



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Sabit Sıcaklık ve Akım Altında Magneto-Reolojik Damperin Tasarım Optimizasyonu

Zekeriya PARLAK^{a,*}, İsmail ŞAHİN^b

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE

^b Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Akyazı Meslek Yüksekokulu, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: zparlak@sakarya.edu.tr

ÖZET

Magneto-Reolojik (MR) damperler, minimum güç gereksinimi olan bir manyetik alanla etkili bir şekilde kontrol edilebilirler. Bu çalışmada, Taguchi deneysel tasarım yaklaşımı kullanılarak bir MR damperin tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Dar geçiş kanalı genişliği, aktif uzunluk, dar geçiş kanalı uzunluğu ve piston göbeği yarıçapı, tasarım parametreleri olarak belirtilmiştir. Taguchi yöntemi ile belirlenmiş farklı tasarım parametrelerinde dokuz damper konfigürasyonu imal edildi ve test edildi. Tüm testler, aynı sıcaklık ve akım koşulları altında aynı şekilde gerçekleştirildi. Farklı akımlar altında yapılan testler optimal tasarım parametrelerinin elde edilmesini zorlaştırdığından, sabit akım değerleri ile testler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, Taguchi yöntemi ile ayrı ayrı maksimum dinamik aralık ve sönüm kuvveti sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir. Analiz, her bir tasarım parametresinin, sıcaklık etkilerinden ve akımdan bağımsız olarak damper performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Analiz sonuçları, dar geçiş kanalının istenen maksimum kuvvet için performans üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu ve bu aktif uzunluğun istenen maksimum dinamik aralık için en yüksek etkiyi gösterdiğini göstermiştir. Sonuçlara bakıldığında, elde edilebilecek en büyük damper kuvvetinin 1688 N olduğu ve bu damperde dinamik aralık değerinin de 3.14 olduğu görüldü. Ancak en büyük damper kuvveti ile beraber en büyük dinamik aralığı elde edilmek istendiğinde, 985,55 N ve 5,1 değerleri bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Magneto-Reolojik Damper, Deneysel Tasarım, Optimizasyon, Taguchi Methodu

Design Optimization of Magneto-Rheological Damper under Constant Temperature and Current Conditions

ABSTRACT

Magnetorheological (MR) dampers can be effectively controlled by a magnetic field with minimum power requirement. In this study, a design optimization of an MR damper design was made using the Taguchi experimental design approach. The width of gap of piston head, the active length, length of gap of piston head and

the piston radius are specified as design parameters. Nine damper configurations were fabricated and tested at different design parameters determined by the Taguchi method. All tests were performed identically under the same temperature and current conditions. Since tests made under different currents made it difficult to obtain optimal design parameters, tests with constant current values were performed. The test results were evaluated to provide maximum dynamic range and damping force separately by the Taguchi method. The analysis revealed the effect of each design parameter on the damper performance, regardless of temperature effects and currents. The results of the analysis show that the gap has the greatest effect on performance for the desired maximum force and this active length has the highest effect for the desired maximum dynamic range. It can be seen of the results that the largest damper force that can be obtained is 1688 N and the dynamic range value of this damper is 3.14. However, when it is desired to obtain the largest dynamic range with the greatest damper force, 985.55 N and 5.1 values are found.

Keywords: Magnetorheological damper, Experimental design, Optimization, Taguchi approach

I. GİRİŞ

Yarı-aktif titreşim kontrol sistemleri, az bir güç gereksinimi ile aktif olarak kullanılabilen aynı zamanda da pasif kontrol sistemlerinin özelliklerini taşımalarından ötürü son yıllarda ilgi odağı haline gelmiştir. Magneto-reolojik (MR) sıvılar 1940'lı yıllarda keşfedilmesine karşın bu konudaki araştırmaların çoğu 1990 ve sonrasında gerçekleşmiştir. Günümüzde MR akışkanlar, kavrama, fren, kilitleme, servo-valf, titreşim sönümlenme (süspansiyon), şok emme sistemlerinde kullanılmakta ve bu kullanım alanlarına yönelik yoğun araştırma faaliyetleri yapılmaktadır. MR süspansiyon sistemlerine yönelik çalışmalar, önemli ölçüde otomotiv endüstrisine, havacılık endüstrisine, uzay çalışmaları ve köprü ve yapıların deprem sarsıntılarında korunmasına yönelmiş olup hızla gelişmektedir.

Hitchcock [1] yaptığı analizde ANSOFT yazılımını kullanarak yaptığı üç boyutlu sonlu eleman analizinde, manyetik alan yönü ve şiddeti için optimum değerleri aramıştır ve neticesinde ve deneysel ölçümlerde manyetik alanın akış yönüne dik gelmesini uygun olarak bulmuştur. MR damperlerin manyetik tasarımı damperin geliştirilmesinde büyük öneme sahiptir. Zhang vd. [2] sonlu elemanlar modeli (FEM) analizi ile bir MR damperin manyetik tasarımı gerçekleştirdiler ve deneysel sonuçlarla yaptığı doğrulama ile damper kuvvetini manyetik sarım ile etkili bir şekilde eşleştirmeyi başardılar. Yaptıkları analizde MR damperin 0,3 A akım değerine kadar MR etkinin hızlıca yükseldiğini 0,3A ile 0,75A arasında ise MR etkinin bir geçiş aşamasına girdiğini ve 0.75A den sonra ise bu etkinin neredeyse sabit kaldığını tespit etti. Zhu [3], disk tipli bir MR damperin sonlu eleman metoduyla tasarımının uygun olup olmadığını inceledi. Eksenel boşluklarının içine doldurulan MR sıvısı çevresindeki bobine gönderilen akım ile titreşimin etkisini deneysel ve teorik olarak çalıştı. Disk tipli MR damperin rotor sistemindeki sönümlenme etkisi ve rotor sistemlerinin titreşim kontrolünün dönme hızına verdiği tepkiyi ölçtü. Sonuçta MR sıvılı damperin rotor titreşimini kontrol etmekte ve sönümlenmekte son derece etkili olduğunu gösterdi. Rosenfeld ve Wereley [4] yaptıkları çalışmada bir MR ve Elektro-Reolojik (ER) valfi ve damperi optimize edilmesini amaçladılar. Yaptıkları FEM çalışmasında kanal boyunca ortalama bir manyetik akı yoğunluğunu tespit edip, buradan akma gerilmesini elde ettiler. Optimize edilmiş MR valfin performansını aynı geometri ile üretilmiş bir ER damperin performansı ile hem analitik hem de nümerik tekniklere karşılaştırdılar ve MR valfin aynı boyutlardaki ER valften daha iyi performansa sahip olduğunu gösterdiler. Nguyen vd. [5] yaptıkları optimizasyon çalışması ile MR valfin optimal geometrik boyutlarını elde ettiler. Bu yaptıkları çalışmada, silindirin çapı ve uzunluğu, akışkan

viskozitesi, debi ve kanal genişliğini sabit alarak, manyetik akı yoğunluğu, basınç düşümü ve dinamik aralık tasarım değişkenleri olarak yakınsaması sağlandı, bunlarla beraber bu yakınsama sürecine bağlı olarak valf gövdesi kalınlığı, bobin genişliği, aktif uzunluk gibi değerlerin optimal sonuçları bulundu. Nguyen vd. [6] güç tüketimi ve zaman sabitini göz önüne alarak FEM ile bir MR valfin optimal tasarımını gerçekleştirdiler. Çalışmasında MR valf kanalındaki basınç düşümünü kontrol eden bobine uygulanan gücü minimize etmeyi amaçladılar. Ortaya koydukları bu optimizasyon probleminde parametreleri, uygulanan akım, bobin teli büyüklüğü ve geometrik boyutlar olarak tanımladılar. Çalışmada, sabit silindirik çapı ve uzunluğunun yanında sabit bir dar kanal genişliği, sabit bir debi kabulü ile, güç tüketimi, zaman sabiti, manyetik akı yoğunluğu ve basınç düşümü değerleri tasarım değişkenleri olarak tespit edildi ve bu değerler yakınsanırken valf dış gövde kalınlığı, uygulanan akım, bobin genişliği ve aktif uzunluk değerlerinin de buna bağlı olarak optimal sonuçları elde edildi. Yang vd. [7] bir MR cihazı karakteristiğinin tüm gereksinimlerine göre bir MR cihaz tasarım yöntemi geliştirdiler. Çalışmasında hedeflenen kuvveti amaç denklemini yapan, hacimsel oran, manyetik alan şiddeti, zaman sabiti, kayıp güç oranını ise bir kısıt fonksiyonu olarak kullanılan bir optimizasyon prosedürü geliştirdiler. Sabit silindirik çapı ve uzunluğu ve sabit kanal genişliği ile yaptığı analizde değişen sarım sayıları için, damper kuvveti, manyetik alan şiddeti, zaman sabiti, kayıp güç oranını buldular. Nguyen ve Choi [8], FEM temelinde bir MR şok sönümleyicinin optimal tasarımını yaptıkları çalışmalarında kullandıkları amaç fonksiyonunda, damper kuvveti, dinamik aralık ve şok sönümleyicinin zaman sabiti yer aldı. Bu optimizasyon sürecinde bobin genişliği, aktif uzunluk, manyetik alan geri dönüş genişliği ve kanal genişliği gibi tasarım değişkenlerinin değerlerinin de optimal sonuçlarını elde ettiler. Nguyen ve Choi [9] yaptığı çalışmadan deneysel sonuçlara ihtiyaç duymayan ve ER akışkanın lineer olmayan davranışlarını da göz önüne alarak yeni bir dinamik model önerdiler. ER damperin yapılandırmasını tanımladıktan sonra Bingham modeli temelinde damperin sanki-statik modelini yaptılar. Önerdikleri bu modeli ile elde ettiği sonuçlarını model geçerliliğini değerlendirmek için deneysel olarak elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırdılar. Karakoc vd. [10] bir otomotiv MR fren sistemlerinin tasarımı için kullandıkları optimizasyon algoritmasıyla, tasarım parametrelerinin alt ve üst değerlerini aradıkları optimum tasarım değerleri elde ettiler. Aynı zamanda manyetik akı yoğunluğunu ve MR fren içindeki ısı dağılımını elde etmek bir sonlu eleman analizi gerçekleştirdiler. Ozan ve Gurocak [11] MR-Frenin optimum konfigürasyonunu sadece geometrik optimizasyon değil, aynı zamanda akım, bobin dönüş sayısı ve bobin tel çapı gibi diğer parametreleri de içerecek şekilde elde ettiler. Optimizasyon yöntemini, Taguchi deneysel tasarım metodu ve manyetik analiz için sonlu elemanlar analizi ile birlikte kullanan geliştirilmiş bir yazılım kullanarak gerçekleştirdiler. Ayrıca her parametrenin önemli veya önemsiz olduğunu belirlemek için ANOVA analizi kullandılar. Parlak vd. [12] Taguchi deneysel tasarım yaklaşımı kullanılarak bir MR damperin optimum konfigürasyonu ile ilgilendiler. MR damperin optimal çözümleri maksimum dinamik aralık ve maksimum damper kuvveti için ayrı ayrı değerlendirdiler. Çalışmaları neticesinde elde edilen optimum damper konfigürasyonları, doğrulama için imal edildi ve test edildi. Doğrulama testleri, amortisörlerin belirtilen sönüm kuvveti ve dinamik aralığı sağladığını gösterdiler. Kara [13] DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğine kuru işleme koşullarında bir tornalama işlemi uygulayarak yaptığı çalışmasında deneyleri, Taguchi L9 ortogonal dizisine göre yaptı ve test sonuçlarının değerlendirilmesinde (S/N) oranları kullandı. Karabatak ve Kara [14] AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında kesme parametrelerinin performansları araştırılmış ve optimum işleme şartları tespit edilmesi için Taguchi L9 ortogonal (dikey) dizinine göre yapmış ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı esas almışlardır.

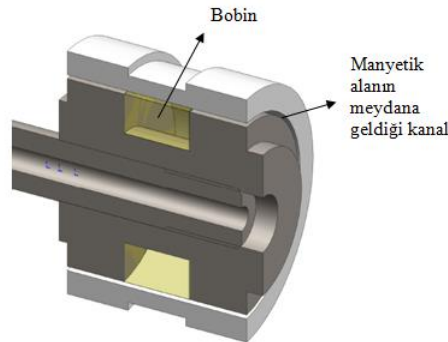
Bu çalışmanın amacı bir MR damperin tasarımını, yüksek sıcaklığın damperin performansı üzerinde olumsuz etkilerini göz önüne alarak sabit sıcaklık altında testler yaparak optimal damper tasarımını bu şartlarla belirlemek olmuştur. Aynı zamanda farklı akımlar altında yapılan testler optimal tasarım parametrelerinin elde edilmesini zorlaştırdığından, sabit akım değerleri ile testler gerçekleştirilmiştir.

Test sonuçları, Taguchi yöntemi ile ayrı ayrı maksimum dinamik aralık ve sönüm kuvveti sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir. Analiz, her bir tasarım parametresinin, sıcaklık etkilerinden ve akımdan bağımsız olarak damper performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Taguchi yöntemi ile geometrik boyut haricindeki diğer etkilerden bağımsız olarak elde edilen optimal bir damper konfigürasyonunun doğrulanması için de testler yapılmıştır.

II. MR DAMPER

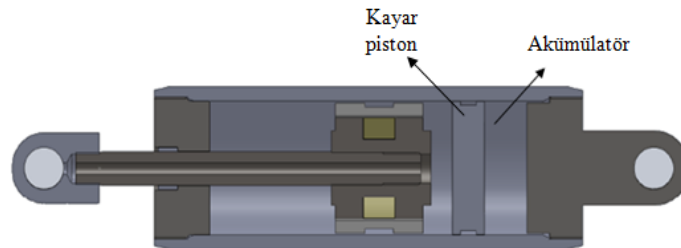
MR damperde, yüksek basınçlı bir akışkan bir dar kanal boyunca kuvvetlendirilir ve sonuçta akışkan bu dar kanalın dışına doğru akarken basıncında bir düşme meydana gelir. Dar kanal boyunca yapılan bu kuvvetlendirme, bu kanal boyunca MR akışkana bir manyetik alan uygulanmasıyla etkin hale geçirilir. Bu manyetik alan, sıvı içindeki mikron seviyesinde çapa sahip olan demir parçacıklarının akış alanına paralel olarak sütun şeklinde yerleşmesine sebep olur. Bu oluşan zincir benzeri yapı akışkanın akmasına karşı bir direnç oluşturur, bundan dolayı akışkan görünür viskozitesinde bir yükselme meydana gelir. Akışkanın bu değişimi, yükselen manyetik alan ile beraber büyüyen bir akma gerilmesi ile sonuçlanacaktır. Bu manyetik alanın varlığı altında MR akışkanlar newton tipi olmayan davranış sergilerler.

Tasarlanan MR damperde, akışkan piston kafası üzerindeki kanal aracılığıyla silindirin diğer tarafına geçebilmektedir (Şekil 1).



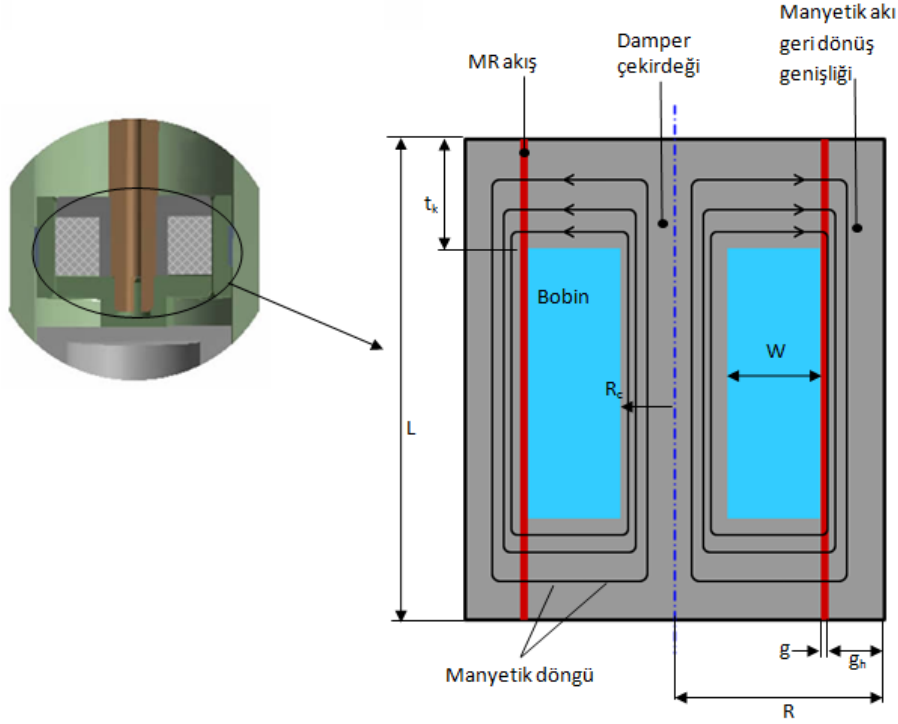
Şekil 1. Akışkanın silindirin diğer tarafına geçtiği ve manyetik alan uygulanan kanal

Ayrıca MR damperlerde, milin silindir içine girmesi ile oluşan basınç farkını dengelemek için bir akümülatör kullanılmıştır. Akümülatör, çalışma sırasında akışkanda kavitasyona engel olur. Aynı zamanda akışkanın termal genişlemesinin yanında piston çubuğu tarafından yer değiştirilen akışkan hacmini hesaba katar, bir nevi damper içindeki yay gibi hareket eder.



Şekil 2. MR damperde kayar piston mekanizması ile sağlanan akümülatör.

Şekil 3’de tek bobinli ve halkasal kanallı bir MR dampere manyetik alan uygulandığında manyetik döngü yapısı ve önemli boyutları görülmektedir. Burada L kanal uzunluğu, g_h manyetik akı geri dönüş genişliği, g kanalın genişliği, t_k aktif uzunluk, R piston kafası yarıçapı, R_c piston göbeği yarıçapı ve W bobin genişliğidir.



Şekil 3. MR damperdeki manyetik döngü

Bobine bir manyetik alan uygulandığında, akı çizgileri akışa karşı direnç meydana getirecek olan iki uçtaki kutupbaşlarına dik yöndedir. Akışa karşı direncin meydana bu aktif uzunluk olarak da adlandırılır. MR etki sadece bu aktif hacim içinde meydana gelmektedir. Bu kanal boyunca meydana gelen basınç düşümü, Nguyen ve Choi [9] tarafından belirtilen iki paralel plaka arasındaki kanal boyunca olan basınç düşümüne denk olduğu varsayılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır

$$\Delta P = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{\tau} = \frac{6Q\mu L}{\pi R_1 g^3} + c \frac{2t_k}{g} \tau_y \quad (1)$$

Burada ΔP_{μ} viskoz yani kontrol edilemeyen basınç düşümü ve ΔP_{τ} manyetik alan oluşumuna bağlı olarak akma gerilmesinden kaynaklanan yani kontrol edilebilen basınç düşümüdür. τ_y uygulanan manyetik alan ile değişen ve bir akışkan özelliği olan akma gerilmesidir. Q damper boyunca olan debidir ve piston hızından hesaplanır. Daha önde de belirtildiği gibi R_1 halkasal kanalın ortalama yarıçapıdır. c akış hızı profiline bağlı bir katsayıdır ve minimum 2,07 ile maksimum 3,07 arasında değişen bir değere sahiptir.

MR damper tarafından üretilen toplam kuvvet üç bileşenden meydana gelmektedir (Denklem 2). F_{μ} , viskoz kuvvetlerden kaynaklanan kuvvet, F_s , damperin mekanik bileşenleri arasındaki hareketten kaynaklanan sürtünme kuvveti ve MR akışkanının içindeki demir partiküllerinin neden olduğu manyetik alan kuvveti F_{τ} , olmak üzere toplam damper kuvveti;

$$F = F_{\mu} + F_{\tau} + F_s \quad (2)$$

ile ifade edilir.

Bu kuvvetlerden F_μ ve F_s herhangi bir akışkan hızına göre sabit bir kuvvet ürettiklerinden dolayı kontrol edilemeyen kuvvet olarak adlandırılırlar. F_τ ise uygulanan manyetik alan ile değişen kontrol edilebilir kuvvet olarak adlandırılır. Toplam kuvvetin kontrol edilemeyen kuvvete oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir parametre olan dinamik aralık, D , MR damperin performansı değerlendirmek için kullanılır.

Kontrol edilebilir kuvvet ve dinamik aralık MR damperin performansını değerlendirmek için en önemli iki parametredir ve dinamik aralık aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$D = 1 + \frac{F_\tau}{F_\mu + F_s} \quad (3)$$

Denklemdaki viskoz kuvvet manyetik alan kuvveti sırasıyla;

$$F_\mu = u_p (A_p - A_k) \frac{6\mu L A_p}{\pi R_1 g^3} \quad (4)$$

$$F_\tau = c \frac{2t_k}{g} A_p \tau_y \text{sgn}(u_p) \quad (5)$$

şeklinde. Burada A_p ve A_k sırasıyla piston kafasının ve piston milinin kesit alanlarıdır. R_1 ise piston kafası ortala kesit alanıdır.

III. DENEYSEL TASARIM

Deney Tasarımı (DOE), birden çok değişkenin etkilerini eş zamanlı olarak incelemek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Dr. Genechi Taguchi, üretilen ürünlerin kalitesini iyileştirmenin yollarını araştıran bir Japon bilim insanıydı. Taguchi'nin önerdiği kalite mühendisliği yöntemi, Taguchi yöntemi veya Taguchi deneysel tasarım yöntemi olarak yaygın olarak bilinir. Deneyler düzenlemek için, her biri çeşitli deneysel durumlar için kullanılan özel birkaç ortogonal dizi oluşturdu. Tam faktöriyel deneyler yapmak çoğu zaman yüksek maliyetli olmakta ve zaman almaktadır. Ortogonal diziler DOE tekniğini deneylerin boyutunu azaltarak daha uygun hale getirmek için geliştirilmiştir. Taguchi, grup içindeki verilerin değişkenliğini yakalamak, böylece kalite karakteristiğini ölçmek ve daha sonra optimum koşulları belirlemek için sinyal-gürültü (S/N) oranının kullanılmasını önermiştir. Performans istatistiği, kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisinin araştırılmasında kullanılmaktadır, böylece kontrol edilebilen faktörler için en uygun bileşenler elde edilebilmektedir [15].

Taguchi üç tane S/N oranı geliştirmiştir. Bunlar aşağıdaki verilmiştir.

Karakteristik tipi	S/N Oranı
<i>En küçük en iyi</i>	$-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right)$
<i>Hedef değer en iyi</i>	$-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum (y_i - y_0)^2 \right)$

$$\text{En büyük en iyi} \quad -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right)$$

Burada y_i deney ölçüm sonuçları ve y_0 ise hedef ölçüm sonucudur.

DeneySEL tasarımda, Şekil 3’de gösterilen damperin geometrik boyutlarının dördü tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Her parametre için 3 seviye tespit edilmiştir. Bu parametre ve seviyeler aşağıda Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. MR damper için tespit edilen parametreler ve seviyeleri

Parametreler	1. seviye	2. seviye	3. seviye
Kanal genişliği (g)	0,4mm	0,6mm	0,8mm
Aktif uzunluk (t_k)	3mm	4mm	5mm
Çekirdek çapı (R_c)	7mm	7.5mm	8mm
Kanal uzunluğu (L)	20mm	21mm	22mm

Belirlene parametre ve seviye sayısına göre uygun olan L9 ortogonal dizisi seçilir. Tabloda parametre seviyelerinin L9 dizisine göre dağıtılmış hali ve Şekil 3 üzerindeki diğer büyüklüklerin aldıkları değerler verilmiştir.

Tablo 2. MR damperlerin imalat parametreleri ve seviyeleri

	g	t_k	L	R_c	g_h [mm]	W (bobin genişliği) [mm]	N (sarım sayısı)
Damper 1	0,4	3	20	7	2	5,10	120
Damper 2	0,4	4	21	7,5	2	4,60	120
Damper 3	0,4	5	22	8	2	4,10	120
Damper 4	0,6	3	22	7,5	2	4,50	120
Damper 5	0,6	4	20	8	2	4,00	120
Damper 6	0,6	5	21	7	2	5,00	120
Damper 7	0,8	3	21	8	2	3,90	120
Damper 8	0,8	4	22	7	2	4,90	120
Damper 9	0,8	5	20	7,5	2	4,40	120

Bu 9 damperin bu büyüklükler ile imatları gerçekleştirilmiştir.

IV. TESTLER

Çalışma esnasında, MR damperlerin test edilmesinde, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında yer alan Roehrig MK-

2150 test cihazı (Şekil 4) ve deney sonuçlarını bu cihazdan okuyabilecek aynı firmaya ait olan SHOCK™ 6.3 yazılımı kullanılmıştır.

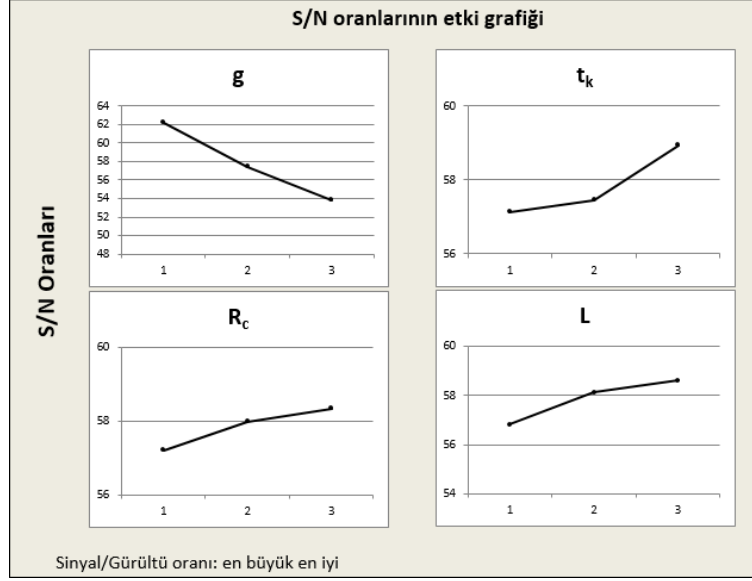


Şekil 4. Deney düzeneği genel görünüşü

Her test 1A akım uygulanarak, 0,1 m/s hızda, 3 kez tekrar edilmiş ve her testin sonucunda MR damperin Kuvvet-Yerdeğiştirme ve Kuvvet-Hız grafikleri elde edilmiştir. Değerlendirmeler için en büyük kuvvet değerleri gözönüne alınmıştır.

V. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

En büyük kuvvet değerini elde etmek için yapılan analiz sonuçlarına göre Şekil 5'deki S/N oranları elde edilmiştir. Bu sonuca göre S/N değerinin her zaman en büyüğü en iyi seçim olacağı için en büyük kuvvet değerini elde etmek için kanal genişliğinin 1. seviyesi, aktif uzunluk, çekirdek yarıçapının ve kanal uzunluğunun 3. Seviyeleri optimal seçimler olacaktır.



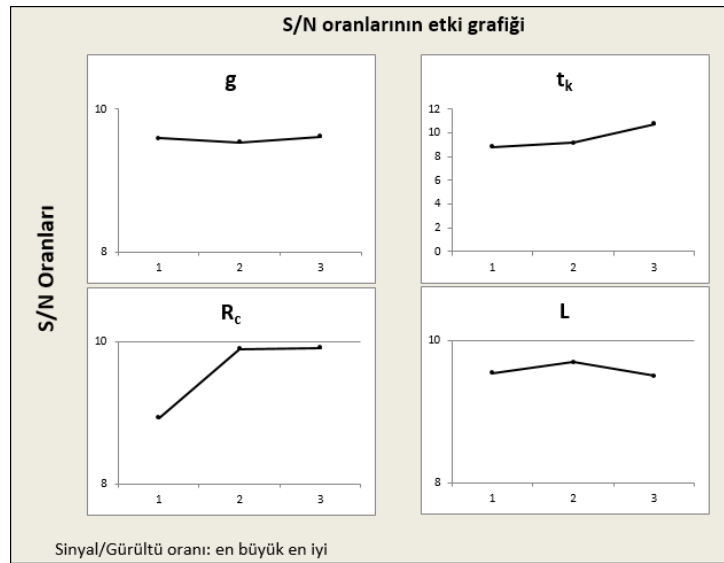
Şekil 5. En büyük damper kuvveti analizi için S/N oranları

Tablo 3. En büyük damper kuvveti için elde edilen optimal seviyeler

g	tk	R_c	L
0,4 mm	5mm	8,0mm	22mm

Tablo 3’de verilen optimal damper tasarımı Tablo 2’de de verilen Damper 3’tür. Sonuç üzerinde de en baskın parametrenin kanal genişliği olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

En büyük dinamik aralığı elde etmek için yapılan analiz sonuçlarına göre Şekil 6’daki S/N oranları elde edilmiştir. Bu sonuca göre en büyük dinamik aralık değerini elde etmek için kanal genişliği, aktif uzunluk ve çekirdek yarıçapının 3. seviyeleri ve kanal uzunluğunun 2. seviyesi optimal seçimler olacaktır. Ayrıca burada en baskın parametrenin aktif uzunluk olduğu görülmektedir. Bu damperin imal edilip test edilmesiyle elde edilebilecek olan S/N ve dinamik oran değerleri Tablo 4’de verilmiştir.



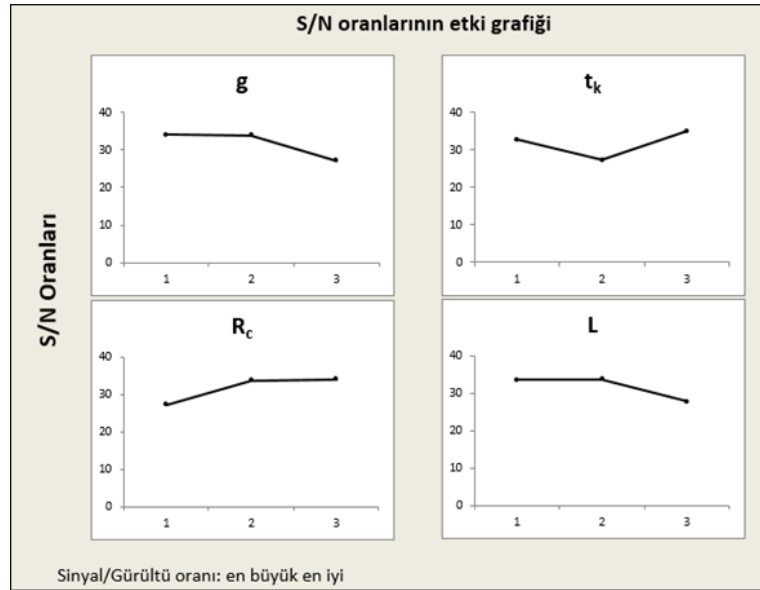
Şekil 6. En büyük dinamik aralık kuvveti analizi için S/N oranları

Tablo 4. En büyük dinamik aralık için elde edilen optimal seviyeler

	Seviye	Değer
g	3	0,8 mm
t_k	3	5 mm
R_c	3	8,0 mm
L	2	21 mm
S/N		11,24
D_{opt}		3,647

Hedef damper kuvveti olarak 1500 N (%40 etkili) ve hedef dinamik aralık olarak 6 (%60) belirlenip beraber bir değerlendirme yapıldığında elde edilen S/N oranları Şekil 7’de verilmiştir. Bu sonuca göre kanal genişliğinin 1. seviyesi, aktif uzunluğun 3. seviyesi ve çekirdek yarıçapının ve kanal uzunluğunun 3. seviyeleri optimal seçimler olduğu anlaşılmaktadır.

Burada yine en baskın parametre kanal genişliği, sonra da aktif uzunluktur. Bu damperin imal edilip test edilmesiyle elde edilebilecek olan S/N ve kuvvet ve dinamik oran değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Hedef kuvvet ve dinamik oran değerlerinin sağlanamadığı görülmektedir.



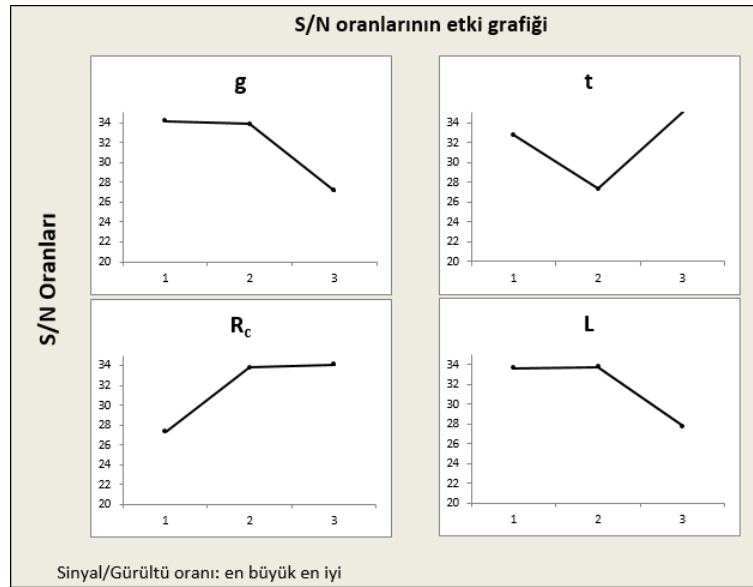
Şekil 7. Hedef damper kuvveti ve dinamik aralık analizi için S/N oranları

Tablo 5. *Hedef damper kuvveti ve dinamik aralık için elde edilen optimal seviyeler*

	Seviye	Değer
g	1	0,4 mm
t_k	3	5 mm
R_c	2	7,5 mm
L	2	21 mm
S/N		40,557
F		913,29 N
D		4,732

Tabloda verilen F ve D Değerleri elde edilen optimal tasarımdan beklenen kuvvet ve dinamik aralık değerleridir.

Bu damper testlerine göre elde edilebilecek olan en büyük damper kuvveti ve dinamik aralık değerleri beraber değerlendirildiğinde hesaplanan S/N oranları Şekil 8’de verilmiştir. Bu sonuca göre tüm parametreler sonuç üzerinde nerdeyse eşit bir etkiye sahiptir. Buna Tablo 6’da verilen optimal seviyelere göre elde edilebilecek olan en büyük kuvvet 985,55 N ve 5.1 dinamik aralık değeridir.



Şekil 8. *En büyük damper kuvveti ve dinamik aralık analizi için S/N oranları*

Tablo 6. En büyük damper kuvveti ve dinamik aralık için elde edilen optimal seviyeler

	Seviye	Değer
g	1	0,4 mm
t_k	3	5 mm
R_c	3	8,0 mm
L	2	21 mm
S/N		41,888
F		985,55 N
D		5,1

Taguchi deneysel tasarım metoduna göre yapılmış olan bu deneysel çalışmada bir MR damperin sabit sıcaklık ve akım değerlerinde optimal tasarımları aranmıştır. Belirlenen tasarım parametreleri Kanal genişliği (g), aktif uzunluk(t_k), Çekirdek çapı (R_c) ve Kanal uzunluğu (L) dur. Deney tasarımında, dokuz damper imal edilmiş ve test edilmiştir.

Taguchi yöntemi, maksimum damper kuvveti ve dinamik oran için ayrı ayrı optimum damper tasarımlarını elde etmek için uygulanmıştır. Sonuçta en büyük kuvvet, en büyük dinamik aralık, hedef kuvvet ve dinamik aralık ve en büyük kuvvet ve dinamik aralık için dört farklı damper tasarımları elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en büyük kuvvet için önerilen optimal tasarım, testi yapılan Damper 3'tür. Hedef kuvvet ve dinamik aralık için önerilen damper istenen hedef değerlerinin sağlamamaktadır. Dinamik aralıkta en fazla 5.1 değerine çıkabilmekte ancak bu da 985,55 N'luk bir kuvvete sahip damper ile yapılmaktadır. Ancak dinamik aralık göz edildiğinde damper kuvveti 1688 N'a kadar çıkmaktadır, ancak bu durumda dinamik aralık 3,8'de kalmaktadır.

Parametreler kendi içinde değerlendirildiğinde kanal genişliğinin damper kuvveti üzerinde etkili olduğu görülürken aktif uzunluk ise dinamik aralık üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür.

Böylece MR damper için gürültü sayılabilecek olan ve damperin performansını önemli oranda etkileyen sıcaklık etkisi nötralize edilerek damperin performansı üzerinde önemli etkiye sahip olan parametrelerin optimal seviyeleri elde edilmiştir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Hitchcock, G.H., "A Novel Magneto-rheological Fluid Damper," Master thesis, Mechanical Engineering Department, University of Nevada, Reno. 2002.
- [2] Zhang, H. H., Liao, C. R., Chen, W. M., Huang, S. L., "A magnetic design method of MR fluid dampers and FEM analysis on magnetic saturation," Journal of intelligent material systems and structures. 2006; 17(8-9):813-818.
- [3] Zhu, C., "A disk-type magneto-rheological fluid damper for rotor system vibration control," Journal of Sound and Vibration, 2004; 283(3-5): 1051-1069.

- [4] Rosenfeld, N.C., Wereley, N.M., "Volume-constrained optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers," *Smart Material and Structures*. 2004; 13: 1303–1313.
- [5] Nguyen, Q.H., Han, Y.M., Choi, S.B., Wereley, N.M., "Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method," *Smart Materials and Structures*, 2007; 16: 2242-2252.
- [6] Nguyen, Q.N., Choi, S.B., Wereley, N.M., "Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant," *Smart Materials and Structures*, 2008; 17:12.
- [7] Yang L., Fubin Duan F., Eriksson A., "Analysis of the optimal design strategy of a magnetorheological smart structure," *Smart Material and Structures*. 2008; 17: 8pp.
- [8] Nguyen, Q. N., Choi, S. B., "Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension," *Smart Materials and Structures*. 2009a; 18: 11.
- [9] Nguyen Q.H., Choi S.B., "Dynamic modeling of an electrorheological damper considering the unsteady behavior of electrorheological fluid flow," *Smart Materials and Structures*. 2009b; 18: 8.
- [10] Karakoc K., Park E. J., Suleyman A., "Design considerations for an automotive magnetorheological brake," *Mechatronics*. 2008; 18: 434–447.
- [11] Ozan E., and Gurocak H., "Interactive design optimization of magnetorheological-brake actuators using the Taguchi method," *Smart Materials and Structures* 20.10 (2011): 105027.
- [12] Parlak, Z., Engin T., and Şahin İ., "Optimal magnetorheological damper configuration using the Taguchi experimental design method," *Journal of Mechanical Design* 135.8 (2013): 081008.
- [13] Kara F., "Taguchi optimization of surface roughness and flank wear during the turning of DIN 1.2344 tool steel," *Materials Testing: Vol. 59, No. 10*, pp. 903-908. (2017).
- [14] Karabatak, M. ve Kara, F., "AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Sert Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel Optimizasyonu," *Politeknik Dergisi*, sayfa: 349-355 (2016)
- [15] Ferah, M., "Çok Yanıtlı Taguchi Tasarım Metodu ve Alüminyum Sanayinde Bir Uygulama," *Y. Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi*. 2003.