



# Üniversal Motorun Yumuşak Manyetik Kompozit-Amorf ve M19 Malzemeleriyle Oluşturulmuş Nüve Formlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizi ile Performans Karşılaştırması

## Performance Comparison of Universal Motor Under Different Core Materials Soft Magnetic Composites-Amorphous and M19 Using with Finite Element Method Analysis

İsmail Topaloğlu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, 18100 Çankırı, TÜRKİYE

**Başvuru/Received:** 24/12/2020

**Kabul / Accepted:** 05/05/2021

**Çevrimiçi Basım / Published Online:** 18/06/2021

**Son Versiyon/Final Version:** 18/06/2021

**Öz**  
Üniversal motorlar geniş kullanım alanına hitap etmesi bakımından popüler olmasına karşın verimleri sınırlıdır. Son yıllarda malzeme biliminin gelişmesiyle birlikte elektrik makinalarının boyut ve performanslarında önemli değişimler olmuştur. Bu çalışmada üniversal motorun, stator nüve materyalinin YMK (yumuşak manyetik kompozit), amorf ve M19, rotor nüve materyalinin amorf, M19 ve YMK kullanılması durumunda motorda meydana gelen nüve kayıpları analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir. Üniversal motor için elektromanyetik tork değişimi, demir kaybı, bakır kaybı, verimi ve ağırlık değişimi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Stator nüve formlarının M19 ve rotor nüve formunun amorf olması durumunda maksimum verim ve minimum kaybın olduğu gözlemlenmiştir. M19 malzemelerinden oluşan konfigürasyonda ise amorf yapıya benzer performans değerleri elde edilmiştir. Böylece üniversal motorda kullanılacak en iyi nüve materyali belirlenmiştir.

### Anahtar Kelimeler

“Amorf, M19, YMK, üniversal motor, SEA”

### Abstract

Although efficiency is limited popular in terms of universal motors has wide range of applications. The size and performance of electrical equipment with the development of materials science in recent years have been significant changes. In this study, the universal motor, the stator core material SMC (soft magnetic composites), Amorphous and M19, the rotor core material is Amorphous, M19 and core losses occurring in the motor when using the SMC was determined by analytical and finite element method. For universal motor electromagnetic torque variation, iron loss, copper loss, efficiency and weight change were examined. If the stator core from M19 and rotor core form amorphous was observed that maximum efficiency and minimum loss occurs. In the configuration of M19 material was obtained similar performance value with amorphous structure. Thus it was determined the best core material can be used in universal motor.

### Key Words

“Amorf, M19, SMC, Universal motor, FEA”

## 1. Giriş

Elektrik makineleri bilindiği gibi elektrik enerjisini mekanik enerjiye(motor) veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine (jeneratör) dönüştüren makineler olduğundan dolayı elektrik kayıplarına ek olarak mekanik kayıplarda söz konusudur. Bu enerji dönüşümlerinin en az enerji kaybı ile gerçekleşmesi istenir. Bu sebepten dolayı elektrik makina tasarımlarının maksimum verim değerlerini verecek şekilde yapılması gerekir. Bu makinelerin çalışma prensipleri yıllardır değişmemesine rağmen kullanılan materyallerin değişimiyle performanslarında önemli ölçüde değişiklikler olmuştur.

Demir alaşımlı nüve materyalinin (Amorf, nanocastline) gelişmesi; büyük güçte küçük ebatlı elektrik makinelerin tasarımı ve uygulamalarını artırmıştır. Amorf materyali motor ve transformatör uygulamalarında %70 oranında kayıplarda azalış göstermektedir. Önceki yapılan çalışmalarda Johnson ve Bailey (2020) yaptıkları çalışmada amorf malzemenin motor ve transformatörlerde kayıplarını incelemişlerdir. Mischler (2018), 60Hz frekansta Amorf nüveli ve M22 silisli saç malzemeli iki asenkron motoru kayıplar açısından incelemiştir, Jianwei ve Ting (2010), yapmış oldukları çalışmada klasik ve Amorf nüveli asenkron motoru 50-60-100 Hz frekanslardaki çalışmalarını Ansoft-Maxwell kullanarak kayıplar açısından değerlendirmiştir. 7.5 KW'lık M19 ve Amorf nüve materyali üç fazlı asenkron motorun v/f kontrolü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak performansını incelenmiştir. Makinanın toplam ağırlığında %10 küçülme çalışma frekansı arttıkça amorf nüveli asenkron motorun daha iyi performans gösterdiğini bulmuştur. Dams ve Komez (2014), amorf nüveli asenkron motorun uygulamasını gerçekleştirmişler frekans attıkça kayıplarının azaldığını göstermişlerdir.

Bir fazlı transformatörlerde amorf nüvenin kullanılması klasik çelik nüveli transformatörlere nazaran daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, şebeke frekanslı ve orta frekanslı dağıtım trafolarında amorf nüvenin kullanılması tanecikleri yönlendirilmiş çelik nüveli trafolarla nazaran çok daha avantajlıdır. Bir fazlı trafolarında ortalama %62,1, üç fazlı trafolarında ise ortalama 67.6 demir kayıplarını azaltmaktadır. 60 Hz frekanslı transformatör uygulamasında, manyetik akı yoğunluğu 1.3 Tesla üzerinde amorf nüveler M3 çeliklere nazaran işitilebilir ses seviyesi yüksektir.

Amorf nüve malzemesinin kullanımı balastlarda %10 kadar kayıpları önemli ölçüde azaltacaktır. Alternatif akım ateşleme bobini sistemlerinde kullanımını artıracaktır. Yüksek hızlı motor-jeneratör uygulamalarında amorf materyali kullanımı uygundur. Wang (2011) rotor ferrit mıknatıslı, stator amorf nüveli eksenel akılı motor tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda verim %90 ve motor boyutunu önemli ölçüde küçültmüşlerdir.

Geleneksel makineler ile karşılaştırıldığında Amorf makineler, boyutlarının küçülmesi, yüksek frekanslarda çalışması, verim ve güç faktörlerinde iyileşme gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca nüve materyalinin pahalı olması ve radyal yapılı motor/jeneratör geometrilerinin üretiminde kullanılması karmaşıktır. Bu nedenle daha çok transformatör uygulamalarında kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki elektrik makinelerinin 1-20 KHz uygulamalarında diğer yumuşak manyetik malzemelere nazaran kayıpları büyük oranda azaltmaktadır. Ayrıca, yüksek frekanslardaki kayıplarının az olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş) üretim alanlarında yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Fiyatlarının diğer malzemelere nazaran daha pahalı olması iyileştirilebilir bilinirse bu malzemeye olan talebi arttırması beklenmektedir.

Zhou ve ark. (1999) Ansoft Maxwell programı kullanarak manyetik alan- devre ve hareket eşitlikleri birleştirerek üniversal motorun dinamik benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Kim, Jack ve Cros ve ark.,(2000-2006) yeni yapılı üniversal motorların statorlarında SMC malzemenin kullanılması ile klasik silisli saçlı motorlara nazaran daha avantajlı (bobin tasarrufu, eksenel uzunluğu azaltması) olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada üniversal motorun verimlerini arttırmaya yönelik düşük kayıplı nüve materyali (Amorf) kullanılmıştır. M19, YMK ve Amorf nüveli makine, kayıplar açısından incelenmiştir. Ayrıca bu makinelerin genel dinamik parametreleri değerlendirilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Amorf (metalik camlı) alaşımlar, sıvı haldeki metallerin ani olarak soğutulmasıyla normal kristallerin sahip olduğu atomik düzenin ve kristal yapının kaybolmasından meydana gelirler. Amorf alaşımlı nüveler 1960lı yıllardan günümüze kadar bilinmesine karşın fiyatlarının yüksek olması nedeniyle kullanım alanları sınırlı kalmıştır. Düşük kayıplı ve yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip yeni amorf metallerine yönelik deneysel çalışmalar devam etmektedir.

Amorf metali %92 Fe, %5Si ve %3B içeren bir alaşımdır. Silisyum çelik malzemeler ise %97 Fe ve %3 Si dan oluşan bir alaşımdır. Bilindiği gibi malzemelerde demir alaşım oranının artması yüksek manyetik akı yoğunluğuna, silisyum oranının artması nüve direncinin ve kırılabilirliğinin artmasına neden olmaktadır. Amorf malzemeler silisyum çelik malzemelere nazaran yaklaşık on kat daha incedir. Ayrıca, düşük paketleme faktörüne ve yüksek gerilim-gerilme değerine sahiptir. YMK malzemeler silisli çelik malzemelere nazaran düşük geçirgenlik ve akı yoğunluğuna sahiptir. YMK nüve yapısı ile kullanılması imalat kolaylığı sağlaması ve düzgün ısı dağılımı için önemlidir. Nüve malzemesinin özelliğini belirleyen parametreler; manyetik geçirgenlik, doyum noktası, kalıcı mıknatıslık, elektriksel direnç ve koersivitesi şeklinde sıralanabilir. Bu çalışmada kullanılan M19, Amorf, Samaloy 700 1P nüve materyalinin özellikleri **Tablo 1**'de verilmiştir:

**Tablo 1.** Amorf, YMK ve M19 malzeme özellikleri

| Malzeme Özellikleri | Birim         | Amorf            | M19        | YMK (Somaloy 700 1P) |          |
|---------------------|---------------|------------------|------------|----------------------|----------|
| Özgül ağırlık       | $kg / m^3$    | 7180             | 7650       | 7450                 |          |
| Özgül direnç        | $\mu\Omega m$ | 1,30             | 0,52       | 400                  |          |
| Doyma indüksiyonu   | T             | 1,56             | 1,8        | 1,56-(10000 A/m)     |          |
| Nüve kayıp          | $k_h$         | 125,167          | 164,2      | 682,565              |          |
| Katsayıları         | $k_c$         | W/m <sup>3</sup> | 0,00235968 | 1,41304              | 0,255412 |
|                     | $k_e$         |                  | 0,534436   | 1,79322              | 4,17571  |
| Kalınlık            | mm            | 0,023            | 0,23       | Katı                 |          |

Buradaki nüve kayıp katsayıları üretici firmaların vermiş olduğu çeşitli frekanslardaki (B-P) grafiğinden elde edilmiştir.

### 3. Üniversal Motorun Analiz Eşitlikleri

Universal motor performansı frekans domeninde analiz edilecek olursa motor gerilim denklemi eşitlik 1 deki gibi ifade edilebilir:

$$U = ZI = (R_a + R_f + R_b)I + j\omega(L_a + L_f + 2M_{af})I + \omega_e(G_{aa} + G_{af})I \quad (1)$$

burada,  $R_a$ ,  $R_f$ , ve  $R_b$  sırasıyla armatür direnci, alan sargısı direnci ve fırça temas direncidir.  $L_a$ ,  $L_f$ , ve  $M_{af}$  sırasıyla armatür öz indüktansı, alan sargısı öz indüktansı, ve ortak indüktanstır. Lineerleştirilmiş nonlinear parametreler olan  $G_{aa}$  ve  $G_{af}$  sırasıyla armatür alan sargılarından indüklenen gerilim hareket katsayısı ve alan sargısı akımlarıdır. Ayrıca diğer Lineerleştirilmiş nonlinear parametreler olan  $\omega$  radyan frekans ve  $\omega_e$  rotor hızıdır rad/s.  $Z$  eşdeğer giriş empedansı. Fırça eksenini q-ekseni ile aynı hizada olduğunda eşitlik 2 durumu oluşur.

$$M_{af} = G_{aa} = 0 \quad (2)$$

Verilen rotor hızı  $\omega_e$ , armatür akımı uygulanan gerilime bağlı olarak hesaplanabilir, eşitlik 3 de bu durum verilmiştir;

$$I = \frac{U}{Z} \quad (3)$$

Sinüzoidal akı altında nüvede oluşan kayıplar Eşitlik 4’de verilmiştir:

$$P_v = P_h + P_c + P_e + P_a \quad (4)$$

$P_h$  histerezis kayıpları,  $P_c$  girdap kayıpları,  $P_e$  ilave girdap kayıpları olarak ifade edilir. Bu kayıplar Eşitlik 5, 6 ve 7’de görülebilir;

$$P_h = k_h f B_m^2 \quad (5)$$

$$P_c = k_c (f B_m)^2 \quad (6)$$

$$P_e = k_e (f B_m)^{1,5} \quad (7)$$

Anormal kayıplar  $P_a$  olarak ifade edilmektedir. Bu kayıplar Williams ve ark. tarafından “*materyal üzerindeki geçirgenliğin homojen dağılmaması*”, olarak ifade edilmiştir. Bu kayıpları domain duvar hareketinde; problemler veya girdap kayıplarının gerçekleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Bu kayıplar uygulamada meydana gelen anormal kayıp olduğu için bu çalışmada ihmal edilmiştir.

Nüve kayıpları genel olarak;

$$P_v = k_h f B_m^2 + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1.5} \quad (8)$$

Eşitlik 8'de  $k_h$ , histerezis kayıp katsayısı,  $k_c$ , girdap akımları kayıp katsayısı,  $k_e$  ilave girdap nüve kayıp katsayısıdır.

Nüve malzemesine ait kayıp katsayıları verilen B-P grafiğinden bulunabilir. Nüve malzemesi üreten firmalar genellikle frekansa bağlı olarak kayıp eğrisini vermektedir.  $f$  test edilen frekans olmak üzere, birden fazla frekans değerlerine ait B-P grafiğinden yararlanılırsa, kaybedilen gücü hesaplamak için gerekli olan nüve katsayıları yapısı kare formda yine minimize edilerek hesaplanmaktadır. Ayrıca her bir orijinal P-B eğrisine eğri uydurularak yakınsanmakta ve hata ölçütü (err) minimize ederek çalışma frekansındaki katsayıları uygun değer hesaplanmaktadır:

$$err(k_h, k_c, k_e) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \left[ P_{vij} - (k_h f_i B_{mij}^2 + k_c f_i^2 B_{mij}^2 + k_e f_i^{1.5} B_{mij}^{1.5}) \right]^2 = \min \quad (9)$$

$m$  kayıp eğri sayısı,  $n_i$   $i$ 'nci kayıp eğrisindeki nokta sayısı olarak verilir.

Üniversal motorun verimi çıkış gücün giriş güce oranı şeklinde bulunur (Eşitlik 12). Verimi etkileyen temel faktörler kayıplardır. Burada, Eşitlik 11 ve 12'de  $P_{out}$  çıkış gücü,  $P_{in}$  giriş gücü,  $P_{cu}$  rotor ve statorda meydana gelen bakır kaybı toplamı,  $P_{fe}$  stator ve rotorda meydana gelen demir kayıpları toplamı (girdap ve histerezis),  $P_{wfr}$  sürtünme ve rüzgâr kayıpları toplamı,  $P_{wfr}$  referans sürtünme kayıp,  $n_{reference}$  referans hız,  $n_{rated}$  anma hızı  $P_{brush}$  fırçada meydana gelen kayıpların toplamı olarak verilmiştir. Giriş gücü direkt olarak akım ve gerilimden hesaplanabilir (Eşitlik 10).

$$P_{in} = UI \cos \phi \quad (10)$$

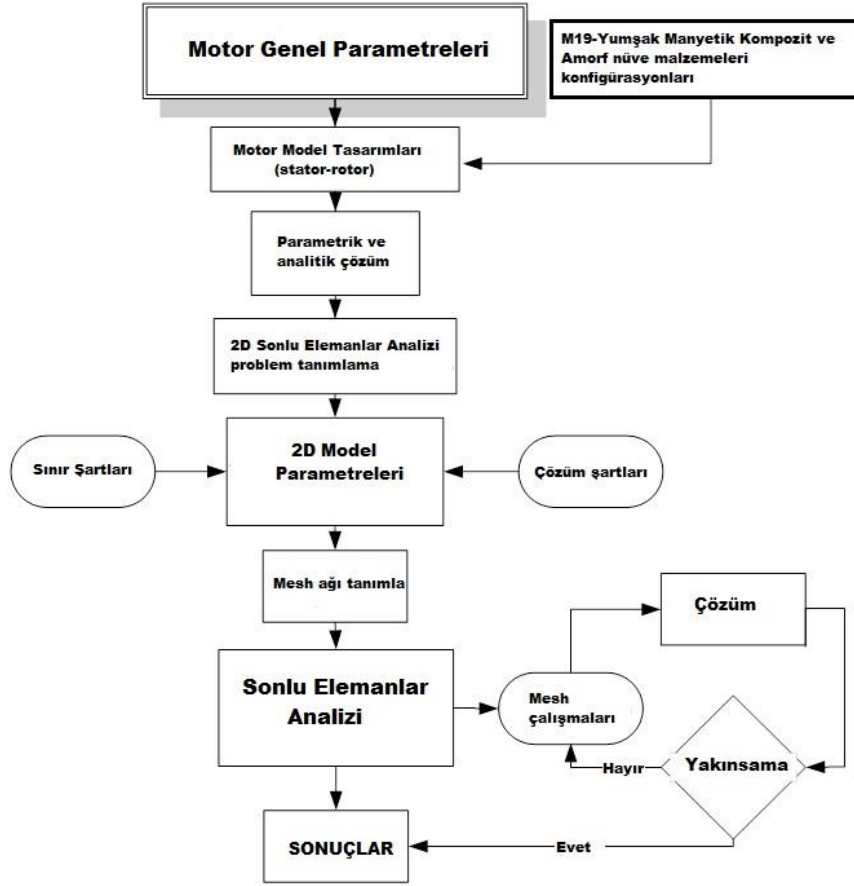
$$P_{wf} = P_{wfr} \frac{n_{reference}}{n_{rated}} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{cu} - P_{fe} - P_{wfr} - P_{brush}}{P_{in}} \quad (12)$$

#### 4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

Ansys Maxwell, dinamik (zamanla değişen) ve statik durum analizi ile ilgili elektrik problemlerinin elektromanyetik analizini yapmak için tasarımcılar tarafından kullanılan 2 ve 3 boyutlu (2D/3D) sonlu elemanlar analizi yazılımıdır.

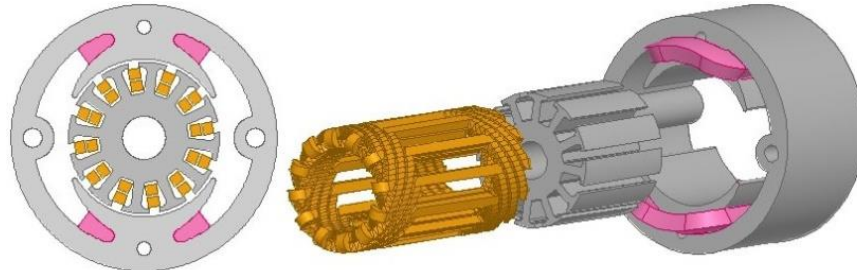
Modellemeye bakış açısından, elektrik makineleri temelde 3 boyutlu bir geometriye sahiptir. Rmxprt modülünde (Bir/üç fazlı asenkron motor/jeneratör, senkron motor/jeneratör, sürekli mıknatıslı motor/jeneratör, pençe tipi alternatör, anahtarlamalı relüktans motor, hat başlamalı sürekli mıknatıslı senkron motor, fırçasız da motor, da motor, üniversal motor, eksenel akılı motor/jeneratör) tasarlanan asenkron motor ve radyal akılı jeneratör, iki nüve materyali (M19, Amorf ve SMC) için analitik çözümler gerçekleştirilir ve sonlu eleman çözümleri için model parametreleri hazır hale gelir. Rmxprt'de hesaplanan çözümler analitiktir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kayıplar karşılaştırılmıştır. **Şekil 1**'de görüldüğü gibi model parametreleri olarak; sınır şartları, bobinden geçen akım değeri veya dış devreden çalışma şartları (Maxwell Circuit Editor) aktarılır. Böylece tasarlanan sistem analize hazır hale getirilir. Mesh tanımlama, program algoritmasında küçük gibi görünse de makinanın yeterli çözüm vermesi için çok önemlidir. Analiz algoritmasına göre öncelikle modellenecek sistem üçgen şeklinde elemanlara bölünür ve sonlu elemanlara ağı oluşturulur. Çözüm sürecinde iterasyonlarla ağlar iyileştirilerek hata azaltılır. İki boyutlu sonlu eleman ağlarla geçici hal analizleri gerçekleştirilir.



Şekil 1. SEY Analiz Diyagramı

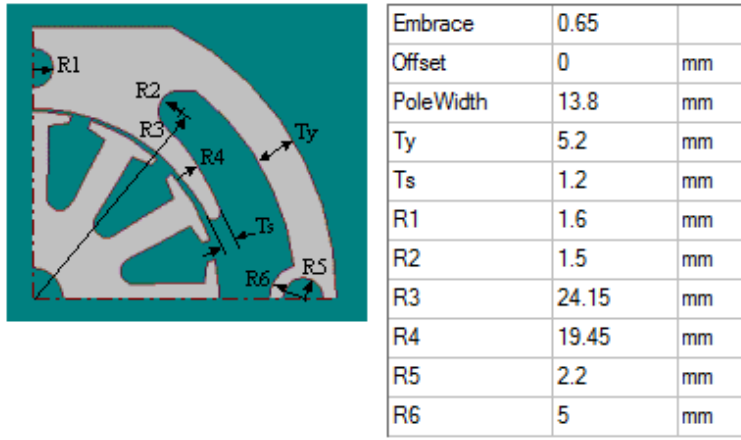
Tablo 2. Makinaların genel parametreleri

| Motor Parametreleri    |       | Stator Parametreleri       |        | Rotor Parametreleri           |        |
|------------------------|-------|----------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| Çıkış Gücü (kW)        | 0,1   | Dış çap (mm)               | 61,7   | Rotor oluk sayısı             | 12     |
| Gerilim (V)            | 120   | Stator uzunluğu (mm)       | 33,35  | Rotor dış çapı (mm)           | 35     |
| Frekans (Hz)           | 50    | Kutup genişliği (mm)       | 13,8   | Rotor iç çapı (mm)            | 10     |
| Kutup Sayısı           | 2     | Kutup başına bobin dönüşü  | 145    | Tek Alan sargısı              | 47     |
| Hız (rpm)              | 12400 | Alan sargısı direnci (ohm) | 3,6161 | Armatür sargısı direnci (ohm) | 3,9244 |
| Sürtünme kayıpları (W) | 10    | Kaçak endüktans (mH)       | 15,453 | Armatür kaçak endüktans(mH)   | 4,4833 |
| Çalışma Sıcaklığı      | 75    | Öz-endüktans (mH)          | 97,447 | Armatür öz-endüktans (mH)     | 18,488 |



(a)

Şekil 2. (a) Üniversal motor 2D/3D görünümü, (b) Stator-Rotor geometrik parametre değerleri



(b)

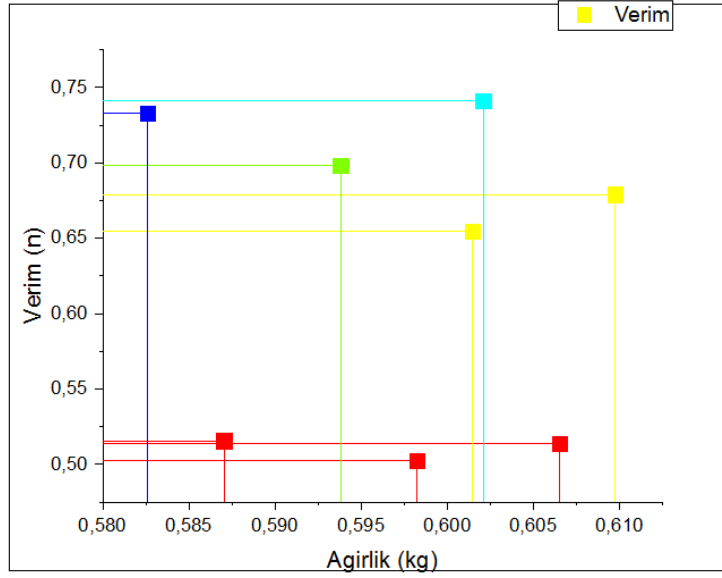
**Şekil 2 (devam).** (a) Üniversal motor 2D/3D görünümü, (b) Stator-Rotor geometrik parametre değerleri

Şekil ikideki başlangıç tasarımından motor geometrik verileri elde edilmiştir. Sonrasında bu değerler Ansoft Rmxprt ile derlenerek motor genel boyut bilgileri elde edilmiştir. **Şekil 2** a'da tasarlanan motorun iki ve üç boyutlu görüntüleri verilmiştir. Şekilde rotor sargıları, rotor, alan sargıları ve stator ayrı ayrı gösterilmiştir. Bindirme (Lap) sargısı için çarpım sayısı bir sarımın başından sonuna aradaki komütatör sayısına eşittir. Paralel kol sayısı da sargı çarpım sayısı ile kutup sayısının çarpımından elde edilir. Bu tasarımda çarpım sayısı bir ve paralel kol sayısı ikidir.

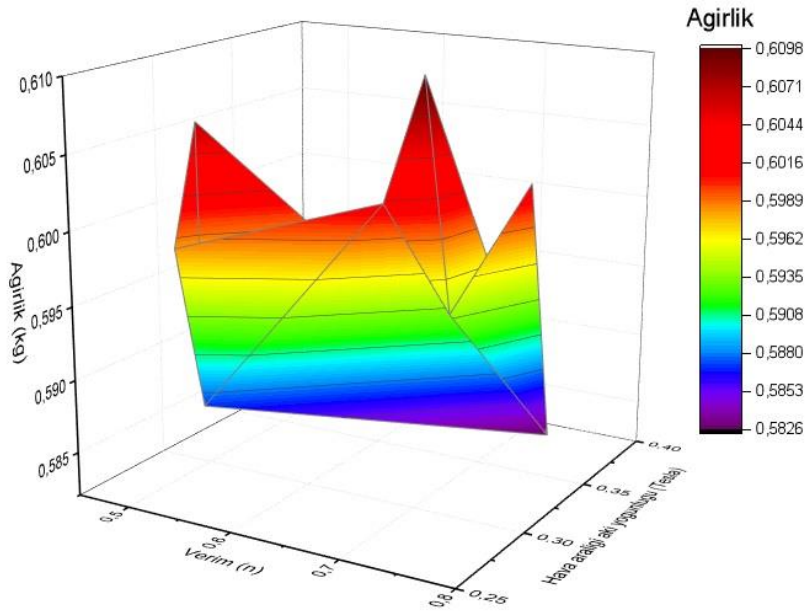
**Tablo 3.** Stator-Rotor yapısına göre üniversal motorun ağırlık, verim, hız, tork, hava aralığı akı yoğunluğu açısından karşılaştırılmaları

| Stator Malzeme                 | M19-      | M19-      | M19-     | YMK -     | YMK -     | YMK -     | Amorf-    | Amorf-    | Amorf-   |
|--------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Rotor Malzeme                  | M19       | YMK       | Amorf    | YMK       | M19       | Amorf     | Amorf     | YMK       | M19      |
| Toplam ağırlık (kg)            | 0,609756  | 0,60649   | 0,60208  | 0,59821   | 0,601476  | 0,5938    | 0,582622  | 0,587032  | 0,590298 |
| Verim (%)                      | 67,9089   | 51,3482   | 74,1125  | 50,279    | 65,484    | 69,8271   | 73,3163   | 51,5707   | 67,5182  |
| Hız (rpm)                      | 18604,5   | 20486,3   | 16809,8  | 20643,3   | 18727,8   | 17819,4   | 15556,6   | 20523,4   | 18396,9  |
| Tork (N.m)                     | 0,0510923 | 0,0465162 | 0,056619 | 0,0462153 | 0,0509159 | 0,0534935 | 0,0613341 | 0,0464659 | 0,051763 |
| Hava aralığı akı yoğunluğu (T) | 0,322146  | 0,286824  | 0,353463 | 0,279382  | 0,312114  | 0,327117  | 0,380687  | 0,287703  | 0,326646 |

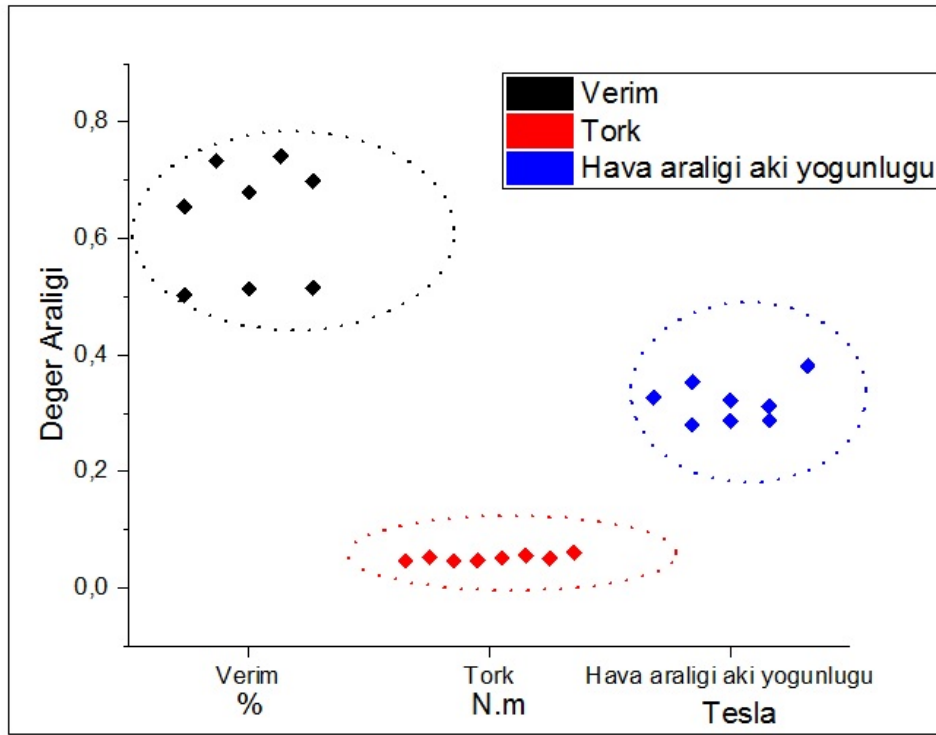
**Tablo 3'**de görüldüğü gibi stator ve rotor materyalinin değişimine göre üniversal motorların ağırlık, verim ve tork açısından değerleri değişmektedir. Analitik olarak incelendiğinde m1 maksimum verim noktaları olmak üzere hız-verim grafiği (**Şekil 6**), hız-tork grafiği (**Şekil 7**) ve alan sargısından geçen akım (**Şekil 8**) ile verilmiştir. **Tablo 3** ve **Şekil 6-8** incelendiğinde en iyi stator ve rotor materyali M19-Amorf, YMK-Amorf ve Amorf- Amorf olarak belirlenmiştir. Hava aralığı akı yoğunluğuna bakarak yorumlayacak olursak stator ve rotorun amorf nüve formu ile en iyi değer elde **Tablo 3'**de görülmektedir. Bu tasarımın handikabı materyalin maliyetidir. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olan amorf tabanlı çelik malzeme YMK ve M19'a göre ekonomik olarak öne çıkmamaktadır.



Şekil 3. Üniversal motor sırasıyla (Stator Malzeme M19-M19-M19-YMK-YMK-YMK -Amorf-Amorf-Amorf/Rotor Malzeme M19-YMK-Amorf-YMK-M19-Amorf-Amorf-YMK-M19) nüve formları için verim-ağırlık değişim grafiği

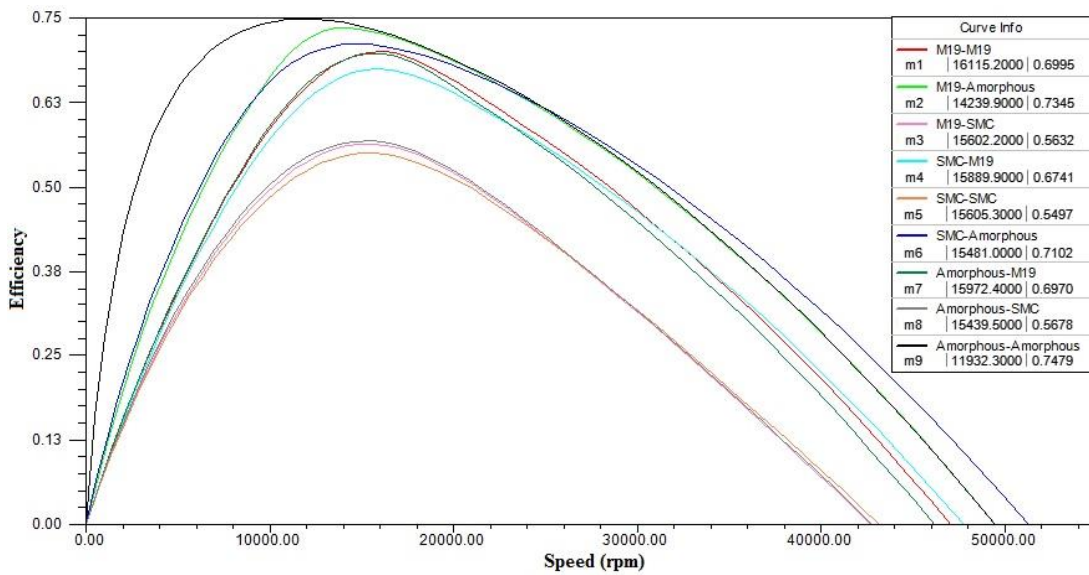


Şekil 4. Üniversal motor sırasıyla (Stator Malzeme M19-M19-M19-YMK-YMK-YMK -Amorf-Amorf-Amorf/Rotor Malzeme M19-YMK-Amorf-YMK-M19-Amorf-Amorf-YMK-M19) nüve formları için verim-ağırlık ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değişim grafiği



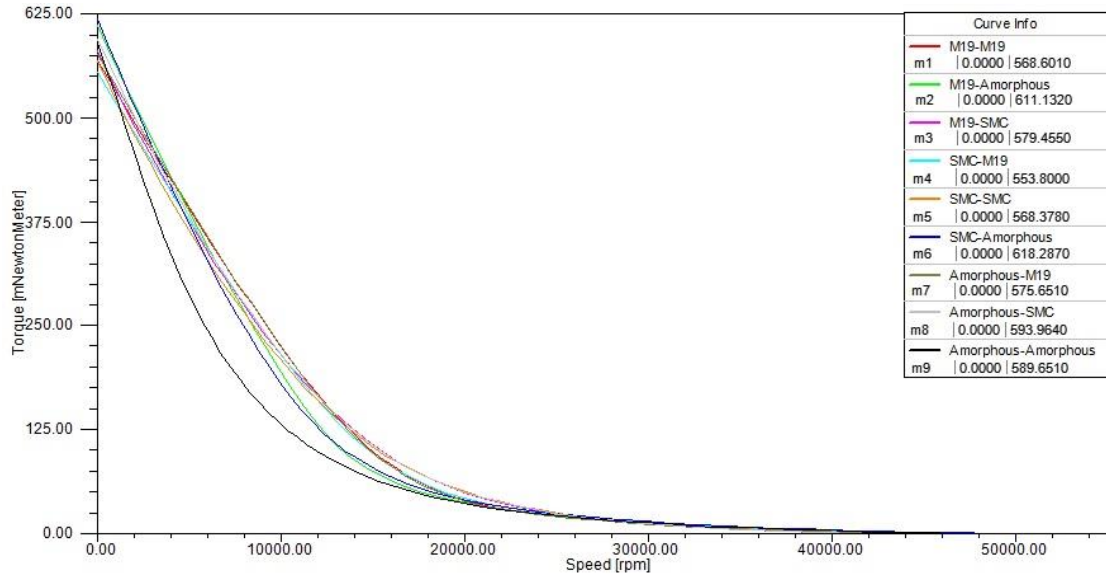
**Şekil 5.** Üiversal motor sırasıyla (Stator Malzeme M19-M19-M19-YMK-YMK-YMK -Amorf-Amorf-Amorf/Rotor Malzeme M19-YMK-Amorf-YMK-M19-Amorf-Amorf-YMK-M19) nüve formları için verim-tork ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değer aralığı grafiği.

Şekil 3’de görüldüğü üzere stator ve rotor nüvesi farklı materyal formları için yapılan analizlerde hali hazırda kullanılan üiversal motorlar için M19/Amorf konfigürasyonu uygulanması durumunda verim artışı sağlanabilmektedir. Şekil 4’de ise görüldüğü üzere hava aralığı manyetik akı yoğunluğu stator-rotor konfigürasyonun amorf/amorf olduğu durumda en büyük değere ulaşmış ve motor ağırlığı minimuma gelmiştir. Diğer M19 (yönlendirilmemiş silisli çelik) konfigürasyonlarda ise motor ağırlığı arttığı gibi verim değeri de düşmüştür. Şekil 5’de ise verim, tork ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerlerinin her bir konfigürasyonda aldığı değer belirlenmiş ve çözüm aralığı gösterilmiştir.

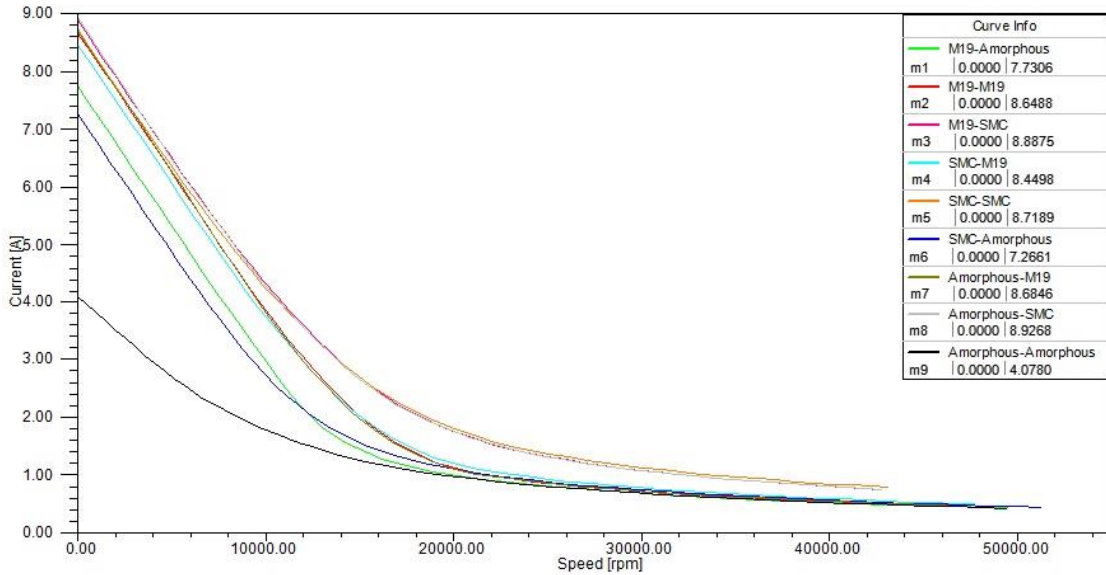


**Şekil 6.** Stator-Rotor farklı nüveli üiversal motorun verim-hız değişimi (burada m1 M19-M19 için maksimum verim noktası)



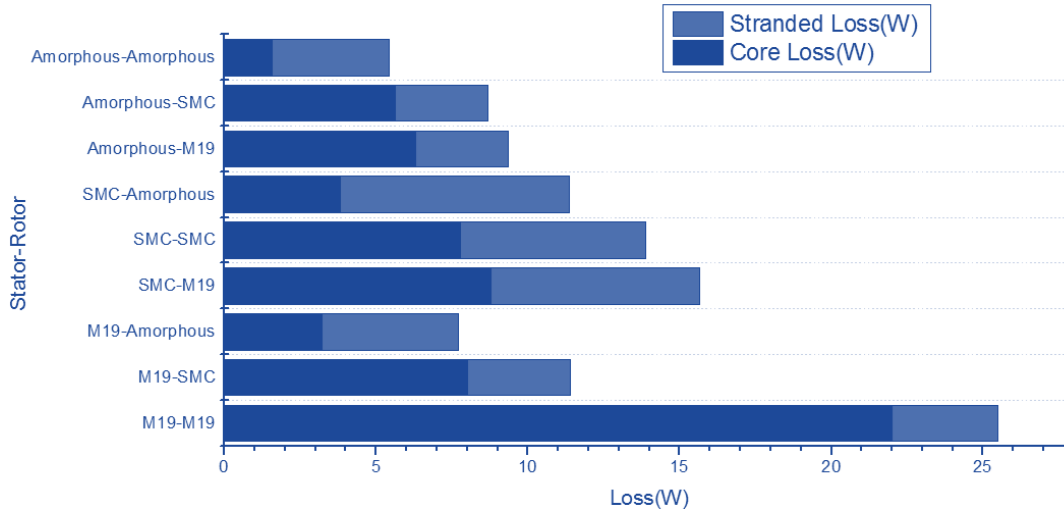


Şekil 7. Stator-Rotor farklı nüveli üniversal motorun tork-hız değişimi (burada m1 M19-M19 için maksimum tork noktası)



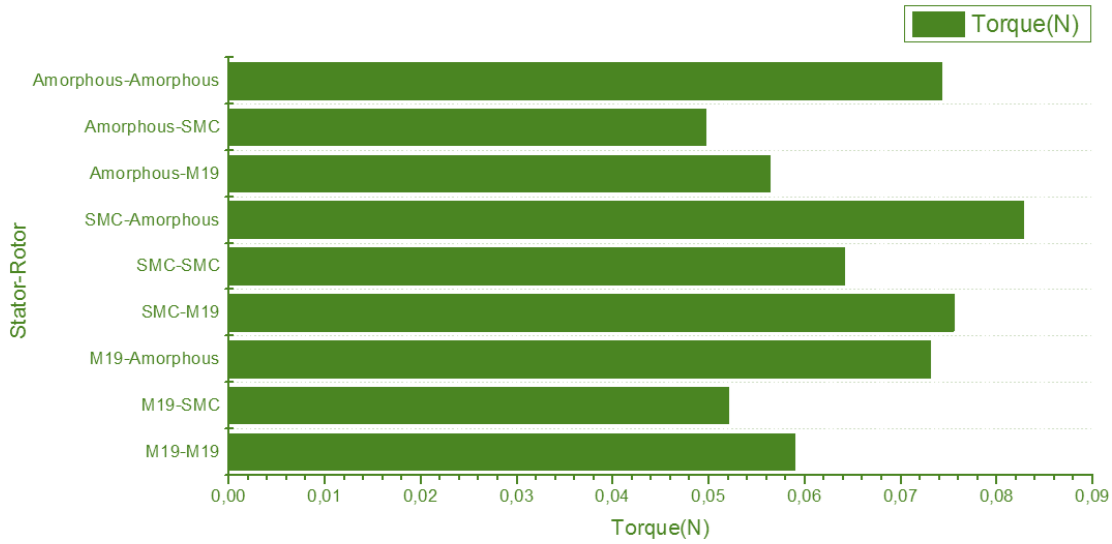
Şekil 8. Stator-Rotor farklı nüveli üniversal motorun akım-hız değişimi (burada m1 M19-Amorf için maksimum akım noktası)

Doyum noktası kırılma noktasından yüksek veya aşağı olmamalıdır. Eğer akı değerleri bu doyum aralığında fazla ise, elde edilen enerji ısı ve yüksek kayıplar olarak gidecek bu durumda tasarlanan makine verimli olmayacaktır. Aynı zamanda doyum bölgesinin çok altında ise akı değerleri bu sefer makine büyük hacimli ve küçük çıkış gücü üretecektir. Bu malzemeler için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir ve doyma indüksiyon değerine ulaşılmıştır. Simülasyonlarda elde edilen değerler yük altında elde edilmiş ve doyma noktalarına çalışma esnasında makine ulaşmamıştır.



Şekil 9. Stator-Rotor farklı nüveli universal motorun demir ve bakır kaybı değişimi

Şekil 6'da stator ve rotoru klasik nüveli (M19-M19) yapı ile karşılaştırıldığında kayıplarda M19-Amorfa göre %48,8, SMC-Amorfa %21 ve Amorfa-Amorfa %63,9 göre azalma olmuştur.



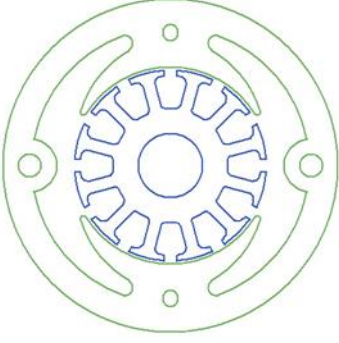
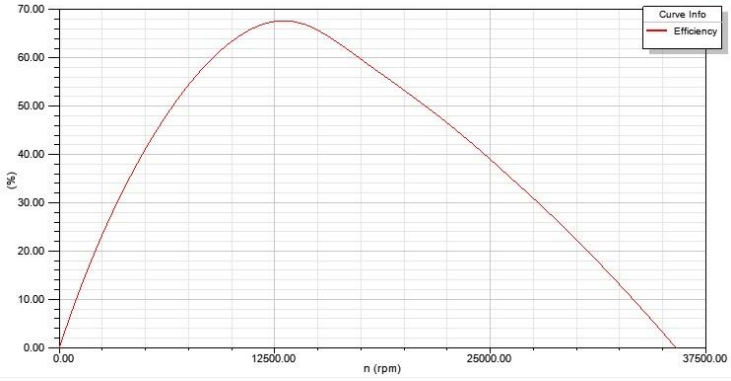
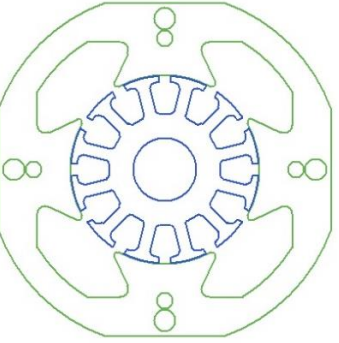
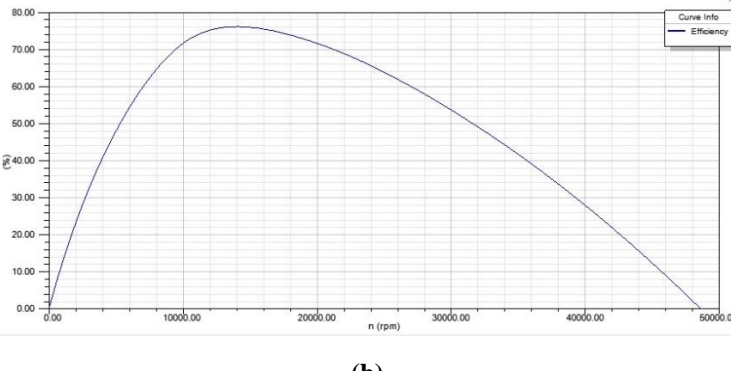
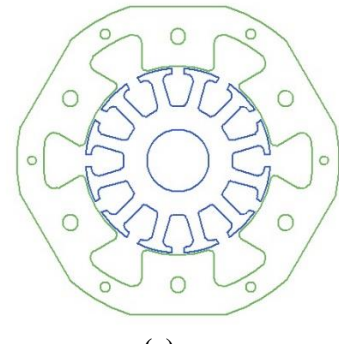
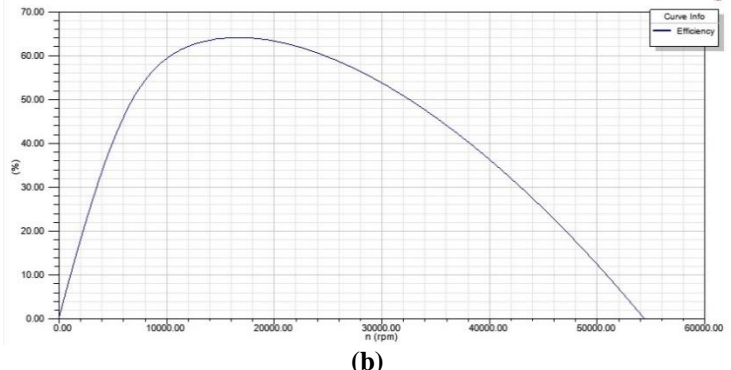
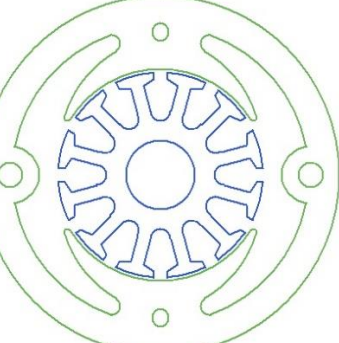
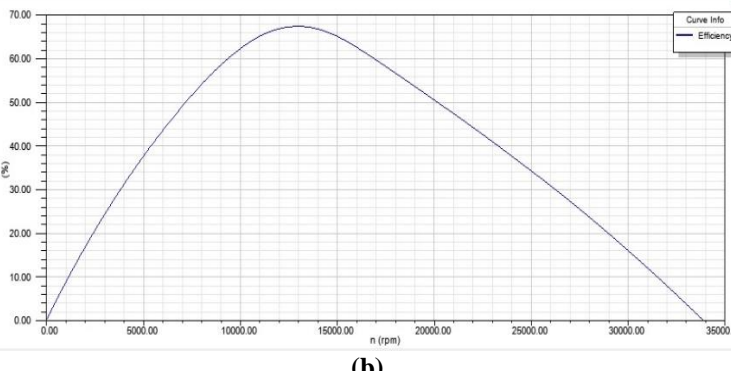
Şekil 10. Stator-Rotor farklı nüveli universal motorun tork değişimi

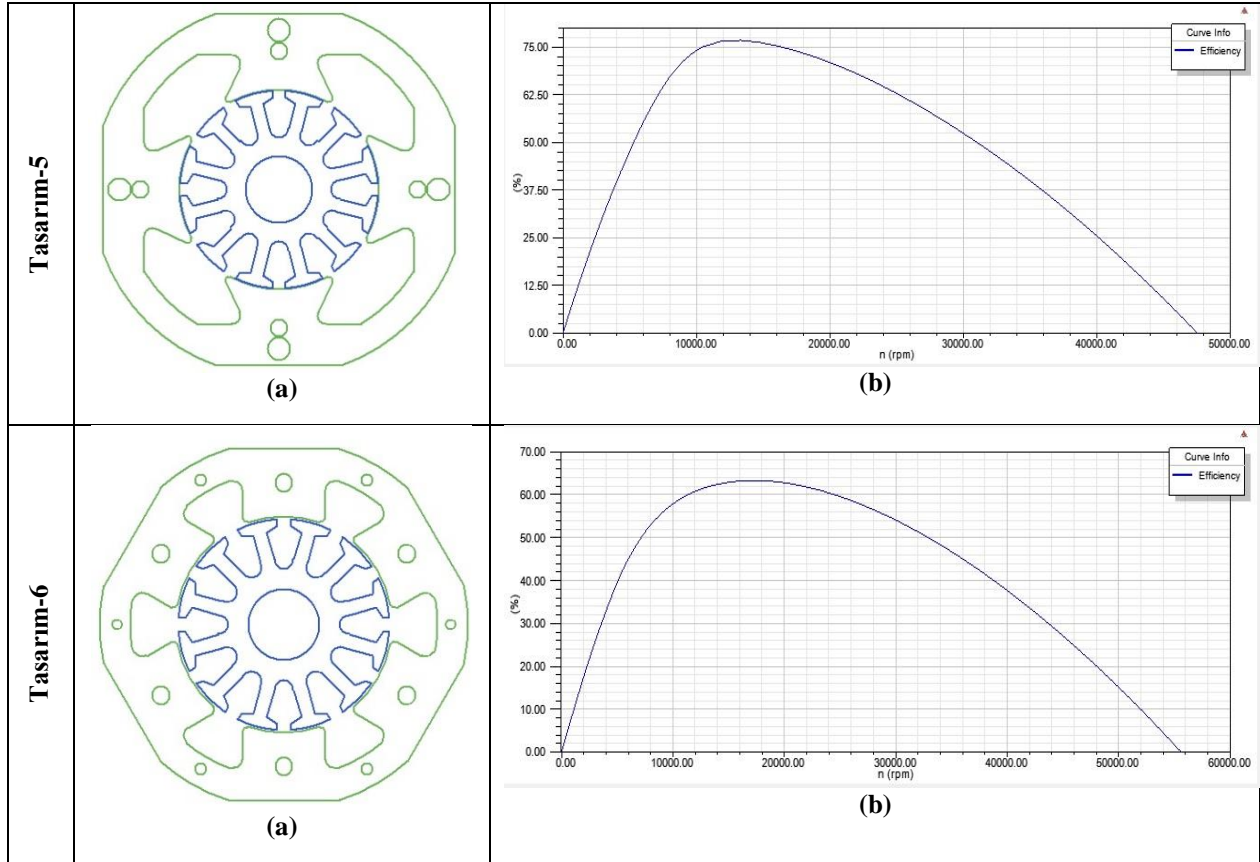
Şekil 7'de stator ve rotoru klasik nüveli (M19-M19) yapı ile karşılaştırıldığında elektromanyetik torkta M19-Amorf %29,7, SMC-Amorf %29,2 ve Amorfa-Amorfa göre %31,9 artma olmuştur. Ayrıca stator ve rotoru klasik nüveli (M19-M19) yapı ile karşılaştırıldığında ağırlıkta M19-Amorf %1,26, SMC-Amorf %2,6 ve Amorfa-Amorfa %4,4 azalma olmuştur.

## 5. Ünlversal Motorun Farklı Stator-Rotor Tasarım Analiz Sonuçları

Çalışmanın ana amacını oluşturan farklı nüve malzemeleri için performans karşılaştırmasını farklı rotor ve stator yapılarını da analizlerin içine katarak yeni ünlversal motor tasarımları elde edebiliriz. Çalışmanın bu kısmında sırasıyla iki, dört ve altı kutuplu Ünlversal motor tasarımları için iki farklı rotor tasarımı yapılmış ve nüve materyali olarak sırasıyla M19, amorf ve SMC olması durumları incelenmiştir. Performans göstergesi olarak incelenen motorlara ait hız-verim eğrileri farklı tasarımların yanında **tablo 4**'te sunulmuştur. Ünlversal motorun hali hazırda endüstriyel uygulamalardaki sıklıkla kullanımına göre kaynaklarda yeterince incelenmiş bir motor tipi değildir. Bu çalışma ile literatüre farklı rotor tiplerinde ve farklı malzemeler ile hız-verim eğrileri incelenerek bir çalışma sunulmuştur.

**Tablo 4.** Üniversal motor farklı nüve ve malzeme formlarında tasarımları

|                  |   |  |
|------------------|---|--|
| <b>Tasarım-1</b> |  <p style="text-align: center;"><b>(a)</b></p>   |  <p style="text-align: center;"><b>(b)</b></p>   |
| <b>Tasarım-2</b> |  <p style="text-align: center;"><b>(a)</b></p>   |  <p style="text-align: center;"><b>(b)</b></p>   |
| <b>Tasarım-3</b> |  <p style="text-align: center;"><b>(a)</b></p> |  <p style="text-align: center;"><b>(b)</b></p> |
| <b>Tasarım-4</b> |  <p style="text-align: center;"><b>(a)</b></p> |  <p style="text-align: center;"><b>(b)</b></p> |

**Tablo 4 (devam).** Ünliversal motor farklı nüve ve malzeme formlarında tasarımları

**Tablo 4**'te görüldüğü üzere tasarım bir, iki ve üç aynı rotor yapısı ve farklı stator yapısına, tasarım dört, beş ve altı aynı rotor yapısı ve farklı stator yapısına sahiptir. İlk üç tasarımda malzeme kullanımı sırasıyla M19, amorf ve SMC ve sonraki tasarımlarda ise sırasıyla M19, amorf ve SMC olması durumları incelenmiştir. Her tasarımın yanında verilen verim-hız grafikleri incelendiğinde en iyi tasarımın amorf-amorf malzeme kullanılan motor konfigürasyonundan elde edildiği ve rotor oluk tipinin verimi ve diğer performansı etkileyen motor parametrelerini etkilediği görülmektedir. Aynı tip rotor konfigürasyonlarında verim çok değişmezken rotor oluk tipi değiştirildiğinde tasarım-6'da görüleceği üzere verim %3 kadar azalma göstermiştir.

## 6. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada görülmüştür ki, klasik nüveli (tanecikleri yönlendirilmemiş) elektrik makinalar yerine yeni düşük kayıplı (amorf nüveli) elektrik makinaları ile değiştirildiğinde ilk yatırım maliyeti olmasına karşın makina ömrü düşünüldüğünde enerji tasarrufunun artacağı, ancak yumuşak manyetik kompozitin klasik nüveli materyal özellikleri sağlayamadığı ve bu yüzden de evsel ve endüstriyel uygulamalar için uygun olmadığı görülmüştür. Stator ve rotorda farklı nüve materyallerinin kullanılması üniversal motorun dinamik karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle yük altında ürettikleri torklarda büyük değişimler olmuştur. Stator-rotor (M19-Amorf) veya (Amorf-Amorf) veya (YMK-Amorf) üniversal motorlar ağırlık, verim ve tork açısından önemli avantaj sağlamaktadır. Bu çalışma ile evsel ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek üniversal motorlarda verim, ağırlık, maliyet ve tork gibi iyileştirmeler sunan malzeme konfigürasyonları tercih edilebilir.

## Referanslar

Ansoft Corporation, (2020). Maxwell 3D technical notes, 200-1045.

Ansoft RMXprt Application Note Application Note AP05-0201, "A Universal Motor Problem".

Ansys Maxwell (2018). v18, Help File.

Azuma, D., & Hasegawa R., (2008). Audible Noise From Amorf Metal and Silicon Steel-Based Transformer Core, IEEE Transactions On Magnetics, 44(11), 2108-2109.

Başer., T.A, (2013). Kompozit Metalik Camlara Genel Bir Bakış, Mühendis ve Makina, 54(640), 36-44.

- Chang-H., Hsu & Chang Hwa Y., (2009). Systematic Study of Low Loss Amorf Core Transformers: Design and Testing, 8th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems.
- Cros, J, Viarouge P., Chalifour Y., & Figueroa J., (2004). A New Structure of Universal Motor Using Soft Magnetic Composites, IEEE Transactions On Industry Applications, 40(2), 1904-1911.
- Dems M., & Komezka K., (2014). Performance Characteristics of a High-Speed Energy-Saving Induction Motor with an Amorf Stator Core, IEEE Transactions On Industrial Electronics, 61(6), 1877-1882.
- Ertugrul Soong, N., W.L., Gayler J., & Rybak T., (2004). High-Efficiency Magnetic Ballast Design Utilizing Amorf Metal Core, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004).
- Hasegawa R.,(1999). US Patent No. 5,868,123.
- Hong Joo, D.K., Woo D., B.C., Jeong Y.H., & Koo D.H., (2013) Investigations on a Super High Speed Motor-Generator for Microturbine Applications Using Amorf Core, IEEE Transactions On Magnetics, 49(7) 2132-2137.
- Jack, A., Mecrow B., Dickinson P., Jansson P., & Hultman L. (2000). Design and Testing of a Universal Motor Using a Soft Magnetic Composite Stator, Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, 1(1) 46 – 50.
- Jianwei L., & Ting, L., (2010) Comparison and analysis of classical motor with Amorf iron motor based on Ansoft, 2nd International Conference on Intelligent Human–Machine Systems and Cybernetics, Nanjing, 305–308.
- Johnson, L., A., Bailey D. J., Cornell E. P., & Hegyi S. M., (2020) Application of Low Loss Amorf Metals In Motors and Transformers, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS–101(7), 2109–2114.
- Jun-Fang L., Jian-wei, L. Chong-nian, Q., (2019) Research on a novel Fe–based amorphous electric motor, IEEE Computer Science and Information Technology, China, 9, 184–187.
- Khazin Rajendran A. F., Khan S., Gobbi R, & Anayet K. (2008). Design of a Three Phase Induction Motor Based On Efficiency Improvement Using Amorf Iron Material, 2nd Engineering Conference on Sustainable Engineering Infrastructures Development & Management, Kuching, Sarawak, Malaysia
- Kim B.-T., (2006). Design of New Type Universal Motor Using Soft Magnetic Composites, Journal of Electrical Engineering & Technology, 1(2), 211-215.
- Liu Woodburn H., Lin D., S., Wu T. X., Wei J., & Cao K., (2010). Design of a High Speed Universal Motor for Organic Agriculture Applications, PIERS Proceedings, Cambridge, USA.
- Luciano B.A., Morais M.E., & Kiminami C. S., (1999). Single phase 1-kVA Amorf core transformer: design, experimental tests, and performance after annealing, IEEE Transactions on Magnetics, 35(4), 2152-2154.
- Miller, K. J., (2010). Investigation of FeCo Nanocomposites for High Frequency Applications, PhD. Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 176-179.
- Mischler W. R., G. M., Rosenberry Frischmann P. G., & Tompkins R. E., (2018) Test Results On a Low Loss Amorf Iron Induction Motor, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS–100(6), 2907–2911.
- Retrieved from : <http://www.cluster2.hostgator.co.in/files/writeable/uploads/hostgator50505/file/ugetcatalog.pdf>
- Retrieved from: Höganäs, Somaloy® Soft Magnetic Composite Technology, Prototyping Material Datasheet, [http://www.hipih.com/SMC/datasheet/SMC\\_ffuqO8OBwhVjZ.htm](http://www.hipih.com/SMC/datasheet/SMC_ffuqO8OBwhVjZ.htm)
- Sato A., H., Terada T., Nagata S., Kurita Matsuda Y., Fukui K., Azuma D., & Hasegawa R., (2009). Development of distribution transformer based on new Amorf metals Electricity Distribution - Part 1, 20th International Conference and Exhibition on , CIRED Prague, 1 – 4.
- Soltanzadeh, K. Tavakoli, A. & Arbab, P.B. (2012). Effects of Amorf core Distribution Transformers in improvement the functioning of the electricity distribution system”, Electrical Power Distribution Networks (EPDC), Proceedings of 17th Conference, 1-7.
- Steinmetz, T., Cranganu-Cretu, B., & Smajic J., (2010). Investigations of No-Load and Load Losses in Amorf Core Dry-Type Transformers, XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM, Rome.
- Wang Le J, L.,, Zhang Le S., & Huang G., S., (2011). Development of the New Energy-Efficient Amorf Iron Based Electrical Motor”, International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 2059-2061.

Wang Z., Masaki R., Morinaga S., Enomoto Y., Itabashi H., Ito M., & Tanigawa S., (2011). Development of an Axial Gap Motor With Amorf Metal Cores, IEEE Transactions On Industry Applications, 47(3), 2211-2217.

Zhou P., Brauer J.R., Stanton S., Cendes Z. J., & Ebben R. N. (1999). Dynamic Modeling of Universal Motors, Electric Machines and Drives, 419 – 421.