

Received: 03.02.2021

Accepted: 03.03.2021

## Santrifuj Pompa için Eddy Akımlı Manyetik Kavramanın Sonlu Elemanlar Analizi

Ahmet FENERCİOĞLU<sup>1\*</sup>, Enes AYDIN<sup>2</sup>, Tuba KOCAER<sup>3</sup>, Kerem YILDIRIM<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Mechatronics Engineering 60250 Tokat, Turkey,  
<sup>2,3,4</sup>KORMAS Elektrikli Motor San.Tic. A.Ş. TOSB İhtisas OSB, 41420 Çayırova / Kocaeli,

### Özet

Eddy akımı, temassız olarak güç ve hareket aktarmak için kullanılabilir. Bunun için döner bir manyetik rotor içerisinde yer alan iletken pompa rotorunda bir eddy akımı indüklenir. Bu akımın etkisi ile pompa rotorunda oluşan manyetik alan Lorentz kuvveti ile rotora temassız güç aktarımı sağlar. Böylece pompalarda salmastra kullanılmadan motor ile pompa tarafı birbirinden tamamen yalıtılmış olur. Manyetik kavrama ile pompalarda sızdırmazlık sağlanarak uzun ömürlü bir pompa elde edilir. Manyetik rotor ile pompa rotoru arasındaki hava aralığı, kutup sayısı, mıknatıs kalınlığı, pompa rotorunun et kalınlığı, malzemenin iletkenliği ve manyetik rotorun hızı manyetik kavramanın verimine ve güç aktarma performansına etki etmektedir. Bu etkiler sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analiz yapan Ansys Maxwell yazılımında analiz edilerek manyetik kavrama tasarımı optimize edilmiştir. SEY analizi çözümlerine göre 6 kutuplu, 8 mm kalınlıkta N52 neodymium mıknatıslı manyetik rotor optimal olarak seçilmiştir. Bu rotorun 4500 d/d hız ile dönmesi durumunda 3 mm hava aralığında, 5mm et kalınlığı olan alüminyum pompa rotorunda 3951 d/d hız ve 0.5 Nm tork ile mekanik güç aktarılmıştır. Bu tasarımda manyetik rotora giren mekanik gücün %87,8 oranında pompaya aktarıldığı hesaplanmıştır. 7 mm kalınlıkta bakır rotor kullanıldığında ise verim %92,3 olarak çözülmüştür. Alüminyum rotorlu tasarım, imalat kolaylığı ve maliyet açısından tercih edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetik kavrama, eddy akımlı kavrama, manyetik kavramalı pompa

## Finite Element Analysis of Eddy Current Magnetic Coupling for Centrifugal Pump

Ahmet Fenercioğlu<sup>1\*</sup>, Enes Aydın<sup>2</sup>, Tuba Kocaer<sup>3</sup>, Kerem Yıldırım<sup>4</sup>

### Abstract

Eddy currents can be used to transfer power and motion without contact. For this, an eddy current is induced in the conductive pump rotor housed in a rotating magnetic rotor. The magnetic field formed in the pump rotor with the effect of this current provides non-contact power transfer to the rotor with the Lorentz force. Thus, the motor and the pump side are completely isolated from each other without the use of seal in the pumps. A long-life pump is obtained by sealing the pumps with magnetic coupling. The air gap between the magnetic rotor and the pump rotor, the number of poles, the magnet thickness, the wall thickness of the pump rotor, the conductivity of the material and the speed of the magnetic rotor affect the efficiency and power transmission performance of the magnetic coupling. The magnetic coupling design has been optimized by analyzing these effects in Ansys Maxwell software, which analyzes with the finite element method (FEM). According to FEM analysis solutions, a 6-pole, 8 mm thick N52 neodymium magnet magnetic rotor has been chosen optimally. When this rotor rotates with a speed of 4500 rpm, mechanical power was transferred with a speed of 3951 rpm and a torque of 0.5 Nm in an aluminum pump rotor with a wall thickness of 5 mm in 3 mm air gap. In this design, it has been calculated that 87.8% of the mechanical power entering the magnetic rotor is transferred to the pump. When a 7 mm thick copper rotor is used, the efficiency is 92.3%. Aluminum rotor was preferred in terms of ease of manufacture and cost.

**Keywords :** Magnetic coupling, eddy current coupling, magnetic coupled pump

\*Corresponding Author, e- mail: ahmet.fenercioglu@gop.edu.tr

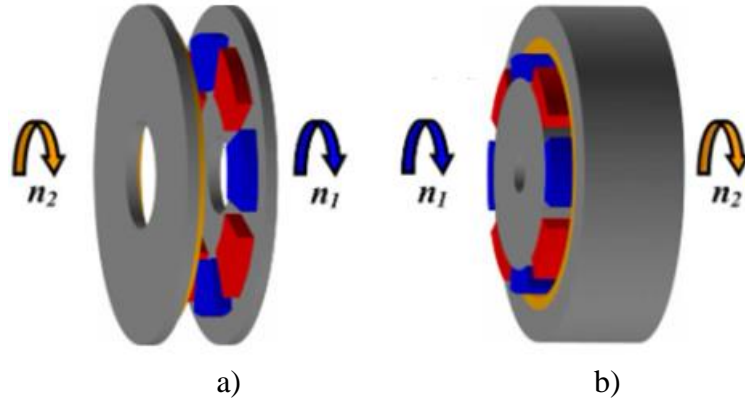
## 1. Giriş

Manyetik kavrama (magnetic coupling) herhangi bir mekanik temas olmadan hareket gücünü aktarabilmektedir. Güç aktaran ve güç aktarılan kısımlar arasında mekanik bir izolasyon sağladığı için kaplin, kasnak, dişli gibi bir mekanizmalar olmadan temassız bir şekilde güç aktarımını sağlamak mümkündür. Bu durumda verimli çalışma ve titreşim izolasyonu sağlanır. Bakım gerektirmez ve uzun ömürlüdür. Manyetik kavrama iki türlü yapılabilir. Bunlar,

Senkron manyetik kavrama: Güç aktaran ve aktarılan kısımlarda karşılıklı yerleştirilmiş sabit mıknatıslar bulunur. Mıknatısların tutma kuvvetlerini aşmayacak torkları karşılayabilir. Her iki tarafta aynı hızda döner ve mekanik güç kaybı yoktur [1].

Eddy akımlı manyetik kavrama: Güç aktaran veya aktarılan kısımlardan birinde sabit mıknatıslar vardır. Diğerinde ise ferromanyetik olmayan elektriksel iletkenliği yüksek malzemeler kullanılır. Genelde alüminyum veya bakır tercih edilir. Mıknatıslı rotorun dönmesiyle birlikte iletken malzemede eddy akımı indüklenir. Eddy akımının oluşturduğu manyetik alan, mıknatısların manyetik alanı ile etkileşip malzemede tork üretilmesini sağlar. Bu sistemde güç aktaran ve aktarılan kısmın hızları birbirine eşit değildir. Kayma kadar bir fark oluşur bu nedenle mekanik gücün tamamını aktarmaz ve kayıp meydana gelir. Eddy akımlı kavramada tek taraflı mıknatıs kullanıldığı için maliyetleri daha uygundur [1].

Eddy akımlı manyetik kavrama, manyetik akı yönlerine göre iki farklı türde yapılır. Bunlar, radyal ve aksel akı kavramalarıdır. Şekil 1’de prensip şekilleri verilmiştir [1].



Şekil 1. Eddy akımlı manyetik kavrama a) aksel akılı b) radyal akılı [1]

Şekilde  $n_1$  ifadesi manyetik rotorun hızı olup manyetik kavramanın giriş hızıdır,  $n_2$  ise eddy akımı ile güç aktarılan rotorun hızı olup manyetik kavramanın çıkış hızıdır.

### 1.1 Literatür özeti

Wang ve ark.’nın çalışmasında [1] sabit mıknatısta manyetik alan dağılımlarının analitik hesaplaması için geliştirilmiş pratik iki boyutlu bir model, eddy akımı kavrayıcıları tork özelliklerini elde etmek için sunulmuştur. Dönen iletken, Kartezyen koordinat referans sistemini ile hareket eden sabit mıknatıslar manyetik alan dalgasının kaynağıdır ve çok katmanlı sınır değeri problemi çözülür. Mıknatıs bloklarının formülasyonu, eddy akımı, boyunduruktaki doyum etkileri ve sabit mıknatıs şekilleri arasındaki eşdeğerlik ilişkilerinin tümü hesaba katılmıştır. Analitik modelle öngörülen

hesaplama sonuçları doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri ve deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır [1].

Yang ve ark. yaptığı çalışmaya [2] göre, sabit mıknatıslı eddy akımı kavrayıcısına iletilen torku doğru bir şekilde tahmin etmek için analitik modelin oluşturulması gereklidir. Çift rotorlu kavramanın doğrusal olmayan tork aktarım performansını incelemek çok önemlidir. Burada sabit mıknatıs kaçak akı etkilerini ve boyunduruk akı doyumlarını dikkate alan manyetik eşdeğer devre yaklaşımları incelenmiştir ve 3 boyutlu manyetik alan modeli oluşturulmuştur. Manyetik alan modeline göre, Faraday yasası ve Ampere yasası ile birlikte 3 boyutlu doğrusal olmayan model kurulmuştur. Endüktansı ve sınırlı eddy akımı alanını açıklayan Jenei metoduna uyumlu bir model önerilmiştir. 3B sonlu elemanlar yöntemi verileri ve deneysel veriler karşılaştırılır. Araştırma, analitik modelin tahmin edilen değerinin tork ile iyi eşleştiğini göstermektedir. FEM analizlerinde % 5,3'ten daha az hata ile % 0-100 kayma aralığındaki deneylerle elde edilmiştir [2].

Wang ve ark. yaptığı çalışmada [3] sabit mıknatıslı eddy akımı kavramasının performans parametreleri, basit ve pratik bir manyetik eşdeğer devre tabanlı analitik teknikler ile sunulmuştur. Burada eddy akımına etkisi olan manyetomotiv kuvvete ve manyetik akı reaksiyonuna izin veren paralel manyetik devreler hesaba katılmıştır. Bir tür kaçak akıların iyileştirildiği manyetik akı reaksiyonu için tam bir formül çıkarılmıştır. Geniş aralıktaki hız kaymaları ve tork değerlerinin tahmin edildiği 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ve deneysel ölçümlerle yapılan bir doğrulama süreci uygulanmıştır. Bu manyetik eşdeğer devre metodu, eddy akımı kavramasının farklı parametrelerle birlikte performansı, simülasyonlar ile etkili bir şekilde ispatlamıştır [3].

Fontchastagner ve ark. çalışmalarında [4], aksenal akılı eddy akımı kavrayıcısının optimum tasarımını içermektedir. Dizayn prosedürü 3 boyutlu analitik model ve popülasyon algoritma yönteminden türetilen tork formülüne dayanmaktadır. Düşük kayma ve yüksek verim altında taşıyıcılar arasında en yüksek torku aktarmak için mıknatısların hacimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Her kayma değeri için tork denklemi doğru sonuç vermektedir ve bilgisayarla etkinliği doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için torka etki eden termal etkiler hesaba katılmıştır. Bunun için konvektif ısı transfer katsayıları tasarım optimizasyon sürecinde kullanılmıştır. Optimizasyon olarak parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılmıştır [4].

Li ve ark. yaptıkları çalışmada [5] sabit mıknatıslı girdap akımı kavrayıcıları, mekanik temas olmadan tork ve hız aktarımı sağlamaktadır. Bu çalışmada, çift yüzlü disk tipi rotorlu sabit mıknatıslı girdap akımı kavrayıcıları incelenmiştir. İki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analizler ve bir analitik modelleme önerilmektedir. Bu modelleme yaklaşımına dayanarak, manyetik alan, eddy akımı, elektromanyetik kuvvet ve tork ifadeleri elde edilmiştir. Son olarak, doğrulamak için üç boyutlu bir sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır [5].

Lubin ve ark. yaptıkları çalışmada [6] geçici rejim durumunda senkron ve eddy akımı kavramasının performansı karşılaştırılmıştır. Aktarılan tork için kapalı form ifadeler ve manyetik alan dağılımlarında 2 boyutlu yaklaşım esas alınarak tahmin edilmiştir. Tork formülleri kullanılarak ilk kalkışta ve yük torkunun ani uygulandığı durumlardaki geçici durum tepkileri tahmin edilmiştir. Simülasyonlar ve test sonuçları karşılaştırılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Aşırı tork yüklemelerinde senkron model senkronizmi kaybettiği durumlar olmuştur. Sürekli durumda senkron kavramanın daha iyi olduğu, ani yüklemelerin olduğu geçici durumlarda ise eddy akımı kuplajının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır [6].

Lubin ve ark. yaptıkları çalışmada [7], aksenal akılı eddy akımı kavrayıcılarının geçici ve sürekli rejim performansının belirlenmesinde hızlı bir hesaplama yaklaşımı sunar. Manyetik akı dağılımının

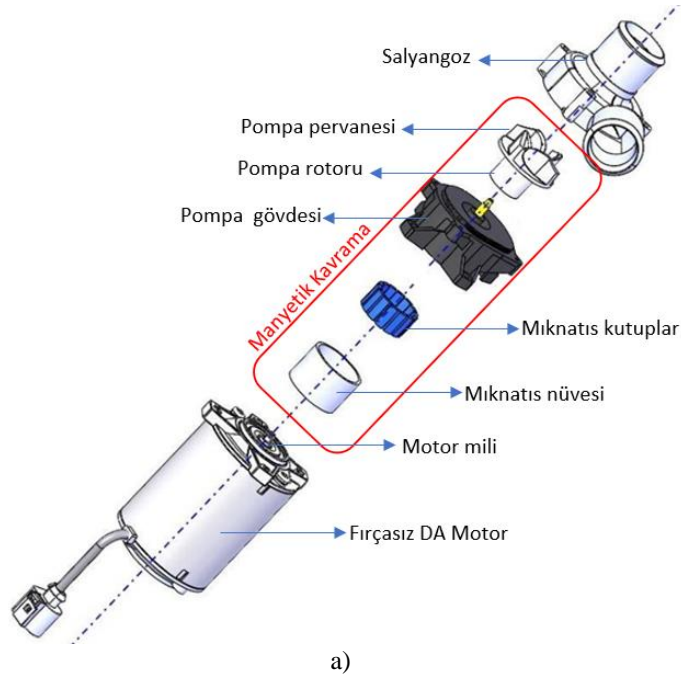
2 boyutlu yaklaşımını esas alarak aktarılan tork için sade bir analitik ifade geliştirilmiştir. Bu ifade düşük kayma ve yüksek verim durumunda geçerlidir. Öngörülen tork ifadesi manyetik kavramanın geçici ve sürekli durumu için kullanılmaktadır. Sonuçlar üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar analizleri ve testler ile karşılaştırılarak iyi bir yaklaşım elde edilmiştir [7].

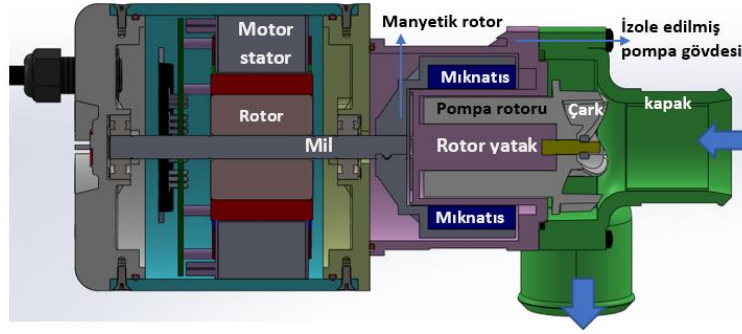
Hamideh ve ark. çalışmalarına [8] göre eddy akımı kavrayıcıları hız ve tork kontrolü için popüler bir cihaz olmuştur. Kavramanın verimi uyartım seviyesine bağlıdır. Bu nedenle indüklenen akımın yönü ve yoğunluğu önemlidir. Bu çalışmada eddy akımlarının manyetik alana ve dönüş eksenine dik olmasını sağlayan sincap kafesli bir kavrama diskinin tasarımına odaklanılmıştır. Lorentz kuvvetleri ve aktarılan tork optimize edilmiştir. Değişken hava aralığı ve hıza göre tork sonuçları sincap kafesli ve düz rotor için deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Demir boyunduruklu sincap kafesli disk, düz diske göre daha fazla tork aktarmıştır [8].

Canova ve ark. çalışmasında [9] radyal döner tip eddy akımı kavrayıcılarda tek yüzlü ve çift yüzlü sabit mıknatıslı yapılar için analitik modeller sunulmuştur. 2 ve 3 boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile her iki yapıda boyutsal parametrelerin etkisi tahmin edilmiştir. Bu analitik yaklaşım 3B analizlerle doğrulanmıştır. Düzeltilmiş analitik modeller ile 3B sonlu elemanlar simülasyonları karşılaştırılmıştır. Bu doğrulama önerilen analitik yaklaşımın doğru olduğunu ve tasarımcılar için zaman açısından verimli bir araç olduğu görülmüştür [9].

## 2. Materyal ve Yöntem

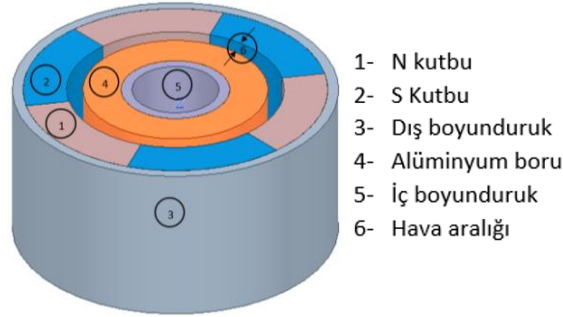
Bu çalışmada radyal akıllı eddy akımlı manyetik kavrama bir santrifuj pompaya uygulanmıştır. Pompada motor mili pompa tarafına geçiş yapmadan manyetik kavrama ile güç aktarmaktadır. Bu durumda sıvı yalıtımı için salmastıra kullanılmaz ve salmastıra kaynaklı problemler ortadan kaldırılmış olur. Manyetik kavramalı pompanın patlatılmış katı modeli Şekil 2’de verilmiştir.





b)  
Şekil 2. Manyetik kavramalı pompa katı modeli a) patlatılmış resim b) kesit görünüm

Eddy akımlı manyetik kavramanın sonlu elemanlar analizleri için 3 boyutlu manyetik modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Eddy akımlı manyetik kavrama manyetik modeli

Analiz modeli geometrik sınırlar içerisinde 3mm hava aralığından yaklaşık 200 W mekanik güç aktarımına göre tasarlanmıştır. Öngörülen sistemin ölçüleri için KORMAS firmasının ürün portföyünde bulunan ve otomotiv sektörüne satışı yapılan pompanın geometrik ölçüleri referans alınmıştır. Ölçüler ve özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

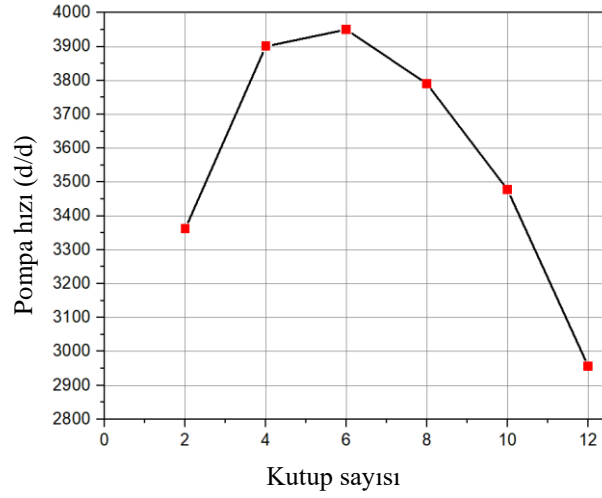
Tablo 1. Manyetik kavramanın boyutları ve özellikleri

Manyetik kavramanın özellikleri	Boyutları
Manyetik rotor dış çap ( $D_{mo}$ )	60 mm
Manyetik rotor iç çap ( $D_{mi}$ )	40 mm
Pompa rotor dış çapı ( $D_{po}$ )	34 mm
Pompa rotor iç çapı ( $D_{pi}$ )	20 mm
Rotor malzemesi ve et kalınlığı	Alüminyum / 5 mm
Hava aralığı	3 mm
Boyunduruk kalınlığı / malzemesi	2mm /steel 1010
Rotor yüksekliği	30 mm
Mıknatis kalınlığı	8 mm
Mıknatis manyetik özellikleri	N52H, Br:1.42 T $H_c$ :-907 kA/m
Kutup sayısı	6

### 3. Bulgular ve Tartışma

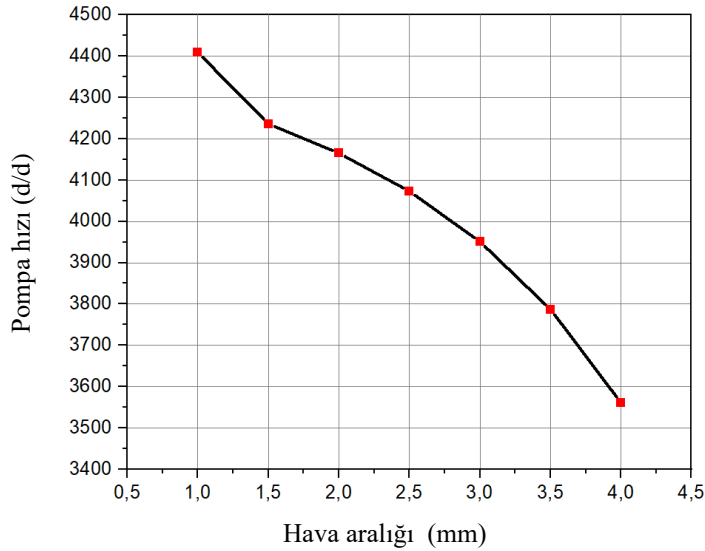
Sistemin performans ve verimine etki eden faktörler manyetik rotorun hızı, kutup sayısı, mıknatis kalınlıkları, hava aralığı, malzemelerin elektriksel ve manyetik özellikleridir. Bu etkilere göre

sistemin performansı ve verimliliği ANSYS Electronics yazılımının Maxwell transient modülünde sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapılmıştır.



Şekil 4. Sabit yük torku altında kutup sayısına göre pompa hızı

Analizlerde referans değer olarak manyetik rotorun hızı 4500 d/d ve pompa tarafında 0.5 Nm sabit yük torku altında 235.5 W mekanik güç manyetik kavramaya uygulanmıştır. Bu durumda kutup sayısının pompa hızına etkisi Şekil 4'teki grafikte verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere en iyi sonuç 6 kutuplu manyetik kavramada elde edilmiştir. 4500 d/d manyetik rotorunun hızına karşı pompa tarafına 3951 d/d hız ve 0.5 Nm yük torkunun transferi edildiği görülmektedir. Şekil 5'de manyetik rotor ile alüminyum pompa rotoru arasındaki hava aralığı mesafesine göre 0.5 Nm yük torku altında hava aralığı mesafesinin pompa hızına etkisi verilmiştir.



Şekil 5. Hava aralığına göre pompa hızının değişimi

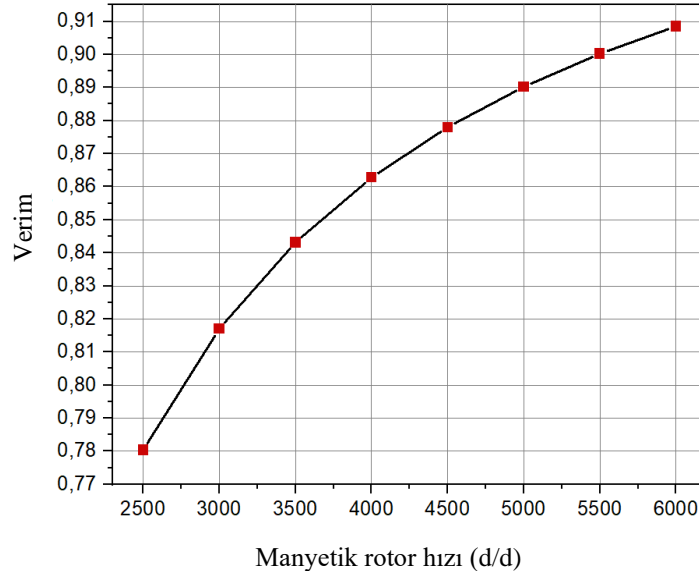
Grafikte görüldüğü üzere hava aralığı genişledikçe boşluktaki akı yolu uzunluğu artmaktadır. Boşluğun manyetik geçirgenliği relüktansın artmasına sebep olmaktadır. Relüktans ifadesi Eş.1' de verilmiştir.

$$R = \frac{l_g}{\mu_o A} \quad (1)$$

Burada  $R$ ; Relüktans (At/Wb),  $l_g$ ; akı yolu uzunluğu (m),  $A$ ; akı yolu kesiti (m<sup>2</sup>) ve  $\mu_o$  boşluğun manyetik geçirgenliği ( $4\pi 10^{-7}$  H/m) dir. Relüktans ifadesi ile manyetik akı değeri Eş.2'den hesaplanır.

$$\Phi = \frac{F}{R} \quad (2)$$

Burada  $\Phi$ ; manyetik akı (Wb) ve  $F$ ; mangnetomotor kuvvet (A) dir. Eş.2'ye göre hava aralığındaki akı zayıflamaktadır. Bu nedenle de pompanın hızı ve dolayısı ile de verimi düşmektedir. Hava aralığı, güç aktaran ve güç aktarılan tarafı izole ettiği için pompa odası bu aralık içerisinde kalacaktır. Bu durumda içteki pompa rotoru ile dıştaki manyetik rotorun da rahatlıkla dönebilmesi için hava aralığının 3 mm olarak alınmasına karar verilmiştir. Manyetik rotorun değişken hızına göre 0.5 Nm yük torqu altında pompa hızının verime etkisi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Hıza göre güç aktarım verimi

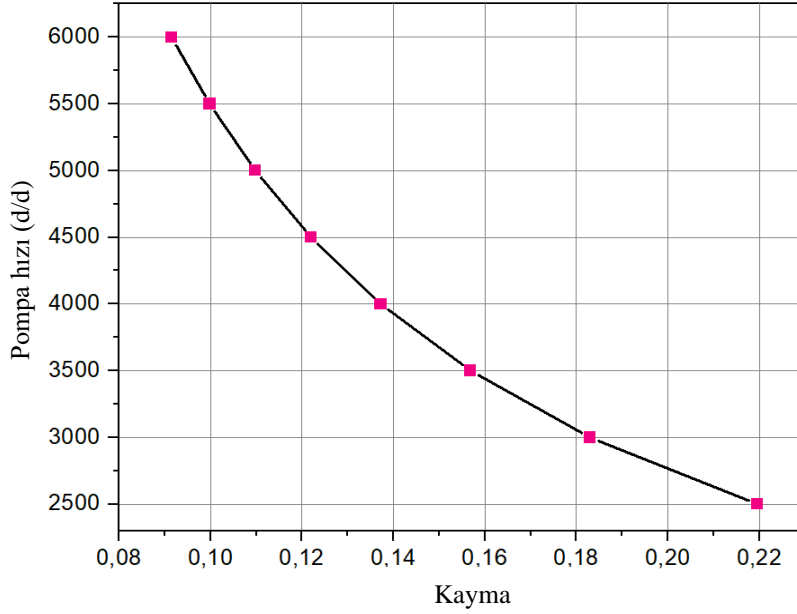
Grafikten görüldüğü üzere hız arttıkça manyetik akının değişim frekansı da artmaktadır. Eş.3'de verilen Faraday Yasası'na göre manyetik akının zamana bağlı değişim hızı (frekansı) arttıkça malzemede endüklenen elektromotor kuvveti (e) artmaktadır.

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Dolayısı ile eddy akımı ve manyetik alanı da arttığı için yüksek hızlarda kavramanın verimi ve performansı artmaktadır. Manyetik rotorun 4500 d/d hızına karşılık pompa rotoru 3951 d/d hız ile dönmektedir. Bu hız pompanın çalışma hızına yakın olduğu için tercih edilmektedir. Bu noktada verim %87,8 dir. Eddy akımlı manyetik kavrayıcılar asenkron motor gibi çalışırlar bu nedenle stator ve rotor arasında bir kayma söz konusudur. Kayma (s) ifadesi Eş.4'de verilmiştir.

$$s = \frac{n_m - n_p}{n_m} \quad (4)$$

Burada  $n_m$  manyetik rotorun hızı (d/d),  $n_p$  pompanın hızı (d/d) olarak verilmiştir. Hıza göre kaymanın değişim eğrisi Şekil 7.'de verilmiştir.



Şekil 7. Farklı pompa hızlarına göre kaymanın değişimi

Grafikten görüldüğü üzere hız arttıkça kaymanın azaldığı yani manyetik rotor ile pompa hızı arasındaki farkın azaldığı dolayısı ile güç aktarımının verimi ve performansının artacağı görülmektedir. Hız arttıkça Faraday Yasası'na göre rotorda indüklenen emk arttığı için buna bağlı olarak rotorda oluşan eddy akımı da artmaktadır ve Eş.5'te verilen Ampere Yasası'na göre artan akımın oluşturduğu manyetik alan artmaktadır [10].

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I \quad (5)$$

Burada kapalı yüzeyde  $s$  yüzeyin integral değişkenidir ve  $B$  manyetik akı yoğunluğu (T) dir. Rotorda oluşan manyetik alan ile manyetik tamburun alanının etkileşimi ile Eşitlik 6'da verilen Lorentz kuvvetini ( $F$ ) üretir.

$$F = I \cdot L \times B \quad (6)$$

Burada  $I$ ; akım (A),  $L$ ; manyetik alana maruz kalan uzunluktur (m). Buna göre oluşan kuvvet rotorda tork üretimini sağlar. Manyetik tamburda kullanılan mıknatıslar N52H özelliğe sahip neodmiyum mıknatıslardır ve bu mıknatısın kalıcı manyetik alan değeri  $B_r=1.48$  T ve giderici kuvveti oluşturan manyetik alan şiddeti  $H_c = -907$  kA/m'dir. Bu değerler sabit olduğu için manyetik tamburun ürettiği manyetik alan değişmez, pompa rotorunda oluşan manyetik alan ise rotorda endüklenen eddy akımına bağlıdır. Dolayısıyla manyetik rotorun hızına, rotor malzemesinin cinsine, hacmine bağlı olarak eddy akımının genliği değişir. Pompa rotorunun malzemesi ve kalınlığına göre pompa performansını Tablo 2'de verilmiştir.



**Tablo 2.** Rotor malzemesinin cinsi ve kalınlığına göre manyetik kavrama performansı

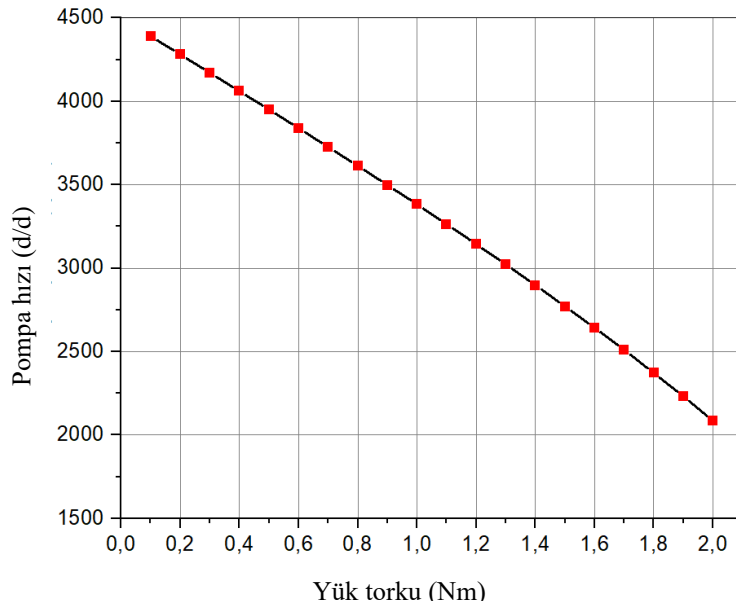
Pompa rotor malzemesi	Aluminyum			Bakır
	5,0	6,0	7,0	7,0
Kalınlık (mm)				
Pompa hızı (d/d)	3951	3967	3976	4152
Manyetik rotor hızı (d/d)	4500	4500	4500	4500
Yük torku (Nm)	0,5	0,5	0,5	0,5
Motor mekanik güç (W)	235,5	235,5	235,5	235,5
Pompa gücü (W)	206,77	207,61	208,08	217,29
Verim (%)	87,8	88,2	88,4	92,3

Malzeme iletkenliğinin ve rotor kalınlığının artması ile pompaya aktarılan mekanik güç artırılmış olur. Bakırın iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle öz direnci düşüktür. Ayrıca rotor et kalınlığının artması da rotorun direncini azaltır bu nedenle eddy akımı artar. Mıknatıs kalınlıkları da manyetik kavrama performansına etki etmektedir. Tablo 3.'de mıknatıs kalınlıklarının bu etkisi görülmektedir.

**Tablo 3.** Mıknatıs kalınlıklarının manyetik kavrama performansına etkileri

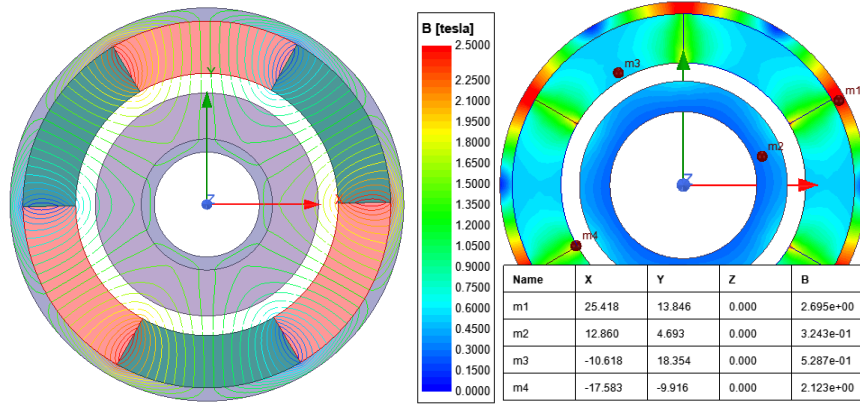
Mıknatıs kalınlığı (mm)	6,0	7,0	8,0
Pompa hızı (d/d)	3797	3886	3951
Manyetik rotor hızı (d/d)	4500	4500	4500
Yük torku (Nm)	0,5	0,5	0,5
Motor mekanik güç (W)	235,5	235,5	235,5
Pompa gücü (W)	198,71	203,37	206,77
Verim (%)	84,4	86,4	87,8

Mıknatıs kalınlıklarının artması mıknatıs hacmini artırdığı için eddy akımı artmaktadır. Bu durumda pompa gücü de artmaktadır. Manyetik kavramada pompa tarafındaki yükün 0'dan 2 Nm'ye kadar 0.1 Nm yük artışları ile yüklenme analizleri yapılmıştır. Çözümler Şekil 8' de verilmiştir.



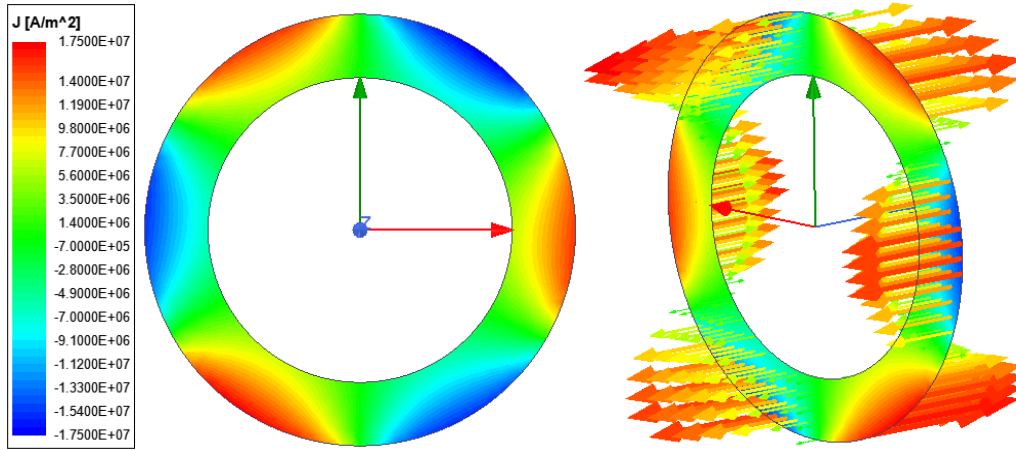
**Şekil 8.** Yük torku değişimine göre pompa hızı

Manyetik rotorun hızı 4500 d/d olarak sabit tutulmuştur. Buna karşılık pompa rotorundaki yük torku arttıkça pompa rotoru hızının düştüğü ve kaymanın arttığı görülmektedir. Önerilen sistem için nominal tork değeri 0.5 Nm dir. Nominal yüklenme şartlarında modelin manyetik akı dağılımları Şekil 9’da görülmektedir.



Şekil 9. Manyetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu dağılımları

Mıknatısları tutan dış demir boyundurukta akı yoğunluğu yüksektir. Malzemenin 1.8 T doyum değerini geçtiği için doyum etkisi performansa küçüğe olsa olumsuz bir etki oluşturabilir. Bu etkiyi azaltmak için boyunduruk kalınlığının artırılması gereklidir. Geometrik sınırlardan dolayı boyunduruk kalınlığı 2mm alınmıştır. Alüminyum rotor malzemesindeki akım yoğunluğu Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 10. J (A/m<sup>2</sup>) akım yoğunluğu dağılımı

Grafiklerden görüldüğü üzere maksimum akım yoğunluğu 17.5 A /mm<sup>2</sup> olarak görülmektedir. Bu akım değeri malzemenin ısınmasına neden olabilir. Bu nedenle akım yoğunluğunu ve ısınma etkisini azaltmak için rotorun et kalınlığı artırılmalıdır [10]. Fakat uygulamada kullanılacak pompa sıcak su pompaladığı için rotor ısısının olumsuz bir etkisi olmayacaktır.

#### 4. Sonuç

Pompa için manyetik kavramanın tasarım optimizasyonu SEY analizleri ile yapılmıştır. Hava aralığı mesafesi arttıkça relüktansın artması manyetik akının azalması nedeniyle güç aktarma performansının

düştüğü görülmektedir. Pompa ile motor arasındaki izolasyonun kalınlığı ve rotorun rahat hareket edebilmesi için hava aralığı 3 mm olarak alınmıştır. Ayrıca mıknatıs kalınlığının artması, rotor hızının yükselmesi de indüklenen eddy akımını artırdığı için performans artmaktadır. Kutup sayısı da önemli bir performans göstergesidir.

4500 d/d manyetik rotor hızı ile pompa tarafında alüminyum rotorda 0.5 Nm yük torku altında 3 mm hava aralığı ile güç aktarımı için önerilen model sonlu elemanlar yöntemiyle 2 boyutlu olarak analiz edilmiştir. Analizlerde mıknatıs 8 mm kalınlıkta N52H neodimyum mıknatıs seçilmiştir. Analiz sonuçlarına göre pompa rotoruna 3951 d/d rotor hızı ve %87.8 verim ile güç aktarımı sağlanmıştır. Bu durumda 235,5 W giriş mekanik gücüne karşı 206,77 W çıkış pompa gücü elde edilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre sistem veriminin %95 e kadar çıkarılması mümkündür. Bunun için rotorun bakır yapılması, hava aralığının azaltılması, mıknatıs ve rotorun kalınlaştırılması, hızın artırılması ile mümkündür. Fakat geometrik sınırların izin vermemesi, maliyetlerin artması üretimin zorlaşması nedeniyle Tablo 1’de verilen ölçülerin kullanılmasına karar verilmiştir.

**Teşekkür:** Bu çalışma KORMAS Elektrikli Motorlar San. Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezinde yürütülen TÜBİTAK TEYDEB destekli 7190809 nolu Fırçasız Doğru Akım Motorlu Manyetik Kavramalı Pompa projesi kapsamında hazırlanmıştır.

## 5. Kaynaklar

- [1] Wang J, Lin H, Fang S, Huang Y (2014). A general analytical model of permanent magnet eddy current couplings, *IEEE Transaction on Magnetics*, 50(1):1–9.
- [2] Yang X, Liu Y, Wang L (2019). Nonlinear Modeling of Transmission Performance for Permanent Magnet Eddy Current Coupler. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2019:1-15.
- [3] Wang J, and Zhu,J (2018). A Simple Method for Performance Prediction of Permanent Magnet Eddy Current Couplings Using a New Magnetic Equivalent Circuit Model, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 65(3):2487-2495.
- [4] Fontchastagner J, Lubin T, Mezani S, Takorabet, N (2018). Design optimization of an axial-field eddy-current magnetic coupling based on magnetothermal analytical model. *Open Physics*, 16:21–26.
- [5] Li Z, Wang D, Zheng Yu L (2017). Analytical modeling and analysis of magnetic field and torque for novel axial flux eddy current couplers with PM excitation. *Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang* 7(105303):1-13.
- [6] Lubin T, Fontchastagner J, Mezani S, Rezzoug A (2016). Comparison of Transient Performances for Synchronous and Eddy-current Torque Couplers. *XXIIIth International Conference on Electrical Machines - ICEM 2016*, s.695-701, Lozan, İsviçre.
- [7] Lubin T, Rezzoug A (2015). Steady-state and transient performance of axial-field eddy-current coupling, *IEEE Transaction on Industrial Electronics* 62(4):2287–2296.
- [8] Razavi H.K, Lamperth M.U (2006). Eddy-Current Coupling With Slotted Conductor Disk, *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(3):405-410.
- [9] Canova A, Vusini B (2005). Analytical modeling of rotating eddy-current couplers, *IEEE Transaction on Magnetics*, 41(1):24–35.
- [10] Fenercioğlu A, Avşar Y (2020). Finite Element Analysis of Eddy Current Actuator for Linear Motion, *IWED 2020*, s.1-4, Moskova, Rusya.