

## Kısıtlı Açılı Dönel Manyeto-Reolojik Damper Tasarımı ve Geometrik Optimizasyonu

Hakan DOĞAN<sup>1</sup> , İsmail ŞAHİN<sup>2,\*</sup> , Zekeriya PARLAK<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Hidromek Corp., Department of R&D., 06935, Sincan/ANKARA

<sup>2</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Arifiye Vocational School, Department of Electronic and Automation, 54580, Arifiye/ SAKARYA

<sup>3</sup>Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 54187, Serdivan/SAKARYA

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 08/12/2022  
Düzeltilme: 02/04/2023  
Kabul: 10/04/2023

### Anahtar Kelimeler

Kısıtlı Açılı Dönel MR  
Damper  
MR sıvı  
Hesaplamalı Akışkanlar  
Mekanik  
Tork Sönümü

### Article Info:

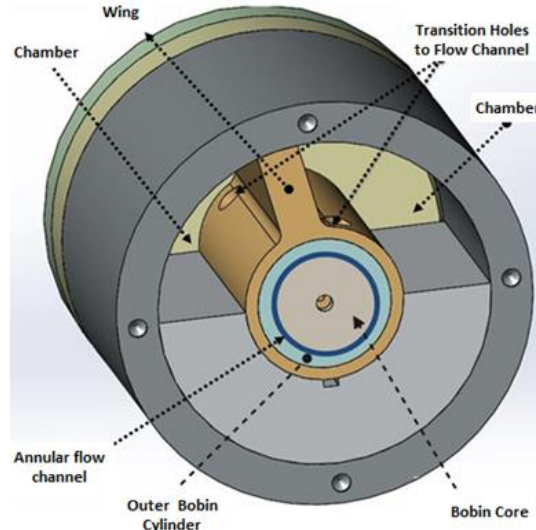
Research article  
Received: 08/12/2022  
Revision: 02/04/2023  
Accepted: 10/04/2023

### Keywords

Limited Angle Rotary MR  
Damper  
MR fluid  
Computational Fluid  
Dynamics  
Torque damping

### Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

A Limited Angle Rotary (LAR) MR damper is a device in which a magnetic field is applied to the MR fluid in a suitable flow region while transferring the MR fluid from one chamber to another in an angularly restricted rotational motion. / Kısıtlı Açılı Dönel (KAD) MR damper, açısız olarak kısıtlanmış dönme hareketiyle MR akışkanı bir hazneden diğerine aktarırken, MR akışkana uygun bir akış bölgesinde manyetik alan uygulandığı bir cihazdır.



Şekil A: KAD-MR Damper geometrisi / Figure A: LAR-MR Damper geometry

### Önemli noktalar (Highlights)

- Geometrik Optimizasyon / Geometric optimization
- Manyetik Analiz ile MR bobin tasarımı / MR coil design with Magnetic Analysis
- ANSYS Fluent ile MR akış analizi / MR flow analysis with ANSYS Fluent

**Amaç (Aim):** Bu çalışmanın amacı, sınırlı bir açıda yüksek tork üretebilen ve tork kontrolüne uygun sınırlı açılı bir dönel MR damper tasarlamaktır. / The aim of this study is to design a rotary damper capable of producing high torque at a limited angle and suitable for torque control.

**Özgünlük (Originality):** Geleneksel damperlerin aksine bu kısıtlı dönel MR damper tasarımında manyetik alanın oluşturulduğu akış bölgesi, damperin merkezinde tasarlanmıştır. Böylece daha küçük bir geometri elde edilmiştir. / Unlike conventional dampers, in this limited rotary MR damper design, the flow region where the magnetic field is generated is designed at the center of the damper. This results in a smaller geometry.

**Bulgular (Results):** Analiz sonuçları incelendiğinde, verilen kısıtlar dahilinde hedeflenen tork değerine ulaşılabileceği gösterilmiştir. / When the analysis results are analyzed, it is shown that the targeted torque value can be achieved within the given constraints.

**Sonuç (Conclusion):** Kısıtlı açılı dönel MR damperin kavramsal tasarım aşamasında tanımlanan 90 Nm hedef tork değerine ulaşmak için yapılan manyetik alan ve akış analizleri ile gerekli geometrik ve bobin parametreler elde edilmiştir. / In order to achieve the target torque value of 90 Nm defined in the conceptual design phase of the restricted angle rotary MR damper, the necessary geometric and coil parameters were obtained through magnetic field and flow analysis.



## Limited Angle Rotary Magneto-Rheological Damper Design and Geometry Optimization

Hakan DOĞAN<sup>1</sup> , İsmail ŞAHİN<sup>2,\*</sup> , Zekeriya PARLAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hidromek Corp., Department of R&D., 06935, Sincan/ANKARA

<sup>2</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Arifiye Vocational School, Department of Electronic and Automation, 54580, Arifiye/ SAKARYA

<sup>3</sup>Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 54187, Serdivan/SAKARYA

### Article Info

Research article  
Received: 08/12/2022  
Revision: 02/04/2023  
Accepted: 10/04/2023

### Keywords

Electro Discharge  
Machining  
Ti-6Al-4V Alloy  
Keyseat  
Measurement Accuracy

### Abstract

Magneto-Rheological (MR) fluid are a type of smart materials that, when excited by a suitable magnetic field, produce very rapid and reversible changes in their apparent viscosity. The ease of controlling the magnetic field allows these liquids to be used as dampers. Today, there are linear damper (damper, shock absorber) and rotary damper (clutch, brake, etc.) designs using these fluids. Limited Angle Rotary MR (LAR-MR) damper is a device in which the MR fluid is exposed to a magnetic field in a defined flow region while transferring the MR fluid from one chamber to another chamber with an angularly restricted rotational motion. In this study, the conceptual design of a new LAR-MR damper was carried out and the design parameters affecting the torque performance were determined with the help of computational fluid dynamics (CFD) to determine the most suitable design parameters for the target values.

## Kısıtlı Açılı Dönel Manyeto-Reolojik Damper Tasarımı ve Geometrik Optimizasyonu

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 08/12/2022  
Düzeltilme: 02/04/2023  
Kabul: 10/04/2023

### Anahtar Kelimeler

Elektro Deşarj  
İşleme  
Ti-6Al-4V Alaşım  
Kama Yuvası  
Ölçüm Doğruluğu

### Öz

Manyeto-Reolojik (MR) sıvı uygun bir manyetik alan ile uyarıldığında, görünür viskozitelerinde çok hızlı ve tersinebilin değişimler elde edilen, akıllı malzemelerin bir türüdür. Manyetik alanın kontrolünün kolay olması sebebiyle, bu sıvıların sönümleyici olarak kullanılabilmelerine olanak sağlamaktadır. Günümüzde bu sıvıların kullanıldığı doğrusal damper (sönümleyici, amortisör) ile, dönel damper (kavrama, fren gibi) tasarımları mevcuttur. Kısıtlı Açılı Dönel MR (KAD-MR) damper ise, açısız olarak sınırlandırılmış dönme hareketiyle MR sıvıyı bir bölmeden diğer bölmeye aktarırken, belirlenen akış bölgesinde MR sıvının manyetik alana maruz bırakıldığı cihazdır. Bu çalışmada yeni bir KAD-MR Damperin kavramsal tasarımı yapılarak ve tork performansını etkileyen tasarım parametrelerinin, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla, belirlenen hedef değerler için en uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

MR sıvı, taşıyıcı bir sıvı (silikon veya hidrokarbon yağ vb.) genellikle 1-10  $\mu\text{m}$  çaplarında, manyetize olabilen küresel biçimli parçacıklardan oluşmaktadır. MR sıvının manyetik alan etkisi altında milisaniyeler içinde Reolojik özelliklerinin değişimi, akış özelliklerinin manyetik alanla kontrol edilebilmesinden dolayı uygulamada dikkati çekmektedir. MR sıvının yarı aktif titreşim kontrol

sistemleri için uygulanabilir olmasının anlaşılmasından sonra bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. MR sıvılar yaygın olarak damper (amortisör) [1-4], fren, kavrama, şok emme gibi sistemlerde uygulama alanı bulmaktadır [5-8].

Dönel MR damper, belirlenen bir açısız hızda dönerken, belirli kontrol bölgelerinde de MR sıvıya uygulanan manyetik alan ile MR sıvının görünür viskozitesinin değiştirilerek tork kontrolünün

sağlandığı yarı aktif kontrol elemanlarıdır. Dönel MR Damperde çıkış parametresi, sönüm kuvveti yerine sönüm momenti [9] olarak ifade edilmektedir. Yapısal tasarımına göre dönel MR damper sürekli açılı ve kısıtlı açılı (KAD-MR) olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. Sürekli açılı dönel MR damper silindir tip ve disk tip olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [10].

Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, daha çok sürekli dönme hareketi yapan kavrama veya fren sistemleri göze çarpmaktadır. Yapılan çalışmalar MR Fren ve/veya kavramanın matematiksel modelinin kurulması [11], çeşitli modeller dikkate alınarak sönüm performansının incelenmesi [12] veya MR fren veya kavramanın sönümlenme performansını etkileyen faktörlerin en uygun parametrelerini, çeşitli araçlarla bulmaya amaçlayan [6,13,14] gibi çalışmalar olduğu görülmektedir.

Sonlu elemanlar analizi ve deneysel test çalışmalarının yapıldığı bir diğer çalışmada ise Giorgetti ve ark., kanal genişliğinin gövde üzerinde ve kanadın dönüş eksenine dik olacak şekilde bir valfin içinde olduğu tasarımlarında, kanadın çalışma açısı  $\pm 7^\circ$  aralığında değiştirerek, 3A'de 200 Nm'ye kadar tork değeri elde etmişlerdir [15]. Bu konudaki diğer bir çalışmada ise, bir arazi aracı için kullanılan damper gövdesinin üzerinde halkasal akışa sahip valf tasarlayıp, elektromanyetik bobini iç radyal akış yoluna yerleştirdikleri bir KAD-MR Damper tasarlanmış ve sonlu elemanlar yardımıyla optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [16].

Zhang ve ark. kısıtlı açılı dönel damperin yarı aktif süspansiyon sistemleri için uygulanabilirliğini, hidrolik çift kanatlı KAD-Damperin yapısını KAD-MR Dampere dönüştürerek incelemişlerdir. Ayrıca dönme momenti üzerine MR etkisini incelemek için matematiksel modeli geliştirilmiştir [17].

Dönel damperlerin bir diğer uygulaması ise koltuk süspansiyon sistemleridir. Deng ve ark. sürücü koltuklarındaki titreşimi azaltmak ve sınır takozlarına çarpma sonucu oluşan darbelerden kaçınmak için değişken sertlik ve değişken sönümlü döner Manyeto Reolojik (MR) amortisörler tasarımı üzerinde çalışmışlardır [18]. Bu tasarımın koltuk süspansiyonunun titreşim zayıflatma performansı, üç titreşim uyarımı, yani harmonik uyarıma, çarpma uyarımı ve rastgele uyarıma altında sayısal ve deneysel olarak değerlendirildi. Hem sayısal hem de deneysel sonuçlar, koltuk süspansiyonunun titreşim kontrol performansının döner MR amortisörleri ile önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Son yıllarda dönel damperlerin protez uygulamalarında araştırılan bir diğer konudur. Saini ve ark. [19] sağlıklı bir insan dizine uygun olarak döner kanatlı Manyeto Reolojik damper tasarlanmıştır. Normal insan dizinin tork ve açısal hız gereksinimleri tasarım limitleri olarak kullanıldığı bu çalışmada çok plakalı MR fren uygulamalarına göre daha uygun bir tasarım elde edildiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmaya özgün olarak, manyetik alan uygulama bölgesi silindirin merkezinde tasarlanmıştır. Buna paralel olarak KAD-MR Damperin hem çalışma açısını hem de tork sönüm değerinin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda dönel MR Damperin kavramsal tasarımı belirlenmiş, sonrasında dinamik modeli oluşturulmuş ve daha sonra akış ve manyetik alan analizleri yardımıyla geometrik optimizasyonu yapılarak maksimum tork sönümünü verecek olan en uygun prototip boyutları belirlenmiştir. Ayrıca damperin tork değeri üzerinde etkili tasarım parametrelerinin etkileri bulunmuştur.

## 2. KAD-MR DAMPER'İN TASARIMI (DESIGN OF LAR-MR DAMPER)

KAD-MR Damper iki ana bölümden oluşmaktadır, ilki MR sıvıya depo görevi de yapan ve bir dönel kanat yardımıyla ikiye ayrılan kanat bölgesi, diğeri ise MR sıvının bir bölümden diğerine geçerken manyetik alana maruz bırakıldığı ve sıvının görünür viskozitesinin değiştirildiği çekirdek bölgesinden oluşmaktadır. Kanat bölgesinde MR sıvı herhangi bir manyetik alana maruz kalmayıp, sadece dönme hareketiyle kanat MR sıvıyı bir odacıktan diğer odacığa harekete zorlamaktadır. (Şekil 1). Her iki sıvı odacığı çekirdek bölgesinden geçen halkasal bir kanal vasıtasıyla birbirine bağlıdır. Çekirdek bölgesinin her iki ucu kanat üzerindeki delikler aracılığıyla odacıklara açılmaktadır. Kanat hareketinin dönme yönüne göre MR sıvı çekirdek bölgede hareket etmektedir.

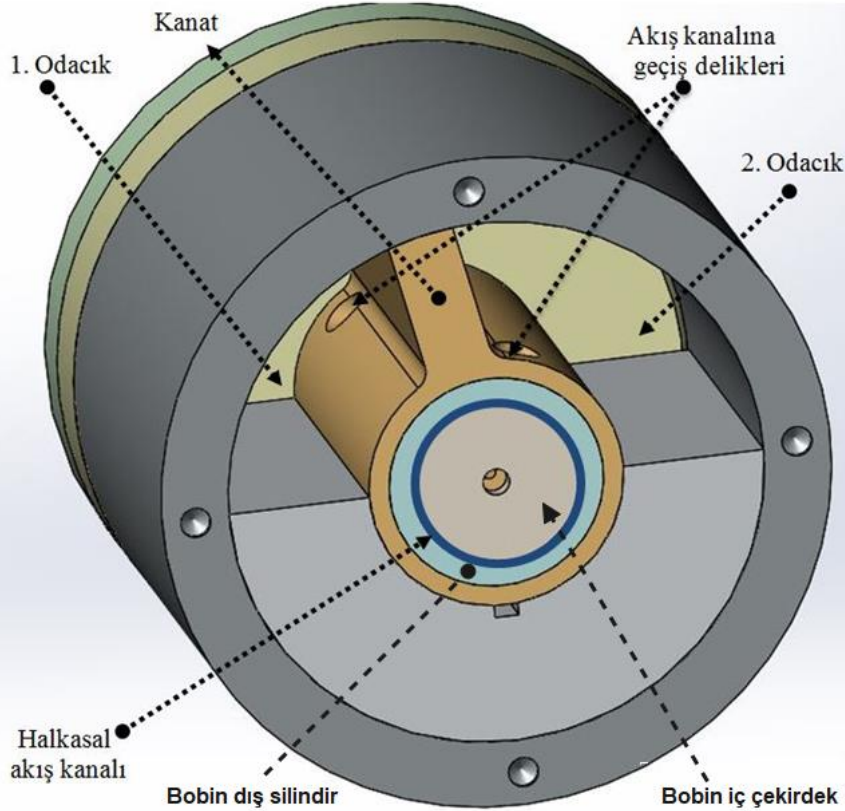
Çekirdek bölgesinde yerleştirilmiş olan bir elektromanyetik bobin yardımı ile MR sıvının geçeceği halkasal bölgenin belirli bir kısmında manyetik alan oluşturulmaktadır. Manyetik alan uygulanmadığı durumda, kanat hareketi ile bir odacıktan diğer odacığa sıvı hareketine sadece viskoz kuvvetler ve sürtünme kuvvetleri engellemeye çalışır.

Bu kuvvetlerin büyüklüğü sıvının viskozitesine, sıcaklığına, kanadın hızına ve geometrik yapıya bağlıdır. Manyetik alan uygulandığında ise kanat hareketi ile çekirdek bölgesindeki halkasal kesitten

akmaya zorlanan MR sıvının akma gerilmesi, manyetik alan uygulanması ile manyetik alanın şiddetine bağlı olarak birkaç milisaniye içinde hızla artar ve akım verildiği müddetçe bu durum devam eder. Şekil 1’te KAD-MR Damperin genel tasarım geometrisi gösterilmiştir.

MR Damper, MR fren, MR kavrama gibi yarı aktif cihazlarda amaç, düşük bir elektrik gücüyle

istenilen fonksiyonu yerine getirerek maksimum verimi elde etmektir. En yüksek verime ulaşabilmek için MR sıvının akma gerilmesini en üst seviyeye çıkarabilmek gerekir. Bu amaçla en uygun manyetik alan şiddetini, en uygun akış ile elde edebilmek amacıyla bu çalışmada hem manyetik alan analizi hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözüm yöntemleri ANSYS paket programı kullanımıyla araştırılmıştır.



Şekil 1. KAD-MR Damper geometrisi (LAR-MR Damper geometry)

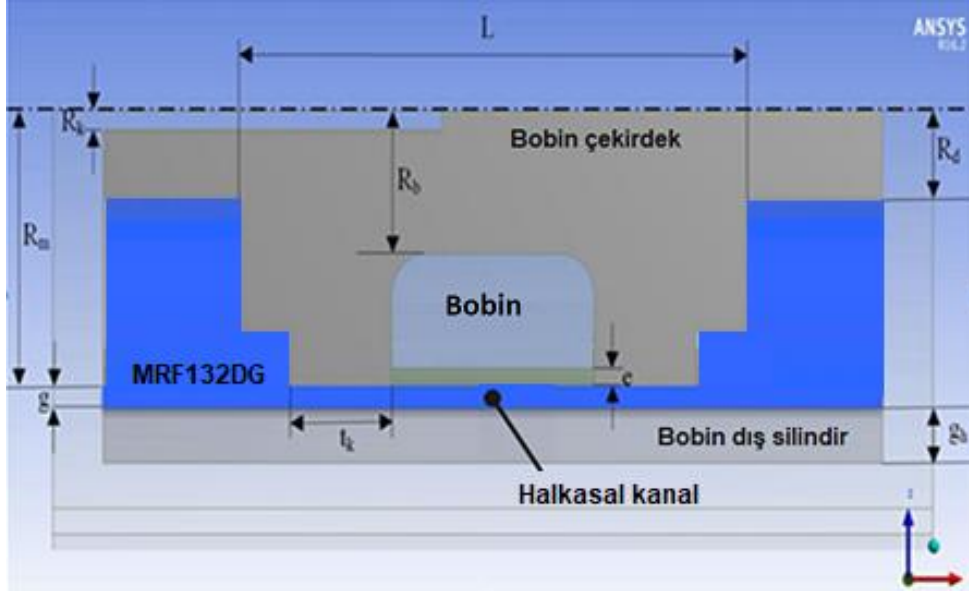
### 3. KAD-MR DAMPERİN MANYETİK ALAN ANALİZİ (MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF LAR-MR DAMPER)

Manyetik alan analizindeki amaç, çekirdek bölgesindeki halka kesitli akış bölgesindeki manyetik alan yoğunluğunun en uygun değerini bulmaktır. Bu sebeple MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı halkasal bölge ANSYS Magnetostatic’de üç boyutlu olarak modellenmiştir. Analizlerde, geometrik büyüklüklerin manyetik alana olan etkisini inceleyebilmek için geometrik parametrelerin birer değişken olarak tanımlandığı parametrik tasarım yapılmıştır. Manyetik alan analizine ait geometrik parametreler Şekil 2’de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

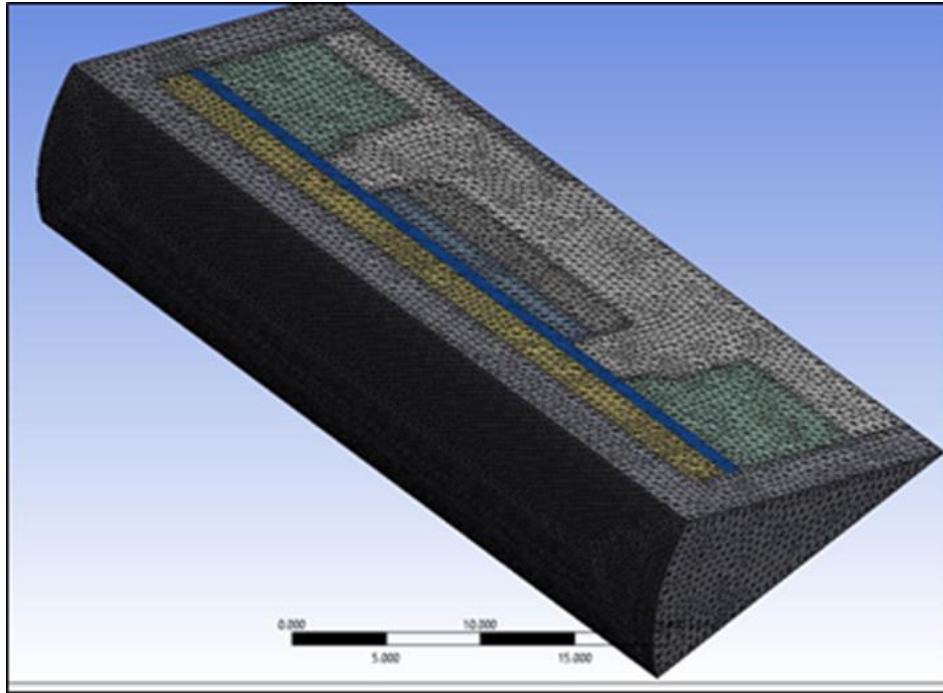
Manyetik alanın meydana geldiği bölge aksel simetrik olduğundan, hesaplama sürecini kısaltmak ve daha hızlı sonuca ulaşmak için tüm geometrinin 30°’lik bir dilimi analiz edilmiştir. Manyetik alan analizi için çözüm ağı geometrisi 346.000 düğüm ve 203.000 dört yüzeyle (tetrahedral) hacim elemanına bölünerek oluşturulmuştur (Şekil 3).

KAD-MR damperde, MR akışkanı olarak Lord firmasının ürettiği MRF-132DG sıvısı kullanılmıştır [20]. Analizler için gerekli olan manyetik akı yoğunluğu (B)-manyetik alan şiddeti (H) verisi MRF-132DG’in üretici firma kataloğundan alınmıştır (Şekil 4). Bu çalışmada mil ve makara malzemesi için St37 çeliği kullanılmış olup, B-H eğrisi Şekil 5’te gösterilmiştir [21]. Bobin ile MR sıvının temasını kesmek için bağlı manyetik geçirgenliği 1 olan epoxy macun kullanılmıştır.

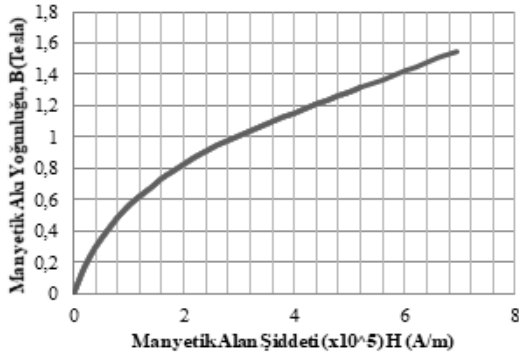
Manyetik alan analizindeki amaç fonksiyonu, en düşük akımda en yüksek manyetik akı yoğunluğunu elde edebilmektir.



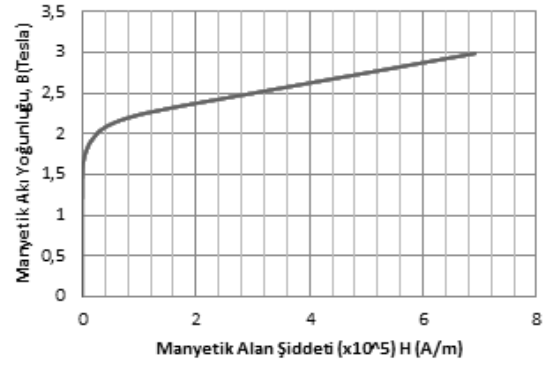
Şekil 2. Manyetik alan analiz geometrisi üzerindeki tasarım parametreleri (Design parameters on the magnetic field analysis geometry)



Şekil 3. Manyetik alan analizi için oluşturulan çözüm ağı (Solution mesh created for magnetic field analysis)



Şekil 4. MRF-132DG 'ye ait B-H grafiği (B-H graph of MRF-132DG)



Şekil 5. St37 çeliğine ait B-H grafiği (B-H graph of St37 steel)

Manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) ile sıvının akma gerilmesi ( $\tau_y$ ) arasındaki ilişkiyi tanımlamak için MRF 132DG [20] kodlu MR sıvının teknik broşüründe doğrudan bir eğri tanımlaması bulunmamaktadır. Bu ilişkiyi tanımlamak için MR sıvıya ait  $B-H$  ve  $H-\tau_y$  grafiklerinden elde edilen veriler kullanılarak, en küçük kareler regresyonu yöntemi elde edilen Denklem (1) [22], akış analizinde kanaldaki sıvı davranışını tanımlamak için kullanılmıştır.

$$\tau_y = 52.962B^4 - 176.51B^3 + 158.79B^2 + 13.708B + 0.1442 \quad (1)$$

Bu denklemde,  $B$ , Tesla ve  $\tau_y$  ise KPa birimlerindedir. Denklem (1) ile MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölgedeki akma gerilmesi değeri elde edilmektedir. Amaç fonksiyonunu uygulayabilmek için Tablo 1'deki geometrik boyutların alt ve üst limit değerleri dikkate alınarak ANSYS "Response Surface Optimization" (RSO) modülüyle 136 adet çözüm yapılmıştır.

Tablo 1. Geometrik parametrelerin sınır değerleri (Limit values of geometric parameters)

Parametre	Alt Sınır	Üst Sınır
$L$ (Bobin çekirdek genişliği)	28mm	32mm
$g$ (Halka kanal yüksekliği)	0,4mm	1mm
$g_h$ (Dış dilindir yüksekliği)	2,5mm	4,1mm
$R_m$ (Bobin çekirdeği yüksekliği)	11,5mm	12,5mm
$R_b$ (Bobin iç çapı)	4,5mm	6,5mm
$t_k$ (Kutup başı genişliği)	4mm	6mm
$I$ (Uygulanan akım)	0,25A	2A
$N_c$ (Bobin sarım sayısı)	100 tur	160 tur

Bu modülün kullanımı sayesinde çıkış parametrelerinin giriş parametrelerine göre değişimi de elde edilebilmiştir. RSO modülünde Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) kullanılarak amaç fonksiyonu sağlayacak olan

optimum tasarım için parametre değerleri belirlenmiş ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu sonuçlar kapsamında bobinin sarıldığı çekirdeğe 0,5 mm çaplı emaye kaplı bobin telinden 23 sıra yatay, 7 sıra üst üste olacak şekilde 160 tur bobin teli sarılacaktır.

Tablo 2. Optimize edilmiş geometrik parametre değerler (Optimized geometric parameter values)

$t_k$	$g$	$g_h$	$R_m$	$R_b$	$L$	$N_c$	$I$ (A)
4	0,55	2,95	12,5	6,5	30	160	1,70

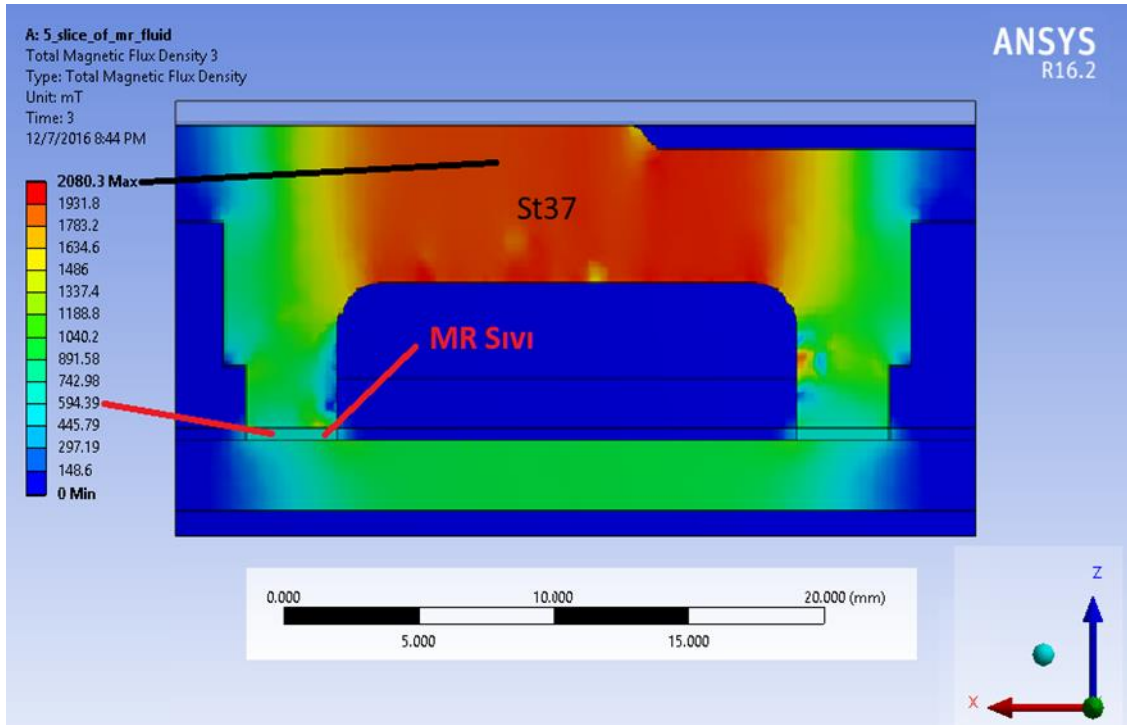
Optimum geometrik değerlere göre yapılan manyetik alan analizi sonucunda elde edilen grafik Şekil 6'da verilmiştir. KAD-MR Damperin

çekirdek bölgesi St37 malzeme üzerinde 2.08 T, MR sıvı üzerinde ise yaklaşık 0,6 T manyetik akı şiddeti elde edildiğini görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde çelik malzeme üzerinde oluşan

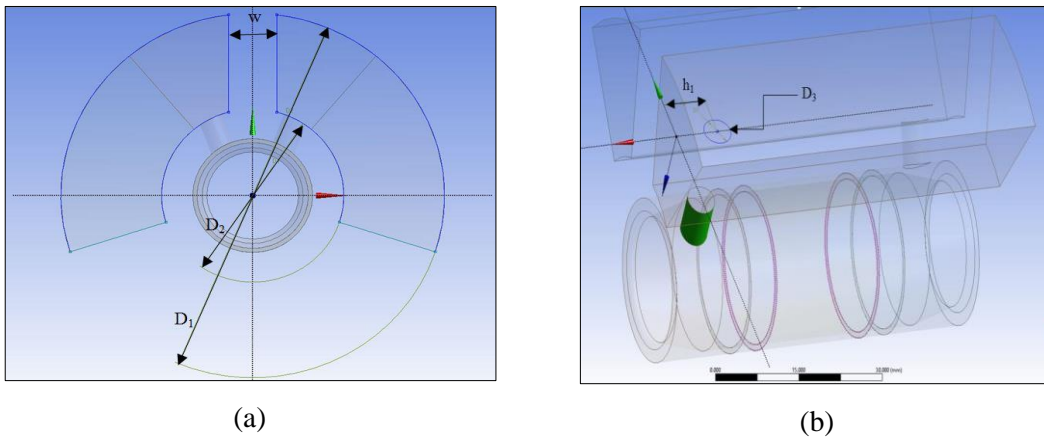
manyetik akı yoğunluğu 2 T değerinden sonra artık duyarlılığını kaybetmeye başlamıştır. Daha fazla manyetik alan şiddeti için harcanan elektrik enerjisi ısı olarak dönüşeceği için bu değer yeterli görülmüştür. Benzer olarak MR sıvı üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu da yaklaşık 32 kPa değerinde bir akma gerilmesi oluşturmaktadır. MRF 132DG'nin B-H grafiğinden bu manyetik akı yoğunluğunda yaklaşık 110 kA/m manyetik alan şiddeti elde edilecektir. Bu değer akış modelinde sıvının tanımlanmasında kullanılacaktır.

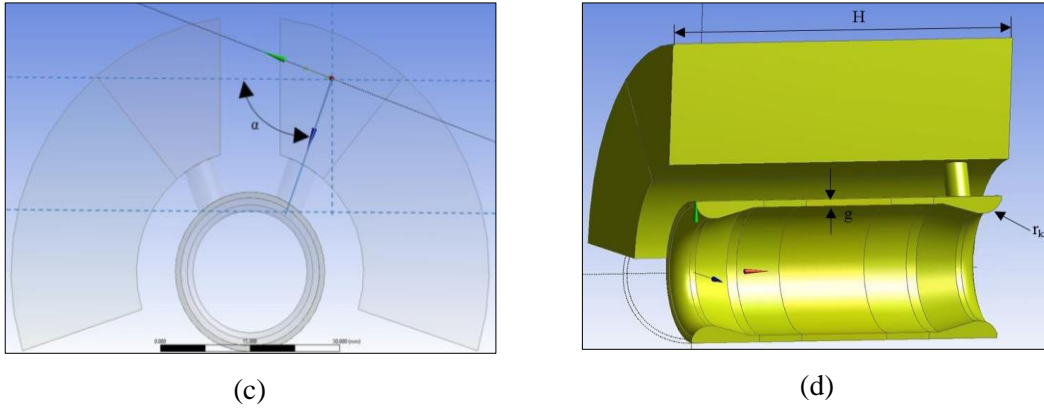
KAD-MR Damperin akış analizi çalışmaları ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 7'de akış hacmi üzerinde, KAD-MR Damperin tasarımındaki geometrik büyüklükler, ANSYS DesignModeller'de parametrik değişkenler olarak tanımlanmıştır. Parametrik tanımlanan büyüklükler ve tasarım için sınır değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Bu değerlerden bazıları yapılan ön çalışmalar neticesinde sabit kabul edilmiş, diğerleri için ise bir alt ve üst aralık belirlenerek çözüm aranmıştır.

#### 4. KAD-MR DAMPERİN HAD ANALİZİ (CFD ANALYSIS OF LAR-MR DAMPER)



Şekil 6. Optimize edilen geometrideki manyetik akı yoğunluğu değerleri (Magnetic flux density values in the optimized geometry)





Şekil 7. Parametrik tanımlanan geometrik büyüklüklerin konumları (a-d) (Locations of geometric quantities defined parametrically)

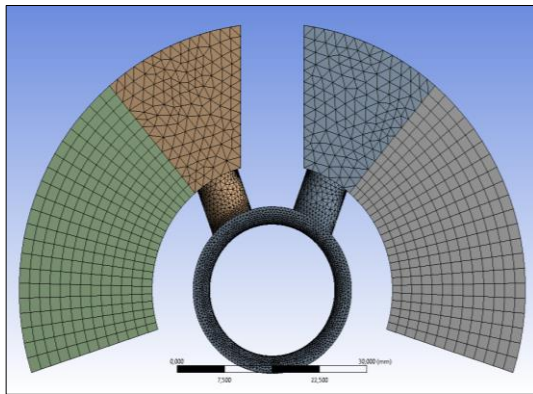
Parametrik tanımlanan büyüklükler ve tasarım için sınır değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu değerlerden bazıları yapılan ön çalışmalar neticesinde sabit kabul edilmiş, diğerleri için ise bir alt ve üst aralık belirlenerek çözüm aranmıştır.

#### 4.1. Çözüm Ağı (Solution Networks)

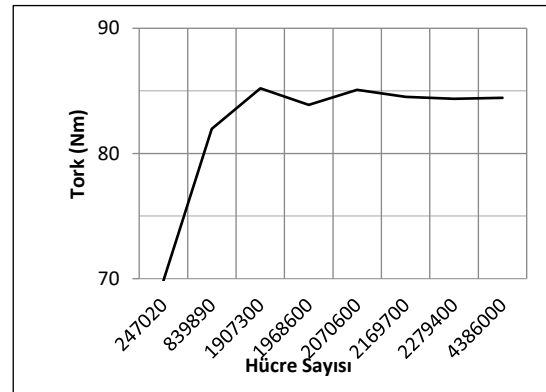
KAD-MR damperin çözüm ağında; zamana bağlı ve deforme olan bir analiz yapılacağı için değişken hacimli geometriye sahip akış bölgelerinde sweep (kare prizma) elemanlar, sabit hacim olarak kalacak olan hacimlerde ise düzgün dörtyüzlü (üçgen piramit) elemanlar kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan çözüm ağı yapısı Şekil 8'de gösterilmiştir. Çözüm ağı yapısı, doğru analiz sonuçları elde etmede etkilidir [23]. Bu amaçla çözüm ağı sayısı arttıkça, belirli bir değerden sonra analiz sonuçları değişmiyorsa ağ bağımsızlığı elde edilmiş olur. Ağ

bağımsızlığının elde edilmesi için analizler yapılmış ve yaklaşık olarak 2000000 hücre sayısından sonra tork değerinin sabit kaldığı Şekil 9'da görülmektedir. Hesaplaması yapılacak olan akış geometrisinin boyutlarına göre değişmek üzere, hesaplama bölgesinde yaklaşık olarak 1352000 düğüm ve 2120000 adet hacim elemanına ayrılmıştır.

HAD analizinde de çözüm ağı çözümünün doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple oluşturulan çözüm ağının kalitesini tanımlayan çeşitli ölçütler bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın dikkate alınan "aspect ratio" ve "skewness" değerleridir. Bu değerler ANSYS programında MESH modülünde de hesaplanarak verilmektedir. Literatür incelendiğinde "aspect ratio" değerinin 10'un altında, "skewness" değerinin ise 0.8 üzerinde olması çözüm için kabul edilebilir değer olarak tanımlanmaktadır [24].



Şekil 8. HAD analizi için çözüm ağı (Solution mesh for CFD analysis)



Şekil 9. Ağ bağımsızlığının grafiksel gösterimi (Graphical representation of mesh independence)



Mesh Metric	Aspect Ratio
Min	1.011
Max	33.341
Average	4.7491
Standard Deviation	2.326

Mesh Metric	Skewness
Min	7.9143e-005
Max	0.8647
Average	0.14599
Standard Deviation	0.14113

(a)

(b)

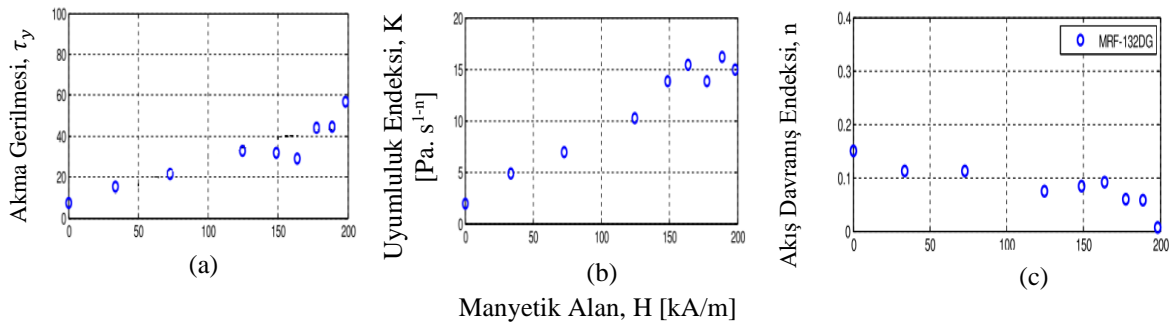
Şekil 10. Mesh Metric değerleri a) Aspect ratio b) Skewness (Mesh Metric values a) Aspect ratio b) Skewness)

#### 4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli (Computational Fluid Dynamics Model)

MR sıvılar manyetik alan uygulandığında Newton tipi olmayan davranış gösterirken, manyetik alan ile uyarılmadığında Newton tipi akışkan davranışı gösterirler. Newton tipi olmayan akışkan davranışını tanımlamak için en yaygın kullanılan modeller Bingham plastik modeli ve Herschel-Bulkley modelleridir. Bu çalışmada, MR sıvının akma sonrası bölgesinde lineer olmayan davranışlarını doğru şekilde tanımlanmak için Herschel-Bulkley modeli kullanılmıştır. Herschel-Bulkley modeli;

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y(B) + K(\dot{\gamma})^n & |\tau| > \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0 & |\tau| < \tau_y \end{aligned} \quad (2)$$

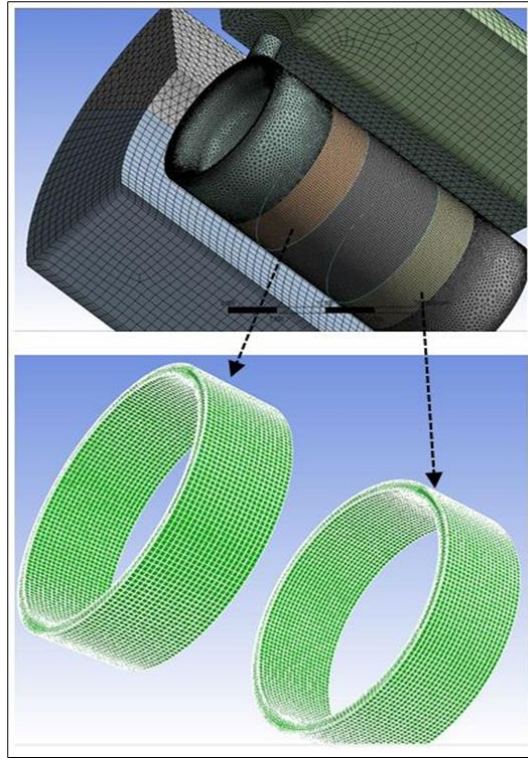
olarak ifade edilmektedir. Denklemden  $\tau$  kayma gerilmesini,  $\dot{\gamma}$  kayma hızını,  $\tau_y(B)$  manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak oluşan dinamik akma gerilmesini,  $K$  uyumluluk endeksi,  $n$  ise akış davranış endeksi olarak ifade edilmektedir. MRF-132DG sıvısına ait  $\tau_y$ ,  $K$  ve  $n$  değerleri Becnel'in çalışmasında [23] manyetik alan şiddetine bağlı olarak Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. MRF-132DG'ye ait Herschel-Bulkley model parametrelerinin manyetik alana bağlı değerleri (Magnetic field dependent values of Herschel-Bulkley model parameters of MRF-132DG)

KAD-MR damperin akış analizi, hareketli çözüm ağı (dinamik ağı, deforme olan ağı) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hareketli çözüm ağı, yüzeylerin hareketi ile ağı yeniden düzenlenmesi esasına dayanır. Dinamik ağı modeli ancak zaman bağımlı analizler ile

çalıştırılabildiğinden, hesaplama süresi uzundur ve yüksek boyutta veri ortaya çıkmaktadır. MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı, böylece akışkanın viskozitenin değiştiği, halka biçimli kanal (Şekil 12) içerisinde, akma gerilmesi sebebiyle nispeten düşük hızlı akışı neticesinde  $Re < 2300$  olduğu için laminer akış olarak modellenmiştir.



Şekil 12. KAD-MR Damperde manyetik etkinin oluştuğu hacimsel bölgeler (Volumetric regions where magnetic effect occurs in LAR-MR Damper)

## 5. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

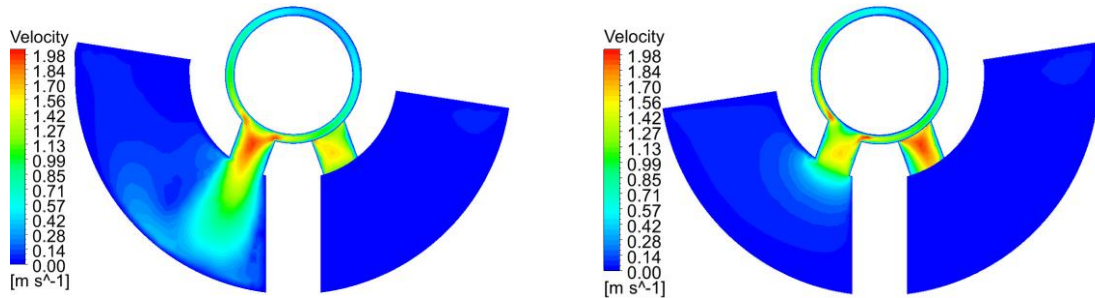
Tablo 3’de verilen parametre sınır ve sabit değerleri için MOGA kullanılarak, manyetik alan etkisi ile kontrol edilebilir tork değerinin ( $T_B$ ), viskoz etkiler nedeniyle oluşan kontrol edilemeyen tork ( $T_V$ ) değerine oranı olan dinamik oranın ( $\lambda$ ) en yüksek olduğu tasarım, optimum tasarım olarak tespit edilmiştir. Optimum tasarım geometrisi ve elde

edilen sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir. Yapılan optimum tasarıma ait olan akış analizine ait görsel sonuçlardan bazıları Şekil 13-14-15’te gösterilmiştir. Şekil 13’de  $8^\circ$ ’lik bir dönme hareketi sonunda akışkanın bir odacıktan diğerine kanal içinde manyetize edilerek akması durumunda oluşan hız konturları görülmektedir. Akışkanın sıkışmaya maruz kaldığı odacıktan dar kanal içine geçişinde ani yön değişimi nedeniyle hızın yükseldiği, kanal içinden genişleme odacığına geçişte ise ani kesit

genişlemesi nedeniyle akış ayrılması oluştuğu ve merkezde daha yüksek hızlı bir akış meydana geldiği görülmektedir.

Tablo 3. Optimize edilmiş geometrik değerler (Optimised geometric values)

$w$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$h_1$	$\alpha$	$H$	$g$	$T_B$	$T_V$	$\lambda$
10 mm	80 mm	38 mm	7 mm	8 mm	$70^\circ$	62 mm	0.55 mm	90.7 N.m	57.4 N.m	1,58

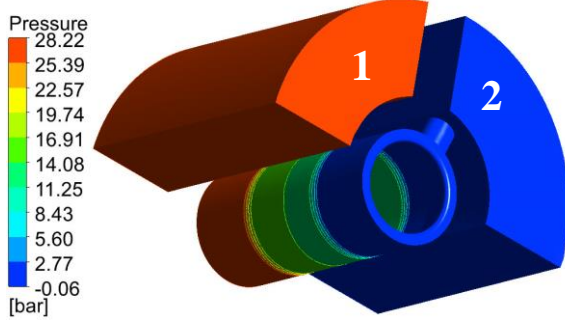


(a)

(b)

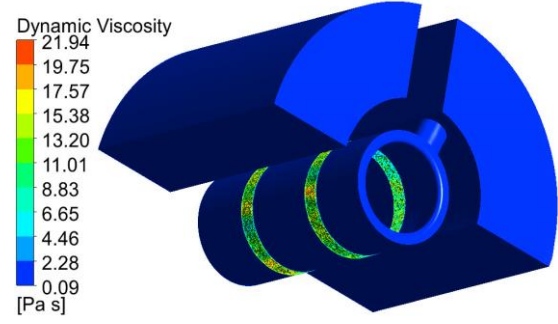
**Şekil 13.** 8°'lik bir dönme hareketi sonunda (a) ön ve (b) arka kesitlerde hız konturlarının değişimi (Variation of velocity contours in (a) front and (b) rear sections after a rotation of 8°)

Şekil 14'de ise dönme pozisyonundaki basınç konturları görülmektedir. Basınç, sıkışma (1 nolu hacim) odasının da en yüksek ve genişleme (2 nolu hacim) odasının da en düşük değerindedir. Bu esnada



**Şekil 14.** 8°'lik bir dönme hareketi esnasında oluşan basınç dağılımı (Pressure distribution during a rotational movement of 8°)

kanal boyunca basıncın bu iki değer arasında değiştiği görülmektedir. Özellikle akışkanın Şekil 15'te gösterilen manyetik alana maruz kaldığı bölümlerde MR etki ile çok şiddetli basınç değişimlerine maruz kaldığı görülmektedir.



**Şekil 15.** Dinamik viskozitenin manyetik alan etkisi ile değişimi (Variation of dynamic viscosity with magnetic field effect)

Tasarım parametrelerinin her birinin sönüm torkuna etkisini belirleyebilmek için Tablo 5'de verilen parametrelere uygun analizler 5 kademeye ayrılarak yapılmıştır. Her bir parametrenin tork ile olan ilişkisi ayrı ayrı grafikler üzerinde çizdirilerek incelenmiştir. Bu parametrelere göre yapılan analizler sonucu elde edilen veriler performans durumlarına göre incelenmiştir.

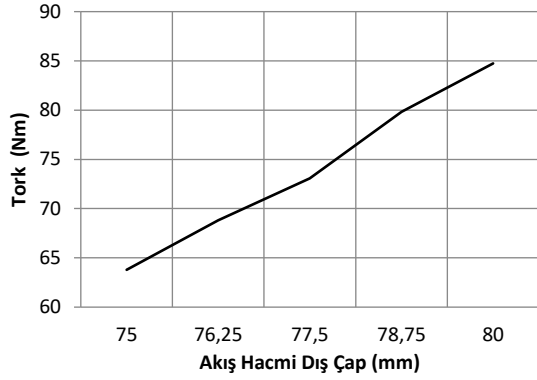
Bu çalışmada hedef tork değeri hedef değer olduğundan, parametrelerin tork değeri üzerinde ne kadar etkisi olduğu kıyaslanmıştır. Bu kapsamda Konik yarıçapı ( $r_k$ ) %3, Kanat kalınlığı delik açısı ( $\alpha$ ) %3,7, delik merkezinin yatay merkezdeki

konumu ( $h_1$ ) %3,8 ve kanat dairesi çapının ( $D_2$ ) tork değişimine etkisi sadece %5 çıktığından bu parametrelerin etkisinin çok az olduğu değerlendirilmiştir.

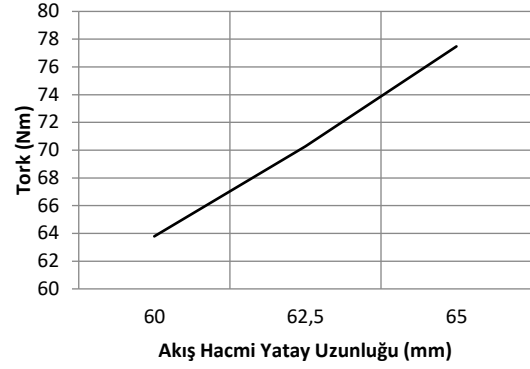
Akış hacmi dış çapı ( $D_1$ ) tork oluşumunda %17,7'lik etki göstermiştir. Akış hacmi dış çapı büyüdükçe daha büyük moment elde edildiğinden, doğru orantılı değişen tork değeri görülmüştür (Şekil 16). Akış hacmi yatay uzunluğu ( $H$ ) büyüdüğünde kanadın süpüreceği hacim artmakta ve daha büyük viskoz kuvvetler oluşmaktadır. Bu veriye bağlı olarak yatay uzunluğu ile tork değeri %19,3'lük etkisi ile doğru orantılı bir değişim belirlenmiştir (Şekil 17).

**Tablo 4.** HAD analizi için tanımlanan parametreler (Parameters defined for CFD analysis)

$w$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$h_1$	$\alpha$	$H$	$g$	$r_k$
6-10	80	38	7	8	70	60	0,55	2
10	75-80	38	7	8	70	60	0,55	2
10	80	38-40	7	8	70	60	0,55	2
10	80	38	5-7	8	70	60	0,55	2
10	80	38	7	7-9	70	60	0,55	2
10	80	38	7	8	65-75	60	0,55	2
10	80	38	7	8	70	60-65	0,55	2
10	80	38	7	8	70	60	0,55-1	2
10	80	38	7	8	70	60	0,55	1-2



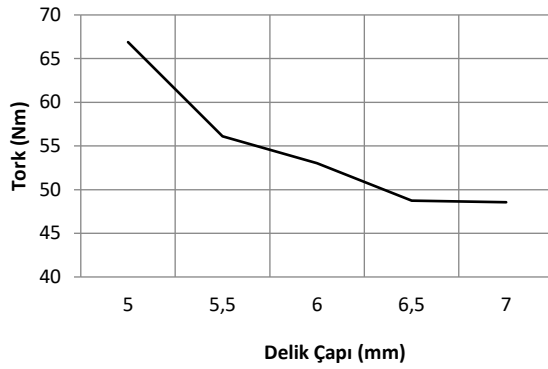
Şekil 16. Akış hacmi dış çapı-tork ilişkisi (Flow volume outer diameter-torque relationship)



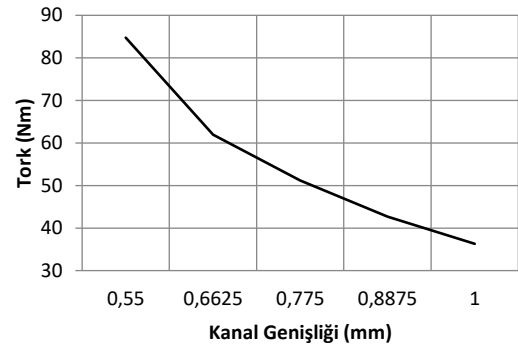
Şekil 17. Akış hacmi yatay uzunluğu-tork ilişkisi (Flow volume horizontal length-torque relationship)

Akışı etkileyen delik çapı ( $D_3$ ) ile tork arasında beklendiği gibi %27,4 gibi yüksek ters orantılı bir ilişki vardır. Delik çapı büyüdükçe, daha az sürtünme kuvveti daha az viskoz kuvvetler oluşmaktadır (Şekil 18). Kanal genişliği ( $g$ ) %56,8 ile manyetik alan analizinde olduğu gibi en büyük

etkiye sahiptir. Kanal genişliği arttıkça, dairesel kanalda MR sıvı daha rahat hareket edebilmekte daha az sürtünme kuvveti ve viskoz kuvvetler oluşmaktadır. Manyetik alan etkisinin tersine, sıvı akışının oluşturduğu basınç düşümünde kanal genişliği ile tork arasında ters orantılı bir ilişki vardır (Şekil 19).



Şekil 18. Kanat dairesi-tork ilişkisi (Wing circle torque relationship)



Şekil 19. Kanal genişliği-tork ilişkisi (Groove width-torque relationship)

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, yarı aktif bir sönümlenme elemanı olarak Kısıtlı Açılı Dönel Manyeto-Reolojik Damper geliştirilmiştir. Akma gerilmesinin kestirimi için ANSYS-Magnetostatic yazılımı kullanılmış ve üç boyutlu analiz yapılmıştır. KAD-MR Damperde MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölge, ANSYS DesignModeller'de çizilerek kritik büyüklükler parametrik olarak tanımlanmıştır. ANSYS RSO programıyla, hedef değer olan maksimum manyetik akı yoğunluğunu en düşük akımda sağlayacak parametrik büyüklükler belirlenmiştir. Optimizasyon algoritması olarak MOGA (Çok Amaçlı Genetik Algoritma) kullanılmıştır. Manyetik alan analizinde belirlenen geometrik boyutlar dahilinde KAD-MR Damper içerisindeki akışın hesaplamalı akışkanlar

dinamiği simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak akış hacmi ANSYS DesignModeller'de oluşturulmuştur. Kanat kalınlığı, akış hacmi dış çapı, kanat dairesi çapı, delik çapı, delik merkezinin dışarıya olan uzaklığı, delik açısı, akış hacmi yatay uzunluğu, kanal genişliği, konik yarıçapı parametre olarak tanımlanmıştır.

Manyetik alan analizinde MR sıvı üzerinde 0,6 T manyetik akı değeri üretecek tasarım gerçekleştirilmiştir. Bunun için kanal genişliğinin çapta 1,1 mm, aktif kanat uzunluğu ise toplamda 8 mm hesaplanmıştır. Manyetik alanı üretmek için 0,5 mm emaye kaplı bobin telinden 160 tur sarılarak istenen manyetik alan, bobine 1,7A akım uygulanarak elde edilmesi hesaplanmıştır. Manyetik alan etkisi ile sağlanan dinamik oran

değeri 1,58 olarak hesaplanmıştır. Newtoniyen olmayan akış bölgesi analizinde de en etkili parametrenin %56,8 gibi bir oranda beklendiği gibi kanal genişliği olduğu belirlenmiştir. İkinci önemli parametre ise kanala giriş çıkışın sağlandığı delik çapının etkisi %27,4 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar genel olarak ele alındığında istenen tork değerinin verilen kısıtlar dahilinde elde edilebildiği göstermektedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Hakan DOĞAN:** Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and wrote the manuscript.

**İsmail ŞAHİN:** Deney ve sonuçların kontrolü ve değerlendirilmesi ve makalenin genel kontrolünü gerçekleştirmiştir.

He carried out the control and evaluation of experiments and results and the overall control of the manuscript.

**Zekeriya PARLAK:** Manyetik alan ve Akış analizlerin kontrolü ve yorumlanmasını gerçekleştirmiştir.

He performed the control and interpretation of magnetic field and flow analyses.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. El-Kafafy, S.M. El-Demerdash, A.-A.M. Rabeih, Automotive Ride Comfort Control Using MR Fluid Damper, *Engineering*. 04 (2012) 179–187. doi:10.4236/eng.2012.44024.
- [2] Q.H. Nguyen, N.D. Nguyen, S.B. Choi, Optimal design and performance evaluation

of a flow-mode MR damper for front-loaded washing machines, *Asia Pacific Journal on Computational Engineering*. 1 (2014). doi:10.1186/2196-1166-1-3.

- [3] J.-H. Kim, J.-H. Oh, Development of an above knee prosthesis using MR damper and leg simulator, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 4 (2001) 3686–3691. doi:10.1109/ROBOT.2001.933191.
- [4] İ. Şahin, Z. Parlak, C. Güneri, Araç Koltuk Süspansiyon Sistemleri İçin Çift Borulu Manyeto-Reolojik Amortisör Tasarımı ve Sayısal Analizleri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 7 (2019) 331–343. doi:10.29109/gujsc.514507.
- [5] G. Sozeri, A. Yılmaz, I. Sahin, Analysis and Comparison of Current Dependent Models of MR (Magnetoreological) Dampers Used in Knee Prosthesis, içinde: 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, 2019: ss. 1–4. doi:10.1109/SIU.2019.8806306.
- [6] J. Huang, J.. Zhang, Y. Yang, Y.. Wei, Analysis and design of a cylindrical magnetorheological fluid brake, *Journal of Materials Processing Technology*. 129 (2002) 559–562. doi:10.1016/S0924-0136(02)00634-9.
- [7] H.T. Guo, W.H. Liao, A novel multifunctional rotary actuator with magnetorheological fluid, *Smart Materials and Structures*. 21 (2012). doi:10.1088/0964-1726/21/6/065012.
- [8] X. Lian, H. Deng, G. Han, M. Ma, X. Zhong, Y. Gao, R. Hu, Self-adapting model for variable stiffness magnetorheological dampers, *Smart Materials and Structures*. 31 (2022) 025006. doi:10.1088/1361-665X/ac3f79.
- [9] A. Giorgetti, N. Baldanzini, M. Biasiotto, P. Citti, Design And Testing Of A MRF Rotational Damper For Vehicle Applications, *Smart Materials and Structures*. 19 (2010) 65006. doi:Artn 065006 Doi 10.1088/0964-1726/19/6/065006.
- [10] F. Imaduddin, S.A. Mazlan, H. Zamzuri, A design and modelling review of rotary magnetorheological damper, *Materials and Design*. 51 (2013) 575–591. doi:10.1016/j.matdes.2013.04.042.

- [11] A. Farjoud, N. Vahdati, Yap Fook Fah, Mathematical Model of Drum-type MR Brakes using Herschel-Bulkley Shear Model, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 19 (2008) 565–572. doi:10.1177/1045389X07077851.
- [12] N.M. Wereley, J.U. Cho, Y.T. Choi, S.B. Choi, Magnetorheological dampers in shear mode, *Smart Materials and Structures*. 17 (2008). doi:10.1088/0964-1726/17/01/015022.
- [13] K. Karakoc, E.J. Park, A. Suleman, Design considerations for an automotive magnetorheological brake, *Mechatronics*. 18 (2008) 434–447. doi:10.1016/j.mechatronics.2008.02.003.
- [14] D. Quamar, C. Sarkar, Optimal Design of Hydraulic Disc Brake for Magnetorheological (MR) Application, *Defence Science Journal*. 72 (2022) 783–792. doi:10.14429/dsj.72.18369.
- [15] A. Giorgetti, N. Baldanzini, M. Biasiotto, P. Citti, Design And Testing Of A MRF Rotational Damper For Vehicle Applications, *Smart Materials and Structures*. 19 (2010) 065006. doi:Artn 065006 Doi 10.1088/0964-1726/19/6/065006.
- [16] L. Yang, S.Z. Chen, B. Zhang, Z.Z. Feng, A Rotary Magnetorheological Damper For A Tracked Vehicle, *Advanced Materials Research*. 328–330 (2011) 1135–1138. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.1135.
- [17] J.Q. Zhang, Z.Z. Feng, Q. Jing, Optimization Analysis Of A New Vane MRF Damper, *Journal of Physics: Conference Series*. 149 (2009) 12087. doi:10.1088/1742-6596/149/1/012087.
- [18] L. Deng, S. Sun, M. Christie, D. Ning, S. Jin, H. Du, S. Zhang, W. Li, Investigation of a seat suspension installed with compact variable stiffness and damping rotary magnetorheological dampers, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 171 (2022) 108802. doi:10.1016/j.ymssp.2022.108802.
- [19] R.S.T. Saini, S. Chandramohan, S. Sujatha, H. Kumar, Design of bypass rotary vane magnetorheological damper for prosthetic knee application, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 32 (2021) 931–942. doi:10.1177/1045389X20942577.
- [20] TechnicalData, MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid, Lord product selector guide: lord magnetorheological fluids. (2019). [https://lordfulfillment.com/pdf/44/DS7015\\_MRF-132DGMRFFluid.pdf](https://lordfulfillment.com/pdf/44/DS7015_MRF-132DGMRFFluid.pdf).
- [21] David Meeker, Finite Element Method Magnetics, (2023). <https://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- [22] Z. Parlak, Manyeto-Reolojik Sıvılı Yarı Aktif Bir Sönümleyici Tasarımı ve Analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [23] A.C. Becnel, High Strength Semi-Active Energy Absorbers Using Shear And Mixed Mode Operation At High Shear Rates, Maryland University, Aerospace Engineering, 2014.
- [24] ANSYS Inc., ANSYS Fluent Meshing User 's Guide, ANSYS, 2015.