

HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DÜŞÜK ÇALIŞMA GERİLİMİNDE İÇ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI

Gökhan ERDOĞAN¹, Yener TAŞKIN², Hasan TİRYAKİ^{3*}

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4285-9919>

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-1923-2672>

³ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9175-0269>

Anahtar Kelimeler	Öz
İç rotor BLDC motor Düşük Çalışma Gerilimi Verim BLDC Motor Boyutlandırma Sonlu Elemanlar Yöntemi	<i>Bu çalışmada, hibrit araçlar için paralel yapıda kullanılabilmeye yönelik yüksek güç, yüksek verim ve yüksek moment özelliklerini sağlayan yüksek çalışma gerilimindeki (300 V) iç rotorlu fırçasız doğru akım motor tasarımı yerine daha düşük bir gerilimde (96 V) yeniden tasarlanması amaçlanmıştır. Bu tasarım çalışmaları ve sonlu eleman analizleri ANSYS Electronics Desktop paket programıyla yapılmıştır. Deney aracı olarak seçilen bir hafif ticari araç verileri kullanılarak uygulama esnasında ihtiyaç duyulacak olan parametreler (moment, güç, devir) hesaplanmış ve motor tasarımları bu parametreler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan elektrik motorları, yüksek devirlerde yüksek güç ve moment ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla genellikle 400 V gibi yüksek çalışma gerilimlerinde üretilmektedir. Yüksek gerilimlerdeki elektrik motor ve sürücülerinde çekilen güce bağlı olarak hat üzerinden geçen akım değerinin düşük olması fayda sağlarken, motor sürücünün geliştirilmesinde kullanılan komponentlerin maliyetlerinin ve elektrik çarpması riskinin artmasına neden olmaktadır. Bu çalışma ile üretilecek olan fırçasız doğru akım motorunun sürücü kısmındaki komponent maliyetlerinin azaltılması ve araç içerisindeki DC bara geriliminin tehlikeli alt sınırın altında olması amaçlanarak tasarımı yapılan yüksek gerilimdeki motorun çalışma gerilimlerinin düşürülmesi sağlanmıştır.</i>

INNER ROTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DESIGN AT LOW OPERATING VOLTAGE FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES

Keywords	Abstract
Inner Rotor BLDC Motor Low Operating Voltage Efficiency BLDC Motor Sizing Finite Element Method	<i>In this study, it is aimed to repattern at a lower voltage (96 V) instead of a brushless direct current motor design with internal rotor at high operating voltage (300 V), which provides high power, high efficiency and high torque features for hybrid vehicles to be used in parallel structure. These design studies and finite element analysis have been done with ANSYS Electronics Desktop software. Using the data of a light commercial vehicle selected as the test vehicle, the parameters (torque, power, speed) that will be needed during the application were calculated and motor designs were made taking these parameters into consideration. Electric motors used in electric and hybrid vehicles are generally produced at high operating voltages such as 400 V in order to meet the high power and torque requirement at high speeds. While it is beneficial that the current value passing through the line is low depending on the power drawn in the electric motors and drivers at high voltages, it causes the cost of the components used in the development of the motor driver and the risk of electric shock to increase. With this study, it was ensured that the component costs in the driver part of the brushless direct current motor to be produced were reduced and the operating voltages of the designed high voltage motor were reduced with the aim of keeping the DC bus voltage inside the vehicle below the dangerous lower limit.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 20.07.2022

Submission Date : 20.07.2022

Kabul Tarihi : 06.02.2024

Accepted Date : 06.02.2024

* Sorumlu yazar: hasan.tiryaki@istanbul.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1146133>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Günümüzde fosil yakıtların hızla tükenmesi, otomotiv sanayii ve yan sanayideki üreticileri çevresel salınımları ve fosil yakıtla bağımlılıkları daha az olan araçların ve ekipmanlarının geliştirilip üretilmesine sevk etmiştir. Bu durum içerisinde, her geçen gün yeni elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve bu tarz araçlara yönelik bileşenler üretilmektedir (Ustun, Yılmaz, Gökçe, Karakaya ve Tuncay, 2009.).

İçten yanmalı motor kullanılan araçlardaki en büyük enerji kaybı yakıtın yakılmasıyla elde edilen enerjinin hareket enerjisine çevrilmesi anında olmaktadır. İçten yanmalı motorlarda mekanik kayıpların ve sürtünme kayıplarının fazla olmasından dolayı elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları çok daha cazip hale gelmektedir. Hareketin elektrik enerjisiyle sağlandığı elektrik motorlarında verim oranları %90 ve üzerlerine çıkabilmektedir. Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlardaki kaybın en önemli bileşeni elektrik motorudur. Bu nedenle motor tasarımı büyük önem arz etmektedir (Zarko, Ban ve Lipo, 2009).

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda, asenkron, senkron, fırçalı DC, fırçasız DC gibi birçok elektrik motoru kullanılmaktadır. Fırçasız doğru akım motorları; yüksek verim, yüksek moment, küçük hacim ve düşük ağırlıklarından dolayı elektrikli araç uygulamaları dışında havacılık, elektronik, bilgisayar teknolojileri gibi çeşitli sektörlerde yüksek yoğunluklarda kullanılmaktadır (Zhao, Ham, Zheng, Wu, Sundaram, Kapat ve Chow, 2007).

Fırçasız doğru akım motoru, adından da anlaşılacağı üzere komütasyon için ya da bir diğer adıyla dönüşün sağlanması için fırça, slipring veya mekanik komütatör kullanmayan motorlardır. Bu tarz motorlarda, DC akımın taşındığı sarımların etrafında bulunan sabit manyetik alanlı mıknatıslar sabit bir açıda bulunmaktadır. Fırçasız doğru akım motorunun dönüşe başlaması ve devam edebilmesi için mıknatısları karşılayan DC akımın geçtiği iletkenlerin polaritelerinin sürekli değiştirilmesi gerekmektedir. Bu polarite değişikliğinin sağlanması işlemine komütasyon denilmektedir (Husain, 2003).

Komütasyon için elektrik motoru içerisinde fırça, slipring gibi ekstra komponentlerin kullanılmaması genel olarak fırçasız motorların verimliliğini arttırmaktadır. Fırçasız motorlar doğru akım ve alternatif akım motoru olmak üzere iki çeşittir. Fırçasız doğru akım motoru ve fırçasız alternatif akım motoru fiziksel olarak aynı yapıdadır; her ikisi de dönen sabit mıknatıslara ve 3 fazlı stator sargılarına sahiptir. Aralarındaki temel fark ise, alternatif akım makine senkron bir hızda döner ve sargı fazları sinüzoidal olarak stator üzerine dağıtılmış, doğru akım makinede ise sargı fazları 60 derecelik bir dağıtılmış yapıdadır.

Fırçasız doğru akım motoru "self-senkron" veya "oto-senkron" olarak da adlandırılmaktadır. Bu tarz motorlarda komütasyon rotorun pozisyonuyla alakalı olduğu için senkronizasyon sürekli kontrol altında tutulmaktadır. Sürüş frekansı ne kadar düşük olursa, motorun dönüş hızı da o kadar düşük olacaktır (Hendershot ve Miller, 2010).

Motorun kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak fırçasız doğru akım motorlarının tasarımında en önemli parametrelerden biri en uygun çalışma geriliminin belirlenmesidir. Çalışma gerilimi, motorun kullanım amacının yanı sıra oluk-kutup kombinasyonunun belirlenmesi, motor sürücüsünün performansı, verimlilik, güç, moment ve üretim maliyeti gibi birçok unsuru doğrudan etkilemektedir. Elektrikli ve hibrit otomobillerde, temel olarak elektrik motoru, enerji depolama sistemi ve motor sürücü kullanılmaktadır (Sanguesa, Torres-sanz, Garrido, Martinez ve Marquez-barja, 2021). Motorun çalışma geriliminin artırılması (120V ve üzeri), elektrik çarpması riskinin artmasının yanında, motor sürücü içerisinde kullanılan anahtarlar ekipmanlarının maliyetlerinin artmasına, iletkenler arasındaki açıklık ve sızıntı mesafelerinin daha büyük olmasına ve son olarak sürücünün IPXX sızdırmazlık koruma sınıfının yüksek olmasına sebep olmaktadır.

Shrivastava ve Brahmin, elektrikli araç uygulamalarında kullanılmaya yönelik dış rotorlu üç fazlı iki farklı oluk/kutup kombinasyonundaki fırçasız doğru akım motor tasarımı yapmış, tasarım sonuçlarını bu çalışmalarında irdelemiştir. Yapmış oldukları motor tasarımı 300 V yüksek gerilimde çalışan ve birim hacimden alınabilen moment miktarı düşük olan bir motor özelliğindedir (Shrivastava ve Brahmin, 2014). Bu çalışmaya paralel olarak Rahim N.A. ve diğerleri, 150 kg'dan daha düşük olan elektrikli araçlar için aksiyel yapıda 300 V yüksek gerilimde çalışan, hacimsel olarak daha küçük olan bir fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirmiştir (Rahim, Ping ve Tadjuddin, 2007).

Öte yandan nispeten daha düşük çalışma gerimine sahip motorlara yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, Nair S.S. ve diğerleri, aksiyel yapıdaki 48V gerilimde çalışan, 4000 rpm' de olan fakat düşük moment ve düşük güçte bir fırçasız doğru akım motoru tasarımı yapmış, farklı oluk ve mıknatıs şekilleriyle elektromotor kuvvetinin dalga biçimlerinin ve tutma moment değerinin azaltılmasını sağlamıştır (Nair, Nalakath ve Dhinagar, 2011). Ayrıca Uygun ve Solmaz tarafından yapılan çalışmada yapılan faaliyetlere benzer şekilde, dış rotorlu bir fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve sonlu eleman analizlerini tipik yöntemlerle gerçekleştirmiştir. Yapmış oldukları çalışmada, 60V gerilimde çalışan, 1100 rpm' de olan fakat binek araçlar için yeterli güç ve moment değerlerini sağlayamayan bir motor tasarımı elde etmiştir. Elde edilen motor

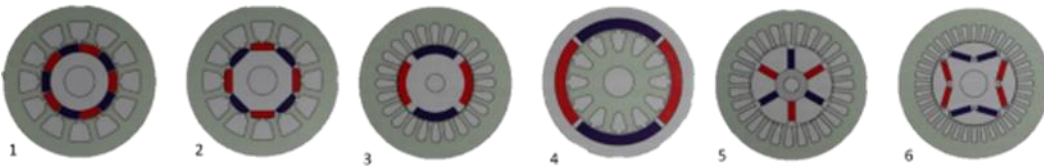
tasarımının, sonlu eleman analizlerinde moment grafikleri, akı çizgileri, hız ve verimlilik parametreleri incelenmiş ve motorun paralel yapıda çalışabilecek hibrit araçlarda kullanımını önermiştir (Uygun, ve Solmaz, 2015).Güneş enerjisiyle çalışan araçlar ve bu araçlar ile dünya çapında düzenlenen yarışmalar elektrikli ve hibrit araçların gelişmesine, farkındalığın artırılmasına büyük katkı sağlamaktadırlar. Güneş arabaları için yapılan çalışmaların başında, elektrik motorları, batarya paketleri, güneş hücreleri gelmektedir (Thacher, 2015). Güneş arabalarının harcadığı elektrik enerjisinin en önemli kısmı elektrik motorları tarafından harcadığı düşünüldüğünde, daha verimli elektrik motorlarının üretilmesi konusu büyük bir önem arz etmektedir. Güneş enerjili araçlar için tasarlanan motorlar, binek araçlar için tasarlanana göre daha düşük gerilimlerde (48V) çalışmalarına rağmen düşük güç ve moment (2kW, 5 Nm) üretebilmektedirler (Singh, Marwaha ve Singh, 2017). Güneş arabalarında ve çeşitli paralel hibrit uygulamalarda tekerlek içi sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları kullanılmaktadır. Çabuk, Sağlam ve Üstün tarafından yapılan farklı sargı yapılarının etkilerinin incelendiği çalışmada anlatılan tasarımını gerçekleştirmiş oldukları fırçasız doğru akım motoru 150V çalışma geriliminde yaklaşık 30Nm moment üretebilmektedir (Çabuk, Sağlam ve Üstün, 2019). Tekerlek içi doğru akım motor uygulamasının bir örneğini de Akar, Eker ve Akın ülkemizde düzenlenen yarışmalar için ürettikleri prototip elektrikli araç için geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri fırçasız doğru akım motoru, tehlikeli alt sınır gerilimi altında çalışmasına rağmen ürettiği moment ve güç, herhangi bir hibrit araç uygulamasında kullanılmak için yeterli olmamaktadır (Akar, Eker ve Akın, 2021).

Mukherjee ve Sengupta, ANSYS RMxprt modülünü kullanarak elektrikli araç uygulamalarında kullanılmak üzere iç rotorlu, neodmiyum mıknatısların kullanıldığı bir fırçasız doğru akım motor tasarımı ve prototip

imalatı gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada, 1500 rpm devir hızına sahip, 400V dc gibi yüksek bir gerilimde çalışan bir motor gerçekleştirilmiştir (Mukherjee ve Sengupta, 2014).

Kerem, hafif elektrikli prototip otomobil için dış rotorlu, 96V çalışma geriliminde 2kW güç ve 20Nm moment üretebilen bir fırçasız doğru akım motoru tasarımı gerçekleştirmiş ve prototip testlerini yapmıştır. Geliştirmiş olduğu motor, hafif elektrikli otomobiller (L7 sınıfı) için uygun olabilmesine rağmen bu çalışmadaki gibi bir otomobil için gerekli olan moment ve güç değerlerini sağlayamamaktadır (Kerem, 2021).

Fırçasız doğru akım motorlarında aksiyel, radyal olmak üzere iki farklı tasarım tipi bulunmaktadır. Aksiyel tasarımlarda, hava aralığında harcanan enerji daha düşük olabilmekte, daha yüksek verimli motorlar elde edilebilmektedir (Saxena, 2014). Aksiyel tasarımların bu avantajından dolayı fırçasız doğru akım motor tasarımlarında günümüzde bu topolojiden de yararlanılmaktadır. Nugraha, Yuniarto, Herizal, Asfani, Riawan ve Wahyudi, elektrikli bisiklet uygulamalarında kullanılmak üzere, diğer benzer çalışmalara göre daha düşük gerilimde (100V) çalışan, aksiyel topolojide bir motor tasarımı yapmıştır. Yapılan tasarımın gücü ve devir hızı çok düşük olmamasına rağmen (5 kW - 5000 rpm) günümüz elektrikli ve hibrit araç uygulamalarında kullanılmaya uygun değildir (Nugraha, Yuniarto, Herizal, Asfani, Riawan ve Wahyudi, 2018). Aksiyel motor tasarımlarında, radyal tasarımlara göre daha düşük hacimlerde aynı güç ve moment değerlerine ulaşabilmektedir. Fakat bu değerlere erişilebilmesi için aksiyel motorların çift hava aralığına sahip olması gerekmektedir. Bu durumda hem motorun üretim maliyeti artmakta hem de bakır kayıpları artmaktadır. Ayrıca aksiyel motorların imalat toleransları, radyal motorlara göre kıyaslandığında çok daha düşük olduğu için üretim maliyetlerini arttırdığından dolayı bu çalışmada radyal bir motor tasarımı tercih edilmiştir (Sitapati ve Krishnan, 2001).



Şekil 1. Fırçasız Makine Tipleri (Hendershot ve Miller, 2010)

Fırçasız doğru akım motorları, genel olarak Şekil 1'de temsili görselleri verildiği üzere altı farklı tipte üretilmektedir. Bahsi geçen tiplerden dört numaralı görselde verilmiş olan dış rotorlu, diğer beş farklı tip ise iç rotorlu yapıdadır. Rotor gövdesi üzerine sabit mıknatısların monte edildiği fırçasız doğru akım motorları yüksek verimlilik sağladıklarından dolayı

hafif elektrikli ve hibrit otomobil uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Hendershot ve Miller, 2010). Bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan motorlar Şekil 1' de verilmiş iki numaralı görseldeki rotor yüzeyine monte edilmiş sabit mıknatıslardan oluşan iç rotorlu yapıdadır.

Bu çalışmada yukarıda özetlenen literatürdeki

çalışmalara destek vermek amacıyla hafif ticari sınıfta paralel hibrit yapıda olan araç için tasarlanmış olan yüksek çalışma gerilimindeki (300 V) fırçasız doğru akım motoru, tehlikeli alt sınır altında kalan gerilimde (96 V) çalışabilecek şekilde farklı kutup-oluk kombinasyonunda yeniden tasarlanmıştır. Çalışma bu yönüyle motor ve motor sürücü tasarımları için güvenilirlik ve ekonomiklik kriterlerinin sağlanması açısından araştırmacılara ışık tutmaktadır. Motorun çalışma geriliminin düşürülmesi, hat ve faz akımlarının artmasına sebep olmaktadır. Çalışmanın devamı niteliğinde olan motor sürücü tasarımında tercih edilen anahtarlar ekipmanı (Infineon IRFP 4310ZPBF) faz başına 6 paralel şeklinde kullanılmaktadır. Mosfetin teknik verileri incelendiğinde maksimum çalışma akımı değerinin, çalışma için ihtiyaç duyulan değer üstünde olduğu açıkça görülmektedir (Infineon IRFP 4310ZPBF, 2022).

Çalışmanın Materyal ve Metot kısmında; tasarlanan fırçasız doğru akım motorunun kullanılacağı hibrit araca ait katalog verileri ve bu veriler kullanılarak yapılan moment, güç ve hız hesaplamaları "Araç Parametreleri ve Hesaplamalar" isimli alt başlığında detaylı bir şekilde verilmiştir.

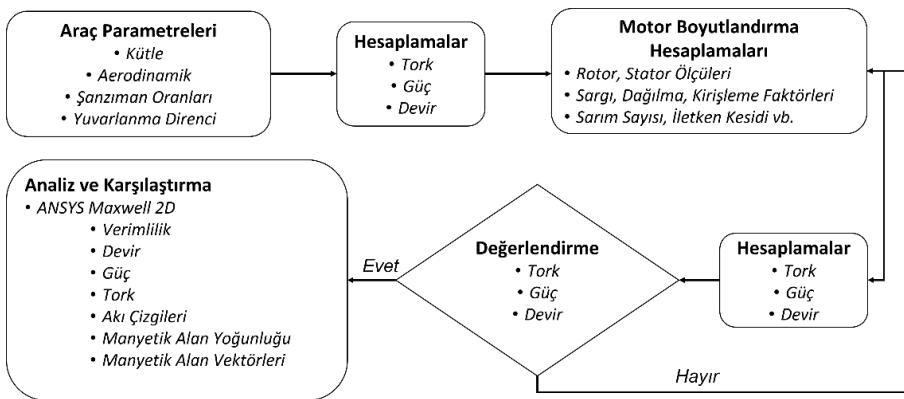
Motor tasarımı yapılırken baz alınan temel adımlar ve tasarım adımları "Motor Tasarım Çalışmaları" isimli alt başlığında ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen motor performans özellikleri kullanılarak gerçekleştirilen motor boyutlandırma aşaması "Motor Boyutlandırmasının Yapılması" isimli alt başlığında paylaşılmıştır. Motor boyutlarının belirlenmesinin ardından, ANSYS Electronics Desktop yazılımının RMXprt modülü kullanılarak fırçasız doğru akım motorunun ilk aşamalarda hesaplanan performans özellikleri olan moment, güç ve hız performans özelliklerinin değerlendirilmesi "Sonuçlar ve Tartışma" başlığının altında yapılmıştır.

Analitik hesaplamalar ile yapılan değerlendirme sonucunda ihtiyaç duyulan performans özelliklerinin sağlanması durumunda iki farklı motor tasarımının sonlu eleman analizleri ve karşılaştırılması "Sonuçlar ve Tartışma" başlığının altında verilmiştir.

Motor tasarımlarının, analitik hesaplamalarının ve 2B sonlu eleman analizlerinin sonuçları, Bulgular kısmında aktarılmış ve son olarak elde edilen performans değerleri Tartışma ve Sonuç kısmında yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bir hibrit elektrikli araçta kullanılmak üzere gerçekleştirilen fırçasız doğru akım motoru tasarımı genel olarak araç parametrelerinin belirlenmesi, ihtiyaç duyulan performans özelliklerinin belirlenmesi, hesaplanan özellikler için motor boyutlandırmasının yapılması, motor tasarımının yapılması, analitik hesaplamalar ve sonlu eleman analizleri olmak üzere beş adımdan oluşmaktadır. Bu aşamalardan ilki, hesaplamalar için gereken araç parametrelerinin belirlenmesidir. Bu amaçla, çalışma kapsamında kullanılacak olan hafif ticari aracın katalog bilgilerinden faydalanılmıştır. Hafif ticari aracın katalog bilgileri kullanılarak, bir sonraki aşamada aracın seyri için ihtiyaç duyulan moment, güç ve hız performans özellikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan motor performans özelliklerini sağlayabilmek için fırçasız doğru akım motoru boyutlandırma hesapları bir sonraki aşamada hesaplanmıştır. Motor boyutlarının belirlenmesinden sonraki aşamada ANSYS Electronics Desktop yazılımının RMXprt modülü kullanılarak motor tasarımı yapılmış ve son aşamada tasarımların analitik hesaplamaları ve sonlu eleman analizleri yine aynı yazılımın Maxwell modülü kullanılarak yapılmıştır. Bahsi geçen bütün aşamalara ait yapılan çalışmalara ilişkin bir akış şeması Şekil 2'de paylaşılmıştır.



Şekil 2. Motor Tasarım Çalışmaları Akış Şeması

Motor tasarım çalışmaları kapsamında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen tork, güç ve devir parametrelerinin değerlendirilmesi sonucunda

ihtiyacın karşılanmadığı tasarımlarda boyutlandırma hesaplarında varsayımsal olarak kullanılan değerler; hava aralığındaki manyetik alan yoğunluğu, armatür

akım yoğunluğu, stator sacları üzerindeki manyetik alan yoğunlukları ve mıknatıs kaliteleri değiştirilerek analitik hesaplamalar yenilenmiştir.

2.1. Araç parametreleri ve hesaplamalar

Çalışma kapsamında tasarlanan fırçasız doğru akım motoru ve paralelde yürütülen diğer çalışmalar sonucunda elde edilecek olan diğer bileşenler (elektronik kontrol birimi, motor sürücüsü, batarya yönetim sistemi vb.) hafif ticari bir aracın dış gövdesi ve şase kısmı kullanılarak şehir içi testlere tabii tutulacaktır. Tasarım çalışmalarının ve şehir içi testlerin yapılacağı aracın parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Araç Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Araç Kütlesi (kg)	m	1840
Ulaşılabilecek Hız (km/h)	V	70
Tekerlek Açısal Hızı (rad/s)	$\omega_{tekerlek}$	109,32
Hızlanma Süresi (s)	t	13,1
Rüzgâr Sürüklenme Katsayısı	C_d	0,37
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	C_{rr}	0,02
Projeksiyon Alanı (m ²)	A	1,8
Tekerlek Yarıçapı (inç)	r	7
Şanzıman Oranı	R	1,258
Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	ρ	1,225

Bu bilgiler ışığında gerekli hesaplamalar aşağıda yapılmıştır (Vargo, 2013).

Aracın hareketi için yenmesi gereken kuvvet (F_T); tekerlek ile yol arasındaki sürtünmeden kaynaklanan yuvarlanma direnci kuvveti (F_{rr}), aracın gövdesi üzerindeki hava akışından kaynaklanan sürüklenme kuvveti (F_d) ve aracın ivmelenmesi için gerekli olan ivmelenme kuvveti (F_a)'nin toplamından oluşmaktadır (Reif ve Dietsche, 2014). Gerekli olan kuvvetin hesaplanmasında yol eğimi ihmal edilmektedir. Bunun nedeni ise, aracın ihtiyaç duyulan hıza (70 km/h) ulaştığında eğimsiz bir yolda seyir halinde olacağı öngörülmekte, motorun ivmelenme anında sağlaması gereken tork değerinin araç eğimli bir yolda seyir halindeyken de yeterli olacağı öngörülmektedir.

$$F_T = F_{rr} + F_d + F_a \quad (1)$$

Yuvarlanma direnci kuvveti, yolun araç tekerleği üzerinde oluşturduğu deformasyondan kaynaklanmaktadır. Eşitlik 2'de yer alan C_{rr} değeri yuvarlanma direnci katsayısını ifade etmektedir.

$$F_{rr} = mgC_{rr} \quad (2)$$

Aerodinamik sürüklenme kuvveti (F_d), aracın gövdesi üzerindeki viskoz sürtünmeden kaynaklanmakta olup

aracın gövdesinin projeksiyon alanına (A), sürüklenme katsayısına (C_d), akan havanın yoğunluğuna (ρ) ve aracın rüzgara göre bağıl hızına (V) bağlıdır.

$$F_d = 0,5C_dA\rho V^2 \quad (3)$$

İvmelenme kuvveti (F_a), aracın statik kütlesi (m) ve istenilen hıza ulaşmak için gerekli olan ivmeye (a) bağlıdır.

$$F_a = ma \quad (4)$$

Hesaplanan bütün kuvvetlerin toplamı Eşitlik 1'de gösterildiği gibi aracın hareketi için gerekli olan toplam kuvveti vermektedir. Hesaplanan kuvvetler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hesaplanan Kuvvetler

Kuvvet	Sembol	Değer
Yuvarlanma Direnci Kuvveti (N)	F_{rr}	361,00
Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti (N)	F_d	154,16
İvmelenme Kuvveti (N)	F_a	2730,50
Toplam Kuvvet (N)	F_T	3245,66

Toplam kuvvet aracın tahrik tekerleğinin merkez noktasında olması gereken yani motorun sağlaması gereken moment değerini bulmak için kullanılacaktır. Araçta kullanılan tekerlekler 14 inç çapındadır. Hesaplanan toplam kuvvet ile tekerlek yarıçapının çarpım sonucu ihtiyaç duyulan moment değerini vermektedir.

$$T_a = F_T r \quad (5)$$

$$T_c = (F_{rr} + F_d)r \quad (6)$$

$$P = T_c \omega \quad (7)$$

İhtiyaç duyulan moment değerinin (T), tekerleklerin açısal hızı ile çarpılması sonucunda ihtiyaç duyulan mekanik güç (P) hesaplanmıştır. Bahsi geçen güç herhangi bir sürtünme kuvvetinin ve herhangi bir aktarma organındaki kaybin dahil olmadığı güç olup tasarlanması gereken motorun bu güç değerinden daha yüksek bir güç değerini sağlayabilmesi gerekmektedir.

Fırçasız doğru akım motorunun, araç 70 km/saat seyir hızında iken; Eşitlik 7 kullanılarak 12,6 kW güce ve Eşitlik 6 kullanılarak 91,59 Nm momente sahip olması gerektiği hesaplanmıştır. Proje sonucundaki geliştirilen ürünlerin şehir içi testleri için kullanılacak olan araca 3. vites oranı 1,258 olan otomatik şanzıman entegre edilecektir. İçten yanmalı motor ile elektrik motoru geliştirilecek olan hibrit araçta şanzımanın öncesinde

konumlandırılacak ve her iki motorda manyetik kavramalar kullanılarak tahrik sistemine bağlanması veya ayrılması sağlanacaktır. Eşitlik 8'de motor açısız hızı (w_{motor}), tekerlek açısız hızı ($w_{tekerlek}$) ve şanzıman oranının (R) çarpılması ile hesaplanmıştır.

$$w_{motor} = w_{tekerlek} R \quad (8)$$

Yapılan hesaplamalar ve varsayımlar sonucunda tasarlanması gereken fırçasız doğru akım motorunun sahip olması gereken değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Nominal Motor Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Motor Devri (rpm)	w_{motor}	1315
İvmelenme Moment (Nm)	T_a	577,07
Sabit Hız Moment (Nm)	T_c	91,59
Mekanik Güç (kW)	P	12,6

2.2. Motor tasarım çalışmaları

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda, bütün motor tiplerinde (fırçasız, fırçalı, senkron, asenkron, doğru akım ve alternatif akım vb.) yapılacak olan tasarım işlemlerinde temel olarak aşağıda sıralanmış olan maddeler baz alınmaktadır (Hendershot ve Miller, 2010).

- Makine tipine ve kontrol metoduna karar vermek,
- Faz sayısı, kutup ve oluk sayısına karar vermek,
- Temel ölçüler ve malzemelere karar vermek,
- Rotor tasarımı yapmak,
- Stator gövdesini saclar veya nüveler kullanılarak tasarlamak,
- Stator sargılarını tasarlamak.

Yukarıda sayılan maddelerden de anlaşılacağı üzere, literatürde geçen bu adımlar çok temel olarak belirlenmiştir. Bu maddelerin hepsinde ve ayrı ayrı teorik hesaplamalar, analizler ve çeşitli iterasyonlar yapılması gerekmektedir.

Fırçasız doğru ve alternatif akım motorlarının dönen mıknatıslara ve sabit sargılara sahip olan birden çok farklı konfigürasyonu bulunmaktadır.

Bu farklılıkların temel nedeni, farklı uygulamaların gelişmesi ve fırçasız makineler üzerine son 30 yıldır yapılan çalışmalardır. Yapılan farklı çalışmalar sonucunda çeşitli geliştirmeler fark edilmiş ve farklı tipte fırçasız makineler ortaya çıkmıştır. Literatüre göre şu ana kadar geliştirilmiş olan ve kullanılan fırçasız makine tipleri Şekil 1'de verilmiş ve özellikleri aşağıda anlatılmıştır.

Fırçasız makineler çalışmanın giriş kısmında anlatıldığı üzere, birden çok farklı tipte geliştirilmekte ve üretilmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilecek olan hibrit elektrikli aracın ihtiyacını karşılayabilmek için gerekli olan; güç (yaklaşık 15 kW), moment (yaklaşık

100 Nm) ve devir (yaklaşık 1300 RPM) değerlerine ihtiyaç vardır. Bu değerleri karşılayabilmek amacıyla Şekil 1'de görülen ikinci tip yani, somun ekmek geometriye yüzey-mıknatıs motor topolojisine karar verilmiştir. Aynı zamanda yüzey-mıknatıs tipinde bir makine olduğundan dolayı sabit mıknatısların oluşturacağı elektromotor kuvveti sinyallerinin şekillerinden dolayı kare dalga işaretli sinyallerle sürülmesi gerekmektedir.

Fırçasız doğru akım motorlarında seçilecek olan faz sayısı 2, 3, 4, 5, 6, 9 gibi sayılarda olabilmektedir. Dört ve yukarısında olan faz sayıları yüksek güçlü motorlar için tercih edilmektedirler. Geliştirilecek olan sürücünün daha kolay bir altyapıya sahip olabilmesi ve testler için kullanılacak hazır ürün bulmanın daha kolay olacağından dolayı 3 fazlı bir tasarıma karar verilmiştir.

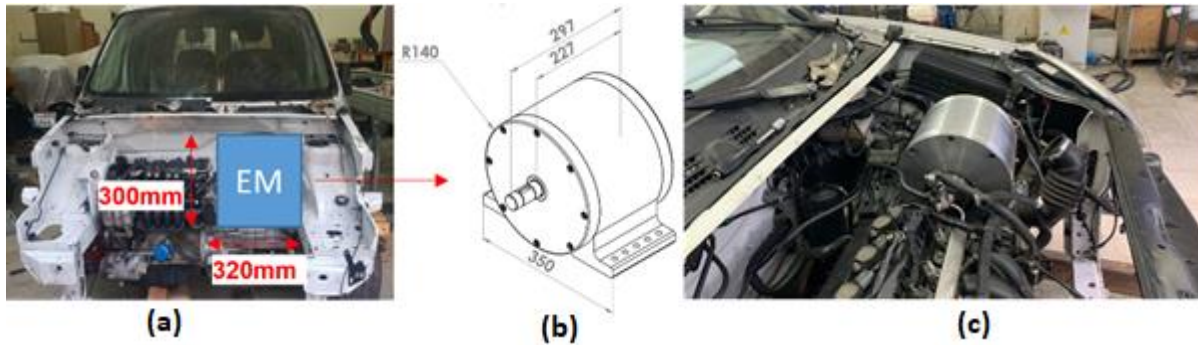
Elektrik makinelerinde tercih edilecek olan kutup-oluk sayısı ve bu ikisinin birbirine oranı; motor statoru üzerindeki iletken dağılım yoğunluğu ve tutma momentini direkt olarak ilgilendirdiğinden oluk ve kutup sayısını birlikte değerlendirmek gerekmektedir. Motorda tercih edilecek olan kutup sayısı; kullanılacak sabit mıknatısların malzeme ve kalitesine, iç veya dış rotorlu olmasına, devir sayısına ve motorun montaj şekline bağlıdır. Kendinden kalkışlı olan makinelerde oluk sayısı / kutup sayısı ($S / 2p$) oranı 1' e eşit olmamalıdır, bunun nedeni ise faz farkı oluşturup dönüşün sağlanabilmesidir.

Temel ölçüler için, motor tasarımının yapıldığı uygulamadaki motor için ayrılabilir olan hacim baz alınmaktadır. Bu belirlenen hacim içerisinde bir tasarım yapılmaya çalışılmaktadır. Malzemeler için ise, sabit mıknatıslarda genellikle nadir elementlerin kullanıldığı neodmiyum alaşım mıknatıslar farklı kalitelere (N35M, N50M vb.) kullanılmaktadır. Neodmiyum mıknatıslar, piyasada bulunabilen diğer seramik mıknatıslara göre çok daha yüksek çekim gücüne ve bu çalışma için yeterli olan çalışma sıcaklığına sahiptirler. Neodmiyum

mıknatıslardaki kalite ifadesi, mıknatısın çekim gücünü ve çalışma sıcaklığını ifade etmektedir. Neodmiyum mıknatısların kalitelerindeki N ifadesi Neodmiyumu ifade etmekte, sonrasında gelen iki haneli sayı ise mıknatısın üretebileceği maksimum enerji çarpımı (BH) ifade etmektedir. Elektrik motorlarının stator ve rotor gövdeleri için ise yüksek verimliliğin sağlanabilmesi amacıyla genellikle yönlendirilmemiş silisli saçlar kullanılmaktadır.

2.3. Motor boyutlandırmasının yapılması

Çalışma kapsamında tasarlanmış olan fırçasız doğru akım motorunun sahip olması gereken özellikler (moment, devir ve güç) belirlendikten sonra, uygulama alanındaki hacim için gerekli olan motor boyutlarının hesaplanması gerekmektedir (Hendershot ve Miller, 2010). Çalışma kapsamında geliştirilen motorun konumlandırılacağı alanın boyutları (a) ve tasarlanmış olan motorun son durumdaki ölçüleri (b) Şekil 3'te verilmiştir. Ayrıca üretilmiş olan motorun entegre edilmiş hali ise Şekil 3.c'de verilmiştir.



Şekil 3. (a) : Elektrik Motoru Maksimum Paketleme Ölçüleri, (b) : Üretilmiş Olan Motorun Ölçüleri, (c) : Elektrik Motorunun Montajı Sonrasındaki Kaput Altı Yerleşimi

Araç kaputunun içerisinde elektrik motorunun paketlenmesi için sabitleme sehpası ve ekstra motor kulakları entegre edilmiştir. Bu parçaların entegrasyonu göz önüne alınarak maksimum boyutlar belirlenmiştir. Ölçülen maksimum boyutlar içerisinde kalarak motor boyutlandırması yapıp, motorun elektromanyetik tasarımı için gerekli olan paket boyu, stator ve rotor çapları gibi değerler hesaplanmış olacaktır. İlk olarak motorun birim hacmindeki moment değerinin (TRV) hesaplanması gerekmektedir.

$$TRV = \frac{T}{\frac{\pi D^2 L}{4}} \quad (9)$$

Motor tasarım çalışmalarında, birim hacimden alınabilecek moment değeri (TRV) seçilerek

kullanılmakta ve bu değer, ihtiyaç duyulan moment değerlerine bağlı olarak birim hacim moment değeri hesaplanmaktadır.

$$\lambda = \frac{L}{\tau_p} \quad (10)$$

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} \quad (11)$$

$$\tau_p = \frac{L}{\lambda} \quad (12)$$

Yukarıda verilmiş olan eşitlikler sonucunda, motorun paket boyu, stator dış çapı, oluk ve kutup sayısı belirlenmiştir. Bu değerlerin ardından stator sargı hesaplarının yapılması gerekmektedir. Sargı hesaplamaları sonucunda oluk alanı, sargı faktörü ve sarım sayısı parametreleri belirlenecektir.

$$k_w = k_d k_p \quad (13)$$

$$k_p = \cos\left(\frac{2\pi - \frac{2\pi}{N_s}}{2}\right) \quad (14)$$

Stator sargı faktörü (k_w), dağılıma faktörü (k_d) ve kirisleme faktörü (k_p) olmak üzere iki farklı değerin çarpılmasıyla elde edilmektedir. Üç fazlı motorlarda dağılıma faktörü (k_d) balansın sağlanması amacıyla 1 olarak seçilmekte, kirisleme faktörü (k_p) ise Eşitlik 14' deki gibi hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{pn}{60} \quad (15)$$

Motorun devir hızı (n) ve kutup sayısı (p) kullanılarak motorun boştaki dönüş frekansı Hz cinsinden Eşitlik 15 ile hesaplanmaktadır.

$$v_{rms} = \frac{V - V_{trs}}{\sqrt{3}\sqrt{2}} \quad (16)$$

$$\emptyset = \frac{2}{\pi} B_g \tau_p L \quad (17)$$

$$w_a = \frac{v_{rms}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_w f \emptyset} \quad (18)$$

$$z = 2m w_a \quad (19)$$

$$z_0 = \frac{z}{N_s} \quad (20)$$

Motor çalışma gerilimi (v), transistörler üzerindeki gerilim düşümü (v_{trs}) kullanılarak motorun etkin gerilimi (v_{rms}) hesaplanmalıdır, etkin gerilim değeri motor faz akımlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Tasarımı geliştirilen fırçasız doğru akım motoru için stator ile rotor arasındaki hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu (B_g) 0,98T olarak seçilmiş, kutup adımı (τ_p) ve paket boyu (L) kullanılarak kutup başına manyetik akı (\emptyset) Eşitlik 17' deki gibi hesaplanmıştır. Eşitlik 13, 15, 16 ve 17 kullanılarak hesaplanmış olan sargı faktörü (k_w), frekans (f) kutup başına manyetik akı (\emptyset) ve etkin gerilim (v_{rms}) değerleri kullanılarak faz başına sarım sayısı (w_a), Eşitlik 18'deki gibi hesaplanmıştır. Faz başına sarım sayısı (w_a), faz sayısı (m) kullanılarak toplam iletken sayısı (z) ve sarım sayısı (z_0), Eşitlik 19 ve 20 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_f = \frac{P}{eff \cdot m \cdot v_{rms}} \quad (21)$$

$$q_{cu} = \frac{I_f}{J} \quad (22)$$

$$A_{sl} = \frac{q_{cu} \cdot 46}{0,73} \quad (23)$$

$$\tau_0 = \frac{\pi D}{N_s} \quad (24)$$

Hibrit araç parametrelerine göre hesaplanan güç değeri (P), varsayımda bulunulan motor verimi (eff), motor faz sayısı (m) ve motor etkin gerilimi (v_{rms}) değerleri kullanılarak motor faz akımları hesaplanmıştır. Motorun faz başına akım değerlerinin hesaplanmasının ardından, varsayımda bulunulan akım yoğunluğu (J) kullanılarak Eşitlik 22 ile iletken kesiti (q_{cu}) hesaplanmıştır. Hesaplanan iletken kesiti (q_{cu}), sarım sayısı (N_s) ve doluluk oranı kullanılarak oluk alanı (A_{sl}) hesaplanmıştır.

$$I_f = \frac{P}{eff \cdot m \cdot v_{rms}} \quad (25)$$

$$q_{cu} = \frac{I_f}{J} \quad (26)$$

$$A_{sl} = \frac{q_{cu} \cdot 46}{0,73} \quad (27)$$

Boşluktaki manyetik alan yoğunluğu (B_g), oluk adımı (τ_0), stator dişlerindeki manyetik alan yoğunluğu (B_d) ve istifleme faktörü (k_{fe}) kullanılarak diş genişliği (b_d) hesaplanmıştır. Yönlendirilmemiş silisli sacların kullanıldığı fırçasız doğru akım motoru uygulamalarında istifleme faktörünün 0,95 olarak alınması uygundur. Ayrıca M27_29G saclarının istiflenerek kullanıldığı motor uygulamalarında stator dişlerindeki manyetik akı yoğunluğunun 2,3 T değerinde alınması uygundur (Hendershot ve Miller, 2010). Eşitlik 24 ile hesaplanan oluk adımı (τ_0) ve diş genişliği (b_d) kullanılarak oluk üst genişliği (b_o) ve oluk alanının (A_{sl}), oluk üst genişliğine (b_o) bölünmesiyle diş yüksekliği (h_o) hesaplanmıştır.

$$h_b = \frac{\tau_p}{2 \cdot k_{fe} \cdot B_b} B_g \quad (28)$$

$$D_i = D - 2h_o - 2h_b \quad (29)$$

Eşitlik 29 sonrasında motorun stator kısmına ait bütün boyutlandırma hesapları tamamlanmıştır. Stator boyutlandırmasının ardından rotor boyutlandırmasının yapılması gerekmektedir. Motor imalatında oluşabilecek hatalar göz önünde bulundurularak stator ile rotor arasındaki hava aralığı (δ) 1mm olarak seçilmiştir.

$$h_{rb} = \frac{\tau_p}{2 \cdot k_{fe} \cdot B_{rb}} B_g \quad (30)$$

$$D_o = D_i - 2d_{mag} - 2h_{rb} \quad (31)$$

Rotor boyunduruk yüksekliği (h_{rb}); boşluktaki manyetik akı yoğunluğu (B_g), rotor adımı (τ_p), istifleme faktörü (k_{fe}) ve rotor boyunduruğundaki manyetik akı yoğunluğu (B_{rb}) kullanılarak rotor boyunduruk yüksekliği (h_{rb}) hesaplanmıştır.

Sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan sabit mıknatısların kalınlıkları, rotor ile stator arasındaki hava aralığının 10 katına kadar seçilebilmektedir (Hanselman, 2006). Bu çalışmada geliştirilen motor tasarımları, yüksek güç üretmedikleri için mıknatıs kalınlığı (d_{mag}) 4mm olarak seçilmiştir.

Çalışma kapsamında tasarımı yapılan düşük çalışma gerilimli motor tasarımına ve daha önceden hibrit araç uygulamasında kullanılmak üzere tasarlanan yüksek çalışma gerilimli motor tasarımına ait boyutlandırma hesapları sonuçları ve rotor pozisyonu, kutup sayısı gibi temel makine parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

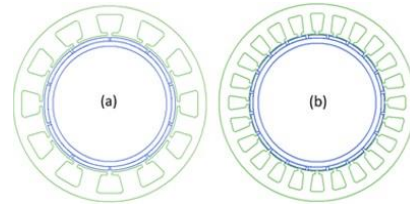
Tablo 4. Motor Boyutları

Parametre	Sembol	300 V Motor Tasarımı	96 V Motor Tasarımı
Birim Hacim Moment	TRV	20 kNm/m ³	20 kNm/m ³
Stator Dış Çapı	D	229 mm	229 mm
Stator İç Çapı	d_{st}	157,8 mm	157,8 mm
Rotor Dış Çapı	D_{rt}	156 mm	156 mm
Rotor İç Çapı	d_{rt}	135 mm	135 mm
Oluk Sayısı	N_s	12	18
Kutup Sayısı	$2p$	10	20
Paket Boyu	L	80 mm	80 mm
İstifleme Faktörü	k_{fe}	0,95	0,95
Sargı Faktörü	k_w	0,99	0,99
Dağılma Faktörü	k_d	1	1
Kirişleme Faktörü	k_p	0,99	0,99
Kutup Başına Manyetik Akı	\emptyset	$3.11 \cdot 10^{-3}$ Wb	$1.55 \cdot 10^{-3}$ Wb
Faz Başına Sarım Sayısı	w_a	109,83	21,88
Toplam İletken Sayısı	z	658,98	131,30
Sarım Sayısı	z_0	55	5
Varsayılan Motor Verimi	eff	0,95	0,95
Motor Faz Sayısı	m	3	3
Mıknatıs Kalınlığı	d_{mag}	4 mm	4 mm

Çalışmanın bu kısmında hesaplanan motor boyutları ve Tablo 4'te verilmiş olan değerler kullanılarak düşük gerilimli fırçasız doğru akım motoru tasarımı ANSYS Electronics Desktop yazılımının Rmxprt modülü kullanılarak yapılmıştır.

3. Bulgular

Elde edilen motor tasarımlarının 2 boyutlu görselleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Motor Tasarımları (a) 300 V, (b) 96 V

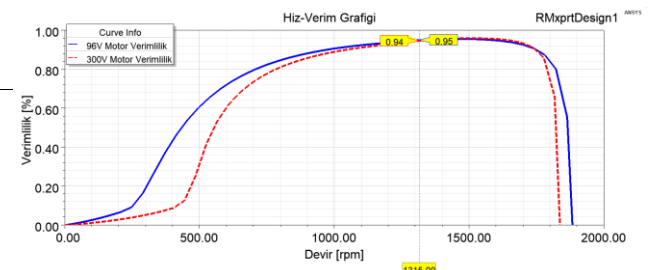
Verilmiş olan iki farklı motor tasarımının görsellerine ilk bakışta, 300 V motor tasarımında kullanılan kutup sayısı daha az olduğu için mıknatısların açıları daha yüksek olmakta ve bu durum neodmiyum mıknatısların hassas olmasından kaynaklanan imalat zorluklarının oluşacağını göstermektedir.

Tanımlamaları ve tasarımı yapılan motorların, ANSYS Rmxprt modülüyle "Sabit Hız" analitik hesaplamaları yapılmıştır ve Tablo 5'de sunulmuştur.

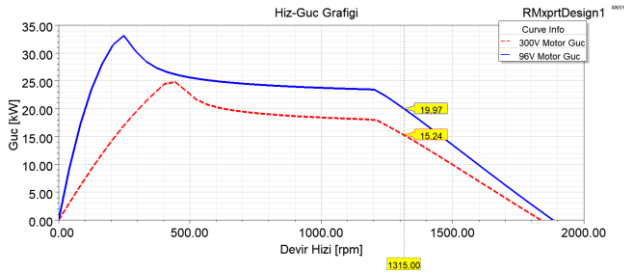
Tablo 5. Sabit Hız Analiz Koşulları İle Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Gerilim	300 V	96V
Devir Hızı (rpm)	1315	1315
Giriş Gücü (kW)	12,05	19,77
Kayıp (kW)	1,12	1,28
Verim (%)	90,71	93,53
Moment (Nm)	110,75	145,07
Armatür Akım Yoğ. (A/m ²)	7,84	10,2
Dış Akı Yoğ. (T)	1,51	0,98
Boyunduruk Akı Yoğ. (Stator) (T)	1,55	1,06
Boyunduruk Akı Yoğ. (Rotor) (T)	1,35	1,47

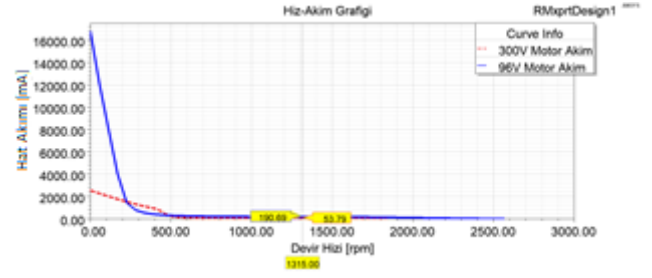
Tablo 5'de sabit hız analiz koşulları verilmiş ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. Yapılan tasarımlara ilişkin hız-verimlilik grafikleri Şekil 5'te, hız-güç grafikleri Şekil 6'da ve hız-moment grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Verilen grafikler de iki tasarıma ilişkin eğriler nesnel bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.



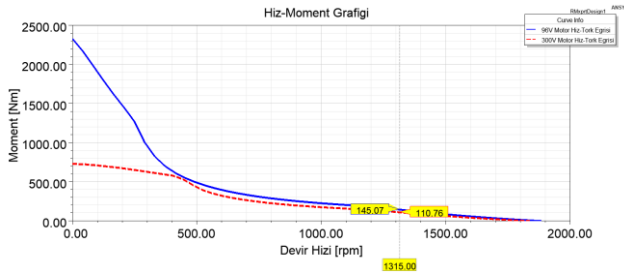
Şekil 5. Motor Tasarımlarına Ait Hız-Verimlilik Eğrilerinin Karşılaştırılması



Şekil 6. Motor Tasarımlarına Ait Hız-Güç Eğrilerinin Karşılaştırılması



Şekil 8. Motor Tasarımlarına Ait Hız-Akım Eğrilerinin Karşılaştırılması



Şekil 7. Motor Tasarımlarına Ait Hız-Moment Eğrilerinin Karşılaştırılması

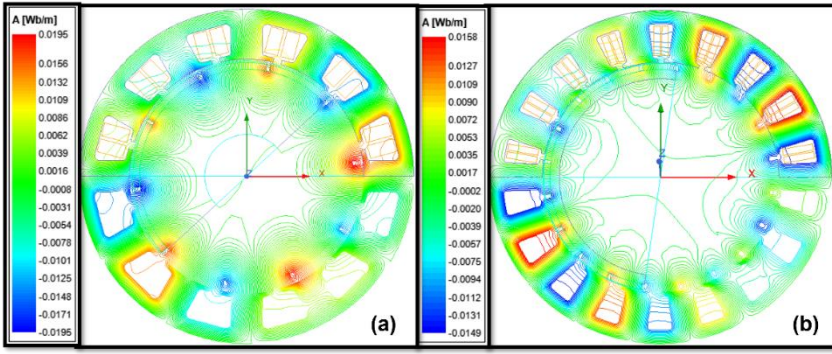
Şekil 5, 6 ve 7' de sırasıyla iki farklı gerilimdeki (300 V, 96 V) motor tasarımlarına ait olan hız-verimlilik, hız-güç ve hız-moment grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, her iki motor tasarımının da verim değerlerinin %90 üzerinde olduğu fakat 96 V motor tasarımının verim değerinin daha yüksek (%95) olduğu görülmektedir. Aynı zamanda 96 V motor tasarımı 300 rpm gibi düşük devir hızlarında da yüksek verim sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı bu çalışma için daha uygun bir motor tasarımı olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 6'da verilmiş olan hız-güç grafiğine göz önüne alındığında, 96 V gerilimli motor tasarımının diğer tasarıma göre aynı hız değerlerinde daha yüksek güç sağlayabildiği görülmektedir. Aynı hız değerlerinde 96 V gerilimli motor tasarımının daha yüksek moment (145 Nm) değerine sahip olduğu Şekil 7'de verilmiş olan grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 8'de motor tasarımlarına ait hız-akım grafikleri verilmiştir.

Motorun çalışma geriliminin düşürülmesi beklenildiği üzere hat akımının artmasına sebep olmuştur. Grafiklerden edinilen bilgilere göre 96 V gerilimli motor tasarımının diğer motor tasarımına göre daha verimli (%1 daha fazla), yüksek moment sağlayabilen (35 Nm daha yüksek), çalışma için gerekli olan hız değerinde daha yüksek güç (%25 daha yüksek) sağlayabildiği ve dolayısıyla gerilim düşümüne (3.1 kat) bağlı olarak artması öngörülen hat akımının daha fazla (3.5 kat) arttığı gözlemlenmiştir.

ANSYS Electronics Desktop yazılımının RMXprt modülünde yapılan analitik hesaplama ve tasarım çalışmalarının ardından motor tasarımları, Maxwell 2D modülünde sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuştur. Bu analizlerle motorun rotor ve stator gövdeleri üzerindeki kaçak reaktansların belirlenmesi, akı çizgilerinin, manyetik akı yoğunluklarının, manyetik alan vektörlerinin ve motorun rotasyonu konusunda bilgilerin elde edilebilmesi amaçlanmaktadır.

RMXprt modülünde tamamlanan analitik hesaplamalar ve tasarım çalışmaları, ANSYS Maxwell 2D modülünde iki farklı yöntemle sonlu elemanlar analizine tabi tutulabilmektedir, bunlardan ilki "Magnetostatic Analysis" diğeri ise zamana bağımlı olan "Transient Analysis" dir. Çalışmanın bu kısmında daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi amacıyla "Transient Analysis" ile geçici rejim analizi sonuçları elde edilmiş ve bu sonuçlar paylaşılmıştır.

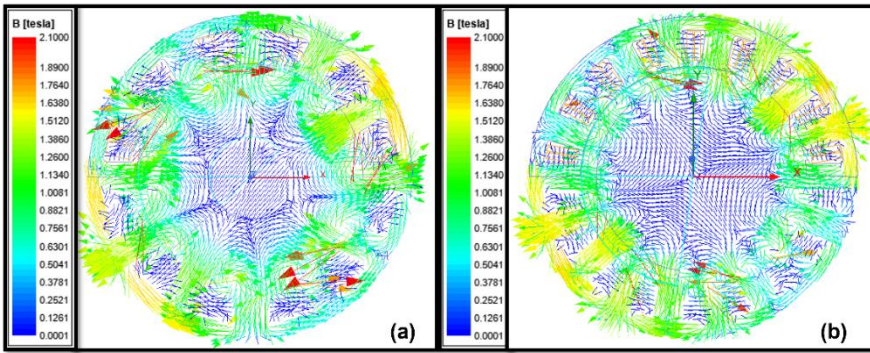
Yapılan geçici rejim analizleriyle, motorun rotasyonu simüle edilerek oluşan akı çizgileri, manyetik akı yoğunlukları, moment-akım-gerilim grafikleri incelenmiştir. Böylelikle moment dalgalanmaları ve sonlu eleman analizleri ve analitik hesaplamalarla elde edilen moment değerlerinin birbirine olan yakınlıkları gözlemlenmiştir. Yapılan geçici rejim analizleri sonucunda elde edilen akı çizgilerine ait görseller iki farklı gerilimdeki (300 V ve 96 V) motor tasarımları için Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Geçici Rejim Analizleri Manyetik Akı Çizgileri (a) 300 V, (b) 96 V

ANSYS Maxwell modülünde, 2B olarak yapılan analizler sonucunda elde edilen Şekil 9'da verilen manyetik akı çizgileri incelendiğinde, 96 V'luk motor tasarımındaki akı çizgileri diğer tasarıma göre çok daha homojenlik göstermektedir.

Yapılan geçici rejim analizleri sonucunda elde edilen manyetik alan vektörlerine ait görseller iki farklı gerilimdeki (300 V ve 96 V) motor tasarımları için Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Geçici Rejim Analizleri Manyetik Alan Vektörleri (a) 300 V, (b) 96 V

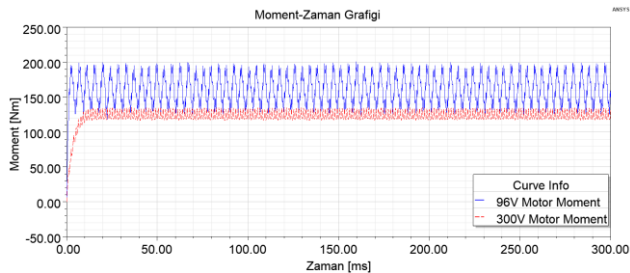
ANSYS Maxwell modülünde, 2B olarak yapılan analizler sonucunda, Şekil 10'da verilen manyetik alan vektörleri incelendiğinde, her iki motor tasarımındaki vektör yoğunluklarının ve yönlerinin motor kullanımı için uygun olduğu görülmektedir.

Yapılan geçici rejim analizi sonucunda elde edilen sabit hız (1315 rpm) koşulu altındaki moment-zaman grafikleri iki gerilimdeki (300 V ve 96 V) motor tasarımı için Şekil 11'de verilmiş ve moment dalgalanmalarının karşılaştırılması Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6 Moment Dalgalanmalarının Karşılaştırılması

Gerilim	300 V	96V
Maks. Moment (Nm)	134,54	190,54
Min. Moment (Nm)	116,33	116,33
Ortalama Moment (Nm)	127,53	167,25
Moment Dalgalanması (%)	%14	%20

Elektrikli ve hibrit otomobiller için tasarlanmış olan motorlardaki moment dalgalanmaları %25-30 seviyelerine kadar olabilmektedir. Moment dalgalanmalarının fazla olması, motorun dönüşü esnasında titreşim ve ses yaratmaktadır. Yüze sabit olan mıknatısların bulunduğu motorlardaki tork dalgalanmaları yüze gömülü motorlara göre daha yüksek seviyelerde olabilmektedir. Ticari otomobiller için istenmeyen bu durumun mümkün olduğunca az olması istenmektedir (Tumbek ve Kesler, 2019). Bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan 96V gerilimindeki motor %20 tork dalgalanmasına sahip olup, çalışmanın sonraki aşamalarında dış geometrilerinin, hava



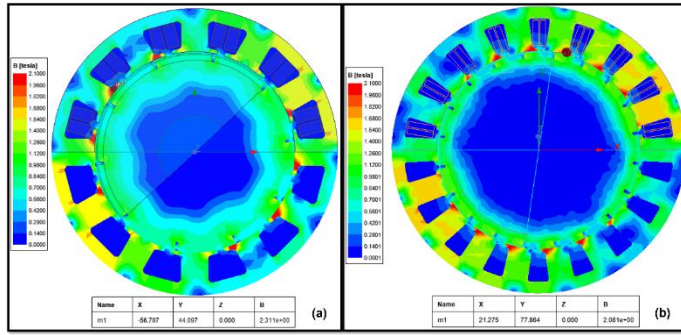
Şekil 11. Moment-Zaman Grafikleri

aralığının ve mıknatıs geometrilerinin değiştirilmesiyle azaltılması amaçlanmaktadır.

ANSYS Maxwell 2B olarak yapılan analizler sonucunda, Şekil 14' de verilen moment-zaman grafiği incelendiğinde, iki motor tasarımına ait (300 V ve 96 V) moment grafikleri yeterince dengeli ve uygundur. Grafikten anlaşıldığı üzere her iki motor tasarımının bir miktar moment dalgalanmalarının olduğu görülmekte,

yük altında motor çalışması durumunda ve dalgalanma periyotlarının çok kısa süreli olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu dalgalanmaların hissedilmeyeceği düşünülmektedir.

Yapılan geçici rejim analizleri sonucunda elde edilen manyetik alan yoğunluklarına ait görseller her iki gerilimdeki (300 V ve 96 V) motor tasarımı için Şekil 12' de verilmiştir.

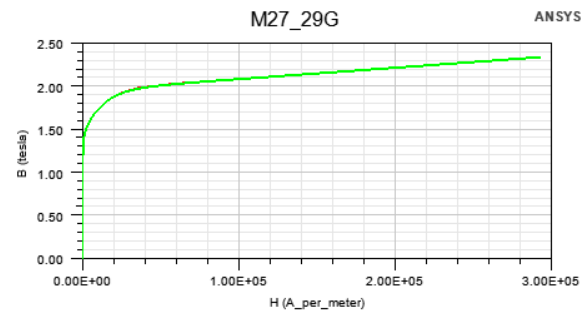


Şekil 12. Geçici Rejim Analizleri Manyetik Akı Yoğunlukları (a) 300 V, (b) 96 V

ANSYS Maxwell 2B olarak yapılan analizler ile elde edilen ve Şekil 12'de verilen dönüş esnasındaki manyetik akı yoğunlukları incelendiğinde 96 V çalışma gerilimli motor tasarımının B değeri 2,1T civarında olduğu görülmektedir. Motorların stator ve rotorlarında kullanılan saclara ait BH eğrisi Şekil 13' de verilmiştir.

2.31T maksimum akı yoğunluğu oluşmakta, 96V motor tasarımında ise 2.08T maksimum akı yoğunluğu oluşmaktadır. Bu durum 300V gerilimindeki motorun demir kayıplarının toplam kayba oranının (%20), 96V gerilimindeki motora göre (%18) daha fazla olmasına sebep olmaktadır.

Elde edilen değerlerden ve grafiklerden görüleceği üzere, 300 V motor tasarımı bu uygulamada ihtiyaç duyulan moment-güç-devir gereksinimlerini sağlamaktadır. Fakat motorun sürülebilmesi için tasarlanacak motor sürücüsünde kullanılacak olan anahtarlama elemanları için bu voltaj değeri oldukça yüksek ve risklidir. Bu çalışma geriliminde sağlıklı çalışabilecek ve uygun maliyetli anahtarlama elemanlarını bulmak çok zor olduğu için çalışma geriliminin düşürülmesi amacıyla farklı bir motor tasarımı daha yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; çalışmanın esas amacı olan tehlikeli alt sınır altında kalan bir DC gerilimde çalışabilen fırçasız doğru akım motor tasarımı elde edilmiştir. Hibrit araç uygulaması amacıyla tasarlanan yüksek gerilimli (300 V) motor tasarımına kıyasla daha yüksek verim sağlayan, aynı hız değerinde daha yüksek moment sağlayabilen, demir kayıplarının daha düşük olduğu bir motor tasarımına ulaşılmıştır. Böylelikle hem motorun hem de motor sürücüsünün üretim aşamaları kolaylaştırılmış, maliyet düşürülmüş ve çalışma geriliminin daha güvenli aralıkta olması sağlanmıştır.



Şekil 13. M27_29G Sacına Ait BH Eğrisi

Bu sac için 1,5-2T arasında kalan dirsek bölgesinde doyum başlamaktadır. Fırçasız doğru akım motorlarının dişlerinde oluşan manyetik akı yoğunlukları diş ortalarında 1,6T-1,8T aralığında, diş diplerinde ise 1,8T-2,1T aralığında olması uygun olmaktadır. Bu değerlerin üstüne çıkılması durumunda motorun demir kayıpları artmakta, daha düşük değerlerde olması ise makinenin gerekenden daha fazla hacim kaplamasına neden olmaktadır.

Çalışma kapsamında tasarlanan motorların manyetik akı yoğunlukları incelendiğinde maksimum değerlerin (2.1T) diş diplerinde olduğu görülmektedir. Akı skalalarından görüldüğü üzere 300V motor tasarımında

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada daha önceden yapılan yüksek çalışma gerilimindeki iç rotorlu fırçasız doğru akım motorunun daha düşük gerilimde çalışması amacıyla yeni bir tasarım yapılmış, düşük maliyetli ve düşük riskli bir

tasarım elde edilmiştir.

Fırçasız doğru akım motorları, devir hızlarının sınırlı olmasından kaynaklı olarak elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda büyük bir kullanım alanı bulamamışlardır. Fakat yüksek güç yoğunluğu ve yüksek moment özelliklerinden kaynaklı olarak paralel hibrit yapıdaki hibrit araçlarda kullanım alanı bulabilmektedirler. Bu çalışmayla, paralel yapıdaki hafif ticari bir hibrit araç için ihtiyaç duyulan değerleri (moment, güç, devir) sağlayan farklı çalışma gerilimlerine sahip (300 V ve 96 V) iç rotorlu fırçasız doğru akım motorları tasarlanmış ve sonlu elemanlar analizleri sonuçları karşılaştırılmıştır.

Elektrik motorunun çalışma geriliminin düşürülmesi maliyet ve güvenlik konularında fayda sağlayabilmekte fakat gerilimin düşürülmesi akımın artmasına sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan iki farklı motorun güç seviyeleri göz önüne alındığında maksimum akım değeri, 40A değerinden 110A değerine çıkmaktadır. Akım değerindeki bu artış göz önüne alındığında motor sürücünde kullanılması planlanan anahtarlama ekipmanının ve ayrıca testler için kullanılacak endüstriyel motor sürücünün çalışma aralığında bulunmaktadır. Son olarak fırçasız doğru akım motorunun geriliminin düşürülmesi bakır kayıplarının artmasına sebep olmakta, 300V gerilimli motor tasarımı için bakır kayıpları 263W iken 96V gerilimli motor tasarımı için bakır kayıpları 740W değerindedir. Bu fark ise sarım sayısı, iletken kesiti gibi değerlerden dolayı oluşmaktadır. Daha detaylı irdelemek gerekirse motorun aynı hızda dönebilmesi için, 300V gerilim yerine 96V gerilimde yapılan motor tasarımında daha düşük zıt elektromotor kuvveti elde edilmektedir. Bir başka deyişle motor sabiti ve motor tork sabiti daha düşük olduğu için aynı hızı sağlayabilmek amacıyla daha fazla akım basılmasına, bu da daha kalın iletken ve daha fazla sarım kullanılmasına ve dolayısıyla bakır kayıplarının artmasına sebep olmaktadır.

Sonuç olarak bu uygulama için en uygun motorun 96 V gerilimli olduğuna karar verilmiş ve çalışmanın başında amaçlanan çalışma geriliminin düşürülmesi gayesine ulaşılmıştır.

Çalışmanın ilerleyen zamanlarında üretilmiş olan motor ile tasarım aşamasında elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılarak bir başka yayında sunulması planlanmaktadır. Ayrıca iki adet motor üretilmiş olup bir tanesinde hazır ürün olarak satın alınmış ithal mıknatıs diğesinde yüksek bor katkılı yerli üretim mıknatıs kullanılarak performans kıyaslamasının yayınlanması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 216M252 proje

numaralı ve "İçten Yanmalı Motorlu Taşıtlar için Yakıt Verimliliğini Arttırıcı ve Yenilikçi Teknolojilerin Geliştirilmesi" başlıklı ARDEB 1003 projesi kapsamında desteklenmiş ve finanse edilmiştir.

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 33416 ve 52033 numaralı projeler ile desteklenmiş ve finanse edilmiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Yazar1, motor tasarımı, literatür araştırması vb.; Yazar2, tasarımın kontrol edilmesi, üretime yönelik tasarım aşamalarının irdelenmesi vb.; Yazar3, motor tasarımının test ve analiz safhalarının düzenlenmesi, bulguların gözden geçirilmesi, makalenin düzenlenmesi vb. konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Akar, M., Eker, M. ve Akın, F. (2021). BLDC motor design and application for light electric vehicle. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 326-336. doi: <http://dx.doi.org/10.35414/akufemubid.889877>
- Çabuk, A.S., Sağlam, S. ve Üstün, Ö. (2019). Farklı sargı yapılarının tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 1975-1986. doi: <http://dx.doi.org/10.17341/gazimmfd.571649>
- European Standards, (2016). "IEC 61140:2016," 2016. Erişim adresi: <https://www.en-standard.eu/iec-61140-2016-protection-against-electric-shock-common-aspects-for-installation-and-equipment/>.
- Hanselman, D. (2006). Brushless permanent magnet motor design. Ohio: Magna Physics Publishing.
- Hendershot, J.R. ve Miller, T.J.E. (2010). Design of brushless permanent-magnet motors. Munich: Motor Design Books LLC.
- Husain, I. (2003). Electric and hybrid vehicles design fundamentals. New York: CRC Press.
- Infineon IRFP4310ZPBF (2022). Infineon IRFP4310ZPBF. Erişim adresi: <https://www.infineon.com/dgdl/irfp4310zpbfd.pdf?fileId=5546d462533600a40153562c469e200f>.

- Sitapati, K. ve Krishnan R. (2001). Performance comparisons of radial and axial field. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(5), 1219-1226. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/28.952495>
- Kerem, A. (2021). Design implementation and speed estimation of three-phase 2 kW out-runner permanent magnet BLDC motor for ultralight electric vehicles. *Electrical Engineering*, 103(5), 2547-2559. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00202-021-01279-5.8>
- Mukherjee, P. ve Sengupta, M. (2014). *Design, analysis and fabrication of a brushless DC motor*, 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems Konferansında Sunulmuş Bildiri, Mumbai.
- Nair, S.S., Nalakath, S. ve Dhinagar, S.J. (2011). *Design and analysis of axial flux permanent magnet BLDC motor for automotive applications*, 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference Konferansında Sunulmuş Bildiri, Niagara Falls.
- Nugraha, Y.U., Yuniarto, M.N., Herizal, H., Asfani, D.A., Riawan, D.C. ve Wahyudi, M. (2018). *Design analysis of axial flux permanent magnet BLDC motor 5 kW for electric scooter application*, 2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications Seminerinde Sunulmuş Bildiri, Bali.
- Rahim, N.A., Ping, H.V. ve Tadjuddin, M. (2007). *Design of axial flux permanent magnet brushless DC motor for direct drive of electric vehicle*, 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting Konferansında Sunulmuş Bildiri, Tampa.
- Reif, K. ve Dietsche, K. (2014). *Automotive handbook*. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.
- Sanguesa, J. A., Torres-sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J. ve Marquez-barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles : technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Saxena, A. (2014). *Performance and cost comparison of PM BLDC motors for ceiling fan*, 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems Konferansında Sunulmuş Bildiri, Mumbai.
- Shrivastava, N. ve Brahmin, A. (2014). Design of 3-phase BLDC motor for electric vehicle application by using finite element simulation. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(1), 140-145. Erişim adresi: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=81afd8f342ed9d37762d24de4467550a31b4cc32>
- Singh, V.K., Marwaha, S. ve Singh, A.K. (2017). Design and analysis of permanent magnet brushless DC motor for solar vehicle using ansys software. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 6(4), 1215-1220. doi: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV6IS040795>
- Thacher, E.F. (2015). *A solar car primer a guide to the design and construction of solar-powered racing vehicles*. New York: Springer.
- Tumbek, M. ve Kesler, S. (2019) Design and implementation of a low power outer-rotor line-start permanent-magnet synchronous motor for ultra-light electric vehicles. *Energies*, 12(16), 3174. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/en12163174>
- Ustun, O., Yılmaz, M., Gökçe, C., Karakaya, U. ve Tuncay, R.N. (2009). *Energy management method for solar race car design and application*, 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Konferansında Sunulmuş Bildiri, Miami.
- Uygun, D. ve Solmaz, S. (2015). *Design and dynamic study of a 6 kw external rotor permanent magnet brushless DC motor for electric drivetrains*, 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Konferansında Sunulmuş Bildiri, Riga.
- Vargo, B.O. (2013). Electric vehicles, primary energy sources and CO₂ emissions: romanian case study. *Energy*, 49(1), 61-70. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.036>
- Zarko, D., Ban, D. ve Lipo, T.A. (2009). Analytical solution for electromagnetic torque in surface permanent-magnet motors using conformal mapping. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(7), 2943-2954. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2009.2014689>
- Zhao, L., Ham, C., Zheng, L., Wu, T., Sundaram, K., Kapat, J. ve Chow, L. (2007). A highly efficient 200 000 rpm permanent magnet motor system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6), 2528-2530. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.893523>