






# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Çembersel Doğru Akım Motoru Tasarımı ve Manyetik Analizi

 Akın AYDIN<sup>a,\*</sup>,  Cemal YILMAZ<sup>b</sup>,  Recep DEMİRCİ<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

<sup>c</sup> Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: [akn.aydn@gmail.com](mailto:akn.aydn@gmail.com)

DOI : 10.29130/dubited.518545

### ÖZET

Endüstride ve otomasyonda doğrusal hareket vazgeçilemez bir ihtiyaçtır. Söz konusu hareket dairesel çıktı üreten makinalara kayış, kasnak ve dişliler eklenerek temin edilmektedir. Ancak bu tür çözümler verim düşmesine ve maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan lineer motorlar elektrik enerjisini doğrusal harekete direkt çeviren elektrik makinalarıdır. Lineer motorların endüstri ve otomasyon sistemlerinde fazla tercih edilmemesinin nedenleri ise düşük kuvvet/akım oranları ve uzunluk sınırlamalarıdır. Son yıllarda geliştirilen çift yanlı DC lineer motorda hem kuvvet/akım oranı artırılmış hem de uzunluk sınırlamasının önüne geçilmiştir. Bu çalışmada, çift yanlı DC lineer motorun öncelikle Ansys-Maxwell de detaylı nümerik analizleri yapılmıştır. Ayrıca ilgili motorun lineer olan tasarım topolojisi çember şekline dönüştürülerek, dairesel hareket üreten yeni bir elektrik motoru tasarlanmıştır. Geliştirilen ve çembersel motor olarak adlandırılan yeni motorun manyetik analizleri yapılmıştır. Elektrikli araçların tekerlekleri içerisine yerleştirilebilecek boyutta tasarlanan motorun moment/akım oranı analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, tasarımı yapılan motorun teker içi kullanıma uygun olduğu, benzer amaçlı motorlara kıyasla tasarımı basit ve maliyeti düşük olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Sabit mıknatıs, Lineer motor, Çembersel motor, Ansys-Maxwell.

## Design and Analysis of Circular Direct Current Motor

### ABSTRACT

Linear motion is an indispensable need in industry and automation. The related motion is obtained with rotary type electrical machines by adding belt, pulley and gears. However, such solutions lead to lower efficiency and increase costs. On the other hand, linear motors are electrical machines that convert electric energy directly to linear motion. The reasons why the linear motors are not preferred in industrial and automation systems are their low force / current ratio and length limitations. The double-sided DC linear motor developed in recent years has increased the force / current ratio and avoided the length limitation. In this study, detailed numerical analysis of double-sided DC linear motor in Ansys-Maxwell was performed. Then, by converting design topology of the motor from linear to a circular one, a new electric motor that generates circular motion has been developed. Magnetic analysis of the designed motor, which is called as circular motor, has been performed. Torque/current

ratio analyses of the created motor, which could be placed in the wheel of electric vehicles, were performed. From the results obtained, it is seen that the motor designed is suitable for in-wheel usage and its design is simple and cost effective compared to similar purpose motors.

*Keywords: Permanent magnet, Linear motor, Circular motor, Ansys-Maxwell*

## I. GİRİŞ

**E**ndüstriyel üretim tesislerinde, ulaşımda ve birçok otomasyon sistemlerinde doğrusal harekete ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde söz konusu gereksinim yaygın olarak dairesel hareket üreten motorlar ile karşılanmaktadır. Ancak dairesel hareketi doğrusal harekete dönüştürmek için ilave donanımların kullanılması hem sistem maliyetini hem de arıza ihtimalini artırmaktadır. Bu yüzden doğrusal hareketi direkt olarak üreten lineer motorlar avantajlı hale gelmiştir[1,2,3]. Ayrıca lineer motorlarda kayış, kasnak, dişli vb. ilave donanımların olmaması da sistemin konum hassasiyetini ve dinamik tepki hızını artıran özellikleridir[4,5]. Dönen tip elektrik motorlarının kesilerek açılmış versiyonları olan lineer motorların birçok çeşitleri mevcuttur[2,6]. Dolayısıyla lineer motorlar AC olarak bir fazlı veya üç fazlı yapılabildiği gibi, DC olarak sargılı veya sabit mıknatıslı tipler şeklinde de tasarlanmaktadır. Lineer motorlarda alan sargıları veya endüvileri hareketli olabildiği gibi lineer motorları çift yanlı veya tek yanlı olarak da çalıştırmak mümkündür.

Lineer motorların performans ölçütlerini iki gruba ayırmak mümkündür. Birinci yaklaşımda en küçük ağırlık/ kuvvet oranı dikkate alınır iken ikinci bakış açısında en büyük kuvvet/akım oranı ön planda tutulur. Birinci yaklaşım yüksek ivme ve düşük sürtünme kuvveti açısından için önemlidir. Dolayısıyla hareketli kısmın kütlelerinin minimum olması tercih sebebidir. Yüksek kuvvet/ akım oranı ise elektriksel devrelerin maliyetini etkilemektedir. Ayrıca uzunluk sınırlaması lineer motorların önemli parametrelerinden biridir. Söz konusu hedeflere ulaşmak için birçok manyetik devre topolojileri önerilmiştir. Ancak manyetik açıdan en temel manyetik açıdan en temel problem düşük hava aralığının temini olmuştur[2,5,7,8]. Diğer taraftan benzer kriterler dairesel hareket üreten makinalar içinde geçerlidir. Son yıllara kadar geliştirilen elektrik motorlarında manyetik akı yolları çoğunlukla radyal olmuştur. Bu nedenle yüksek moment elde etmek için çok sayıda sarım ve kolektör dilimleri kullanılma ihtiyacı olmuştur. AC motorlarda ise motoru sürmek için invertör gibi karmaşık elektronik sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Fırçasız DC motorlarda ise konum algılayıcılar ve karmaşık sürücü devrelere olan ihtiyaç kaçınılmazdır.

Uzunluk sınırlaması olmayan ve oldukça yüksek kuvvet/akım oranına sahip olan çift yanlı mıknatıslı doğru akım lineer motoru son yıllarda önerilmiştir. Önerilen bu tasarımda hareketli ünite de mıknatıslar kullanılmış olup, hareketsiz veya sabit olan kısımlara ise endüvi sargıları yerleştirilmiştir. Endüvi sargıları modüler yapıda olduklarından, yan yana dizilerek ihtiyaç duyulan uzunlukta motor gerçekleştirmek mümkündür. Bir adet prototipi yapılan söz konusu motorun manyetik devresi incelenmiş ve dinamik modeli çıkartılmıştır. Ayrıca hız ve konum denetleyicisi tasarlanmıştır.

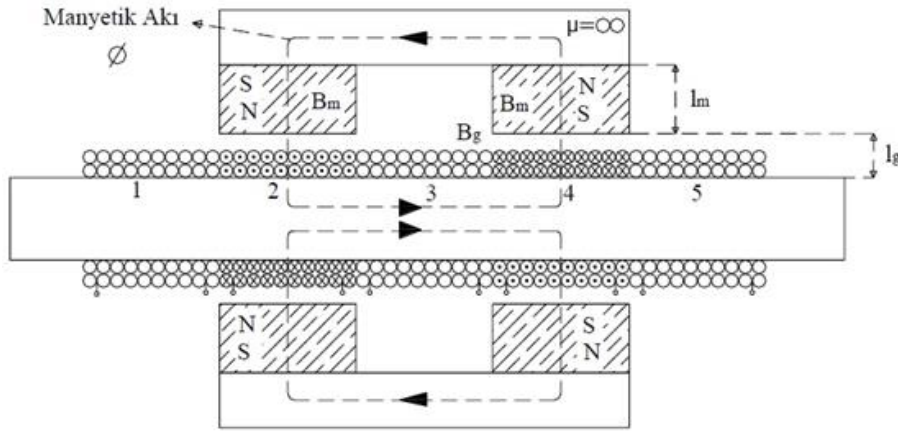
Bu çalışmada [2] numaralı kaynakta detayları verilen çift yanlı DC lineer motorun Ansys-Maxwell yazılımı ile manyetik analizi yapılmış ve elde edilen bulgular orijinal tasarımdan elde edilen ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar prensibine (SEY) göre çalışan Ansys-Maxwell de elde edilen



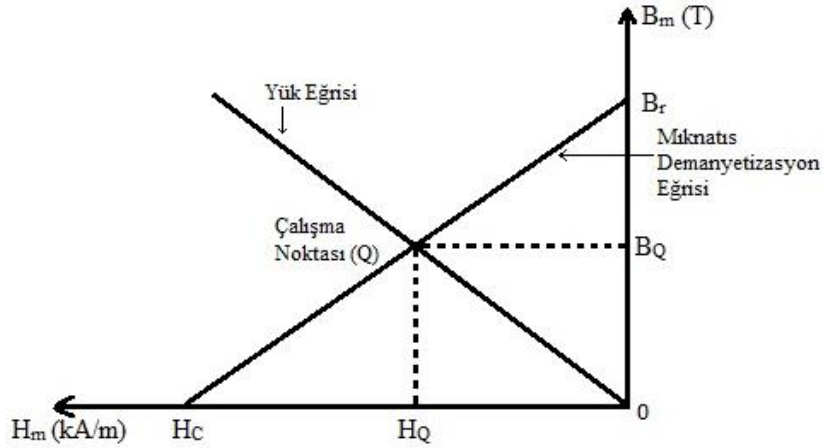
devrede üretilen manyetik akılar orta milde birbirini destekler durumdadır. Böylece herhangi bir manyetik devredeki manyetik akı için

$$\phi = B_m A_m = q B_g A_g \quad (1)$$

ifadesi yazılabilir[1]. Burada  $B_m$  mıknatısındaki manyetik akı yoğunluğu,  $B_g$  hava aralığındaki akı yoğunluğunu,  $A_m$  mıknatısın yüzey alanı,  $A_g$  hava aralığı yüzey alanı ve  $q$  kaçak akı faktörüdür. Çift yanlı DC lineer motorda kullanılan NdFeB tipi mıknatısların  $B$ - $H$  değişimleri doğrusal olup Şekil 3'te gösterilmiştir. Mıknatısların çalışma noktasındaki akı yoğunluğunun bilinmesi, üretilen kuvvetin analizinde önemlidir[2,12]. Manyetik devrenin fiziksel boyutlarını içeren yük eğrisi ile mıknatısların demanyetizasyon eğrisinin kesişim noktası mıknatısın çalışma noktasını belirlemektedir.



Şekil 2. Çift yanlı DC lineer motorun manyetik devresi [2]



Şekil 3. Mıknatısın yük ve demanyetizasyon eğrisi

Sabit mıknatıslı ve büyük hava aralığına sahip manyetik devrelerde nüvelerin relüktansları çok küçük olduğundan ihmal edilirler. Buradan hareketle, Şekil 2'de görülen manyetik devrede Amper kanunu uygulandığında

$$2 H_m l_m + 2 H_g l_g = 0 \quad (2)$$

ifadesi elde edilir. Eş. 2'de  $H_m$  ve  $H_g$  sırasıyla mıknatıs ve hava aralığındaki manyetik alan şiddetini, aynı şekilde  $l_m$  ve  $l_g$  ise mıknatıs ve hava aralığının akı boyunca uzunluğunu göstermektedir[2]. Eş. 1 ve Eş. 2 yardımıyla Şekil 3'de gösterilen yük eğrisinin denklemi

$$B_m = - \frac{\mu_0 q l_m A_g}{l_g A_m} H_m \quad (3)$$

şeklinde bulunur[2]. Eş. 3'de  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliğini göstermekte olup  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m$  dir. Şekil 3'de gösterilen mıknatıs demanyetizasyon eğrisi ile Eş. 3'de tanımlanan yük eğrisinin kesişim noktası mıknatısın çalışma noktasını verir. Söz konusu noktada, mıknatısın manyetik alan şiddeti

$$H_Q = - \frac{\frac{B_r}{H_C} + \mu_0 \frac{q A_g l_m}{A_m l_g}}{\frac{B_r}{H_C} + \mu_0 \frac{q A_g l_m}{A_m l_g}} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır. Şekil 1'de gösterilen motorda kullanılan mıknatısların boyutları 50x50x25 mm dir. Mıknatısların artık mıknatısiyeti  $B_r = 1,17 T$  , giderici kuvveti  $H_C = 868 kA/m$  olduğundan, çalışma noktasında manyetik alan şiddeti

$$H_Q = -218.10^3 A / m$$

olarak hesaplanmıştır. Çalışma noktasındaki manyetik alan şiddeti mıknatısın doğru denkleminde

$$B_Q = \frac{B_r}{H_C} H_Q + B_r \quad (5)$$

şeklinde yerine konulduğunda, çalışma noktasındaki manyetik akı yoğunluğu  $B_Q = 0,876 T$  olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde çalışma noktasında hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu ise

$$B_{gQ} = \frac{B_Q}{q} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilir. Kaçak akı faktörü, mıknatısın ve hava aralığının alanlarının oranı olup  $q = 1,537$  olarak alınmıştır. Böylece gerçekte kuvvet üretiminde etkin olan hava aralığı manyetik akı yoğunluğu  $B_{gQ} = 0,569 T$  olarak hesaplanmıştır[2]. Lorentz kanuna göre manyetik alan içerisindeki iletkenlerde üretilen kuvvet

$$F = n B_{gQ} L i \sin \theta \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,  $F$  iletkenlerde oluşan kuvveti,  $n$  sarım sayısını,  $B_{gQ}$  hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunu,  $L$  mıknatıs altında kalan iletken uzunluğunu,  $i$  sargılardan geçen akımı ve  $\theta$  hava aralığındaki manyetik akı ile iletkenler arasındaki açıyı temsil etmektedir. Çift yanlı doğru akım lineer motorda üretilen akı, sargıları dik keserek yolunu tamamlamaktadır. Bu yüzden

İlgili açı 90 derece olup sinüs değeri 1 dir. 1000 turdan oluşan endüvi bobinin mıknatıs altında kalan uzunluğu 50mm olup, her bir sarımın iki tarafında kuvvet oluştuğu göz önüne alındığında, üretilen kuvvet için

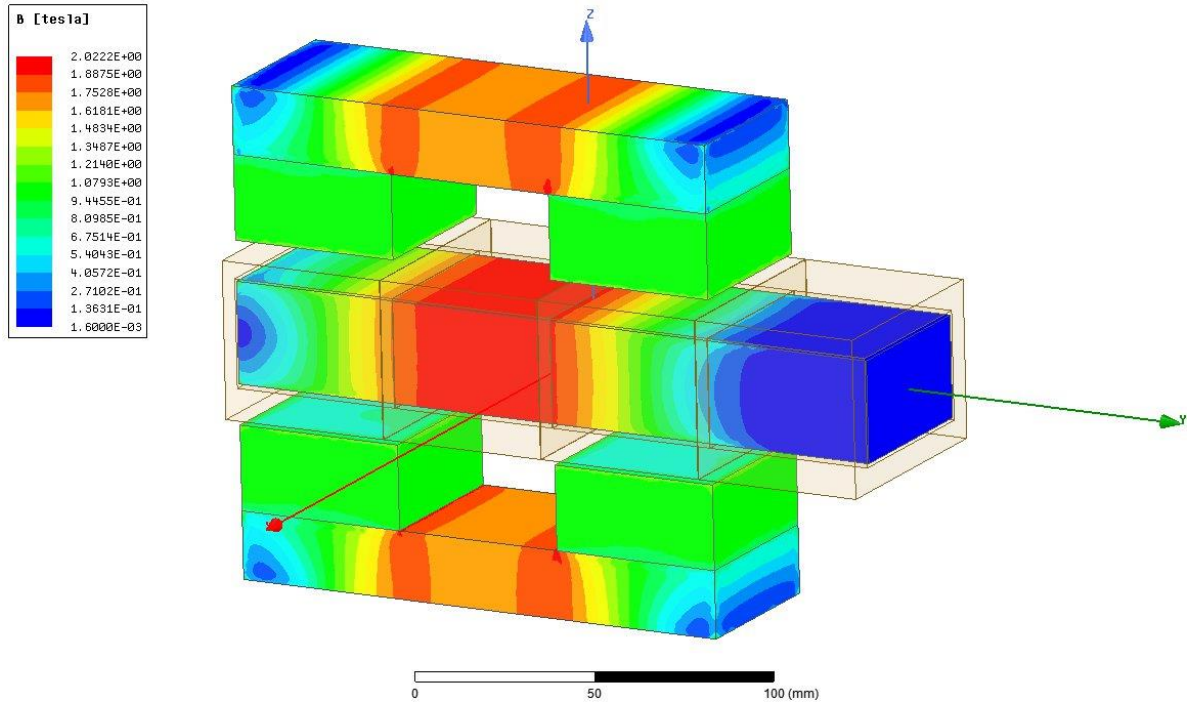
$$F = 56,9 \text{ i}$$

ifadesi elde edilmiştir. Çift yanlı lineer motorda aynı anda iki sarıma enerji uygulandığı için, üretilen toplam kuvvet

$$F = 2 \times 56,9 \text{ i} = 113,8 \text{ i} = K \text{ i} \quad (8)$$

olarak hesaplanmıştır. DC Lineer motorlarda sabit akımda üretilen statik kuvvet için  $F = K I$  ifadesi yaygın olarak tercih edilmiştir[2]. Böylece statik kuvvet/akım oranı olan  $K$ , çift yanlı lineer motor için 113,8 N/A olarak bulunmuştur. Başka bir ifade ile motora uygulanan her 1 Amperlik akıma karşılık, hareketli üniteye 113,8 N kuvvet üretildiği görülmüştür. Yukarıda verilen hesapların detayları ve deneysel sonuçları [2] numaralı kaynakta verilmiştir.

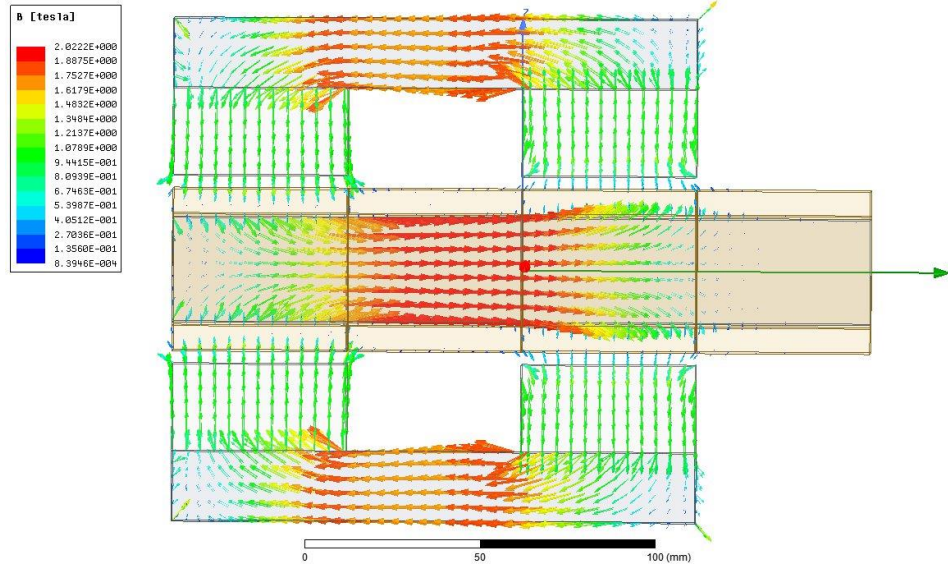
İlgili çalışmada analitik yöntemlerle hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan yaklaşık hesaplamaların nümerik yöntemlerle detaylı analizleri yapılmamıştır. Bu çalışmada ise söz konusu motorun Ansys-Maxwell ortamında 3 boyutlu modeli oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Şekil 1'de gösterilen boyutlar ve malzemeler dikkate alınarak tasarım ve analizler yapılmıştır. Çift yanlı DC lineer motor için elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 4'de gösterilmiştir.



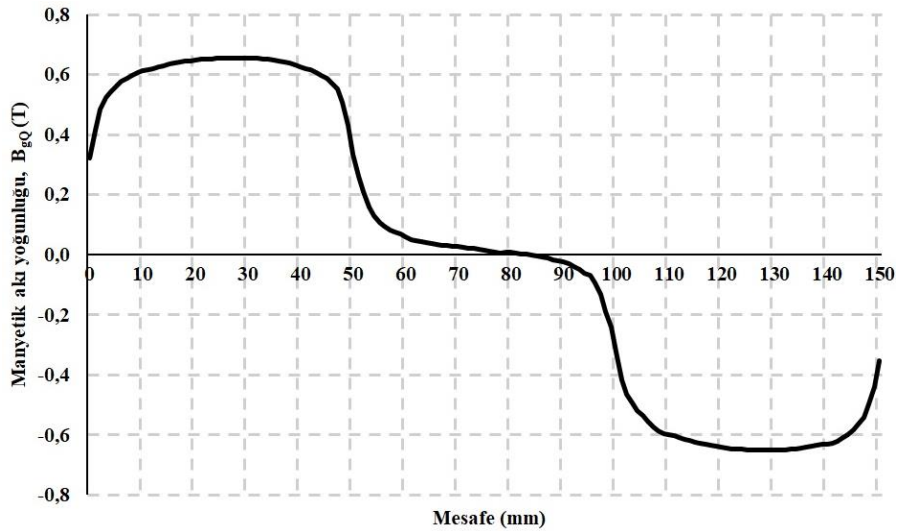
Şekil 4. Çift yanlı DC lineer motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Görüldüğü gibi orta mil üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu topolojinin diğer kısımlarından fazladır. Bunun sebebi simetrik iki manyetik devrenin manyetik akılarının orta mil üzerinden devresini tamamlamasıdır. Diğer taraftan orta milde kullanılan 1010 tipi çelik malzemenin doyum halinde manyetik akı yoğunluğu 2 Tesla olduğundan, seçilen kesitlerin uygun olduğu açıktır. Üst ve alt

millerde oluşan manyetik akı yoğunlukları ise zaten limitlerin altında kalmıştır. Ayrıca enerji verilmeyen 4 numaralı sargının altında kalan kısımda ise manyetik akı yoğunluğu oldukça küçüktür. Manyetik devresi Şekil 2’de gösterilen çift yanlı DC lineer motor motorun Ansys Maxwell de elde edilen manyetik akı vektörleri ise Şekil 5’de gösterilmiştir. Çift yanlı doğru akım lineer motorunun hareketli kısmında üretilen kuvvetin belirlenmesi için hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunun bilinmesi en önemli parametredir. Analitik yöntemlerle 0,569 T olarak hesaplanan hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu, Ansys-Maxwell de yapılan analiz de 0,60 T olarak elde edilmiştir. Şekil 4’de y ekseni hararet yönü olup, endüvi sarımları y ekseni boyunca yerleştirilmiştir. Dolayısıyla endüvi ekseni olan y ekseni boyunca hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 6’da verilmiştir. Her sarım boyunca hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun homojen olduğu söylenebilir.



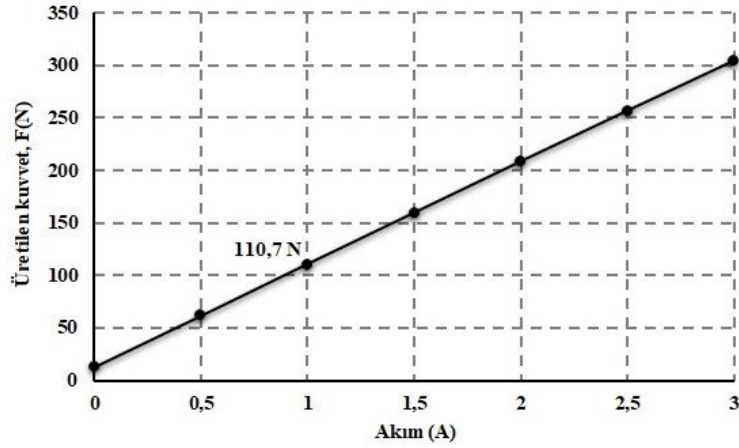
Şekil 5. Çift yanlı DC lineer motor: vektörel manyetik akı yoğunluğu



Şekil 6. Çift yanlı DC lineer motor: hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi

Şekil 6’da görüleceği üzere 50mm genişliğe sahip mıknatıs ve endüvi bobini boyunca hava aralığı manyetik akı yoğunluğu sabit kalmıştır. Diğer taraftan hava aralığı manyetik akı yoğunluğu 50 mm

sonunda hemen sıfır olmamaktadır. Kaçak akı olarak tanımlanan bu akılar, çift yanlı doğru akım lineer motorda kuvvet üretiminde kullanıldığından faydalı akıya dönüşmektedir. Bu durum tasarlanan topolojinin pozitif tarafıdır. Çift yanlı doğru akım lineer motorda üretilen kuvvetin akıma ve manyetik devre parametrelerine göre denklemi verilmiştir. Herhangi bir motor fiziksel olarak tasarlandıktan sonra üretilen kuvveti kontrol edeceğimiz tek parametre akımdır. Bu nedenle üretilen kuvvetin akıma göre değişiminin tespiti önemlidir. Bu parametrenin deneysel çalışmalarla elde edildiği literatürde görülmüştür [2]. Ayrıca analitik yöntemlerle statik kuvvet/akım oranı olan  $K$ , 113,8 N/A olarak bulunmuştur. İlgili hesaplamalar Ansys-Maxwell ortamında nümerik olarak yapıldığında ise Şekil 7’de gösterilen değişim elde edilmiştir. Görüldüğü gibi nümerik olarak elde edilen statik kuvvet/ akım oranı  $K$ , 110,7 N/A dir. Bu durum analitik yöntemlerle yapılan hesaplamaların oldukça geçerli olduğunun bir göstergesidir. Sabit mıknatıslı çift yanlı doğru akım lineer motorun Ansys-Maxwell de yapılan manyetik analiz sonuçlarının, deneysel verilerle örtüştüğü görülmüştür. Böylece, lineer hareket gerektiren uygulamalarda söz konusu motorun kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Tasarım, fırçalı veya fırçasız olarak tasarlanabilir. Fırçalı tasarım, arıza olasılığının fazla olması sebebiyle tercih edilmez iken, fırçasız tasarımda da elektronik devrenin karmaşıklığı artmaktadır[2].



Şekil 7. Çift yanlı DC lineer motor: üretilen kuvvet-akım değişimi,  $K$

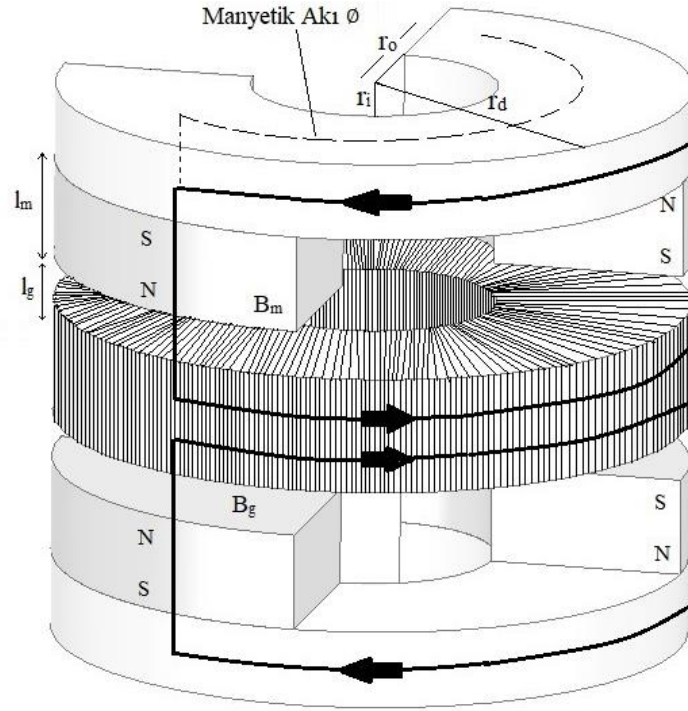
### III. ÇEMBERSEL DC MOTOR VE MANYETİK ANALİZİ

Uç etkisi ve uzunluk sınırlaması DC lineer motorların en belirgin dezavantajlarından biridir [3,8]. Ancak söz konusu problemler çift yanlı DC lineer motor tasarımı ile çözülmüştür. Ayrıca yüksek kuvvet/akım oranının elde edilmesi yeni tasarımlar için motivasyon kaynağı olmuştur. Şekil 2’de manyetik devresi verilen motorun 4 tane sarımdan oluşan topolojisinin hareket güzergâhını çember haline getirmek mümkündür. Böylece çembersel çift yanlı DC lineer motor topolojisi elde edilmiştir. Dört sarımlı çembersel DC motorun manyetik devresi Şekil 8’de gösterilmiştir. Önerilen yeni tasarımda, mıknatısların dizilimi, daha önce analizi yapılan çift yanlı doğru akım lineer motordaki gibidir. Başka bir ifade ile manyetik akı yolunu hava aralığı, orta mil, tekrar hava aralığı ve mıknatıs üzerinden aksel olarak tamamlamaktadır. Çift yanlı DC lineer motorda olduğu gibi her iki manyetik akı orta mil de üst üste gelerek birbirini destekler durumdadır.

Önerilen çembersel motorun tasarımında çift yanlı DC lineer motorun boyutları öncelikle referans alınmıştır. Çift yanlı DC lineer motorda olduğu gibi her sarımın uzunluğu 50 mm olup, mıknatıs yüksekliği,  $l_m$  25 mm olarak sabitlenmiştir. Sabit olan orta milin iç yarıçapı,  $r_i$  Şekil 8’de görüldüğü

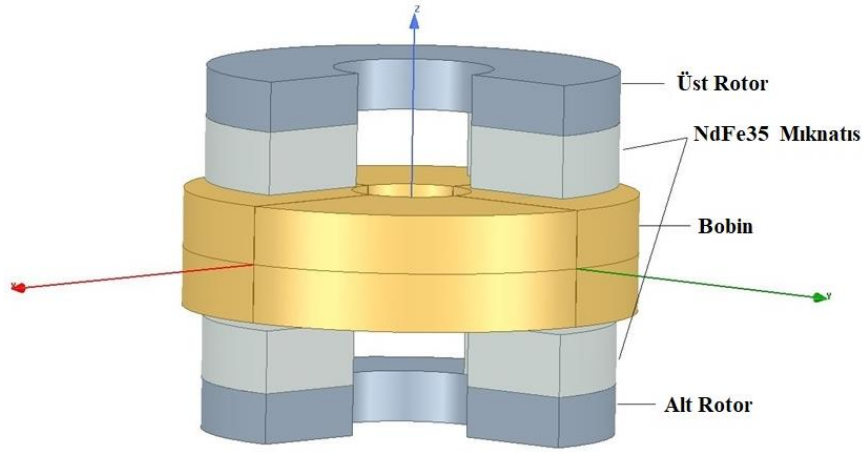


gibi çevresi 4x50 mm olacak şekilde 32 mm olarak alınmıştır. Aynı şekilde 50mm iletken uzunluğunu karşılamak için dış yarıçap  $r_d$  82 mm olacak şekilde topoloji oluşturulmuştur. Çift yanlı DC lineer motorda üst mil ve alt mil olarak adlandırılan ve 1010 tipi çelik malzemedan yapılan kısımlar, çembersel motorda üst rotor ve alt rotor olarak isimlendirilmiştir. Sabit orta mil ise stator olarak tanımlanmıştır. Mıknatısın altında kalan ve sabit olan stator üzerindeki sarımlara, zıt yönde akım verildiğinde hareketli kısımda bulunan üst rotor , alt rotor ve mıknatıslarda bir kuvvet oluşacaktır. Gerçekte kuvvet sarımlarda oluşmaktadır. Ancak sarımlar sabit olduğundan oluşan kuvvet hareketli kısımda reaksiyon kuvveti şeklinde etkili olacaktır. Böylece rotor ve mıknatıslara etkiyen kuvvet, ortalama yarıçap,  $r_o$  ile orantılı olan bir moment üretecektir. Bobinlere verilen enerji aynı yönde olur ise hareketli kısımda üretilen kuvvet sıfır olup, motor frenleme moduna geçecektir[1,2].



Şekil 8. Çembersel DC motorun manyetik devresi

Önerilen çembersel motorda, lineer motorda olduğu gibi hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu, rotordaki kuvveti üreten bileşenlerden biridir. Bu nedenle hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu hesabında, denklem 2 de verilen ifade kullanılmıştır. Kullanılan mıknatıs aynı tip olup, değişen mıknatıs ve hava aralığı alanıdır. Diğer taraftan her iki yüzey alanı aynı olduğundan, denklem 4 göre sonuç değişmeyecektir. Bu nedenle hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu 0,569 Tesla olmuştur. Şekil 1’de verilen boyutlar dikkate alınarak önerilen motorun Ansys-Maxwell ortamında oluşturulan üç boyutlu modeli Şekil 9’da verilmiştir. Çembersel motorda 4 adet sarım 90 derecelik aralığa karşılık gelecek şekilde yerleştirildiğinden ve her mıknatıs 90 derecelik açı oluşturduğundan, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu 360 derecelik bir yörünge boyunca analiz edilmiştir. Böylece hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunun aksel dağılımı Şekil. 10’da gösterilmiştir. Şekil 10’da görüleceği üzere, hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun açısal olarak değişimi, lineer motorda elde edilen eğriye benzer olup, mıknatısların altında birbirine zıt yöndedir.



Şekil 9. Çembersel DC motorun Ansys-Maxwell modeli



Şekil 10. Çembersel DC motorun hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi

Çift yanlı DC lineer motor üretilen kuvvet Eşit. 7'deki denklem ile hesaplanmıştır. Aynı yaklaşım ile çembersel motorda üretilen kuvvet hesaplanmıştır. Ancak hareket dairesel olduğundan çembersel motorda üretilen kuvvet rotorda oluşan momente dönüşmüştür. Motorda üretilen kuvvet dönme eksenine dik olarak yerleştirilmiş olan iletkenlerde oluştuğundan, moment hesabında en küçük yarıçap  $r_i$  ile en büyük yarıçap  $r_d$  nin ortalaması:

$$r_0 = \frac{r_i + r_d}{2} = 57 \text{ mm}$$

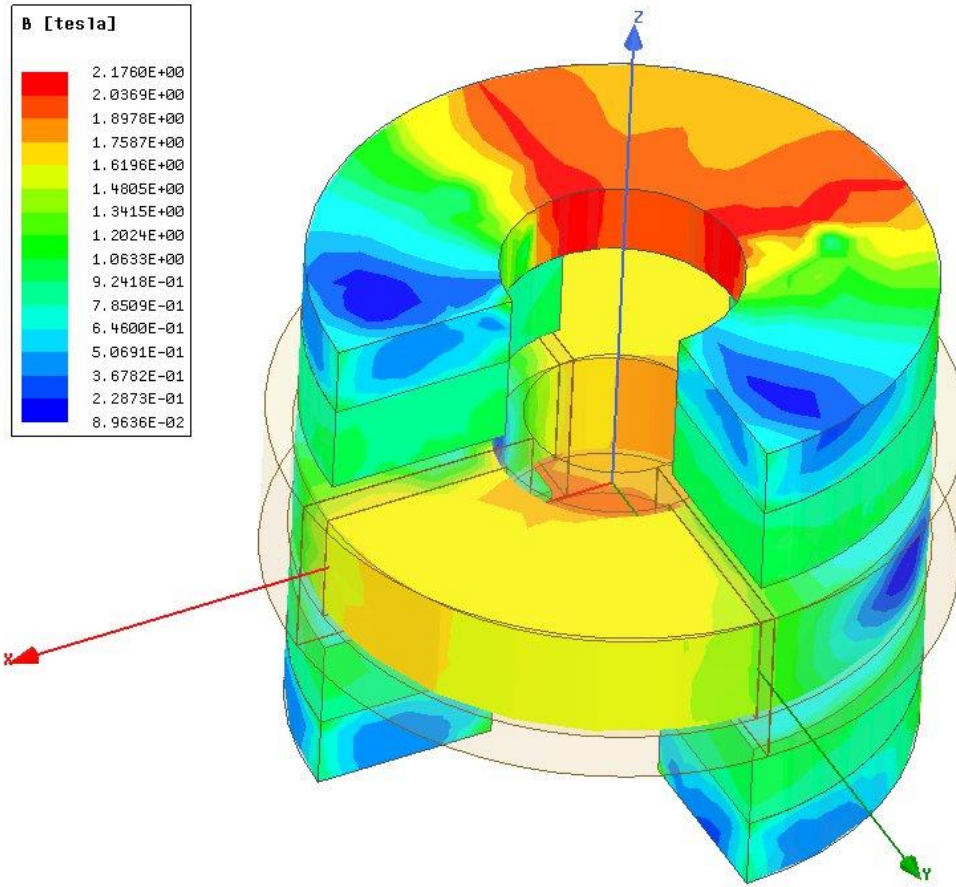
kullanılmıştır. Böylece stator sargılarında üretilen ve hareketli üniteye reaksiyon şeklinde oluşan moment denklem 8 yardımıyla

$$M = F r_0 = K i r_0 = K_t i \quad (9)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Denklem 8 deki bilgiler ve ortalama yarıçap Denklem 9 da yerine konulduğunda, moment/ akım oranı veya moment katsayısı

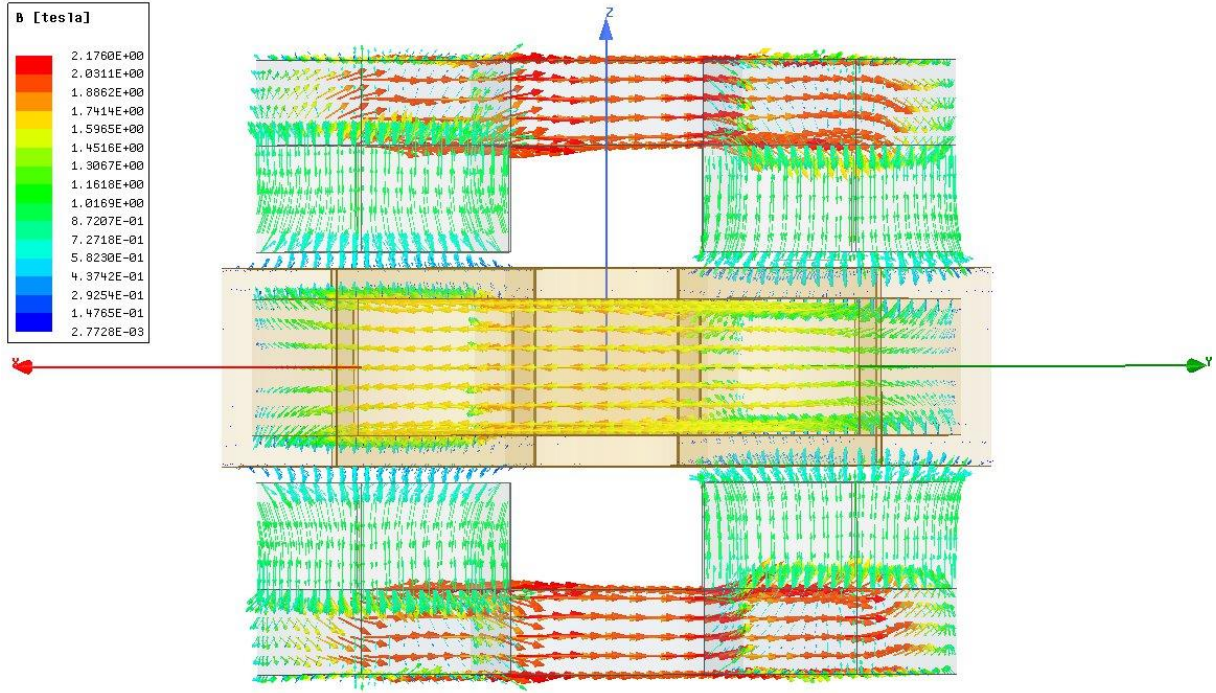
$$K_t = 6,31 \text{ Nm / A}$$

olarak hesaplamıştır. Aslında moment/ akım oranı her 1 Amperlik akıma karşılık üretilen momente tekabül etmektedir. Söz konusu parametrenin yüksek olması motorlarda istenilen bir durumdur. İlgili parametreyi artırmanın bir yolu da ortalama yarıçapın büyütülmesidir. Çembersel motorun ilk örneği Şekil 1’de verilen boyutlar dikkate alınarak tasarlandığından elde edilen moment/ akım oldukça düşük kalmıştır. Ancak istenilen boyutlarda tasarım yapma esnekliği her zaman mevcuttur. Şekil 1’de verilen boyutlar dikkate alınarak ilk tasarımı yapılan çembersel motorda üç boyutlu manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 11’de, ilgili manyetik akı yoğunluğu dağılımının vektörel gösterimi Şekil 12’de gösterilmiştir.

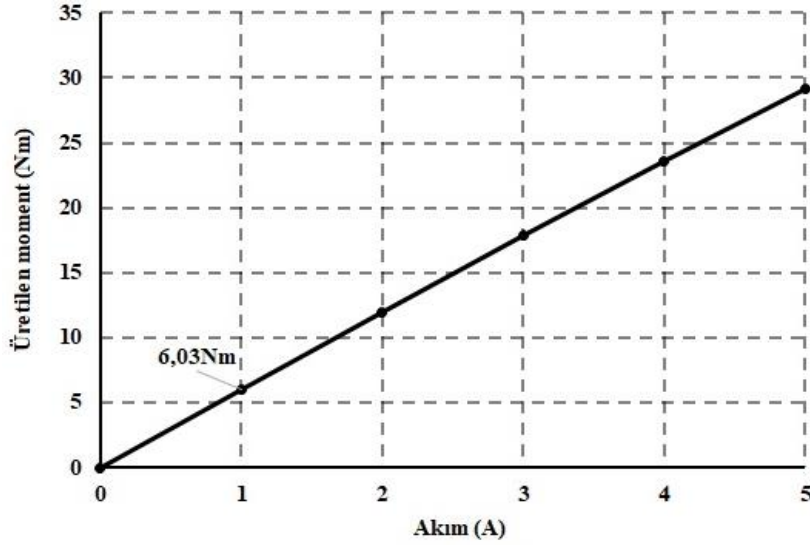


Şekil 11. Çembersel DC motor: manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Sabit olan orta mil veya statorda, 1010 tipi çelik malzemenin manyetik akı yoğunluğu, manyetik doyum sınırları içerisinde olduğu görülmüştür. Rotordaki ya da hareketli kısımlarda ise manyetik akı yoğunluğu statora göre yüksek olmasına rağmen sınırlar dâhilinde kalmıştır. Manyetik akı dağılımına ilave olarak üretilen momentin akım ile değişimi Şekil 13’de gösterilmiştir. Şekil 13’de görüldüğü gibi 1 Amperlik akıma karşılık üretilen moment 6,03 Nm olmuştur. Bu bulgu 6,31 Nm olarak hesaplanan moment değerine oldukça yakındır.



Şekil 12. Çembersel DC motor: vektörel manyetik akı yoğunluğu

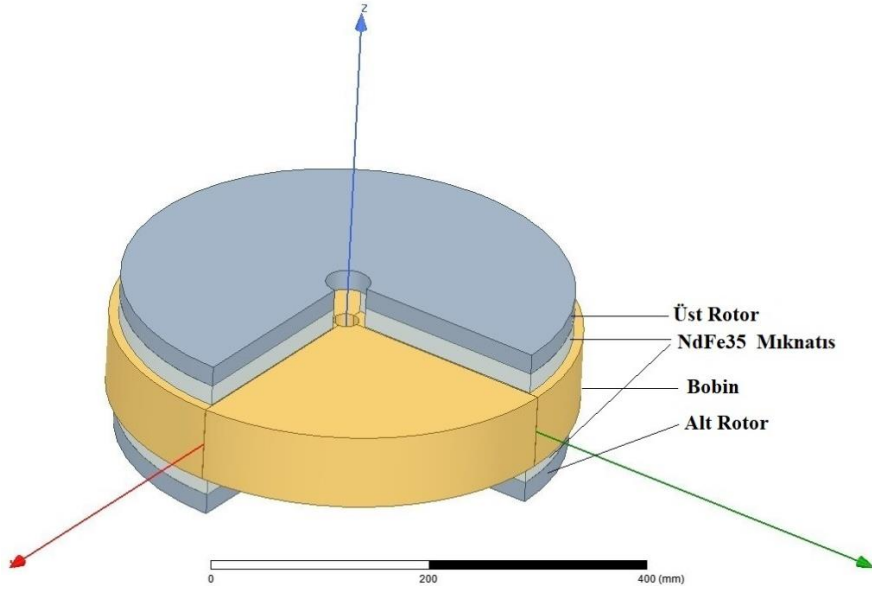


Şekil 13. Çembersel motor: üretilen moment-akım değişimi,  $K_t$

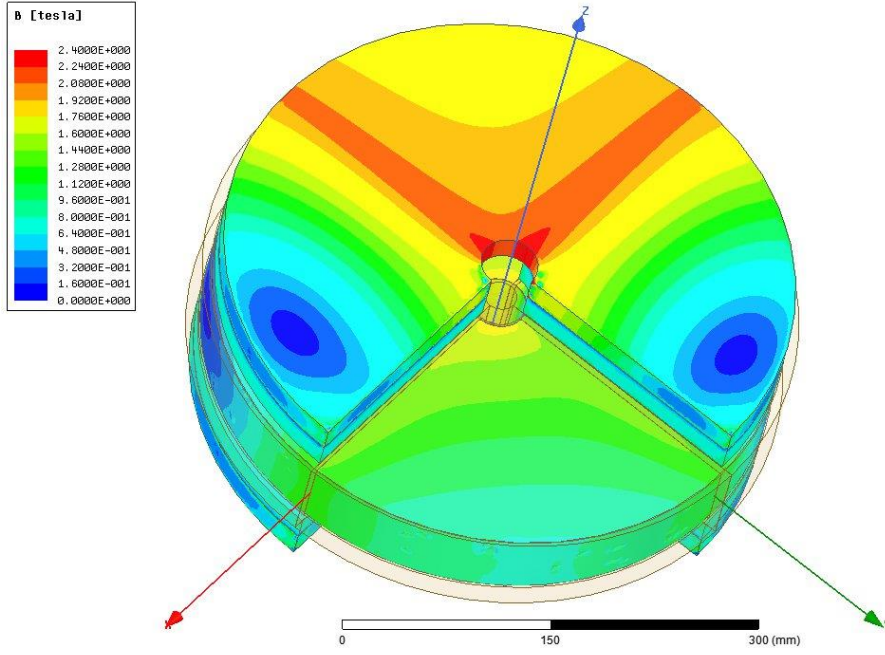
Önerilen çembersel motor diğer dönen tip elektrik motorlarının kullanıldığı yerlerde kullanılabilir şekilde geliştirilebilir. Ancak bu çalışmada öngörülen ilk kullanım alanı elektrikli araçlardır. Şekil 9'da ki topoloji göz önüne alındığında, sabit mıknatıslardan, alt ve üst rotordan oluşan hareketli kısım elektrikli araçlarda tekerlek içerisine yerleştirilebilir. Sabit olan endüvi sargılarını taşıyan stator ise araç gövdesine sabitlenebilir. Dolayısıyla daha düşük kütleye veya ağırlığa sahip hareketli kısım araç tekerleklerini tahrik için kullanılabilir. Araçlarda geleneksel olarak merkezi bir motor bulunup aktarma elemanları vasıtasıyla üretilen güç tekerlere ulaşır. Fakat teker motorlu araçlarda, 4 ayrı tekerde bağımsız motorlar bulunur ve bu motorlar merkezi bir birimde kontrol edilebilir[13]. Bununla birlikte teker motor tipli araçlarda, aktarma elemanlarına gereksinim duyulmayacağından, bu tür araçlar verim

açısından daha avantajlı hale gelmiştir[14]. Ayrıca geleneksel olarak elektrikli taşıtlarda kullanılan radyal akılı fırçasız doğru akım motoru, asenkron motor ve sabit mıknatıslı senkron motorlara kıyasla, aksel akılı motorların düşük hızda daha fazla moment üretip, moment dalgalanmasının daha düşük olması tercih edilme sebeplerindedir[11,15,16,17].

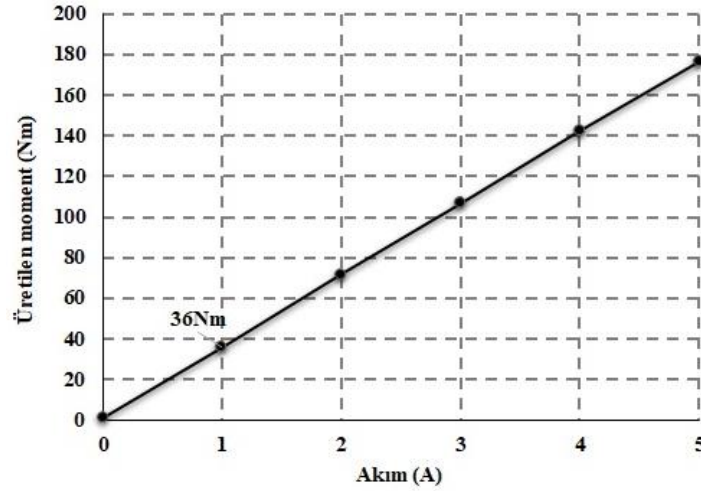
Teker motorlarla ilgili yapılan çalışmalarda motor boyutlarının lastik çapları ile orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Buna ek olarak literatürden, 19 inç çapında bir lastik için çapı 420mm, kalınlığı 160mm olan teker motorun uygun olabileceği anlaşılmıştır[13]. Bu nedenle geliştirilen ve ilk tasarımı Şekil 9’da gösterilen çembersel motor da elde edilen 6,03 Nm/A lik moment/akım parametresini artırmak için 19 inç lastik çapı referans alınarak değişiklik yapılmıştır. Başlangıç olarak, rotor ve statorun dış yarıçapları,  $r_d$  210 mm ye ayarlanmış ve iç yarıçap,  $r_i$  21 mm olarak belirlenmiştir. Daha sonra, toplam kalınlığı 155 mm de sınırlamak kaydıyla stator, rotor ve mıknatısların kalınlığı ayrı ayrı değiştirilerek moment üretimindeki değişimler gözlenmiştir. Son olarak maksimum moment değeri, stator kalınlığı 55 mm, rotor ve mıknatıs kalınlıkları 20 mm olarak tasarlandığında elde edilmiştir. Yeni önerilen çembersel tasarımda hem yarıçapın büyümesi hem de statorun boyundaki değişim ile aktif iletken uzunluğu artmıştır. Buna ek olarak, sargıların toplam katman kalınlığı 9 mm olarak belirlenmiş, sargıların mıknatıs ile arasındaki uzaklık 1mm olarak ayarlanmıştır. Böylece hareketli ünite de oluşan moment artırılmıştır. İlgili amaç doğrultusunda elde edilen çembersel motorun üç boyutlu Ansys-Maxwell modeli Şekil 14’de, manyetik akı yoğunluğu dağılımı ise Şekil 15’de gösterilmiştir. Ayrıca yeni tasarımın moment / akım değişimi Şekil 16’da verilmiştir. Elde edilen 36 Nm/A şeklindeki moment/akım oranı oldukça yüksektir. Dört tekerlektan tahrik edilen bir araç dikkate alındığında elde edilen tasarımın niteliğini değerlendirmek daha kolay olacaktır. Ayrıca her 1 Amperlik akıma karşılık 36 Nm lik moment üretimi elektrikli araçların batarya gereksinimi açısından önemli bir iyileştirme dir.



Şekil 14. Teker motor: Ansys-Maxwell modeli



Şekil 15. Teker motor: manyetik akı yoğunluğu değişimi



Şekil 16. Teker motor: üretilen moment-akım değişimi,  $K_t$

## IV. SONUÇ

Bu çalışmada daha önce tasarımı yapılarak prototipinden deneysel veriler elde edilen çift yanlı DC lineer motorun Ansys-Maxwell ortamında nümerik analizleri ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Çift yanlı lineer DC motorun hareket yörüngesi dairesel hale getirilerek yeni bir elektrik motoru topolojisi elde edilmiştir. Geliştirilen çembersel motorun tipik uygulama alanı olarak teker motor için tasarım analizleri yapılmıştır. Teker içi ölçüler göz önüne alınarak yapılan tasarımda, moment/akım oranı yüksek yeni bir motor topolojisi elde edilmiştir. Bununla birlikte motorun tasarımında uygulanabilecek farklı optimizasyon yöntemleri ile daha yüksek moment ve güç yoğunluğu elde edilebilir. Ayrıca

stator ve rotor için seçilen 1010 tipi çelik malzeme yerine farklı malzemeler test edilerek motorun performansı artırılabilir.

## V. KAYNAKLAR

- [1] R. Demirci ve M.T. Tuncay, “Çift yanlı doğru akım lineer motor tasarımı,” *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, s. 7, ss. 42-54, 2013.
- [2] M.T. Tuncay, “Sabit Mıknatıslı Dc Lineer Motor Tasarımı Ve Denetimi,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2016.
- [3] A.Basak, *Permanent-Magnet DC Linear Motors*, Oxford, Oxford University, 1996, pp. 1–37.
- [4] C. Jiefan, and W. Chengyuan, “Design characteristic and force analysis of PM linear motor for fast response servo system,” *IEEE 4th IPEMC*, 2004, pp. 1001–1004.
- [5] M. Küçükali, Ö. Akyazı ve S.A. Akpınar, “Doğrusal hareketli asenkron motor sürücülü mekanik osilatör ve evirici ile kontrolü,” Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Bursa, Türkiye, 2008, Bildiri no: 39.
- [6] E.R. Laithwaite, *Linear Electric Motors*, London, Mills and Boon Limited, 1971, pp. 32–88.
- [7] M. Ekmekçi, “Otomatik Açılıp Kapanan Kapılar için Tüp Tipi Lineer İndüksiyon Motor Tasarımı,” Yüksek Lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [8] S.A. Nasar and I. Boldea, *Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications*, USA:Prentice-Hall, 1987, pp. 4–23.
- [9] F. Profumo, Z. Zhang, and A. Tenconi, “A new viable solution for electric cars,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 39-45, 1997.
- [10] E. Hüner, N. Ekren ve T.Ç. Akıncı, “Teker Motorlar Ve Teker Motorların Elektrikli Araçlarda Kullanımına İlişkin Bir İnceleme,” *e-Journal of New World Sciences Academy*, c. 3, s. 2, 2008.
- [11] D. Choppa, “Performance of Torus-Type Brushless DC Motor with Winding Connected in Two and Three-Phase System,” Master's Theses, Louisiana State University, Louisiana, USA, 2006.
- [12] C. Gürünlü, *Enerji Dönüşümünün Temelleri Çözümlü Problemler 1*, Trabzon, Türkiye, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 1989, ss. 1-12.
- [13] K. Çakir, and A. Sabanovic, “In-wheel motor design for electric vehicles,” *9th IEEE International Workshop on*, 2006, pp. 613-618.
- [14] C.J. Ifedi, B.C. Mecrow, S.T.M. Brockway, G.S. Boast, G.J. Atkinson, and K.P. Dragica, “Fault Tolerant In-Wheel Motor Topologies for High Performance Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1249-1257, 2013.

- [15] E. Çetin ve F. Daldaban, "Otomotiv Uygulamalarında Kullanılacak Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı BLDC Motor Tasarım Modeli," Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, Türkiye, 2014.
- [16] M. Aydın, S. Huang and T. A. Lipo, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review," University of Wisconsin-Madison 2004.
- [17] N.A. Rahim, H.W. Ping, and M. Tadjuddin, "Design of axial flux permanent magnet brushless DC motor for direct drive of electric vehicle," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1–6.