

**Makale
(Article)**

Silindirik Slotlu Elektromanyetik Sönümleyicinin Optimal Tasarımı

Aysun BALTACI*, **Mutlu BOZTEPE****, **B. Oğuz GÜRSES***, **Sercan SABANCI***, **Mehmet SARIKANAT***

*Ege Üniversitesi Müh. Fak. Makine Müh. Böl. 35100 İzmir/TÜRKİYE

**Ege Üniversitesi Müh. Fak. Elektrik-Elektronik Müh. Böl. 35100 İzmir/TÜRKİYE

aysun.baltaci@ege.edu.tr, aysunaysun6@gmail.com

Özet

Günümüzde pek çok makinada istenmeyen titreşimlerin önlenmesi için viskoz sönümleyiciler kullanılmaktadır. Bu pasif elemanlar, titreşime sebep olan mekanik enerjiyi içerisindeki akışkanın hareketi yardımıyla ısı enerjisine dönüştürerek dışarı atmaktadırlar. Uygun bir elektrik makinesi ve güç elektroniği topolojisi kullanarak gerçekleştirilecek bir aktif sönümleyiciler ile bu enerjinin geri kazanımı mümkün hale gelmektedir. Böylece kayıp olarak dışarıya atılan ısı ileride kullanılmak üzere elektrik enerjisi olarak depolanabilmektedir.

Bu çalışmada slotlu tübüler yapıda bir elektromanyetik sönümleyici tasarlanmıştır. Sargı slot genişliği ile kalıcı mıknatıs boyutunun sistem performansına etkisi incelenmiş ve optimize edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla öncelikle sistemin iki boyutlu geometrisi oluşturulmuş ve COMSOL ile MATLAB yazılımları birlikte kullanılarak sistemdeki geometrik boyutlar parametrik hale getirilmiştir. Daha sonra iki boyutlu eksenel simetrik sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik sönümleyici, elektrik makinesi, manyetik alan

Optimal Design of Cylindrical Slotted Electromagnetic Damper

Abstract

Nowadays viscous dampers are used to prevent undesired vibrations in the machines. These passive elements, convert mechanical energy into heat energy by fluid motion and the heat is dissipated. It is possible that this energy can be regenerated by using a suitable electric machinery and power converter topology. By means of this electromagnetic system, the mechanical energy due to undesired vibrations can be converted into electrical energy and can be utilized later,

In this study a slotted tubular electromagnetic magnetic damper was designed. The effect of winding slot width and permanent magnet width on the system performance is analyzed and optimized. For this purpose a two-dimensional parametric geometry of the system is created using MATLAB and COMSOL. Then two-dimensional axisymmetric Finite Element analysis is performed and the results are compared.

Keywords : Electromagnetic damper, electric machines, magnetic fields.

1. GİRİŞ

Her yıl sürekli artış gösteren dünya enerji talebinin geleneksel enerji üretim yöntemleriyle karşılanması sürdürülebilir olmaktan uzaktır. Bu nedenle yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılmasının yanı sıra enerji verimliliği çalışmaları da günümüzde oldukça önemli hale gelen konulardandır.

Geleneksel pasif sönümleme sistemlerinde titreşime neden olan mekanik enerji ısı enerjisine dönüşerek harcanır. Harcanan bu enerjiden sistem faydalanamaz. Oysa uygun bir elektrik makinesi ve güç elektroniği topolojisi kullanarak gerçekleştirilecek bir aktif sönümleyici ile bu enerjinin geri kazanımı mümkün hale gelmektedir. Geri kazanılan bu enerji sistemin enerji verimliliğini yükseltmektedir, örneğin geleneksel araçlara göre menzili kısa olan elektrikli araçlarda, bu yöntemle menzil artırılabilir. Diğer yandan aktif sönümleyici ile sürüş konforunun daha da iyileştirilmesi mümkün hale gelmektedir. Bütün bu avantajları nedeniyle aktif manyetik sönümleyicilerin yakın gelecekte uygulama alanının artması beklenmektedir.

Elektromanyetik sönümleyiciler titreşimden doğan kinetik enerjiyi kullanan ve elektriksel enerjiye dönüştüren elektrik makineleridir. Bu cihazlar hem aktüatör hem de jeneratör olarak iki yönlü kullanılabilir. Önemli ölçüde sönümleme sağlanan bu sistemlerde aynı zamanda kullanılabilir enerji eldesi söz konusu olduğu için rejeneratif olarak adlandırılmaktadırlar [1]. Çoğunlukla araç süspansiyon sistemlerinde kullanılmaktadırlar [2-3]. Ayrıca binalarda sönümleyici olarak kullanılabilirliğine yönelik çalışmalar da mevcuttur [4-5-6]. Bu sistemlerin tasarımında elde edilecek kuvvet ya da elektriksel güç sistem performansını belirlemekte olup sistemi optimum yapacak tasarım parametreleri iyi belirlenmelidir.

Literatürde elektromanyetik lineer aktüatör sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunda yarı analitik ve nümerik metodlar kullanılarak sistem performansını iyileştirmeye yönelik çalışmalar mevcuttur. Moses ve arkadaşları çalışmalarında sonlu elemanlar metodunun lineer elektromanyetik aktüatörlerin tasarım sürecinde tasarımı hızlandıran ve eşdeğer devre tasarımına göre daha avantajlı bir çözüm olduğu sonucuna varmıştır [7]. Markovic ve arkadaşları Schwarz - Christoffel haritalama metodu kullanarak bir elektromanyetik aktüatör üzerinde oluşan elektromanyetik alanı ve kuvveti belirlemiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında elde ettikleri sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir [8]. Encica ve arkadaşları ise çalışmalarında Uzay Haritalama Metodu (Space Mapping) tekniği kullanarak elektromanyetik lineer aktüatörleri optimize etmiştir [9]. Milanesi çalışmasında tübüler yapıdaki lineer aktüatörlerin tasarımında kullanılacak optimal tasarım algoritması geliştirmiş ve sistemi sadece elektromanyetik açıdan değil termal ve mekanik sınırlamalar açısından da değerlendirmiştir [10]. Oriol ve arkadaşları da lineer elektromanyetik aktüatörlerin optimizasyonunda termal yönden sistemi değerlendirmiştir. Çalışmalarında sistemden elde edilecek maksimum kuvvet çıktısının sıcaklık ile sınırlandığını, bu nedenle sistemin ısı olarak incelenmesi gerektiğini vurgulamışlardır [11]. Ancak literatürdeki bu çalışmalar sistemin geometrik özelliklerinin rejeneratif sönümleyicinin güç çıktısına olan ilişkisine ve optimal geometrik özelliklerin tasarım aşamasında belirlenmesine yönelik değildir.

Bu çalışmada, slotlu tübüler yapıda bir elektromanyetik sönümleyici tasarlanmıştır. Tasarım için gerekli olan optimal geometrik özellikleri belirlemek için sargı slot genişliği ile kalıcı mıknatıs boyutunun sistem performansına etkisi incelenmiş ve optimize edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle sistemin iki boyutlu geometrisi oluşturulmuş ve iki boyutlu eksenel simetrik sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT

Elektromanyetik sönümleyiciler hareket kaynaklı kinetik enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Bu dönüşüm Faraday Kanunu ile açıklanmaktadır.

Faraday kanununun matematiksel formu;

$$e = -\frac{d\Psi(t)}{dt} = -N \frac{d}{dt} \left(\int_S B \cdot dS \right) \quad (1)$$

şeklindedir. Burada Ψ sargı kesit alanındaki (S) manyetik akı bağı, N sargının tur sayısı, B manyetik akı yoğunluğu ve e indüklenen gerilim ya da elektromotor kuvvettir (birimi Volt). Denklemdaki negatiflik, indüklenen emk'nin yönünün akım ilmeğinin çevrelediği alandan geçen manyetik akı değişimine karşı koyacak şekilde manyetik akı oluşturan akımın yönünde olduğunu belirten Lenz yasası ile açıklanmaktadır.

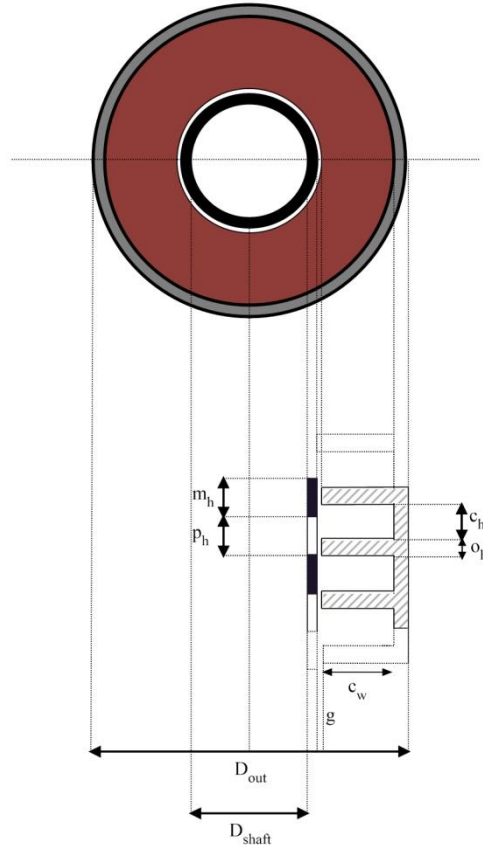
Zamana bağlı olarak değişen manyetik akı yoğunluğu söz konusu olduğunda Eşitlik (1) aşağıdaki hali alır;

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

Faraday yasası, sargı üzerinde oluşan elektromotor kuvvetin sargı boyunca değişen manyetik akı yoğunluğunun zamana bağlı değişiminin negatifine eşit olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle, sargı ile kalıcı mıknatıslar arasındaki bağıl hareket sonucu oluşan manyetik akı yoğunluğundaki değişim sargı üzerinde bir gerilim indüklemektedir. Bu gerilim sarım sayısı ve kalıcı mıknatısların yoğunluğu ile kontrol edilebilir [12].

Eşitlik (1) ve (2)'den üretilen gerilimin aynı zamanda manyetik akının zamana göre değişim hızı ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Kalıcı mıknatısların akı yoğunluğu nispeten sabit olduğuna göre, sargının mıknatıslara göre bağıl hareketinin frekansı üretilen gerilimin genliğini değiştirmektedir. Frekans azaldıkça genlik de azalmakta ve dolayısıyla değerlendirilebilecek en düşük gerilimin değerine bağlı olarak sönümleme için bir alt frekans sınırı ortaya çıkmaktadır.

Sistem Şekil 1'de gösterildiği gibi içeriden dışa doğru sırasıyla hareketli demir rod, aksenal yönde mıknatıslanmış sıralı kalıcı mıknatıslar ve içerisinde sargıların bulunduğu slotlardan oluşmaktadır. Burada o_h diş genişliği, c_h slot genişliği, m_h mıknatıs genişliği, g hava aralığı ve p_h akı yönlendiricisinin genişliğidir.



Şekil 1. Elektromanyetik Sönümleyicinin Şematik Çizim

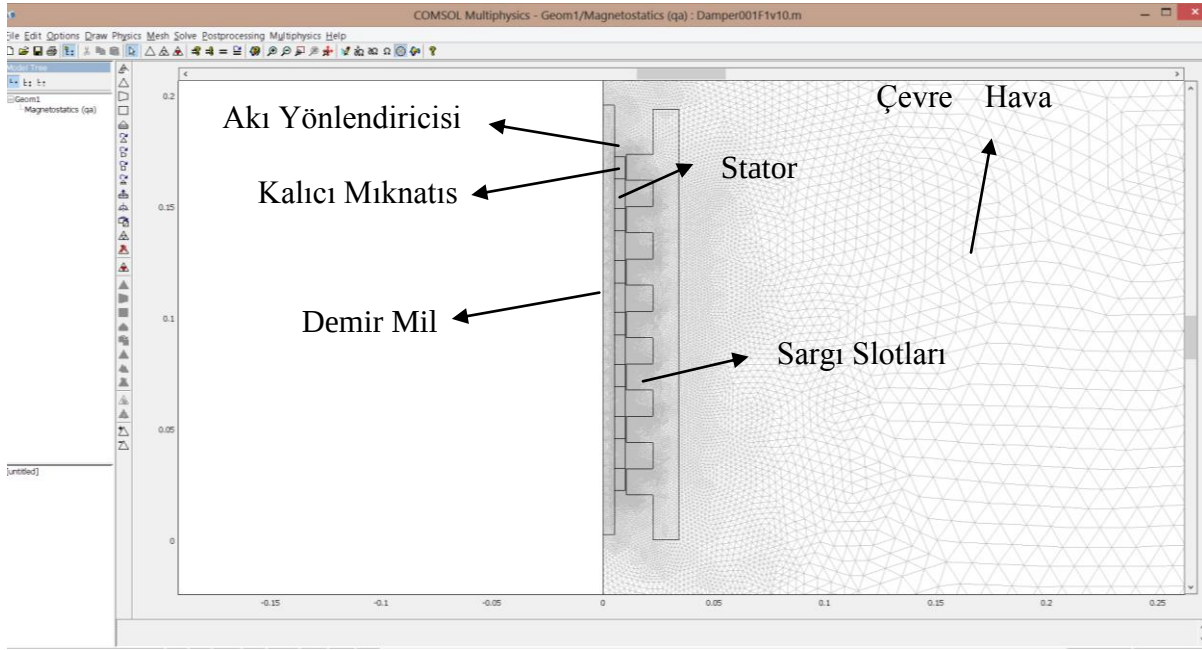
Sistemde NdFeB mıknatıslar kullanılmış olup mıknatıslara ait özellikler Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. Kalıcı Mıknatısların Özellikleri

Özellik	Sembol	Birim	Değer
Artık Mıknatıslanma	Br	Tesla	1,20
Koersivite	Hc	A/m	720000
Kalınlık	l_m	mm	7
Genişlik	W_m	mm	10
Mıknatıs Dış Çapı	D_2	mm	20
Mıknatıs İç Çapı	D_{v2}	mm	6

Literatürde bu sistemlerin tasarımında ve sistemi oluşturan elemanların boyutlarının belirlenmesinde kullanılacak bir tasarım metodolojisi mevcut değildir. Bu yüzden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak mıknatısların, akı yönlendiricilerinin ve sargıların slot genişliklerinin sistem performansına etkisi incelenmiş ve optimal tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Bu amaçla öncelikle sistemin iki boyutlu geometrisi oluşturulmuş (Şekil 2) ve COMSOL ile MATLAB yazılımları birlikte kullanılarak sistemdeki geometrik boyutlar parametrik hale getirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri iki boyutlu olup eksenel simetri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelde stator, akı yönlendiricisi ve demir rod için bağıl manyetik geçirgenlik değeri $\mu_r = 4000$, eksenel yönde birbirlerine zıt yönde konumlandırılmış kalıcı mıknatısları artık mıknatıslanma değeri $B_r = 1.2 \text{ Tesla}$ alınmıştır. Havanın bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_r = 1$ alınmıştır.



Şekil 2. Elektromanyetik Sönümleyicinin İki Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi için COMSOL ile Oluşturulmuş Eksenel Simetrik Modelin Mesh Yapısı

Sistemde mıknatıs genişliği sabit 10 mm alınmış ve diğer geometrik unsurlar bu genişlik dikkate alınarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizinde çözüm analizleri uzun sürdüğü için zamandan bağımsız gerçekleştirilmiştir. Ancak elektromanyetik sönümleyiciden elde edilecek toplam elektromotor kuvvet milin zamana bağlı değişimi ile doğru orantılı olarak değiştiğinden, sonlu elemanlar analizi milin hareketi sağlanarak yenilenmiş ve bu şekilde indüklenen gerilim çıktısı değerlendirilmiştir.

Üzerinde çalışılan model altı fazdan oluşmakta olup toplamda 6 sargı, 6 kalıcı mıknatıs ve 7 adet akı yönlendiricisi kullanılmıştır. Bu çalışmada kalıcı mıknatıs ile sargı slot genişliği arasındaki ve kalıcı mıknatıs ile akı yönlendirici genişliği arasındaki oranlar değiştirilmiş ve sistem performansına etkisi incelenmiştir.

Bu amaçla;

$$\varphi = \frac{m_h}{p_h} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{m_h}{c_h} \quad (4)$$

ile oluşturulmuş iki oran kullanılmıştır. Burada $0.5 < \theta < 1$ için değişim incelenmiştir. Sistemde sargı slotlarının bulunduğu toplam uzunluk;

$$l = 7o_h + 6c_h \quad (5)$$

ile ifade edilebilir ve $o_h = c_h$ olarak seçildiğinde toplam uzunluk;

$$l = 13c_h = 6m_h + 7p_h \quad (6)$$

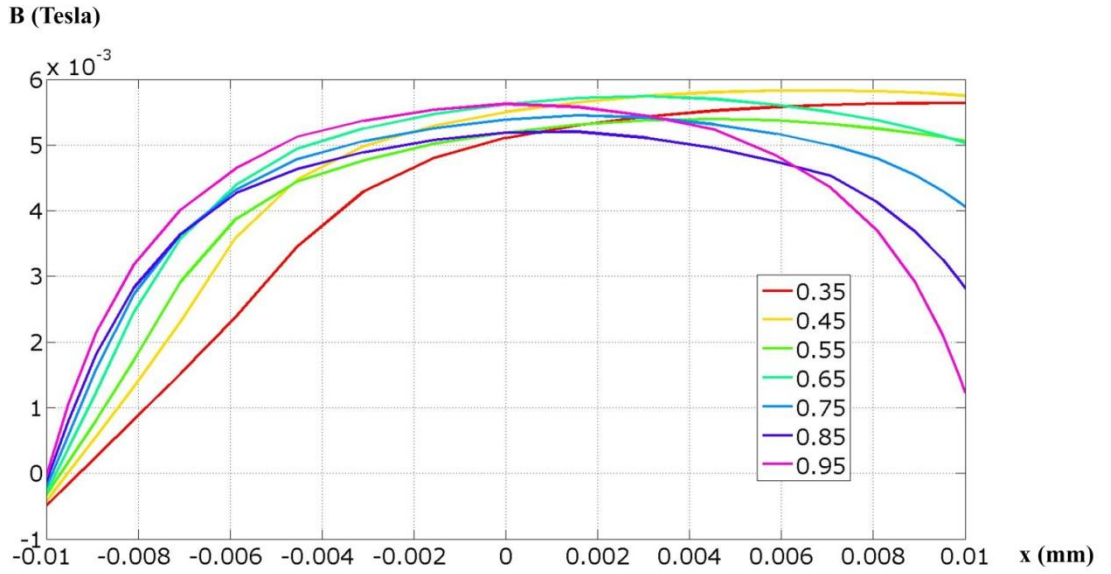
halini alır. Denklem 3 ve 4 ile verilen oranlar yerine yazılırsa;

$$l = 13 \frac{m_h}{\theta} = 6m_h + 7 \frac{m_h}{\varphi} \quad (7)$$

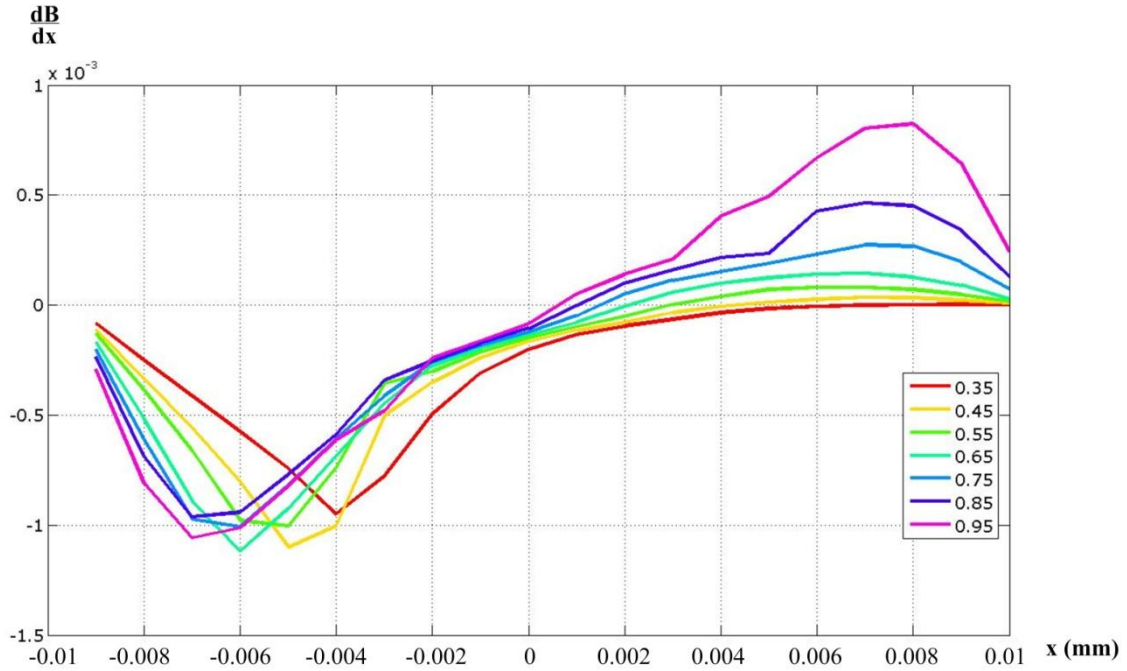
elde edilir. Buradan φ ile θ arasındaki ilişki;

$$\frac{13}{\theta} = 6 + \frac{7}{\varphi} \quad (8)$$

olur. θ değerin belirlenen aralıktaki her değeri karşılık φ değeri değişmektedir. Sargı slotlarının orta noktalarında aksel simetri çizgisine kadar olan manyetik akı yoğunluğunun integrali her φ için alınmış ve milin pozisyonu -0.01m ile 0.01m aralığında değiştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Her konum ve oranlar için analizler tekrarlanmış olup bir slot için manyetik akının zamana bağlı türevi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4'de verilmiştir. Her iki şekilde de incelenen kesit alttan 3. sargının bulunduğu slot içindir.



Şekil 3. Değişen Mil Pozisyonu ile ve Manyetik Akı Yoğunluğu Arasındaki İlişkinin grafiği



Şekil 4. Değişen Mil Pozisyonu ile ve Manyetik Akı Yoğunluğunun Türevi Arasındaki İlişki

Görüldüğü üzere mıknatıs genişliği ile akı yönlendirici genişliği arasındaki oran φ arttıkça, sistemden elde edilecek elektromotif kuvvet çıktısı da artacaktır. Buradan elde edilen sonuç doğrultusunda elde edilecek maksimum elektromotif kuvveti çıktısı için sargı genişliği, mıknatıs genişliği ve akı yönlendiricisi genişliği birbirine eşit seçilmelidir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir aktif manyetik sönümleyicinin elektromekanik tasarımında optimal geometrik özelliklerin belirlenmesi amacıyla sonlu elemanlar metodundan yararlanılmıştır. Bu amaçla altı fazlı iki boyutlu manyetik sönümleyici modeli oluşturulmuş ve eksenel simetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde ters-EMK geriliminin, mıknatıs genişliği ile akı yönlendirici genişliği arasındaki oran arttıkça arttığı ve en büyük değerini sargı genişliği, mıknatıs genişliği ve akı yönlendirici genişliğinin birbirine eşit olduğu durumda aldığı görülmüştür. Optimal özelliklere göre tasarlanan bu sönümleyiciler, özellikle yeni nesil taşıt amortisör sistemlerinde kullanılan elektromanyetik sönümleyicilerin performansını artıracak ve daha büyük güç çıktıları elde edilebilecektir.

5. KAYNAKLAR

1. Fodor, M.G., Redfield, R., 1993. The Variable Linear Transmission for Regenerative Damping in Vehicle Suspension Control. *Vehicle System Dynamics* 22, 1–20.
2. Suda Y, Shiiba T, Hio K, et al., “Study on Electromagnetic Damper for Automobiles with Nonlinear Damping Force Characteristics (Road Test and Theoretical Analysis)”, *Vehicle System Dynamics*, 2004, 41(Sup.) , pp.637-646.
3. Kawamoto, Y., Suda, Y., Inoue, H., Kondo, T., 2007. Modeling of Electromagnetic Damper for Automobile Suspension. *Journal of System Design and Dynamics* 1, 524–535.
4. Nagem, R., 1997. AN Electromechanical Vibration Absorber. *Journal of Sound and Vibration* 200, 551–556.
5. Nerves, A.C., 1996. Regenerative Electric Actuators for Active Control of Civil Structures. Virginia Polytechnic Institute and State University.
6. Scruggs, J., 1999. Active, regenerative control of civil structures.
7. Moses, A.J., Al-Naemi, F., Hall, J., 2003. Designing and prototyping for production. Practical applications of electromagnetic modelling. *Journal of magnetism and magnetic materials* 254, 228–233.
8. Markovic, M., Jufer, M., Perriard, Y., 2004. Analyzing an electromechanical actuator by Schwarz-Christoffel mapping. *IEEE Transactions on Magnetics* 40, 1858–1863.
9. Encica, L., Echeverría, D., Lomonova, E.A., Vandenput, A.J.A., Hemker, P.W., Lahaye, D., 2006. Efficient optimal design of electromagnetic actuators using space mapping. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 33, 481–491.
10. Milanesi, F., 2009. Design optimization and control strategies for PM Multiphase Tubular Linear Actuators.
11. Gomis-Bellmunt, O., Galceran-Arellano, S., Sudrià-Andreu, A., Montesinos-Miracle, D., Campanile, L.F., 2007. Linear electromagnetic actuator modeling for optimization of mechatronic and adaptronic systems. *Mechatronics* 17, 153–163.
12. Gomis-Bellmunt, O., Galceran-Arellano, S., Sudrià-Andreu, A., Montesinos-Miracle, D., Campanile, L.F., 2007. Linear electromagnetic actuator modeling for optimization of mechatronic and adaptronic systems. *Mechatronics* 17, 153–163.