



## Modeling and analysis of an electro-pneumatic brake valve with on-off type solenoid driven by PWM technique

Elif Erzan Topçu<sup>1\*</sup>, Ersel Bali<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bursa Uludağ University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, 16059, Bursa, Turkey

<sup>2</sup>Amasya University, Taşova Yüksek Akademi, 05800, Amasya, Turkey

### Highlights:

- Analysis of an electro-pneumatic brake system with on-off valve driven by PWM technique
- Modeling by finite element and model based design methods
- Obtaining proportional output from on-off solenoid valve

### Keywords:

- Electro-pneumatic brake valve
- PWM driven on-off solenoid
- Finite element analysis
- Model based design
- System modeling and analysis

### Graphical/Tabular Abstract

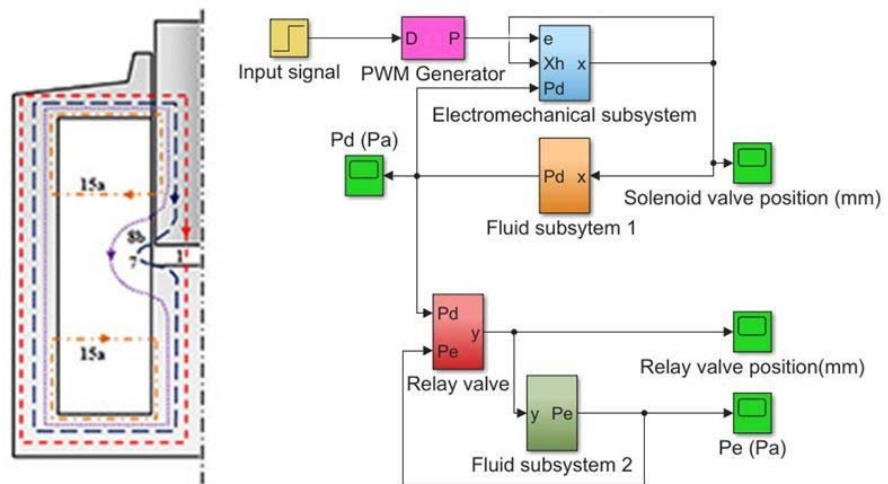


Figure A. The flux path of the on-off type solenoid, the model of the electro-pneumatic brake valve

### Article Info:

Research Article  
Received: 26.04.2019  
Accepted: 06.02.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.558356

### Correspondence:

Author: Elif Erzan Topçu  
e-mail: erzant@uludag.edu.tr  
phone: +90 224 294 1990

**Purpose:** Investigation using of on-off type solenoid driven by PWM technique instead of proportional solenoid in an electro-pneumatic brake valve system.

### Theory and Methods:

Based on the present operating conditions of the system, the dynamic characteristics of the designed on-off type solenoid valve are obtained by using finite elements by ANSYS/Maxwell and model based design methods by MATLAB/ Simulink. The results obtained from both methods are consistent with each other. Electro-pneumatic brake valve system is driven by DGM technique and the proportional working behavior of the system is investigated by working with model based design method.

### Results:

Dynamic behavior and PWM characteristics of an electro-pneumatic brake valve system for different operating conditions are presented with using finite element and model based design methods.

### Conclusion:

It has been seen that proportional output can be obtained from electro-pneumatic brake valve outlet by using on-off type solenoid driven by PWM signals according to the frequencies determined by considering opening and closing times of the solenoid valve.



## DGM tekniği ile sürülen aç-kapa tipi solenoid yapıları elektro-pnömatik fren valfinin modellenmesi ve analizi

Elif Erzan Topçu<sup>1\*</sup>, Ersel Bali<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Amasya Üniversitesi, Taşova Yüksel Akın Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 05800, Amasya, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- DGM tekniği ile sürülen aç-kapa solenoidli elektro-pnömatik fren valfinin analizi
- Sonlu elemanlar ve model tabanlı tasarım yöntemleriyle modelleme
- Aç-kapa tipi solenoid valften oransal çıkış eldesi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 26.04.2019  
Kabul: 06.02.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.558356

### Anahtar Kelimeler:

Elektro-pnömatik fren valfi,  
DGM sürümlü aç-kapa tipi  
solenoid,  
sonlu elemanlar analizi,  
model tabanlı tasarım,  
sistem modelleme ve analiz

### ÖZ

Elektro-pnömatik fren valf sistemlerinde kullanılan oransal solenoidler ile belli bir çalışma bölgesinde akışın oransallığı sağlanabilmektedir. Akışkan güç sistemleriyle ilgili uygulamalarda bu valflere göre daha basit yapıları, ucuz ve üretimi kolay olan aç-kapa tipi solenoid yapıları valflerin Darbe Genişlik Modülasyon (DGM) tekniği gibi yöntemlerle sürülmesiyle de oransal çıkış elde edilebilmektedir. Bu çalışmada elektro-pnömatik fren valfinde kullanılan oransal solenoid yerine aç-kapa tipi solenoid yapısının kullanılabilirliği teorik olarak incelenmiştir. Tasarlanan solenoidin dinamik karakteristikleri sonlu elemanlar ve model tabanlı tasarım yöntemleri kullanılarak modellenmiş ve her iki yöntemle elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Aç-kapa tipi solenoidin kullanıldığı elektro-pnömatik fren valfi MATLAB/Simulink ortamında model tabanlı tasarım yöntemiyle modellenmiştir. Solenoidin açma, kapama zamanları dikkate alınarak belirlenen çeşitli frekanslarda DGM tekniği uygulanmış ve sistemin oransal çalışma davranışı incelenmiştir. Tasarlanan yapının DGM sinyaliyle sürülmesi sonucunda elektro-pnömatik fren valfi çıkışından oransal çıkış elde edilebildiği görülmüştür.

## Modeling and analysis of an electro-pneumatic brake valve with on-off type solenoid driven by PWM technique

### HIGHLIGHTS

- Analysis of the electro-pneumatic brake valve with on-off valve driven by PWM technique
- Modeling by finite element and model-based design methods
- Obtaining proportional output from on-off solenoid valve

### Article Info

Research Article  
Received: 26.04.2019  
Accepted: 06.02.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.558356

### Keywords:

Electro-pneumatic brake  
valve,  
PWM driven on-off type  
solenoid,  
finite element analysis,  
model-based design,  
system modeling and  
analysis

### ABSTRACT

In an electro-pneumatic brake valve system, the proportional flow can be provided with the proportional solenoid in a certain working area. In applications related to fluid power systems, the proportional output can also be obtained by using on-off type solenoid driven with methods such as Pulse Width Modulation (PWM) technique. In this study, the usability of the on-off type solenoid structure instead of the proportional solenoid in the electro-pneumatic brake valve was theoretically investigated. The dynamic characteristics of the designed solenoid have been modeled using finite elements and model-based design methods, and the results obtained with both methods have been found to be compatible with each other. The electro-pneumatic brake valve using an on-off type solenoid was modeled by a model-based design method in MATLAB/Simulink environment. PWM technique was applied at various frequencies determined by considering the opening and closing times of the solenoid and the proportional operating behavior of the system was examined. As a result of driving the designed structure with the PWM signal, it was seen that proportional output can be obtained from the electro-pneumatic brake valve output.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Taşıtlarda frenleme işlemi mekanik, hidrolik, pnömatik veya elektrikli sistemlerle sağlanabilmektedir. Kamyon, traktör römorkları, otobüs vb. ağır vasıta araçlarının pek çoğu pnömatik fren sistemlerine sahiptir [1-3]. Bu sistemler oldukça karmaşık yapıya sahiptir ve yapılarında birincil, ikincil ve park freni olmak üzere üç farklı frenleme sistemi bulunmaktadır [4]. Tipik bir pnömatik fren sistemi kompresör, birincil ve ikincil tank, ayak pedalı, fren odacıkları, ABS modülatör ünitesi, valfler ve bağlantı hatlarından meydana gelmektedir [5, 6].

Günümüzde gelişmiş bir ABS olarak tanımlanabilecek elektronik kontrollü fren sistemi (EBS) ticari araçlar için standart güvenlik ekipmanı olarak alternatif hale gelmiştir. EBS; yük sensörü, fren valfi sensörü ve haznenin basınç sensörü vb. ekipmanları bünyesinde barındırmaktadır [7]. 1990'lı yıllarda geliştirilen bu sistemle sürücünün frene basmasıyla gönderdiği sinyal, elektriksel sinyallerle fren sisteminin ilgili bileşenlerine iletilmektedir. Bu sistem ile frenleme süresi kısaltılmakta ve duyarlılık artırılmaktadır [8]. Bu sistemlerde ön aks, arka aks ve treyler kontrol kısımları için hesaplanan nominal basınç değerlerine göre basınç ayarlaması yapılmakta ve fren silindrielerindeki gerekli basınç ayarlanmaktadır. Elektronik kontrol biriminden gelen kumanda sinyali ile hava akışını ayarlayan elektro-pnömatik valflerde daha çok oransal yapıları solenoidler kullanılmaktadır. Bu valflerdeki akım kontrol edilerek basınç kontrol karakteristikleri iyileştirilmektedir [9, 10]. Bu valfler tasarımları itibariyle giriş sinyaline karşılık belli bir çalışma bölgesinde oransal çıkış sinyali üretmektedir. Pnömatik kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan diğer bir solenoid valf yapısı da aç-kapa tipindeki solenoid valflerdir. Bu valfler yapıları itibariyle basit, üretimi kolay ve maliyeti düşük valflerdir. Aç-kapa tipi solenoid valflerin kısmi olarak oransal çalıştırılabilmesi amacıyla Darbe Genişlik Modülasyon (DGM) tekniği gibi tekniklerden faydalanılmaktadır [11].

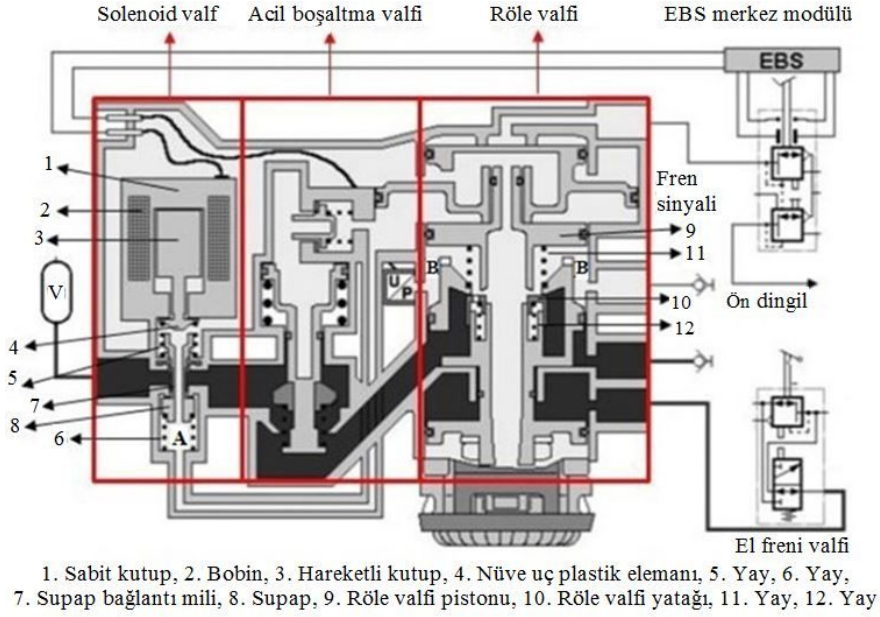
Pnömatik fren sistemleri, EBS, fren sistemlerindeki valflerle ilgili olarak matematiksel modelleme, ürün geliştirme, sistem kontrolü ve dinamik davranışının iyileştirilmesi konularında yıllardır pek çok araştırma yapılmaktadır. Çalışma konusu ile ilgili olarak literatürdeki çalışmalara bakıldığında Han vd. [1] EBS sisteminde kullanılan oransal röle valfinin statik, dinamik ve histerezis karakteristiklerinin benzetimini incelemiştir. Patil vd. [2] pnömatik fren sisteminin dinamik performansını optimize etmek üzere sistemin matematiksel modelinin AMESim programıyla elde edilmesi üzerine çalışmışlardır. Kaminski [3] traktörlerde bulunan fren sistemini ve treyler kontrol valfinin modellenmesini incelemiştir. Acarman vd. [5] ağır vasıta taşıtlarının pek çoğunda bulunan pnömatik fren sistemindeki hava akışının dinamiğini incelemişler ve deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır. Mithun vd. [6] AMESim ortamında 4x2 tipi ağır bir ticari aracın pnömatik fren sistemini modellemişlerdir. Weigiang vd. [7] ve Han vd. [8] ticari taşıtların elektro-pnömatik fren sistemini donanım içi benzetim testleriyle incelemiştir. Wan vd. [10] oransal

röle valfinin yapısını inceleyerek valfin tepki süresini ve histerezis karakteristiklerini analiz etmişlerdir. Lin vd. [11], Fathi ve Najafi [12], Taghizadeh vd. [13] aç-kapa tipi solenoid valfleri sürmek için DGM tekniğini kullanmışlar ve geliştirdikleri kontrol yöntemiyle sistemin dinamik davranışını iyileştirmişlerdir. Pipan ve Herakovic [14] DGM yöntemiyle kontrol edilen hızlı anahtarlama valfinin akış karakteristiklerini farklı frekans ve darbe genişliklerine göre test etmişlerdir. Düzgün [15] ağır taşıtların elektro-pnömatik fren sistemlerinde kullanılan oransal solenoid valfin tasarımı ve prototip imalatı üzerine çalışmıştır. Meng vd. [16] ağır vasıta taşıtların aktif süspansiyon sistemlerinde kullanılan oransal solenoid valflerin optimizasyonunu incelemiştir. Yun vd. [17] basınç kontrol valflerinde kullanılan elektromanyetik oransal solenoid eyleyicinin statik karakteristiklerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler ve elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Wang vd. [18] çok akslı ağır taşıtın bir acil durum davranışında pnömatik fren sistemlerinin histerezis karakteristiklerini deneysel yöntemlerle incelemiştir. He ve Xu [19] havalı fren sistemine sahip yarı-römork sisteminin cevap hızını sisteme ilave ettikleri iki adet aç-kapa tipi solenoid valfi DGM tekniği ile sürerek ve basıncı PID tipi denetim algoritma kullanarak iyileştirmişlerdir. Gülyüz ve Başer [20] 4x7 ağır hizmet araçları için pnömatik fren sistemi tepki süresini teorik ve deneysel çalışmalarla incelemiştir. Bali [21] elektro-pnömatik fren valfinin solenoid valf kısmını ve röle valfi kısmını modellemiş, sonlu elemanlar modeli ve MATLAB/Simulink modelleme yöntemlerini kullanarak analiz etmiştir. Bali ve Erzan Topçu [22] elektro-pnömatik fren valfi için aç-kapa tipi solenoid tasarımını araştırmışlar ve valfin statik karakteristiklerini ANSYS/Maxwell sonlu elemanlar programında incelemiştir. Elektromekanik sistemlerin tasarımında ve manyetik analizlerin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmesinde çalışmada kullanılan programın [23, 24] yanı sıra ANSYS Electronics Desktop, JMAG-Designer vb. pek çok paket programın da kullanıldığı görülmüştür [25-27].

Bu çalışmada elektro-pnömatik fren valfi sisteminde oransal solenoid yerine aç-kapa tipi solenoid yapısının kullanılabilirliği teorik olarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk kısmında aç-kapa tipi solenoidin dinamik karakteristikleri ANSYS/Maxwell ve MATLAB/Simulink programları kullanılarak elde edilmiştir. Her iki programdan elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görüldükten sonra elektro-pnömatik fren valfi sistemi modellenmiş ve valf DGM sinyali ile sürülerek sistemin oransal çıkış karakteristikleri incelenmiştir. Valfin açma ve kapama davranışına göre belirlenen frekanslarda oransal çıkış elde edilebildiği tespit edilmiştir.

## 2. ELEKTRO-PNÖMATİK FREN VALFİNİN YAPISI (STRUCTURE OF AN ELECTRO-PNEUMATIC BRAKE VALVE)

Elektro-pnömatik fren sistemlerinde akışın kontrolü genellikle oransal solenoid yapıları valflerle beraber çalışan valf grupları ile sağlanmaktadır. Bu valf sistemlerinin temel elemanları solenoid valf ve röle valfi kısımlarıdır. Şekil 1'de



Şekil 1. Elektro-pnömatik fren valfinin elemanları [9] (Elements of an electro-pneumatic brake valve)

bu çalışmada incelenen valfin şematik gösterimi sunulmuştur. Bu valf temel olarak solenoid valf, acil boşaltma valfi, röle valfi ve basınç algılayıcısı kısımlarından oluşmaktadır. Solenoid valf kısmı temel olarak sabit kutup, hareketli kutup, bobin, nüve uç plastik elemanı, supap, supap bağlantı milini ve yay elemanlarından; röle valfi kısmı ise röle valfi pistonu, röle valfi yatağı ve yay elemanlarından oluşmaktadır. Elektrik enerjisini öteleme hareketine dönüştüren solenoid devresi, sabit ve hareketli olmak üzere iki kutuptan oluşmaktadır. Bobine elektrik gerilimi uygulanması sonucu oluşan manyetik kuvvet, hareketli kutbu sabit kutba çekerek valfin açılmasını sağlamaktadır. Elektrik gerilimi kesildiğinde yay, hareketli kutbu sabit kutuptan uzaklaştırmakta ve valf kapanmaktadır.

Mevcut halde elektro-pnömatik fren valfinin solenoid valf kısmında kullanılan yapı oransal solenoid tipindedir. Bu çalışmada oransal solenoid yerine aç-kapa tipi solenoid yapısının kullanılabilirliği teorik olarak incelenmiştir. Aç-kapa tipi solenoidden oransal çıkış elde etmek için DGM tekniği kullanılmıştır. Mevcut valf sisteminin çalışma durumu dikkate alınarak tasarlanan, düz yüzü piston tipi geometriye sahip aç-kapa tipi solenoidin yapısı Şekil 2a'da gösterilmiştir. Tasarım için kabul edilen değerler ve tasarlanan solenoidin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

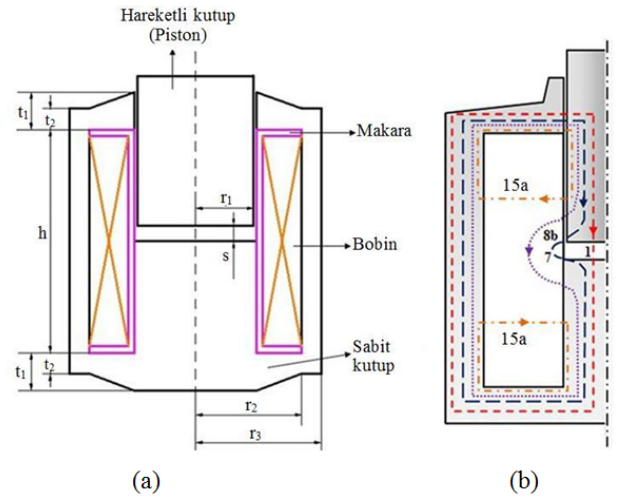
### 3. VALF SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE VALVE SYSTEM)

Valf sistemi alt sistemlere ayrıştırıldığında solenoid valf kısmının elektriksel, manyetik, mekanik ve akışkan alt sistemlerinden; röle valfi kısmının ise mekanik ve akışkan alt sistemlerinden oluştuğu söylenebilir. Şekil 3'te elektro-pnömatik fren valfi sisteminin sinyal akışlarını ve alt sistemlerini gösteren blok şema verilmiştir. Buna göre elektro-pnömatik fren valfi sisteminin matematiksel modeli

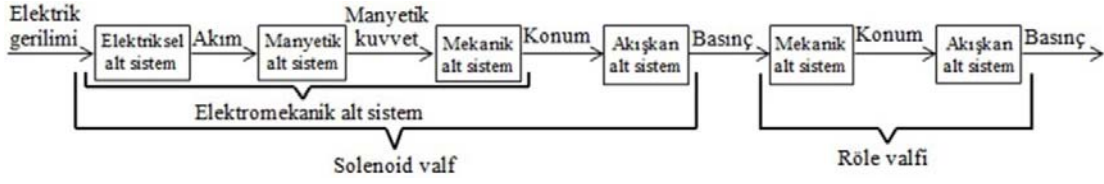
her bir alt sistemin hareket denklemlerinin incelenmesiyle elde edilmiştir.

Tablo 1. Tasarım için kabul edilen değerler ve solenoidin tasarım ölçüleri (Accepted values for the design and the design dimensions of the solenoid)

Kabul edilen değerler		Tasarım ölçüleri	
Parametre	Değeri	Boyut	Değer (mm)
$\theta_f$	80°C	$r_1$	4,65
$q$	0,1	$r_2$	8,23
$\rho$	$2,1184 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	$r_3$	9,73
$f$	0,45	$h$	17,18
$k$	12,09	$t_1$	2,9
$h/(r_2 - r_1)$	4,8	$t_2$	1,64



Şekil 2. a) Düz yüzü piston tipi solenoid geometrisi (Geometry of flat-faced piston type solenoid) b) Mıknatis akı yolları (Flux paths of the magnet)



Şekil 3. Elektro-pnömatik fren valfinin yapısal blok şeması (Structural block diagram of the electro-pneumatic brake valve)

### 3.1. Elektriksel Alt Sistem (Electrical Subsystem)

Elektriksel kısmın esasını teşkil eden bobin, ideal olarak seri bağlı direnç ve indüktans elemanından oluşmaktadır. Bobine elektrik gerilimi uygulandığında oluşan akım değişimi sonucu, devrede bir manyetik akı değişimi meydana gelmektedir. Kirchoff Yasası'na göre bu ifadenin matematiksel bağıntısı Eş. 1 ile verilebilir [28].

$$e(t) = R.i(t) + N \cdot \frac{d\phi(i, x)}{dt} \quad (1)$$

### 3.2. Manyetik Alt Sistem (Magnetic Subsystem)

Manyetik alt sistem; bobin, bobinin içine yerleştirildiği sabit kutup ve hareketli kutuptan oluşmaktadır. Bu çalışmada düz yüzü silindirik pistonlu mıknatis devresi kullanılmıştır. Bu tip mıknatis devresinin akı yolları ve temel boyutları Şekil 2b'de gösterilmiştir. Faydalı akı (1) yolunu, saçak akı (7) ve (8b) yolunu ve kaçak akı (15a) yolunu takip etmektedir. Geçirgenlik değerleri, boyutlara ve hava aralığına bağlı olarak Eş. 2, Eş. 3, Eş. 4 ve Eş. 5 ile ifade edilebilir [28].

(1) yolunun geçirgenliği;

$$P_1 = \frac{\mu \cdot \pi \cdot r_1^2}{s} \quad (2)$$

(7) yolunun geçirgenliği;

$$P_7 = 1,63 \cdot \mu \cdot \left( r_1 + \frac{s}{4} \right) \quad (3)$$

(8b) yolunun geçirgenliği;

$$P_{8b} = 2 \cdot \mu \cdot r_1 \cdot \ln \left[ \frac{4 \cdot (r_2 - r_1)}{\pi \cdot s} \right] \quad (4)$$

(15a) yolunun geçirgenliği;

$$P_{15a} = \mu \cdot \left[ \frac{\pi \cdot h}{8} \cdot \left( \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} \right) - (r_2 + r_1) + \frac{2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{\pi \cdot h} \right] \quad (5)$$

Buradan manyetik akı ve manyetik ohm yasası ile ilgili denklemler kullanılarak hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu ve magnetomotor kuvvet ile ilgili değerler elde

edilebilmektedir. Belli bir kuvvet ve hava aralığında gerekli olan manyetik akıyı sağlayacak magnetomotor kuvveti, havanın ve manyetik malzemenin magnetomotor kuvveti değerlerine Eş. 6 ile ifade edilebilir.

$$N \cdot i = \frac{z \cdot B_g(x, i) \cdot x_i}{\mu} + \sum H_i \cdot l_i \quad (6)$$

Manyetik kuvvet, manyetik akının fonksiyonu olarak Eş. 7'deki denklem yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$F_m = \frac{z}{2} \cdot \frac{\varphi^2}{\mu \cdot A_e} = \frac{z}{2} \cdot \frac{B_g^2 \cdot A_e}{\mu} \quad (7)$$

Manyetik kuvvet, akım ve yer değiştirmenin fonksiyonu olarak da Eş. 8'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot A_e \cdot (N \cdot i)^2}{z \cdot (x_i - x)^2} \quad (8)$$

Elektromanyetik devrelerin hesabı ve dinamik davranışlarının incelenmesi yukarıdaki denklemlerden de görüldüğü gibi oldukça karmaşıktır. Bu nedenle bu denklemlerin çözümü için bilgisayar destekli çözümlerden faydalanılmaktadır. Bunun için farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Manyetik alt sistem geçirgenlik denklemlerini veren karmaşık cebirsel denklemler kullanılarak uygun programların yazılması bu yollardan bir tanesidir [28]. Akım ve hava aralığı değerlerine karşılık manyetik kuvvet ve manyetik akı bağı değerlerinin yer aldığı matrislerin kullanılması da başka bir yöntem olarak gösterilebilir [15]. Sonlu elemanlar yöntemi de elektromekanik sistemlerin karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerden bir tanesidir [15, 17, 21].

### 3.3. Mekanik Alt Sistem (Mechanical Subsystem)

Solenoid valfin mekanik kısmının hareketi iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada manyetik kuvvetin etkisiyle hareketli kutup ve nüve uç plastik elemanı hareket etmekte ve hareketli kutup, supap bağlantı miline temas etmektedir. İkinci aşamada hareketli kutup, nüve uç plastik elemanı, supap bağlantı mili ve supap birlikte hareket etmektedir. Mekanik alt sistemin hareket denklemleri Newton'un II. Hareket Yasası kullanılarak Eş. 9'daki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 m_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} &= F_m - b_1 \cdot \frac{dx}{dt} - k_{y1} \cdot (x_{10n} + x) + m_1 \cdot g - P_A \cdot A_1 \quad 0 \leq x < x^* \\
 (m_1 + m_2) \cdot \frac{d^2x}{dt^2} &= F_m - (b_1 + b_2) \cdot \frac{dx}{dt} - k_{y1} \cdot (x_{10n} + x) \\
 -k_{y2} \cdot (x_{20n} + x - x^*) &+ (m_1 + m_2) \cdot g - P_A \cdot A_1 \quad x^* \leq x \leq x_{max}
 \end{aligned} \quad (9)$$

### 3.4. Akışkan Alt Sistem (Fluid Subsystem)

Solenoid valfin mekanik kısmındaki hareketin ikinci aşamasında besleme hattından röle valfi ile solenoid valf arasındaki hacme (A haznesi) doğru akışkan geçişi başlamaktadır. Hareketin ilk aşamasında ise A haznesinden egzoz tarafına akışkan geçişi olmaktadır. Her iki aşamadaki kütleli debi değişimi Eş. 10 ile verilebilir.

$$\dot{m}_A = \begin{cases} 0 \leq x < x^* \\ 0,0405 \cdot C_d \cdot A_{v1} \cdot \frac{P_A}{\sqrt{T}} \cdot \frac{P_o}{P_A} \leq 0,528 \\ \frac{C_d \cdot A_{v1} \cdot P_A}{\sqrt{T}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \gamma}{R \cdot (\gamma - 1)} \cdot \left[ \left( \frac{P_o}{P_A} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_o}{P_A} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right] \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{P_o}{P_A} > 0,528 \\ x^* \leq x \leq x_{max} \\ 0,0405 \cdot C_d \cdot A_{v2} \cdot \frac{P_g}{\sqrt{T}} \cdot \frac{P_A}{P_g} \leq 0,528 \\ \frac{C_d \cdot A_{v2} \cdot P_g}{\sqrt{T}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \gamma}{R \cdot (\gamma - 1)} \cdot \left[ \left( \frac{P_A}{P_g} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_A}{P_g} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right] \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{P_A}{P_g} > 0,528 \end{cases} \quad (10)$$

Burada etkin akış kesit alanı hareketli kutbun hareketinin fonksiyonu olarak  $A_v = \pi \cdot d \cdot x$  şeklinde hesaplanmaktadır. Sistemin adyabatik olduğu, sistemdeki kinetik ve potansiyel enerjilerin ihmal edildiği kabulüyle kütleli debi, basınç ve hacim arasındaki ilişki Eş. 11 ile elde edilmektedir [29, 30].

$$\frac{dP}{dt} = \gamma \cdot \frac{R \cdot T}{V} \cdot \frac{dm}{dt} - \gamma \cdot \frac{P}{V} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

### 3.5. Röle valfi alt sistemi (Relay valve subsystem)

Röle valfinin hareketi de iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada basınç kuvvetinin etkisiyle röle valfi pistonu hareket etmekte ve röle valfi yatağına temas etmektedir. İkinci aşamada röle valfi pistonu ile röle valfi yatağı birlikte hareket etmektedir. Röle valfinin mekanik alt sisteminin hareket denklemleri Newton'un II. Hareket Yasası kullanılarak Eş. 12'deki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 m_3 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} &= P_A \cdot A_2 - b_3 \cdot \frac{dy}{dt} - k_{y3} \cdot (y_{30n} + y) \\
 + m_3 \cdot g - P_B \cdot A_3 - F_s \cdot \text{sign} \left( \frac{dy}{dt} \right) & \quad 0 \leq y < y^* \\
 (m_3 + m_4) \cdot \frac{d^2y}{dt^2} &= P_A \cdot A_2 - (b_3 + b_4) \cdot \frac{dy}{dt} - k_{y3} \cdot (y_{30n} + y) - P_B \cdot A_3 \\
 -k_{y4} \cdot (y_{40n} + y - y^*) &+ (m_3 + m_4) \cdot g - F_s \cdot \text{sign} \left( \frac{dy}{dt} \right) \quad y^* \leq y \leq y_{max}
 \end{aligned} \quad (12)$$

Röle valfinin mekanik kısmındaki hareketin ikinci aşamasında besleme hattından röle valfinin çıkışındaki çalışma odası haznesine (B haznesi) akışkan geçişi başlamaktadır. Hareketin ilk aşamasında ise B haznesinden egzoz tarafına akışkan geçişi olmaktadır. Her iki aşamadaki kütleli debi değişimi A haznesindeki kütleli debi denklemlerine benzer şekilde tanımlanabilmektedir.

## 4. DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU TEKNİĞİ (PULSE WIDTH MODULATION TECHNIQUE)

DGM tekniği, valf giriş sinyali ile akışkan debisi arasında doğrusal bir bağıntı elde etmek için aç-kapa tipi solenoid valflere uygulanan bir tekniktir [12-14, 29, 31]. İdeal valf anahtarlama şartları altında valf periyodik olarak belirlenen darbe süresinde açılıp kapanacak olursa sistemde hacim artımları elde edilir ve akış salınımlarının ortalama debisi Eş. 13 ile tanımlanabilir.

$$Q_{ort} = Q_n \cdot t_d \cdot f_{dgm} \quad (13)$$

Buna göre darbe süresini veya frekans değerini değiştirerek doğrusal olmayan bir sistemden zaman ortalaması doğrusal bir çıkış elde etmek mümkün olmaktadır. Çıkışta kabul edilebilir sınırlarda doğrusal bağıntı elde edebilmek için DGM frekansının seçiminde bazı parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Valflerin sahip olduğu açma-kapama davranışlarındaki ölü zaman gecikmelerinden ve yay geri dönüşlü solenoidlerde açma ve kapama zamanlarının birbiriyle eş olmaması gibi dinamik davranış özelliklerinden dolayı valflerin gerçek akış karakteristikleri ideal akış karakteristiklerine göre farklılık göstermektedir. Buna göre valfin anahtarlama zamanı, darbe süresi ve DGM periyodu arasındaki ilişki valfin açılma ve kapanma zamanına göre Eş. 14 ile tanımlanabilmektedir.

$$T_{ta} \leq t_d \leq T_{DGM} - T_{tk} \quad (14)$$

DGM tekniğinde herhangi bir darbe süresinin DGM periyoduna oranı modülasyon oranı olarak tanımlanmaktadır. Eş. 14'e bağlı olarak valfin minimum ve maksimum modülasyon oranları Eş. 15' de verilen denklem kullanılarak elde edilebilir.

$$MO_{min} = \frac{T_{ta}}{T_{DGM}} \quad MO_{max} = \frac{T_{DGM} - T_{tk}}{T_{DGM}} \quad (15)$$

Modülasyon frekansının sistem frekansına oranı hafif salınlı hareketlerde 4-5 olduğunda modülasyon işaretinin düşük genlikli yüksek frekans bileşenleri, denetlenen sistem tarafından süzûlebilmektedir [29, 31].

## 5. ELEKTRO-PNÖMATİK FREN VALFİNİN BENZETİMİ (SIMULATION OF ELECTRO-PNEUMATIC BRAKE VALVE)

Çalışmada elektro-pnömatik fren valfi sisteminin modellenmesinde sonlu elemanlar ve model tabanlı tasarım

yöntemleri beraber kullanılmıştır. Sistemin çalışma koşulları dikkate alınarak yapılan solenoid valf boyutlandırma çalışmasından sonra solenoidin tek aşamalı hareketi için statik ve dinamik karakteristikleri ANSYS/Maxwell sonlu elemanlar programında elde edilmiştir. Sistem çalışırken solenoidin hareketli kutbunun hareketi iki aşamada gerçekleşmektedir. Kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile fren valfinin tüm alt sistemlerinin davranışını incelemek mümkün olmadığı için solenoidin elektromekanik kısmının dinamik davranışının incelendiği ön tasarım çalışmalarında bu yöntemden faydalanılmıştır. Ön çalışma olarak elektromekanik sistemin 0,55 mm hava aralığında tek aşamalı hareket koşulunda modellemesi yapılmış, elde edilen sonuçlar MATLAB/Simulink programında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak çalışmanın diğer kısımlarının modelleme kısmına devam edilmiştir.

Şekil 4'te solenoid valfin dinamik davranışının incelenmesi için kurulan ön tasarım ANSYS/Maxwell dış devre modeli ve mesh yapıları gösterilmiştir. Dinamik analiz için sarım sayısı, akım, direnç, indüktans ve gerilim parametreleri tanımlanmış, dış devre oluşturularak modele çağrılmış, hareket parametreleri tanımlanmış ve mesh atamaları yapılmıştır. Program yapısında "adaptif meshing" denilen ağ oluşturma yöntemini kullanmaktadır. Enerji hatasını dikkate alarak yapılan bir adaptif mesh oluşturma işlemidir. Statik analizde elde edilen mesh yapısı dinamik analiz için kullanılmak üzere atanmıştır. Maksimum iterasyon sayısı 20, nonlinear residual değeri  $1.10^{-6}$ , hata yüzdesi % 0,1 olarak alınmış ve kriterlerin sağlandığı duruma ulaşıldığında iterasyonun otomatik olarak durduğu görüldükten sonra parametrik çözüme geçilmiştir. Burada elde edilen yapı dinamik analiz işlemlerinde de kullanılmış ve "Inside Selection-Length Based" seçeneği kullanılarak ağ ataması yapılmıştır.

Şekil 5'te elektro-pnömatik fren valfinin Simulink modeli görülmektedir. Solenoid valf kısmının iki aşamalı hareketi ve sistemin diğer kısımlarının dinamik davranışının modellenmesi ile ilgili çalışmalar ise MATLAB/Simulink programında yapılmıştır. Sistemin DGM sinyali üretimi için kullanılan blok, programın kütüphanesinden seçilmiştir. Solenoidin hareketli kutbunun iki aşamalı hareketini tanımlamak için Eş. 1-7 ve Eş. 9'daki denklemler

kullanılarak valfin solenoid kısmına ait dinamik davranış modeli "Elektromekanik alt sistem" oluşturulmuştur. Elektromekanik alt sistemde hareket başlayana kadar ve hareket tamamlandıktan sonra hız ve ivme değerleri sıfır olmaktadır. Bu durumlar koşul alt modeli olarak dahil edilmiştir. Solenoid valf kısmının akışkan alt sistemine ait "Akışkan alt sistem 1" modeli Eş. 10 ve Eş. 11'deki ifadeler kullanılarak oluşturulmuştur. Röle valfinin alt sistemine ait model "Röle valfi" ve "Akışkan alt sistem" Eş. 10, Eş. 11 ve Eş. 12'nin giriş ve çıkış basınçlarına göre düzenlenmesiyle elde edilmiştir. Alt sistemlerin detayları literatürde yer alan [21] nolu kaynakta verilmektedir. Fren köprüğü [3, 7, 20] numaralı çalışmalarda yapıya benzer olarak Newton'un II. Hareket yasası kullanılarak ve Eş. 11'den yararlanılarak modele dahil edilmiştir.

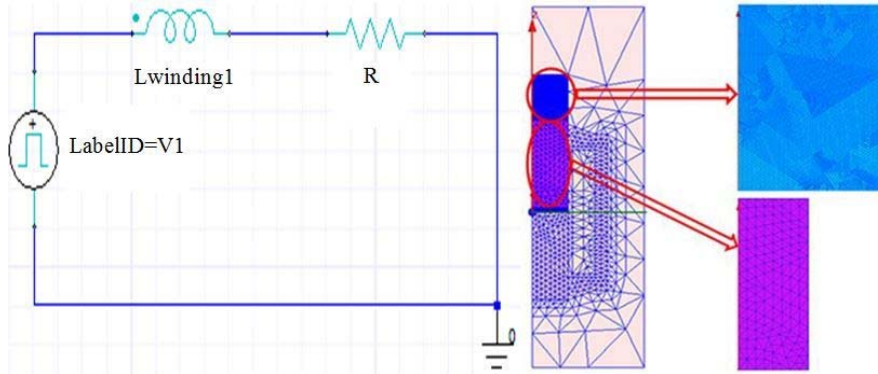
## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

### 6.1. Solenoid Valf Sisteminin Dinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi

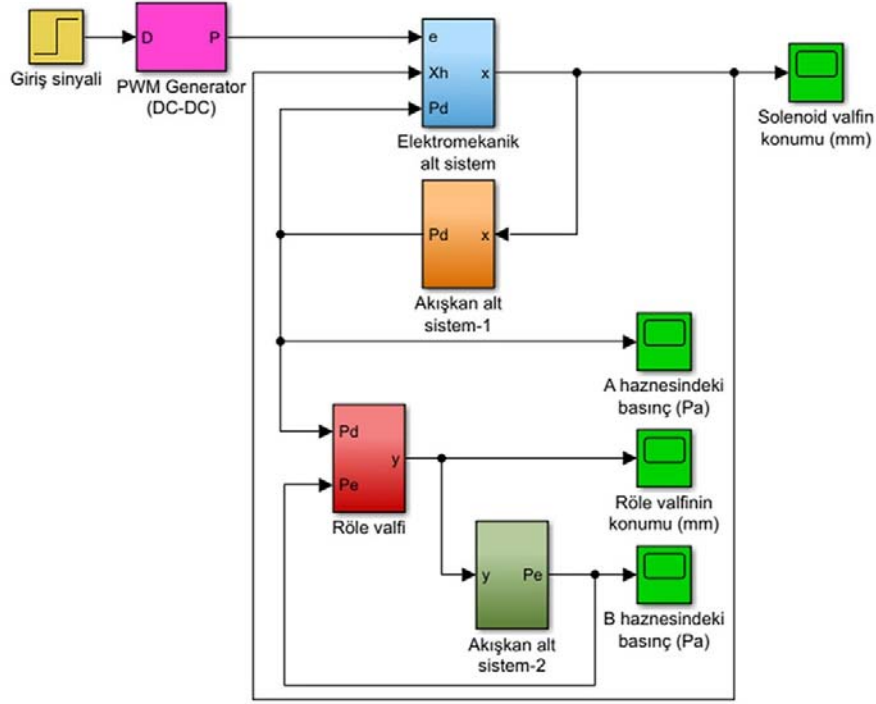
*(Investigation of Dynamic Characteristics of the Solenoid Valve)*

Bu kısımda öncelikli olarak elektromekanik sistem çözümlerinden elde edilen sonuçların kabul edilebilirliği ile ilgili doğrulama çalışmaları sunulmuştur. Bunun için ilk aşamada [29] numaralı çalışmada incelenen solenoid valf yapısı ANSYS/Maxwell programında modellenmiş ve ilgili çalışmanın deneysel ve teorik sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu karşılaştırma için belirtilen çalışmada kullanılan yapının, ANSYS/Maxwell sonlu elemanlar programında Şekil 4'te gösterilen dış model ve mesh atama yöntemleriyle modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da gösterilen sonuçlarda deney ve benzetim sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

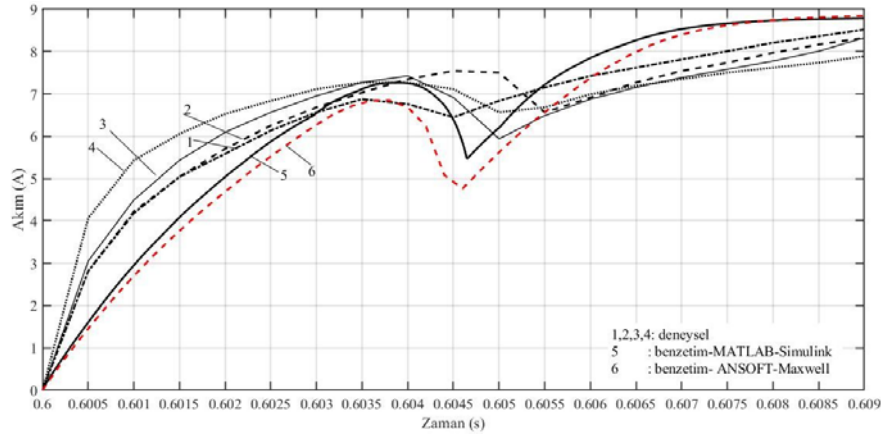
Bu doğrulama işleminden sonra elektro-pnömatik fren valfi sisteminin modellenmesiyle ilgili çalışmalara devam edilmiştir. İstenen tasarım değerleri elde edildikten sonra sistemin dinamik davranışının incelenmesi için dinamik davranış ön tasarım çalışmaları yapılmıştır. Yük durumu bir adet ön gergili yay ve ağırlık kuvveti olarak verilmiştir. Bu ön tasarım çalışması ile çalışmada kullanılan düz yüzlü piston tipi solenoid yapısının tek aşamalı hareketi için sonlu



Şekil 4. Solenoid ön tasarım dış devresi ve mesh atamaları (Pre-design out circuit of the solenoid and mesh structures)



Şekil 5. Elektro-pnömatik fren valfinin Simulink modeli (Simulink model of electro-pneumatic brake valve)



Şekil 6. [29] numaralı çalışmanın deneysel ve benzetim sonuçlarının SEY ile karşılaştırılması (Comparison of experimental and theoretical results of the work number [29] with FEA)

elemanlar yöntemi (SEY) ve cebirsel denklemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve sonuçlar birbirini doğruladıktan sonra fren valfi sistemi analizlerine devam edilmiştir.

Elektromekanik alt sistemin dinamik karakteristiklerinde devreye uygulanan giriş gerilimine karşılık bobindeki akım değişimi ve hareketli elemanın yer değiştirmesi incelenmiştir. Şekil 7’de valfin 9 ms süreyle 10 V basamak giriş gerilimi ile çalıştırılması halinde elde edilen açma-kapama davranışı akım ve yer değiştirme karakteristik eğrileri ANSYS/Maxwell ve MATLAB/Simulink programları için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen grafiklerden çözümlerinin birbiriyle oldukça yakın ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

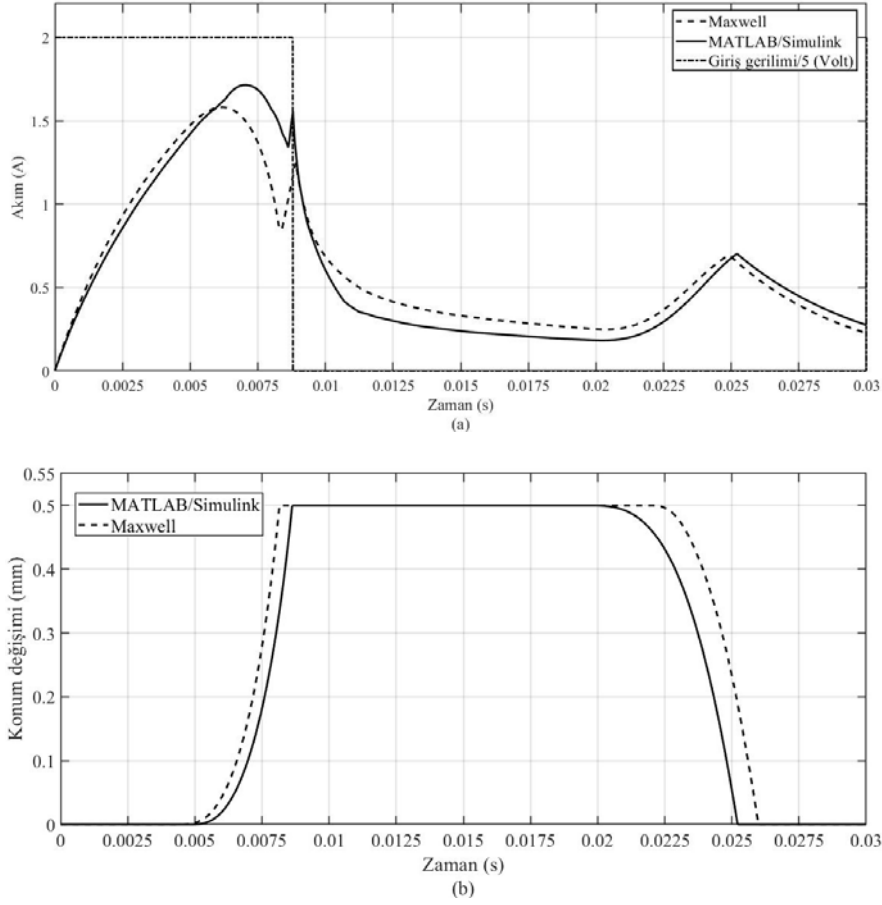
## 6.2. Solenoid Valf Sisteminin DGM Karakteristiğinin İncelenmesi

(Investigation of PWM Characteristics of the Solenoid Valve System)

DGM periyodunun belirlenmesinde solenoid valfin elektromekanik kısmının açılma ve kapanma zamanları esas alınmaktadır. DGM sinyalinin en küçük doluluk süresi solenoid valfin açılma zamanı kadar seçilirken, en büyük doluluk süresi solenoid valfin DGM periyodu sonunda kapanmasına izin verecek şekilde belirlenmiştir [29].

DGM tekniği ile sürülen solenoid valfin akış karakteristikleri Şekil 5’te verilen Simulink modelinin “PWM Generator”, “Elektromekanik Alt Sistem” ve “Akışkan Alt Sistem-1” bloklarının uygun şekilde düzenlenmesiyle elde edilmiştir.





**Şekil 7.** (a) Akım-zaman grafiği (açma-kapama davranışı) (Current-time graph (opening and closing behavior))  
 (b) Konum-zaman grafiği (açma-kapama davranışı) (Displacement-time graph (opening and closing behavior))

Solenoid valfle ilgili kısımların doğrulama çalışmalarının yapılmasının ardından elektromekanik alt sistemin iki aşamalı çalışma hali dikkate alınarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Mutlak 9 barlık besleme basıncında solenoid valfin belli bir frekans değeri doluluk oranlarında çalıştırılmasıyla 0,5 lt hacme sahip tankı doldurma davranışı, tank içindeki kalıcı durum basıncı değerleri üzerinden incelenmiştir. 5, 10, 20, 25, 40 ve 50 Hz DGM frekansları için benzetim çalışmaları tekrarlanmıştır.

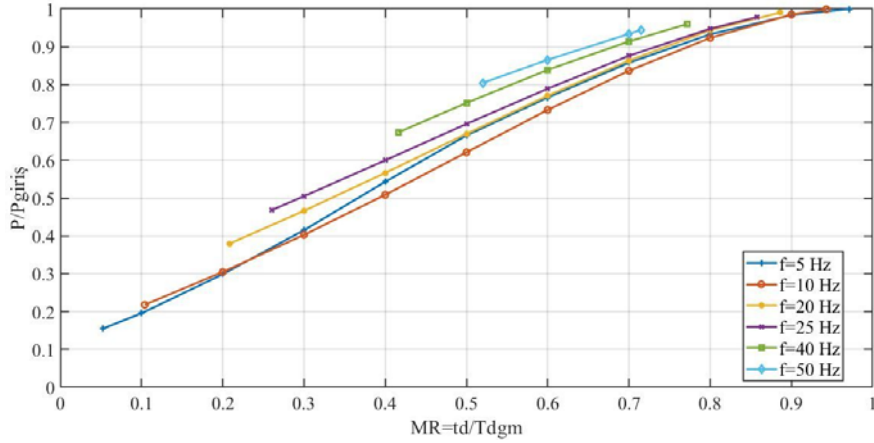
Şekil 8’de solenoid valfe 16 V genlikli DGM gerilimi uygulanması sonucu elde edilen DGM karakteristiği grafiği görülmektedir. Şekil 8’deki grafikten 50 Hz DGM frekansında 0,52-0,7 modülasyon oranı aralığında oransallık elde edildiği, 5 Hz DGM frekansında ise 0,05-0,96 modülasyon oranı aralığında oransallık elde edilebildiği görülmektedir.

### 6.3. Elektro-pnömatik Fren Valfinin Dinamik Karakteristikleri ve Sistemin DGM Performansı (Dynamic Characteristics of Electro-pneumatic Brake Valve and PWM Performance of the System)

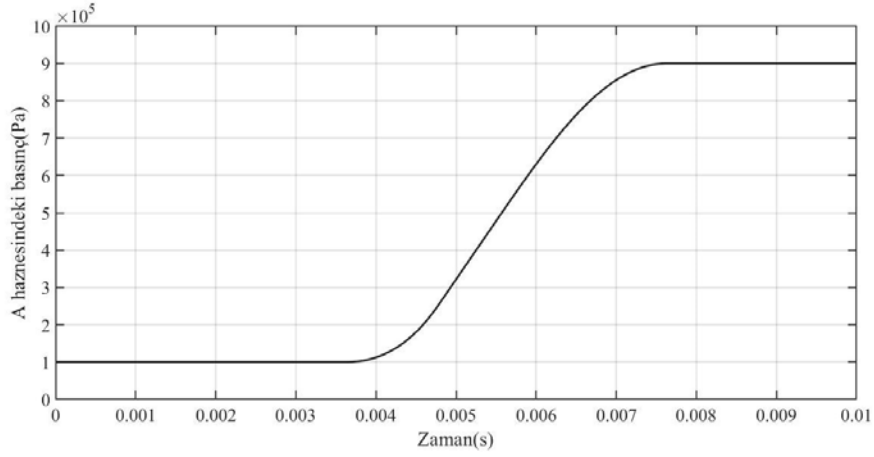
Şekil 5’te verilen modele röle valfi kısmının mekanik ve akışkan alt sistemleri de dahil edilerek elektro-pnömatik fren valfinin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Yapılan

analizlerde 16 V giriş geriliminde oransallık iyi sağlandığı için bu kısımda da giriş sinyalinin genliği 16 V olarak alınmış ve 9 bar besleme basıncı için valf sisteminin basamak giriş cevabı incelenmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10’da sırasıyla solenoid valf ile röle valfi pistonu arasında bulunan haznedeki (A haznesi) ve röle valfinin çıkış haznesindeki (B haznesi) basıncın zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Çıkış haznesinin hacmi 0,73 lt olarak alınmıştır. Şekil 9’daki grafikten A haznesindeki basıncın yaklaşık 7,7 ms’de giriş basıncına ulaştığı görülmektedir. Şekil 10’daki grafikten B haznesindeki basıncın giriş basıncına yaklaşık 167,5 ms’de, giriş basıncı değerinin %75’ine yaklaşık 100 ms’de ulaştığı görülmektedir. Elde edilen bu cevap hızı değerlerinin besleme basıncı ve hacim değerleri dikkate alındığında literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür [1, 8, 10]. DGM sinyali ile sürülen solenoid valfin fren valf sisteminde uygulanabilirliğini incelemek için 20, 25, 40, 50 ve 100 Hz DGM frekanslarının farklı doluluk oranları için röle valfinin çıkış haznesindeki kalıcı durum basıncı değeri elde edilmiştir.

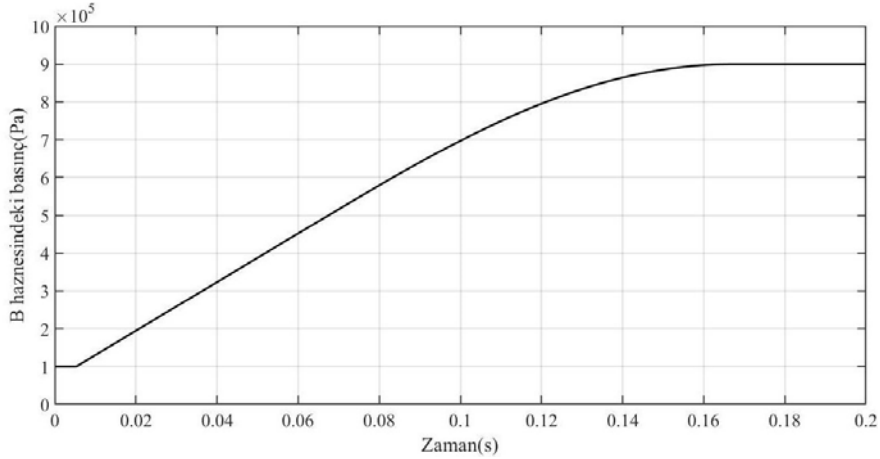
Valf sistemine farklı frekans ve doluluk oranlarında DGM sinyalinin uygulanması durumunda elde edilen oransal çalışma karakteristiği Şekil 11’deki gibi elde edilmiştir. Grafikten 100 Hz DGM frekansında 0,3-0,6 modülasyon



**Şekil 8.** Solenoid valfin DGM karakteristikleri ( $V=0,5$  lt hacmi doldurması için) (PWM characteristics of the solenoid (for filling  $V=0.5$  lt volume))



**Şekil 9.** A haznesindeki basınç değişimi (Change of pressure in chamber A)



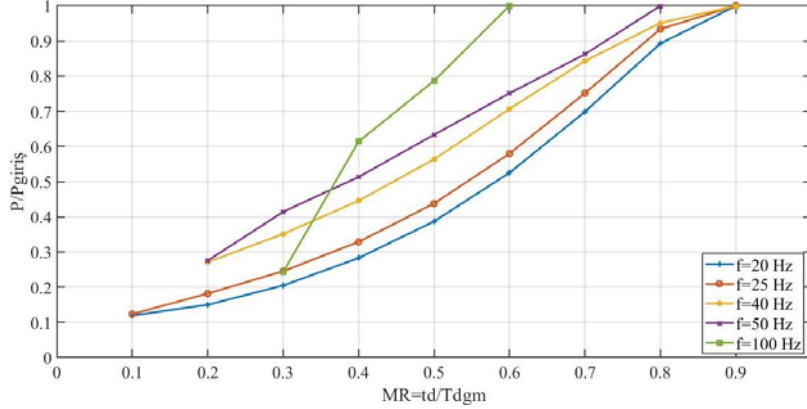
**Şekil 10.** B haznesindeki basıncın zamana bağlı değişimi (Change of pressure in chamber B)

oranı aralığında valfte oransallık elde edildiği görülmektedir. Sistemin 50 Hz DGM frekansında çalıştırılması halinde ise oransal çalışma bölgesi genişlemekte ve 0,2-0,8 modülasyon oranı aralığında oransal bir çalışma elde edilmektedir. UN-ECE R13 standardında havalı fren sistemlerinin cevap

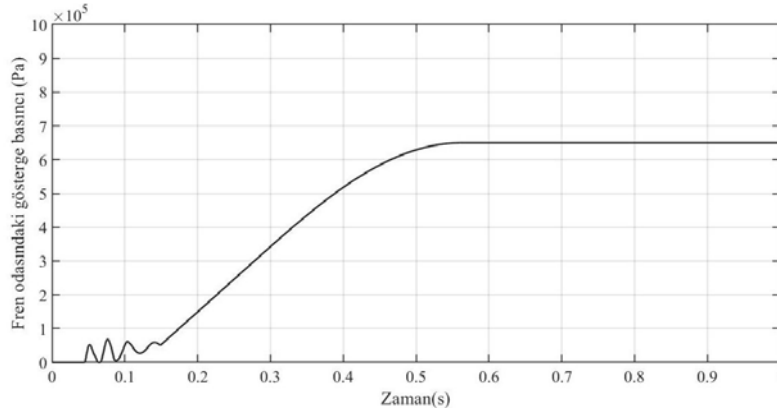
hızının test edilmesine yönelik testlerde 6,5 bar besleme basıncında fren körüklerindeki hava basıncının nihai değerinin %75'ine ulaşana kadar geçen sürenin en fazla 0,4 s olması gerektiği belirtilmektedir [32]. EBS sistemlerinin kullanıldığı yapılarda cevap süresinin ve sistemin dinamik

davranışının iyileştirilmesi için kapalı döngü kontrol yöntemlerinin uygulandığı çalışmalar da yapılmaktadır [8, 10, 19, 33]. Buna göre Şekil 12’de verilen grafikte basıncın nihai değerinin %75’ine ulaşması için geçen süre 0,38 s olarak elde edilmiştir. Başlangıçta görülen titreşim fren odasındaki itici milin hareketi sebebiyle meydana gelmektedir. Hareket tamamlandıktan sonra basınç sabit bir hacmi dolduruyormuş gibi artış göstererek nihai değerine ulaşmaktadır. Buradan alternatif yapının fren çalışma durumunu olumsuz olarak etkilemediği söylenebilir.

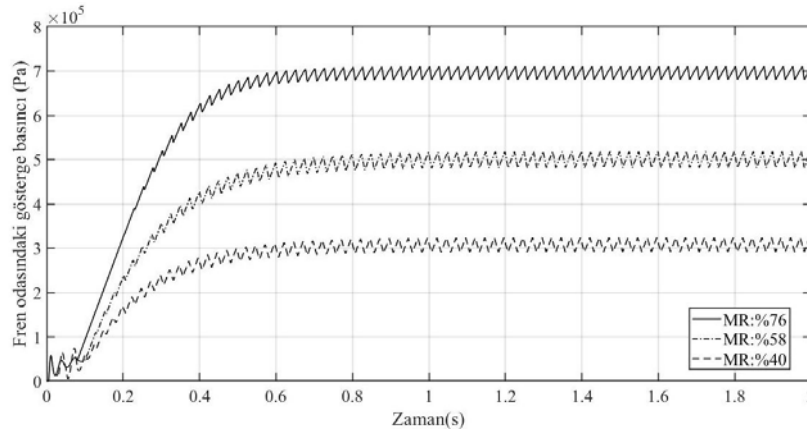
Oransal yapıli elektro-pnömatik fren valfi kullanarak sistemin cevabını inceleyen Han vd. [8] çalışmalarında fren sisteminin zayıf, orta ve panik şeklindeki durumlarını valfin çıkışında 3 bar, 5 bar ve 7 bar çalışma değerlerini sağlayıp sağlamadığını inceleyerek değerlendirmişlerdir. Çalışmamızda da benzer bir yol izlenmiş ve 40 Hz DGM frekansında sürülen valfin farklı modülasyon oranlarıyla çalıştırılmasıyla bu basınç değerlerini sağlayabildiği görülmüştür. Şekil 13’ten görülebileceği gibi %76 modülasyon oranında 7 bar, %58 modülasyon oranında 5



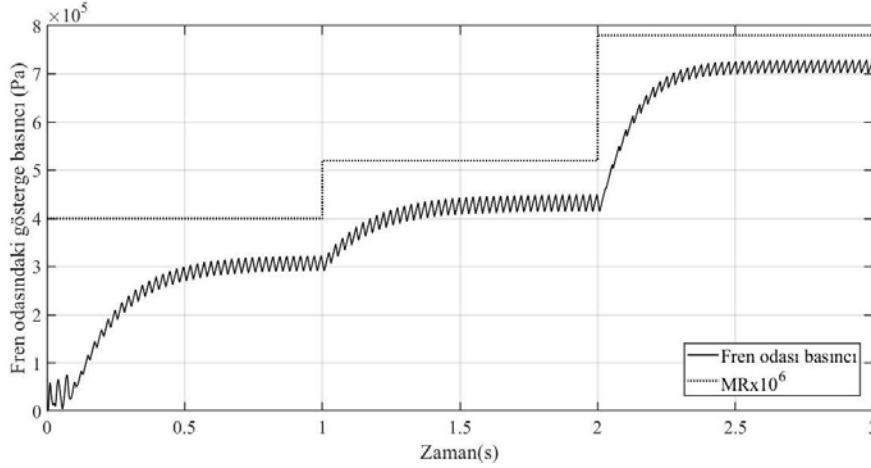
Şekil 11. Fren valfinin oransal çalışma karakteristiği (Proportional operating characteristics of brake valve)



Şekil 12. Fren odasının dinamik davranış cevabı (The dynamic response of brake chamber)



Şekil 13. Farklı modülasyon oranlarına göre fren odasındaki basınç değişimi (Pressure variation in the brake chamber according to the different PWM modulation ratio)



Şekil 14. Fren odasındaki basınç değişimi (Pressure variation in the brake chamber)

bar, %40 modülasyon oranında 3 barlık oransal çıkış alınmıştır. DGM tekniğinin uygun şekilde fren sistemine uygulanmasıyla da oransal çıkış elde edilebilmiş ve nihai değerinin %75'ine sistemin yaklaşık 0,3 s'de ulaştığı tespit edilmiştir.

Şekil 14'te valfin 1 s'lik periyotlarla sürekli artan modülasyon oranlarındaki giriş sinyalleri ile sürülmesi sonucu elde edilen cevap eğrileri sunulmuştur. Bu grafiklerden de fren sisteminin cevabının bu artışa uygun şekilde cevap verdiği söylenebilir.

## 7. SİMGELER (SYMBOLS)

- A : Alan (m<sup>2</sup>)  
b : Sönümlenme katsayısı (N.s/m)  
B<sub>g</sub> : Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m<sup>2</sup>)  
C<sub>d</sub> : Boşaltım katsayısı  
d : Çap (m)  
e : Gerilim (V)  
F : Kuvvet (N)  
f : Boşluk faktörü  
f<sub>dgm</sub> : DGM frekansı (Hz)  
g : Yer çekimi ivmesi (m/s<sup>2</sup>)  
H : Manyetik alan şiddeti (A/m)  
h : Bobinin uzunluğu (m)  
i : Akım (A)  
k : Malzemenin ısı iletim katsayısı (W/(m<sup>2</sup>.°C))  
k<sub>y</sub> : Yay katsayısı (N/m)  
l : Akı yolu uzunluğu (m)  
m : Kütle (kg)  
MO : Modülasyon oranı  
N : Sarım sayısı  
P : Manyetik geçirgenlik (Wb/A.sarım)  
P<sub>o</sub>, P<sub>atm</sub> : Atmosfer basıncı (Pa)  
P<sub>A</sub>, P<sub>B</sub> : A ve B haznesindeki basınç (Pa)  
P<sub>g</sub> : Giriş basıncı (Pa)  
Q<sub>n</sub> : İdeal valf nominal debisi (m<sup>3</sup>/s)  
Q<sub>ort</sub> : Akış salınımlarının ortalama debisi (m<sup>3</sup>/s)  
q : Çalışma sıklığı  
r : Yarıçap (m)

- R : Gaz sabiti (J/(kg.K))  
R<sub>b</sub> : Direnç (Ω)  
s : Hava aralığı (m)  
t<sub>d</sub> : Darbe süresi (s)  
T : Sıcaklık (K)  
T<sub>DGM</sub> : DGM periyodu  
x<sub>t</sub> : Toplam hava aralığı (m)  
x : Solenoid valfin hareketli elemanının yer değiştirmesi (m)  
x\* : Hareketsiz durumda hareketli kutup ile supap bağlantı mili arasındaki boşluk (m)  
y : Röle valfi diskinin yer değiştirmesi (m)  
y\* : Hareketsiz durumda röle valfi pistonu ile röle valfi yatağı arasındaki boşluk (m)  
V : Hacim (m<sup>3</sup>)  
z : Hava aralığı sayısı  
γ : Özgül ısılar oranı  
θ<sub>f</sub> : En yüksek bobin sıcaklığı (°C)  
μ : Manyetik geçirgenlik (H/m)  
ρ : Özgül direnç (Ω.m)  
φ : Manyetik akı (Wb)

## 8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada elektro-pnömatik fren valfi yapısında oransal solenoid yerine DGM tekniği ile sürülen aç-kapa tipi solenoid kullanılmasıyla valf sisteminin oransal çalıştırılmasının mümkün olup olmadığı teorik olarak incelenmiştir. Çalışmamıza konu olan solenoidin valfin yapısı oransal yapıya göre daha basit ve üretimi kolay olup daha düşük maliyetlerde üretilmesi de mümkün görünmektedir. Bu valfin DGM tekniği ile sürülerek belli bir çalışma bölgesinde oransal yapıya valf sistemleriyle benzer şekilde oransal çıkış alınmasının da sağlanabildiği teorik olarak görülmüştür. İlk aşamada mevcut oransal solenoid valfin üzerine gelen yük ve mevcut çalışma durumu dikkate alınarak tasarımı yapılan aç-kapa tipi solenoid valfin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. İkinci aşamada elektro-pnömatik fren valfi yapısı modellenerek bu yapıda DGM tekniği ile sürülen aç-kapa tipi solenoidin kullanılması incelenmiştir. Sisteme çeşitli modülasyon oranlarında DGM

sinyali uygulandığında 50 Hz DGM frekansında 0,2-0,8 modülasyon oranı aralığında, 100 Hz DGM frekansında ise 0,3-0,6 modülasyon oranı aralığında dar bir bölgede oransallık elde edilmiştir. 50 Hz' den düşük frekanslarda da oransal çıkış elde edilebildiği görülmüştür. Fren sistemindeki davranışını incelemek amacıyla valfin kullanıldığı bir fren sisteminin fren odasını doldurma dinamiği de incelenmiştir. 40 Hz DGM frekansında farklı frenleme durumlarına ait senaryolar üzerinden yapılan incelemelerde valfin uygun frekanslarda ve doluluk oranlarına sahip sinyaller ile sürülmesi halinde oransal çıkışlar verebildiği ve önerilen sistemin kullanılabilir olduğu teorik olarak görülmüştür. Aç-kapa tipi solenoid valfin DGM sinyali ile sürülmesi esnasında tutma akımı yöntemi uygulanarak, kapalı döngü basınç kontrolü yapılarak veya hızlı anahtarlama valfi kullanılarak da oransal çalışma aralığının genişletilebileceği söylenebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Han J., Weiqiang Z., Zong C., Zheng H., Research on characteristics of proportional relay valve for commercial vehicle pneumatic EBS, SAE Technical Paper, 2013-01-2795, 2013.
- Patil J.N., Palanivelu S., Aswar V., Sharma V., Mathematical model to evaluate and optimize the dynamic performance of pneumatic brake system, SAE Technical Paper, 2015-26-0082, 2015
- Kaminski Z. Mathematical modelling of the trailer brake control valve for simulation of the air brake system of farm tractors equipped with hydraulically actuated brakes, Maintenance and Reliability, 16 (4), 637-643, 2014.
- Çetinkaya S. Taşıt Mekaniği. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Ticaret Ltd.Şti., Ankara, 2015.
- Acarman T., Özgüner U., Hatipoglu C., Lgusky A., Pneumatic brake system modeling for systems analysis, SAE Technical Paper, 2000-01-3414, 2000.
- Mithun S., Mariappa S., Gayakwad S., Modeling and simulation of pneumatic brake system used in heavy commercial vehicle, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 11 (1), 01-09, 2014.
- Weiqiang Z., Zong C., Zheng H., Wang H., Yang S., Integrated HIL test and development for pneumatic ABS/EBS ECU of commercial vehicles, SAE Technical Paper 2012-01-2031, 1-13, 2012.
- Han, J. Changfu, Z., Weiqiang, Z., Development of a control strategy and HIL validation of electronic braking system for commercial vehicle, SAE Technical Paper 2014-01-0076, 1-13, 2014.
- Wabco. EBS–Electronically controlled braking system basic training. <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/57/8150100573-22.pdf>. Yayın tarihi 2004. Erişim tarihi Nisan 20, 2018.
- Wan Y., Zhang D., Weiqiang Z., Zong C., Han J. Development of simulation platform and control strategy of electronic braking system for commercial vehicles, SAE Technical Paper 2014-01-2286, 1-10, 2014.
- Lin Z., Zhang T., Xie Q., Wei Q., Intelligent Electro-pneumatic position tracking system using improved mode-switching sliding control with fuzzy nonlinear gain, IEEE Access, 6, 34462-34476, 2018.
- Fathi M., Najafi F., Improved tracking accuracy of a pneumatic actuator on entire piston stroke by a modified fuzzy-PWM controller, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39 (3), 879-893, 2017.
- Taghizadeh M., Ghaffari A., Najafi F., Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications, Comptes Rendus Mecanique, 337 (3), 131-140, 2009.
- Pipan, M., Herakovic, N., Volume flow characterization of PWM-controlled fast-switching pneumatic valves, Strojniski Vestnik- Journal of Mechanical Engineering, 62 (9), 543-550, 2016.
- Düzgün E., Ağır taşıt elektro-pnömatik fren valfi için oransal solenoid tasarımı ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2015.
- Meng F., Chen H., Liu H., Han B., Nie X., The optimization of a proportional solenoid valve design for heavy vehicle active suspension system, International Journal of Vehicle Design, 68 (1/2/3), 180-200, 2015.
- Yun S., Ham Y., Park J., New Approach to Design Control Cone for Electro-magnetic Proportional Solenoid Actuator, The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Kaohsiung, Taiwan, 11-14 Temmuz 2012.
- Wang Z., Zhou X., Yang C., Chen Z., Wu X., An experimental study on hysteresis characteristics of a pneumatic braking system for a multi-axle heavy vehicle in emergency braking situations, Applied Sciences, 7(8):799, 2017.
- He R., Xu C., Prediction and Control of Response Time of the Semitrailer Air Braking System, SAE International Journal of Commercial Vehicles, 12 (2), 139-150, 2019
- Güleryüz İ.C., Başer Ö., Computer aided calculation and experimental verification of response time of pneumatic brake system for 4x4 heavy duty vehicles, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 24 (8), 1409-1417, 2018.
- Bali E., Aç-kapa solenoid valf kumandalı elektro-pnömatik fren valfinin modellenmesi ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2017.
- Bali E., Erzan Topçu E., Design of on-off type solenoid valve for electropneumatic brake systems and investigation of its static characteristics, International Journal of Advances on Automotive and Technology, 2 (3), 175-184, 2018.
- Kurnaz Araz, H., Yılmaz M., Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnetmass and torque-ripple for electric vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and

- Architecture of Gazi University, 35 (2), 1110-1089, 2019.
24. Çabuk A.S., Sağlam S., Üstün Ö., Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 1986-1975, 2019.
  25. Demir U., Aküner M.C., Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1530-1517, 2018.
  26. Soygenç O., Ergene L., Geometric optimization of PMSM using Halbach array and PSO algorithm, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (4), 2045-2060, 2020.
  27. Kurnaz Araz H., Yılmaz M., Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnetmass and torque-ripple for electric vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 1089-1110, 2019.
  28. Roters H.C., Electromagnetic Devices, John Wiley and Sons Inc., New York, A.B.D., 1941.
  29. Erzan Topçu E., Yüksel İ., Kamyş Z., Development of electro-pneumatic fast switching valve and investigation of its characteristics, Mechatronics, 16 (6), 365-378, 2006.
  30. McCloy D., Martin H.R., Control of Fluid Power: Analysis and Design, Ellis Horwood Ltd., 1980.
  31. Ye N., Scavarda S., Betemps M., Jutard A., Models of a pneumatic PWM solenoid valve for engineering applications, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 114 (4), 680-688, 1992.
  32. ECE Regulation No.13, Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles of Categories M, N and O with Regard to Braking. UN, 2011.
  33. Wang J., Yang B., Li S., Zhang D., Li K., Pneumatic electronic braking assistance system using high-speed valves, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Qing Dao, China, 59-64, 2010.