

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) xxxxxx (390 – 396)

AKU J. Sci. Eng. 18 (2018) 017203 (390 -396)

DOI: 10.5578/fmbd.66854

## Disk Tipi Elektromekanik Aygıtın Bağ Grafiği Yöntemi ile Modellenmesi

**Zeliha KAMIŞ KOCABIÇAK***Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Bursa.**e-posta: zkamis@uludag.edu.tr*

Geliş Tarihi:30.03.2017 ; Kabul Tarihi:17.04.2018

### Özet

**Anahtar kelimeler**Bağ grafiği yöntemi;  
Mıknatıs devresi;  
Elektromekanik aygıt

Bu çalışmada disk tipi elektromekanik aygıtın modellenmesi ve sistemin dinamik davranışının elde edilmesi incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında sistem elemanları arasındaki enerji alışverişine dayalı grafiksel bir yöntem olan bağ grafiği yöntemi ile modellenmesi yapılmıştır. İkinci aşamada aygıtın MATLAB/Simulink modeli kurularak dinamik davranış eğrileri elde edilmiş ve iki model sonuçları karşılaştırılmıştır. Bağ grafiği modeli daha basit yapıda ve daha kolay anlaşılabilir bir modelleme yöntemi olmakla birlikte, yapılan benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen dinamik davranış eğrilerinin de Simulink modeli sonuçları ile bire bir uyumlu olduğu görülmüştür. Modellerden elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile de doğrulanmıştır.

## Modeling of Disc Type of Electromechanical Device by Bond Graph Method

### Abstract

**Keywords**Bond graph method;  
Magnetic circuit;  
Electromechanical  
device

In this study, the modeling of the disc type of electromechanical actuator and the dynamic behavior of the system have been investigated. In the first stage of the study, the system is modeled by the bond graph method that is a graphical method based on the energy exchange between the system elements. In the second stage, the MATLAB/Simulink model of the device is established to obtain dynamic behavior curves and the two model results are compared. Although bond graph method is simpler and more understandable modeling method, the dynamic behavior results of the model is found to be in harmony with Simulink model results. The results obtained from the models are also confirmed by the experimental results.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Elektromekanik aygıtlar elektriksel işareti mekanik harekete dönüştüren elemanlardır. Elde edilen mekanik hareket açılmalı ise elektrik motoru, doğrusal ise solenoid yada elektromekanik aygıt olarak adlandırılırlar. Elektromekanik aygıtlar gelişen teknoloji ile birlikte özellikle denetim sistemlerinin vazgeçilmez elemanı olmuşlardır.

Elektromekanik aygıt, tasarım aşamasında eş zamanlı olarak analiz edilmesi gereken alt sistemlerden meydana geldiği için tipik bir mekatronik sistemdir. Elektromekanik aygıtların tasarımı, modellenmesi ve çeşitli alanlara uyarlanması ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Kamış, 2005; Şefkat, 2009; Nitu et

al. 2008; Poyraz vd. 2003; Habib et al. 2012; Cope et al. 2008). Elektromekanik aygıtlarda kullanılan manyetik malzemenin B-H grafikleri (B: akı yoğunluğu [ $\text{Wb/m}^2$ ], H: Manyetizma/Mıknatıslanma kuvveti [ $\text{At/m}$ ]) kullanılarak MATLAB/Simulink programı yardımıyla gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir (Kamış, 2005; Şefkat, 2009).

Elektromekanik aygıtların modellenmesinde çeşitli yöntemler kullanılsa da, karmaşık yapıları aygıtların modellenmesine uygun grafiksel bir modelleme yöntemi olan bağ grafiği yöntemi de tercih edilmektedir. Bu yöntem farklı fiziksel sistemler arasındaki enerji alışverişini açıkça gösterdiği için mekatronik sistemlerin modellenmesinde

tasarımcıya kolaylık sağlar (Karnopp et al. 2000; Das et al. 2009; Alabakhshizadeh et al. 2011). Gonzalez-A ve Nunez-P (2012), elektrik ve mıknatis devreleri kullanan bir transformatörü bağ grafiği yöntemi ile modellemiştir. Alkov vd. (2014) endüstriyel bir sistem için bağ grafiği modelini kullanmıştır. Elektromekanik aygıtların bağ grafiği ile modellenmesi üzerine de çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle DC motor modellemesi (Poyraz vd. 2003; Habib vd. 2012; Ömürlü vd. 2010) yada farklı yapıdaki elektromekanik aygıtlar (Nitu et al. 2008; Cope et al. 2008; Dridi et al. 2017; Tseng et al. 2017) ele alınmıştır. Disk tipi mıknatis devresine sahip elektromekanik aygıtın bağ grafiği ile modellenmesi üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada daha önce elektromekanik supap mekanizması için tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiş olan disk tipi elektromekanik aygıt ele alınmıştır (Kamış, 2005). Elektromekanik aygıtın dinamik davranışı için bağ grafiği modeli elde edilmiş ve bağ grafiği model sonuçları Simulink modelinden elde edilen sonuçlar ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bağ grafiği modelinin doğruluğunu test etmek için her iki modelde de akı yolu geçirgenlikleri malzeme B-H eğrileri kullanılmadan doğrudan hesaplama yoluyla belirlenmiştir. Bağ grafiği yöntemi ile çok daha basit yapıda bir model elde edilmiş ve bu modelden elde edilen sonuçlar Simulink modelinden elde edilen sonuçlarla birebir aynı çıkmıştır. Modellerin doğruluğunu test etmek için mıknatis devresi üzerinde deney yürütülmüş ve model sonuçlarının deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

## 2. Disk Tipi Elektromekanik Aygıt

Bu çalışmada ele alınan elektromekanik aygıt düz yüzü disk tipi mıknatis devresinden oluşmaktadır. Bu mıknatis devresinin hareketli elemanı disk şeklindedir ve mıknatis olarak seri, mekanik olarak paralel bağlı iki çalışma aralığına sahiptir. Şekil 1' de disk tipi elektromekanik aygıt geometrisi ve eşdeğer mıknatis devresi gösterilmektedir.

Disk tipi mıknatis devresi elektrik, mıknatis ve mekanik alt sistemlerinden meydana gelir. Sistemin

hareket denklemleri alt sistemlerin birbiriyle etkileşimine bağlı olarak elde edilmektedir (Kamış, 2005; Şefkat, 2009; Roters, 1941).

Bir mıknatis devresinin bobinine uygulanan elektrik gerilimine ( $e_b$ ) karşılık oluşan akım değişimi ( $i$ ) sonucu devrede bir mıknatis akısı değişimi oluşur. Kirchoff yasasına göre bu ifadenin matematiksel bağıntısı; sarım sayısı ( $N$ ) ve mıknatis akısına ( $\phi$ ) bağlı olarak

$$e_b = Ri + \frac{d(N\phi)}{dt} = Ri + N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $R$  bobinin elektriksel direncidir.

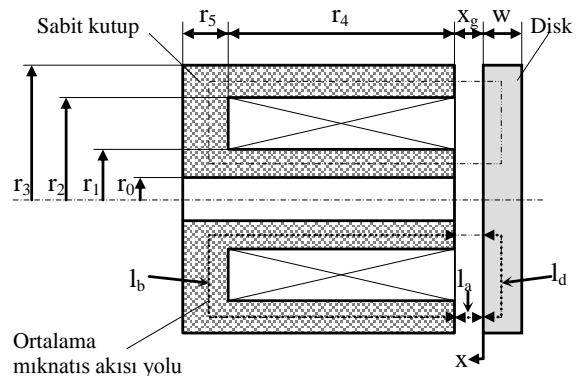
Mıknatis devresi magnetomotor kuvveti ( $\mathcal{F}=Ni$ ) mıknatis akısına bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\mathcal{F} = \phi(\mathcal{R}_b + \mathcal{R}_a + \mathcal{R}_d) \quad (2)$$

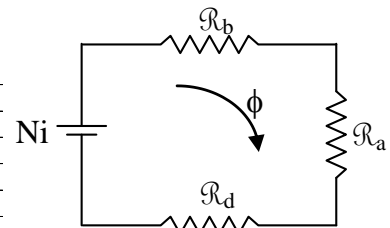
Burada  $\mathcal{R}_b$ ,  $\mathcal{R}_a$  ve  $\mathcal{R}_d$  sırasıyla bobinin içinde bulunduğu sabit kutup, hava aralığı ve disk elemanın mıknatis dirençleri olup

$$\mathcal{R}_b = \frac{l_b}{\mu_0 \mu_r A_b}, \quad \mathcal{R}_a = \frac{l_a}{\mu_0 A_a}, \quad \mathcal{R}_d = \frac{l_d}{\mu_0 \mu_r A_d} \quad (3)$$

şeklinde hesaplanır.



$r_0$	3 mm
$r_1$	16 mm
$r_2$	21 mm
$r_3$	26 mm
$r_4$	19 mm
$r_5$	7.5 mm
$w$	6 mm



Şekil 1. Elektromekanik aygıt geometrisi ve eşdeğer mıknatis devresi

Burada,  $\mu_0$ : havanın geçirgenlik katsayısı [H/m] ( $\mu_0=4\pi 10^{-7}$  H/m),  $\mu_r$ : mıknatıs malzemesinin bağlı geçirgenlik katsayısıdır.  $l_b, l_a, l_d$  sırasıyla sabit kutup, hava aralığı ve diskteki akı yolu uzunlukları [m],  $A_b, A_a, A_d$  sırasıyla sabit kutup, hava aralığı ve diskte akının geçtiği etkin kesit alanlarıdır [m<sup>2</sup>]. Şekil 1' de verilen ortalama mıknatıs akısı yoluna bağlı olarak (3) nolu denklemde yer alan akı yolu uzunlukları ve kesit alanları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$l_b = 0.5(r_3 + r_2 - r_1 - r_0 + 4r_4 + 2r_5)$$

$$l_a = 2(x_g - x) \quad (4)$$

$$l_d = 0.5(r_3 + r_2 - r_1 - r_0 + 2w)$$

$$A_b = A_d = \pi(r_3^2 - r_2^2), \quad A_a = \pi(r_1^2 - r_0^2)f \quad (5)$$

(5) nolu denklemde yer alan  $f=1.2$  olup hava aralığındaki akı saçaklanmalarını ve sızıntıları dikkate almak için kullanılan bir katsayıdır (Şefkat, 2009).

$\mathcal{P}_b, \mathcal{P}_a$  ve  $\mathcal{P}_d$  sırasıyla sabit kutup, hava aralığı ve disk elemanın mıknatıs geçirgenliği olmak üzere, mıknatıs direncinin tersi olarak hesaplanabilir.

$$\mathcal{P}_b = 1/\mathcal{R}_b, \mathcal{P}_a = 1/\mathcal{R}_a, \mathcal{P}_d = 1/\mathcal{R}_d \quad (6)$$

Disk elemanını harekete zorlayan mıknatıs çekim kuvveti ( $F_m$ ) mıknatıs akısının ( $\phi$ ) bir sonucu olarak aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$F_m = \frac{\phi^2}{\mu_0 A_a} \quad (7)$$

Elektromekanik aygıtlarda geri dönüş hareketi yay kuvveti ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla mıknatıs kuvveti yay ve sönüm kuvvetlerini yendikten sonra, disk elemanında mekanik hareket meydana gelmektedir. Newton' un II. Hareket Yasasından sistemin mekanik kısmının hareket denklemi

$$F_m = m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx \quad (8)$$

şeklinde elde edilir. Burada;  $m$ : disk kütlesi (kg),  $b$ : sönümleme katsayısı (N/(m/s)),  $k$ : yay rijitlik katsayısıdır (N/m).

Görüldüğü gibi mıknatıs devresinin dinamik davranışını tanımlayan denklemler oldukça karmaşık doğrusal olmayan ifadelerden meydana gelmektedir. Bu denklem takımlarının sayısal

yöntemlerle çözümünden sistemin statik ve dinamik davranış karakteristikleri elde edilebilir.

### 3. Bağ Grafiği Yöntemi

Bağ grafiği yöntemi fiziksel sistemlerin modellenmesinde kullanılan grafiksel bir yaklaşımdır. Farklı alt sistemleri, elemanlar arasındaki güç ya da enerji akışını gösteren bağlar ile birbirine bağlamaktadır.

Herhangi bir sistemdeki güç veya enerji akışı daima iki bağımsız parametreye bağlıdır. Bağ grafiği yönteminde bu parametreler çaba ( $e$ ) ve akış ( $f$ ) olarak tanımlanır.

Güç ( $P$ ), çaba ( $e$ ) ve akış ( $f$ ) parametrelerinin çarpımıdır. Momentum ( $p$ ) çabanın ve yerdeğiştirme ( $q$ ) akışın integrali şeklindedir.

$$P = ef \quad (9)$$

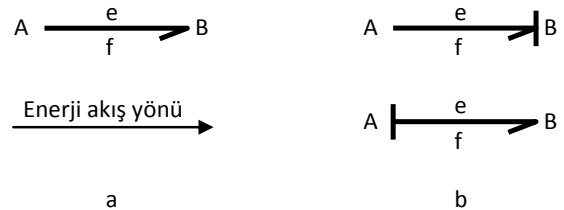
$$p = \int edt \quad q = \int fdt$$

Enerji ifadesi,  $E$  ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$E = \int ef dt = \int f dp = \int e dq \quad (10)$$

Bağ grafiklerinde yönlendirme okunun başlangıç ya da bitiş noktasına dik bir çizgi yerleştirilerek nedensellik belirlemesi yapılmaktadır. Nedensellik, hangi elemana doğru belirlendiyse o elemana çaba girişi olduğunu, nedensellik uygulanan elemandan diğer elemana doğru da bir akış çıkışı olduğunu göstermektedir (Şekil 2).

Çizelge 1' de farklı fiziksel sistemler için çaba, akış, momentum ve yerdeğiştirme parametreleri verilmiştir. Bağ grafiği modelinde kullanılan temel elemanlar ve matematiksel bağıntıları ise Çizelge 2' de verilmiştir.



Şekil 2. a) Elemanlar arası bağ grafiği gösterimi  
b) Nedensellik uygulanmış şekli

Çizelge 1. Fiziksel sistemlerdeki güç ve enerji değişkenleri

Sistem	Çaba (e)	Akış (f)	Momentum (p)	Yerdeğiştirme (q)
Elektrik	Gerilim [V]	Akım [A]	Akı Bağı [Vs]	Elektrik yükü [C]
Mekanik (öteleme)	Kuvvet [N]	Hız [m/s]	Doğrusal momentum [kgm/s]	Konum [m]
Mekanik (dönme)	Moment [Nm]	Açısal hız [rad/s]	Açısal momentum [Nms]	Açı [rad]
Mıknatis	Magnetomotor kuvveti [A-sarım]	Akı değişimi [Wb/s]	-	Akı [Wb]

#### 4. Elektromekanik Aygıtın Modellenmesi

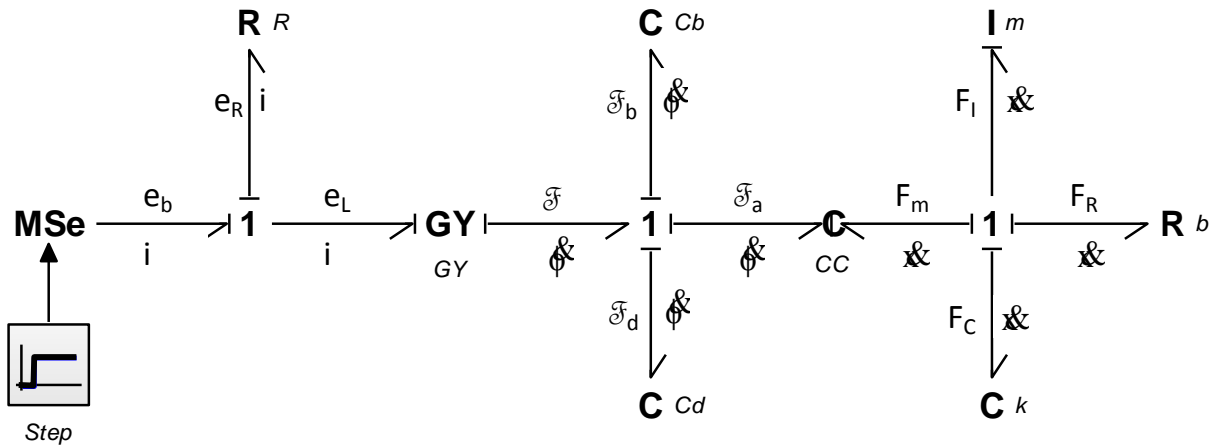
Disk tipi mıknatis devresinin elektrik, mıknatis ve mekanik alt sistemlerine ait (1)-(8) temel denklemleri kullanılarak oluşturulan bağ grafiği modeli Şekil 3' te gösterilmektedir. Mıknatis devresi modellenirken akı yolunun geçtiği her bir kısmın mıknatis geçirgenlikleri ya da mıknatis dirençlerinin dikkate alınması gerekir. Bağ grafiği modelinde mıknatis devresinin çeşitli kısımlarındaki geçirgenlik değerleri (6) nolu ifade yardımıyla doğrudan hesaplanmış mıknatis malzemesine ait B-H eğrileri kullanılmamıştır.

Bağ grafiği modelinde, her bir alt sistemde akışlar ortak olduğundan her alt sistem için 1 kavşağı kullanılmıştır.

Elektrik alt sisteminde bobin direnci için R elemanı, bobine uygulanan gerilim için basamak giriş şeklinde uygulanan MSe çaba kaynağı kullanılmıştır.

Çizelge 2. Temel bağ grafiği elemanları ve tanımları

	Sembol	Temel denklemler	İsim
Kaynaklar	$S_e:e \xrightarrow{f}$	$\begin{cases} e(t): \text{kaynaktan verilen} \\ f(t): \text{keyfi} \end{cases}$	Çaba kaynağı
	$S_f:f \xrightarrow{e}$	$\begin{cases} f(t): \text{kaynaktan verilen} \\ e(t): \text{keyfi} \end{cases}$	Akış kaynağı
Pasif elemanlar	$\xrightarrow{e} R$	$e(t) = Rf(t)$	Direnç
	$\xrightarrow{e} C$	$e(t) = \frac{1}{C} \int f(t) dt$	Kapasite
	$\xrightarrow{e} I$	$f(t) = \frac{1}{I} \int e(t) dt$	İndüktans
Dönüşümler	$\begin{matrix} e_1 & \xrightarrow{TF} & e_2 \\ f_1 & \xrightarrow{m} & f_2 \end{matrix}$	$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$	Düz dönüşüm
	$\begin{matrix} e_1 & \xrightarrow{GY} & e_2 \\ f_1 & \xrightarrow{r} & f_2 \end{matrix}$	$\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \end{cases}$	Ters dönüşüm
Kavşaklar	$\begin{matrix} f_3 \\ e_1 & \xrightarrow{0} & e_2 \\ f_1 & & f_2 \end{matrix}$	$\begin{cases} e_1 = e_2 = e_3 \\ f_1 - f_2 + f_3 = 0 \end{cases}$	Sıfır kavşağı
	$\begin{matrix} f_3 \\ e_1 & \xrightarrow{1} & e_2 \\ f_1 & & f_2 \end{matrix}$	$\begin{cases} f_1 = f_2 = f_3 \\ e_1 - e_2 + e_3 = 0 \end{cases}$	Bir kavşağı



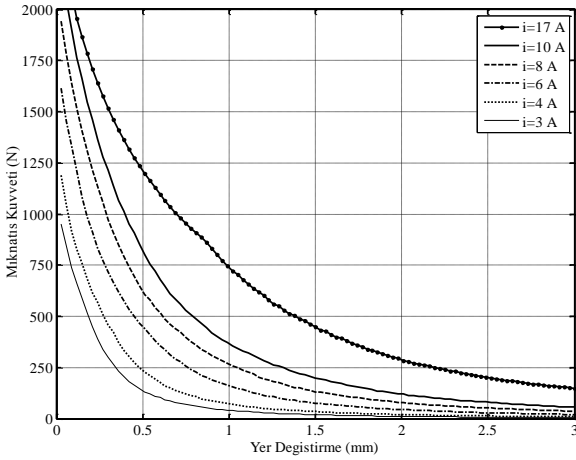
Şekil 3. Elektromekanik aygıtın bağ grafiği modeli



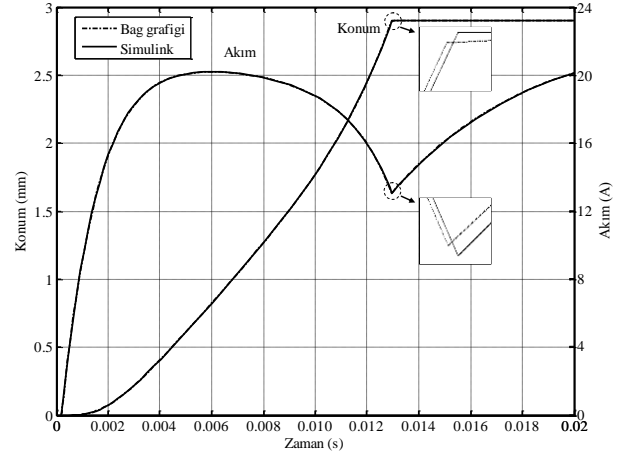
kuvvetlerinde hızlı bir azalma gözlenmekte, akım yükseldikçe mıknatis kuvveti artmaktadır.

Şekil 6' da ise bağ grafiği ve Simulink modeli ile elde edilmiş dinamik davranış eğrileri gösterilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi her iki modelden elde edilen eğriler birbiri ile tamamen uyumludur.

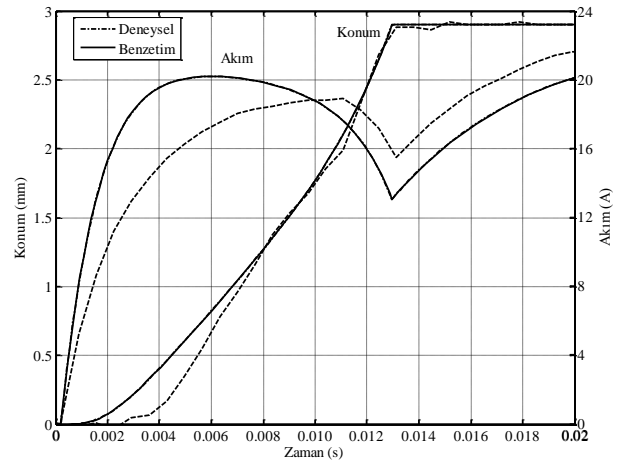
Şekil 6' da verilen dinamik davranış eğrileri incelendiğinde; başlangıçta sürekli artış gösteren akımın belli bir noktada maksimum değere ulaştıktan sonra düşüşe geçtiği görülmektedir. Düşüşe geçen akım eğrisi belli bir noktada minimum değere ulaştıktan sonra tekrar yükselişe geçmektedir. Akım değişimi ile oluşan mıknatis kuvveti artışı doğrudan hareket değişimine neden olurken diğer taraftan hareket değişimi de ters yönde akım değişimine etki etmektedir. Sonuçta akım değişimi elektromekanik sistemdeki karşılıklı etkileşimin bir ifadesidir. Akım eğrisinin minimum yaptığı noktada hareketin tamamlandığı görülür.



Şekil 5. Mıknatis kuvveti-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 6. Mıknatis kuvveti-yerdeğiştirme eğrileri model sonuçları



Şekil 7. Mıknatis kuvveti-yerdeğiştirme eğrileri model ve deney sonuçları

Bu çalışmada ele alınan mıknatis devresi önceki bir çalışmada elektromekanik supap mekanizmasında kullanılmıştır (Kamış, 2005). Elektromekanik supap mekanizmalarında, supap hareketi büyük oranda yay enerjisi ile tamamlanmaktadır. Mıknatis kuvveti hareketi sonlandırmak ve supabı açık ya da kapalı konumda tutmak için gereklidir. Bu nedenle elektromekanik supap mekanizmalarında yeterli cevap hızını sağlayabilmek için rijitliği yüksek yaylar kullanılmaktadır ( $k=134\text{N/mm}$ ).

Mıknatis devresi, diski yay kuvvetine karşılık belli bir mesafeden ( $\sim 2.9$  mm) çekecek şekilde modellenmiştir. Karşı yay kuvveti mıknatis devresine göre çok büyük olduğundan, mıknatis devresi akımı oldukça yüksek değerlere ulaşmakta ve cevap süresi de uzun çıkmaktadır (Şekil 6). Şekil 7' de model sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar uyumlu olarak elde edilmiştir.

## 6. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada disk tipi mıknatıs devresine sahip elektromekanik aygıt için temel denklemler çıkarılmış ve elektromekanik aygıtın dinamik davranışı için bağ grafiği modeli elde edilmiştir. Bağ grafiği modeli sonuçları hazırlanan Simulink modeli sonuçları ile karşılaştırılmış, her iki model için elde edilen akım ve konum eğrilerinin birbiri ile aynı olduğu ve deney sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile bağ grafiği yöntemi ile modellemenin çok daha basit bir modelleme yöntemi olduğu ve sonuçlarının yeterli doğrulukta elde edildiği tespit edilmiştir.

## Kaynaklar

- Alabakhshizadeh, A., Iskandarani, Y., Hovland, G. and Midtgard, O. M., 2011. Analysis, modeling and simulation of mechatronic systems using the bond graph method. *Modeling, identification and control*, **32(1)**, 35-45.
- Alkov, I., Diekmann, R. and Weidemann, D., 2014. A generalized power-based modelica library with application to an industrial hydraulic plant. Proceedings of the 10th international modelica conference, Lund, Sweden, March 10-12.
- Cope, D., Wright, A., Corcoran, C.J., Pasch, K., and Fischer, D., 2008. Fully flexible electromagnetic valve actuator: design, modeling, and measurements. SAE International, 2008-01-1350.
- Das, S., 2009. Mechatronic modeling and simulation using bond graphs. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, 233-314.
- Dridi, S., Salem I. B. and Amraoui L. E. 2017. Bond Graph modeling of automotive suspension system using a linear actuator. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **8(1)**, 1837-1844.
- Gonzalez-A, G. and Nuñez-P, D., 2012. Electrical and magnetic modelling of a power transformer: a bond

- graph approach. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, **6(9)**, 965-971.
- Habib, T., Nielsen, K. and Jørgensen, K. A., 2012. Bond graph modeling and simulation of mechatronic systems. Proceedings of NordDesign 2012, Aalborg University, Denmark, August 22-24.
- Kamış, Z., 2005. Supaplar için elektromekanik eyleyici tasarımı ve denetiminin araştırılması. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 165.
- Karnopp, D. C., Margolis, D. L. and Rosenberg, R. C., 2000. System dynamics – modeling and simulation of mechatronic systems. John Wiley & Sons Inc., New York, 519-543.
- Niçu, C., Niçu, S. and Grămescu, B., 2008. Electromagnetic actuator modeling for modular robotics applications. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, **10(5)**, 1137 – 1142.
- Ömürlü, V. E., Sağırılı, A., Hasköy, E., Turgut, M. N. ve Yıldız, İ., 2010. Dört rotorlu insansız hava araçlarının bağ grafik yöntemi ile modellenmesi ve model teyidi. Türkiye Otomatik Kontrol Komitesi Ulusal Toplantısı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, 463-468.
- Poyraz, M., Özdemir, M. ve Yıldız, A., 2003. Aynı yükü besleyen iki serbest uyarımlı dc motorun dinamik davranışının bond graf yöntemi yardımıyla incelenmesi. *Politeknik dergisi*, **6(1)**, 373-377.
- Roters, H.C., 1941. Electromagnetic devices. John Wiley, USA, 253-266.
- Şefkat, G., 2009. The design optimization of the electromechanical actuator. *Structural and multidisciplinary optimization*, **37(6)**, 635-644.
- Tseng, K., Chou, C., Liu, T., Wu, C., Chiu, J. and Cheng, P. 2017. Electromagnetic characteristic analysis of circuit breaker actuator using bond graph method. *Electric Power Components and Systems*, **45(6)**, 647–659.