



BİR ELEKTROMEKANİK AYGITIN STATİK VE DİNAMİK KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Gürsel ŞEFKAT

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle/Bursa

Geliş Tarihi : 28.06.2002

ÖZET

Elektronik elemanların ve bundan dolayı sürücü devrelerin hızlı gelişimi ve yaygınlaşması sonucunda elektromekanik aygıtların kullanımı hızla artmıştır. Bir çok uygulamada klasik cihazlara alternatif olmuşlardır. Bu çalışmada bir elektromekanik cihaz tasarlandı ve benzetim sonuçları elde edildi. İlk aşamada elektromekanik aygıt tipi seçildi ve tasarım işlemi adım adım açıklandı. Daha sonra, çalışma şartları dikkate alınarak elektromekanik aygıtın MATLAB ve SIMULINK paket programları kullanılarak statik ve dinamik analizi yapıldı. Gerçek çalışma koşulları altında, sistem başarımını gösteren benzetim sonuçları, uygulanan farklı gerilim değerlerine karşılık akım, kuvvet ve yerdeğiştirme eğrileri olarak sunuldu.

Anahtar Kelimeler : Elektromekanik aygıt, Sistem dinamiği, Statik ve dinamik analiz, MATLAB

AN INVESTIGATION OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTIC OF AN ELECTROMECHANICAL DEVICE

ABSTRACT

The use of electromechanical devices increased rapidly as a result of rapid development in electronic components and therefore in driver circuits and because of widespread use of them. They became alternative to classical devices for many application. In this study, an electromechanical device was designed and simulation results were obtained. Firstly, the type of electromechanical device was chosen and design procedure was explained step by step. Then, static and dynamic analysis of the device were carried out using MATLAB and SIMULINK software considering working conditions. Simulation results showing the system performance under real working conditions were presented as current, force and displacement curves for different voltage values.

Key Words : Electromechanical device, System dynamic, Static and dynamic analysis, MATLAB

1. GİRİŞ

Elektromekanik aygıtlar, elektrik ve mekanik sistemlerin birleşiminden meydana gelen ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren düzeneklerdir. Bu dönüşüm sonucunda mekanik enerji bir dönme hareketi oluşturuyorsa elektrik motoru, öteleme hareketi oluşturuyorsa solenoid veya elektromekanik aygıt adını alır. Elektromekanik aygıtların, elektriksel çalışması,

cevap hızının yüksek olması, uygulama esnekliği, hassasiyet ve otomatik olarak çalışması gibi üstün özellikleri ile ve elektronik ve bilgisayar teknolojilerinin gelişimi ve denetim sistemlerindeki yeri ve önemi arttıkça, endüstrinin bir çok alanında, basit bir su musluğundan, otomobil sektöründeki çok hassas denetim gerektiren enjeksiyon valflerine kadar yaygınlaşarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle robotlar, CNC takım tezgahları ve elektriksel valfler gibi hassas konum denetimi gerektiren sistemlerde, yakıt tasarrufu sağlamak için

ısı sistemlerinde ve otomobil sektöründe, tıbbi aletlerde, ölçme elemanlarında kullanılan elektromekanik aygıtların, hassas ve uzaktan kumanda gerektiren daha bir çok uygulama alanında da kullanılacağı aşikardır.

Roters (1958), farklı elektromıknatis tiplerini ve statik karakteristiklerini inceleyerek tasarım adımlarını belirlemiştir. Yüksel (1981), tek ve iki yüzer diskli anahtarlama valflerinin tasarımı, elektromanyetik ve akışkan karakteristiklerinin çıkarılması üzerine çalışmalar yapmıştır. Fabien (1990) yaptığı çalışmada elektromekanik eyleyicinin optimum tasarımını incelemiş ve mekanik sistemlere göre üstünlüğünü belirtip sistem dinamiği açısından bir karşılaştırma yapmıştır. Sun ve Parker (1992), tek diskli pilot valfin karakteristiklerini incelemiştir. Xu and Jones, (1997), manyetik dirençlerin tanımlanıp hesaba katıldığı elektromekanik aygıtların dinamik başarımının benzetimi için bir metod geliştirmişlerdir. Howe (2000), elektromekanik aygıtların uygulama alanları, karakteristiklerini ve kontrollerini incelemiştir. Şefkat (2000), elektromekanik aygıtların optimum tasarımı ve denetimini incelediği çalışmada bu tip bir cihazın statik ve dinamik karakteristiklerini araştırmıştır. Lua et al., (2001), soluk alma problemi olan hastaların kullandığı havalandırma cihazında kullanılan solenoid valfin karakteristiklerini ve kontrolünü incelemiştir.

Bu çalışmada, elektromekanik aygıtların, doğrusal mekanik hareket sağlayan ve elektromıknatis veya solenoid olarak bilinen kısmı irdelenecektir. Bir solenoidin genel yapısı, çekirdek olarak bilinen hareketli kutup ve içinde sargı devresi bulunan hareketsiz kutuptan ibarettir. Çekirdek ve kutup ferromanyetik malzemeden mamul olup sargıdan akan elektrik akımının oluşturduğu mıknatis kuvveti çekirdeği kutuba doğru harekete zorlar. Solenoidler elektrik akımını kuvvete dönüştüren aygıtlardır. Bu kuvvet ile herhangi bir cihazın hareketli elemanına kolaylıkla kumanda edilebilir. Solenoidler yapılarında kullanılan elektromıknatis tipleri ile de adlandırılabilirler. Bu çalışmada, düz yüzlü disk tipi elektromıknatis kullanılmıştır. Bu tip bir elektromekanik aygıt tasarımı ve bu aygıtın statik ve dinamik analizi gerçekleştirilecektir.

2. MATERYAL VE METOT

2. 1. Düz Yüzlü Elektromekanik Aygıt Tasarımı

Düz yüzlü elektromekanik aygıt çok küçük yer değiştirmelerde çok yüksek çekim kuvveti, buna karşılık yer değiştirmenin artışına bağlı olarak çekim

kuvvetinde çok ani düşüşlerin olduğu bir karakteristik yapıdadır. Ayrıca iki hava aralığına sahip olması nedeni ile büyük ve etkili tutma yüzeyleri oluştururlar.

Elektromekanik aygıt tasarımı iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda tasarlanacak elektromekanik aygıttan istenen kuvvet, hareket mesafesi, sıcaklık artışı ve uygulanacak gerilim verilerine göre dört temel denklemden (1, 2, 5, 6) hesaplanan boyutların belirlenmesidir. İkinci kısımda ise bulunan değerlerin standartlara uygun seçimi ve bu boyutlara göre elektromekanik aygıttan elde edilecek kuvvet, maksimum sıcaklık artışı, bobin teli çapı gibi değerlerin belirlenmesidir (Şefkat, 2000).

Manyetik kuvveti, yapılan işten hareketle şu şekilde de elde edebiliriz.

$$\text{Kuvvet} = \frac{z}{2} \frac{B_h^2 A}{\mu} \quad (1)$$

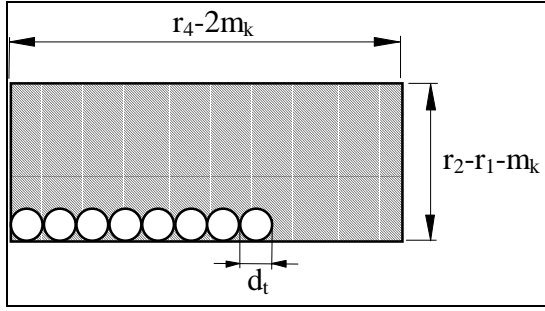
Burada z ; hava aralığı sayısı, B_h ; hava aralığındaki akı yoğunluğunu, A ; çekirdek kesit alanını ve μ havanın geçirgenlik katsayısını göstermektedir. Verilen kuvvet ve hava aralığı için gerekli akı üretimini sağlayacak magnetomotor kuvveti (NI), elektromıknatisli devrelerin tümü için manyetik devre eşitliği olarak bilinir ve bu eşitlik;

$$NI = z \frac{B_h x_h}{\mu} + \sum H_i l_i \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $B_h x_h / \mu_0$; hava aralığında B_h akı yoğunluğunu sağlayacak magnetomotor kuvvetini, $\sum H_i l_i$; ise malzeme içindeki akı yoğunluğunu sağlayacak magnetomotor kuvvetini temsil eder. Elektromekanik sistemlerde harcanan güç, elektriksel güç olup $P = I^2 R$ 'dir. Verilen bu enerji ile sistemin ısınması kaçınılmazdır. Ancak sisteme verilen bu enerji, taşınım yolu ile çevreye atılmaktadır. Isı transferi denklemini yazarsak;

$$P = I^2 R = h A_{tr} \Delta T \quad (3)$$

Burada, h ısı iletim katsayısını, ΔT sıcaklık farkını ve A_{tr} , ısı transferine konu olan yüzey alanını temsil etmekte olup boyutlara bağlı direnç ifadesini Şekil 1'de verilen parametrelere göre şöyle ifade edilir.



Şekil 1. Makara

$$R = \frac{\rho \pi N^2 (r_1 + r_2)}{(r_4 - 2m_k)(r_2 - r_1 - m_k) f_2} \quad (4)$$

Burada N sarım sayısı, m_k makara cidar kalınlığı, ρ özgül direnç ve f_2 boşluk faktörü olup tel çapına göre standart değerler alır. (4)'nolu ifadeyi (3)'nolu ifadeye yerine koyarsak;

$$\Delta T = \theta = \frac{\rho \pi (r_1 + r_2)}{h A (r_4 - 2m_k)(r_2 - r_1 - m_k) f_2} (NI)^2 \quad (5)$$

şeklini alır. Bobindeki bakır telin, verilen gerilim için uygun sarım sayısı düzenlenmelidir. Ohm kanunundan gerilim düşümü ve R için özgül dirençli ifadesi yerine konulursa;

$$E = IR = I \frac{\rho l}{A_t} N = \frac{4 \rho NI (r_1 + r_2)}{d_t^2} \quad (6)$$

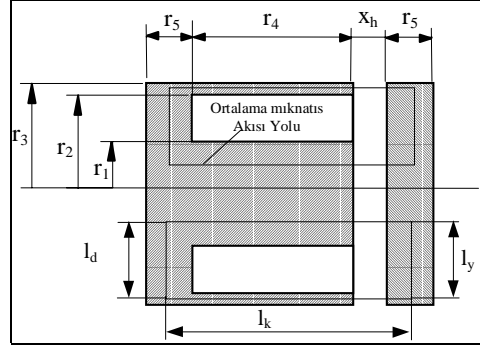
şeklinde ifade edilir. Burada, E; verilen gerilim farkını, r_1 , r_2 ; bobinin temel boyutlarını, d_t ; tel çapını temsil eder.

Bu aşamada sabit bir hava aralığı mesafesi için, sağlanacak kuvvetten hareketle boyutlar belirlenir. Ancak manyetik kayıpların, demir malzemenin doyması, geçirgenlik ifadeleri, değişik hava aralığı mesafelerinde sağlanan kuvvet gibi elektromekanik aygıt karakteristiklerinin hesaba katılması, manyetik devre hesabını zorlaştırır. Bu nedenle bu tip hesaplamalarda sayısal analiz metotları kullanılmalıdır. Elektromekanik aygıtın statik karakteristiğini temsil eden kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, elde edilen boyutlara göre belirlenir.

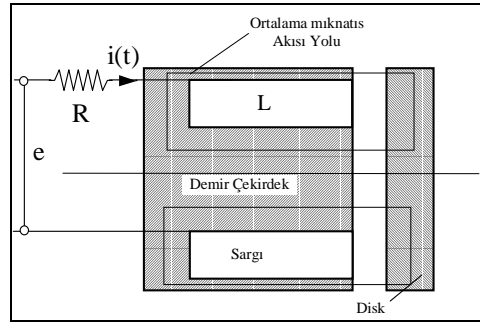
2. 2. Düz Yüzlü Elektromekanik Aygıtın Statik Karakteristiği

Elektromekanik aygıtlar genellikle Şekil 2'de görüldüğü gibi, sabit bir gövde ve hareketli bir elemandan (disk) oluşur. Elektromekanik aygıtın elektrik modeli Şekil 3'de verildiği gibidir. Elektromekanik aygıt, çekirdek ve bobin sistemiyle bir elektromanyetik alan meydana getirme temeli ile çalışır. Manyetik özelliğe sahip bir malzeme ile bu

sistemin kaplanması, manyetik yolda maksimum geçirgenlik sağlar. Elektromıknatısın sağladığı kuvvetin faydalı (iş yapabilen) kısmı, bobin ile disk arasındaki hava aralığı ile kontrol edilir. Disk üzerine, bobin tarafından uygulanan kuvvet (1) nolu denklem kullanılarak, iki hava aralığı (incelenen tipte; $z = 2$) için şöyle verilir;



Şekil 2. Elektromekanik aygıtın geometrisi



Şekil 3. Elektromekanik aygıtın elektrik modeli

$$\text{Kuvvet} = \frac{B_h^2 A}{\mu} \quad (7)$$

Analize başlarken Şekil 2'de gösterildiği gibi manyetik devrenin ana boyutlarının, arzu edilen manyetik kuvveti sağlaması için (7)'nolu ifadeden yararlanarak çekirdek kesit alanı r_1 bulunur. En uygun elektromekanik aygıt boyutları için verilen (Roters, 1958).

$$3 \leq \frac{r_4}{r_2 - r_1} \leq 4 \quad (8)$$

$$r_1^2 = r_3^2 - r_2^2 = 2r_1 r_5$$

ifadeleri ile r_2 , r_3 , r_4 ve r_5 belirlenir. Bunlara bağlı olarak Şekil 2'de gösterilen ortalama akı yolu boyutları l_k , l_y ve l_d de belirlenmiş olur. Bir sonraki adım, manyetik devrenin farklı kısımlarının geçirgenliğinin belirlenmesidir, böylece devredeki akı dağılımı da bilinir. Disk yer değiştirmesinin

fonsiyonu olarak manyetik devrenin geçirgenliği, kullanılan elektromıknatis da manyetik yolun boyutları ve şekli üzerine dayandırılmış deneysel formüllerle verilir (Roters, 1958).

İç kutup geçirgenliği;

$$P_{fi} = 3.26\mu_0 r_1 + 4\mu_0 r_2 \ln\left(\frac{r_2 - r_1}{\pi x_h}\right) \quad (9.a)$$

Dış kutup geçirgenliği;

$$P_{fd} = 1.63\mu_0 r_3 + 2\mu_0 r_3 \ln\left(1 + \frac{r_1}{x_h}\right) + 3.26\mu_0 r_2 + 4\mu_0 r_2 \ln\left(\frac{r_2 - r_1}{\pi x_h}\right) \quad (9.b)$$

Kullanılır aralığın geçirgenliği;

$$P_{uh} = \frac{\pi\mu_0 r_1^2}{2x_h} \quad (9.c)$$

İç ve dış kutup çekirdeğinin arasındaki disk boyunca toplam etkili geçirgenlik;

$$P_a = \frac{1}{\frac{1}{P_{ug} + P_{fi}} + \frac{1}{P_{ug} + P_{fd}}} \quad (9.d)$$

Kutup çekirdekleri arasındaki kayıp geçirgenlik;

$$P_1 = \mu_0 \left[1.57r_4 \frac{(r_1 + r_2)}{(r_2 - r_1)} - \frac{(r_1 + r_2)}{2} \left(1 - \frac{\pi x_h}{(r_2 - r_1)} \right) \right] \quad (9.e)$$

Geçirgenliğin birimi amper sarım başına Maxwell'dir. Elektromanyetik devrelerin hesabı yukarıdaki eşitliklerden de görüldüğü gibi gerçekten çok karmaşıktır. Bu nedenle bu eşitliklerin en iyi çözümü bilgisayar destekli çözümlerdir. Bu çalışmada manyetik devrenin sayısal hesaplamaları için MATLAB paket programı kullanılarak bir bilgisayar programı yazıldı. Manyetik devre hesabındaki doğrusalsızlıktan dolayı ortaya çıkan güçlük, kullanılan manyetik malzemenin B-H ilişkisini temsil eden deneysel mıknatislanma eğrisinin kullanılmasıyla kısmen giderilir. Bilgisayar programı içinde, verilen B değerine karşılık, H değerini elde etmek için Armco demirin mıknatislanma eğrisinden alınan verilerle MATLAB'ın enterpolasyon programı "interp1.m" dosyası kullanıldı. Hesaplanan herhangi bir B değerine karşılık H değeri enterpolasyonla elde edildi. İlk durumda, sabit bir hava aralığında manyetik devrenin farklı kısımlarının geçirgenliğinin hesabından sonra, iterasyon yöntemi ile manyetik malzemenin mıknatislanma eğrisinden alınan verilerle oluşturulan $H = f(B)$ eğrisinden alınan akı yoğunluğu verileri

programın asıl kısmına giriş olarak verilir. İlk adımda, ferromanyetik kaplamanın akı yoğunluğu B_b ile benzer olması için alınan akı yoğunluğunun çok küçük değerleriyle başlar. Daha sonra manyetik devrenin farklı kısımlarının akı ve akı yoğunluğu aşağıdaki deneysel formüllerle hesaplanır.

Hava aralığındaki akı yoğunluğu;

$$B_h = \frac{P_{uh}}{P_a + P_1} B_b \quad (10.a)$$

diskin akı yoğunluğu;

$$B_d = B_h \frac{P_a}{P_{uh}} \quad (10.b)$$

kutup çekirdeğinin akı yoğunluğu;

$$B_k = B_d + \frac{2}{3} B_h \frac{P_1}{P_{uh}} \quad (10.c)$$

Bulunan akı yoğunluğu değerlerinden, B-H mıknatislanma eğrisinden alınan veriler kullanılarak yapılan enterpolasyon ile H değerleri hesaplanır, dolayısı ile manyetik devrenin demir kısmı için gerekli magnetomotor kuvveti NI, bulunur.

$$\sum H_n l_n = H_d l_d + 2H_k l_k + H_y l_y \quad (11)$$

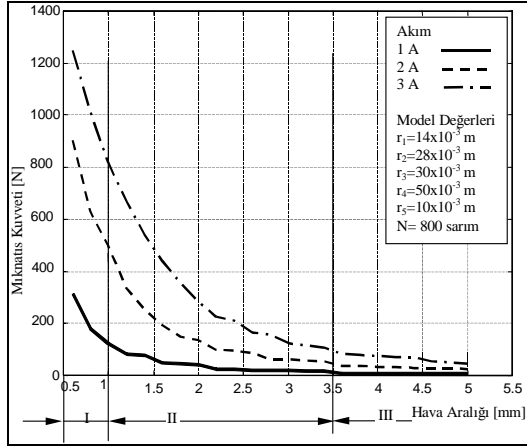
Bu eşitliğe, hava aralığındaki magnetomotor kuvvetinin eklenmesiyle gerekli toplam magnetomotor kuvvet şöyle hesaplanır ;

$$NI = \frac{2B_h x_h}{\mu_0} + \sum H_n l_n \quad (12)$$

İkinci durum, bir döngü yoluyla iterasyon yapılarak farklı aralıklarda hesaplanan magnetomotor kuvvet NI için gerekli akının belirlenmesinde kullanılır. Burada da birinci durumdaki eşitlikler kullanılır. Ancak akı yoğunluğu değerleri giriş verileri olarak gerekli değildir. Programda bir döngüyle verilen magnetomotor kuvvetine yaklaşılmaya çalışılır ve verilen magnetomotora ulaşıncaya kadar iterasyona devam edilir. Bu yöntemle sabit uyarı akımı elde edebilmek için elektromıknatisın kuvvet-hava aralığı karakteristiklerini tamamlayıncaya kadar, her artan aralık için mıknatis kuvvet hesaplanır.

Çeşitli disk yer değiştirmelerine ve uyarı akımlarına karşılık gelen mıknatisal kuvvetlerin tam değerlerinin bulunabilmesi için mıknatisal sızıntıyı ve doymayı hesaba katan hava aralığı akı yoğunluğu değerleriyle mıknatisal çekirdek içindeki akı dağılımının elde edilmesi gerekir. Elektromanyetik devre içindeki mıknatis yolunun boyutlarına ve biçimine bağlı olan

deneySEL geçirgenlik formülleri (9), disk yer değiştirmesinin bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Elektromanyetik devrelerin yapısı karmaşık olduğundan sözü geçen formüller yardımıyla çeşitli disk yer değiştirmelerine ve akımlara karşılık gelen kuvvet eğrileri bilgisayar programı yardımıyla elde edilebilmektedir ve bu eğriler sabit akım değerleri için şekil 4'de gösterilmiştir.



şekil 4. Elektromekanik aygıtın statik karakteristiği

şekil 4'de görüldüğü gibi, elektromekanik aygıtın statik karakteristiğini gösteren mıknatis kuvveti-hava aralığı eğrileri üç bölgeye ayrılır. Düz yüzlü disk tipi elektromekanik aygıtın en önemli özelliği, küçük hava aralıklarında yüksek mıknatis kuvveti, hava aralığının artmasına bağlı olarak mıknatis kuvvetinde çok ani bir düşüşün olmasıdır. şekil 4'de gösterilen I. bölge mıknatis kuvvetlerinin çok yüksek, hava aralığının küçük olduğu bölgedir. Bu alan içinde kalıcı mıknatislanma etkisi çok yüksek olduğundan bu bölge çalışma sınırları dışında tutulur. III. bölge ise hareketli kutup (disk) sabit kutuptan çok fazla uzaklaştığından mıknatis kuvvetleri en aza inmiştir. Bu durumda elektromekanik aygıt için en uygun çalışma alanı II. bölge içinde olmaktadır. Bu bölgede kalıcı mıknatislanma etkileri en aza indirgenmiş ve diskin hareketi için yeterli mıknatis kuvveti sağlanmıştır.

Aynı grafikte farklı sertliklere sahip elemanın kuvvet-sıkışma eğrileri de gösterilebilir. Buradan hareketle sistemde kullanılacak geri dönüş yayı seçilebilir. Uygulamada sabit kutupla hareketli kutup arasında kullanılan yay elemanı hava aralığı azaldıkça sıkışma artacağı için küçük hava aralıklarında en büyük değerini alacaktır. Harekete başlama anı olan hava aralığının maksimum değerinde mıknatis kuvvetine nazaran yay kuvveti seçilen sertliğe göre daha yüksek olabilir. Bu durumda bobin harekete başlarken yüksek akım, tutma anında ise daha düşük bir akımla sürülebilir. Kademeli akım denilen bu durum aynı zamanda enerji tüketimini de azaltır (şefkat, 2003).

2. 3. Elektromekanik Aygıtın Dinamik Karakteristiği

Düz yüzlü mıknatis devresine sahip elektromekanik aygıtın, diskli elektromıknatis modeline dayanan elektromekanik sisteminin elektrik, manyetik ve mekanik kısımları ile ilgili ifadeler sırasıyla aşağıda verildiği gibidir.

Elektriksel ; sisteme verilen gerilim direnç ve indüktans üzerinde harcanacağından (Fitzgerald et al., 1990).

$$e = E_R + E_L = iR + N \frac{d\Phi}{dt} \quad (13)$$

burada e; sisteme giriş olarak verilen gerilimi, R; bobin direncini, N; sarım sayısını ve Φ ; manyetik akıyı göstermektedir.

Manyetik; (13)'nolu eşitliği manyetik akıyı tanımlayacak biçimde yeniden düzenlersek;

$$\Phi = \frac{1}{N} \int (e - iR) \quad (14)$$

biçiminde elde ederiz. Manyetik alan ile manyetik akı arasındaki ilişki;

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (15)$$

olup burada B; sistemin demir içindeki manyetik alan şiddetini ve A; manyetik akıya konu olan kesit alanını gösterir. Bir sonraki adım, manyetik devrenin farklı kısımlarının geçirgenliğinin (9) belirlenmesidir, böylece devredeki akı dağılımını da bulunabilir.

Mıknatis devresinin farklı kısımlarının akı ve akı yoğunluğu (10a-10c) numaralı ifadelerde verilen deneySEL formüllerle hesaplanır.

B-H mıknatislanma eğrisinden alınan veriler kullanılarak yapılan enterpolasyon ile H değerleri hesaplanır, dolayısı ile manyetik devrenin demir kısmı için gerekli magnetomotor kuvveti NI, (11) nolu ifade ile elde edilir. Bu eşitliğe, hava aralığındaki magnetomotor kuvvetinin de eklenmesiyle gerekli toplam magnetomotor kuvvet (12)'nolu ifade ile hesaplanır. Hesaplanan toplam magnetomotor kuvvet, sargı sayısına bölünürse devredeki akım değerini bulunabilir.

$$I = \frac{NI}{N} \quad (16)$$

Aynı zamanda sistemin sağladığı mıknatis kuvveti de hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğundan

(1)'nolu ifade kullanılarak elde edilir. Ayrıca enerji eşitliğinden yararlanarak, geçirgenliğin hesaba katılmadığı durumda sağladığı mıknatıs kuvveti,

$$F_m = \frac{\mu AN^2 i^2}{4(l_t - x)^2} \quad (17)$$

olarak elde edilir (Şefkat, 2000).

Mekaniksel; Newton'un II. hareket yasası gereği, sistemi etkileyen net kuvvet eylemsizlik kuvvetine eşit olacağından

$$F_m = M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + kx + F_d \quad (18)$$

biçiminde verilir. Burada; F_m ; enerjilenen sargı devresindeki mıknatıssal çekim kuvvetini, F_d ; elektromekanik aygıtın hareketli elemanını geri çeken yayın ön gergi kuvveti ve diğer dış kuvvetleri temsil eder. M ; hareketli elemanın kütesini, B ; yapışkanlık sürtünmesini ve k ; geri dönüş yayının rijitlik katsayısını göstermektedir. Elektromekanik sistemin dinamik davranışını saptamak için doğrusal olmayan eşitliklerin doğrusallaştırılarak yaklaşık analitik çözümleri veya Runge-Kutta, Gaus Siedel (RKGS) gibi sayısal hesaplama yöntemleri kullanılabilir. Bir diğer çözüm şeklide bilgisayar programı kullanılmaktadır. Özellikle yaklaşık sayısal çözümde, yukarıdaki eşitliklerin uygun bir biçimde çözümünü elde etmek için elektromekanik sistemin dinamik davranışını üç kademe de inceleyebiliriz.

i) Anahtarlama süreci başlangıcından diskin harekete başlamasına kadar olan kademe,

$$F_{yö} \geq F_m \Rightarrow \frac{d^2 x}{dt^2} = 0, \quad \frac{dx}{dt} = 0, \quad x = 0 \quad (19)$$

Sargı devresi hareketsiz olup yalnızca elektriksel hareket mevcuttur. Bu durumda yalnızca (13) ve (19) eşitlikleri geçerlidir.

(ii). Sargı devresinin gövdesiyle birlikte hareketli olduğu kademe, hem elektrikselsel hemde mekaniksel (öteleme) hareket mevcut olup elektriksel ve mekanik öteleme hareket denklemlerinin hepsi geçerlidir.

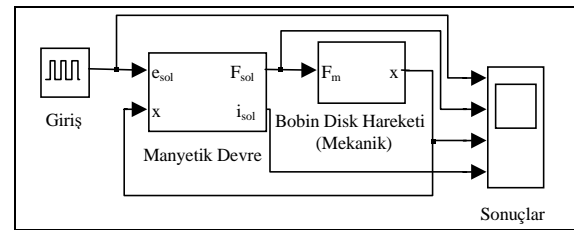
(iii). Sargı devresi (gövdesiyle birlikte) hareketini tamamladığı kademe, bu durum ilk duruma benzemekle beraber $F_y < F_m$ dir. Bu kademe de elektriksel eşitlik ve mekanik eşitlik geçerlidir.

Ele alınan sistemin dinamik davranışına bir açıklık getirmek amacıyla bazı kabuller yapılabilir.

- (i). Elektromekanik aygıtın elemanlarından olan demir çekirdek malzemesinin geçirgenliğinin ideal olarak hava geçirgenliği yanında sonsuz büyük olduğu kabulüne dayanarak, mıknatıssal enerjinin yalnızca hava aralığında depolandığı varsayılmakta,
- (ii). Mıknatıssal devrenin mıknatıssal doyması, sızıntı ve saçaklanma akıları ve hysteresis kayıpları ihmal edilmektedir.

2. 4. Elektromekanik Aygıtın Simulink Modeli

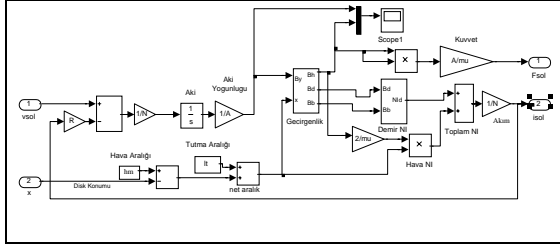
Gerçek durumlar göz önüne alındığında elektromekanik sistemin Simulink modeli; manyetik devre (elektriksel ve manyetik eşitliklerden oluşan) ve mekanik olmak üzere Şekil 5'de gösterildiği gibi iki kısımdan oluşur.



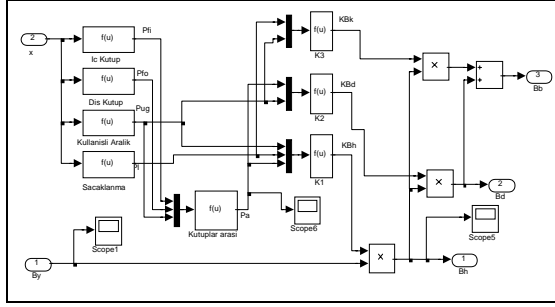
Şekil 5. Elektromekanik aygıtın dinamik analizi için SIMULINK Modeli

Manyetik devre alt modeli elektriksel ve manyetik eşitliklerin ilişkilendirilmesi ile oluşturulur. Şekil 5'den de görüldüğü gibi elektromekanik ağıta uygulanan gerilim e ve geri beslenen disk konumu x , giriş olarak verilir. Çıkış olarak da üretilen manyetik kuvvet F_m ve akım değeri i , hesaplanır.

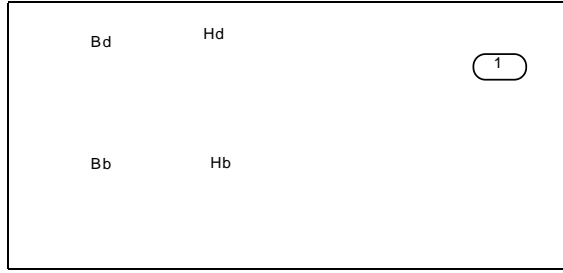
Manyetik devre alt modeli Şekil 6'da verildiği gibi oluşturulur. (1, 9, 12, 16, 18, 19) numaralı elektriksel ve temel manyetik eşitlikler kullanarak akı yoğunluğu bulunur. Daha sonra bu akı yoğunluğu değeri kullanılarak elektromekanik sistemin farklı kısımlarına ait geçirgenlik (9)'nolu ve akı yoğunlukları (10)'nolu eşitlikleri kullanılarak Şekil 7'de verilen alt modeldeki gibi ilişkilendirilerek hesaplanır. Havadaki manyetik akı yoğunluğu değeri (1)'nolu eşitlikte kullanılarak üretilen manyetik kuvvet değeri hesaplanır. Bulunan akı yoğunlukları malzemenin mıknatıssal eğrisinden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 8'de verildiği gibi elektromıknatısın farklı kısımlarındaki manyetik alan şiddeti enterpolasyon yöntemi ile elde edilir. Bulunan bu değerler ile demir içinde ve havada harcanan magnetomotor kuvvet (12)'nolu eşitlikten yararlanarak elektromekanik sistem için gerekli toplam magnetomotor kuvvet NI , hesaplanır. Bulunan bu değerlerin sarım sayısına oranı, devredeki akım (i) değerini verir.



Şekil 6. Manyetik devre alt modülü

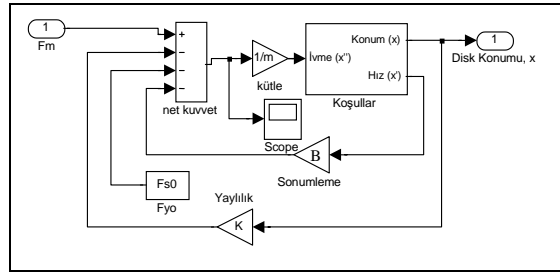


Şekil 7. Geçirgenlik alt modülü



Şekil 8. Demir içinde harcanan magnetomotor kuvvet alt modeli

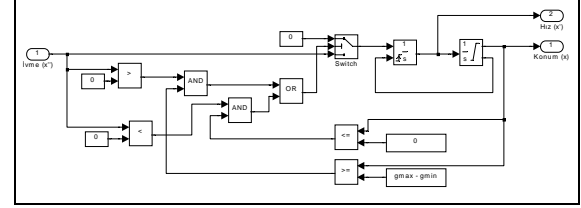
Elektromekanik sistemin ikinci kısmı olan bobin disk hareketi (mekanik), (18)'nolu eşitlik ve elektromekanik sistemin üç aşamalı verilen dinamik davranışı ele alınarak Şekil 9'da verildiği gibi kurulur. Bu alt modelde üretilen manyetik kuvvet F_m giriş, disk konumu x çıkış olarak verilir.



Şekil 9. Bobin disk hareketi alt modeli

Koşullar alt modeli gerçek çalışma durumları dikkate alınarak Şekil 10'daki gibi ilişkilendirilerek kurulmuştur. Sistemin harekete başlama, hareket halinde ve hareketini tamamladığı durumlarda geçerli olan ifadeler kullanılarak disk konumunun bu

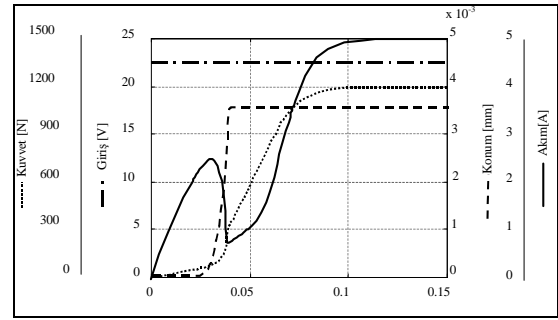
durumlarına karşılık değeri ilgili eşitlikten hesaplanır.



Şekil 10. Gerçek durumları dikkate alan koşullar alt modeli

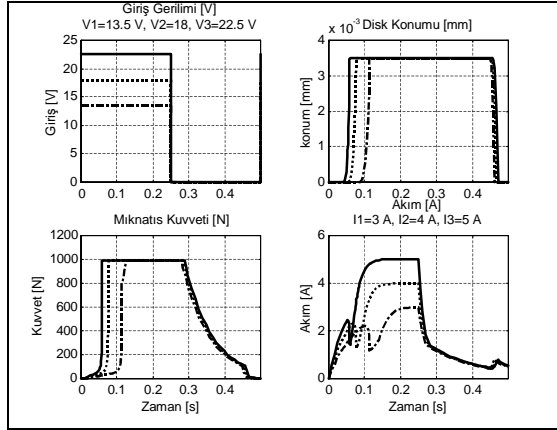
2. 5. Benzetim Sonuçları

Şekil 11'de yukarıda bahsedilen durumlar göz önünde bulundurularak SIMULINK'te hazırlanan model ile elde edilen ve elektromekanik aygıtın dinamik karakteristik eğrileri olan giriş gerilimi, disk konumu, manyetik kuvvet ve akımın zamana göre değişimi elde edilerek gösterilmiştir. Burada akım eğrisinin minimum yaptığı nokta diskin hareketini tamamladığı anı göstermektedir.

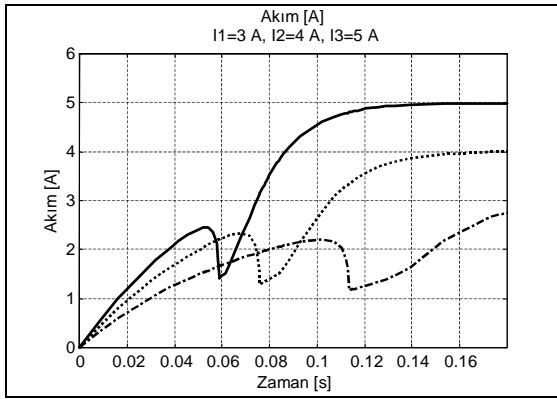


Şekil 11. Elektromekanik aygıtın dinamik davranışı

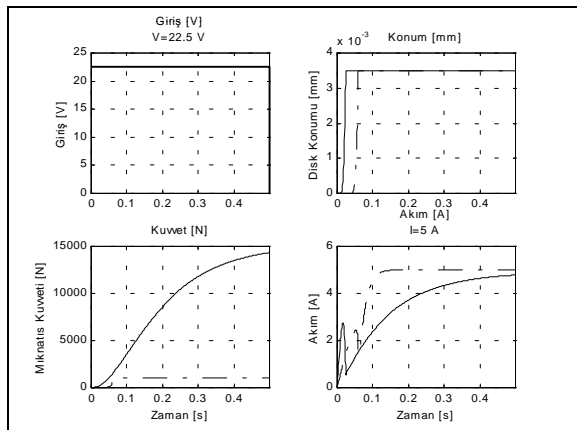
Aynı benzetim programı ile farklı giriş gerilimlerinde sistemin açılıp kapanma periyodu boyunca dinamik davranışını gösteren eğriler Şekil 12'de verildiği gibi elde edildi. Akım eğrisini yakından incelediğimiz, Şekil 13'den de görüldüğü gibi devreye uygulanan akım değerine bağlı olarak sistem cevap hızının doğal olarak arttığı gösterilmiştir. Benzetim programını geçirgenliğin hesaba katıldığı gerilim eşitliği (12) ve mıknatis kuvvetini (1) dikkate alarak ve geçirgenliğin dikkate alınmadığı mıknatis kuvvetini (17) dikkate alarak eş zamanlı olarak çözüp benzetimin karşılaştırmalı sonuçları Şekil 14'de görüldüğü gibi elde edildi. Şekil 15'de, akım değişimini daha yakından incelemek için gösterildi.



Şekil 12. Farklı girişlere karşılık açma kapama periyodu boyunca dinamik davranış nokta çizgi $V_1 = 13.5$ V, kesikli çizgi $V_2 = 18$ V, sürekli çizgi $V_3 = 22.5$ V

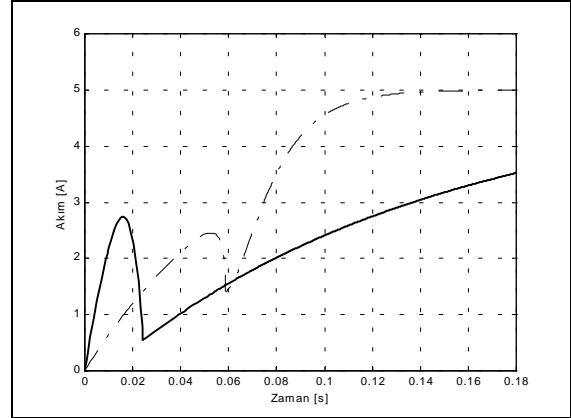


Şekil 13 Farklı girişlere karşılık akım değişimi nokta çizgi $I_1 = 3$ A, kesikli çizgi $I_2 = 4$ A, sürekli çizgi $I_3 = 5$ A,



Şekil 14. Geçirgenliğin dikkate alındığı ve alınmadığı durumda benzetim sonuçları sürekli

çizgi; geçirgenliğin dikkate alınmadığı, noktali çizgi; geçirgenliğin dikkate alındığı,



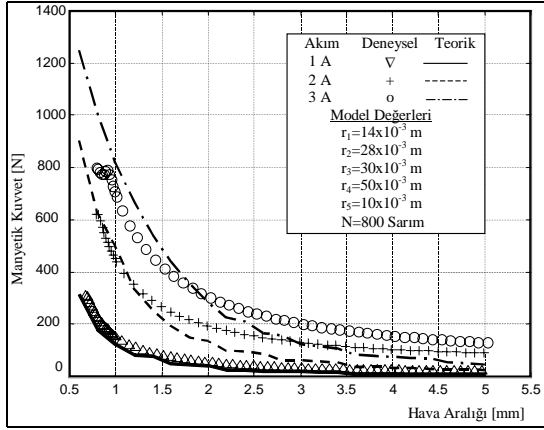
Şekil 15. Geçirgenliğin dikkate alındığı ve alınmadığı durumda akım değişimi sürekli çizgi; geçirgenliğin dikkate alınmadığı, noktali çizgi; geçirgenliğin dikkate alındığı

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3. 1. Statik Karakteristik Sonuçları

Materyal ve Metot bölümünde açıklandığı gibi tasarımı yapılan elektromekanik aygıtın, bobinlere uygulanan gerilime bağlı olarak kuvvet-hava aralığı karakteristiği elde edilmiştir. Bunun için MATLAB'da hazırlanan bir program kullanılmıştır. Bu program yolu ile doyma anındaki manyetik akı ile geçirgenliği ve malzeme içinde kaybolan magnetomotor kuvveti de hesaba katılarak miknatis kuvveti hesaplanır.

Şekil 16'da tasarım ve imalatı gerçekleştirilen elektromekanik aygıtın teorik ve deneysel sonuçları bir arada verilmiştir. Bu sonuçlar çeşitli akım değerlerine karşılık gelen kuvvet-hava aralığı eğrileri biçiminde sunulmuştur. Teorik sonuçlar MATLAB ile hazırlanan ve program yardımı ile elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ise 4301 model İnstron mukavemet test cihazı yardımı ile elde edilmiştir. 4301 model İnstron Mukavemet Test Cihazı; sabit uzama prensibine göre çalışmakta olup, elektromiknatisin gövdesi sabit çeneye, hareketli kısmı yani disk hareketli çeneye bağlanarak aradaki mesafe (hava aralığı) 0 mm'den 5 mm'ye kadar artırılarak hava aralığı mesafesine karşılık miknatis kuvveti eğrileri alınmıştır. Her deney iki kez tekrarlanmıştır.



Şekil 16. Elektromekanik aygıtın teorik ve deneysel statik karakteristikleri

Bu eğrilerden belirli bir akım değerinde, belirli bir yer değiştirme ile oluşan kuvveti görmek mümkündür veya belirli olan bir kuvvette belirli bir yer değiştirmeyi sağlayabilmek için gerekli olan akım değerini bulmak da mümkündür.

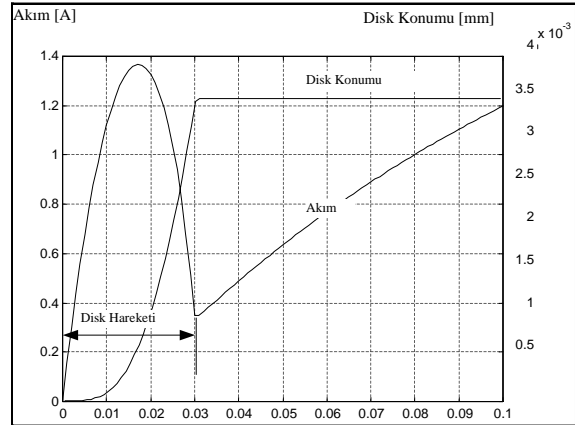
Başka bir deyişle, belirli bir akımda, belirli bir kuvveti sağlamak için gerekli hava aralığı mesafesini belirlemek mümkündür.

Şekil 16'da verilen teorik ve deneysel sonuçları gösteren eğride 0-0.5 mm arasındaki bölge, diskin bobine çok yakın olduğu (yapışık gibi) bölgedir. Mıknatıs kuvveti hava aralığı ile ters orantılı olduğu için ($x_n=0$ ise $F_m=\infty$) bu bölge hesaplanmamış ve deneysel olarak da disk ile bobin arasındaki mesafenin kontrol edilemediği ve ölçme işleminin gerçekleşmediği bölge olduğundan deneysel olarak elde edilen eğride de göz ardı edilmiştir. Bu bölgeden sonraki bölgeler dikkate alındığında, bilgisayar modeli sonuçları ile gerçek sonuçlar belli oranda uygunluk sağlamaktadır. Örneğin, 1 mm'lik hava aralığında ve 1 A'lık bir akım için bilgisayar çözümünden yaklaşık 120 N'luk bir kuvvet elde edilirken, deneysel olarak elde edilen sonuçlardan yaklaşık olarak 125 N'luk bir kuvvet elde edildiği görülmektedir. 3 mm'lik bir hava aralığında ve 2 A'lık bir akım için bilgisayar çözümünden yaklaşık 70 N'luk bir kuvvet elde edilirken, deneysel olarak elde edilen sonuçlardan yaklaşık olarak 100 N'luk bir kuvvet elde edildiği görülmektedir.

Elektromekanik aygıtın kuvvet-hava aralığı karakteristiği için hazırlanan programda, manyetik malzemenin özellikleri Armco demir için alınmıştır. İmalatı gerçekleştirilen mıknatıs malzemesi Armco demir olmayıp, otomat çeliği denilen düşük karbonlu bir çeliktir. Bu yüzden gerçek sonuçlar ile bilgisayar çözüm sonuçları arasında farklar oluşmaktadır.

3. 2. Dinamik Karakteristik Sonuçları

Şekil 17'de görüldüğü gibi, enerjilenen sargı devresindeki akım ilk önce devredeki endüktans elemanın etkisinden dolayı belli bir değere doğru, sürekli bir artış gösterir. Akımın enerjilenen sargı devresinde üstel olarak artışı ile birlikte kuvvet artışı oluşacaktır (Şekil 12). Bu mıknatıs kuvveti, sistemde kullanılan geri dönüş yay kuvvetine eşit olana kadar disk hareketsiz kalacaktır. Diskin hareketini engelleyici herhangi bir dış kuvvet yoksa, mıknatıs kuvveti yay kuvvetinden büyük olduğu anda disk hareket etmeye başlar. Anahtarlama başlangıcından bu ana kadar geçen zaman disk bekleme zamanı olarak anılır. Disk harekete başlar başlamaz, sargı devresinin endüktansı, disk ile sargı devresi arasındaki aralığın azalması ile artmaya başlar. Bu durumda akım değişimi elektrikli zaman sabiti ile olduğu kadar hava aralığındaki değişimden de etkilenir. Disk hareketini tamamladığında akım ifadesindeki hız terimi sıfır olacağından, akımın yerel minimum değerine düşmesine neden olur. Diskin hareketsiz konumundan bu ana kadar geçen zaman, disk hareket zamanı olarak anılır. Akım üstel olarak artmaya devam ederek, uygulanan gerilim ve dirence bağlı olarak son değerine ulaşır.



Şekil 17. Elektromekanik aygıtın dinamik karakteristiği

Sonuçta toplam anahtarlama zamanı, disk bekleme zamanı ve disk hareket zamanından ibaret olmaktadır. Şekil 13'den görüldüğü gibi çeşitli uyarı gerilimlerine karşılık bobinde oluşan akım değişimlerinin bilgisayar çözüm sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, uygulanan gerilim arttıkça bobindeki akım dolayısı ile elektromekanik aygıtın cevap hızı artmaktadır. Geçirgenlik ifadelerinin dikkate alındığı gerçek durum ile geçirgenliğin ihmal edildiği durum da dinamik başarımın göstergesi olan akım, disk konumu ve kuvvet eğrileri Şekil 14-15'de gösterildiği gibi elde edildi. Şekilden görüldüğü gibi toplam anahtarlama zamanı ve akım değişimi farklı

olmaktadır. Geçirgenliğin ihmal edilmesi sistemin daha hızlı cevap vermesi gibi bir durum çıkardığı için yanıtıcı olmaktadır. Geçirgenliğin hesaba katılmasıyla daha gerçekçi bir çözüm elde edildiği gözlemlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

- Fabien, B. C. 1990. *Contributions to the Design Optimization, Control and Synthesis of Electromechanical Systems*, Ph. D. Thesis, University of Columbia.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley C. and Umans S. D. 1990. *Electric Machinery*, McGraw-Hill Book Company. London.
- Howe, D. 2000. Magnetic actuators, *Sensors and Actuators*, Vol. 81, 268-274.
- Lua A. C., Shi K. C and Chua L. P. 2001. Proportional Assist Ventilation System Based on Proportional Solenoid Valve Control, *Medical Engineering and Physics*, Vol. 23, 381-389.
- Roters, H. C. 1958. *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons Inc., 7th Edition, New York.
- Sun, Y. and Parker G. A. 1992. Steady-State theoretical model of an Electrohydraulic Single-Disk Pilot Valve, *Transaction of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.114, 293-298.
- Şefkat G. 1993. *Bir Elektromekaniksel Sistemin Tasarımı ve Analizi*, Y.L. Tezi, Uludağ Üniversitesi
- Şefkat, G. 2000. *Elektromekanik Sistemlerin Optimum Tasarımı ve Denetimi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- Xu, Y. and Jones, B. 1997. A Simple of Predicting the Dynamic Response of Elektromagnetic Actuators, *Mechatronics*, Vol. 7., No. 7., 589-598.
- Yüksel, İ. 1981. *An Investigation of Electrohydraulic Disk Switching Valves*, Ph. D. Thesis, University of Surrey.