



Elektromanyetik Fırlatıcıların İçbükey Armatür Şeklinin Çok Amaçlı Genetik Algoritma ile Optimizasyonu

Concave Armature Shape Optimization of Electromagnetic Launchers using Multi-Objective Genetic Algorithm

Ferhat Yurdakonar^{1,2}, Görkem Gülletutan³, Nail Tosun³, Ozan Keysan³, Ahmet Cansız²

¹Savunma Sistem Teknolojileri Sektör Başkanlığı
ASELSAN
fyurdakonar@aselsan.com.tr

²Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
yurdakonar@itu.edu.tr, acansiz@itu.edu.tr

³Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
gorkem.gulletutan@metu.edu.tr, nail.tosun@metu.edu.tr, keysan@metu.edu.tr

Özet

Elektromanyetik fırlatma yolu (EMFY) içerisinde armatür fırlatma boyunca yüksek akım ve manyetik alan yoğunluklarına maruz kalır. Maruz kalma süresi kısa olmasına rağmen, ortaya çıkan sıcaklık malzemenin erime noktasına ulaşabilir. Mühimmatın başarılı bir şekilde fırlatılması armatür bütünlüğüne bağlıdır, bu nedenle armatür tasarımı önem arz eder. Dışbükey raylar, dikdörtgen raylara kıyasla düzgün alan dağılımları ve daha iyi elektriksel temasları açısından üstünlük gösterir. Bu çalışmada, içbükey armatür şekli çok amaçlı genetik algoritma (ÇAGA) ile optimize edilmiştir. Armatür parametrik modeli 3-B sonlu elemanlar ortamında oluşturulmuş ve baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma-II (NSGA-II) sayısal hesaplama ortamında gerçekleştirilmiştir; Optimum armatür şekline ulaşmak için iki yazılım birleştirilmiştir. Hem armatür kütlelerinin azaltılması hem de armatür üzerindeki akım yoğunluğu dağılımının homojenleştirilmesi, namı çıkış hızındaki artış ve fırlatma güvenliği göz önüne alındığında faydalıdır. Bu çalışma hem fırlatma verimliliğine hem de güvenliğe odaklanan içbükey bir armatür tasarım yöntemi önermektedir.

Abstract

The armature of electromagnetic launchers (EMLs) is exposed to enormous current and magnetic field densities throughout the launch. Although, exposure time is short, the resulting temperature can reach the material's melting point. A successful launch of projectile relies on armature integrity, for that reason design of armature is substantial. Convex rails are superior regarding their smooth field distributions and better electrical contacts as compared to rectangular rails. In this paper, concave armature shape is optimized with multi objective genetic algorithm (MOGA). Armature parametric model is constructed in 3-D finite element environment and non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) is implemented in numeric

computing environment; two software are coupled to reach optimum armature shape. Both reducing armature mass and homogenizing current density distribution on armature are beneficial considering an increase in muzzle velocity and launch safety. This study promises a concave armature design tool which focuses both launch efficiency and safety.

1. Giriş

Elektromanyetik fırlatma sistemi (EMFS), elektrik enerjisi kullanarak yüksek hızlı mühimmatlar fırlatabilmeleri nedeniyle geleneksel barutlu alternatiflere göre daha fazla ilgi görmektedir [1]. EMFS mühimmatı hipersonik hızlarla fırlatmak için depolanmış elektrik enerjisini kullanan bir elektromekanik enerji dönüştürme sistemidir [2]. Sistem, sınırlı uzunluktaki elektromanyetik fırlatma yolu (EMFY) içinde mühimmatı hızlandırmak için yüksek akımlı düzgün bir darbeye ihtiyaç duyar. EMFS'de mühimmat ivmesi akımın karesi ile orantılı olduğundan oldukça düzgün bir akım istenmektedir [3]. Darbe güç kaynağı, armatür üzerinde yüksek manyetik alan oluşturmak için darbe şeklinde akım üretir. Elektriksel olarak iletken iki paralel ray, genliği birkaç mega amper olan bu darbe şeklindeki akım tarafından sürülür. Dışbükey raylar, iç yüzeyde düzgün akım dağılımı, daha iyi ısı dağılımı, daha yüksek elektrik temas yüzeyi ve daha uzun ömürleri ile öne çıkmaktadır [4].

Armatür, başarılı bir fırlatma ve namı kinetik enerjisi üzerindeki etkisi nedeniyle çokça çalışılmıştır [5-7]. Armatür, elektromanyetik kuvvetin üretildiği sistemin temel parçalarından biridir. Lorentz kuvveti (1), fırlatma paketini birkaç km/sn'ye kadar hızlandırır.

$$\vec{F}_L = \frac{1}{2} L' I^2 \quad (1)$$

L' EMFY'nin endüktans gradyanı, I ray akımıdır. L' ray geometrisine ve raylar arasındaki mesafeye bağlıdır [8].

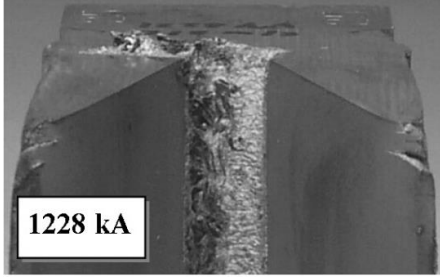
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_L}{m_p + m_a + m_s} \quad (2)$$

$$\vec{v} = \int_{t=0}^{t=t_{cikis}} \vec{a} dt \quad (3)$$

$$E_{kinetik} = \frac{1}{2} m_p v^2 \quad (4)$$

Fırlatma paketinin hızı, kütle ve ivmelenme (\vec{a}) ile karakterize edilir. Eksiksiz bir fırlatma paketi, armatürün (m_a) yanı sıra mühimmat (m_p) ve sabot kütesini (m_s) içerir. Verilen bilgilerle sürtünme ihmal edilirse fırlatma paketinin konumu, namlu çıkış hızı (\vec{v}) ve namlu kinetik enerjisi ($E_{kinetik}$) hesaplanabilir.

Fırlatma sistemlerinde çeşitli armatür türleri kullanılmaktadır, bunlar plazma, hibrit, faz geçişli ve katı armatürlerdir [9]. Armatürlerin katı tipleri, klasik top yüklemeye benzer şekilde fırlatıcıya yüklenebildiklerinden diğerlerine göre daha basittir. Katı armatürler arasında C şeklindeki yekpare armatürler genel olarak daha üstündür [10]. Armatür ve sabot, mühimmatın kinetik enerjisine katkıda bulunmadıkları için mermi açısından parazitik kütledir [11]. Bu nedenle daha yüksek namlu kinetik enerjisine ulaşmak için daha düşük armatür ve sabot kütesine sahip olmak daha avantajlıdır. Literatüre bakıldığında, armatür şeklinin farklı şekillerde optimizasyonu için büyük çaba sarf edilmiş ve sonuçta performansı artırılmıştır [12-13]. Armatür eyeri üzerindeki düzleştirilmiş akım dağılımı, manyetik testere etkisi riskini ve armatür eyer alanındaki bölgesel sıcak noktalarını azaltır, böylece atış sırasında armatürde oluşabilecek çatlak riski azaltılmış olur [14]. Manyetik testere etkisi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Armatür üzerinde manyetik testere etkisinin 1228 kA akım altında oluşturduğu etki [15].

Armatürlerin geometrik optimizasyonu bir mühendislik problemidir. Mühendislik problemlerine uygulanan birçok türevsiz optimizasyon algoritması vardır [16]. Genetik Algoritmalar (GA), belirli bir hedefe dayalı mühendislik problemlerini çözmeye yeteneğine sahiptir [17]. Özellikle bu problem için çok amaçlı genetik algoritma (ÇAGA) tercih edilmektedir. Literatürde armatür şekil optimizasyonu sadece dikdörtgen raylar için yapılmaktadır. Bu çalışma, içbükey armatür şekli optimizasyonuna odaklanmakta, aynı anda hem armatür kütesini azaltırken hem de armatür üzerindeki akım yoğunluğu dağılımını (AYD) homojenleştirmektedir. Muhtemel çözümler bulunduktan sonra, tasarımın doğrulanması için malzemelerin faz değişimi ve armatür üzerindeki sıcaklık dağılımının analiz edilmesi bütünlük için gereklidir.

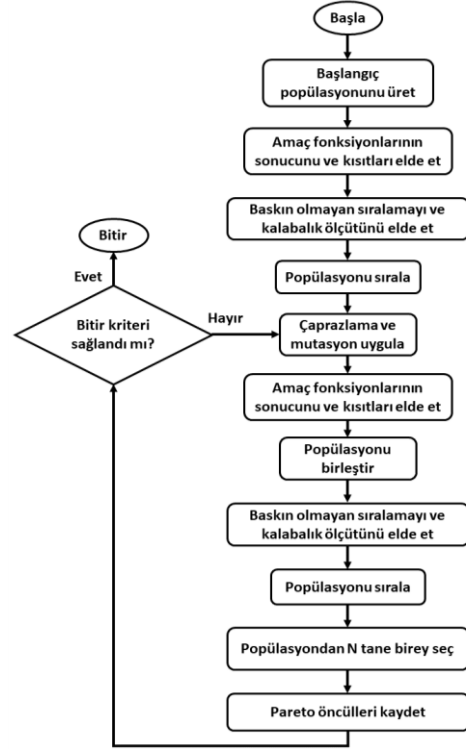
Bu çalışmada, ÇAGA kullanılarak C-şekilli katı içbükey armatür optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın ana hedefleri, minimum kesit alanı kısıtlaması ile armatür kütesini azaltmak ve eyer üzerindeki AYD'nin homojenleştirilmesi üzerine

odaklanmıştır. Bu bağlamda, çalışma aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde optimizasyon yöntemi ve parametrik armatür modeli sunulmuştur. Bu bölümde özellikle baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma-II (NSGA-II) incelenmiştir. Bölüm III ise ortaya çıkan geometrinin iletir sıcaklık ve malzeme faz değişimi analizleri vermektedir. Son olarak, çalışmanın tartışması ve sonuçları verilmiştir.

2. Optimizasyon Yöntemi ve Çoklu Fizik Modeli

Mühendislik problemlerinin çoğunun kısıtlamaları olduğu için, bu kısıtlamalara dayalı uygun algoritmanın seçilmesi çözüm olasılıklarını artırır. Bu çalışmaya odaklanılan bu özel problemde, bir kısıt ve iki amaç vardır. Armatür şekil optimizasyonu iki amaç ile yapılır, bunlar armatür kütesi ve eyer üzerindeki AYD homojenliğinin minimize edilmesidir. Kısıt, armatürün minimum kesit alanıdır. Optimizasyon problemi için seçilen yöntem NSGA-II'dir. NSGA-II, hızlı yakınsama ile gerçek pareto optima yakın en uygun çözümleri bulabilen evrimsel ve elitist bir genetik algoritmadır [18]. Yeni nesil, yavrulardan ve önceki nesilden oluşturulur. Popülasyonun çeşitliliğe sahip olduğundan emin olmak için hem çaprazlama hem de mutasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Popülasyondan iki birey A ve B olarak alındığında, çözümlerin birbirine baskınlığı, verilen amaç fonksiyonu sonuçları karşılaştırılarak hesaplanır. Eğer eşitlik (5) sonucu mantıksal doğru ise, A bireyinin B'den baskın olduğu söylenir. Sıralamanın takibi amaç fonksiyonları ve kalabalık ölçütü değerlerine göre yapılır. Bulunan yeni bireyler, üretim süresini ve maliyetini azaltabilen birkaç pareto optimal çözümü sağlayabilir. Pareto öncülleri olarak bulunan çözümler her yinelemede kayıt altına alınır. NSGA-II algoritmasının akış şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$((f_1^A \leq f_1^B) \wedge (f_2^A \leq f_2^B)) \wedge ((f_1^A < f_1^B) \vee (f_2^A < f_2^B)) \quad (5)$$



Şekil 2: NSGA-II akış şeması.

2.1. Amaç Fonksiyonları ve Kısıt

Amaç fonksiyonları, minimum armatür kütlesi ve eyer üzerindeki AYD'dir. Eyer üzerindeki AYD, Şekil 3'te gösterilen armatürün orta bölgesinde bulunan dikey kenarda hesaplanır. Armatür kütlesi daha önce de belirtildiği gibi mühimmat açısından parazitiktir ve namlu çıkış hızına etki etmektedir. Akım yoğunluğu homojenlik indeksi (AYHI) ortalama karekök hatası kullanılarak hesaplanır (6). Düşük AYHI daha iyidir.

$$AYHI = \sum_{n=1}^k \sqrt{(J_n - J_{ort})^2} \quad (6)$$

k toplam veri noktası, ve J_n n. veri noktasındaki akım yoğunluğu, J_{ort} tüm noktaların ortalaması alınarak hesaplanan akım yoğunluğudur. Optimize edilmemiş bir armatür Şekil 3'de verilmiştir. Kısıt, armatür üzerinde akımın aktığı minimum kesit alanıdır ve iki farklı noktada ölçülür. Şekil 3'te de gösterildiği üzere biri armatürün ortasında (kafa kısmı alanı) ve ikincisi bacağın ön kenarıdır (bacak kısmı alanı). Bu çalışmada minimum kesit alanı, %20 güvenlik payı ile malzemenin aksiyon integrali kullanılarak belirlenmiştir. Bir malzemenin Joule ısınması, belirli aksiyon integral değeri ile tanımlanır ve Al7075 alaşımı için bu değer $19500 A^2s/mm^4$ olarak verilir [19]. A_{min} (mm^2), malzemenin erimeden akım taşıyabileceği minimum kesit alanıdır. Denklem (7) kullanılarak minimum kesit alanı hesaplanır.

$$A_{min} = \sqrt{\frac{1}{19500} \int_{t=0}^{t=t_{cikis}} I^2 dt} \quad (7)$$

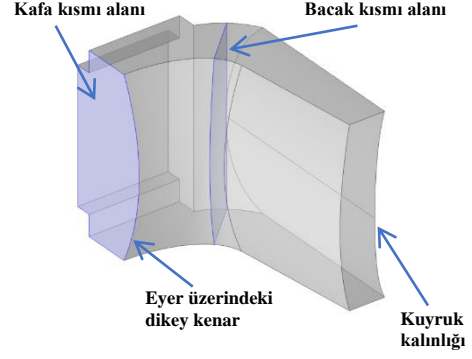
2.2. Çoklu Fizik Modeli

2.2.1. Parametrik Geometri

Armatür elektromanyetik modeli parametrik değişkenler kullanılarak oluşturulmuştur. Bu nedenle sadece bir parametre değiştirilerek yeni bir şekil elde edilebilir. EMFY zaten önceden yapılmış olduğundan ve sadece tanımlanmış paketleri fırlatabileceğinden, bazı parametreler sabit tutulmuştur. Ayrıca, olası tasarımların arandığı uzaya daha fazla parametre eklendiğinde, optimizasyonun hesaplama maliyetinin önemli ölçüde artacağını bilinmektedir. Optimizasyon parametreleri 4 adet olarak seçilmiştir. Bunların her birinin şekil üzerine etkisi Çizelge 1'de açıklanmıştır. Bu parametrelerden hiçbiri armatürün ray ile kontak ettiği yüzey geometrisinin minimum ve maksimum sınırlarını değiştirmemektedir. Böylece bulunan sonuç mevcut EMFY ile fırlatılabilecektir.

Çizelge 1: Optimizasyon parametreleri.

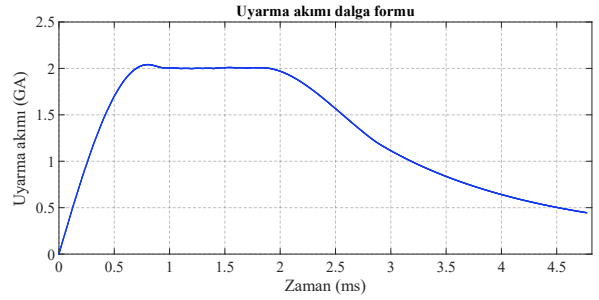
Parametre	Şekil üzerinde etkisi
Par_a	Kafa kısmı alanı, armatür bacak uzunluğu, kontak yüzey alanı
Par_b	Bacak kalınlığı, eyer geometrisi
Par_c	Kafa kısmı alanı, eyer geometrisi
Par_d	Bacak iç geometrisi, eyer geometrisi



Şekil 3: Optimize edilmemiş armatür (yarı-simetrik).

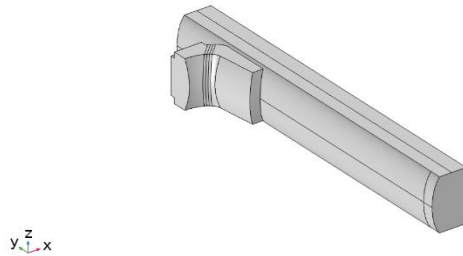
2.2.2. Manyetik Alan

Manyetik alan fiziği ile armatür üzerindeki manyetik alan ve akım yoğunluğu hesaplanmaktadır. Şekil 4'te verilen uyarma akımı modele uygulanmıştır. Darbe güç kaynağında 8 MJ enerji depolanmıştır. Simülasyon zamana bağlıdır ve simülasyon süresi armatürün EMFY'den çıkış süresine eşittir. Bunun nedeni ise armatürün EMFY'den bütünlüğünü koruyarak bir kere çıktıktan sonra görevini tamamlamış olmasıdır. 3-D sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılan modelde elektrik potansiyel gradyanı ihmal edilmiştir.



Şekil 4: Uyarma akımı dalga formu.

Hesaplama zaman tasarrufu sağlamak için Şekil 5'te verilen yarı simetrik model oluşturulmuştur. Modelde ray uzunluğunun tamamı modellenmemiş ve bu da zamandan tasarruf sağlamıştır. Simetri ekseninde manyetik izolasyon sınır koşulu kullanılmaktadır. Bu sınır koşulu akım geçişini engellemez fakat manyetik alan çizgilerini engeller böylece yarı simetrik model oluşturulabilir.



Şekil 5: Yarı-simetrik model (ray ve armatür).

2.2.3. Termal Alan

Elektromanyetik-termal birleştirilmiş sonlu eleman modeli kullanılarak armatür hacmi üzerinde sıcaklık artışı hesaplanmıştır. Hacim çevresinde sıfır ısı iletimi sınır koşulu vardır. Çünkü fırlatma işlemi o kadar hızlıdır ki armatürün üzerinden neredeyse hiç ısı akışı oluşmaz. Termal zaman sabiti çıkış zamanından daha büyüktür. Yoğunluk, ısı iletkenlik, ısı kapasitesi, manyetik ve elektriksel geçirgenlik ve daha birçok mekanik özellik sıcaklıkla değişir. Bu modelde sadece elektriksel iletkenlik sıcaklıkla değişmektedir. Çizelge 2'te armatür malzemesinin sıcaklığa göre elektriksel iletkenlik değişimi verilmiştir.

Çizelge 2: Elektriksel iletkenliğin sıcaklığa göre değişimi

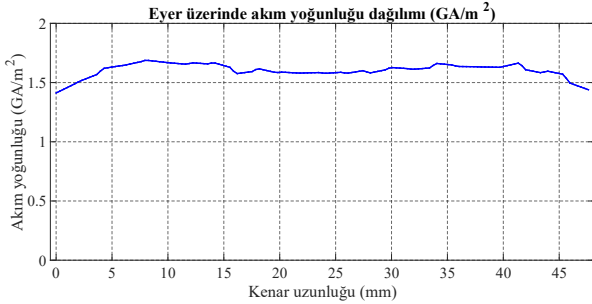
Sıcaklık (K)	İletkenlik (MS/m)
293.15	19.14
753.15	8.264
913.15	4.386

Malzeme faz değişimi modellenmiştir, katıdan sıvıya sadece 1 faz geçişi meydana gelmektedir. Joule ısınmasından kaynaklı armatür malzemesi üzerinde sıcaklık dağılımı ve faz geçişi modellenmiştir.

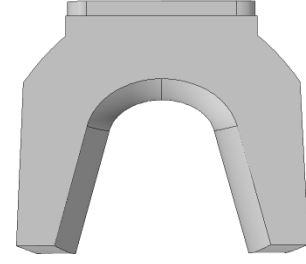
3. İleri Analizler

Mevcut tasarıma ilişkin çözümler, başlangıçta tanımlanan iterasyon sayısına ulaşıldığında elde edilir. Birçok Pareto öncüllü bulunmuştur, neredeyse hepsi birbirine çok yakındır. Bu durum aynı zamanda algoritmanın en iyi çözüme yakınsadığını göstermektedir. İleri analizleri uygulamak için en küçük kütleyle sahip olan çözüm seçilmiştir. Ortaya çıkan geometriye, üretimden önce mekanik olarak bazı düzeltmeler uygulanmalıdır, sivri kenar ve köşelere pah açılmalıdır. Armatür ayaklarının raylara ön basma kuvvetini karşılamak için mekanik modifikasyon gereklidir. Şekil 6'da optimize edilmiş armatürün referans armatür ile görsel bir karşılaştırması yapılmıştır.

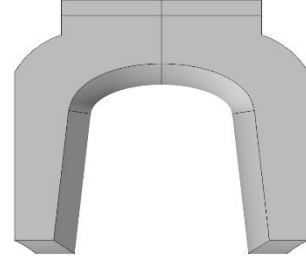
Optimize edilmiş armatür kütlelerinin referans armatüre göre %7,8 azaltıldığı görülmüştür. Eyer üzerindeki tepe akımdaki AYD Şekil 7'de gösterilmiştir, yatay eksen Şekil 2'de gösterilen dikey kenarın uzunluğudur. Grafikteki değerler yarı simetrik modellemeye dayanır, gerçek değerlerin yarısıdır.



Şekil 6: Eyer üzerinde AYD (tepe akım değerinde).



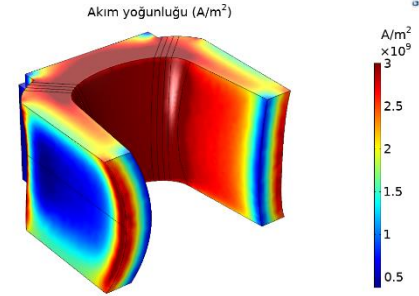
(a)



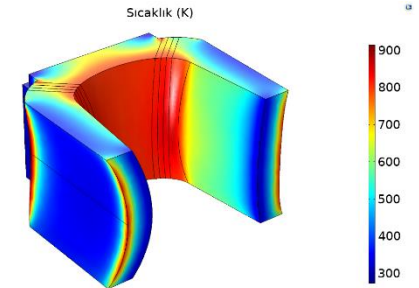
(b)

Şekil 7: Armatürlerin görsel karşılaştırılması. (a) Referans armatür. (b) Optimize edilmiş armatür.

Şekil 8'de görüldüğü üzere, AYD eyer alanında oldukça homojendir. Şekil 9'da erime sonu sıcaklığı dağılımı gösterilmektedir, armatürün eyer kısmında, bacalarının ön ve arka kenarında erime meydana gelmektedir.

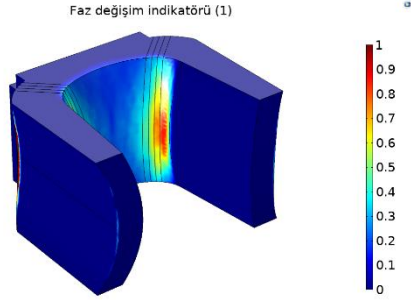


Şekil 8: Armatür üzerinde AYD (tepe akım değerinde).



Şekil 9: Armatür üzerinde sıcaklık dağılımı (erime sonu 913K).

Malzeme faz değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir. Faz değişiminde 1 tamamen sıvı, 0 tamamen katı demektir.



Şekil 10: Armatür üzerinde malzemenin faz değişimi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, çok amaçlı armatür şekil optimizasyonu adımları, parametrik bir SEY modeli kullanılarak gösterilmiştir. Optimizasyon prosedürü, önceki tasarıma kıyasla minimum armatür kütle ve eğer üzerinde daha homojenleştirilmiş AYD bulunmasını amaçlamaktadır. Yeni tasarım prosedürü armatür aksiyon integral limitlerinden hesaplanan minimum kesit alanını da dikkate alır. İçbükey armatür geometrisi birçok parametreden oluşmasına rağmen, seçilen optimizasyon algoritması en az sayıda parametreyi hesaba katarak başarılı sonuçlar vermiş, bu da zaman ve tasarım komplikasyonlarını azaltmıştır. Armatüre ait yalnızca dört parametre değiştirilerek büyük şekil değişimleri elde edilebilmektedir. Optimizasyon sonucu, armatür kütle ve eğer üzerindeki AYD'nin aynı anda optimize edilebileceğini göstermiştir. Optimizasyon işleminin sağladığı armatür tasarımının iyileştirilmesi armatür kütlede %7,8 azalma sağlarken homojenize edilmiş AYD elde edilmiştir. Elde edilen geometrinin doğrulanması için deneysel çalışmalar gerekmektedir. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmamız, tasarım çerçevesinin etkinliğini doğrulamak için deneyler yapmaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma ASELSAN tarafından desteklenmiştir. Yazarlar çalışmaya katkılarında dolayı Mustafa Karagöz, Dr. Baran Yıldırım ve diğer ASELSAN çalışanlarına teşekkür eder.

5. Kaynaklar

- [1] J. T. Tzeng and E. M. Schmidt, "Comparison of Electromagnetic and Conventional Launchers Based on Mauser 30-mm MK 30-2 Barrels," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, no. 1, pp. 149-152, Jan. 2011.
- [2] Fedorchenko, A., "The Theory and Its Development of Anti-Tactical Ballistic Missiles: Electromagnetic Launchers", The 6th Forum on Military Operation Research & Modeling Simulation, 2009.
- [3] I. R. McNab, "Pulsed power for electric guns," in IEEE Transactions on Magnetism, vol. 33, no. 1, pp. 453-460, Jan. 1997.
- [4] H. Polat, N. Tosun, D. Ceylan and O. Keysan, "Optimization of a Convex Rail Design for Electromagnetic Launchers," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 48, no. 6, pp. 2266-2273, June 2020.
- [5] G. Goyal, J. P. Khatait and S. Mukherjee, "Hybrid Armature Design Based on Compliance Matching with C Armatures," 2021 IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 2021, pp. 1-4.
- [6] B. Wild, F. Alouahabi, D. Simicic, M. Schneider and R. Hoffman, "A Comparison of C-Shaped and Brush Armature Performance," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 7, pp. 1227-1233, July 2017.
- [7] J. Barber and C. McDonald, "A comparison of armature performance," in IEEE Transactions on Magnetism, vol. 22, no. 6, pp. 1389-1394, November 1986.
- [8] N. Tosun et al., "A Hybrid Simulation Model for Electromagnetic Launchers Including the Transient Inductance and Electromotive Force," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 48, no. 9, pp. 3220-3228, Sept. 2020.
- [9] D. Putley, "Plasma type armatures (railguns)," IEE Colloquium on Pulsed Power Applications, 1989, pp. 911-912.
- [10] D. C. Haugh and G. M. G. Hainsworth, "Why 'C' armatures work (and why they don't!)," in IEEE Transactions on Magnetism, vol. 39, no. 1, pp. 52-55, Jan. 2003.
- [11] Qing-hua Lin, Bao-ming Li, "Numerical simulation of dynamic large deformation and fracture damage for solid armature in electromagnetic railgun", Defence Technology, Volume 16, Issue 2, Pages 348-353, 2020.
- [12] G. Goyal, J. P. Khatait and S. Mukherjee, "Attempts at optimization and analysis of C armatures using action parameters," 2021 IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 2021, pp. 1-4.
- [13] L. Rip, S. Satapathy and Kuo-Ta Hsieh, "Effect of geometry change on the current density distribution in C-shaped armatures," in IEEE Transactions on Magnetism, vol. 39, no. 1, pp. 72-75, Jan. 2003.
- [14] Q. -A. Lv, C. Liang, X. Yuan, Z. Qiao, B. Lei and H. Xiang, "Armature Technologies and Launching Capability of Electromagnetic Railgun Launcher with Monolithic U-shaped Aluminum Armature," 2021 IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 2021, pp. 1-5.
- [15] T. Watt and F. Stefani, "Experimental and computational investigation of root-radius melting in C-shaped solid armatures," in IEEE Transactions on Magnetism, vol. 41, no. 1, pp. 442-447, Jan. 2005.
- [16] Rios, L.M., Sahinidis, N.V. "Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations", J Glob Optim 56, 1247-1293, 2013.
- [17] J. M. Johnson and V. Rahmat-Samii, "Genetic algorithms in engineering electromagnetics," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 39, no. 4, pp. 7-21, Aug. 1997.
- [18] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002.
- [19] A. Vanderburg et al., "The electrical specific-action-to-melt of structural copper and aluminum alloys," 2013 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 2013, pp. 1-1.