

3 Boyutlu Yazıcı Desteği ile Nüvesiz Tip Alternatör Tasarımı

*¹Tarık Aslan ve ²M. Caner Aküner

¹ MYO, Mekatronik Programı İstanbul Okan Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Marmara Üniversitesi, Türkiye

Özet

750 Watt'a kadar son kullanıcı tarafından da kolayca üretilebilen Sürekli Mıknatıslı Senkron Alternatör (SMSA) tasarımı, alternatif enerjinin yaygınlaşması için oldukça önemlidir. Prototip alternatör üretimi, stator, rotor ve gövde yapısının kompleks bir çalışma ve farklı makinelerde çeşitli işlemler sonucunda gerçekleştirilebildiğinden zorlu bir süreçtir. Bu nedenle 3 boyutlu yazıcı desteği ile çeşitli içerikte Polimer esaslı (PLA) malzeme kullanılarak stator, rotor ve gövde üretimi sağlanabilir. Bu çalışmada standart bir 3 Boyutlu (3B) yazıcıyla çeşitli PLA filamentleri kullanılarak üretilebilecek bir SMSA modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, yeni bir üretim yöntemi kullanarak, elektrik makinelerinin gelişimine orijinal bir katkı sağlamaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Makineleri, Sabit Mıknatıslı Senkron Alternatör, Ansys RMXprt, Çelik Dolgulu PLA, PLA, 3B Baskı

Coreless Type Alternator Design with 3D Printer Support

Abstract

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) design, which can be easily produced by the end user up to 750 Watt, is very important for the spread of alternative energy. Prototype alternator production is a challenging process as the stator, rotor and body structure can be performed as a result of a complex operation and various processes in different machines. For this reason, stator, rotor and body production can be achieved by using polymer-based (PLA) material with various content with 3D printer support. In this study, an PMSG that can be produced using various PLA filaments with a standard 3D (3D) printer is modeled and analyzed. The purpose of this study is to make an original contribution to the development of electrical machines by using a new production method.

Key words: Electrical machines, Permanent Magnet Synchronous Generator, Ansys RMXprt, Steelfill PLA, PLA, 3D Printing

1. Giriş

Enerji üretiminden fosil kaynakların birinci tercih olması küresel ısınma ile hava kirliliğine ve bu durum alternatif enerji üretiminin gittikçe önem kazanmasına neden olmaktadır [1]. Özellikle küçük ölçekteki alternatörlerin yaygınlaşması ile tüketicinin kendi enerjisini üretmesi enerji üretimine ciddi katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada, üretim yöntemi farklı ve kolay, kurulum maliyeti düşük, sürekli mıknatıslı senkron alternatör tasarlanmıştır. Bu tasarımda doğrudan tahrikli alternatör sistemleri hedeflenerek, ayrıca üretim kolaylığı, ham madde bulunabilirliği, maliyeti, son olarak da bakımı değerlendirilerek yüzey mıknatıslı iç rotorlu alternatör tasarımı üzerine durulmuştur. Böylece, 3 boyutlu yazıcı destekli, statoru çelik dolgulu PLA olan, nüvesiz bir alternatör uygulaması amaçlanmıştır.

*Sorumlu Yazar: Adresi: MYO, Mekatronik Programı, İstanbul Okan Üniversitesi, 34959, İstanbul TÜRKİYE.
E-mail adresi: tarik.aslan@okan.edu.tr, Tel: +902642955752

Bu amaç doğrultusunda ise varmak istenen sonuçlar;

- Üretim kolaylığı ve pratikliği ortaya koyacak yeni bir üretim tarzı ortaya koymak,
- Yeni tasarımlar için alternatör üretim maliyetlerini düşürmek,
- Rüzgârgülllerinin yaygınlaşmasını sağlamak,
- Alternatörlerin ağırlığı azaltmak,
- Fuko (Eddy) kayıplarını en aza indirmek
- Dişli, kayış, kasnak gibi hız ayar mekanizmaları, kısacası dişli kutusundan kaynaklı kayıpların ortadan kaldırmak,
- Alternatörleri uyartım gereksinimi ortadan kaldırmak, elektriksel verimi yükseltmek,
- Alternatörlerde bakım ihtiyacını azaltmak,
- Sabit mıknatıs uyartımdan dolayı toplam elektriksel kayıpları azaltmak,
- Atalet momentleri küçülterek değişik rüzgâr hızlarında (düşük devirlerde bile) alternatörün çalışmasını sağlamak.

Varmak istenilen sonuçlar ile birlikte çalışmanın amacına ulaşması için izlenecek yollar ise; 750 Watt gücünde, 3 boyutlu yazıcılar tarafından basılabilir iç rotorlu yüzeye yerleştirilen sürekli mıknatıslı alternatör tasarlamaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Tasarım Kriterleri ve Kısıtları

Günümüzde, üretim araçlarının çeşitlenmesi, örneğin 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşması ve üretim çeşitliliğinin artması diğer yandan sürekli mıknatıs malzeme teknolojisinin gelişmesi ve maliyetlerinin düşmesi alternatör üretimi için bir fırsat yaratmıştır. Fakat bu durumun getirdiği bazı sınırlılıklarda mevcuttur, yazıcı üretim boyutunun sınırlı olması, çelik dolgulu PLA filamentinin ferromanyetik özelliklerinin gelişmeye açık olması, mıknatıslara ait boyut çeşitliliğinin istenilen seviyede olmaması çalışmaya belirli kısıtlamalar getirmektedir.

Bu çalışmada, stator, rotor ve gövde üretimi tek parça halinde üç boyutlu yazıcı yardımı ile üretileceğinden, bu durum alternatörün boyutunu 3B yazıcının baskı yüzey alanı ile kısıtlamaktadır. Yaygın olarak kullanılan 3B yazıcıların baskı yüzey alanları 214 cm x 214 cm olduğundan bu çalışmada da statorun geometrik boyutu en fazla 214 cm olarak sınırlandırılmıştır.

Ayrıca çalışmada bobin telleri, mıknatıs, mil, mil yatağı ve vidalar hariç diğer bütün parçalar; stator, rotor, gövde, PLA ile basılması hedeflenmiştir. Rotor ve gövde için ferromanyetik özellik içermeyen PLA kullanılırken, stator da ise çelik dolgulu PLA kullanarak, statorun ferromanyetik özelliği kazanmasını sağlamıştır. Üretimin PLA ile olması, elektrik makinelerinde sıklıkla kullanılan ve silisli saç plakaların perçinleştirilmesi ile oluşturulan nüve ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu durum, nüvesiz alternatör tasarım ve üretimini mümkün kılar. Bunun yanı sıra, çelik taneciklerinin PLA içindeki küçük tanecik boyutları nedeniyle Eddy akımlarını sifıra yakın bir değere getirmekte, bu durum alternatörün verimini arttırmaktadır. Ayrıca stator ve rotorun 3 boyutlu bir yazıcıda basılması üretime yeni bir esneklik getirecek ve farklı tasarımların önünü açacaktır.

Stator yapımında kullanılacak olan çelik dolgulu PLA, hem yalıtkan hem de ferromanyetik bir özellik göstermektedir. Bu özellik, bir stator için oldukça önemli bir avantajdır; bobin telleri istenirse prensband kullanılmadan oluklara sarılabilir.

3B yazıcı desteği ile çeşitli doluluk oranları ile stator elde edilebilir. Bu doluluk oranlarından hangisinin ferromanyetik özelliğinin daha işlevsel olduğunu tespit etmek ve modellemede kullanılacak Ansys Rmxprt modülüne seçilen doluluk oranındaki çelik dolgulu PLA malzeme değerlerini girmek için 80x40x15 mm boyutlarında radyal ferromanyetik toroidal nüveler basılarak 1/1 oranında bobin sarılmış ve laboratuvarında test edilmiş ve sonuçlar Tablo 1’de sunulmuştur. Teste kullanılan farklı doluluk oranındaki her bir bobin grid yöntemi ile doldurulmuş ve 50 Hz frekansında ve aynı koşullar (sıcaklık, nem vs..) altında test edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde çelik dolgulu bobin üretiminde kullanılan doluluk oranının ferromanyetik özelliği üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Örneğin %20 doluluk oranının %10 ve %50’den daha iyi sonuçlar verdiği, %80 doluluk oranının ise en olumsuz sonucu verdiği görülmektedir. En yüksek manyetik alan ise %100 ile elde edilmiştir.

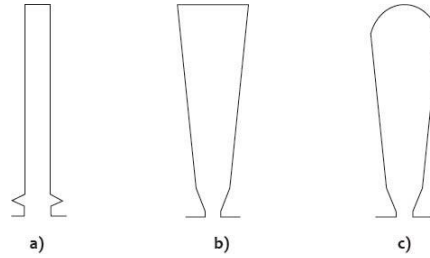
Tablo 1. Çelik Dalgulu PLA Bobininin Doluluk Oranına Göre Ferromanyetik Özellikleri

%10 Doluluk												Ağırlık : 58,5 g / Öz ağırlık : 1,0345	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT
1	2	2,0083	312,36	1,83E-05	0,09587	-5,3E-06	1,0423	1,4271	220,9	-0,10121	5,6629	0,002116	2,4002
2	4	4,0148	622,76	0,001401	0,38363	-1,2E+10	2,2953	2,8532	442,48	-0,35663	11,29	0,004156	4,7974
%20 Doluluk												Ağırlık : 72,3 g / Öz ağırlık : 1,2785	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT
1	2	1,9833	173,84	4E-05	0,042438	-1,6E+23	0,55646	1,4038	122,77	-0,1528	3,1516	0,002118	2,2009
2	4	3,9221	343,62	0,00018	0,17096	2800139 0	0,6702	2,817	245,92	0,166866	6,2296	0,004219	4,3526
3	6	5,9721	523,82	0,001919	0,3893	-1,4E-33	2,4661	4,2567	371,62	-0,61308	9,4966	0,006337	6,6299
4	8	7,9899	697,25	0,003769	0,69864	-1,6E+18	3,9595	5,7064	497,5	-0,33044	12,641	0,00836	8,8646
%50 Doluluk												Ağırlık : 110,2 g / Öz ağırlık : 1,9488	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT
1	2	1,9646	284,12	6,08E-05	0,045949	0,003862	1,0597	1,404	202,68	0,203342	5,151	0,002135	2,3199
2	4	4,0027	578,38	0,000477	0,18969	-2,4E+14	1,293	2,8541	411,96	-0,22949	10,486	0,004193	4,7292
%80 Doluluk												Ağırlık : 143,7 g / Öz ağırlık : 2,541	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT
1	2	1,9803	313,4	8,9E-05	0,038764	1,93E-13	0,63211	1,4076	222,59	-0,28046	5,6818	0,002086	0,002086
2	4	3,9735	631,45	0,000277	0,1575	6,05E+10	1,2709	2,8353	448,47	-0,23007	11,448	0,004131	0,004131
%100 Doluluk												Ağırlık : 167,7 g / Öz ağırlık : 2,9656	
Mess.	Js mT	Jmax mT	Hmax A/m	Ps W/kg	Ss VA/kg	Jr mT	Hc A/m	Je mT	He A/m	DC %	Imax A	Umax V	Bmax mT
1	2	2,004	162,69	0,000113	0,017522	3041,6	1,0838	1,4273	115,64	0,942479	2,9494	0,002099	2,2083
2	4	3,9778	322,93	0,000119	0,068425	5145170	0,4221	2,8211	228,72	-0,06037	5,8546	0,004121	4,3832
3	6	6,0309	489,23	6,87E-05	0,15789	1,12E+31	0,22101	4,2893	347,05	-0,30385	8,8694	0,006276	6,645
4	8	7,9903	646,46	0,000868	0,27651	-1,9E+27	2,0901	5,6794	459,15	-0,1124	11,72	0,008186	8,8024
5	10	10,039	813,78	0,000653	0,43972	7,2E-17	1,2531	7,1582	579,28	-0,07346	14,753	0,010404	11,06

2.2. Tasarım Parametreleri

Bu çalışmada, rotor ve gövdelerde ferromanyetik özellik içermeyen PLA için %20'lik doluluk oranı, çelik dolgulu PLA kullanılacak olan stator için ise en yüksek manyetik alana ulaşılan %100'lük doluluk oranı tasarım parametresi olarak belirlenmiştir.

Tasarımda yer alacak oluk şekli oldukça önemli olup alternatörün manyetik, elektriksel ve fiziksel karakteristiğini oluşturan temel öğelerden biridir. Bu nedenle çeşitli oluk şekillerinin kendilerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bu nedenle literatürde oluk şekli üzerine birçok çalışma yer almaktadır. Günümüzde Şekil 1'de yer aldığı gibi ağız açık oluklar yaygındır. Oluk ağzının açıklığı daraldıkça alternatörün verimi yükselir [2]. Üretimde kolaylık sağlamasından dolayı yaygın olarak Resim 1.c ile gösterilen damla oluk kullanılır. Bu oluk geometrisinin harmonik kayıpları daha düşük, verimi ise diğer oluklara göre daha yüksektir [3].



Şekil 1. Günümüzde kullanılan oluk çeşitleri

Senkron alternatör ve motorlarda sürekli mıknatısların kullanımı yüksek güç yoğunluğu, verim, moment gibi kazanımlar sağladığından gittikçe yaygınlaşmaktadır [4]. Sürekli mıknatıslı senkron makinelerde uygulamaya bağlı olarak farklı malzemelerden oluşan, yaygın olarak da Neodimyum (NdFeB), samaryum kobalt (SmCo) ve ferrit, mıknatıslar tercih edilir [5]. NdFeB mıknatısların üstün manyetik özellikleri, kolay tedarik edilebilirliği ve yaygın kullanımı vardır [6]. Enerji verimliliği öncelikli olarak ele alındığında da SMSA'larda kullanılan mıknatıs türünün NdFeB olduğu görülür fakat çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır, bunların başında; darbelere karşı dayanıklı olmaması, Curie sıcaklık değerinin düşük olması ve buna bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda karakteristik özelliğini kaybetmesi gelir [7]. Yine de bu tür çalışmalar için yaygın olarak kullanılan mıknatıs türüdür.

Sürekli mıknatıslı senkron alternatörler için çok sayıda oluk/kutup kombinasyonu bulunmaktadır. Literatürde bununla ilgili yapılan çok fazla çalışma vardır. Bu çalışmalardan biri Tablo 2. de yer almaktadır. Nssp değerinin 0,5 değerinde veya daha düşük olması elektrik makinesinin sargı faktörünün yüksek seviyede olduğunu ifade eder. Tablo incelendiğinde ve iç rotorlu bir sistem için yazıcının yazma alanı hesaplanıp optimizasyon çalışması yapıldığında rotorun en fazla 40x5x10 mm geometrik boyuta sahip 40 kutuptan oluşabileceği hesaplanmıştır. Tablo da 40 kutup için en yüksek verimin 36 oluk mümkün olduğu görülmektedir.

Tüm bu çalışmalar sonucunda SMSA tasarım parametreleri Tablo 3'de listelenmiştir.

Tablo 2. Oluk/kutup oranı – sargı faktörü tablosu [8].

Nssp, Kw																				
Ns\2p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	0,5 0,866		0,25 0,866				0,125 0,866		0,1 0,866				0,07 0,866		0,062 0,866				0,05 0,866	
9		0,5 0,866	0,375 0,945	0,3 0,945	0,25 0,866						0,125 0,866	0,115 0,945	0,107 0,945	0,1 0,866						0,07 0,866
12			0,5 0,866	0,4 0,966		0,285 0,966	0,25 0,866								0,125 0,866	0,117 0,933		0,105 0,933	0,1 0,866	
15				0,5 0,866		0,357 0,951	0,31 0,951		0,25 0,866										0,125 0,866	
18					0,5 0,866	0,42 0,902	0,375 0,945		0,3 0,945	0,27 0,902	0,25 0,866									
21						0,5 0,866	0,437 0,870		0,35 0,953	0,318 0,953		0,269 0,89	0,25 0,866							
24	Nssp ≥ 1						0,5 0,866		0,4 0,966	0,36 0,958		0,307 0,95	0,285 0,966		0,25 0,866					0,19 0,943
27							0,5 0,866	0,45 0,877	0,36 0,958	0,375 0,945	0,346 0,954	0,321 0,954	0,3 0,945	0,281 0,915	0,264 0,877	0,25 0,866				
30								0,5 0,866	0,45 0,874		0,384 0,936	0,357 0,951		0,312 0,951	0,294 0,936		0,263 0,874	0,25 0,866		
33									0,5 0,866		0,423 0,903	0,392 0,928		0,343 0,954	0,323 0,954		0,289 0,928	0,275 0,903		
36												0,5 0,866	0,46 0,867	0,428 0,902	0,4 0,966	0,375 0,945	0,35 0,953		0,315 0,953	0,3 0,945

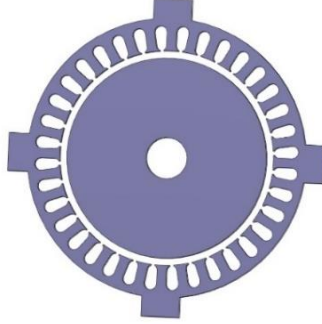
		Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar		Nssp ≤ 0,866
--	--	---------------------------------------	--	--------------

Tablo 3. SMSA Tasarım Parametreleri

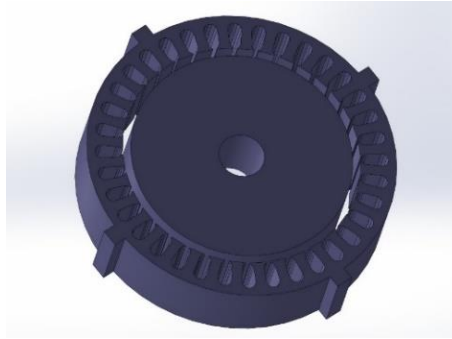
Genel Makine Parametreleri	
Makine Tipi	Radyal Akılı SMSA
Kutup Sayısı	40
Slot sayısı	36
Rotor pozisyonu	İç Rotorlu
Gerilim	380 V
Güç	0,75 kW
Stator Parametreleri	
Malzeme	Çelik Dolgulu PLA
Doluluk Oranı	%100
Dış Çap	210 mm
İç Çap	159 mm
Uzunluk	40 mm
Oluk Sayısı	36
Olut Hs0	0.5 mm
Olut Hs2	8,0635 mm
Olut Bs0	2.5 mm
Olut Bs1	6.46087
Olut Bs2	7.8718 mm
Rotor Parametreleri	
Malzeme	PLA
Doluluk Oranı	%20
Dış Çap	152 mm
İç (mil) çapı	26 mm
Uzunluk	40 mm
Mıknatıs Tipi	NdFeBr (N35)
Mıknatıs Ölçüleri	40x5x10 mm

2.3. Modelleme ve Analiz

Tablo 3’de belirtilen parametreler Ansys RMXprt modülüne girildiğinde Şekil 2’de iki boyutlu, Şekil 3’de ise üç boyutlu stator ve rotor modellemesi elde edilmiştir.



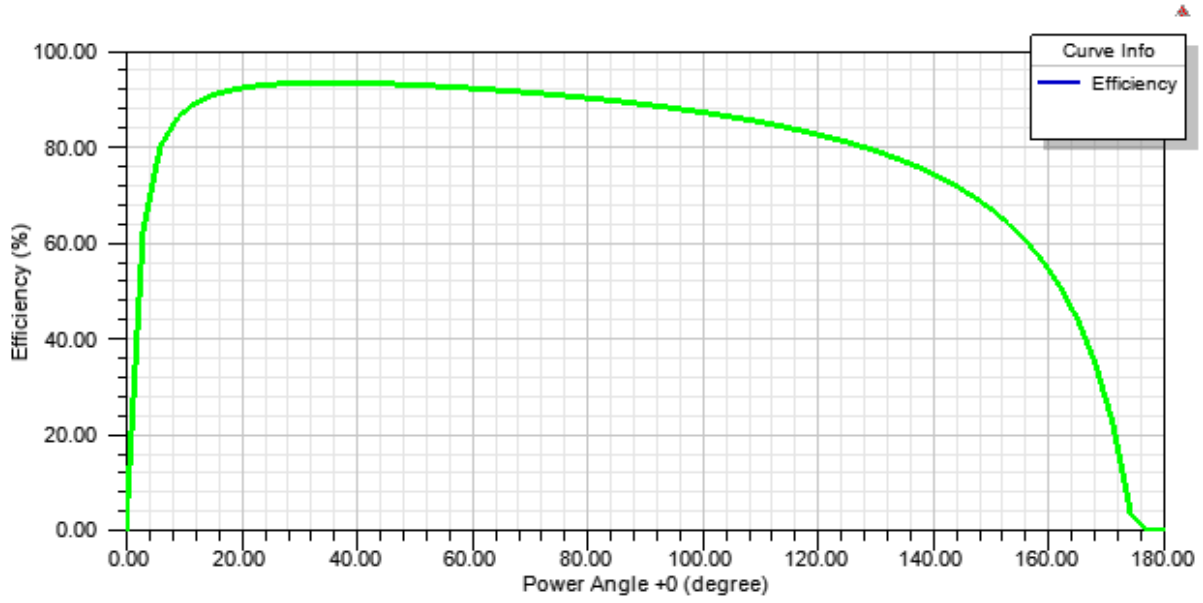
Şekil 2. Alternatörün 2 boyutlu görüntüsü



Şekil 3. Alternatörün üç boyutlu görüntüsü

Ansys Maxwell sadece geometrik model çıkarmak için değil aynı zamanda alternatör üzerinde birçok simülasyon yaparak çeşitli değerlerin hesaplamasını da sağlar. Mıknatıs, rotor ve çelik dolgulu PLA’da elde edilen veriler sonucunda stator malzemesi modüle tanımladıktan sonra modül yardımı ile statorda kullanılacak sargı tel kalınlığı ve sarım sayısı hesaplanarak; tel kalınlığı 0,50 mm ve sarım sayısı tek kat olmak üzere 76 olarak bulunmuştur.

Bütün bu çalışmanın sonucunda asıl varılmak istenen değer alternatörün verimidir. Rotoru PLA ve statoru Çelik dolgulu PLA ile üretilen SMSA’nın verim değer grafiği Şekil 4.’de yer almakta ve %90 olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Alternatör Verimi

3. Sonuç

Bu çalışma ile elektrik makineleri için yeni bir üretim metodu ortaya konulmuş ve teorik olarak bu metodun işlevselliği araştırılmıştır. Bu amaçla çelik dolgulu PLA ile ferromanyetik toroidal nüveler oluşturulmuş ve ferromanyetik özelliği deneysel yöntem ile elde edilmiştir. Sonuçta %100 doluluk oranının en iyi sonucu vereceği görülmüştür. Ardından standart 3B yazıcısı olan her kullanıcının üretebileceği bir SMSA tasarlanmış ve modellemesi ve hesaplamaları Ansys Maxwell ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin bu metodu uygulanabilir kıldığı görülmektedir. Bundan sonraki aşama bir prototip çalışması yapılarak teoride elde edilen verilerin uygulamada da test edilerek doğrulanmasıdır. Ayrıca bu yöntemin kabul görmesi halinde;

- Çelik dolgulu PLA'nın ferromanyetik özelliği arttıracak çalışmalar yapılabilir.
- Statorun 3B yazıcıda değişik dolgu yöntemleri ve oranları ile en verimli şekli bulunabilir.
- Stator ve rotor üretimin 3B yazıcı ile sağlanması, üretimi esnekleştireceğinden bu duruma uygun yeni stator ve rotor tasarımları geliştirilebilir.

Teşekkür:

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FEN-C-YLP-130219-0033 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Ahmad M.Z, Sulaiman E, Kosaka T. Optimization of outer-rotor hybrid excitation fsm for in-wheel direct drive electric vehicle. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2015; March: 6–8:696 – 691.
- [2] Jang G. H, And Park S.J. Characterization of a single-phase induction motor due to the effect of slot opening. IEEE Transaction on Magnetics, 2004; August: 24: 2067 – 2065.
- [3] Serteller, N.F, Mergen, A.F. Sincap kefesli indüksiyon makinalarında değişik rotor oluk dizaynının oluk harmonikleri üzerine etkisi. Eleco`2000 elektrik - elektronik - bilgisayar mühendisliği sempozyumu ve fuarı, 2000; 96–98
- [4] Özçira, S, Bekiroğlu, N, Şenol, İ, ve Ayçiçek, E. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda doğrudan moment kontrolünün incelenmesi ve benzetim çalışmasının gerçekleştirilmesi. EMO Bilimsel Dergi, 2012; 2(3): 6 – 1.
- [5] Petrov, I, Egorov, D, Link, J, Stern, R, Ruoho, S, Pyrhönen, J. Hysteresis losses in different types of permanent magnets used in pmsms. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017; 64(3): 2510–2502.
- [6] Ataman, V. Kalıcı mıknatıslı eksenel akılı girdap akımı freninin tasarım optimizasyonu. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi; 2017.
- [7] Mutluer, M. Yapay zekâ tekniklerini kullanarak yüksek verimli kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı. Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya: T.C. Selçuk Üniversitesi; 2013.
- [8] Tanç, G, Elektrikli bisikletler için fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve üretimi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi; 2014.