



Yeni Artı (+) Tip 4 Kutuplu Temassız Taşıyıcı Sistemin Tasarımı ve Manyetik Kuvvet Analizleri

Enes Mahmut Göker^{1*}, Kadir Erkan²

^{1*}Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-9429-8164), enesgkr@hotmail.com

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9293-7279), kerkan@yildiz.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 11 Aralık 2021 ve Kabul Tarihi 28 Mart 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1032443)

ATIF/REFERENCE: Göker E. M., Erkan K., (2021). Yeni Artı (+) Tip 4 Kutuplu Taşıyıcı Sistem Tasarımı ve Manyetik Kuvvet Analizleri *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 373-379.

Öz

Bu çalışmada artı şeklinde U tipli karma elektromıknatıs (kalıcı mıknatıs ve elektromıknatıs) kullanılarak yeni artı tip 4 kutuplu temassız taşıyıcı sistemi tasarlanmıştır. Artı tip elektromıknatıs için sonlu elemanlar metodu ile manyetik yastıklama kuvvetlerinin üç ekseninde (z, α, β) 3 boyutlu analizi ve elektromıknatısın manyetik eş değer devresi (MEC) çıkartılarak kuvvet analizleri gerçekleştirilmiştir. MEC ile elde edilen analitik model ile sonuçları karşılaştırılmıştır. Taşıyıcı sistemin, askılama işlemi yapıldığındaki nüvenin manyetik akı performansı incelenmiştir. Analitik hesaplamalar için Matlab programı, sonlu elemanlar analizi için ANSYS Maxwell-3D yazılımı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik yastık, Maglev Taşıyıcı Sistemi, Manyetik Eş Devre (MEC).

Design and Magnetic Force Analysis of Novel Cross (+) Shaped 4-Pole Maglev Carrier System

Abstract

In this study, a new cross type 4-pole non-contact carrier system is created by using U-type hibrid electromagnets (permanent magnet and electromagnet). For the cross type electromagnet, 3-dimensional analysis of the magnetic levitation forces in three axes (z, α, β) was made with the finite element method (FEM) and analytical calculations of the force analyzes were made by developing the magnetic equivalent circuit (MEC) of the electromagnet. The simulation results were compared with the analytical model obtained with MEC. The magnetic flux performance of the core when the levitating process of the carrier system is performed has been investigated. Matlab program was used for analytical calculations and ANSYS Maxwell-3D software was used for finite element analysis.

Keywords: Magnetic Levitation, Maglev Carrier System, Magnetic Equivalent Circuit (MEC).

* Sorumlu Yazar: enesgkr@hotmail.com

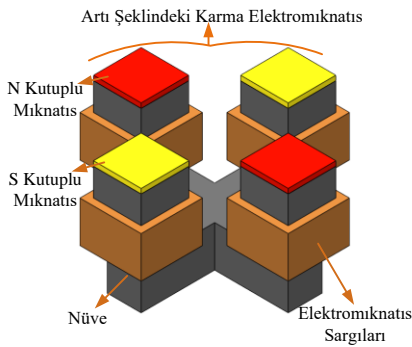
1. Giriş

Teknolojinin ve üretimin hızla ilerlemesi zor olan üretim alanlarına kolaylık sağlamaktadır. Üretim alanlarının olmazsa olmazlarından birisi üretilen malzemelerin taşınmasıdır. Özellikle temiz odalar ve yüksek teknolojiye sahip olan malzemelerin üretilmesinde ve üretilen malzemelerin taşınma esnasındaki ortamda; titreşim, ses ve toz gibi partiküllerin olması taşımadaki hassasiyeti olumsuz etkilemektedir. Aynı zamanda bu taşıma sistemlerinin ve imalat alanlarının taban uzayında olması mekânın verimli kullanılmasını da engellemektedir. Mevcut olan taşıma sistemleri bu konularda yetersiz kalmaktadır (Kim vd 2011; Morishita 1989). Bu gibi problemlerin çözümü için elektromanyetik kuvvetler kullanılarak taşıyıcının temassız bir şekilde askıda kalmasını sağlayan manyetik levitasyon teknolojisi geliştirilmiştir (Atherton,1980; Han, Kim, 2016; Erkan vd 2016). Taşıyıcı platformlar aktif veya pasif olarak iki farklı türde taşıma sistemlerine sahip olsalarda yastıklama kısımları aynıdır (Bozkurt vd 2018;Ertuğrul 2014). Karma elektromıknatis yapısı bünyesinde kalıcı mıknatıslar ve elektromıknatısları barındırmaktadır. Karma elektromıknatıslar; enerji kayıplarını büyük oranlarda azaltırlar ve buna ek olarak mıknatis boyutu ve elektromıknatısın sarım sayılarıyla taşınacak olan malzemenin ağırlığına göre kolayca ölçeklendirilerek olumlu katkı sağlar (Morishita 1989).

Yastıklama elemanı olarak U tipli, E tipli, 4 kutuplu U tipli karma elektromıknatıslar kullanılmaktadır (Tzeng, Y. ve Wang 1998;Lee vd 2013;Ertuğrul 2014). Bu sistemde ise artı şeklindeki u tipli karma elektromıknatis ilk defa kullanılmaktadır.

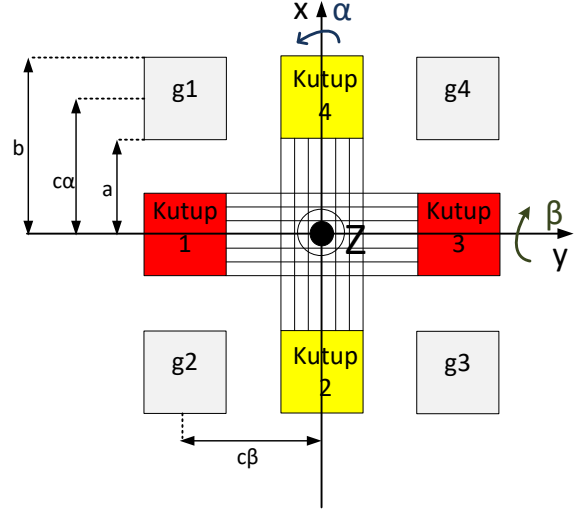
2. Materyal ve Metot

2.1. Artı Tipli Karma Elektromıknatısın Manyetik Analizi ve Analitik Hesabı



Şekil 1. Artı Kutuplu Karma Elektromıknatis (Figure 1. Cross-Pole Hybrid Electromagnet)

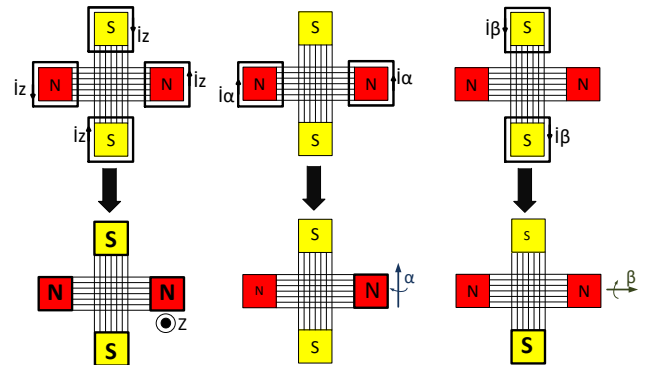
Şekil 1’de + şeklindeki U-tipli taşıyıcı platformun kutup başları gösterilmiştir. İki adet N kutuplu, iki adet S kutuplu mıknatıslar karşılıklı olarak + şeklindeki trafo saçlarından oluşturulan çelik saç paketlerinin kutup başlarına konulmuştur. Kutup başlarının üst kısmına kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiştir. Kalıcı mıknatısların altına bobin sargıları eklenerek hibrid elektromıknatis yapısı oluşturulmuştur. Sarı ve kırmızı renkle gösterilen mıknatıslar Şekil 1’deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 2. Artı Kutuplu Manyetik Yastık Hareket Eksenleri (Figure 2. Cross Pole Magnetic Levitation Motion Axes)

Artı kutuplu manyetik yastık, hareket serbestliği bakımından 3 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlar; dikey z ekseninde doğrultusunda, x-ekseni (α eğimi) etrafında ve y-ekseni (β eğimi) etrafındaki dönel hareketlerdir. Şekil 2’de hareket eksenleri gösterilmiştir. Literatürde var olan 4 kutuplu u tipli taşıyıcıların kutup başlarının konumlarının karşılaştırılması g harfiyle gösterilmiştir.

Her bir eksende hareket kontrolü sağlayacak akımlar farazi eksen akımlarına çevrilir ve kontrol işlemi benimsenecek metoda bağlı olarak ayrı ayrı tanımlanır. i_z farazi akımı kutup başlarını kuvvetlendirecek yönde, i_α ve i_β farazi akımları dönme ekseninde kutupları kuvvetlendirecek yönde belirlenmiştir. Şekil 3’te büyük punto ve kalınlaştırılmış çizgilerle gösterilen kutup başları farazi akımlarla kuvvetlendirilmiş, küçük punto ile gösterilenler de azaltılmış kutup başlarını gösterilmektedir.



Şekil 3. Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Kontrol Metotları (Figure 3. Control Methods of Cross-Pole Magnetic Levitation)

Şekil 3 dikkate alınarak gerçek sargı akımları ile farazi eksen akımları arasında aşağıdaki dönüşüm yapılabilir.

$$\begin{aligned}
 i_z &= \frac{1}{4}(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) \\
 i_\alpha &= \frac{1}{4}(-i_1 + i_3) \\
 i_\beta &= \frac{1}{4}(i_2 - i_4)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_z \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}$$

Gerilimler de, akımlara benzer şekilde yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned}
 e_z &= \frac{1}{4}(e_1 + e_2 + e_3 + e_4) \\
 e_\alpha &= \frac{1}{4}(-e_1 + e_3) \\
 e_\beta &= \frac{1}{4}(e_2 - e_4)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_z \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix}$$

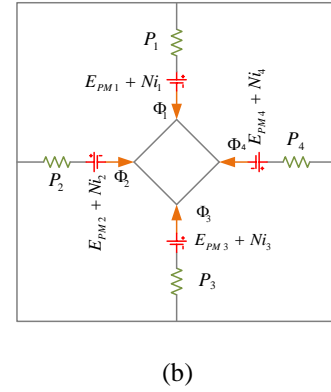
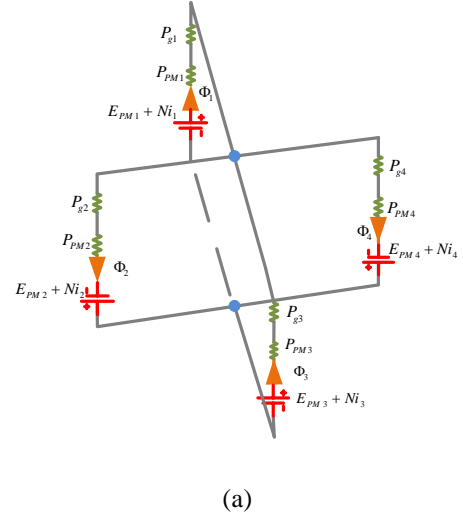
Tüm kutup başları dikkate alındığında yer değiştirmeler ise aşağıdaki dönüşüme tabi tutulur.

$$\begin{aligned}
 z &= \frac{1}{4}(g_1 + g_2 + g_3 + g_4) \\
 \alpha &= -\frac{1}{4c_\alpha}(g_1 - g_2 - g_3 + g_4) \\
 \beta &= \frac{1}{4c_\beta}(-g_1 - g_2 + g_3 + g_4)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & c_\alpha & -c_\beta \\ -1 & -c_\alpha & -c_\beta \\ -1 & -c_\alpha & c_\beta \\ -1 & c_\alpha & c_\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

Manyetik yastıklama için çekme kuvvetleri ve moment değerlerinin bulunabilmesi için artı kutuplu elektromıknatısın eş

değer devresinin çözülmesi gerekmektedir. Artı kutuplu elektromıknatısın manyetik eş devresi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. (a) Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Eş Devresi (b) İndirgenmiş Eş Devresi (Figure 4. (a) Equivalent Circuit of Cross-Pole Magnetic Levitation (b) Reduced Equivalent Circuit)

Şekil 4'te ifade edilen P manyetik geçirgenlikleri, E_{PM} sabit mıknatısların AT değerini, N sargı sayım sayısını, i ilgili uyarım akımlarını ve Φ kutup akımlarını ifade etmektedir. Sabit mıknatıs laminasyonuna ait manyetik geçirgenlik 4.denklemden verilmiştir. S kutup yüzey alanı, l_{PM} mıknatısın kalınlığını ve μ_0 manyetik geçirgenlik sabitini ifade etmektedir.

$$P_{PM} = \frac{\mu_0 S}{l_{PM}}
 \tag{4}$$

P_{g1} hava aralıklarına ilişkin manyetik geçirgenlik ise Şekil 2 refans alınarak merkez eksenine göre iki katlı integral hesabı yapılarak bulunabilir. Bu hesaplamayı yapmak için Matlab programında *integral2* komutu kullanılarak çözümü kolaylıkla yapılabilmektedir.

$$P_{g1} = \int_a^b \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy$$

$$P_{g2} = \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \int_{-b}^{-a} \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy$$

$$P_{g3} = \int_{-b}^{-a} \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy$$

$$P_{g4} = \int_{-(b-a)/2}^{(b-a)/2} \int_a^b \frac{\mu_0}{z + y \tan \beta + x \tan \alpha} dx dy$$

İntegrallerin analitik sonuçlarının bulunması zor, zaman alıcı ve uzun sürmektedir. Nümerik hesapları ise daha kolaydır. Bu yüzden artı kutuplu manyetik yastığın modellenmesinde nümerik hesaplar kullanılmaktadır. P_i her bir kutup devresi üzerindeki toplam manyetik geçirgenliği ifade etmektedir.

$$P_i = \frac{P_{PM} P_{gi}}{P_{PM} + P_{gi} \quad (i=1,2,3,4)}$$

Kalıcı mıknatısa ilişkin manyeto motor kuvveti ise;

$$E_{PM} = H_c I_{pm}$$

ifade edilir. Artı kutuplu manyetik yastıkta depolanan enerji miktarı ise;

$$W^* = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} (E_{PM} + N i_n)^2 P_n$$

hesaplanmaktadır. Çekme kuvveti ve her eksenlerde endüklenen elektromanyetik moment değerleri virtüel yerdeğiştirme prensibine göre hesaplanabilmektedir.

$$f_z(z, \alpha, \beta, i_z, i_\alpha, i_\beta) = \frac{\partial W^*}{\partial z} \Big|_{i = const}$$

$$T_\alpha(z, \alpha, \beta, i_z, i_\alpha, i_\beta) = \frac{\partial W^*}{\partial \alpha} \Big|_{i = const}$$

$$T_\beta(z, \alpha, \beta, i_z, i_\alpha, i_\beta) = \frac{\partial W^*}{\partial \beta} \Big|_{i = const}$$

9. denklemde kuvvet hesaplarının çözümünün zorluğu görülmektedir. Bu yüzden alternatif olarak buradaki modelleme yerine her bir kutup başında endüklenen çekme kuvveti hesabı temel alan yaklaşım kullanılacaktır. Böylelikle türev alma işlemlerine gerek kalmadan kolayca bulunmuş olunacaktır. Buna göre f_z manyetik çekme kuvveti;

$$f_z(z(t), i_z(t)) = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \cdot 4 = \frac{2\mu_0 S (E_{pm} + N i_z(t))^2}{(z(t) + l_{PM})^2}$$

ile ifade edilebilir. Manyetik akıların yüzey alanı üzerinden dağılımsızın aktığı kabul edilerek, manyetik akı yoğunluğu (B) kolay bir şekilde hesaplanabilir.

$$i = 1, 2, 3, 4$$

$$f_i = \frac{B_i^2 S}{2\mu_0}$$

$$B_i = \frac{\Phi_i}{S}$$

$$\Phi_i = \sum_{n=1}^4 \Phi_{in}$$

Φ_{in} , i. kutuptan n.sargı bobininininden geçirmiş olduğu manyetik akı miktarıdır. Sonuç olarak çekme kuvveti ve momentini;

$$f_z = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$$

$$T_\alpha = (f_1 - f_3) \left(\frac{b-a}{2} + a \right)$$

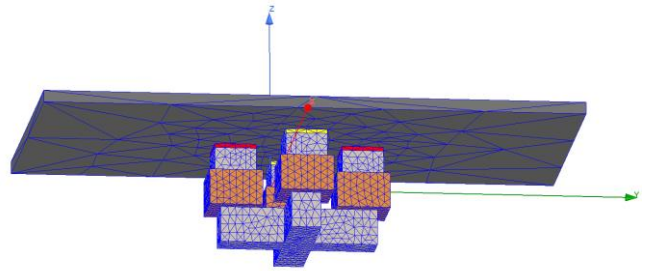
$$T_\beta = (-f_2 + f_4) \left(\frac{b-a}{2} + a \right)$$

hesaplanır.

Tablo 1. Model Parametreleri (Table 1. Model Parameters)

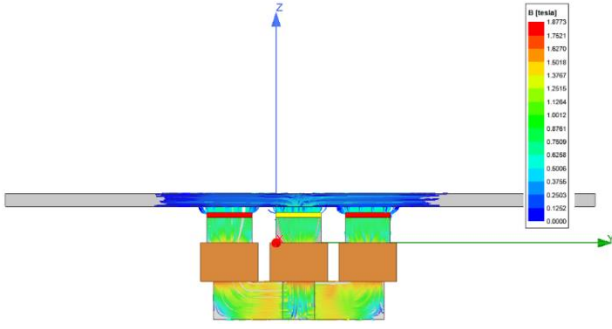
a (mm)	36,5	b (mm)	71,5	L _{pm} (mm)	3,5	N (turn)	200
q (mm)	10	z (mm)	5	H _c (kA/m)	939	i (A)	5

Tablo 1’de artı kutuplu elektromıknatısın model parametreleri verilmiştir. Şekil 2’de gösterilmiş olan uzaklıklar a ve b’yi mıknatıs kalınlığı L_{pm}’yi, q plaka kalınlığını, z z eksenindeki hava aralığını, N bobin sarım sayısını, i bobinlerden geçecek akım değerini ifade etmektedir.



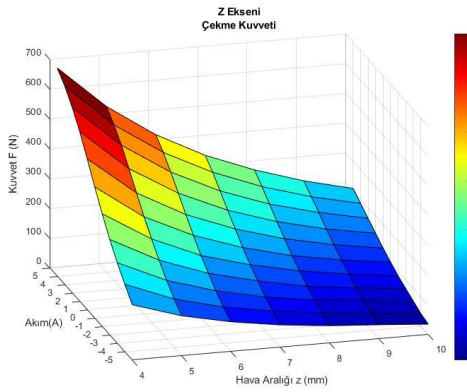
Şekil 5. Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Maxwell Analiz Modeli (Figure 5. Maxwell Analysis Model of Cross-Pole Magnetic Levitation)

Şekil 5’ te analizi yapılan artı tipli karma elektromıknatısın 3 boyutlu adaptif ağ yapısı (mesh) gösterilmiştir. Bu 3 boyutlu ağ yapısı Maxwell programının manyeto-statik analiz bölümünden üretilmiştir. Analizin önemli olan bölgeleri artı tipli taşıyıcının olduğu kısımlardır. Bu kısımlarda ağ yapısının daha da arttığı görülmektedir.

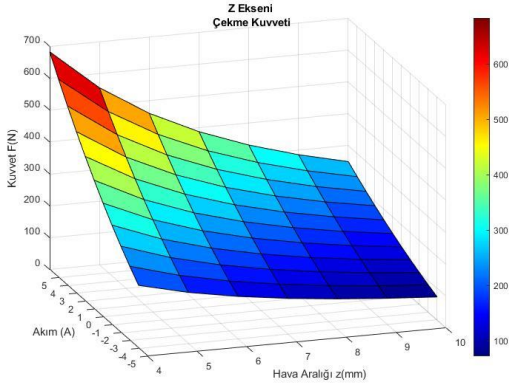


Şekil 6. Artı Kutuplu Manyetik Yastığın Maxwell Akı Yoğunluğu (Figure 6. Maxwell Flux Density of Cross-Pole Magnetic Levitation)

Şekil 6'da artı kutuplu manyetik yastığın Maxwell akı yoğunluğu verilmiştir.

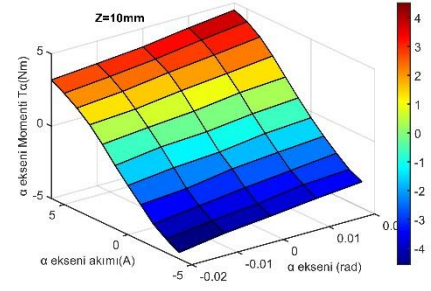


Şekil 7. Z Eksenli Çekme Kuvvetinin (F_z) Sonlu Elemanlar Analizi (Figure 7. Finite Element Analysis of Z Axis Attraction Force (F_z))

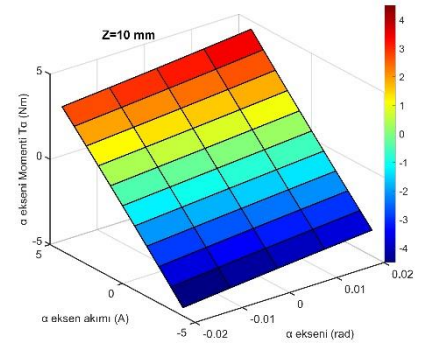


Şekil 8. Z Eksenli Çekme Kuvvetinin (F_z) Analitik Hesaplanması (Figure 8. Analytical Calculation of Z Axis Attraction Force (F_z))

Şekil 8'de 12. formül ile Z eksenindeki çekme kuvvetinin (F_z) hava aralığına ve z eksenindeki akımına (i_z) bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Şekil 7'de ise sonlu elemanlar analizi ile elde edilen F_z kuvveti verilmektedir. F_z için sonuçlara bakıldığında analitik model sonlu elemanlar metodu ile yapılan analiz sonuçlarıyla yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Geliştirilmiş olan bu model z eksenindeki çekim kuvveti açısından doğru olarak kabul edilir.



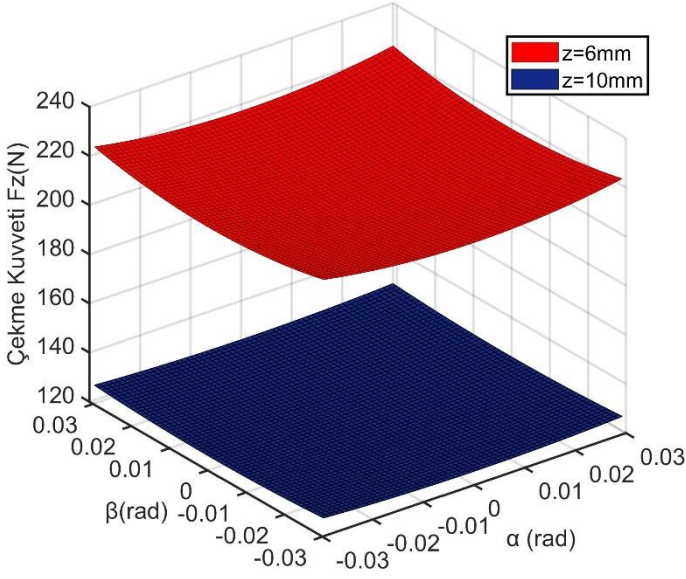
Şekil 9. Moment Değişimi Sonlu Elemanlar Analizi (Figure 9. Moment Change Finite Element Analysis)



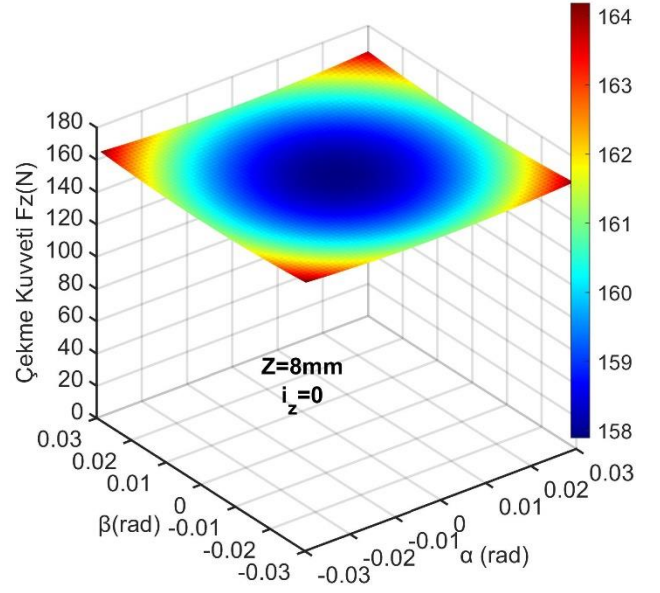
Şekil 10. Moment Değişimi Analitik Hesaplanması (Figure 10. Analytical Calculation of Moment Change)

Şekil 10'da 13. formül ile açılal yer değiştirme momenti α eksenindeki dönme ve α akımına bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Şekil 9'da ise sonlu elemanlar analizi ile elde edilen T_α momenti verilmektedir. Artı kutuplu elektromagnıt yapı gereği simetriktir. Bu yüzden β eksenindeki dönme momentide α eksenindeki dönme momentide aynı olacağı için verilmemiştir. Moment için sonuçlara bakıldığında analitik model sonlu elemanlar metodu ile yapılan analiz sonuçlarıyla yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Geliştirilmiş olan bu model de dönme eksenlerindeki moment değerleri açısından teyit edilmiştir.

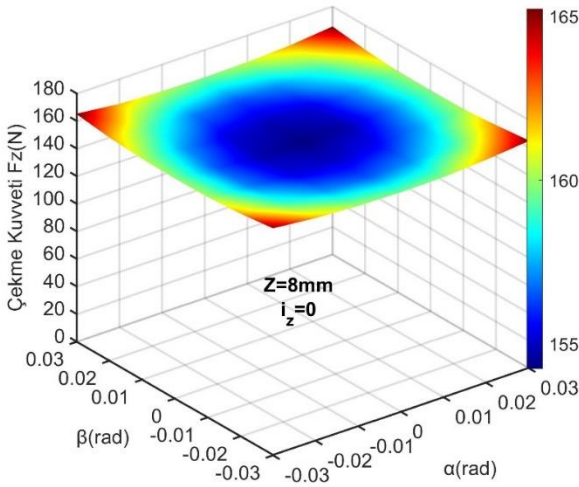
Taşıyıcı platformda dengesiz yüklenmeler sonucu kuplaj etkisi oluşabilmektedir. Bu durumu gözlemlemek için belirli bir i_z akımı için α ve β açılal yerdeğişimlerine karşı z eksenine düşen F_z çekme kuvveti hesaplanmalıdır. Bunun için denklem 12 kullanılabilir. Şekil 11'de $i_z=0$ için ve hava aralığının 10 mm ve 6 mm arasındaki değerler incelendiğinde, hava aralığının daha düşük olduğu yerlerde (6 mm) kuplaj etkisini gösterirken daha yüksek olan (10 mm) yerde kuplaj etkisi azalmaktadır.



Şekil 11. α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı Olarak Farklı z Değerleri (Figure 11. Different z -Values Due to Angular Displacements of α and β)



Şekil 13. $z = 8$ mm ve $i_z = 0$ için α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı F_z 'nin Analitik Hesaplanması (Figure 13. Analytical Calculation of F_z Due to Angular Displacements of α and β for $z = 8$ mm and $i_z=0$)



Şekil 12. $z = 8$ mm ve $i_z = 0$ için α ve β Açısal Yer Değiştirmelerine Bağlı F_z 'nin Sonlu Elemanlar Analizi (Figure 12. Finite Element Analysis of F_z Due to Angular Displacements of α and β for $z = 8$ mm and $i_z=0$)

Şekil 12'de görüldüğü üzere dönme açısı arttıkça oluşan kuvvet artmaktadır. Bu kuvvetlerin maksimum ve minimum değerler arasındaki farka incelendiğinde %6 lik bir farkın olduğu görülmektedir. Dönmeden dolayı değişen hava aralığının 8 mm'den küçük hava aralığında artarken daha düşük hava aralığı değerlerinde azalma göstermektedir.

Şekil 12 ve Şekil 13 karşılıklı incelendiğinde, F_z için analitik model ile sonlu elemanlar metoduyla yapılan analiz sonuçlarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Geliştirilmiş olan bu modelin doğruluğu teyit edilmiştir.

3. Sonuç

Bu çalışmada yeni bir tip olarak artı tip 4 kutuplu karma elektromıknatıslara sahip maglev taşıma sistemi önerilmiştir. Bu sistem iki tane U tipli karma elektromıknatısın farklı dizaynıyla gerçekleştirilmiştir. Analitik hesaplamalarda çekme kuvvetleri için virtüel yerdeğiştirme prensibine göre hesaplayabilmek zor olacağı için bu model yerine her bir kutup başında endüklenen çekme kuvveti hesaplanarak bulunmuştur.

Sonlu elemanlar metodu ile analitik hesaplarının başarılı bir şekilde örtüştüğü ve hata miktarlarının çok az olduğu görülmüştür. Bu hata miktarının nedenleri ise hesaplara katılmayıp ihmal edilen parametrelerden dolayı olduğu belirlenmiştir. Hata miktarlarının az olması sistemin çalışmasında kabul edilebilir sınırlar dahilinde modelin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Bu durum da bizlere çıkartılmış olan modelin doğruluğunu tasarlanan model ile gerçekleştirilecek kapalı çevrim kontrolcü benzetim sonuçlarının, gelecek çalışmalarda gerçekleştirilecek deneysel çalışmaların sonuçlarına yakın olacağı öngörülmektedir.

4. Teşekkür

Çalışmalarımıza desteklerinden dolayı TÜBİTAK ARDEB Başkanlığı'na, projemizi gerçekleştirme imkanı verdiği için YTÜ Rektörlüğü'ne, Mekatronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederiz (Proje No:112M210).

Kaynakça

- Atherton, D. (1980). Maglev Using Permanent Magnet. IEEE Transactions on Magnetics, (Vol.16, No: 1, Sf. 146–148.).
- Bozkurt, A.F., Güney, Ö.F., Erkan, K., (2018) Multi degrees of freedom robust magnetic levitation control of a flexible transport mover with disturbance observer and state feedback control, Control Engineering and Applied Informatics, 20(3):50-59.
- Erkan, K., Yalçın, B. C., Garip, M., (2016). Three-axis gap clearance I-PD controller design based on coefficient diagram method for 4-pole hybrid electromagnet. *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 58:2, 147-167.
- Ertuğrul H.F., (2014). 4 kutuplu 3 Serbestlik dereceli karma elektromıknatısın modellenmesi ve kontrolü. [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]
- Han, H. S., Kim D. S., (2016). Magnetic Levitation: Maglev Technology and Applications, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7524-3>.
- Kim, C., Lee, J., Han, H. ve Kim, B. (2011). Levitation and Thrust Control of a Maglev LCD Glass Conveyor. IECON 2011- 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Sf. 610 – 615.
- Lee, J., Khoo, S. and Wang, Z., (2013). DSP-Based Sliding-Mode Control for Electromagnetic-Levitation Precise-Position System, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 2, pp. 817-827
- Morishita, M., Azukizawa, Teruo; Kanda, S.; Tamura, N.; Yokoyama, T. (1989). A new Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System. IEEE Transactions on Vehicular Technology, (Vol. 38, No: 4, Sf. 230 – 236.)
- Tzeng, Y. ve Wang, T. C. (1994). Optimal Design of the Electromagnetic Levitation with Permanent and Electro Magnets. IEEE Transactions on Magnetics, (Vol. 30, No. 6, Sf. 4731 – 4733.)