

# Hyperloop Kapsülü için Lineer Asenkron Motor Tasarımı

## Design of Linear Induction Motor for Hyperloop Pod

Bahaddin Göksün<sup>1</sup>, İsmet Şen<sup>1</sup>, Mehmet Onur Gülbahçe<sup>1</sup>, Kevser Özer<sup>1,4</sup>, İlhan Kocaarslan<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
goksun19@itu.edu.tr, seni19@itu.edu.tr, ogulbahce@itu.edu.tr

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

<sup>3</sup>Enerji Enstitüsü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
kocaarslani@itu.edu.tr

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

### Özet

Son dönemlerde Hyperloop konseptine olan ilgi artmaktadır. Bu çalışmada da bir Hyperloop kapsülünün itki sisteminde kullanılmak üzere 500 W çıkış gücünde çift taraflı bir lineer asenkron motor (LAM) tasarlanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda genellikle tercih edilen dağıtılmış sargı yerine mekanik kısıtlar sebebiyle eş merkezli sargı tipi tercih edilmiştir. Hyperloop uygulaması dikkate alınarak mekanik ve elektriksel isterleri belirlenen LAM'ın geometrik ve elektriksel tasarımı belli adımlar takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Ardından tasarlanan modelin sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS Electronics Desktop programı kullanılarak benzetimi ve analizleri yapılmış, motor karakteristiklerinin iyileştirilmesi için gerekli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyonlar sonucu elde edilen nihai model ele alınarak eş merkezli sargı tipli LAM'ın Hyperloop teknolojisi için uygulanabilirliği incelenmiştir.

### Abstract

Recently, the interest in the Hyperloop concept has been increasing. In this study, a double-sided linear induction motor (LIM) with 500 W output power was designed to be used in the propulsion system of a Hyperloop capsule. In contrast to the studies in the literature, concentric winding type is preferred instead of distributed winding due to mechanical constraints. The geometric and electrical design of LIM, whose mechanical and electrical requirements were determined considering the Hyperloop application, was carried out by following some certain steps. Then, the designed model was simulated and analyzed with the finite element method using the ANSYS Electronics Desktop program, and the necessary optimizations were made to improve the motor characteristics. By examining the final model, the applicability of the concentric winding type LAM for Hyperloop technology has been investigated.

### 1. Giriş

Son zamanlarda birçok alanda daha az fosil yakıtın tüketildiği, çevre dostu ve düşük karbon salımlı ulaşım yöntemlerine olan yönelim artmıştır. Bu yönelimin son dönemlerdeki en çok ses getiren kavramı Hyperloop teknolojisidir. Hyperloop, insanların vakumlu bir tünel içinde, ses hızının hemen altındaki 1220 km/s gibi yüksek hızlarda seyahat edebilecekleri süper hızlı bir ulaşım sistemi olarak ortaya atılmıştır [1]. Yapı itibarıyla vakumlanmış tünel içinde hareket eden bir Maglev trenine benzer [2]. Şekil 1'de Hyperloop kavramını içeren temsili bir resim verilmiştir. Bu teknolojiye itki kuvvetinin raylara temas etmeden sağlanması için lineer asenkron motorlar tercih edilmektedir [2].



Şekil 1: Hyperloop kavramını içeren temsili bir resim [3].

LAM tahrikli sistemler düşük işletme maliyetleri ve son derece yüksek güvenilirlikleri sebebiyle toplu taşımının önemli bir parçası haline gelmiştir. Dünyadaki pek çok şehirdeki maglev trenlerinde "Lineer Metro" adındaki LAM tabanlı toplu taşıma sistemleri hizmet vermektedir. Literatürde Hyperloop ve buna benzeyen maglev trenlerinde lineer motorların kullanılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır [1,2,4-9]. Ekonomik

nedenlerle dünyadaki LAM tabanlı ulaşım sistemlerinde tek taraflı LAM kullanılır [1,2]. Radyal tasarımlar ile karşılaştırıldığında, LAM'ın stator ile rotor arasındaki hava boşluğunun büyük olması sebebiyle daha az verimli olmasına rağmen, LAM tabanlı sistemlerin kendine özgü karakteristik özelliklerinden dolayı sistem seviyesinde daha iyi bir başarımla gösterebilir.

Literatürdeki LAM ile ilgili çalışmalar genellikle motorun analitik tasarımının yapılması, optimizasyonu ve devamında tasarlanan modelin sonlu elemanlar yöntemi ile analizini içermektedir. LAM'ların tasarımı ve optimizasyonu geometrik ve elektriksel parametrelere bağlıdır. Bir parametrenin değiştirilmesi çıkış özellikleri üzerinde ters etkiye ve farklı hassasiyete sahip olabilir. Bu sebeple, LAM'ların tasarımı çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak ele alınmalıdır. [10]'da yapılan tasarım optimizasyonu sayesinde motorun ağırlığı azaltılmıştır. [11]'de LAM'larda sargı tasarımının optimizasyonu irdelenmiştir. [12]'de tek taraflı bir LAM'ın verimi ve güç faktörünü arttırmak için genetik algoritma (GA) uygulanmıştır. Bu çalışmada optimizasyon parametreleri olarak yalnızca stator akım yoğunluğu, stator genişliğinin kutup adımına oranı ve sekonder taraftaki alüminyum levha kalınlığı seçilmiştir. Diğer ana parametreler optimizasyona dahil edilmemiştir.

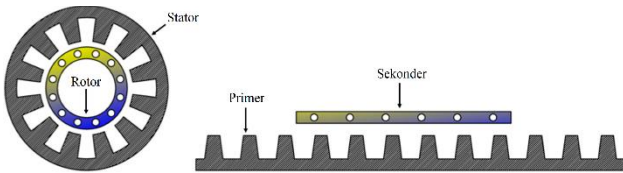
Literatürdeki yer alan çalışmaların bazılarında tek taraflı [4-6], bazılarında çift taraflı motor tasarımları göze çarpmaktadır [6-9]. Ayrıca düşük hızlı [7] ve yüksek hızlı [2] araçlar için tasarlanan lineer asenkron motorlar da mevcuttur. Ayrıca bu çalışmaların çoğunda sargı tipi olarak eş merkezli sargıdan ziyade dağıtılmış sargı tercih edilmiştir. Bu çalışmada ise literatürdeki öne çıkan çalışmalardan farklı olarak çift taraflı eş merkezli sargılı lineer asenkron motor tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmada hyperloop kapsülü için 100 V giriş geriliminde ve 500 W çıkış gücünde çift taraflı ve eş merkezli sargı tipinde bir LAM tasarlanmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle LAM'ın çalışma ilkesi ve yapısı etraflıca tartışılmış, ardından analitik tasarım için gerekli olan matematiksel ifadeler verilmiştir. Bu bağlamlarla tasarım için gerekli olan geometrik ve elektriksel büyüklükler hesaplanmış, ardından tasarımı yapılan LAM'ın sonlu elemanlar analizi ile gerekli olan verim iyileştirmeleri yapılmıştır.

## 2. Hyperloop Kapsülü için LAM Tasarımı

### 2.1. LAM'ın Yapısı ve Çalışma İlkesi

Şekil 2'de gösterildiği gibi LAM, bir asenkron motorun aksel yönde kesilip düzleştirilmiş hali olarak karşımıza çıkar.



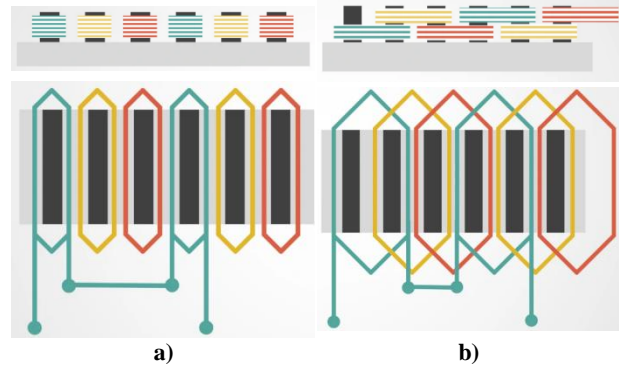
Şekil 2: Radyal ve lineer motor [13].

LAM'ın çalışma ilkesi radyal akıllı asenkron motora benzerdir: Stator sargıları üç fazlı gerilim ve akımlar ile beslendiğinde radyal akıllı motordaki döner manyetik alana benzer olarak

LAM'da doğrusal olarak hareket eden bir manyetik alan (yürüyen alan) oluşur. Zamanla değişen bu manyetik alana maruz kalan sekonder (ray) üzerinde Faraday yasasına göre gerilimler endüklenir ve girdap akımları meydana gelir. Bu girdap akımları ile primer manyetik alanının etkileşmesi sonucunda itki kuvveti elde edilir [2].

LAM, tek taraflı ve çift taraflı olmak üzere iki tipe karşımıza çıkar. Tek taraflı LAM, primer kısmında bir adet manyetik çekirdek ve sekonder kısmında iletken bir levhadan oluşur. Çift taraflı LAM ise primer kısmında karşılıklı iki adet manyetik çekirdeğe sahiptir. İletken bir levhadan oluşan sekonder kısmı ise bu çekirdeklerin arasında yer alır [7]. Bu iki LAM tipinin kendilerine göre üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Hyperloop teknolojisi için rayın sadece alüminyumdan oluştuğu çalışmalarda tek taraflı LAM, aracı ileriye götürecektir itkiye ek olarak alüminyumun itmeye çalışacak ve böylece aracın yer çekimine karşı havada asılı kalmasına katkı sağlayacaktır. Çift taraflı LAM'da ise çekirdeklerin rayın iki tarafında bulunması manyetik akı çizgilerinin daha düzgün yol almasını ve kayıpların azalmasını sağlamaktadır. Bu sayede daha yüksek verim değerlerine ulaşılabilir.

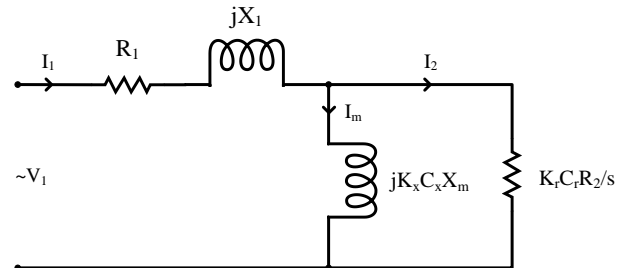
LAM uygulamalarında eş merkezli sargı veya dağıtılmış sargı kullanılabilir [2,14]. Bu sargı tiplerinin prensip şemaları Şekil 3'te verilmiştir. Dağıtılmış sargılar daha düzgün bir manyetomotor kuvvet (MMK) dağılımı ve daha sinüzoidal bir endüklenen gerilim oluştururken, eş merkezli sargı tipinde sargı başları daha kısa olmakta ve daha bütünlüklü bir motor yapısı tasarlanabilmektedir. Bu çalışmada mekanik kısıtlardan dolayı eş merkezli sargı tipi ve çift taraflı LAM tasarımı tercih edilmiştir.



Şekil 3: Lineer asenkron motorlarındaki sargı tipleri: Eş merkezli sargı (a) ve dağıtılmış sargı (b) [15].

### 2.2. LAM'ın Eşdeğer Devresi

Çift taraflı LAM'ın eşdeğer devresi Şekil 4'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4: LAM tek faz eşdeğer devresi.

[7]'de çift taraflı LAM'ın geometrik parametreleri kullanılarak eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanma yöntemi anlatılmıştır.

Primer sargı direnci  $R_1$ , (1)'deki formül ile hesaplanır.  $J$  primer akım yoğunluğunu,  $a$  paket boyunun yarısını,  $l_{ce}$  sargı başı uzunluğunu,  $N_{ph}$  faz başına düşen sarım sayısını ve  $\sigma_{cu}$  bakırın iletkenlik değerini temsil etmektedir.

$$R_1 = \frac{J(4a + 2l_{ce})N_{ph}^2}{(\sigma_{cu} N_{ph} I_{ph})} \quad (1)$$

Primer kaçak reaktansı  $X_1$ , (2)'deki gibi hesaplanır. Burada  $\lambda$  toplam kaçak permeansı,  $f_1$  kaynak frekansını,  $q$  faz başına kutup başına oluk sayısını,  $p$  kutup çifti sayısını temsil etmektedir.

$$X_1 = \frac{15.8(f_1 N_{ph}^2 2a\lambda)}{100^3 qp} \quad (2)$$

Primer faz sayısı  $m_1$ , senkron hız  $v_s$ , sargı faktörü  $k_{w1}$  ve eşdeğer hava aralığı  $g_e$  kullanılarak mıknatıslanma reaktansı  $X_m$  hesaplanır (3).

$$X_m = \frac{4\mu_0 a m_1 v_s (N_{ph} k_{w1})^2}{p g_e \pi} \quad (3)$$

Sekonder direncinin primer tarafına indirgenmiş değeri  $R_2$ , (4)'teki formül ile bulunur. Burada  $\sigma_{Al}$  alüminyumun iletkenliğini,  $d$  sekonder kalınlığını ve  $\tau$  kutup adımını temsil etmektedir.

$$R_2 = \frac{4a m_1 (N_{ph} k_{w1})^2}{\sigma_{Al} d p \tau} \quad (4)$$

Eşdeğer devre, primer faz gerilimi  $U_1$  için çözülerek primer akımı  $I_1$  ve sekonder akımının primer tarafına indirgenmiş değeri  $I_2$  bulunur (5)(6). (6) ve (7) kısımlarında kullanılan  $K_r$ ,  $C_r$ ,  $K_x$  ve  $C_x$  değerleri uç etkisinden kaynaklanan katsayı değerleridir.

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{s}{R_2} + \frac{1}{jX_m}}} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{U_1 - I_1(R_1 + jX_1)}{\frac{R_2 K_r C_r}{s}} \quad (6)$$

Son olarak (9) kısmında belirtilen formül ile itki kuvveti " $F$ " hesaplanır.

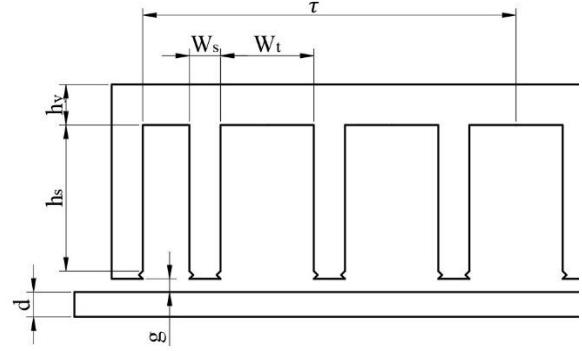
$$F = \frac{m_1 I_2^2 R_2 K_r C_r}{v_s s} \quad (7)$$

### 2.3. Tasarım Süreci

Motorun tasarım sürecinde literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak aşağıdaki adımlar takip edilmiştir [1,2,4-9]. LAM tasarımına başlamadan önce motor plaka değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bunlar istenilen hız değeri, kuvvet değeri ve mekanik tasarım kriterleridir.

Şekil 5'te lineer motorun boyutları sembollerle gösterilmiştir. Bu sembollerden  $W_s$  oluk genişliğini,  $W_t$  diş genişliğini,  $h_s$  oluk yüksekliğini,  $h_y$  boyunduruk yüksekliğini  $\tau$  kutup adımını,  $d$

mekanik hava aralığını,  $d$  sekonder (ray) kalınlığını temsil etmektedir. Motor modelleri oluşturulurken öncelikle motorun hız ve kayma ( $s$ ) değeri kullanılarak senkron hız  $v_s$  hesaplanmalıdır.



Şekil 5: Lineer motor geometrik parametreleri.

$$v_s = \frac{v_r}{1-s} \quad (10)$$

Devamında  $W_s$ ,  $W_t$  ve  $q$  kullanılarak kutup adımı  $\tau$  hesaplanır.

$$\tau = 3q(W_t + W_s) \quad (11)$$

Elde edilen senkron hız ve kutup adımı ile LAM'ın primer frekansı  $f$  hesaplanır.

$$f = \frac{v_s}{2\tau} \quad (12)$$

Sarımda kullanılacak paralel kol sayısı  $N_p$ , nominal akımın ( $I_1$ ) akım yoğunluğuna ( $J$ ) ve bakır telin kesit alanına bölünmesi ile bulunur. Bu adımda  $N_p$  tam sayı olarak bulunmazsa bir sonraki tam sayıya yuvarlanmalıdır.

$$N_p = \frac{I_1}{JA_{tel}} \quad (13)$$

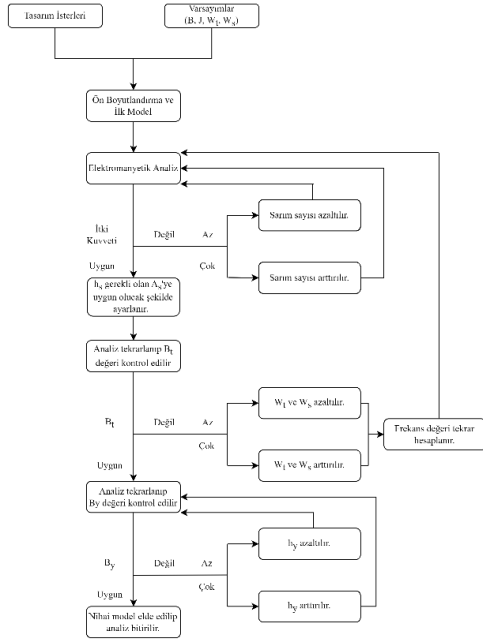
Oluk Alanı  $A_s$ , paralel kol sayısı, bir oluktaki sarım sayısının ( $N_s$ ) ve bakır telin kesit alanının çarpımının doluluk oranına ( $FF$ ) bölümünden elde edilir.

$$A_s = \frac{N_p N_s A_{tel}}{FF} \quad (14)$$

Son olarak oluk yüksekliği  $h_s$ , bulunan  $A_s$  değeri  $W_s$  değerinin yarısına bölünerek bulunur.

$$h_s = \frac{2A_s}{W_s} \quad (15)$$

Bu formüller doğrultusunda, motor modellenip analiz edildikten sonra, bir oluktaki sarım sayısı ( $N_s$ ), oluk geometrisi, motorun boyu ve derinliği gibi geometrik ve elektriksel parametreler istenilen kuvvet sağlanıncaya kadar değiştirilerek optimize edilebilir. Bazı çalışmalarda bu optimizasyonlar deneme yanılma yöntemi ile yapılırken bazılarında ise doğadan ilham alan algoritmalar kullanılabilir [6]. Aynı şekilde, boyunduruk yüksekliği ( $h_y$ ) de, boyunduruk akı yoğunluğu belli bir değeri aşmayacak şekilde ( $B_y < 1.6T$ ), tasarım yapılır. Tasarım adımları aşağıdaki akış diyagramında verilmiştir.



Şekil 6: Tasarım sürecini gösteren akış diyagramı.

## 2.4. Tasarım İsterleri ve Tasarlanan Modelin Özellikleri

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

- Hedeflenen Kuvvet,  $F = 60 \text{ N}$
- Nominal Hız,  $V_r = 30 \text{ km/s}$
- Primer Akımı,  $I_1 = 16 \text{ A}$
- Fazlar Arası Gerilim,  $V_{1,rms} < 120 \text{ V}$
- Paket boyu,  $W_{st} = 37.5 \text{ mm}$
- Mekanik hava aralığı,  $g = 4.25 \text{ mm}$
- Ray kalınlığı,  $d = 7.95 \text{ mm}$

Tasarım isterleri dikkate alınarak ve akış diyagramı takip edilerek tasarlanan modelin parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Nihai tasarım parametreleri

| Parametre                  | Sembol    | Büyüklik |
|----------------------------|-----------|----------|
| Kutup Sayısı               | $P$       | 4        |
| Mekanik Hava Aralığı (mm)  | $g$       | 4.25     |
| Manyetik Hava Aralığı (mm) | $g_{mag}$ | 16.45    |
| Dış Genişliği (mm)         | $W_t$     | 10       |
| Oluk Genişliği (mm)        | $W_s$     | 30       |
| Oluk Yüksekliği (mm)       | $h_s$     | 46.9     |
| Boyunduruk Yüksekliği (mm) | $h_y$     | 13       |
| Primer Uzunluğu (mm)       | $L$       | 500      |
| Primer Yüksekliği (mm)     | $h$       | 62.4     |
| Paket Boyu (mm)            | $D$       | 37.5     |
| Kutup Adımı (mm)           | $\tau$    | 120      |
| Senkron Hız (m/s)          | $V_s$     | 9.26     |
| Frekans (Hz)               | $f$       | 38.58    |
| Bir Bobindeki Sarım Sayısı | $N$       | 112      |

## 3. Tasarımın 2-D Geçici Hal Manyetik Modeli ve Sonlu Elemanlar Benzetimi

### 3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel sistemlerin modellenmesi ve analiz edilmesi sırasında karşılaşılan diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözmek için kullanılan bir yöntemdir. Fiziksel sistemin geometrisinin karmaşık olması gibi sebeplerle analitik çözümün neredeyse imkânsız hale geldiği durumlarda sonlu elemanlar yöntemi vazgeçilmez bir araç olarak kabul edilmektedir. Elektromanyetik alan problemlerinin çözümü ve elektromekanik sistemlerin analizi de bu yöntemin yaygın olarak kullanıldığı alanlar arasındadır.

Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen LAM’ın sekonderinin kafes tipi veya sargılı olmayıp kütleli gövdeli olması girdap akımı dağılımının analitik yöntemlerle belirlenmesini daha da zorlaştırmakta ve sonlu elemanlar yönteminin kullanımını neredeyse zorunlu hâle getirmektedir [16-18]. Manyetik alan ve akım yoğunluğu dağılımının belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile çözülecek denklemler [16-18]’de açıklanmıştır. Manyetik vektör potansiyeli  $A$ ’nın rotasyonel ve diverjans (16) ve (17)’yi sağlamalıdır.

$$\nabla \times A = B \quad (16)$$

$$\nabla \cdot A = B \quad (17)$$

Faraday yasası, manyetik vektör potansiyeli ile birlikte (18)’daki gibi ifade edilebilir. Burada  $E$ , elektrik alanı temsil etmektedir.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times \frac{\partial A}{\partial t} \quad (18)$$

$\phi$  skaler elektrik potansiyeli ve  $\sigma$  elektriksel iletkenlik olmak üzere (9)’dan yola çıkılarak elektrik alan şiddeti  $E$  ve akım yoğunluğu  $J$ , (19) ve (20)’deki gibi ifade edilebilir.

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi \quad (19)$$

$$J = \sigma E = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \phi \quad (20)$$

Son olarak (21) ve (22)’de ifade edilen Ampere yasası da hesaba katılarak (23)’teki denkleme ulaşılır. Manyetik relüktans  $\nu$ , manyetik geçirgenliğin tersi ( $1/\mu$ ) olup  $H$ ’nin bir fonksiyonudur. Bu da (24)’ü doğrusal olmayan bir denklem haline getirmektedir.

$$\nabla \times H = J \quad (21)$$

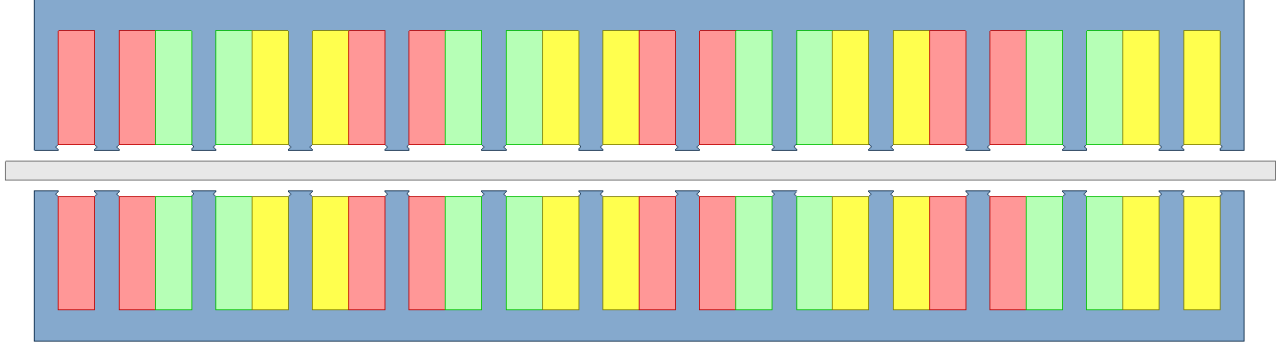
$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J \quad (22)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \phi = 0 \quad (23)$$

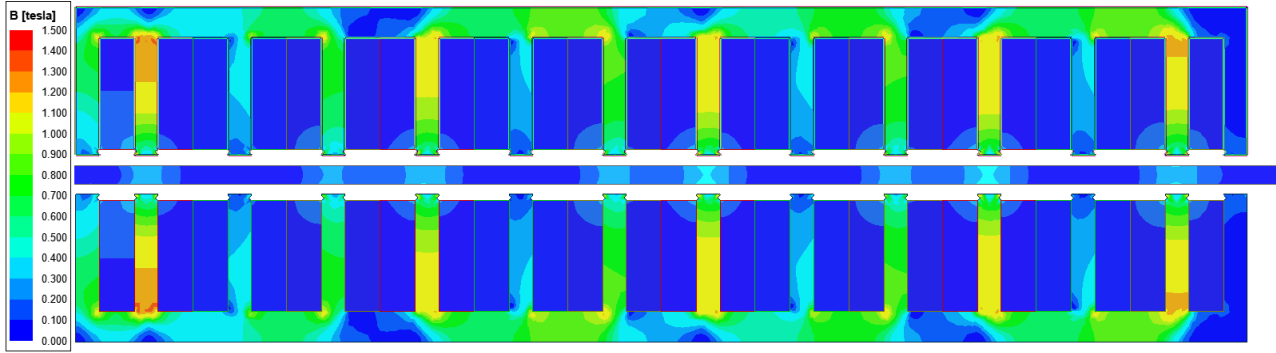
(23) çözüldükten sonra kuvvet  $F$ , manyetik koenerjinin ( $W_{co}$ ) kısmi türevi olarak (24)’teki gibi hesaplanır.

$$F = \frac{\partial W_{co}}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \int_0^H B dH dV \quad (24)$$

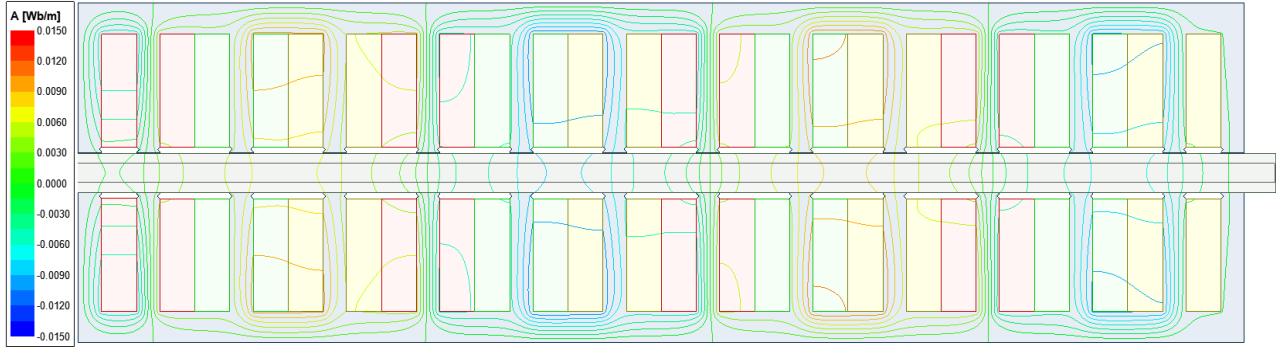
Sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında genellikle bir bilgisayar yazılımı kullanılmakta ve deneysel sonuçlarla büyük oranda örtüşen benzetim çalışmaları hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 7: Tasarlanan LAM'ın 2D geçici hal manyetik modeli.



Şekil 8: Nihai modelin manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 9: Nihai modelin manyetik akı çizgileri.

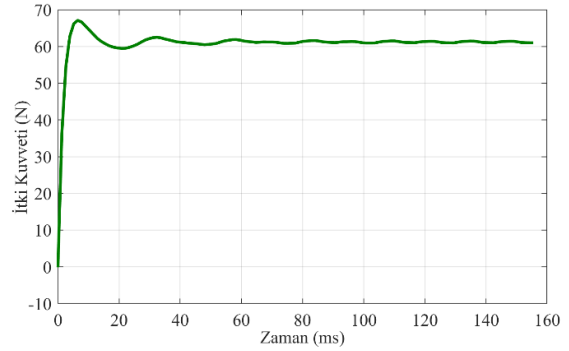
Bu çalışmada LAM'ın geçici hal manyetik modelinin benzetimi Ansys Electronics Desktop ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2. Modelleme ve Benzetim

Tasarımı yapılan LAM'ın 2D geçici hal manyetik modeli Şekil 7'de verilmiştir. Gerekli sınır koşulları ile birlikte manyetik çekirdeğin malzemesi M270-35A, ray malzemesi 6061-T6 olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modellemesinde LAM'ın hızını modellemek için [2]'de anlatılan yöntem kullanılmıştır. Asenkron motorlarda kaymanın ( $s$ ) azalması, primer akımı ve çıkış momenti üzerinde sekonder direncinin ( $R_2$ ) artması ile aynı etkiye sahiptir. Asenkron motor eşdeğer devresinde,  $R_2$  ve  $s$  terimlerinin " $R_2/s$ " şeklinde bir arada bulunması da bunu göstermektedir. Dolayısıyla motorun çalışma hızının etkilerini gözlemlemek için alüminyum alaşımının iletkenlik değeri kayma değeri ile çarpılarak (25)'teki gibi yeniden yazılabilir.

$$\sigma_{Al,new} = s\sigma_{Al} \quad (25)$$

Analizler sonucunda kararlı haldeki manyetik akı yoğunluğu Şekil 8'de, manyetik akı çizgileri ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Buna ek olarak sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen itki kuvvetinin kararlı hale ulaşmaya kadarki değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: İtki kuvvetinin zamanla değişimi.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada bir Hyperloop kapsülünün isterleri doğrultusunda, 100V giriş geriliminde, 500W çıkış gücünde, eş merkezli sargı kullanılan, çift taraflı bir LAM tasarlanmıştır. Tasarım süreci literatürdeki yöntemler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan modelin benzetimi ANSYS Electronics Desktop yardımıyla yapılmıştır. Benzetim ve analiz sonuçlarına göre tasarımın istelere uygun hale gelmesi için gereken düzenlemeler ve optimizasyonlar gerçekleştirilip analizler tekrarlanmış ve nihai model elde edilmiştir. Geometrik kısıtlar sebebiyle kullanılan eş merkezli sargının motor başarımı incelenmiş olup Hyperloop kapsülü için uygulanabilir olduğu görülmüştür. Sargı başı uzunluğunu kısaltmak için farklı bir yöntem olarak kutup adımının küçük tutulup dağıtılmış sargıların kullanılması ilerdeki çalışmalarda ele alınabilir.

#### 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 üretimi süresince desteklerini esirgemeyen Akım Metal San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederler.

#### 6. Kaynaklar

- [1] Musk, E., "Hyperloop Alpha", 1-58, 2013.
- [2] Timperio, C., "Linear Induction Motor (LIM) for Hyperloop Pod Prototypes", 1-145, 2018.
- [3] "What Is Hyperloop and When Will It Be Ready?", Discover Magazine, <https://www.discovermagazine.com/technology/what-is-hyperloop-and-when-will-it-be-ready>, 2017.
- [4] Nireekshana, T. ve Ramesh Babu, V., "Design and Fabrication of Linear Induction Motor For Traction Application", International journal of electrical and electronics engineering, 6, 1-18, 2017.
- [5] Palka, R. ve Woronowicz, K., "Linear Induction Motors in Transportation Systems", Energies, 14, 1-22, 2021.
- [6] Mhway, A. M., Aung, N. W., ve Tun, M. N. Y., "Design of Single-Sided Linear Induction Motor Used in Elevator", International journal of science and engineering applications, 7, 386-390, 2018.
- [7] Wang, H., Zhao, J., Xiong, Y., Xu, H. ve Yan, S., "Optimal Design of a Short Primary Double-Sided Linear Induction Motor for Urban Rail Transit", World electric vehicle journal, 13., 3-5, 2022.
- [8] Abdollahi, S. E., Mirzayee, M. ve Mirsalim, M., "Design and Analysis of a Double-Sided Linear Induction Motor for Transportation", IEEE transactions on magnetics, 51, 1-7, 2015
- [9] Kuptsov, V., Fajri, P., Rasheduzzaman, M., Magdaleno-Adame, S. ve Hadziristic, K., "Combined Propulsion and Levitation Control for Maglev/Hyperloop Systems Utilizing Asymmetric Double-Sided Linear Induction Motors", Machines, 10, 1-15, 2022.
- [10] Osawa, S., Wada, M., Karita, M., Ebihara, D. ve Yokoi, T., "Light-Weight Type Linear Induction Motor and Its Characteristics", IEEE transactions on magnetics, 28, 3003-3005, 1992.
- [11] Laporte, B., Takorabet, N. ve Vinsard, G., "An Approach to Optimize Winding Design in Linear Induction Motors", IEEE transactions on magnetics, 33, 1844-1847, 1997.
- [12] Hassanpour Isfahani, A., Ebrahimi, B.M. ve Lesani, H., "Design Optimization of a Low Speed Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Efficiency and Powerfactor", IEEE transactions on magnetics, 44, 266-272, 2008.
- [13] Toro-García, N., Garcés-Gómez, Y. A. ve Hoyos, F. E., "Discrete and Continuous Model of Three-Phase Linear Induction Motors 'LIMs' Considering Attraction Force", Energies, 12, 1-11, 2019.
- [14] Eastham, F., Cox, T., Leonard, P. ve Proverbs, J., "Linear Induction Motors with Modular Winding Primaries and Wound Rotor Secondaries", IEEE transactions on magnetics, 44, 4033-4036, 2008.
- [15] "Windings for Electric Motors", OSWOS, <https://oswos.com/motor-windings/>, 2022.
- [16] Gülbahçe, M. O., "Contributions to Reduce Rotor Harmonic Losses in Solid Rotor Induction Machine for High Speed Drive Applications", 26-31, 2019.
- [17] D. T. McGuinness, M. O. Gulbahce ve D. A. Kocabas, "Novel rotor design for high-speed solid rotor induction machines," 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 579-583, 2015
- [18] A. H. Oguz, M. O. Gülbahce ve D. A. Kocabas, "Design and optimization of an axially-slitted high-speed solid rotor induction motor," 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp. 568-573, 2015