

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA EPOKSİ MALZEMESİNİN MOTOR TERMAL PERFORMANSINA ETKİSİ

Oğuzhan Ocak¹, Zuhal Payza¹, Enes Maksut Kocabalkan¹, Burak Özdiğer¹, Metin Aydın²

¹AR-GE Bölümü

Akım Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş. İstanbul

oocak@akimmetal.com.tr

zpayza@akimmetal.com.tr

emkocabalkan@akimmetal.com.tr

arge29@akimmetal.com.tr

²Mekatronik Mühendisliği Bölümü

Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada sürekli mıknatıslı (SM) senkron motor sargılarında kullanılan epoksi malzemenin motor performansına etkisi incelenmiştir. Endüstriyel bir uygulama için tasarım kriterleri elde edilmiş, manyetik tasarım ve sonlu elemanlar analizleri (SEA) tamamlanmıştır. SM motorlarda kullanılan farklı epoksi malzemelerin özellikleri özetlenmiş, malzemelerin motor termal performansına etkisi incelenmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Nihai tasarım için prototip üretilmiş ve prototipe ait hem performans hem de termal testler gerçekleştirilmiştir. Termal testler epoksisiz ve epoksili olmak üzere iki farklı durum için yapılmış ve kullanılan epoksi malzemenin motor performansına etkisi detaylıca irdelenmiştir.

Abstract

This paper focuses on the influence of epoxy material on permanent magnet (PM) synchronous motor performance. A design specifications for an industrial application is defined, magnetic design and detailed finite element analyses (FEA) are carried out. Properties of epoxy materials used in PM motors are summarized, thermal performances are obtained and compared. For the final design, a prototype is built and both electrical and thermal tests are completed. Thermal tests with and without epoxy material are carried out and the influence of the chosen material on the machine performance is investigated in detail.

1. Giriş

1.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar çeşitli sektörlerde sağladığı avantajlar nedeniyle artan bir ilgi görmektedirler. Bu ilginin artmasını sağlayan başlıca nedenler arasında yüksek pozisyon hassasiyeti, yüksek

moment/hacim oranları, yüksek dinamik cevap, yüksek moment kalitesi, yüksek enerji verimliliği ve diğer motorlar kadar bakım gerektirmemesi gösterilebilir. Getirdiği avantajlar yanı sıra Sürekli Mıknatıslı (SM) Senkron Motorların kontrol zorluğu, mıknatıs fiyatları nedeniyle fazla maliyet, tasarım zorluğu ve tecrübe istemesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. SM senkron motorlar en genele anlamda stator sacları ve statora yerleştirilmiş 3 veya daha fazla fazlı sargılar, rotorda ise rotor sacları, mil ve sac yüzeyine (yada içerisine) monte edilmiş sürekli mıknatıslardan oluşur. İç rotorlu PM motorlar geleneksel motorlara benzemekle birlikte yüzey mıknatıslı ve dahili mıknatıslı olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Standart uygulamalarda ve yüksek hız uygulamalarında bu tür motorlar tercih edilmektedir. Dış rotorlu PM motorlar ise genelde taşıt ve direkt sürümlü uygulamalarda, motorun doğrudan tekerlek içerisine gömüldüğü hub motor türünde motorlarda karşımıza çıkmaktadır [1]-[3].

Diğer taraftan SM motorların tasarımı uzmanlık gerektiren, motor yapısına ve türüne bağlı olarak denklemleri değişen, uygulamanın türüne bağlı olarak gereksinimlerinin de hesaba katılması gereken, modelleme ve SEA gibi analizler olmaksızın tasarımın sonlandırılmayacağı, gerekmesi durumunda yapısal ve termal analizlerin de yapılmasına ihtiyaç duyulan, zaman alıcı, zorlu bir süreçtir [3]-[6]. Uygulama tarafı motorun ısı performansını etkileyen önemli bir unsurdur. Bu nedenle ortam sıcaklığı, motor hızı, motor kayıplarının oranı, motorun çalışma sıcaklığı gibi unsurlar senkron motorda kullanılan malzemelerin önemini ortaya koymaktadır. Senkron motorların çoğunda bakır kayıplarının demir kayıplarına göre daha ağır bastığını hesaba katıldığında sargılarda oluşan ısı atılması, akım yoğunluğunun düşürülmesi için

epoksi kullanılacak ise epoksinin ısı iletkenliği gibi teknik detaylar tasarım ve analiz sürecinde önem arz etmektedir.

1.2. Epoksi Malzemeler

Epoksi, termosetler grubundan yapıştırıcı bir kimyasal reçinedir. Suya, aside ve alkaliye direnci çok iyidir, zamanla direnç özelliğini yitirmez. Çatlađa doldurulmuş epoksi yapıştırıcısı, çatlağın yarattığı süreksizlik ortamını sürekli duruma dönüştürür, çatlağın her iki yüzünü çatlak boyunca sürekli olarak birbirine bağlar ve gerilme birikimlerini önler. Genellikle iki bileşenli olan epoksiler, diğer termoset plastikler gibi belli süre sonra sıvı halden katı hale geçer ve takip eden bir iki hafta içinde olgunlaşarak nihai sertliğe ulaşır. Cam veya karbon elyafı ile epoksi kombinasyonu mükemmel mekanik dayanıklılığa sahiptir. Bu yüzden uzay ve havacılık teknolojilerinde ve denizcilik alanında çok kullanılır [7]-[10].

Epoksi yapıştırıcılar, mühendislik veya yapısal yapıştırıcılar olarak bilinen; inşaat, havacılık, otomotiv, elektronik, yatçılık, genel endüstriyel uygulamalar gibi sektörlerde güçlü yapışma mukavemeti ve çevresel şartlara dayanımları ile yaygın kullanımları olan yüksek performanslı yapıştırıcı grubudur. Ahşap, metal, taş ve bazı plastiklerin yapıştırılmasında kullanılırlar. Epoksi yapıştırıcılar fiziksel özelliklerine göre rijit veya esnek, saydam veya opak renkli olabilirler. Kürleşme hızları da formülasyonlarına göre farklılık gösterir. Epoksi yapıştırıcıların bilinen diğer yapıştırıcılara göre ısı ve kimyasal dayanımları daha iyidir. [7]-[10] Tablo 1’de elektrik motorlarında kullanılabilecek epoksi malzemelerin ısı ve mekanik özellikleri açısından aralıkları verilmiştir.

Tablo 1. Epoksi malzeme teknik özellikler

Teknik Detaylar				
Malzeme özellikleri	Termal Kondaktivite	Maks. Çalışma Sıcaklığı	Yoğunluk @25 °C	Pota ömrü @25 °C
Epoksi	0.6-1,7 W/(m°K)	155 °C - 180°C	1,55 - 2,1 g/ml	50 min - 210 min

2. 150 Gövde 3kW SM Senkron Motor Tasarımı ve Prototip Üretimi

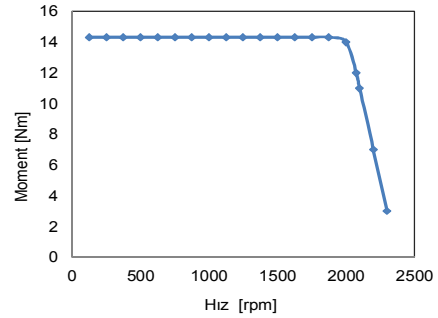
2.1. Motor Tasarımı

Sürekli mıknatıslı motor tasarımında öncelikle uygulama ihtiyacını görecek motor tasarım kriterlerini belirlemek önemlidir. Bu çalışmada Tablo 2’de tasarım kriterleri ve Şekil 1’de istenen moment-hız karakteristiği verilmiştir. Tasarlanacak sürekli mıknatıslı senkron motorun bu kriterleri sağlaması beklenmektedir. Ön

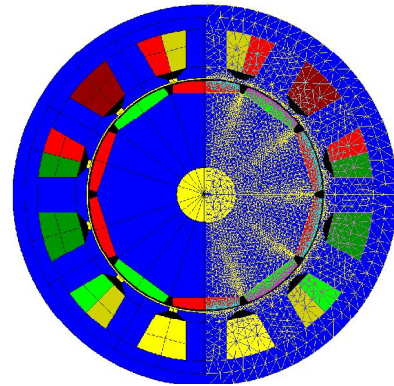
boyutlandırma işlemi yapılan ve tasarımı gerçekleştirilen 3kW motorda yapılan kutup sayısı optimizasyonunda optimum kutup sayısı 10 olarak belirlenmiştir. Kutup ayısını belirlemede ilgili hacimden elde edilecek maksimum moment/hacim, güç/hacim, minimum malzeme maliyeti gibi faktörler göz önüne alınmıştır. 10 kutuplu bir yapı ile kombine edilecek ilk oluk sayısı 12 olduğu için 10kutup/12oluk kombinasyonu ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ön tasarımı tamamlanan motorun elektromanyetik SEA Flux 2D yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tasarıma ait SEA modeli ve bu modele ait ađ yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğu üzere elektromekanik enerji dönüşümünün yapıldığu hava aralığında ađ yapısı oldukça sık ve iyidir. Bu da yapılan analizlerin daha doğru sonuç vermesini sağlayacak önemli bir faktördür.

Tablo 2. SM motor tasarım özellikleri

Motor Özellikleri	Değer
Güç	3kW
Anma Momenti	14.32Nm
Anma Hızı	2000rpm
Kare Flanş Boyu	150mm



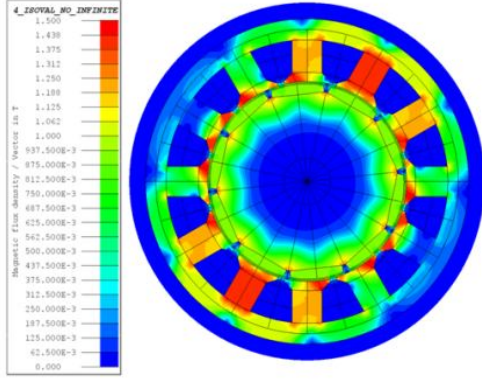
Şekil 1. 150gövde 3kW SMB marka sürekli mıknatıslı senkron Motordan istenen moment-hız karakteristiği



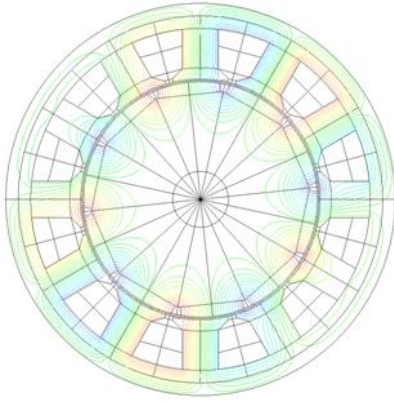
Şekil 2. Motor SEA modeli ve ađ yapısı

Motorun öncelikle yüksüz durum analizleri gerçekleştirilmiş ve akı yoğunluğu dağılımına ve akı çizgilerine bakılmıştır (Şekil 3 ve Şekil 4). Yüksüz

durumda statorun eriştiği maksimum akı yoğunluğu makul seviyelerindedir. Kullanılan sac malzemenin doyum eğrisi göz önüne alındığında yüksüz ve yüklü durum akı yoğunluklarında bir sorun görülmemektedir. Akı çizgilerine bakıldığında ise mıknatısların mıknatıslanma yönlerinin doğru tanımlandığı 10 adet manyetik çevrim olmasından anlaşılmaktadır.



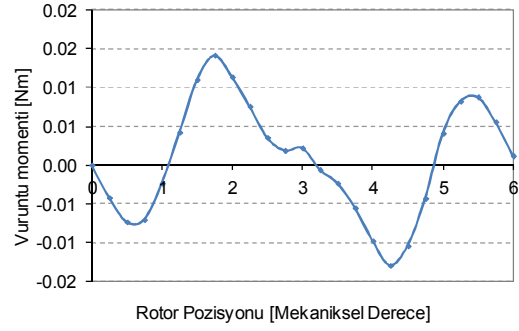
Şekil 3. Yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi



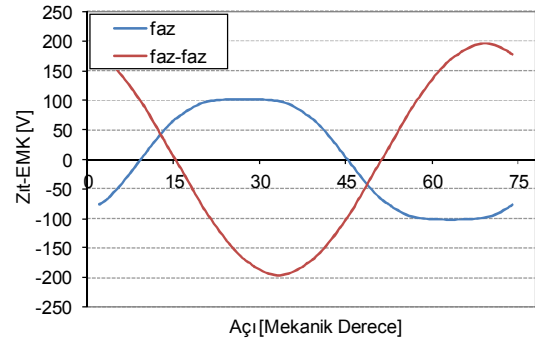
Şekil 4. Yüksüz durum akı çizgileri değişimi

Sürekli mıknatıslı motorlarda moment kalitesi önem taşıyan bir konudur. Motorun moment kalitesinin yüksek olması motor performansına etkisinin yanında sistem performansına da etki etmektedir. Bu sebeple özellikle düşük hızlarda moment kalitesini etkileyen en önemli sebeplerden biri olan vuruş momenti seviyesinin düşük tutulması uygulama için kritiktir.

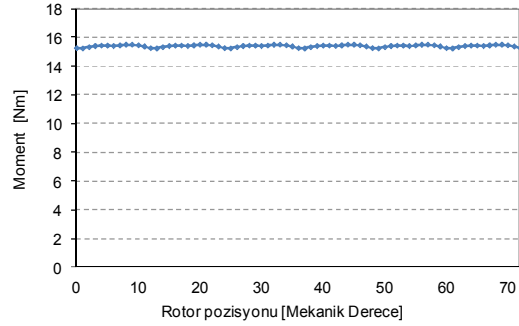
Yüksüz durum analizlerinde önce tasarımın vuruş momenti ve zıt-EMK dalga değişimine bakılmıştır. Şekil 5’de gösterildiği üzere maksimum vuruş momenti seviyesi 0.015 Nm değeri ile anma momentinin % 0.1 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu değer bu güç seviyesi göz önüne alındığında oldukça düşük bir moment seviyesidir. 1000 rpm hız değeri için zıt-EMK faz ve hat değişimleri ise Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 5. Vuruş momenti değişimi



Şekil 6. Zıt-EMK faz ve hat dalga değişimleri (@1000rpm)



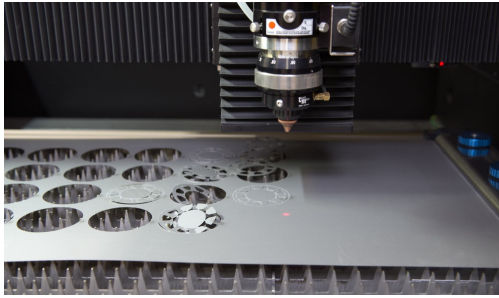
Şekil 7. Çıkış momenti değişimi

Yüksüz durum analizlerinden sonra yüklü durum analizleri tamamlanmış, anma akımındaki çıkış momenti değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Burada nihai model için ortalama moment 15.40Nm elde edilmiş ve ortalama momente göre moment dalgalanması %1,7 seviyelerinde olduğu görülmüştür. Bu tür uygulamalarda %5 moment dalgalanmasının makul seviyelerde olduğu düşünülürse elde edilen değerin oldukça düşük seviyelerde olduğu söylenebilir.

2.2. Prototip Üretimi

Tasarım kriterleri doğrultusunda bir tasarım oluşturulmuş ve kriterleri sağlayan boyutlar için prototip üretimi aşamasına geçilmiştir. Prototip üretim aşamasında stator sacları hızlı fiber optik laser kesim

yöntemi kullanılarak kesilmiş (Şekil 8) ve malzeme manyetik özelliklerine zarar verilmeden kesim işlemi sonlandırılmıştır. Stator ve rotor sacları bu şekilde üretilmiş ve uygun aparatlar yardımıyla lazer kaynak kullanılarak paketlenmiştir. Mıknatıslar kalitesinden emin olunan bir firmadan temin edilerek prototipte malzeme bağımlı hataların oluşmasının önüne geçilmiştir. Ayrıca işlenen parçalarda belirtilen toleranslar dahilinde imalat gerçekleştirilmiş ve doğruluğu kalite kontroller ile teyit edilmiştir. Bu çalışmaların amacı prototipin kaliteli üretilerek, prototip testleri sonucu oluşabilecek hataların nedenini daha kolay bulmak adına oldukça önemlidir. Prototip motora ait sarımları yapılmış stator, mıknatısları yapılandırılmış rotor ve montajı yapılmış motora ait görüntüler sırasıyla Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.



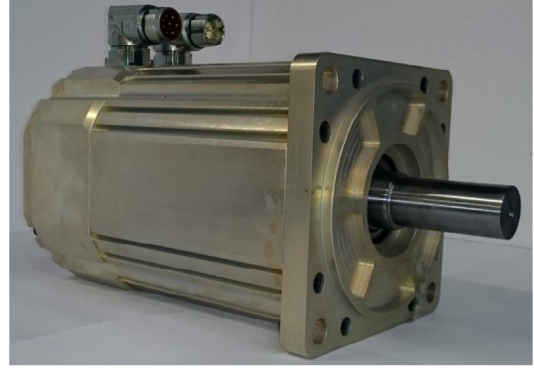
Şekil 8. SM saclarının hızlı fiber lazer de kesimi



Şekil 9. Prototip stator nüvesi ve sargılar



Şekil 10. Prototip rotor nüvesi, mıknatıslar ve mil

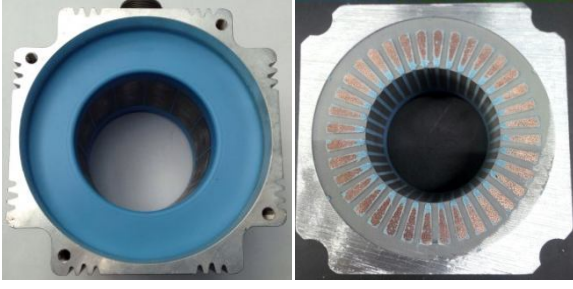


Şekil 11. Prototip tamamlanmış, deneysel olarak doğrulanmış ve üretime aktarılmış 150gövde 3kW sürekli mıknatıslı senkron motor

3. SM Senkron Motorlarda Kullanılan Epoksi Malzemeler

Elektrik motorları elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Tasarım ne olursa olsun, her elektrik motorunda girişteki elektrik enerjisi çıkışta hareket ve ısı enerjisine dönüşür. Bu ısı enerjisi dönüşümü içinde, mekanik etkenler için rulman ve kaymalı yatak gibi sürtünmeye maruz kalan parçalarda ve elektriksel etkenler için motor sargılarında geçen akım sonucu oluşan ısı sayılabilir. Elektrik motorunda oluşan ısı genelde motor gövdesi üzerinden dış ortama atılarak uzaklaştırılır. Motorda aşırı sıcaktan dolayı veriminin düşmesi ve sargı izolasyonlarının hasar görmesini engellemek için motor tasarımında motor gövdesinde soğutma sistemleri tasarlanabilmektedir. Bu durum özellikle motorda termal tasarımın iyi yapılmasının ve modellenmesinin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Malzeme teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu alanda ilerlemeler sağlanmıştır. Bunlardan bir tanesi motor gövdesi içinde termal iletkenliği yüksek epoksi kullanımıdır. Bir segmentli laminasyon statoru yüksek sıcaklıklara rağmen güvenilir çalışması için Şekil 12’de gösterildiği gibi tamamen termal iletken epoksi kaplanır. Burada dikkat edilmesi gereken epoksi malzemesinin stator içine tamamen nüfuz etmesi ve hava kabarcığı/boşluk kalmamasıdır. Bunun için de genelde bu işlem vakum altında yapılmaktadır. Gösterilen örnekte prototip motora epoksi dökülmesi sonrası motor kesilerek sargı aralarında boşluk olup olmadığı kontrol edilmiş ve oldukça iyi sonuçlar alındığı görülmüştür. Bu da yapılan çalışmanın kaliteli olduğunu ve böylece test sonuçları ile simülasyon sonuçlarının yakın çıkması için önemli bir etken olduğunu göstergesidir.



Şekil 12. Epoksi uygulanmış motor statoru ve arakesiti
örneği

Epoksiler elektrik motorlarında daha çok elektriksel yalıtım (izolasyon) ve ısı transferi amacıyla kullanılmaktadır. Elektrik motoru stator paketi sargı sonu çevresindeki hava boşluğunun yerini dolduran epoksi malzemesi, gövde ile stator sargıları arasında termal iletkenliği artırır. Artan bu iletkenlik sayesinde ısınn atıldığı ortam ile sargı arasındaki sıcaklık farkı azalacaktır. Kullanılan epoksi malzemesinin termal iletkenlik katsayısı motor uygulamaları için önem arz etmektedir.

Tablo 3’de incelenen farklı epoksi malzemeler ve teknik özellikleri verilmiştir. Tabloda renkli işaretli olan epoksi malzemeler ısı iletkenlik, performans ve fiyat olarak uygun olarak belirlenmiş ve bu malzemeler ile çeşitli ısı analizler yapılarak, fiyat performans açısından en uygun epoksi malzeme belirlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 3. Epoksi malzeme alternatifleri

EPOKSI	TEKNİK DETAYLAR				
Epoksi isimleri	Termal Kondaktivite	Maks. Çalışma Sıcaklığı	Yoğunluk	Pota ömrü	Fiyat
Elan-tron MC 622 LV / W	1,0÷1,1 W/(m²K)	155 °C	1,68÷1,71 g/ml @25 °C	50÷65 min @25 °C	1 x/kg
Elan-tron MC 623 / W 58	1,25÷1,35 W/(m²K)	200 °C	2,20÷2,24 g/ml @25 °C	37÷42 min @40 °C 12÷18 min @60°C	1.6 x/kg
Elan-tron MC 336 / W 360	1,6÷1,7 W/(m²K)	155 °C	1,86÷1,90 g/ml @25 °C	15÷23 min @40 °C 11÷17 min @50°C	1.46 x/kg
Loctite Hysol 9496	1.7 W/(m²K)	150°C	2.21 g/cm3 @25°C	120 min @22°C	-
Huntsman Araldite CW 2710-1 Aradur HW 2711-1	1.7 W/(m²K)	180°C	2.1 g/cm3	400 min @60°C	0.87 x/kg
Wevopur 60416 mit Härter Wevonat 300RE	1,6 W/(m²K)	155 °C	1,90-1,97 g/cm3	40-60 min	2.18 x/kg
Wevopox 8260 FL mit Härter Wevodur 1018/25	0.94	180 °C	1,65 -1,75 g/cm³	240 min	2.5 x/Kg
Wevopur 403 FL mit Härter Wevonat 300 RE	0.75	165 °C	1,62 - 1,65 g/cm³	45 min	1.4 x/ Kg
Elan-tron MC4260 mit Härter W4260	0,6/0,7 (Wm²K)	155 °C	1,73 - 1,77 g/cm³	25 min	1.17 x / Kg
Elan-tron UP 3540 RTC mit Härter UH 3990	0,56 (Wm²K)	184 °C	1,54 g/cm³	65 min	1.5 x/ Kg
Elan-tron MC 5430 mit Härter W 5868	0,45-0,55 (Wm²K)	198 °C	1,93-1,98 g/cm³	60 min	1.78 x/ Kg
Polytec TC 417 Koomponente A + B	1,00 (Wm²K)	180 °C	1,83 g/cm³	360 min	32 x/ KG
Sepox 215 FR DK504	0.6-0.7 (W/mK)	Datasheette belirtilmemiş	1.55 g/ml	210 min @25°C	1.01 x/Kg

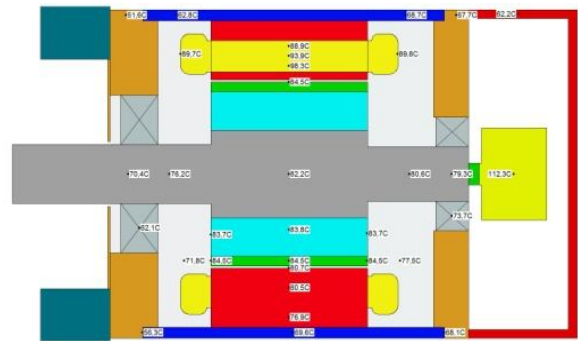
Tablo 3 Epoxy uygulamasının vernik uygulamasına benzer şekilde vakum altında yapılması önerilmektedir. Yapılan altyapı yatırımına bağlı olarak tıpkı vernik uygulamalarında olduğu gibi manuel veya otomatik yöntemler kullanılmaktadır. Vernik uygulamasından farklı olarak stator iç çapı ölçüsünde yapılması gereken bir aparat ve bu aparatın uygulama öncesi montajı ile uygulama sonrası demontajı işlemi bulunmaktadır. Bu da standart vernik uygulamalarına göre maliyetin bir miktar artması anlamı taşımaktadır. Gerekli otomasyon yatırımının yapılarak bu sistemin de otomatize edilebileceği düşünüldürse maliyetlerin de minimize edilebileceği söylenebilir.

4. Termal Analizler

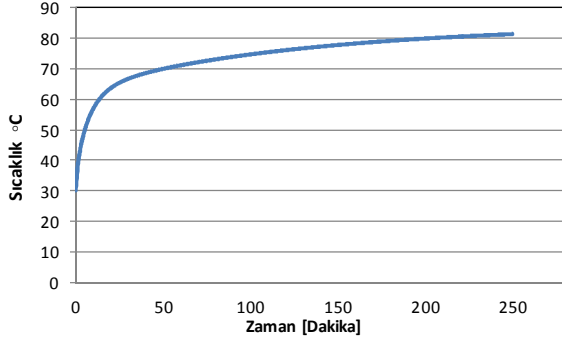
Burada elektrik motoru üzerinde oluşan ısının uzaklaştırılması çeşitli ısı analizler gerçekleştirilerek sonuçları incelenmiştir. Motor-Cad yazılımı kullanılarak dört farklı epoksi malzeme için ısı analizler aynı koşullar altında tamamlanmıştır. Şekil 13 ve Şekil 14’de sırasıyla epoksisiz motor kesit görünümü ve motorun zamana bağlı sargı sıcaklık değişim grafiği verilmiştir. Bu analizlerdeki amaç epoksinin motor performansına etkisini görmektir. Bu çalışmada 150 gövde 3kW nihai sürekli mıknatıslı servomotor tasarımı elde edilen ve prototipi üretilen motora,

Tablo 3’deki ısı iletkenlik katsayıları verilen farklı epoksi malzemeler uygulanarak ısı performansları incelenmiştir.

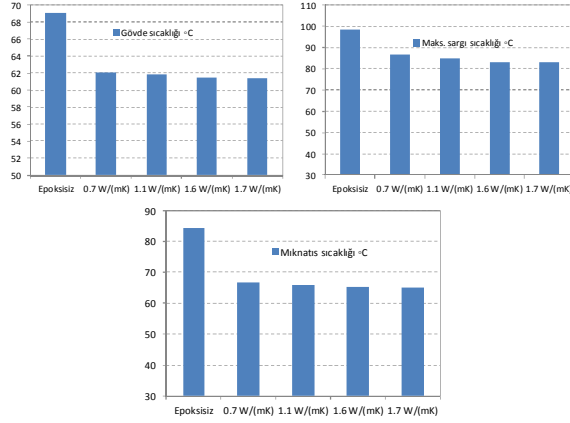
Şekil 15’ de farklı epoksi malzeme uygulamaları için MotorCAD yazılımı kullanılarak yapılan termal analizler sonucunda motorun kritik noktalarında oluşan sıcaklık değişim sonuçları verilmiştir. Termal iletkenlik katsayısı yüksek olan epoksi malzemelerde kritik sargı sıcaklıklarında 12 °C ile 15 °C arasında iyileşme olduğu görülmüştür. Bu sıcaklık farkının, bakır kayıplarını azaltan ve motor ömrünü uzatan önemli bir etken olduğu rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 13. Motor Motor-Cad modeli kesit
görünümü(epoksisiz)



Şekil 14. Zamana bağlı ortalama motor sargı sıcaklık değişimi(epoksisiz)



Şekil 15. Farklı epoksi malzemeler için motor termal analiz sonuçları

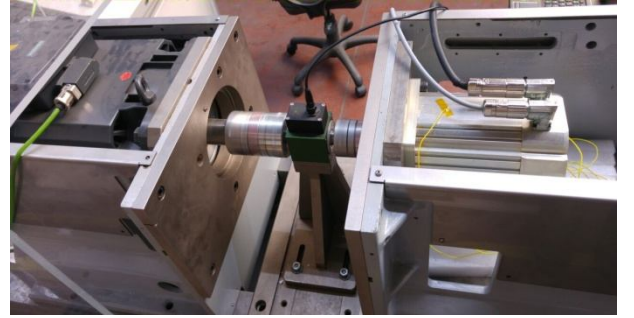
5. Deneysel Veri

Prototip üretimi yapılmış motora hem epoksi uygulanmadan önceki hali hem de epoksi uygulanmış hali ile yapılan %100 yüklü dinamik termal testler aynı ortam ve koşullar göz önünde tutularak yapılmıştır (ortam sıcaklığı 30°C). Yüklü durum testinde test motoru tork modunda %100 yüklenip, karşı motor hız modunda çalıştırılarak termal dataların alınması şeklinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 16). Bu testte bakır kayıpları, demir kayıpları, proximity ve skin effect kayıpları ve mekanik kayıplar gibi kayıplar da göz önüne alınmaktadır.

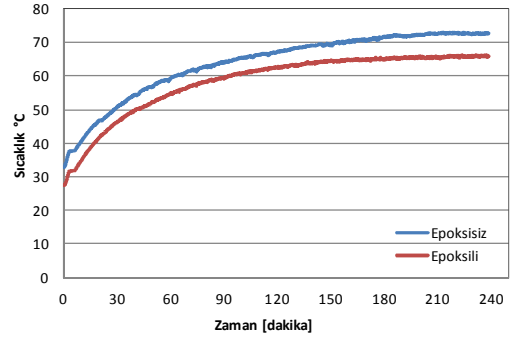
Yapılan dinamik testlerde gövde ve sargı sıcaklık verileri 10'er saniye aralıklarla yaklaşık 4 saat boyunca alınmıştır. Motor gövde ve sargı sıcaklık artışının 4 saatin sonunda durduğu gözlemlenmiştir. Motor test süresince gövde üzerinde dört farklı noktadan sıcaklık verileri alınmış epoksisiz motorun gövde sıcaklığı 72,9°C'ye ulaşırken 1,1 W/(m°K) termal iletkenlik katsayısına sahip epoksili motorun gövde sıcaklığının 65,9°C'ye ulaştığı görülmüş ve Şekil 17'de sıcaklık değişim grafiği verilmiştir. Aynı zamanda test başlangıcında ve test süresince motor sargılarındaki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Epoksisiz motorun sargı sıcaklığı 88,5°C'ye ulaşırken 1,1 W/(m°K) termal

iletkenlik katsayısına sahip epoksili motorun sargı sıcaklığının 78,9°C'ye ulaştığı görülmüş ve Şekil 18'da sıcaklık değişim grafikleri verilmiştir. Testler sonucunda epoksi uygulanmamış ve epoksi uygulanmış motor gövde sıcaklıklarının 7°C, sargı sıcaklıklarında 9,6°C azalma olduğu görülmüş ve Şekil 19'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

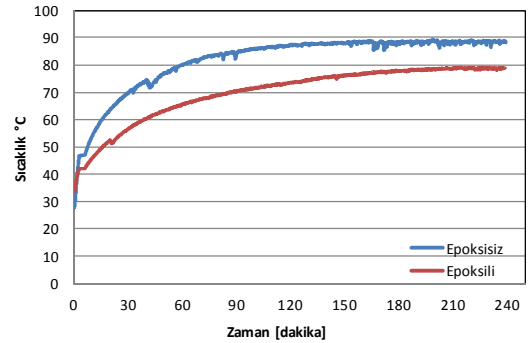
Deneysel çalışmalar ile analiz sonuçları sargı sonu sıcaklıkları için karşılaştırılmış Tablo 4'te verilmiştir. Analiz ve deneysel sonuçlar arasında epoksisiz motor sargı sıcaklıklarında % 0,45, epoksili motor sargı sıcaklıklarında ise % 1,4 oranında hata olduğu görülmüştür.



Şekil 16. Motor statik termal test ortamı



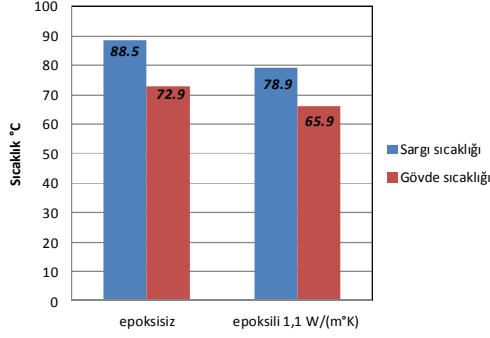
Şekil 17. Motor gövdesinin zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 18. Motor sargılarının zamana bağlı sıcaklık değişimi

Tablo 4. Sargı sonu sıcaklığı analiz ve deneysel sonuç karşılaştırılması

Sargı Sonu Sıcaklığı Karşılaştırması			
Malzeme	Analiz	Deneysel	Yüzde Hata%
Epoksisiz	88,9	88,5 °C	0,45
Epoksili 1,1 W/(m°K)	77,8	78,9 °C	1,4



Şekil 19. Gövde ve sargı sıcaklıkları karşılaştırma grafiği

6. Sonuçlar

Bu çalışmada manyetik tasarımı yapılan bir sürekli mıknatıslı senkron elektrik motorunun prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve epoksi kullanımının motor performansına ve sıcaklığına etkisi incelenmiştir. Sargılarına epoksi enjekte etmeden önce epoksi makinesinin etkinliği yapılan demo bir çalışma ile motorun kesilmesi ile görülmüştür. Sargılarına epoksi uygulaması durumu hem analizlerle incelenmiş hem de termal iletkenliği 1,1 W/(m°K) olan bir epoksi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Epoksi uygulanan ve uygulanmayan motorlara ait termal testleri tamamlanmış ve epoksili durumda sıcaklığın ne kadar düştüğü görülmüştür. Test sonuçlarına göre epoksi malzeme kullanımı hem termal performansı olumlu etkilemekte hem de statoru tamamen sararak dışarıdan motora girebilecek su ve benzeri malzemelerden dolayı motorun zarar görmesini engellemektedir.

Kaynakça

- [1] Sebastian T., Slemonand G. R., Rahman M. A., "Design considerations for variable speed permanent magnet motors", Proceedings of International Conference on Electrical Machines, München, Almanya, 8-10 Eylül 1986.
- [2] Thomas M., Jahnsand Wen L., Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 43, 321-330.
- [3] Eastham J. F., Ionel D. M., Balchin M. J., Betzer T., Demeter E., "Finite element analysis of an interior-magnet brushless DC machine, with a step-skewed rotor", IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33, 2117-2119.

- [4] Bianchi N., Bolognani S., "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38, 1259-1265.
- [5] Y. Demir, B. T. Ertuğrul, E. Sincar, A. Turhan, S. Yılmaz, M. Aydın, "Mıknatıs Korozyonunun 36-Oluk/12-Kutuplu Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Performansına Etkisi (Influence of Magnet Corrosion on Performance of 36-slot/12-Pole Permanent Magnet Synchronous Motor)",
- [6] J. A. Guemes, A. M. Iraolagoitia, J. I. Del Hoyo and P. Fernandez, "Torque Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study", IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. vol. 26, no. 1, March 2011.
- [7] Yu Xia, Wen Wang, Chunchu Tao, Cuicui Li, Shaobo He and William Chen "Application of Newly Developed Epoxy-Anhydride VPI Resin for High Voltage Motors and Generators" 2015 Electrical Insulation Conference (EIC), Seattle, Washington, USA, 7 -10 June 2015
- [8] Shu-Lung Wang1 , Ting-Yu Chueh" Research of Permanent Magnetic Brushless Motor on Epoxy Resin With Taguchi Method"
- [9] James D. B. Smith "Evaluation Tests With Epoxy Resins For Motor And Generator Insulation~ Applications"
- [10] Yasunori Okada, Shozo Kasai, "New Highly Reliable HeatResistant Magnet Wire And Epoxy Potting Compound System For Electrical Devices", CH2788-8/89/0000-0284, 1989 IEEE