



Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi

Dergiye Geliş Tarihi: 18.01.2013
Yayına Kabul Tarihi: 02.09.2013

Baş Editör: Naim Çağman
Alan Editörü: Levent Gökrem

Çift Yanlı Doğru Akım Lineer Motor Tasarımı

Recep DEMİRCİ^{a,1} (rdemirci@gazi.edu.tr)
Mehmet TANER TUNCAY^b (mehmettaner.tuncay@gop.edu.tr)

^aGazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 06500 Ankara
^bGaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu 60125 Tokat

Özet – Lineer elektrik motorları elektrik enerjisini herhangi bir ilave sistem kullanmadan direkt olarak doğrusal harekete dönüştüren elektrik makinalarıdır. Doğrusal hareket gerektiren uygulamaların çoğunda, kayış ve kasnak yardımıyla dairesel hareket yapan DC ve AC motorlardan hareket sağlanmaya çalışılmıştır. Diğer taraftan DC lineer motorların yaygınlaşmamasının en temel nedenleri ise uzunluk sınırlaması ve düşük kuvvet/akım oranları olmuştur. Bu çalışmada uzunluk sınırlaması olmayan çift yanlı DC lineer motor geliştirilmiştir. Laboratuvar şartlarında prototipi yapılan motorun, analitik yöntemle bulunan sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler –
Sabit Mıknatıs, DC
Lineer Motor

Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research 7 (2013) 42-54

Design of Double Sided Direct Current Linear Motor

Abstract – Linear electrical motors are electrical machines which directly convert electrical energy into linear motion without requiring any extra components. So far, rotating DC or AC motors with belt and gear systems have been employed in many position systems. On other hand, the main reasons, why DC linear motors have not been widespread are their stroke limitations and low force to current ratios. In this study, a double-sided direct current linear motor which has not any stroke limitation has been designed. The experimentally obtained results of the DC linear motor which was designed in laboratory conditions were compared with results of the analytical methods.

Keywords -
Permanent magnet,
DC Linear Motor

Received: 18.01.2013

Accepted: 02.09.2013

¹Sorumlu Yazar

1. Giriş

Elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştürmek için elektrik motorları kullanılmaktadır. Endüstriyel üretim tesislerinin birçok aşamasında doğrusal harekete ihtiyaç vardır. Diğer taraftan dairesel hareket üreten elektrik motorlarından lineer hareketi elde etmek için redüktör, kayış ve kasnak gibi birçok ilave parçalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, konum kontrolünü zorlaştırmanın yanı sıra maliyeti ve bakım gereksinimini de artırmaktadır. Ayrıca güvenilirlik ve verimin düşmesine yol açmaktadır. Söz konusu mevcut çözümler yerine, hızla yaygınlaşmaya başlayan ve daha güvenilir olan direk olarak doğrusal hareket üreten lineer motorların kullanımı bu sakıncaları ortadan kaldıracaktır. Doğrusal hareketi elde etmek için son yıllarda lineer motorların kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır [1,2]. Küçük çaplı uygulamalardan, ulaşım ve füze fırlatma sistemlerine kadar birçok alanlarda Lineer DC motorlarla karşılaşmaktadır [3]. Lineer elektrik motorları temel olarak AC ve DC olmak üzere iki grupta toparlanabilirler [4]. Doğrusal olmayan yapısı nedeniyle, AC motorlar ileri düzey kontrol teknikleri, yüksek kapasiteli mikrodenetleyiciler ve karmaşık elektronik devreler gerektirirler [5-7]. DC motorlar bu yönden daha avantajlıdır [8].

DC lineer motorlar da alan sargılı [9] ve mıknatıslı [10] olarak yapılabilmektedir. DC lineer motorların en yaygın dezavantajları fırça-kolektör problemleri, tek katmanlı yapılabilmeleri, çok katmanlılarda ise kontrol ve kumanda problemleri nedeniyle uzun yapılamamalarıdır. Green ve Paul tek katmanlı, fırçasız, kısa uzunlukta, Basak ve Oveshott sabit mıknatıslı fırçalı, Basak ve Anayi ise sabit mıknatıslı, fırçasız lineer DC motorlar tasarlamışlardır [11-14]. Gelişen NdFeB mıknatıslar sayesinde daha fazla kuvvet üreten ve kontrolü kolay olan DC lineer motorların kullanımı her geçen gün artmaktadır. Söz konusu mıknatıslar yardımıyla alan sargılı motorlara göre kuvvet/akım oranı daha yüksek motorlar üretilebilmektedir.

Bu çalışmada kontrol sistemi oldukça basit ve kuvvet/akım oranı yüksek olan çift yanlı DC lineer motor (ÇYDCLM) tasarlanmıştır. Üretilen kuvveti artırabilmek için endüvi bobinleri çok katmanlı sarılmış ve endüvi bobinlerine enerji vermek için kolektör ve fırça sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen motorun analitik yöntemlerle analizleri yapılmıştır. Ayrıca prototipi üretilerek deneysel verileri elde edilmiş ve çeşitli karşılaştırmalar yapılmıştır. Her iki durumdan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak motorun avantajları ve karakteristikleri ortaya konulmuştur.

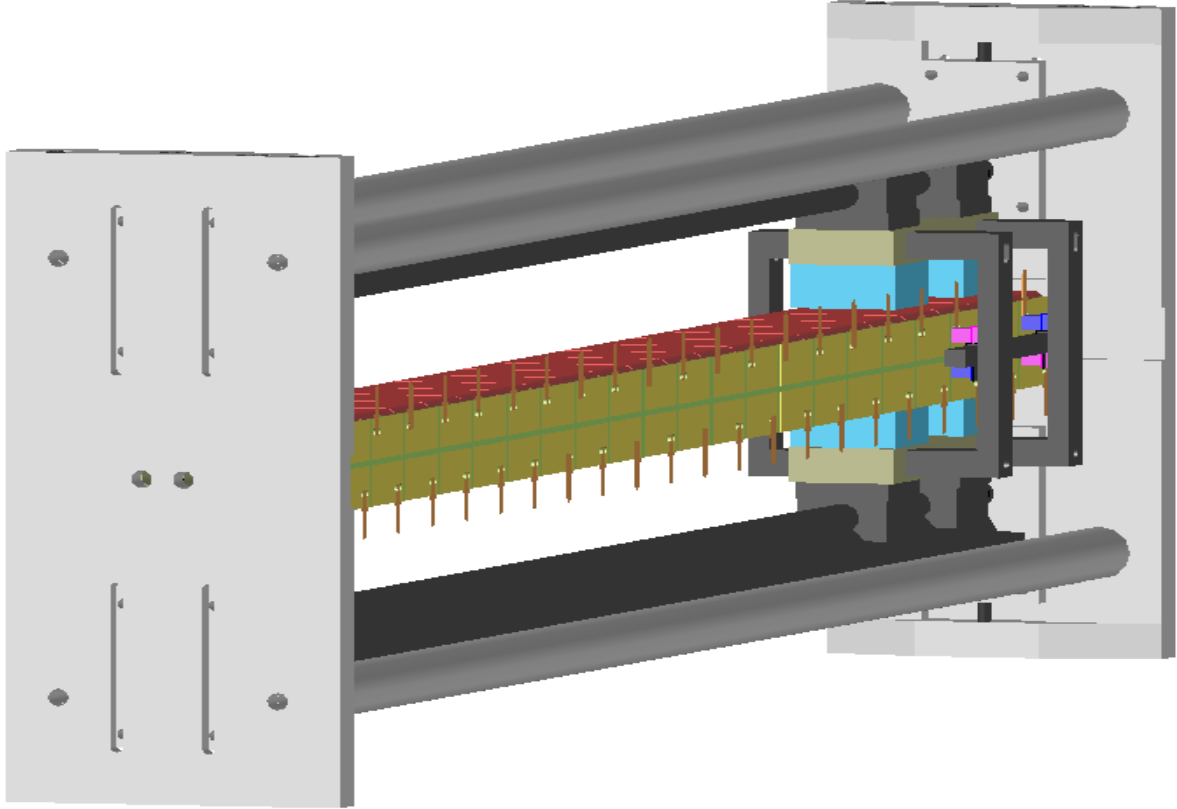
2. Çift Yanlı Doğru Akım Lineer Motorunun Tasarımı ve Çalışma Prensibi

Lorentz kanunu gereği manyetik alan içerisine yerleştirilen bir iletkenin akım geçirilirse kuvvet oluşur. Söz konusu kuvvetin büyüklüğü denklem 1 ile hesaplanır:

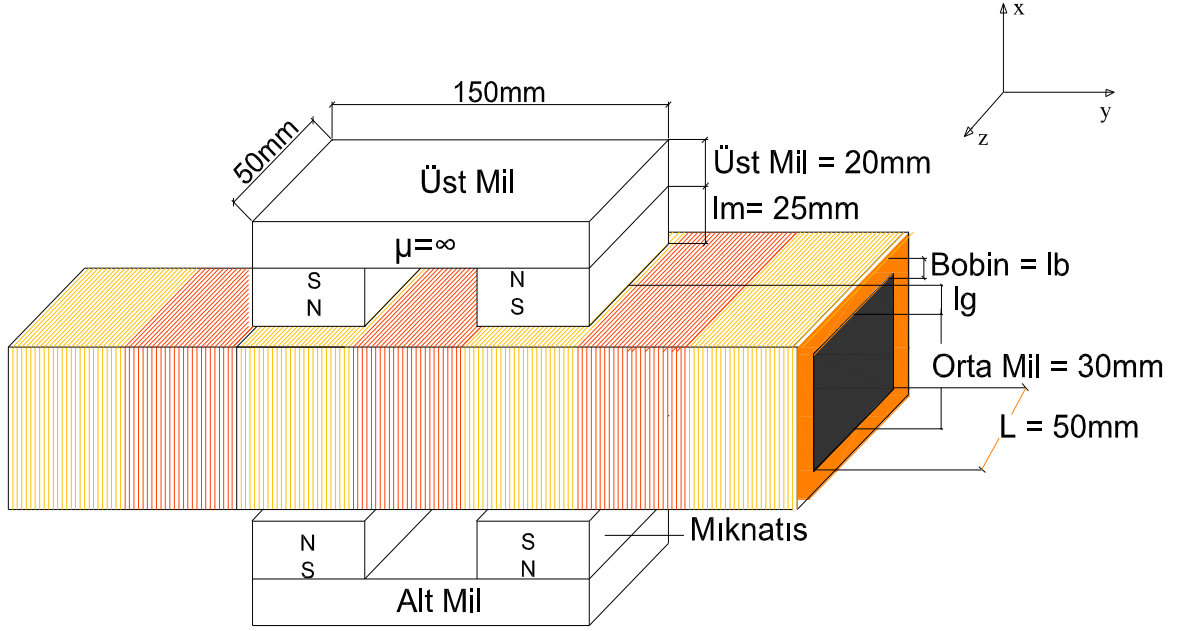
$$F = L \times B = B L I \sin(\theta) \quad (1)$$

Burada F iletkenin oluştuğu kuvveti (N), L iletkenin uzunluğu (m), B manyetik akı yoğunluğu (T), I iletkenin geçen akımı (A) temsil etmektedir. Bu yasa aynı zamanda bütün DC motorlarının çalışma prensibidir. Geleneksel tip DC lineer motorlarında bobinler tek katmanlı

yapılmış olup, bobinlerin üst kısımlarına gelen iletkenlerin izolasyonları kaldırılmış ve bu iletkenlere temas eden fırçalar yardımıyla enerji verilmiştir. İki veya daha fazla katmanlı yapıldıklarında ise fırça sistemiyle enerji vermek mümkün olmamıştır. Böylece üretilen kuvvetlerde çok düşük seviyelerde kalmıştır. Çok katmanlı yapılan tasarımlarda ise anahtarlama için karmaşık güç elektroniği devrelerine ve konum algılayıcılarına ihtiyaç duyulduğundan DC lineer motorlar yaygınlaşamamıştır. Bu çalışmada geliştirilen motorun üç boyutlu çizimleri Şekil 1’de, ölçüleri Şekil 2’de verilmiştir. Geliştirilen motorun hareket eden kısmında 4 adet NdFeB mıknatıs ve iki adet M 1010 düşük karbonlu yumuşak çelik nüve bulunmaktadır. Hareketli kısım lineer rulmanlar vasıtasıyla desteklenmiştir. Sabit olan orta mil M 1010 yumuşak çelikten yapılmış olup bobinleri taşımaktadır. Bobinlerin boyu mıknatısların boyu ile aynı olup Şekil 3’de gösterildiği gibi her kutup altına bir bobin gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bobinlerin üzerine bobinlerle aynı boyda olan ve kolektör görevi yapan bakır şeritler yerleştirilmiştir. Hareketli kısım sadece mıknatısları değil ilave olarak fırçaları da taşımaktadır. Bu yapılandırma sayesinde, hareket halinde mıknatısların altına kalan her iki bobine herhangi bir elektronik devreye ihtiyaç duyulmadan otomatik olarak enerji sağlanabilmektedir. Ayrıca enerji vermek için bobinlerin tek katmanlı yapıma zorunluluğu ortadan kaldırıldığından, tasarlanan lineer motorda sarım sayısı artırılarak istenilen kuvveti elde etme esnekliği de sağlanmıştır.

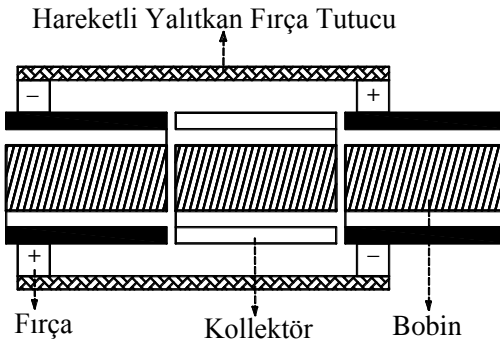


Şekil 1. Tasarlanan motorun 3 boyutlu çizimi

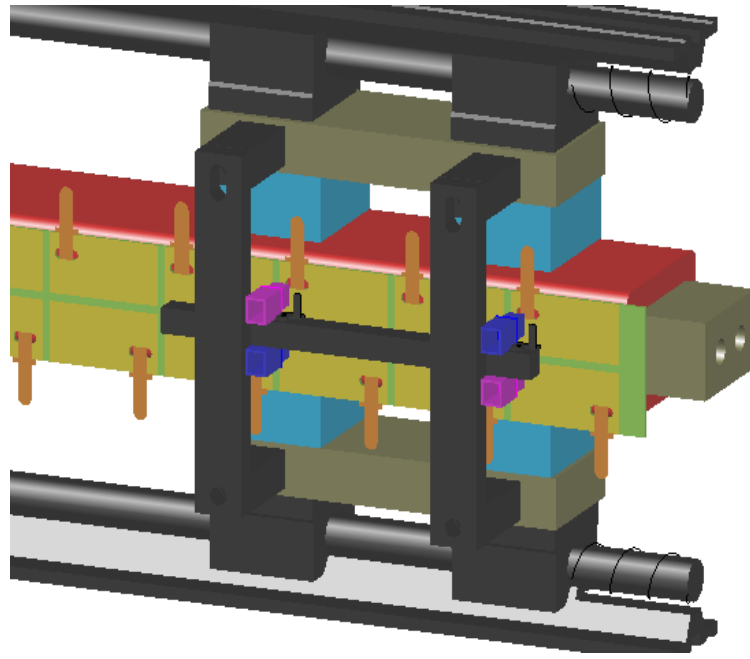


Şekil 2. Tasarlanan motorun ölçüleri

Üretilen kuvveti artırmak için mıknatısların altında kalan bobinlere hareket halinde fırçalar ve kolektör vasıtasıyla birbirine göre zıt yönde enerji verilmesi mümkün olup, fren yapılmak istendiğinde ise her iki bobine aynı yönde enerji verilmesi yeterlidir. Şekil 4'de görüldüğü gibi fırçalar mıknatıslarla birlikte kayabilen bir düzeneğe monte edilmişlerdir. Fırçalardan "+" kutup ile "-" kutup çapraz olarak yerleştirilmiştir. Tasarlanan sistem ile sadece mıknatısın altına gelen bobine enerji verildiğinden, hem enerji tasarrufu sağlanmış hem de görevini icra etmiş bobinlerin soğumasına imkân tanınmıştır. Önerilen kolektör ve fırça düzeneği sayesinde simetrik güç kaynağına gerek kalmadan ilgili bobinlere enerji sağlamış ve ayrıca ortadaki bobinin enerjisi kesilerek anahtarlama problemi çözülmüştür. Bu nedenle DC lineer motor istenilen uzunlukta yapılabilmekte ve herhangi bir sürücüye veya anahtarlama devresine ihtiyaç duymamaktadır.



Şekil 3. Bobinlerin besleme düzeneği



Şekil 4. Fırça ve kolektör sistemi

3. Üretilen Kuvvetin Analitik Hesabı

Elektrik makinalarının analitik yöntemlerle analizlerinin yapılması aşamasında manyetik devre parametrelerinin belirlenmesi önemlidir. Geliştirilen motorun manyetik devresi ve akı yönleri Şekil 5'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi motor simetrik iki ayrı manyetik devreden oluşmaktadır ve mıknatısların oluşturduğu manyetik akılar birbirlerini destekler vaziyettedir. Aynı anda enerji verilecek olan 2. ve 4. bobinlerdeki akım yönleri birbirine zıt olup, bu özellik Şekil 3'deki fırça ve kolektör düzeneği ile sağlanmaktadır. Mıknatısların altında kalan 2. ve 4. bobinlerdeki aktif iletkenler sayesinde kuvvet üretilmekte ve söz konusu kuvvet sayesinde mıknatıslar hareket yönünde itilmektedir. Bir sonraki adımda 3. ve 5. bobinlere otomatik olarak enerji verilerek hareketin devamlılığı sağlanmaktadır.

Şekil 5'de verilen sembollerden, Φ manyetik akıyı, μ manyetik geçirgenlik katsayısını, B_m mıknatıstaki manyetik akı yoğunluğunu, B_g hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu, l_m manyetik akının mıknatıs üzerinden geçtiği yol uzunluğu, l_g hava aralığını göstermektedir. Bu uygulamada kullanılan NdFeB mıknatıs 50x50x25 mm ölçülerindedir. Manyetik akı boyunca mıknatısın boyu, l_m 25mm ve hava aralığının uzunluğu, l_g 12 mm olarak alınmıştır. Seri manyetik devrede manyetik akı bütün devre boyunca aynı olduğundan manyetik akı için:

$$\Phi = B_m A_m = q B_g A_g \quad (2)$$

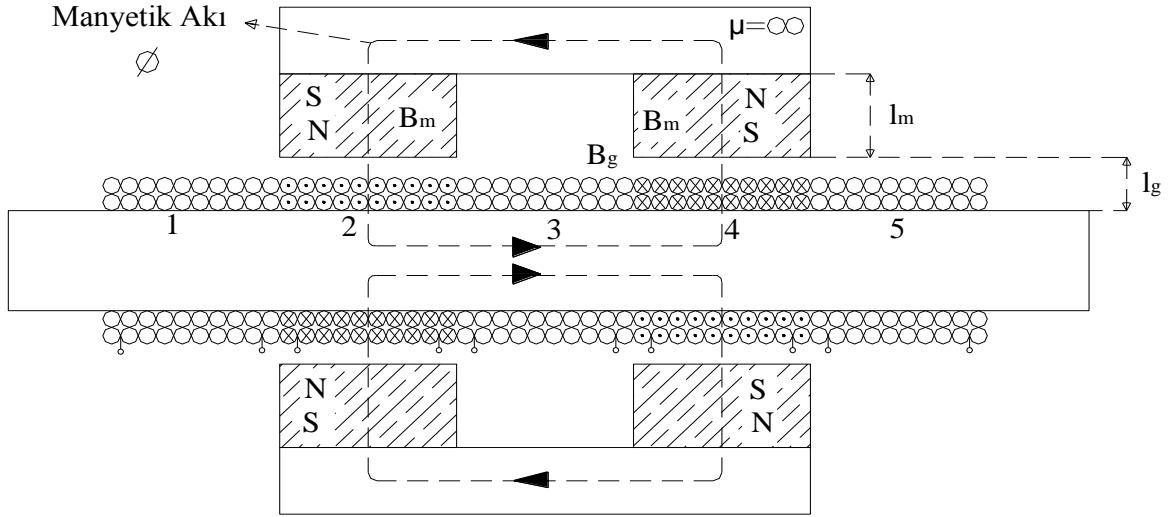
ifadesi yazılabilir. Burada q kaçak akı katsayısı olup, tasarım şekline ve hava aralığındaki akının geçtiği etkin yüzey ile alakalıdır. Hava aralığının başındaki ve sonundaki malzemelerin

kesitleri eşit ve paralel ise, a ve b yüzeyin boyutları olmak üzere etkin yüzey denklem 3 ile hesaplanır. Yüzeylerin birbirine eşit olmadığı durumda küçük olan yüzey ölçüleri dikkate alınarak ve denklem 4'deki gibi uygulanmaktadır. Bunun dışındaki farklı geometrik durumlar için değişik formüller kullanılabilir. Diğer taraftan, karmaşık yapılar için deneysel hesaplama yoluna gidilmelidir [15].

$$A_g = (a + l_g)(b + l_g) \quad (3)$$

$$A_g = (a + 2l_g)(b + 2l_g) \quad (4)$$

Geliştirilen motorda, A_g değeri 5.476×10^{-3} ve A_m değeri 2.5×10^{-3} olup, kaçak akı katsayısı q , denklem 3 yardımıyla 1,537 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Çift yanlı DC lineer motorun manyetik devresi

Motorda kullanılan mıknatısın demanyetizasyon (B-H) eğrisi Şekil 6'da verilmiş olup, B_m mıknatıstaki manyetik akı yoğunluğunu, H_c giderici kuvveti, B_r artık mıknatısiyeti, H_m mıknatıstaki manyetik alan şiddetini, B_Q çalışma noktasının ordinatı, H_Q çalışma noktasının apsisisidir. Tasarımda kullanılan NdFeB tipi mıknatısın B_r değeri 1,17 T, H_c değeri $868 \cdot 10^3$ kA/m dir. Böylece Şekil 6'da gösterilen 1 numaralı doğrunun denklemi,

$$B_m = \tan \alpha H_m + B_r = \frac{B_r}{H_c} H_m + B_r \quad (5)$$

olarak bulunur. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu (B_g) ile manyetik alan şiddeti (H_g) arasındaki bağıntı denklem 6'daki gibidir.

$$B_g = \mu_0 H_g \quad (6)$$

Motorun manyetik devresine Amper kanunu uygulanırsa;

$$2H_m l_m + 2H_g l_g = 0 \quad (7)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 7'den H_g değeri çekilirse, hava aralığındaki manyetik alan şiddetine ait ifade, denklem 8 elde edilir.

$$H_g = -\frac{H_m l_m}{l_g} \quad (8)$$

Ayrıca denklem 2'den B_m değeri çekilirse, mıknatısın manyetik akı yoğunluğu;

$$B_m = \frac{q B_g A_g}{A_m} \quad (9)$$

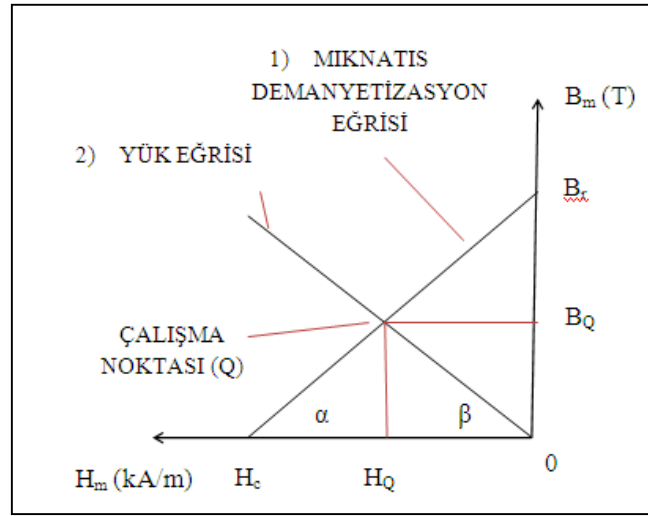
olarak bulunur. Denklem 6'deki B_g değeri denklem 9'de yerine yazılarak,

$$B_m = \frac{\mu_0 q H_g A_g}{A_m} \quad (10)$$

ifadesine ulaşılır. Yine denklem 8'de elde edilen H_g değeri denklem 10'da yerine konulursa denklem 11 bulunur.

$$B_m = -\frac{\mu_0 q l_m A_g}{l_g A_m} H_m \quad (11)$$

Böylece Şekil 6'da gösterilen 2 numaralı doğrunun denklemi elde edilir. Söz konusu doğru, bazı kaynaklarda mıknatısın yük eğrisi olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 6. Mıknatısın B-H eğrisi, yük eğrisi ve çalışma noktası

Yük eğrisinin eğimi mıknatısın ve hava aralığının uzunluklarına bağlı olup, manyetik devrede yük doğrusu mıknatısın boyu arttıkça yukarı doğru, hava aralığı arttıkça aşağı doğru kayar. Ancak mıknatısın demanyetizasyon doğrusu üretim parametrelerine bağlı olup sabit kalmaktadır. Her iki doğrunun kesiştiği nokta mıknatısın çalışma noktasını vermekte olup; denklem 5 ve 11 birbirine eşitlenerek çalışma noktasının apsis değeri denklem 12 verildiği şekilde bulunur.

$$H_Q = \frac{-B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \frac{qA_g l_m}{A_m l_g}} \quad (12)$$

Manyetik devre parametreleri denklem 12'de yerine konulmasıyla mıknatısın çalışma noktası manyetik alan şiddeti, $H_Q = -218,633 \text{ kA/m}$ olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer denklem 5'de yerine konulmasıyla da, mıknatısın çalışma noktası manyetik akı yoğunluğu, $B_Q = 0,875 \text{ T}$ olarak hesaplanmıştır. Motorda üretilen kuvvet hava aralığındaki manyetik alanda olduğundan, hava aralığının ve mıknatısın kesit alanları da dikkate alınarak, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu denklem 2 yardımı ile

$$B_{gQ} = \frac{B_Q}{q} = 0,569 \text{ T}$$

olarak hesaplanmıştır. Şekil 5 de görüldüğü gibi lineer motorda üretilen kuvvete aynı anda katkısı olan iki adet sargı olup (2 ve 4 bobinler), aktif iletken uzunlukları L dir. Her bobinin aktif olan iki yanı bulunduğundan, motorda üretilen toplam kuvvet, denklem 1 yardımıyla

$$F = 4nB_g L I_2 \quad (13)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada n , her bobinin sarım sayısını göstermekte olup 1000 tur olarak tespit belirlenmiştir. I_2 değişkeni ise aktif olan bobinlerden geçen akımı göstermektedir. Değeri bilinen değişkenler yerine konulduğunda,

$$F = 113,8 I_2 = K I_2 \quad \text{N} \quad (14)$$

ifadesi elde edilmiştir. Aynı anda aktif olan bobinler simetrik olduğundan, denklem 14 toplam akıma göre yeniden düzenlendiğinde

$$F = 56,90 I = K I \quad \text{N} \quad (15)$$

ifadesi elde edilir. Böylece tasarlanan motorun duyarlılığı ya da kuvvet/ akım oranı, K 56,90 olarak bulunmuştur. Bu değer geleneksel motorlardan yüksek olup tasarımın üretime uygun olduğunun göstergesidir.

4. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlar

Perspektif çizimleri ve analitik hesapları önceki kısımlarda verilen DC lineer motorun bir adet prototipi laboratuvar şartlarında üretilmiştir. Şekil 7 de fotoğrafı verilen DC lineer motorun elektrik devresi Şekil 8 de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi Şekil 5 de verilen yapıya uygun olarak aynı anda iki adet bobine enerji verilmektedir. DC lineer motorların en önemli parametrelerinden biri olan kuvvet /akım oranı, K veya statik kuvvet katsayısıdır.

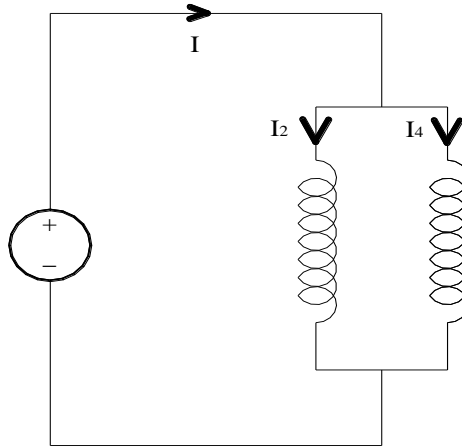
Tasarlanan DC lineer motorda bu değer denklem 15 yardımı ile 56,90 N/A olarak hesaplanmıştır. Kuvvet akım oranının deneysel olarak tespiti için, hareketli kısım 0 mm konumunda sabitlenmiş ve I değişkeni 0,1 Amper lik aralıklara artırılarak üretilen kuvvet dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Üretilen kuvvetin toplam akıma göre değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir. Grafikten görüleceği gibi 0,2 Amper'lik akım değerine kadar olan aralıkta üretilen kuvvet denklem 15 gereği 11,38 N olduğundan statik sürtünme kuvvetini yenemekte ve aynı zamanda kullanılan dinamometrenin hassasiyetinden dolayı ölçülememektedir. Sonuç olarak grafikte değeri sıfır olarak görünmektedir. Diğer taraftan 1 Amperlik akıma karşılık gelen kuvvet veya grafiğin eğimi 52,66 N/A olup teorik olarak hesaplanan K değerine oldukça yakındır.

Prototipi laboratuvar şartlarında geliştirilmiş olan DC lineer motorun kuvvet/akım oranının oldukça yüksek olmasına rağmen, en belirgin dezavantajın ise üretilen kuvvetin konuma bağlı olmasıdır. Başka bir ifade ile üretilen kuvvet konuma bağlı olarak periyodik olarak değişmektedir. Şekil 2,3 ve 5'de görüldüğü gibi mıknatis genişliği ve bobin genişliği 50mm.dir. Bobinle mıknatis aynı hizada olduğu zaman en fazla kuvvet üretilmekte, mıknatis

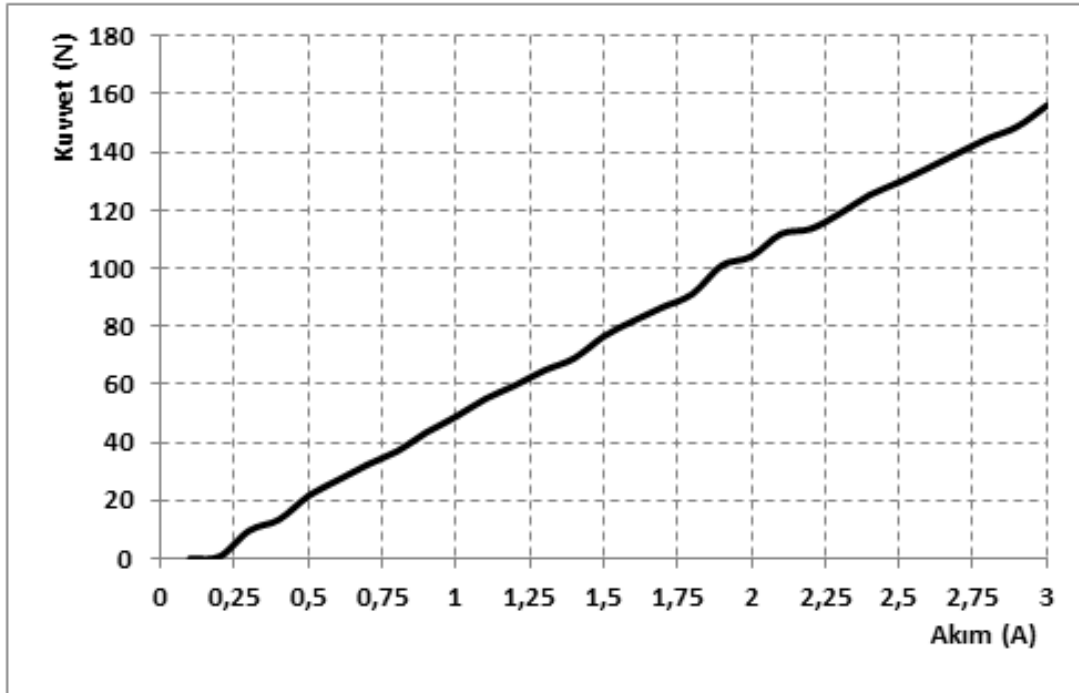
kaydıkça karşısındaki aktif iletken sayısı (n) azaldığından denklem 13 gereği üretilen kuvvet konuma bağlı olarak azalacaktır. Söz konusu değişim 50 mm'lik yani bir bobin boyuna karşılık gelen periyotlarla tekrarlanmaktadır. Bu değişimi tespit etmek için motor akımı 2 Amper'de sabit tutularak, üretilen kuvvet konuma bağlı olarak 5 mm aralıklarla teorik olarak hesaplanmış ve aynı zamanda dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Üretilen kuvvetin konuma göre değişiminin teorik ve deneysel sonuçları Şekil 10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu değişim her bobin boyunca yenilediğinden, motorda üretilen kuvvet konuma bağlı olarak testere dişi şeklinde değişen periyodik bir karakteristiğe sahiptir.



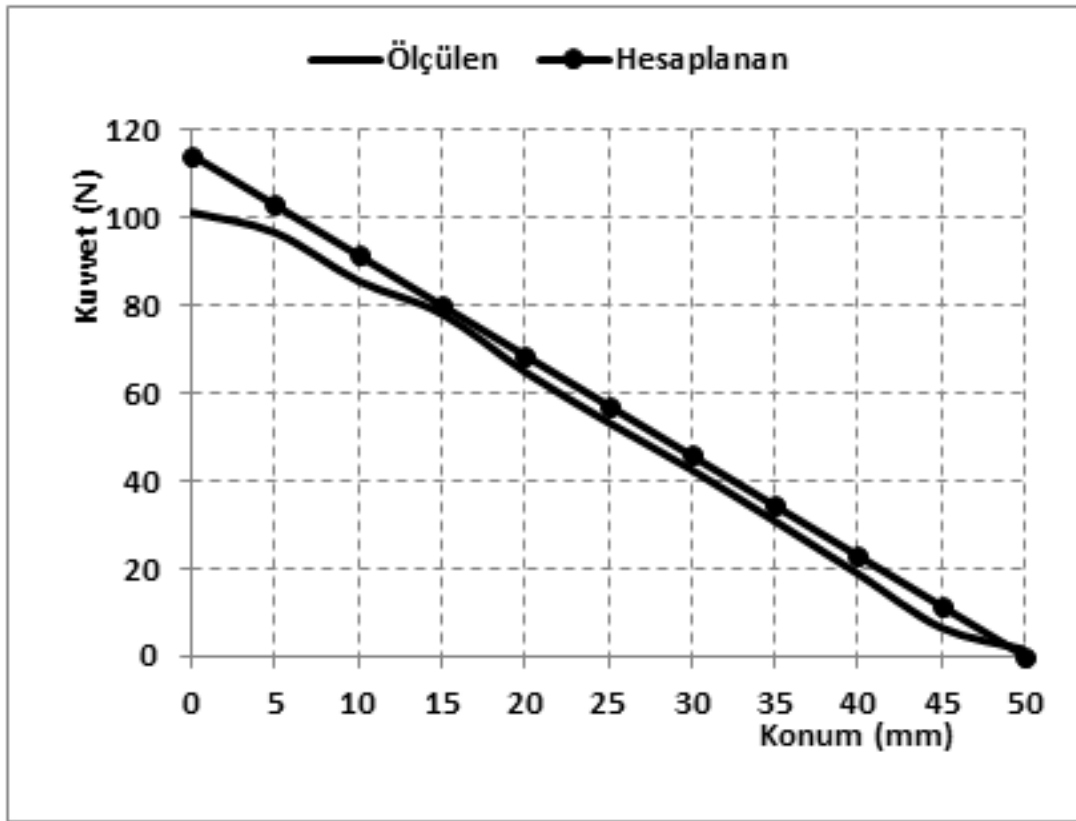
Şekil 7. Üretilen motorun resmi



Şekil 8. Bobin ve ana kol akımları



Şekil 9. Motorun kuvvet -akım karakteristiği



Şekil 10. Üretilen kuvvetin konuma bağlı değişimi.

5. Sonuç

Bu çalışmada yeni bir çift yanlı DC lineer motoru tasarlanmıştır. Geleneksel DC lineer motorlar elektronik devre ihtiyacından dolayı uzun yapılamamasına rağmen, Söz konusu motorda herhangi bir uzunluk sınırlaması yoktur. Modüller halinde üretilebilecek parçaların uç uca eklenmesi ile istenilen uzunlukta montajının yapılabilir olması, tasarlanan motorun en önemli avantajıdır. Geliştirilen motorun analitik yöntemle analizleri yapılmış, elde edilen sonuçlar üretilen motordan alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kaynaklar

- [1] Tavana, N. R., Shoulaie, A., “Modeling and Design Optimization of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Halbach Array”, *17th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE 2009)*, İran, 441-446 (2009).
- [2] Üney, M. Ş., “Matris konverterden beslenen lineer asenkron motorun vektör kontrol yöntemi ile hız kontrolünün yapılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ (2010).
- [3] Filho, A. F. F., “Investigation of a double armature homopolar brushless DC linear motor”, Doktora Tezi, *University of Wales Cardiff*, 41-45 (1996).
- [4] Demirci, R., “Adaptive control of DC linear motors”, Doktora Tezi, *University of Wales Cardiff*, 41-45 (1998).

- [5] Dursun, M., Ozden, S., “PC-based data acquisition system for PLC-controlled linear switched reluctance motor”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk J Elec Eng & Comp Sci, 21: 71 – 80 (2013)
- [6] Dursun, M., Özbay, H., “Design and analysis of a double sided linear switched reluctance motor driver for elevator door”, Przeglad Elektrotechniczny, 293-296 (2011)
- [7] Dursun M., Koç F.,Ozbay H., "Determination of Geometric Dimensions of a Double Sided Linear Switched Reluctance Motor", ICEMPE 2010, International Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 27-29 October Paris, France: 282-288 (2010),
- [8] Demirci, R., Dursun, M., “Adaptive position controller for double armature brushless DC linear motor,” ICEM’2000, International Conference On Electrical Machines, Espoo, Finland, Vol.2: 1066-1069, (28-30 August 2000).
- [9] Ratcliff, G., Griffiths, J., “A linear DC motor”, *Journal of Scientific Instruments*, 41: 267-268 (1964).
- [10] Griffiths, J. T., Jones, P. L., “The direct current linear motor and its applications”, *4. Universities Power Engineering Conference*, Nottingham Üniversitesi, İngiltere, 89-91 (1969).
- [11] Gren, C. W., Paul, R. J., “Performance of d.c. linear machines based on an assessment of flux distributions”, *Proc. IEE*. Vol. 118, No10, 1413-1420 (1971).
- [12] Basak, A., Overshott, K. J., “The ferrite field DC linear motor”, IEE Conference on Linear Electric Machines”, *IEE Publication* 120: 39-44 (1974).
- [13] Nasar, S. A., Boldea, I., “Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications”, *Prentice-Hall*, Amerika, 4-23 (1987).
- [14] Basak, A., Anayi, F. J., “A DC linear motor with a square armature”, *IEEE Trans on Energy Conversion*, 10(3): 462-469 (1993).
- [15] Gürünlü, C., “Enerji Dönüşümünün Temelleri Çözümlü Problemler 1”, Ders Notu, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi*, Trabzon, 1-12 (1989).