



Alınış tarihi (Received): 08.02.2023

Kabul tarihi (Accepted): 28.03.2023

Senkron Relüktans Motor Analitik Hesabı ve Tasarımı

Emre GÖZÜAÇIK^{1,*} Mehmet AKAR¹

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tokat

*Sorumlu yazar: emre.gozuacik@gop.edu.tr

ÖZET: Enerji ihtiyacı günümüzün ve geleceğin önemli problemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum elektrik enerjisi ve elektrik makinelerini araştırmaların odağı haline getirmektedir. Hayatımızın birçok alanında (ev, sanayi, ulaşım, vb.) kullanmakta olduğumuz elektrik makinelerinin yüksek performansa sahip olmasının yanı sıra verimli olması da beklenmektedir. Bu amaçla endüstride ve diğer uygulamalarda sıklıkla kullanılan asenkron ve sabit mıknatıslı motorlar için alternatif olabilecek motorlar üzerinde çalışmalar sürdürmektedir. Gerek yapısında mıknatıs bulundurmaması gerekse rotorunda sargı, fırça, bilezik gerektirmemesi sebebiyle Senkron Relüktans Motorların (SRM) iyi alternatifler arasında olduğu görülmektedir. Yüksek verimlilik ve yüksek tork yoğunluğuna sahip bu motorlarda araştırma ve geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Bu çalışmada da 75kW'lık bir SRM tasarımı yapılmıştır. Motorun stator nüvesinin boyutlandırılması, oluk ölçülerinin belirlenmesi, sargı tasarımı, rotor bariyer ölçülerin hesaplanması, motor tasarımı ile ilgili parametrelerin hesaplanması ve motorun elektrik ve manyetik açıdan uygun sınırlar içinde olup olmadığı incelenmiştir. Yapılan hesaplamaların doğruluğu RMxprt tasarımı ile doğrulanmıştır. Analizler sonucunda istenilen parametrelere uygun bir SRM tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Senkron Relüktans Motor, Motor Analitik Tasarımı, RMxprt Analizi

Synchronous Reluctance Motor Analytical Calculation and Design

ABSTRACT: Energy requirement is one of the most important problems of today and future. This situation makes electrical energy and electrical machines the focus of research. The machines that we use in many areas of our lives (home, industry, transportation, etc.) are expected to be efficient as well as having high performance. For this purpose, studies are ongoing on motors that can be an alternative to asynchronous and permanent magnet motors that are frequently used in industry and other applications. It is seen that Synchronous Reluctance Motors (SRM) are among the good alternatives because they do not contain magnets in their structure and do not require windings, brushes and rings in the rotor. Research and development studies continue in these motors with high efficiency and high torque density. In this study, a 75kW synchronous reluctance motor was designed. The sizing of the stator core of the motor, determination of the slot dimensions, winding design, calculation of the rotor barrier dimensions, calculation of the parameters related to the motor design and whether the motor is within the appropriate limits electrically and magnetically are examined. The accuracy of the calculations was verified with RMxprt design. As a result of the analysis, a SRM design suitable for the desired parameters was realized.

Keywords – Synchronous Reluctance Motor, Motor Analytical Design, RMxprt Analyses

1. Giriş

Enerji üretimi ve tüketiminin çok önemli olduğu günümüzde, dünya genelinde üretilen elektrik enerjisinin %40'ı endüstriyel uygulamalarda kullanılan elektrik motorları tarafından tüketilmektedir. Bu oran Avrupa Birliği ülkelerinde ise %70'leri bulmaktadır (Gerçekcioğlu & Akar, 2021). Bu endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan motor tipi de asenkron motorlardır. Halen üzerinde çalışmaları yapılan ve üretilen bu motorlara alternatif motor

tasarım çalışmaları da devam etmektedir. Geleneksel alternatif akım motorlarının stator yapısını kullanabilen, rotor tasarımı sebebiyle asenkron motorlara göre rotor kayıplarını azaltan Senkron Relüktans Motor (SRM) bu konuda dikkat çekmektedir. SRM'ler, basit yapısı, sağlamlığı, ısınma sorununun daha az olması, yüksek tork yoğunluğu ve hız kontrol kolaylığı gibi avantajlara sahiptir (Gerçekcioğlu & Akar, 2021).

SRM'ler muadillerine göre sağlamlıkları ve düşük maliyetleriyle ön plana çıkmaktadır. SRM'ler yüksek hızlarda çalışabilir ve anahtarlamalı relüktans motorlara göre daha az titreşim ve gürültüye sahiptir. Asenkron motorlarla kıyaslandığında yüksek tork yoğunluğuna ve rotor kayıplarının daha az olması sebebiyle yüksek verimliliğe sahiptir. Rotor nüvesinde sadece ferromanyetik malzeme kullandığı için basit bir yapıya, sabit mıknatıslı motorlara göre de daha düşük maliyete sahiptir. Yapısında mıknatıs olmaması zorlu şartlarda çalışmasına ve dayanıklılık seviyesinin artmasına katkı sağlamaktadır (Mahmoudi vd., 2020).

Geçtiğimiz on yıl boyunca, daha yüksek verimlilik ve daha yüksek tork yoğunluğu sunarak asenkron makinelere umut verici bir alternatif olarak uygun maliyetli SRM'ler kullanılmaya başlanmıştır. SRM'lerin mıknatıssız, basit ve rijit rotor yapısı gibi avantajları elektrikli araç uygulamalarında ve ev aletlerinde uygun bir seçim haline gelmesini sağlamaktadır. SRM'lerin statoru geleneksel senkron ve asenkron motor tasarımlarına oldukça benzer yapıya sahiptir. Bu sebeple rotor yapısı üzerine çalışmalar devam etmektedir (Aghazadeh vd., 2019).

Bu çalışmada SRM analitik tasarımının yapılması ve bu tasarımın analiz programında doğrulanması amaçlanmıştır. Dört bölümden oluşan çalışmanın giriş bölümünde SRM'lerin kullanımı ve avantajları kısaca verilmiştir. İkinci bölümde SRM hakkında bilgi verilmiş, relüktans torku açıklanmış ve SRM çeşitlerinden bahsedilmiştir. SRM tasarımı başlığı altında; başlangıç parametreleri, stator, sargı ve rotor tasarımı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu bölümde tasarım ile ilgili standartlar, sınırlamalar, hesaplamalar çalışmaya eklenmiştir. Dördüncü bölümde ilgili parametreler ve analitik tasarım sonuçları ANSYS Maxwell RMxprt ile programa eklenmiştir. Analitik tasarım sonuçları, RMxprt sonuçları ile doğrulanmıştır. Analiz sonuçları da bu bölümde verilmiştir. Son bölümde ise çalışma ile ilgili değerlendirme yapılmıştır.

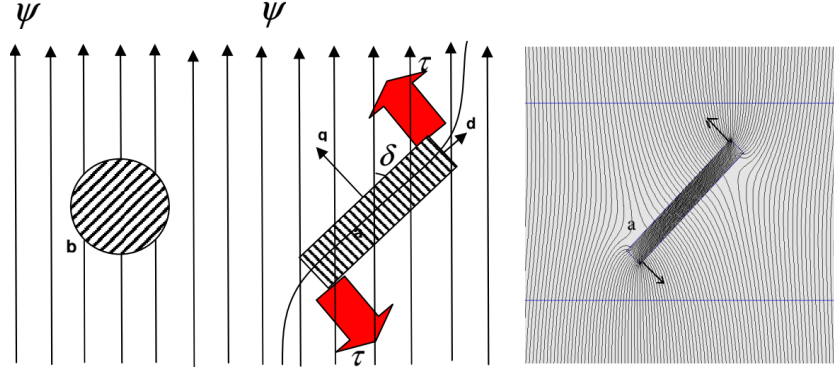
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Senkron Relüktans Motorlar

SRM'ler 19. yy.'da çıkık kutuplu olarak bilinen basit haliyle literatüre kazandırılrsa da 1923'te Kostko tarafından dönen manyetik alana sahip ilk örneği geliştirilmiştir. Rotor relüktans farkına bağlı relüktans torku üretimiyle enerji dönüşümünü sağlamaktadır (Ersöz, 2015). Rotorunda sargı bulunmadığı için asenkron motorlara göre bakır kaybı daha azdır. Bu durum aynı zamanda rotor kısmında termal avantaj sağlamaktadır. Rotoru nüve ve hava açıklığına sahip bariyerlerden oluşan basit bir yapıya sahiptir (Tap, 2017). Kayıpların az olması sebebiyle yüksek verime sahip, basit yapısıyla uygulanabilir ve az maliyetli, özellikle çıkık kutuplu yapıları için sağlam motorlar olarak bilinmektedir. Bunların yanı sıra harici güç elektroniği devresi gerektirmesi, tork dalgalanmasının/ripple yüksek olması, düşük güç faktörü gibi dezavantajları bulunmaktadır (Ersöz, 2015; Özçelik, 2016).

SRM'ler tork üretimi için rotor relüktans farkı ve stator tarafından üretilen sinüzoidal manyetomotor kuvvetine (mmk) dayalı bir mantık kullanmaktadır. Bunun için de rotor geometrisinin yapısı önem kazanmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi dairesel 'b' nesnesi her ekseninde aynı relüktansa sahiptir, bu durumda izotropik manyetik malzeme olarak tanımlanabilir. Aynı şekilde belirtilen köşeli 'a' nesnesi çizilen d eksenini (daha az relüktansa sahip eksen) ve q eksenleri üzerinde farklı relüktansa sahip olacaktır. Bu durumda ise nesne

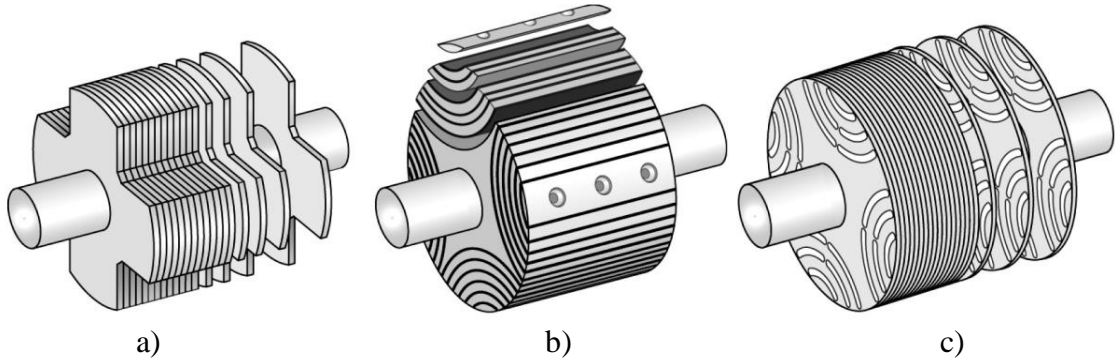
anizotropik manyetik malzeme olarak tanımlanmaktadır. Manyetik alana (ψ) maruz kalan anizotropik bir cismin d eksenine ile manyetik alan çizgisi arasında kalan yük açısının (δ) sıfır olmadığı durumlarda nesne üzerinde bir relüktans torku (τ) üretilecektir. Yük açısının, yük torku veya kontrol yöntemleri ile sabit tutulması durumunda sürekli bir elektromanyetik enerji dönüşümü sağlanabilmektedir (Moghaddam, 2007).



Şekil 1. Anizotropik geometriye sahip 'a' nesnesi ile izotropik geometriye sahip 'b' nesnesinin manyetik alan içinde tork üretimi

Figure 1. Torque production of object 'a' with anisotropic geometry and object 'b' with isotropic geometry in magnetic field

SRM'lerin ilk örnekleri Şekil 2a'da görseli verilen çıkık kutuplu rotor geometrisine göre üretilmiştir. Demir kayıplarını azaltmak için tek tarafı izole edilmiş lamine saçların birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Şekil 2b'de rotor kutuplarında aksenal olarak laminasyona uğramış aksenal laminasyonlu (ALA-Axially Laminated Anisotropy) rotor geometrisi görülmektedir. Şekil 2c'de enine laminasyonlu (TLA-Transversally Laminated Anisotropic) rotor geometrisi bariyer yapısıyla verilmiştir (Moghaddam, 2007). Çıkık kutuplu rotor geometrisi yüksek hızlı motorlarda basit yapısıyla tercih edilmektedir. Ancak L_d/L_q oranının düşük olması sebebiyle güç katsayısını düşürmektedir. Aksenal laminasyonlu rotor tasarımında q eksenindeki akı bariyerlerinin sayısının artmasıyla L_q oranı azalmaktadır. Lamine saçların yerleştirilmesiyle d ekseninde L_d oranı arttıracak şekilde akı yolu relüktansı azalır. Bu durumda en yüksek çıkıntı oranına sahip rotor geometrisi olarak gözüktüğü de maliyet ve üretim zorluğu sebebiyle tercih edilmemektedir. Enine laminasyonlu rotor tasarımı, paketlenmiş saçların kesme/delme işlemleri ile bariyerlerinin açılmasıyla oluşur. Aksenal laminasyonlu örneklerle kıyaslandığında düşük güç faktörü ve düşük güç gibi dezavantajları vardır. Bariyer optimizasyonu, üretim, maliyet durumuna bağlı olarak daha çok tercih edilmektedir (Ersöz, 2015).



Şekil 2. SRM rotor tasarımları a) Çıkık kutuplu, b) Aksenal laminasyonlu, c) Enine laminasyonlu

Figure 2. SRM rotor designs a) Salient pole, b) Axially laminated, c) Transversally laminated

2.2. Senkron Relüktans Motor Tasarımı

SRM tasarımı için literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar içinde 2017 yılında başlamış ve 2021 yılında sonlandırılmış bir tasarım projesi olan ReFreeDrive dikkat çekmektedir. Özellikle elektrikli araçlar için yüksek tork yoğunluğu, geniş hız aralığı, maksimum verim ve düşük maliyet gibi özelliklere sahip bir seri üretim motoru tasarlamayı amaçlamaktadırlar. Bunun için asenkron motor ve SRM tasarımları tercih etmişlerdir. 200 kW ve 75kW güç değerinde tasarlanan motorlar için geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Prototip için Tesla S60 ile kıyaslama yaparak birim ağırlık başına düşen tork kapasitesini %30 arttıran, motor kayıplarını %50 azaltan, maksimum hızı 15000 rpm olmak üzere dört motor test edilmiştir. Maliyeti %15 düşürmesi planlanan güç aktarım sistemi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Projede güç elektroniği çalışmaları ile güç yoğunluğunu ve verimliliği artırmanın yanı sıra aracın ağırlığını azaltmak, soğutma sistemini geliştirmek, sürücü sistemlerini ve verimlilik optimize edici kontrol stratejilerini geliştirmek amaçlanmıştır. Ayrıca SRM modelleri için bariyerlere mıknatis ekleyerek mıknatis destekli SRM analiz sonuçları da değerlendirilmiştir (Velasco vd., 2021; Villani vd., 2019).

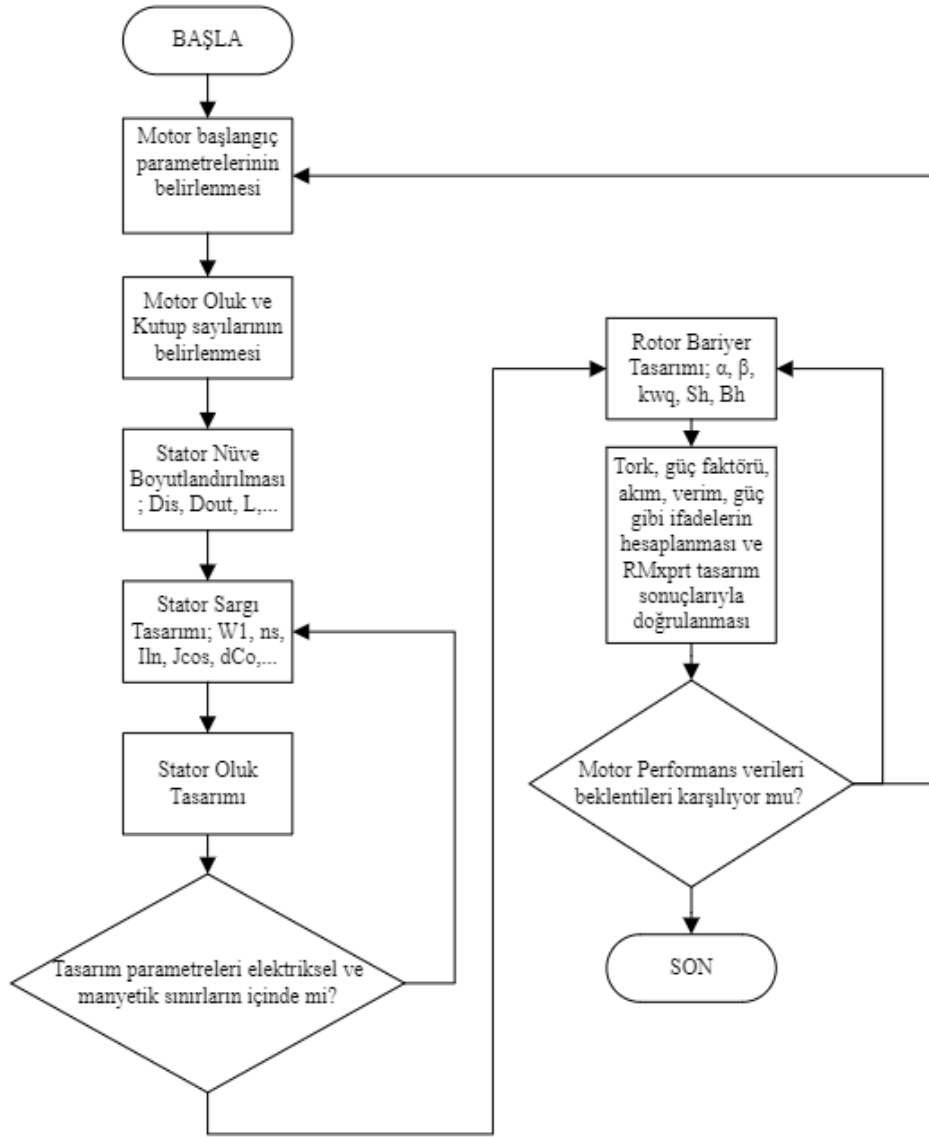
Bu çalışmada tasarlanacak SRM için Tablo 1’de verilen motor başlangıç parametreleri kullanılmıştır. Bu değerler ReFreeDrive projesi referans alınarak belirlenmiştir. Projede 200kW motor için tasarım yaptıktan sonra paket boyu ve stator sargılarında değişiklikler yapılarak 75kW motor tasarımı gerçekleştirilmiştir (Villani vd., 2019).

Tablo 1. Motor başlangıç parametreleri

Table 1. Motor initial parameters

Motor Parametreleri	
Güç Değeri (W)	75000
Gerilim (V)	420
Verim (%)	95
Maksimum Hız (rpm)	15000
Nominal Hız (rpm)	5000
Kutup Çifti Sayısı	3
Frekans (Hz)	250
Oluk Sayısı	54

Oluk sayısı ve kutup sayısı belirlenirken (Villani, 2018)’de yapılan analizler göz önüne alınmıştır. (Villani, 2018)’de yapılan analizlerde sırasıyla 4 kutup-36 oluk, 6 kutup-54 oluk ve 8 kutup-72 oluk SRM tasarımları için sonuçlar alınmıştır. Bu analizler neticesinde 6 kutup-54 oluklu SRM tasarımının sınırlı bir hacimde, nominal ve tepe güç değerlerinde diğer tasarımlara göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Credo vd., 2019; Villani, 2018).



Şekil 3. SRM tasarımını akış şeması
Figure 3. SRM design flowchart

Şekil 3'te çalışma boyunca takip edilen adımlar kısaca akış şemasında verilmiştir. Akış şeması içinde stator oluk tasarımından sonra akı yoğunlukları ve sargı kriterlerine bağlı olarak tasarımın uygun elektriksel ve manyetik sınırlar içinde olup olmadığı kontrol edilmektedir (Zöhra & Akar, 2016). Değişkenler birbirine bağlı olduğu için hesaplamaların uygunluğu sürekli kontrol edilmelidir. Aynı şekilde rotor tasarımından sonra bariyer yapısına da bağlı olarak motor genel performansı karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonuçları tasarımı en başa veya ara aşamalara geri döndürmektedir.

Tablo 1'de verilen parametrelere göre makinenin boyutlandırma hesaplamaları yapılmıştır. SRM stator yapısının asenkron motorla aynı yapıya sahip olması sebebiyle rotor tasarımına kadar asenkron motorla aynı tasarım yöntemi kullanılmıştır. Sırasıyla ilgili formüller bir sonraki bölümde verilecektir.

2.3. Stator Nüvesinin Boyut Hesaplamaları

Motor tasarımına, $D_s L^2$ standart çıkış katsayısından başlanmaktadır. Bu katsayı motorun güç ve performansıyla doğrudan ilişkilidir. Motorun talep edilen güç-tork değerlerindeki artış

boyutsal olarak standart çıkış katsayısının artışıyla sonuçlanacaktır. D_{is} stator iç çapı ve L paket boyudur (Boldea, 2020).

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2p_1 p_1 S_{gap}}{\pi \lambda f_1 C_0}}; \quad K_E = 0.98 - 0.005 p_1 \quad (1)$$

$$S_{gap} = \frac{K_E P_n}{\eta_n \cos \varphi}; \quad \lambda = L \left(\frac{2p_1}{\pi D_{is}} \right) = \frac{L}{\tau}; \quad \tau = \frac{\pi D_{is}}{2p_1}$$

Stator iç çapının hesaplanması için Denklem 1’de verilen formül kullanılmaktadır. Bunun için ilgili parametrelerin formülleri aynı denklemde verilmiştir. K_E zıt-EMK faktörü indüklenen gerilimin, giriş faz gerilimine oranıdır. Denklem 1’de verilen formülde görüldüğü gibi p_1 kutup çifti sayısını vermektedir. S_{gap} hava aralığı gücü, P_n çıkış gücü, η_n verim, $\cos \varphi$ güç faktörüdür (Boldea, 2020). İkinci aşamada τ kutup aralığı (pole pitch) yani bir kutbun stator iç çapında kapladığı uzunluk hesaplanmaktadır. Aynı şekilde τ_s , bir oluğun kapladığı uzunluk yani oluk aralığı (slot pitch) olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 2. Paket boyu kutup adımı oranı
Table 2. Stack length to pole pitch ratio

	$2p_1$			
	2	4	6	8
λ (Boldea, 2020)	0.6-1.0	1.2-1.8	1.6-2.2	2-3
λ (Ersöz, 2015)	0.55-0.97	1.02-1.91	1.42-2.32	1.62-2.76

Tablo 2’de λ , paket boyunun kutup aralığına oranı kutup sayısına bağlı olarak verilmiştir (Boldea, 2020; Ersöz, 2015). Buradan 6 kutuplu bir motor için standartlarda verilen aralığa göre $\lambda=1.9$ alınmıştır. D_{is} için bir başka bilinmeyen ise hacim kullanım faktörü C_0 Esson’s sabitidir (Boldea, 2020). Faydalanma katsayısı olarak da bilinen C_0 hava aralığı gücü ve kutup çiftine bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bir dakikada makinenin hacimsel olarak verebileceği enerjiyi temsil etmektedir (Ersöz, 2015).

Tablo 3. Stator iç çap/dış çap oranı
Table 3. Stator inner diameter/outer diameter ratio

	$2p_1$			
	2	4	6	8
D_{is}/D_{out}	0.54-0.58	0.61-0.63	0.68-0.71	0.72-0.74

Tablo 3’te 100kW altındaki motorlar için K_D yani stator iç çapının stator dış çapına oranının değişimi verilmiştir (Boldea, 2020). 6 kutuplu motorumuz için $K_D=0.695$ alınmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Boldea;} \quad g &= (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \quad ; \quad p_1 \geq 2 \text{ için} \\ \text{Lipo;} \quad g &= 3 \cdot 10^{-3} \tau_p \sqrt{2p} \\ \text{Say;} \quad g &= 0.2 + 2 \sqrt{D_{out} L} \end{aligned} \quad (2)$$

Makinenin hava aralığı ölçüsü çıkış gücüne bağlı olarak değişmektedir. Denklem 2’de bazı yazarların hava aralığı için belirledikleri standartlar verilmiştir. Bu standartlara göre hesaplamalar yapıldığında hava aralığı değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise hava aralığı Boldea’nın formülasyonuna göre $g=0.606\text{mm}$ olarak hesaplanmıştır (Boldea, 2020; Hendershot, 2012).

2.4. Stator Sargı Tasarımı

Stator sargıları için öncelikle oluk sayısı hesaplanır. Oluk sayısı $N_s = 2p_1qm$; $m=3$ faz sayısı için $N_s=54$ tercih edilmiştir (Boldea, 2020). Burada q değeri faz ve kutup başına düşen oluk sayısını belirtmektedir. Bu değer motor gücüne göre değişebilmektedir. İkiyden büyük olması gerekmektedir ve genellikle $q=3$ olarak kullanılmaktadır (Ersöz, 2015).

$$K_w = K_q K_y; \quad K_q = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \left(\frac{\pi}{6q} \right)}; \quad K_y = \sin \frac{\pi y}{2 \tau} \quad (3)$$

Denklem 3’te stator sargıları için gerekli sabitler verilmiştir. K_w sarım faktörü, K_q bölge faktörü (zone factor), K_y akort faktörü (chording factor) olarak isimlendirilmektedir. K_q kutup ve faz sayısına bağlı bir sabit olarak hesaplanmaktadır. K_y ise iki katmanlı bir sargı için adım aralığına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Boldea, 2020).

$$W_1 = \frac{K_E V_f}{4K_f K_w f \phi}; \quad n_s = \frac{a_1 W_1}{p_1 q} \quad (4)$$

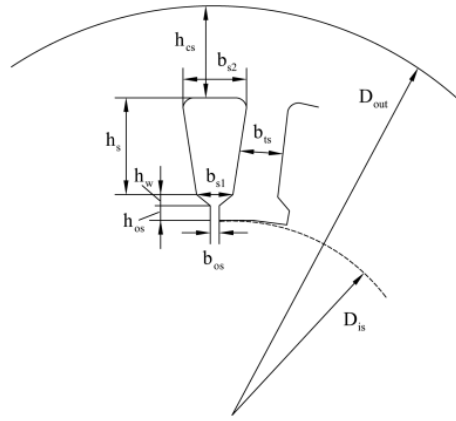
Denklem 4’te W_1 faz başına sarım sayısı ve n_s oluk başına iletken sayısı-sipir sayısı formülleri verilmektedir. K_f form faktör ve α_i akı yoğunluğu şekil faktörü stator dişlerinin manyetik doygunluğuna ve B_g hava aralığı akı yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durumda $K_f=1.08$, $\alpha_i=0.74$ ve hava aralığı akı yoğunluğu Tablo 4’te verildiği gibi 6 kutup için $B_g=0.76$ T olarak alınmıştır (Boldea, 2020). Denklem 4’te ϕ kutup akısını, f frekansı, V_f faz gerilimini temsil etmektedir. Sipir sayısının bulunabilmesi için ise a_1 akım yolu sayısını belirlemek gerekmektedir. Akım yolunun artırılması sipir sayısını artırırken, iletken çapını düşürecektir. Sipir sayısı hesaplamalar ile kesirli sonuçlar verebilmektedir. Uygulamada böyle bir durumun olamayacağı düşünülerek yakın tam sayı değere yuvarlanır ve W_1 güncel değere göre tekrar hesaplanır. Faz başına düşen sarım sayısının bu kabulü hava aralığı akı yoğunluğunu etkilemektedir (Boldea, 2020). Bu nedenle değişimin uygun aralıkta kaldığından emin olmak gerekmektedir.

$$I_{ln} = \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi \sqrt{3} V_1} \quad (5)$$

$$J_{cos} = 10 \text{ A/mm}^2 \quad \text{için}; \quad A_{Co} = \frac{I_{ln}}{J_{cos} a_1}; \quad d_{Co} = \sqrt{\frac{4A_{Co}}{\pi}}; \quad d'_{Co} = \sqrt{\frac{4A_{Co}}{\pi a_p}} \quad (6)$$

Denklem 5’te stator sargılarından geçen akımın rms değeri hesaplanmaktadır. Bu akım değerine bağlı olarak A_{Co} sargı kesit alanı ve d_{Co} sargı-iletken çapı belirlenmektedir. Yüksek güçte tasarım yapılması amaçlandığından sıvı soğutmalı bir makine için uygun akım yoğunluğu $J_{cos}=10\text{A/mm}^2$ olarak seçilmiştir (Hendershot, 2012). Bu seçim makine kutup sayısı ve soğutma şekline bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Denklem 6’da a_p paralel iletken sayısı genel olarak sargı çapının düşürülmesi gerektiği durumlarda kullanılmaktadır. Boldea’ya göre $d_{Co} > 1.3\text{mm}$ için a_p değeri artırılıp tekrar sargı çapı (d'_{Co}) hesaplanması gerekir (Boldea, 2020).

2.5. Stator Oluk Tasarımı



Şekil 4. Stator oluk geometrisi
Figure 4. Stator slot geometry

$$A_{su} = \frac{\pi d_{Co}^2 a_p n_s}{4K_{fill}} \quad (7)$$

Denklem 7’de verilen kullanılabilir oluk alanı A_{su} , sargı yerleşimi için önemli bir kriterdir. Burada doluluk oranı-dolum faktörü (fill factor) 10kW’tan büyük motor tasarımları için $K_{fill}=0.44$ alınmıştır. Doluluk oranı sargıların oluğa yerleştirilmesiyle alakalı olduğundan sarım şekline göre de değişiklik göstermektedir. (Özsoy vd., 2022), yaptıkları asenkron motor tasarımı çalışmasında doluluk oranını ‘0.6’ tercih etmiştir.

Tablo 4. Akı yoğunluğu aralıkları

Table 4. Flux density limits

	$2p_1$			
	2	4	6	8
Hava Aralığı Akısı (B_g) (T)*	0.5-0.75	0.65-0.78	0.7-0.82	0.75-0.85
Hava Aralığı Akısı (B_g) (T)	0.65 – 0.82 (ortalama)			
Stator Boyunduruk Akısı (B_{cs}) (T)	1.1 – 1.45 (tepe değeri)			
Stator Diş Akısı (B_{is}) (T)	1.4 – 1.7 (ortalama)			

(*) (Boldea, 2020) kaynağından alınmıştır. Diğer veriler (Hendershot, 2012) kaynağına aittir.

$$b_{ts} = \frac{B_g \tau_s}{B_{ts} K_{Fe}} \quad (8)$$

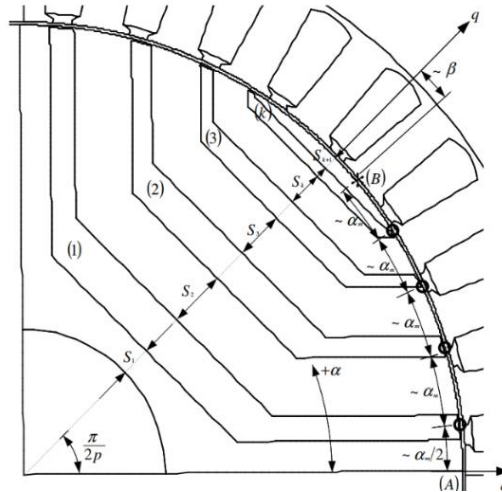
$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} \quad , \quad b_{s2} = 10^{-3} \sqrt{4A_{su} \tan \frac{\pi}{N_s} + b_{s1}^2} \quad (9)$$

$$h_s = \frac{2A_{su}}{b_{s1} + b_{s2}} \quad , \quad h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + 2(h_{os} + h_w + h_s))}{2} \quad (10)$$

Stator nüve yapımında 0.5mm kalınlığında silisli saçlar için nüve laminasyon faktörü $K_{Fe} = 0.96$ alınmıştır (Boldea, 2020). K_{Fe} silisli saçlarda 0.92, silisli olmayan saçlarda 0.95 olarak alınabilir (Ersöz, 2015). Stator dış kalınlığını belirlemek için Tablo 4’te verilen standartlara göre $B_{ts} = 1.55$ Tesla olarak alınmıştır (Hendershot, 2012). Boldea’nın stator oluk geometrisine göre $b_{os} = 0.0022$ m, $h_{os} = 0.001$ m ve $h_w = 0.0015$ m olarak alınmıştır. Denklem 9 kullanılarak Şekil 4’te görüldüğü gibi oluk alt genişliği b_{s1} ve oluk üst genişliği b_{s2} hesaplanmaktadır. Oluk yüksekliği h_s ve stator boyunduruk yüksekliği h_{cs} Denklem 10 kullanılarak hesaplanmaktadır (Aghazadeh vd., 2019; Boldea, 2020). Belirlenen oluk ve boyunduruk ölçülerine göre akı yoğunluğu hesapları tekrar yapılmakta ve ölçülerin uygunluğu kontrol edilmektedir (Hendershot, 2012). Akı yoğunlukları Tablo 4’e göre uygun değer aralığında ise tasarım bu ölçülendirmeye göre gerçekleştirilebilir.

2.6. Rotor Tasarımı

SRM için rotor tasarımında oluk veya sargı ihtiyacı bulunmamaktadır. Şekil 5’te görüldüğü gibi rotor tasarımında belirlenmesi gereken bariyerlerin yapısı ve sayısıdır.

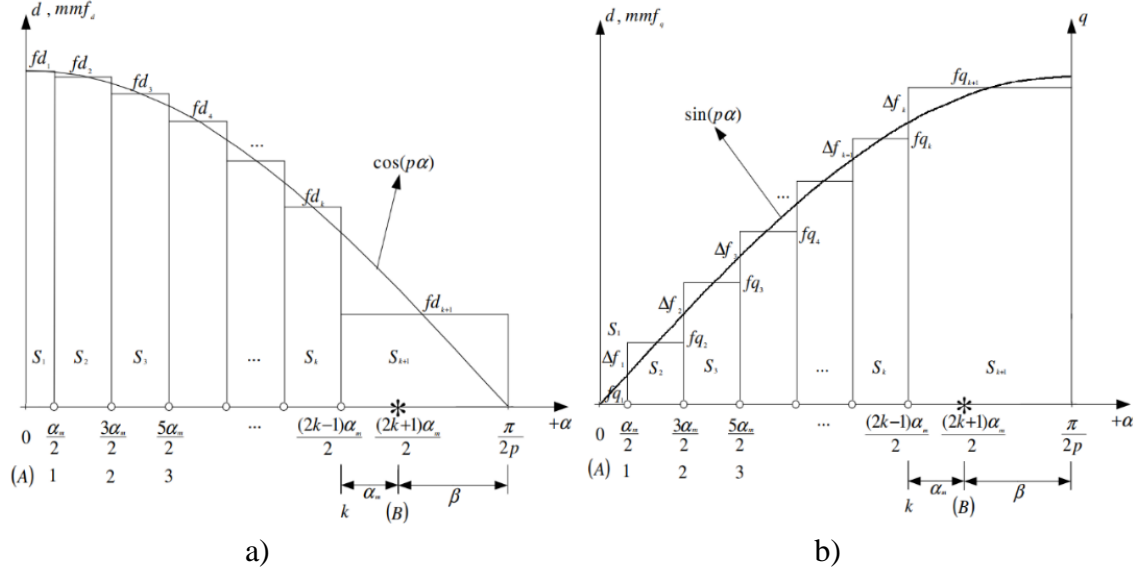


Şekil 5. SRM rotor geometrisi
Figure 5. SRM rotor geometry

Rotor kutuplarında bulunan segment ve bariyerlerin açısal olarak pozisyonları tork ve tork dalgalanmasında önemli parametrelerdir. Şekil 5’te α bariyerler arasındaki açı, β ise α açısının kontrolü için gerekli ilave yardımcı açıdır. α açısı ile tork dalgalanması minimize edilebilmektedir. Optimizasyon çalışmaları ile β açısının da değişebileceği çalışmalar ile gösterilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda $\beta = 2 * \alpha$ alınarak hesaplamalar yapılmıştır (Moghaddam, 2007; Özçelik, 2016).

$$a = \frac{\frac{\pi}{2p} - \beta}{n_{bariyer} + \frac{1}{2}} \quad (11)$$

Denklem 11’de verilen formül kullanılarak $\alpha=4.615^\circ$, $\beta=9.23^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Bariyer ve segment genişlikleri için bu açı değerleri kullanılacaktır.



Şekil 6. a) d eksen mmk dağılım grafiği, b) q eksen mmk dağılım grafiği
 Figure 6. a) d-axis mmf distribution graph, b) q-axis mmf distribution graph

SRM rotorunun segment yani bariyerler arasından kalan nüve kalınlığı Şekil 6a’da verilen d eksen mmk dağılımına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Her bir segmentin maruz kaldığı ortalama mmk, α açısı ve bariyer sayısına bağlı olarak segmentlerin arasındaki oranın hesaplanmasını sağlamaktadır (Moghaddam, 2007).

$$fd_h = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}a_m}^{\frac{2h-1}{2}a_m} \cos(pa) da}{a_m} = \frac{\sin(p \frac{2h-1}{2} a_m) - \sin(p \frac{2h-3}{2} a_m)}{pa_m} \quad h = 1, 2, \dots, k \quad (12)$$

$$fd_{k+1} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}a_m}^{\frac{\pi}{2}} \cos(pa) da}{a_m + \beta} = \frac{1 - \sin(p \frac{2k-1}{2} a_m)}{p(a_m + \beta)}$$

$$\frac{2S_1}{S_2} = \frac{fd_1}{fd_2} \quad \& \quad \frac{2S_h}{S_{h+1}} = \frac{fd_h}{fd_{h+1}} \quad h = 2, 3, \dots, k$$

$$\sum_{h=1}^{k+1} S_h = l_y = \frac{\left(\frac{D_{is}}{2} - \frac{D_{mil}}{2} - g \right)}{1 + k_{wq}} \quad (13)$$

Denklem 12’de bariyerler arasında kalan segmentlerin genişlik oranları verilmektedir. Bariyer sayısı ve sırasına bağlı olarak belirlenen bu oranlar rotor toplam genişliği ile kıyaslanarak segment genişliklerine ulaşılmaktadır. Burada h bariyer sayısını ifade etmektedir. Denklem 13’te k_{wq} yalıtım oranını yani toplam bariyer genişliğinin toplam nüve genişliğine oranını temsil etmektedir (Moghaddam, 2007). Bu oran ortalama torku değiştiren faktörlerden biridir ve motor performansına doğrudan etki etmektedir (Öner vd., 2016). (Aghazadeh vd., 2019)’de yapılan çalışmaya göre yalıtım oranı 0.2-1.2 değerleri arasında test edilmiştir. En yüksek ortalama torkun yaklaşık olarak $k_{wq}=0.6$ değerinde alındığı görülmektedir. Yalıtım oranının değişimiyle d ve q eksenindeki endüktans oranı yani çıkıntı oranı değişmektedir. Güç faktörü de SRM’ler için çıkıntı oranına bağlı olarak değişmektedir (Özçelik, 2016). Bu çalışmada istenilen güç faktörü değerine yaklaşabilmek adına $k_{wq}=0.7$ olarak alınmıştır.

Segmentlere benzer şekilde bariyer genişliklerinin birbirlerine oranı da Şekil 6b’de verildiği gibi q eksenini mmk dağılım oranı farkına (Δf_k) bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bariyer genişliklerinin optimum değeri Δf_k kullanılarak, q ekseninden akan akıyı azaltmak üzere belirlenmektedir (Moghaddam, 2007).

$$f_{q_1} = 0$$

$$f_{q_h} = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}a_m}^{\frac{2h-1}{2}a_m} \sin(pa) da}{a_m} = \frac{\cos(p \frac{2h-3}{2} a_m) - \cos(p \frac{2h-1}{2} a_m)}{p a_m} \quad h = 2, 3, \dots, k \quad (14)$$

$$f_{q_{k+1}} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}a_m}^{\frac{\pi}{2p}} \sin(pa) da}{a_m + \beta} = \frac{\cos(p \frac{2k-1}{2} a_m)}{p(a_m + \beta)}$$

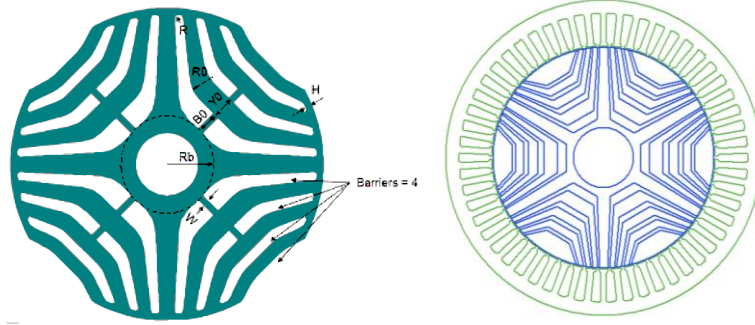
$$\frac{B_h}{B_{h+1}} = \left(\frac{\Delta f_h}{\Delta f_{h+1}} \right)^2 ; \quad h = 1, \dots, k-1$$

$$\sum_{h=1}^k B_h = l_a = \frac{\left(\frac{D_{is}}{2} - \frac{D_{mil}}{2} - g \right)}{1 + \frac{1}{k_{wq}}} \quad (15)$$

Denklem 14 ve Denklem 15’te bariyer genişliklerinin birbirine oranını bulmak için segmentlerin benzeri bir hesaplama kullanılmaktadır (Moghaddam, 2007). Rotor bariyer ve segment ölçüleri sonucu yalıtım oranına bağlı olarak hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Motor tasarımı ve üretimi detaylı testler gerektiren ve analizler sonucuna göre güncellemelerin gerektiği bir süreçtir. Bu çalışmada SRM için analitik tasarım çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve performansının test edilebilmesi için Şekil 7’de görüldüğü gibi ANSYS Maxwell RMxprt Tasarımı gerçekleştirilmiştir.



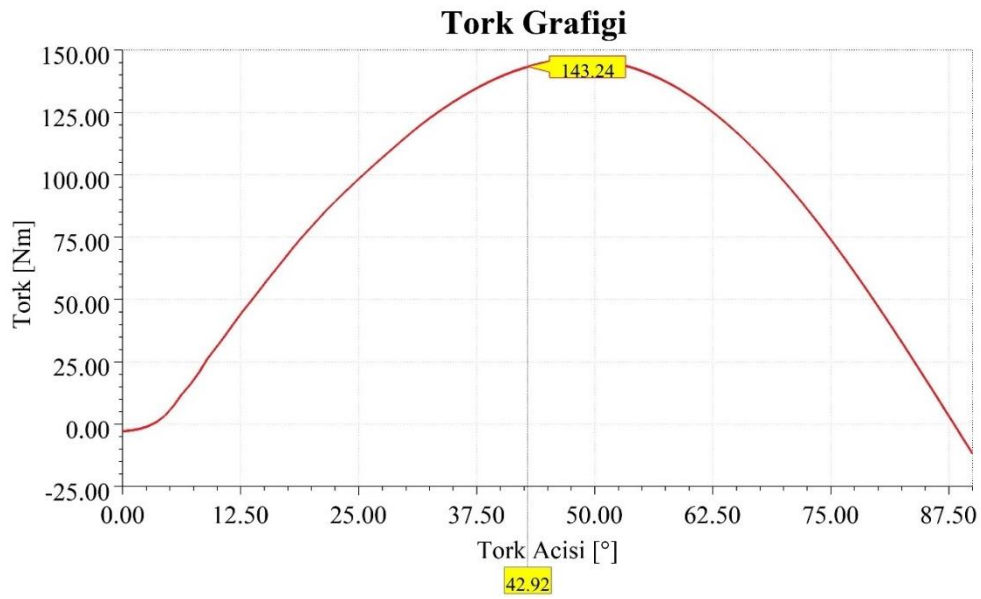
Şekil 7. ANSYS Maxwell RMxprt tasarımı
Figure 7. ANSYS Maxwell RMxprt design

Tablo 5. Başlangıç değerlerine bağlı tasarım sonuçlarının karşılaştırılması
Table 5. Comparison of design results based on initial values

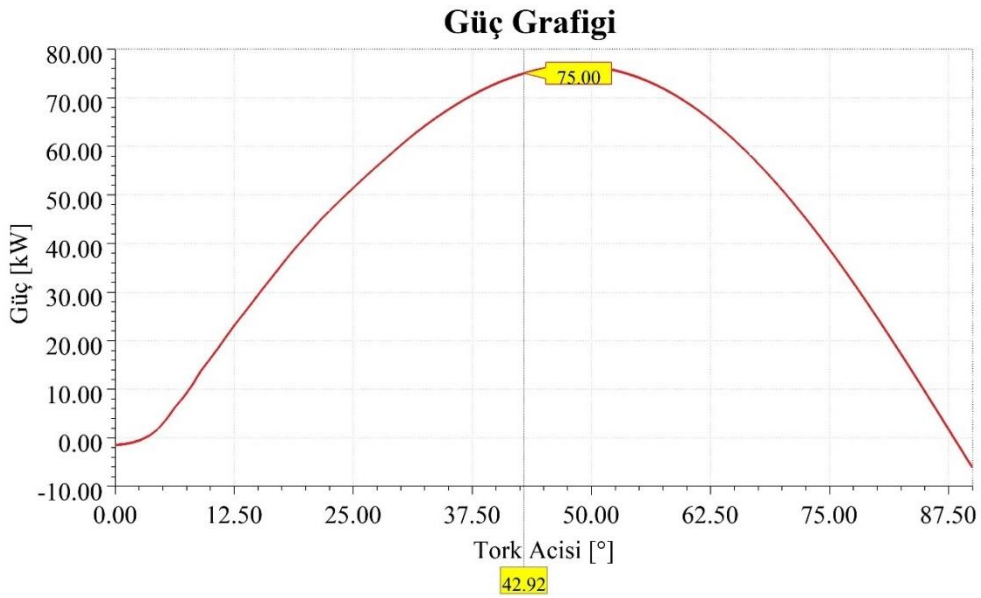
Parametreler		Analitik Tasarım	RMxprt Sonuçları
Motor Giriş/Çıkış Parametreleri	$\cos \varphi$ Güç Faktörü	0.6060	0.6099
	P_n Mil Gücü (W)	75000.0	75008.4
	η Verim	0.9500	0.9548
	T Tork (Nm)	143.24	143.26
	I_{In} Stator Akım Değeri (rms) (A)	178.64	177.05
Stator Parametreleri	D_{is} Stator İç Çap (m)		0.1655
	D_{out} Stator Dış Çap (m)		0.2331
	τ Pole Pitch (m)		0.0866
	τ_s Slot Pitch (m)		0.0096
	b_{ts} Stator Dış Kalınlığı (m)		0.0049
	b_{s1} Oluk Alt Genişlik (m)	0.0051	0.0050
	b_{s2} Oluk Üst Genişlik (m)	0.0076	0.0075
	h_s Oluk Yüksekliği (m)	0.0215	0.0205
	h_{cs} Stator Boyunduruk Yüksekliği (m)	0.0098	0.0098
A_{su} Kullanılabilir Oluk Alanı (mm ²)	135.47	135.41	
Stator Sargı Parametreleri	W_1 Faz Başına Sarım Sayısı	30.02	30.00
	n_s Sipir Sayısı	10.01	10.00
	a_1 Paralel Akım Yolu Sayısı		3
	a_p Paralel İletken Sayısı		4
	J_{\cos} Akım Yoğunluğu (A/mm ²)	10.00	10.02
	d_{Co} Sargı Çapı (mm)	1.3768	1.3690
	K_{fill} Doluluk Oranı	0.44	0.55
	R_s Stator Sargı Direnci	0.0211	0.0218
Rotor Paramet releri	L Paket Boyu (m)		0.1646
	D_{or} Rotor Dış Çapı (m)		0.1642
	D_{ir} Mil Çapı (m)		0.0450
	k Bariyer Sayısı		4

B_{01}	1. Bariyer Genişliği (B0)	6.63
S_{01}	1. Segment Genişliği (Mil bariyer arası)	5.08
S_{02}	2. Segment Genişliği (Y0)	9.86

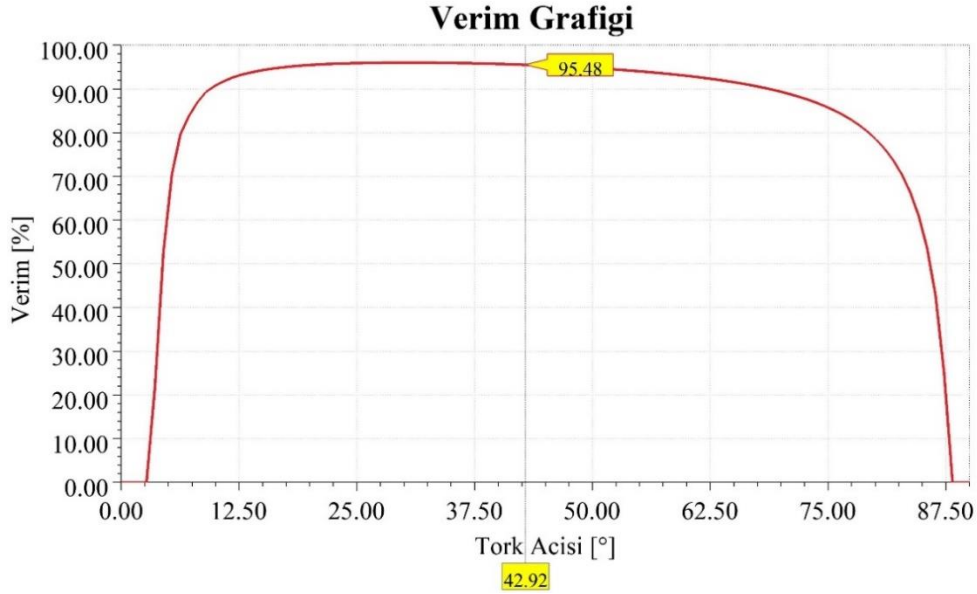
Tablo 5’te çalışmada verilen hesaplamalar ve sınırlamalara göre bulunmuş sonuçlar listelenmiştir. Analitik hesaplamalar sonucu belirlenen parametrelere göre ANSYS Maxwell tasarımı yapılmış ve RMXprt sonuçları ile doğrulanmıştır. Verilen değerlerin bazıları programa direk girildiği için iki değer de eşit olmaktadır. Bu değerler Tablo 5’te ortak değer olarak verilmiştir. Analitik olarak ölçüleri ve sınırları belirlenen motorun RMXprt sonuçlarının da oldukça yakın olması tasarımın sonraki süreçte başarıyla devam etmesini sağlayacaktır.



a)



b)



c)

Şekil 8. SRM tasarımında tork açısına bağlı çıkış eğrileri a) Tork, b) Güç, c) Verim
 Figure 8. Output curves depending on torque angle in SRM design a) Torque, b) Power, c) Efficiency

Yapılan analizlerde tasarlanan SRM ile ilgili sonuç değerlendirilmesi için tork, güç ve verim değerlerinin grafikleri verilmiştir. Bu grafikler SRM için önemli kriterlerden biri olan Tork Açısı / Yük Açısına bağlı olarak alınmıştır. Makinenin optimum durumu için tork açısı 42.9243° olarak RMxprt analizlerinden bulunmuştur. Şekil 8’de ilgili sonuçlar verilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi daha yüksek tork, verim veya güç değerlerinde motorun çalıştırılması için tork açısında değişiklikler yapılabilir. Ancak bu durumda motor optimum çalışma noktasında olmayacaktır.

4. Sonuç

Bu çalışmada 75kW SRM analitik tasarımı için yapılması gereken işlemler sırasıyla verilmiştir. RMxprt analizi öncesinde talep edilen motor parametrelerine bağlı olarak tasarım aşamaları adım adım işlenmiştir. Stator yapısının asenkron motorlarla aynı olması sebebiyle stator boyutlandırılması, stator oluk tasarımı ve stator sargı tasarımı asenkron motora benzer şekilde tamamlanmıştır. İlgili hesaplamalar yapılırken tasarım standartlarına, elektriksel ve manyetik sınırlandırılmalarına dikkat edilmiştir.

Özellikle elektrikli araçlar için projelendirilmiş bir çalışmanın motor parametreleri referans alınarak yüksek güçte bir SRM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Stator ve sargı tasarımları tamamlandıktan sonra rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Rotor yapısı sadece nüve ve bariyerlerden oluşmaktadır. Bu nedenle bariyer tasarımı SRM relüktans torku üretimi için oldukça önemli bir faktördür. Rotor tasarımı da stator ve sargı tasarımları gibi literatürde dikkat edilmesi gereken sınır değerlerine göre tamamlanmıştır.

Analitik tasarımı yapılan motorun parametreleri kullanılarak ANSYS Maxwell RMxprt tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yapılan analitik hesaplamalar, RMxprt sonuçları ile kıyaslanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Performans değerlendirmesi için SRM’nin tork açısına bağlı olarak tork, güç ve verim grafikleri verilmiştir. 75kW güç değerine sahip SRM ile 143.24Nm tork elde edilmiş ve %95.48 verime ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre tasarlanan SRM’nin amaçlanan hedeflere ulaştığı görülmektedir.

Analitik tasarımı ve RMXprt doğrulaması yapılan motorun sonraki çalışmalarda prototipleme ve üretim gibi aşamalara ulaşabilmesi için Sonlu Elemanlar Yönetimi (SEY) ile 2D ve 3D tasarımları gerçekleştirilmelidir. Bu sebeple çalışmanın devamında tasarlanan motorun SEY analizlerinin yapılması ve test edilmesi gerekmektedir. Bu tasarımlarda yapılacak optimizasyon çalışmaları ile daha yüksek performans değerleri elde edileceği tahmin edilmektedir.

5. Kaynaklar

- Aghazadeh, H., Afjei, E., & Siadatan, A. (2019). Sizing and detailed design procedure of external rotor synchronous reluctance machine. *IET Electric Power Applications*, 13(8), 1105-1113. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5802>
- Boldea, I. (2020). *Induction Machines Handbook; Transients, Control Principles, Design and Testing* (3. bs). CRC Press, Boca Raton, 99-150.
- Credo, A., Fabri, G., Villani, M., & Popescu, M. (2019). High Speed Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicles: A Focus on Rotor Mechanical Design. *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 165-171. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785083>
- Ersöz, M. (2015). *Akı Bariyerli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Uygulaması* [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 163.
- Gerçekcioğlu, H. S., & Akar, M. (2021). Eksenel Akı Konseptindeki Senkron Relüktans ve İndüksiyon Motor'un Verim ve Performans Karşılaştırması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. <https://doi.org/10.29109/gujsc.910521>
- Hendershot, J. R. (2012). *Electric Machine Design Course, Poly-Phase Induction Machine Design Strategy*. University of Minnesota.
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Roshandel, E., & Soong, W. L. (2020). Axial-Flux Synchronous Reluctance Motors: Introduction of a New Machine. *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379345>
- Moghaddam, R. R. (2007). *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design* [Master Thesis]. KTH Vetenskap Och Konst, Royal Institute of Technology, Stockholm, 95.
- Öner, Y., Ersöz, M., & Bingöl, O. (2016). Akı Bariyerli TLA Tipi Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4). <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278449>
- Özçelik, N. G. (2016). *IE4 Verim Sınıfı Senkron Relüktans Motor Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 119.
- Özsoy, M., Kaplan, O., & Akar, M. (2022). The effect of stator slot number and pole number on motor performance in double-sided axial flux induction motors for electric vehicles. *Electrical Engineering*, 104(6), 4289-4304. <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01623-3>
- Tap, A. (2017). *Sürekli Miknatis Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 115.
- Velasco, J., Fabri, Giuseppe, Jezdinsky, Tomas, Albini, Luciano, Misa Milosavljevic, Carrero, Miguel, Thackwell, Cleef, Benedetto, Matteo, & González, Manuel. (2021). *REFREEDRIVE_D1.3_V3 Report, Rare Earth Free e-Drives Featuring Low Cost Manufacturing*. Refreedrive.
- Villani, M. (2018). *Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications*. University of L'aquila Department of Industrial and Information Engineering and Economics, WMC Coiltech 20118 - Pordenone.
- Villani, M., Fabri, G., Leonardo, L. D., & Credo, A. (2019). *Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications*. University of L'aquila Department of Industrial and Information Engineering and Economics, WMC Coiltech 2019 - Pordenone.
- Zöhra, B., & Akar, M. (2016). Matlab grafik arayüzü kullanılarak 3 fazlı asenkron motorların analitik modellenmesi. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*, 3652-3659.