Küp Uydu İçin Dünya Etrafındaki Manyetik Alan Benzetimi Yapacak Helmholtz Kafesi Tasarımı ve Analizi

Sibel Türkoğlu, Mehmet Şevket Uludağ, Özcan Kalenderli, Alim Rüstem Aslan

ÖZET:

Gelişen teknoloji ile birlikte uzay araçlarının üretimi ucuzlamış ve artmıştır. Buna paralel olarak riski azaltmak ve uzay araçlarına yapılacak yatırımı güvence altına almak için test sistemlerine olan ihtiyaç da artmıştır. Uzay araçlarının Dünya etrafındaki manyetik alan içindeki çalışma durumları ve manyetik alanı düzgün bir şekilde ölçüp ölçemeyeceklerini kontrol edebilmek amacıyla bir Helmholtz kafesi gereklidir. Ancak her bir eksene karşılık gelen toplamda üç çift Helmholtz bobininden oluşan bu sistemde elde edilen manyetik alan dağılımları bobin çapları, bobinler arası uzaklık ve bobin şekli ile değişmektedir. Literatürde sıkça karşılaşılan dairesel ve karesel Helmholtz bobinlerdir. Bu çalışmada kapsamında ise dairesel ve karasel bobinlerden oluşan kafeslerde indüklenebilecek manyetik alan dağılmlarının 3u'luk bir küp uydu testi için gereken hacimdeki homojenliklerini, Comsol programı aracılığıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanarak kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda dairesel bir Helmholtz kafesi tasarımının kullanılması uygun bulunmuştur, ancak karesel kafesin analizlerinin olası sorunlar göz önüne alınarak tekrarlanması uygun görülmüştür.

Anahtar Kelime: Helmholtz Bobini, Manyetik Alan, Uzay Ortamı, Küp Uydu

Helmholtz Cage Design and Analysis to Simulate Earth Magnetic Field for a Cubesatellite

Sibel Türkoğlu, Mehmet Şevket Uludağ, Özcan Kalenderli, Alim Rüstem Aslan

ABSTRACT:

Developing technology leads to increase and cheapen spacecraft systems, especially in the field of cubesatellites. In parallel, to reduce the risks of space environment effects and to assure the investments on space systems it is crucial to test these systems thoroughly. The main purpose of this paper is to design and compare circular and square Helmholtz cages for a 3U cube satellite. A Helmholtz Cage is a combination of Helmholtz Coils which creates a homogeneous magnetic field between a pair of coils. A 3 axis Helmholtz Cage (a pair of coils for each axis) allows us to model any desired magnetic field such as Earth's magnetic field which is needed to be modelled to test for magnetic actuators and sensors of satellites' ADCS. To compare the magnetic field distribution homogeneity of the test volume of a 3u CubeSat, both cages are modelled and solved with finite element method by using Comsol software. According to results a circular Helmholtz Cage is found appropriate to use, and in case possible problems on square cage analysis it will be re-analysed.

Key Words: Helmholtz Coil, Magnetic Field, Space Environments, Cube Satellites.

1. GİRİŞ:

Küp uyduların kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır. Buna paralel olarak bunların testlerinin yapılabilmesi için gerekli olan yazılım ve donanıma olan talep de artmakta ve üretimleri çok yaygın olmadığı için yüksek fiyatlardan satışa sunulmaktadır. Bu durum ışığında ülkemizde sürmekte olan küp uydu çalışmalarına katkıda bulunmak için bir Helmholtz bobini tasarlanması amaçlanmıştır. Helmholtz bobinleri bir çift aynı sarım sayısına sahip bobinin aynı akım değeri ile beslenerek iç yarıçapları kadar mesafe ile yerleştirilen, homojen manyetik alan yaratan bobinlerdir [1].

Bobinlerin bu özelliğinden yararlanılarak dünya etrafındaki manyetik alan benzetimi gerçekleştirilebilir. Her bir bobindeki akımın şiddeti farklı olarak değiştirilerek manyetik alanın yönü istenilen şekilde ayarlanabilir ve bu sayede dünya etrafında herhangi bir yerdeymişçesine istenilen manyetik alan elde edilerek testler tamamlanabilir.

Dünya etrafındaki manyetik alan benzetimine iki sebepten dolayı ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan birincisi alçak irtifalarda uydunun dünya etrafındaki konumu saptarken bu manyetik alandan yararlanarak uydunun yaklaşık olarak yeri ve konumu belirlenebilir. Bu işlemi uydu içerisinde gerçekleştiren sisteme yönelim belirleme ve kontrol sistemi denir. Benzetime ihtiyaç duyulmasının ikinci bir sebebi de uydu dünya etrafındaki manyetik alandan yararlanarak kendi içerisinde bulunan sargılardan kuvvet üreterek istenen ya da daha önceden belirlenen şekliyle yönelim yapabilir ve bu sistemin çalışıp çalışmadığının denenmesi için benzetime ihtiyaç duyulmaktadır.

2. HELMHOLTZ BOBİNİ:

Helmholtz bobinleri ihtiyaca göre birden fazla eksen için uygun hale getirilebilir. İlk eksen için yapılan sargıların test edecek sistemi ancak içine aldığı kabul edilirse, sonraki her eksen bir öncekinden daha büyük olacak şekilde iki sargıdan oluşur ve bir öncekini kapsar. Yani bir Helmholtz bobininde test edilecek hacimde en önemli ölçü en içteki bobin çiftinin çapının büyüklüğüdür. Bobinler arası düzgün bir manyetik alan oluşturulabilmesi için bobinlerin yarıçapları birbirine eşit olmalı ve bobinlerin birbirlerine uzaklıkları yarıçapları kadar olmalıdır.



Şekil 1. Helmholtz Bobinlerinin Boyutları [2].

Şekil 1'de görüldüğü gibi bir eksenli Helmholtz bobininde manyetik alan çizgileri bu boyutlar için düzgün olmaktadır. Elde edilen bu manyetik alanların hesabı Detroye ve Chase (1994) çalışmalarında aşağıda izlenen yoldan gerçekleştirilebilir [3].

Şekil 2' de yarıçapı a olan bir Helmholtz bobinin eksenleri görülebilmektedir.

Sarımda I ile gösterilen akımdır. Vektör geriliminin genel bir akım dağılımı için yazılışı aşağıdaki gibidir.

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l}}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$
(0.1)

(1.1) denkleminde A vektör gerilimi iken I sarımdaki akımdır. Akımın yöneliminden dolayı vektör gerilimi sadece ϕ bileşeninden etkilenir.

Ayrıca vektör geriliminin simetriği de bu değişkenden de bağımsızdır. İntegrasyon işleminin yapılması sırasında sonuçların basitleştirilebilmesi için $\varphi = 0$ olarak alınır

$$\vec{dl} = (-a\sin\phi', a\cos, 0)d\phi' \tag{0.2}$$

$$\vec{r} = (r\sin\theta, 0, r\cos\theta) \tag{0.3}$$

$$\vec{r}' = (a\cos\phi', a\sin, 0) \tag{0.4}$$

$$\left|\vec{r} - \vec{r}'\right| = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ra\sin\theta\cos\phi'} \tag{0.5}$$



Şekil 2: Elektro-manyetik alan gösteriminde kullanılan dairesel bir bobinin koordinatları ve sistemdeki değişkenler [3].

Şekil 2'de görülen değişkenlerin integrasyona uygulanmasının ardından elemanına sahip integral ortadan kalkar ve aşağıdaki denklemde görülen A_{ϕ} bileşeni ile hesaplamalara devam edilir ki, bu bileşende bulunan $\cos \phi'$ elemanı integrasyon aralığının yarıya indirilmesine olanak tanır. Sonuç olarak (1.6) denklemi elde edilir.

$$A_{\phi}(r,\theta) = \frac{\mu_0 IA}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\cos\phi' d\phi'}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ra\sin\theta\cos\phi'}}$$
(0.6)

(6.6) denklemi silindirik koordinatlar kullanılarak daha rahat ifade edilebilir. Bu durumda $r^2 = z^2 + r^2$ ve $\sin q = r / \sqrt{(z^2 + r^2)}$ bileşenleriyle denklem,

$$A_{\phi}(\rho, z) = \frac{\mu_0 IA}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\cos \phi' d\phi'}{\sqrt{\rho^2 + z^2 + a^2 - 2a\rho \cos \phi'}}$$
(0.7)

haline gelir.

Bu integralin kapalı formu olmamasına rağmen bir dönüştürme işlemi ile tabule fonksiyonlar elde edilmiştir. İntegralin üst $\phi' = \pi + 2\phi$ kullanılarak $\pi/2$ olarak değiştirilmiştir. Bunun sonucunda integral,

$$A_{\phi}(\rho, z) = \frac{\mu_0 IA}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\left(2\sin^2 \phi - 1\right) d\phi}{\sqrt{\left(a + \rho\right)^2 + z^2 - 4a\rho \sin^2 \phi}}$$
(0.8)

İntegralin dönüştürülmesinin aşamalarında biri olarak $k^2 = \frac{4a\rho}{(a+\rho)+z^2}$ tanımlanır.

$$A_{\phi}(\rho,\phi) = \frac{\mu_o I}{\pi k} \sqrt{\frac{a}{\rho}} \left[\left(1 - \frac{1}{2} k^2 \right) K(k) - E(k) \right]$$
(0.9)

$$K(k) = \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}$$
(0.10)

$$E(k) = \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi$$
 (0.11)

K ve E her ikisi de tabule fonksiyonlardır ve tam eliptik integrallerdir. K birinci tür eliptik integral iken E ikinci tür eliptik integraldir. Manyetik alanlar, vektör geriliminden hesaplanırken $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ formülünden faydalanılır,

$$B_{\rho}(\rho, z) = -\frac{\partial A_{\phi}}{\partial z}$$
(0.12)

$$B_{z}(\rho, z) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_{\phi})$$
(0.13)

$B_{_{\Gamma}}$ ve $B_{_{z}}$ bileşenlerini elde edebilmek için K, E ve k türevlerinin hesaplanması gereklidir.

$$\frac{\partial K}{\partial k} = \frac{E}{k\left(1-k^2\right)} - \frac{K}{k} \tag{0.14}$$

$$\frac{\partial E}{\partial k} = \frac{E}{k} - \frac{K}{k} \tag{0.15}$$

$$\frac{\partial k}{\partial \rho} = \frac{k}{2\rho} - \frac{k^3}{4\rho} - \frac{k^3}{4a}$$
(0.16)

$$\frac{\partial k}{\partial z} = -\frac{zk^3}{4a\rho} \tag{0.17}$$

Son aşamaya gelindiğinde ise manyetik alan denklemleri şu şekle varır.

$$B_{\rho}(\rho,z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{z}{\rho \sqrt{(\rho+a)^2 + z^2}} \left[\frac{a^2 + \rho^2 + z^2}{(a-\rho)^2 + z^2} E(k) - K(k) \right]$$
(0.18)

$$B_{z}(\rho,z) = \frac{\mu_{0}I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(\rho+a)^{2}+z^{2}}} \left[\frac{a^{2}-\rho^{2}-z^{2}}{(a-\rho)^{2}+z^{2}} E(k) - K(k) \right]$$
(0.19)

Elde edilen bu denklemler tek sarımlı xy düzleminde uzanan bir bobin için manyetik alanın z ve p eksenlerindeki herhangi bir noktada bulmayı sağlar, ancak bunun için öncelikle k belirlenir ardından yukarıdaki denklemlerde yerine konur. Helmholtz bobini aynı eksene yerleştirilmiş 2 bobinden oluşur ve merkeze (z = 0 noktasına) bobin yarıçapının yarısı kadar uzaklıkta (a/4), birbirlerine ise bobin yarıçapı kadar (d = a/2) uzaklıkta bulunurlar. Son aşamada varılan bu denklemler tek bir sarımdan meydana gelen Helmholtz bobini için geçerlidir. Ancak yeterli ve gerekli manyetik alan bileşenlerinin oluşturulabilmesi için sarım sayısının arttırılması ve 3 eksende Helmholtz bobini ile bir Helmholtz kafesi tasarlanmıştır, Şekil 2'deki gibi üç eksenli bir Helmholtz bobini elde edilir.



Şekil 3. Üç eksenli Hemlholtz bobini [4]

3. LİTERATÜR TARAMASI:

Literatürde yapılan incelemeler gösterimistir ki, ele alınan bu konu hakkında yapılan calısmalar genel olarak iki alt baslıkta toplanabilir. İlki sonlu elemanlar yöntemi kullanan ve Comsol programı yardımıyla gerceklestirilen calısmalar, Helmholtz bobinleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Özellikle Restrepo-Alvarez, Franco-Mejia ve Pinedo-Jaramillo (2012) calışmalarında Comsol programı aracılığıyla dairesel ve karesel Helmholtz bobinlerinin homojenliklerini incelemişlerdir. Ulaştıkları sonuç ise karesel bobinlerin daha yüksek homojenlik sunduğu vönündedir [5]. Avnı zamanda vine Restrepo, Franco ve Pinedo (2014) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada 3 eksenli karesel bir kafesin hem sonlu elemanlar analizi hem de üretilen bir modelin manyetik alan ölcümleri alınarak, kullanılan yöntemin islerliği vurgulanmıştır [6]. İkinci başlıkta ise üretilen Helmholtz kafesleri üzerinde gerceklestirilen calısmaları kapsamaktadır. Bunlara örnek olarak Klesh, Seagraves, Bennett, Boone, Cutler ve Bahcivan (2010) tarafından gerceklestirilen karesel kafes [7], Obispo'nun (2012) yüksek lisans tezinde üretim aşamalarını konu edindiği dairesel kafes [8] ve Poppenk, Amini ve Brouwer'in (2007) çalışmalarında dizayn ve uvgulamalarından bahsettikleri Delft Teknik Üniversitesi'ndeki karesel kafes [9], gösterilebilir. Bu üç örnek de küp uydular için tasarlanmış olmaları gibi bir ortak noktaya sahiptir.

Ancak araştırmalar dahilinde karesel-dairesel kafeslerin manyetik alan homojenlik yeterliliklerini sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla kıyaslayan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın konusu olarak seçilmiştir.

4. UYGULAMA:

Belirleyici özellikte olduğu için ilk olarak en içteki bobinin hesabının yapılması gerekmektedir. Onun için de belirleyici olan test edilecek olan elemanın hacmi önemlidir. Buna göre İstanbul Teknik Üniversitesi'nde geliştirilmekte olan ve geliştirilecek olan uyduların boyutlarına göre hacmin yaklaşık olarak 0.027 m³ olması gerekmektedir. Comsol [10] programı kullanılarak ilk önce bir eksenli bobin tasarımı yapıldı. Yapılan bobin tasarımında yarıçap 30 cm seçilmiştir ve iki sargı arasındaki mesafe de 30 cm olacak şekilde yerleştirme yapılmıştır. Şekil 3'ten görüleceği üzere bobinlerden içe doğru belirli bir mesafe sonra manyetik alan çizgileri homojen hale gelmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'ten bobinlerin çevresinde oluşan manyetik alan çizgileri görülebilir.



Şekil 4. Bir bobin çiftinin oluşturduğu manyetik alan ve homojenliği



Şekil 5. Karesel bir bobbin çiftinin oluşturduğu manyetik alan ve homojenliği

İlk yapılan analiz yardımı ile bobinlerin belirtilen boyutlarda ve boyutlarının birbiri ile ilişkisinin sistem üzerinde etkisi gözlenmiş ve sağlaması yapılmıştır. İkinci adım olarak da üç eksenli biri dairesel diğeri ise karesel yapıda olan kafesler tasarlanmıştır. Ancak genel olarak karşılaşılan Helmholtz bobinleri dairesel yapıdadır. Bu sebeple her iki sistem de tasarlanarak sonuçlar kıyaslanacaktır.

Kafes oluşturma işlemleri sırasıyla dairesel ve karesel kafesler için yapılmıştır.



Şekil 6. Dairesel Yapılı Kafes Tasarımının Görünüşleri



Şekil 7. Karesel Yapılı Kafes Tasarımının Görünüşleri



0

Şekil 9: Karesel bobin çiftinin sarımları

Şekil 6 ve Şekil 7' de de görüldüğü üzere bir eksen için yapılan bobin çiftlerindeki sarımlar gösterilmiştir. Ayrıca kafeslerin içerisinde görülen şeffaf küpler (30 x 30 x 30 cm³) bir sonraki adımda sonuç görsellemesi için kullanılacaktır, teste uygun olması beklenen

hacmi temsil etmektedir. Son adım olarak tüm üç eksenin içerisindeki hacim üzerinde ve etrafında oluşturduğu manyetik alan yoğunluğu incelenmiştir. Her biri 20 sarım bakır tel içeren bobinlerden geçen 2A ile elde edilen üç boyutlu manyetik alanlar Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir. Her iki kafesin de küplerin iç bölgelerinde oldukça homojen bir manyetik alan dağılımı ile 100 mikroTesla'yı geçen bir manyetik indüksiyon elde edilebilmiştir. Ancak test hacmlerine bakıldığı zaman kenarlarına ve özellikle köşelerine doğru gidildikçe manyetik alan yoğunlukları artmaktadır, ki bu beklenen bir durum olmasına karşı iki kafes bu noktada değişik özellikler göstermektedir.



Şekil 10. 30 x 30 x 30 cm³'lük hacimdeki manyetik alan dağılımı



Şekil 11. 30 x 30 x 30 cm³'lük hacimdeki manyetik alan dağılımı

Dairesel kafes tam olarak köşelerde makisimuma ulaşan simetrik bir dağılım oluştururken, karesel kafeste aynı simetriye ulaşılamamıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmanın sonucunda tasarlanan her iki kafesin de en düşük istekleri yerine getirdiği fakat iyileştirmelerin yapılabileceği gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları incelendiği zaman kafes yarıçapının büyütülmesinin test edilecek olan sistemin daha homojen bir manyetik alan içerisine konulabileceğini göstermektedir. Ancak elde edilen manyetik alan dağılımlarının test hacminin köşelerine yakın bölgelerindeki bozulmaların her iki kafeste farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bozulmalar göz önüne alındığında Helmholtz kafesinin dairesel olması uygun bulunmuştur. Ayrıca, karesel kafes analizinde elde edilen bu beklenmeyen sonuçların sebepleri ilerleyen çalışmalarda incelenerek, üretilecek Helmholtz kafesinin şekil seçiminde güncellemeye ihtiyaç olup olmadığına karar verilecektir.

KAYNAKÇA:

- [1] http://physicsx.pr.erau.edu/HelmholtzCoils/
- [2] <u>https://sites.google.com/site/hsa2013adanhelmholtzcoil/my-pbl-project</u>
- [3] DeTroye, Chase, (1994), The Calculation and Measurement of Helmholtz Coil Fields
- [4] http://www.directvacuum.com/shopexd.asp?id=149
- [5] Restrepo, Franco, Pinedo, (2012), Study and analysis of magnetic field homogeneity of square and circular Helmholtz coil pairs: A Taylor series approximation, 2012 Andean Region International Conference
- [6] Restrepo, Franco, Pinedo, (2014), Tri-axial Square Helmholtz Coils System to Generate Uniform Magnetic Field Volume, 2014 COMSOL Conference, Boston
- [7] Klesh, Seagraves, Bennett, Boone, Cutler, Bahcivan, (2009), Dynamically Driven Helmholtz Cage for Experimental Magnetic Attitude Determination
- [8] Obispo, 2012, Calibration and Characterization of Cubesat Magnetic Sensors Using a Helmholtz Cage
- [9] Poppenk, Amini, Brouwer, (2007), Design and Application of a Helmholtz Cage for Testing Nano-Satellites, ESA-ESTEC 6th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes, The Netherlands
- [10] COMSOL http://www.comsol.com/