



Kalıcı Mıknatıslı Çift Yanlı Tübüler DC Lineer Motorun Farklı Yükler Altında Konum ve Hız Analizi

Position and Speed Analysis of Permanent Magnet Double-Sided Tubular DC Linear Motor Under Different Loads

Uğur Hasırcı¹ , Ziya Demirkol^{2*}

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

²Kastamonu Üniversitesi, Tosya Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Kastamonu, Türkiye

Öz

Otomasyon sistemlerinin temelini elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştüren elektrik motorları oluşturmaktadır. İhtiyaç duyulan dairesel hareket doğrudan üretilebilirken doğrusal hareket, ilave maliyetlere ve verimin düşmesine yol açan yardımcı donanımlar aracılığıyla dairesel hareket üreten motorlardan ya da doğrudan lineer motorlar ile elde edilmektedir. Lineer motorlar üstünlüklerine rağmen uzunluk sınırlaması ve düşük kuvvet/akım oranı gibi dezavantajlarından dolayı fazla tercih edilmemektedir. Bu çalışmada lineer motorlar için belirtilen dezavantajlar göz önünde bulundurularak laboratuvar ortamında prototip üretimi gerçekleştirilen ve patentlenen özgün, yüksek kuvvet/akım oranına sahip ve uzunluk sınırlaması olmayan bir tübüler DC lineer motorun analitik ve nümerik (Ansys-Maxwell ortamında) analizleri yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca motorun yüksüz ve farklı yükler altında hız ve konum tepkileri deneysel olarak belirlenmiştir. Motor hızı yüksüz, 1 kg, 2 kg, 3 kg ve 5 kg yükler altında karalı duruma ulaştıktan sonra yaklaşık olarak sırasıyla 350 mm/s, 330.62 mm/s, 291 mm/s, 276 mm/s ve 224 mm/s ortalama hızla hareket etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ansys-Maxwell, babet mıknatıs, lineer motor, tübüler motor.

Abstract

The basis of automation systems are electric motors that convert electrical energy into motion energy. While the required circular motion can be produced directly, linear motion is obtained from motors that produce circular motion through auxiliary equipment that causes additional costs and reduced efficiency, or directly by linear motors. Despite their advantages, linear motors are not preferred due to their disadvantages such as stroke limitation and low force/current ratio. In this study, considering the disadvantages of linear motors, analytical and numerical analyses (in Ansys-Maxwell) of a tubular DC linear motor with high force/current ratio and no stroke limitation, which was prototyped in the laboratory environment and patented, were carried out. It has been clearly shown that the analysis results are in good agreement. In addition, the speed and position responses of the motor under no load and different loads were experimentally determined. After the motor speed reaches steady state under no load, 1 kg, 2 kg, 3 kg and 5 kg loads, it moves with an average speed of approximately 350 mm/s, 330.62 mm/s, 291 mm/s, 276 mm/s and 224 mm/s, respectively.

Keywords: Ansys-Maxwell, permanent magnet, linear motor, tubular motor.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: zdemirkol@kastamonu.edu.tr

Uğur Hasırcı orcid.org/0000-0001-5419-5083

Ziya Demirkol orcid.org/0000-0002-8617-3863



Bu eser "Creative Commons Atıf-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

1. Giriş

Gelişen teknolojiyle birlikte endüstride yararlanılan otomasyon sistemlerinde, elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştüren elektrik motorları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Casadei vd. 1994, Hasırcı 2005, Okonkwo 2006, Okonkwo ve Hanitsch 2007, Tuncay 2016, Aydın vd. 2019, Oğuz 2021). Elektrik motorlarının ürettiği hareket dairesel ya da lineer olabilmektedir. Endüstriyel sistemlerde ihtiyaç duyulan dairesel ve lineer hareket geleneksel rotasyonel motorlar tarafından üretilebilir. Dairesel hareket üreten motorlardan lineer hareketin elde edilmesi kayış, dişli vb. ilave ekipmanlar yardımıyla mümkün olmaktadır. Hareket dönüşümü için kullanılan mekanizmalar ise ilave maliyetleri ve kayıpları beraberinde getirmektedir (Ratcliff ve Griffiths 1964, Jones 1969, Okonkwo ve Hanitsch 2007). Lineer motorlar bahsedilen ilave donanımlar olmadan doğrusal hareketi doğrudan üreten makinelerdir. Bundan dolayıdır ki günlük hayatta ya da otomasyon sistemlerinde lineer hareketin gerekli olduğu yerlerde lineer motorların kullanımı giderek artmaktadır (Azhar vd. 2016, Ismael 2018).

Lineer motorlar prensip olarak klasik dönel hareket üreten motorların aksiyal bir düzlem boyunca kesilerek açılmış modelleri olduğu için çalışmaları neredeyse birbiriyle aynıdır (Basak ve Anayi 1995). Bu benzerlikten dolayıdır ki dairesel hareket üreten her AC ya da DC motorun farklı topolojilerde lineer motor karşılığını yapmak mümkündür (Green ve Paul 1969, Basak 1975a, Azhar vd. 2016).

Lineer motor ile ilgili yapılan çalışmalar 1800'lü yılların ortalarına kadar dayandırılabilir bu alanda 1940'lı yıllarda Eric Laithwaite tarafından geliştirilen ve başarılı bir şekilde çalıştırılan motor ile birlikte bu alanda yapılan araştırmalar hızlanmıştır (Çepni 2010, Tuncay 2016). Güçlü kalıcı mıknatısların keşfedildiği 1970'li yıllara kadar geliştirilen DC lineer motorlar alan sargılı motorlardı. 1964 yılında Ratcliff ve Griffiths tarafından hem hareketli ünitenin hem de endüvinin sargılardan oluştuğu alan sargılı bir DC lineer motor geliştirmiştir (Ratcliff ve Griffiths 1964). Jones 1969 yılında Ratcliff ve Griffiths'in geliştirdiği motorun kutup şeklini ve fırça sayısını azaltarak yeni bir motor tasarlamıştır (Jones 1969). Yine alan sargılı olarak geliştirilen bir diğer çalışma da 1969 yılında Griffiths ve Jones iki farklı motor sunmuştur (Griffiths ve Jones 1969). Aynı yıl Green ve Paul tarafından kısa mesafeli bir piston olarak çalışan tübüler yapıda bir motor tasarlanmıştır. Bu anlamda çalışma ilk tübüler lineer motor olma özelliği taşımaktadır (Green ve Paul 1969). Warnett, Jones'un yaptığı çalışmada iyileştirmeler yaparak 1971 yılında yeni motor geliştirmiştir (Warnett 1971).

1970'li yıllardan itibaren alan sargısı yerine gün geçtikçe gelişim gösteren ve enerji performansı yüksek kalıcı mıknatısların kullanılması lineer motorların daha düşük maliyetli ve yüksek verimli olmasını sağlamıştır (Hasırcı 2005). Basak 1975 yılında lineer motorda manyetik alan oluşturmak için alan sargıları yerine ferrit kalıcı mıknatısı ilk defa kullanan araştırmacıdır. Bu yeni konfigürasyon sadece armatür sargılarının enerjilenmesi ve motorun daha hassas kontrolünün yapılmasını sağlamıştır (Basak 1975a). Aynı yıl basak tarafından iki ve dört kutuplu ferrit kalıcı mıknatıslı motor geliştirilerek lineer motorlarda kalıcı mıknatıs kullanımının yaygınlaşmasına önemli katkıda bulunmuştur (Basak 1975b). Yüksek enerjiye sahip neodmiyum (NdFeB) mıknatısların keşfedildiği 1985 yılından itibaren lineer motorlar dahil birçok elektrik motorda yüksek artık mıknatısya sahip bu mıknatıslar yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır (Hasırcı 2005). 1990 yılında Basak ve Shirkoohi ilk defa geliştirdikleri DC lineer motorun alan ünitesinde neodmiyum kalıcı mıknatıs kullanmıştır (Basak ve Shirkoohi 1990). 1992 yılında Akmeşe tarafından neodmiyum kalıcı mıknatıslı (Akmeşe ve Eastham 1992), aynı yıl Fomouri tarafından fırçasız DC lineer motor (Famouri 1992), 1994 yılında Casadei ve arkadaşları (Casadei vd. 1994), Anayi 1995 yılında (Basak ve Anayi 1995), 1996 yılında Lequesne (Lequesne 1996), aynı yıl Filho (Filho 1996), Filho ve Basak 1997 yılında (Filho ve Basak 1997), aynı yıl Demirci (Demirci 1998), 2000 yılında Yajima ve arkadaşları (Yajima vd. 2000), Okonkwo tarafından 2006 yılında (Okonkwo 2006), 2010 yılında Çepni (Çepni 2010), 2015 yılında Dursun ve arkadaşları (Dursun vd. 2015), 2016 yılında Tuncay tarafından (Tuncay 2016) ve 2016 yılında ise Azhar ve arkadaşları tarafından (Azhar vd. 2016) lineer motor geliştirilmiştir. Yakın zamanda Habil ve arkadaşları geliştirdikleri motorun farklı hava aralıklarında ürettiği statik kuvveti simülasyon ve gerçek zamanlı olarak karşılaştırılmıştır. Armatüre uygulanan farklı akım değerlerine karşılık üretilen kuvvet değerlendirilmiştir. Armatüre 1 A akım uygulandığında motor 20 N kuvvet üretmektedir (Habil vd. 2023). Üstün ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yüksek kuvvet/hacim, kuvvet/ağırlık ve kuvvet/giriş gücü oranlarına sahip doğrusal motor geliştirmiştir. Tasarım, ANSYS Maxwell yazılımı ile iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Motorun konum, hız ve kuvvet analizleri yapılmıştır (Üstün vd. 2020). Chen ve arkadaşları araştırmalarında doğrusal kompresör için hareketli mıknatıslı yeni bir doğrusal motorun tasarlamıştır Doğrusal motorun simülasyonu için sonlu elemanlar analizi (FEA) modeli oluşturulmuştur. Akım, konum ve statik kuvvet de-

ğerleri bir test düzeneği ile ölçülerek FEA modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Chen vd. 2020).

Yapılan literatür taramasında görüldüğü üzere güçlü mıknatısların kullanılmasıyla birlikte günümüze kadar araştırmacılar tarafından farklı topolojilerde lineer motor tasarımı, geliştirilmesi, analizi, modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir (Ghodsı vd. 2014). AC ya da DC lineer motor topolojilerini fırçalı-fırçasız olmasına, nüvenin yapısına ve geometrik şekline kategorize etmek mümkündür. Lineer motorlar düz, tek yanlı, çift yanlı, U kanallı ve tübüler geometrik yapıda tasarlanmaktadır (Oruç ve Dikmen 2020). Lineer motorların ilave donanımına ihtiyaç olmadan lineer hareketi doğrudan üretmek, düşük bakım maliyeti (Okonkwo 2006, Luo vd. 2007), yüksek verimlilik, gelişmiş güvenilirlik ve kompakt yapıda olmaları gibi birçok üstünlüğü sıralanabilir. Bununla beraber bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikli olarak düşük kuvvet/akım oranı ve uzunluk sınırlaması iyileştirilmesi gereken önemli parametrelerdir (Hasırcı 2005, Tuncay 2016). Amper başına düşen kuvvetin düşük olması birçok araştırmacıyı bu değerleri iyileştirmeye yönelik çalışmalara sevk etmiştir. Basak tarafından 1975 yılında önerilen ilk kalıcı mıknatıslı DC doğrusal motor, 45 cm uzunluğunda olup 1 A başına 1.5 N kuvvet üretmektedir (Basak 1975a). Bununla birlikte geliştirdikleri DC lineer motorlarda 1 Amper için Yajima ve arkadaşları 2.67 N (Yajima vd. 1997), Yajima ve arkadaşları yaptıkları başka bir çalışmada 27 N (Yajima vd. 2000), Okonkwo 1 N (Okonkwo 2006), Demirci 7.8 N (Demirci 1998), Basak ve Filho yaklaşık 1 N (Basak ve Filho 1994), Wang ve arkadaşları 24 N (Wang vd. 2011), Tuncay 27 N (Tuncay 2016) ve Habil ve arkadaşları 20 N (Habil vd. 2023) kuvvet elde etmiştir. Bu çalışmada ise 1 amper başına 199 N kuvvet elde edilmiştir.

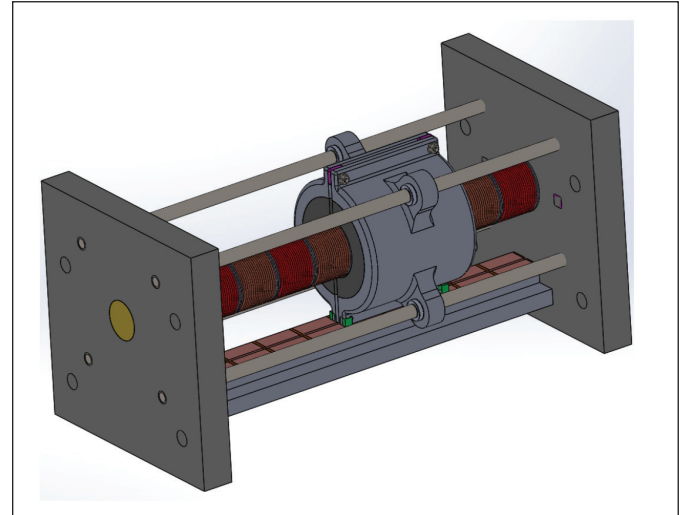
Bu çalışmada nümerik ve analitik analizleri yapılarak laboratuvar ortamında tasarıma uygun prototipi üretilen ve patentlenen, çift yönlü ve tübüler geometrik yapıda bir DC lineer motorun yüksüz ve farklı yükler altında konum ve hız tepkileri değerlendirilmiştir. Geometrik yapısı ve geliştirilen fırça kollektör sistemi çalışmayı, yüksek kuvvet/akım oranına sahip, uzunluk sınırlaması olmayan ve daha uzun tasarlandığında ilave elektronik devrelere ihtiyaç bırakmayan bir lineer motor kılmasıdır. Üretilen motorun yüksüz ve farklı yükler altında hız tepkisi ve konum bilgisi sensör yardımıyla ölçülmüştür. Ölçülen bilgiler veri toplama kartı yardımıyla bilgisayar ortamına aktararak görsel olarak ifade edilmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

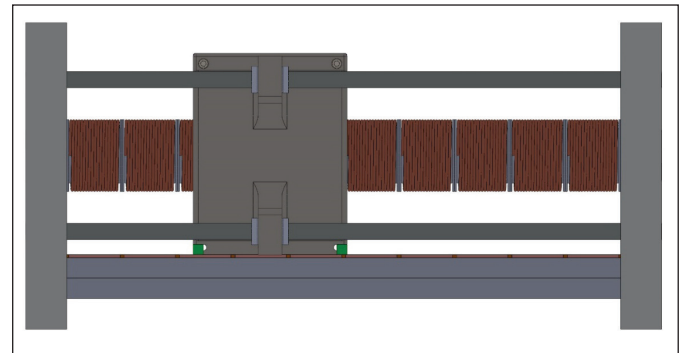
2.1. Çift Yanlı Tübüler DC Lineer Motorun Yapısı

Bu çalışma kapsamında üretilen motor, silindirik yapıda olup iki ana üniteden oluşmaktadır. Birincisi hareketli ünite olup sağ ve sol olmak üzere simetrik iki nüveden oluşmaktadır. İkincisi ise hareketsiz (sabit) ünite olup silindirik bir nüve ve nüve üzerine sarılan sargılardan oluşmaktadır. Şekil 1'de tübüler DC lineer motorun 3B görseli, Şekil 2'de motorun ön görünüşü, Şekil 3'te motorun üst görünüşü ve Şekil 4'te motorun yan kesit görünüşü sunulmuştur.

Hareketli üniteyi oluşturan ark şeklindeki sağ ve sol nüvelerin her birinin uzunluğu 150 mm olup, iç yarıçapı 62 mm ve dış yarıçapı 82 mm olup SAE 1010 düşük karbonlu çelikten üretilmiştir. Sağ ve sol nüve üst ve alt kısımlarında bulunan bağlantı noktalarının arasına manyetik olmayan bir malzeme yerleştirilerek birbirine sabitlenmiştir. Hareketli ünitenin hareketi esnasında kılavuz millerinde meydana gelecek sürtünmeyi minimize etmek için kılavuz millerine yataklık

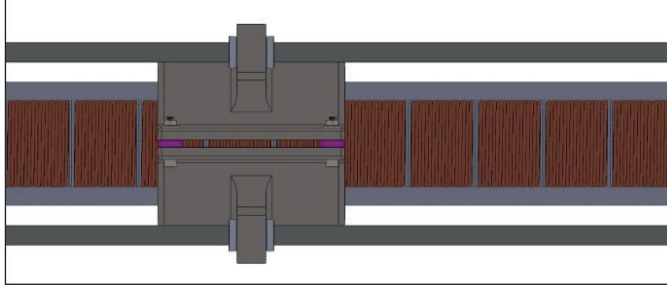


Şekil 1. Tübüler DC lineer motorun 3B görünüşü.

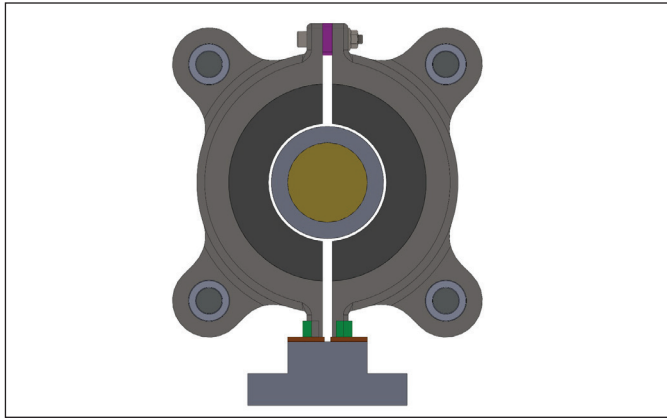


Şekil 2. Tübüler DC lineer motorun ön görünüşü.

eden dört adet lineer rulman bulunmaktadır. Manyetik alanı oluşturan kalıcı mıknatıslar sağ ve sol nüvenin iç yüzeylerine yerleştirilmiştir. Kalıcı mıknatıs olarak diğer kalıcı mıknatıslarla karşılaştırıldığında daha yüksek artık mıknatısiyet (B_r)



Şekil 3. Tübüler DC lineer motorun üst görünüşü.

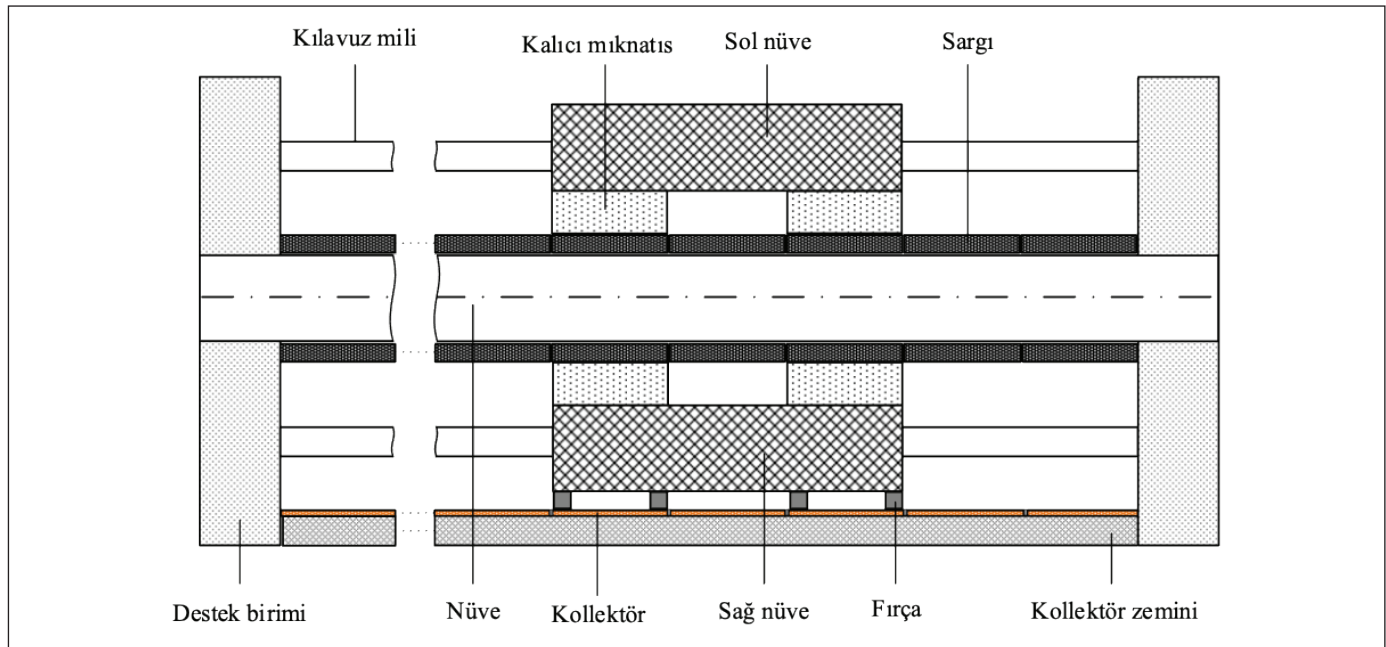


Şekil 4. Tübüler DC lineer motorun yan kesit görünüşü.

ve giderici kuvvete (H_c) sahip olmaları ve $B-H$ eğrilerinin ikinci bölgede doğrusal olmasından neodmiyum (NdFeB) mıknatıs kullanılmıştır. Birbirine yapıştırılarak elde edilen dört adet mıknatıs grubu, sağ ve sol nüvenin her birine iki grup olarak aralarında 50 mm boşluk olacak biçimde nüvelerin başına ve sununa yerleştirilmiştir. Her mıknatıs grubu 172° yay ölçüsünde 50 mm genişliğinde olup iç yarıçapı 37 mm, dış yarıçapı 62 mm, uzunluğu 25 mm, genişliği 25 mm ve 4° yay ölçüsünde 86 adet NdFeB mıknatıs bir araya getirilerek oluşturulmuştur. Kalıcı mıknatıslar N35 sınıfı olup hareketli nüveye kutupları SN ve NS olacak biçimde yerleştirilmiştir. Hareketli ünitenin üst kısmına fırçalara uygulanacak enerji bağlantısını sağlayan klemensler bulunurken alt tarafında kollektör dilimlerine enerji transfer eden 8 adet fırça yerleştirilmiştir (Demirkol 2023). Motorun kesit görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir.

Tübüler DC lineer motorun hareketsiz ünitesi ise bir adet 25 mm yarıçapında, silindirik, SAE 1010 düşük karbonlu yumuşak çelikten imal edilmiş nüve ve nüve üzerine mıknatıslar ile aynı uzunlukta, 0.55 mm çapında emaye kaplı bakır telden 1000 tur 14 katman sarılan 20 adet sargıdan oluşmaktadır. Sargılar presbant üzerine sarılmış olup toplam kalınlığı 8.2 mm'dir. Geliştirilen motora ait parametreler Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1'de verilen ölçüler doğrultusunda laboratuvar ortamında üretilen tübüler DC lineer motorun prototip görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Motorun kesit görünümü.

Çizelge 1. Tübüler DC lineer motorun parametreleri.

Parametre	Ölçüsü (mm)
Nüve yarıçapı	25
Sargı toplam katman kalınlığı	8
Hava aralığı uzunluğu	12
Kalıcı mıknatıs yarıçapı	37
Kalıcı mıknatıs genişliği	50
Kalıcı mıknatıs uzunluğu	25
Sağ-sol nüve yarıçapı	82
Sağ-sol nüve uzunluğu	150

**Şekil 6.** Tübüler DC lineer motorun prototip görüntüsü.

2.2. Analitik Analiz

DC lineer motorların çalışması dairesel hareket üreten geleneksel DC motorların çalışması ile aynı prensibe dayanmaktadır. Buradan hareketle DC lineer motorların ürettiği kuvvet Denklem 1'de verilen Lorentz Yasası ile açıklanabilir (Deng vd. 2020).

$$F = (\vec{B} \times \vec{I})L \quad (1)$$

Burada F kuvveti (N), B manyetik akı yoğunluğunu (T), I sargılardan geçen akımı (A) ve L ise iletken uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen motor, hava aralığı barındıran kalıcı mıknatıslı bir sistem olduğundan üretilen kuvvetin analizi için hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunun belirlenmesi gerekmektedir. Kalıcı mıknatısların kullanıldığı sistemlerde hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu

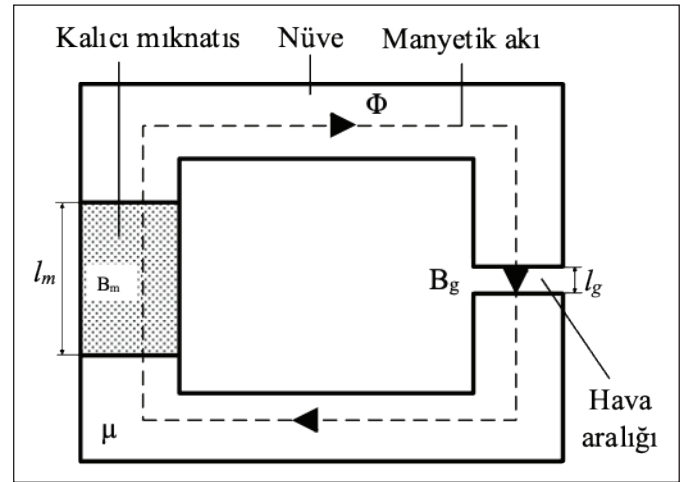
$$B_m = \frac{B_r}{H_c} H_m + B_r \quad (2)$$

biçiminde yazılabilir. Burada B_m hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunu (T), B_r artık mıknatısiyet değerini (T), H_c giderici kuvveti (kA/m) ve H_m hava aralığı manyetik

alan şiddetini (kA/m) temsil etmektedir. Hava aralığında oluşan manyetik alan şiddeti ise

$$H_m = -\frac{B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 q \frac{A_g l_m}{A_m l_g}} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir (Demirkol vd. 2023). Burada q kaçak akı faktörünü, μ_0 havanın manyetik geçirgenliğini, A_g hava aralığının yüzey alanını, A_m kalıcı mıknatısın yüzey alanını, l_m kalıcı mıknatıs uzunluğunu ve l_g ise hava aralığının uzunluğunu göstermektedir.

**Şekil 7.** Hava aralıklı kalıcı mıknatıslı manyetik sistem (Demirkol 2023).

Şekil 7'de verilen hava aralığı barındıran kalıcı mıknatıslı manyetik bir sistemin uygulama aşamasında bir miktar kaçak akı oluşmaktadır. Bu sistemlerin analizi yapılırken dikkate alınması gereken kaçak akı faktörü

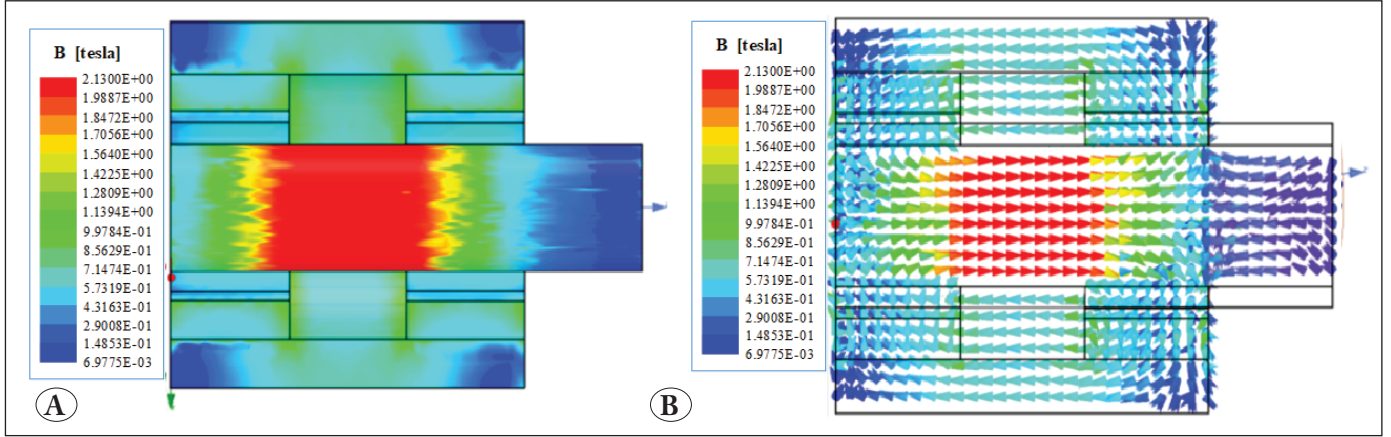
$$q = \frac{\text{Kalıcı mıknatıs içindeki akı}}{\text{Hava aralığındaki akı}} \quad (4)$$

denklemleri ile hesaplanabilir (Gürünlü 1989). Kaçak akılar dikkate alındığında tasarlanan motorun hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu analitik olarak 0.541 T olarak hesaplanmıştır. Sarım sayısı dikkate alındığında Denklem 1

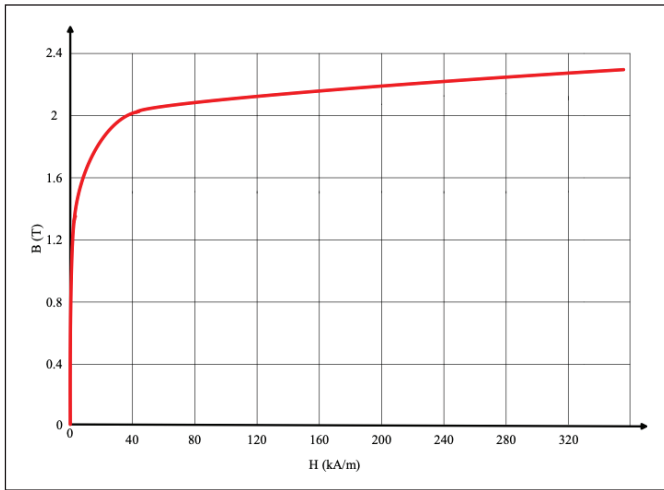
$$F = BNII \quad (5)$$

olarak yazılabilir. Burada N sarım sayısını temsil etmektedir. Sargılar 14 katman ve 1000 olarak sarılmıştır. Sargıların sarıldığı nüvenin silindirik yapısından dolayı manyetik alan içerisinde kalan iletkenin uzunluğunu hesaplamak için ortalama katman yarıçapı

$$r_0 = \frac{r_i - r_s}{2} \quad (6)$$



Şekil 8. Maxwell-Ansys manyetik analiz görselleri (A) Manyetik akı yoğunluğu dağılımı (B) Vektörel manyetik akı yoğunluğu (Demirkol vd. 2023).



Şekil 9. 1010 çelik malzemenin B-H eğrisi.

denklemleri ile hesaplanabilir (Aydın vd. 2019). Denklem 6'da r_o ortalama katman yarıçapını, r_i birinci katman yarıçapını ve r_s ise en üst katman yarıçapını göstermektedir. Motorda dört adet kalıcı mıknatıs kullanıldığı için üretilen toplam kuvvet Denklem 5 yardımıyla 199 N olarak belirlenmiştir.

2.3. Nümerik Analiz

Analitik hesaplamaları yapılan tübüler DC lineer motorun bilgisayar yardımıyla üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri Maxwell-Ansys ortamında oluşturularak nümerik analizleri de gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizler sonucunda elde edilen manyetik akı yoğunluğu ve vektörel manyetik akı yoğunluğu görselleri Şekil 8'de verilmiştir.

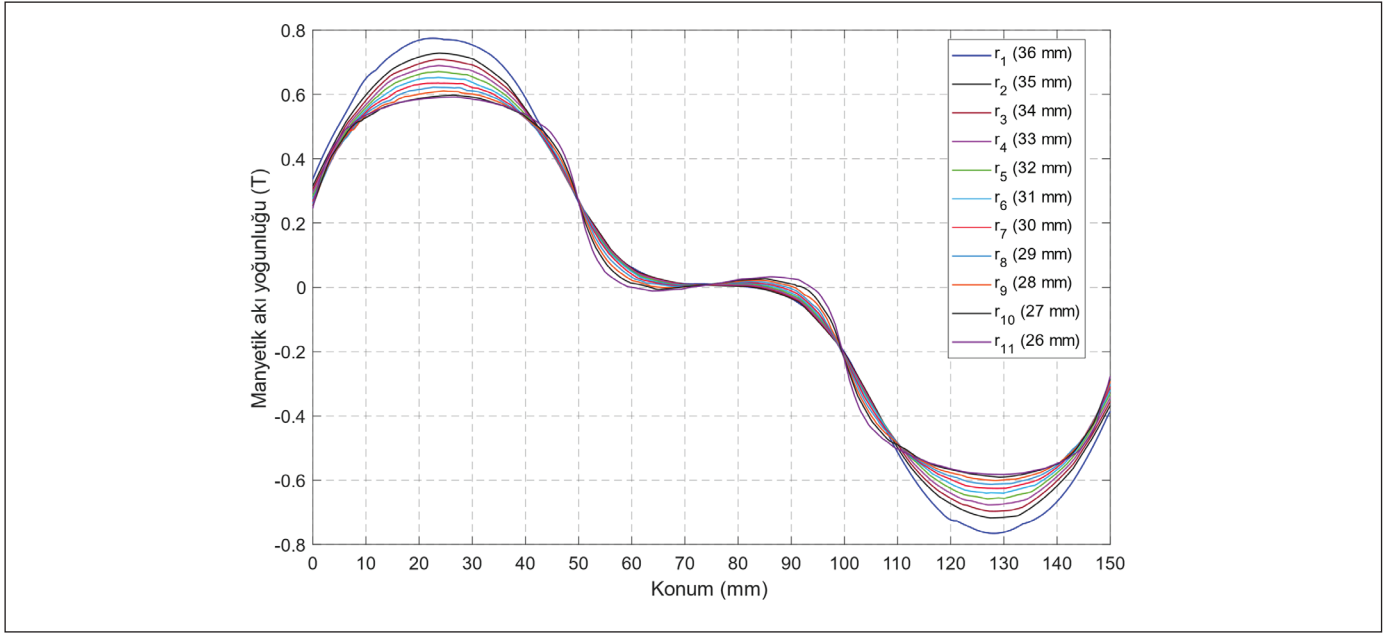
Motorun topolojisi göz önünde bulundurulduğunda Şekil 8'de görüldüğü gibi manyetik akı yoğunluğu değeri en yük-

sek kırmızı renk ile nüve üzerinde oluşmaktadır. Bu durum mıknatısların kutuplarına bağlı olarak oluşan iki simetrik manyetik devre akılarının devresini nüve boyunca aynı doğrultuda tamamlamasından kaynaklanmaktadır. Yapılan analizde en yüksek manyetik akı yoğunluğu 2.13 T olarak nüvede elde edilmiştir. Düşük karbonlu yumuşak 1010 çelik malzemenin B-H eğrisi Şekil 9'da görülmektedir. Doyum durumunda manyetik akı yoğunluğunun B-H eğrisinde yaklaşık olarak 2.2 T olduğu görülmektedir. Geliştirilen motorun nüvesi için tercih seçilen 1010 yumuşak çeliğin bu çalışma için uygun manyetik malzeme olduğu görülmektedir.

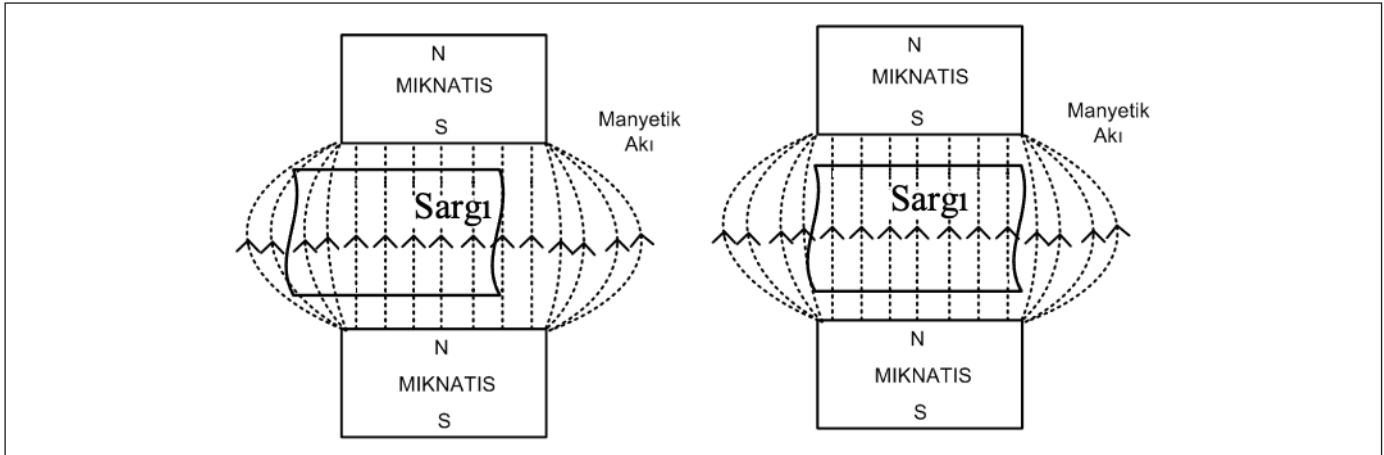
En küçük manyetik akı yoğunluğu manyetik alan dışında kalan kısımlarda gerçekleşmiş olup mavi renk ile gösterilmiştir. Şekil 10'da z-ekseninde bulunan endüvi boyunca hava aralığının farklı uzunluklarında oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımı sunulmuştur.

Şekil 10'da görüldüğü gibi manyetik alan içerisinde bulunan kısımlardaki hava aralığında manyetik akı oluşmaktadır. Hava aralığı uzunluğu arttıkça buna bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu azalmaktadır. En yüksek manyetik akı yoğunluğu manyetik alanı oluşturan kalıcı mıknatıslara en yakın bölgede meydana gelmektedir. Kaçak akılardan dolayı manyetik alan içerisinde bulunmayan bölgede manyetik akı yoğunluğu hemen sıfır değerine düşmemektedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi kalıcı mıknatıslı manyetik sistemlerde belli bir miktar kaçak akı oluşmaktadır.

Burada oluşan kaçak akılar üzerinden akım akan sargıları kesmektedir. Dolayısıyla oluşan kaçak akılar motorun ürettiği kuvveti pozitif yönde desteklemektedir.



Şekil 10. Hava aralığında farklı uzunluklarda oluşan manyetik akı yoğunluğu değişimi.



Şekil 11. Tübüler DC lineer motorun sargı konumuna göre kaçak akı ve kalıcı mıknatıs ilişkisi (Tuncay 2016).

3. Bulgular ve Tartışma

Analitik ve nümerik analizleri gerçekleştirilen yeni bir tübüler DC lineer motorun laboratuvar ortamında prototipi üretilerek hız ve konum testleri gerçekleştirilmiştir. Prototip motorun deney düzeneği Şekil 12'de sunulmuştur.

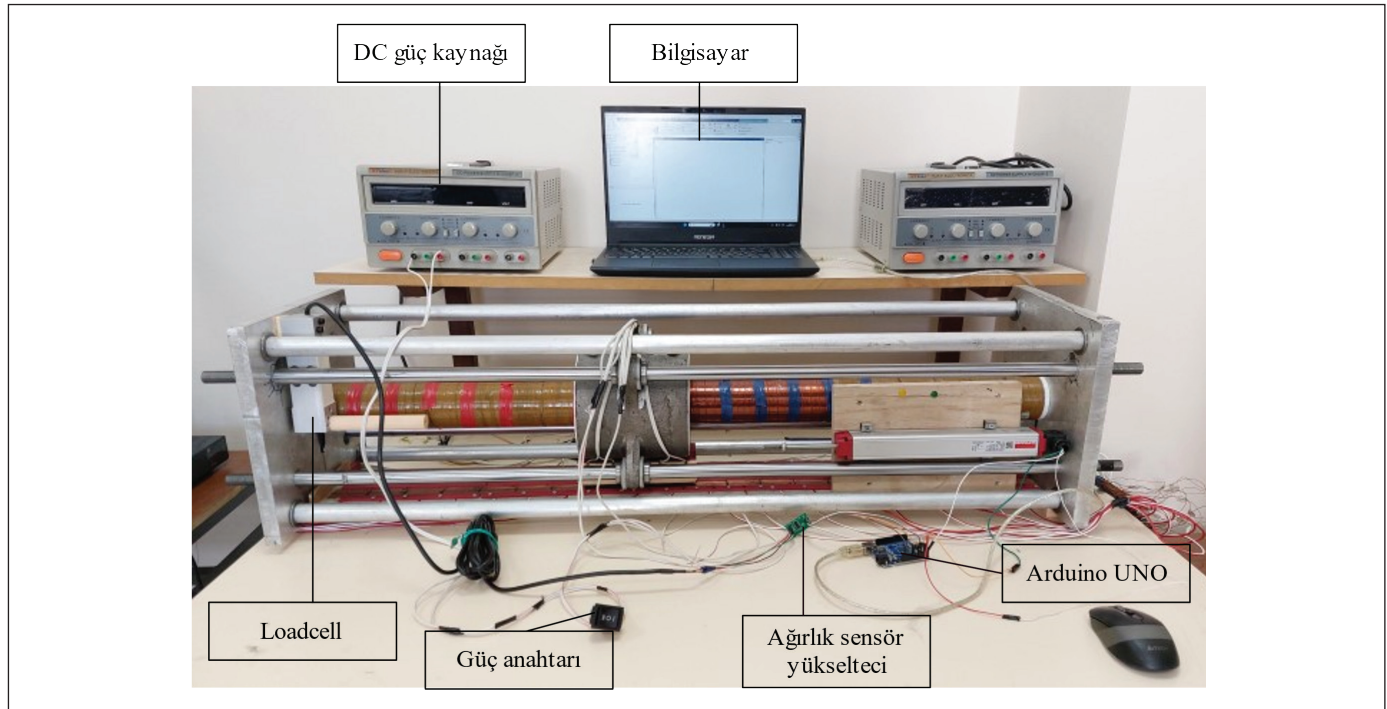
Lineer motorların en önemli parametrelerinden biri statik kuvvet/akım oranıdır. Yani amper başına üretilen kuvvet miktarıdır. Bu çalışma kapsamında prototipi üretilen tübüler DC lineer motorun kuvvet/akım oranı, 600 N'a kadar ölçüm yapabilen ZEMİC marka L6E CLASS:C3 model loadcell yardımıyla ölçülmüştür. Loadcell çıkışı HX711 ağırlık sensör kuvvetlendirici ile uygun seviyeye yükseltilip Arduino

UNO arayüzüyle bilgisayar ortamına gönderilmiştir. Ağırlık sensör kuvvetlendiricinin çıkışı Arduino Uno'nun 10 kHz örnekleme frekansına sahip analog girişine (Elektrifikasyon 2024) bağlanmıştır. Ölçüm işlemi, hareketli ünite sargılardan birinin baş kısmına yani sargının tamamı manyetik alan içerisinde kalacak biçimde konumlandırılarak 1 A akım için gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçme işlemi sonucunda motorun kuvvet/akım oranı deneysel olarak 193 N/A olarak tespit edilmiştir. Deneysel olarak elde ölçülen statik kuvvet/akım oranının analitik ve nümerik sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. OPKON RTL lineer potansiyometre ile motorun konum bilgisi ölçülmüştür. Konum verileri de Arduino UNO ile Arduino IO toolbox kullanı-

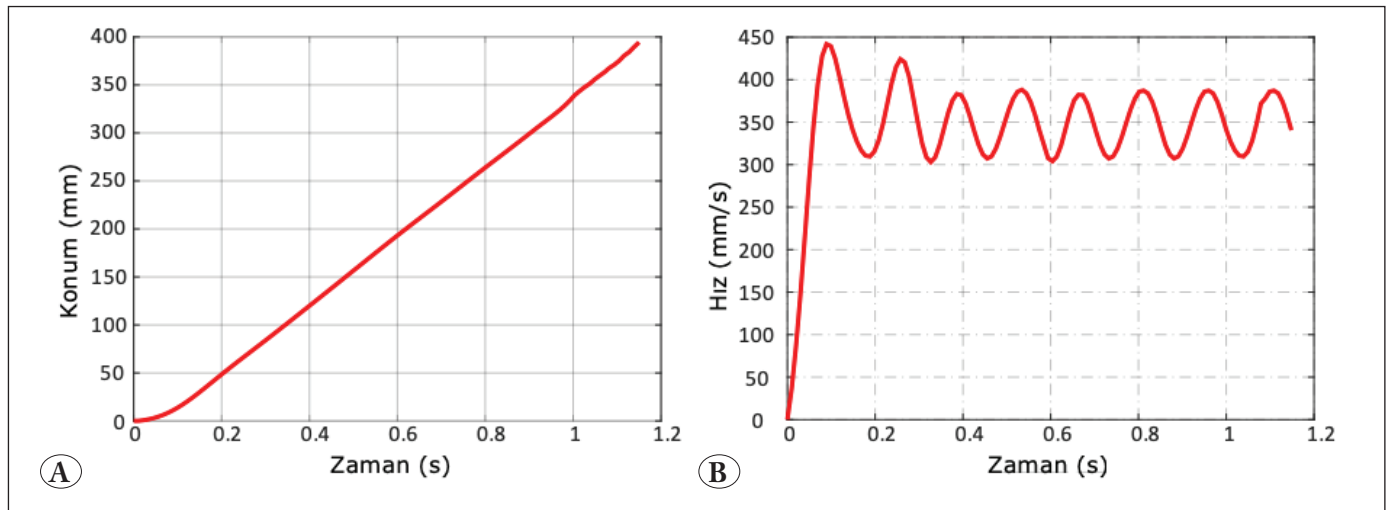
olarak MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır. Motorun hızı, konum bilgisinin simulink ortamında nümerik olarak türevi alınarak elde edilmiştir. Konum ve hız verileri yüksüz, 1 kg, 2 kg, 3 kg ve 5 kg yük altında incelenmiştir. Analiz neticesinde elde edilen konum ve hız tepkileri yüksüz durum için Şekil 13'te, 1 kg, 2 kg, 3 kg ve 5 kg için sırasıyla Şekil 13, Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de sunulmuştur.

Şekil 13'te görüldüğü gibi yüksüz olarak gerçekleştirilen deneysel incelemede motorun hızı yaklaşık 0.3 s'den sonra

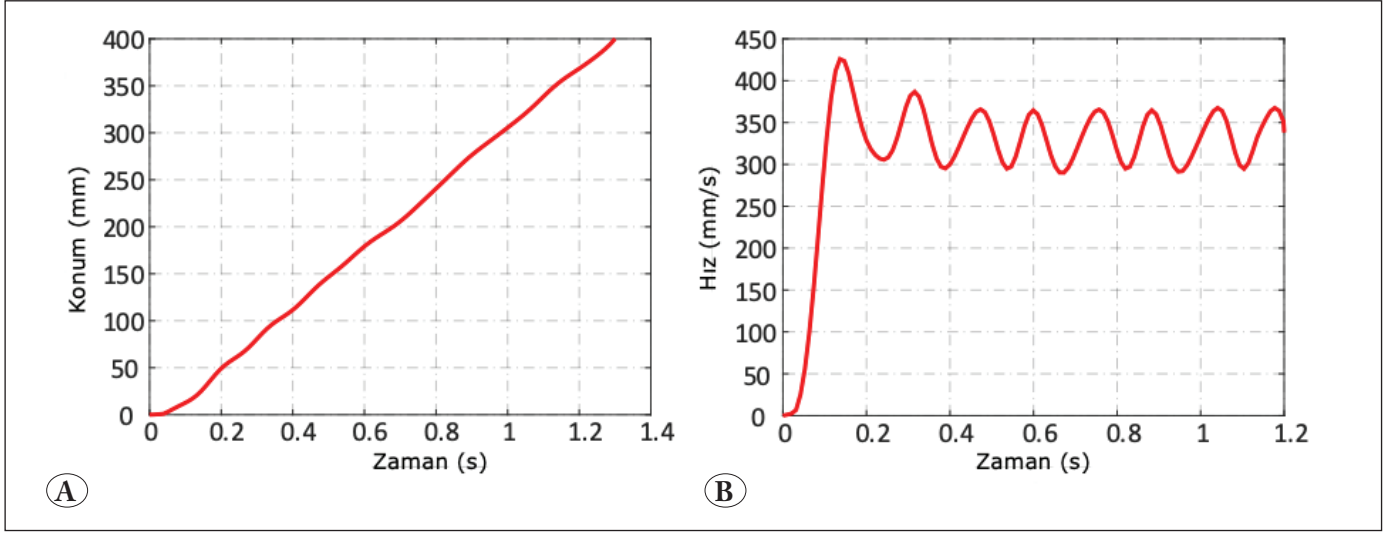
kararlı duruma geçmektedir. Motor hızı kararlı duruma ulaştıktan sonra yaklaşık olarak 340 mm/s ortalama hızla hareketini sürdürmektedir. Hız eğrisindeki dalgalanma %11.76 olarak gerçekleşmiştir. 400 mm mesafeyi 1.2s'den daha kısa bir sürede tamamlamaktadır. Motor yük altında enerjilenmediğinden yük miktarına bağlı olarak bu mesafeyi daha uzun sürede tamamlamaktadır. Hareket mesafesini yüksüz duruma göre 1 kg yük için %8.4, 2 kg yük için %14.4, 3 kg yük için %18.65 ve 5 kg yük için %39.8 artış göstermiştir. 1



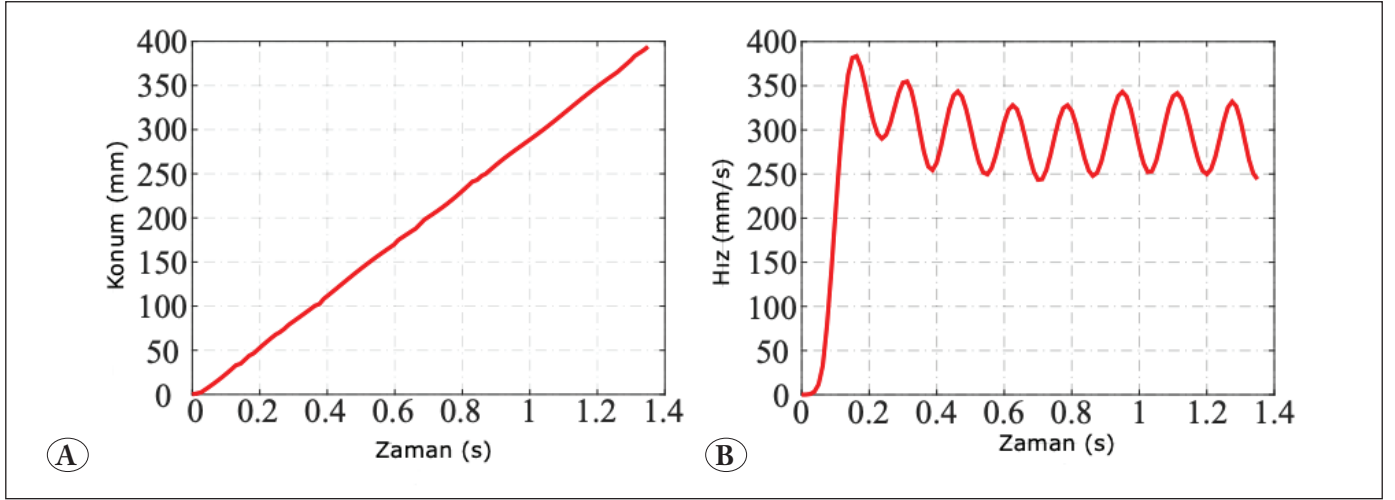
Şekil 12. Prototip motorun deneysel düzeneği.



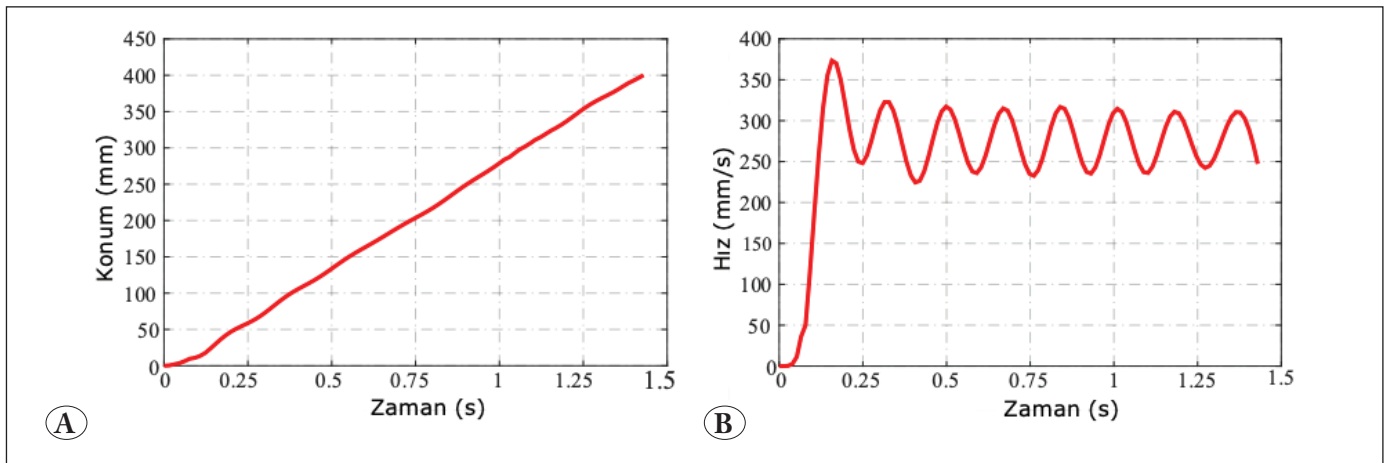
Şekil 13. Motorun yüksüz cevabı (A) konum cevabı (B) hız cevabı.



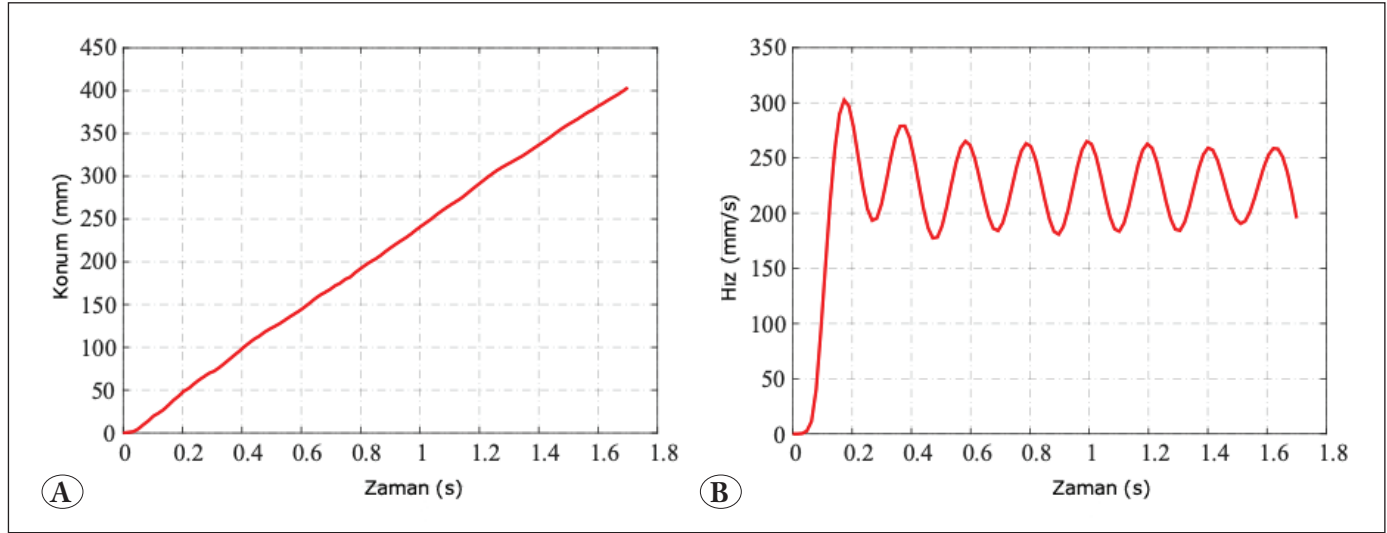
Şekil 14. Motorun 1 kg yük altında cevabı (A) konum cevabı (B) hız cevabı.



Şekil 15. Motorun 2 kg yük altında cevabı (A) konum cevabı (B) hız cevabı.



Şekil 16. Motorun 3 kg yük altında cevabı (A) konum cevabı (B) hız cevabı.



Şekil 17. Motorun 5 kg yük altında cevabı (A) konum cevabı (B) hız cevabı.

kg, 2 kg, 3 kg ve 5 kg yükler altında motorun hızı sırasıyla 0.32 s, 0.35 s, 0.4 s ve 0.5 s'de kararlı duruma geçmekte ve bu sürelerden sonra ortalama 330.62 mm/s, 291 mm/s, 276 mm/s ve 224 mm/s hızla yol almaktadır. Buradan açıkça görülmektedir ki uygulanan yükün miktarı arttıkça motorun hızı düşmektedir. Yüksüz duruma göre ortalama hızdaki bu düşüş belirtilen yükler için sırasıyla %2.75, %14.4, %18.8 ve %34.1 olarak gerçekleşmiştir. Motorun hız eğrisinde meydana gelen dalgalanma anahtarlamaların yol açtığı geçici rejim, ölçme işleminde kullanılan sensörlerin hassasiyeti ve nümerik türev alma işleminden kaynaklanmaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada uzunluk kısıtı bulunmayan, daha uzun imal edildiğinde ilave elektronik devre gerektirmeyen ve yüksek kuvvet/akım oranına sahip olup lineer motorların avantajlarından olan düşük kuvvet/akım oranına önemli bir çözüm sunan çift yanlı tübüler geometrik yapıda bir lineer motor geliştirilerek Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından patentlenmiş ve laboratuvar ortamında bir prototipi üretilmiştir.

Üretilen motorun analitik, nümerik ve deneysel olarak kuvvet/akım oranı belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Deneysel olarak elde edilen kuvvet/akım değerinin literatürde yapılan benzer çalışmalara oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Geliştirilen motorun yüksüz, 1 kg, 2 kg, 3 kg ve 5 kg yük altında konum ve hız davranışları incelenmiştir. Motor yük

altında çalıştırıldığında yük miktarındaki artışa bağlı olarak hareket mesafesini daha uzun sürede tamamlamaktadır. Aynı zamanda yük miktarı arttıkça motor hızının yavaşladığı görülmektedir. Yüksüz ve farklı yükler altında elde edilen hız eğrilerinde görülen dalgalanmalar anahtarlama sistemi, ölçme elemanlarının çözünürlüğü ve simülasyon ortamında kullanılan türev alma işleminden kaynaklanmaktadır. Daha sonra yapılacak çalışmalar ile uygun bir denetleyici tasarlayarak bu dalgalanmalar minimize edilebilir.

Motorun temel karakteristik niteliği, kuvvet/akım oranının yüksek olmasıdır. Bu nitelik, önerilen motoru özellikle yüksek kuvvet/akım oranının gerekli olduğu elektromanyetik fırlatıcılar gibi uygulamalar için ideal kılar. Bu nedenle, önerilen motorun bir DC elektromanyetik fırlatıcı olarak kullanımı, yazarların güncel odak konusudur.

Yazar katkısı: Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır. Yazarlar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Etik kurul onayı: Çalışma, etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

5. Kaynaklar

- Akmeşe, R., Eastham, JF. 1992. Design of permanent magnet flat linear motors for standstill applications. IEEE Transaction on Magnetics, 28(2):3042–3044.
- Aydın, A., Yılmaz, C., Demirci, R. 2019. Çembersel doğru akım motoru tasarımı ve manyetik analizi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(3):1351–1366. doi: 10.29130/dubited.518545.

- Azhar, F., Firdavs, N., Maht Jamil, ML. 2016.** Design of a linear DC motor for high thrust constants characteristics. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(14):8764–8769.
- Basak, A. 1975a.** An investigation of DC linear motor. Wales Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Brighton.
- Basak, A. 1975b.** The ferrite field closed end linear motor. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 8(9):716–717. doi: 10.1088/0022-3735/8/9/006.
- Basak, A., Anayi, FJ. 1995.** A DC linear motor with a square armature. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(3):462–469. doi: 10.1109/60.464869.
- Basak, A., Filho, AFF. 1994.** The Design and Analysis of A Novel Brushless DC Linear Motor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 133:640–643.
- Basak, A., Shirkoohi, GH. 1990.** Computation of magnetic field in DC brushless linear motors built with NdFeB magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*, 26(0):948–951.
- Casadei, D., Cecati, C., Grandi, G., Serra, G. 1994.** Adaptive control of a slotless PM linear DC actuator [Conference presentation]. *Proceedings of IECON'94 - 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Italy. doi: 10.1109/IECON.1994.398141.
- Chen, X., Jiang, H., Li, Z., Liang, K. 2020.** Modelling and Measurement of a Moving Magnet Linear Motor for Linear Compressor. *Energies*, 13(15):4030. <https://doi.org/10.3390/en13154030>
- Çepni, ME. 2010.** Lineer servo motor ve kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Demirci, R. 1998.** Adaptive control of DC linear motors. Doktora Tezi, University of Wales.
- Demirkol, Z. 2023.** Tübüler DC Lineer Motor Tasarımı ve Denetimi (Yayınlanmamış) Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Demirkol, Z., Hasırcı, U., Demirci, R. 2023.** Design, Implementation and Test of a Novel Cylindrical Permanent Magnet DC Linear Motor. *Energies (Basel)*, 16(8):3491. doi: 10.3390/en16083491.
- Deng, C., Ye, C., Yang, J., Sun, S., Yu, D. 2020.** A Novel Permanent Magnet Linear Motor for the Application of Electromagnetic Launch System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4):1–5. doi: 10.1109/TASC.2020.2986732.
- Dursun, M., Saygın, A., Özden, S., Fenercioğlu, A. 2015.** A new design of single side brushless direct current linear motor. *Journal of Automation and Control Engineering*, 3(4):336–342. doi: 10.12720/joace.3.4.336-342.
- Elektrifikasyon 2024.** <https://www.elektrifikasyon.com/arduino-analog-olcumler/>
- Famouri, P. 1992.** Control of a linear permanent magnet brushless DC motor via exact linearization methods. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(3):544–551.
- Filho, AFF. 1996.** Investigation of a double armature homopolar brushless DC linear motor. Doktora Tezi, Wales Üniversitesi.
- Filho, AFF., Basak, A. 1997.** Improvement of the force produced by a homopolar brushless DC linear motor. *Electric Machines and Drives Conference Record, USA*. doi:10.1109/IEMDC.1997.604161.
- Ghods, M., Ozer, A., Al-Yahmadi, A., Zadegan, MN., Hosseinzadeh, N. 2014.** Design, sensitivity analysis and fabrication of DC Linear Direct-Drive Motor (LDDM) [Conference presentation]. 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), USA. doi: 10.1109/ICRERA.2014.7016461.
- Green, CW., Paul, RJ. 1969.** Application of DC linear machines as short-stroke and static actuators. *Proceedings IEE*, 116(4):597–604.
- Griffiths, J., Jones, PL. 1969.** The direct current linear motor and its applications [Conference presentation]. 4. Universities Power Engineering Conference Scientific Instruments, Nottingham, United Kingdom.
- Gürünlü, C. 1989.** Enerji dönüşümünün temelleri çözümlü problemler 1, Ders Notları, Trabzon.
- Habil, M., Anayi, F., Xue, Y., Alnagasa, K. 2023.** Analyzing the Design and Performance of a DC Linear Stepper Motor. *Machines*, 11(8):785. <https://doi.org/10.3390/machines11080785>
- Hasırcı, U. 2005.** Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantıkla DC Lineer Motor Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Üniversitesi, Düzce.
- Ismael, A. 2018.** Microprocessor-controlled brushless DC linear stepping motor. Doktora Tezi, Cardiff University.
- Jones, PL. 1969.** DC linear motor for industrial applications. *Electrical Times*, 48–51.
- Lequesne, B. 1996.** Permanent magnet linear motors for short strokes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32(1):161–168. doi: 10.1109/28.485828.
- Luo, H., Wu, J., Chang, WS. 2007.** Minimizing Thrust Fluctuation in Moving-Magnet Permanent-Magnet Brushless Linear DC Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(5):1968–1972. doi: 10.1109/TMAG.2007.892081.
- Oğuz, K. 2021.** Çift taraflı hava çekirdekli sabit mıknatıslı lineer servo motor tasarımı ve uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Okonkwo, RC., Hanitsch, R. 2007.** Development and control of a prototype permanent-magnet DC linear motor. *IET Electr Power Applications*, 1(2):223. doi: 10.1049/iet-epa:20060119.

- Okonkwo, RC. 2006.** Design and performance of permanent-magnet DC linear motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(9):2179–2183. doi: 10.1109/TMAG.2006.880397.
- Oruç, OO., Dikmen, F. 2020.** Lineer motorlu engelli asansör tasarımı. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1):110–113.
- Ratcliff, G., Griffiths, J. 1964.** A linear DC motor. *Journal of Scientific Instruments*, 41:267–268.
- Tuncay, MT. 2016.** Sabit Mıknatıslı DC Lineer Motor Tasarımı ve Denetimi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Üstün, O., Kıvanç, OC., Mokukcu, MS. 2020.** A Linear Brushless Direct Current Motor Design Approach for Seismic Shake Tables. *Applied Sciences*, 10(21):7618. <https://doi.org/10.3390/app10217618>
- Warnett, K. 1971.** Linear electric motor. ABD. Patent 3 581 127.
- Yajima, H., Wakiwaka, H., Minegishi, K., Fujiwara, N., Tamura, K. 2000.** Design of linear DC motor for high-speed positioning. *Sensors and Actuators A: Physical*, 81(1–3):281–284. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00175-2.
- Yajima, H., Wakiwaka, H., Senoh, S., Yamada, H., Oda, J. 1997.** Optimum Design of a Long Stroke Thin Linear DC Motor. *Electrical Engineering in Japan*, 118:384–389.
- Wang, J., Wang, W., Atallah, K. 2011.** A linear permanent-magnet motor for active vehicle suspension. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 60:55–63.