

İNDÜKSİYON BOBİN SİLAHI İÇİN UYGUN STATOR BOBİNİ GEOMETRİSİNİN ARAŞTIRILIMASI

İsmail COŞKUN

Gazi Üniversitesi Elektrik Eğitimi Bölümü Beşevler/ANKARA

Osman KALENDER

KK. Astsubay Meslek Yüksek Okulu Elektrik Bilimleri Grubu Çayırhisar/BALIKESİR

Yavuz EGE

Balıkesir Üniversitesi Necati Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü BALIKESİR

ÖZET

Bu çalışmada, indüksiyon bobin silahı için uygun bir stator bobini geometrisi araştırılmıştır. Benzetim programları ile yapılan analizler ve deneysel çalışmalar sonucunda merminin fırlatıcıdan çıkış hızında, stator ve mermi bobininin ortak indüktansını belirleyen değişkenlerin etkili olduğu görülmüştür. İndüksiyon bobin silahında uygun stator bobini geometrisinin tespit edilmesi, çözülmesi gereken çok önemli bir problemdir. Bu maksatla, mikrodenetleyici kontrollü yeni bir indüksiyon bobin silahı tasarlanmış ve bu çalışma kapsamında stator bobini bobini geometrisinin, merminin çıkış hızına etkileri araştırılarak sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: İndüksiyon Bobin Silahı, Stator Bobini, Akı Yoğunlaştırıcı Bobin, Mermi Hızı

THE RESEARCH OF THE SUITABLE STATOR COIL GEOMETRY FOR INDUCTION COIL GUN

ABSTRACT

In this study, the suitable geometry of a stator coil for induction coil gun have been researched. As the result of analyses and experimental studies made through simulations, the parameters determining the mutual inductance of the stator and the projectile coils have been effective in the projectile speed. In the induction coil gun, finding the suitable geometry of the stator coil are one of the most important problems needed to be solved. In this case, a new type microcontroller basis induction coil gun has been designed and the effects of geometry of the stator coil on the projectile speed has been researched and the results have been discussed.

Key words: Induction coil gun, Stator Coil, Flux concentrator Coil, Projectile Speed

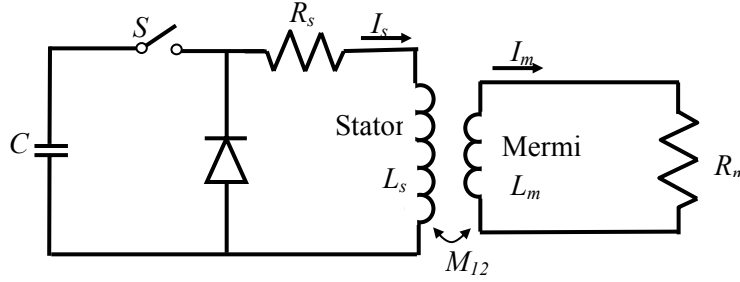
1.GİRİŞ

Son yıllarda güç elektroniği alanındaki gelişmeler elektromanyetik bobin silahı alanındaki uygulamalarda da önemli ilerlemeler sağlamıştır. Özellikle ardışık fırlatıcıların lazerli mesafe ölçüm cihazları ve optik sensörlerin devreye girmesi üzerine değişik çalışmalar yapılmıştır(1). İndüksiyon bobin silahı, farklı tiplerde ve farklı çalışma prensibine sahip elektromanyetik bobin silahları içerisinde en umut verici bobin silahı tipi olarak görülmektedir(4,12). Bu doğrultuda yapılan bu çalışmada yeni karakteristik özelliklere sahip mikrodenetleyici kontrollü bir indüksiyon bobin silahı tasarlanmıştır.

Bu makale kapsamında öncelikle geliştirilen sistemin yapısı kısaca tanıtılmış ve ardından sistemin fırlatma düzeneğindeki bobinlerin geometrisinin, geliştirilen elektromanyetik sistemde ulaşılabilecek hızlara etkisi araştırılmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında geliştirilen indüksiyon bobin silahı temelinde, bir doğrusal elektrik makinesidir. Stator bobini tarafından fırlatılan bir mermi bobininin oluşturduğu elektromanyetik fırlatma düzeneği, tristörlerden oluşmuş elektronik anahtarlama devresi ile mikrodenetleyici ve bilgisayarlı ölçme ve kontrol sisteminden meydana gelmektedir. Şekil 1’de sistemin elektrik eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 1. İndüksiyon bobin silahı elektrik eşdeğer devresi

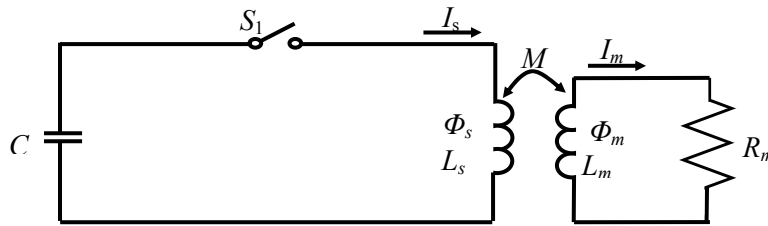
Şekil 1’deki devrede stator sargısının indüktansı L_s , akımı I_s , direnci R_s , mermi (rotor) sargısının indüktansı L_m , akımı I_m , direnci R_m olarak gösterilmiştir.

Dolu durumda olan C kondansatörü, S anahtarı kapatılarak stator sargısı üzerinden deşarj edilmektedir. Stator sargısında meydana gelen değişken manyetik alan, mermi sargısı üzerinde bir gerilim indüklemekte ve kısa devre olarak tasarlanmış mermi sargısından akacak kısa devre akımı, stator akımına ters yönlü olduğu için itme kuvveti meydana getirmektedir. İki bobin arasındaki ortak indüktans M ve iki bobin arasındaki itme kuvveti F_m ise, Lenz kanuna göre bu kuvvet aşağıdaki gibidir.

$$F_m = I_s I_m \frac{dM}{dx} \quad [2.1]$$

Bağıntı 2.1’e göre, stator ve mermi bobini geometrisinin, çalışma geriliminin, bu iki bobin arasındaki ortak indüktans eğiminin, bobinlerin yapımında kullanılan malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerinin ve devreyi besleyen kaynağın geliştirilen elektromanyetik sistemde ulaşılacak hızlara etkisi önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bu parametrelerden sadece stator bobini geometrisinin bir başka deyişle ortak indüktansın mermi itici kuvvetine etkisi incelenmiştir.

Şekil 1.’deki devrenin kayıpsız olduğu düşünülürse eşdeğer devre Şekil 2.’deki gibi olacaktır.



Şekil 2. Tek kademeli indüksiyon bobin silahı eşdeğer devresi

Bu şekilde her iki bobinin de kayıpsız olduğu varsayılmaktadır. Stator ve mermi bobinlerinin uygun fırlatma konumunda olduğu ve devrede fırlatma işleminin başladığı andan itibaren devreye uygulanan gerilimin sıfır olduğu varsayılırsa Faraday kanunlarına göre iki bobinin manyetik akı bağlantıları sabit kalacaktır. Böylece devrenin temel akı denklemleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\lambda_s = L_s I_s + M I_m \quad [2.2]$$

$$\lambda_m = L_m I_m + M I_s \quad [2.3]$$

Bu denklemler matris formunda yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_m \end{bmatrix} \quad [2.4]$$

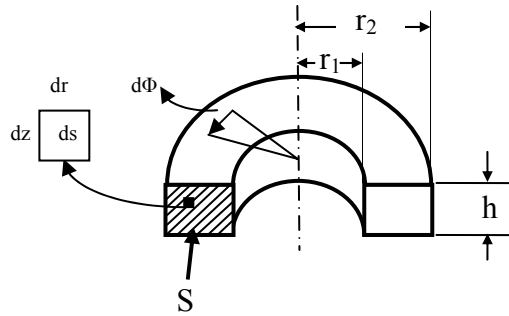
Stator bobini ve mermi bobini öz indüktansları L_s ve L_m sabit fakat ortak indüktans M mermi bobini konumunun bir fonksiyonudur. Mermi bobini, stator bobininin merkezine (orta noktasına) ulaştığında, stator bobini akımının kesilmesi durumunda Eş. 2.4 aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} L_s & M_0 \\ M_0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_m \end{bmatrix} \quad [2.5]$$

Burada, M_0 mermi bobininin stator bobini merkezinde olduğu durumdaki ortak indüktansı göstermektedir. Yukarıdaki denklem akı eşitlikleri için çözülerek aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_m} = \frac{M_0}{L_m} \quad [2.6]$$

Şekil 3'deki gibi toroid biçimindeki bir sargıda manyetik akı (Φ) ifadesi de aşağıdaki gibidir:



Şekil 3. Toroid biçimli sargı

Ampere kanunu uygulandığında akıyoğunluğu için aşağıdaki ifade bulunur:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i_0 N}{2\pi r} \vec{a}_\phi$$

Akı değeri için:

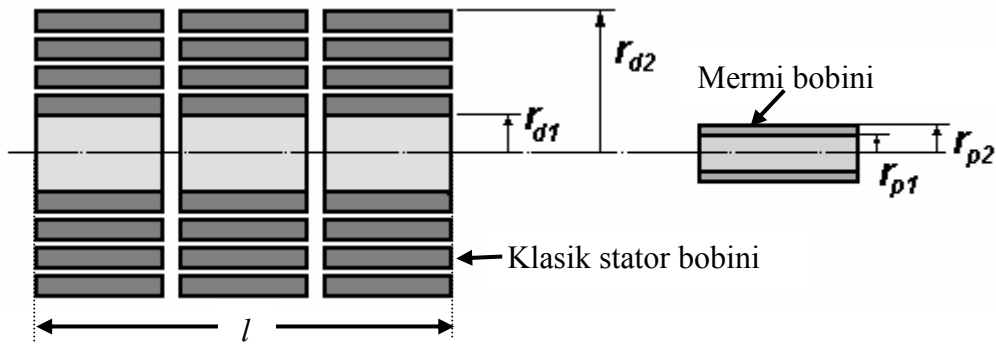
$$d\vec{s} = dr dz \vec{a}_\phi$$

$$\begin{aligned}\phi &= \int_s B \cdot d\vec{s} \\ \phi &= \int_s \frac{\mu_0 i_0 N}{2\pi r} dr dz \\ \phi &= \frac{\mu_0 i_0 N}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^h \frac{1}{r} dr dz \\ \phi &= \frac{\mu_0 i_0 N h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}\end{aligned}\quad [2.7]$$

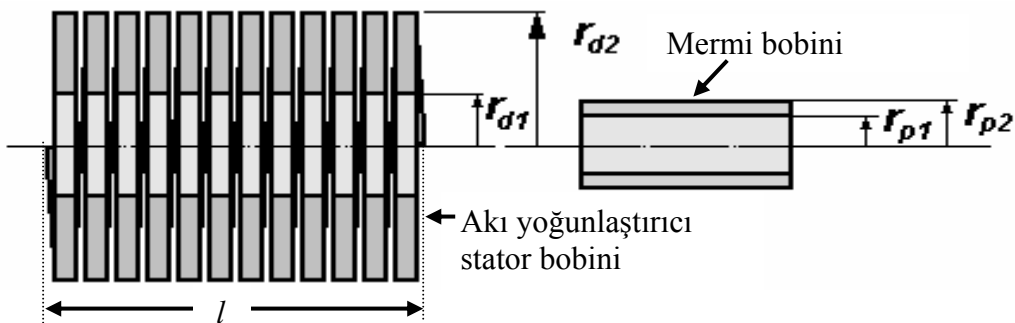
bulunur. Bu sargıların yan yana dizilmesiyle elde edilen bobin boyu l olmak üzere, stator ve mermi bobini arasındaki ortak indüktans ifadesi de aşağıdaki gibi olur.

$$M_{ms} = \frac{\Phi_m}{I_s} = \frac{\mu_0 N_s N_m \pi r^2}{l}\quad [2.8]$$

Doğal olarak toroid şeklindeki stator bobinin Φ manyetik akısının büyümesi, mermi bobinindeki Φ_m akısının da büyümesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bu bağıntılardan da anlaşılacağı üzere, tasarlanacak stator sargısı geometrisinin ortak indüktansa ve bu nedenle de mermi itici kuvveti üzerinde etkili olacağı görülmektedir. Bu nedenle Şekil 4 ve Şekil 5’deki gibi aynı kesit alanı ve sarım sayısına sahip iki bobin tipi üzerinde çalışılmıştır.



Şekil 4. Klasik tipte sarımlardan oluşan stator bobini



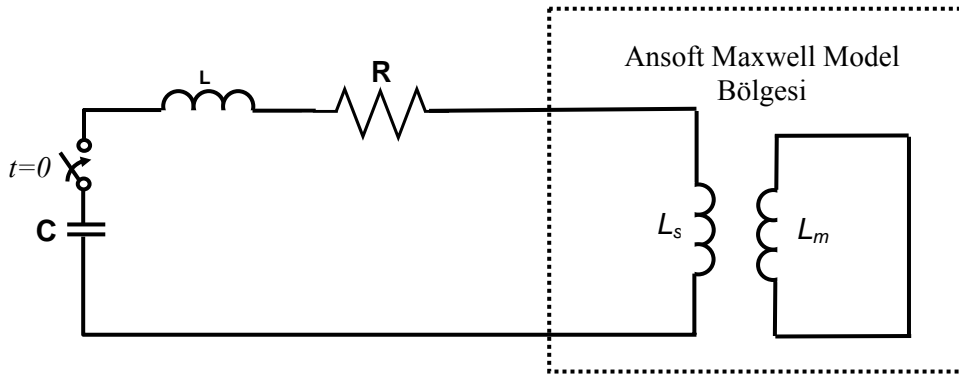
Şekil 5. Akı yoğunlaştırıcı tipte sarımlardan oluşan stator bobini

3. BULGULAR

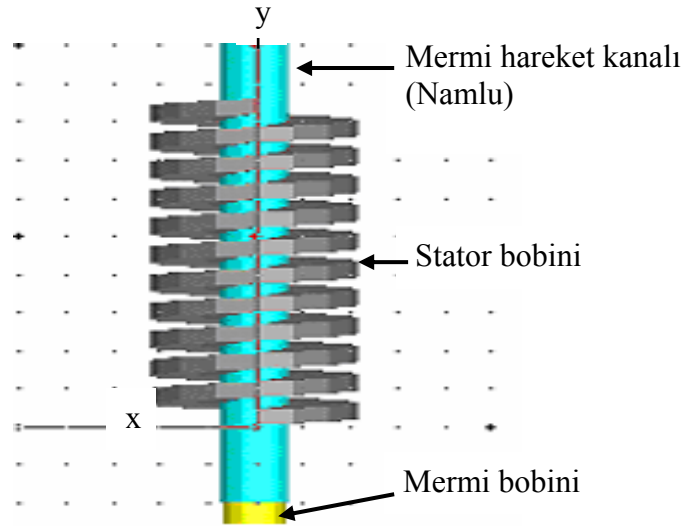
Şekil 4 ve Şekil 5'deki bobinlerin her bir sargısının kesit yüzeyi, iç yarı çapları (r_{d1}), dış yarı çapları (r_{d2}), bobin boyları (l) ve sarım sayıları birbirine eşittir. Sadece sarım biçimlerinin farklılığı nedeniyle tek sarımlık mermi bobini ile aralarındaki ortak indüktansın farklı olduğu görülmüştür. Yapılan benzetim ve mermi hızı ölçümleri sonucunda Şekil 5'deki akı yoğunlaştırıcı tipteki bobin ile mermi bobini arasındaki ortak indüktansın diğer bobin tipinde elde edilenden düşük çalışma gerilimleri için yaklaşık 10 kat daha fazla olduğu, 10000 V. çalışma geriliminden sonra bu oranın azaldığı ve 30000 V.'ta iki katı olduğu görülmüştür. Bu husustaki çalışma sonuçları başka bir makale kapsamında ele alınacaktır.

Bağıntı [2.7] de, r_2/r_1 oranının artmasıyla bu sargıdaki akının artacağı görülmektedir. Ancak r_2/r_1 oranındaki artışla birlikte manyetik akı artarken, manyetik akı yolunun çapı da büyümekte ve bu sargının içerisine yerleştirilecek diğer sargıdan akıtacağı manyetik akının da azalmasına neden olmaktadır. Başka bir deyişle stator bobininin mermiyi kesen manyetik akı yolu, mermi bobininden uzaklaşmakta ve dolayısıyla mermi bobini üzerinden geçen manyetik akı çizgisi sayısı azalmakta, bunun sonucunda da mermi bobininde indüklenen gerilim ve akım değerleri de azalmaktadır. Bu da mermiye etkiyen kuvveti azalttığı için merminin çıkış hızını düşürmektedir. Bu nedenle indüksiyon bobin silahı uygulamalarında Şekil 5'deki akı yoğunlaştırıcı tipteki bobin tipinin kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

Ayrıca bunu doğrulamak amacıyla Şekil 5'deki bobin çifti için, mermi sargısına enerji verilmeden, stator bobinine 1 A. doğru akım uygulanarak stator bobinindeki akı ve her iki sargı arasındaki ortak indüktans için Ansoft Maxwell yazılımı kullanılarak benzetimler yapılmıştır. Bu benzetim, stator bobini iç çapı sabit tutulup, dış çapı büyütülerek tekrarlanmıştır. Şekil 6'da benzetim modelinin elektriksel eşdeğer devresi ve Şekil 7'de de benzetim modeli görülmektedir.

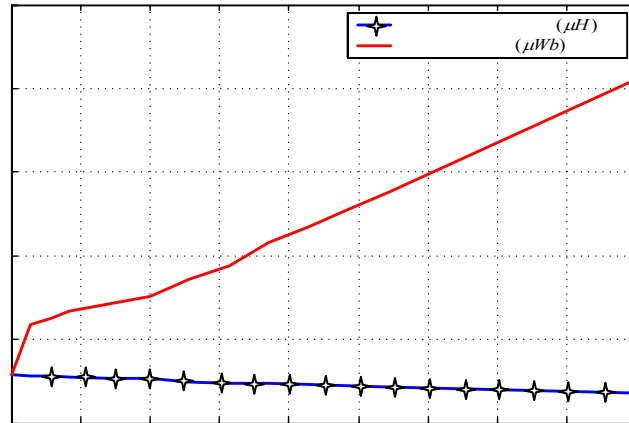


Şekil 6. Benzetim modelinin elektriksel eşdeğer devresi



Şekil 7. Benzetim modeli

Yapılan benzetimde stator bobini bakır, mermi bobini de aliminyum olarak seçilmiştir. Büyüklükleri ise uygulamada kullanılan ölçülere eşittir. Benzetimlere başlanmadan önce sonlu eleman analizi için sınır koşulları belirlenmiş ve mevcut geometrinin 10 katı büyüklükten sonra manyetik akının bu alanın dışında olmadığı kabulünü yapmanın uygun olduğu görülmüştür. Şekil 8’de bu modelden elde edilen stator bobini manyetik akısı ve iki sargı arasındaki ortak indüktans değişimine ilişkin olarak elde edilen benzetim sonuçları gösterilmiştir.

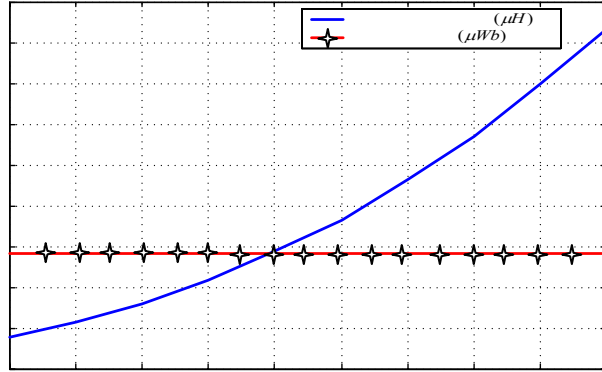


Şekil 8. Stator dış çapı/iç çapının ortak indüktans ile stator akısına etkisi

Bu benzetim sonucuna göre, stator sargısı dışa doğru genişledikçe bu sargıdaki manyetik akının arttığı ancak stator ve mermi sargıları arasındaki ortak indüktansın azaldığı görülmüştür. Bu durum Denklem 2.6 ve Denklem 2.7 ile de uyşmaktadır.

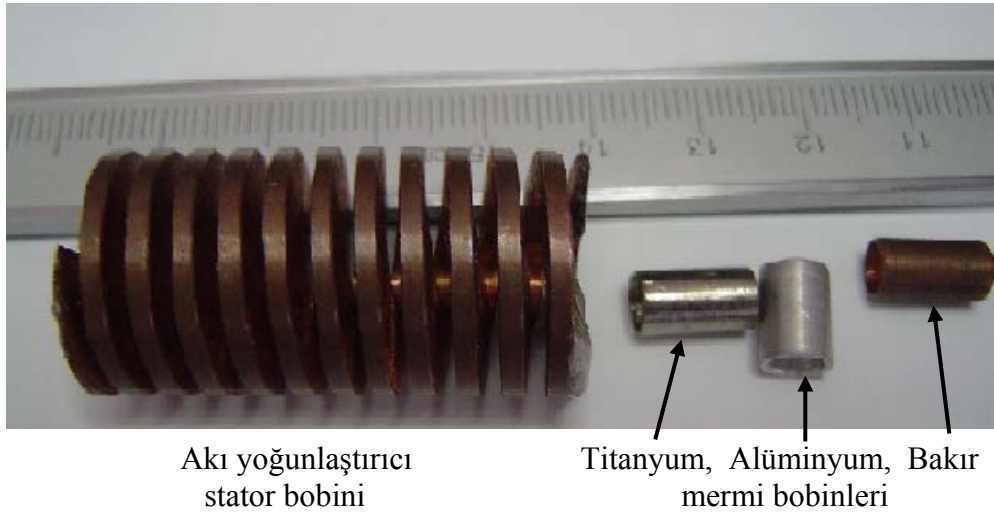
Bir sonraki aşamada da, mermi bobini iç çapı sabit tutulup, dış çapı büyütülerek aynı benzetimler tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 9’da gösterilmiştir. Şekil 9’a bakıldığında, stator bobini kesiti ve statora uygulanan akımın sabit olması nedeniyle stator

akısının da sabit olduğu görülmektedir. Mermi bobini dış çapı büyüyerek mermideki manyetik akı yolu statora doğru genişlediği için stator sargısı ile mermi bobini arasındaki ortak indüktans da artmaktadır. Bu durum yine Denklem 2.6 ve 2.7 ile uyum içindedir.

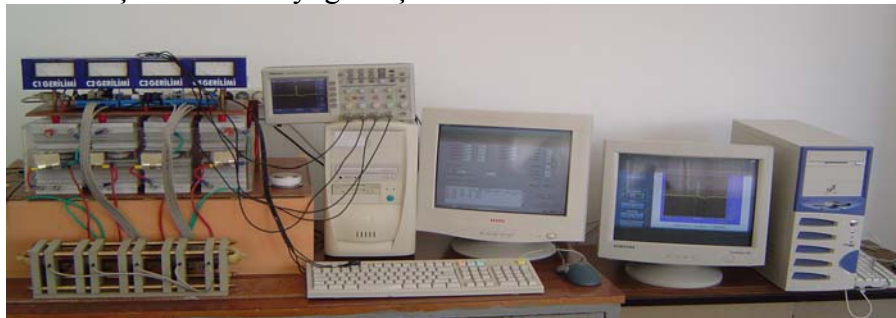


Şekil 9. Mermi dış/iç çapının ortak indüktans ile stator manyetik akısına etkisi

Şekil 10'da geliştirilen akı yoğunlaştırıcı tipteki stator bobini ve mermi bobinleri, Şekil 11'de de bu çalışmada tasarlanan indüksiyon bobin silahı ve deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 10. Akı yoğunlaştırıcı stator ve mermi bobini



Şekil 11. İndüksiyon bobin silahı ve deney düzeneği

Çalışmamızda, Şekil 10'da da görüldüğü gibi stator ve mermi bobinlerinin dış/iç yarıçap oranı sabit ve değeri $r_{d2}/r_{d1} = 3$ tutulmuştur. Halbuki Şekil 8'deki benzetime bakıldığında yarıçapların oranının 1 olması durumunda ortak indüktansın daha büyük olacağı ve dolayısıyla Denklem 2.1 gereğince mermiye etkiyen kuvvetin ve çıkış hızının artacağı yanılıgına düşülebilir. Fakat Denklem 2.1'e den de görüldüğü üzere kuvvet, sadece ortak indüktanstaki değişime bağlı değil, stator ve mermi bobininden geçen akımın büyüklüğüne de bağlıdır. Bu üç değişkenin çarpımı merminin çıkış hızını belirlemektedir. Çizelge 1'de de görüleceği gibi r_{d2} sabitken r_{d1}/r_{d2} oranı arttırıldığında stator bobinin direnci büyüdüğünden üzerinden geçen akım düşmekte, statorun manyetik akısı da azalmaktadır. Görüldüğü gibi ortak indüktans arttırırken stator akımı düşmektedir. Sonuç olarak benzetimle elde edilen Çizelge 1 değerlerinden de anlaşılacağı üzere, mermiye etkiyen kuvvet değerinin en büyük ve buna bağlı olan çıkış hızının da en yüksek olduğu r_{d2}/r_{d1} oranının 3 ya da r_{d1}/r_{d2} oranının 0.3 olması gerektiği belirlenmiştir.

Çizelge 1. Alüminyum mermi için benzetim sonuçları ve mermi çıkış hızları

Mermi Boyu (mm)	Dış/iç Çap oranı r_{d1}/r_{d2}	Ortak indüktans (H)	Stator Bobinin Manyetik Akısı (W)	Mermi Bobinin Manyetik Akısı (W)	Mermi Çıkış Hızı (m/s)
10	0.2	1.06×10^{-9}	12.01×10^{-9}	1.08×10^{-9}	2.53
10	0.3	1.34×10^{-9}	7.52×10^{-9}	1.31×10^{-9}	25.02
10	0.4	1.43×10^{-9}	5.54×10^{-9}	1.42×10^{-9}	21.48
10	0.5	1.54×10^{-9}	4.45×10^{-9}	1.56×10^{-9}	21.09
10	0.6	1.60×10^{-9}	3.95×10^{-9}	1.61×10^{-9}	20.11
10	0.7	1.65×10^{-9}	3.71×10^{-9}	1.67×10^{-9}	19.72
10	0.8	1.71×10^{-9}	1.71×10^{-9}	3.26×10^{-9}	17.83

4. SONUÇ

Bu çalışmada bir indüksiyon bobin silahı tasarlanmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen indüksiyon bobin silahında mermi itici kuvvetine etki eden parametreler belirlenmiş, bu parametrelerden stator bobinine ait olanlar incelenmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalarda kullanılan klasik tipteki stator bobini tipinin değiştirilmesi ile aynı güç koşulları için daha büyük mermi itici kuvveti elde edilebileceği görülmüş ve stator bobini olarak akı yoğunlaştırıcı bobin kullanılmıştır.

Stator bobini olarak, akı yoğunlaştırıcı bobin kullanımının, daha büyük mermi itici kuvveti elde edilmesini sağladığı ve mermi bobini boyunun olabildiğince kısa, r_{d2}/r_{d1} oranının bobin akımı göz önünde bulundurularak küçük seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- (1) Kaye, R.J., “ Design and Performance of Sandia’s contactless coilgun for 50 mm projectiles,” *IEEE Trans. on Mag.*, 29: 680-685 (1993).
- (2) Bauer, D. P., “A Novel Railgun Launcher Design”, *IEEE Trans. on Mag.*, 3(1): 267-272 (1995).
- (3) Matyac, M. J., Christopher, F., Jaminson, K.A., Persad C. and Marshall R.A., “Railgun Performance Enhancement From Distribution of Energy Feeds”, *IEEE Trans. on Mag.*, 31(1): 332-337 (1995).
- (4) Ingram, S. K., “Theoretical Analysis of a Collapsing Field accelerator”, *6th Symposium of Electromagnetic Launch Technology*, Austin, Texas, 28-30 (1992).
- (5) Seely, S. and Poularikas A. D., “Electromagnetics–Classical and Modern Theory and Applications”, *Marcel Dekker Inc.*, New York, 19-21 (1979).
- (6) He, J. L., Levi E., Zabar Z. and Birenbaum L. “Concerning the Design of Capacitively Driven Induction Coil Guns”, *IEEE Trans. on Plasma Science*, 17(3): 429-438 (1984).
- (7) Andrews, J. A., “Coilgun Structures”, *IEEE Trans. on Mag.*, 29(1): 637-642 (1993).
- (8) Williamson, S., Horne C.D. and Haugh D.C., “Design of Pulsed Coil-Guns”, *IEEE Trans. on Mag.*, 31(1): 516-521 (1995).
- (9) Laithwaite, E. R., “Propulsion Without Wheels”, *English University Pres Ltd.*, 74-79 (1966).
- (10) Eliot, D. G. “Travelling-Wave Induction Launchers”, *IEEE Trans. on Mag.*, 25(1): 159-163 (1989).
- (11) Honig, E.M., “Progress in Developing Repetitive Pulse System Utilizing Inductive Energy Store”, *4th IEEE Pulsed Power Conference*, Albuquerque, New Mexico, 6-8 (1983).
- (12) McKinney, K. and Mongeau, P., “Multiple Stage Pulsed Induction Acceleration”, *IEEE Trans. on Mag.*, 20(2): 239-242 (1984).