





Görüntüleme Sistemleri İçin Kalıcı Mıknatıslarda Optimum Performans İncelemesi

Optimum Performance Review In Permanent Magnets For Imaging Systems

Furkan Balcı ¹, Nurcan Doğan ^{2*}, Ayhan Bingolbalı ^{3*}

^{1,3} Yıldız Teknik Üniversitesi Biyomühendislik Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

²Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü, Gebze, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: ab1353@gmail.com; nurcandogan8o@gmail.com

Geliş Tarihi / Received: 01.02.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 03.09.2021

Atıf şekli/ How to cite: BALCI, F., DOĞAN, N., BİNGOLBALI, A. (2022). Görüntüleme Sistemleri İçin Kalıcı Mıknatıslarda Optimum Performans İncelemesi. DEUFMD, 24(70), 37-44.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247005

Öz

Tıbbi görüntüleme cihazları hastalıkların teşhisinde hayatımızda önemli bir yer tutmaktadır. Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG = MRI) cihazı klinik olarak kullanılmakta ve Manyetik Parçacık Görüntüleme (MPG = MPI) cihazı ise geliştirilmektedir. Her iki görüntüleme tekniğinde manyetik alan kullanılmaktadır. Bu görüntüleme yöntemlerinden MPI tekniğinin temel mekanizması, izleyici materyal olarak kullanılan süperparamanyetik nanoparçacıkların (SPION) konsantrasyon dağılımını görselleştirmeye dayanmaktadır. MPI tarayıcıları için gereken manyetik alanlar genellikle elektromıknatıslardan elde edilmektedir. Bu durum MPI tarayıcılarının çok yüksek seviyede enerji tüketmelerine yol açmaktadır. Ancak oluşturulan manyetik alan kuvvetlerinin artırılıp azaltılmasında ve görüntünün hızlı elde edilmesinde avantaj sağlamaktadırlar. Manyetik alanın üretilmesinde elektromıknatıslara alternatif olarak kullanılan kalıcı mıknatıslar ise yüksek akı yoğunlukları sağlamakla beraber herhangi bir güç kaynağına da ihtiyaç duymazlar. İstenmeyen arkaplan gürültüleri yoktur ve soğutma sistemine de ihtiyaç duymazlar. Ancak, kalıcı mıknatısların ürettiği manyetik alanların büyüklüğü, elektromanyetik mıknatısların ürettiği manyetik alanların büyüklüğüne kıyasla daha düşüktür. Bu çalışmada MPI tarayıcısının kalıcı mıknatıslarla çalışması durumunda optimum ölçülerinin tasarısı önerilmektedir. Bu tasarıda, Halbach ve ikili mıknatıs sistemlerindeki performansı etkileyen parametrelerin değişimiyle meydana gelen sonuçlardan bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Halbach dizisi, Manyetik Parçacık Görüntüleme, Dolgu Faktörü, Silindirik şekilli mıknatıs, Kare şekilli mıknatıs

Abstract

Medical imaging devices have an important place in our lives in the diagnosis of diseases. Magnetic Resonance Imaging (MRI) device is used clinically and Magnetic Particle Imaging (MPI) device is being developed. Both imaging techniques use magnetic fields. The basic mechanism of MPI technique, one of these imaging methods, is based on visualizing the concentration distribution of superparamagnetic nanoparticles (SPION) used as tracer material. Magnetic fields required for MPI scanners are usually obtained from electromagnets. This causes MPI scanners to consume very high

levels of energy. However, they provide advantages by increasing and decreasing magnetic field strengths and obtaining the image quickly. Permanent magnets, which are used as an alternative to electromagnets in the generation of magnetic fields, provide high flux densities and do not require any power source. They do not have any unwanted background noise and do not need a cooling system. However, the magnitude of the magnetic fields produced by permanent magnets is lower compared to the magnitude of the magnetic fields produced by electromagnetic magnets. In this design, the results of changing the parameters affecting the performance in Halbach and double magnet systems are mentioned.

Keywords: Halbach series, Magnetic Particle Imaging, Fill Factor, Cylindrical magnet, Square shaped magnet

1. Giriş

2005 yılında önerilen MPG (MPI) tekniği [1], tüm dünyada büyük bir ilgi ile karşılanmış ve birçok bilimsel araştırma grupları tarafından incelenmiştir [2-8]. Günümüzde kullanılmakta olan görüntüleme sistemlerinin eksikliklerini tamamlamayı vadeden bu teknik, süperparamanyetik demir-oksit nanopartiküllerin (SPION) manyetik özelliklerini kullanır [9, 10]. Manyetik nanopartiküllerin bu özelliklerinden dolayı MPI tekniği iki çeşit manyetik alana ihtiyaç duyar. Bu alanlardan birincisi merkezde manyetik alanın sıfır olduğu (manyetik alansız noktası (MAN) = Free Field Point (FFP)) ve doğrusal bir gradyan ile artış gösteren seçim alanıdır (Selection Field). İkincisi ise bu FFP noktasını hareket ettiren, sabit ve homojen özellikte bir sürücü alandır (drive field) [3, 11, 12].

MPI tekniğinin temel taşlarından olan seçim ve sürücü alanları ayarlanabilir yüksek gradyan sağladıklarından ve hızlı görüntü elde ettirdiklerinden dolayı genellikle elektromıknatıslar tarafından üretilmektedir [5, 13, 14]. Ancak elektrik akımının getirdiği maliyet, ısınma ve istenmeyen arka plan sinyalleri gibi dezavantajlardan dolayı, manyetik alanların kalıcı mıknatıslar ile yapılabilirliği test edilmiş ve bu konuda birçok araştırma yapılmıştır [3, 12, 15].

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada MPI tekniğinde seçim ve sürücü alanların kalıcı mıknatıslar ile yapılması durumunda en iyi performansın hangi parametre ölçülerinde gerçekleştiği araştırılmıştır. Bu araştırma simülasyon ortamında Comsol Multiphysics [16] programıyla yapılmıştır. Bu çalışmada silindirik ve kare olmak üzere iki tip mıknatıs kullanılmıştır. Seçim alanının mıknatıslar ile oluşturulmasında

Halbach sistemi [17-19] ve ikili mıknatıs sistemleri kullanılırken, sürücü alanın oluşturulmasında yalnızca ikili mıknatıslar kullanılmıştır.

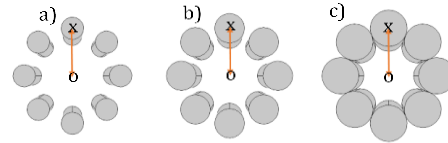
2.1. Seçim alanının oluşturulması

Seçim alanı, Halbach sistemi ve ikili mıknatıs sistemi ile oluşturuldu. Uyarım (seçim) alanı için oluşturulan ikili mıknatıs yöntemi; birbirine karşılıklı olarak konumlandırılmış kutup yönleri birbirine ters yöne doğru bakan iki mıknatısın merkezinde sıfır manyetik alan oluşturulmasına dayanmaktadır.

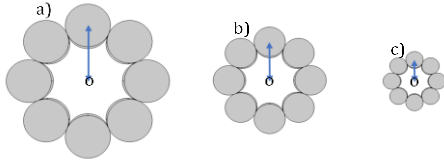
2.1.1 Halbach sistemi ile seçim alanının oluşturulması

Seçim alanının Halbach ile oluşturulması Halbach denkleminin $m = 2$ modülü ile gerçekleştirilmiştir [17-19].

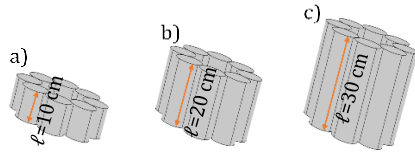
Minimum mıknatıs kütlesiyle en iyi seçim alanı performansı elde etmek için Halbach sistemindeki mıknatıs sayısı, mıknatıs uzunluğu, sistem yarıçapı, B_r faktörü (manyetik kalıntı) ve dolgu faktörü [20] parametreleri belli aralıklarla değiştirilip Comsol Multiphysics programıyla simülasyonu yapılmıştır (Şekil 1 – Şekil 3).



Şekil 1. Halbach teorisinde dolgu faktörü parametresinin incelenmesi. Turuncu ok sistem yarıçapını ifade etmektedir ve her şekilde eşit uzunluktadır.



Şekil 2. Halbach teorisinde sistem yarıçapı (mavi ok) parametresinin incelenmesi



Şekil 3. Halbach teorisinde mıknatıs uzunluğu parametresinin incelenmesi

Her bir parametrenin incelenmesinde, incelenecek parametre belli değerler arasında değiştirilirken diğer parametreler sabit bırakılmıştır. Sabit bırakılan bu parametreler referans değerler olarak adlandırılmıştır. Örneğin, dolgu faktörünün etkisinin incelenmesinde (Şekil 1) B_r faktörü, sistem yarıçapı ve mıknatıs sayısı sabit bırakılmıştır. Dolayısıyla sadece dolgu faktörüne bağlı mıknatıs çapları değişmektedir.

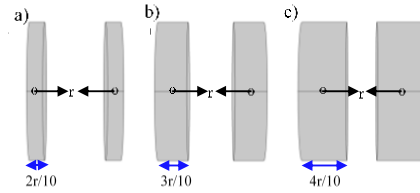
Her bir parametre 4, 8, 12 ve 16 mıknatıslı Halbach sistemlerinde denenmiştir. Referans değerleri ve parametrelerin hangi aralıklarla ne kadar değiştiği Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. 4, 8, 12, 16'lı Halbach tasarımlarında kullanılan ortalama değerler ve parametre değişimleri

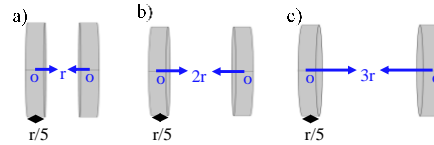
Parametre	Referans Değerleri	Parametre Aralığı	Adım Aralığı
Sistemin Yarıçapı (cm)	12.5	12.5-32.5	10
Mıknatıs Uzunluğu (cm)	10	10-30	10
Manyetik Kalıntı (B_r)(T)	1.2	1-1.4	0.2
Dolgu Faktörü (Birimsiz)	1	0.6-1	0.2

2.1.2 İkili mıknatıs ile seçim alanının oluşturulması

İkili mıknatısların uyarım alanı performansını ölçmede kare ve silindir mıknatıslar kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulacak bir mıknatıs sisteminde en iyi performansı elde etme adına belli bir yüzey alanına sahip mıknatısların (daire yüzeyli mıknatıslarda yarıçap 5 cm, kare yüzeyli mıknatıslarda birim uzunluk 10 cm) kalınlığı (Şekil 4) ve birbirine olan uzaklığı (Şekil 5) belli aralıklarla yarıçap (karede birim uzunluğun yarısı) parametresi baz alınarak değiştirilmiştir.



Şekil 4. İkili mıknatıs tasarımında mıknatıs kalınlık etkisinin incelenmesi. (a) mıknatıs kalınlığı = $2r/10$, (b) mıknatıs kalınlığı = $3r/10$ cm, (c) mıknatıs kalınlığı = $4r/10$ cm.



Şekil 5. İkili mıknatıs tasarımında iki mıknatıs arasındaki uzaklık etkisinin incelenmesi. (a) uzaklık = r , (b) uzaklık = $2r$, (c) uzaklık = $3r$.

Halbach parametrelerinde olduğu gibi her seferinde yalnızca bir parametre değiştirilirken diğer parametreler sabit bırakılmıştır. Tablo 2'de silindir ve kare geometriler için referans değerler ile referans değerler üzerinden değişen parametrelerin değişim aralığı gösterilmektedir.

Tablo 2. Seçim alanı için geliştirilen yarıçap uzunluğu $r = 5$ cm ve birim uzunluğu $2r = 10$ cm olan daire ve kare yüzeyli ikili mıknatis tasarımlarında kullanılan referans değerler ve parametre değişimleri.

Parametre	Referans Değerleri	Parametre Aralığı	Adım Aralığı
Sistemin Yarıçapı (cm)	0.7r	$r/2-3r$	12.5-32.5
Mıknatis Uzunluğu (cm)	$r/5$	$0.2r-0.5r$	$r/10$
Manyetik Kalınlı (B_r)(T)	1.2	1-1.4	0.1

2.2. Sürücü alanının oluşturulması

Halbach sistemi ile yapılan $m = 1$ modülüne sahip sürücü alanlarının FFP noktasını hareket ettirebilme kabiliyeti çok sınırlı olduğundan, bu sistem ile sürücü alanı yapılmamıştır. Sürücü alan için oluşturulan ikili mıknatis ise kutup yönleri aynı yöne bakan ve merkezinde homojen bir manyetik alan oluşturarak FFP noktasını düzgün bir şekilde hareket ettirmeye uygun manyetik bir sistemdir.

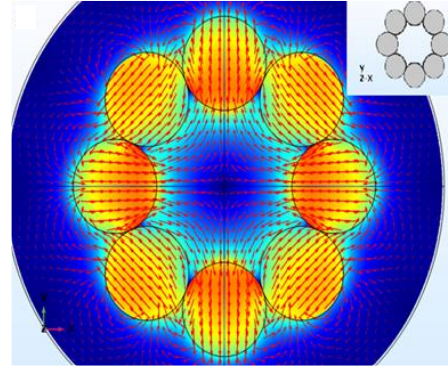
İkili mıknatis ile sürücü alan oluşturulmasında hedef, olabildiğince düzgün, güçlü ve homojen bir manyetik alan üretmektir. Böylece FFP noktası gradyanı bozulmadan yeterince uzağa hareket ettirebilecektir. Bu manyetik alan kutup yönleri 'yüzeysel' olarak aynı tarafa bakan ikili mıknatislerle (Sürücü Alan Tekniği 1 - SAT1) yapılabileceği gibi (Şekil 10) kutup yönleri 'dikeysel' olarak aynı tarafa bakan ikili mıknatislerle (Sürücü Alan Tekniği 2 - SAT2) da yapılabilmektedir (Şekil 11). Her iki yöntem de Comsol 5.4 multiphysics programıyla modellenerek simüle edilmiştir.

İkili mıknatislerin sürücü alan performansını ölçmede uyarım (seçim) alanı çalışmasında olduğu gibi kare ve silindir mıknatisler kullanılmıştır ve aynı şekilde mıknatislerin

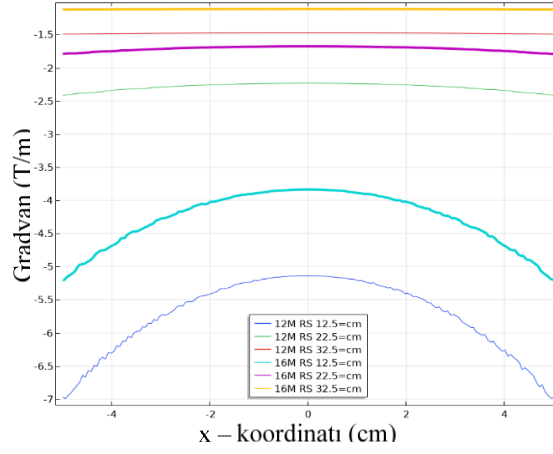
uzunluk ve B_r faktörü parametreleri değiştirilerek, sürücü alan için optimum ikili mıknatis sistemi oluşturulmaya çalışılmıştır. Parametre değişimleri ve referans parametreler FFP alanı için kullanılan parametreler ile aynı yapılmıştır (Tablo 2).

3. Bulgular

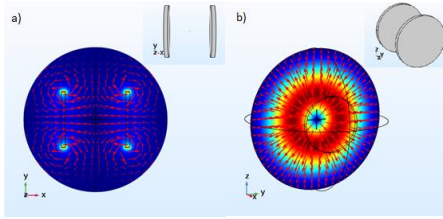
Halbach sistemlerinin ± 5 cm'deki x koordinatlarındaki manyetik akı yoğunluklarının gradyan değerleri hesaplanmıştır. Halbach sistemlerinde simetriden dolayı manyetik akı yoğunluklarında x ile y koordinatları arasında $B_x = -B_y$ ilişkisi vardır. Şekil 6'da 8 mıknatıslı Halbach sisteminin $m = 2$ modülündeki 3D manyetik akı yoğunluğu tasarım şeması gösterilmektedir. Yapılan simülasyonlarda özellikle gradyan değeri ve stabilitesine odaklanılmıştır. Şekil 7'de ise örnek olarak 12 ve 16 mıknatıslı Halbach sistemlerinin sistem yarıçapı parametresine bağlı gradyan sonuçları gösterilmektedir. Diğer parametrelerin grafikleri ve detaylı sonuçları bu alanda yapmış olduğumuz tez çalışmamızda verilmiştir [21].



Şekil 6. 8 mıknatıslı Halbach sisteminin $m = 2$ modülündeki 3D manyetik akı yoğunluğu şeması.

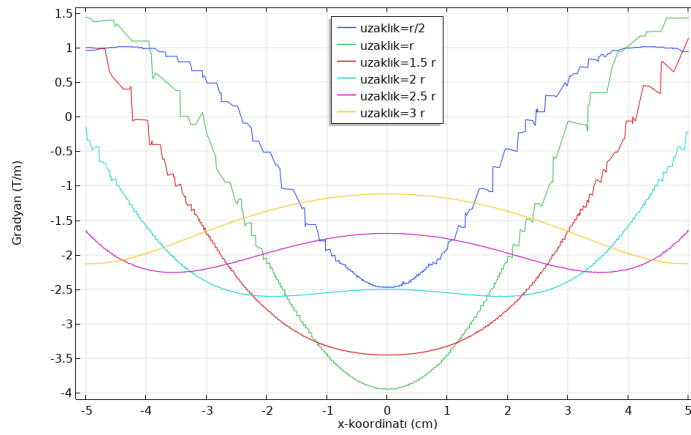


Şekil 7. 12 ve 16 mıknatıslı Halbach sistemlerinin sistem yarıçapı (RS) parametresine bağlı gradyan grafiği.



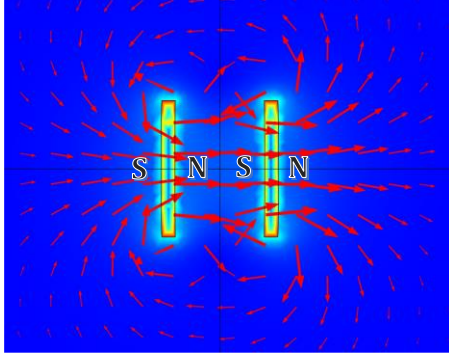
Şekil 8'de FFP için yapılan ikili mıknatıs sisteminin 3D manyetik akı yoğunluğu şeması gösterilmektedir. Şekil 9'da ise silindir ikili mıknatıs sisteminde uzaklık parametresinin manyetik akı yoğunluklarının gradyan grafiği gösterilmektedir.

Şekil 8. İkili mıknatıs sisteminin manyetik akı yoğunluklarının 3D gösterimi. (a) sistemin xy bakış açısı, (b) sistemin zy bakış açısı.

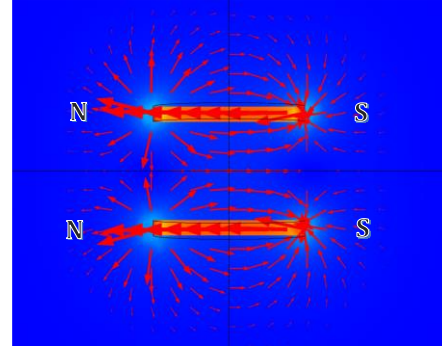


Şekil 9. İkili mıknatıs sisteminde x koordinatında uzaklık parametresinin manyetik akı yoğunluklarının gradyan değerleri.

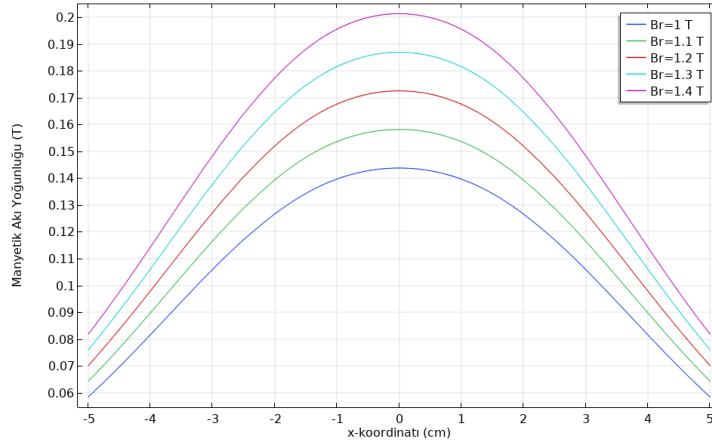
Şekil 10 ve Şekil 11'de sırasıyla SAT1 ve SAT2 kombinasyonunda yapılan simülasyonların manyetik akı yoğunluğunun 3D grafiği gösterilmektedir. Şekil 12'de ise örnek olarak SAT 1 silindirik ikili mıknatis sisteminin x koordinatının manyetik akı yoğunluğu şeması gösterilmektedir.



Şekil 10. SAT1 ikili mıknatis sisteminin manyetik akı yoğunluklarının 3D gösterimi. Bu teknikte silindirik yüzeyli mıknatislerin kutup yönleri yüzeylerine dikey doğrultudadır.



Şekil 11. SAT2 ikili mıknatis sisteminin manyetik akı yoğunluklarının 3D gösterimi. Bu teknikte silindirik yüzeyli mıknatislerin kutup yönleri yüzeylerine paralel doğrultudadır.



Şekil 12. SAT1 ile silindirik ikili mıknatis sisteminin x koordinatının manyetik akı yoğunluğu grafiği.

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan simülasyon sonuçlarına göre B_r faktörünün 1 T'dan 1.4 T'ya artması Halbach ve ikili mıknatis sistemlerinde gradyanı %40 oranında artırırken stabiliteyi azaltmıştır. Geometrik ve mıknatis parametrelerin eşit olduğu durumda mıknatis sayısının 4'ten 16'ya çıkması gradyan değerini yaklaşık 5 kat

düşürmüştür. Stabilite ise genel olarak artmıştır. Dolgu faktörünün 0.6'dan 1'e yükselmesi gradyan değerini yaklaşık olarak 3 kat artırırken gradyan stabilitesinde %40 - 50 arasında bir azalma görülmektedir.

Halbach sisteminde mıknatis uzunluklarının artması gradyan değerini ve stabilitesini artırmıştır. Mıknatis sayısına bağlı olarak

gradyan değerindeki artış %5'ten %250'ye değişmektedir. Sistem yarıçapının 12.5 cm'den 32.5 cm'ye çıkması gradyan değerini yaklaşık olarak 4 kat düşürmekle birlikte stabilitesini arttırmıştır.

Tüm sonuçları bir arada toplayacak olursak Halbach mıknatıslarında stabiliteyi belirleyen temel parametre mıknatıs uzunluğudur. Diğer parametrelerin artışı kısmi olarak stabiliteyi azaltsa da yüksek mıknatıs uzunluğu bu düşüşü maliyet/performans açısından karşılayabilmektedir [21]. Gradyan açısından ise maksimum FFP performansı için maksimum dolgu faktörü ve B_r faktörü gerekirken minimum sistem yarıçapı gerekmektedir.

Seçim alanı için tasarlanan ikili mıknatıs sonuçlarına göre gradyan açısından x ile y koordinatı arasında $G_x = 2G_y$ ilişkisi olduğu görülmektedir (beklendiği gibi). Stabilite açısından ise y koordinatının stabilitesi x koordinatına göre yaklaşık %30 daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca kalınlığın artmasının gradyan değerini tüm durumlarda doğrusal olarak arttırdığı, gradyan stabilitesini ise azalttığı görülmüştür.

Uzaklık parametresinde ise her iki geometride uzaklığın $r/2$ 'den r 'ye artması gradyan değerini arttırırken, r 'den $1.5r$ 'ye artması gradyan değerini azaltmaktadır. Bunun yanında silindirik yüzeyli ikili mıknatıs sisteminde gradyan değeri için r cinsinden optimum uzaklık değeri her iki koordinatta $1r$, kare yüzeyli için ise $1.1r$ 'dir. Gradyan stabilitesi için ise r cinsinden en optimum uzaklık değeri her iki koordinatta $1.8r$, kare yüzeyli için ise $2r$ olduğu görülmüştür.

Sürücü alan için tasarlanan ikili mıknatıs sistemlerinde kalınlığın artmasının her iki kombinasyonda ve geometride manyetik akı yoğunluğunu doğrusal olarak arttırdığı görülmüştür. Buna rağmen stabilite ise SAT1'de ve SAT2'nin silindirik geometrisinde devamlı olarak azalmakta, SAT2'nin kare geometrisinde ise kalınlığın $4r/10$ 'dan $5r/10$ değerine geçişte stabilitede bir artış görülmüştür.

Uzaklık parametresinde ise SAT1'de iki mıknatıs arasındaki uzaklığın silindirik yüzeyli ikili mıknatıslarda $0.7r$ değerine, kare yüzeyli için ise $0.8r$ değerine kadar artması manyetik akı yoğunluğunu arttırmakta bundan sonra ise düşürmüş olduğu görülmüştür. SAT2'de ise en yüksek manyetik akı yoğunluğu uzaklığın artmasına bağlı olarak sürekli düştüğü görülmüştür.

SAT1'de stabilizenin optimum olduğu uzaklık durumu silindirik ve kare geometride $1.1r$ olarak bulunmuştur. SAT2'de ise manyetik akı yoğunluğu stabilitesi $0.5r$ 'den r 'ye sürekli artış olduğu görülmüştür.

Bu simülasyon ortamında tasarlanan mıknatıs sisteminin deneysel çalışmaları ayrıca yapılacaktır.

Son not olarak; Halbach sisteminin kullanılmasıyla yapılan bu çalışma kalıcı mıknatıslar ile yapılmıştır. Dolayısıyla günümüzdeki mıknatıs sistemlerini göz önüne aldığımızda insan bedeninin tam taramasının yapıldığı boyutlarda (yaklaşık 70 cm oyuk boşluğu ve 1.5 m uzunluk), toplamda çok yüksek mıknatıs kütlelerinin (4 ton üzerinde) gerekmesi bu sistemler için bir dezavantaj olarak söylenebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje numarası: 115E776 & 115E777).

Kaynakça

- [1] B. Gleich and J. Weizenecker, "Tomographic imaging using the nonlinear response of magnetic particles," *Nature*, vol. 435, pp. 1214-1217, 2005.
- [2] A. Meola, J. Rao, N. Chaudhary, G. Song, X. Zheng, and S. D. Chang, "Magnetic Particle Imaging (MPI) in Neurosurgery," *World neurosurgery*, 2019.
- [3] M. Weber, J. Beuke, A. von Gladiss, K. Gräfe, P. Vogel, V. C. Behr, et al., "Novel field geometry using two

Halbach cylinders for FFL-MPI," *Intern. J. Magnetic Particle Imaging*, vol. 4, p. 1811004, 2018.

- [4] Z. W. Tay, D. W. Hensley, E. C. Vreeland, B. Zheng, and S. M. Conolly, "The relaxation wall: experimental limits to improving MPI spatial resolution by increasing nanoparticle core size," *Biomedical physics & engineering express*, vol. 3, p. 035003, 2017.
- [5] E. E. Mason, C. Z. Cooley, S. F. Cauley, M. A. Griswold, S. M. Conolly, and L. L. Wald, "Design analysis of an MPI human functional brain scanner," *International journal on magnetic particle imaging*, vol. 3, 2017.
- [6] M. Straub, S. Hubertus, F. Kiessling, and V. Schulz, "MPI field generator design for an FFL based image acquisition," in *2015 5th International Workshop on Magnetic Particle Imaging (IWMP)*, 2015, pp. 1-1.

- [7] N. Panagiotopoulos, R. L. Duschka, M. Ahlborg, G. Bringout, C. Debbeler, M. Graeser, *et al.*, "Magnetic particle imaging: current developments and future directions," *International journal of nanomedicine*, vol. 10, p. 3097, 2015.
- [8] M. Ergor, A. Olamat, N. Dogan, and A. Bingolbali, "Nested Halbach Arrays of Rectangular, Cylindrical, and Polygonal Magnets Optimize the Field-Free Line in Magnetic Particle Imaging," *IEEE Magnetism Letters*, vol. 12, pp. 1-5, 2021.
- [9] S. M. Dadfar, D. Camozzi, M. Darguzyte, K. Roemhild, P. Varvarà, J. Metselaar, *et al.*, "Size-isolation of superparamagnetic iron oxide nanoparticles improves MRI, MPI and hyperthermia performance," *Journal of nanobiotechnology*, vol. 18, pp. 1-13, 2020.
- [10] S. Lyer, T. Knopp, F. Werner, J. Zaloga, R. Friedrich, L. Trahms, *et al.*, "Multifunctional SPIONs for Theranostics in Cancer," *International Journal on Magnetic Particle Imaging*, vol. 4, 2018.
- [11] T. Knopp and T. M. Buzug, *Magnetic particle imaging: an introduction to imaging principles and scanner instrumentation*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] J. Konkle, P. Goodwill, and S. Conolly, "Development of a field free line magnet for projection MPI," in *Medical Imaging 2011: Biomedical Applications in Molecular, Structural, and Functional Imaging*, 2011, p. 79650X.
- [13] M. Ütkür and E. U. Saritas, "Comparison of different coil topologies for an MPI relaxometer," in *2015 5th International Workshop on Magnetic Particle Imaging (IWMPi)*, 2015, pp. 1-1.
- [14] G. Bringout, H. Wojtczyk, W. Tenner, M. Graeser, M. Grüttner, J. Haegeler, *et al.*, "A high power driving and selection field coil for an open MPI scanner," in *2013 International Workshop on Magnetic Particle Imaging (IWMPi)*, 2013, pp. 1-1.
- [15] C. B. Anna, S. Jonas, B. Peter, G. Ksenija, A. Mandy, and M. B. Thorsten, "A concept for a magnetic particle imaging scanner with Halbach arrays," *Physics in Medicine & Biology*, 2020.
- [16] <https://www.comsol.com/>.
- [17] P. V. Trevizoli, J. A. Lozano, G. F. Peixer, and J. R. Barbosa Jr, "Design of nested Halbach cylinder arrays for magnetic refrigeration applications," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 395, pp. 109-122, 2015.
- [18] Q. Chen, G. Zhang, Y. Xu, and X. Yang, "Design and simulation of a multilayer Halbach magnet for NMR," *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering*, vol. 45, pp. 134-141, 2015.
- [19] P. Blümli, "Permanent Magnet System for MRI with Constant Gradient mechanically adjustable in Direction and Strength," *arXiv preprint arXiv:1510.02772*, 2015.
- [20] F. Balci, A. Bingolbali, N. Dogan, and M. Irfan, "Optimization of Fill Factor Equation in Halbach Design," *Technical Physics Letters*, vol. 47, pp. 158-161, 2021.
- [21] F. Balci, "Manyetik Parçacık Görüntüleme Sistemi İçin Miknatıs Tasarımı," Yıldız Technical University, 2020.