

Yeni bir manyetik fırlatıcı tasarımı ve analizi: Bir ANSYS Maxwell uygulaması

Sabri BIÇAKÇI* , Hakan ÇITAK²

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Müh. Böl., Balıkesir, 10145, Türkiye

²Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Prog., Balıkesir,10145, Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 27.02.2023

Kabul Tarihi (Accepted Date): 29.03.2023

Öz

Bu çalışmada herhangi bir mekanik itici kullanmadan halka ve silindirik şeklindeki sabit mıknatıslardan oluşturulmuş yeni bir manyetik fırlatıcı tasarımı önerilmiştir. Tasarımda önce iki halka mıknatis kullanılmış daha sonra her seferinde bir halka mıknatis ilave edilerek fırlatıcı boyu değiştirilmiştir. Farklı boylardaki fırlatıcı tasarımlarında halka mıknatıslar arası mesafe sabit değerde arttırılmış ve fırlatılacak mıknatis merminin kesiti de değişken tutulmuştur. ANSYS Maxwell simülasyon programı kullanılarak oluşturulan boyları farklı her bir fırlatıcı tasarımı için mıknatis mermiye uygulanan manyetik kuvvetin konuma göre değişimleri analiz sonrasında belirlenmiştir. Böylece mermi kesiti değişiminin ve fırlatıcı boyunun sabit kademelerle arttırılmasının manyetik kuvvete olan etkileri bulunmuştur. Ayrıca mermiye etkiyen manyetik kuvvette etkin rol oynayan halka mıknatıslar yerine bobin kullanılması durumunda bobin ile ilgili değişkenlerin belirlenmesine de çalışılmıştır. Böylece bobine verilecek değişken akıma göre itici kuvvetin de değiştirilebilir olması sağlanabilmiştir. Makalede fırlatıcı tasarımlarının ANSYS Maxwell programıyla oluşturulması ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Manyetik fırlatıcı, sabit mıknatis, manyetik kuvvet, ANSYS Maxwell.

A new magnetic launcher design and analysis: An ANSYS Maxwell application

Abstract

In this study, a new magnetic launcher design consisting of ring and cylindrical permanent magnets without using any mechanical propellants is proposed. In the design, first two ring magnets were used, then one ring magnet was added each time, and the

*Sabri BIÇAKÇI, sbicakci@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-2334-8515>

Hakan ÇITAK, hcitak@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-5627-3601>

launcher length was changed. In launcher designs of different lengths, the distance between the ring magnets has been increased at a constant value and the cross section of the magnet bullet to be launched has been kept variable. The variations of the magnetic force applied to the magnet bullet according to the position were determined after the analysis for each launcher design of different sizes created by using the ANSYS Maxwell simulation program. Thus, the effects of changing the bullet cross-section and increasing the launcher length by constant steps on the magnetic force were found. In addition, in the case of using coils instead of ring magnets, which play an active role in the magnetic force acting on the bullet, it has also been tried to determine the variables related to the coil. Thus, it has been ensured that the driving force can be changed according to the variable current to be given to the coil. In the article, the creation of launcher designs with the ANSYS Maxwell program and the results obtained are discussed in detail.

Keywords: *Magnetic launcher, permanent magnet, magnetic force, ANSYS Maxwell.*

1. Giriş

Ateşli silahlar ve uydu fırlatma sistemlerinin fırlatılması, kimyasal enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesi ilkesine dayanmaktadır. Elektromanyetik fırlatıcılarda ise, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesiyle fırlatma işlemi gerçekleşmektedir [1]. Elektromanyetik fırlatıcılarda, stator bobinlere verilen akımın kontrol edilmesiyle mermi bobinin hızı değiştirilebilmektedir [2].

Elektromanyetik fırlatıcı ile ilgili ilk çalışmalar 1844 yılına dayanmaktadır [3,4]. O zamandan beri elektromanyetik fırlatıcılar birçok araştırmaya konu olmuştur. Örneğin insansız hava araçları [5], tuzak karşı önlem [6], [7], havan [8], füze [8]), uzun menzilli silahlar [9] ve yüksek hız uygulamaları [10], fizik uygulamaları [11]), titreşim testi [12] için elektromanyetik fırlatıcılar (EML) geliştirilmiştir. Uzun bir gelişim süreci olan elektromanyetik fırlatıcıların farklı geometride birçok çeşidi imal edilmiş ve performansı değerlendirilmiştir [13]. Geleneksel raylı fırlatıcılar, artırılmış raylı fırlatıcılar, geleneksel helisel fırlatıcı [14] ve yüksek verimli helisel fırlatıcı en popüler EML geometrilerinden bazılarıdır.

Raylı fırlatıcı sisteminde, doğru akım güç kaynağına bağlı bir çift ray arasına bir iletken mermi Lorentz kuvvetine dayalı hareket etmektedir [15-17]. Bobinli fırlatıcı sisteminde ise; mermi bobini uygun kuplaj bölgesinde iken stator bobine uygulanan kısa süreli akım sayesinde oluşan elektromanyetik kuvvet ile mermi bobini itilmektedir [18-22].

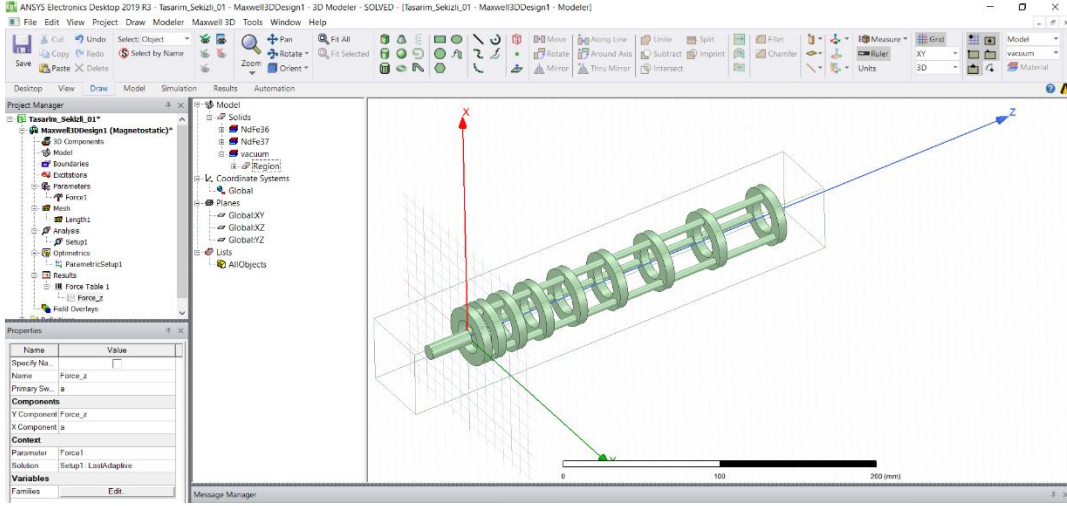
Bobinli fırlatıcı sistemlerin bazılarında ise, mermi bobini ile sürücü bobininin mekanik veya elektriksel bir bağlantısı yoktur. Sürücü bobininin zamanla değişen akımı, mermi bobini üzerinde Lenz kanununa göre bir akım indüklemektedir. Böylece iki bobin arasında bir itme kuvveti oluşmaktadır. Birden fazla sürücü bobine sahip fırlatıcılarda bu itme işlemi her bir sürücüde tekrarlanmaktadır. Bu tür bobinli fırlatıcılarda mermi ile sürücü bobin arasında sadece manyetik kuplaj bulunmaktadır. Bu nedenle çok sürüclü bobine sahip indüksiyon bobin silahlarda mermi ile stator bobini arasındaki eşzamanlılık son derece önemlidir. Bobinli fırlatıcıdaki sürücü bobinin enerjilendirilmesi, mermi bobininin uygun kuplaj bölgesinde iken sağlanmalıdır. Ayrıca sürücüye aktarılan kısa süreli enerjinin ise merminin bölgeyi terk etmeden bitmiş olması gerekmektedir. Mermi bobini hızlandıkça uygun kuplaj bölgesinde kalma süresi azaltılmaktadır. Bu durum

anahtarlama zamanını kısaltmaktadır. Bu çalışmada ise, çok kademeli bobinli fırlatıcılardaki bu problemin bobinler arası mesafenin değişken tutulması ve bobinler arasında manyetik yönlendirme yapılmasıyla giderilebileceği öngörülmüştür. Bu öngörü doğrultusunda halka ve silindirik şeklindeki sabit mıknatıslardan oluşturulmuş yeni bir manyetik fırlatıcı tasarımı ANSYS Maxwell simülasyon programı kullanılarak yapılmış ve fırlatıcının bir mıknatıs mermiye uygulayacağı manyetik kuvvetin konuma göre değişimi analiz sonrasında belirlenmiştir. Daha sonra tasarımda halka mıknatıs ilavesiyle fırlatıcı boyu artırılarak ve mermi kesiti değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Bu sayede fırlatıcıda halka mıknatıslar arası mesafenin sabit büyüklükte artırılmasının ve fırlatılacak mermi kesiti değişiminin manyetik kuvvetle olan ilişkisi belirlenmiştir. Ayrıca mermiye etkiyen kuvvette etkin rol oynayan halka mıknatıslar yerine çok kademeli fırlatıcılardaki gibi bobin kullanılması durumunda bobin ile ilgili değişkenlerin belirlenmesine de çalışılmıştır. Makalede boyları farklı fırlatıcı tasarımların ANSYS Maxwell programıyla oluşturulması ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada halka ve silindirik şeklindeki sabit mıknatıslardan oluşturulmuş yeni bir manyetik fırlatıcı tasarımı için ANSYS Maxwell simülasyon programı kullanılmıştır. ANSYS Maxwell, elektrik, manyetostatik, Girdap akımı ve geçici problemleri çözmek için sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanan yüksek performanslı bir yazılımdır. Yazılım, uygun malzeme, sınır ve kaynak koşulları kullanarak uzayda belirli bir bölgede tanımlanmış bir model için Maxwell denklemlerini uygulayarak manyetik alan problemlerini çözmektedir. Kartezyen (XY) ve Axisymmetric (RZ) olmak üzere 2 geometri modu içeren Maxwell yazılımı, 3 farklı Elektrik Alanı çözücüsü (Electrostatic, AC Conduction and DC Conduction) ve 3 ayrı Manyetik Alan çözücüsü (Magnetostatic, Eddy Current and Transient Magnetic) içerir.

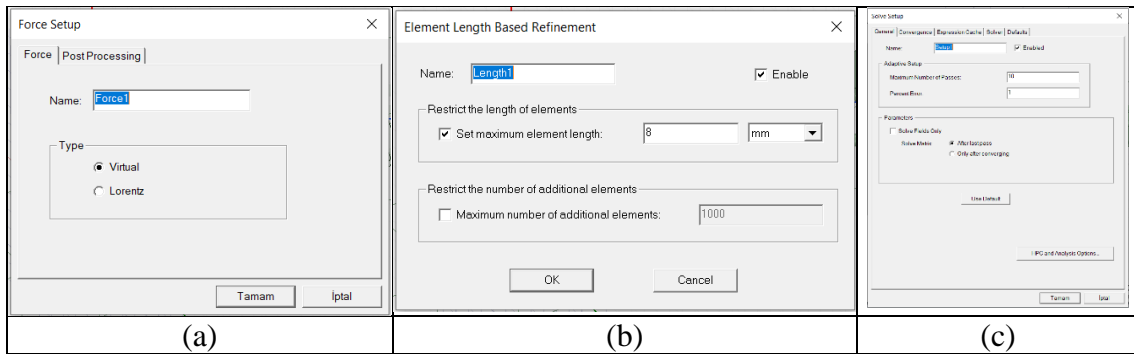
Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde “Magnetostatic” adlı “Manyetik Alan çözücü” kullanılmıştır. Çalışmada ilk olarak “Magnetostatic” tasarım sayfası açıldıktan sonra “Model” sekmesi seçilerek fırlatıcı tasarımı için çapı 5 mm, boyu 5, 10, 15, ..., 40 mm olan silindirik malzemeler ile iç çapı 11,5 mm, dış çapı 20 mm ve boyu 6 mm olan halka şeklindeki malzemeler oluşturulmuştur. Daha sonra malzeme özellikleri sekmesinden malzemelerin cinsleri ve manyetik yönleri atanmıştır. Bir sonraki aşamada bu malzemeler Şekil 1’de görüldüğü gibi konumlandırılarak fırlatıcının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda halka mıknatıslar arasına manyetik akı kaçaklarının azaltılması ve manyetik akının yönlendirilmesi için boyları 5 cm ile 40 cm arasında değişen silindirik mıknatıslar konulmuştur. Her bir aralıkta üç silindirik mıknatıs yer almakta ve kendi aralarında pozisyonları bir eşkenar üçgen oluşturmaktadır. Çalışmada fırlatıcıdaki halka mıknatıs sayısı 2 ile başlanmış ve 9’a kadar artırılmıştır. Her ilave sonrasında boyu değişen fırlatıcı için analizler tekrarlanmıştır.



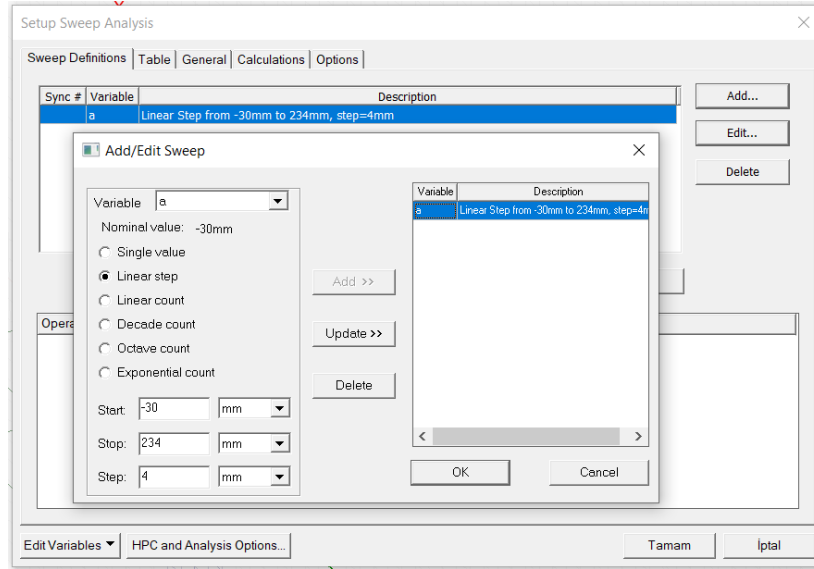
Şekil 1. Fırlatıcının ANSYS Maxwell programındaki tasarımı.

Çalışmada her bir fırlatıcı tasarımı için 5 mm çapında 30 cm boyunda silindirik bir mıknatıs mermiye etki eden manyetik kuvvetin analizinin yapılabilmesi için öncelikle “Parameters” seçmesinde “Force” eklenmelidir (Şekil 2a). Daha sonra mesh ayarının yapılabilmesi için fırlatıcıyı saran bir “region tanımlanmalı, “Mesh” sekmesi ile de mesh aralığı belirlenmeli (Şekil 2b) ve “Analysis” seçmesiyle çözüm ayarları yapılmalıdır (Şekil 2c). Son olarak silindirik mıknatıs, fırlatıcı tasarımı içinde konum değiştireceği için “Optimetrics” sekmesi ile bu değişimin aralıkları belirlenmelidir (Şekil 3). Fakat bu ayarın yapılabilmesi için daha önceden merminin z eksenindeki konumuna bir değişken atanmalı ve bunun uzunluk ifade ettiği ve biriminin de mm olduğu tanımlanmalıdır.

Çalışmada silindirik mermiye etki eden manyetik kuvvetin değişimi belirlenirken sadece fırlatıcı boyu değiştirilmemiş, merminin kesiti de değişken tutulmuştur. Böylece mermi çapı ve fırlatıcı boyunun (dolayısıyla halka mıknatıslar arası mesafe) manyetik kuvvetle ilişkisi belirlenebilmiştir. Ayrıca analiz sonrasında fırlatıcı tasarımında z eksenı boyunca manyetik akı değişimi de belirlenmiş ve manyetik akının maksimum değeri bulunmuştur.



Şekil 2 a) Parameters, b) Mesh, c) Analysis ayarları



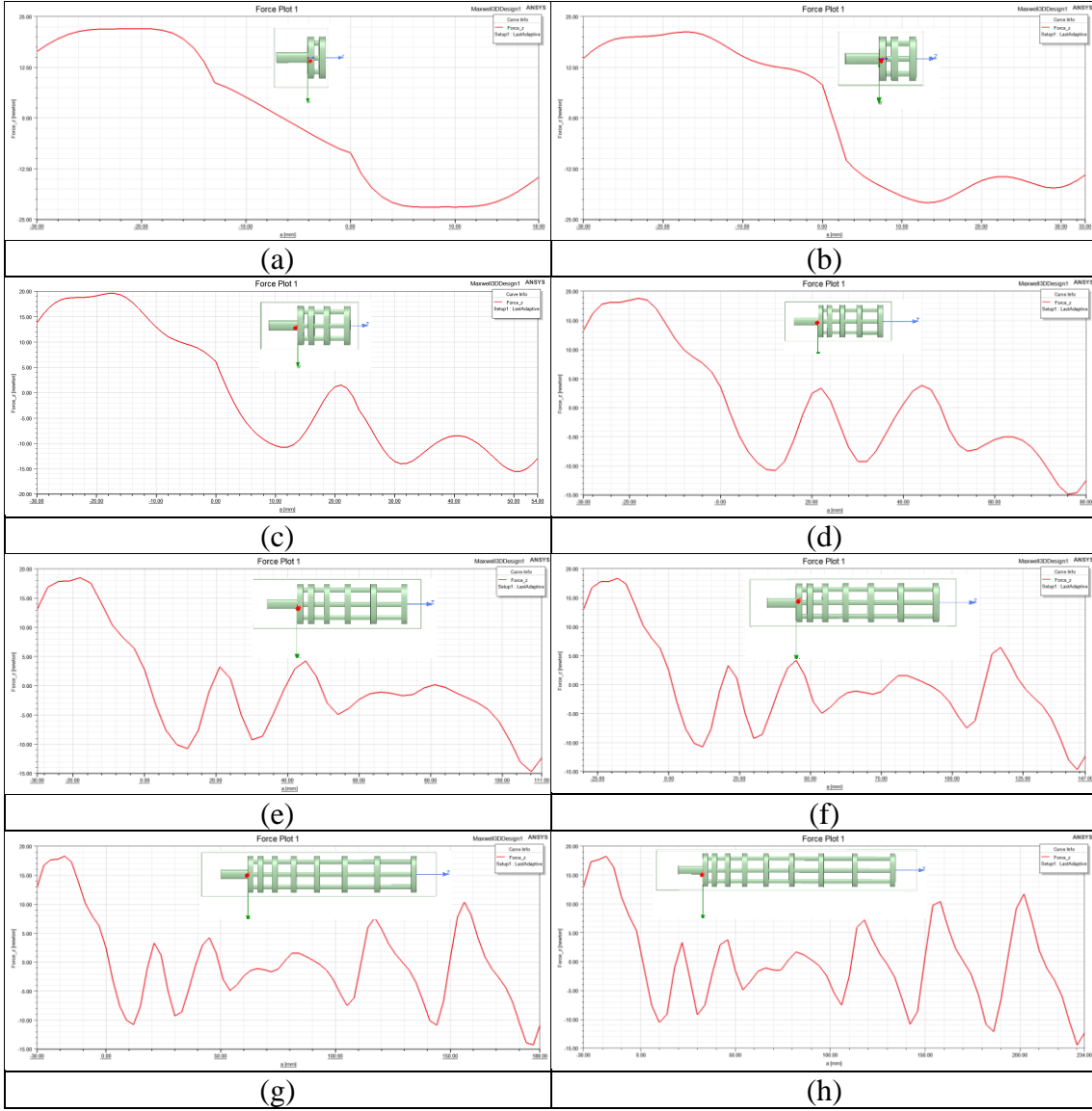
Şekil 3. Optimetrics ayarı

3. Bulgular

Çalışmada 8 farklı boyda fırlatıcı tasarımı ayrı ayrı analiz edilmiş ve böylece 5 mm çapında ve 30 mm boyundaki mıknaş mermiye etki eden manyetik kuvvetin değişimleri belirlenmiştir. Şekil 4'te, her bir tasarım için merminin sol taraftaki uç noktası fırlatıcıdan çıkıncaya kadar z doğrultusunda mermiye etkileyen manyetik kuvvetin büyüklük değişimleri gösterilmektedir. Değişim grafikleri içindeki tasarım şemalarında da görüleceği gibi her tasarımda bir halka mıknaş ilave edilmiş, halkalar arası mesafede +5 mm arttırılmıştır. İlk tasarımda halkalar arası mesafe 5mm iken daha sonraki tasarımlarda bu 10 mm, 15 mm,, 40 mm olmuştur.

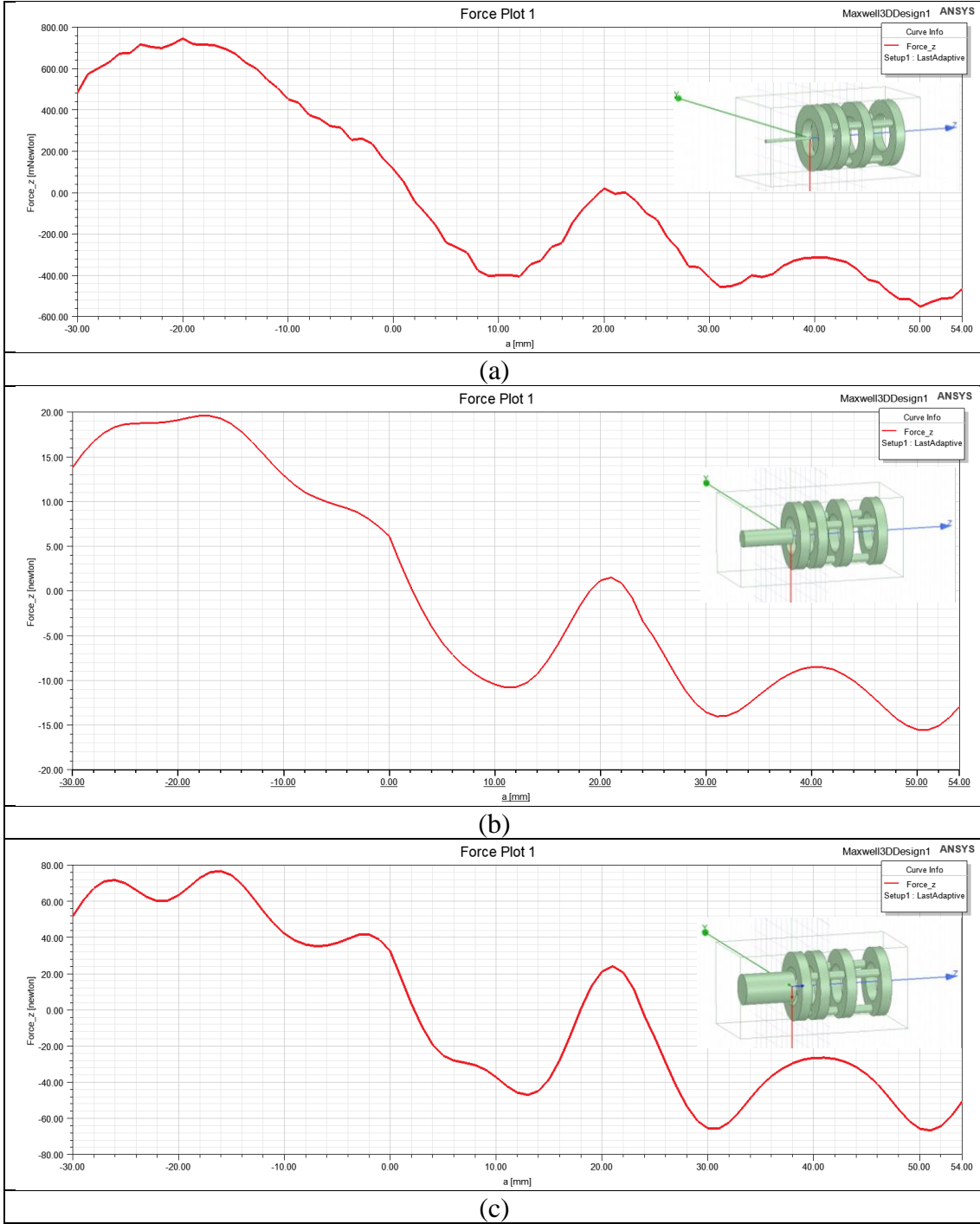
Şekil 4a, b incelendiğinde mıknaş mermiye etkileyen kuvvetin iki farklı yönde ve benzer değişim gösterdiği görülecektir. Bu durum merminin fırlatıcının tam ortasına geldiğinde iki farklı yönde eşit kuvvete maruz kalacağını ve hareketin sonlanacağını ifade etmektedir. Bu her fırlatıcıda olması istenen bir durumdur. Çünkü merminin fırlatma işlemi öncesinde hareketsiz durumda kalabildiği bir başlangıç noktası gereklidir. Şekil 4c'de merminin soldaki ucunun +2 mm iken hareketsiz kalacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 4c ve diğerleri incelendiğinde ise halka mıknaş ilavesi sonrasında fırlatıcının boyunun artmasıyla mermiye her iki yönde etkileyen kuvvetin eşit olmadığı ve kuvvet dengesinin bozulduğu görülecektir. Bu durumda tasarımda halka mıknaş sayısının 4 ve üstüne çıkması durumunda mermiye verilecek ufak bir başlangıç hızı ile merminin harekete geçebileceği ve hızlanarak fırlatıcıyı terk edeceği söylenebilir.

Bununla birlikte Şekil 4g, h incelendiğinde mermiye etkileyen kuvvetin her iki yönde de olabildiği ve dolayısıyla merminin 7,8,9. halka mıknaşlar arasından geçerken hız artışı miktarının kademeli olarak azalacağı sonucuna ulaşılabilir. Merminin bu halka mıknaşlar arasından geçerken tek yönde manyetik kuvvete maruz kalabilmesi için halkalar arasındaki uzaklığın arttırılması gerektiği anlaşılmaktadır.



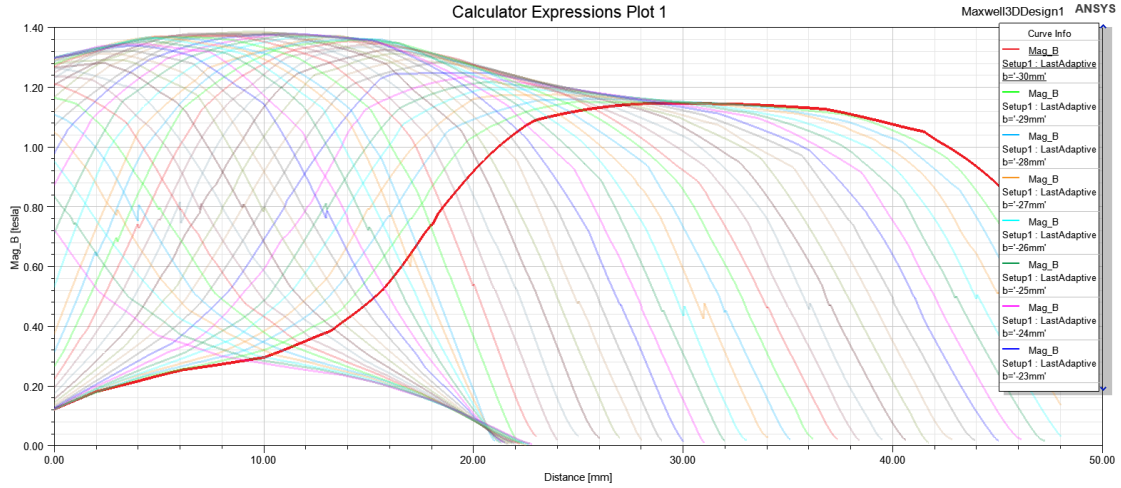
Şekil 4 a) iki, b) üç, c) dört, d) beş, e) altı, f) yedi, g) sekiz, h) dokuz halka mıknatıslı fırlatıcı tasarımında mermiye etki eden kuvvetin konuma göre değişimi

Çalışmada mermi kesitinin manyetik kuvvet ile olan ilişkisi de araştırılmıştır. Bunun için 4 halkalı fırlatıcı tasarımı seçilmiş, mermi kesiti 1, 5 ve 9 mm olduğu durumlar için mermiye etki eden manyetik kuvvetin konuma göre değişimleri analizle tespit edilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde mermi kesitinin artması ile manyetik kuvvetin konuma göre değişim karakteristiğinin değişmediği ve bununla birlikte mermiye etki eden manyetik kuvvetin büyüklüğünün arttığı görülecektir. Manyetik kuvvet artışının hız artışına da sebep olacağı düşünülse de kesiti büyüyen merminin kütesinin de artacağını göz ardı etmemek gerekmektedir. Bu yüzden itme-momentum değişim eşitliğini dikkate alarak optimum bir mermi kesiti tayin etmek doğru olacaktır. Bunun yanı sıra mermi kesitinin küçülmesi durumunda 2 mm'den sonra kuvvetin tek yönlü sadece hızlandırıcı yönde olduğu da kesit belirlenirken göz ardı edilmemelidir (Şekil 5a).

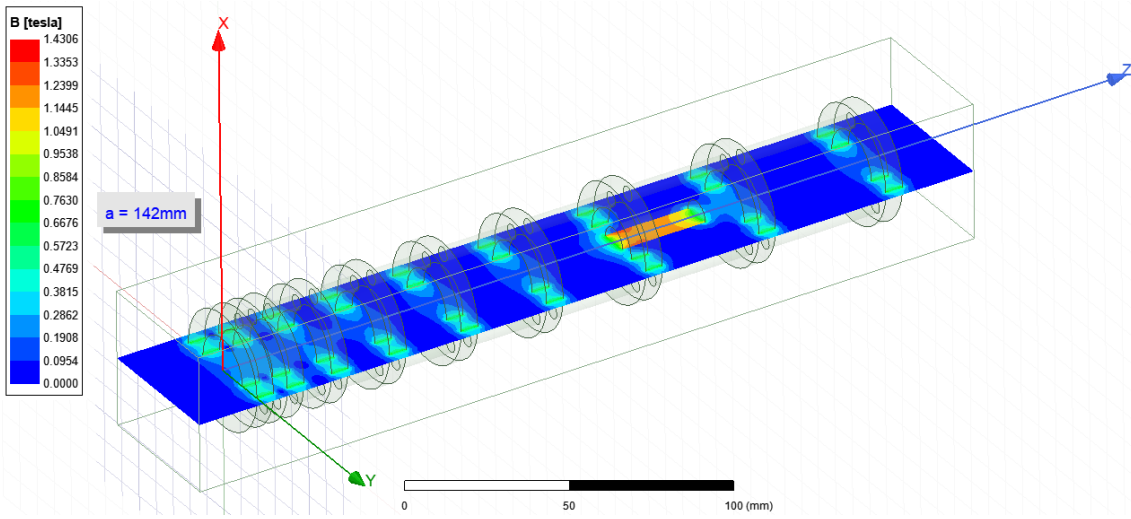


Şekil 5 Mermi kesitinin manyetik kuvvete olan etkisi a) 1 mm, b) 5 mm, c) 9 mm

Çalışmada mermiye etkiyen kuvvette etkin rol oynayan halka mıknatıslar yerine bobin kullanılması durumunda bobin ile ilgili değişkenlerin belirlenmesine de çalışılmıştır. Bu çerçevede ilk olarak manyetik akı yoğunluğunun en yüksek olacağı iki halka mıknatıslı fırlatıcı tasarım ele alınmış ve analiz sonuçlarına göre manyetik akının konuma bağlı değişim grafiği belirlenmiştir. Şekil 6'da da görüleceği en büyük manyetik akı yoğunluğunun 1,16 T olduğu bulunmuştur. Bu büyüklükteki bir manyetik akı yoğunluğunu bir bobin ile elde etmek için bobindeki tek bir sarımın merkezinden belirli uzaklıktaki manyetik alanın büyüklüğü Biot Savart yasası ile belirlenmiştir (Şekil 7).

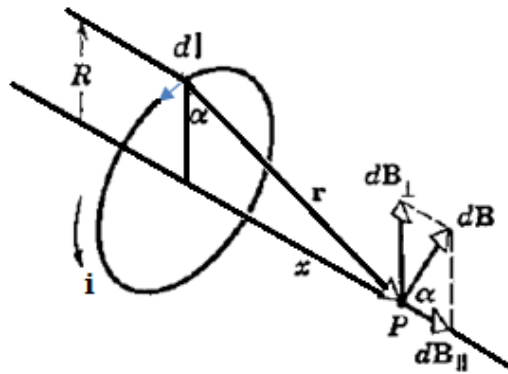


(a)



(b)

Şekil 6. a) İki halka mıknatıslı fırlatıcı tasarımı için manyetik akı yoğunluğunun konuma bağlı değişimi, b) Dokuz halka mıknatıslı fırlatıcı tasarımında mermi başlangıçtan 142 mm ilerideyken yz düzlemindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 7. Daire şeklinde bükülmüş üzerinden i akımı geçen telin merkez ekseninden x kadar uzaktaki manyetik akı yoğunluğu.

Bir spirli bir bobinin merkez eksenini boyunca herhangi bir P noktasındaki manyetik alan Eq.1 ile bulunabilir. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi her bir halkanın merkez eksen doğrultusundaki manyetik alanının dik bileşeni sıfırlandığından, alan yönü eksen boyunca olacaktır.

$$B_p = \int_0^{2\pi R} dB_{II} = \frac{\mu_0 i R}{2\pi(R^2+x^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}} \quad (1)$$

Çalışmada halka boyu 6 mm olduğundan bobin uzunluğu da aynı boyutta düşünülmüş, B_p 'nin 1,16 T olacağı bobin değişkenleri belirlenerek Tablo 1'de verilmiştir. Böylece bobine verilecek değişken akıma göre itici kuvvetin de değiştirilebilir olması sağlanabilecektir.

Tablo 1. Bobin değişkenlerinin büyüklükleri

Sarım Sayısı	Akım (A)	Sarım teli kalınlığı (mm)	Bobin yarıçapı (mm)
1200	16	0,5	11,5

4. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada sabit mıknatıslar kullanılarak boyu değiştirilebilen bir manyetik fırlatıcı tasarımının ANSYS Maxwell simülasyon programıyla oluşturulması ve analizi ele alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre mermiye etkileyen kuvvetin tek yönlü ve hız değişiminin hep artan yönde olması için halka mıknatıslar arasındaki mesafenin hep aynı büyüklükte artmaması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada olduğu gibi hep +5 mm sabit artışın özellikle son halka mıknatıs ilaveleri için yeterli olmadığı belirlenmiştir. Tasarımda halkalar arası mesafenin sabit şekilde arttırmamızın nedeni piyasada bu tür mıknatısların standart boyutlarda üretilmesi ve kolay ulaşılabilir olmasıdır. Halbuki çalışma sonucunda da görüldüğü gibi böyle bir tasarımın gerçekleştirilmesi düşünüldüğünde standart olmayan, kullanıcıya özel üretim sabit mıknatıslar kullanmak gerekecektir. Tasarımda halka mıknatıs yerine bobin kullanılması durumunda da mesafe arttırılarak kuvvetin değişim karakteri ayarlanabilir, ya da bobinler arası mesafe sabit artış aralıklarında arttırılsa bile bobinlere verilecek akımların farklı tutulmasıyla da kuvvetin tek yönlü olması sağlanabilir. Ayrıca mermi kesitinin küçültülmesi sonrasında mermiye etkileyen kuvvet küçülse de kuvvetin tek yönlü olması mermi hızının sürekli artacağı anlamına gelmektedir. Halbuki mermi kesiti büyüdükçe mermiye etkileyen kuvvetin büyüklüğü artsa da, kuvvetin çift yönlü değişim göstermesi ve mermi kütlesinin de büyümesi hız artışını düşürecektir. Mermi kesitinin büyük ya da küçük olmasının avantaj ve dezavantajlarını dikkate alarak kesit seçimi yapılması gerekmektedir. Bunun için itme-momentum değişim eşitliğini dikkate almak uygun olacaktır.

Kaynaklar

- [1] Luo, W., Wang, Y., Gui, Z., Yan, Z., & Chen, W., Connection pattern research and experimental realization of single stage multipole field electromagnetic launcher, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 41(11), 3173-3179, (2013), <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2281240>.

- [2] Yuan, W., Yan, P., Sun, Y., Li, M., Liu, C., Li, J., ... & He, J., Design and testing of a two-turn electromagnetic launcher. **IEEE Transactions on Plasma Science**, 39(1), 198-202, (2010), <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2060499>.
- [3] McNab, I. R., Early electric gun research. **IEEE Transactions on Magnetics**, 35(1), 250-261, (1999), <https://doi.org/10.1109/20.738413>.
- [4] McNab, I. R., Stefani, F., Crawford, M., Erengil, M., Persad, C., Satapathy, S., ... & Dampier, C., Development of a naval railgun, **IEEE Transactions on Magnetics**, 41(1), 206-210, (2005), <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839285>.
- [5] Mongeau, P., & Williams, F., Helical rail glider launcher, **IEEE Transactions on Magnetics**, 18(1), 190-193, (1982), <https://doi.org/10.1109/TMAG.1982.1061773>.
- [6] 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), <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.857900>.
- [7] Skurdal, B. D., & Gaigler, R. L., Multimission electromagnetic launcher, **IEEE Transactions on Magnetics**, 45(1), 458-461, (2009), <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008551>.
- [8] Slade, G. W., A simple unified physical model for a reluctance accelerator. **IEEE Transactions on Magnetics**, 41(11), 4270-4276, (2005), <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.856320>.
- [9] Fair, H. D., Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications, **IEEE Transactions on Magnetics**, 45(1), 225-230, (2009), <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008612>.
- [10] 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), <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.838744>.
- [11] McNab, I. R., Progress on hypervelocity railgun research for launch to space, **In 2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology**, (pp. 1-8), (2008), IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELT.2008.65>.
- [12] Upshaw, J. L., & Kajs, J. P., Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator, **IEEE Transactions on Magnetics**, 27(1), 607-610, (1991), <https://doi.org/10.1109/20.101103>.
- [13] Engel, T. G., Timpson, E. J., & Veracka, M. J., Demonstration of a reversible helical electromagnetic launcher and its use as an electronically programmable mechanical shock tester, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 43(5), 1266-1270, (2015), <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2417056>.
- [14] Engel, T. G., Neri, J. M., & Veracka, M. J., The maximum theoretical efficiency of constant inductance gradient electromagnetic launchers, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 37(4), 608-614, (2009), <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2014379>.
- [15] Yang, D., Liu, Z., Li-Jia, Y., Zhi, S., Jian-Ming, O., & Ya-Qin, J., Design and realization of a novel helical coil electromagnetic launcher, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 41(5), 1100-1103, (2013), <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2251672>.
- [16] Stankevič, T., Schneider, M., & Balevičius, S., Magnetic diffusion inside the rails of an electromagnetic launcher: Experimental and numerical studies, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 41(10), 2790-2795, (2013), <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2255627>.

- [17] Schneider, M., & Schneider, R., Measurement of the current distribution between multiple brush armatures during launch. In 2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, IEEE, (pp. 1-6), (2008), <https://doi.org/10.1109/ELT.2008.56>.
- [18] Bengui, Z., Yanjie, C., Jie, W., Huijin, W., & Xuehui, C., Magnetic-structural coupling analysis of armature in induction coilgun, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 39(1), 65-70, (2010), <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2077742>.
- [19] Coramik, M., Citak, H., Bicakci, S., Gunes, H., Aydin, Y. and Ege, Y., Studies to Increase Barrel Exit Velocity for Four-Stage Coil-Gun, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 48(7), 2618-2627, (2020), <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2999110>.
- [20] Citak, H., Ege, Y. and Coramik, M. Design and Optimization of Delphi-Based Electromagnetic Coilgun, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 47(5), 2186-2196, (2019), <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2904515>.
- [21] Çetin, O., Özbay, H., Dalcalı, A. and Temurtaş, F., An Experimental Study on Sensorless Determination of the Projectile Position by Artificial Neural Network in Magnetic Launcher Systems, **IEEE Transactions on Plasma Science**, 49(12), 3970-3979, (2021), <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3123064>.
- [22] Kong, L., Li, H., Zhao, B., Gao, W., Zhang, P. and Hu, C., Multistage Reluctance Coil Launcher With Residual Energy Recovery and Utilization Mode, **IEEE Transactions on Plasma Science**, Early Access, <https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3252526>.