

BİR RELÜKTANS FIRLATICININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Ferhat DALDABAN¹, Vekil SARI²

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri

²Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

daldaban@erciyes.edu.tr, vsari@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 06.01.2015; Kabul/Accepted: 23.07.2015)

ÖZET

Bu çalışmada, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözüm yapabilen Maxwell yazılımı kullanılarak tek sargılı bir relüktans fırlatıcının iki boyutlu modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde mermi parametrelerinin mermi çıkış hızına etkisi incelenmiştir. Mermi çıkış hızının en yüksek olduğu duruma ait mermi parametreleri belirlenmiştir. İncelenen mermi parametreleri mermilerin yapıldığı malzemeler, mermilerin çapları ve mermilerin uzunluğudur. Her bir parametre için relüktans fırlatıcı modelinin analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda merminin yapıldığı malzemenin bağlı manyetik geçirgenliğinin artmasıyla mermi hızının da arttığı tespit edilmiştir. Mermi çapı namlu çapının yarısı olduğunda ve mermi uzunluğu sargı uzunluğuna eşit veya biraz büyük olduğunda daha yüksek hızlar elde edilmektedir. En yüksek hız 1050'den yapılmış 8 cm uzunluğunda ve 3 mm çapındaki mermide elde edilmiştir. Bu hız değeri 19,76 m/sn dir. Bu çalışmada ayrıca merminin boru tipinde olması durumu da incelenmiştir. Daha önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlardan farklı olarak merminin boru tipi olması durumunda mermi hızının arttığı tespit edilmiştir. Bu hız değeri 22,08 m/sn olmaktadır. Modelde uygulanan gerilim DC 250 voltur.

Anahtar Kelimeler: Bobin silahı, lineer hızlandırıcılar, relüktans fırlatıcı, sonlu elemanlar analizi, Maxwell simülasyon

ANALYSIS OF A RELUCTANCE LAUNCHER BY FINITE ELEMENTS METHOD

ABSTRACT

In this study, two dimensional model of a single-coil reluctance launcher was constructed via Maxwell software which uses Finite Elements Method as a solver. The effects of projectile parameters on muzzle velocity were examined with the constructed model. Projectile parameters were determined when the muzzle velocity is at its highest value. The studied projectile parameters are the material, diameter and the length of the projectile. Analysis of the reluctance launcher was carried out for each parameter. As a result of the analysis it was determined that the velocity of the projectile increases as the relative magnetic permeability of the material increases. Higher velocities are obtained when the diameter of the projectile is the half of the muzzle diameter and the length of the projectile is equal to or a bit longer than the length of the coil. The highest velocity was obtained with the 8 cm length, 3 mm diameter projectile constructed from 1050 material. The highest velocity is 19.76 m/sec. The tube-type projectile was also studied with in this study. In contrast to the past studies, It was determined that the velocity of the projectile increases when it is tube type. The obtained velocity value is 22.08 m/sec. in this case. 250 V DC voltage is applied to the model.

Keywords: Coilgun; linear accelerators; reluctance launcher; finite elements analysis; Maxwell simulation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çok eskiden beri mermileri fırlatmak için kullanılan silahlarda kimyasal patlayıcılar kullanılmaktadır. Bu silahlarla daha yüksek hız elde etmek için ya kimyasal

maddenin yoğunluğu artırılmalı ya da yüksek sıcaklıklara çıkılmalıdır. İki durumda da sınırlayıcı koşullar vardır. Kimyasal patlayıcıları tekrar kullanmak mümkün değildir, bu yüzden maliyetleri pahalıdır. Ayrıca kimyasal yakıt ve patlayıcıları

depolamak tehlikeli durumlara neden olmaktadır. Kimyasal reaksiyon başladığı zaman kontrol edilmesi çok zordur. Kimyasal bir silahta, mermi çıkış hızını belirleyen ortalama basınç, silahta oluşan en yüksek basınçtan 3 ila 5 kat daha azdır. Bu maksimum basıncın sınırlı olması, ortalama basıncı ve dolayısıyla da mermi çıkış hızını sınırlar. Kimyasal fırlatıcı sistemlerin hız sınırlamalarının ve diğer dezavantajlarının üstesinden gelmek için elektromanyetik fırlatıcılar keşfedilmiştir [1].

Elektromanyetik fırlatıcılarla ilgili çalışmalar son yıllarda önemli oranda artmıştır [2]. Elektromanyetik fırlatıcıların kullanım alanları çok geniş olmakla birlikte daha çok askeri alanda ve endüstride kullanılmaktadır [3]. Elektromanyetik fırlatıcılar ray silahı ve bobin silahı olmak üzere ikiye ayrılabilirler [4]. Ray silahı ve bobin silahı çalışma yöntemine göre çok farklıdır. Ray silahı daha büyüktür ve deniz veya hava taşıtlarında kullanılmak üzere yapılmıştır. İki adet ray ve bir adet armatürden oluşur. Raylardan akım aktığında armatürde indüklenen kuvvet armatürü hareket ettirir. Fırlatılmak istenen mermi armatürün önüne konular ve armatürün hareketi ile mermi fırlatılır [5]. Bobin silahının yapısı ray silahından daha karmaşıktır [6]. Bobin silahı, içi boş bir silindir ve bu silindirin etrafındaki sargılardan oluşur [7]. Bobin silahı, indüksiyon bobin silahı ve relüktans bobin silahı olarak ikiye ayrılabilir. İndüksiyon bobin silahının kontaklı ve kontaklı olmayanları vardır [8]. İndüksiyon bobin silahında, manyetik olmayan mermiler fırlatılır. İndüksiyon bobin silahının çalışması eddy akımları ile ilgilidir [9]. Elektromanyetik fırlatıcıların diğer bir çeşidi olan relüktans fırlatıcının çalışma prensibi, relüktans motorların çalışma prensibi ile aynıdır. Statorda elektriksel dönüşüm vardır ve rotor kısmı basit bir ferromanyetik mermiden oluşur. Merminin fırlatılmasında kablolar ve kontaklara gerek duyulmaması bir avantajdır. Verimi indüksiyon fırlatıcıdan daha iyidir. Ayrıca relüktans fırlatıcı ile indüksiyon fırlatıcıdan daha düşük akımlarda fırlatma yapılabilir [10-12].

Relüktans fırlatıcılarda kullanılan mermi ferromanyetik malzemeden yapılmıştır. Ferromanyetik malzemelerin B-H karakteristikleri lineer değildir. Bu yüzden relüktans fırlatıcıların performansını belirlemek çok zordur. Relüktans fırlatıcıların performansını belirlemek amacıyla Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılır. SEY klasik metotlarla çözülemeyen veya çözümü zor olan mühendislik problemlerinin analizinde başarılı olarak kullanılabilen bir nümerik analiz metodudur. Bu nedenle daha önceki çalışmalarda fırlatıcıların performanslarını incelemek için iki boyutlu SEY kullanılmıştır [12-18]. İki boyutlu modelin oluşturulması ve analizi üç boyutlu modele göre daha kolaydır. Ayrıca analiz süresi de daha kısadır. Fakat iki boyutlu modelde üç boyut etkileri ele

alınmamaktadır. Bu etkiler, laminasyonların anizotropisi (laminasyonların değişik eksenler boyunca değişik boyutlara sahip olması), uç sargı akısı (uç etkisi) ve eksenel saçaklanma olarak üçe ayrılabilir [19]. Daha önce yapılan bir çalışmada [19], bu etkilerin lineer ve dairesel relüktans motorlar üzerindeki performansları incelenmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu modeller oluşturularak, bu etkilerin iki boyutlu ve üç boyutlu modellerde bir hata meydana getirip getirmeyeceği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre üç boyut etkileri, üç boyutlu modelde hesaba katılırken, iki boyutlu modelde hesaba katılmadığı için iki boyutlu model analizinde bir hataya neden olduğu belirtilmiştir. Fakat üç boyutlu model oluşturmak daha zor olduğu için ve ayrıca analiz süresi uzadığı için, iki boyutlu modelde bir düzeltme yapılarak üç boyut etkilerini de hesaba katarak iki boyutlu modelin de kullanılmasının mümkün olduğu tespit edilmiştir. Daha önce yapılan başka bir çalışmada [20] ise, lineer relüktans motorun iki boyutlu ve üç boyutlu modeli oluşturulmuş, modellerin sonuçları ile ölçülen sonuçlar karşılaştırılmış ve üç boyutlu modelin daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi, üç boyutlu modelde üç boyut etkileri de dikkate alındığı içindir. Üç boyutlu model yerine iki boyutlu model kullanılması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde göre malzemenin B-H eğrisi yeniden ele alınmış ve bağıl manyetik geçirgenliği daha az olan yeni bir B-H eğrisi elde edilmiştir. Bu yeni B-H eğrisinin iki boyutlu modelde kullanılmasıyla üç boyutlu modeldeki sonuçlara yakın değerler alınabildiği tespit edilmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalar incelendiğinde [12-18], üç boyutlu model yerine, üç boyut etkilerinden kaynaklanan hatanın ihmal edilip iki boyutlu model kullanılarak sistemin analizinin yapılabileceği anlaşılmaktadır. O yüzden, bu makale kapsamında relüktans fırlatıcının iki boyutlu modeli oluşturulmuş ve üç boyut etkileri ihmal edilmiştir. Elektromekanik sistemlerin tasarımında ve performans analizinde Flux, Magnet, Maxwell gibi elektromanyetik tasarım programları kullanılmaktadır [21]. Bu çalışmada Maxwell programı kullanılmıştır.

Daha önce yapılan bir çalışmada [12] relüktans fırlatıcının iki boyutlu Maxwell modeli oluşturulmuştur. Modelin simülasyon sonuçlarına göre sürücü sargı yapısının, sürücü sargısının sarım sayısının ve armatürün kesit alanının fırlatıcının performansına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sargının sarım sayısının namlu çıkış hızını çok az etkilediği tespit edilmiştir. Merminin kesit alanı incelemesinde boru tipi mermi ele alınarak, iki durum incelenmiştir. Bunlardan birisi merminin dış çapının sabit, iç çapının değişmesi durumu, ikincisi ise merminin iç çap ile dış çap arasındaki kalınlığın sabit, dış çapının değişmesi durumudur. Bu iki durumda da merminin kesit alanı değişmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, her iki durumda da çıkış

hızının pek değişmediği tespit edilmiştir [12]. Fakat bu makale kapsamındaki çalışmada Referans 12’de elde edilen sonuçlardan farklı olarak merminin boru tipi olması durumunda mermi hızının arttığı tespit edilmiştir.

Referans 16’da verilen çalışmada ise relüktans fırlatıcının iki boyutlu Maxwell modeli oluşturulmuş, merminin yapıldığı malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği ve iletkenliğinin, merminin boyutlarının ve mermi ile sargının birbirine göre konumlarının mermi hızı üzerine etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre mermi boyu sargı boyuna eşit olduğunda en yüksek hız elde edilmiştir. Mermi hızının daha yüksek olması için, merminin yapıldığı malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğinin yüksek olması gerektiği sonucu elde edilmiştir [16]. Bu makale kapsamında sunulan çalışmada da Referans 16’daki çalışmanın sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir, fakat farklı olarak iki mermi malzemesi için mermi boyu sargı boyuna eşit olduğunda en yüksek hız elde edilmiş, üçüncü malzeme için ise mermi boyu sargı boyundan biraz büyük olduğunda en yüksek hız elde edilmiştir. Referans 16’da elde edilen “mermi boyu sargı boyuna eşit olduğunda en yüksek hız elde edilmektedir” sonucunun her malzeme için geçerli olmadığı tespit edilmiştir.

Maxwell programı, oluşturulan iki boyutlu modeli üç boyutluya çevirerek analizini gerçekleştirmektedir. İki boyutta oluşturulamayan modellerin üç boyutlu olarak oluşturulması gerekir. Fakat bu çalışmada incelenen fırlatıcının modeli iki boyutlu olarak oluşturmaya ve incelemeye uygun olduğu için, sistemin analizinde iki boyutlu model kullanılmıştır. Öncelikle, fırlatıcının iki boyutlu Maxwell modeli oluşturulmuştur. Daha sonra modelde kullanılan merminin yapıldığı malzemeler, merminin uzunluğu ve merminin çapı değiştirilerek hıza olan etkisi incelenmiştir. Daha önceki çalışmalardan elde edilen bulgulara benzer olarak, merminin namlu çıkış hızının, merminin yapıldığı malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum bu çalışmaya özel bir durum değildir. Bağıl manyetik geçirgenliğin artmasının tüm elektrik makinelerinde olduğu üzere, makinanın performansını iyileştireceği bir gerçektir. Bağıl manyetik geçirgenlik B/Bo şeklinde ifade edildiği için makinanın genel performansını da doğrudan etkilemektedir.

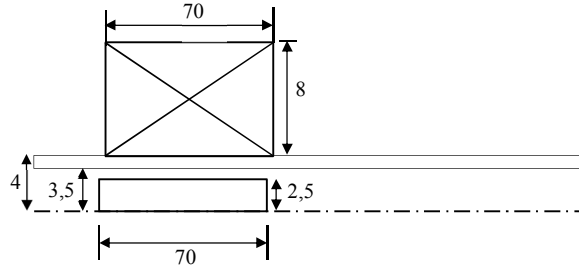
Merminin yapıldığı iki malzemede (1020, 12L14) mermi boyu sargı boyuna eşit olduğunda en yüksek hız elde edilmiş, üçüncü malzemede ise(1050) mermi boyu sargı boyundan 1 cm uzun olduğunda en yüksek hız elde edilmiştir. Mermi çaplarında yapılan analiz sonucunda ise, mermi çapı arttıkça daha uzun mermilerde daha yüksek hız elde edilmektedir. En yüksek hız ise bağıl manyetik geçirgenliği en yüksek malzemedan yapılan (1050), uzunluğu sargının uzunluğundan 1 cm daha uzun olan (8 cm) ve mermi

çapı namlu çapının yarısı olan (3 mm) mermide elde edilmiştir. Bu çalışmada daha önceki çalışmalardan elde edilen bulgulardan farklı olarak en yüksek hız elde edilen mermi uzunluğunun, merminin yapıldığı malzemeye göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Mermi çapı namlu çapının yarısı olan mermilerde daha yüksek hız elde edildiği tespit edilmiştir. Mermi hızının artırılması için mermi çapı ve uzunluğunun birlikte ele alınmasının gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca merminin boru tipinde olması durumunda mermi hızının arttığı da tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulguların relüktans fırlatıcı tasarımında faydalı olacağı düşünülmektedir.

2. RELÜKTANS FIRLATICILARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ (OPERATION PRINCIPLES OF RELUCTANCE LAUNCHERS)

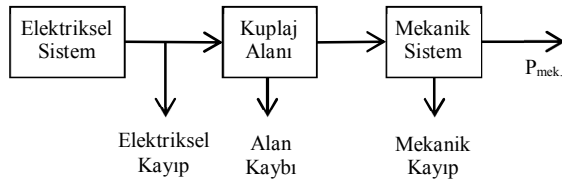
Relüktans fırlatıcıların çalışma prensibi, relüktans teorisine dayanmaktadır. İçi boş bir silindirin etrafına sarılan bir sargıdan akım geçirildiğinde, sargının etrafında ve boş silindirin içinde bir manyetik alan oluşur. Silindirin içine bir ferromanyetik mermi konulursa, sargının manyetik alanı mermiyi silindirin ortasına çeker. Relüktans fırlatıcılar, çekirdeğin sargının merkezine çekilmesi prensibine göre çalışır. Çekirdeğin itilmesi yoktur. Çekirdek merkeze geldiğinde sargının enerjisi kesilmeli ve içerisindeki enerji en kısa sürede sönmülmelidir. Aksi takdirde çekirdek tekrar sargının merkezine çekileceğinden, çekirdek fırlatılmaz ya da yavaş fırlatılır. Relüktans fırlatıcının tasarımındaki en önemli nokta burasıdır. Çekirdeğin, sargının ortasına geldiğini algılayan sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Relüktans fırlatıcı birden fazla sargıdan oluşursa, her bir sargı yukarıda anlatılan prensibe göre çekirdeği daha da hızlandıracaktır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, çekirdek bir sonraki sargıya yaklaştığında, yaklaşılan sargı enerjilendirilmeli, bu sargının merkezine geldiğinde sargının enerjisi kesilmeli ve sargının enerjisi en kısa sürede sönmülmelidir. Relüktans fırlatıcının verimi, sargılarından akan akımın ve sargılardaki enerjinin sönmülenmesinin zamanlamasına bağlıdır. Enerjinin uygulanma ve kesme zamanlaması sargının girişine optik alıcı-verici çifti yerleştirilerek yapılabilir. Sargıya verilen akım kesildiğinde, sargıda depolanan enerji aniden yok olmaz. Sargıdaki enerjinin sönmülenmesi için sargıya paralel bir diyot bağlanarak enerjinin sönmülenmesi sağlanır. Sargılara verilen enerjinin anahtarlanması için yüksek gerilimleri hızlı olarak anahtarlayabilen yarıiletken güç elemanları kullanılabilir. Şekil 1’de relüktans fırlatıcının boyutları mm cinsinden verilmiştir. Fırlatıcıda kullanılan sargının uzunluğu 70 mm, sargının dış çapı 24 mm ve iç çapı 8 mm dir. Namlunun uzunluğu 33 cm, namlunun dış çapı 8 mm ve iç çapı 7 mm dir.



Şekil 1. Fırlatıcının boyutları (Dimensions of the launcher)

Relüktans fırlatıcı aslında enerji dönüşümü yapan bir sistemdir. Sistemin girişine elektrik enerjisi verilir, elektrik enerjisinin bir kısmı elektriksel kayıplara gider. Geri kalanı manyetik enerjiye çevrilir. Manyetik kayıpları çıktıktan sonra kalan enerji mekanik enerjiye çevrilerek sistemin çıkışından alınır [22]. Relüktans fırlatıcı sisteminin güç akış şeması Şekil 2’de gösterilmiştir.



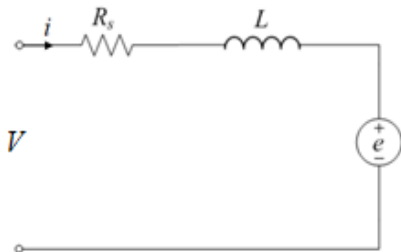
Şekil 2. Elektromekanik enerji dönüşümü (Electromechanical energy conversion)

Tek sargılı bir relüktans fırlatıcının eşdeğer devresi Şekil 3’te görülmektedir [23]. Sargıya uygulanan gerilim Eşitlik 1’deki gibi verilebilir.

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(x, i)}{dt} \quad (1)$$

$$\lambda = L(x, i) i \quad (2)$$

Burada, V sargıya uygulanan gerilimi, R_s sargının omik direncini, i sargıdan akan akımı, L merminin konumuna ve akan akıma bağlı sargı indüktansını, λ sargının oluşturduğu toplam manyetik akıyı göstermektedir. Giriş gücü ise Eşitlik 3’deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 3. Tek sargılı bir relüktans fırlatıcının eşdeğer devresi (Equivalent circuit of a single-coil reluctance launcher)

$$P = Vi = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(x, i)}{dt} + L(x, i) i \frac{di}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(x, i) i^2 \right) = L(x, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x, i)}{dt} \quad (4)$$

Dolayısıyla giriş gücü yeniden düzenlenirse Eşitlik 5’deki gibi olur.

$$P = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(x, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x, i)}{dt} \quad (5)$$

Burada, $R_s i^2$ ifadesi sargıda harcanan elektriksel kayıp, $d/dt(L(x, i) i^2 / 2)$ ifadesi manyetik alan enerjisini, $(i^2 / 2)(dL(x, i) / dt)$ ifadesi hava aralığı gücünü göstermektedir. Hava aralığı gücünde mermi konumu ve hız yerine yazılırsa, Eşitlik 7 elde edilir.

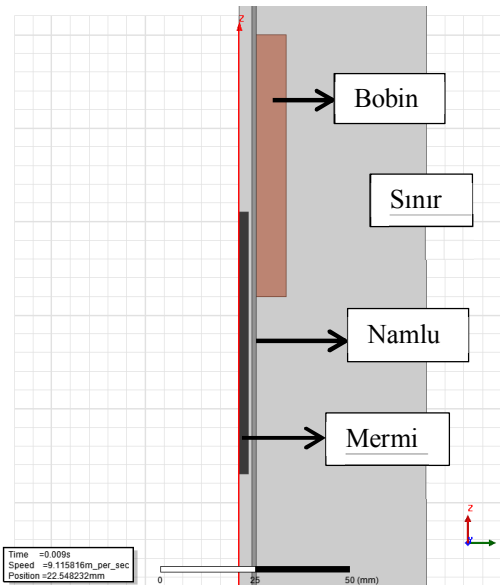
$$v = \frac{x}{t} \quad (6)$$

$$P_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x, i)}{dt}$$

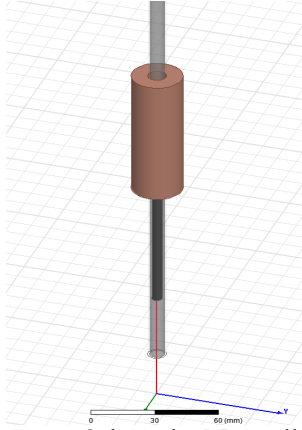
$$P_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x, i)}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x, i)}{dx} v \quad (7)$$

3. RELÜKTANS FIRLATICI SİSTEMİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (FEA OF RELUCTANCE LAUNCHER SYSTEM)

Bu çalışmada Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak, bir sargılı fırlatıcının Sonlu Elemanlar Analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde, iki boyutlu silindirik z ekseni seçilmiş ve bu eksene ait geometri oluşturulmuştur.



Şekil 4. Fırlatıcının 2 boyutlu Maxwell modeli (2D Maxwell model of the launcher)

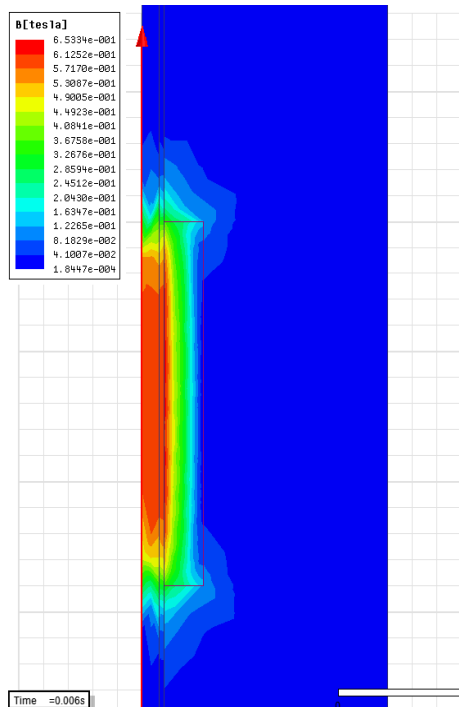


Şekil 5. Fırlatıcının 3 boyutlu Maxwell modeli (3D Maxwell model of the launcher)

Fırlatılan mermilerin yapıldığı malzemeler, çapları ve uzunlukları değiştirilerek, en yüksek mermi hızına sahip sistem tespit edilmeye çalışılmıştır. Bir sargılı relüktans fırlatıcının iki boyutlu modeli Şekil 4’de ve otomatik olarak oluşturulan üç boyutlu modeli Şekil 5’de görülmektedir. Namlunun içinde mermi yokken, sargıdan akım geçmesi sonucunda, sargının oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu Şekil 6’da gösterilmiştir. Burada manyetik akı yoğunluğu, sargının ortasında 0,65 Tesla, sargının ucunda 0,32 Tesla’dır. Hesap yoluyla Eşitlik 8’den [24] manyetik akı yoğunluğu, sargının ortasında 0,59 Tesla, sargının ucunda 0,29 Tesla bulunur.

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2l} (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \quad (8)$$

Burada, μ_r havanın bağlı manyetik geçirgenliği, N bobinin sarım sayısı, I sargıdan geçen akım, l bobinin boyu, $\theta_2=71^\circ$, $\theta_1=-71^\circ$ dir.

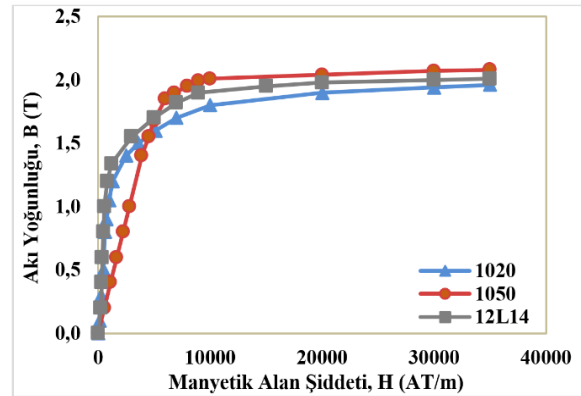


Şekil 6. Sargının manyetik alanı (Magnetic field of coil)

Bu çalışmada, AISI1020, AISI1050 ve AISI12L14 den yapılmış, 2-10 cm uzunluğunda ve 2-6 mm çapındaki mermilerin fırlatılması Maxwell modeli ile analiz edilmiştir. 1020 kodlu malzemenin içerisinde ağırlığının %0,18-%0,25 arasında karbon bulunmaktadır. 1050 malzemesinin içerisinde %0,50-%0,57 arasında karbon bulunmaktadır. 12L14 malzemesinin içerisinde %0,57-%0,65 arasında karbon ve %0,20-0,35 arasında kurşun bulunmaktadır [25].

Bu üç malzemenin B-H eğrisi Şekil 7’de gösterilmiştir [26- 28]. Bu eğriler incelendiğinde, düşük akı yoğunluğunda 1020 ve 12L14 ün bağlı manyetik geçirgenliklerinin yüksek olduğu, yüksek akı yoğunluğunda, yani doyumda 1050’nin bağlı manyetik geçirgenliğinin en yüksek olduğu görülmektedir.

Relüktans prensibi ile çalışan makinelerde yüksek bir kuvvet üretmek için doyum bölgesinde çalışmalıdır [29]. O yüzden mermi olarak kullanılan malzemelerin doyum bölgesinde çalışmaları için, bobine 250 VDC gerilim uygulanarak, bobinden 69 Amper akım geçmesi sağlanmıştır. Sarım sayısı 500 tur seçilerek, manyetik alan şiddetinin 34500 AT olması sağlanmıştır. Şekil 7’de gösterilen B-H eğrilerine göre, bu manyetik alan şiddetinde üç malzeme de doyumdadır. Doyumdaki bağlı manyetik geçirgenlikler incelendiğinde, en yüksek 1050, sonra 12L14 ve en düşük 1020 olduğu görülür.



Şekil 7. 1020, 1050 ve 12L14 için B-H eğrileri (B-H characteristic for 1020, 1050 and 12L14)

Mermi uzunluğu ve mermi çapları değiştirilerek SEY’e göre analiz yapılmış ve her bir merminin maksimum hızı bulunmuştur. SEY’e göre analiz yapılırken her bir merminin ağırlıkları hesaplanmıştır. Mermi ağırlıkları hesaplanırken, 9 ve 10 numaralı eşitlikler kullanılmıştır.

$$m = V \cdot d \quad (9)$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l \quad (10)$$

Burada, m merminin kütlesi, V merminin hacmi, d merminin yapıldığı malzemenin öz kütlesi, r

merminin yarıçapı ve l merminin uzunluğudur. Mermilerin yapıldığı malzemelerin öz kütlesi $7,872 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınmıştır. Bulunan ağırlıklar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Mermilerin ağırlıkları (Mass of projectiles)

Mermi Ağırlıkları (gr)					
Mermi Uzunluğu	Mermi çapı				
	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm
2cm	0,49	1,11	1,97	3,08	4,44
3cm	0,74	1,66	2,96	4,63	6,67
4cm	0,98	2,22	3,95	6,17	8,89
5cm	1,23	2,78	4,94	7,72	11,12
6cm	1,48	3,33	5,93	9,26	13,34
7cm	1,73	3,89	6,92	10,81	15,57
8cm	1,97	4,44	7,90	12,35	17,79
9cm	2,22	5,00	8,89	13,90	20,02
10cm	2,47	5,56	9,88	15,44	22,24

Tablo 2. 1020 mermilerinin hız sonuçları (Velocity results of projectiles made from 1020)

1020 Hız sonuçları (m/s)					
Mermi Uzunluğu	Mermi çapı				
	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm
2cm	15,71	13,41	12,58	11,47	12,48
3cm	17,09	15,05	13,83	13,15	13,36
4cm	18,96	17,02	15,8	14,92	14,67
5cm	19,28	18,76	16,82	15,81	14,15
6cm	15,29	18,32	17,81	16,05	13,7
7cm	15,62	19,35	17,78	16,68	15,37
8cm	14,91	19,24	16,87	16,83	15
9cm	13,81	13,19	18,07	16,76	14,11
10cm	13,74	12,79	18,04	15,97	13,68

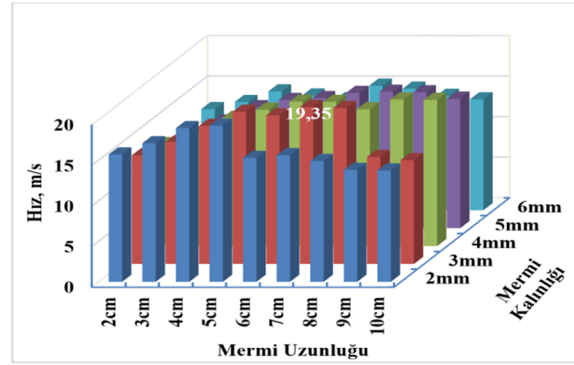
Tablo 2'de 1020'den yapılmış mermilerin hız sonuçları, Tablo 3'de 1050'den yapılmış mermilerin hız sonuçları ve Tablo 4'de 12L14'den yapılmış mermilerin hız sonuçları verilmiştir. Ayrıca hız sonuçları Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 3. 1050 mermilerinin hız sonuçları (Velocity results of projectiles made from 1050)

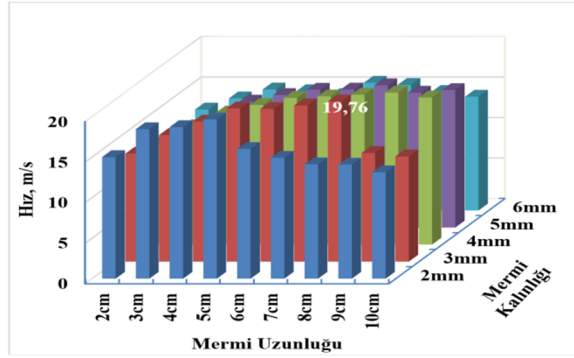
1050 Hız sonuçları (m/s)					
Mermi Uzunluğu	Mermi çapı				
	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm
2cm	15,01	13,33	12,43	11,57	12,46
3cm	18,45	15,62	14,61	13,19	13,83
4cm	18,71	17,29	16,3	15,54	14,93
5cm	19,65	18,9	17,23	16,36	14,72
6cm	16,01	18,84	18,1	17,01	14,23
7cm	14,92	19,28	18,28	17,02	15,76
8cm	14,11	19,76	18,49	17,56	15,49
9cm	14,07	13,41	18,75	16,64	14,62
10cm	13,13	12,98	18,15	16,96	14,04

Tablo 4. 12L14 mermilerinin hız sonuçları (Velocity results of projectiles made from 12L14)

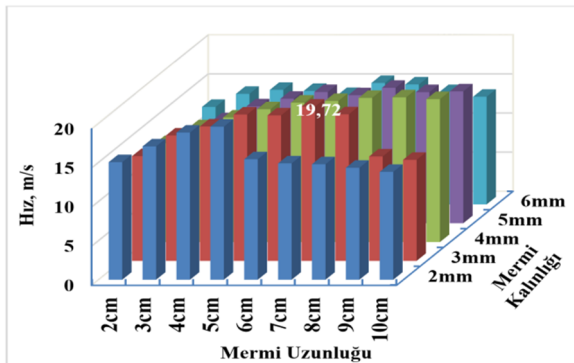
12L14 Hız sonuçları (m/s)					
Mermi Uzunluğu	Mermi çapı				
	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm
2cm	15,03	13,39	12,65	11,53	12,46
3cm	17,04	16,03	14,67	13,15	14,13
4cm	18,81	17,18	15,92	14,94	14,64
5cm	19,56	18,71	16,98	15,91	14,5
6cm	15,4	18,6	17,82	16,77	13,98
7cm	14,87	19,72	18,03	16,36	15,52
8cm	14,76	18,74	18,43	17,31	15,33
9cm	14,31	13,35	18,5	16,76	14,35
10cm	13,79	12,92	18,27	16,85	13,76



Şekil 8. 1020 mermilerinin hız sonuçları (Velocity results of projectiles made from 1020)



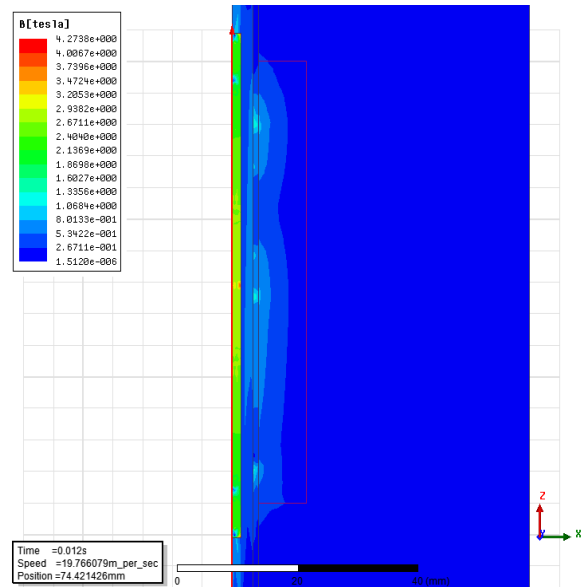
Şekil 9. 1050 mermilerinin hız sonuçları (Velocity results of projectiles made from 1050)



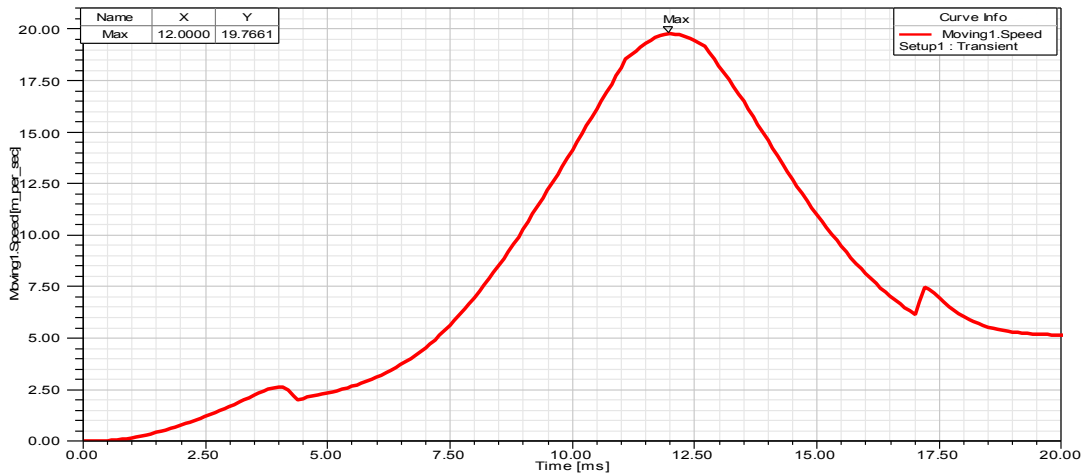
Şekil 10. 12L14 mermilerinin hız sonuçları (Velocity results of projectiles made from 12L14)

Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'deki satırlar mermi uzunluğunu, sütunlar mermi çaplarını göstermektedir. Her bir mermi uzunluğundaki (her bir satırdaki) en yüksek hıza ait hücrenin zemini sarı ile boyanmış, her bir mermi çapındaki (her bir sütundaki) en yüksek hız ise kırmızı ile yazılmıştır. Üç grafikte de en yüksek hız çerçeve içine alınmıştır. Mermi çaplarına göre hızları incelemek için, her üç grafikte de ilk dört satır incelendiğinde, uzunluğu 2, 3, 4 ve 5 cm olan mermilerde, en yüksek hız 2 mm çapındaki mermilerde olmaktadır. Aynı şekilde uzunluğu 6, 7 ve 8 cm olan mermilerde, en yüksek hız 3 mm çapındaki mermilerde olmaktadır. Uzunluğu 9 ve 10 cm olan mermilerde, en yüksek hız 4 mm çapındaki mermilerde olmaktadır. Mermi çapı büyüdükçe en yüksek hız daha uzun mermilerde elde edilmektedir. Bu ilişkiler malzemenin cinsinden bağımsız olarak her üç malzemede de (1020, 1050, 12L14) geçerlidir. Mermi uzunluklarına göre hızları incelemek için, her üç grafikte de birinci sütun incelendiğinde, 2 mm çapındaki mermilerde en yüksek hız her üç malzemede de 5 cm uzunluğundaki mermilerde olmaktadır. 3 mm çapındaki mermilerde en yüksek hız 1020 ve 12L14'den yapılmış mermilerde 7 cm uzunluğundaki mermilerde, 1050'den yapılmış mermilerde 8 cm uzunluğundaki mermilerde olmaktadır. 4 mm çapındaki mermilerde en yüksek hız 9 cm uzunluğundaki mermilerde, 5 mm çapındaki mermilerde en yüksek hız 8 cm uzunluğundaki mermilerde, 6 mm çapındaki mermilerde en yüksek hız 7 cm uzunluğundaki mermilerde olmaktadır. 3, 5 ve 6 mm çapındaki mermilerde en yüksek hız, mermi uzunluğu bobin uzunluğuna eşit veya biraz büyük olduğunda elde edilmektedir. 2 mm çapındaki mermilerde en yüksek hız, mermi uzunluğu bobin uzunluğundan 2 cm küçük, 4 mm çapındaki mermilerde ise en yüksek hız mermi uzunluğu bobin uzunluğundan 2 cm büyük olduğunda elde edilmektedir. En yüksek hız 1020 ve 12L14 malzemelerinden yapılmış mermilerde 3mm çapında ve 7 cm uzunluğundaki mermilerde, 1050 malzemesinden yapılmış mermilerde ise 3mm çapında ve 8 cm uzunluğundaki mermilerde olmaktadır. Bu

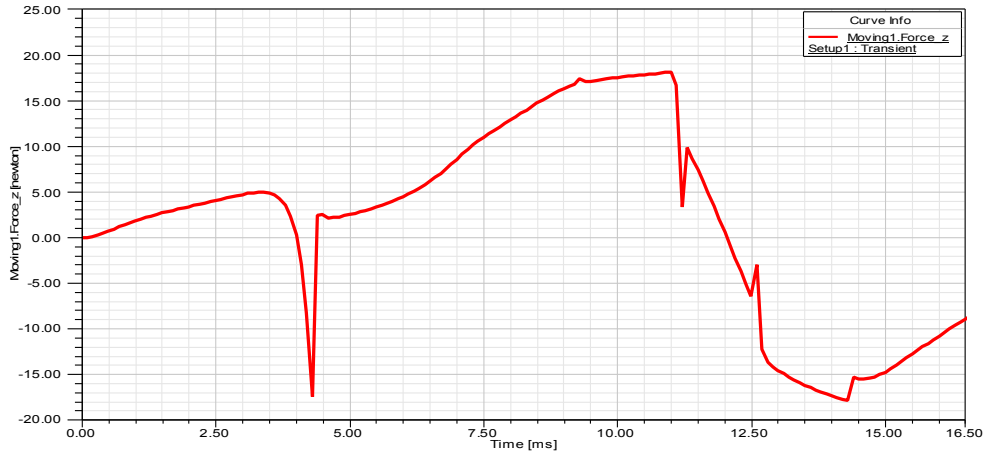
çalışmada oluşturulan relüktans fırlatıcı ile elde edilebilecek en yüksek hız 19,76 m/s olmaktadır. Bu hız, 1050 malzemesinden yapılmış, 8 cm uzunluğunda ve 3 mm çapındaki mermide elde edilmektedir. O yüzden en yüksek hız elde edilen mermiye ait parametreler incelenmiştir. Şekil 11'de merminin sargının ortasına geldiği durumdaki manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir. Mermi, sargının ortasına geldiğinde (12 ms'de), manyetik alan maksimum olmaktadır. Bu değer 3,5 Tesla civarındadır. Şekil 12'deki hız-zaman grafiğinde görüldüğü gibi en yüksek hız 12 ms'de 19,76 m/sn olmaktadır. Mermi maksimum hıza ulaştığında yani enerji verildikten 12 ms sonra bobinin enerjisi kesilmeli ve bobindeki enerji boşaltılmalıdır, yoksa merminin namlu çıkış hızı azalacaktır. Bobinin girişindeki sensörler bu duruma uygun yerleştirilmelidir. Böylece mermi bobinin ortasına geldiğinde sensörler bunu algılamalı ve bobine uygulanan enerji o andan itibaren kesilmelidir.



Şekil 11. Mermi sargının ortasında manyetik akı yoğunluğunun gösterimi (Magnetic flux density when projectile is at the middle of the winding)



Şekil 12. Hız-zaman grafiği (Velocity vs. time)



Şekil 13. Kuvvet-zaman grafiği (Force vs. time)

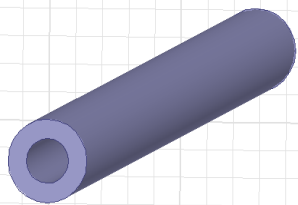
Şekil 13'deki kuvvet-zaman grafiğinde görüldüğü gibi 12 ms'den sonra mermiye uygulanan kuvvet negatif olmakta, yani mermi tekrar bobinin merkezine çekilmektedir. Mermiye etkiyen kuvvet Eşitlik 11'den bulunabilir [12].

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 (\mu_r - 1) \left(\frac{NI}{l} \right)^2 A \quad (11)$$

Burada μ_0 havanın manyetik geçirgenliği, μ_r mermi malzemesinin bağıl manyetik geçirgenliği, N bobinin sarım sayısı, I bobinden geçen akım, l bobinin uzunluğu, A bobinin kesit alanıdır. Eşitlik 11'de görüldüğü gibi sargının manyetik alanı tarafından mermiye uygulanan kuvvet, merminin bağıl manyetik geçirgenliği, sargının sarım sayısının karesi, sargıdan geçen akımın karesi ve sargının kesit alanı ile doğru orantılı, sargının uzunluğunun karesi ile de ters orantılıdır. Bu çalışmada ayrıca en yüksek hız elde edilen 8 cm uzunluğunda ve 3mm çapındaki 1050'den yapılmış merminin içinin boşaltılarak bir boru gibi olması durumundaki hız değişimi incelenmiştir. Şekil 14'de boru tipi mermi gösterilmektedir. Tablo 5'de bu mermilere ait hızlar gösterilmiştir. Merminin iç çapı 1,6 mm, dış çapı 3 mm olduğunda en yüksek hız elde edilmektedir. Bu hız değeri 22,08 m/sn olmaktadır. Mermi ağırlıkları hesaplanırken, 9 ve 12 numaralı eşitlikler kullanılmıştır.

$$V = \pi(r_1^2 - r_2^2) \cdot l \quad (12)$$

Burada, V merminin hacmini, r_1 merminin dış yarıçapını, r_2 merminin iç yarıçapını ve l merminin uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 14. Boru tipi merminin görünümü (View of tubular projectile)

Tablo 5. Boru tipi mermilerin parametreleri (Parameters of tubular projectiles)

İç çap (mm)	Dış çap (mm)	Ağırlık (gr)	Hız (m/s)
0,2	3	4,43	14,04
0,4	3	4,37	14,01
0,6	3	4,271	13,81
0,8	3	4,132	14,34
1	3	3,95	14,07
1,2	3	3,74	14,08
1,4	3	3,48	15,18
1,6	3	3,183	22,08
1,8	3	2,85	14,6
2	3	2,47	14,97
2,2	3	2,05	14,55
2,4	3	1,6	14,45
2,6	3	1,1	15,46
2,8	3	0,5734	16,95

4. YAPILAN ÇALIŞMANIN YORUMLANMASI (INTERPRETATION OF THE STUDY)

Hız sonuçları incelendiğinde, daha önceki çalışmalardan elde edilen bulgulara uygun olarak, mermilerin yapıldığı malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği ile mermilerin namlu çıkış hızı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Buna göre doyuma bağıl manyetik geçirgenliği en yüksek olan 1050 nin hızı en yüksek, ikinci sırada 12L14 ve en düşük 1020 olmaktadır. Mermi uzunluğu bobin uzunluğuna eşit olduğunda veya biraz büyük olduğunda en yüksek hız elde edilmektedir. Bu durum malzemeden malzemeye farklılık göstermektedir. Mermi çapı, namlu çapının yarısına sahip olan mermilerdeki hız göreceli olarak diğer çaplara sahip mermilerden yüksektir. Sonuçlar incelendiğinde küçük çaplara sahip mermilerde en yüksek hız, uzunluğu küçük olan mermilerde olmakta, mermi çapı artırıldığında daha uzun mermilerde daha yüksek hız elde edilmektedir. O yüzden, daha yüksek hız elde etmek için mermi çapı ile mermi uzunluğu birlikte ele alınmalıdır. Bu çalışmada incelenen fırlatıcı sisteme 250 VDC gerilim uygulandığında bu sistem ile elde edilebilecek en yüksek hız 19,76 m/sn olmaktadır. Bu

hız 3 mm çapında, 8 cm uzunluğunda ve 1050 den yapılmış merminin fırlatılmasıyla elde edilmektedir. Ayrıca 8 cm uzunluğundaki 3 mm çapındaki merminin içinin 1,6 mm çapında boşaltılması ile elde edilen boru tipi merminin hızı daha yüksek olmaktadır. Bu değer 22,08 m/sn olmaktadır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bir sargılı relüktans fırlatıcının iki boyutlu Maxwell modeli oluşturulmuş, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak mermi hızına etki eden parametreler belirlenmiştir. En yüksek namlu çıkış hızına sahip sistem tespit edilmiştir. Daha önceki çalışmalardan elde edilen bulgulara uygun olarak, merminin hızının merminin yapıldığı malzemenin bağlı manyetik geçirgenliği ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Daha önceki çalışmalardan elde edilen bulgulardan farklı olarak, en yüksek hız elde edilen mermi uzunluğunun, merminin yapıldığı malzemeye göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Mermi çapı namlu çapının yarısı olduğunda mermi hızının arttığı tespit edilmiştir. Merminin hızının artırılması için sadece mermi uzunluğunun veya mermi çapının değil her ikisinin birlikte ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlardan farklı olarak merminin boru tipi olması durumunda mermi hızının arttığı belirlenmiştir.

6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından, FBD-10-3313 kodlu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Fair, H. D., "Electromagnetic propulsion: A new initiative", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 18, No 1, 4-6, 1982.
2. Tomczuk, B. ve Sobol, M., "Field Analysis of the Magnetic Systems for Tubular Linear Reluctance Motors", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 41, No 4, 1300-1305, 2005.
3. Bresie, D. A. ve Andrews, J. A., "Design of a Reluctance Accelerator", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 27, No 1, 623-627, 1991.
4. Waindok, A. ve Mazur, G., "Mutual Inductances in a Mathematical Model of the Three-Stage Reluctance Accelerator", **3rd International Students Conference on Electrodynamics and Mechatronics**, Opole University of Technology, Polonya, 115-118, 6-8 Ekim 2011.
5. Bayati, M. S., Keshtkar, A. ve Gharib, L., "Analyzing the Near and Far Field Using Finite Difference and Finite Element Method", **IEEE Transactions on Plasma Science**, Cilt 41, No 5, 1398-1402, 2013.
6. Kim, S. W., Jung, H. K. ve Hahn, S. Y., "An Optimal Design of Capacitor-Driven Coilgun", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 30, No 2, 207-211, 1994.
7. Marder, B., "A Coilgun Design Primer", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 29, No 1, 701-705, 1993.
8. Kaye, R. J., "Operational Requirements and Issues for Coilgun Electromagnetic Launchers", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 41, No 1, 194-199, 2005.
9. Slade, G. W., "A Simple Unified Physical Model for a Reluctance Accelerator", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 41, No 11, 4270-4276, 2005.
10. Ingram, S. K. ve Pratap, S. B., "A Control Algorithm for Reluctance Accelerators", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 27, No 1, 156-159, 1991.
11. Slade, G. W., "Fast Finite-Element Solver for a Reluctance Mass Accelerator", **IEEE Transactions on Magnetics**, Cilt 42, No 9, 2184-2192, 2006.
12. Chaowei, Z., Pengshu, D., Xiaojun, D., Sanqun, L., Zhiyuan, L. ve Guanghui, Z., "Analysis of Reluctance Coil Launcher Performance Using Coupled Field-Circuit Method", **International Conference on Electrical Machines and Systems**, Wuhan, China, 4049-4052, 17-20 Ekim 2008.
13. Topaloğlu, İ., **İnsansız Hava Araçları İçin Lineer Elektromanyetik Fırlatıcı Sistem Tasarımı ve Optimizasyonu**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
14. Kalender, O., **Bir Merminin Elektromanyetik Enerji ile Sevkinin Optimizasyonu**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
15. Yadong, Z., Ying, W. ve Jiangjun, R., "Capacitor-Driven Coil-Gun Scaling Relationships", **IEEE Transactions on Plasma Science**, Cilt 39, No 1, 220-224, 2011.
16. Hou, Y., Liu, Z., Ouyang, J.M. ve Yang, D., "Parameter Settings of the Projectile of the Coil Electromagnetic Launcher", **16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology**, Beijing, China, 1-4, 15-19 Mayıs 2012.
17. Köksoy, A., **Lineer İndüksiyon Fırlatıcı Analizi ve Tasarımı**, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
18. Topaloğlu, İ. ve Gürdal, O., "Lineer Elektromanyetik Fırlatıcı Sistem Tasarımı ve Eşdeğer Devre Modeli Kullanarak Geliştirilmiş Fırlatma Performansı İçin Boyut Optimizasyonu", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 28, No 1, 103-113, 2013.

19. Michaelides, A. M. ve Pollock, C., "Effect of End Core Flux on the Performance of the Switched Reluctance Motor", **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, Cilt 141, No 6, 308-316, 1994.
20. Deshpande, U., "Two-Dimensional Finite-Element Analysis of a High-Force-Density Linear Switched Reluctance Machine Including Three-Dimensional Effects", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Cilt 36, No 4, 1047-1052, 2000.
21. Topaloğlu, İ. ve Gürdal, O., "Elektromanyetik Tasarım Programı Kullanılarak Elektrik Makinelerinin Tasarımında Boyut Optimizasyonu İçin Geliştirilmiş İkinci Dereceden Hassasiyet Analizi Temelli Nümerik Bir Yaklaşım", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, No 2, 363-369, 2010.
22. Sen, P. C., **Principles of Electric Machines and Power Electronics**, John Wiley & Sons, Singapur, 1989.
23. Üstkoyuncu, N., **Anahtarlamalı Doğrusal Hareketli Relüktans Motor Tasarımı**, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
24. Ulaby, F. T., Michielssen, E. ve Ravaioli, U., **Fundamentals of Applied Electromagnetics**, 6th Edition, Prentice Hall, New Jersey, A.B.D., 2010.
25. Topbaş, M. A., **Çelik ve Isıl İşlem Atlası**, Prestij, İstanbul, 1998.
26. Ziegenbein, J., **Magnetic Clamping Structures for the Consolidation of Composite Laminates**, Msc Thesis, Georgia Institute of Technology, 2011.
27. Li, F., Li, X., Zhu, T. ve Rong, Y., "Numerical Simulation of the Moving Induction Heating Process with Magnetic Flux Concentrator", **Advances in Mechanical Engineering**, Cilt 2013, 1-9, 2013.
28. An, J. ve Kwon, D. S., "Modeling of a Magnetorheological Actuator Including Magnetic Hysteresis", **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Cilt 14, 541-550, 2003.
29. Daldaban, F. ve Ustkoyuncu, N., "Inductance Estimating of Linear Switched Reluctance Motors with the Use of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems", **Gazi University Journal of Science**, Cilt 22, No 2, 89-96, 2009.