

**ARAŞTIRMA MAKALESİ /RESEARCH ARTICLE**

**ELEKTROMEKANİK SUPAP MEKANİZMALARINDA OTURMA HIZININ  
AZALTILMASI**

**Zeliha KAMIŞ<sup>1</sup>, İbrahim YÜKSEL**

**ÖZ**

İçten yanmalı motorlarda kullanılan elektromekanik supap mekanizmalarında supapların mıknatıs devreleri ile açılıp kapanması esnek supap denetimine izin vererek motor performansını önemli oranda iyileştirebilir. Supabın hareketini tamamlama aşamasında mıknatıs kuvveti çok hızlı yükseldiğinden supabın ani olarak ivmelenmesine ve hareketin bir çarpma ile sonlanmasına neden olur. Elektromekanik supap mekanizmalarının en kritik problemi hareketin tamamlanma aşamasındaki yüksek oturma hızlarıdır. Bu çalışmada tasarımı yapılan elektromekanik supap mekanizmasının matematik modeli çıkarılmış ve sistemin statik ve dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Supabın oturma hızı denetiminin analizi yapılmış, denetim işlemi model üzerinde teorik olarak gerçekleştirilmiş ve uygun denetim teknikleri kullanarak oturma hızının yaklaşık olarak istenen değerlere düşürülebileceği gösterilmiştir. Bu durum ayrıca basit deneysel çalışmalarla da doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler** : Elektromekanik supap mekanizması, Oturma hızı, Akımın anahtarlanması

**REDUCTION OF CONTACT VELOCITY IN ELECTROMECHANICAL VALVE  
ACTUATORS**

**ABSTRACT**

In electromechanical valve actuators used in IC engines, opening and closing of valves via magnetic circuits can allow flexible valve control and improve engine performance significantly. Rapid rise in the magnetic force at the final stage causes an unexpected acceleration of the valve and the motion ends with an impact. The most critical problem of the electromechanical valve actuator is high contact velocity at the final stage of the movement. In this study, the mathematical model of the designed electromechanical valve actuator is derived and static and dynamic characteristics of the system are also obtained. Control of the contact velocity of the valve is analyzed, and it is verified that contact velocity is decreased to desired value by appropriate control techniques. This conclusion is also confirmed by experimental studies.

**Keywords:** Electromechanical valve actuator, Contact velocity, Current switching.

<sup>1</sup> Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059 Görükle/BURSA  
**Faks:** (0224) 4428021, **E-posta:** zkamis@uludag.edu.tr

**Geliş:** 22 Mart 2006; **Düzeltilme:** 25 Ocak 2007; **Kabul:** 2 Ekim 2007

## 1. GİRİŞ

Konforun ve ekonomikliğin aranan bir özellik haline gelmesi, çevreye atılan kirleticilere getirilen kısıtlamalar taşıtlarda her türlü denetimi zorunlu hale getirmektedir. Bu nedenle otomotiv sektöründe mekanik veya hidrolik kumandalı sistemler yerine, motor performansını optimize eden, esneklik derecesi yüksek merkezi elektronik kumanda altındaki yerel elektromekanik aygıtlar kullanan yapıya doğru bir geçiş yaşanmaktadır.

Elektromekanik aygıtların taşıtlarda en son uygulaması elektromekanik supap mekanizmasıdır. Bu sistemde supaplar elektronik denetim birimine bağlı olarak elektromıknatis devreleri ile açılıp kapanmakta ve böylelikle de esnek supap denetimi sağlanmaktadır.

Supap zamanlamasının elektronik denetimi ile motor performansının önemli oranda iyileştirilebilir. Elektromekanik supap mekanizması ile supap hareketi tüm çalışma şartlarında motorun devrinden bağımsız olarak denetlenir ve bunun sonucunda yakıt tüketimi ve kirletici oranları azaltılmış olur (Pischinger vd., 2000). Ayrıca bu sistem ile yüksek tork ve güç çıkışı elde edildiği, motorun soğukta ilk çalışması ve ısınması, geçici durum ve rölanli çalışması için optimum yakıt tüketimi sağladığı ve pompalama kayıplarını en aza indirdiği öne sürülmektedir (FEV; Wang vd., 2000; Giglio vd., 2002 ).

Son yıllarda elektromekanik supap mekanizmaları üzerine çok yönlü çalışmalar yürütülmektedir. Yapılan çalışmaların bir kısmı sistemin tasarımı ve tasarım parametrelerinin incelenmesi ve statik ve dinamik karakteristiklerin araştırılması üzerinedir (Park vd., 2001; Park vd., 2003a; 2003b; Nitu vd., 2005). Bu çalışmalarda genellikle E tipi olarak adlandırılan ve dikdörtgen prizması şeklinde olan mıknatis devreleri kullanılmıştır (Park vd., 2001; Chang vd., 2002; Park vd., 2003a; 2003b; Nitu vd., 2005; Clark vd., 2005).

Elektromekanik supap mekanizması tasarımında silindirik mıknatis devreleri nadir olarak kullanılmaktadır. Yapılan bir çalışmada elips kesit alanına sahip mıknatis devresinden yararlanılmıştır (Chladny vd., 2005). Disk ve piston tipi mıknatis devrelerinin elektromekanik supap mekanizmalarında uygulanabilirliği yapılan çeşitli çalışmada ayrıntılı olarak araştırılmıştır (Kamış ve Yüksel, 2004b; Kamış, 2005; Kamış ve Yüksel, 2005a). Bu konu ile ilgili yapılan

diğer çalışmalarda ise elektromekanik supap mekanizmalarında tasarım parametrelerinin (Kamış ve Yüksel, 2003; Kamış ve Yüksel, 2004c), giriş sinyali biçiminin (Kamış ve Yüksel, 2004a) ve yay enerjisinin (Kamış ve Yüksel, 2005b) etkisi incelenmiştir.

Elektromekanik supap mekanizmasının modellenmesi ve denetimi üzerine de çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Sistemin modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi (Park vd., 2001; Park vd., 2003a; 2003b; Nitu vd., 2005) ve MATLAB/Simulink programı (Wang vd., 2000; Wang vd., 2002; Xiang, 2002 ; Eyabi, 2003; Peterson, 2005) yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektromekanik supap mekanizması doğrusal olmayan bir sistem olduğundan ve küçük hava aralıklarında kararsızlık problemi ortaya çıktığından düşük oturma hızlarını sağlamak için sistemin geri beslemeli olarak doğrusal olmayan bir denetleyici ile denetlenmesi gerekir (Butzmann vd., 2000; Stubbs, 2000; Wang vd., 2002; Xiang, 2002 ; Eyabi, 2003; Montanari, vd., 2003; Tai ve Tsao, 2003; Peterson, 2005).

Bu çalışmada elektromekanik supap mekanizmasının matematik modeli çıkarılarak statik ve dinamik karakteristikler incelenmiş, oturma hızı denetiminin analizi yapılmıştır. Bunun yanı sıra uygun denetim teknikleri ile oturma hızının azaltılabileceği gösterilmiştir.

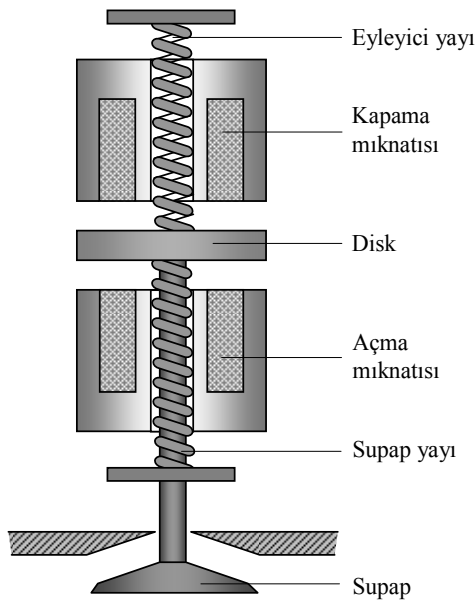
## 2. ELEKTROMEKANİK SUPAP MEKANİZMASI (ESM)

Elektromekanik supap mekanizmalarının getirdiği yeniliklerden en önemlisi kam mekanizması gibi mekanik bir 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, elektronik ateşleme zamanı ve yakıt püskürtmesi optimize edilebilmektedir.

Şekil 1' den görüldüğü gibi bir elektromekanik supap mekanizması (ESM) açma ve kapama üzere iki adet mıknatis devresi ve bobini, iki adet yay ve supap ile birlikte hareket eden disk veya piston biçiminde bir adet hareketli elemandan meydana gelir.

Elektromekanik supap mekanizmalarında sistemin dinamik davranışı göz önünde bulundularak en uygun mıknatis devresinin seçilmesi

ve tasarımın buna göre yapılması esastır. Elektromekanik supap mekanizmalarında sistemin cevap hızı büyük oranda kütle yay sisteminin doğal frekansına bağlı iken belli oranda da elektromıknatısın dinamiğine bağlıdır. Bu çalışmada elektromekanik supap mekanizması tasarımında disk tipi mıknatıs devresi kullanılmıştır. Disk tipi mıknatıs devresinin hareketli elemanı disk biçimindedir ve mıknatıssal olarak seri, mekanik olarak paralel bağlı iki çalışma aralığına sahiptir. Bu yapıya bağlı olarak da küçük hava aralıklarında aşırı yüksek çekme kuvvetleri elde edilirken, hava aralığı artışı ile beraber çekim kuvvetleri aşırı bir düşüş gösterir (Şekil 7, 8). Bu sistemde disk ve mıknatıs devresi ferromıknatıs bir malzemeden yapılmış olup, hareketli eleman iki mıknatıs devresi arasında gidip gelme hareketi yaparak supabı açık veya kapalı konuma getirir ve tutar. Diskin hareketi, yayların sağladığı potansiyel enerji ile mıknatıs enerjisi veya kuvvetine bağlıdır.



Şekil 1. Elektromekanik supap mekanizması

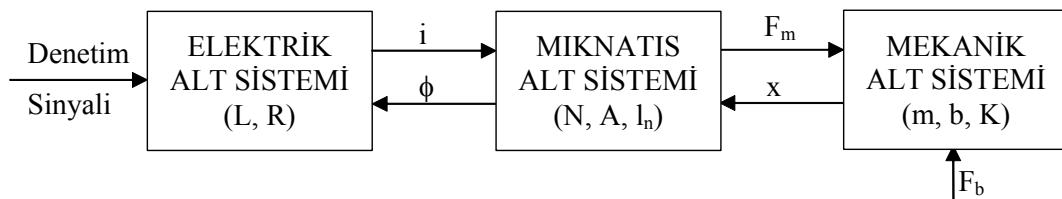
Elektromekanik supap mekanizmalarında, elektronik denetim biriminden gönderilen denetim sinyaline göre bobinlerden biri ilettime, diğeri kesime sokularak supap açılıp kapanır. Supap kapama mıknatıs devresi ile kapalı konuma, açma mıknatıs devresi ile açık konuma getirilir. Her iki mıknatıs devresine de akım uygulanmadığında hareketli eleman yaylar yardımıyla denge konumunda tutulur. Motor çalıştığı sürece mıknatıs devrelerinden biri iletimde diğeri kesimdedir. Yani supap ya açık yada kapalı konumdadır. Motor çalışmadığında her iki mıknatıs devresi de iletimden kesilir ve supap denge konumunda yarı açık kalır.

Elektromekanik supap mekanizmasının motorlarda uygulanabilmesi ve yüksek motor hızlarında yeterli performansı sağlaması için supabın hareket süresinin mümkün olduğu kadar kısa olması gerekir.

Elektromekanik supap mekanizması tasarımında yay kuvveti ve diğer karşı kuvvetleri yenebilecek bir mıknatıs devresinin tasarımı esastır. Bu sistemde supap yay enerjisi ile harekete başladığından sistemde kullanılan yayların yay katsayıları silindir içi basıncını yenecek büyüklükte olmalı, mıknatıs devresi boyutları da yay kuvvetine göre belirlenmelidir. Bu durumda mıknatıs kuvveti, yay kuvveti ve egzoz/emme manifoldu ve silindir arasındaki basınç farkının oluşturduğu değişken gaz kuvvetlerini yenebilecek büyüklükte olmalıdır.

## 2.1. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Matematik Modeli

Elektromekanik supap mekanizmasında kullanılan mıknatıs devresi elektrik, mıknatıs ve mekanik alt sistemlerinden meydana gelir (Şekil 2). Bu alt sistemler birbiriyle etkileşim halindedir ve supabın açılması ve kapanması için benzer davranış gösterirler.



Şekil 2. Elektromekanik supap alt sistemlerinin birbiri ile etkileşimi

### 2.1.1. Elektrik Alt Sistemi

Bir mıknatıs devresinin bobinine uygulanan elektrik gerilimine karşılık oluşan akım değişimi sonucu devrede bir mıknatıs akısı değişimi oluşur. Kirchoff yasasına göre bu ifadenin matematiksel bağıntısı sarım sayısı,  $N$  ve mıknatıs akısına,  $\phi$  bağlı olarak ilettime sokulan mıknatıs devresi için

$$e_c = e_R + e_L = Ri_c + \frac{d(N\phi_c)}{dt} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir (Roters, 1941). Çözümüne esas olan (1) nolu elektriksel alt sistem denklemini kapalı formda yazılmış doğrusal olmayan bir diferansiyel denklemdir. Bu ifadeden mıknatıs akısı,  $\phi$  çekilirse

$$\phi_c = \frac{1}{N} \int (e_c - Ri_c) dt \quad (2)$$

elde edilir.

Elektromekanik supap mekanizmasında bir bobin ilettime sokulurken diğer bobine uygulanan gerilim sıfıra düşürülerek kesime sokulur. Buna göre kesime sokulan bobin için

$$e_i = 0 = Ri_i + N \frac{d\phi_i}{dt} = Ri_i + L \frac{di_i}{dt} + i_i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

yazılabilir. (3) nolu ifadeden görüldüğü gibi tutma bobininde gerilim sıfırlansa bile mıknatıs devresindeki indüktans etkisinden dolayı akım ani olarak düşmez, zamana bağlı bir değişim gösterir.

### 2.1.2. Mıknatıs Alt Sistemi

Elektromekanik supap mekanizmasının statik ve dinamik karakteristiklerinin elde edilebilmesi için mıknatıs devresinin farklı kısımlarına ait mıknatıs geçirgenlik değerleri ve bunlara bağlı olarak da mıknatıs akısı yoğunluğu değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu şekilde elektromekanik supap mekanizmasının tüm hareketi boyunca sağlayacağı kuvvetin hesabında malzemenin mıknatıssal doyması dikkate alınır.

Sisteme giriş olarak uygulanan elektriksel sinyale karşılık mıknatıs devresinin sağladığı çekim kuvveti bobin ile hareketli eleman arasında kalan hava aralığı ile denetlenir. Hareketli eleman üzerine mıknatıs devresinin uyguladığı mıknatıs çekim kuvveti mıknatıs akısı yoğunlu-

ğuna bağlı olarak (4) nolu denklem yardımıyla hesaplanır. Mıknatıs alt sisteminin temelini teşkil eden mıknatıs devresinin kuvvet-yer değiştirme karakteristikleri (4) nolu denklem ile birlikte bir dizi mıknatıs akısı ve geçirgenlik bağıntılarının çözümünden elde edilir (Roters, 1941).

Mıknatıs çekim kuvveti sabit mıknatıs ile hareketli eleman arasında kalan hava aralığındaki mıknatıs akısı yoğunluğu,  $B_h$  ve çekirdek etkin kesit alanı,  $A$  cinsinden

$$F_m = \frac{z}{2} \frac{\phi^2}{\mu_0 A} = \frac{z}{2} \frac{B_h^2 A}{\mu_0} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir (Roters 1941). Burada  $z$ : hava aralığı sayısı (disk tipi mıknatıs devresi için 2' dir.),  $\mu_0$ : hava aralığı geçirgenliğidir ( $4\pi 10^{-7}$ ).

Mıknatıs devrelerinin hesabı oldukça karmaşıktır. Mıknatıs devresi hesabındaki doğrusalsızlıktan dolayı ortaya çıkan güçlük kullanılan mıknatıs malzemesinin B-H ilişkisini temsil eden deneysel mıknatıslanma eğrisinin kullanılmasıyla kısmen giderilir. Mıknatıs devresi için bulunan akı yoğunluğu değerlerinden, B-H mıknatıslanma eğrisinden alınan veriler kullanılarak yapılan enterpolasyon ile mıknatıs alan şiddeti,  $H$  değerleri hesaplanır. Bu değerlere bağlı olarak mıknatıs devresinin demir kısmı için gerekli magnetomotor kuvveti aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\sum H_n l_n = H_b l_b + H_h l_h \quad (5)$$

Bu eşitliğe, hava aralığındaki magnetomotor kuvvetinin de eklenmesiyle gerekli toplam magnetomotor kuvveti,  $NI$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$NI = \frac{z B_h x_h}{\mu_0} + \sum H_n l_n \quad (6)$$

### 2.1.3. Mekanik Alt Sistemi

Mıknatıs kuvvetinin etkisi ile hareket eden hareketli elemana Newton' un II. Hareket Yasası uygulandığında

$$F_{mc} = m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_{sür} \pm F_{yay} + F_b + F_{mt} \quad (7)$$

elde edilir. Burada  $F_{mc}$ : ilettime sokulan mıknatıs devresindeki mıknatıs çekim kuvveti (N),  $F_{mt}$ :

kesime sokulan mıknatıs devresindeki kalıntı mıknatıs kuvveti (N),  $F_{sür}$ : sürtünme kuvveti (N),  $F_b$ : silindir içi basınç kuvvetidir (N).

Yapılan tasarımda hareketli elemanın maksimum hareket mesafesi pratikte otomobil motorlarındaki supapların hareket mesafesine uygun gelecek şekilde 8 mm ( $x_h=8$  mm) olarak belirlenmiştir.  $x=0$  iken hareketli eleman kapama mıknatıs devresi tarafından,  $x=8$  mm iken açma mıknatıs devresi tarafından tutulmaktadır.  $x=4$  mm iken hareketli eleman yay kuvvetleri yardımıyla denge konumunda tutulmaktadır.

$F_{yay}$  yayların hareketli eleman üzerine uyguladığı bileşke yay kuvveti olup

$$F_{yay} = -K \left( \frac{x_h}{2} - x \right) \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır.

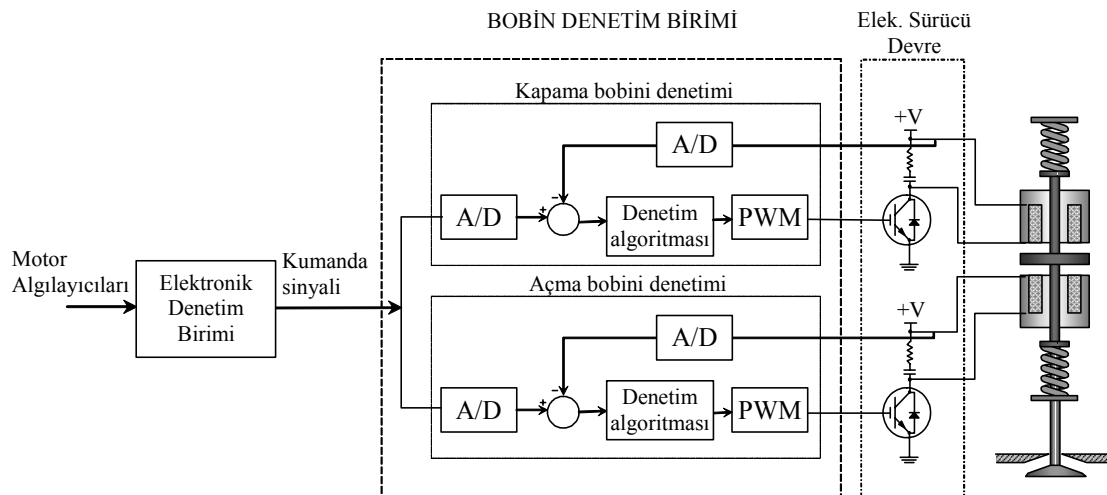
Görüldüğü gibi mıknatıs devresinin dinamiğini tanımlayan denklemler oldukça karmaşık doğrusal olmayan ifadelerden meydana gelmektedir. Burada çözüme esas olan temel denklemler (1)-(3) nolu elektrik alt sistemi denklemleri, (4)-(6) nolu mıknatıs alt sistemi denklemleri, ve (7)-(8) nolu mekanik alt sistemi denklemleridir. Bu denklem takımlarının sayısal yöntemlerle çözümünden sistemin dinamik davranış karakteristikleri elde edilebilir. Bu durumda en iyi çözüm aracı bilgisayar destekli sayısal çözümler tekniği olup bu çalışmada çözümler

MATLAB/Simulink ortamında elde edilmiştir.

## 2.2. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Denetimi

Elektromekanik supap mekanizmalarının açma/kapama zamanlaması denetimi motorun çalışma şartlarına göre krank mili açısına bağlı olarak elektronik denetim biriminden gerçekleştirilir. Bu şekilde supapların esnek bir şekilde denetimi yoluyla motor performansında önemli oranda iyileştirme sağlanmış olacaktır.

Şekil 3' te sistemin akım geri beslemeli denetiminin prensip şeması gösterilmiştir. Elektronik denetim şeması; elektronik denetim birimi, bobin denetim birimi ve elektronik sürücü devre olmak üzere üç kısımdan oluşur. Elektronik denetim birimi motor algılayıcılarından gelen sinyallere bağlı olarak supabı gerekli zamanlarda açmak veya kapamak için bobin denetim birimine kumanda sinyali gönderir. Bobin denetim birimi ise kumanda sinyali ve geri besleme sinyaline bağlı olarak supabın konumunu ve/veya hızını denetleme işlevini yürütür. Bobin denetim birimi çıkışı akım sürücü devre (elektronik güç kartı) üzerinden mıknatıs devresi için gerekli olan yüksek elektrik akımını sağlar. Denetim sinyalinin sürücü devredeki anahtarlama elemanını açması ile akım sürücü devrenin besleme gerilimine bağlı olarak bobinden gerekli akım sürülür. Sürücü devrenin temel elemanı yüksek akımlı güç tranzistorleri olup bunların üzerinden geçen akım denetimi darbe genişlik modülasyon sinyali (DGM) ile gerçekleştirilir.



Şekil 3. Elektromekanik supap mekanizması denetim şeması

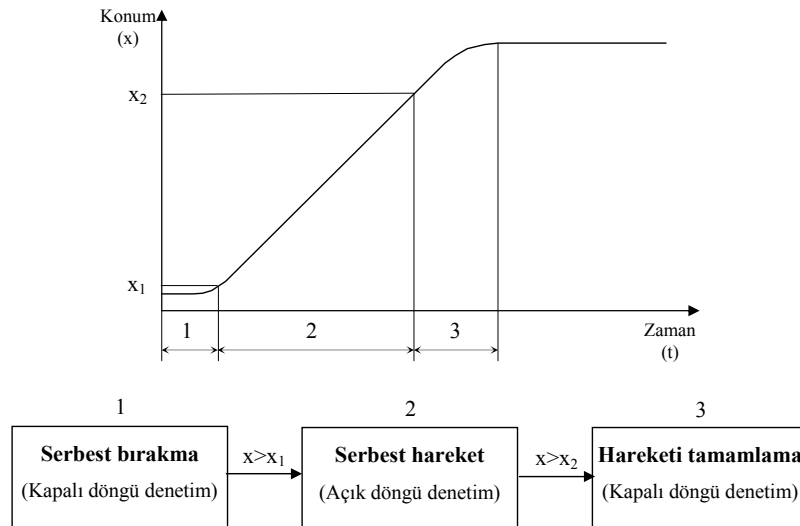
Elektromekanik supap mekanizmalarının yüksek motor hızlarında kullanılabilmesi için açma/kapama süresinin mümkün olduğu kadar kısa olması gerekir. Yüksek cevap hızları sağlamanın bir yolu sistemde sert yay ve buna uygun mıknatıs devresi kullanarak daha yüksek mıknatıs çekim kuvveti elde etmektir. Mıknatıs kuvveti belli bir eşik değerinde yay kuvvetini yendikten sonra supap üzerine etki eden net kuvvet hızlı bir şekilde yükselir. Bu da hareketli eleman ve supabın ani olarak ivmelenmesine ve supabın açılma/kapanma anında yüksek oturma hızları oluşmasına neden olur. Yüksek açma/kapama hızları hareketli eleman ve supabın aşınmasının yanı sıra mekanik gürültü problemlerine de neden olur. Bu nedenlerden dolayı elektromekanik supap mekanizmalarında supabın açılma/kapanma aşaması gerek sistemin en uygun denetimi ve gerekse kararlılığı açısından kritiktir.

Elektromekanik supap mekanizmasının açık döngü çalışmasında, supap belli bir dengeleme konumunu aştığında mıknatıs ve yay kuvveti arasındaki net kuvvet çok hızlı yükselerek hareketli elemanın ve supabın kararsız bölgeden geçmesine neden olur. Bunun temel nedeni ise mıknatıs çekim kuvvetinin akım ve konum değişiminin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olmasına dayanır. Kararsız bölge yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (Peterson, 2005).

$$x_e < \frac{x_h}{3} \quad (9)$$

Bu ifadeden görüldüğü gibi toplam hareket mesafesinin üçte birinden daha küçük tüm hava aralığı mesafelerinde sistemde kararsızlık problemi ortaya çıkmakta ve supap konumunun açık döngü denetimi hemen hemen imkansız hale gelmektedir. Açık döngü denetim teorik olarak yakın bölge kararsızlığını ve oturma hızını iyileştirmek için yeterli gözüksün de pratik uygulamalarda bir takım zorlukların ortaya çıktığı ve sisteme etki eden bozucu girişler ve modelleme hataları nedeniyle açık döngü denetimin tek başına yeterli olmadığı ortaya çıkmakta ve gürbüz bir denetim için kapalı döngü denetim yöntemleri önerilmektedir (Peterson, 2005).

Elektromekanik supap mekanizmalarında ortaya çıkan yakın bölge kararsızlığını gidermek ve yüksek oturma hızlarını en asgari düzeye indirmek için çeşitli çalışmalarda geri beslemeli denetim önerilmektedir (Butzmann vd., 2000; Montanari, vd., 2003; Tai ve Tsao, 2003; Peterson, 2005). Yürütülen çeşitli çalışmalarda elektromekanik supap mekanizmasında üç aşamalı bir denetim planı uygun görülmektedir (Montanari, vd., 2003; Peterson, 2005). Bunlar; hareketli elemanın serbest bırakılması, serbest hareketi ve hareketini tamamlama aşamaları olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Denetim aşamaları

Tutma aralığı mesafesinde kesime sokulan mıknatıs devresinin indüktansı hareket başlama anındaki mıknatısın indüktansına göre çok daha yüksektir. Bu da sistemin elektriksel gecikme

zamanını yükseltir ve kesime sokulan bobinde akımın dolayısıyla da mıknatıs akısının düşüşünü geciktirir. Bu gecikmeyi önlemenin bir yolu geri beslemeli denetim uygulayarak kesime so-



### 3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

#### 3.1. Statik Karakteristikler

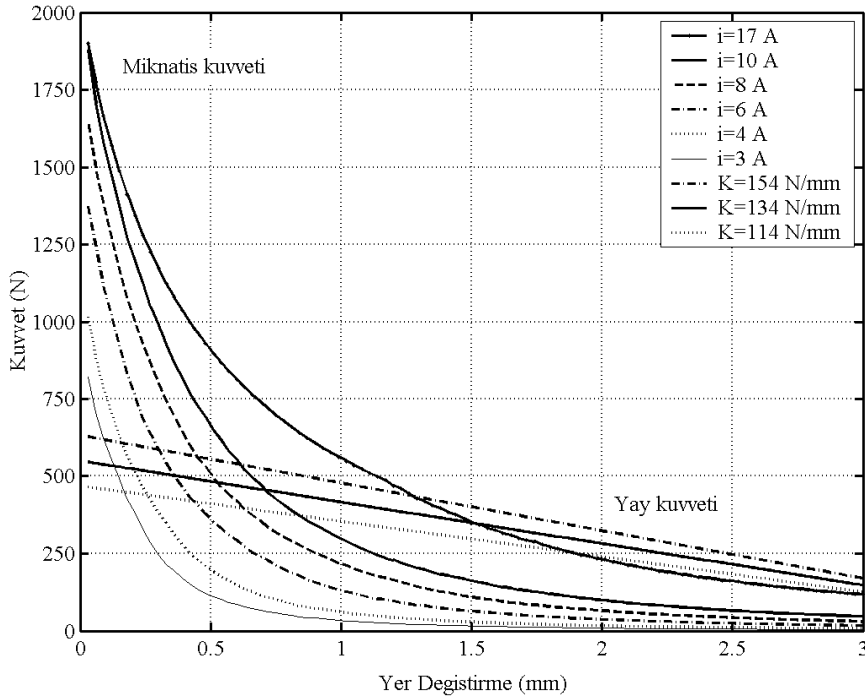
Boyutlandırılması yapılan mıknatıs devrelerinin çeşitli hareket mesafelerinde sağlayacağı çekim kuvvetinin belirlenmesi için mıknatıs devrelerinin farklı akım değerlerine karşılık gelen kuvvet-yer değiştirme karakteristiklerinin bilinmesi gerekir. Bu karakteristik eğrilerden belirli bir akımda belirli bir kuvveti sağlamak için gerekli hava aralığı mesafesi veya tam tersi belirli bir hava aralığı mesafesi için gerekli akımın belirlenmesi mümkündür.

Bu çalışmada mıknatıs devresinin statik karakteristikleri MATLAB ortamında geliştirilen bir program yardımıyla çözülmüştür (Kamış, 2005). Bu program malzemenin mıknatıslanma (B-H) değerlerini kullanarak belli bir akım değerine karşılık gelen çeşitli karakteristik değerleri hesaplar.

Şekil 7' de elektromekanik supap mekanizmasının (ESM) farklı akım değerlerine karşılık gelen kuvvet-yer değiştirme karakteristiklerinin sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüldü

ğü gibi eğrilerin yapısı yaklaşık hiperbolik olup yakın mesafelerde çok yüksek çekim kuvvetleri oluşmasına karşılık görece uzun mesafelerde çekim kuvvetlerinde hızlı bir azalma gözlenmektedir.

Şekilden görüldüğü gibi hareketli eleman sabit kutba doğru yaklaştıkça yay kuvveti doğrusal biçimde artarken mıknatıs kuvveti hava aralığının karesi ile doğrusal olmayan biçimde artmaktadır. Ayrıca mıknatıs kuvveti büyük hava aralığı mesafelerinde yay kuvvetinden daha küçük iken küçük hava aralığı mesafelerinde yay kuvvetinden daha büyüktür. Diğer taraftan mıknatıs çekim kuvveti ancak belli bir mesafeden sonra yay kuvvetini yenebilmektedir. Bu noktaya kadar hareket yayların kütle üzerinde kazandırmış olduğu kinetik enerji yardımıyla sürdürülmektedir. Buna karşılık mıknatıs kuvvetinin yay kuvvetini yendiği noktadan itibaren mıknatıs kuvveti çok hızlı yükselmektedir. Bu da hareketli eleman üzerine etki eden net kuvvetin hızlı bir şekilde yükselmesine neden olmaktadır. Bu da supabın yakın mesafelerde konum denetimini güçleştirmekte ve supabın yüksek hızlarda yuvasına çarpmasına neden olmaktadır. Bu durum yakın bölge kararsızlığı olarak tanımlanmaktadır (Peterson, 2005).

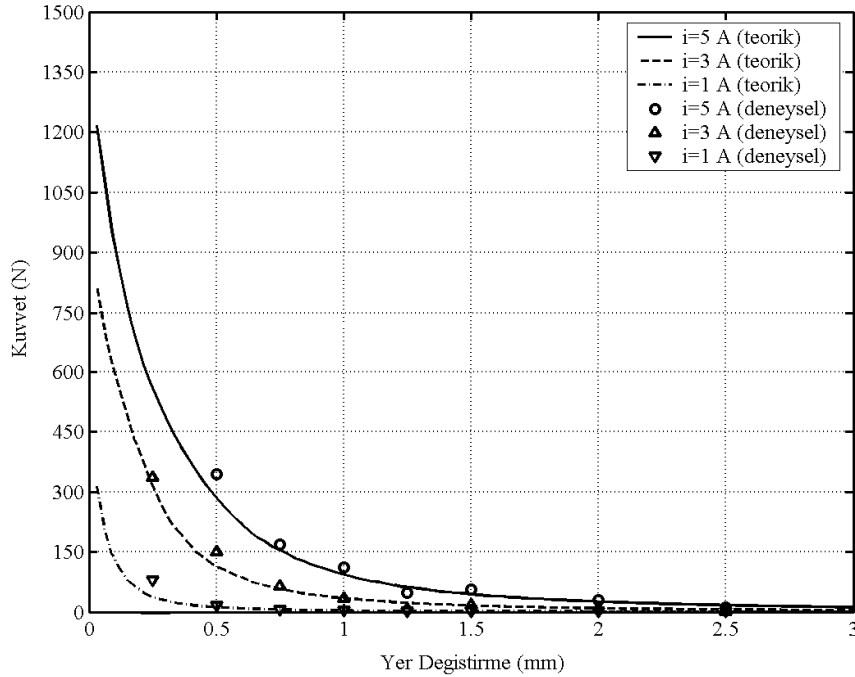


Şekil 7. Kuvvet – yer değiştirme karakteristik eğrileri (teorik)



Şekil 8’ de deneysel olarak elde edilen kuvvet–yer değiştirme karakteristik eğrileri verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi 0.5 mm’ den daha büyük hava aralığı mesafelerinde teorik ve deneysel sonuçlar iyi bir uyum gösterirken daha

küçük hava aralığı mesafelerinde az da olsa sapmalar ortaya çıkmaktadır. Bu sapmalar test düzeneğindeki problemlerin yanı sıra mıknatıs devresinde meydana gelen saçaklanma kayıplarından da kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 8. Kuvvet – yer değiştirme karakteristik eğrileri (deneysel)

### 3.2. Dinamik Karakteristikler

Elektromekanik supap mekanizmasının dinamik karakteristikleri elektrik, mıknatıs ve mekanik alt sistemlerine ait (1)-(8) nolu eşitliklerin uygun bir biçimde düzenlenmesiyle oluşturulan bir Simulink modeli ile elde edilmiştir (Kamış, 2005). Simulink modeli yardımıyla tam bir analitik çözümü bulunmayan bu denklemlerin, malzemenin mıknatıssal doyması ve sızıntı akısı kaçaklarını göz önünde bulundurarak mıknatıs devresine ait mıknatıs geçirgenlik denklemleri ile birlikte ve malzemenin mıknatıslanma eğrisi değerlerini (B-H) bir arada kullanmak suretiyle uygun bir sayısal çözüm elde edilmeye çalışılmıştır.

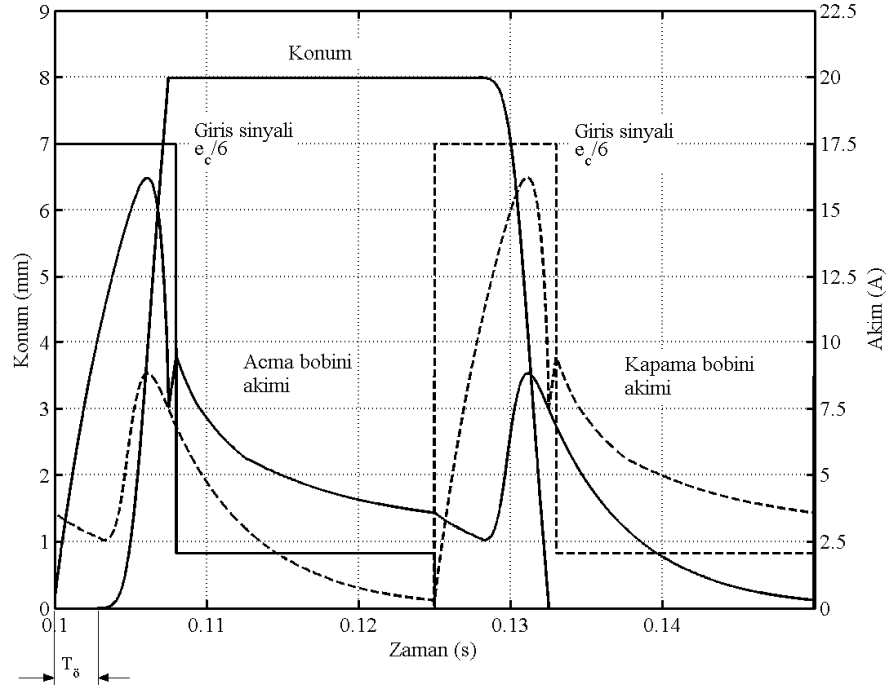
Sistemin dinamik karakteristikleri mıknatıs devresine uygulanan belli bir giriş gerilimine bağlı olarak hareketli eleman konumunun, hızının ve akımın zamana göre değişimi ile belirlenmiştir.

Elektromekanik supap mekanizmasının dinamik davranışını pek çok parametrenin yanında kesime sokulan mıknatıs devresindeki tutma akımı da etkiler. İletimden kesilen mıknatıs devresinde akım düşüşü ansal olmayıp belli bir zaman gecikmesine bağlıdır. Hareket başlangıcında karşı mıknatıs devresinde akım sıfırlanmadığı takdirde yay kuvveti, kalıntı mıknatıs kuvveti ve diğer karşı kuvvetleri yenene kadar supap harekete başlayamaz. Bu nedenle iletimden kesilen bobindeki kalıntı mıknatıs kuvveti hareketi geciktirici yönde etki ederek sistemde ölü zaman gecikmesine ( $T_0$ ) neden olur. Ölü zaman gecikmesi mıknatıs devresinin kesime sokulma anındaki bobin akımı ile artar. Bu durumda supabın toplam hareket zamanı ölü zaman ile hareket zamanının toplamına eşittir.

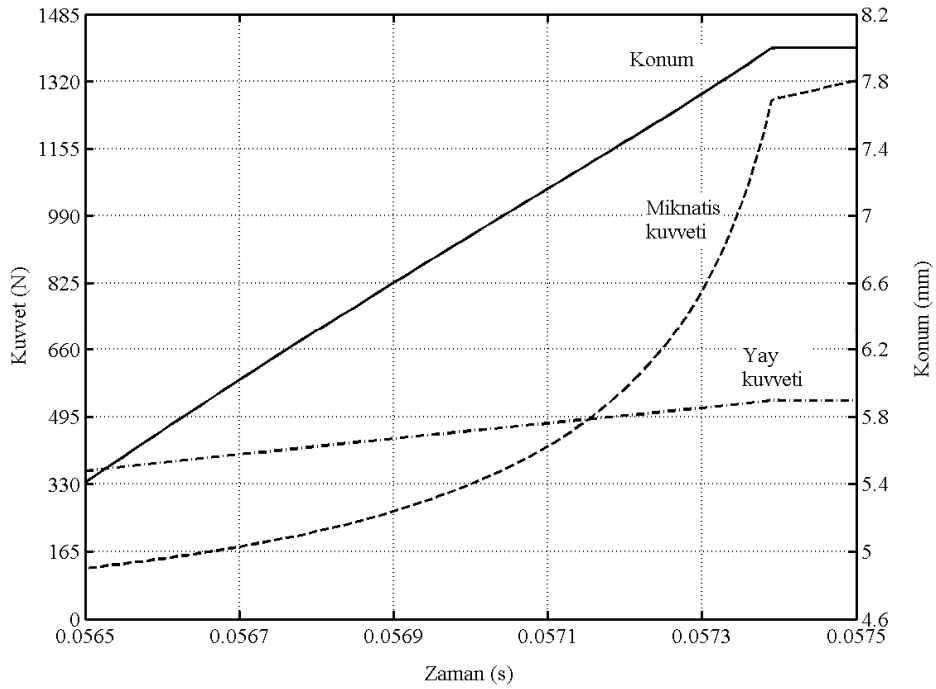
Pratikte elektromıknatısla çalışan sistemlerde ölü zaman gecikmesini azaltmak ve cevap hızını yükseltmek için mıknatıs devresi bobinine iki kademeli sinyal uygulanır (Şekil 9). Bu uygulamada da supabın hareket süresi boyunca

ilgili bobine aşırı yüksek bir giriş sinyali uygulanmış, hareket tamamlandıktan sonra da giriş sinyali yay kuvvetine karşı supabı tutabilecek

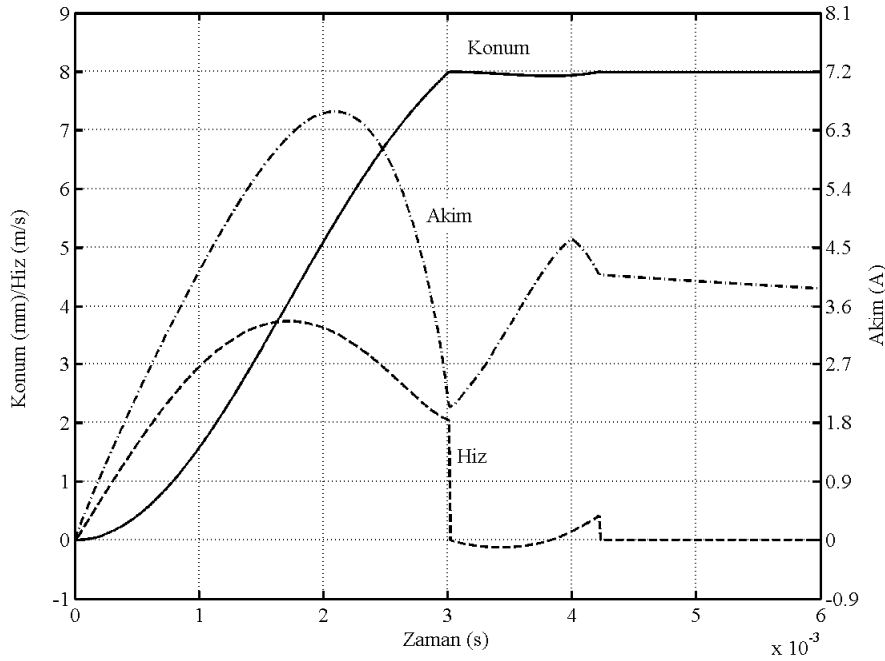
seviyeye düşürülmüştür. Bu şekilde supabın cevap süresi kısalmışken diğer taraftan da elektrik enerjisinden tasarruf sağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 9. Bobine iki kademeli sinyal uygulanması



Şekil 10. Hareket sonunda supaba etki eden kuvvet değişimleri



Şekil 11. Elektromekanik supap mekanizmasının dinamik davranış eğrileri

Şekil 10' da ise normal çalışma koşullarında supabın hareketini tamamlama anındaki kuvvet değişimleri gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi mıknatıs kuvveti hareketin son aşamasında ( $\approx 0.7$  mm) yay kuvvetini yenerek hızlı bir şekilde yükselmektedir. Bu da hareketin tamamlanması anında hızın sıfır olmadığını ve supabın kapanmasının belli bir hızla çarpma biçiminde olduğunu göstermektedir.

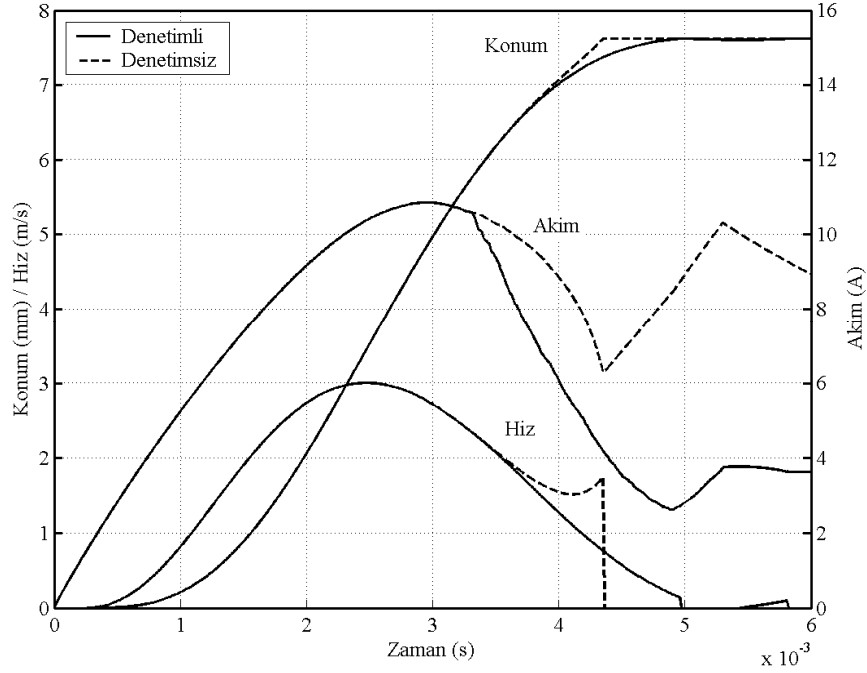
Elektromekanik supap mekanizmasının ideal çalışma durumunda dinamik benzetim sonuçları Şekil 11' de verilmiştir. Bu eğrilerde tutma akımının geciktirici etkisi, silindir içi basıncı, bobinin ısınmasıyla oluşan direnç değişimi ve sürtünme etkisi göz ardı edilerek ideal şartlar için sistemin uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Tasarlanan sistemin benzetim sonuçları geleceğin otomobil teknolojisi göz önünde bulundurularak hareket süresince 42 V' luk giriş gerilimi uygulanmasıyla ve hareket tamamlandıktan sonra bu gerilim değerinin 5 V' a düşürülmesiyle elde edilmiştir. Benzetim sonuçları imalatı gerçekleştirilen yaylar göz önünde bulundurularak 134 N/mm' lik bileşke yay sabiti için elde edilmiştir.

Şekil 11' den görüldüğü gibi hareketli elemanın konum değişimi sürekli artış biçiminde

olurken hız değişimi belli bir maksimumdan sonra yavaşlayarak azalmaktadır. Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde supabın hareketini yaklaşık 3 ms' de 2.04 m/s' lik bir hızla çok küçük bir sıçrama hareketi yaparak tamamladığı görülür.

Elektromekanik supap mekanizmasının dinamik davranış özelliklerini ayrıca akım eğrisinden de izlemek mümkündür. Şekil 12' den görüldüğü gibi akım değişimi başlangıçta sürekli artış biçiminde ortaya çıkmakta ve belli bir noktada maksimum yaptıktan sonra azalma yönünde değişim göstermektedir. Belli bir noktada minimum değere ulaştıktan sonra tekrar yükselmeye başlayarak nihai değerine ulaşmaktadır. Akım değişimindeki bu karakteristik yapı hareketli elemanın hareketine bağlı olarak hava aralığının küçülmesiyle indüktans değerinin artmasından kaynaklanmaktadır. 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 sistemde karşılıklı etkileşimin bir sonucudur. Akım eğrisinin minimum yaptığı nokta hareketli elemanın hareketini tamamladığı yer olup bu şekilde akım eğrisi üzerinden supabın açılıp-kapanma zamanını tespit etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 12. Açık döngü denetim (rasgele sinyal)

### 3.3. Oturma Hızı Denetimi

Tasarlanan sistemde bobin akımının anahtarlanması ile oturma hızının düşürülebileceğini göstermek amacıyla elektromekanik supap mekanizmasının denetimi gerçek çalışma durumu referans alınarak teorik olarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin denetimi açık döngü ve kapalı döngü olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Mıknatis devresi bobinine pozitif ve negatif değerler arasında değişen maksimum değeri  $\pm 42$  V olan kare dalga ve sinüs sinyali ile rasgele sinyal gönderilerek sistem açık döngü olarak denetlenmiş ve oturma hızı kabul edilebilir değerlere düşürülmüştür. Bu uygulamada en iyi sonuç bobine rasgele giriş sinyali uygulanarak elde edilmiştir (Şekil 12). Tablo 1’ de ise rasgele sinyal ve diğer giriş sinyallerinde elde edilen oturma hızı değerleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Giriş sinyali biçimine göre supabın oturma hızı

Sinyal Biçimi	Oturma Hızı (m/s)
Kare	0.17
Sinüs	0.13
Rasgele	0.12

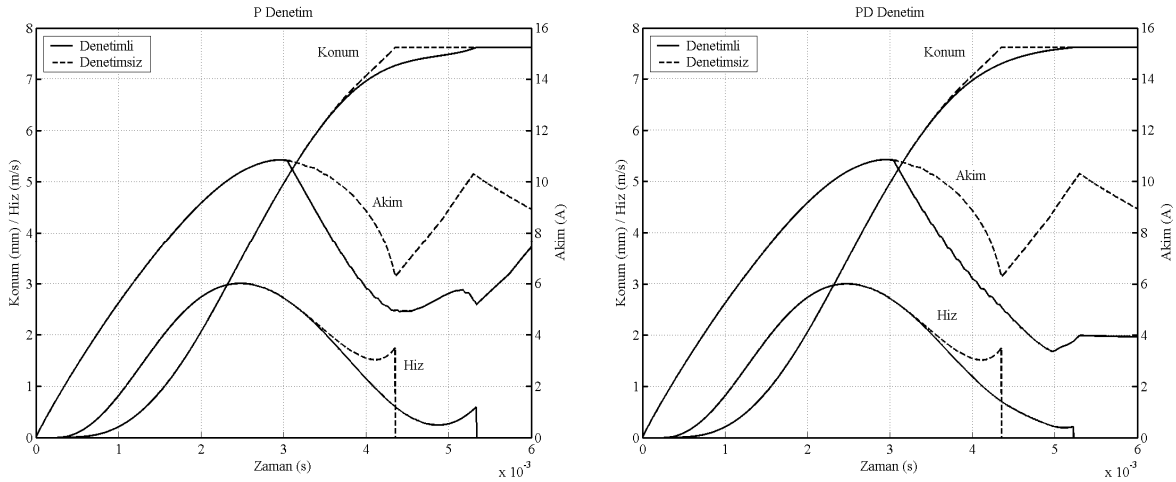
Sistemin kapalı döngü denetimi üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiş ve referans olarak belirlenen bir konum eğrisi ile çıkış konumu karşılaştırılmış üretilen hata sinyaline bağlı olarak P ve PD etki ile denetim sinyali oluşturulmuştur. Bu denetim sinyali yardımı ile de 8 kHz’ lik DGM sinyali elde edilerek bobin akımı anahtarlanmıştır. Bu uygulamada türev etki farklı bir amaç için kullanılmış olup hatanın türevi alınarak daha küçük orantı kazancında DGM sinyalinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bobin akımının bu şekilde anahtarlanması ile oturma hızı teorik olarak önemli oranda azaltılmıştır. P ve PD etki için model sonucu Şekil 13’ te verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi P etkide oturma hızı yaklaşık olarak 0.57 m/s’ ye, PD etkide ise 0.2 m/s’ ye kadar azaltılmıştır.

Açık döngü ve kapalı döngü denetim için elde edilen eğrilerden görüldüğü gibi oturma hızının azaltılması hareket süresini belli oranda arttırmaktadır.

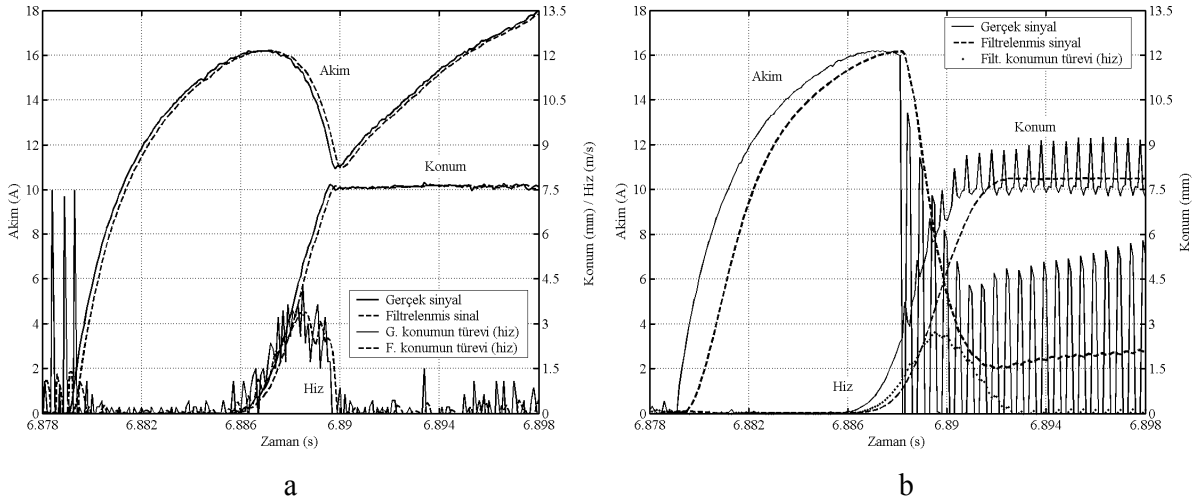
Şekil 14’ te ise sistemin normal çalışma (a) ve akımın anahtarlanması (b) durumunda deneysel olarak elde edilen denetim sonucu verilmiştir. Şekil 14 a’ dan görüldüğü gibi normal çalışmada hız kestiriminden hareketin yaklaşık olarak 2 m/s’ lik bir hızla tamamlandığı görülmüştür.

Şekil 14 b' de ise bobin akımı hareket sonunda 8 kHz ve % 50 doluluk oranındaki DGM sinyali ile anahtarlanarak oturma hızı azaltılmaya çalışılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi akımın anahtarlanması ile hareket sonunda konum eğrisinde

yumuşak bir geçiş olmakta ve supabın hareketi kam profiline yaklaşmaktadır. Bu da hareket sonunda hızın azaltıldığına bir göstergesidir. Bu durumda oturma hızı hız kestiriminden yaklaşık olarak 0.24 m/s olarak tespit edilmiştir.



Şekil 13. Kapalı döngü denetim (teorik)



Şekil 14. Açık döngü denetim (deneysel)

Şekil 12 ve 14' te zaman eksenine açısından bir farklılık görülmektedir. Bu durum deneysel sonuçların supabın sürekli çalışması sırasında herhangi bir zaman aralığı için elde edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4. SONUÇ

Disk tipi mıknatıs devresi kullanılarak tasarlanan elektromekanik supap mekanizmasının

matematik modelinin denklemleri ayrıntılı olarak çıkarılmış ve bu matematik modellerin benzetimi yapılmıştır. Statik ve dinamik karakteristikler için benzetim sonuçları elde edilmiştir. Statik karakteristikler deneysel olarak da elde edilmiş ve benzetim sonuçları ile iyi bir uyum gösterdiği tespit edilmiştir.

Elektromekanik supap mekanizmasının en kritik problemi olan oturma hızı denetimi teorik

olarak ele alınmıştır. Bu durumda kapalı döngü denetimde PD etki ve DGM tekniği ile oturma hızı 0.21 m/s' ye kadar düşürülebilmektedir. Deneysel çalışmalarda oturma hızının akımın anaharlanması ile azaltılabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada elektromekanik supap mekanizmaları için tasarlanan modelin gerek kuramsal gerekse deneysel olarak elektromekanik supap mekanizmalarında uygulanabilirliği ortaya konmuştur. Supabın oturma hızı azaltıldığında ve uygun imalat koşulları altında gerçekleştirildiğinde otomobil motorlarında uygulanabilir yapıda olduğu gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Butzmann, S., Melbert, J. ve Koch, A. (2000). Sensorless control of electromagnetic actuators for variable valve train. variable valve actuation. SAE. 2000-01-1225, 65-70.
- Chang W.S., Parlikar, T.A., Seman, M.D., Perreault, D.J., Kassakian, J.G. ve Keim, T.A. (2002). A new electromagnetic valve actuator. Power Electronics in Transportation, 109-118.
- Chladny R.R., Koch, C.R. ve Lynch, A.F. (2005). Modeling automotive gas-exchange solenoid valve actuators. *IEEE Transactions on Magnetics* 41 (3), 1155-1162.
- Clark, R.E., Jewell, G.W., Forrest, S.J., Rens, J. ve Maerky, C. (2005). Design features for enhancing the performance of electromagnetic valve actuation systems. *IEEE Transactions on Magnetics* 41 (3), 1163-1168.
- Eyabi, P.B. (2003). Modeling and sensorless control of solenoidal actuators. PhD Thesis, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Giglio, V., Iorio, B., Police, G. ve Gaeta, A. (2002). Analysis of advantages and of problems of electromechanical valve actuators. Variable Valve Actuation, SAE 2002-01-1105.
- [http://www.fev.com/f\\_index.html](http://www.fev.com/f_index.html)  
(Electromechanical valve control)
- Kamış, Z. ve Yüksel, İ. (2003). Elektromekanik supap mekanizması tasarımı ve tasarıma etki eden parametrelerin araştırılması. *Mühendis ve Makine* 44 (523), 14-27.
- Kamış, Z. ve Yüksel, İ. (2004a). An investigation of effect of applied electrical voltage on system dynamic behavior and energy consumption of an electromechanical valve actuator. *G. U. Journal of Science* 17 (3), 161-177.
- Kamış, Z. ve Yüksel, İ. (2004b). Elektromekanik supap mekanizmaları için farklı tasarım yapılarının incelenmesi. *OTEKON'04*, 21-23 Haziran 2004, Bursa. ss. 359-368.
- Kamış, Z. ve Yüksel, İ. (2004c). Elektromekanik supap mekanizmalarında tasarım parametrelerinin incelenmesi. *U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 9 (2), 45-58.
- Kamış, Z. ve Yüksel, İ. (2005a). Elektromekanik supap mekanizmalarının teorik ve deneysel olarak incelenmesi. *TOK' 05*, 2-3 Haziran 2005, İTÜ, İstanbul. ss. 411-416.
- Kamış, Z. ve Yüksel, İ. (2005b). Yay enerjisinin elektromekanik supap mekanizmalarının performansına katkısı. *Mühendis ve Makine*, 46 (543) 39-50.
- Kamış, Z. (2005). Supaplar için elektromekanik eyleyici tasarımı ve denetiminin araştırılması. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Montanari, M., Ronchi, F. ve Rossi, C. (2003). Trajectory generation for camless internal combustion engine valve control. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 9-12 June 2003, Brazil. ss. 454-459.
- Nitu, C., Gramescu, B. ve Nitu, S. (2005). Application of electromagnetic actuators to a variable distribution system for automobile engines. *Journal of Materials Processing Technology* 161, 253-257.
- Park, S.H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D., Park, K. ve Cho, Y. (2001). A developing process of newly developed electromagnetic valve actuator - effect of design and operating parameters. SAE, 02FFL-93.

- Park, S.H., Lee, J., Yoo, J. ve Kim, D. (2003a). A study on the design of electromagnetic valve actuator for VVT engine. *KSME International Journal* 17, 357-369.
- Park, S.H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D. ve Park, K. (2003b). Effects of design and operating parameters on the static and dynamic performance of an electromagnetic valve actuator. *Journal of Automobile Engineering* 217, 193-201.
- Peterson, K.S. (2005). Control methodologies for fast & low impact electromagnetic actuators for engine valves. PhD Thesis, The University of Michigan, USA.
- Pischinger, M., Salber, W., Staay, F.V.D., Baumgarten, H. ve Kemper, H. (2000). Benefits of the electromechanical valve train in vehicle operation. *Variable Valve Actuation* 43-53.
- Roters, H.C. (1941). Electromagnetic devices. John Wiley, USA.
- Stubbs, A. (2000). Modeling and controller design of an electromagnetic engine valve. M.Sc. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign.
- Tai, C. ve Tsao, T.C. (2003). Control of electromechanical actuator for camless engines. Proceedings of the American control Conference, 4, 3113-3118.
- Wang, Y., Stefanopoulou, A., Haghgoie, M., Kolmanovsky, I. ve Hammoud, M. (2000). Modeling of an electromechanical valve actuator for a camless engine. *Proceedings AVEC, 5 th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control*, 93.
- Wang Y., Megli T. ve Haghgoie, M. (2002) Modeling and control of electromechanical valve actuator. *Variable Valve Actuation*, SAE. 2002-01-1106.
- Xiang, J.Y. (2002). Modeling and control of a linear electro-mechanical actuator (LEMA) for operating engine valves. IEEE, 1943-1948.



**Zeliha KAMIŞ**, Yüksek Lisans ve doktorasını 2001 ve 2005 yıllarında U. Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümü'nde tamamlamıştır. 2006 yılından itibaren aynı bölümde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Otomatik Kontrol ve Sistem Dinamiği konularında çeşitli dersler ve araştırma çalışmaları yürütmektedir. Ulusal ve uluslar arası alanda yayınlanmış çeşitli makaleleri mevcuttur.



**İbrahim YÜKSEL**, Doktorasını University of Surrey İngiltere' de tamamladıktan sonra, 1982 yılından bu yana U. Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine, Tekstil, Elektronik, Endüstri Mühendisliği bölümlerinde Otomatik Kontrol ve Sistem Dinamiği konularında Lisans ve Yüksek Lisans seviyelerinde çeşitli dersler ve araştırma çalışmaları yürütmüş ve yürütmektedir. Dokuz yıldan fazla dekan yardımcılığı, üç yıldan fazla dekanlık yapmış, çeşitli yönetim kurulu üyeliklerinde bulunmuş ve şu anda TOK yönetim kurulu üyesidir. Ulusal ve uluslar arası alanda yayınlanmış çeşitli makaleleri mevcuttur. Ayrıca Nobel Yayın Dağıtım tarafından yayınlanmış, Otomatik Kontrol, Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri; MATLAB ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü ve yine aynı yayınevinde dağıtımı yapılan Otomatik Kontrol Problemleri (Öğr. Gör. Dr. Mesut ŞENGİRİN ve Öğr. Gör. Dr. Gürsel ŞEFKAT ile birlikte) isimli ders kitapları vardır.