

Rotor Oluk Şekillerinin Asenkron Motor Performansına Etkileri

Effect of Rotor Slot Shapes on Induction Motor Performance

Efe Ünlükaya¹, Asım Gökhan Yetgin², Ali İhsan Çanakoglu³, Mustafa Turan⁴

^{1,2,3} Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü

Dumlupınar Üniversitesi

efe.unlukaya4@ogr.dpu.edu.tr, gokhan.yetgin@dpu.edu.tr, aihsan.canakoglu@dpu.edu.tr

⁴ Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü

Sakarya Üniversitesi

turan@sakarya.edu.tr

Özet

Bu çalışmada asenkron motorun değişik yapıdaki rotor oluk şekilleri 2 - D Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analiz edilmiştir. Stator oluk geometrisi bütün modeller için aynı alınmış, rotor oluk geometrisinde ise 10 farklı oluk yapısı modellenmiştir. Modellemelerde 3 fazlı, 2 kutuplu, 3 kW gücünde, sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Literatürde mevcut olan yayınlardan farklı olarak bütün rotor oluk şekillerinin alanları ve rotor oluk yükseklik değerleri aynı alınmıştır. Modellemelerden her bir rotor oluk geometrisi için hava aralığında meydana gelen akı dağılımları, performans karakteristikleri ve çeşitli noktalardaki manyetik akı yoğunluk değerleri incelenmiştir. Ayrıca rotor oluğunda tek kafes veya çift kafes kullanılması durumundaki etkiler ile kamalı rotor olukların doyuma durumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yuvarlak rotor oluk geometrisi en iyi performans değerlerine sahip olan model olmuştur.

Abstract

In this paper, the induction motor with different rotor slot shapes is analyzed with 2 - D Finite Element Method (FEM). The geometry of stator slot is same for all but the geometry of the rotor slot was chosen with 10 different shapes. In analysis, a 3 - phase, 2 - pole, 3 kW with squirrel - cage induction motor was used. Unlike the commonly literature, the area and the height of the rotor slots are taken in same value. For each rotor slot shape, the distribution of the air - gap magnetic field, performance characteristics and magnetic field density on different location was examined. Additionally, single and double - cage in the rotor structure and the saturation on the wedge was examined. According to the results that obtained from modeling, round rotor slot geometry is given the best performance characteristics.

1. Giriş

Asenkron motorlar yapılarının basit, sağlam ve düşük maliyetli olmalarından dolayı endüstriyel birçok uygulamada geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Asenkron motorun moment - hız karakteristikleri birçok farklı uygulama için en önemli parametrelerden birisidir. NEMA, asenkron motorun moment - hız karakteristiklerini 4 ana sınıfta toplamıştır [1].

Bu sınıflandırmada A sınıfı; hava aralığına yakın, büyük (Şekil 1.a), B sınıfı; hava aralığına yakın, büyük ve derin (Şekil 1.b), C sınıfı; çift kafes rotor oluklarını (Şekil 1.c) ve D sınıfı; hava aralığına, yakın küçük rotor oluklarını (Şekil 1.d) temsil etmektedir [2].

Literatürdeki makalelere bakıldığında rotor oluk karşılaştırmaları genellikle NEMA standartlarında verilen rotor oluk geometrilerinden ikisinin kullanılarak analizlerin ve karşılaştırmaların yapıldığı görülmektedir.



Şekil 1: NEMA motor sınıfları.

Değişik yapıdaki rotor oluklarının motor performansına etkilerini inceleyen birkaç çalışma aşağıda verilmiştir. Bazı çalışmalarda ise stator oluk şekillerinin değiştirilmesi ile asenkron motorun performansının artırılması amaçlanmıştır [3], [4].

Pao-La-Or ve arkadaşları IEEE standartlarında verilen dikdörtgen ve yuvarlak şeklindeki rotor oluk geometrilerini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre yuvarlak rotor oluğunun dikdörtgen rotor oluğuna göre % 4.8 daha düşük titreşime sahip olduğunu göstermişlerdir. Rotor oluk tasarımının titreşim üzerinde etkilerinin olduğunu fakat moment - hız karakteristikleri, harmonik analiz vb. parametrelerinde motor tasarımı yapılırken dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir [5]. Virkan ve arkadaşları 4 farklı stator oluk geometrisini modellemişler ve en iyi yol alma ve devrilme momentinin dikdörtgen stator oluğundan elde edildiğini, nominal kayma değerinde en az akım değerine sahip stator oluğunun T tipi oluk geometrisine ait olduğunu belirtmişlerdir [6]. Feyzi ve Kalankesh asenkron motorun stator ve rotor oluklarının optimizasyonunu gerçekleştirip motor performansını artırmayı amaçlamışlardır. Bunun için oluk yapılarının genişliği ve derinliği gibi parametreleri, kullandıkları programda iterasyon metoduyla optimize etmişlerdir. Elde edilen yeni oluk yapısıyla toplam kayıpları azaltıp verimi yükseltmişlerdir [7].

James çalışmasında çift kafesli bir motorun yol alma anındaki değişimlerini incelemek amacıyla üst oluğun çap değerini 1 mm, 2.1 mm ve 5 mm olarak değiştirilerek moment ve verim değişimini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlara göre çubuk genişliği arttıkça verim değerinin arttığı, yol alma momentinin ise küçük çubuk genişliklerinde arttığı fakat çubuk genişliğinin artırılmasıyla yol alma momentinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca oluk yükseklik değerinin artması ile verim değerinin azaldığını, yol alma momentinin arttığını ifade etmişlerdir [8]. Galindo çalışmasında 5 farklı çift kafes rotor oluk geometrisinin akım ve moment değişimlerini incelemiştir [9]. Virlan ve arkadaşları yuvarlak rotor oluk geometrisine sahip bir asenkron motorda olukların kapalı veya yarı kapalı olması durumunda nelerin değişeceğini göstermişlerdir. Açık rotor geometrisinin yol alma akımı, yol alma ve devrilme momentlerinin daha yüksek olduğunu, nominal akım ve moment değerlerinde ise sonuçların birbirine oldukça yakın olduğunu göstermişlerdir [10]. Jelassi ve arkadaşları çalışmalarında dikdörtgen ve kamaya sahip dikdörtgen rotor oluklarını incelemiştir. Kamalı dikdörtgen rotor oluğunun kama ile iç çap arasında kalan kısımlarında doymaların meydana geldiğini belirtmişlerdir [11]. Simon ve Monzon, SEY kullanarak üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motoru analiz etmişlerdir. Çalışmalarında 5 farklı rotor oluk geometrisi kullanmışlardır. Rotor oluk geometrileri için parametrik model tanımlamalarını elde etmişlerdir [12]. Jang ve Park, bir fazlı asenkron motor üzerinde, oluk açıklığının verim üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Eğer oluk açıklığı 2.1 mm’den 0.2 mm’ye düşürülürse, verim değerinin % 2.6 oranında arttığını göstermişlerdir [13]. Donolo ve arkadaşları bir asenkron motorun açık veya kapalı oluğa sahip olması durumundaki performanslarını incelemiştir. Kapalı oluk tipli asenkron motorun açık tipli oluk yapısına göre daha düşük verime sahip olduğunu göstermişlerdir [14].

Bu çalışmada ise, stator oluk geometrisi bütün modeller için aynı alınmıştır. Ayrıca motor iç – dış çap, sargı sayıları, hava aralığı uzunluğu vb. değerlerde aynı alınmıştır. Rotor oluk geometrisinde ise 10 farklı yapı kullanılmıştır. Bütün rotor oluk modellerinin alanları ve oluk yükseklik değerleri aynıdır. Analizler SEY programında gerçekleştirilmiş ve en iyi performans değerlerini veren rotor oluk geometrisi araştırılmıştır.

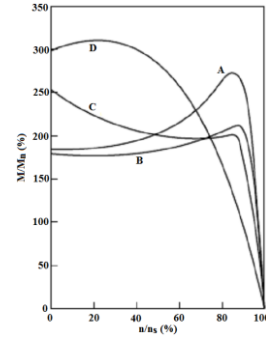
2. Rotor Oluklarının Performansa Etkisi

Oluk şekilleri; makinenin fiziksel, elektriksel ve manyetik karakteristiğini etkiler. Oluk geometrisi belirlenirken bütün bu karakteristikler göz önünde bulundurulur. Oluk alt genişliği, oluk adınının yarısı seçildiğinde maksimum güç elde edilmektedir. Sabit oluk genişliği yerine sabit dış genişliğinin kullanımı ile hacimsel azalmalar olduğu gibi manyetik direncin azaldığı ve buna bağlı olarak yol verme momentinin arttığı belirlenmiştir. Elektrik motorlarının tasarımında birçok parametre bulunur ve bunlar birbirleriyle bağlantılıdır. Verimli sonuçlar elde edebilmek için tasarım parametrelerinin bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekmektedir [15].

Performans özelliklerinin belirlenmesinde asenkron motorun rotor oluk geometrisi oldukça kritik bir öneme sahiptir. Çünkü moment - hız karakteristiği büyük ölçüde rotor

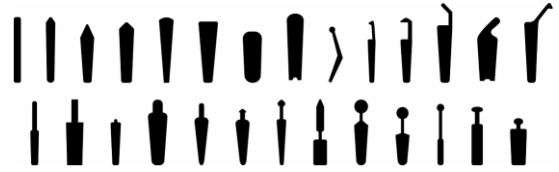
konfigürasyonu ile belirlenmektedir [1]. Motor performansını geliştirebilmek için rotor oluk geometri şekillerinin iyileştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir. Rotor oluğunun tasarım sürecinde, tasarımcının mevcut standart rotor oluklarından farklı tasarımları yapabilmesi için bu konu üzerinde uzun süre çalışmasını gerekmektedir [1]. Oluk yapılarının farklılığı, motorun kalkış, devrilme ve nominal işletmesindeki rotor direnç ve endüktans değerlerini, dolayısıyla moment değerlerini değiştirmektedir. Sincap kafesli asenkron motorun performansını belirleyen parametrelerin başında ise rotor direnci ve kaçak endüktans değerleri gelmektedir [2].

NEMA sınıfına ait moment - hız eğrileri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: NEMA motor sınıfına ait moment - hız eğrileri [2].

Asenkron motorun rotor oluklarında kullanılan çeşitli ebatlardaki rotor geometrileri Şekil 3’de verilmiştir [16].



Şekil 3: Bir asenkron motorun rotorunda kullanılabilecek oluk geometrileri.

Rotorda kullanılan oluk geometrilerinin oldukça fazla olduğu, ayrıca oluk alanlarının ve oluk yükseklik değerlerinin birbirlerinden farklı oldukları görülmektedir.

3. Rotor Oluk Parametrelerinin Hesabı

Bu kısımda stator oluk geometrisinde herhangi bir değişiklik yapılmadığı için sadece rotor ile ilgili ifadeler [17] verilmiştir. Kutup başına manyetik akı değeri (ϕ) sırasıyla dışlardaki manyetik doyma katsayısına bağlı şekil faktörüne (α_i), kutup adımına (τ), nüve uzunluğuna (L) ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerine (B_g) bağlı olarak değişmektedir.

$$\phi = \alpha_i \tau L B_g \quad (1)$$

Hava aralığı görünür gücü ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenir. Bu ifadede A_l stator akım yüklemesini, n_s

senkron devir sayısını, D_{is} stator iç çapını, K_f 1.11 ile 1.02 arasında değişen şekil faktörünü ifade etmektedir.

$$S_g = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 D_{is}^2 L \frac{n_s}{60} A B_g \quad (2)$$

Nominal rotor akımı ise aşağıdaki şekilde hesaplanır. Burada K_{w1} stator sargı faktörünü, W_1 bir fazdaki sarım sayısını, I_{1n} nominal akımı, N_r rotor oluk sayısını, m faz sayısını, K_i stator ve rotor arasındaki emk oranının katsayısını ifade etmektedir.

$$I_b = K_i \frac{2mW_1K_{w1}}{N_r} I_{1n} \quad (3)$$

Rotor oluk alanı A_b hesaplanan nominal rotor akımı ve rotor iletkenleri için seçilen akım yoğunluğu J_b değerleri ile basitçe hesaplanabilir.

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} \quad (4)$$

Rotor oluk adımı τ_r şu şekildedir. g hava aralığı uzunluğudur.

$$\tau_r = \frac{\pi(D_{is} - 2g)}{N_r} \quad (5)$$

Rotor dış akı yoğunluğu B_{tr} kullanılarak rotor dış genişliği b_{tr} bulunabilir. K_{fe} paketleme faktörüdür.

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{fe} B_{tr}} \quad (6)$$

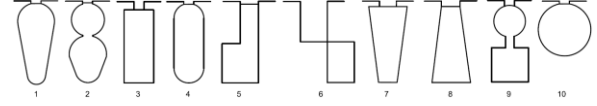
B_{cr} rotor sırt akı yoğunluk değerine bağlı olarak rotor sırt yükseklik değeri h_{cr} hesaplanır.

$$h_{cr} = \frac{\phi}{2LB_{cr}} \quad (7)$$

Hava aralığı manyetik akı yoğunluk değerinin motor performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Çalışmada rotor oluk alanı 64.4 mm^2 olarak, rotor oluk yüksekliği ise 15 mm alınmıştır. Rotor sırt yükseklik değeri ise 10.8 mm ’ dir. Rotor oluk geometrilerine bağlı olarak rotor üst ve alt oluk genişlik değerleri, dış genişlikleri, oluk ağız genişlikleri, kama yüksekliği vb. değişkenlik gösterecektir. Rotor oluk geometrisine bağlı olarak manyetik akı yoğunluk değerlerinin (rotor, hava aralığı) değişeceği görülmektedir. Bu durum motor performansında ve ebatlarında oldukça etkin rol oynamaktadır. Bu yüzden bir motor tasarımı yapılırken rotor oluk geometrisinin seçimi en önemli parametre haline gelmektedir.

Bu çalışmada, modellemesi yapılan rotor oluklarının isimleri Damla, Damla + Yuvarlak, Dikdörtgen, Düz Damla, Düz L, L, Ters Yamuk, Yamuk, Yuvarlak + Kare ve Yuvarlak olarak sırasıyla verilmiştir. Stator oluk geometrisi ise Şekil 5’ de görülmektedir.



Şekil 4: Modellemesi yapılan 10 farklı rotor oluk geometrisi.

4. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Günümüzde, kullanılan sayısal yöntemler, başta sonlu elemanlar yöntemi, rotor geometrisine ait parametrelerin motor performansı üzerine etkilerini görmekte yaygın olarak kullanılan simülasyon araçlarıdır. SEY belli bir geometri için, elektrik, mekanik ve elektromanyetik değerler arasındaki ilişkileri tanımlayabilmektedir [9]. Asenkron motorun manyetik alan analizi iki boyutlu SEY ile lineer olmayan AC problem olarak ele alınıp hesaplanmıştır. Bu analiz ile rotor oluk geometrisinin, hız - moment gibi çalışma karakteristiklerine etkisi incelenebilmektedir. Elektromanyetik alan modeli Maxwell denklemlerine dayanmaktadır [9].

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = -js\omega_s \sigma A + J \quad (8)$$

İfadede A manyetik vektör potansiyeli, σ elektriksel geçirgenliği, ω_s statora uygulanan açısal frekansı, s kayma değerini, μ manyetik geçirgenliği ve J akım yoğunluğunu ifade etmektedir [9].

Bu çalışmada asenkron motorun performans değerlendirmesi FEMM isimli sonlu eleman paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEY ile asenkron makinanın analizlerini yapabilmek için uygun bir eşdeğer devre modeli ortaya konulmalıdır. Bu eşdeğer devrenin karalı hal bir faz devre olması yeterlidir. Kararlı hal söz konusu olduğundan hız ve elektriksel frekans sabittir. FEMM modellemelerinde kullanılan formüller kaynak [18]’ den alınmıştır.

5. Elde Edilen Sonuçlar

FEMM programında çözüm hassasiyeti $1e-008$ ve üçgenler için minimum açı değeri 30° seçilmiştir. 10 farklı rotor oluk geometrisi için motorun çeşitli noktalarından elde edilen manyetik akı yoğunluk değerleri Çizelge 1’ de verilmiştir.

Çizelge 1 incelendiğinde çeşitli noktalardan elde edilmiş manyetik akı yoğunluk değerlerinin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Burada oluşan farkların rotor oluk geometrisinin şekli ile alakalı olduğu açıktır. Hava aralığında meydana gelen akı yoğunlukları ile motor performansında değişiklikler meydana geleceği de görülmektedir.

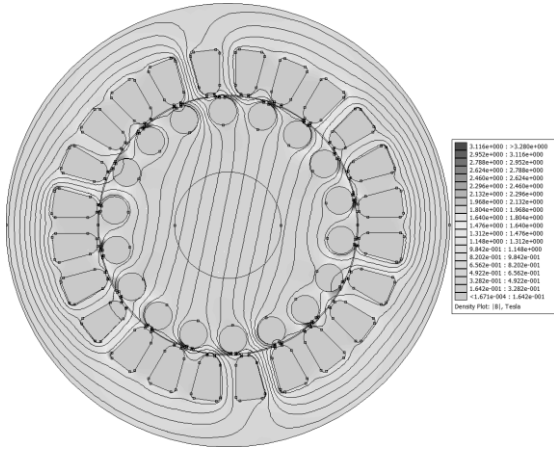
Rotor dış aralığı küçüldükçe (L model) manyetik akı yoğunluğu değerlerinin arttığı görülmektedir. Mil kısmına yakın yerlerden elde edilen B değerlerinin birbirine yakın olduğu ve ortalama 0.6 T civarında olduğu tespit edilmiştir. Formül 7’ den de görüleceği üzere rotor oluk yükseklikleri aynı olduğu için, dolayısıyla rotor sırt yüksekliği de aynı, rotor sırt kısmındaki manyetik akı yoğunluk değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Stator dişlerinin orta kısmından elde edilen değerlerin ise ortalama olarak 1.66 T civarında ve birbirlerine yakın değerler olduğu görülmüştür. Kamaya sahip olan rotor oluk geometrilerinde, rotor dış çapı ile kama kısmı arasında

doymaların meydana geldiği görülmektedir. (Özellikle Damla, Ters Yamuk, Dikdörtgen). Diğer rotor oluk tiplerinde ise daha az doyma meydana gelmiştir.

Çizelge 1: 10 farklı rotor oluk geometrisi için çeşitli noktalarda elde edilen manyetik akı yoğunluk değerleri

Koordinatlar (mm)		Damla	Damla + Yuvarlak	Dikdörtgen	Düz Damla	Düz L	L	Ters Yamuk	Yamuk	Yuvarlak + Kare	Yuvarlak
x	y	B (T)									
-09.00	37.60	1.0633	0.9950	1.0089	1.0013	0.8798	1.3644	1.0161	0.9217	1.0528	1.7751
11.70	18.50	0.6229	0.6133	0.6295	0.6157	0.6342	0.5819	0.6236	0.6319	0.4679	0.5237
-10.40	41.90	1.1475	1.1378	1.1265	1.1124	0.9631	1.2165	1.1715	1.0120	1.1489	1.4341
02.26	43.55	1.7104	1.6265	1.6826	1.5345	1.2728	1.3644	2.2231	1.3122	1.5066	2.1629
-14.00	52.00	1.6635	1.6692	1.6630	1.6828	1.6202	1.5472	1.6316	1.6201	1.7356	1.6622

Şekil 5’ de FEMM programından elde edilen yuvarlak rotor oluk yapısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.



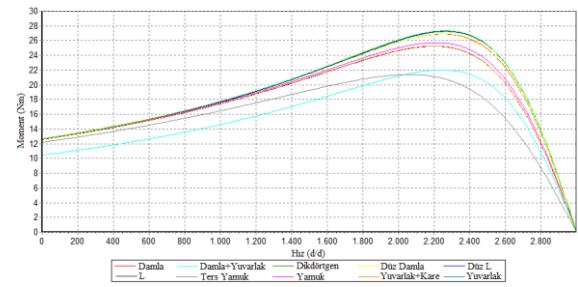
Şekil 5: Yuvarlak rotor için manyetik akı yoğunluk dağılımı.

Çizelge 2: Hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluk değerleri

Rotor Modelleri	Ortalama Manyetik Akı Yoğunluğu (T)
Damla	0.54412
Damla + Yuvarlak	0.55650
Dikdörtgen	0.54673
Düz Damla	0.55621
Düz L	0.49716
L	0.44002
Ters Yamuk	0.50453
Yamuk	0.49533
Yuvarlak + Kare	0.56338
Yuvarlak	0.55711

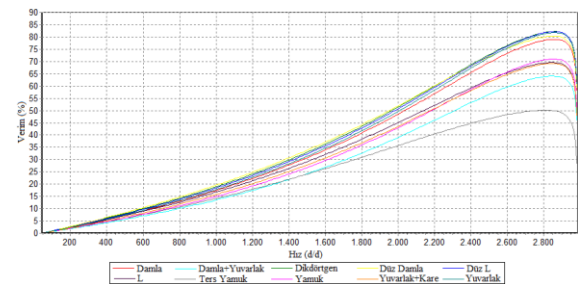
Çizelge 2 incelendiğinde, rotor oluğunda yuvarlak geometriye sahip olan modellerde ortalama hava aralığı manyetik akı yoğunluk değerinin daha fazla elde edildiği görülmektedir. Bu durum motorun performansını da olumlu yönde etkilemektedir. Hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluğu grafikleri ve çizelge incelendiğinde ortalama değerlerin 0.45 T ile 0.55 T değerleri arasında olduğu görülmektedir. Kamalı rotor oluklarının hava aralığındaki akı yoğunluğu değerlerinin daha büyük çıktığı görülmektedir. En

düşük manyetik akı yoğunluğu değeri, oluk ağız açıklığı en büyük olan L rotor geometrisinden elde edilmiştir. Diş genişliği küçük olan rotor modellerinde ortalama hava aralığı manyetik akı yoğunluk değerlerinin küçük çıktığı görülmektedir.



Şekil 6: 10 farklı rotor oluk geometrisi için moment - hız grafikleri.

Elde edilen moment grafiği incelendiğinde yol alma momenti için en yüksek değeri veren yuvarlak oluk geometrisi olmuştur. Minimum ve maksimum yol alma momentleri arasında % 21.19’ luk bir iyileştirme sağlanmıştır. Devrilme momentinde ise yine en iyi sonuç yuvarlak oluk geometrisinden elde edilmiştir. Yol alma momentinde ise % 27.78’ lik bir artış gözlemlenmiştir. Nominal moment değerlerinde ise, (en düşük 6.912 Nm, en yüksek 11.07 Nm), % 60.15’ lik bir değişimin olduğu görülmektedir. Motor performansını belirlemede en önemli parametrelerden biri olan moment değerlerinin rotor oluk geometrisine oldukça bağımlı olduğu görülmektedir. Rotor oluk üst genişliği yuvarlak olan rotor oluk geometrilerinde, hava aralığı manyetik akı değerleri daha fazla elde edildiği için, yol alma ve devrilme momentlerinin daha yüksek elde edildiği görülmüştür.



Şekil 7: 10 farklı rotor oluk geometrisi için verim - hız grafikleri.

Verim grafiği incelendiğinde nominal işletme değerinde en yüksek verim % 82.18 değeri ile yuvarlak oluk geometrisi olmuştur. En düşük verim ise ters yamuk oluk geometrisinden elde edilmiştir. Rotor oluk geometrisinin uygun seçilmesi ile % 64.26'lık bir iyileştirme sağlanacağı görülmüştür.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada asenkron motorun rotorunda kullanılan 10 farklı oluk geometrisi 2 - D sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Analizler sırasında oluk alanları ve oluk yükseklik değerleri bütün rotor olukları için sabit alınmıştır. Analizler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Kamalı olan rotor modellerinde kama ile hava aralığı arasında kalan kısımda doymaların meydana geldiği görülmüştür. Paralel kenarları olan rotor modellerinde akı çizgilerinin rotorun iç kısımlarına daha fazla nüfuz ettiği görülmüştür. Oluk ağız açıklığı büyüdükçe hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluk değerinin azaldığı görülmüştür. Kenarları dik olarak birleşen rotor oluklarında (dikdörtgen, L vb.) bu birleşim yerlerinde doymaların meydana geldiği görülmüştür. Kenarları yuvarlak olan rotor oluk tiplerinde ise manyetik akı çizgilerinin daha düzgün elde edildiği görülmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda, NEMA standartlarında (oluk alanlarının ve oluk yükseklik değerlerinin farklı olması) verilen moment - hız karakteristiklerinden farklı grafikler elde edilmiştir. Rotor oluk geometrisinin moment ve verim üzerinde ne kadar etkili olduğu (oluk alanı ve oluk yüksekliklerinin eşit olması kısıtı altında) açıkça görülmektedir.

Endüstride istenilen moment değeri için motor tasarımı yapılırken uygun oluk seçimi ile birçok problem aşılmış olacaktır. Bundan sonraki çalışmada Şekil 3' de verilen rotor oluk geometrilerinin hepsinin modellenmesi yapılarak daha detaylı bir motor performans analizi yapılacaktır.

7. Kaynaklar

- [1] Lee, G., Min, S. ve Hong, J. P., "Optimal Shape Design of Rotor Slot in Squirrel - Cage Induction Motor Considering Torque Characteristics", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 5, 2197 - 2200, 2013.
- [2] Şal, S., İmeryüz, M. ve Ergene, L. T., "The Analysis of The Squirrel Cage Induction Motor Rotor Bars under the Cost Constraint", *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt No. 2, Sayı 3, 23 - 28, 2012.
- [3] Mohan, M., Vallecha, H., Singh, S., Nayyar, A., Kumar, A. ve Singh, N., "A Comparative Study on Performance of 3 kW Induction Motor with Different Shapes of Stator Slots", *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 4, No. 6, 2446 - 2452, 2012.
- [4] Sundaram, M. ve Navaneethan, P., "On the Influence of Stator Slot shape on the Energy Conservation Associated with the Submersible Induction Motors", *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, No. 4, 393 - 399, 2011.
- [5] Pao-La-Or, P., Peaiyoung, S., Kulworawanichpong, T. ve Sujitjorn, S., "Effects of the Geometry of the Rotor Slots on the Mechanical Vibration of Three - Phase Induction Motors", *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, 2007, 434 - 438.
- [6] Virlan, B., Simion, A., Livadaru, L., Munteanu, A., Mihai, A. M. ve Vlăsceanu, S., "External Rotor Shape Estimation of an Induction Motor by FEM Analysis", *Buletinul AGIR*, Vol. 4, 27 - 32, 2011.
- [7] Feyzi, M. R. ve Kalankesh, H. V., "Optimization of Induction Motor Design by using the Finite Element Method", *Electrical and Computer Engineering Canadian Conference*, 2001, 845 - 850.
- [8] Kirtley, J. J. L., "Designing Squirrel Cage Rotor Slots with High Conductivity", *Proc. of ICEM'04 Conference International Conference on Electric Machines*, 2004.
- [9] Galindo, V. A., Fdez, X. M. L., Pinto, D. J. A. ve Coimbra, A. P., "Parametric Study of Rotor Slot Shape on a Cage Induction Motor", *10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*, 2002, 190 - 195.
- [10] Virlan, B., Livadaru, L., Simion, A., Munteanu, A. ve Mihai, A. M., "Design and FEM Simulation of a Fractional Power Three - Phase Induction Motor for Oil - Submerged Applications", *Proceedings 25th European Conference on Modelling and Simulation ECMS*, 2011, 181 - 187.
- [11] Jelassi, S., Romary, R. ve Brudny, J. F., "Slot Design for Dynamic Iron Loss Reduction in Induction Machines", *Progress in Electromagnetics Research B*, Vol. 52, 79 - 97, 2013.
- [12] Simon, L. ve Monzon, J. M., "The Finite Element Method for Parametric Identification of a Three - Phase Induction Machine with Genetic Algorithms", *11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering*, 2009.
- [13] Jang, G. H. ve Park, S. J., "Characterization of a Single-Phase Induction Motor due to the Effect of Slot Opening", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 4, 2065 - 2067, 2004.
- [14] Donolo, P., Bossio, G. ve De Angelo, C., "Analysis of Voltage Unbalance Effects on Induction Motors with Open and Closed Slots", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, 2024 - 2030, 2011.
- [15] Karabiber, A. ve Çelebi, M., "Asenkron Motor Tasarımının Güncellenmiş Kriterler ile Simülasyonu", *Fırat Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, 321 - 325.
- [16] Bonnett, A., "Stator & Rotor Design Considerations for Integral HP Motors", *EASA Convention Dallas*, 2008.
- [17] Boldea, I. ve Nasar, S. A., *The induction machine handbook*, CRC Pres LLC, Washington, D.C., 2002.
- [18] Meeker, D., "Induction motor example", 2004, <http://www.femm.info/wiki/InductionMotorExample>.
- [19] Çanakoğlu, A. İ., Şenol, İ. ve Bekiroğlu, N. D., "Analytical and Numerical Calculation of Inductance of a Plunger - Type Magnet", *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 1999, 455 - 458.