \frac{V^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{UW}{Vr} \right) - \frac{W^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{UV}{Wr} \right) \quad (10)$$

$$\Phi_{\perp y}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) = \frac{(U^2 - V^2)}{2} \ln(r + W) - UW \ln(r - U) - UV \tan^{-1} \left(\frac{UW}{Vr} \right) - \frac{1}{2} Wr \quad (11)$$

$$\Phi_{\perp z}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) = \frac{(U^2 - W^2)}{2} \ln(r + V) - UV \ln(r - U) - UW \tan^{-1} \left(\frac{UW}{Vr} \right) - \frac{1}{2} Vr \quad (12)$$

$$F_{\perp} = \frac{JJ'}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^{i+j+k+l+p+q} \cdot \phi_{\perp}(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) \quad (13)$$

Sonuç olarak eğimli bir manyetik polarizasyon için toplam etkileşim kuvvet Eş. 14'te verildiği şekilde istenilen yönde (x, y, z) hesaplanabilmektedir.

$$F = F_{//} \cdot \sin(\theta) + F_{\perp} \cdot \cos(\theta) \quad (14)$$

Teorik denklemlerin kullanılmasıyla hesaplanan F_x , F_y ve F_z kuvvetlerinin hem polarizasyon açısına (θ) hem de z eksenini boyunca olan mıknatıslar arası mesafeye (γ) göre değişimleri Şekil 5'te gösterilmektedir. Önemle belirtmek gerekir ki Şekil 2'de gösterilen birinci kayar yatak üzerinde yer alan arabanın hareket doğrultusu mıknatısların yerleşim düzenine göre z eksenine denk düşmektedir. Diğer x ve y yönlerinde ise mıknatıs hareketleri kayar yatak tarafından kısıtlanmıştır ($\alpha=0$ ve $\beta=0$ 'dir). Şekil 5'ten görüleceği üzere F_x kuvvet değeri polarizasyon açısından ve mesafe değişiminden bağımsız olarak daima 0 Newton değerindedir. F_y kuvvet değerleri ise kayar yatak sistemine sürekli normal doğrultuda etkiyecek olup kızak milleri tarafından taşınabilecek seviyededir. Bu yüzden yukarıda açıklanan denklemlerden sadece Eş. 8 ve Eş. 12 kullanılarak z eksenini yönünde oluşan manyetik kuvvetler ve hareketler göz önüne alınacaktır. Ayrıca çalışmada kullanılan mıknatısların matematiksel modele göre konumları ve uzunlukları Tablo 1'de verilmiştir. Mıknatısların manyetik boş alan geçirgenliği ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$) olup manyetik polarizasyon sabiti (J) ise N35 serisi mıknatıslar için geçerli olan $1,21$ Tesla değeri kullanılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan mıknatısın ölçüleri
(The dimensions of the magnet used in the study)

Eksen	O_x	O_y	O_z
Birinci mıknatıs boyutları (J)	50	50	25
İkinci mıknatıs boyutları (J')	50	50	25
İkinci mıknatısın merkezi konumu (O')	$\alpha = 0$	$\beta = 0$	γ

Analitik yöntemle hesaplanmış olan kuvvet değerlerini Robertson vd. [11] tarafından önerilen ampirik bir formül yardımıyla basitçe elde edilmesi amaçlanmıştır. Çünkü gerçek zamanlı kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesi için Eş. 14'ün işlem yoğunluğu nedeniyle bir mikro

denetleyici içerisinde yüksek örnekleme frekanslarında kullanılması zordur. İki mıknatıs arasındaki açığa ve mesafeye bağlı kuvvet hesabı için kullanılan ampirik formül Eş. 15'te verilmektedir.

$$F = \sin \theta \cdot A / (B + \gamma)^n \quad (15)$$

Ampirik formülde yer alan A , B ve n katsayılarının bulunması için daha önce analitik yöntemle (Eş. 14 yardımıyla) hesaplanan her γ mesafesine denk gelen kuvvet değerleri (F_z) elde edilmiştir. Daha sonra MATLAB® programının *lsqnonlin()* fonksiyonu yardımıyla oluşturulan 20 adetlik veri setine en iyi uyum sağlayacak katsayı değerleri belirlenerek Eş. 16'da sunulmuştur.

$$F = \sin \theta \cdot (0,0041) / (0,0227 + \gamma)^{3,9758} \quad (16)$$

Analitik yöntemle ve ampirik formül ile hesaplanan kuvvet değerlerinin karşılaştırılması Şekil 6'da gösterilmektedir. Görüleceği üzere ampirik formülle elde edilen kuvvet değerleri ile analitik yöntemle elde edilen değerler örtüşmektedir. Dolayısıyla elde edilen bu ampirik formül gerçek-zamanlı kontrolcünün çevrimini yüksek frekanslarda kapatmasında büyük bir kolaylık sağlayacaktır.

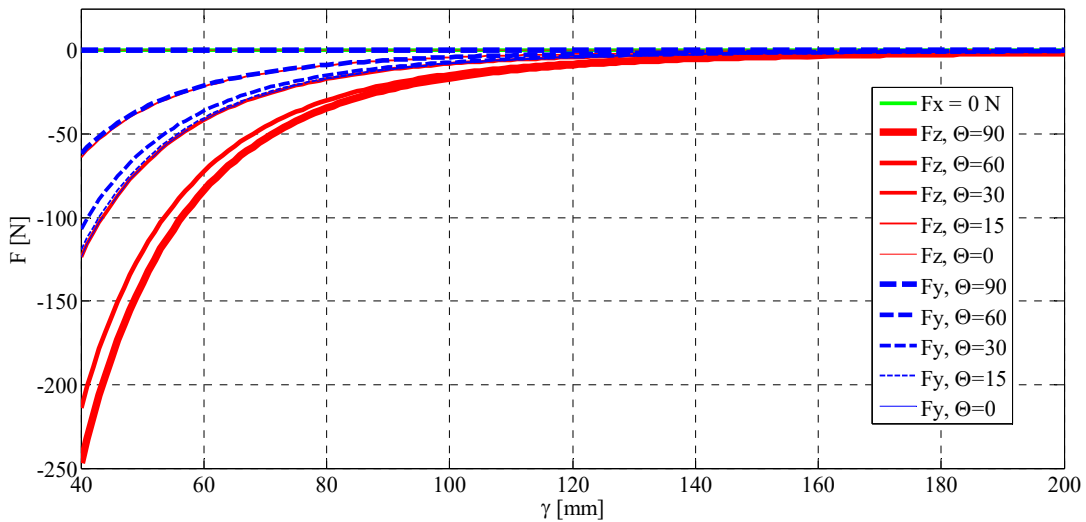
4. Deneysel Metot (Experimental Method)

4.1 Konum Kontrolü (Position Control)

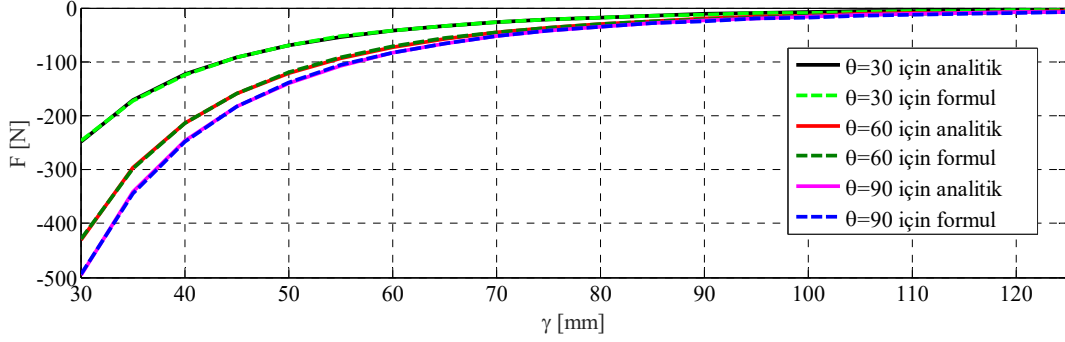
Bu bölümde manyetik kuvvetler ile taşıt süspansiyon sisteminin yatay ve dikey konfigürasyonda konum kontrolü çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Yatay konfigürasyon için konum kontrolü (Position control in horizontal configuration)

Yatay konfigürasyonda konum kontrolü gerçekleştirilecek sistemin şematik gösterimi Şekil 7'de sunulmaktadır. Şekil 7'de gösterildiği gibi mıknatısların eş kutuplarının birbirini itme kuvvetinden yararlanılarak ortadaki mıknatısın istenilen konuma gitmesi sağlanacaktır. Ortadaki mıknatısın eğim açısı 90° açıda sabit tutulmakta olup döner mıknatısların ise eğim açıları değiştirilerek gitmesi hedeflenen $+h$ veya $-h$ mesafesine manyetik kuvvet eşitliği sağlanarak ulaşılması beklenmektedir. Bu konfigürasyonda ortadaki mıknatıs sadece kayma hareketi yaparken diğer iki mıknatıs ise sadece dönme hareketi yapacaktır. İki döner mıknatıs arası sabit mesafe $0,4$

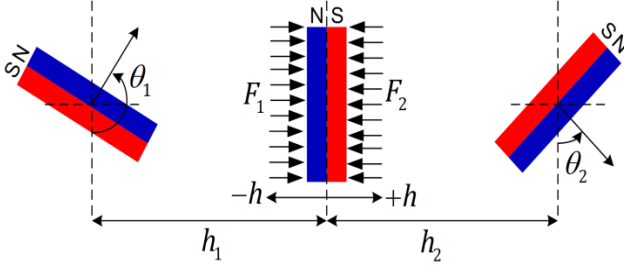


Şekil 5. F_x , F_y ve F_z kuvvetinin grafiği (Graph of F_x , F_y and F_z forces)



Şekil 6. Analitik yöntemle ve ampirik formül ile hesaplanan kuvvet değerlerinin karşılaştırılması
(Comparison of force values calculated by analytical method and empirical formula)

m olarak ayarlanmıştır. Başlangıç konumunda döner mıknatısların eğim açıları 90° olacağından dolayı ortadaki mıknatısın denge konumu iki mıknatısın tam ortasında ($h_1 = h_2 = 0,2 \text{ m}$) denge konumunda bulunacaktır.



Şekil 7. Yatay konfigürasyonda bulunan mıknatısların şematik gösterimi (Schematic representation of magnets in horizontal configuration)

İlk başta Şekil 8.a)'da gösterildiği üzere ortadaki kayar mıknatısın istenilen bir hedef konumda dengede kalması için gerekli eğim açıları hesaplanarak açık-çevrim konum kontrolü gerçekleştirilecektir. Açık-çevrim konum kontrolünde kullanılan fonksiyonun sözde kodu Tablo 2'de verilmektedir. Sunulan kodlardan anlaşılacağı üzere hedef konuma ulaşılması için ilgili noktada kuvvet dengesinin ($F_1 = F_2$) sağlanması için Eş. 15'te verilen ampirik kuvvet ve bu kuvvet formülünün tersi alınarak gerekli açı hesaplamaları yapılmaktadır. Ayrıca h_1 ve h_2 mesafeleri değişken olup ortadaki kayar mıknatısın sabit-döner mıknatıslara olan mesafeleri olarak tanımlanmıştır.

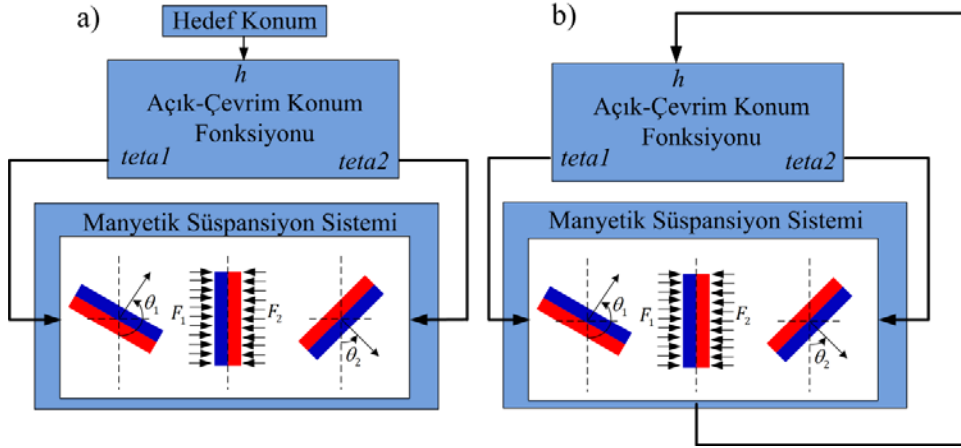
Tablo 2. Açık-çevrim konum fonksiyonu için sözde cod
(Pseudocode for open-loop position function)

```
function [teta1,teta2] = input(h)
A=0.0041; B=0.0227; n=3.9758;
h1=0.2+h; h2=0.2-h;
if h>0
teta1=90;
F1=sind(teta1)*A/(B+h1)^n;
F2=F1;
teta2=asind(F2*((B+h2)^n)/A);
elseif h<0
teta2=90;
F2=sind(teta2)*A/(B+h2)^n;
F1=F2;
teta1=asind(F1*((B+h1)^n)/A);
else
teta1=90;
teta2=90;
end
```

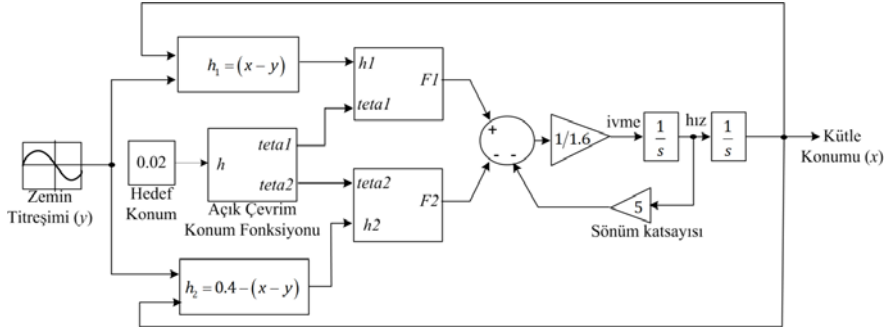
Sonrasında Şekil 9'da sunulduğu üzere Matlab/Simulink ortamında bir simülasyon çalışması oluşturulmuş ve hedeflenen mesafede kuvvet eşitliği sağlanarak ortadaki kayar mıknatısın sırasıyla 3 farklı kütle ($m = 1,6 \text{ kg}$, 8 kg ve 16 kg) değerinde olduğu kabul edilerek istenilen hedef konuma nasıl gittiği gözlemlenmiştir. Şekil 10'da gözüktüğü üzere h_2 değişkenine göre ortadaki mıknatısın istenen bir hedef konuma (h) + yönde 20 mm (200 mm 'den 220 mm 'ye) gitmesi için θ_1 açısını 90° açıda sabit tutarken θ_2 açısını ise $29,25^\circ$ değerine ayarlanmaktadır.

Şekil 10'dan görüleceği üzere kütle değişimi arttıkça hedef konuma titreşimli bir hareket yaparak hem daha fazla aşım miktarınca hem de daha fazla oturma zamanı süresinde gitmektedir. Sonrasında bu uygulanan açık-çevrim konum kontrolünde herhangi bir kütle değeri alınıp ($m=1,6 \text{ kg}$ seçilmiştir) ve herhangi bir hedef konuma (20 mm 'ye) giderken eğer zemine 20 mm genişliğinde bir sinüs sinyali bozucu giriş olarak uygulanırsa Şekil 11'in ilk 8 saniyelik zaman diliminde gözüktüğü üzere yine aynı θ açıları kullanılarak ($\theta_1 = 90^\circ$ ve $\theta_2 = 29,25^\circ$) fakat bu sefer zeminden gelen bozucu girişler nedeniyle Şekil 12'de sunulduğu gibi daha yüksek genlikli titreşim hareketleri gerçekleşmektedir. Fakat çalışmanın esas amacı konum kontrolü değil titreşim izolasyonu olduğu için geliştirilen bu açık-çevrim konum kontrolcüsü Şekil 8.b)'de gösterildiği gibi anlık kütle konumunun o anki yeni hedef konumu olacak şekilde geri-beslemeli bir döngüde kullanılması düşünülmüştür. Böylece döner mıknatısların θ açı değerleri sabit tutulmayacak olup sürekli denge konumunun sağlanması için anlık olarak değiştirilecektir. Bu geri-beslemeli kontrol döngüsünün net avantajını görmek için gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında 8. saniyeden sonra Şekil 8.b)'de sunulan konfigürasyona geçilmiş olup elde edilen sonuçlar Şekil 11 ve Şekil 12 üzerinden takip edilebilir. Sonuçlardan görüleceği üzere özellikle 8. saniyeden sonra hareketli kütle için denge konumu zemin titreşiminden bağımsız olacak şekilde tam bir titreşim yalıtımına girmektedir.

Böylelikle Matlab/Simulink ortamında açık-çevrim konum kontrolü ve kapalı-çevrim titreşim kontrolü istenilen bir şekilde sağlandıktan sonra ilgili fonksiyonun gerçek-zamanlı konum kontrolcüsüne entegrasyonu sağlanmıştır. Yatay konfigürasyon için oluşturulan manyetik süspansiyon deney düzeneği Şekil 13'te gösterilmektedir. Deneysel düzenek üzerinde döner mıknatısların birbirlerine olan uzaklığı $0,4 \text{ m}$ olacak şekilde ayarlanmış olup dolayısıyla başlangıç anında ortadaki mıknatıs her iki döner mıknatısa $0,2 \text{ m}$ uzaklıkta bulunmaktadır. Döner mıknatısların başlangıç eğim açıları 90 derece olarak ayarlanmıştır. Mıknatısların birbirlerine yapışma tehlikesinden dolayı Tablo 2'de verilen programlama kodu güncellenerek Şekil 14'te verilen programlama koduna dönüştürülmüştür. Mıknatısların birbirlerine yapışmasını önlemek için $h > 0,04$ veya $h < -0,04$ limitlerinin aşılması halinde döner mıknatıslar kendilerini 45 dereceye çekerek manyetik kuvvetin azaltılması ve devreye girecek olan

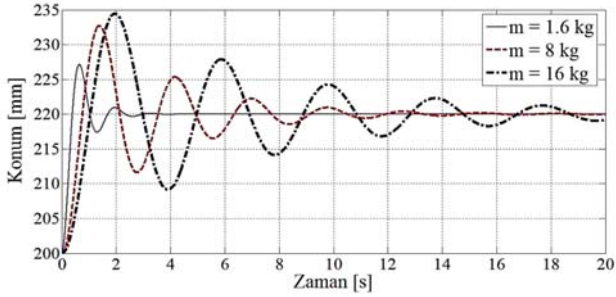


Şekil 8. a) Açık-çevrim konum kontrolcü, b) Kapalı-çevrim titreşim yalıtım kontrolcü. (a) Open-loop position controller, b) Closed-loop vibration isolation controller

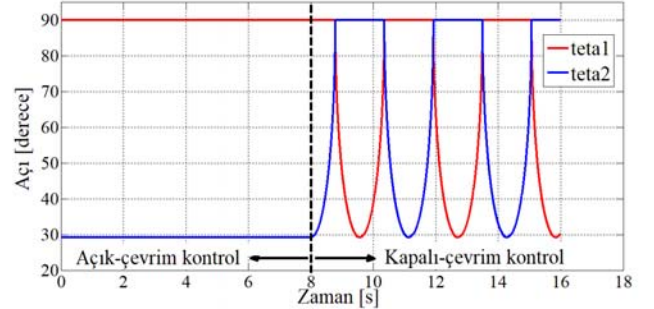


Şekil 9. Yatay konfigürasyonda sistemin konum kontrolü için oluşturulan Simulink modeli (Simulink model created for the position control of the system in horizontal configuration)

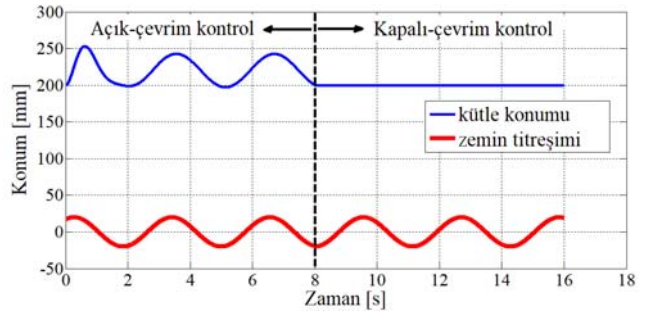
güvenlik yayları sayesinde tekrar orta konuma yönlendirme hareketi sağlanmıştır. Şekil 14'te sunulduğu üzere *Matlab/Simulink* ortamında gerçek-zamanlı çalışan bir kontrolcü oluşturulmuştur. *Humusoft MF624* marka denetim kartları yardımıyla DC motorların PID konum kontrolü sağlanmaktadır. Yalnızca ortadaki mıknatıs bağlanan DC motor devre dışı bırakılıp konumu 90 derecede sabitlenmiştir böylece mıknatısın sadece kayma hareketi yapmasına izin verilmiştir. Ortadaki mıknatısın konumu ise krank-biyel mekanizması yardımıyla enkoder üzerinden dolayı olarak okunmaktadır. Enkoder üzerinden okunan krank açısı değerleri kayar mafsalın doğrusal konum bilgisine ($\pm h$) dönüştürülerek Şekil 15'te sunulmaktadır. Görüleceği üzere bazı hedef konumlara giderken işlemlerde hesaba katılmayan kuru sürtünmeden dolayı hatalar olduğu tespit edilse de geliştirilen kontrolcünün arzu edilen şekilde çalıştığı görülmektedir.



Şekil 10. Başlangıç konumundan + yönde 20 mm gitmesi istenen mıknatısın cevabı (Response of the magnet that is requested to go 20 mm from the starting position in the + direction)



Şekil 11. Döner mıknatısların açısı değişimleri (Angle of the revolute magnets)



Şekil 12. Kayar mıknatıs konumu ve zemin titreşim profili (Sliding magnet location and ground vibration profile)



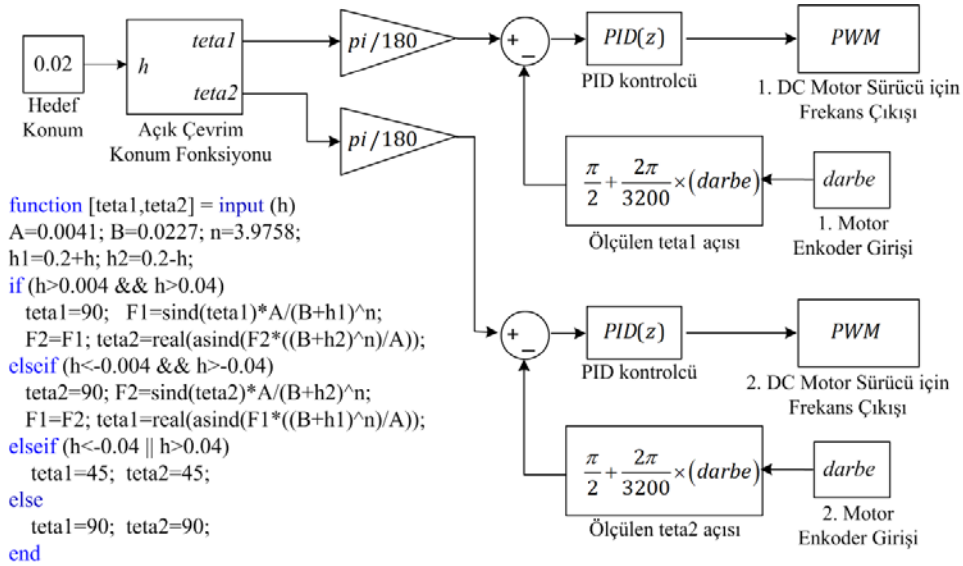
Şekil 13. Yatay konfigürasyon için manyetik süspansiyon deney sistemi (Magnetic suspension test system for horizontal configuration)

4.1.2 Dikey konfigürasyon için konum kontrolü (Position control in vertical configuration)

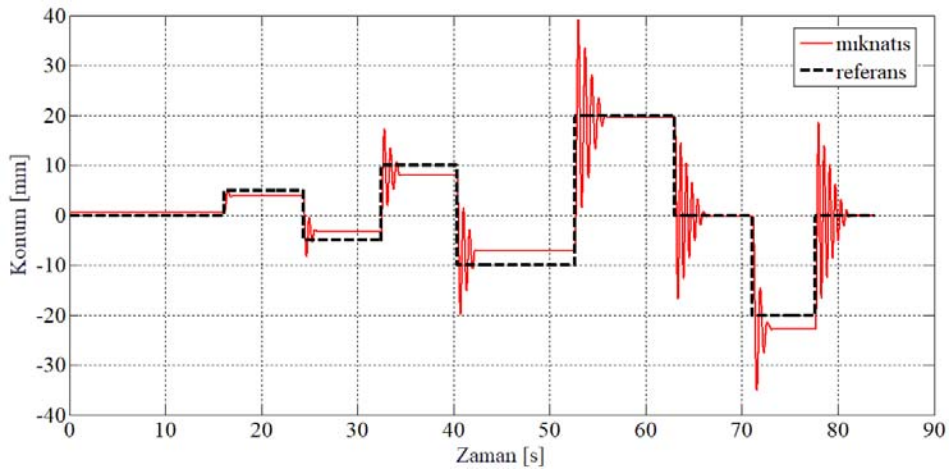
Dikey konfigürasyonda konum kontrolü yapılacak olan mıknatısların şematik gösterimi Şekil 16'da gösterilmektedir. Şekil 16'da

gösterildiği gibi mıknatısların eş ve zıt kutuplarının birbirini itme ve çekme kuvvetinden yararlanılarak ortadaki mıknatısın konum kontrolü gerçekleştirilecektir. Ortadaki mıknatısın eğim açısı 90° açıda sabitlenip döner mıknatısların eğim açıları değiştirilerek gitmesi istenilen $\pm h$ mesafesinde kuvvet eşitliği sağlanarak dengede kalması sağlanmaktadır. Bu konfigürasyonda ortadaki mıknatıs sadece kayma hareketi yaparken diğer iki mıknatıs ise yine dönme hareketi yapacaktır. Döner mıknatısların birbirine olan uzaklığı $0,4 m$ olarak alınmıştır. Başlangıç anında döner mıknatıslar hareketlerine 45 derecede başlayacağı için ortadaki mıknatıs en alttaki döner mıknatısın $0,091 m$ üstünde ($h_1 = 91 mm$) denge konumunda bulunmaktadır. Ayrıca yer çekimi etkisinden dolayı ortadaki mıknatısın kütlesi ($m = 1,6 kg$) açık-çevrim konum kontrolü hesaplamalarına dahil edilmektedir.

Dikey konumda mıknatısın çalışma aralığı değiştiği için özellikle bu aralık ($50mm - 250mm$) için elde edilen yeni bir veri seti yardımıyla ampirik formülün (Eş. 15) katsayı değerleri güncellenmiştir. Dikey konfigürasyonda konum kontrolü yapabilmek için yer çekiminin etkisi de göz önüne alınarak kuvvet dengesi yazılmış ve katsayıları

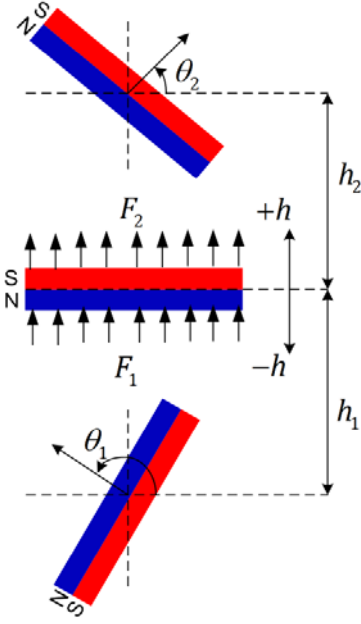


Şekil 14. Yatay konfigürasyonda sistemin gerçek-zamanlı konum kontrolü için oluşturulan program kodu ve Simulink modeli (Program code and Simulink model created for the real-time position control of the system in horizontal configuration)



Şekil 15. Yatay konfigürasyonda deney düzeneğinden elde edilen konum cevabı (Position response obtained from the experimental setup in the horizontal configuration)

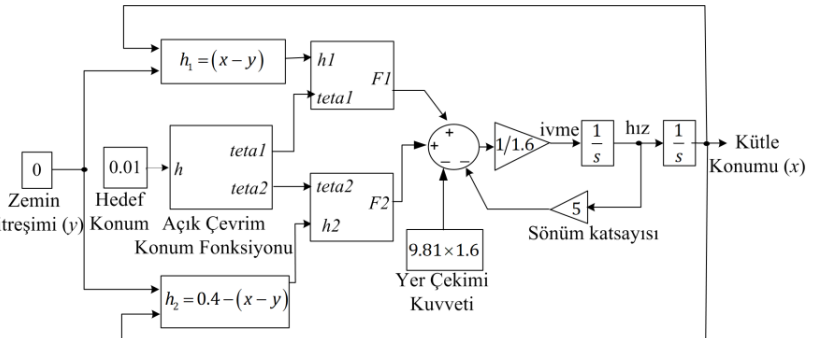
güncellenen ampirik formülün tersi alınarak Şekil 17'de sunulan program kodu oluşturulmuştur. Böylece gidilmesi istenen hedef mesafede kuvvet eşitliği sağlanıp ortadaki mıknatısın dengede kalması için gerekli DC motor açıları (θ_1 ve θ_2) hesaplanarak açık-çevrim konum kontrolü gerçekleştirilmektedir. Eğer ortadaki mıknatıs $+h$ yönünde gidecekse θ_2 açısını 90 dereceye ayarlamakta diğer türlü eğer ortadaki mıknatıs $-h$ yönünde hareket edecek ise de bu sefer de θ_2 açısını 0 dereceye çekip sadece θ_1 açısı değiştirilerek konum kontrolü sağlanmaktadır. Bu geliştirilen fonksiyon ilk önce Şekil 17'de sunulan *Matlab/Simulink* ortamında denenmiş olup bir 1,6 kg'lık kütle için elde edilen konum cevabı h_1 değişkenine göre Şekil 18'de verilmektedir.



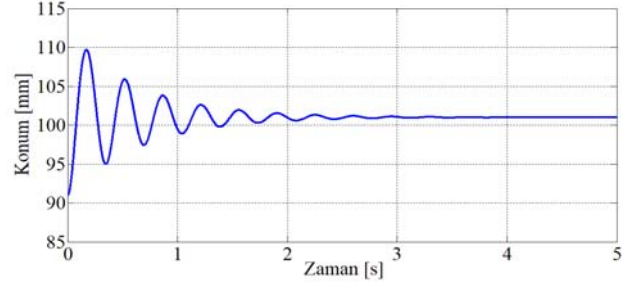
Şekil 16. Dikey konfigürasyonda bulunan mıknatısların şematik gösterimi (Schematic representation of magnets in vertical configuration)

Sanal model üzerinde hedef konuma başarıyla gittiği gözlemlenen fonksiyonun daha sonra gerçek-zamanlı açık-çevrim konum kontrolcüsüne adaptasyonu sağlanmıştır. Yatay konfigürasyon için hazırlanmış deney düzeneği dikey yönde test yapabilmek için Şekil 19'da görüldüğü gibi sadece 15 derece kaldırılmıştır. Çünkü tam dikey durumda tüm sisteme el ile hızlı bir şekilde yüksek frekanslarda tahrik vermek zor olacağından dolayı Şekil 20'de oluşturulan gerçek-zamanlı denetim fonksiyonunda kütle değerine $\sin 15^\circ$ çarpımı eklenmiştir.

```
function [teta1,teta2] = input(h)
A=0.0012; B=0.0402; n=4.8548;
h1=0.091+h; h2=0.4-h1; F=9.81*1.6;
if h>0.001
teta2=90; F2=sind(teta2)*A/(B+h2)^n;
F1=F-F2; teta1=asind(F1*((B+h1)^n)/A);
elseif h<-0.001
teta2=0; F2=sind(teta2)*A/(B+h2)^n;
F1=F-F2; teta1=asind(F1*((B+h1)^n)/A);
else
teta1=45; teta2=45;
end
```



Şekil 17. Dikey konfigürasyonda sistemin konum kontrolü için oluşturulan program kodu ve Simulink modeli (Program code and Simulink model created for the position control of the system in vertical configuration)



Şekil 18. Başlangıç konumundan + yönde 10 mm gitmesi istenen mıknatısın cevabı (Response of the magnet that is requested to go 10 mm from the starting position in the + direction)

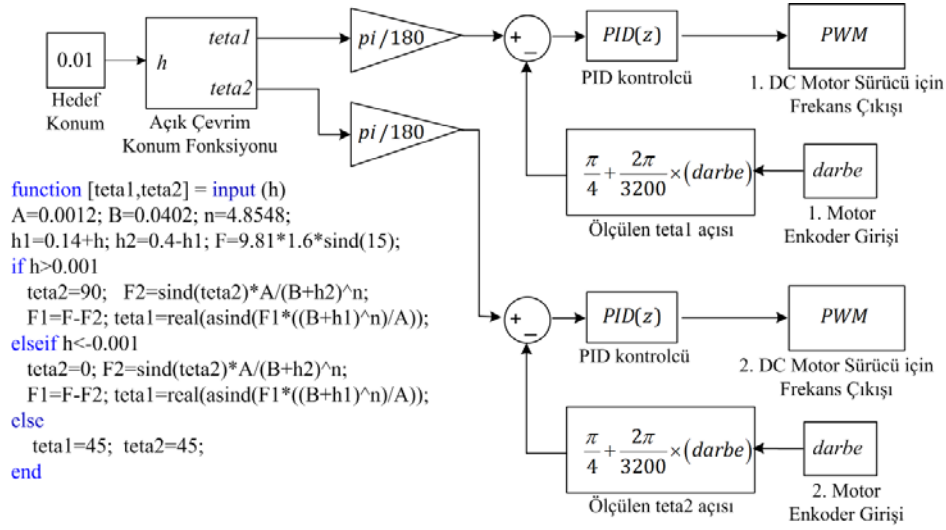


Şekil 19. Dikey konfigürasyon için manyetik süspansiyon deneyi (Magnetic suspension test for vertical configuration)

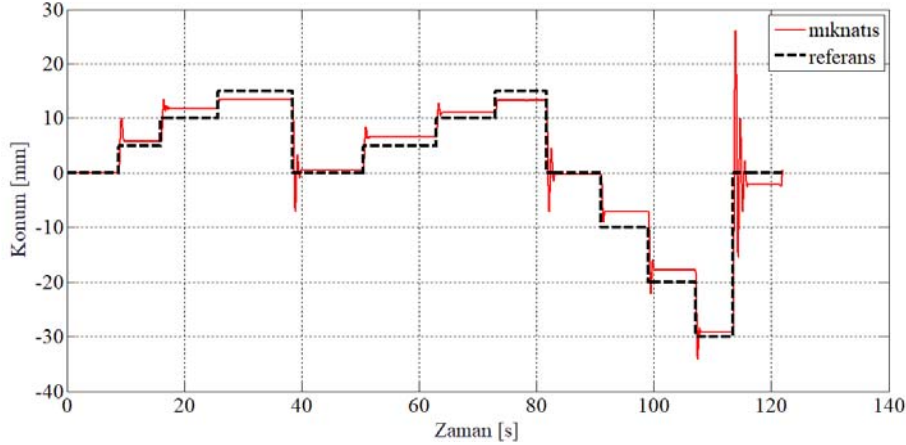
Ayrıca gerçek-zamanlı denetim sistemine geçişte ortadaki mıknatısın denge konumu sanal ortamdan farklı olarak $0,14\text{ m}$ olarak ölçülmüştür. Bu sebeplerden dolayı Şekil 20'de sunulan gerçek-zamanlı konum kontrolcüsünde gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Krank-biyel mekanizması yardımıyla enkoder üzerinden okunan ortadaki kayar mıknatısın doğrusal konum cevabı ($\pm h$) Şekil 21'de gösterilmektedir. Hedef konumlara giderken birtakım hatalar olduğu gözlemlense de açık-çevrim konum kontrolcüsünün arzulan şekilde çalıştığı görülmektedir.

4.2. Manyetik süspansiyon ivme deneyleri (Magnetic suspension acceleration experiments)

Açık-çevrim konum kontrol deneyleri başarılı bir şekilde gerçekleştirildikten sonra sistemin zeminine ve ortadaki kayar mıknatıs üzerine ivme sensörleri bağlanmıştır. Bu iki ivme sensöründen eş zamanlı olarak ölçülen değerler karşılaştırılarak ivme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapmak için ilk olarak



Şekil 20. Dikey konfigürasyonda sistemin gerçek-zamanlı konum kontrolü için oluşturulan program kodu ve Simulink modeli (Program code and Simulink model created for the real-time position control of the system in vertical configuration)



Şekil 21. Dikey düzlemde deney düzeneğinden elde edilen konum cevabı (Position response obtained from the experimental setup in the vertical plane)

mıknatıslar devre dışı bırakılıp sabit yay katsayılı süspansiyon sistemine ait deneyler yapılmış olup daha sonra yaylar çıkarılıp mıknatıslar devreye alınarak kontrolcü aktif ve kontrolcü devre dışı şeklinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Belirli bir zaman dilimine ait ölçülen ivme değerlerini sayısal olarak karşılaştırmak için Eş. 17'de verilen ortalama karekök değerleri (Root Mean Square-RMS) kullanılmıştır. Ayrıca belirli bir zaman dilimine ait ölçülen ivme değerlerini frekansa bağlı olarak ifade edebilmek için Eş. 18'de verilen frekans yanıt fonksiyonu (Frequency Response Function-FRF) kullanılmıştır. Pavelka vd. [19] çalışmasında frekans analizi için Eş. 19'da kullanımı belirtilen *modalfrf* fonksiyonunu önermektedir.

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (17)$$

$$frf(\omega) = \frac{\text{Çıktı Sinyali}(\omega)}{\text{Giriş Sinyali}(\omega)} = \frac{a_{mıknatis}}{a_{zemin}} \quad (18)$$

$$[frf, f, coh] = \text{modalfrf} = (x, y, fs, windows, \text{noverlap}, \text{Estimator}, \text{Hv}, \text{Sensor}, \text{acc}') \quad (19)$$

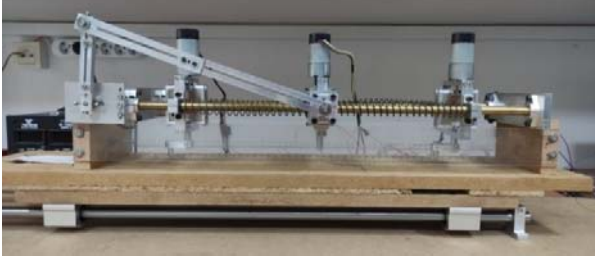
Bu önerilen *Matlab* fonksiyonunda, x olarak gösterilen giriş sinyalini (zeminde bulunan ivme sensörü) y ile gösterilen ise çıkış sinyalini

(ortadaki mıknatısın üzerinde bulunan ivme sensörü) ifade etmektedir. Örnekleme frekansı (f_s) ise 1000 Hz olarak girilmiştir. Toplanan ivme sinyallerini pencerelere bölerek analiz etmeye yarar pencere sayısı (*windows*) 8'i aşmayacak şekilde ayarlanmış olup çakışan sinyallerin sayısı (*noverlap*) ise pencere sayısının yarısına denk gelecek şekilde belirlenmiştir. Giriş ve çıkış sinyallerinde gürültü olmasından dolayı *Estimator* ve *Hv* değişkenleri kullanılmış olup sensör tipinin (*Sensor*) ivme sensörü (*acc*) olduğu belirtilmiştir. Böylece örnekleme frekansının yarısına kadar yani 0-500 Hz aralığı için süspansiyon sistemine ait frekans yanıt fonksiyonu değerleri elde edilecektir.

4.2.1. Sabit yay bağlı durumda ivme deneyi (Acceleration test with fixed spring)

Şekil 22'de gösterildiği gibi ortadaki mıknatısla sürekli etkileşim halinde çalışacak 2 adet mekanik ay bağlanmıştır. Ayrıca tüm deney esnasında döner mıknatıslar sürekli 0° açıda sabit tutularak manyetik kuvvetler ortadan kaldırılmıştır. İlk önce krank uzvuna sabit açıda bir değer verilerek sistem serbest titreşime sokulmuş olup toplanan sinüzoidal verilerin tepe noktalarından ve zaman geçişlerinden süspansiyon sisteminin yay sabitinin (k) 650 N/m, sönüm oranının (ξ) 0,0497 ve doğal frekansının (ω_n) ise 20,12 rad/s olduğu tespit edilmiştir. Sonrasında mekanizmanın üzerinde yer aldığı en alttaki

kızak sistemi el yardımıyla rastgele tahrik edilerek tüm sistem genel zorlama kuvvetleri altında titreşime sokulmuştur. Şekil 23 ortadaki mıknatısın konumu göstermekte olup bu esnada ivme sensörleri yardımıyla eş zamanlı olarak zeminin ve ortadaki mıknatısın ivmeleri kayıt altına alınarak toplanan veriler Şekil 24'te sunulmuştur.

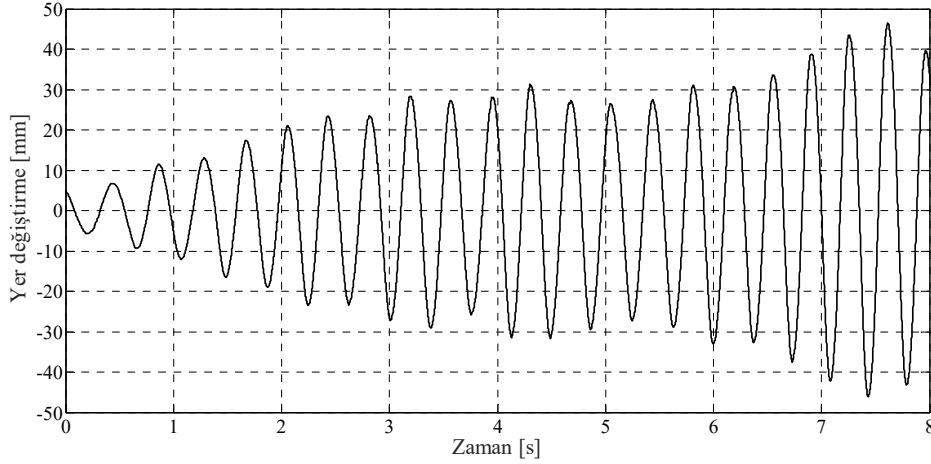


Şekil 22. Süspansiyon sisteminin yay bağlantılı durumu
(Spring connected state of the suspension system)

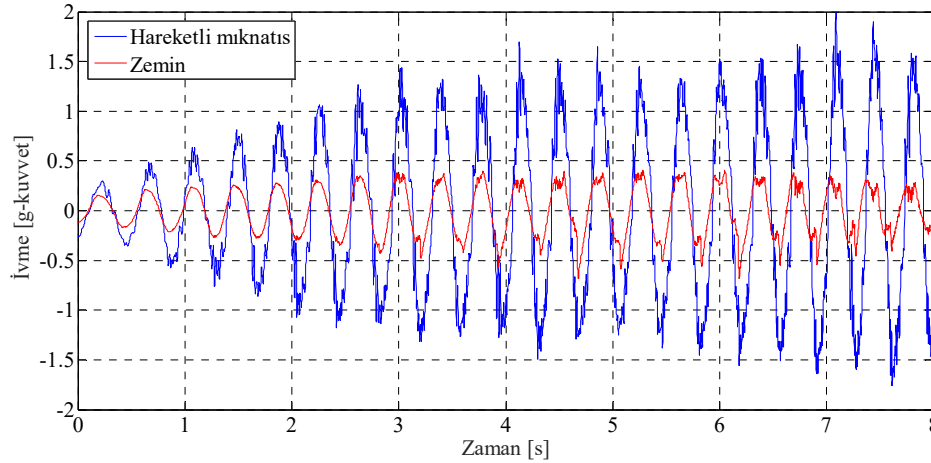
4.2.2. Yatay konumda manyetik süspansiyon ivme deneyi (Magnetic suspension acceleration test in the horizontal position)

Şekil 13'te gösterilen manyetik süspansiyon sistemi ilk önce serbest titreşime sokularak toplanan verilerden sistemin eş değerli yay sabitinin (k) 638 N/m, sönüm oranının (ξ) 0,0707 ve doğal frekansının (ω_n) ise 19,90 rad/s olduğu görülmüştür. Daha sonra tüm manyetik

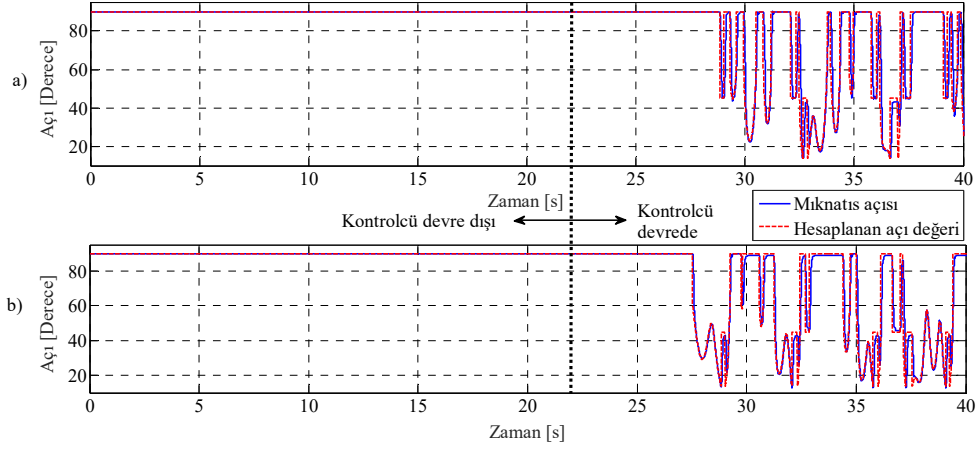
süspansiyon sistemi el ile tahrik edilen ikinci bir kayar mekanizma yardımıyla genel zorlama kuvvetleri altında kapalı-çevrim titreşim yalıtım kontrolcüsü devredeyken ve devre dışı bırakılarak titreşim izolasyonu için testler yapılmıştır. Geliştirilen kapalı-çevrim titreşim yalıtım kontrolcüsünün çalışma prensibi bir önceki bölümde tasarlanmış olan açık-çevrim konum kontrolcüsünü kullanarak o anki konum değerini yeni denge konumu kabul edecek şekilde döner mıknatısların açılarını anlık olarak ayarlamaktır. Böylece ortadaki mıknatıs mevcut konumunu sabit referans sistemine göre korumaya çalışacaktır. Bunu sağlamak için Şekil 8.b)'de gösterildiği üzere ortadaki mıknatısın doğrusal konum bilgisi pozitif geri-besleme yapılarak konum kontrolcüsüne referans giriş olarak bağlanmıştır. Kontrolcü devredeyken ve devre dışıyken yapılan ölçümler kayıt altına alınarak titreşim kontrolcüsünün farklı durumlardaki performansları karşılaştırılmıştır. İlk olarak Şekil 25'te görüldüğü gibi kontrolcü devre dışı bırakılıp döner mıknatıslar 90 derecede sabit tutulmaktadır. Sonrasında ise dışardan el yardımıyla zemin yapıya değişken frekansa sahip hareket girdisi verilerek ortadaki mıknatısın Şekil 26'da gösterildiği üzere titreşim yapması sağlanmıştır. Bu esnada zemine ve ortadaki hareketli mıknatıs üzerinde yer alan ivme sensörlerinden toplanan veriler Şekil 27'de gösterilmektedir. Önemle belirtmek gerekir ki 20. saniyeden sonra kontrolcü devreye alınarak deneylere devam edilmiştir. Kontrolcü devreye alındıktan sonra ölçülen değerler yine Şekil 25-27 üzerinden gözlemlenebilir. Ölçülen ivme değerlerinin Eş. 19'da açıklanan frekans yanıt fonksiyon değerleri ise Şekil 28'de sunulmaktadır.



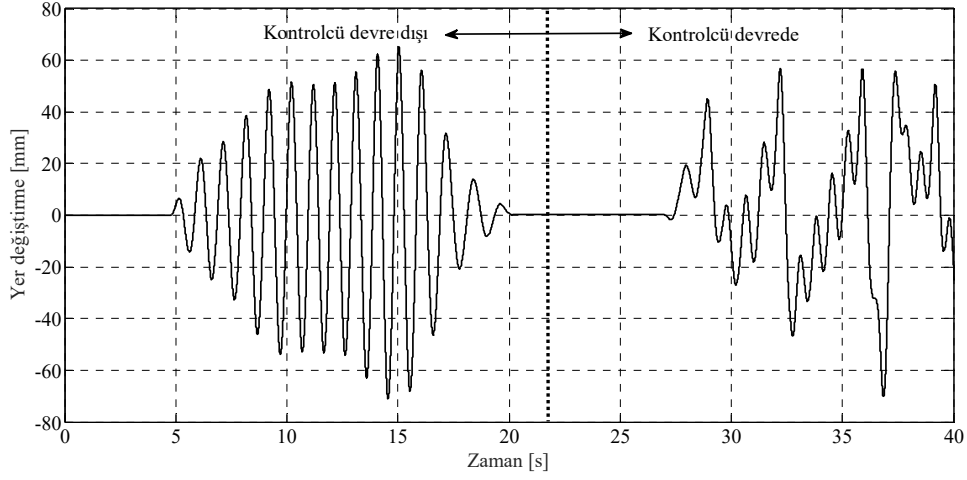
Şekil 23. Yay bağlı durum için ortadaki mıknatısın konumu (The position of the middle magnet for the spring-connected state)



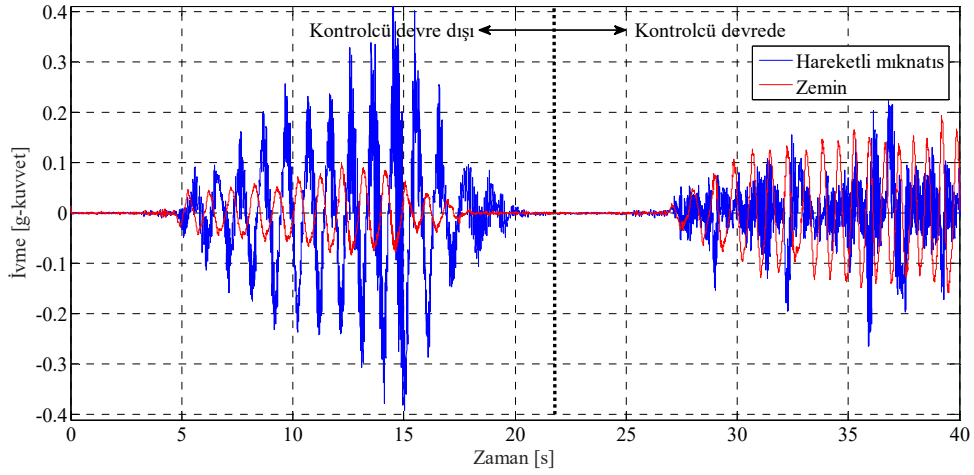
Şekil 24. Yay bağlı durum için ivme değerleri (Acceleration values for the spring-connected state)



Şekil 25. Kontrolcü devre dışıyken ve devredeyken a) θ_1 açısı değişimi b) θ_2 açısı değişimi
(While the controller is disabled and enabled a) Angle change of the θ_1 b) Angle change of the θ_2)



Şekil 26. Kontrolcü devre dışıyken ve devredeyken ortadaki mıknatısın konumu
(The position of the middle magnet when the controller is disabled and enabled)



Şekil 27. Kontrolcü devre dışıyken ve devredeyken ivme cevapları (Acceleration responses with controller disabled and enabled)

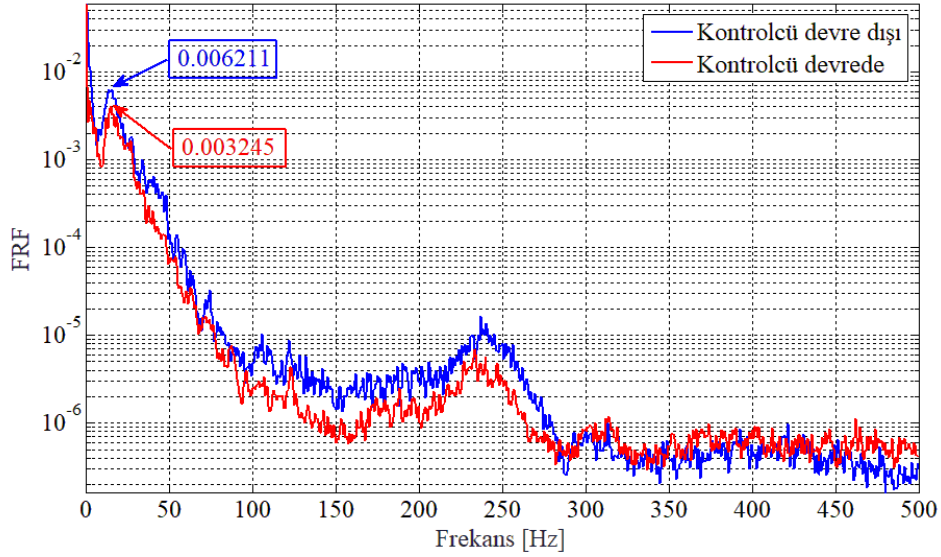
4.2.3. Dikey konfigürasyonda manyetik süspansiyon deneyi (Magnetic suspension test in vertical configuration)

Şekil 19'da görüldüğü gibi tüm sistem yataydan ancak 15° eğim açısında kaldırılmış olup bu dikey konfigürasyon için ivme deneyleri yapılmıştır. İleride tam dikey durumda çalışmak için Şekil 20'de sunulan program kodunda $\sin 15^\circ$ çarpanı yerine $\sin 90^\circ$ katsayısının kullanılması yeterli olacaktır. Diğer bir önemli husus ise oluşturulan dikey konfigürasyon için pozitif yönde bir hareket (+h) krank biyel mekanizmasında negatif bir harekete karşılık gelmektedir. Bu zıtlığı ortadan kaldırmak için yatay konfigürasyondan farklı olarak açık-çevrim konum kontrolcüsüne negatif geri-besleme yapılarak bir kapalı-çevrim titreşim yalıtım kontrolcüsü oluşturulmuştur. Sonrasında ise benzer şekilde titreşim kontrolcüsü devredeyken ve devre dışıyken yapılan testler karşılaştırılarak geliştirilen titreşim kontrolcüsünün etkisi gözlemlenmiştir. İlk olarak Şekil 29'da görüldüğü gibi kontrolcü devre dışı bırakılıp döner mıknatıslar 45 dereceye sabitlenmiştir. Sonrasında dışardan el yardımıyla zemine değişken frekansa sahip hareket girdisi verilerek ortadaki kayar mıknatıs Şekil 30'da gözüktüğü üzere titreşime sokulmuştur. Zemine

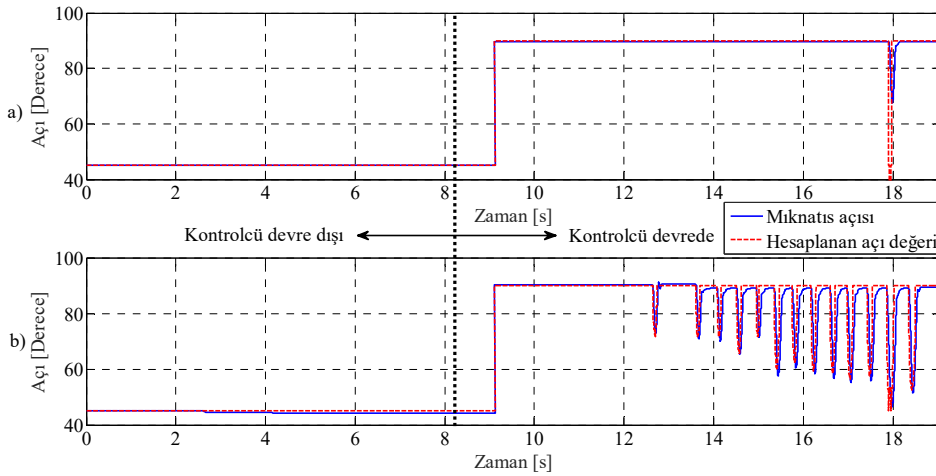
ve ortadaki hareketli mıknatıs üzerine yerleştirilen ivme sensörleri yardımıyla elde edilen ivme değerleri Şekil 31'de sunulmaktadır. Ölçülen ivme değerlerinin frekans yanıt fonksiyonu ise Şekil 32'de gösterilmektedir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

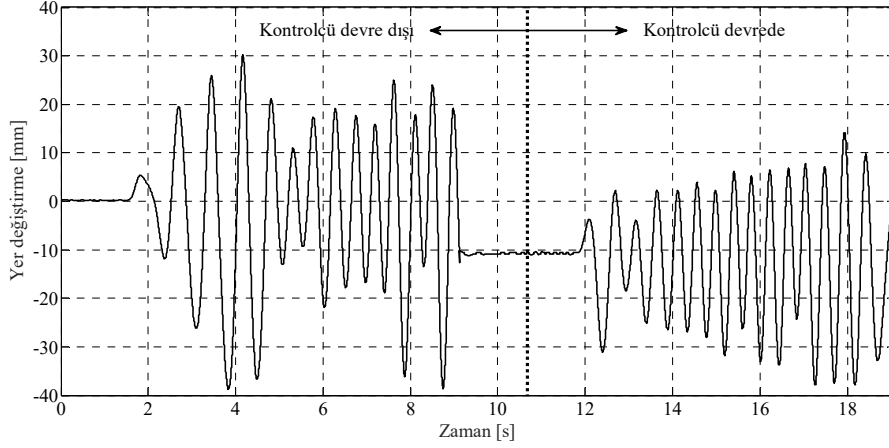
Bu çalışmada farklı zemin koşullarında klasik yaylı süspansiyon sistemlerinden daha iyi bir titreşim yalıtımı sağlayacak bir manyetik süspansiyon sistemi tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Literatürde bu gerçekleştirilen çalışmaya en yakın örnek ulaşım sektöründe kullanılmaya yeni başlanmış olan Mag-Lev trenleridir. Fakat bu tür sistemlerde sabit mıknatıslar kullanılmakta olup sistemin çalışma aralıkları küçüktür. Bu çalışmada ise sabit mıknatıslar yerine polarizyon açılarının sürekli kontrol edildiği döner mıknatıslar kullanılarak daha geniş bir çalışma aralığında ve herhangi bir ileri kontrol algoritmasına ihtiyaç duyulmadan basit bir algoritma ile aktif titreşim yalıtımının yapılabileceği gösterilmiştir. İlk olarak cihaz yatay konfigürasyona alınarak sabit yaylar takılı iken ve sonrasında ise mıknatıslar devreye alınarak önerilen titreşim kontrol sistemi



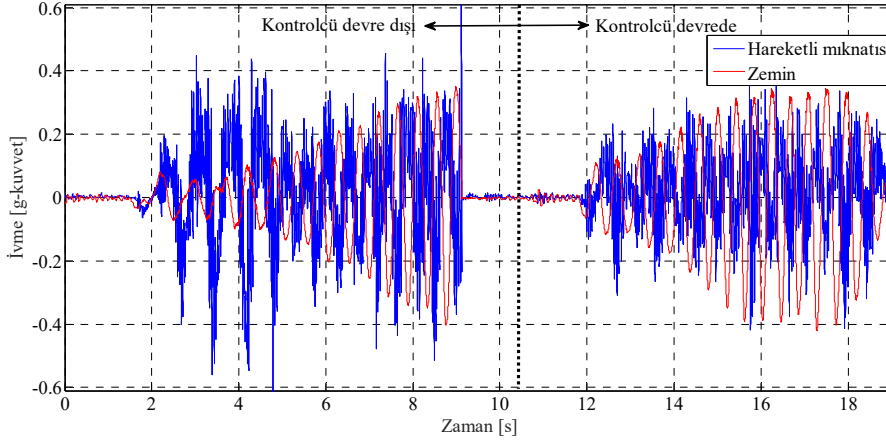
Şekil 28. Kontrolcü devredeyken ve devre dışıyken FRF değerleri (FRF values with controller enabled and disabled)



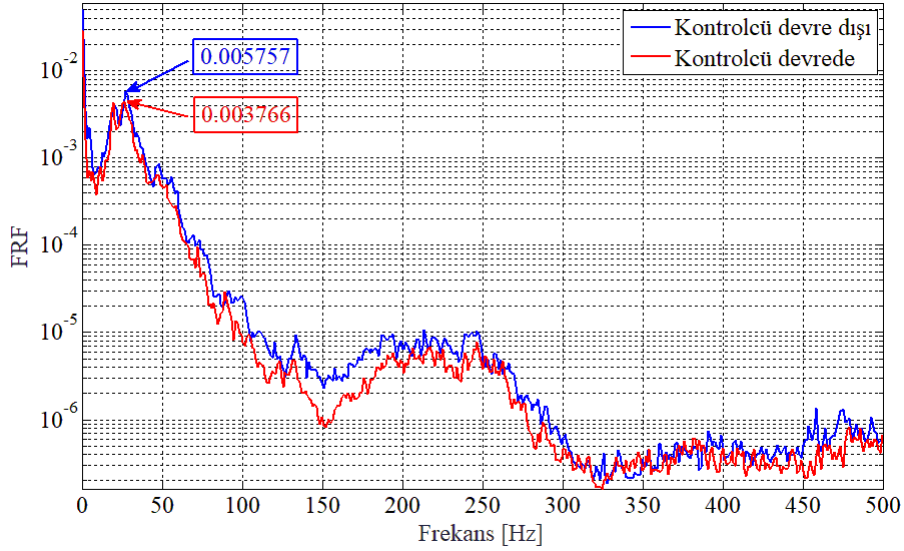
Şekil 29. Kontrolcü devre dışıyken ve devredeyken a) θ_2 açısı değişimi b) θ_1 açısı değişimi
(While the controller is disabled and enabled a) Angle change of the θ_2 b) Angle change of the θ_1)



Şekil 30. Kontrolcü devre dışıyken ve devredeyken ortadaki mıknatısın konumu
(The position of the middle magnet when the controller is disabled and enabled)



Şekil 31. Kontrolcü devre dışıyken ve devredeyken ivme cevapları (Acceleration responses with controller disabled and enabled)



Şekil 32. Kontrolcü devredeyken ve devre dışıyken FRF değerleri (FRF values with controller enabled and disabled)

devre dışı (döner mıknatıslar 90° açıda sabit) ve kontrolcü devredeyken olmak üzere üç farklı durumda testler yapılmıştır.

Deneyler sonucu elde edilen verileri RMS ve FRF metotlarıyla analiz edildiğinde kontrolcü aktif edildikten sonra ivme değerlerinde

Tablo 3. İvme deneylerinden elde edilen RMS ve FRF değerleri (RMS and FRF values obtained from acceleration experiments)

		$a_{RMS_mıknatıs}$	a_{RMS_zemin}	$\frac{a_{RMS_mıknatıs}}{a_{RMS_zemin}}$	FRF
Yatay konfigürasyon	Kontrolcü devre dışı	0,1252	0,0413	3,0315	0,006211
	Kontrolcü devrede	0,0586	0,0835	0,7018	0,003245
Dikey konfigürasyon	Kontrolcü devre dışı	0,1710	0,1474	1,1601	0,005757
	Kontrolcü devrede	0,1202	0,1953	0,6155	0,003766
Sabit yaylı durum	Kontrolcü yok	0,8179	0,2369	3,4525	-

yaklaşık 3-4 katlık bir düşüş gözlemlenmiştir. Kontrolcünün etkisini dikey konfigürasyonda görmek için tüm sisteme 15 derecelik bir eğim verilerek cihaz sanki dikey konfigürasyundaymış gibi testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen RMS ve FRF değerlerine bakıldığında kontrolcü devreye alındıktan sonra ivme değerlerinde yaklaşık 2 katlık bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Tüm deneylerden elde edilen RMS ve FRF değerleri Tablo 3'te verilmektedir. Teoride (yani simülasyon ortamında) tam bir titreşim yalıtımı sağlanmış olup deneysel sonuçlarda bunun elde edilememesinin sebebi ise döner mıknatısları kontrol eden 7 Watt'lık DC motorların güç yetersizliği olup hedef konumlara (Şekil 25 ve Şekil 29'da gösterildiği üzere) hatasız bir şekilde anlık olarak gidememesidir. Bu yüzden ilerleyen çalışmalarda en az 50-100 Watt'lık elektrik motor kullanımı ya da araçlarda pratik uygulama düşünülür ise yüksek hız ve tork kapasitesine sahip hidrolik motorların kullanılması önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Doç. Dr. Ergin KILIÇ danışmanlığında yürütülen Berkan KUŞÇU'nun yüksek lisans tezinden oluşturulmuştur.

Kaynaklar (References)

- Rao S.S., Mechanical Vibrations, Fifth Edition, Pearson Education, New York, A.B.D., 2011.
- Sever M., Şendur H.S., Yazıcı H., Arslan M.S., Active vibration control of a vehicle suspension system having biodynamic driver model with state derivative feedback LQR, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1574-1583, 2019.
- Eroğlu M., Koç M.A., Kozan R., Esen İ., Active control of quarter-car and bridge vibrations using the sliding mode control, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (4), 1957-1970, 2022.
- Youness S., Lobusov E., Networked control for active suspension system, Procedia Computer Science, 150, 123-130, 2019.
- Bednarek M., Lewandowski D., Polczyński K., Awrejcewicz J., On the active damping of vibrations using electromagnetic spring, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 1-14, 2020.
- Öztürk S., Kizir S., Bingül Z., Oysu C., Manyetik Süspansiyon Sisteminin Gerçeklenmesi ve Kontrolü, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul-Türkiye, 95-100, 5-7 Eylül, 2007.
- Sun N., Fang Y., Chen H., Tracking control for magnetic-suspension system with online unknown mass identification, Control Engineering Practice, 58, 242-253, 2017.
- Liu C., Fu D., Wang T., H_{∞} control for magnetic-suspension system of gantry-moving type numerically controlled machine tool crossbeam. International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, Harbin-China, vol.1, 21-23, 12-14 August, 2011.
- Golob M., Tovornik B., Modeling and control of the magnetic suspension system, ISA Transactions, 42, 89-100, 2003.
- JesúsRubio J., Zhang L., Lughofer E., Cruz P., Alsaedi A., Hayat T., Modeling and control with neural networks for a magnetic levitation system, Neurocomputing, 227, 113-121, 2017.
- Robertson W.S., Kidner M., Cazzolato B.S., Zander A.C., Theoretical design parameters for a quasi-zero stiffness magnetic spring for vibration isolation, Journal of Sound and Vibration, 326, 88-103, 2009.
- Yang B., Hu Y., Fang H., Song C., Research on arrangement scheme of magnetic suspension isolator for multi-degree freedom vibration isolation system, Journal of Industrial Information Integration, 6, 47-55, 2017.
- Mizuno T., Takasaki M., Kishita D., Hirakawa K., Vibration isolation system combining zero-power magnetic suspension with springs, Control Engineering Practice, 15, 187-196, 2007.
- Carrella A., Brennan M.J., Waters T.P., Shin K., On the design of a high-static low-dynamic stiffness isolator using linear mechanical springs and magnets, Journal of Sound and Vibration, 315, 712-720, 2008.
- Xu D., Yu Q., Zhou J., Bishop S.R., Theoretical and experimental analyses of a nonlinear magnetic for vibration isolator with quasi-zero stiffness characteristic, Journal of Sound and Vibration, 332, 3377-3389, 2013.
- Akoun G., Yonnet J.P., 3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets, IEEE Transactions on Magnetics, 20 (5), 1962-1964, 1984.
- Yonnet, J.P., Allag H., Three-dimensional analytical calculation of permanent magnet interactions by magnetic node representation, IEEE Transactions on Magnetics, 47 (8), 2050-2055, 2011.
- Allag H., Yonnet J.P., Bouchekara H.R., Latreche M.E., Rubeck C., Coulombian Model for 3D Analytical Calculation of the Torque Exerted on Cuboidal Permanent Magnets with Arbitrary Oriented Polarizations, Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 30 (4), 351-356, 2015.
- Pavelka P., Huňady R., Kučinský M., Modal analysis using the signal processing toolbox of Matlab 2017, American Journal of Mechanical Engineering, 5 (6), 312-315, 2017.