

Kafesli Asenkron Motorlarda Maliyet Kısıtı Altında Rotor Çubuklarının Analizi

The Analysis of The Squirrel Cage Induction Motor Rotor Bars under the Cost Constraint

Sinan Şal¹, Murat İmeryüz², Lale T. Ergene²

¹ İTÜ Makina Fakültesi
sal@itu.edu.tr

²İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
imeryuz@itu.edu.tr, ergene@itu.edu.tr

Özet

Bu makalede günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılan asenkron motorların performans analizine yönelik bir çalışma sunulmaktadır. Test motoru olarak üç fazlı 4 kW gücünde bir kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Çalışmada aynı kesit alanı olan rotor çubukları ve aynı iletken malzeme kullanılarak oluk biçimleri değiştirilmiştir. Motorun analizleri farklı rotor oluk biçimleri için hem analitik hem de sayısal olarak incelenmiştir. Böylelikle motor üretim maliyeti aynı olan daha üstün işletme özelliğine sahip rotor oluk geometrisi belirlenmiştir. Farklı oluk biçimlerine ait sayısal sonuçlar ve bunların karşılaştırmaları makalede verilmiştir. Aynı zamanda rotor çubuk kaçak indüktansları analitik olarak hesaplanarak motor işletmesi üzerine etkileri tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: kafesli asenkron motor, rotor oluğu, sonlu elemanlar yöntemi, rotor çubuk indüktansı, verim.

Abstract

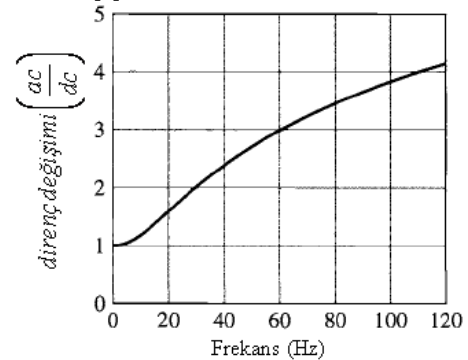
In this paper, induction motors, which will be commonly used, have been presented due to their performances. A Three phase, 4 kW squirrel cage induction motor is chosen as a test motor. In this study, the rotor bar geometries are modified under the constrained of using the same cross sectional area and conductive material in the rotor bars. Motor analyses are performed by using the analytical and the numerical method for different type of the rotor bar slots. So the rotor bar geometry, which has the same manufacturing cost and better operating conditions compare to the original one, are determined. Numerical results and their comparison are given for different rotor bar geometries in the paper. Also, rotor bar leakage inductance values are calculated analytically and their effects on the motor operation are discussed.

Keywords: Squirrel cage induction motor, rotor slots, finite element method, rotor bar inductance, efficiency.

1. Giriş

Asenkron motorlarda performans analizlerine yönelik olarak Alger ve Wray (1953) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği gibi, çok fazlı asenkron motorların en önemli problemi; kalkışta yüksek moment (büyük rotor direnci) ve düşük akım

(yüksek rotor reaktansı), sürekli çalışmada ise düşük anma kayması ve yüksek verimin (düşük rotor direnç ve reaktansı) istenmesidir [1].Yapılan çalışma kapsamında akım için iki paralel yol sağlayacak bir rotor oluğu tasarımı düşünülmüştür. Bu düşünce doğrultusunda biri yüksek reaktans ve düşük dirençli (A), diğeri ise düşük reaktans ve yüksek dirençli (B) iki parçalı bir oluk tasarlanmıştır. Rotor frekansının nispeten yüksek olduğu kalkış anında akımın büyük çoğunluğu yüksek dirençli kısımdan geçerken, rotor frekansının düşük olduğu normal çalışma koşullarında ise düşük dirençli kısımdan geçmektedir. Böylece kalkış anında akım sınırlanmaktadır. Asenkron motorlarda yüksek kalkış momenti elde edilirken, motor veriminin düşmesi önlenmelidir. Alger (1970)' e göre derin oluk veya çift kafesli oluk kullanılarak rotor direncinin değişken olması sağlanabilir. Rotor direncinin kalkış anında yüksek bir değerde olması ve artan hızlarla birlikte rotor direncinin azalması sonucu motor verimi düşmeden yüksek kalkış momenti sağlanabilir [2]. Fitzgerald ve diğerlerine göre (2003), uygun bir derin oluk tasarımı yapıldığında oluk direncinin frekans ile değişmesi sağlanabilir. Bu tasarımla deri olayı etkisinden yararlanarak; rotor frekansının nispeten yüksek olduğu kalkış anındaki direncin etkin değerinin, normal çalışma koşullarındaki değerinin birkaç katı olması sağlanabilir [3]. 2.5 cm derinliğindeki bir rotor oluğu için direnç değerinin frekans ile değişimi Şekil 1' de gösterilmektedir [3].



Şekil 1: 2.5 cm derinliğindeki bir rotor oluğu için direnç değerinin frekans ile değişimi [3]

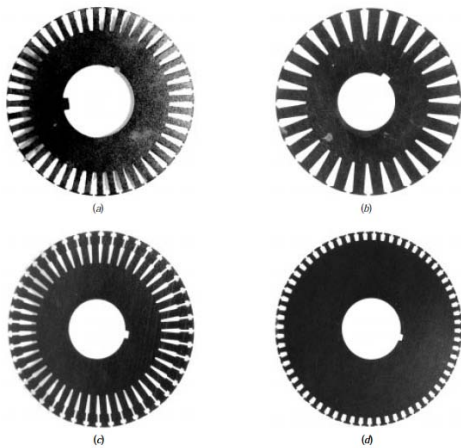
Deri etkisinden yararlanabilmek için, oluk derinliğinin en küçük değerinin ne olması gerektiği ile ilgili denklem

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \pi f}} \quad (1)$$

eşitliği ile verilmektedir [4]. Bu eşitlikte δ ; en az deri etkisi derinliği (m), ρ ; özgül direnç (Ωm), f ; frekans (Hz), μ_0 (H/m); boşluğun magnetik geçirgenliği olarak tanımlanmıştır.

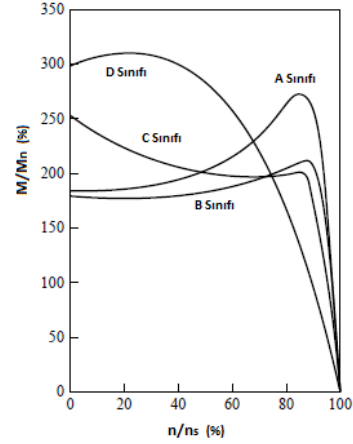
Kirtley Jr. tarafından yapılan çalışmada rotor oluk geometrisindeki değişimlerin motor performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için çift kafesli olduğu olan 5,5 kW gücünde bir motor incelenmiştir [5]. Kalkış olduğu olarak adlandırılan üst kısımdaki oluk parçasının çapı değiştirilerek farklı oluk kombinasyonları elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda artan çap değerleri için motor verimi artarken, kalkış momentinin en büyük değerden geçtiği görülmüştür. Kalkış momentinin en büyük olduğu çap değeri optimum tasarım değeri olarak belirtilmiştir. Galindo ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada motorun anma çalışma koşullarındaki performansını değiştirmeyecek ve sadece kalkış performansını arttıracak tasarımlar üzerinde durulmuştur [6]. Anma çalışma koşullarındaki performansın değişmemesi amaçlandığından rotor oluğunun toplam direncinin değişmemesi ve bunun için de toplam oluk alanının aynı kalması gerektiği vurgulanmıştır.

Bu çalışmada incelenen rotor geometrileri NEMA (National Electrical Manufacturer Association) Standartlarında tanımlanmış motor sınıflarına göre belirlenmiştir. NEMA, farklı rotor oluk geometrilerini gözönüne alarak kafesli asenkron motorlar için dört temel tasarım sınıfı tanımlamıştır. Şekil 2, bu dört rotor oluk laminasyonunu göstermektedir [7]. Bu sınıflandırmada A sınıfı; hava aralığına yakın büyük (Şekil1a), B sınıfı; hava aralığına yakın büyük ve derin (Şekil1b), C sınıfı (Şekil1c) ve D sınıfı hava aralığına yakın küçük rotor oluklarını temsil etmektedir.



Şekil 2: NEMA Motor Sınıfları [7]

Oluk biçimlerinin farklılığı, motorun kalkış, devrilme ve anma işletmesinde rotor direnç ve indüktans değerlerini dolayısıyla moment değerlerini değiştirmektedir. Bu sınıflara ait moment-hız özeğrileri Şekil 3 de verilmiştir.



Şekil 3: NEMA Motor Sınıflarına ait moment-hız özeğrileri [7].

Kullanılacak test motoru üç faz, 4 kW, 380 V, Δ bağlı, 50 Hz anma değerlerine sahiptir. Öncelikle motorun sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modellemesi yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak modellemenin güvenilirliği denetlenmiştir. Daha sonra burada sözü edilen diğer oluk modelleri, test motoruna ait sonlu elemanlar modeli üzerinde, rotor oluk alanı kısıtı altında, yeniden oluşturulmuştur. Makalede bu oluk modellerinin oluk alanlarının test motoru oluk alanına eşit alınmasıyla aynı üretim maliyetine sahip ancak işletme bakımından daha iyi oluk tasarımının saptanması amaçlanmıştır. Ayrıca her oluk tasarımında rotor çubuk indüktansının değeri analitik yöntemlerle de hesaplanarak; rotor çubuk kaçak indüktansının motorun işletme iyiliği üzerine etkisi de incelenmiştir.

2. Metodoloji

Kafesli asenkron makinede motor performansını belirleyen parametrelerin başında rotor direncinin ve kaçak indüktansının değerleri gelmektedir. Rotor kaçak indüktansı aşağıda sıralanan alt bileşenlerden oluşmaktadır. Bunlar,

- Diferansiyel kaçak indüktansı,
- Hava aralığı zig-zag kaçak indüktansı,
- Oluk kaçak indüktansı,
- Kısadevre bileziğinin kaçak indüktansı,
- Bükme (skewing) kaçak indüktansıdır.

Hesaplamalarda diferansiyel kaçak indüktansı, hava aralığı zig-zag kaçak indüktansı ve bükme kaçak indüktans değerleri stator devresine indirgenmiş olarak, diğer iki indüktans ise rotor devresinde ifade edilmektedir. Bir rotor kafes çubuğunun kaçak indüktansı

$$L_{bT} = L_b + 2.L_e \quad (2)$$

denklemleriyle hesaplanır [8]. Burada L_{bT} ; rotor çubuğunun toplam indüktansı, L_b ; yalnız rotor çubuğunun, L_e ; ise kısadevre bilezik parçasının kaçak indüktansıdır. L_b değeri L_e değerinden yaklaşık 100 katı olduğu gözönüne alınarak, çalışmada farklı oluk geometrileri için yalnızca çubuğun kaçak indüktansı hem analitik, hem de sayısal hesaplama yöntemleri ile hesaplanmıştır [9].

Makalede analitik çözümlere yanında motor modellemesinde sayısal yöntem olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi diğer elektromagnetik analiz yöntemleri (Sonlu Farklar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi vb.) yanında özellikle elektrik makineleri uygulamalarında doğrusal olmayan malzemesi olan karmaşık geometrilerin modellenmesinde tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar benzeri sayısal yöntemlerin analitik yöntemlere göre üstünlüğü; elektrik makina problemlerinde karşımıza çıkan sınır koşullarına bağlı kısmi türevli denklemlerin Galerkin, Virtual Work vb. prensipler yardımıyla çözülebilir olmasıdır. [10].

2.1. Analitik Yaklaşım

Oluk kaçak akısının dağılımı özellikle oluk geometrisine, magnetik malzemenin doyma özelliklerine, rotor frekansına ve oluk içerisindeki akım yoğunluğuna bağlıdır. Oluk akım yoğunluğu anma ve kalkış işletmesinde farklılık gösterir. Rotor çubuk indüktansı; depolanan magnetik enerji

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_V \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dV \quad (3)$$

denkleminde hesaplanır. l rotor çubuk uzunluğu, h_1 çubuk derinliği, $b(h)$, çubuk derinliğine bağlı oluk genişliği ve H magnetik alan şiddeti olmak üzere Amperé Yasası uygulandığında

$$\vec{H} \cdot b(h) = \vec{\Theta} \cdot \frac{h}{h_1} \quad (4)$$

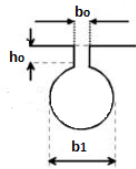
çubuk indüktansı

$$L_b = \frac{1}{2 \cdot i^2} \mu_0 \cdot l \int_0^{h_1+r} H^2(h) \cdot b(h) \cdot dh \quad (5)$$

biçiminde gösterilir. Bu denklemde, dh çubuk derinlik değişkenidir. Sonuç olarak, çubuk indüktansı, Λ oluk magnetik geçirgenliği ve λ magnetik geçirgenlik katsayısı olmak üzere denklem 6 ile hesaplanır.

$$L_b = \mu_0 \cdot l \cdot N^2 \cdot \lambda = N^2 \cdot \Lambda \quad (6)$$

λ katsayısı tamamen oluk geometrisine bağlıdır. Literatürde farklı rotor oluk biçimleri için ayrıntılı hesaplamalar yapılmıştır [8,9,11,12,13]. Aşağıda çalışmada analizleri yapılan rotor oluk biçimleri için magnetik geçirgenlik katsayıları verilmektedir.



Şekil 4: Yuvarlak oluk geometrisi.

Yuvarlak kesitli oluk için geçirgenlik katsayısı;

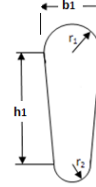
$$\lambda = k_2 + \frac{h_0}{b_0} \quad (7)$$

h_0 ; oluk ağzının hava aralığına göre derinliği, b_0 ; oluk ağzı genişliğidir. Literatürde k_2 değeri için 0,645...0,785 arasında değer tanımlanmıştır. Bu çalışmada 0,785 değeri kullanılmıştır [8,9].

Şekil 5 te verilen damla biçimli oluklar için indüktans zayıflatma çarpanı $k_1 < 1$ olmak üzere geçirgenlik katsayısı,

$$\lambda = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} k_1 + k_2 - \frac{h_0}{2 \cdot b_1} + \frac{h_0}{b_0} \quad (8)$$

denklemini vardır [8].



Şekil 5: Damla biçimli oluk geometrisi.

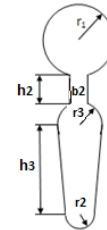
Çift kafesli rotor oluklarında kalkış sırasında yalnızca üst çubuk, anma işletmesinde ise alt çubuk etkilidir. Üst çubuk yuvarlak biçimli olduğunda magnetik geçirgenlik katsayısı, kalkış için,

$$\lambda = 0,66 + \frac{h_0}{b_0} \quad (9)$$

anma işletmesi için $1 < k_3 < 2$ olmak üzere ,

$$\lambda = \frac{h_3}{3 \cdot b_3} k_1 + k_3 + \frac{h_2}{b_2} + \frac{h_0}{b_0} \quad (10)$$

denklemleri ile tanımlanır [9]. Denklem 10 da 2 indisi geçiş kanalının, 3 indisi damla biçimli işletme oluşunun geometrik ölçülerini belirtmektedir. Şekil 6 da çift kafesli oluk geometrisi verilmiştir.



Şekil 6: Çift kafesli oluk geometrisi.

Denklemlerde verilen h_0/b_0 terimi açık ağızlı oluklar için oluk ağzı geçirgenlik katsayısıdır. Kapalı oluklar için bu terim yerine,

$$\frac{h_0}{b_0} = 0,3 + 1,12 \cdot h_0 \cdot \frac{10^3}{I_b^2} \quad (11)$$

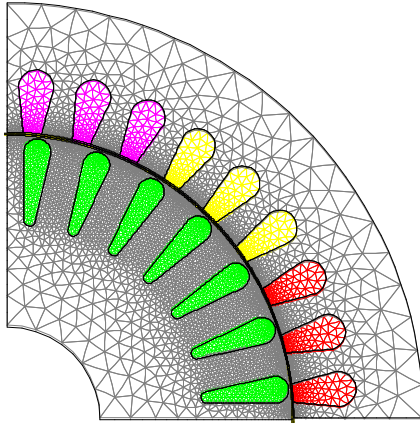
kullanılabilir [8]. I_b rotor çubuk akımıdır. Çalışmada rotor çubuk indüktansının anma işletmesindeki değerleri ile ilgilenildiği için, analitik hesaplamalarda akım yığılmasının etkisi ve doyma gözardı edilmiştir.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

Elektrik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi, elektrik veya magnetik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi ilkesine dayanır. Bölge içindeki alan Laplace veya Poisson tipinde bir elektrik veya magnetik alan olabilir. Sonlu elemanlar yönteminde bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün, sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir. Sonlu

elemanlar yöntemi ile magnetik akı yoğunluğunun sayısal çözümünü elde etmek için verilen alan bölgesi, sonlu küçük elemanlardan oluşan bir ağ ile bölünerek bu ağın düğümlerdeki magnetik potansiyelleri hesaplanır [10].

Analizlerde kullanılan test motorunun sonlu elemanlar modeli Flux2D adlı sonlu elemanlar yazılımı yardımı ile oluşturulmuştur. Motorun simetri özelliği kullanılarak, dört kutuplu motorun sadece bir kutbu modellenmiştir. Bu çeyrek motor modeli; dokuz adet stator oluğu ve yedi adet rotor çubuğu içermektedir. Çözüm bölgesi için en uygun sonlu eleman dağılımı için; magnetik alan değişiminin en hızlı yaşandığı hava aralığı ve doyma etkisinin gözlemlendiği dış diplerinde daha küçük elemanlar, magnetik alanın sıfır olması varsayılan motor en dış yüzeyinde ise daha büyük elemanlar kullanılmalıdır. Motora ait sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 7 de verilmiştir.

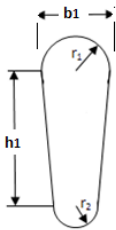


Şekil 7: Test motorunun ağ yapısı.

Makalede incelenen bütün tasarımlarda rotor oluk maddesi alüminyum olup özgül direnç değeri $\rho_{Al}=2,78.10^{-8}$ ($\Omega.m$) olarak alınmıştır. Benzer biçimde stator ve rotor magnetik malzemeleri; her tasarım için aynıdır ve doğrusal olmayan yapıdadır.

3. Analitik Yaklaşım ve Benzetim Sonuçları

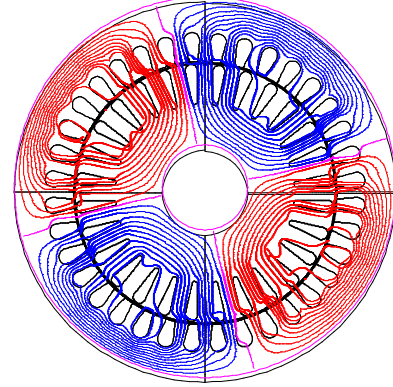
Test motorunda kullanılan rotor oluk modeli damla şeklindedir ve oluk geometri boyutları Şekil 8 de verilmiştir. Bu rotor çubuğuna ait kesit alanı; 68.9 mm^2 'dir.



r_1 (mm)	r_2 (mm)	h_1 (mm)
2,75	1,15	14,1

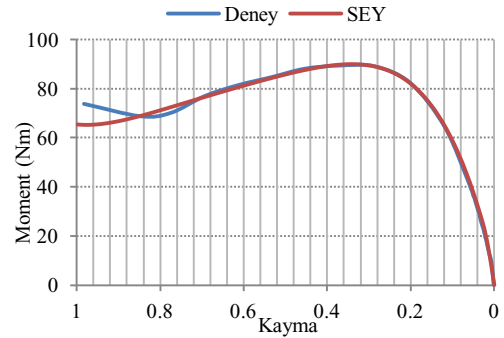
Şekil 8: Test motoruna ait damla oluk geometrisi ve boyutları.

Bu motora ait sonlu elemanlar analizi yapılmış ve motorun eş akı dağılımı Şekil 9 da verilmiştir.



Şekil 9: Test motorunun eş akı çizgilerinin dağılımı (damla oluk modeli).

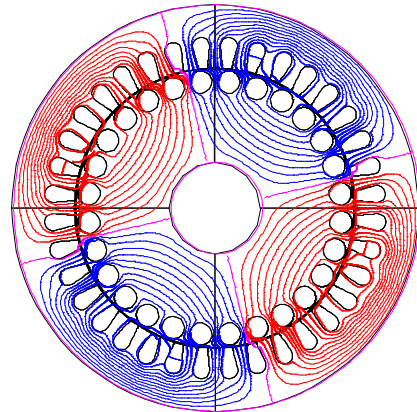
Test motoru için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin güvenilirliği için deneysel sonuçlarla bir karşılaştırma yapılmış ve her iki durum için kayma-moment özeğrisi Şekil 10 da verilmiştir.



Şekil 10: Test motorunun kayma-moment özeğrisi.

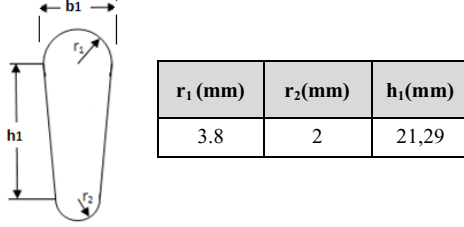
Şekil 10 da görüleceği gibi kayma-moment özeğrisi kalkıştaki semer momenti dışında tümüyle örtüşmektedir.

Yuvarlak oluk modeli için Şekil 4'te verilen oluk geometrisi kullanılarak aynı kesit alanı için daire çapı (b_1) 9,366 mm alınmıştır. Bu oluk tipi için eş akı dağılımı Şekil 11 de verilmiştir.

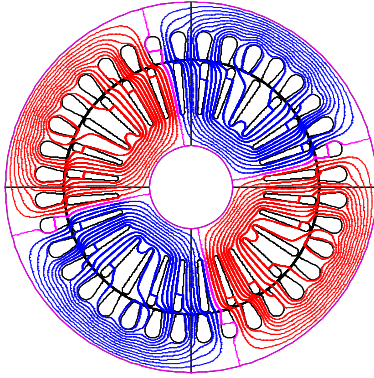


Şekil 11: Rotorda yuvarlak oluk tipi için eş akı dağılımı

Derin oluk için aynı alan kısıtı altında damla modelinin boyutları değiştirilmiştir. Şekil 12 de bu çubuk için alınan oluk geometrisi ve değerleri verilmiştir. Bu oluk yapısının kullanıldığı durumda oluşacak eş akı çizgileri de Şekil 13 de gösterilmektedir.

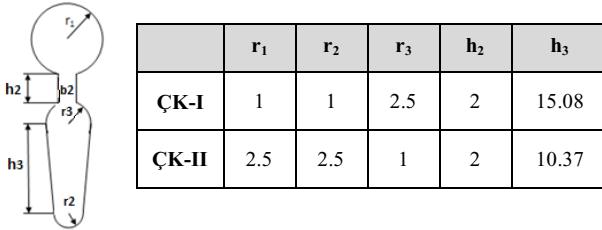


Şekil 12: Rotorda derin oluk geometrisi ve boyutları.

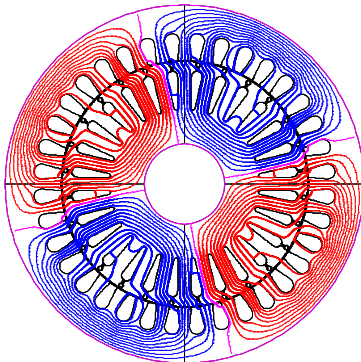


Şekil 13: Rotorda derin oluk tipi için eş akı dağılımı

Son olarak rotorda aynı alan kısıtı altında çift kafesli oluk yapısı incelenmiştir. Kalkış momentinin artırılması için rotor üst kafesi alt kafeşe oranla küçük tutulmuştur.

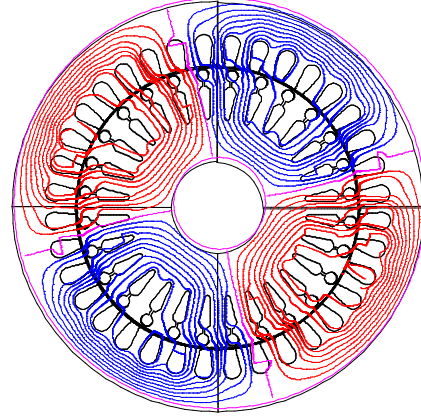


Şekil 14: Rotorda çift kafes oluk geometrisi ve boyutları (mm)



Şekil 15: Rotorda çift kafes oluk (ÇK-I) için eş akı dağılımı

Kalkışta rotor frekansının stator frekansına eşit olması dolayısıyla ve akım yığılmasının etkisiyle rotorun etkin direnci üst çubuk direncine eşit olacaktır. Oluşturulan iki adet çift kafes geometrisinin (ÇK-I ve ÇK-II) şekli ve boyutları Şekil 14 de verilmiştir. Şekil 15 ve Şekil 16 sırasıyla bu oluk tiplerine ait eş akı dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 16: Rotorda çift kafes oluk (ÇK-II) için eş akı dağılımı

Tablo 1 de bu oluk tiplerine ait rotor çubuk kaçak indüktans değerlerini sunulmaktadır.

Tablo 1: Oluk geometrilerine bağlı çubuk kaçak indüktans değerleri (μ H)

	Damla	Derin	Yuvarlak	Çift Kafes
SEY	0,12	0,124	0,102	0,179
Analitik	0,082	0,133	0,055	0,196

Bu tablo sonuçları değerlendirilirse, oluk derinliği bakımından, damla biçimli oluk tasarımı ile, derin oluklu tasarım arasında 6 mm ye yakın fark vardır. Buna karşın, anma işletme bölgesinde akım oluğa düzgün dağıldığı için indüktans değerleri arasında belirgin bir fark yoktur.

Çift kafesli rotor tasarımının oluk derinliği derin oluklu tasarımdan 2,5 mm daha kısadır. Ancak, anma işletmesinde akım alt oluktan geçtiğinden, rotor oluşunun geçiş ve kalkış çubuğu bölgesi, magnetik bakımdan hava aralığı gibi davranmaktadır. Bu nedenle çift kafesli tasarım daha derin olmamasına karşın, indüktans değeri daha büyüktür.

Yuvarlak oluklu tasarımda makine büyük bir kalkış çubuğu varmış gibi davranmaktadır. Oluklar arasında dar bir bölge kaldığından magnetik malzeme erken doymakta ve anma verimi küçük olmaktadır. Buna karşın moment özeğrisi bakımından kalkış momenti artmakta, diğer tasarımlara göre azalan indüktans değeri nedeniyle devrilme kayması moment ekseninden uzaklaşmaktadır. Böylelikle motorun yüklenebilme aralığı artmaktadır. Oluk derinliği küçük olduğundan indüktans değeri küçüktür.

Tablo 2 de gözönüne alınan tüm rotor oluk yapılandırmaları için kalkış, devrilme, anma momentlerini, devrilme ve anma kayma değerlerini, giriş ve çıkış güçlerini ve son olarak verim değerlerini toplu olarak verilmektedir.

Tablo 2: Tüm rotor oluk modelleri için sonuçlar

	Damla	Derin	Yuvarlak	ÇK-I	ÇK-II
Kalkış Momenti (Nm)	13.6	12.18	14.5	9.14	14.2
Devrilme Momenti (Nm)	22	18.24	23.42	14.37	16.95
Anma Momenti (Nm)	6.5	6.57	6.57	6.60	6.6
Devrilme Kayması	0.23	0.217	0.267	0.183	0.25
Anma Kayması	0.0262	0.0298	0.0315	0.0327	0.0282
Mekanik Güç (W)	4000	4000	4000	4000	4000
Elektriksel Güç (W)	4662	4700	5298	4598	4734
Verim (%)	85.8	85.1	75.5	87	84.5

Damla oluk modeline sahip test motorunun bazı özelliklerinin, rotor oluk alanı kısıtı altında oluşturulan diğer modellerle farklı açılardan iyileştirildiği gözlenmiştir. Örneğin yuvarlak oluk alanının kullanılması durumunda aynı çıkış gücü için verim düşerken kalkış momenti iyileştirilmiştir. Bu geometri en yüksek devrilme momentine ve daha geniş yüklemeye aralığına sahiptir. Oysa çift kafes kullanılan ilk yapılandırma (ÇK-I) bunun tam tersi gözlemlenmektedir. Bu tasarımda kalkış momenti test motoruna göre azalırken, işletme kafesinin direnci daha küçüldüğünden kayıplar azalmakta ve verim %1,2 kadar artmaktadır. Üst çubuk alanının ilkine göre daha büyük olduğu ikinci çift kafes geometrisinde (ÇK-II) kalkış momenti artarken verim %1,3 azalmıştır. Derin oluk yapılandırması bu tasarımlar içinde büyüklükler açısından damla modele en yakın sonuçları vermiş, alan kısıtı nedeniyle derin oluşun yaratması beklenen akım yığılması etkisi pek görülmemiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada incelenen üç fazlı kafesli asenkron motorun; rotor çubuk geometrileri değiştirilerek maliyet kısıtı altında “Nasıl daha iyi bir tasarım gerçekleştirilebilir?” sorusunun cevabı aranmış ve bunun için NEMA standartlarının öngördüğü temel oluk modelleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem rotor çubuk kaçak indüktansı hem de motor işletme büyüklükleri açısından beraber verilerek yorumlanmış ve bu yorumlar çerçevesinde çift kafes yapılandırmalarının hem kalkış hem de anma işletmesi açısından daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] Alger P. L., and Wray J. H., “Double and Triple Squirrel Cages for Polyphase Induction Motors”, *AIEE Transactions*, pp. 637-644, 1953.
- [2] Alger P. L., “*Induction Machines: Their Behavior and Uses*,” Gordon and Breach Publishers, USA, 1970
- [3] Fitzgerald A. E., Kingsley Jr. C., Umans S. D., “*Electric Machinery*,” McGraw-Hill, Boston, 2003
- [4] Sadarangani C., “*Electrical Machines – Design and Analysis of Induction and Permanent Magnet Motors*,” Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000
- [5] J.L. Kirtley Jr., “Designing Squirrel Cage Rotor Slots with High Conductivity”, *International Conference on Electric Machines*, Krakow, Poland, 5-8 September, 2004
- [6] Galindo V.A., Lopez-Fdez X. M., Pinto J.A.D., Coimbra A.P., “Parametric Study of Rotor Slot Shape On a Cage Induction Motor”, *X International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*, ISEF, 2001, pp. 441 – 447.
- [7] Chapman, S.J., ‘*Electric Machinery Fundamentals*’, McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 4th edition, 2003.
- [8] Boldea I., Nasar S. A. : *The Induction Machine Handbook*, CRC Pres, 2002
- [9] Seinsch, H.O. : *Program felder Drechfeldrechnung*, Magnetkreisr. Fuer Kaefiglaeuefer Fachbuch, 1993.
- [10] Kalenderli, Ö.; *Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları*
- [11] Schuisky W., *Brechnung Elektrischer Maschinen*, Springer Verlag, 1960.
- [12] Engelmann R.H., Middendorf W.H.: *Handbook of Electric Motors*, Marcel Dekker, 1995
- [13] Pyrhönen J., Jokinen T.: *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons, 2008
- [14] Rentzsch, H. : *Elektromotoren*, ABB Fachbuch, 1992