



Süperiletken Manyetik Yataklı Doğrusal Fırlatıcı Sistemi için H-Formülü Yöntemi ile Manyetik Ray Konfigürasyonu Tasarımı

Sinan Başaran^{1*}, Mutlu Altıncılıç², Ali Suat Yıldız³

^{1*} Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-3783-2260),
sinan.basaran@bilecik.edu.tr

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-4989-0131),
maltinkilic@gmail.com

³ Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-6914-5222),
suat@sivas.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 22 Şubat 2021 ve Kabul Tarihi 17 Nisan 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.884362)

ATIF/REFERENCE: Başaran, S., Altıncılıç, M., & Yıldız, A. S. (2021). Süperiletken Manyetik Yataklı Doğrusal Fırlatıcı Sistemi için H-Formülü Yöntemi ile Manyetik Ray Konfigürasyonu Tasarımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 742-749.

Öz

Süperiletken malzemeler kullanılarak oluşturulan sistemlerde deneysel yapının kurulmasından önce sistemin hareketine bağlı levitasyon kuvveti gibi spesifik karakteristiklerini gözlemlemek ve tasarımı şekillendirmek için çeşitli analitik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Maxwell denklemleri üzerinden elde edilen bu analitik yaklaşımlar ile kalıcı mıknatıs ve süperiletken malzeme arasındaki etkileşimi modelleme mümkün olmaktadır. Bu çalışmada manyetik alanın analitik olarak modellenmesini sağlayan H-formülasyonu yöntemi ile süperiletken manyetik yataklı doğrusal fırlatıcı sistemi için manyetik ray konfigürasyonu sunulmuştur. Bu çalışmada ele alınan sistemde insansız hava araçları için fırlatıcı olarak kullanılabilecek yapıya sahip doğrusal bir ivmelendirici sisteminin yataklanmasının süperiletken manyetik yataklar yardımı ile temassız bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Dolayısı süperiletken ve manyetik ray arası etkileşimin incelenmesi ve levitasyon kuvvetlerinin hesaplanması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Süperiletken manyetik yatak, Doğrusal fırlatıcı, H-formülü.

Magnetic Rail Configuration Design with H-Formulation Method for Superconducting Magnetic Bearing Linear Launcher System

Abstract

Various analytical approaches have been used in the superconducting levitation system before the experimental application stage to observe specific behavior such as displacement depending on force characteristic. The interaction between the permanent magnet and superconducting material can be modelled with these analytical approaches derived from Maxwell's equations. In this study, the H-formulation method that uses an analytic form of the magnetic field is presented for the magnetic rail configuration of a superconducting magnetic bearing linear launcher system. The system addressed in this study is aimed to realize the contactless bearing of a linear accelerator system that can be used as a launcher for unmanned aerial vehicles including a superconducting magnetic bearing. Therefore, the interaction between the superconductor and magnetic rail should be examined and also resulting force characteristics should be derived.

Keywords: Superconductive magnetic bearing, Linear launcher, H-formulation.

* Sorumlu Yazar: sinan.basaran@bilecik.edu.tr

1. Giriş

Her ne kadar manyetik levitasyon çok yeni bir konsept olmasada, yüksek maliyet nedeniyle, günlük hayatta uygulama olarak sadece birkaç çeşit örneği vardır. Yıllar içerisinde süperiletken manyetik yataklama ve buna bağlı uygulamalarda birçok gelişme olmaktadır. Bu gelişmeler birkaç ana başlık altında toplanabilir. Süperiletken yataklama alanındaki gelişmelerin ilki kriyostat gelişmeleri olarak nitelendirilebilir.

Süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki etkileşim basitçe şu şekilde açıklanabilir. Kalıcı mıknatıs bir süperiletkene yaklaştırıldığında süperiletken içerisinde mıknatıstan kaynaklanan bir diyamanyetik görüntü oluşur. Süperiletken bu haldeyken kritik sıcaklığın altına soğutulduğunda bu diyamanyetik görüntü süperiletken içinde hapsolür. Bu halde süperiletken bir manyetik alana maruz kaldığında, bu manyetik alan süperiletken tarafından tamamen itilir. Bunun bir sonucu olarak bir kalıcı mıknatıs, süperiletkene yaklaştırıldığında kararlı bir manyetik levitasyon elde edilir. Bu kararlı manyetik levitasyonun korunabilmesi için kritik sıcaklığın aşılması gerekmektedir. Günümüzde bu alanda kullanılan YBCO (İtriyum Baryum Bakır Oksit) tipi süperiletkenlerin soğutulması için sıvı nitrojen ve kriyostatlar kullanılmaktadır. 2002 yılında ilk üretilen kriyostatlar ile 0.3 kg ağırlığında yük bir saatten az bir süre levite edilirken 2016 yılına gelindiğinde tek bir kriyostat ile 350 kg ağırlığında bir yük 24 saate yakın bir süre levite edilebilmektedir.(Floegel-Delor vd., 2018)

Kriyostatın taşıma kapasitesi kullanılan süperiletkenin miktarına ve sıcaklığına, taşıma süresi ise gerçekleştirilen ısı yalıtıma bağlıdır. Günümüzde kullanılan gelişmiş kriyostat sistemlerinde, sıvı azot bakır bir hazne içerisinde muhafaza edilmektedir. Bakırın yüksek ısı iletimi sebebiyle süperiletken, sıvı azota temas etmeden soğutulabilmektedir. Kriyostatın dış yüzeyi ise paslanmaz çelikten levhalarla kaplanmıştır. Bakır gövde ve paslanmaz çelik gövde arasındaki hava vakumlanarak, yayılım yoluyla ısı alverişi engellenmeye çalışılmıştır. Sıvı azotun kaynama sıcaklığı düşük olduğundan sistemdeki sıvı azot buharlaşma yoluyla sürekli olarak azalmaktadır. Paslanmaz çelik gövdeden bakır gövdeye giden paslanmaz çelik dolun kanalları sayesinde sisteme dışarıdan sıvı azot nakli yapılabilmektedir. Her ne kadar kriyostat ısı alverişini engellemeye çalışsa da bunu mükemmel olarak yapması mümkün değildir ve kriyostatın dış yüzeyi de epey düşük sıcaklıklara düşmektedir. Bu da ortamda bulunan nemli havanın kriyostat yüzeyinde yoğunlaşmasına ve çığlenmeye neden olacaktır. Kriyostat dış yüzeyinin paslanmaz çelik malzemeden imal edilmesinin nedeni de hem sıcaklık farkından dolayı kriyostat dış yüzeyinde yoğunlaşan havanın korozyon etkisini ortadan kaldırmak hemde kriyostatın manyetik ray ile etkileşime girmesini engellemektir. Eğer korozyon oluşursa çelik malzeme aşınacak ve vakumlanmış bölgeye hava hücum edecektir. Bu da izolasyonun tamamen ortadan kalkmasına ve sıvı azotun hızlı bir şekilde buharlaşıp kritik sıcaklığın aşılmasına neden olacaktır. Bu çalışmaya konu olan kriyostat tasarımında ise vakum izolasyon kullanılmayacaktır. Dış gövdede paslanmaz çelik yerine korozyona karşı dirençli ve kriyojenik sıcaklıklarda yüksek mekanik özellik gösteren PEEK polimer malzeme, vakum izolasyon yerine de yalıtım battaniyeleri ile kriyostat tasarımı yapılmıştır. Üretilen kriyostat, vakumlu kriyostat kadar uzun süre çalışması ve sıvı azotu muhafaza etmesi beklenemez

ancak deney esnasında süperiletkeni kritik sıcaklığın altında tutacak seviyede ısı yalıtım sağlaması beklenmektedir.

Süperiletken manyetik yataklamadaki bir başka gelişmede süperiletkenlerin üretim süreçlerindeki gelişim olarak sınıflandırılabilir. Ancak bunlar çoğunlukla malzeme ile ilgili gelişmeler olduğundan çok fazla değinilmeyecektir. Her ne kadar günümüzde kritik sıcaklığı 250K olan süperiletken üretilmiş olsa da bu süperiletken çok yüksek basınç altında süperiletken olma özelliğini korumaktadır ve mühendislik olarak bir değeri yoktur (Drozdov vd., 2019). Günümüzde mühendislik alanında YBCO tipi süperiletkenler kullanılmaktadır. Bu süperiletkenlerde itriyum, baryum, bakır ve oksijenden oluşan seramiklerdir. YBCO tek tip bir süperiletken değildir ve değişik süperiletkenlerde bu elementler değişik miktarlarda bulunmaktadır.

Süperiletken yataklamadaki son gelişimde bu çalışmaya da konu olmuş kalıcı mıknatısların diziliminde gerçekleşmektedir. Manyetik levitasyonun oluşması için gereken manyetik alan ve bu manyetik alanların oluşturduğu kuvvet daha önce yapılan bir çok çalışmayla belirlenmiştir (Basaran ve Sivrioglu, 2017a; Ozturk vd., 2019; Yang ve Zheng, 2007). Kalıcı mıknatıs manyetik alanının şiddeti ne kadar fazla ise levitasyonun oluşturulabileceği süperiletken kalıcı mıknatıs mesafesi de artacaktır. Düşük manyetik alanlarda artan mesafe ile levitasyon ortadan kaybolacaktır. Manyetik levitasyonu içinde bulunduran sistem çalışma esnasında mekanik titreşimlere veya başka bozucu etkenlere maruz kalabilir. Bu sebeple mıknatıs ve süperiletken arasındaki mesafenin fazla olması ve korunabilmesi önemlidir. Mıknatıs dizilimindeki bir başka önemli nokta ise süperiletken üzerindeki manyetik alan şiddetinin farklı mıknatıs dizilimleri ile değiştirilebilmesidir. Örneğin neodyum mıknatısların yüzeyindeki manyetik alan mıknatısın büyüklüğünden bağımsız olarak 0.5 tesla civarındadır. Ancak süperiletken ve mıknatıs arasındaki levitasyon kuvveti mıknatıs yüzeyindeki ortalama manyetik alanla doğru orantılıdır. Her ne kadar mıknatısın yüzeyindeki azami manyetik alan değiştirilemez olsada mıknatısların farklı dizilimi ile ortalama manyetik alan değiştirilebilir ve oluşan kuvvet de buna göre değişir.

Yüksek sıcaklık süperiletken (YSS)-Kalıcı mıknatıs (KM) etkileşimini ifade etmek için bazı modelleme araçlarının kullanılması gerekmektedir. Bu araçlar arasında, analitik modeller, belirli varsayımlar altında basit geometriler için kullanılabilir. Daha karmaşık bir yapı için, YSS ve KM arasındaki etkileşimi açıklamak için Maxwell denklemlerinden türetilen sayısal yöntemlerin kullanılması gereklidir. Manyetik alana dayalı H-formülasyonu, hesaplama hızı ve ticari FEM yazılımları ile uygulanabilirliği gibi kolaylıkları nedeniyle levitasyon davranışını modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. H-formülasyon ile modellenecek yapı bir sonlu elemanlar çözüm yazılımı olan COMSOL Multiphysics ile çözdürülecektir. Bu alanda daha önce benzer ama öncü çalışmalar da bulunmaktadır (Sass vd., 2015). Sass vd. gerçekleştirdiği bu çalışmada süperiletken manyetik alan içinde ve manyetik alansız soğutulmuş ve tek parça kalıcı mıknatısla etkileşimi farklı mesafelerde incelenmiştir. Bu çalışmada ise süperiletken 4 kalıcı mıknatıstan oluşan sistemin etkisiyle manyetik alan içinde soğutulacak ve H-formülasyon kullanılarak süperiletken ve mıknatıslar arasındaki etkileşim modellenecektir.

Bu çalışmaya konu olan projede süperiletken manyetik fırlatıcı tasarlanması hedeflenmektedir. Manyetik fırlatıcı hali

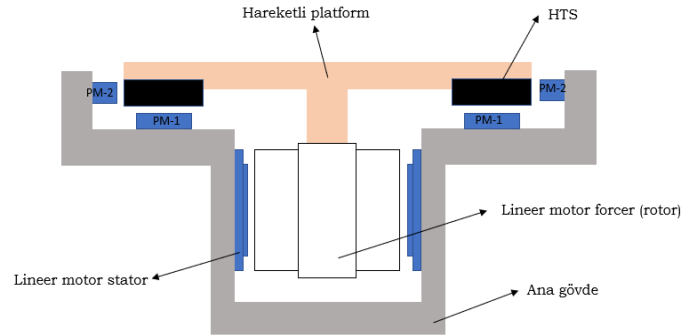
hazırda kullanılan fırlatıcılara göre birçok avantajı bulunmaktadır. Manyetik fırlatıcılar, geleneksel fırlatıcılara göre çok daha yüksek hızlara ulaşabilmektedir ayrıca manyetik fırlatıcılar geleneksel fırlatıcıların aksine tamamen otomatik olarak çalışabilmektedir. Daha önce süperiletken manyetik fırlatıcılar üzerine çalışmalar olmuştur (Kozdraš ve Sibilska-mroziewicz, 2017). Ancak her ne kadar amaç aynı olsada önceki çalışmada kurulan sistem ve projeye konu olan sistem arasında farklar bulunmaktadır. Polonya’da daha önce çalışılan sistemde pod adı verilen ufak sistemlerden oluşmaktadır. Her bir podda dört adet süperiletken, sıvı nitrojen kabı ve duralumin dış yüzeyden oluşmaktadır. Ayrıca podların alt yüzeyi süperiletkenleri darbelerden korumak için karbon fiber ile kapatılmıştır. Sistemde iki adet birbirine paralel mıknatıs yolu bulunmaktadır. Her bir mıknatıs yolu yanyana üçerli halde dizilmiş sıra mıknatıslardan oluşmaktadır podlar bu mıknatıs yolunun üzerinde hareket etmektedir ve podlar ayrıca insansız hava aracını taşıma işini de üstlenmiştir. Polonya’da çalışılan sistemin projede tasarlanan sistemden bazı farkları bulunmaktadır. Öncelikle Polonya’daki sistemde 21mm çapında ve 8mm kalınlığında dairesel süperiletkenler kullanılmışken projede, çok yüzeyli levitasyon konsepti sebebiyle 40mmx40mmx13mm boyutlarında kare prizma süperiletken kullanılacaktır. Polonya’daki sistemde yollar sadece üçerli mıknatıs yolu vardır dolayısıyla mıknatıs ve süperiletken arasında tek yüzeyli iletişim vardır. Projede tasarlanan sistemde yatay mıknatıs yolu dışında süperiletkenlerin yan yüzeyine etki edecek ikinci bir yol daha bulunmaktadır. Bu sayede süperiletken ve mıknatıslar arasında çok yüzeyli etkileşim hedeflenmektedir. Çok yüzeyli etkileşim ile yanal eksende, Polonya’daki sisteme göre daha yüksek bir katılık elde edilir, bu da projedeki sistemin yanal eksenlerden gelecek bozukluklara karşı daha karalı bir yapıda olacağını gösterir. Mıknatıs ve süperiletken arasında ki çoklu yüzey etkileşimi üzerine çalışmalar da bulunmaktadır (Sivrioglu vd., 2016), (Sivrioglu vd., 2018), (Ozturk vd., 2020).

2. Süperiletken Manyetik Yataklı Fırlatıcı Sistemi

Hedef uçak veya insansız hava aracı gibi yapısı gereği kalkış sistemi bulunmayan araçlarda kalkışı bir fırlatıcı sayesinde gerçekleştirilmektedir. İnsansız hava araçları için genel olarak mekanik tipte bir fırlatıcı sistem kullanılmaktadır (Novaković ve Medar, 2013). Mekanik fırlatıcı sistemlerde hava aracının kalkış hızı sabit olmakta olup gerekli ivme ve hız kontrolü yapılamamaktadır. Burada hava aracının fırlatılması pnömatik bir sistem yardımı ile yapılmaktadır. Burada hava aracına uygulanan pnömatik kuvvet büyüklüğü kalkış hızını belirlemektedir. Uygulanan pnömatik kuvvette herhangi bir geri besleme sistemi olmadığı için, hava aracına zarar vermeyecek büyüklükte olmalıdır. Buradan yola çıkarak daha kontrollü kalkışlar için son yıllarda yapılan çalışmalarda mekanik fırlatma sistemlerine alternatif olarak elektromanyetik fırlatıcı tasarımları yapılmaktadır (Fahlstrom ve Gleason, 2012). Elektromanyetik fırlatıcılar sayesinde hava araçları daha kısa mesafelerden hızlandırılarak kalkış yapılması sağlanmakta ayrıca ivme ve kalkış hızının manyetik fırlatıcı ile kontrol edilmesi ile farklı tipte ve ortamda kalkış işleminin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Tipik bir elektromanyetik fırlatıcı sistemi lineer motor prensibi ile çalışmaktadır. Dolayısı ile motora uygulanan geri beslemeli kontrol sayesinde daha kontrollü hava aracı kalkışları yapılabilmekte ve klasik yöntem nazaran hava aracı gövdesine zarar verme olasılıkları minimize edilmektedir. Elektromanyetik

fırlatıcıların bir diğer avantajı ise klasik sistemlere göre daha az yer kaplaması ve operasyonel maliyetlerinin daha düşük olmasıdır (Kondratiuk ve Ambroziak, 2016; Reck, 2003). Elektromanyetik fırlatıcılar, hava aracını fırlatmak için bir pist boyunca bir vagonu iten elektrik akımı ile çalışan doğrusal bir endüksiyon motorunu (linear induction motor) kullanırlar. Fırlatma işlemi tamamlandıktan sonra fırlatıcı vagon kablo yardımı ile geri çekilerek ilk konumuna getirilmektedir. Uçak gemisi gibi yapılarda savaş uçaklarını fırlatmak için gereken enerji miktarı yüksek olmasına karşın uçak gemisinin hareketi için gereken güce nazaran epey düşük bir miktardadır. Elektromanyetik fırlatıcı sisteminin insansız hava araçları için kullanıldığı daha küçük ve daha az enerji tüketen bir sistem tasarlanabilir. Geri beslemeli kontrol için lineer motorun konumu hall etkili bir sensör yardımı ile kontrol edilmektedir.

Klasik mekanik fırlatıcı sistemler mevcut dezavantajları sebebi ile yerini elektromanyetik fırlatıcılara bırakmaktadır. Süperiletken manyetik yatakların temassız olarak yataklamayı sağladığı elektromanyetik fırlatıcı tasarımı henüz çalışılmamış bir konudur. Bu çalışmada laboratuvar ölçekli süperiletken manyetik yataklı doğrusal fırlatıcı sistem tasarımı önerilmektedir. Bu yapı her ne kadar laboratuvar ölçekli olsa da (tahmini boyu 1,5 metre) aynı zamanda küçük ve orta ölçekli insansız hava araçlarını fırlatabilecek kapasitede olacaktır. Bu yapı aynı zamanda süperiletken manyetik yatakların farklı ivmelenme durumlarındaki davranışlarını inceleyeceği için daha büyük ölçekli manyetik levitasyonlu yolcu taşıma sistemleri gibi projeler için bir ön hazırlık ve bilgi birikimi oluşturacaktır.



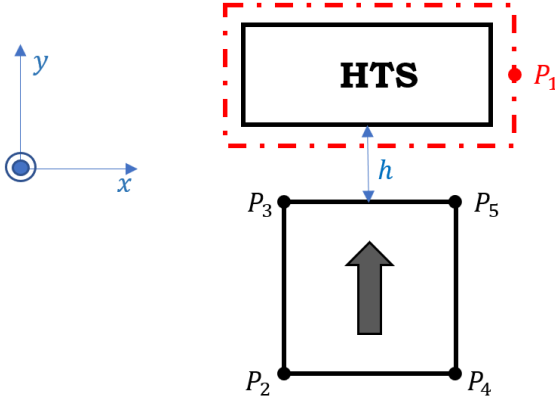
Şekil 1. Süperiletken manyetik yataklı fırlatıcı şematik görünüşü.

Şekilde verilen yapı fırlatılacak yükün taşındığı platformun süperiletken manyetik yatakla levite edildiği ve doğrusal hareketin lineer motorla sağlandığı bir elektromanyetik fırlatıcı sistemi tasarımını kapsamaktadır. Ayrıca süperiletken malzemeler genel olarak literatürde tek bir yüzey üzerinde sabit mıknatıslar ile levite edilmektedir. Bu yapıda ise süperiletken malzemenin aktif yüzeyi olarak hem alt yüzeyi hem de yan yüzeyi kullanılacaktır (Şekil 1). Çok yüzeyli levitasyon (Basaran ve Sivrioglu, 2017b; Sivrioglu vd., 2016) ismi verilen bu yapı ayrıca tek bir süperiletken malzemenin elde edilebilecek katılık değerini arttıracak ve lineer hareket esnasından yanal yüklerin bastırılmasını kolaylaştıracaktır.

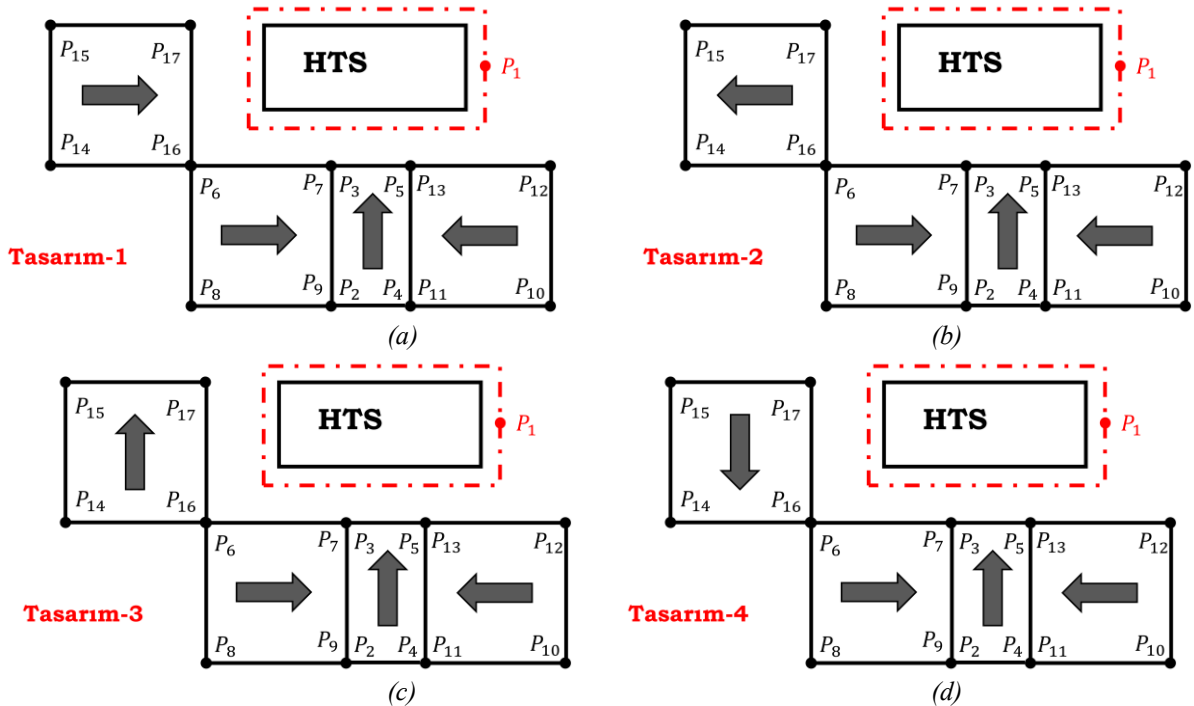
3. H-formülasyon Yöntemi

Manyetik alan (H) zamanı bağılı olarak analitik elde edilebilmektedir. Dolayısı ile süperiletken malzeme ile sabit mıknatıs arasındaki etkileşimi tanımlamak için en etkin yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Elde edilen manyetik alan analitik ifadesi sonlu elemanlar yöntemi ile süperiletken sabit mıknatıs arasındaki zamana bağılı olarak

oluşan manyetik kuvvetin hesaplanması için kullanılmaktadır. Süperiletken fazına giren bir malzeme manyetik bir alan içerisine girdiği zaman kendisini denge noktasına itecek şekilde bir kuvvet oluşumuna sebep olur. Şekil 2’de tek bir sabit mıknatıs ve süperiletken malzeme arasında oluşan manyetik alanın analitik fomülünde kullanılacak geometrik konumlar gösterilmektedir. Bu şekilde süperiletken malzemenin sınır tabakası onun etrafını saran ince hava bölgesinden oluşmaktadır. Dolayısı ile birinci geometrik nokta olarak bu sınır tabakası üzerindeki herhangi bir nokta kabul edilebilir. Sabit mıknatıstan kaynaklanan ve bu sınır tabaka üzerine etki eden manyetik alan zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanması gerekmektedir. Bilindiği üzere manyetik alan vektörel bir büyüklüktür ve kartezyen koordinatlarda büyüklüğü ve yönü tanımlanabilir. Ayrıca buradaki manyetik alan sabit mıknatısın mıknatıslanmasının (M_0) bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Şekil 2’de verilen sistem dikkate alınarak sanit mıknatıstan kaynaklına x ve y yönündeki manyetik alan ifadeleri Biot-Savart yasaları kullanılarak ifade edilebilir. Bu ifadeler denklem (1) ve (2)’de verildiği gibidir.



Şekil 2. Bir süperiletken ve kalıcı mıknatıstan oluşan manyetik yatağın temsili gösterimi.



Şekil 3. Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemi ve yanal sabit mıknatıs konfigürasyonu.

$$H_x = \frac{M_0}{4\pi} \ln \frac{[\Delta y_{13}^2 + \Delta x_{13}^2][\Delta y_{14}^2 + \Delta x_{14}^2]}{[\Delta y_{12}^2 + \Delta x_{12}^2][\Delta y_{15}^2 + \Delta x_{15}^2]} \quad (1)$$

$$H_y = \frac{M_0}{2\pi} \operatorname{atan} \left(\frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}} \right) - \frac{M_0}{2\pi} \operatorname{atan} \left(\frac{\Delta y_{13}}{\Delta x_{13}} \right) - \frac{M_0}{2\pi} \operatorname{atan} \left(\frac{\Delta y_{14}}{\Delta x_{14}} \right) + \frac{M_0}{2\pi} \operatorname{atan} \left(\frac{\Delta y_{15}}{\Delta x_{15}} \right) \quad (2)$$

Burada Δx_{1i} ve Δy_{1i} ($i = 2,3,4,5$), P_1 noktasının kalıcı mıknatıs köşe noktalarına göre zamanla değişen koordinatlarını ifade etmektedir. Maxwell denklemleri, COMSOL kısmi diferansiyel denklemler modülü kullanılarak çözülebilir. Bu modülde, YSS, bir güç yasası ile elde edilen doğrusal olmayan dirençli bir alan olarak modellenmiştir. Lineer olmayan direnç ifadesi ρ_{sc} , $E - J$ güç yasasından türetilir.

$$\rho_{sc} = \frac{E_c}{J_{c(B)}} \left| \frac{J}{J_{c(B)}} \right|^{n-1} \quad (3)$$

Kritik akım yoğunluğu ve manyetik alan arasındaki ilişki ise denklem (3)'de verilmiştir.

$$J_c = J_{c0} \exp \left(-\frac{|H|}{H_0} \right) \quad (4)$$

Levitasyon kuvveti ise denklem (5)'de verilen Lorentz kuvvet formülü ile ifade edilir.

$$F_{y,x} = l \mu_0 \int_S J_z H_{x,y} dS \quad (5)$$

Burada H_x ve H_y bir önceki denklem (1) ve (2)'de hesaplanan manyetik alan komponentleridir, J_z ise süperiletken içerisindeki akım yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu ifade denklem (6) ile verilmiştir

$$J_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (6)$$

4. Manyetik Ray Tasarımı

Süperiletken manyetik yataklı lineer fırlatıcı düzeneğinde kullanılacak olan sabit mıknatıs ray tasarımları ve bu tasarımlara ait çok yüzeyli manyetik akı yoğunluğu hesabı bu çalışmada sunulmuştur. Şekil 3'te süperiletken ve olası sabit mıknatısların

konfigürasyonları verilmiştir. Burada yanal kılavuz ray için olası 4 farklı durum incelenmiştir. Sonuçlar deneysel sistemde süperiletken malzemenin soğutulması planlandığı CH=5 mm mesafesi için süper iletkenin alt yüzeyi temsil eden doğru boyunca elde edilmiştir.

4.1. Süperiletken Üzerindeki Manyetik Alan

Birinci durum, yanal sabit mıknatısın polarizasyon yönünü +x yönünde olduğu konfigürasyon için Bölüm 3'te anlatılan yaklaşım ile elde edilen manyetik alan analitik ifadeleri x ve y yönleri için sırası ile denklem (7) ve (8)'de elde edilmiştir.

$$H_{y_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{y-y_2}{x-x_3} - \operatorname{atan} \frac{y-y_3}{x-x_3} + \operatorname{atan} \frac{y-y_5}{x-x_5} - \operatorname{atan} \frac{y-y_4}{x-x_5} \right] + \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_6)^2+(y-y_7)^2}{(x-x_7)^2+(y-y_7)^2} + \ln \frac{(x-x_9)^2+(y-y_9)^2}{(x-x_8)^2+(y-y_9)^2} + \ln \frac{(x-x_{11})^2+(y-y_{11})^2}{(x-x_{10})^2+(y-y_{11})^2} + \ln \frac{(x-x_{12})^2+(y-y_{13})^2}{(x-x_{13})^2+(y-y_{13})^2} + \ln \frac{(x-x_{15})^2+(y-y_{15})^2}{(x-x_{14})^2+(y-y_{16})^2} + \ln \frac{(x-x_{17})^2+(y-y_{17})^2}{(x-x_{14})^2+(y-y_{16})^2} \right] \quad (7)$$

$$H_{x_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{x-x_{10}}{y-y_{11}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{11}}{y-y_{11}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{13}}{y-y_{13}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{12}}{y-y_{13}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_7}{y-y_7} - \operatorname{atan} \frac{x-x_6}{y-y_7} + \operatorname{atan} \frac{x-x_8}{y-y_9} - \operatorname{atan} \frac{x-x_9}{y-y_9} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{14}}{y-y_{14}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{15}}{y-y_{14}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{17}}{y-y_{17}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{16}}{y-y_{16}} \right] + \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}{(x-x_3)^2+(y-y_2)^2} + \ln \frac{(x-x_5)^2+(y-y_4)^2}{(x-x_5)^2+(y-y_5)^2} \right] \quad (8)$$

Burada x_{1i} ve y_{1i} ($i = 2,3, \dots, 17$), $P_1(x,y)$ noktasının kalıcı mıknatıs köşe noktalarına göre zamanla değişen koordinatlarını ifade etmektedir (Şekil 3(a)).

Tasarım-2 için verilen numaralandırılmış ray geometrisi Şekil 3(b)'de gösterilmiştir. Bu numaralandırmayı ve sabit mıknatısların manyetiklenme yönlerini dikkate alarak harici olarak elde edilen manyetik alanın x ve y bileşenleri (9) ve (10) nolu denklemler ile verilmiştir

$$H_{y_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{y-y_2}{x-x_3} - \operatorname{atan} \frac{y-y_3}{x-x_3} + \operatorname{atan} \frac{y-y_5}{x-x_5} - \operatorname{atan} \frac{y-y_4}{x-x_5} \right] + \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_6)^2+(y-y_7)^2}{(x-x_7)^2+(y-y_7)^2} + \ln \frac{(x-x_9)^2+(y-y_9)^2}{(x-x_8)^2+(y-y_9)^2} + \ln \frac{(x-x_{11})^2+(y-y_{11})^2}{(x-x_{10})^2+(y-y_{11})^2} + \ln \frac{(x-x_{12})^2+(y-y_{13})^2}{(x-x_{13})^2+(y-y_{13})^2} + \ln \frac{(x-x_{15})^2+(y-y_{15})^2}{(x-x_{14})^2+(y-y_{14})^2} + \ln \frac{(x-x_{17})^2+(y-y_{17})^2}{(x-x_{15})^2+(y-y_{15})^2} \right] \quad (9)$$

$$H_{x_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{x-x_{10}}{y-y_{11}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{11}}{y-y_{11}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{13}}{y-y_{13}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{12}}{y-y_{13}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_7}{y-y_7} - \operatorname{atan} \frac{x-x_6}{y-y_7} + \operatorname{atan} \frac{x-x_8}{y-y_9} - \operatorname{atan} \frac{x-x_9}{y-y_9} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{14}}{y-y_{14}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{15}}{y-y_{14}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{16}}{y-y_{14}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{17}}{y-y_{15}} \right] + \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}{(x-x_3)^2+(y-y_2)^2} + \ln \frac{(x-x_5)^2+(y-y_4)^2}{(x-x_5)^2+(y-y_5)^2} \right] \quad (10)$$

3 numaralı tasarım yani yanal sabit mıknatısın polarizasyon yönünü +y yönünde olduğu için verilen numaralandırılmış ray geometrisi Şekil 3(c)'te gösterilmiştir. Bu numaralandırmaya ve sabit mıknatısların manyetiklenme yönlerini dikkate alarak benze şekilde Biot-Savart yasaları kullanılarak harici olarak elde edilen manyetik alanın x ve y bileşenleri (11) ve (12) nolu denklemler ile verilmiştir.

$$H_{y_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{y-y_2}{x-x_3} - \operatorname{atan} \frac{y-y_3}{x-x_3} + \operatorname{atan} \frac{y-y_5}{x-x_5} - \operatorname{atan} \frac{y-y_4}{x-x_5} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{14}}{x-x_{15}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{15}}{x-x_{15}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{17}}{x-x_{17}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{16}}{x-x_{17}} \right] +$$

$$\frac{\mu_0 M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_6)^2+(y-y_7)^2}{(x-x_7)^2+(y-y_7)^2} + \ln \frac{(x-x_9)^2+(y-y_9)^2}{(x-x_8)^2+(y-y_9)^2} + \ln \frac{(x-x_{11})^2+(y-y_{11})^2}{(x-x_{10})^2+(y-y_{11})^2} + \ln \frac{(x-x_{12})^2+(y-y_{13})^2}{(x-x_{13})^2+(y-y_{13})^2} \right] \quad (11)$$

$$H_{x_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{x-x_{10}}{y-y_{11}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{11}}{y-y_{11}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{13}}{y-y_{13}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{12}}{y-y_{13}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_7}{y-y_7} - \operatorname{atan} \frac{x-x_6}{y-y_7} + \operatorname{atan} \frac{x-x_8}{y-y_9} - \operatorname{atan} \frac{x-x_9}{y-y_9} \right] + \frac{\mu_0 M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_{15})^2+(y-y_{15})^2}{(x-x_{15})^2+(y-y_{14})^2} + \ln \frac{(x-x_{17})^2+(y-y_{16})^2}{(x-x_{17})^2+(y-y_{17})^2} + \ln \frac{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}{(x-x_3)^2+(y-y_2)^2} + \ln \frac{(x-x_5)^2+(y-y_4)^2}{(x-x_5)^2+(y-y_5)^2} \right] \quad (12)$$

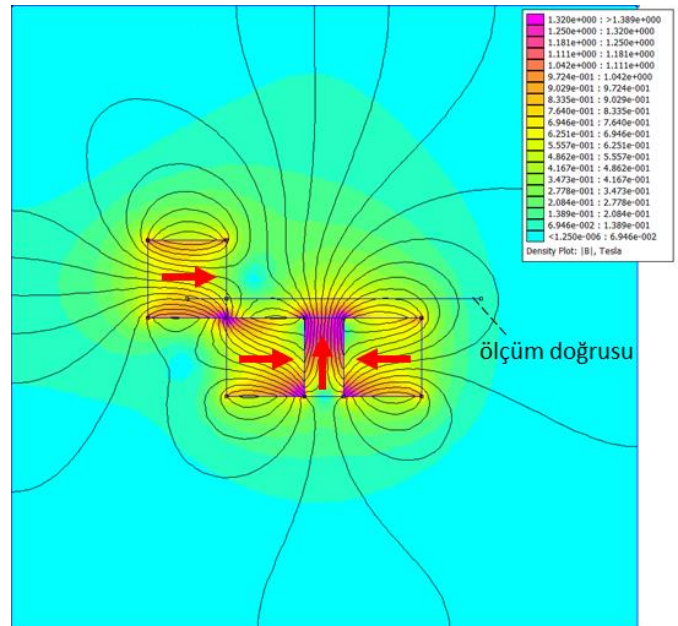
Son olarak Tasarım-4 için verilen numaralandırılmış ray geometrisi Şekil 3(d)'de gösterilmiştir. Elde edilen manyetik alanın x ve y bileşenleri (13) ve (14) nolu denklemler ile verilmiştir.

$$H_{y_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{y-y_2}{x-x_3} - \operatorname{atan} \frac{y-y_3}{x-x_3} + \operatorname{atan} \frac{y-y_5}{x-x_5} - \operatorname{atan} \frac{y-y_4}{x-x_5} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{15}}{x-x_{15}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{14}}{x-x_{15}} + \operatorname{atan} \frac{y-y_{16}}{x-x_{17}} - \operatorname{atan} \frac{y-y_{17}}{x-x_{17}} \right] + \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_6)^2+(y-y_7)^2}{(x-x_7)^2+(y-y_7)^2} + \ln \frac{(x-x_9)^2+(y-y_9)^2}{(x-x_8)^2+(y-y_9)^2} + \ln \frac{(x-x_{11})^2+(y-y_{11})^2}{(x-x_{10})^2+(y-y_{11})^2} + \ln \frac{(x-x_{12})^2+(y-y_{13})^2}{(x-x_{13})^2+(y-y_{13})^2} \right] \quad (13)$$

$$H_{x_ext} = \frac{M_0}{2\pi} \left[\operatorname{atan} \frac{x-x_{10}}{y-y_{11}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{11}}{y-y_{11}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_{13}}{y-y_{13}} - \operatorname{atan} \frac{x-x_{12}}{y-y_{13}} + \operatorname{atan} \frac{x-x_7}{y-y_7} - \operatorname{atan} \frac{x-x_6}{y-y_7} + \operatorname{atan} \frac{x-x_8}{y-y_9} - \operatorname{atan} \frac{x-x_9}{y-y_9} \right] + \frac{M_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}{(x-x_3)^2+(y-y_2)^2} + \ln \frac{(x-x_5)^2+(y-y_4)^2}{(x-x_5)^2+(y-y_5)^2} + \ln \frac{(x-x_{15})^2+(y-y_{14})^2}{(x-x_{15})^2+(y-y_{15})^2} + \ln \frac{(x-x_{17})^2+(y-y_{16})^2}{(x-x_{17})^2+(y-y_{16})^2} \right] \quad (14)$$

4.2. Sonlu Elemanlar Programı ile Karşılaştırma

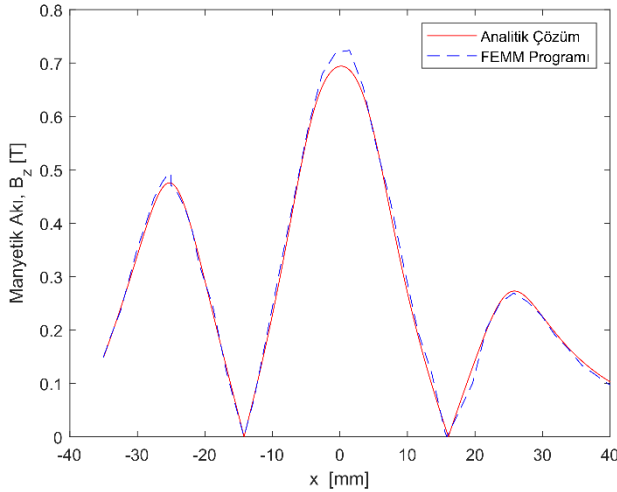
Süperiletken manyetik yataklı doğrusal fırlatıcı sistemi için yapılan sabit mıknatıs kılavuz ray sistemi konfigürasyon çalışması sonucunda elde edilen analitik manyetik alan sonuçlarının doğrulanması için elektromanyetik sonlu elemanlar program olan FEMM ile iki boyutlu analizler yapılarak elde edilen dikey yönlü manyetik akı yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te kurulan sonlu elemanlar modeli ve Tasarım-1 için elde edilmiş manyetik akı dağılımı verilmektedir.



Şekil 4. Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemi sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen manyetik akı dağılımı.

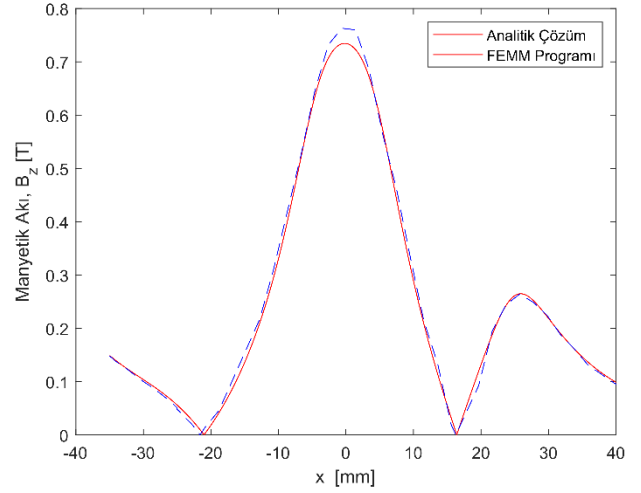
Farklı manyetik ray konfigürasyonlarının y yönünde oluşacak levitasyon kuvvetine etkisini görmek genel bir bilgi edinmek için Şekil 4'te belirtilen 75 mm uzunluğunda bir doğru boyunca grafikler çizdirilmiştir. Ayrıca hem analitik çözümler hem de FEMM sonlu elemanlar programında elde edilen çözümler için kullanılan geometrik mesafeler sabit mıknatısların ve süperiletken malzemenin boyutlarına bağlıdır. Kullanılan süperiletken malzeme 40 mm x 40 mm x 13 mm ölçülerine sahiptir. Sabit mıknatıs manyetik ray tasarımlarında ise iki farklı ölçüde sabit mıknatıs kullanılmıştır. Bunlardan dikdörtgen geometrisine sahip olan sabit mıknatısın ölçüleri 20 mm x 10 mm x 10 mm, kare geometrisine sahip olan ise 20 mm x 20 mm x 20 mm olarak seçilmiştir.

Şekil 5'te Tasarım-1 için elde edilen denklem (7)'de verilmiş olan manyetik alan y bileşeni kullanılarak elde edilen manyetik akı için FEMM programında elde edilen sonuç ile karşılaştırılması verilmektedir. Görüldüğü üzere analitik çözüm ile FEMM programın çıktısı olan sayısal çözüm büyük ölçüde örtüşmektedir. Burada elde edilen sonuçlar hem analitik olarak hem de sayısal olarak manyetik ray ile süperiletken malzemenin alt yüzeyi arasında 5 mm boşluk olması durumu için elde edilmiştir.

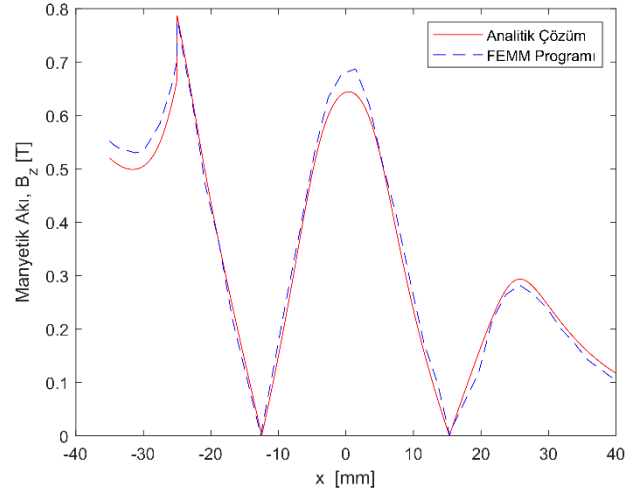


Şekil 5. Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemi eksenel manyetik akı yoğunluğu- (Tasarım-1).

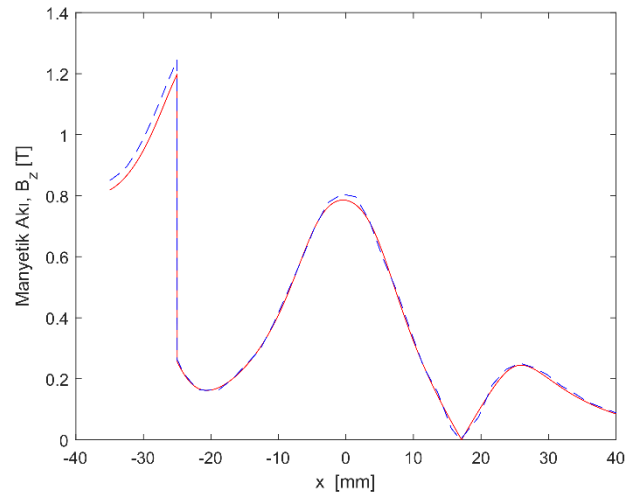
Benzer şekilde Tasarım 2, 3 ve 4 için yapılan analitik çözüm ve sayısal çözüm karşılaştırmalı dikey yönlü manyetik akı yoğunlukları sırası ile Şekil 6-8 ile verilmiştir. Bu şekiller sonucu yanal ray sabit mıknatısı için mıknatıslanma yönünü x doğrultusunda olması durumunda analitik çözüm ve sayısal çözümün örtüştüğü gözükmemekte fakat y doğrultusu -35 mm ile -20 mm arasındaki x mesafesinde ufak bir farklılık olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca tüm dört farklı tasarım arasında elde edilen en yüksek manyetik akı değeri Tasarım-4 için yani yanal sabit mıknatısın - y doğrultusunda mıknatıslanma yönüne sahip olması durumu için elde edilmiştir. Tasarlanan bu yapı sayesinde mevcut süperiletken manyetik levitasyon sistemlerinden farklı olarak tek bir süperiletken malzemenin iki yüzeyini aktif olarak kullanmanın levitasyon kuvvetini artırıcı etkisi olduğunu göstermiştir. Çok yüzeyli levitasyon ismi verilen bu yapı geliştirmeye açık farklı konfigürasyonlara sahip olmasının yanında levitasyon kuvveti ve yanal dengeleme kuvvetini aynı anda sağlama sebebi ile özgün bir özelliğe sahiptir.



Şekil 6. Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemi eksenel manyetik akı yoğunluğu- (Tasarım-2).

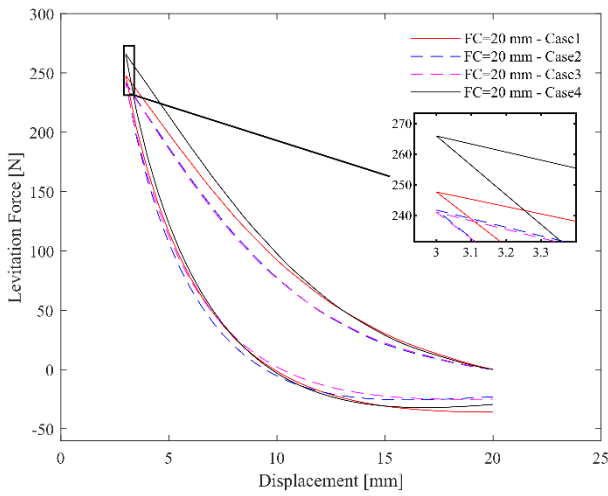


Şekil 7. Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemi eksenel manyetik akı yoğunluğu- (Tasarım-3).



Şekil 8. Sabit mıknatıs kılavuz ray sistemi eksenel manyetik akı yoğunluğu- (Tasarım-4).

Son olarak yukarıda doğrulanmış manyetik alan ifadeleri ile COMSOL programı kullanılarak levitasyon kuvvetleri elde edilmiştir. Bunun için Comsol programı içerisinde süperiletken ve sabit mıknatıs için gerekli karakteristik özelliklerinin girilerek Maxwell denklemleri kısmi diferansiyel denklem (partial differential equation (pde)) modülü ile çözülmesiyle levitasyon kuvvetleri elde edilmiştir. Süperiletken ve sabit mıknatıs arasındaki kuvvet ilişkisi histerisiz barındırmaktadır. Şekil 9’da elde edilen levitasyon kuvveti ile bu histerisiz durumu gözlemlenebilmektedir. Bu senaryo için süper iletken malzemenin manyetik ray üzerinde 20 mm soğutma mesafesinde durduğu ve levitasyon kuvvetinin gözlemlenebilmesi için 5 mm boşluğa indirildiği ve daha sonra tekrar 20 mm mesafeye getirildiği bir işlem adımı seçilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tasarım 2 ve 3 en düşük olmak üzere benzer seviyelerde levitasyon kuvveti oluşturmuştur. En yüksek levitasyon kuvveti ise tasarım 4 için elde edilmiştir.



Şekil 9. Aksel levitasyon kuvveti karşılaştırılması.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada süperiletken manyetik yataklar ile yataklanması gerçekleştirilen bir doğrusal fırlatıcı sistemi için sabit mıknatısların oluşturduğu manyetik ray konfigürasyonu sunulmuştur. Süperiletken malzemeler kullanılarak oluşturulan sistemlerde deneysel yapılarının kurulmasından önce levitasyon kuvveti gibi spesifik karakteristiklerini gözlemlemek ve tasarımı şekillendirmek için yapılan analitik yaklaşımlar önem taşımaktadır. Bu yaklaşımlardan biri olan manyetik alanın analitik olarak modellenmesini sağlayan H-formülasyonu yöntemi ile süperiletken manyetik yataklı doğrusal fırlatıcı sistemi için manyetik ray konfigürasyonu bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Çalışmada sunulan yapı sayesinde klasik süperiletken manyetik yatak sistemlerinden farklı olarak tek bir süperiletken malzemenin aynı anda iki farklı yüzeyini kullanarak hem levitasyon kuvvetinde iyileştirme hemde ekstre yanıl kılavuz kuvveti elde edilmesi mümkündür. Çok yüzeyli levitasyon ismi verilen bu yapı geliştirmeye açık farklı sabit mıknatıs konfigürasyonlarının da denemek için çalışmalara konu olabilecek bir yapıya sahiptir. Elde edilen sonuçlar H-formülasyon yönteminin sabit mıknatısların bir araya gelmesi ile elde edilen farklı ray tasarımına nasıl uygulanacağını analitik olarak göstermektedir. Yan yüzeyde yer alan kalıcı mıknatıs polarizasyonun değiştirilmesi ile en düşük duruma göre yaklaşık %11 oranında levitasyon kuvvetinde artış sağlanmıştır. Ayrıca

elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar programı yardımı ile doğrulanmıştır.

6. Teşekkür

Bu çalışma 119M131 proje numaralı, Tübitak 3501 Kariyer destek programı kapsamında yapılmıştır. Yazarlar katkılarından dolayı Tübitak’a teşekkürlerini sunarlar.

Kaynakça

- Basaran, S., ve Sivrioglu, S. (2017a). Levitation force analysis of ring and disk shaped permanent magnet-high temperature superconductor. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 55(4), 261-268.
- Basaran, S., ve Sivrioglu, S. (2017b). Radial stiffness improvement of a flywheel system using multi-surface superconducting levitation. *Superconductor Science and Technology*, 30(3). IOP Publishing.
- Drozdov, A. P., Kong, P. P., Minkov, V. S., Besedin, S. P., Kuzovnikov, M. A., Mozaffari, S., Balicas, L., vd. (2019). Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures. *Nature*, 569(7757), ss. 528-531. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1201-8>.
- Fahlstrom, P. G., ve Gleason, T. J. (2012). *Introduction to UAV Systems: Fourth Edition. Introduction to UAV Systems: Fourth Edition.*
- Floegel-Delor, U., Schirmeister, P., Riedel, T., Koenig, R., Kantarbar, V., ve Werfel, F. N. (2018). Bulk Superconductor Levitation Devices: Advances in and Prospects for Development. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(4), ss. 1-5.
- Kondratiuk, M., ve Ambroziak, L. (2016). Concept of the magnetic launcher for medium class unmanned aerial vehicles designed on the basis of numerical calculations. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54(1), ss. 163-177.
- Kozdraś, E. Ł., ve Sibilska-mroziewicz, A. (2017). Analysis of the Levitation Forces Generated by High-Temperature Superconductors Located within the Magnetic Field of a UAV Catapult System, 3(29), ss. 87-94.
- Novaković, Z., ve Medar, N. (2013). Analysis of a UAV Bungee Cord Launching Device. *Scientific Technical Review*, 63(3), ss. 41-47.
- Ozturk, K., Abdioglu, M., ve Karahmet, Z. (2020). Magnetic force and stiffness performances of Maglev system based on multi-surface arrangements with three-seeded bulk YBaCuO superconductors. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 578(July), s. 1353739. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2020.1353739>.
- Ozturk, K., Guner, S. B., Abdioglu, M., Demirci, M., Celik, S., ve Cansiz, A. (2019). An analysis on the relation between the seed distance and vertical levitation force for the multi-seeded YBCO using the modified advanced frozen image (MAFI) and experimental methods. *Journal of Alloys and Compounds*, 805, ss. 1208-1216. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.205>.
- Reck, B. (2003). First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE Transactions on Magnetism*, 39(1), ss. 310-313.
- Sass, F., Sotelo, G. G., De Andrade, R., ve Sirois, F. (2015). H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS

- bulks and stacks of 2G coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 28(12). IOP Publishing.
- Sivrioglu, S., Basaran, S., ve Yildiz, A. S. (2016). Multisurface HTS-PM Levitation for a Flywheel System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(8). IEEE.
- Sivrioglu, S., Yildiz, A. S., Basaran, S, Bolat. F. C., ve Kepenek, E. (2018). Design and simulation of a model maglev vehicle. *4th International Symposium on Railway Systems Engineering (ISERSE'18), Karabuk, Turkey.*
- Yang, Y., ve Zheng, X. (2007). Method for solution of the interaction between superconductor and permanent magnet. *Journal of Applied Physics*, 101(11).