

3 Fazlı 37 kW'lık Asenkron Motorlarda Rotor Oluk Uzunluklarının Motor Verimine Etkilerinin Araştırılması

Necati DEMİR¹, Mehmet Recep MİNAZ¹, Melih KUNCAN¹

¹Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye
Sorumlu yazar: melihkuncan@siirt.edu.tr

Geliş tarihi:14.12.2020;

Kabul tarihi:04.02.2021

Özet

Asenkron motorlar; verimli olmaları, az bakım gerektirmeleri, sağlam ve ucuz olmaları sebebiyle, birçok alanda oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisinde, endüstrinin yüksek maliyetli alanlarında, asenkron motorlar tercih edilmektedir. Dolayısıyla; bu motorlardan alınan verim de maddi anlamda büyük etki sahibi olmaktadır. Bu nedenle; asenkron motorların verimi, akademik alanı da yakından ilgilendiren bir konumdur. Yapılan bu çalışma da, asenkron motorların veriminde büyük etkiye sahip olan rotor oluk uzunluklarının optimizasyonu üzerine yapılmıştır. Çalışmada analizler sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma için öncelikle bir denek model oluşturulmuş ve 2-D SEY(Sonlu Elemanlar Yöntemi) kullanılarak, deney-gözlem metoduyla verimlilik optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Makinada rotor oluk tipi olarak seçilen modelde optimal verim elde edilmiştir. Bu oluk tipinin uzunluk parametreleri olan hs_0 , hs_1 ve hs_2 üzerine yapılan bu çalışmada 3 farklı optimal rotor uzunluk değerleri bulunmuştur. Bu değerlerin her birinde başlangıca göre yaklaşık %0,6'nın üzerinde verim artışı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Optimizasyon, Rotor oluk yapısı, Oluk Uzunluğu, Verim

Investigation of the Effects of Rotor Slot Lengths on Motor Efficiency in 3 Phase 37 kW Asynchronous Motors

Abstract

Induction motors; Due to their efficiency, low maintenance, robustness, and cheapness, they are widely used in many fields. In today's technology, induction motors are preferred in the high-cost areas of the industry. Therefore; the efficiency of these engines also has a great financial impact. Therefore; The efficiency of induction motors is in a position that closely concerns the academic field. This study has been done on the optimization of rotor slot lengths, which have a great influence on the efficiency of induction motors. In the study the analyses are performed using the finite element program. For the study; primarily a subject model was created. Then, an efficiency optimization study was carried out by using the 2-D FEM (Finite Element Method) with the experiment and observation method. Optimal efficiency was achieved in the model selected as the rotor slot type in the machine. In the study on the parameters of hs_0 , hs_1 , and hs_2 , which are the length parameters of this slot type, 3 different optimal rotor length values were found. In each of these optimal values, an efficiency increase of more than about 0.6% was observed compared to the initial yield.

Keywords: Induction Motor, Optimization, Rotor slot structure, Slot Length, Efficiency

1. GİRİŞ

Asenkron makinalar, endüstriyel alanda; düşük maliyetleri, kullanım kolaylığı, bakım gerektirmemesi, üretim kolaylıkları gibi avantajlı yönlerinden dolayı yüksek kullanım oranına sahiptir. İlerleyen teknolojiye paralel olarak asenkron makinalardaki verimlilik kalitesi de artmaya devam etmektedir. Ülkemizde elektrik tüketiminin yaklaşık %40'ı doğrudan asenkron motorlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu oran sanayi kuruluşlarında ise %70'e kadar çıkmaktadır. Bu da demek oluyor ki motorun verim kalitesindeki %0.1'lik bir artış ile büyük ekonomik tasarruflar sağlanabilmektedir. Durum böyleyken asenkron motorun verimini etkileyen parametrelerin her biri üzerinde yapılan optimizasyon çalışması büyük bir değer taşımaktadır [1,2].

Asenkron makinalar stator ve rotor olmak üzere temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Hareketsiz kısım olan statorun görevi manyetik alanı oluşturmak, hareketli kısım olan rotor ise dönme hareketini oluşturmaktadır. Asenkron motorların stator sargılarına üç fazlı alternatif bir gerilim uygulandığında stator sargılarında döner bir manyetik alan meydana gelir. Bu manyetik alan içerisinde duran kısa devre çubuklarını keserek rotor üzerinde bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilimin oluşturduğu kısa devre akımları rotor üzerinde manyetik alanı oluşturur. Rotor manyetik alanı ile stator manyetik alanının birbirini etkilemesi sonucunda bir döndürme momenti oluşur. Oluşan bu moment ile rotor, döner alan yönünde dönmeye başlar [3,4].

Asenkron motorların verim değeri, giriş ve çıkış güçlerine bağlıdır. Elektrik enerjisinin mekanik dönme enerjisine dönüşene kadar olan süreçte verdiği kayıpların minimum değerde olması, makinenin maksimum verim ile çalıştığı anlamına gelir.

$$\text{Verim} = (P_{\text{giriş}} / P_{\text{çıkış}}) \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte görüldüğü gibi, giriş ve çıkış güçleri verimi doğrudan belirlemektedir. Ancak giriş ve çıkış güçleri arasındaki kayıpları belirleyen; motorun geometrisindeki her detay, kullanılan malzemeler, sargı yapıları, devir sayısı, kutup sayısı, çalışma sıcaklığı, çalışma frekansı, çalışma gerilimi gibi birçok faktör, dolaylı yoldan verime etki etmektedir.

Asenkron makinaların icadından bugüne dek yapılan birçok çalışma, maksimum verime odaklanmıştır. Asenkron motorların rotor oluk geometrisi üzerine yapılan çalışmalar da bu çalışmaların önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Literatürdeki mevcut olan diğer çalışmalar incelendiğinde; rotor oluk geometrisinin optimize edilmesinin, motor performansında önemli katkılar sağladığı görülmektedir. Farklı modeller üzerinde yapılmış, rotor oluk geometrisi çalışmalarının birkaçı aşağıda verilmiştir.

Yetgin ve arkadaşı, 3 fazlı 2.2 kW gücünde kafesli asenkron motor modeli üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada kare ve dikdörtgen rotor olukları üzerinde rotor oluk genişliği (bs) ile rotor oluk yüksekliği (hs) oranının (hs/bs), motor performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hs/bs oranının optimum motor performansı için 2 ile 3 arasında olması gerektiği tespit edilmiştir [5].

Barbour ve arkadaşı, 500 kW'lık, 3fazlı asenkron motor modeli üzerinde çalışmışlardır. Yapılan bu çalışmada 3 farklı rotor oluk şekli üzerindeki uzunluk ve genişlik parametreleri ile oluşturduğu oranları tork ve akım grafikleri üzerinde incelemiştir. Optimal tork ve akım değerlerine karşılık gelen oranları bulmuştur. Elde edilen bu sonuçları her rotor oluk şekli için ayrı ayrı yorumlamıştır. Sonuçlara göre; dikdörtgen çubuk kullanıldığında, çubuk yüksekliği ile çubuk kalınlığı arasındaki oran kesit alanını değiştirmeden artarsa, başlangıç torku artar ve başlangıç akımı azalır. Kademeli şekilli çubuklar kullanıldığında daha yüksek başlangıç torku değerleri elde etmiştir. Derin dikdörtgen çubuklarda ise çubuğun yüksekliği arttıkça kırılma torkunda azalma gözlemlenmiştir [6].

Feyzi ve arkadaşı, asenkron motor performansını arttırmayı amaçlayarak, stator ve rotor oluklarının optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Bunun için oluk yapılarının genişliği ve derinliği gibi parametreleri, kullandıkları programda iterasyon metoduyla optimize etmişlerdir. Elde ettikleri yeni optimal oluk şekli sayesinde toplam kayıpları azaltıp verimi arttırmışlardır [7].

Ünlükaya ve arkadaşları, 3 fazlı, 2 kutuplu, 3 kW gücünde, kafesli asenkron motor modeli üzerinde çalışmıştır. Çalışmada stator oluk geometrisi sabit tutulmuş, rotor oluk geometrisinde ise 10 farklı oluk yapısı modellenmiştir. Her oluk modelinin; hava aralığında meydana gelen akı dağılımları, performans karakteristikleri ve çeşitli noktadaki manyetik akı yoğunluk değerleri gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yuvarlak rotor oluk geometrisi en iyi performans değerlerine sahip olan model olmuştur [8].

Yetgin ve arkadaşı, çalışmalarında asenkron motorlarda moment dalgalanmasının etkileri ve farklı rotor oluk yapılarındaki moment dalgalanmasındaki değişiklikleri araştırmıştır. Çalışmada motor modeli olarak 90 kW, 3 fazlı, sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Rotor oluk yapısında 7 farklı oluk geometrisi kullanılmış ve elde edilen sonuçlara göre, en düşük ve en yüksek moment dalgalanma oranı arasında %31.6'lık bir fark olduğu görülmüştür [9].

Şal ve arkadaşı, yaptıkları çalışmada 4 kW gücünde, 4 kutuplu, 3 fazlı sincap kafesli bir asenkron motorda, farklı rotor oluk geometrilerinin motor performansına etkisi incelemiştir. Yapılan analizler sonucunda derin oluklu tasarımın kalkış momentinin daha düşük olduğu görülmesine rağmen, zamana bağlı manyetik analizler sonucu derin oluklu asenkron motorun ilk tur boyunca ürettiği moment değerinin test motorunun üretmiş olduğu momentin yaklaşık 3 katı olduğu gözlenmiştir. Üç tasarım içerisinde en yüksek kalkış momenti değerini çift kafesli oluğa sahip motor sergilemiştir [10].

Yavuz ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada 1.1 kW'lık 3 fazlı asenkron motor üzerinde çalışmıştır. Bu motor modelini kullanarak stator oluk sayısı rotor oluk sayısı ve diğer parametrelerin değiştirilmesinin verim ve tork üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada sonuç olarak oluk uzunluğunun düşürülüp stator ve rotor oluk sayılarının azaltılması sonucu verimde yaklaşık %2'lik artış gözlemlenmiştir [1].

Yetgin, 5.5 kW, 7.5 kW ve 11 kW gücündeki asenkron motorlar üzerinde analizler yaparak motor verimini artırabilmek amacıyla mil çapının optimum değerinin ne olacağı araştırılmıştır. Çalışmada sonuç

olarak mil çapının artması rotor nüve ağırlıklarında azalmaya, buna bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu değerinin arttığı çıkarımları yapılmıştır [20].

Yenipınar ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada rotor oluk şekillerini, Sequential Nonlinear Programming (SNP), Genetik Algoritma (GA) ve Sequential Mixed Integer NonLinear Programming (SMINP) yöntemleri ile ayrı ayrı belirlemiş ve karşılaştırma yaparak motor performansına etkilerini incelemiştir. Ansys Maxwell paket programı kullanılarak gerçekleştirmiş oldukları bu çalışma sonucunda, en verimli geometriyi Genetik Algoritma (GA) kullanarak elde etmişlerdir [3].

Sousa ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada vektör kontrol sürücülerinin verimlilik optimizasyonu için bulanık mantık tabanlı yeni bir yöntem önermiştir. Gerekli testleri yaparak önerilen yöntemin minimum ekstra donanım ile sisteme dahil edilebilir olduğunu ve ekstra yazılımların kolayca uygulanabilir hale geleceğini ortaya koymuşlardır. Bu sayede, uygun maliyete ve daha yüksek verime sahip sürücü elde edilebilecektir [21].

Önal ve arkadaşı, boşta çalışmakta olan üç fazlı asenkron motorların veriminin artırılması için DSP tabanlı bir kontrol uygulaması gerçekleştirmiştir. Bu kontrol uygulaması sayesinde uygulanan gerilim belli bir seviyeye kadar azaltılarak kaynaktan çekilen gücün azaltılabileceği göstermişlerdir [22].

İmre, çalışmasında 1,1 kW gücündeki sincap kafesli bir asenkron motorun stator sargılarında tam kalıp sarım ve yarım kalıp sarım olmak üzere iki farklı sarım tekniği kullanılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bununla birlikte her bir oluktaki sipir sayıları 96, 106 ve 116 olacak şekilde 3 farklı şekilde denenmiştir. Bu şekilde toplamda 6 adet aynı güç ve ebatla denek motor oluşturulmuştur. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre 106 sipir tam kalıp motordan en iyi verim elde edilmiştir. Ayrıca tüm sipir sayılarındaki motorların tam kalıp sarımlı modelleri, yarım kalıp sarımlı modellerinden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Son yıllarda özellikle otomasyon sektöründeki hızlı gelişmelerin neticesinde kullanılan farklı çeşitlerdeki motorların performansları önem kazanmaya hızla devam etmiştir. Bu motorların performanslarındaki kriterler arıza verme oranları, bakım-onarım maliyetleri, elektrik kullanım maliyetleri, motor-ekipman maliyetleri ve motor verimi olarak değerlendirilebilir. Hassas işlemler ve doğruluk oranlarının çok yüksek seviyede olması gereken uygulamalarda kullanılan motorların verimi en önemli parametre olarak ön plana çıkabileceği söylenebilmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi motor veriminin artırılmasına yönelik hem akademik hem de endüstriyel çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir. Akademik araştırmacılar genellikle motorların farklı durumlarda karşılaştıkları hataları detaylı olarak inceleyerek bunların giderilmesine yönelik çalışmalar yapmaya devam etmektedir. Araştırmacılar farklı senaryoları (yük miktarları, moment etkisi, akım-gerilim dalgalanmaları, oluk sayıları, oluk açıklıkları vb.) inceleyerek deneysel veya simülasyon uygulamaları ile motor verimine etkilerini araştırmaktadırlar [11–17].

2. YÖNTEM ve MOTOR MODELİ

Çalışmada sonlu elemanlar paket programı içeriğindeki özel yazılım kullanılmış ve ilk önce asenkron motorun 2-D modeli oluşturulmuştur. Bu motor modeli oluşturulurken Şekil 1'de verilen lojik akış diyagramına uygun davranılmıştır.

Bu modelde üzerinde çalışılmak üzere Şekil 3'te verilen rotor oluk modeli kullanılmıştır. Bu rotor oluk modeli 1 numaralı rotor oluk tipi olarak kullanılmıştır. Çalışmada, rotor oluk tipinin uzunluk parametreleri olan hs_0 , hs_1 ve hs_2 parametreleri üzerinde deney-gözlem metodu uygulanmıştır. Bu üç parametrenin en uyumlu değerlerde olmaları amaçlanmıştır.

Analizlerde hs_1 değeri sabit tutularak başlanmış ve optimal (hs_0, hs_2) ikilisi elde edilmiştir. Daha sonra hs_1 değeri farklı bir değerde sabit tutulmuş ve tekrar optimal (hs_0, hs_2) ikilisi elde edilmiştir. Bu işlem üçüncü bir hs_1 değeri için de yapılmıştır. Sonuç olarak elde edilen bu üç optimal üçlü kombinasyon, birbiriyle ve başlangıç verileriyle karşılaştırılmıştır.

2.1. Üzerinde Çalışılan Motor Modeli

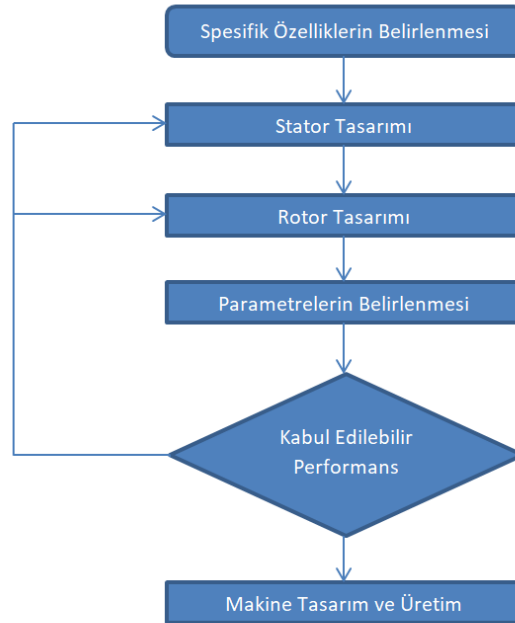
Üzerinde çalışılması için hazırlanmış motor modeli üç fazlı, 4 kutuplu, 37 kW gücünde, 75°C, 380 V, 50 Hz çalışma koşullarına sahip sincap kafesli bir asenkron motordur.

Motorun stator dış çapı 380 mm ve iç çapı 180 mm'dir. Stator oluk tipi olarak programdaki 3 numaralı oluk tipi seçilmiştir. Motorun rotor dış çapı 178 mm ve iç çapı 43 mm'dir. Motorda 36 adet stator oluğu, 28 adet rotor oluğu kullanılmıştır.

Tablo 1. Motorun Genel Özellikleri.

Giriş Gerilimi	380 V
Çıkış Gücü	37 kW
Frekans	50 Hz
Faz Sayısı	3
Kutup Sayısı	4
Devir Sayısı	1480 rpm
Çalışma Sıcaklığı	75°C
Yaklaşık Başlangıç Verimi	% 91.5

Motor modeli tasarlanırken Şekil 1’de verilen lojik akış diyagramına uygun olarak öncelikle stator nüve boyutları motor gücüne uygun şekilde belirlenmiş, daha sonra, rotor nüve boyutları, stator tasarımına uygun şekilde seçilmiştir.

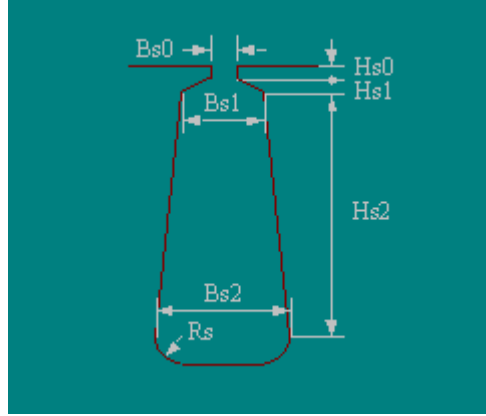
**Şekil 1.** Asenkron motor tasarımı lojik diyagramı.

Daha sonra 37 kW gücündeki bir motor için kabul edilebilir verim değeri elde etmek için stator ve rotor oluk sayıları üzerinde farklı senaryolar, uygun oluk geometrileriyle birlikte denenmiş ve en uygun oluk sayıları 36-28 şeklinde belirlenmiştir. Stator oluk sayısı 36 olarak belirlendikten sonra, stator oluk geometrisi üzerinde düzeltmeler yapılarak performans iyileştirmesi yapılmıştır. Bu şekilde %90’ın üzerinde verim elde edilmiştir. Tablo 2’de stator parametreleri verilmiştir.

Tablo 2. Stator Nüve Parametreleri.

Dış çap	İç çap	Nüve Uzunluğu	Oluk Sayısı	Oluk Tipi	Paketleme Faktörü	Nüve Malzemesi
320mm	180mm	210mm	36	3	0.95	Steel_1008

Seçilen stator oluk tipi Şekil 2’de verilmiştir.

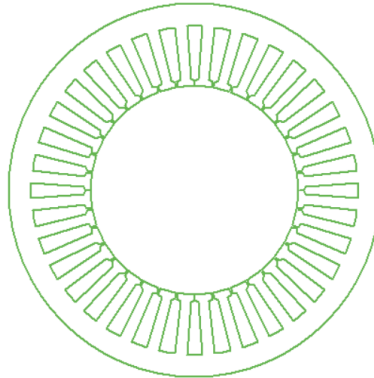
**Şekil 2.** Seçilen stator oluk geometrisi.

Şekil 2’de belirtilen parametrelerin değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Stator Oluk Parametreleri.

Hs0	Hs1	Hs2	Bs0	Bs1	Bs2	Rs
4mm	1.5mm	44.5mm	1.4mm	8mm	13.5mm	0

Stator dış çapı ile rotor dış çapı arasında 2 mm boşluk bırakılmış ve rotor dış çapına en uygun rotor iç çapı 43 mm olarak belirlenmiştir. Burada Rs değerinin 0 alınması, şekil 2’deki görünümünden farklı olarak köşeli bir rotor geometrisi kullanıldığını belirtir. Tablodaki değerler ile elde edilen stator oluklarının görünümü Şekil 3’te verilmiştir.

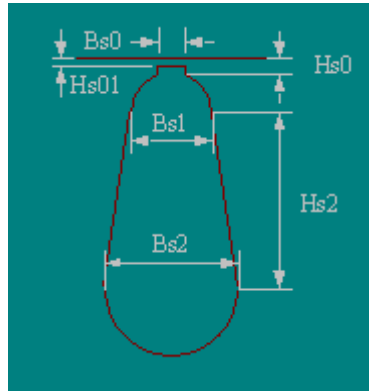
**Şekil 3.** Stator oluklarının görünümü.

Tablo 4'te rotor parametreleri verilmiştir.

Tablo 4. Rotor Nüve Parametreleri.

Dış çap	İç çap	Nüve Uzunluğu	Oluk Sayısı	Oluk Tipi	Paketleme Faktörü	Nüve Malzemesi
178	43	258	28	1	0.95	D24_50

Seçilen rotor oluk tipi Şekil 4'te verilmiştir.



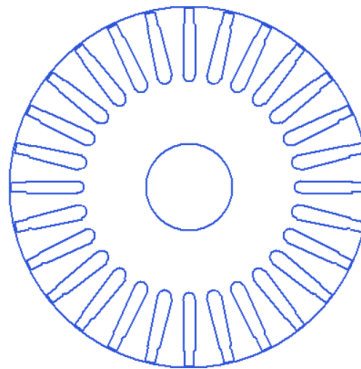
Şekil 4. Seçilen rotor oluk geometrisi.

Şekilde belirtilen parametrelerin değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Rotor Oluk Parametreleri.

Hs0	Hs1	Hs2	Bs0	Bs1	Bs2
7mm	1mm	25mm	5mm	6mm	7mm

Tablodaki değerler ile elde edilen rotor oluklarının görünümü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Rotor oluklarının görünümü.

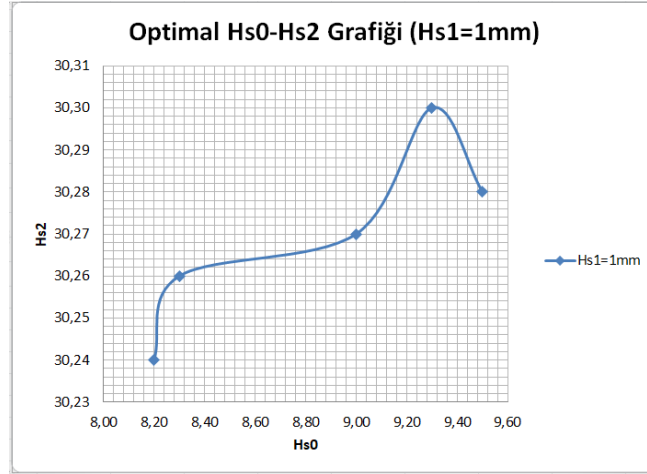
2.2. Optimal Rotor Oluk Uzunluklarının Bulunması

Çalışmanın başlangıcında motor modelinin rotor oluşunun uzunluk parametreleri olan Hs0, Hs1 ve Hs2 sırasıyla 7-1-25 mm'dir. Bu değerlerle okunan verim değeri yaklaşık olarak %91.5'tir.

İlk aşamada Hs1 değeri 1mm olarak sabit tutulmuş ve optimal (Hs0,Hs2) değerlerinin (8.2mm, 30.24mm) olduğu gözlemlenmiştir. Bu 3 değerde verim üzerinde %0.6029 artış gözlemlenmiştir. Bu aşamanın çıktısı tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Hs1=1 mm İken Bazı Hs0 Değerlerine Karşılık Gelen Optimal Hs2 Değerleri.

Hs0	Hs2
8.2	30.24
8.3	30.26
9	30.27
9.3	30.3
9.5	30.28



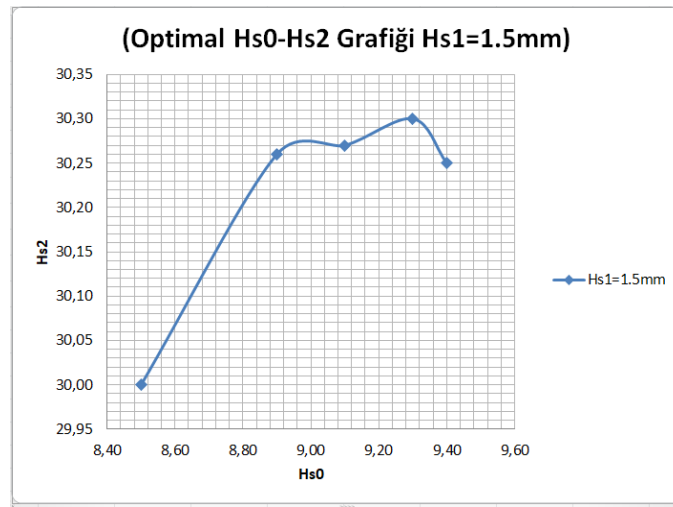
Şekil 6. Hs0-Hs2 Grafiği (Hs1=1mm).

Şekil 6'da Hs1=1 değerinde sabit iken yapılan deneyde gözlenen Tablo 6 de verilmiş bazı optimal Hs0 ve Hs2 değerleri ile oluşturulan grafik görülmektedir.

İkinci olarak Hs1 değeri 1.5mm olarak sabit tutulmuş ve optimal Hs0, Hs2) değerlerinin (9.3 mm, 30.3 mm) olduğu gözlemlenmiştir. Bu 3 değerde verim üzerinde %0.6125 artış gözlemlenmiştir. Bu aşamanın çıktısı tablo 7'da verilmiştir.

Tablo 7. Hs1=1.5 mm İken Bazı Hs0 Değerlerine Karşılık Gelen Optimal Hs2 Değerleri.

Hs0	Hs2
8.5	30
8.9	30.26
9.1	30.2
9.3	30.3
9.4	30.25

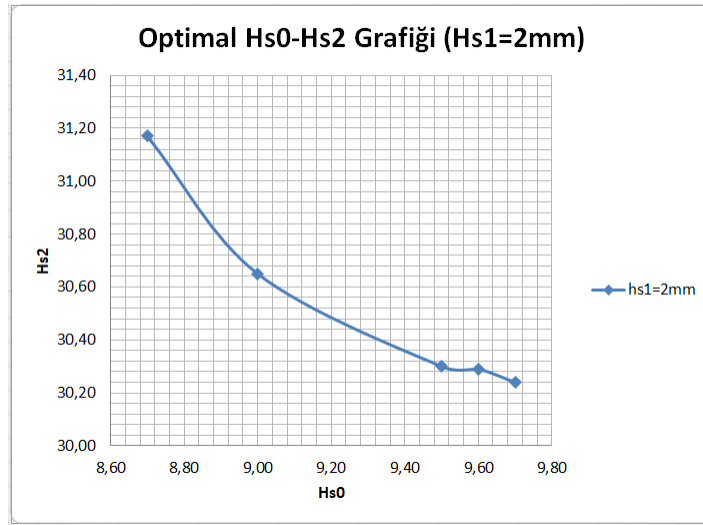
**Şekil 7.** Hs0-Hs2 Grafiği (Hs1=1.5mm).

Şekil 7'de Hs1=1.5mm değerinde sabit iken yapılan deneyde gözlenen Tablo 7 bazı optimal Hs0 ve Hs2 değerleri ile oluşturulan grafik görülmektedir.

Üçüncü aşamada Hs1 değeri 2mm olarak sabit tutulmuş ve optimal (Hs0, Hs2) değerlerinin (9.6 mm, 30.29mm) olduğu gözlemlenmiştir. Bu 3 değerde verim üzerinde %0.6131 artış gözlemlenmiştir. Bu aşamanın çıktısı tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Hs1=2 mm İken Bazı Hs0 Değerlerine Karşılık Gelen Optimal Hs2 Değerleri.

Hs0	Hs2
8.7	31.17
9	30.65
9.5	30.3
9.6	30.29
9.7	30.24



Şekil 8. Hs0-Hs2 Grafiği (Hs1=2mm).

Şekil 8'de Hs1=2mm değerinde sabit iken yapılan deneyde gözlenen Tablo 8 bazı optimal Hs0 ve Hs2 değerleri ile oluşturulan grafik görülmektedir.

3. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, literatürde mevcut olan diğer yayınlardan farklı olarak rotor oluk geometrisindeki genişlik parametreleri sabit tutulmuş ve yalnızca rotor oluklarının yükseklik ölçüleri optimize edilmiştir. Tablo 9, rotor oluşunun genişlik değerlerini göstermektedir. Ayrıca stator oluk uzunluk ve genişlikleri, stator ve rotor oluk sayıları, motor iç ve dış çapı, sargı sayıları, nüve uzunluğu vb. değerler de sabit tutulmuştur. Çalışma, rotor oluk uzunluk parametrelerinin birbiri ile olan ilişkilerine odaklanmış ve yorumlamıştır. Dolayısıyla çalışmanın diğer benzer çalışmalardan farklı olan bir diğer özelliği; tek bir sonuca odaklanmayıp, yaklaşık olarak aynı optimal verim değerlerini sağlayan birçok rotor oluk uzunluk üçlüleri önermiş olmasıdır, diyebiliriz. Bu sayede birbiri arasında ihmal edilebilecek kadar düşük verim farkları bulunan bu optimal değerlerin ortak yönleri, rotor oluşunun uzunluk parametrelerinde olması gereken optimal özellikler olarak değerlendirilebilmiştir. Yapılan bu çalışmadan faydalanılarak tasarlanmak istenen asenkron motorların genel boyutları ile rotor oluk uzunlukları arasındaki oran yaklaşık olarak bilinip, buna göre istenilen çap boyutlarına, stator oluk boyutlarına ve rotor oluk genişlik değerlerine uygun olan rotor oluk toplam uzunluğu belirlenebilecektir. Belirlenen toplam uzunluk için benzer şekilde deney gözlem metodu uygulanarak oluk parametreleri ayrı ayrı belirlenebilecektir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar paket programı içeriğindeki özel yazılımından faydalanılarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analizler yapılmıştır. Bu program üzerinde seçilen 1. tip rotor oluşunun yükseklik bileşenleri olan Hs0,Hs1,Hs2 parametreleri üzerinde optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma üç kademede Hs1 değerlerinin sabitlenmesiyle yapılmıştır. Sonuç olarak 3 farklı optimal rotor uzunlukları bulunmuştur. Bu değerlerle başlangıca göre %0,6'nın üzerinde verim artışı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 9. Sabit Tutulan Rotor Oluğu Genişlik Değerleri.

Bs1	5 mm
Bs1	6 mm
Bs1	7 mm

Tablo 10. Sonuç Tablosu (Rotor Oluğu Uzunluk Parametreleri-Verim).

Hs0, Hs1, Hs2	Verim
8.2 mm, 1 mm, 30.24 mm	%92.1029
9.3 mm, 1.5 mm, 30.3 mm	%92.1125
9.6 mm, 2 mm, 30.29 mm	%92.1131

Her üç optimal üçlü için de uzunlukların toplam 39 ile 42 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Üç değer için ortalama rotor oluk uzunluğu olarak 41 mm referans alınırsa yapılan basit hesap sonucu toplam rotor oluk uzunluğunun optimal değerinin rotor dış çapına oranının ($H_{s_{rotor}}/D_{r_{dış}}$) 0.23, rotor iç çapına oranının ($H_{s_{rotor}}/D_{r_{iç}}$) 0.95, toplam stator oluk uzunluğuna oranının ($H_{s_{rotor}}/H_{s_{stator}}$) 0.82 ve rotor oluk toplam genişliğine oranının ($H_{s_{rotor}}/B_{s_{rotor}}$) 2.3 olduğu analiz edilmiştir.

Tablo 11. Optimal Geometrik Oranlar.

$H_{s_{rotor}}/D_{r_{dış}}$	0.23
$H_{s_{rotor}}/D_{r_{iç}}$	0.95
$H_{s_{rotor}}/H_{s_{stator}}$	0.82
$H_{s_{rotor}}/B_{s_{rotor}}$	2.3

Hs1 değeri arttıkça Hs2 uzunluğunun optimal değerlerinde esneklik gözlemlenmemiştir. Hs1 değeri 1mm iken yapılan bu optimizasyon çalışmasında hs0 değerinin her 1 mm farklılığında hs2 uzunluğunun en optimal değerinde 0.05 mm'lik değişim olduğu görülmüştür. Hs1 değeri 1.5mm iken yapılan bu optimizasyon çalışmasında hs0 değerinin her 1 mm farklılığında hs2 uzunluğunun en optimal değerinde 0.30 mm'lik değişim olduğu görülmüştür. Hs1 değeri 2mm iken yapılan bu optimizasyon çalışmasında hs0 değerinin her 1 mm farklılığında hs2 uzunluğunun en optimal değerinde 0.93mm'lik değişim olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu makalenin yazarları, verilen destekten dolayı Siirt Üniversitesi Otomasyon ve Kontrol Sistemleri Laboratuvarı ve Siirt Üniversitesi Özel Elektrik Makinaları Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Yavuz, İ.; Minaz, M.R.; Kuncan M., 1, 1 kw'lık İndüksiyon Motorun Oluk Sayısının Verime ve Torka Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi. IETS'18 Int. Eng. Technol. Symp., Batman: 208AD, p. 555–60.
2. Kutuphan T., 3 Fazlı Asenkron Motorlarda Arızalar ve Verime 2020. <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/3-fazli-asekron-motorlarda-arzalar-ve-verime-etkileri/4133#ad-image-0S>
3. Yenipınar B.; Yılmaz C.; Sönmez Y., Işık MF., Asenkron Motorlarda Rotor Oluğunun Farklı Optimizasyon Yöntemleri ile Optimizasyonunun Gerçekleştirilmesi ve Performansa Etkilerinin İncelenmesi. J Polytech 2017;0900:1–6. doi:10.2339/politeknik.372682.
4. Erdemir, V., Üç Fazlı Asenkron Motorlan 2020:1–34. http://tbmyoelektrik.klu.edu.tr/dosyalar/birimler/tbmyoelektrik/dosyalar/dosya_ve_belgeler/2.hafta_uc_fazli_asekron_motor_calisma_prensibi.pdf.
5. Yetgin, A.G., Tezcan M.M., Rotor Oluk Genişliği ve Rotor Oluk Yüksekliği Oranının Sincap Kafesli Asenkron Motor Performansın Etkileri. Mühendislik Bilim ve Tasarım Derg 2019;7:60–4. doi:10.21923/jesd.448187.
6. Barbour A.; Thomson W.T., Finite element study of rotor slot designs with respect to current monitoring for detecting static airgap eccentricity in squirrel - cage induction motors. Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc., vol. 1, 1997, p. 112–9. doi:10.1109/ias.1997.643016.
7. Feyzi M.R.; Kalankesh, H.V., Optimization of induction motor design by using the finite element method. Can. Conf. Electr. Comput. Eng., vol. 2, 2001, p. 845–50. doi:10.1109/CCECE.2001.933551.
8. Ünlükaya, E.; Yetgin A.G.; Çanakoğlu, A.İ.; Turan, M., Rotor Oluk Şekillerinin Asenkron Motor Performansına Etkileri. Eleco 2014 Elektr. – Elektron. – Bilgi. ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 2014, p. 27–9.
9. Yetgin, A.G.; Durmuş, B., Analysis of the Effect of Rotor Slot Type on Torque Ripple in Induction Motors by Finite Element Method 2020;2020:536–42.
10. Mühendisli, M., Fakültesi M. Rotor Oluk Geometrisinin Asenkron Motor Performansına Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle öncelenmesi Analysis of the Rotor Bar Geometry ' s Effect on the Induction Motor Performance with Finite Element Method. Natl. Conf. Electr. Electron. Comput. Eng., IEEE; 2010, p. 320–4.
11. Çetin E.; Daldaban, F., Eksenel Akılı Motorlarda Oluk Açıklıklarındaki Hatanın Moment Üzerine Etkisi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg 2017;4:374–81. doi:10.31202/ecjse.310221.
12. Çetin E.; Daldaban, F., Yüzey Miknatıslı Eksenel Akılı Motorlarda Rotor Miknatıslarına Adım Ve Kayma Uygulanarak Moment Dalgalanmasının Azaltılması. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg 2018;5:56–64. doi:10.31202/ecjse.345470.
13. Kayabaşı E.S; Topçu, E., Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Minyatür Fırçasız DA Motorların Tasarım Parametrelerinin Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg 2019;2019:236–50. doi:10.31202/ecjse.474067.
14. İmre M., Asenkron motorlarda sargı yapısının motor performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi. 2019.
15. Terzioğlu H., Ağaçayak AC, Yalçın G, Neşeli S. Asenkron Motorun Çalışma Parametrelerinin SCADA ile İzlenmesinin Tasarımı. Eur J Sci Technol 2019;418–27. doi:10.31590/ejosat.638378.
16. Minaz, M.R., Araştırma Makalesi / Research Article Fırçasız DC Motorunun Eksen Kaçıklığı ve Kırık Miknatıs Arızalarının Tespitinin Bilgisayar Benzetimi ile Yapılması Broken Rotor Magnet and Eccentricity Faults Detection of Brushless DC Motor Simulation Model 2020;9:846–61.
17. Deveci, H., 3 Fazlı Kafes Rotorlu Asenkron Makine Tasarımı. 2016.
18. Lee, Ha Jeong, Sang Hyeon Im, and Gwan Soo Park. "Shape Design of a Rotor Bar for Improving Starting Torque and Running Efficiency in Squirrel Cage Induction Motor." 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2017). Vol. 1. 2017.
19. Lee, Gyeorye, Seungjae Min, and Jung-Pyo Hong. "Optimal shape design of rotor slot in squirrel-cage induction motor considering torque characteristics." IEEE Transactions on Magnetics 49.5 (2013): 2197-2200.
20. Yetgin, Asım Gökhan. "Asenkron motor mil çapının motor performansına etkisi." (2017).
21. Sousa, Gilberto CD, Bimal K. Bose, and John G. Cleland. "Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive." IEEE Transactions on Industrial Electronics 42.2 (1995): 192-198.
22. Önal, Yasemin, and Metin Kesler. "ASENKRON MOTORUN BOŞTA ÇALIŞMA VERİMİNİN ARTTIRILMASI VE DSP TABANLI UYGULAMASI." MS thesis. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
23. İmre, Murat. Asenkron motorlarda sargı yapısının motor performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi. MS thesis. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.