

ELEKTROMEKANİK SUPAP MEKANİZMASI TASARIMI VE TASARIMA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN ARAŞTIRILMASI

Zeliha KAMIŞ,

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

İbrahim YÜKSEL

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

Motor performansı büyük oranda supapların açılma ve kapanma zamanlamasına bağlıdır. Supapların motor devri ve çalışma koşullarına göre uygun zamanda açılıp kapanmasını sağlayan sistem değişken zamanlamalı supap mekanizması olarak bilinir. Değişken zamanlamalı supap mekanizmaları mekanik, elektrohidrolik ve elektromekanik olmak üzere üçe ayrılır. Günümüzde mekanik ve elektrohidrolik sistemlerin yanı sıra üzerinde yirmi yılı aşkın süredir çalışılan elektromekanik supap mekanizmalarında da önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu çalışmada elektromekanik supap mekanizmalarında kullanılacak uygun bir mıknatıs türü araştırılmış ve elektromekanik supap mekanizması tasarımına etki eden parametreler incelenmiştir. Tasarımda iki farklı mıknatıs devresinden yararlanılmıştır. Elektromekanik supabın statik ve dinamik karakteristikleri MATLAB/Simulink programı yardımıyla elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler : Elektromekanik supap mekanizması, elektromekanik sistemlerin karakteristikleri

The performance of the IC engines greatly depends on the opening and the closing timing of the valves. The mechanism of the valve timing is known as a variable valve train and it provides opening and closing of the valves at the appropriate time, depending on the speed and the working conditions of the engine. The variable valve trains can be classified as a mechanically variable valve train, an electro-hydraulic variable valve train and an electromechanical variable valve train. Besides, the development on the mechanically and the electro-hydraulic variable valve train there is a significant research and development on the electromechanical variable valve train for last twenty years. In this work, a suitable magnetic circuit that could be used in the electromechanical variable valve train and parameters effecting on the design of the valve are investigated. Two different types of magnetic circuit are used in the design. The static and dynamic characteristics of the electromechanical valve is obtained by MATLAB/Simulink program.

Keywords: Electromechanical valve train, the characteristics of the electromechanical systems

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde günümüzdeki eğilim, daha konforlu ve ekonomik taşıtlar tasarlama yönündedir. Otomobillerde en önemli sorun yakıt tüketiminin ve çevreye atılan kirleticilerin azaltılmasıdır.

Yetmişli yıllara göre günümüzün taşıtlarında çevreye atılan kirleticiler yaklaşık olarak on kat azaltılmış ve taşıtların verimleri iki kat arttırılmıştır. Bu gelişmelere rağmen taşıtların verimleri ve kirletici oranları halen arzu edilen seviyelere ulaşmış değildir (11). Bu amaçla içten yanmalı motorlar için yakıt pillerini veya bataryalarını esas alan elektro-kimyasal sistemler geliştirilmesine rağmen bu sistemlerin alt yapılarını oluşturmak oldukça güçtür. Bu nedenle

günümüzde, ana sistemin alt yapısını değiştirmeksizin motor verimini yükseltmeye ve kirletici oranlarını düşürmeye yönelik çeşitli çalışmalar yürütülmektedir.

Geleneksel içten yanmalı motorlarda supaplar kam mili yardımıyla açılıp kapanmakta, emniyetli ve güvenilir bir supap performansı sağlamaktadır. Bu sistemde, yakıt ekonomisi, çevreye atılan kirletici oranları, maksimum tork çıkışı gibi parametreler optimize edilecek şekilde supap zamanlaması, piston hareketine bağlı olarak bir kez ayarlandıktan sonra motorun çalışma koşullarına göre değiştirilemez. Ayrıca mekanik sistemlerin motor performansı yanında sürtünme ve aşınma gibi sakıncaları da mevcuttur.

Motor performansı, yakıt püskürtmesi ve ateşleme performansı yanında büyük oranda supapların açılma ve kapanma zamanlarına bağlıdır. Motorun volumetrik verimini yükselterek performansını arttırmak için supaplar üzerine çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar supapların çalışması sırasında oluşan kayıpları ortadan kaldırmak amacıyla supaplar ve supap mekanizmaları üzerinedir. Supaplardaki gelişmeler temel olarak supap sayısını arttırmaya yöneliktir. Bu sayede her bir silindir için iki ya da daha fazla emme ve egzoz supabı kullanılarak karışımdan maksimum verim sağlanması hedeflenmektedir. Supap mekanizmaları üzerine yapılan çalışmalar ise supapların açılma ve kapanma zamanlamalarının değişken olmasını sağlamaya yöneliktir. Motor devri değiştikçe piston hızı, piston hızına bağlı olarak da içeri alınan dolgunun hızı ve kinetik enerjisi sürekli değişeceğinden supap zamanlamasının da sürekli değişmesi gerekmektedir. Bu durum ancak değişken zamanlamalı supap mekanizması ile sağlanabilmektedir.

Değişken zamanlamalı supap mekanizmalarında, mekanizmanın yapısına göre supabın açılma miktarı, açık kalma süresi, açılma-kapanma zamanlaması değişken olabilmektedir. Bu değişkenler, birbirinden bağımsız veya birlikte değiştirilerek, motor çalışma koşullarına göre optimize edilebilmektedir. Ayrıca bu sistemler gaz keleşğini tamamen veya kısmen ortadan kaldırmayı sağlamaktadırlar (7).

Değişken supap zamanlama sistemleri mekanik, elektrohidrolik ve elektromekanik olmak üzere üç türdedir. Mekanik değişken zamanlamalı supap mekanizmaları, mekanik olarak oldukça karmaşık ve birbirine göre hareketli çok sayıda parçadan oluşurlar. Elektrohidrolik değişken zamanlamalı supap mekanizmaları ise kam mili içeren ve kam mili içermeyen sistemler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kam mili içeren elektrohidrolik supap mekanizmalarında kam profili genellikle bir hidrolik piston üzerine etki eder. Kam profilinin stroku hidrolik piston üzerinde yer alan kanalların solenoidler ile açılıp kapatılmasıyla değiştirilerek supaba iletilir. Elektrohidrolik kam mili içermeyen mekanizmalarda ise supaplar tamamen hidrolik olarak tahrik edilirler. Bir hidrolik pompanın sağladığı basınçlı yağın supap üzerine uyguladığı kuvvetin yönü elektrohidrolik solenoid valf ile değiştirilerek açma kapama işlemi gerçekleştirilir (7).

Günümüzde elektromekanik supap mekanizmaları üzerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Halihazırda gelişme aşamasında olan elektromekanik supap mekanizmalarının temel elemanları ve çalışma ilkeleri hemen hemen aynıdır.

Elektromekanik supap mekanizmaları üzerine özellikle son yıllarda çok yönlü çalışmalar yürütülmektedir. Yapılan bu çalışmalar genellikle elektromekanik supapların tasarım parametrelerinin incelenmesi (6,8), elektromekanik supapların modellenmesi (20), denetimi ve mekatronik açıdan tasarımı (19) şeklinde sınıflandırılabilir. Yapılan çeşitli çalışmalarda elektromekanik supap mekanizmalarının yakıt tüketimini %10-15 oranında iyileştirdiği, çevreye atılan kirletici oranlarını azalttığı, motorun soğukta ilk çalışması ve ısınması, geçici durumda çalışması ve rölanti çalışması için optimum yakıt tüketimi sağladığı ve pompalama kayıplarını en aza

indirdiği öne sürülmektedir (2,5,12). Günümüzde elektromekanik supap mekanizmaları üzerindeki çalışmalar daha çok yeterli ve güvenilir bir supap performansı sağlanmaya yöneliktir. Elektromekanik supap mekanizmalarında; büyük bir yay kuvvetine karşılık supabın açık veya kapalı konuma geçirilmesi için gerekli mıknatıs kuvveti, açma veya kapama zamanı gibi parametreler kritik olmaktadır. Diğer bir kritik konu da supabın kapanma anındaki çarpma hızı ve yüksek hızlarda ortaya çıkabilecek mekanik gürültü problemidir. Bu olumsuzlukların giderilmesi için elektromekanik supap mekanizmalarının modellenmesi ve denetimi üzerine çok çeşitli çalışmalar yapılmakta, farklı denetim algoritmaları kullanılmaktadır (1, 3, 4, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 21).

Halihazırda Almanya' da bir firma (FEV) tarafından benzinli motorlar için elektromekanik supap mekanizmalarının üretiminin yapıldığı bilinmektedir (5). Deneme amacı ile değişik firmaların motorlarında kullanılan bu sistemin seri halinde motorlarda kullanılıp kullanılmadığı bilinmemektedir .

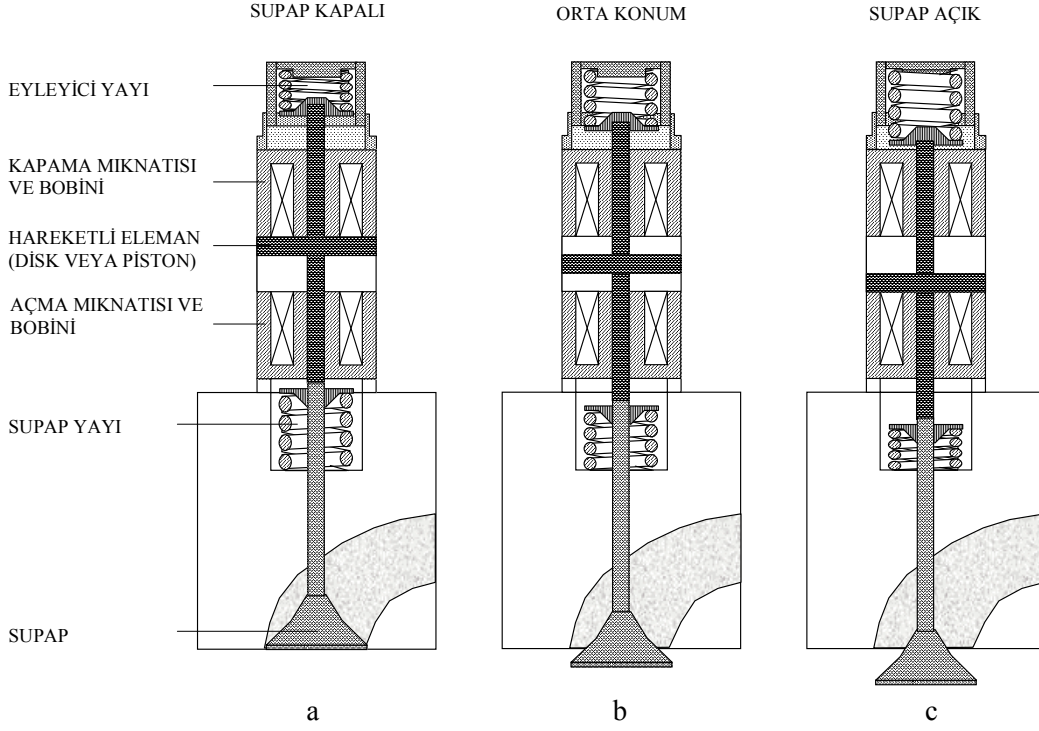
Bu çalışmada elektromekanik supap mekanizması tasarımı üzerinde durulmuştur. Tasarımda etkili olan parametreler incelenmiş, iki farklı mıknatıs devresi ele alınarak supaplarda uygulanabilme olanakları irdelenmiştir. Supap mekanizmalarında kullanılmak üzere ele alınan mıknatıs devrelerinden birisi düz yüzlü disk tipi olarak bilinmekte olup, bundan önce de pek çok çalışmada (14,15,22) değişik uygulamalar için kullanılmıştır. Diğeri ise piyasada solenoid olarak bilinen düz yüzlü piston tipi mıknatıs devresi olup, otomatik olarak çalışan musluklardan oransal elektrohidrolik valflere kadar pek çok alanda kullanılmaktadır.

ELEKTROMEKANİK SUPAP MEKANİZMASININ YAPISI

Elektromekanik supap mekanizmalarının getirdiği yeniliklerden birisi kam mekanizması gibi mekanik bağlantıyı ortadan kaldırması diğeri de supapların açma-kapama zamanlamasının elektronik denetim biriminden yapılabilmesidir. Bunun sonucunda, emme ve egzoz supabının açılma ve kapanma zamanlaması her türlü motor çalışma şartlarına göre optimum olarak ayarlanabilmekte ve elektronik ateşleme zamanı ve yakıt püskürtmesi ile yanma değişkenleri optimize edilebilmektedir.

Elektromekanik supap mekanizmaları üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda birbirine göre biraz farklılık gösteren tasarım yapıları görülmekle beraber bugüne kadar geliştirilmiş olanlar temelde birbirine benzemektedir. Şekil 1a' da görüldüğü gibi bir elektromekanik supap mekanizmasının temel elemanları; açma ve kapama olmak üzere iki adet mıknatıs devresi ve bobini, iki adet yay ve supap ile birlikte hareket eden disk veya piston biçiminde bir hareketli elemandır. Hareketli eleman da mıknatıs elemanları gibi ferromıknatıs bir malzemeden yapılmış olup, iki mıknatıs elemanı arasında gidip gelme hareketi yapmaktadır. Hareketli elemanın hareketi, yayların sağladığı kinetik enerji ile mıknatıs enerjisi veya kuvvetine bağlıdır.

Elektromekanik supap mekanizmasının çalışma ilkesi Şekil 1' de verilmiştir. Elektronik denetim biriminden gönderilen denetim sinyaline göre bobinlerden biri ilettime, diğeri kesime sokularak supap açılıp kapanmaktadır. Burada hareketli elemanı ivmelendirmek için yay kuvvetinden yararlanılmaktadır. Elektromıknatıs kuvveti hareketli elemanı ve buna bağlı olan supabı açık veya kapalı konumda tutmak için devreye girmektedir.



Şekil 1. Elektromekanik Supabın Çalışma Prensipleri

Her iki bobine de akım uygulanmadığı zaman hareketli eleman yaylar vasıtasıyla denge konumunda tutulmaktadır. Supabın kapanması için kapama (üst) mıknatıs devresine akım uygulanır. Motorun sürekli çalışması sırasında, supabı açık konumda tutan açma (alt) mıknatısının sağladığı mıknatıs kuvvetidir. Supabın açık konumdan kapalı konuma sokulması ise, kapama (üst) mıknatısının iletime açma (alt) mıknatısının kesime sokulması ile gerçekleştirilmektedir. Bu durumda mıknatıs kuvveti yay kuvveti ve egzoz/emme manifoldu ve silindir arasındaki basınç farkının oluşturduğu değişken gaz kuvvetlerini yenebilecek büyüklükte olmalıdır.

Supabın sürekli çalışmasında yayların önemi çok büyüktür. Hareketli eleman, hareketinin büyük bir kısmını yayların depoladığı enerji yardımıyla tamamlamaktadır. Sistemin dinamik davranışını incelerken dikkat edilecek bir nokta yay kuvvetinin iletime sokulan mıknatıs devresi için hareket mesafesinin yarısına kadar mıknatıs kuvvetine yardımcı ve bu noktadan sonra ise karşı kuvvet olduğudur. Bu durumda elektromekanik supap mekanizması tasarımında yayların seçimi kritik olmaktadır.

ELEKTROMEKANİK SUPAP MEKANİZMASININ TASARIMI

Elektromekanik eyleyiciler, elektriksel ve mekanik sistemlerin birleşiminden meydana gelen ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren düzeneklerdir. Bu tür aygıtların tasarımında mıknatıs bilgisi ile mekanik bilgisinin uygun bir biçimde birleştirilmesi gerekmektedir.

Diğer taraftan elektromekanik bir sistemin, elektronik denetim biriminden gelen bir komutla sürülebilmesi için bir elektronik akım sürücü devreye de ihtiyaç duyulmaktadır. Supap

mekanizmalarında kullanılan eyleyicilerin oldukça güçlü olması gerektiğinden, bunun için güçlü bir akım sürücü devresinin tasarlanması ve ayrıca eyleyicilerin denetim biriminde uygun bir motor performansını sağlayacak biçimde programlanması gerekir. Bütün bunlar mekanik sistemlerin, elektrik-elektronik, denetim ve gerçek zaman bilgisayar programcılığı ile sinerjik bir biçimde bütünleştirilmesi ile olur. Bu da bu tür sistemlerin tasarımı mekatronik bir bakış açısına sahip olmayı gerektirir.

Şekil 1' de görüldüğü gibi elektromekanik sistem, içinde bobin bulduran elektromıknatıs alt sistemi ile kütle ve yaylardan ibaret mekanik alt sisteminden meydana gelmiştir. Dolayısıyla tüm sistemin tasarımı bu iki alt sistemin uygun özelliklerini birleştirebilecek biçimde olmalıdır.

Elektromıknatıs sisteminin genel yapısı, çekirdek olarak bilinen hareketli kutup ve içinde sargı devresi bulunan hareketsiz kutuptan ibarettir. Çekirdek ve kutup ferromıknatıs malzemeden yapılmış olup sargıdan akan elektrik akımının oluşturduğu mıknatıs kuvveti çekirdeği sabit kutupa doğru harekete zorlar. Böylece çekirdek bağlı olduğu elemanın (supap) açılmasını ya da kapanmasını sağlar.

Elektromekanik eyleyicilerin en önemli karakteristiği kuvvet-yerdeğiştirme arasındaki bağıntıdır. Bu karakteristikleri elde etmenin bir yolu, mıknatıs devresinin çeşitli kısımlarına ait mıknatıs geçirgenlik denklemlerini ve malzemeye ait mıknatıslanma eğrisi değerlerini kullanarak çözmektir (14, 15, 22). Elektromıknatısın sağladığı mıknatıs çekim kuvveti sabit mıknatıs ile hareketli eleman arasında kalan hava aralığındaki mıknatıs akısı yoğunluğu ve hareketli elemanın kesit alanı cinsinden (1) nolu ifade verilmiştir.

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

Burada; z : hava aralığı sayısı, B_h : hava aralığındaki mıknatıs akısı yoğunluğu (Wb/m^2), A : etkin kesit alanı (m^2), μ : hava aralığı geçirgenliğidir ($4\pi 10^{-7}$).

Diğer taraftan mıknatıs kuvveti bobine uygulanan akım ile hareketli elemanın yerdeğiştirmesinin bir fonksiyonu olarak (2) nolu ifade ile de verilebilir.

$$F_m = \frac{\mu A (NI)^2}{2z(x_h - x)^2} \quad (2)$$

Burada; x_h : sabit kutup ile hareketli eleman arasındaki toplam mesafe (m), x : hareketli elemanın hareket mesafesi (m), N : sarım sayısı, I : bobine uygulanan akım (A) değeridir. Bu durumda devrenin tüm mıknatısal doyması ve sızıntı akıları ihmal edilmiş ve bobine uygulanan elektrik enerjisinin mıknatıs enerjisine dönüştüğü varsayılmıştır. Buna karşılık bu basitleştirici ifadede mıknatısın kuvvet-yerdeğiştirme karakteristiği daha açık biçimde görülmektedir. Bu denklemden görüldüğü gibi mıknatıs kuvveti yerdeğiştirmenin karesi ile ters orantılı değişmektedir. Buna göre küçük hava aralıklarında mıknatıs kuvveti yüksek olurken, hava aralığı mesafesi artınca mıknatıs kuvveti aşırı düşüş göstermektedir (Şekil 6).

Genelde otomobil motorlarında kullanılan supapların toplam hareket mesafesi 7-8 mm civarındadır. Bu değer, bir supabın belli bir supap alanında bu mesafede açıldığında yeterli yakıt-

hava karışımını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Supap mekanizmalarında kullanılabilen boyutlarda bir elektromıknatıs için bu hareket mesafesi oldukça büyük kalmaktadır. Uygun boyutlu bir elektromıknatısın farklı akım değerlerine karşılık gelen kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinden (Şekil 6) görülebileceği gibi 8 mm gibi bir mesafede sağlanabilen mıknatıs çekim kuvveti çok düşük kalmaktadır. Sonuç olarak bu çekim kuvveti supabı uygun bir hızda açıp-kapamaya yeterli olmayacaktır. Ayrıca egzoz supabı açısından durum daha da kritiktir. Çünkü egzoz aşamasında oluşan gaz basıncı supap üzerinde oldukça büyük kuvvetler (350-400 N gibi) oluşturur. Bu kuvvetin 8 mm' lik bir mesafeden elektromıknatısın sağladığı kuvvet yardımı ile yenilmesi çok güçtür.

Ele alınan tasarım yapısına göre bu tür bir elektromekanik supap mekanizmasında büyük hareket mesafelerinde, mıknatıs kuvvetinin yetmediği durumlarda yay enerjisinden yararlanmak gerekmektedir. Burada yay enerjisi, supap kolu, yaylar, tutucular ve disk veya piston elemanından ibaret hareketli kütlelerin ivmelenmesini sağlamak ve yüksek cevap hızları elde etmek amacı ile kullanılmaktadır. Bu yayların biri eyleyici (actuator), diğeri de supap yayı olup bazı uygulamalarda her iki yay için aynı yay sabiti kullanılırken, bazı uygulamalarda ise eyleyicide daha sert buna karşılık supapta daha yumuşak yay kullanılmaktadır (8). Burada yay seçiminin sistemin cevap hızı üzerinde etkisi büyüktür. Basit bir kütle-yay sisteminde (rezonans veya mekanik salınım sistemi)

doğal frekans $\omega_n = \sqrt{k/m}$ olup yay sertliği, k ile doğru, hareketli kütle, m ile ters orantılı olarak değişmektedir. Kullanılan elektromıknatıslar ise daha çok hareketin tamamlanmasına yardımcı olmak ve supabı açık veya kapalı konumda tutmak için kullanılırlar. Teorik olarak, sürtünmelerin yok sayıldığı durumda supabın herhangi bir açık veya kapalı tutma durumunda yayların depoladığı potansiyel enerji maksimum olup hareketin orta konumuna kadar harcanır ve bu harcanan enerji kütle elemanı tarafından kinetik enerji olarak depolanır. Bu durumda yay enerjisi sıfırlanmış ve kütle kinetik enerji maksimum olmuştur. Hareketin orta konumundan sonraki durumda yay kuvvetleri harekete ters yönde olup bu yönde hareketi sürdüren kütle elemanında depolanan kinetik enerjidir. Depolanan kinetik enerji yayların sıkıştırılmasına yeterli olacağından teorik olarak hareketin tamamlanmasını sağlayabilecektir. Yalnız hareketin tamamlanması aşamasında kütle kinetik enerjisi sıfırlanırken yayların depoladığı enerji tekrar maksimum olacaktır. Bu aşamada, hareketli elemanı ve dolayısıyla supabı istenen konumda tutabilmek için ilave bir kuvvete gerek vardır. Ayrıca gerçek bir sistemde hareket sırasında sürtünmeden dolayı ortaya çıkan enerji kayıplarının da karşılanması gerekir. Bu durumda gerekli enerji ve kuvvet elektromıknatıs elemanları yolu ile sağlanmaktadır.

Elektromekanik sistemde, hareketli elemanın elektromıknatıs elemanlarına yaklaşımına bağlı olarak mıknatıs kuvveti mesafenin karesi ile ters orantılı olarak artarken, yay kuvveti mesafe ile doğrusal olarak artar. Bu durumda başlangıçta çok düşük olan mıknatıs çekim kuvveti belli bir mesafede yay kuvvetini yenebilecek seviyeye ulaşır (Şekil 9) ve hareketli elemanı yakalayarak tutar. Buna göre elektromıknatıs sistemi, supabın kapalı veya açık durumda tutulması sırasında en azından yay kuvvetini yenebilecek bir mıknatıs kuvveti sağlayacak şekilde boyutlandırılır. Ayrıca mıknatıs kuvvetinin karşılaması gereken diğeri bir kuvvet de silindir içi basınç kuvvetidir. Basınç kuvvetleri özellikle egzoz supaplarında önem arz eder. Sistemde yayların hareketli eleman üzerine uyguladığı yay kuvveti

$$F_{yay} = 2k \left(\frac{x_h}{2} - x \right) \quad (3)$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada; k : her bir yaya ait yay sabiti, x_h : toplam hareket mesafesi, x : orta konumdan itibaren ölçülen hareket mesafesidir.

Gerekli kuvveti sağlayabilecek bir mıknatıs devresinin ön tasarımında esas olan hareketli elemanın kesit alanıdır. Bunun için gerekli mıknatıs kuvvetini, F_m sağlayacak kesit alanı, A (1) nolu ifadeden hesaplanabilir. Kesit alanı daire veya dikdörtgen biçiminde olabilir. Daire kesitli kesit alanı esas alınarak yapılan hesaplamalarla bulunan değerler Tablo 1' de verilmiştir. Bu tabloda silindir içi basınç değişimine karşılık gerekli yay kuvvetini sağlayacak yay sabiti ve elektromıknatısın dış çap değişimi gösterilmiştir. Bu değerler yaklaşık ve statik durum esas alınarak belirlenmiş, sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir.

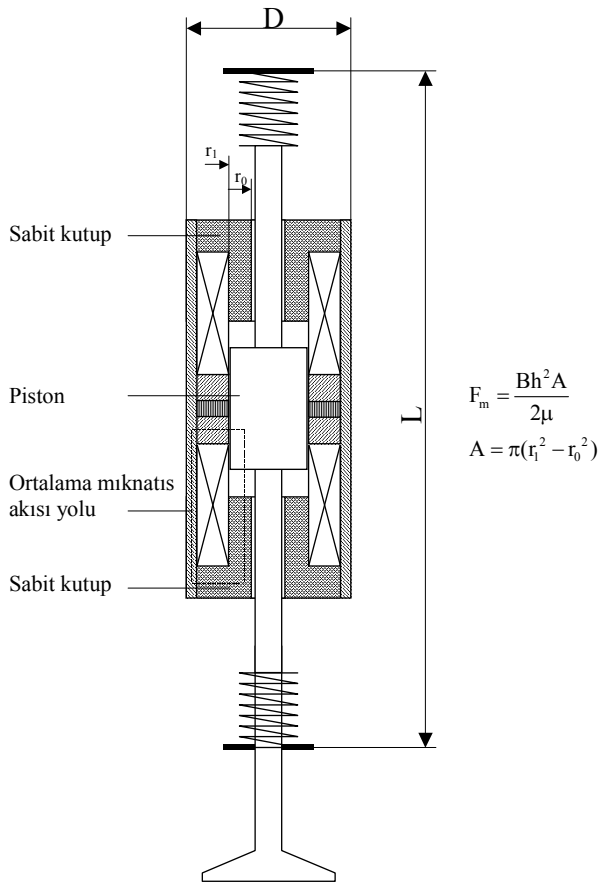
Tablo 1. Silindir İçi Basıncına Göre Yay Sabiti ve Elektromekanik Supabın Dış Çapının Değişimi ($D_{sup}=30$ mm, $B_s=1.4$ B/m, $Yay>B$ olmalıdır.)

P_{sil}	B	k	F_{yay}	$D_{dış}$
1 bar	75 N	10 N/mm	80 N	24 mm
2 bar	145 N	20 N/mm	160 N	28 mm
3 bar	220 N	30 N/mm	240 N	31 mm
4 bar	300 N	40 N/mm	320 N	34 mm
5 bar	350 N	45 N/mm	360 N	35 mm
6 bar	430 N	55 N/mm	440 N	36 mm

Tablo 1' den görüldüğü gibi silindir içi basınç yay kuvvetinin ve buna bağlı olarak da mıknatıs kuvvetinin ve elektromekanik supabın boyutlarının belirlenmesinde çok etkilidir. Silindir içi basınç özellikle egzoz supabının boyutlarının belirlenmesinde çok önemlidir. Egzoz supabında supap açılana kadar silindir içi basınç yaklaşık olarak 5 bar' dır. Supabın açılmasıyla birlikte egzoz gazları silindiri terk etmeye başlayacağından supap üzerine etki eden gaz kuvvetlerinin hızlı bir düşüş göstermesi beklenir. Dolayısıyla supabın açılmaya başlaması yay kuvvetinin supap üzerine etki eden basınç kuvvetini yenmesi ile mümkün olacaktır. Buna göre motorun yapısına bağlı olarak silindir içi basınç arttıkça elektromekanik supapta kullanılacak yayların rijitliklerinin de o oranda artması gerekir. Supap açıldıktan sonra hareketli eleman hareketini tamamlayana kadar gaz kuvvetinin etkisi yok denecek kadar az olmaktadır. Supap açılır açılmaz gaz basıncı düşeceğinden basınç kuvvetinin etkisinin de hemen ortadan kalkması beklenir.

Sistemin dinamik davranışı bir taraftan yay kuvveti, mıknatıs kuvveti ve basınç kuvveti etkilerine bağlı iken, diğer taraftan da anahtarlama anında kesime sokulan mıknatıstaki kalıcı mıknatıs kuvvetine de bağlı kalır. Kesime sokulan mıknatıs devresindeki akım düşüşü ani olmayıp belli bir zaman gecikmesine bağlıdır. Diğer taraftan akım tamamen sıfırlansa dahi mıknatıs devresinde az da olsa bir miktar kalıcı mıknatıslanma devam eder. Bu da özellikle ilk başlama hareketini yavaşlatan bir unsurdur. Bu nedenle gerekli mıknatıs çekim kuvvetinin belirlenmesinde bu etkilerin de göz önünde bulundurulması ve tasarımın buna göre yapılması gerekir.

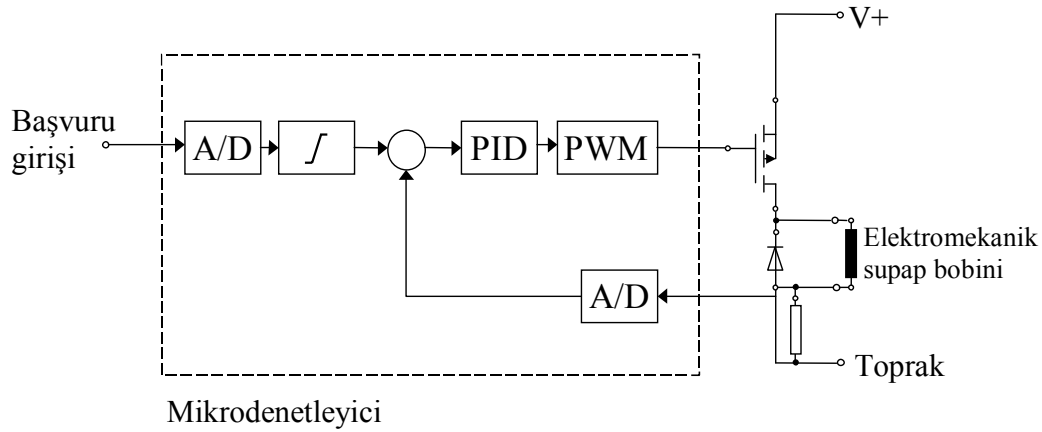
Elektromıknatıs için yaklaşık bir kesit alanı belirlendikten sonra kullanılacak mıknatıs devresinin biçimine göre, uygun bir mıknatıs akısı dağılımı sağlanacak biçimde diğer boyutlar belirlenir. Bunun için bir dizi teorik ve amprik bağlantılardan (13) yararlanılabilir.



Şekil 3. Düz Yüzlü Piston Tipi Mıknatıs Devresi ve Supap Üzerinde Uygulanışı

SİSTEMİN ELEKTRONİK DENETİMİ

Motorun çalışma koşullarına göre elektromekanik supap mekanizmasının kumandası bir mikrodenetleyici yoluyla sağlanabilir. Bunun için motorun elektronik denetim birimi (ECU) kullanılır. Denetim biriminin çıkışından elde edilen denetim sinyalinin gücü düşük olduğundan yüksek akımda çalışan bobini sürmeye yetmez. Bunun için genellikle bir transistordan ibaret bir akım sürücü devreye gerek vardır. Transistor olarak BJT, MOSFET veya IGBT tipinden birisi kullanılabilir. Darbe genişlik modülasyon tekniği ile sürmek için uygun olan MOSFET veya IGBT tipi transistor olmakla birlikte çok yüksek akımlarda yalıtılmış IGBT transistor elektromekanik supap mekanizmaları için daha uygun görünmektedir. Şekil 4' te sistemin elektronik denetimi için kurulması planlanan devrenin prensip şeması verilmiştir. Prototip üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarında elektronik denetim birimi yerine DSP veri toplama ve denetim kartı kullanılmaktadır.



Şekil 4. Elektronik Sürücü Devrenin Prensi Şeması

ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

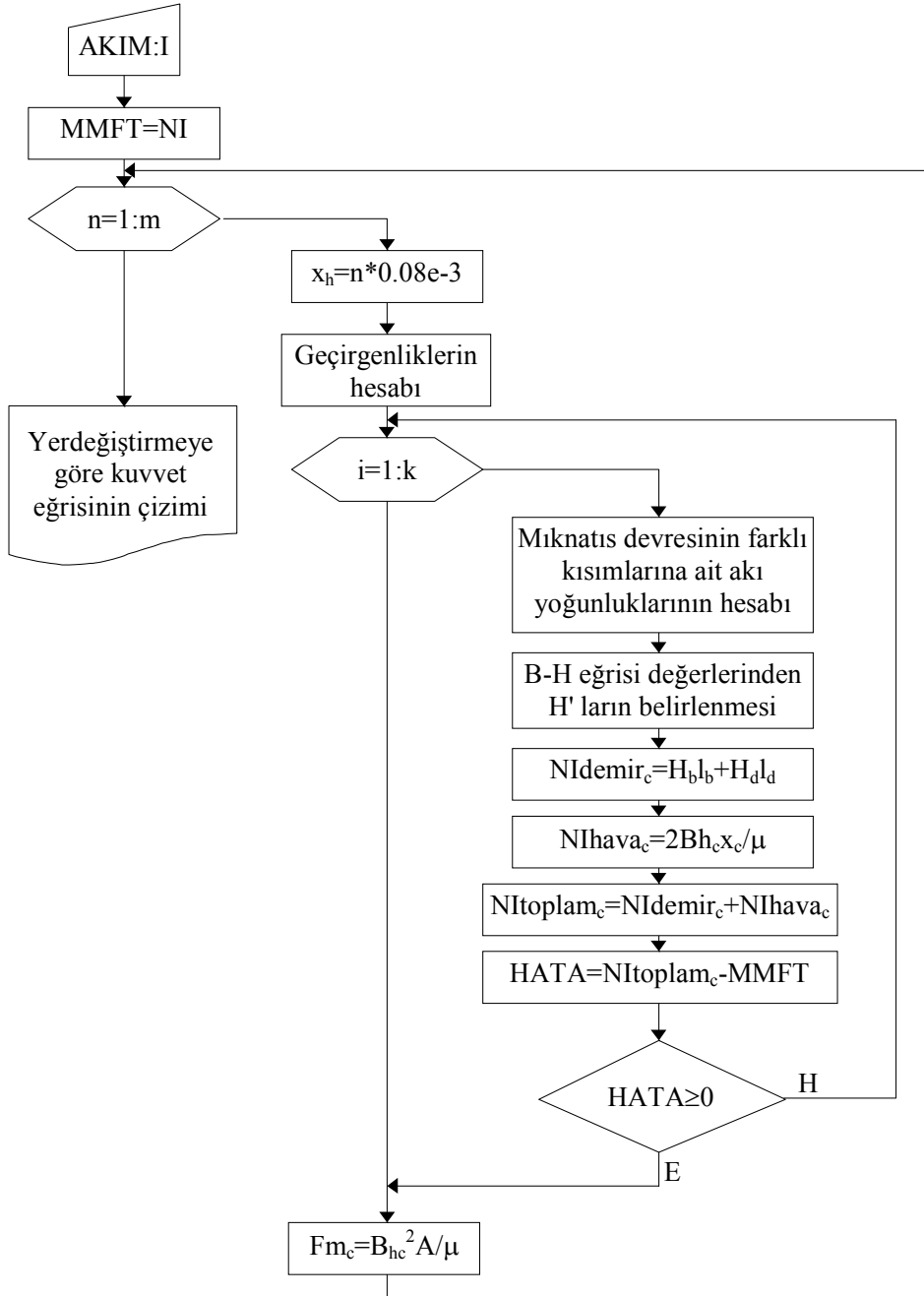
İki farklı mıknatıs devresi için boyutlandırma çalışmaları yapılmış ve bunların statik ve dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Böyle bir sistemde olabilecek en küçük boyutu belirlemek amacı ile silindir içi basınç ihmal edilerek yapılan boyutlandırmada 30 N/mm' lik iki adet yay kullanıldığında, her iki tür için geçerli olmak üzere dış çapı 30 mm olan bir mıknatıs devresinin yeterli olduğu görülmüştür. Boyutlandırma işleminde mıknatıs devresinin geometrik boyutları yanında bobinde kullanılacak tel çapı, sarım sayısı ve bobin direnci belirlenmiştir. Bu çapta iki adet mıknatıs devresi ile oluşturulabilecek bir elektromekanik supap mekanizmasının toplam boyu da yaklaşık 90 mm civarındadır.

STATİK KARAKTERİSTİKLER

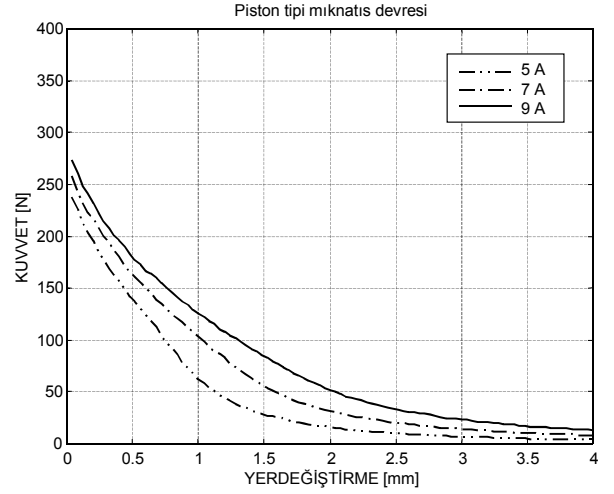
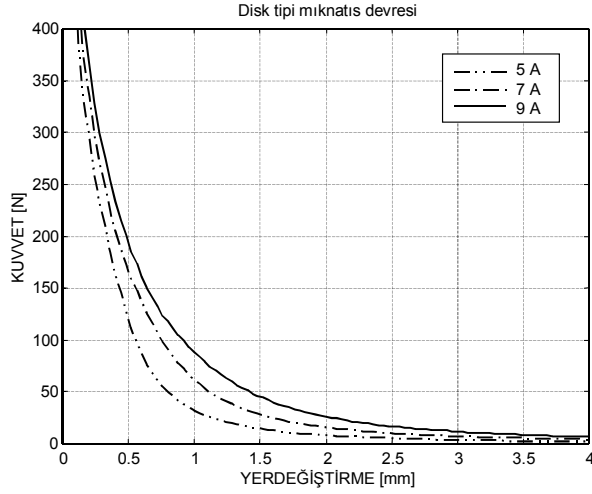
Boyutlandırılması yapılan mıknatıs devresinin çeşitli hareket mesafelerinde sağlayacağı çekim kuvvetinin belirlenmesi gerekir. Bunun için (2) nolu denklem yardımıyla mıknatısın farklı akım değerlerine karşılık gelen kuvvet-yerdeğiştirme karakteristikleri çok kaba biçimde elde edilebilir. Yalnız bu ifadede elektromıknatıs malzemesinin mıknatıslanma özellikleri, devrenin mıknatıs akısı geçirgenliği ve mıknatıs akısı kaçakları hesaba katılmadığı için sonuçlar tam gerçekçi olmayacaktır. Statik kuvvet-yerdeğiştirme karakteristiklerinin yeterli bir yaklaşıklıkta hesaplanmasında genelde iki yöntem kullanılır. Bunlardan birisi sonlu elemanlar yöntemi olup oldukça karmaşıktır. Diğer bir yöntem ise boyutlandırılması tamamlanan mıknatıs devresine ait mıknatıs akısı geçirgenlik formüllerini, malzemenin mıknatıslanma (B-H) eğrisi değerleri ile birlikte çözmektir.

Bu çalışmada mıknatıs devresinin statik karakteristikleri MATLAB programlama dilinde hazırlanan bir program yardımıyla çözülmüştür. Programın algoritması Şekil 5' te verildiği gibidir. Program, malzemenin mıknatıslanma (B-H) değerlerini kullanarak belli bir akım değerine karşılık gelen çeşitli karakteristik değerleri hesaplar. Bu karakteristiklerden birisi kuvvet-yerdeğiştirme eğrileridir. İletime sokulan bobin için farklı akım değerlerine karşılık gelen eğriler karşılaştırma amacı ile her iki tip mıknatıs devresi için Şekil 6' da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi

eğrilerin yapısı yaklaşık hiperbolik olup, yakın mesafelerde yüksek çekim kuvveti, buna karşılık görece uzun mesafelerde ise düşük kuvvetler biçimindedir. İki farklı mıknatıs devresi karşılaştırıldığında, disk tipi mıknatıs devresinin piston tipi mıknatıs devresine göre büyük yerdeğiştirmelerde daha düşük kuvvet sağlarken yakın mesafelerde çok daha fazla kuvvet sağladığı görülmektedir.

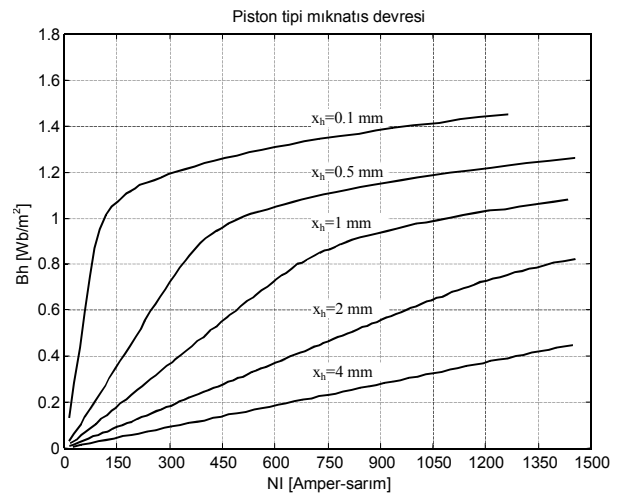
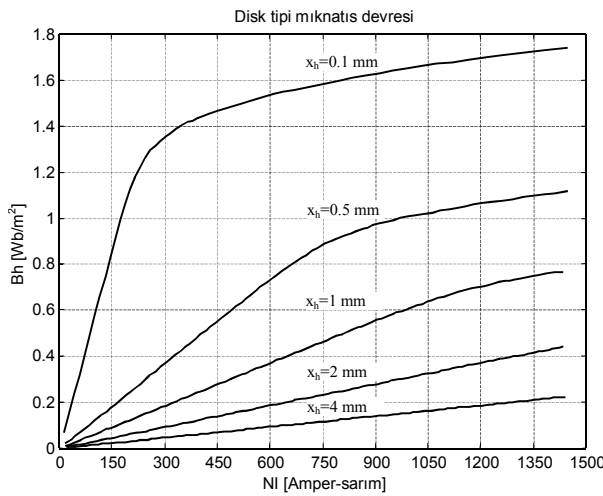


Şekil 5. Elektromekanik Supabın Statik Davranışı Kestiriminin Program Akış Diyagramı



Şekil 6. Elektromekanik Supapta Kullanılan Mıknatıs Devrelerinin Kuvvet-Yerdeğiştirme Karakteristiği

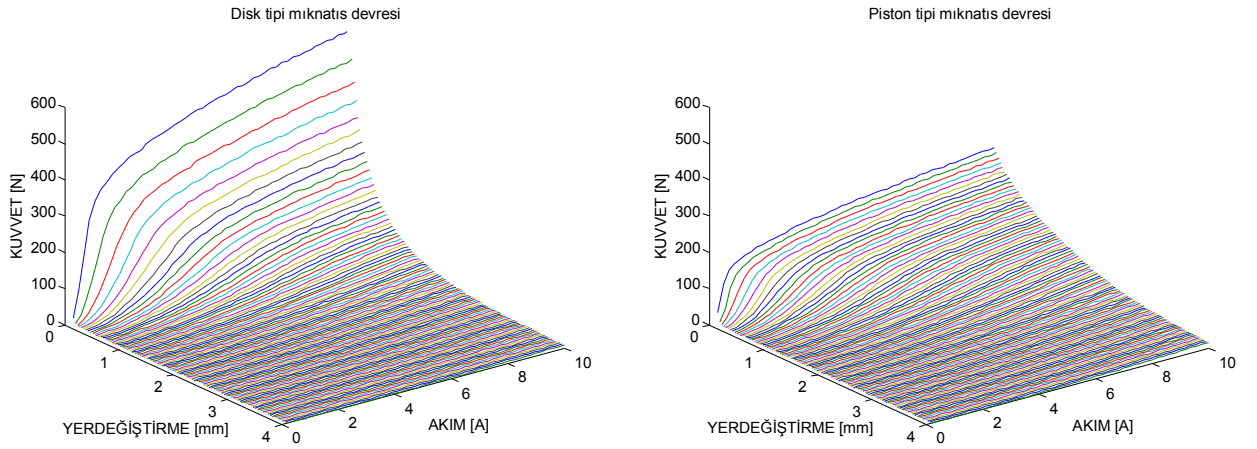
Mıknatıs devresinin diğer bir önemli karakteristiği ise uygulanan akım değerine (veya NI) bağlı mıknatısal doymadır. Bu durum, çeşitli hareket mesafeleri için Şekil 7' deki grafiklerde gösterilmiştir. Her iki türe ait eğrilerden görüldüğü gibi hareket mesafesi yaklaşık 0.5 mm ve altına düştüğünde mıknatıs doyması oluşmaktadır. Burada elektromıknatıs sistemin girişi olan NI değerine karşılık gelen mıknatıs akı yoğunluğu, B_h (hava aralığı faydalı mıknatıs akısı) başlangıçta doğrusal olarak artış gösterirken belli bir NI (veya I) değerinden sonra artışı yavaşlamakta ve sonuna doğru değişimi durmaktadır. Burada eğrinin büküm noktası önemli olup bu noktadan sonraki akım (veya NI) artışında, çok fazla mıknatıs akısı B_h ve dolayısıyla da mıknatıs kuvveti artışı sağlanamayacağı söylenebilir. Bu durum (1) denkleminde de görülebilir. Mıknatıs devresi, eğrinin büküm noktasından sonraki akımlarda zorlanırsa, bir taraftan mıknatıs verimi düşerken diğer taraftan da kayıplardan dolayı ısı artışı ortaya çıkar. Aşırı sıcaklık artışları ise bir taraftan bobin telinin direncini arttırarak çekeceği akımı ve dolayısıyla çekim kuvvetini düşürürken diğer taraftan da bobin telinin yalıtkanlığına zarar verebilir. Pratikte düşük hareket mesafeleri mıknatısın hareketli elemanı tuttuğu duruma karşılık gelir. Bu durumda akım gerekli tutma kuvvetine yetecek seviyeye düşürülebilir.



Şekil 7. Belli Hava Aralıklarında $NI-B_0$ Değişimi

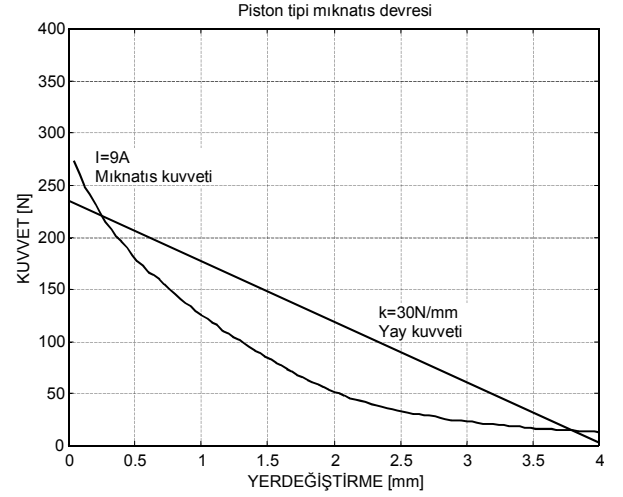
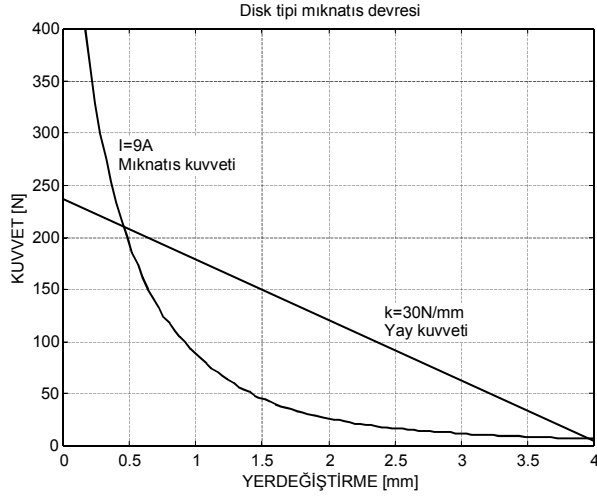
Buna karşılık, eğrilerden görüldüğü gibi yüksek hareket mesafelerinde doyma hemen gerçekleşmemektedir. Pratikte bu durumda hareketli elemanın harekete başlama ve hareketinin devam ettiği zamanlara karşılık gelir. Buna göre ilk harekete akım aşırı yüksek tutularak başlanırsa yüksek bir cevap hızı elde etmek mümkün olabilir. Tutma gerçekleştikten sonra ise bu akım değeri uygun bir değere düşürülebilir. Böylece mıknatıs devresi için uygun çalışma koşulları belirlenmiş olur.

Şekil 8' de akım ve hareket mesafesine bağlı olarak mıknatıs kuvvetinin değişimi verilmiştir. Buradan gerekli mıknatıs kuvvetini sağlayan hareket mesafesi ve akım değeri belirlenerek uygun bir çalışma noktası bulunur.



Şekil 8. Mıknatıs Kuvvetinin Yerdeğiştirme ve Akıma Göre Değişim

Şekil 9' da hareket mesafesine bağlı olarak yay kuvveti ile çekim kuvvetinin kesim noktası gösterilmiştir. Burada çekim kuvveti belli bir mesafeden sonra yay kuvvetini yenebilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi disk elemanlı mıknatıs devresinde çekim kuvveti yakın mesafelerde daha yüksek olduğundan yay kuvvetini daha çabuk yenebilmektedir. Bu da sistemin statik davranışı yanında dinamik davranışını da iyileştirici bir özelliktir.



Şekil 9. Mıknatıs ve Yay Kuvveti Değişimleri

DİNAMİK KARAKTERİSTİKLER

Elektromekanik supap mekanizmaları elektriksel ve mekanik alt sistemlerinden oluşmuş olup bu iki alt sistem mıknatıs alt sistemi ile eşleşerek bütünleşir. Böyle bir sistemin dinamik karakteristiklerini ise iki temel bağıntı yönlendirir. Bunlar;

i) Elektro-mıknatıs bağıntı : Bir bobinden ibaret bir elektro-mıknatıs devresine Kirchhoff yasası uygulanırsa

$$e(t) = Ri(t) + \frac{d(N\Phi)}{dt} \quad (4)$$

elde edilir.

ii) Mıknato-mekanik bağıntı : Elektromıknatıs kuvvetinin etkisi ile hareket eden hareketli elemana Newton' un II. Hareket yasası uygulanırsa

$$F_m(t) = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + B \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) + F_b + F_y + F_{mt} \quad (5)$$

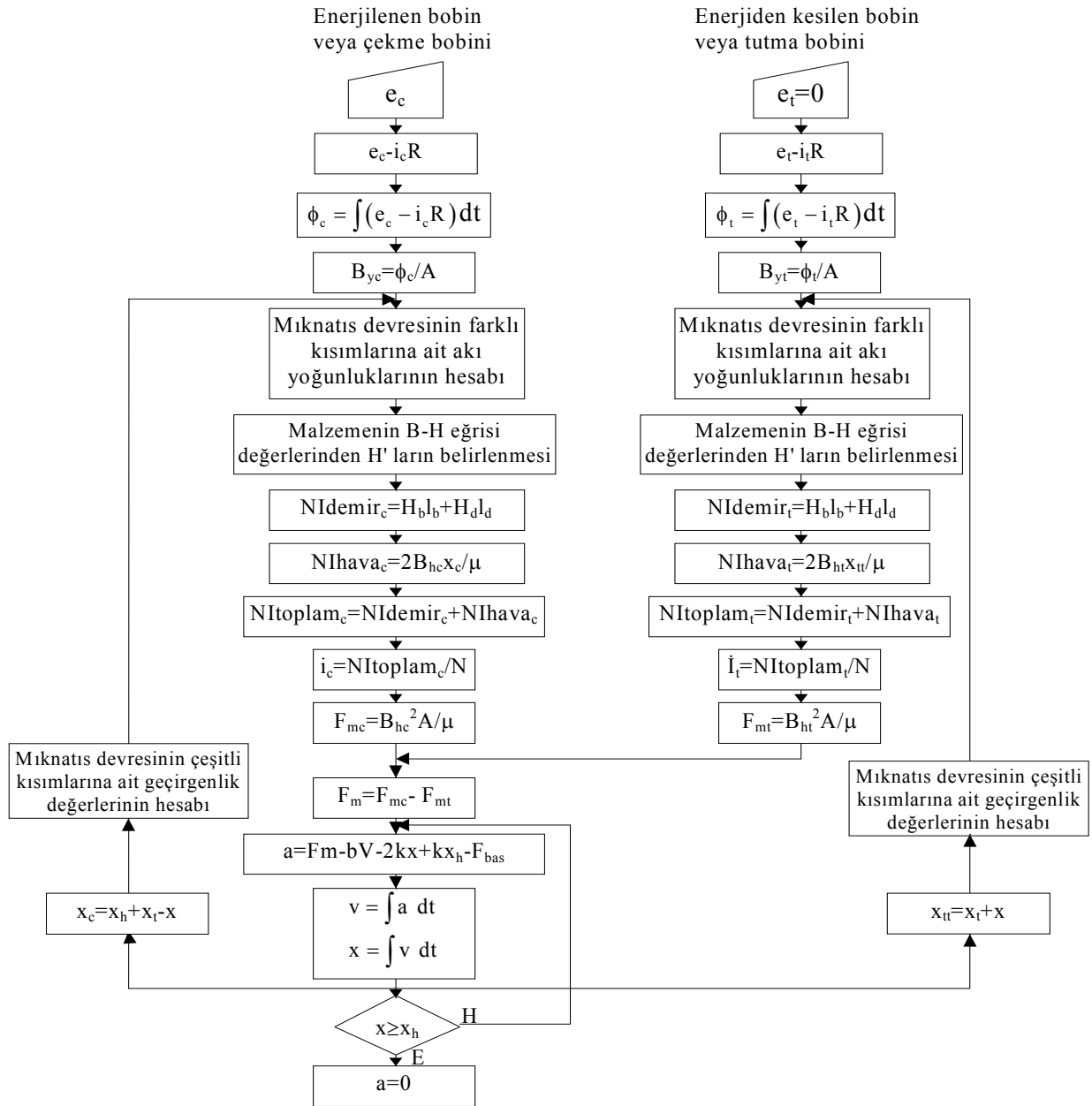
elde edilir.

Burada; F_b : basınç kuvveti, F_y : yay kuvveti, F_{mt} : kalıcı mıknatıs kuvveti, f ve F_m sırasıyla mıknatıs akısı ve mıknatıs kuvveti olup her ikisi de hem konum değişiminin, $x(t)$ ve hem de elektrik akımının, $i(t)$ bir fonksiyonudur.

Bu iki denklemin tam bir analitik çözümü yoktur. Bu denklemlerle birlikte mıknatıs devresine ait mıknatıs geçirenlik denklemleri ve malzemenin mıknatıslanma karakteristiklerini (B-H eğrileri) bir arada kullanmak suretiyle uygun bir sayısal çözüm elde etmek mümkündür. Bunun için, MATLAB/Simulink' te bir program hazırlanmış ve kullanılmıştır. Şekil 10' da programın çalışma algoritması gösterilmiştir. Ele alınan programda mıknatıs devresinde kullanılan malzemenin gerçek

B-H eğrisi değerleri kullanılmıştır. Bu şekilde malzemenin mıknatıssal doyması göz önünde bulundurulmuş ve ayrıca sızıntı kayıpları ile saçaklanma akıları hesaba katılmıştır. Hizterisiz kayıpları ise ihmal edilmiştir. Böylece sistemin dinamik davranışı hakkında gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 11' de karşılaştırma amacı ile sistemin dinamik davranış özellikleri her iki tür mıknatıs devresi için verilmiştir. Sistemin cevap hızı, konum ve hız değişimi özellikleri yanında akım değişimi özelliklerinden de görülebilir. Şekil 11' den de görüldüğü gibi konum değişimi sürekli artış biçiminde olurken hız değişimi belli bir maksimumdan sonra yavaşlayarak azalmaktadır. Burada hareketin tamamlanması anında hızın sıfır olmadığı görülmektedir. Bu da supabın kapanmasının belli bir hızla çarpma biçiminde olduğunu gösterir. Bu konu elektromekanik supap mekanizmalarında giderilmesi gereken bir sorun olarak görülmekte ve sorunun giderilmesi amacı ile çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (1, 3, 4, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 21). Dinamik davranış özelliklerini ayrıca akım eğrisinden de izlemek mümkündür. Şekil 11' den görüldüğü gibi akım değişimi başlangıçta sürekli bir artış biçiminde ortaya çıkmakta ve belli bir noktada maksimum yaptıktan sonra azalma yönünde değişim göstermektedir. Daha sonra belli bir noktada minimum yaptıktan sonra tekrar yükselmeye başlayarak nihai değerine ulaşmaktadır. Akımın sürekli artış ile değişimi yerine belli bir noktada düşme göstermesi, mıknatıs devresinde hareketli elemanın hareketinden kaynaklanmaktadır. Burada akım değişimi ile oluşan mıknatıs kuvveti artışı doğrudan hareket değişimine neden olurken diğer taraftan hareket değişimi de ters yönde akım değişimine etki etmektedir. Bu da elektromekanik sistemdeki karşılıklı etkileşimin bir sonucudur.



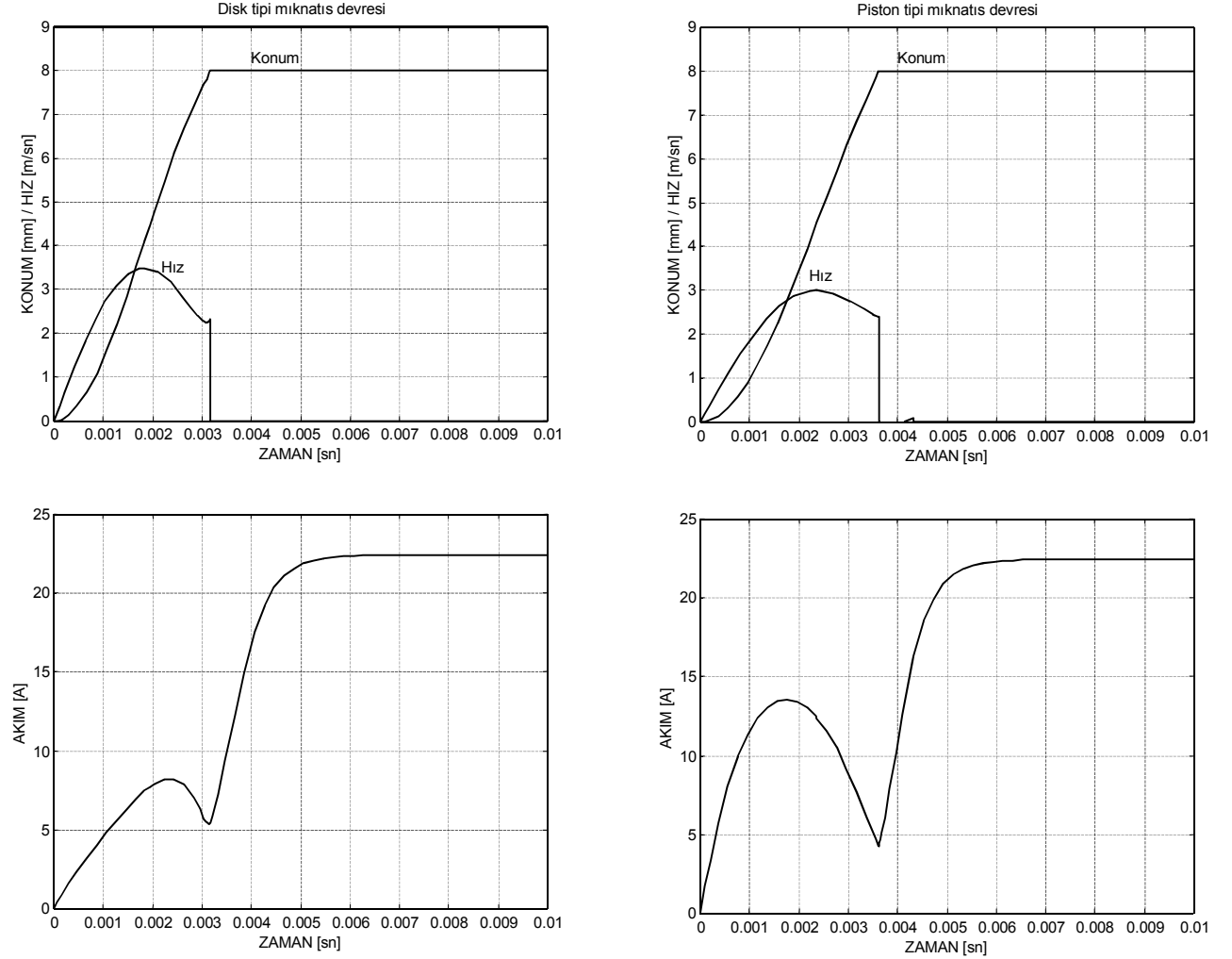
Şekil 10. Elektromekanik Supabın Dinamik Davranışı Kestiriminin Program Akış Diyagramı

Akım eğrisinin minimum yaptığı nokta, hareketli elemanın hareketini tamamladığı yer olup bu şekilde akım eğrisi üzerinde supabın açılıp-kapanma zamanını tespit etmek mümkün olmaktadır.

Her iki tür mıknatis devresinin cevap hızlarını karşılaştırdığımızda dik tipi mıknatisli supabın cevap hızının yaklaşık 3.15 ms olduğu görülürken, piston tipi mıknatisli supabın cevap hızının 3.6 ms olduğu görülür. Buradan disk tipi mıknatisli supabın dinamik davranışının daha iyi olduğu söylenebilir.

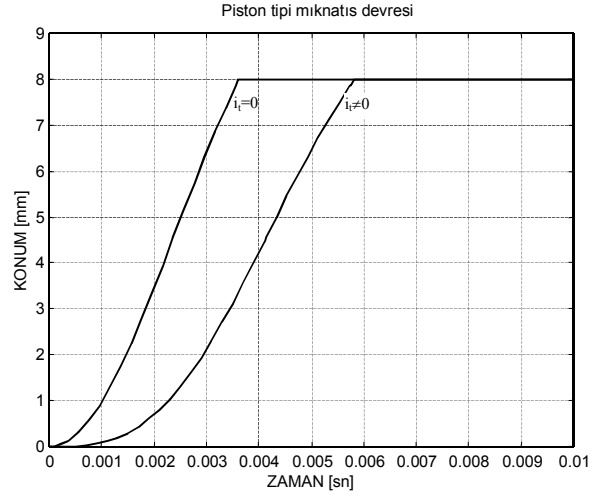
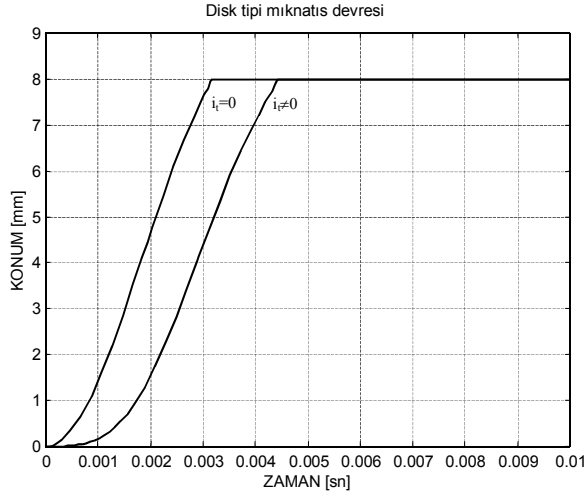
Şekil 12' de tutma akımının cevap hızı üzerine etkisi her iki tür mıknatis devresi için verilmiştir. Burada tutma akımı kesime sokulan mıknatisle kesime sokulmadan önce yay kuvvetini yenmek için gerekli mıknatis kuvvetini sağlayan akım değeridir. İletime sokulan mıknatis devresi içinde akım artışı nasıl ki ani olmazsa, kesime sokulan mıknatis devresi içindeki akım düşümü de ani olmamakta

ve buna bağı olarak da tutucu mıknatıs kuvveti de ani olarak düşmeyeceğinden bir zaman gecikmesine neden olmaktadır. Pratikte bu etki ters yönde akım uygulamak suretiyle giderilebilmektedir.

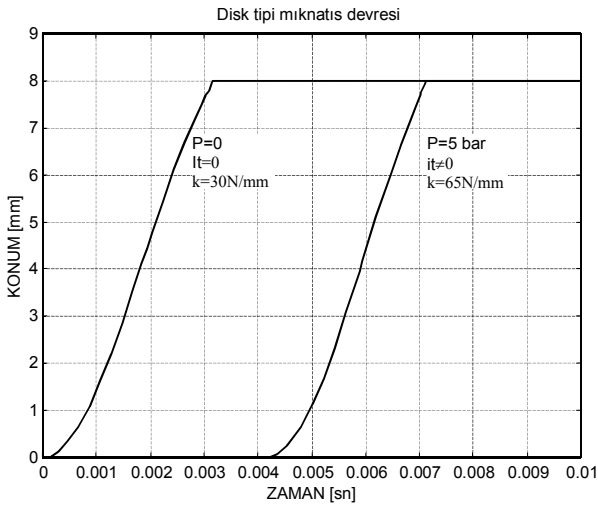


Şekil 11. Mıknatıs Devrelerinin Dinamik Karakteristikleri

Şekil 13' te ise sistemin dinamik davranışı üzerine silindir içi basıncının etkisi gösterilmiştir. Gerçekte silindir içi basıncının etkisi egzoz supaplarında ortaya çıkmaktadır. Motorun egzoz aşamasındaki sıkıştırma basıncı 5-6 bar civarında olup bunun egzoz supabı üzerindeki etkisi 350-400 N civarındadır. Bu kuvveti dikkate alarak yapılan hesaplamalarda daha kuvvetli bir yay ve buna karşılık da daha güçlü bir mıknatıs devresi kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu durumda mıknatıs devresinin cevap hızı azaldığından tüm sistemin cevap hızında da bir düşme ortaya çıkmaktadır. Yalnız egzoz basıncının etkisi supabın tam kapalı konumunda en yüksek olup supap açılır açılmaz gaz basıncı düşme gösterecektir. Supap harekete başladıktan sonra sistemin dinamik davranışı, silindir içi gaz basıncının dikkate alınmadığı durumda elde edilen karakteristiğe çok yakın olacaktır.



Şekil 12. Tutma Akımının Sistemin Cevap Hızına Etkisi



Şekil 13. Silindir İçi Basıncın Sistemin Cevap Hızına Etkisi

SONUÇ

Bu çalışmada elektromekanik supap mekanizması tasarımına etki eden statik ve dinamik karakteristikler araştırılmış, bunun için hazırlanan bilgisayar programları yardımıyla teorik sonuçlar elde edilmiştir.

Ayrıca iki ayrı tür mıknatis devresi kullanılarak en uygun türün belirlenmesine çalışılmıştır. Bunun sonucunda gerek statik ve gerekse dinamik karakteristikler, disk tipi mıknatis devresinin daha uygun olacağını göstermiştir.

Sistemin dinamik performansı göz önünde bulundurulduğunda, en kritik parametrelerden birisinin yay sabiti olduğu görülmektedir. Yay sabitinin seçimi elektromekanik devrenin boyutlarına etki etmektedir. Buna göre yay ne kadar sert olursa sistemin cevap hızı o oranda yüksek olmakta,

fakat buna karşılık da mıknatısın boyutları büyümektedir. Mıknatısın boyutları büyüyünce gerekli güç talebi artmakta ve aynı zamanda sistemin cevap hızı da düşmektedir. Sistemin cevap hızındaki bu düşüş tutucu bobindeki tutma akımından kaynaklanmaktadır. Tutma akımının etkisi ortadan kaldırıldığında cevap hızının kolaylıkla istenen değerlere geleceği söylenebilir. Teknik olarak tutma akımının etkisini en aza indirmek mümkündür.

Sonuçları elde edilen elektromekanik supap mekanizmalarında gaz basıncının etkisi ihmal edilerek boyutlandırma yapılmış ve bu durumda 30N/mm' lik bir yay kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür. Bu yay kuvvetini belli bir noktada karşılayabilecek ve bu noktada tutabilecek gerekli mıknatıs kuvvetinin de 30 mm çapında bir mıknatıs devresi ile sağlanabileceği belirlenmiştir. Silindir içi basıncı ve tutma akımının hesaba katıldığı durumlarda ise en az 65 N/mm' lik bir yaya gerek olduğu görülmüştür. Bu durumda mıknatıs devresinin çapı da yaklaşık 55 mm civarında çıkmaktadır. Kaba hesaplamalarla bir supabı çalıştırmak için kullanılan mekanik devrenin boyu 90-100 mm arasında olmaktadır.

Bu çalışmada değişken zamanlamalı elektro-mekanik supap mekanizmasının tasarımı ve tasarıma etki eden parametreler incelenmiştir. Çalışma devam etmekte olup bundan sonra tasarımı yapılan mekanizmanın imalatı ve sistemin denetimi ele alınacaktır.

KAYNAKÇA

1. **Butzmann, S. J. Melbert, A. Koch.** 2000. "Sensorless Control of Electromagnetic Actuators for Variable Valve Train". Variable Valve Actuation 2000. SAE. 2000-01-1225. p. 65-70.
2. **Flierl, R. M. Klütting.** 2000. "The Third Generation of Valvetrains-New Fully Variable Valvetrains for Throttle-Free Load Control". Variable Valve Actuation 2000. SAE. 2000-01-1227. p. 81-91.
3. **Gottschalk, M.** 1993. "Electromagnetic Valve Actuator Drives Variable Valve Train". Design News 49 (21).
4. **Hoffmann, W., K. Peterson, A. Stefanopoulou.** 2001. "Iterative Learning Control for Soft Landing of Electromechanical Valve Actuator in Camless Engines". Proceedings American Control Conference. p.2860-2866.
5. http://www.fev.com/f_index.html
6. **Kamış, Z., İ. Yüksel, E. E. Topçu.** 2002. "Bir Elektromekanik Supap Mekanizması Tasarımı". OTEKON'02. s.300-307.
7. **Kutlar, O. A., H. Arslan, A.T. Çalık.** 1999. "Benzin (Otto) Motorunda Kısmi Yükte Yakıt Tüketimini Azaltmaya Yönelik Yöntemler: Değişken Supap Zamanlaması Ve Açılma Miktarı, Değişken Sıkıştırma Oranı". Mühendis ve Makine. Cilt 40. Sayı 477. s 44-52
8. **Park, S. H., J. Lee, J. Yoo, D. Kim, K. Park.** 2003. "Effects of Design and Operating Parameters on the Static and Dynamic Performance of an Electromagnetic Valve Actuator". Journal of Automobile Engineering. Vol.217. p. 193-201.
9. **Peterson, K., A. Stefanopoulou, T. Megli, M. Haghgooye.** 2002. "Output Observer Based Feedback for Soft Landing of Electromechanical Camless Valvetrain Actuator". Proceedings of American Control Conference. p. 1413-1418.
10. **Peterson, K., A. Stefanopoulou, Y. Wang, M. Haghgooye.** 2002. "Nonlinear Self-Tuning Control for Soft Landing of an Electromechanical Valve Actuator". IFAC Mechatronics Conference.
11. **Peterson, K., A. Stefanopoulou, Y. Wang.** 2002. "Control of Electromechanical Actuators: Valves Tapping in Rhythm". Mohammed Dahkeh Symposium. University of California, Santa Barbara.
12. **Pischinger, M. W. Salber, F. V. D. Staay, H. Baumgarten, H. Kemper.** 2000. "Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation". Variable Valve Actuation 2000. SAE. 2000-01-1223. p. 43-53.
13. **Roters, H. C.** 1941. "Electromagnetic Devices". John Wiley & Sons. Inc., 561s.
14. **Şefkat, G.** 2000. "Elektromekanik Sistemlerin Optimum Tasarımı ve Denetiminin İncelenmesi". Doktora Tezi. Bursa, s. 21-31.

15. **Şengirgin, M.** 2000. "Elektrohidrolik Disk Valflerin Geliştirilmesi ve Bunların Çeşitli Sinyal İşleme Teknikleri Yolu ile Denetlenmesinin Araştırılması". Doktora Tezi. Bursa, s. 19-27.
16. **Tai, C., A. Stubbs, T. C. Tsao.** 2001. "Modeling and Controller Design of an Electromagnetic Engine Valve". Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA June 25-27. p.2890-2894.
17. **Tai, C., T. C. Tsao.** 2001. "Quiet Seating Control Design of an Electromagnetic Engine Valve Actuator". Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Newyork, NY. p. 1-7.
18. **Tai, C., T. C. Tsao.** 2002. "Control of Electromechanical Camless Valve Actuator". Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, AK May 8-10. p.262-267.
19. **Uhlenbrock, R., J. Melbert.** 2001. "Smart Actuator for Sensorless Electromagnetic Variable Valve Actuation". SAE. 01ATT491.
20. **Wang, Y., A. Stefanopoulou, M. Haghgoie, I. Kolmanovsky, M. Hammoud.** 2000. "Modeling of an Electromechanical Valve Actuator for a Camless Engine". Proceedings AVEC 2000. 5 th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control. No 93.
21. **Wang, Y., T. Megli, M. Haghgoie.** 2002. "Modeling and Control of Electromechanical Valve Actuator". Variable Valve Actuation 2002. SAE. 2002-01-1106.
22. **Yüksel, İ.** 1981. "An Investigation of Electro-hydraulic Floating Disc Switching Valves". Ph.D. Thesis, University of Surrey.