

2209/A

ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİ ARAŞTIRMA PROJELERİ DESTEK
PROGRAMI

SONUÇ RAPORU

**PROJE BAŞLIĞI: Yüksek Verimli Sabit Mıknatıslı Fırçasız DC
Motor Tasarımı Projesi**

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI: İrfan Güven ÇÖMEZOĞLU

DANIŞMANININ ADI: Dr.Öğr.Üyesi Engin AYÇİÇEK

GENEL BİLGİLER

PROJENİN KONUSU	Yüksek Verimli Sabit Mıknatıslı Fırçasız DC Motor Tasarımı Projesi
PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI	İrfan Güven ÇÖMEZOĞLU
DANIŞMANIN ADI	Dr.Öğr.Üyesi Engin AYÇİÇEK
PROJE BAŞLANGIÇ VE BİTİŞ TARİHLERİ	30.09.2019 – 11.11.2020

1. Giriş

Bu proje kapsamında elektrikli araçlarda kullanılmak üzere sabit mıknatıslı fırçasız DC senkron elektrik motoru, Yıldız Teknik Üniversitesi Alternatif Enerjili Sistemler Kulübü bünyesinde geliştirilip prototip hidrojenli ve elektrikli araçlarda test edilerek tasarlanıp üretilmiştir.

Tasarım aşamasında verimi arttırabilecek bütün parametreler ortaya çıkartılıp kayıp meydana gelen parçaların her birinde kayıpların minimuma indirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Motor direkt olarak tek tekerden teker içi olarak kullanılmıştır. Bu sayede aktarım organlarında yaşanacak kayıpların önüne geçilmiştir. Uygulanabilirlik ve yüksek enerji verimliliği üzerine tasarlanıp üretilen bu sabit mıknatıslı fırçasız DC senkron elektrik motoru, Yıldız Teknik Üniversitesi Alternatif Enerjili Sistemler Kulübü tarafından üretilen elektrikli araç Lyra ve hibrit elektrikli araç Hydra üzerinde test edilmiştir. Bu araçlar TÜBİTAK tarafından düzenlenen Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışları'nda yarışmış olup aşağıdaki başarıları elde etmiştir.

- Hidromobil Kategorisi Birincilik Ödülü
- Elektromobil Kategorisi Birincilik Ödülü
- Verimlilik Rekor Ödülü
- Teknik Tasarım Ödülü
- Yerli Ürün Birincilik Ödülü

Tasarlanıp üretilen sabit mıknatıslı fırçasız DC senkron elektrik motoru iki araçta da yarış esnasında kullanılmıştır. Aracın TÜBİTAK Efficiency Challenge yarışmasında 16 yılın en verimli aracı olarak verimlilik rekor ödülünü kazanmasında yüksek verimli elektrik motoru tasarımının büyük payı olduğu görülmüştür.



Şekil1: Elektrikli Araç "Lyra" ve Hidrojenli Araç "Hydra"

2. Rapor dönemlerinde yapılan çalışmalar

Sabit mıknatıslı fırçasız DC senkron elektrik motoru tasarımına ilk olarak oluk/kutup oranına karar vermek ile başlandı. Oluk/kutup oranlarının avantaj-dezavantajları incelendiğinde yarışma koşulları için en uygun tasarımın 36 oluk, 32 mıknatıs olduğuna karar verildi. Bu tasarımın diğer tasarımlardan farkı olarak potansiyel tork sabitinin daha fazla olması ve motorun indüklenen gerilim şeklinin diğer tasarımlara göre daha çok saf sinüs dalgasına yakın olmasıdır. Ne kadar sinüs dalgasına yaklaşırsa harmonik kayıpları azalmaktadır. Ayrıca motorun kutup sayısının fazla olması ile yarış koşullarında istenen tork-güç değerlerinin rahatlıkla karşılanabilir olduğu matematiksel hesaplamalar ile hesaplanmış ve elektromanyetik analizler sonucunda doğrulanmış.

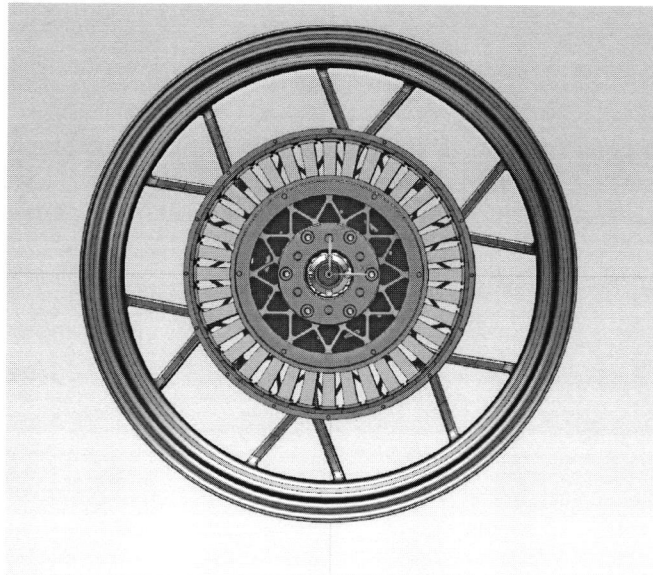
2.1 Motorun Boyutlandırılması

Motor boyutu motor tasarımında en öncelikli olarak belirlenmesi gereken parametrelerdendir. Motorun karakteristiğini ve özelliklerini birçok noktadan etkilemektedir. Motorun boyutu hesaplanırken istenen torku üretebilmesi esas alınır. Motor çapı arttıkça üretilen tork miktarı da aşağıdaki Denklem (1)'de görüldüğü gibi artar.

$$T = kD^2L \quad (1)$$

Motor, tekerleğin içinde kullanıldığı için boyutu maksimum tekerlek boyunda olabilmektedir. Motorun çapı arttıkça üretebildiği maksimum tork artmakta fakat aynı zamanda motorun ağırlığı da artırmaktadır. Ağırlığın artması verimde düşüşlere neden olmaktadır. Bu sebeple ağırlık-tork oranı en optimum noktada olacak şekilde belirlenmeye çalışılmıştır.

Motor çapı için yapılan işlemler eksenel kalınlık hesaplanırken de yapılmıştır. Bu sayede motorun ağırlığı tekerleğin hepsini kaplayacak durumdaki gibi ağır olmadı, hem de istenilen miktarda tork üretebilen bir motor elde edildi.



Şekil 2. Motorun boyutunun CAD model üzerinden gösterimi

2.2 ROTOR VE STATOR BOYUTU HESAPLAMALARI

Rotorun boyutlandırılması konusunda motor dıştan rotorlu yapıya sahip olduğundan motorun dış çapı aynı zamanda rotorun dış çapı olmuştur. Rotor malzemesi, manyetik geçirgenliği yüksek olabilmesi için çelik olarak seçildiğinden motorun fazlaca ağırlaşmasına neden olmaktadır. Rotor kalınlığı mıknatıslar arası manyetik akı geçişini zorlaştırmayacak şekilde olabildiğince minimum kalınlıkta seçilmeye çalışılmıştır. Manyetik analiz kısmında görüleceği üzere rotor çeliği kalınlığı manyetik analizler sonucunda belirlenmiştir.

Stator boyutlandırılması tarafında statorun dış yarıçapı, rotorun iç yarıçapından hava aralığının azaltılmış hali şeklinde bulunabilir. Bu nedenle stator dış çapı hava aralığı optimizasyonu şeklinde yapılmaya çalışıldı. Bunu yaparken hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunun miktarı ayarlanmaya çalışıldı. Aynı zamanda motor kendi üretimimiz olacağı için üretim toleranslarını da düşünerek hareket edilmesi gerektiği düşünüldü. Bu sebeplerden ve yapılan analiz sonuçlarına göre motor tasarımı için 1mm'lik bir hava aralığının yeterli olabileceği kararlaştırıldı. (Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu manyetik analizine manyetik analiz çalışmalarıyla ulaşabilirsiniz.)

$$T_d = \frac{S_{elm} \cos \psi}{2\pi n_s} = \frac{\pi}{4} k_{w1} D_{1in}^2 L_i B_{mq} A_m \cos \psi \quad (2)$$

Motorun elektromanyetik tork hesaplaması Denklem (2) deki formülden şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\frac{\pi}{4} \times 0,95 \times (0,242)^2 \times 0,02 \times 0,7 \times 1,45 \times 20000 = 17,74067 \quad (3)$$

Literatür araştırmasına göre Kw1 olarak gösterilen sargı faktörü PMSM motorlarda 1'e çok yakın değerlerde çıkmaktadır. Bu sebeple 0.95 olarak alınmıştır. Onun dışındaki parametreler motorun boyutlandırılması ve mıknatıs özellikleri gibi motora özgü özellikler olup motor tasarımı sonucu çıkan parametreler yerine konarak hesaplanmıştır.

$$S_{elm} = m_1 E_f I_a = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{w1} \Phi_f \frac{m_1 \pi D_{1in} A_m}{2 m_1 \sqrt{2} N_1} \quad (4)$$

Motorun üreteceği tork formülde görüldüğü üzere birçok parametreye bağlıdır. Bu formülden yola çıkılarak motorun istenen yarış koşulu torkunu elde edemeyeceği hesaplanarak tasarımda ılerlenmiştir.

Yukarıdaki Denklem (4) deki formülden yola çıkılarak faz başına elektromanyetik görünür güç şu şekilde hesaplanmıştır;

$$1 \times 82 \times 13 = 1066 \quad \text{Watt} \quad (5)$$

Tasarlanan motorun mekanik güç hesabı formülü denklem 6 da verilmiştir. Motorun talep ettiği tork ve açısal hız değerleri bilindiği için mekanik güç hesaplanabilmiştir.

$$P_m = \frac{dW_m}{dt} = T \frac{d\theta}{dt} = T\omega \quad (6)$$

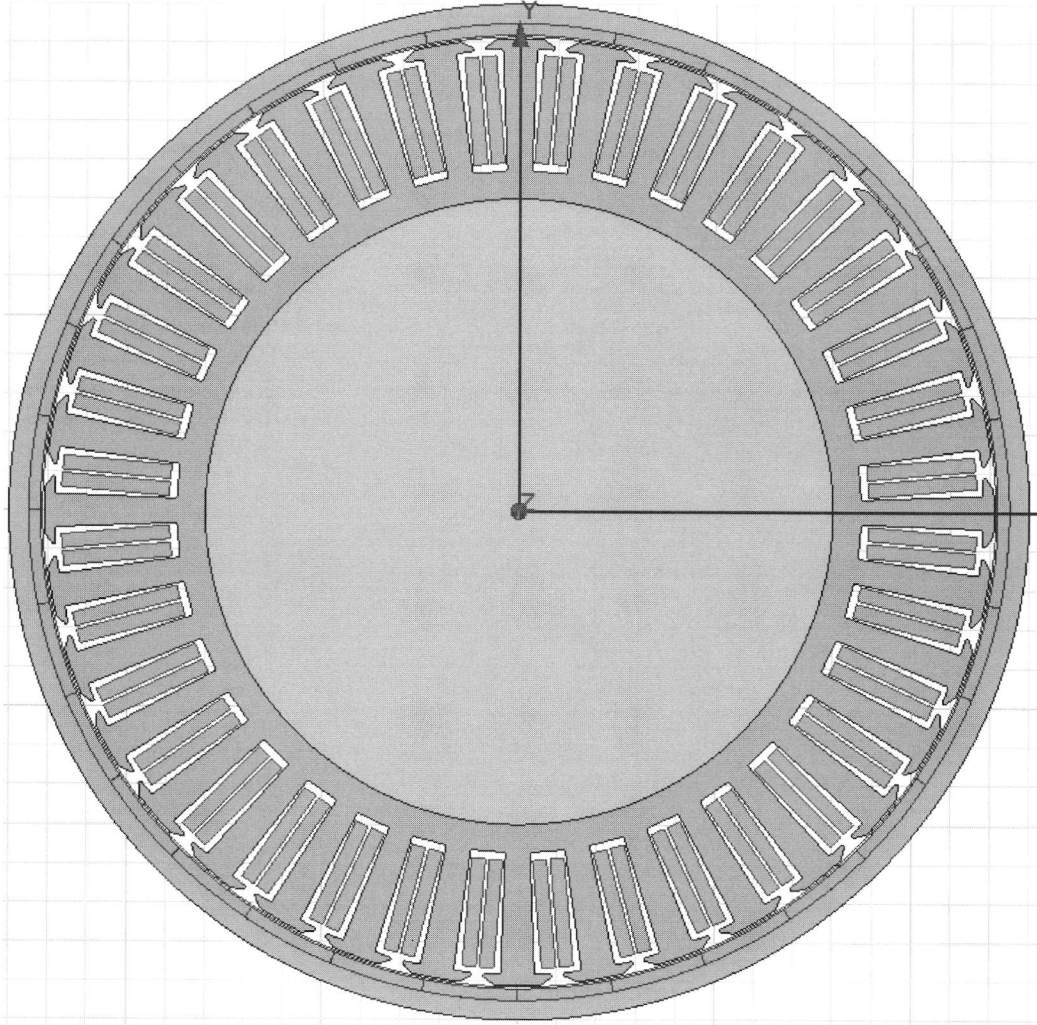
Tork aynı zamanda motorun güç eşitliğini de etkilemektedir. Bu nedenle motorun istenen çıkış gücünü verebilmesi için de çıkış torku miktarı hesaplanıp tasarımlara devam edilmiştir.

Motorun elektromanyetik torku potansiyeli yaklaşık olarak 17.74Nm olduğu Denklem (3) de hesaplanarak bulunmuştu. Motor 550 rpm (57,59 rad/s)de giderken bu tork elde edilmesi durumunda motorun üretebileceği mekanik güç potansiyeli yaklaşık 1000 Watt olmaktadır. Motorun tasarım parametreleri 1 kW değerine göre düzenlenmiştir. (Denklem (7))

$$P_m = 17,74 \times 57,59 = 1021 \text{ Watt}$$

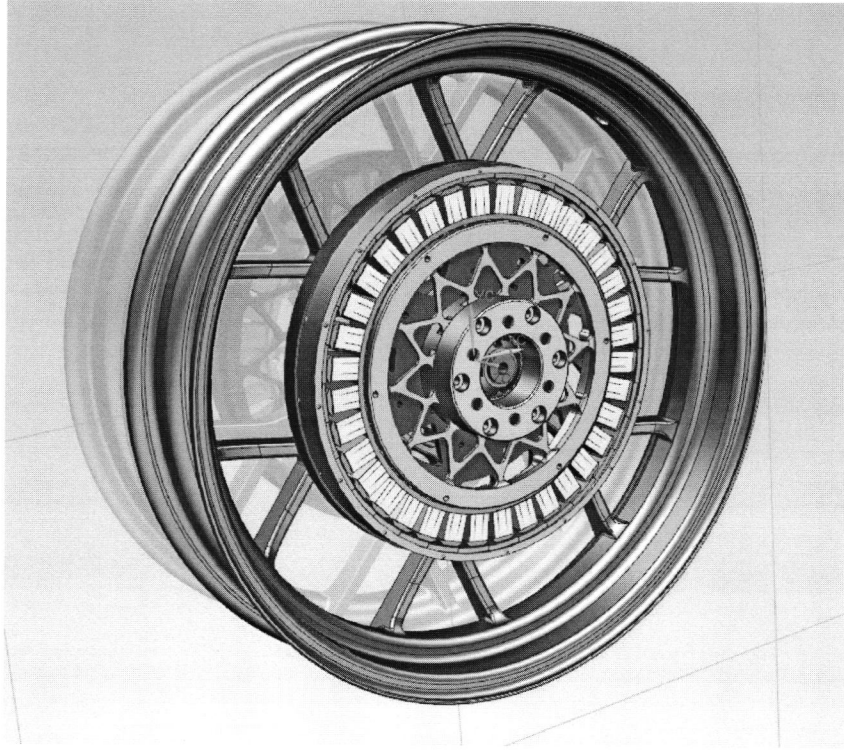
(7)

2.3 -Boyutlandırma hesaplamalarının tamamlanması ve motor CAD modeli çizilmesi



Şekil 3. RF-PMSM motorun 2 boyutlu tam görünümü

Statorun iç çapı için ise stator diş uzunluklarının sarım sayısına göre belirledikten sonra stator iç çap uzunluğu belirlendi. Stator malzemesi elektriksel çelik olduğundan dolayı öz kütlesi fazladır. Stator diş kısmının bitişi ile iç çap arası mesafe inceliğinin olabildiğince ince olması ağırlık bakımından avantaj olacağından bu mesafe analizler doğrultusunda manyetik akının geçişini bozmayacak şekilde en az olabileceği değerde belirlenmeye çalışıldı. Boyutlandırma konusunda analiz sonuçları manyetik analizler kısmında verilmiştir. Sabit mıknatıslı fırçasız DC senkron elektrik motorun 2 boyutlu tam görünümü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 4. RF-PMSM motor tasarımının CAD programında janta montajlanmış son hali

2.4. MOTORUN KAYIPLARI

2.3.1. Bakır Kayıpları

Sabit mıknatıslı fırçasız DC motorlarda en büyük verim kaybının sebebi, stator sargılarını oluşturan bakır tel üzerinde oluşan bakır kayıplarından meydana gelir.

$$R_{1dc} = \frac{N_1 l_{1av}}{a \sigma_1 s_a} \quad (8)$$

$$\Delta P_a = m_1 I_a^2 R_1 \approx m_1 I_a^2 R_{1dc} k'_{1R} \quad (9)$$

Motorun doğal frekansı yarış koşulları altında 150 hertz değerini geçmediği için DC direnç toplam dirence çok yakındır. Bu sebeple direkt olarak DC direnç değeri direnç olarak kullanılabilir. Daha detaylı araştırma yapılmak istenirse DC direnç, deri etkisi ve yakınlık etkisinin de hesaba katılmasını sağlayan aşağıdaki Denklem (9)'daki sabiti ile çarpılır.

$$k'_{1R} = \frac{k_{1R} + l_{1e}/L_i}{1 + l_{1e}/L_i} \quad (10)$$

R1 DC değerine değerler yerine yazılınca analiz programında da aynı sonuç çıktığı üzere 79 mΩ değeri çıkmıştır.

$$3 \times 13^2 \times (79 \times 10^{-3}) = 40.053 \quad (11)$$

Denklem (11)'deki hesaplamada hesaplanan değer doğrultusunda yarış koşulu hız-tork-güç değerlerini karşılayan bakır kaybı saat başına **40 Watt** olarak hesaplanmıştır.

2.3.2. Çekirdek Kaybı

Motor tasarımında azaltılması istenen bir diğer kayıp türü çekirdek kaybıdır. Motorun sargılarının sarıldığı stator parçası üzerine meydana gelen bu kayıp denklem 12 de verilmiştir.

$$\Delta P_{Fe} = k_{ad}(\Delta P_{eFe} + \Delta P_{hFe}) \quad (12)$$

Çekirdek kayıpları aslında motorda oluşan eddy ve histerezis kaybının toplamı şeklindedir fakat ölçüldüğü zaman her zaman daha fazla gelmektedir. Bu sebeple çekirdek kaybı sabiti ile çarpılarak Net çekirdek kaybı elde edilir. K_{ad} sabiti dişlerde oluşan (K_{adt}) ve boyundurukta oluşan (K_{ady}) olmak üzere iki parçada yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Aşağıdaki Denklem (13) ve Denklem (14) deki formüllerde olduğu üzere histerezis ve eddy akımı formülü ayrı ayrı bulunabilir.

$$\begin{aligned} \Delta P_{hFe} &= \epsilon \frac{f}{100} m_{Fe} \sum_{n=1}^{\infty} n [B_{mtn}^2 + B_{mrn}^2] \\ &= \epsilon \frac{f}{100} m_{Fe} [B_{mt1}^2 + B_{mr1}^2] \eta_{dh}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Histerezis kaybı E sabiti kullanılan silikonlu elektriksel çeliğin türüne göre değişmektedir. Kullandığımız stator çeliği %4 silikon oranlı yön verilmemiş laminasyon olarak kullanılacağı için diğer tür silikonlu çeliklere göre daha düşük katsayı olan 1,5 değerine sahiptir. Diğer tip çeliklerde katsayı değeri 4 ve üstü olabileceğinden düşük katsayılı ürün seçimi, histerezis kaybını azaltmıştır.

Formülde görüleceği üzere manyetik akı yoğunluğunun harmonik komponentlerinin karelerinin toplamı ile histerezis kaybı artmaktadır. Demirin ağırlığı ve motorun doğal frekansı da histerezis kaybını doğru orantılı olarak etkilemektedir. η_{dh} sabiti ise manyetik akı yoğunluğunun şekli dolayısı ile etki etmesini temsil etmektedir. Değeri sinüzoidal manyetik akı yoğunluğu olan motorlarda 1'e çok yakın olduğu için hesaplamalarda 1 olarak kabul edilmiştir.

$$\begin{aligned} \Delta P_{eFe} &= \frac{\pi^2}{6} \frac{\sigma_{Fe}}{\rho_{Fe}} f^2 d_{Fe}^2 m_{Fe} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 [B_{mtn}^2 + B_{mrn}^2] \\ &= \frac{\pi^2}{6} \frac{\sigma_{Fe}}{\rho_{Fe}} f^2 d_{Fe}^2 m_{Fe} [B_{mt1}^2 + B_{mr1}^2] \eta_{de}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Eddy akımı formülü daha önceki kısımlarda anlatıldığı gibi motorun doğal frekansı ve levha kalınlığının karesi ile orantılı şekilde değişmektedir. Ayrıca elektriksel çeliğin iletkenliği ve kütlesi de arttıkça eddy kaybı artmaktadır. Demirin yoğunluk değeri ile ters orantılı şekilde artmaktadır.

Eddy ve histerezis kaybının ayrı ayrı hesaplanması yerine aşağıdaki Denklem (15)'deki hem eddy akımı formülünü kapsayan hem de histerezis kaybı formülünü kapsayan denklem üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta p_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{4/3} [k_{adt} B_{mt}^2 m_t + k_{ady} B_{my}^2 m_y] \quad (15)$$

Denklem (15)'de çekirdek kaybının daha detaylı hali verilmiştir. K_{ad} sabitinin PMSM motor stator dişlerinde 1.7-2.0 (K_{adt}) arasında, boyundurukta ise 2.4 ile 4.0 (K_{ady}) arası değişmektedir. Hesaplamalara boyunduruk ve dişlerin ağırlıkları da eklenmiştir. Ayrıca dişlerdeki ve boyunduruktaki manyetik akı yoğunluğunun karesi ile çekirdek kaybının arttığı görülmektedir.

$$\left(\frac{150}{50}\right)^4 \times (1.7 \times (0.8)^2 \times 3 + 2.4 \times (0.7)^2 \times 0.9) = 18.70193863 \quad (16)$$

Denklem (16) deki toplam çekirdek kaybı hesaplaması sonucu yarış koşullarındaki hız-güç-tork büyüklüğünde saat başına **18.7 Watt** olarak hesaplanmıştır.

2.3.3. Mıknatıs Kayıpları

Mıknatısındaki kayıplar Denklem (17) deki şekilde hesaplanır. Görüldüğü üzere mıknatısın manyetik akı yoğunluğunun etkisi büyüktür. Mıknatıs aktif yüzey alanı arttıkça artmakta ve mıknatısın iletkenliği arttıkça azalmaktadır. a_{Rv} değeri v. harmonik katsayısıdır, k_v değeri elektromanyetik alan zayıflama katsayısıdır, B_v değeri v. Harmonikteki maksimum manyetik akı yoğunluğudur ve açık formülleri aşağıdaki Denklem (18) de verilmiştir.

$$a_{Rv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{4 + \left(\frac{\beta_v}{k_v}\right)^4} + \left(\frac{\beta_v}{k_v}\right)^2} \quad (17)$$

$$k_v = \sqrt{\pi(1 \mp \nu)f\mu_0\mu_{rec}\sigma_{PM}} \quad \beta_v = \nu \frac{\pi}{\tau} \quad k_{rv} = 1 + \frac{1}{\nu} \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{L_i} \quad (18)$$

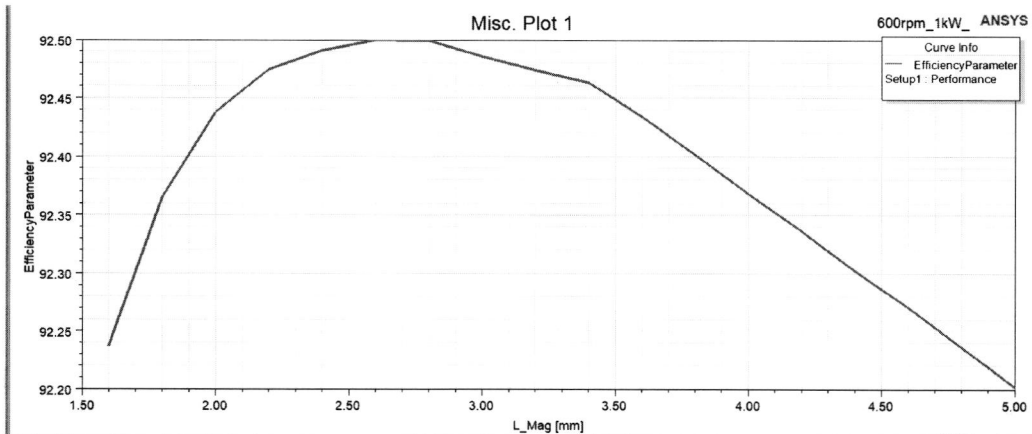
Mıknatısta oluşan kayıp değeri literatürde sabit mıknatıslı fırçasız DC senkron elektrik motorda oluşan en düşük miktarda kayıp olarak gösterilmiştir. Hesaplanması durumunda bile her değer için hata payı diğer kayıplara göre daha fazla olduğu için formüller kullanılarak hesaplanmamıştır.

2.4. Optimizasyonlar

Motor tasarımında yüksek verimlere ulaşabilmek adına optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında motorun stator, rotor, mıknatıs, sargı kısımlarında verimi arttırmaya yönelik çalışmalar yapılarak motorun verimi olabildiğince artırılmıştır.

2.4.1. Mıknatıs Kalınlığı Optimizasyonu

Mıknatıs kalınlığı motorun verim karakteristiğini ve üretim maliyeti açısından motoru etkileyen önemli bir parametredir. Aşağıdaki şekil 5 te görüldüğü üzere tasarıma uygun mıknatıs kalınlığı analizi ANSYS Rmxprt programı üzerinden parametrik analiz olarak yapılmıştır. Şekil 5 te görüldüğü üzere **3 mm** kalınlıkta mıknatısın verim açısından optimum olacağı belirlenmiştir.



Şekil 5. Mıknatıs kalınlığının verim optimizasyonu

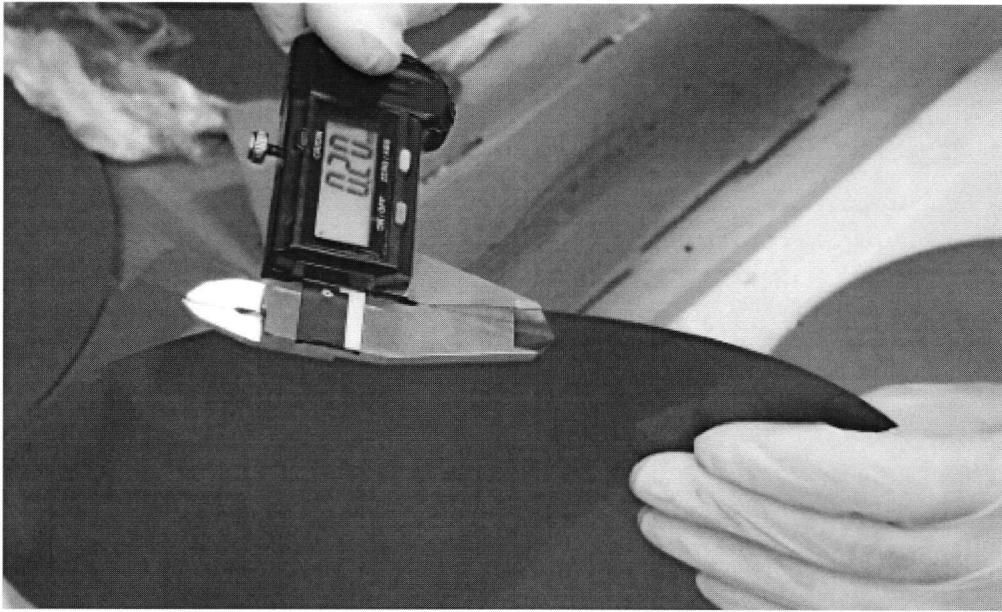
Mıknatıs kalınlığını motorun stator parametrelerini belirledikten sonra yarış koşullarında maksimum verim için ideal olan mıknatıs boyutu seçildi.

2.4.2. Motor Stator Çeliği Optimizasyonu

Nüvesi olan motorların çoğunda en çok kayıp olan parçalardan biri de motorun sargısının sarıldığı stator çeliğidir. Stator çeliğinde meydana gelen kayıpların tamamına çekirdek kayıpları denir ve bu kayıpların çok büyük kısmı malzeme türü ve kalitesine göre değişmektedir. Bu sebeple motorun en çok kaybı olan bu parça üzerinde malzeme optimizasyonu yapılmaya çalışılmıştır.

Optimizasyon çalışmalarına başlarken piyasadaki silisli sac levha tedarikçilerinin ürünleri araştırılmıştır. Bu araştırmanın sonucunda Çin deki bir şirketin elektrik motorları için özel ürettikleri sac levhaların olduğu görülmüştür.

Daha önce tasarladığımız motorlarda 0.35mm incelikte levha kullanılmaktaydı. Yapılan araştırmalar sonucunda eğer 0.2 mm incelikte levha kullanılırsa eddy kaybindan %306 kazanç olduğu Denklem (4.36) daki eddy kaybı formülünden görülmüştür. Levhaların fiyatı kulübümüz için fazla gelse de kazanç 3 kat olduğu için bu harcamanın yapılmasına karar verilmiştir ve sonuç olarak motorun çekirdek kayıplarının olabildiğince azalması sağlanmıştır. Malzemenin detayları aşağıda Şekil 4.24. da verilmiştir.



Şekil 6. Motorun statorunda kullanılan 0.2 mm incelikteki silisli sac levha

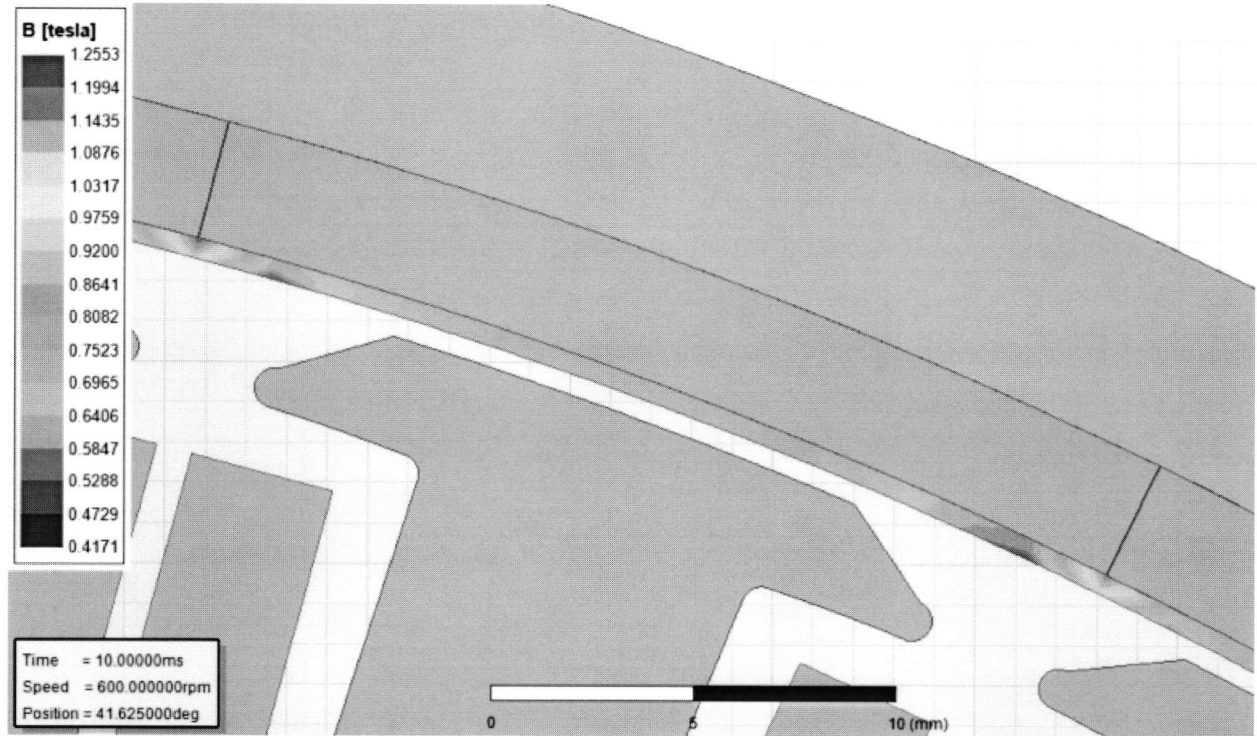
Levhaların bir diğer özelliği 180 °C de belirli bir baskı altında durması halinde levhaların birbirine yapışmasını sağlayan yapıştırıcı active olup levhaların birbirine kalıcı olarak yapışmasını sağlamaktadır (detaylar üretim çalışmalarında anlatılmıştır.). Bu sayede levhalar arası mesafe minimuma inip statorun laminasyon faktörünün artması sağlanabilmektedir. Bu da motorun verimini arttıracak için motor için olumlu etkisi olacaktır.

2.5. Analiz Çalışmaları

Motorun manyetik modeli ANSYS Maxwell 2D ve analizler sonucunda belirlenmiştir. Analizlerden önce literatürden yapılan araştırmalarla hangi parametrelerin motorun manyetik modelini etkilediği not edilip bu parametreler üzerinden düşünülerek manyetik analizler yorumlanmıştır.

$$B_g \approx \frac{B_r}{1 + \mu_{recg}/h_M} \quad (19)$$

Motorun hava aralığı manyetik akı yoğunluğu motorun performansı ve verimi açısından önemli bir parametredir. Seçilen mıknatısın B_r değeri ve mıknatıs kalınlığı arttıkça hava aralığı manyetik akı yoğunluğu artmaktadır. Aynı zamanda hava aralığının uzunluğu azalması ile de artmaktadır. Olabildiğince yüksek hava aralığı manyetik akı yoğunluğu olması motorun motorun performansını etkileyeceğinden Denklem 19 daki parametreler göz önünde bulundurularak hava aralığı manyetik akı yoğunluğu artırılabilir kadar artırılmaya çalışılmıştır. Analiz sonucu aşağıdaki Şekil 7 deki gibidir.



Şekil 7. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu analizi

$$B_{mg} = \frac{\Phi_f}{\alpha_i \tau L_i} \quad (20)$$

Motorun hava aralığı akı yoğunluğu, matematiksel olarak yukarıdaki Denklem 4.38 deki formül ile bir yaklaşım yapılabilir. Formüldeki değişkenler daha önce yukarıda yapılan hesaplamalardan yerine konulursa aşağıdaki Denklem 21 deki sonuç elde edilmektedir. ANSYS Maxwell 2D analiz değerine yakın bir değer bulunması tasarımın iki taraftan kendini doğruladığını göstermektedir.

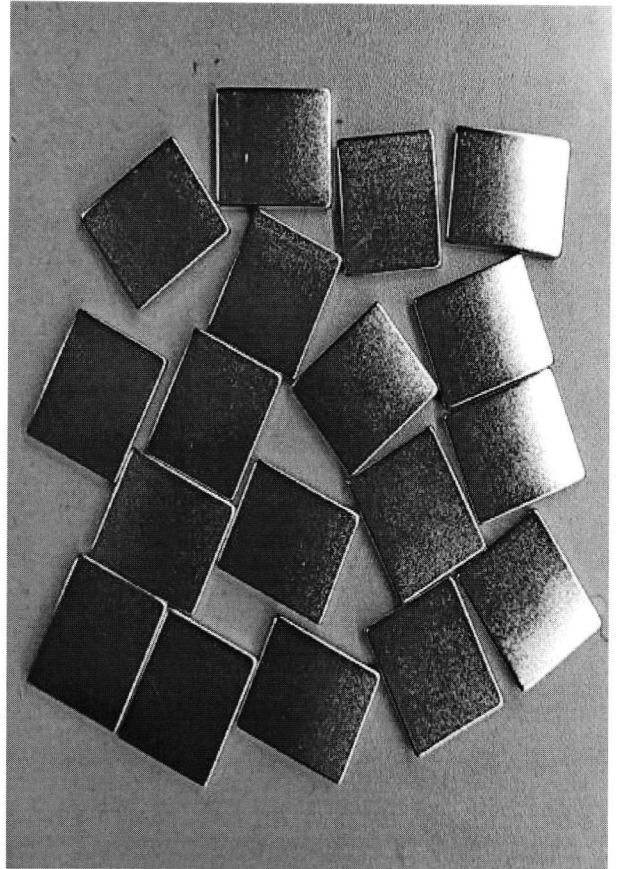
$$\frac{(2.1175 \times 10^{-4})}{0.57 \times 0.02 \times 0.0237582} = 0.7818168 \quad (21)$$

Motorun manyetik akı yoğunluğu sabiti, ortalama manyetik akı yoğunluğunun maksimum manyetik akı yoğunluğuna bölünmesi sonucunda bulunur

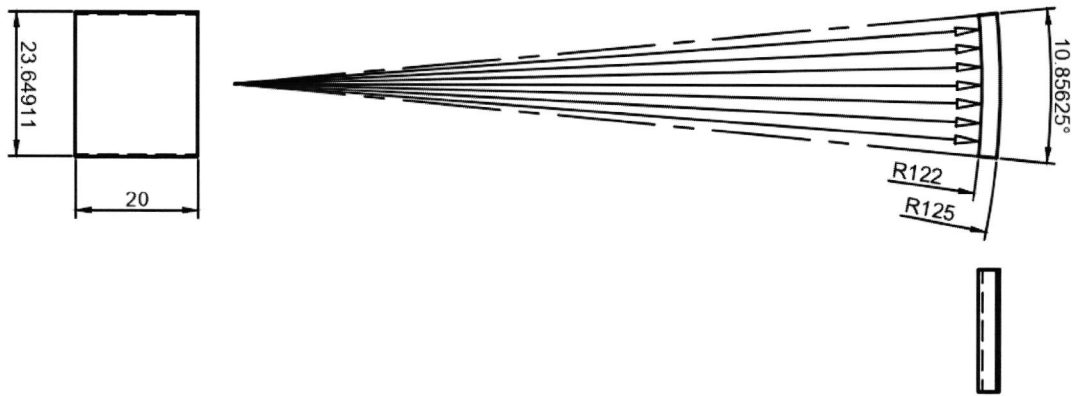
2.6 Üretim Çalışmaları

2.6 .1. Motor Mıknatıslarının Üretilmesi

Motorumuz kendi tasarımıımız olduğu için mıknatıslarının da kendine özgü bir tasarımı vardır. Mıknatıslar motorun çevresini radyal şekilde döndüğü için mıknatıslara bir miktar açi verdik. Bu sayede motor mıknatısları çember yüzeye tam olarak temas edecek ve olabildiğince mıknatısların ürettiği manyetik alanı bozmayacak şekilde konumlanmasını sağlayacaktır.



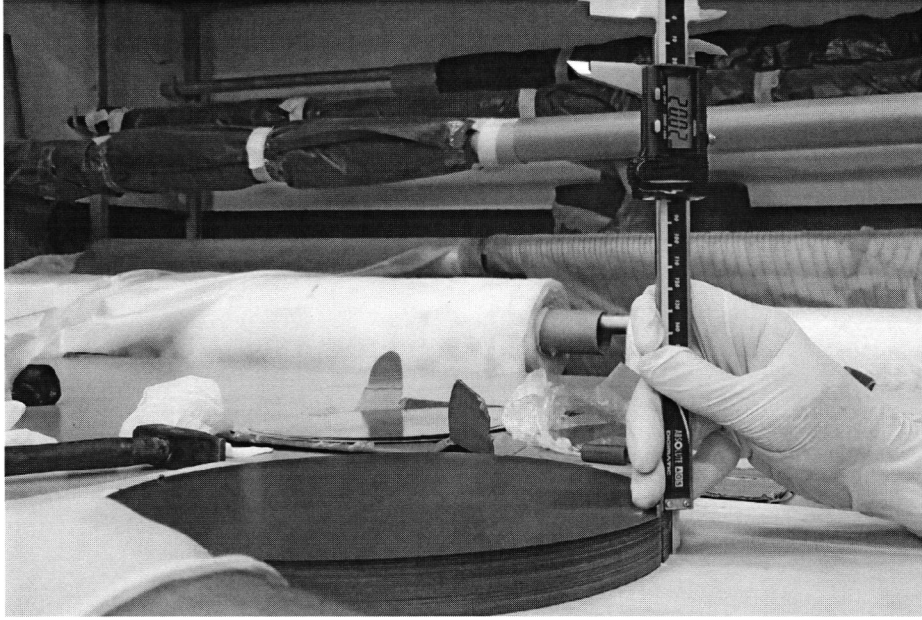
Şekil 8. Motor mıknatısları



Şekil9: Tasarlanan mıknatısların üretici firmaya gönderilen teknik çizimi

2.6.2. Levhalarının dizilmesi ve yapışması için levhaların fırında ısıtılması

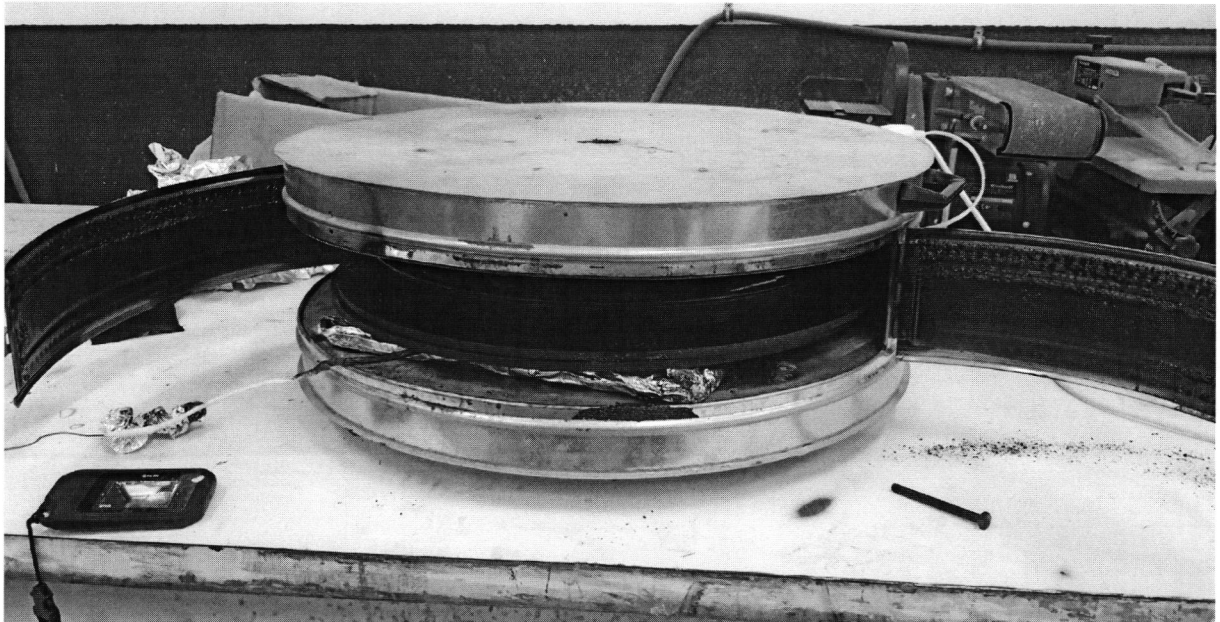
Stator levha kalınlığı motorun gücü ve verimi için önemli bir tasarım parametresidir. Yapılan manyetik analizler sonucunda 20mm kalınlıkta stator eksenel kalınlığı olmasına karar verilmiştir. Stator levhaları motorun eksenel kalınlığı kadar sayıda dizilerek motorun eksenel uzunluğu ayarlanmıştır.



Şekil 10. Motorun eksenel kalınlığının ayarlanması

Tedarik ettiğimiz elektrik makineleri için özel üretilen stator levhaları "bonding lamination" adında belli sıcaklık ve baskı altında birbirine yapışabilen tip levhalardan oluşmaktadır. Levhanın 180°C de 5 saat boyunca üstünde belli bir mıknatıs ağırlık altında kalması sonucunda levhalar birbirine kenetlenerek yapışabilmektedir. İşlemler doğru şekilde uygulanıp Şekil 10 daki gibi birleştirilmiştir.

Levhaların ısıtılması ve baskı altında kalması aşağıdaki şekil 11 de verilen fırın içerisinde yapılmıştır. Fırın sıcaklığı anlık olarak termal kamera ile kontrol edilerek kontrolsüz ısınma olmasının önüne geçilmiştir.



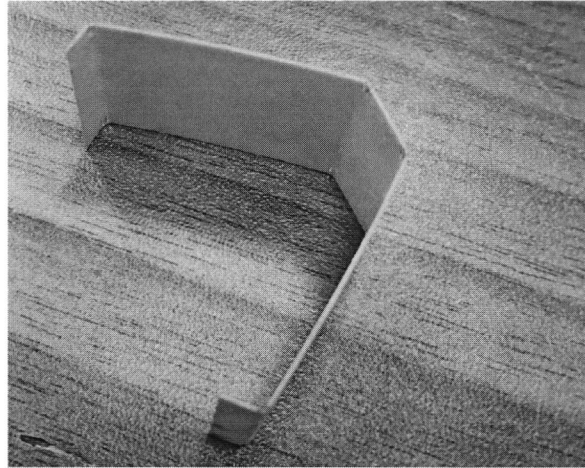
Şekil 11. Levhaların ısıtılmak üzere fırına konması

2.6.3.Motor Üretimi için Stator yalıtımı Yapılması

Motorda sorun teşkil eden noktalardan bir tanesi stator sargıları ile stator levhası arasındaki tel laminasyonunun kalkıp motorda kısa devre yaratmasıdır. Bu soruna yönelik birçok yalıtım malzemesi mevcuttur. Bu malzemeler arasından en dayanıklı ve en ince olan nomex izolasyon kağıdı kullanılmıştır. Bu kağıdın ince olması, stator oluğunda az yer kaplamasını sağlar ve bu sayede sargı teli kalınlığı artırılarak motor iç direnci azaltılabilir. Şekil 12 de nomex izolasyon kağıtlarının stator oluğuna yerleştirilme aşaması verilmiştir. Nomex izolasyon kağıdının görünümü şekil 13 de verilmiştir.



Şekil 12.Nomex izolasyon kağıtları her bir stator oluklarına yerleştirilir



Şekil 13:Nomex izolasyon kağıdı

Nomex kağıtlarının yerleştirilmesi sayesinde bakır sargı telinin emaye izolasyonu stator çeliği tarafından sürterek kalkmamaktadır. Nomex kağıtları lazer kesimde kesilerek her biri stator oluğuna sıkı geçiş olacak şekilde ayarlanmıştır.

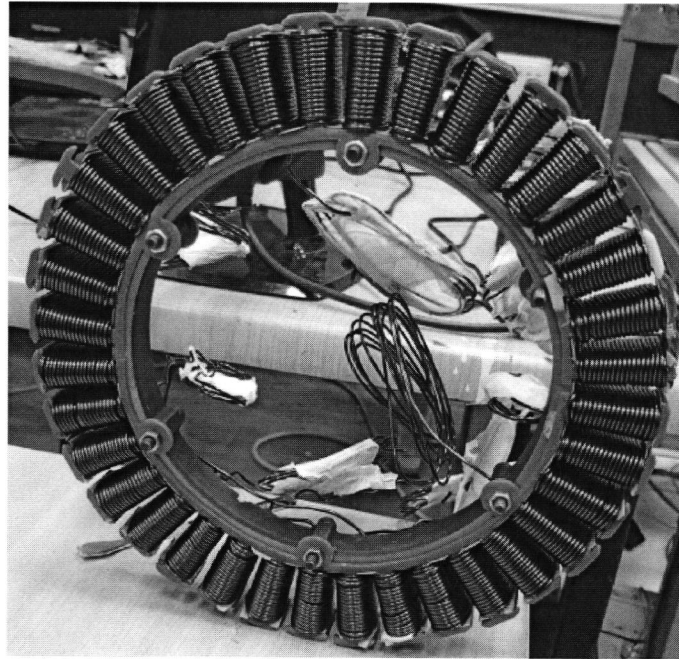
2.6.3. Motorun Sarılması

Motorun sarılması için sarım teknikleri araştırılıp motorun sarılması proje yürütücüsü öğrenci tarafından yapılmıştır. Uygun kalınlıkta seçilen sargı teli seçilen motor sarım tekniği ile sarılmıştır. Motor sarım işlemi şekil 14 te verilmiştir.



Şekil 14. Stator sargılarının sarılması

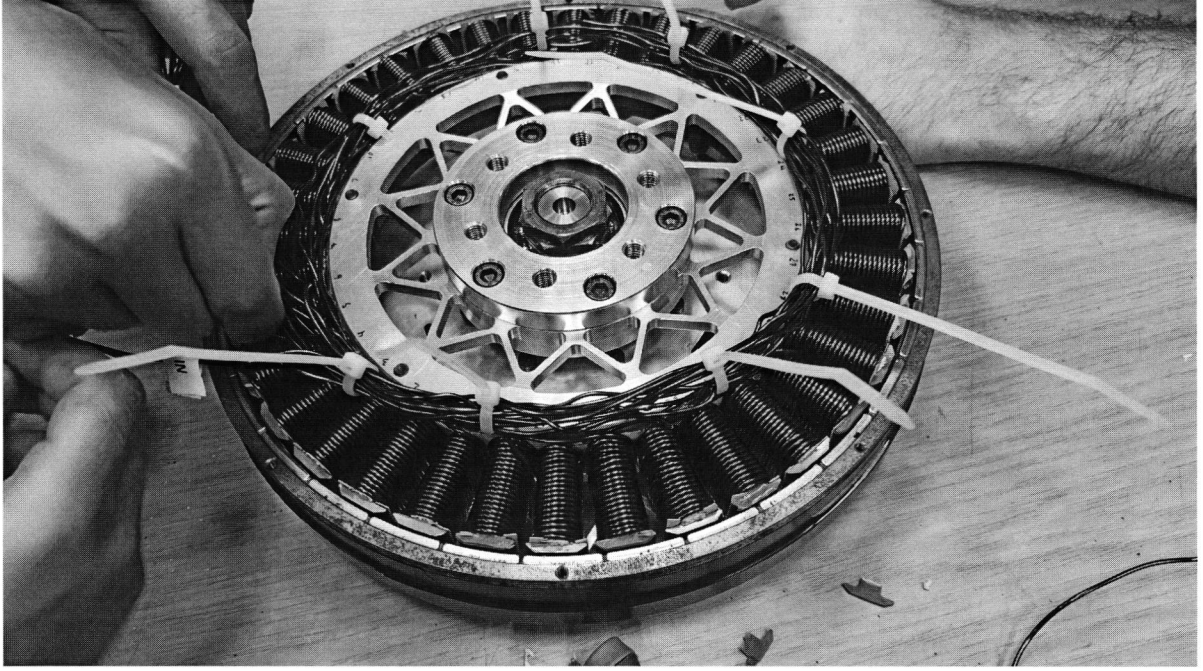
Motor sarımının bitmiş hali şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Stator sargılarının sarılmış hali

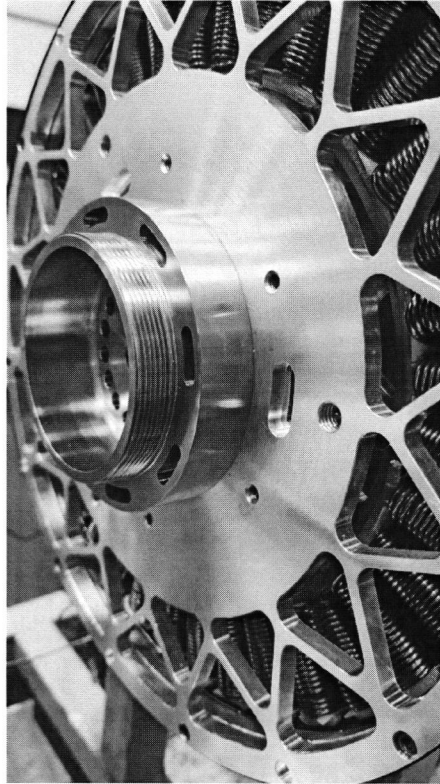
2.6.4. Yıldız noktası oluşturulması ve faz kablolarının dzenlenmesi

Motor faz çıkışları ve yıldız noktası oluşturulup sabitlenmiştir. şekil 16 da son görünümü verilmiştir.



şekil 16. Fazların yıldız bağlantısının yapılması

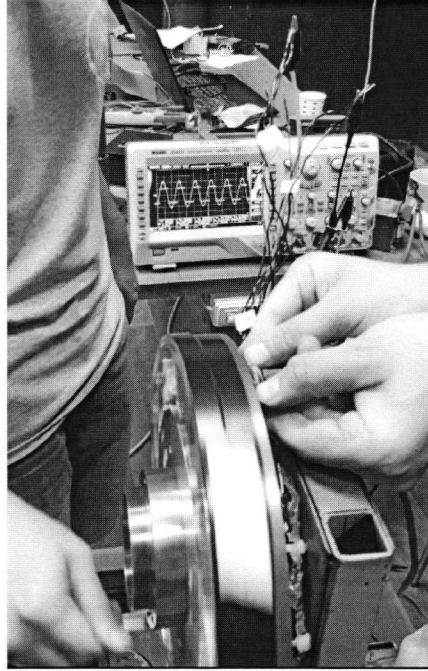
2.6.5. Motorun mekanik montajı



şekil 17. Motorun mekanik montajı yapılmış hali

2.6.6. Hall Sensörü Sabitlenmesi

Motorun kontrolü hall sensörleri ile yapılmaktadır. Hall sensörlerinin konumu aşağıdaki şekil 18 de görüldüğü üzere dijital osiloskop ile gerilimin tepe değeri noktalara göre ayarlanıp sıcak silikon ile sabitlenerek gerçekleştirilmiştir.

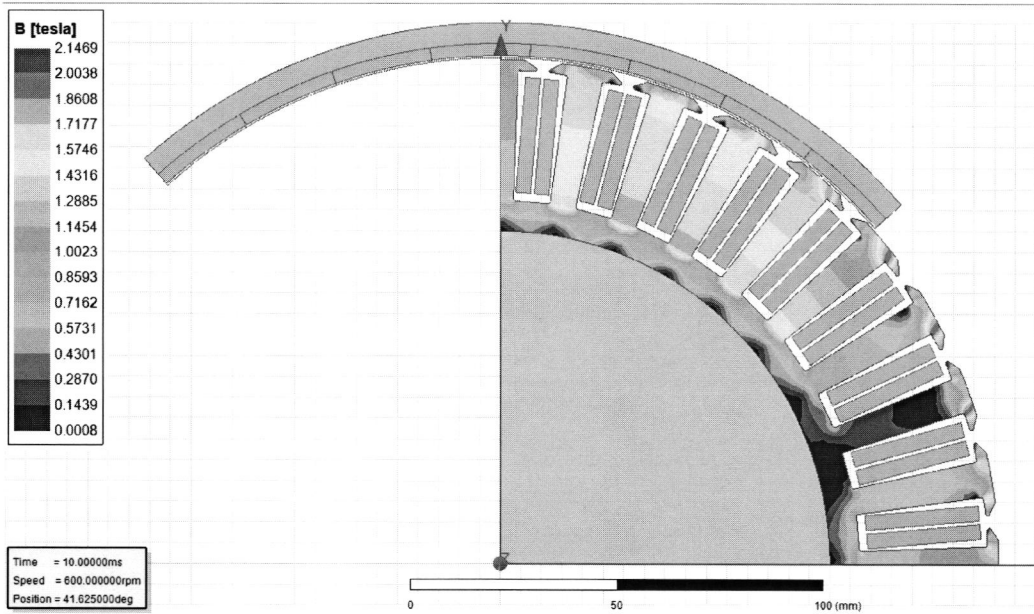


Şekil 18. Motorun hall sensörü kartının konumu belirlenmesi

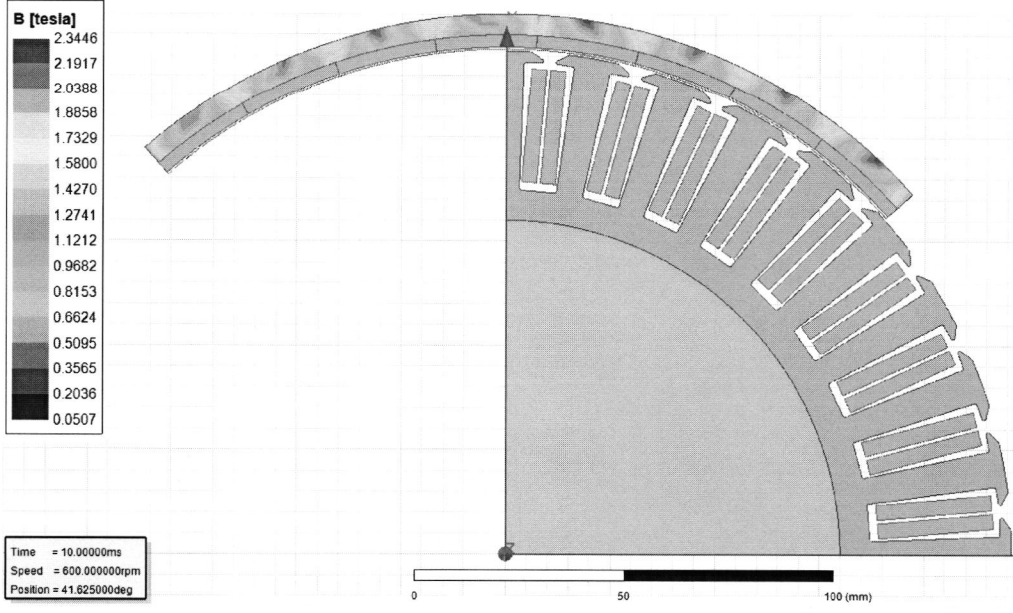
3. Sonuç:

3.1 Manyetik Analiz Sonuçları

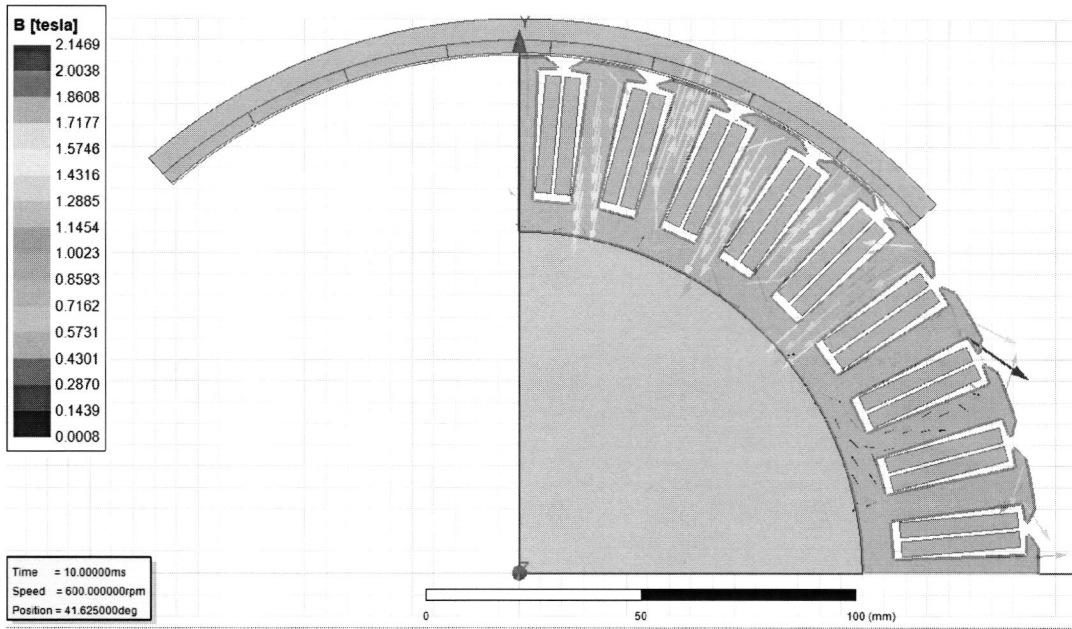
Manyetik analizler sonucunda kullanılacak malzemeler ve malzeme karakteristikleri belirlenmiştir. Tasarımlar, bu manyetik analizler sonucuna alınan bilgilere göre değerlendirilip tamamlanmıştır. Manyetik analizler şekil 19,20 ve 21 de verilmiştir.



Şekil 19. Stator nüvesi manyetik akı yoğunluğu manyetik analizi



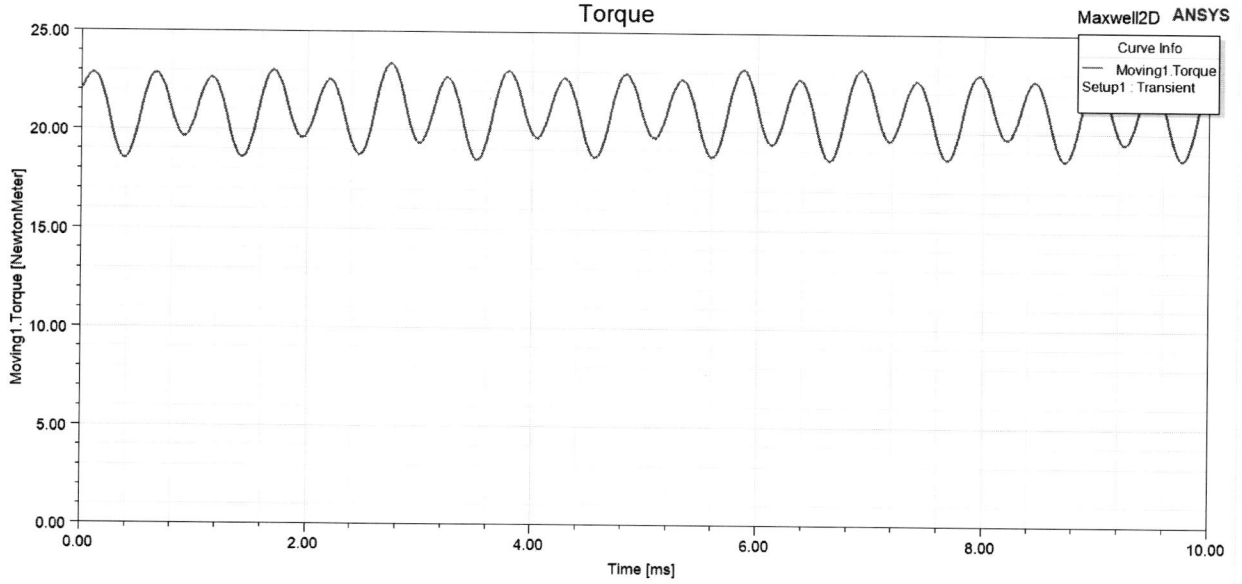
Şekil 20. Rotor çeliği akı yoğunluğu manyetik analizi



Şekil 21. Stator nüvesi manyetik akı yoğunluğu vektörleri manyetik analizi

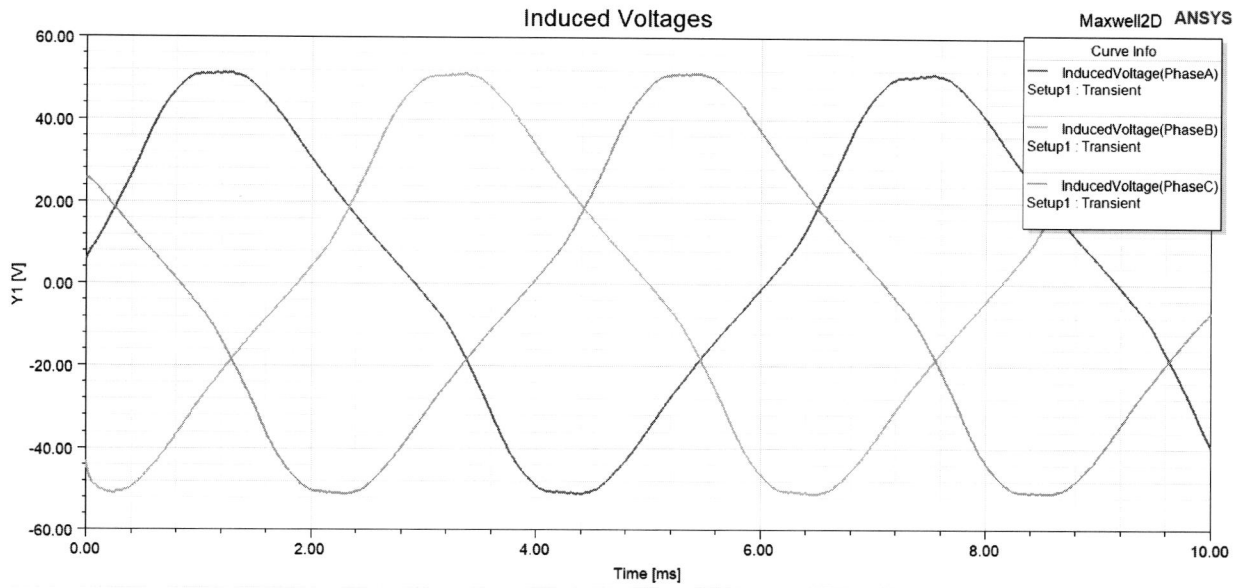
3.2. Performans Analizi Sonuçları

Performans analizleri ANSYS Maxwell 2D ortamında yapılmıştır. Motorun simülasyon ortamına 2 boyutlu şekilde çalıştırılması durumunda aşağıda verilen analiz çıktıları elde edilmiştir. Sırasıyla tork, indüklenen gerilim, dq akımları, dq eksenli akıları ve dq eksenli endüktans değerleri şekil22 ile şekil26 arasına verilmiştir.

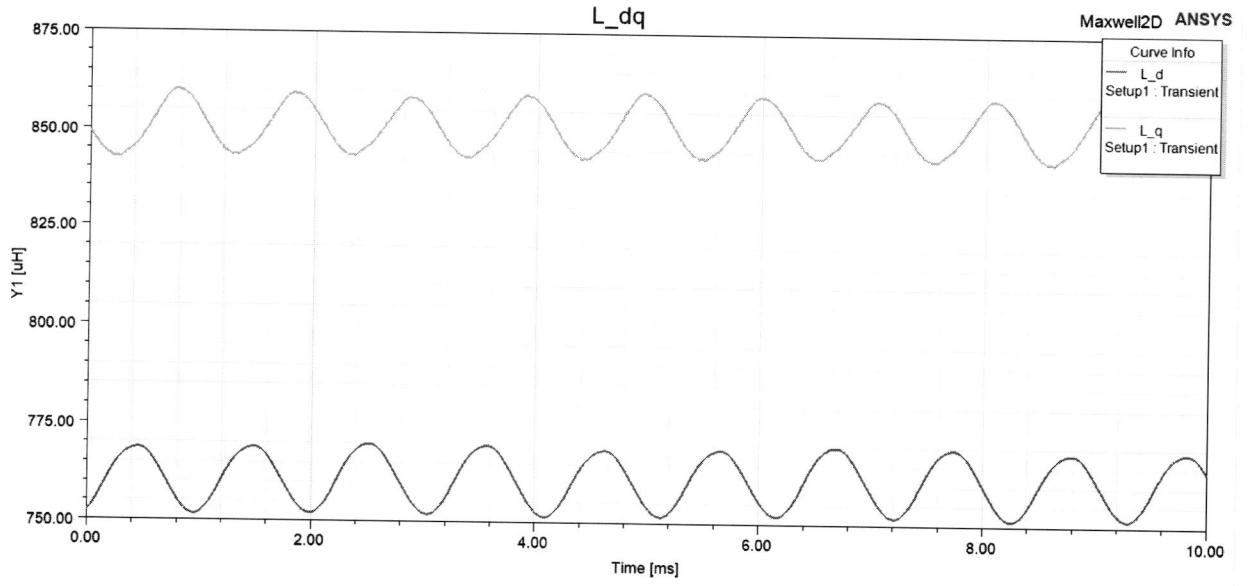


Şekil 22. Tork analizi

Motorun çıkış torku analizde görüldüğü üzere ortalama 20 Newton metre civarlarında dalgalanmaktadır. Dalgalanma miktarı +2-2 Newtonmetre olmaktadır. Dalgalanma miktarı yapılan mıknatıs ve stator oluk tasarımı ile minimuma indirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda motorun dalgalanması +5 -5 dalgalanmadan +2 -2 Newtonmetre dalgalanmaya indirilmiştir.

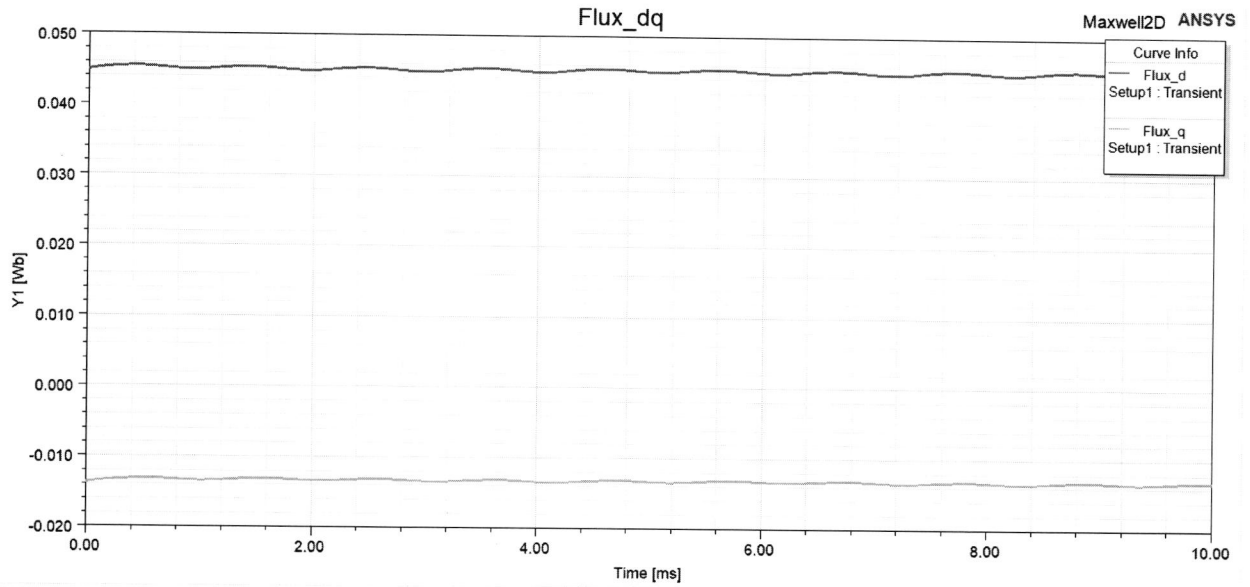


Şekil 23. İndüklenen gerilim analizi

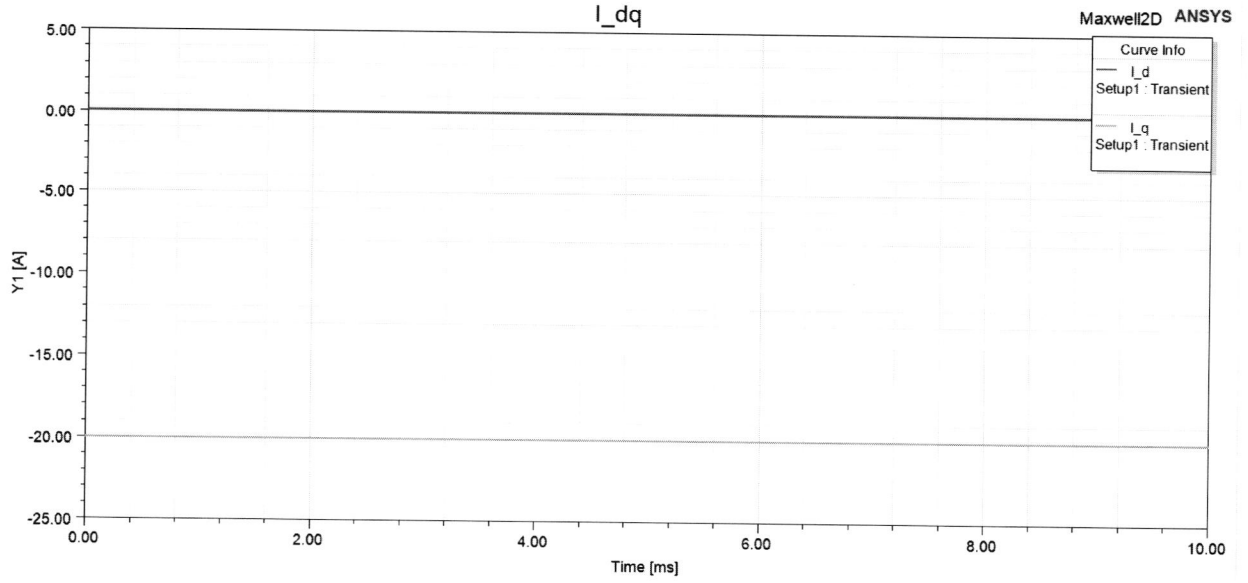


Şekil 24. L_dq endüktans analizi

Sabit mıknatıslı fırçasız DC senkron elektrik motoru tipi motorlarda sabit mıknatıs kullanılmasından kaynaklı D eksen ve Q eksen endüktanslarının birbirine çok yakın olduğu, hatta bazı durumlarda birbirlerine eşit olduğu literatür araştırmasında görülmüştür. Tasarlanan motorun D ve Q eksen endüktansları da oldukça birbirine değerler olduğu görülmektedir.



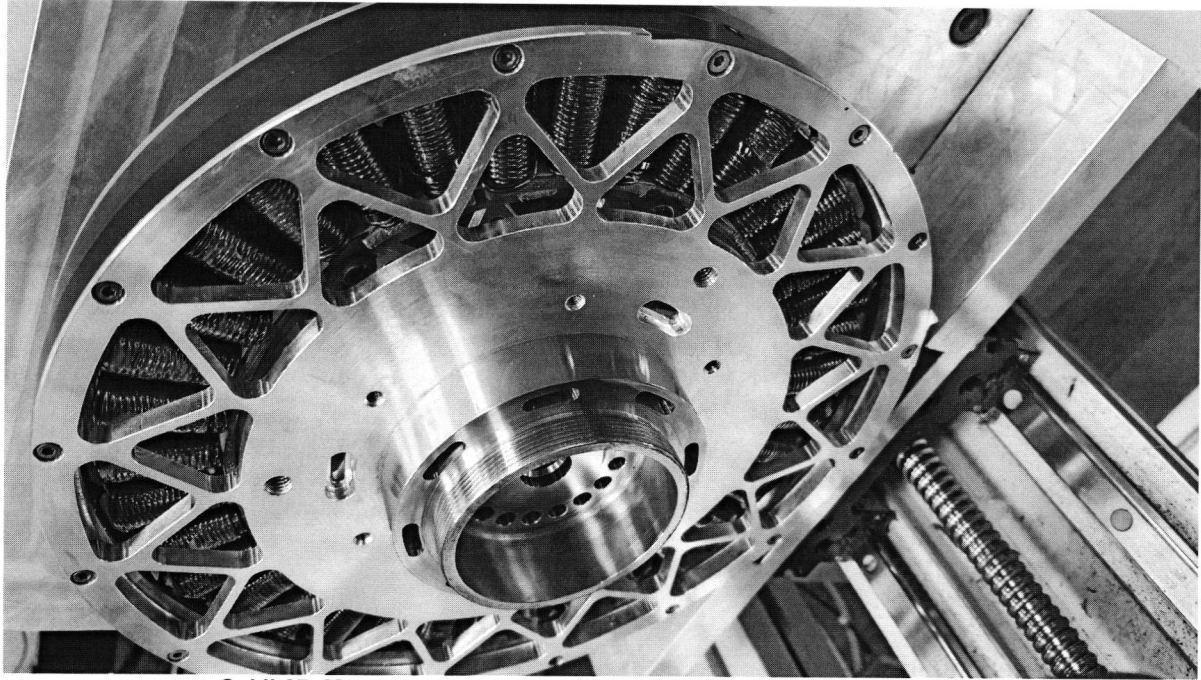
Şekil 25. Akı_dq manyetik akı analizi



Şekil 26. I_{dq} akım analizi

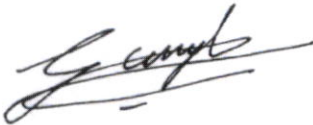
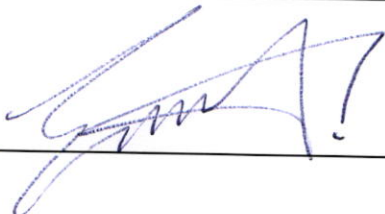
3.3 Test Standında Motorun Verim Testi

Motorun testi Alternatif Enerjili Sistemler Kulübü Laboratuvarındaki motor test standında yapılmıştır. Test standına bağlı duruma tasarlanıp üretilmiş motor Şekil 27 de görülmektedir. Motorun verim ölçümü için gerekli donanımlar bu laboratuvarında mevcuttur. Motorun torku test stanındaki tork sensörü üzerinden okunmuştur. Giriş ve çıkış gerilim-akım değerleri okunarak giriş ve çıkış güç değerleri elde edilip Microsoft Excel programında gerekli işlemler Şekil 28 de yapılmıştır.



Şekil 27. Motorun test standında mekanik montajı yapılmış son hali

Motorun test standında yük altında sabit 550 rpm de verim testi yapılmıştır. Motor test standı test verilerine göre motor 9.77 Nm ve 12.71Nm tork yük altında %92.5 verime kadar yükselen bir verime sahiptir. Böylece motorun tasarımının başarı ile tasarlandığı ve üretildiği test standı testleri sonucunda görülmüştür.

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI – SOYADI - İMZA	DANIŞMANIN ADI – SOYADI - İMZA
İrfan Güven ÇÖMEZOĞLU	Dr.Öğr.Üyesi Engin AYÇIÇEK
	

Tarih : 27.11.2020