

# Hyperloop Kapsülü için Manyetik Askılama Sistemi Tasarımı

## Design of Magnetic Levitation System for Hyperloop Pod

İbrahim Enes Uslu<sup>1</sup>, Ahmet Selim Akkaş<sup>2</sup>, Mehmet Onur Gülbahçe<sup>3</sup>, Kevser Özer<sup>3,4</sup>, İlhan Kocaarslan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
uslu18@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
akkas20@itu.edu.tr, kocaarslani@itu.edu.tr

<sup>3</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
ogulbahce@itu.edu.tr, ozerke16@itu.edu.tr

<sup>4</sup>Kormas-Elektrikli Motor San. ve Tic. A.Ş.  
ozerke16@itu.edu.tr

### Özet

Hyperloop teknolojisi 2013 yılında ortaya atılan, yaklaşık 1220km/s hızıyla karada ses hızına ulaşmayı hedefleyen, uzun mesafe yolculukları için kullanılması öngörülen bir ulaşım ve taşımacılık projesidir. Hyperloop kapsülünün bu hızlara ulaşmasına olanak sağlayan etmen aracın ilerlemesi sırasında kapsülün raylara temas etmemesi ve ilerlediği tünelin vakumlu olmasıdır. Bu çalışmada, bir Hyperloop kapsülünün askılama sisteminde kullanılmak üzere elektrodinamik askılama diski tasarımı yapılmıştır. Manyetik kuvvetler sayesinde rayı iterek kapsülün havada durmasını sağlayan bu askılama sisteminde yüksek dönüş hızlarına sahip sürekli mıknatıslar bulunmaktadır. Analitik tasarım tamamlandıktan sonra model ANSYS Electronics Desktop kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve alınan çıktılar doğrultusunda gerekli geometrik ve elektriksel iyileştirmeler yapılmıştır.

### Abstract

Hyperloop technology is a transportation project introduced in 2013, aiming to reach the speed of sound on land at a speed of approximately 1220km/h and intended to be used for long distance journeys. The factor that allows the Hyperloop capsule to reach these speeds is that the capsule does not contact the rails during the propulsion of the vehicle and the tunnel in which it moves is vacuum. In this study, an electrodynamic suspension disc is designed to be used in the levitation system of a Hyperloop capsule. There are permanent magnets with high rotational speeds in this levitation system, which allows the capsule to stay in the air by pushing the rail thanks to magnetic forces. After the analytical design was completed, the model was analyzed with the finite element method using ANSYS Electronics Desktop and the necessary geometric and electrical improvements were made according to the outputs.

### 1. Giriş

Son yıllarda gündelik hayatın hızlanmasıyla birlikte ulaşım ve taşıma süreçlerindeki hız oldukça önemli bir hale gelmiştir. Bu gereksinimi karşılayabilmek için yüksek hızlara çıkabilen hava ulaşımı sıklıkla tercih edilir hale gelmiştir. Kara taşımacılığında hızı sınırlayan temel unsurlardan birisi tekerlek ile yer arasındaki sürtünme kuvvetidir. Temel prensibi sürtünme kuvvetini azaltmak üzerine olan Hyperloop teknolojisi karada ses hızına çok yakın hızlara ulaşmayı hedefleyen, Maglev treninin vakumlu bir tünel içerisinde ilerleyen halidir [1]. Hyperloop kapsülü, vakumlu ortam sayesinde hava sürtünmesini en aza indirirken aynı zamanda askılama sistemi sayesinde yer sürtünmesini de ortadan kaldırmaktadır. Bu durum harcanılan enerjinin doğrudan hıza dönüştürülmesine olanak sağlar. Hyperloop kavramını içeren temsili bir resim Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1: Hyperloop kavramını içeren temsili bir resim [4].

Önerilen bu yapının mevcut çalışma koşulları sayesinde 1220 km/s civarında hızlara ulaşarak süper hızlı bir ulaşım sistemi olması beklenmektedir [1,2]. Buna ek olarak önerilen teknolojiye karbon ayak izi büyük olan fosil yakıtlar yerine elektrik

enerjisinin kullanımı çevre dostu bir ulaşım aracı olduğunu kanıtlar niteliktedir [1,3].

Asıklama sistemleri hava yastıklamaya askılama (ACV), elektromanyetik askılama (EMS) ve elektrodinamik askılama (EDS) olmak üzere üç farklı gruba ayrılabilir. Hava yastıklama sisteminde basınçlı tüpler veya fanlar kullanılarak araçtan zemine üflenen hava sayesinde askılama sağlanır. ACV sistemleri kısa mesafe yolculuklarında karşımıza çıkmaktadır ancak uzun mesafe taşımacılığında ACV sistemleri başarılı bir çözüm olarak gözükmemektedir [5]. Ayrıca, vakumlanmış olan Hyperloop tüneline hava üflendiği zaman tünelin içine hava dolacak ve tünelin daha aktif olarak vakumlamaya devam etmesi gerecektir. Bu durum sistemi verimsizleştirecektir.

İkinci yöntem olan elektromanyetik askılama sistemlerinde ise trende bulunan ve elektrik akımı ile beslenen elektromıknatıslarla birlikte kılavuz rayda bulunan elektromıknatıs sistemleri veya ferromanyetik sistemler sayesinde askılama sağlanmaktadır. Elektromanyetik askılama sistemlerinde askılama çekme kuvvetleri ile sağlanır [6].

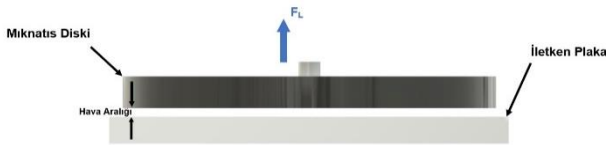
Üçüncü yöntem olan ve bu çalışmanın da ana odak noktasını oluşturan askılama sistemi elektrodinamik askılama sistemidir. Elektrodinamik askılama yöntemleri ise elektromanyetik askılama yöntemlerinin aksine itme kuvvetleri ile sağlanır [6]. Bu çalışmadaki sistemde de hareketli mıknatıslar sayesinde pasif kılavuz plakalarda oluşan manyetik etkiler sonucu oluşan itme kuvveti sayesinde askılama sağlanmaktadır.

Bu çalışmada 70 kg ağırlığındaki bir hyperloop kapsülü için elektrodinamik askılama sistemi tasarlanmıştır. Öncelikle sistemin çalışma ilkesi detaylandırıldıktan sonra matematiksel model ortaya konmuştur. Analitik tasarımı yapılan sistemin en uygunlaştırılması ve sistem gereksinimlerini ne kadar karşıladığını anlamak için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

## 2. Hyperloop Kapsülü için Askılama Sistemi Tasarımı

### 2.1. Askılama Sisteminin Yapısı ve Çalışma İlkesi

Elektrodinamik askılama sistemlerinde askılama birden fazla yöntemle sağlanabilmektedir. Bu sistemde temel yöntem değişken bir manyetik alan oluşturmaktır. Bu değişken manyetik alan mıknatısların hareket ettirilmesi ile sağlanabilir ancak bu hareket sadece askılama sağlamaz aynı zamanda bir manyetik sürtünme de oluşturur. Düşük hızlarda sürtünme baskın halde iken yüksek hızlarda ise askılama baskındır [7]. Bu yüzden EDS sistemlerinde mıknatıslar yüksek hızlarda hareket ettirilir ve bu hareket doğrusal veya çembersel olabilir. Bu çalışmada tasarlanan kapsül sadece ilerleme halinde değil, sabit konumdayken de askılama yapabilmeye için mıknatısların döndürmesi gerekmektedir. Mıknatısların döndürülebilmesi için Şekil 3'deki gibi bir platform tasarımı yapılmış ve manyetik alanın değişkenliği dairesel hareket ile sağlanmıştır.



Şekil 2: Disk ve plaka yandan görünüm.

İletken plaka değişken manyetik alana maruz kaldığı zaman girdap akımları oluşacaktır [8]. İletkene uygulanacak manyetik akının tepe noktası  $\phi_B$  olmak üzere, diskin oluşturacağı manyetik akı sinüzoidal şekilde ifade edilebilir ve ondan yararlanılarak girdap akımlarının kararlı hal formülüne (2) ulaşılır [9].

$$\phi_B = \phi_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$i_{ss}(t) = \frac{\phi_0}{L} \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} \left[ \sin(\omega t) + \frac{R}{\omega L} \cos(\omega t) \right] \quad (2)$$

Oluşacak kaldırma kuvvetini ve sürtünme kuvvetini hesaplamak için aşağıdaki yaklaşımlardan faydalanılabilir [10, 11]. Bu yüzeydeki ( $y=g$ ) maksimum akı yoğunluğunu temsil etmektedir.

$$B_z = B_0 \sin(kz) e^{-k(g-y)} \quad (3)$$

$$B_y = B_0 \cos(kz) e^{-k(g-y)} \quad (4)$$

İletkenin kalınlığı  $d$  ve mıknatısların hareket yönündeki genişliği  $w(m)$  olmak üzere indüklenen akı  $\Phi$  şu şekilde temsil edilebilir [10].

$$\phi = w \frac{B_0}{k} e^{-kg} \sin(kz) [1 - e^{-kd}] \quad (5)$$

Ayrıca (5)'ten yararlanılarak ulaşılan maksimum akı değerini, kararlı hal girdap akımı formülünde (2) yerine koyarak yatay ( $x$ ) yöndeki akım elde edilir.

$$I_x(z) = \frac{\lambda B_0 w}{2\pi L} \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} e^{-kg} \left[ \sin(kz) + \frac{R}{\omega L} \cos(kz) \right] \quad (6)$$

Daha sonra, dönen mıknatısların oluşturduğu manyetik alanlar (3) ve (4) ve yatay düzlemde oluşan akımdan (5) yararlanılarak aşağıdaki kuvvet denklemleri oluşturulur.

$$\overline{F}_y = w \overline{I}_x(z) \times \overline{B}_z \quad (7)$$

$$\overline{F}_z = w \overline{I}_x(z) \times \overline{B}_y \quad (8)$$

Kuvvetlerin büyüklüklerinin dalga boyuna göre ortalamasının alınması sonucunda  $F_y$  ve  $F_z$  ortalama kuvvet büyüklüklerine ulaşılır [9].

Kaldırma kuvveti:

$$F_y = \frac{B_0^2 w^2}{2kL} \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} e^{-2kg} \quad (9)$$

Sürtünme kuvveti:

$$F_z = \frac{B_0^2 w^2}{2kL} \frac{\left(\frac{R}{\omega L}\right)}{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} e^{-2kg} \quad (10)$$

Disk tasarımında nihai amaç kaldırma kuvvetini artırarak daha fazla yük kaldırmayı sağlamaktır ancak sürtünme kuvvetini de göze almakta fayda var. Sistemin verimini ifade etmek için kullanılan yöntem kaldırma kuvvetinin sürtünme kuvvetine oranıdır [9]. Bu orana basit bir şekilde (9)'u (10)'a bölerek ulaşılır.

Kaldırma/Sürtünme oranı:

$$\frac{F_y}{F_z} = \frac{wL}{R} = \frac{2\pi}{\lambda} v_z \frac{L}{R} \quad (11)$$

Tasarım süresince kaldırma kuvvetinde artışın yanında kaldırma/sürtünme oranı incelenmiş ve bu oran artırılmaya çalışılmıştır.

## 2.2. Tasarım İsterleri ve Tasarlanan Modelin Özellikleri

Bu sistem bir Hyperloop kapsülü için tasarlanmış olup mekanik ve elektriksel tasarım isterleri şu şekilde belirlenmiştir.

- Disk başına hedeflenen kuvvet,  $F = 100$  N
- Mekanik hava aralığı,  $g = 8$  mm
- Alüminyum plaka kalınlığı,  $d = 12.7$  mm
- Alüminyum plaka genişliği,  $p_d = 305$  mm
- Maksimum disk çapı,  $d = 250$  mm

Tasarım isterleri dikkate alınarak tasarlanan modelin özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1: Nihai tasarım parametreleri.

Parametre	Sembol	Büyükük
Kutup sayısı	P	3
Toplam mıknatis sayısı	s	6
Mekanik hava aralığı (mm)	g	8
Açısal hız (RPM)	w	4000
Disk çapı (mm)	d	145
Mıknatislerin merkezinin disk merkezinden uzaklığı (mm)	u	35
Mıknatis çapı (mm)	$m_d$	30
Mıknatis yüksekliği (mm)	$m_h$	10
Çelik plaka çapı (mm)	$s_d$	145
Çelik plaka kalınlığı (mm)	$S_h$	3
Oluşan moment (Nm)	$\tau$	1.5
Oluşan kaldırma kuvveti (N)	F	100

## 3. Tasarımın 3-D Geçici Hal Manyetik Modeli ve Sonlu Elemanlar Benzetimi

### 3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Manyetik askılama sistemleri belirli formüller ve teoriler üzerinden modellense de bu formülleri, formüllerin çözümleri sırasında karşılaşılan diferansiyel denklemleri çözmek her zaman kolay değildir. Hatta geometrinin karmaşıklaşmasından dolayı bazı denklemler sembolik hesaplarla çözülemez hale gelmektedir. Bu tür durumlarda çözümler sayısal olarak yapılmaya çalışılır. Sistemler sonlu sayıda elemanlara bölünür ve denklemler parçalar halinde çözümlenerek sonuca yaklaşılar. Sonlu elemanlar yöntemi (12)-(18) arasında verilen eşitliklerin çözümüne dayanır.

V skaler elektrik potansiyeli, A manyetik vektör potansiyeli ve w hız olmak üzere manyetik akı yoğunluğu B ve elektrik alan yoğunluğu E sırasıyla (12) ve (13)’teki şekilde ifade edilir [12].

$$B = \nabla \times A \quad (12)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V + w \times \nabla \times A \quad (13)$$

V ihmal edilip, Ohm yasası (14), Amper yasası ve (13)’teki ifade kullanılarak (15)’te bulunan ifadeye ulaşılır. Daha sonra (16)’yı elde etmek için (15)’in diverjansı alınır [12].

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (14)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \times \nabla \times A = \sigma \left( -\frac{\partial A}{\partial t} - w \times \nabla \times A + \nabla V \right) \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \sigma \left( -\frac{\partial A}{\partial t} - w \times \nabla \times A + \nabla V \right) = 0 \quad (16)$$

Skaler elektrik potansiyelinin A ve w cinsinden ifade edilişi (17)’teki şekildedir. (13)’ü (15)’te yerine koyarak (18)’e ulaşabiliriz.

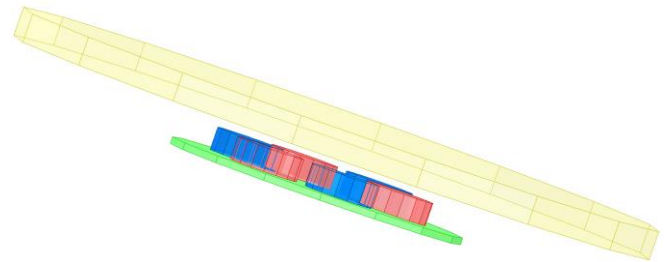
$$V = A \cdot w \quad (17)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \times \nabla \times A = \sigma \left( -\frac{\partial A}{\partial t} - (w \cdot \nabla) A - (A \cdot \nabla) w - A \times (\nabla \times w) \right) \quad (18)$$

Bu çalışmada, döndürülen mıknatisların sebep olacağı girdap akımları ve ardından oluşacak kaldırma kuvveti gibi hesaplamaları analitik olarak yapmak oldukça zordur ve bu yüzden sonlu elemanlar yönteminin kullanımı zorunludur. Bu çalışmada askılama sisteminin manyetik modelinin ve oluşacak kuvvetlerin hesabı Ansys Electronics Desktop kullanılarak yapılmıştır.

### 3.2. Modelleme ve Benzetim

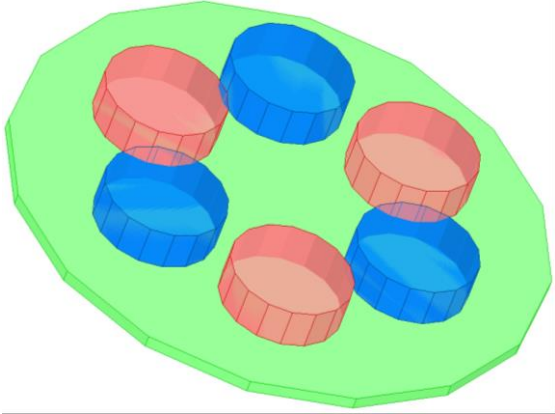
Tasarlanan askılama diskinin üç boyutlu geçici hal manyetik modeli Şekil 3’te verilmiştir. Çözüm için gerekli sınır koşulları tanımlanmıştır. Model, belirlenen hızda, alüminyum plakada oluşan kuvvet ve moment değerleri kararlı hale gelene kadar analiz edilmiştir. Geçici hal modelinde mıknatisler NdFe-35 olarak seçilmiştir. Mıknatisler farklı polariteler yan yana olacak şekilde askılama diski üzerine dizilmiştir. Ray malzemesi olarak ise Alüminyum 6101-T6 ve çelik malzemesi olarak Steel-1010 atanmıştır.



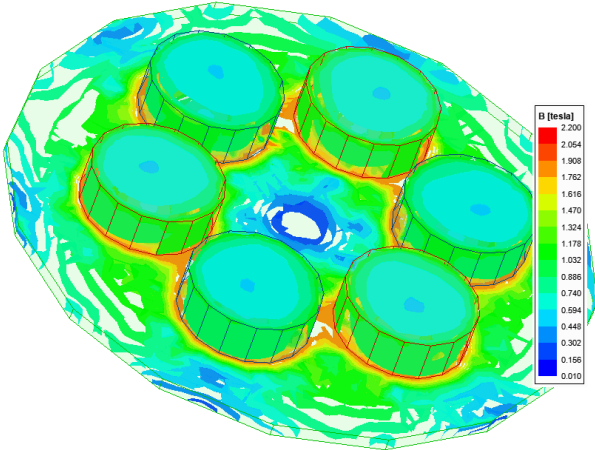
Şekil 3: Askılama diski geometrisi.

Sisteme çelik plaka eklenmesi manyetik akının disipline olmasını sağlayarak meydana gelen manyetik akı yoğunluğunu artırır. Bununla birlikte çelik ferromanyetik bir cisim olduğu için manyetik akının içerisinden geçmesine izin verir. Normalde diskin üst yüzeyinde dağılacak olan manyetik akı çelik içinden devresini tamamlar ve bu sayede manyetik akı daha da kuvvetlendirilmiş olur. Manyetik akının artması ile oluşan kaldırma kuvvetinde de artış görülür. Sistemde oluşan yukarı yönlü manyetik alanlar normalde kapsüle gidip kapsül içerisindeki elektronik aksamı etkilemektedir. Diskin üstüne

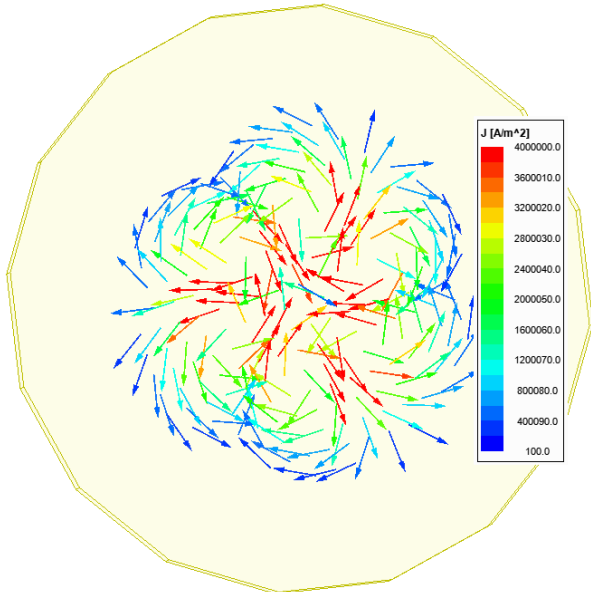
yerleştirilen çelik sayesinde bu manyetik alan kapsüle doğrudan varamayıp çelik içerisinde yayılmaktadır. Bu da kapsüldeki elektronik bileşenlere ulaşan gürültüyü azaltmaktadır.



Şekil 4: Çelik plaka ve mıknatısların geometrisi.

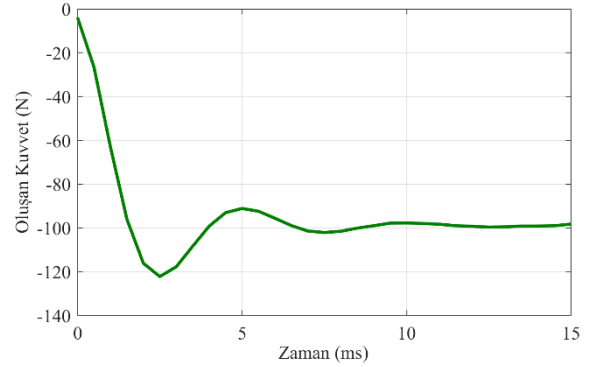


Şekil 5: Mıknatıslar ve boyunduruk üzerindeki oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

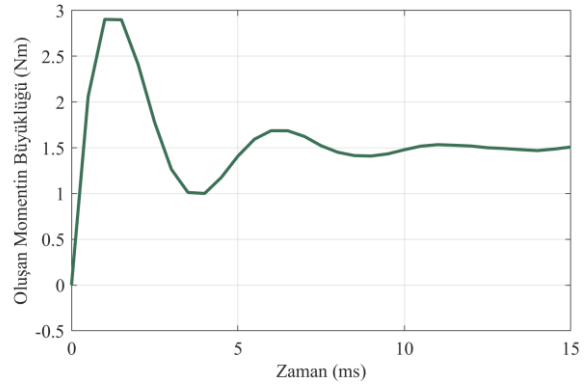


Şekil 6: Rayda meydana gelen girdap akımlarının vektörel görüntüsü.

Sonlu elemanlar analizi sonucu rayda gözlemlenen akım yoğunluğu Şekil 6'da verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kaldırma kuvvetinin değişimi ve gözlenen momentin büyüklüğü de sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 7: Kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi.



Şekil 8: Momentin zamanla değişimi.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada 70 kg ağırlığındaki bir Hyperloop kapsülü için temel bir elektrodinamik askılama sistemi tasarımı yapılmıştır. Analitik tasarım süreci ayrıntılı olarak irdelenmiş ve matematiksel alt yapısı verilmiştir. Analitik tasarım yapıldıktan sonra sonlu elemanlar yöntemi ile model üzerindeki iyileştirmeler yapılmıştır. Yapılan tasarım ve optimizasyonlar sonucunda döner elektrodinamik askılama sistemi tasarımı tamamlanmıştır. Tasarlanan sistemin optimizasyonu kısıtlı bir aralıkta yapılmıştır. Mıknatıs dizimleri ve şekillerinden kaynaklı manyetik kayıplar oldukça fazla olduğu görülmüştür. Bu çalışmada kapsam dışı tutulan mıknatıs şekli, mıknatısların dizimi ve mıknatıs malzemesinin sistem başarımına etkisi daha detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

#### 5. Teşekkür

Bu çalışma, Teknofest tarafından düzenlenen 2022 Hyperloop Geliştirme Yarışmasına katılan İTÜ-Hyperbee proje takımının tasarlayıp ürettiği Hyperloop'ta kullanılmak üzere yapılmıştır. Yazarlar, çalışmanın tasarım ve üretimi süresince desteklerini esirgemeyen Kormas Elektrikli Motor San. ve Tic. A.Ş.'ye, Vefa Havacılık'a ve Salim Kara'ya teşekkür eder.

#### 6. Kaynaklar

- [1] B Timperio, C., "Linear Induction Motor (LIM) for Hyperloop Pod Prototypes", 1-145, 2018.

- [2] Musk, E., "Hyperloop Alpha", 1-58, 2013.
- [3] R. Galluzzi et al., "A Multi-domain Approach to the Stabilization of Electrodynamic Levitation Systems", *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 142, no. 6, 2020. Available: 10.1115/1.4046952.
- [4] "What Is Hyperloop and When Will It Be Ready?", *Discover Magazine*, 2022. [Online]. Available: <https://www.discovermagazine.com/technology/what-is-hyperloop-and-when-will-it-be-ready>. [Accessed: 07- Oct-2022].
- [5] H. Ferreira and R. Stephan, "Air Cushion Vehicle (ACV): History Development and Maglev Comparison", *Transportation Systems and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 5-25, 2019. Available: 10.17816/transsyst2019515-25.
- [6] M. N. O. Sadiku and C. M. Akujuobi, "Magnetic levitation," in *IEEE Potentials*, vol. 25, no. 2, pp. 41-42, March-April 2006.
- [7] Y. Chen, W. Zhang, J. Bird, S. Paul and K. Zhang, "A 3-D Analytic-Based Model of a Null-Flux Halbach Array Electrodynamic Suspension Device", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-5, 2015. Available: 10.1109/tmag.2015.2444331.
- [8] M. O. Gulbahce, D. A. Kocabas and F. Nayman, "Investigation of the effect of pole shape on braking torque for a low power eddy current brake by finite elements method," 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2013, pp. 263-267
- [9] A. Lendek and C. Apostoia, "Investigation of an Electrodynamic Magnetic Levitation Device", 2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), 2020. Available: 10.1109/eit48999.2020.9208281 [Accessed 6 October 2022].
- [10] R. Post and D. Ryutov, *The Inductrack concept*. [Livermore, Calif.]: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.
- [11] R.F. Post, D.D. Ryutov, "The Inductrack: A simpler Approach to Magnetic Levitation", 2000, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 901-904.
- [12] M. O. Gulbahce, D. A. Kocabas and A. K. Atalay, "Determination of the effect of conductive disk thickness on braking torque for a low power eddy current brake," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013, pp. 1272-1276