

Investigation of Current-Force Relationship in an Electromagnetic Launcher

Adem DALCALI^{*}, Onursal ÇETİN¹, Feyzullah TEMURTAŞ¹

¹Department of Electronics and Communication Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bandırma Onyediy Eylül University, Bandırma, Balıkesir / Turkey

Abstract: In electromagnetic launchers, the projectile location information is required. Particularly in sequential winding systems, position information is provided by using additional devices for de-energizing a winding and energizing the next winding. In alternating current powered launcher systems, projectile position can be estimated from current changes without the need for an additional device. In this study, the design of coil and projectile suitable for use in electromagnetic launcher systems has been realized with the help of computer aided design programs. The projectile position is defined as variable and the change of force and winding current on the projectile is determined by finite element method. The relationship between the current difference and the force is determined according to the position.

Keywords: Electromagnetic launcher, position detection, finite element method

Bir Elektromanyetik Fırlatıcıda Akım-Kuvvet İlişkisinin İncelenmesi

Özet: Elektromanyetik fırlatıcılarda merminin konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, ardışık bobinli sistemlerde bir bobinin enerjisinin kesilip sıradaki bobinin enerjilendirilmesi için ek düzenekler kullanılarak konum bilgisi sağlanmaktadır. Alternatif akım ile beslenen fırlatıcı sistemlerinde mermi konumu ek bir düzeneğe ihtiyaç kalmadan akım değişimlerinden kestirilebilir. Bu çalışmada, elektromanyetik fırlatıcı sistemlerinde kullanıma uygun bobin ve mermi tasarımı bilgisayarlı analiz programları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Mermi konumu değişken olarak tanımlanmış ve üzerindeki kuvvet ve sargı akımı değişimi sonlu elemanlar metodu ile tespit edilmiştir. Konuma göre akım farkı ile kuvvet arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik fırlatıcı, konum tespiti, sonlu elemanlar metodu

Reference to this paper should be made as follows (bu makaleye aşağıdaki şekilde atıfta bulunulmalı):

A. Dalcalı, O. Çetin, F. Temurtaş 'Investigation of Current-Force Relationship in an Electromagnetic Launcher', Elec Lett Sci Eng , vol. 15 no. 1 , (2019), 21-27

1. Giriş

Elektromanyetik fırlatıcılar elektrik makinalarında olduğu gibi enerjinin bir formdan diğer bir forma dönüştürüldüğü sistemlerdir. Fırlatıcıya uygulanan elektrik enerjisi bobinde manyetik enerjiye sonrasında da hareket enerjisine dönüştürülür. Elektromanyetik fırlatıcılarda fırlatılacak nesne, sabit olan bir veya birden fazla sayıda bobinde oluşturulan manyetik alanı takip ederek hareket sağlanır. Klasik sistemlerde mermi hızı sınırlıdır. Elektromanyetik fırlatıcılarda mermi hızı, manyetik alanın hızında bir sınır olmadığından teorik olarak sınırlandırılmaz. Bu durum elektromanyetik fırlatıcıların popülerliğini arttırmaktadır. Elektromanyetik fırlatıcılar özellikle savunma sanayinde, robotik ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [1-3].

Literatürde manyetik fırlatıcıların hız, mermi kütlesi, stator uzunluğu, yüzey yıpranması, sarım sayısı ve stator akımı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [4-11]. Mermi hızının incelendiği çalışmada, mermi ve stator bobininin ortak endüktansını belirleyen parametrelerin merminin hızında etkili olduğu tespit edilmiştir. Buna göre hızın artırılması için mermi boyunun kısa seçilmesi ve akı yoğunlaştırıcı tip stator bobini kullanılması önerilmiştir [12]. Le ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada çok kademeli bir manyetik fırlatıcının her bir kademesi için sarım sayısı ve tetikleme pozisyonlarını belirlemek için Taguchi metodunu kullanarak sistem

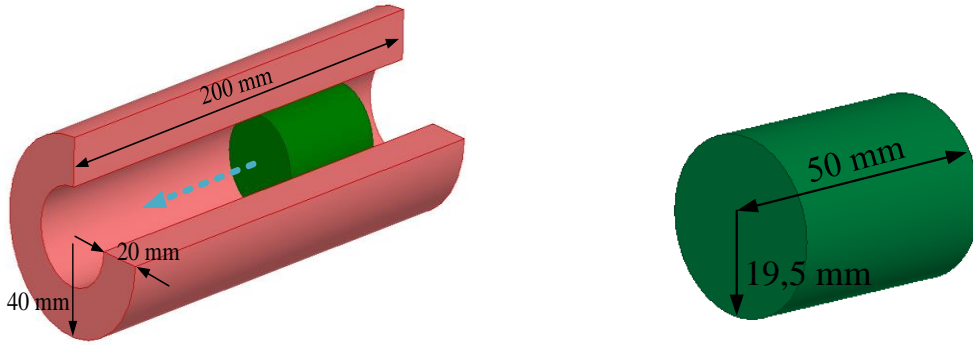
^{*} Corresponding author; Tel.: 0 266 717 0117 adalcali@bandirma.edu.tr

verimliliğini arttırmaya çalışmışlardır [13]. Verimin incelendiği diğer bir çalışmada sarmal tip bobinli elektromanyetik fırlatıcılarda bobinin sarım sayısının az olması durumunda verimin düştüğü ancak hızın arttığına değinilmiştir. Enerji dönüşüm verimliliğini arttırmak amacıyla genetik algoritma gibi optimizasyon yöntemlerinin kullanımı önerilmiştir [14].

Enerjinin kapasitör gruplarından sağlandığı sistemlerde şarj işlemi zaman kaybına neden olmaktadır. Alternatif akımın (AA) sürekli uygulanabilir olmasından dolayı bu çalışmada AA'nın elektromanyetik fırlatıcı bobinindeki davranışı incelenmiştir. Çalışmada, öncelikle bir elektromanyetik fırlatıcı sisteminde kullanılacak olan bobin ve merminin 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan modelin Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak manyetostatik ve zamana bağlı analizleri gerçekleştirilmiştir. Merminin sargıdan önce, sargı içerisinde ve sargıdan çıktığı süre boyunca üzerinde endüklenen manyetik alan, konuma göre akımdaki fark ve kuvvet değişimi profilleri çıkarılmıştır.

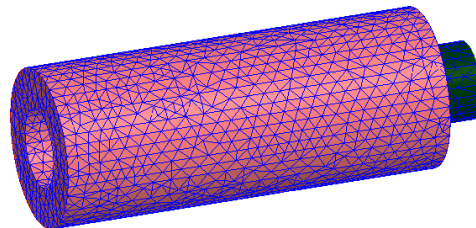
2. Tasarlanan Bobin ve Mermi Modeli

Elektromanyetik fırlatıcılar için tasarlanan bobin ve merminin 3 boyutlu modeli ve fiziksel boyutları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil-1 Bobin ve merminin 3 boyutlu modeli

Elektrik makinalarında SEM kullanılarak makineye ait nüve kayıpları, kuvvet, manyetik akı yoğunluğu, akım yoğunluğu gibi parametreler bulunabilir [15]. Bu metodun kullanılması ile tasarımcılar yüksek doğruluk ile hızlı hesaplama gerçekleştirebilmektedir. SEM'de çözümü istenen kısım ağ denilen sonlu sayıda küçük bölgelere ayrılır. Aranılan büyüklüğün, bu küçük bölgelerde sürekli olduğu ve modellenen temel diferansiyel denkleminde, bölgedeki her bir elemanın üzerinde geçerli olduğu varsayılır. Bir noktadaki çözüm için, noktayı çevreleyen ağların noktaya olan etkisi dikkate alınır. Böylece elemanların ağ yapısındaki köşe noktalarına ait büyüklükler birbirine bağlanmış olur. Sonuçta, ağ sayısı kadar doğrusal denklem takımı çıkarılır ve istenilen büyüklükler bu denklem takımlarının çözümü ile elde edilir [16-17]. Tasarlanan sistemin ağ (mesh) yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil-2 Sistemin ağ yapısı

3. Analiz Sonuçları

Sistemde mermi malzemesi olarak demir tercih edilmiştir. Maxwell denklemleri kullanılarak mermi üzerindeki manyetik alan ifade edilebilir [17].

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \nabla \times \vec{A}\end{aligned}\quad (1)$$

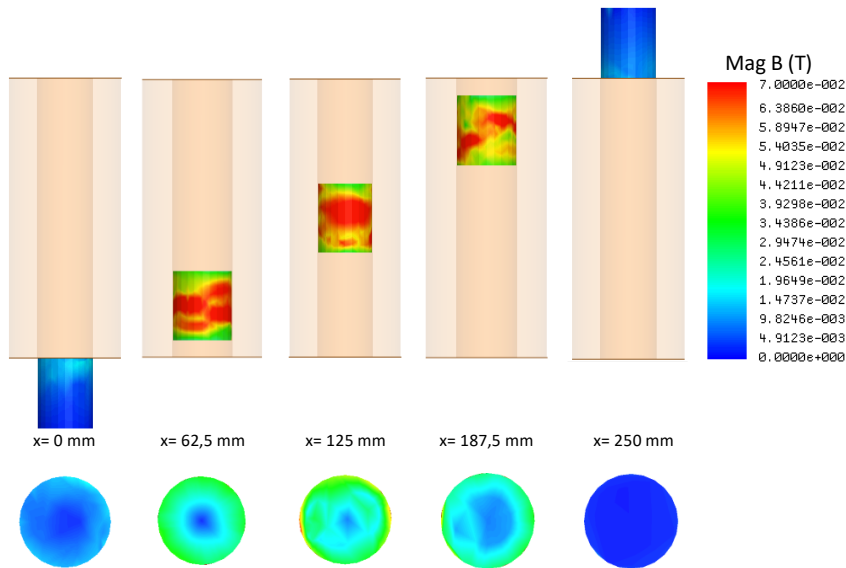
Denklem 1’de \vec{H} manyetik alan şiddetini, \vec{J} akım yoğunluğunu, \vec{E} elektrik alan şiddetini, \vec{B} manyetik akı yoğunluğunu ve \vec{A} manyetik vektör potansiyelini belirtmektedir. Denklem 2’de vektör potansiyelinin temel formülasyonu gösterilmiştir.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (2)$$

Burada, kullanılan malzemenin BH eğrisinin lineer olmamasından dolayı ν değişken geçirgenliği belirtmektedir. $\nu = \partial B / \partial H$ olarak ifade edilirse Şekil 3’te verilen manyetik akı yoğunluğu dağılımları Denklem 3 ile hesaplanabilir [17].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -\vec{J} \quad (3)$$

Sargıya 10 V DA üzerine bindirilen 50 Hz’lik 5V AA gerilim uygulanmıştır. Merminin giriş pozisyonunda, 62,5 mm’de, 125 mm’de ve sargıdan tamamen çıktığı pozisyondaki akı dağılımları sonlu elemanlar analizleri ile elde edilmiştir. Şekil 3’te 5 farklı pozisyon için akı dağılımları verilmiştir. Şekilde hareket düzlemindeki kesit için mermi yüzeyinde elde edilen akı dağılımı da verilmiştir. Akı dağılımı incelendiğinde merminin üzerindeki akının bobin içerisinde yoğunlaştığı görülebilmektedir.

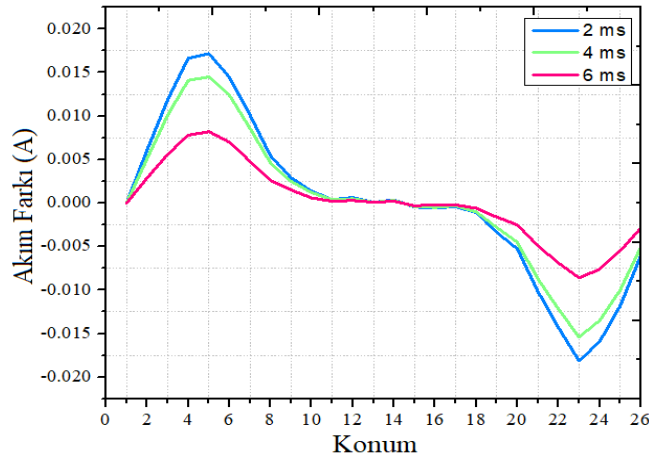


Şekil-3 Mermi üzerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Manyetostatik analizlerden sonra zamana bağılı analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sargı konumu 10 mm aralıklarla değiştirilerek toplam 26 konum ($0 \text{ mm} \leq x \leq 250 \text{ mm}$) için parametrik çözümler yapılmıştır. Akım farklarının belirlenmesi amacıyla 2 ms, 4 ms ve 6 ms referans alınarak belirlenen konumlarda akım değerlerinin farkları Denklem 4 kullanılarak belirlenmiştir.

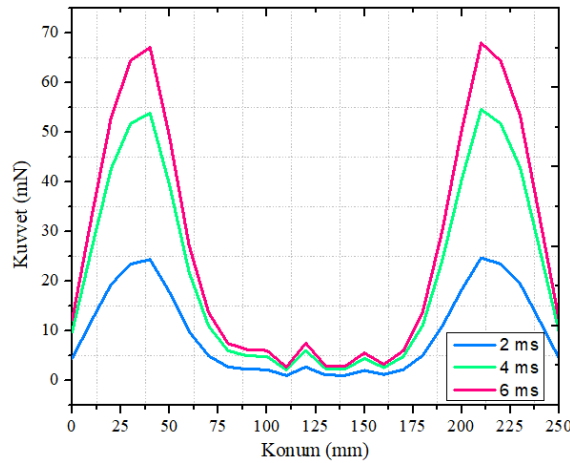
$$\Delta I = I_{i+1} - I_i \quad (4)$$

Burada ΔI akım farkını, I_i ilk konumdaki akım değerini ve I_{i+1} bir sonraki konumdaki akım değerini ifade etmektedir. Hesaplanan akım farklarının dalga formu Şekil 4'te verilmiştir



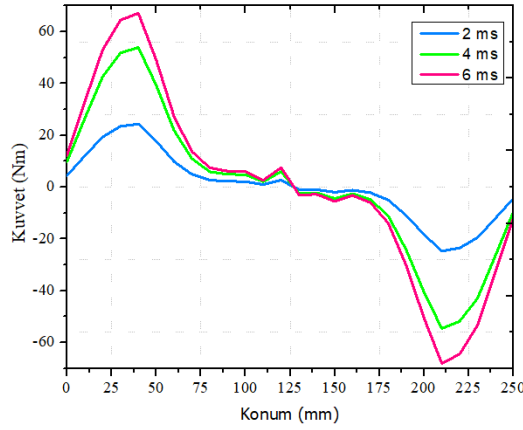
Şekil-4 Belirlenen zamanlardaki akım farkı değerleri

2 ms, 4 ms ve 6 ms'de mermi konumu 0-250 mm aralığında 10 mm hassasiyetle değiştirilerek mermi üzerindeki kuvvetlerin genliği çıkartılmıştır. Şekil 5'te kuvvetin genliğindeki değişimler sunulmuştur.



Şekil-5 Mermi üzerindeki kuvvet genliğinin konuma göre değeri

Merminin üzerindeki kuvvetin konuma göre değişimi ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde negatif kuvvet mermi üzerindeki kuvvetin yön değişimini göstermektedir.



Şekil-6 Mermiye etkiyen kuvvetin konuma göre değişimi

Şekil 4 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğine konuma göre akım farkı ile konuma göre kuvvet arasındaki ilişki açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra büyüklükler açısından akım fark genliği ile kuvvet genliği arasında ters orantısal bir ilişki vardır. Bu durum akımın fark değerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

5. Sonuç ve Tartışma

Elektromanyetik fırlatıcılarda sargıya AA uygulanması durumunda analizlerden de görüldüğü gibi mermi üzerinde itme ve çekme kuvveti oluşmaktadır. AA beslenen fırlatıcı sistemlerinde mermi konumunun belirlenmesi sargıya uygulanan gerilimin zamanında kesilmesi açısından önemlidir. Sargı konumu AA'da ek bir düzeneğe ihtiyaç kalmadan akım değişimlerinden pozisyon kestirimine olanak vereceği değerlendirildiğinden bobine AA gerilim uygulanmıştır. Analizlerde kuvvet ile akım farkı arasında konuma göre belirli bir ilişki olduğu görülmüştür. Dolayısıyla akım farkından kuvvet kestirimi yapılabilir. Akım farkındaki değişimin negatif olduğu bölgelerde kuvvetin yönünün değiştiği, akım farkındaki değişiminin tepe değerine ulaştığı noktalarda kuvvetin de ileri ve ters yönlerde tepe değerine ulaştığı görülmektedir. Bütün bunlar değerlendirildiğinde merminin maksimum hızı sağlaması için akım fark değeri bilgisi yola çıkılarak, uygulanan gerilimin kesilme zamanı tespit edilebilir. Bu çalışma ile elektromanyetik fırlatıcılarda AA sistem uygulanarak mermi konumunun belirlenmesinin mümkün olabileceği görülmüştür. İleriki çalışmalarda makine öğrenmesi veya klasik öğrenme teknikleri kullanılarak mermi konumunun başarılı bir şekilde kestirilebileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP-18-MF-1003-003 proje numarası ile desteklenmiştir.

Referanslar

[1] Chandan, K.S., Rao, P. M., "A Mathematical Formulation of Inductance for Multipole Field Electromagnetic Launcher", International Journal of Pure and Applied Mathematics, 118(24), 1-13, 2018.

- [2] Sari, V., “Elektromanyetik Fırlatıcıların Farklı Manyetik Özellikteki Çekirdeklerle Performans Analizi”, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2015.
- [3] Fair, H. D., “Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters A New Era”, IEEE Transactions on Magnetics, 41(1), 158-164, 2005.
- [4] W. Luo, Y. Wang, Z. Gui, Z. Yan, and W. Chen, “Connection pattern research and experimental realization of single stage multipole field electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Plasma Science, 41(11), 3173–3179, 2013.
- [5] Engel, T. G., Nunnally, W. C., Neri, J. M., “High-efficiency, medium-caliber helical coil electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Magnetics, 41(11), 4299–4303, 2005.
- [6] Yuan, W., Yan, P., Sun, Y., Li, M., Liu, C., Li, J., Gui, Y., He, J., “Design and testing of a two-turn electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Plasma Science, 39(1), 198–202, 2011.
- [7] Skurdal, B. D., Gaigler, R. D., “Multi-mission electromagnetic launcher”, IEEE Transactions on Magnetics, 45(1), 458–461, 2009.
- [8] Crawford, M., Subramanian, R., Watt, T., Surls, D., Motes, D., Mallick, J., Barnette, D., Satapathy, S., Campos, J., “The design and testing of a large-caliber railgun”, 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Canada, 2008.
- [9] He, Y., Song, S., Guan, Y., Cheng, C., Dai, W., Qui, X., Li, Y., “An investigation into muzzle velocity repeatability of a railgun”, IEEE Transactions on Plasma Science, 43(5), 1647–1651, 2015.
- [10] Zhang, J., Gu, G., Xiang, Y., Zhao, X., Liu, X., “Research on a big multiturn rail electromagnetic launching system”, IEEE Transactions on Magnetics, 43(5), 2054–2058, 2007.
- [11] Dong, E., Cao, R., “The Inner Surface Profile Measurement Apparatus for an Electromagnetic Rail-Gun Launcher”, IEEE Sensors Journal, 18(10), 4269-4274, 2018.
- [12] Çoşkun, İ., Kalender, O., Ege, Y., “İndüksiyon Bobin Silahı İçin Uygun Stator Bobini Geometrisinin Araştırılması”, BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi, 8(2), 40-48, 2006.
- [13] Le, D. V., Go, B. S., Song, M. G., Park, M., Yu, I. K., “Design of an Electromagnetic Induction Coilgun Using the Taguchi Method”, IEEE Transactions on Plasma Science, 46(10), 3612- 3618, 2018.
- [14] Yang, D., Liu, Z., Shu, T., Yang, L., Ouyang, J., Zhi, S., “Transient simulation of helical coil electromagnetic launchers”, The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 37(1), 280-292, 2018.
- [15] Dalcalı, A., Akbaba, M., “Comparison of 2D and 3D magnetic field analysis of single-phase shaded pole induction motors,” Engineering Science and Technology, an International Journal, 19, 1–7, 2016.

[16] Akbaba, M., Fakhro, S. Q., "Field Distribution and Iron Loss Computation in Reluctance Augmented Shaded-Pole Motors Using Finite Element Method", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(2), 302–307, 1992.

[17] Akbaba, M., Fakhro, S. Q., "An Improved Computational Technique of the Inductance Parameters of the Reluctance Augmented Shaded-pole Motors Using Finite Element Method", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(2), 308–314, 1992.