

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ BİSİKLETLER İÇİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU
TASARIMI VE ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gamze TANÇ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ BİSİKLETLER İÇİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU
TASARIMI VE ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Gamze TANÇ
504121016**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN

HAZİRAN 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504121016 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gamze TANÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ELEKTRİKLİ BİSİKLETLER İÇİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE ÜRETİMİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Faik MERGEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erkan MEŞE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 05 Mayıs 2014
Savunma Tarihi : 03 Haziran 2014

ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmam süresince bilgisini ve desteğini esirgemeyen danışman hocam MEKATRO Mekatronik Sistemler Araş. Geliş. Tic. ve San. Ltd. Şti. kurucusu ve Genel Müdürü Sayın Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN' e rehberliği, anlayışı ve sağladığı imkanlar için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez, KOSGEB Ar-Ge İnovasyon Programı kapsamında başarı ile tamamlanmış "Elektrikli Bisiklet ve Elektrikli Bisiklet Kiti Geliştirme" isimli projede iki yıl boyunca yapmış olduğum çalışmalardan yola çıkılarak hazırlanmıştır. Proje yürütücüsü Arslan Makina Döküm San. ve Tic. Ltd. Şti. Genel Müdürü Oğuzhan ARSLAN' a, ekip arkadaşlarım Mustafa ŞİMŞEK ve Özhan TÜMAY' a, proje ve tez çalışmam süresince sağladıkları imkanlar ve destekleri için teşekkür ederim.

MEKATRO Mekatronik Sistemler Araş. Geliş. Tic. ve San. Ltd. Şti. kurucuları Prof. Dr. R. Nejat TUNCAY ve Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN' a, çalışma arkadaşlarım Gürkan TOSUN, Ömer Cihan KIVANÇ ve Mert Safa MÖKÜKCÜ' ye birlikte çalıştığımız süre boyunca tüm paylaşımları, destekleri ve tavsiyeleri için teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca üzerimde emeği bulunan tüm öğretim elemanlarına ve bu süreci birlikte paylaştığım arkadaşlarıma, ilgi ve destekleri ile motivasyonumu yüksek tutan dostlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, güvenleri ve sevgileri ile her zaman yanımda olan annem, babam ve kardeşlerime, emekleri ve anlayışları için teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2014

Gamze TANÇ
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Elektrikli Bisikletin Tarihsel Gelişimi	3
1.3. İlgili Standart ve Yönetmelikler	9
1.4. Elektrikli Bisiklet ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	12
2. ELEKTRİKLİ BİSİKLET MOTORU TASARIM ÇALIŞMALARI.....	17
2.1. Elektrikli Bisiklet Modeli.....	19
2.2. Elektrik Motor Tipinin Belirlenmesi.....	25
2.2.1. Kesirli oluk sargılı fırçasız doğru akım motorları	30
2.2.2. Sargı yapısı	32
2.2.3. Sargı yerleşiminin belirlenmesi	33
2.3. Motor Seçim Kriterleri	37
2.4. Motor Tasarımları	41
2.4.1. Motor boyutlarının belirlenmesi	41
2.4.2. Malzeme seçimi	48
2.4.3. Tasarım çıktıları.....	48
3. ELEKTRİKLİ BİSİKLET MOTORU UYGULAMA AŞAMASI	69
3.1. Motor Üretimi	69
3.2. Deneyler	71
3.2.1. Performans deneyi	72
3.2.2. Isınma deneyi.....	77
3.3. Motorun Bisiklete Entegrasyonu.....	81
4. SONUÇ.....	83
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

AlNiCo	: Alüminyum-Nikel-Kobalt
BLDCM	: Brushless Direct Current Motor
EN	: European Norm
FDAM	: Fırçasız Doğru Akım Motoru
NdFeB	: Neodim-Demir-Bor
SmCo	: Samaryum-Kobalt
TCK	: Türk Ceza Kanunu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
WHO	: World Health Organization
2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Çeşitli ülkelerde düzenlenmiş yasal elektrikli bisiklet limitleri.	9
Çizelge 2.1 : Simülasyon parametreleri.....	20
Çizelge 2.2 : Değişen jantlar için nominal hız-nominal moment tablosu.	24
Çizelge 2.3 : Oluk/kutup oranı-sargı faktörü tablosu.	38
Çizelge 2.4 : Oluk/kutup oranı-N değeri tablosu.....	40
Çizelge 2.5 : Oluk/kutup oranı-t değeri tablosu.	40
Çizelge 2.6 : Tek kat sargılı motor tasarım sonuçları.....	49
Çizelge 2.7 : Çift kat sargılı motor tasarım sonuçları.....	49
Çizelge 2.8 : Değişen radyal uzunluklar için tasarım çıktılarının karşılaştırılması...	52
Çizelge 2.9 : Değişen aksel uzunluklar için tasarım çıktılarının karşılaştırılması.	56
Çizelge 2.10 : Değişen oluk ağzı genişliği için tasarım çıktılarının karşılaştırılması.	60
Çizelge 2.11 : Seçilen motorun özellikleri.	64
Çizelge 3.1 : Test düzeneği parça listesi.....	72
Çizelge 3.2 : Performans deneyi ölçüm tablosu.	73
Çizelge 3.3 : Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları.....	77
Çizelge 3.4 : Isınma deneyi ölçüm tablosu.	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Bisikletin tarihsel gelişimi.....	4
Şekil 1.2 : Michaux Perreaux (solda) ve Sylvester H. Roper (sağda) tarafından geliştirilen buharlı bisikletler.	5
Şekil 1.3 : Tekerlek içi (hub) motor patentleri.	5
Şekil 1.4 : Bolton' ın elektrikli bisikleti.....	6
Şekil 1.5 : Libbey' in elektrikli bisikleti.	6
Şekil 1.6 : Steffens' ın elektrikli bisikleti.....	7
Şekil 1.7 : Schnepf' in elektrikli bisikleti.....	7
Şekil 1.8 : Dubé' un elektrikli bisikleti.	8
Şekil 1.9 : Örnek elektrikli bisiklet sistemleri- Arka motorlu sistem (sol üstte), motoru pedalda olan sistem (sağ üstte), ön motorlu sistem (sol altta), elektrikli bisiklet dönüşüm kiti (sağ altta).	9
Şekil 1.10 : Çeşitli kullanıcılar için pedal çevirirken harcanan enerji eğrisi.	11
Şekil 2.1 : Motor tasarım çalışması akış şeması.	18
Şekil 2.2 : Eğimli yolda elektrikli bisiklet üzerine etkiyen kuvvetler.	19
Şekil 2.3 : Motor destek gücünün hesaplanması.	21
Şekil 2.4 : Elektrik motoru bloğu.	22
Şekil 2.5 : Elektrikli bisiklet Simulink modeli.	22
Şekil 2.6 : Değişen eğimler için motor gücü-hız eğrisi.	23
Şekil 2.7 : Maks. 250 W güç için farklı eğimlerdeki maksimum açılma hızı eğrisi. ...	23
Şekil 2.8 : Elektrikli bisiklet maksimum moment eğrisi.	24
Şekil 2.9 : Çeşitli sürekli mıknatıs malzemelerin demagnetizasyon eğrileri.....	26
Şekil 2.10 : FDAM motoru evirici yapısı.	28
Şekil 2.11 : FDAM Hall gerilimleri, gerilim-akım ve anahtarlama dalga şekilleri... 30	
Şekil 2.12 : 24 oluklu motor için sargı şeması: a) $N_{ssp}=1$ olan dağıtılmış sargılı klasik FDAM b) $N_{ssp}=0.4$ olan kesirli oluk tek kat sargılı motor konsantrik sargılı c) $N_{ssp}=0.4$ olan kesirli oluk çift kat sargılı motor konsantrik sargılı FDAM	33
Şekil 2.13 : 12/10 oluk/kutup oranlı motorun tek katlı sargı yerleşiminin J. Cros' un önerdiği yöntemle belirlenmesi.....	34
Şekil 2.14 : 12/10 oluk/kutup oranlı motorun çift katlı sargı yerleşiminin J. Cros' un önerdiği yöntemle belirlenmesi.....	34
Şekil 2.15 : Oluk yıldızı yönteminde fazörlerin yerleşimi.	35
Şekil 2.16 : 12/10 oluk/kutup oranlı motor için oluk yıldızı yöntemi ile sargı yerleşiminin bulunması ve sargıların tek katlıya dönüşümü.....	36
Şekil 2.17 : Bisiklet arka tekerlek mili.	42
Şekil 2.18 : Bisiklet arka tekerlek göbeğine yerleştirilmiş motor.	43
Şekil 2.19 : Elektrikli bisiklet motor sürücü kartı.	43
Şekil 2.20 : Motor tasarımında kullanılacak boyut aralıkları.	44
Şekil 2.21 : N35 mıknatıs demagnetizasyon eğrisi.....	45
Şekil 2.22 : Motor oluk yapısı	46
Şekil 2.23 : 36/34 motor sargı şeması.....	51

Şekil 2.24 : Değişen radyal uzunluklar için manyetik akı yoğunlukları dağılımı.	53
Şekil 2.25 : Değişen radyal uzunluklar için motor akı çizgilerinin dağılımı.	54
Şekil 2.26 : Değişen radyal uzunluklar için moment dalga şekilleri.	55
Şekil 2.27 : Değişen radyal uzunluklar için akım dalga şekilleri.	55
Şekil 2.28 : Değişen aksel uzunluklar için manyetik akı yoğunlukları dağılımı. ..	57
Şekil 2.29 : Değişen aksel uzunluklar için motor akı çizgileri dağılımı.	58
Şekil 2.30 : Değişen aksel uzunluklar için moment dalga şekilleri.	59
Şekil 2.31 : Değişen aksel uzunluklar için akım dalga şekilleri.	59
Şekil 2.32 : Değişen oluk ağzı genişliği için manyetik akı yoğunlukları dağılımı.	61
Şekil 2.33 : Değişen oluk ağzı genişliği için motor akı çizgileri dağılımı.	62
Şekil 2.34 : Değişen oluk ağzı uzunlukları için moment dalga şekilleri.	63
Şekil 2.35 : Değişen oluk ağzı uzunlukları için akım dalga şekilleri.	63
Şekil 2.36 : Seçilen motor üç boyutlu görüntüsü.	64
Şekil 2.37 : Manyetik alan yoğunluğunun dağılımı.	65
Şekil 2.38 : Akım yoğunluğu analizi.	65
Şekil 2.39 : Verim-hız eğrisi.	66
Şekil 2.40 : Mil gücü-hız eğrisi.	66
Şekil 2.41 : Moment-hız eğrisi.	66
Şekil 2.42 : Endüklenen gerilimin dalga şekli.	67
Şekil 3.1 : Motor kesiti ve bileşenlerin ayrıntılı görüntüsü.	69
Şekil 3.2 : Motor imalat aşamaları.	70
Şekil 3.3 : Motor imalatının tamamlanması.	71
Şekil 3.4 : Test düzeneği 3D tasarımı.	71
Şekil 3.5 : Motorun deney düzeneğine yüklenmesi.	72
Şekil 3.6 : Motor performans deneyi bağlantı şeması.	73
Şekil 3.7 : 36/34 motor verim-hız grafiği.	74
Şekil 3.8 : 36/34 motor mil gücü-hız grafiği.	74
Şekil 3.9 : 36/34 motor moment-hız grafiği.	75
Şekil 3.10 : 36/34 motor moment-akım grafiği.	75
Şekil 3.11 : 36/34 motor hız-akım grafiği.	75
Şekil 3.12 : 36/34 motor mil gücü-akım grafiği.	76
Şekil 3.13 : 36/34 motor boşta üç faz gerilim-akım dalga şekli.	76
Şekil 3.14 : 36/34 motor yükte üç faz gerilim-akım dalga şekli.	76
Şekil 3.15 : Motor yükleme deneyi bağlantı şeması.	79
Şekil 3.16 : Motor ısınma eğrisi.	80
Şekil 3.17 : Motorun bisiklete monte edilmesi.	81

ELEKTRİKLİ BİSİKLETLER İÇİN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI VE ÜRETİMİ

ÖZET

Elektrikli bisikletler günümüzün önde gelen ve gelişen teknolojilerinden biridir. Elektrikli bisiklet teknolojisi, batarya ve güç kontrol düzeneği üzerinden beslenen özel tip elektrik sürüş sistemine dayanır. Elektrik gücü desteği sayesinde yaş ya da kondisyondan bağımsız olarak bisiklet kullanıcısının daha uzun mesafeleri kat etmesine ve dik yokuşları kolaylıkla çıkılmasına olanak sağlar. Böylece bisikletin sadece spor ve eğlence için değil, bir ulaşım aracı olarak da kullanımı yaygınlaşmaktadır. Karbondioksit salınımı olmayan bu araçların çevre dostu olmalarının yanı sıra, park ve trafik problemlerini azaltıcı etkileri şehir içi ulaşımı için ideal araçlar olduklarının göstergesidir. Elektrikli bisikletlerin diğer elektrikli araçlara karşı en büyük üstünlüğü bataryanın bitmesi ile yolda kalma sorununun bulunmamasıdır, sürücü pedal çevirerek yoluna devam edebilir. Bu özelliğiyle elektrikli bisikletler, elektrikli araçların günlük hayatımıza geçişinde önemli bir basamak olarak görülmektedir.

Günümüzde, elektrikli bisiklet ticari bir ürün olarak dünya pazarında önemli yere sahiptir. Elektrikli bisikletlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, birçok ülke elektrikli bisikletler için yasal limitler getirmiştir. EN 15194 Avrupa standardı ile pedal destekli elektrikli bisikletlerin (pedelec) özellikleri belirlenmiştir. Standarda göre sistemin maksimum anma gücü 250 W olmalıdır. Bisiklet 25 km/h hızı aştığında destek gücü azalarak kesilmelidir. Daha yüksek hıza ulaşmak için sürücü kendi efor sarf etmelidir. Pedal destekli bisikletler hibrit araçlardır. Destek sadece sürücü pedal çevirirken devreye girer, sürücü pedal çevirmeyi bıraktığında motor desteği azalarak kesilir. Sistem gerilimi güvenlik nedeniyle 48 V ile sınırlandırılmıştır. Standartlarda yer alan limitlerin belirlenmesindeki temel yaklaşım, elektrik gücü destekli bisikletlerin, bisiklet sınıfında yer alabilmesi içindir. EN 15194 standardına uygun elektrikli bisikletlerin statüleri yasal olarak bisiklet ile aynıdır. Böylece, pedal destekli elektrikli bisiklet kullanıcısı için ehliyet zorunluluğu, vergi yükümlülüğü ya da yaş sınırı bulunmamaktadır.

Elektrikli sürüş sistemlerinin bisiklete farklı yöntemlerle yerleştirildiği, çeşitli mekanik dönüştürücülerin kullanıldığı tasarım ve uygulamalar hakkında çok sayıda çalışma ve patent bulunmaktadır. Elektrikli bisiklet temel olarak elektrik motoru, motor sürücüsü ve bataryadan oluşan bir sistem olarak tanımlanabilir. Elektromanyetik enerji dönüşümünün gerçekleştiği elektrik motoru, sistemin performansını ve verimliliğini en çok etkileyen bileşen olarak görülmektedir. Bu nedenle, elektrikli bisiklet sistemlerinin tasarımında uygun elektrik motorunun belirlenmesi önemli bir araştırma konusudur. İncelenen örnek sistemlerde ve literatürde, yüksek performanslı elektrikli bisiklet uygulamalarında yaygın olarak fırçasız doğru akım motorlarının kullanıldığı görülmüştür. Bu motorların rotorunda sargı bulunmadığından dolayı bakır kayıpları düşüktür ve verimleri yüksektir. Yapılarındaki sürekli mıknatıslar, enerji yoğunluğunun ve moment üretme kapasitesinin yüksek olmasını sağlar.

Bu çalışmada, EN 15194 Avrupa standardına uygun bir elektrikli bisiklet için fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve üretimi amaçlanmıştır. Standart uyarınca motorun anma çıkış gücü 250 W olarak belirlenmiştir. Piyasada yaygın olarak bulunan elektrikli bisiklet bataryalarının incelenmesi sonucunda motor gerilim seviyesinin 36 V olmasına karar verilmiştir. Motor, bisikletin arka tekerleğine yerleştirilmek üzere tekerlek jantına monte edilecektir. Hub motor sistemi olarak da bilinen doğrudan sürüş sistemlerinin imalat kolaylığı ve bisiklet üzerinde yer kazanımı sağlamanın yanı sıra birçok avantajı bulunmaktadır. Bu yapı kullanıcının mevcut bisikletini elektrikli bisiklete dönüştürmesini sağlayan “elektrikli bisiklet dönüşüm kiti” uygulaması için de uygundur.

Motor tasarım çalışmalarına elektrikli bisiklet sisteminin gereksinimlerinin incelenmesi ile başlanmıştır. Sisteminin farklı seyir durumlarındaki moment ve hız ihtiyacını belirlemek amacıyla elektrikli bisiklet modeli kurulmuştur. Simülasyon doğrultusunda, motor plaka değerleri belirlenmiş ve sistemin yüksek moment ihtiyacını karşılayabilmek üzere motorun yüksek kutup sayılı olarak tasarlanmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda, fırçasız doğru akım motorunun özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yüksek kutup sayılı motorların verimini arttırmak ve üretimini kolaylaştırmak adına konsantrik sargı ile imal edilen kesirli oluk sargılı motor kullanımı yeni bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Konsantrik sargılı motorlarda moment üretme kapasitesi yüksek, moment dalgalılığı ise düşüktür. Bu nedenle, tasarımı yapılacak motorun kesirli oluk sargılı tipte olmasına karar verilmiştir.

Kesirli oluk sargılı motorlar çeşitli oluk/kutup oranında tasarlanabilirler. Uygun kombinasyonun belirlenmesinde öncelikli olarak literatüre başvurulmuştur. Motor gücü ve bisiklet üzerindeki fiziksel sınırlar incelenerek motor temel büyüklükleri belirlenmiştir. Literatürde önerilen motor oluk/kutup kombinasyonlarından yola çıkılarak tasarım denemeleri yapılmıştır. Motor parametrelerinin ve kullanılacak malzemelerin seçilmesinin ardından, ANSYS firmasının RMXprt isimli analitik çözümleme yapan programı ile çeşitli motor geometrileri oluşturularak motor tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Motor tasarımları, moment kalitesi, ağırlık, verim ve üretim kolaylığı açılarından değerlendirilmiş, en uygun motor kombinasyonu olarak 36/34 oluk/kutup oranına sahip motor seçilmiştir.

Seçilen motor için farklı boyut ve oluk denemeleri yapılarak, bu modeller için elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece motor boyutları optimize edilmiş ve değişen motor boyutlarının motor üzerindeki etkisi incelenmiştir. RMXprt üzerinden oluşturulan modeller, sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Maxwell elektromanyetik analiz programına aktarılarak daha güvenilir sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Yapılan analizlerin karşılaştırılması sonucunda en uygun tasarım belirlenerek üretim aşamasına geçilmiştir. Özel olarak hazırlanmış bir deney düzeneği üzerinde üretilen motorun yükleme ve ısınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının uygunluğunun belirlenmesinin ardından motor janta monte edilmiş ve bisiklete entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan sürüş denemelerinde sistemin istenilen performansta ve sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BRUSHLESS DC MOTOR FOR ELECTRIC BICYCLES

SUMMARY

Nowadays electric bicycles are one of the most prominent and progressive technologies. Electric bicycle technology depends on a special electric drive system that is powered by a battery and an electronic control device. Electric bicycle leads their drivers to cover more distances and go up hills with little effort thanks to the electric power, no matter user's ages and conditions are. With these advantages of electric bicycle, cycling is not only used for sports and entertainment but also used for means of transportation, especially for short distances. Another advantage of electric bicycles is that they do not lose their mobility even if the battery gives out because the driver can go on with cycling. Since they bring numerous advantages for urban transportation and build a step for electric vehicles to get in human life.

Two-wheel electric vehicles have an important role in the individual transportation owing to being environmentally friendly with no carbon emission and ease of use in traffic. The first electric bicycle was patented in 1895 by Ogden Bolton. In time, the various electric bicycles have been designed and developed. In recent years, electric bicycles are also commercially available and they have been very popular into the two-wheel electric vehicle market. While electric bicycles have been widespread, many countries have been formed legal limitations. Power assisted electric bicycles and their features are identified by EN 15194 European Standard.

According to the EN 15194 European Standard the maximum continuous rated power should be 250 W. If the cyclist stops pedaling, the output is progressively reduced and finally cut off as the vehicle reaches a speed of 25 km/h. To reach higher speeds, cyclist should make an effort. Since electric bicycles are hybrid vehicles, motor cuts off the output when driver stop pedaling. European Standard specifies the battery voltage up to 48 V for safety requirements. Thus, electric bicycles are kept in the bicycle class. The legal status of electric bicycles, which are identified by EN 15194 European Standard, is same with classic bicycles. Thus, there is no need to the driver license, tax obligation or age limitation to use electric bicycles.

There are a lot of studies and patents about electric bicycles. The designs and applications vary according to their mechanical transmission systems and placement of them. According to their motor placement, there are rear, front or middle drive type electric bicycles in the market. Electric bicycles basically consist of electric motor, motor driver, and battery. An electric motor is an electromechanical energy converter, and it is the basic component, which mostly affects efficiency and performance of the electric bicycle system. Therefore, identifying an ideal electric motor during electric bicycle design has been a popular subject of academic and commercial researches. In literature review and detailed market research, it was seen that brushless direct current motors (BLDCM) are used in high-level electric bike applications. Since there is no winding in their motors, BLDCM have low copper losses and high efficiency. In

addition, their torque production capacity and energy density are high thanks to the permanent magnets in their rotors.

The aim of this project is designing an optimum BLDCM for the electric bicycle applications in accordance with EN 15194 European Standard. It was decided that continuous rated output power is 250 W. In addition, motor rated voltage was chosen as 36 V because this level is widely used by electric bicycle battery suppliers and also within reasonable bounds of EN15194 European Standard. The design objective was assembling the electric motor in the rear wheel of an electric bicycle. The direct drive application, also known as hub motor system, is widely used in light electric vehicle systems and it brings about many advantages. For instance, implementation is easy, there is no mechanical transmission losses and there is more area for placement of motor. It is also suitable for retrofit systems.

Firstly, electric bicycle Simulink model was built in order to determine torque, speed and power requirements under different road and load conditions. By means of simulation results, the motor specifications were determined and it was decided that using high pole motor to satisfy high torque demand of electric bicycle. Then, features of BLDCM was examined. Conventional electric motors are constructed with distributed winding. For high pole distributed winding motors, the numerous slots have to be used and this situation causes manufacturing difficulties, high copper volume and high cost. In the literature, there is a new approach to make manufacturing process of electric motor easier and enhance efficiency of high pole motors. These type motors are named as fractional slot winding motors. These motors are constructed with concentrated winding. Thus, fractional slot winding motors have high torque production capacity with low ripple, short end-turns, high efficiency, high fault tolerance and low manufacturing costs. Owing to these advantages, fractional slot winding BLDCM was intended to design. Fractional slot winding motors can be wound with single or double layer. The layer type should be selected according to the application which motor will be used. Also, there are several method to determine the motor winding layout.

Fractional slot winding motors can be in various slot/pole combinations. Firstly, the literature was reviewed that there are some criteria to determine optimum slot/pole combination. The motor slot number have to be even; thus, motor unbalanced magnetic forces are eliminated. Designing the motor with high value of fundamental winding factor is advantages. This leads to decreasing in slot fill factor, copper volume and copper losses. The selected motor combination should have low cogging torque and low torque ripple. Thus, the slot/pole combination with high N value should be selected, which defines the lowest common multiple of the number of slots and the number of poles. The other criteria is the greatest common divisor of the number of slots and the number of poles. This value should be higher than one and even so, the net radial forces of motor are low. If the greatest common divisor of the number of slots and the number of poles equals to one or an odd number, abnormal radial forces can be seen on the motor. According to these criteria, the optimum motor slot/pole combinations which were selected are about to be designed.

The basic motor parameters were calculated according to physical limitations of bicycle and motor power. Motor axial length is limited by bicycle cassette type and fork width because the motor will be placed into the rear wheel of the bicycle. The other limitation is about stator inner diameter. The motor driver board will be placed in the motor hub due to use minimum transmission cable and to make system more

compact. Then, inner diameter of the stator have to be longer then diameter of the motor driver board. The motor dimensions were determined in an interval and these dimensions were corrected by using power and valume relation of the motor according to the literature. Then, the motor materials, as magnet type, stator and rotor steel codes, had been chosen.

The designs were experimented for determined combinations and limitations by ANSYS RMxprt software. RMxprt can calculate machine performance with using classical motor theory and equivalent magnetic circuit methods. Motor parameters were calculated by this tool and motor initial sizing decisions were made according to analytical analysis results.

36/34 motor combination with two layer winding was chosen because its analyze results were closer to desired parameters as torque quality, weight, efficiency, and ease of manufacturing. Then, various designs were experimented for this combination by changing dimensions and slots. Thus, motor dimensions were optimized and effects of motor dimensions over the motor performance were determined. After the analytical analysis, designs were validated by using ANSYS Maxwell software. Maxwell is an electromagnetic field simulation software for designing and analyzing 2D and 3D electromagnetic and electromechanical devices. It uses finite element method to solve electromagnetic field. In consideration of analytical and finite element analysis, the most convenient model was chosen in order to produce.

After the production stage, motor laboratory tests were made in a special test equipment. Nominal parameters, efficiency and thermal performance of the motor were determine by laboratory tests these were applied in accordance with EN 60034 Rotating Electrical Machines International Standard. It was clearly seen that the test results are similar to design data and motor is found appropriate for electric bicycle applications. 26 inch rim wheel was chosen for the prototype. Motor were assembled into the the rim of the rear wheel and integration of bicycle is achieved. With driving tests, it is seen that the system functions as planned without any problem.

1. GİRİŞ

Bisiklet ucuz, temiz ve sessiz oluşu, trafik ve park problemlerini azaltıcı etkisi ile şehir içi ulaşım için ideal bir çözümdür. Bir insan yürürken tükettiği enerjiyi kullanarak bisikletle iki ya da üç kat daha hızlı yol alabilir. Bu özelliği ile bisiklet bilinen en verimli araçtır [1]. Bisikletin, insan sağlığı üzerinde de önemli faydaları bulunmaktadır. WHO' nun araştırmasına göre günde yarım saat bisiklet sürmek insan ömrünü sekiz yıl arttırmaktadır [2]. Ancak, belirli konfor koşullarının eksikliği sebebiyle bisikletin ulaşım aracı olarak kullanımı oldukça sınırlıdır. Elektrikli bisikletler, elektrik gücü desteği sayesinde bisiklet kullanıcısının daha uzun mesafeleri kat etmesini ve dik yokuşların kolaylıkla çıkılabilmesine olanak sağlar. Günümüzde elektrikli bisikletin yaygınlığı gittikçe artmaktadır. Electric Bike World Report 2013' e göre, 2015 yılına gelindiğinde dünya genelindeki yıllık elektrikli bisiklet satışının 40,000,000 adete ulaşması beklenmektedir [3].

Pedal destekli elektrikli bisikletler (pedelec) hibrit araçlardır. Sadece insan gücü ile ulaşım sağladığı gibi, motor destek modu ile insan ve elektrik gücünü birleştirerek hareket sağlar. Elektrikli bisikletler, bisikletin insan gücüne bağımlılığını azaltır. Bisiklet sürmenin zor olduğu yokuşlu bölgelerde motor desteği ile bisikletin kullanımını kolaylaştırır, daha az efor sarf ederek aynı hızla seyredebilmeye ve varılacak yere daha kısa sürede ulaşmaya olanak sağlar. Elektrikli bisikletler sayesinde yaş ya da kondisyondan bağımsız olarak daha çok insan bisiklet kullanabilmektedir. Bu sayede bisikletin sadece spor ve eğlence için değil, bir ulaşım aracı olarak da kullanımı yaygınlaştırmaktadır.

Günümüzde elektrikli araçlar ile ilgili en büyük kaygılardan biri olan bataryanın bitmesi sonucunda yolda kalma problemi elektrikli bisikletler için geçerli değildir. Bataryanın bitmesi durumunda klasik bisiklet moduna geçerek mobilitelerini kaybetmezler. Bu avantajıyla elektrikli bisikletler, elektrikli araçların günlük hayatımıza geçişinde önemli bir adım olarak da görülebilirler.

Elektrikli bisikletler temel olarak elektrik motoru, sürücü ve bataryadan oluşan sistemlerdir. Sürücüye destek sağlayan motorun ön tekerlek, arka tekerlek ya da pedala yerleştirildiği üç farklı tip elektrikli bisiklet uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır. Motoru pedala yerleştirilmiş elektrikli bisikletlerde ağırlık merkezinin değişmemesi ve tekerlekler üzerinde ekstra ağırlık oluşmaması avantajları bulunsa da bu yapı kullanıcının mevcut bisikletini elektrikli bisiklete dönüştürmesini sağlayan “elektrikli bisiklet dönüşüm kiti” uygulaması için uygun değildir. Elektrikli bisiklet sistemlerinde montaj kolaylığı sebebiyle ön ya da arka tekerleğe monte edildiği hub motorlu sistemler tercih edilmektedir. Önden çekişli bisikletlerde yokuş performansı kötüdür ve frenleme esnasında tehlikeli durumlar oluşabilir. Arka tekerlekte hub motor sistemi, hafif araçlar için en uygun uygulamadır ve yokuşta çekiş performansı daha iyidir [4].

Hub motor sistemi olarak da bilinen elektrik motorunun tekerlek göbeğine monte edildiği doğrudan sürüş sistemlerinin imalat kolaylığı ve bisiklet üzerinde yer kazanımı sağlamanın yanı sıra birçok avantajı bulunmaktadır. Düşük hız ve yüksek moment çalışma durumu için uygun olan bu sistem, dişli ya da mekanik dönüştürücüye ihtiyaç duymadığından dolayı mekanik iletim kayıplarının ortadan kaldırır, yüksek verimli hareket sağlar. Yokuş aşağı iniş ve frenleme durumlarında geri kazanımlı frenlemeye olanak sağlayan bu sistem bisikletin menzilini arttırır. Doğrudan sürüşün diğer bir önemli özelliği ise aracın manevra kabiliyetini ve yol tutuşunu arttırmasıdır [5].

Tekerlek içine monte edilecek motor tipi belirlenirken öncelikli olarak düşük maliyetli olmaları nedeniyle asenkron motor ve anahtarlamalı relüktans motorları alternatif olarak düşünülebilir. Asenkron motor ve anahtarlamalı relüktans motorların elektrikli bisikletlerde kullanılması ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunsa da bunlar akademik düzeydedir. Anahtarlamalı relüktans motorlarının moment dalgalılığı çok yüksek olduğundan dolayı çalışmaları düzensizdir. Asenkron motorlarda rotor sargılarında endüklenen akım bakır kayıplarının ve motor sıcaklığının yükselmesine neden olur. Artan sıcaklığa bağlı olarak rotor sargı direncinin değişmesi ve asenkron motorlarda görülen kayma problemi, bu tip motorların moment ve hız kontrollerinin zorlaşmasına neden olur. Sürekli mıknatıslı motorların rotorunda sargı bulunmadığından dolayı bakır kayıpları düşüktür ve verimleri yüksektir. Yapılarındaki sürekli mıknatıslardan dolayı enerji yoğunlukları daha fazladır. Bu üstünlüklerinden dolayı, yüksek

performanslı elektrikli bisiklet uygulamaları için sürekli mıknatıslı motor kullanımı kaçınılmazdır [6], [7].

Fırçasız motorlar, rotorları çevrildiğinde sargılarında endüklenen gerilimin dalga şekli trapezoidal olan fırçasız doğru akım motorları ve sinüzoidal olan sürekli mıknatıslı senkron motorlar olarak sınıflandırılırlar. Bu motorların yapıları ve kontrol devreleri fiziksel olarak benzer olsa da kontrol yöntemleri farklıdır. Fırçasız doğru akım motorunun kontrolü daha kolaydır ve düşük maliyetlidir [7]. Bu nedenle, elektrikli bisiklet uygulamalarında yaygın olarak fırçasız doğru akım motoru kullanımı tercih edilmektedir.

1.1. Tezin Amacı

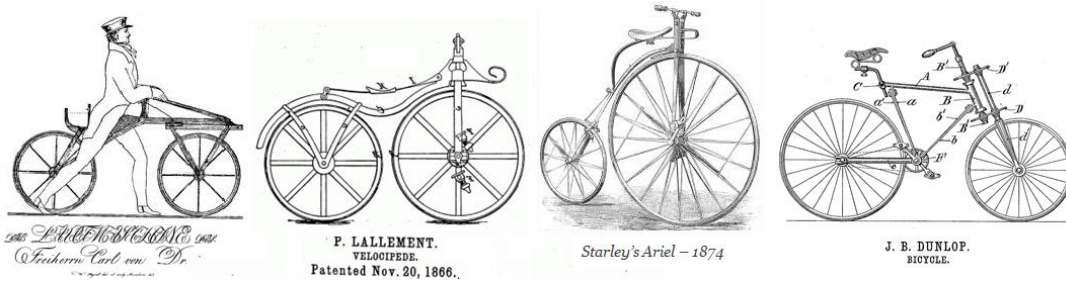
Elektrikli bisikletler ile ilgili çok çeşitli tasarımlar, patentler ve ticari olarak pazara sürülmüş ürünler bulunsa da, elektrikli bisiklet temel olarak elektrik motoru, motor sürücüsü ve bataryadan oluşan bir sistem olarak tanımlanabilir. Elektromanyetik enerji dönüşümünün gerçekleştiği elektrik motoru, sistemin performansını ve verimliliğini en çok etkileyen bileşen olarak görülmektedir. Bu nedenle, elektrikli bisiklet sistemlerinin tasarımında, uygun elektrik motorunun seçilmesi büyük önem taşır. Bu çalışmada, elektrikli bisikletler için en uygun fırçasız doğru akım motor yapıları incelenerek optimum tasarıma ulaşılması, seçilen motor tasarımının üretilmesi ve laboratuvar testlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, elektrikli bisiklet sisteminin gereksinimleri doğru analiz edilerek, motorun sahip olması gereken özellikler ve temel büyüklükleri belirlenecektir. Literatürde önerilen motor tiplerinden yola çıkılarak belirlenen uygun motor tiplerinin bilgisayar destekli tasarımı ve elektromanyetik analizleri yapılacak, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek en uygun motor tipinin üretimi gerçekleştirilecektir.

1.2. Elektrikli Bisikletin Tarihsel Gelişimi

Bisikletin icadı hakkında kesin bilgiler bulunmamakla birlikte, ilkel anlamdaki ilk bisikletin 12. yüzyılda Çin’de ortaya çıktığı düşünülmektedir [8]. Tarih içerisinde birçok mucidin katkıları ile günümüzdeki halini alan bisiklet ile ilgili bilinen ilk güvenilir kaynak ise 1817 yılına dayanmaktadır. Alman Baron Karl von Drais de Sauerbrun tarafından icat edilmiş iki tekerlekli tahta taşıt, binicisinin yerden aldığı

destek ile hareket sağlamakta ve bisikletin atası olarak kabul edilmektedir. Drais, Almandada ‘koşu makinası’ anlamına gelen “laufmaschine” adını verdiği icadı için 1818 yılında patent almıştır. Kısa sürede Batı Avrupa ve Amerika’ da “velespit” ismiyle yaygınlaşan bu taşıt, halk arasında “hobi atı” ya da “züppe atı” olarak bilinmektedir. At arabasına alternatif olması ve yüksek hızlara ulaşabilmesine karşın, artan kazalardan dolayı 1821 yılında kullanımı yasaklanmıştır. Bu dönemde velesipitin geliştirildiği ülkeler raylı ulaşım konusunun tesiri altında olduğundan dolayı 1860’ lı yıllara kadar bisiklet ile ilgili önemli bir gelişme kaydedilmemiştir [9].

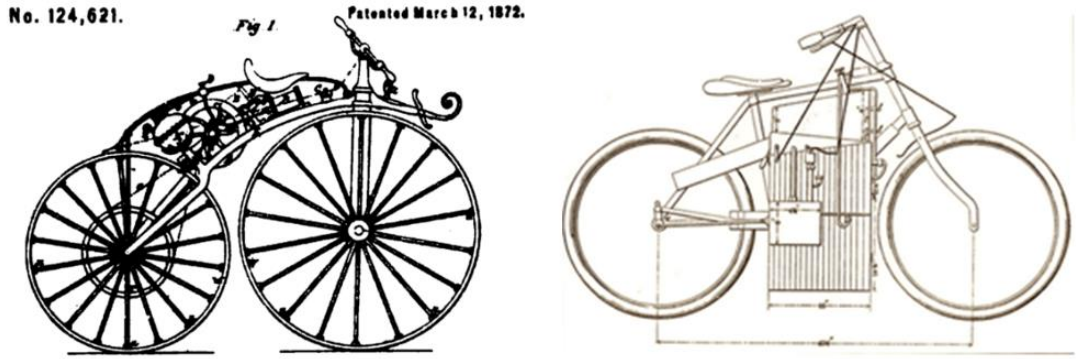
1866 yılında Fransız Pierre Michaux ve Pierre Lallement, ön tekerleğinde pedal bulunan tasarımları ile modern anlamdaki bisikletin temelini atmışlardır. Zaman içinde çeşitli tekerlek boyutlarında ve farklı formlarda bisiklet tasarımları ortaya çıkmıştır. 1870’ li yıllarda geliştirilen yüksek ön tekerlekli model, bisiklet tarihinin öne çıkan tasarımlarındandır. 1885 yılında, John Dunlop’ ın zincirle hareket sistemini ve pnömomatik lastikleri geliştirmesiyle bisiklet güvenilir ve konforlu bir ulaşım aracı haline gelmiştir. Bisiklet için geliştirilen bilyeli rulman, pnömomatik lastik, zincir germe dişlisi gibi birçok teknoloji hem motosiklet hem de otomobillerin gelişiminde büyük rol oynamıştır. Bu yönüyle bisiklet, bireysel ulaşım teknolojilerinin çıkış noktası olarak görülmektedir [8],[9].



Şekil 1.1 : Bisikletin tarihsel gelişimi [8], [10], [11], [12].

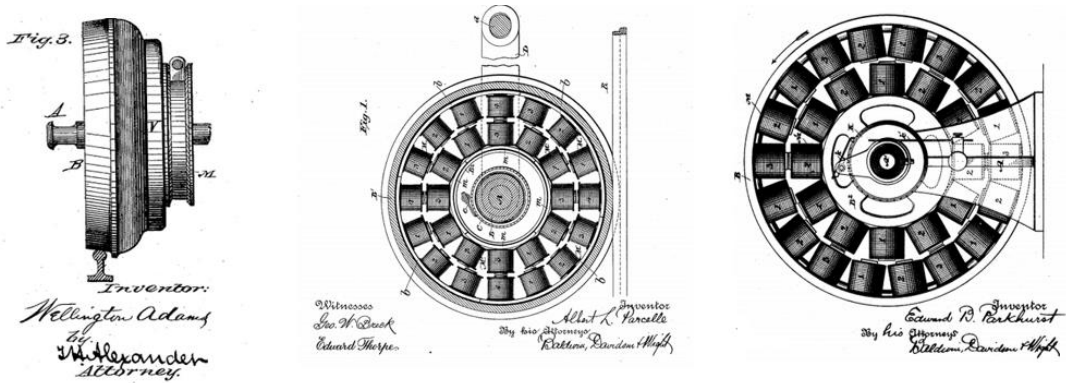
19. yüzyılın sonuna kadar bisiklete özellikle Batı Avrupa ülkelerinde büyük bir ilgi bulunmaktadır. İlginin Amerika’ ya kıyasla daha yüksek olmasının nedeni, yerleşim yerleri arasındaki mesafelerin Avrupa’ da daha kısa olmasıdır. Fabrikaların artması ve seri üretimin maliyetler üzerindeki olumlu etkisi ile bisiklet geniş kitlelere ulaşmıştır. 19. yüzyılın sonunda ise Avrupa’ da bisiklet spor ve hafta sonu gezilerinde kullanılan bir araç halini almıştır. II. Dünya Savaşı sırasında petrolün bulunamamasının etkisiyle bisikletler yeniden sokaklardaki yerini almış olsa da, savaşın sonlanması ve petrol

sorununun ortadan kalkması ile birlikte bisiklete olan ilgi yeniden azalmıştır. Buna karşın az gelişmiş ülkelerde, bisiklet ulaşım aracı ve ihtiyaç olarak görülmektedir [9]. Bisiklet, insan gücü ile çalışan bir araç olması sebebiyle kullanıcıyı zorlayan ve menzilin kişisel performansa bağlı olduğu bir araçtır. Bisikletin kısıtlarını oradan kaldırmak amacıyla bisiklete motor ekleme fikri, bisiklete ilginin yoğun olduğu 1960' lı yıllara dayanmaktadır. İlk motorlu bisikletler, buhar makinası eklenerek geliştirilmiştir [9].



Şekil 1.2 : Michaux Perreaux (solda) ve Sylvester H. Roper (sağda) tarafından geliştirilen buharlı bisikletler [13].

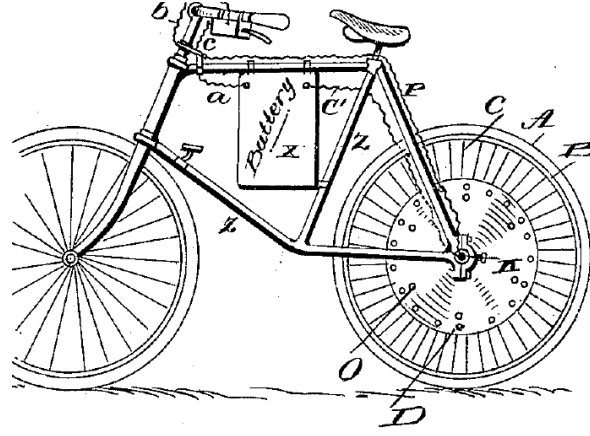
İki tekerlekli elektrikli araç teknolojisinin temellerini ise Wellington Adams, Albert Parcella ve Edward Parkhurst oluşturmuştur. İlk tekerlek içi motor (hub) patenti Wellington Adams tarafından 1884 yılında alınmıştır. Adams karmaşık bir dişli sistem üzerinden tekerlek içine bağlanan bir motor tasarlamıştır [14]. Albert Parcella' in 1890 yılında patentini aldığı tasarımı araç üzerine uygulanan ilk hub motordur. Edward Parkhurst ise, ilk düşük hızlı-yüksek momentli elektrikli hub motor patentini almıştır.



Şekil 1.3 : Tekerlek içi (hub) motor patentleri [14], [15], [16].

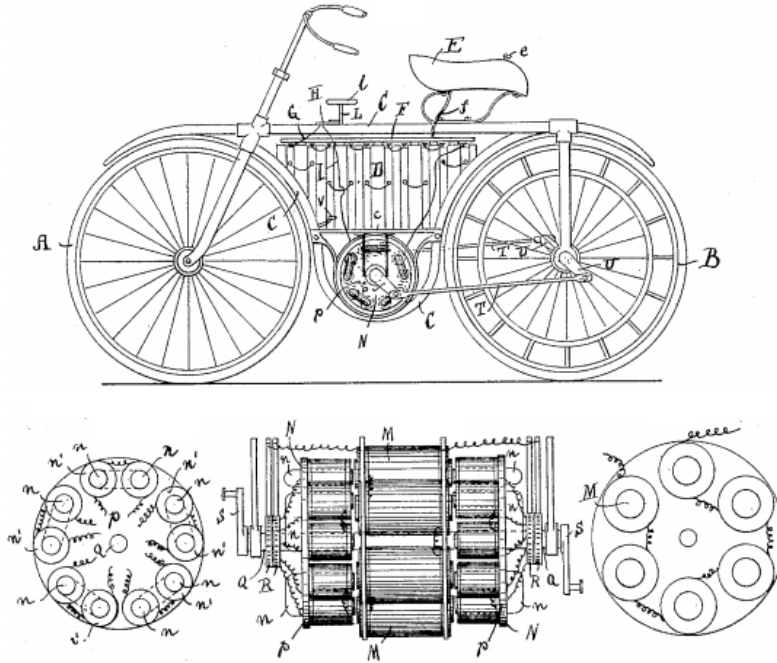
1895 yılında Ogden Bolton tarafından alınan patent, bilinen ilk elektrikli bisiklettir. Bolton, patentinde 100 V-10 A bataryadan beslenen 6 kutuplu sürekli mıknatıslı bir

firçalı doğru akım motorunu arka tekerleğe yerleştirdiğinden bahsetmiştir. Motorun içinde herhangi bir dişli sistem ya da mekanik dönüştürücü bulunmamaktadır. Bilinen ilk patent olmasına rağmen, Bolton'ın patenti günümüz elektrikli bisikletlerine benzer izler taşımaktadır [17].



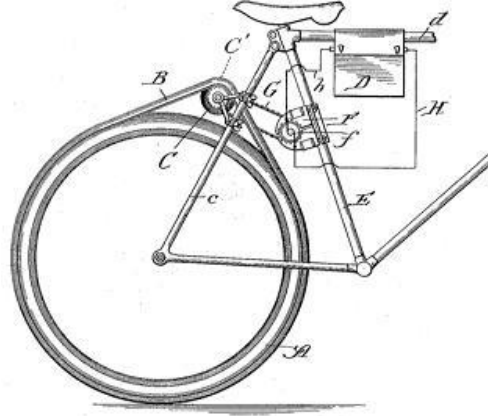
Şekil 1.4 : Bolton'ın elektrikli bisikleti [17].

Hosea W. Libbey' in 1897 yılında yapmış olduğu tasarımda, sürekli mıknatıslı firçalı iki elektrik motoru bisikletin pedalına yerleştirilmiştir ve üretilen moment mekanik bir iletim organı ile arka tekerleğe aktarılmıştır. Ayrıca, yokuş performansını arttırmak amacıyla sadece yokuşta devreye girmek üzere ikinci bir batarya sisteme eklemiştir [18].



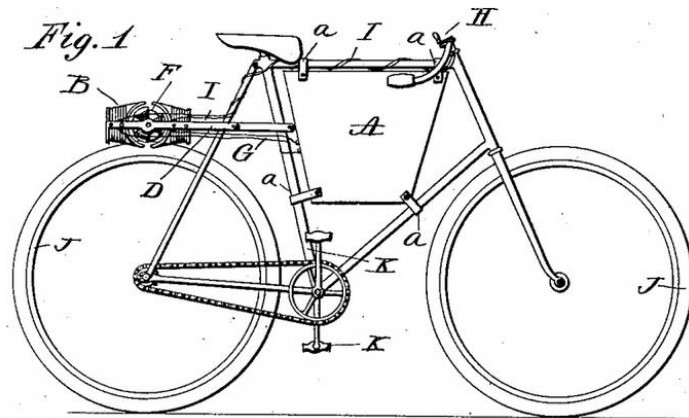
Şekil 1.5 : Libbey' in elektrikli bisikleti [18].

Mathew J. Steffens ise, 1898 yılında almış olduğu patentinde arka tekerleğe kayış üzerinden bağlı bir elektrik motoru ile sürüş sağlayan sistemi anlatmıştır. Motor sele borusuna yerleştirilmiştir. Moment, bir zincir aracılığı ile arka tekerleğin hemen üstünde bulunan kasnağa aktarılır, böylece kayış kasnak sistemi sayesinde arka tekerleğin motor desteği ile hareketi sağlanır. Steffens, bu sistemin üç tekerlekli bisikletlerde ve benzer araçlarda da kullanılabileceğini belirtmiştir [19].



Şekil 1.6 : Steffens' in elektrikli bisikleti [19].

John Schnepf' in 1899 yılında yapmış olduğu elektrikli bisiklet tasarımı, arka tekerleğin üst tarafına monte edilen elektrik motorunun tekerleğe değmesi ve sürtünme etkisi ile bisiklete hareket kazandırması prensibine dayanmaktadır. Schnepf, yokuş aşağı seyir durumunda motorun bir dinamo gibi çalışarak bataryayı şarj edeceğini, yine de normal şarj koşullarında bataryanın doldurulması gerektiğini belirtmiştir.

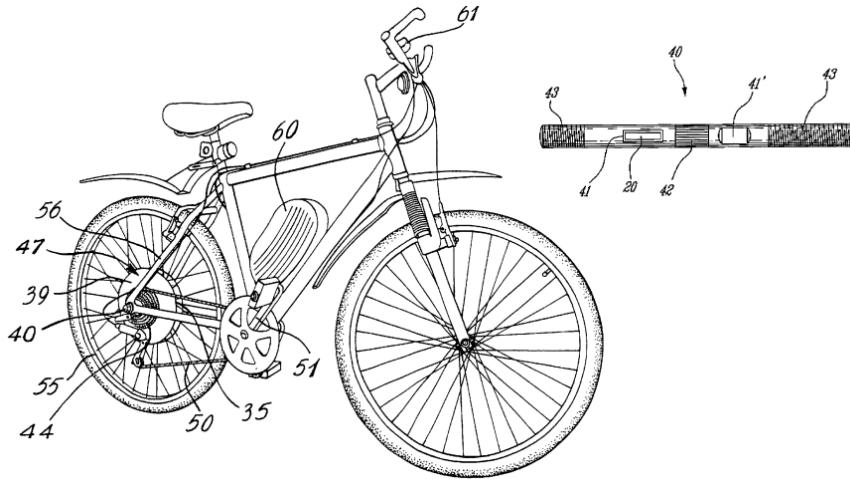


Şekil 1.7 : Schnepf' in elektrikli bisikleti [20].

Elektrikli bisiklet konusunda çok sayıda uluslararası patent bulunmaktadır. Bu konuda alınan patentler, çoğunlukla elektrikli sürüş sistemlerinin bisiklete farklı yöntemlerle

yerleştirildiği, çeşitli mekanik dönüştürücülerin kullanıldığı tasarım ve uygulamalar hakkındadır. Özel tip elektrik motorlarının kullanımının yanı sıra, güç elektroniği konusundaki ilerlemeler ile birlikte farklı modlarda çalışmaya uygun kontrolör tasarımlarının yer aldığı patentler bulunmaktadır. Moment algılayıcısı kullanımı ve motor kontrolü konusundaki patentler 1990' lı yılların sonunda ortaya çıkmıştır.

Jean-Yves Dubé' un 2005 yılında aldığı patentinde, motor desteğini devreye sokmak için bir gerinim algılayıcı (strain gauge) sensör kullanarak moment algılama işlemi için faydalı bir çözüm sunmuştur. Arka tekerlek göbeğinde bulunan motorun miline düşey olarak konumlandırılan sensör, sürücünün pedala basmasıyla mildeki burulmayı ölçerek sinyal oluşturur. Filtre, kuvvetlendirici ve analog-dijital çevirici üzerinden gerçek zamanlı olarak işlemciye gönderilen gerinim bilgisi ile motor devreye girer ve sürücünün pedala basma oranınca motor desteği sağlanır [18].



Şekil 1.8 : Dubé' un elektrikli bisikleti [21].

Günümüzde elektrikli bisiklet ticari bir ürün olarak satılmaktadır. Hızla büyüyen elektrikli bisiklet pazarında, çok çeşitli fiyat aralıklarında ve teknoloji seviyelerinde ürünler yer almaktadır. Temel olarak elektrik motoru, sürücü devre ve bataryadan oluşan elektrikli bisikletler, gelişmişliklerine bağlı olarak çeşitli sensörler ve gösterge panelini de barındırmaktadır. Bu bileşenlerin monte edilmiş olarak bisikletle birlikte satıldığı sistemler olduğu gibi, ayrıca satılarak kullanıcının mevcut bisikletini elektrikli bisiklete dönüştürmesini sağlayan kitler halinde de bulunmaktadır. Elektrikli bisiklet dönüşüm kitleri çoğunlukla janta monte motor, batarya, kontrol devresi ve bağlantı elemanlarından oluşur.



Şekil 1.9 : Örnek elektrikli bisiklet sistemleri- Arka motorlu sistem (sol üstte) [22], motoru pedalda olan sistem (sağ üstte) [23], ön motorlu sistem (sol altta) [24], elektrikli bisiklet dönüşüm kiti (sağ altta) [25].

1.3. İlgili Standart ve Yönetmelikler

Elektrikli bisikletin yaygınlığının artması ile beraber, birçok ülke motor gücü, hız, ağırlık ve motor desteğinin nasıl devreye gireceği konusuna yasal limitler getirmiştir. Ülkelerin, performans ve güvenlik yaklaşımlarına bağlı olarak oluşturdukları standartlar değişkenlik göstermektedir. Elektrikli bisikletler için çeşitli ülkelerde düzenlenmiş yasal elektrikli bisiklet limitleri Çizelge 1.1’ de özetlenmiştir. Standartlar ve yönetmelikler, sistemin temel tasarım parametrelerinin belirlenmesindeki en önemli etmenlerdir.

Çizelge 1.1 : Çeşitli ülkelerde düzenlenmiş yasal elektrikli bisiklet limitleri [26].

Bölge/ Ülke	Motor Güç Limiti [W]	Hız Limiti [km/h]	Ağırlık Limiti [kg]	Diğer Sınırlamalar
Avrupa Birliği	250	25	Yok	Pedal destekli olması
Britanya	200	25	40	Pedal ve açma/kapama düğmesi bulundurması
Kanada	500	32	Yok	Pedal, açma/kapama düğmesi ve 4’ten az tekerlekli bulunması
Tayvan	Yok	30	40	
Japonya	Yok	24	Yok	
Çin	240	20	Yok	Pedal bulunması
Amerika	750	32.2	Yok	Pedal ve 4’ ten az tekerlek bulundurma

Elektrikli bisikletler, elektrik gücü desteğinin devreye giriş türlerine göre ikiye ayrılırlar. Sürücünün pedal basmasına gerek kalmadan sürüş sağlayan elektrikli bisikletler genellikle gaz koluna benzer bir hız ayarlayıcısı ile çalışmaktadır. Sadece motor gücü ya da sadece pedal çevirerek sürüş sağlarlar. Pedal destekli elektrikli bisikletler (pedelec-pedal electric cycle) ise, insan ve motor gücünü birleştirerek hareket sağlayan hibrit araçlardır. Bu tip elektrikli bisikletlerde, sisteme sürücünün pedala bastığını algılayan bir moment sensörü eklenmesi gerekmektedir. Motor desteği sadece sürücü pedal çevirirken devreye girer, pedal çevirmeyi bıraktığında ise kesilir.

EN15194 Avrupa standardında pedal destekli elektrikli bisikletlerin özellikleri belirlenmiştir. Standartta göre sistemin maksimum sürekli nominal gücü 250 W olmalıdır ve bisiklet 25 km/h hızı aştığında destek gücü azalarak kesilmelidir. Daha yüksek hıza ulaşmak için sürücü kendi efor sarf etmelidir. Destek sadece sürücü pedal çevirirken devreye girmelidir, sürücü pedal çevirmeyi bıraktığında motor destek vermeyi kesmelidir. Sistem gerilimi güvenlik nedeniyle 48 V ile sınırlandırılmıştır [27].

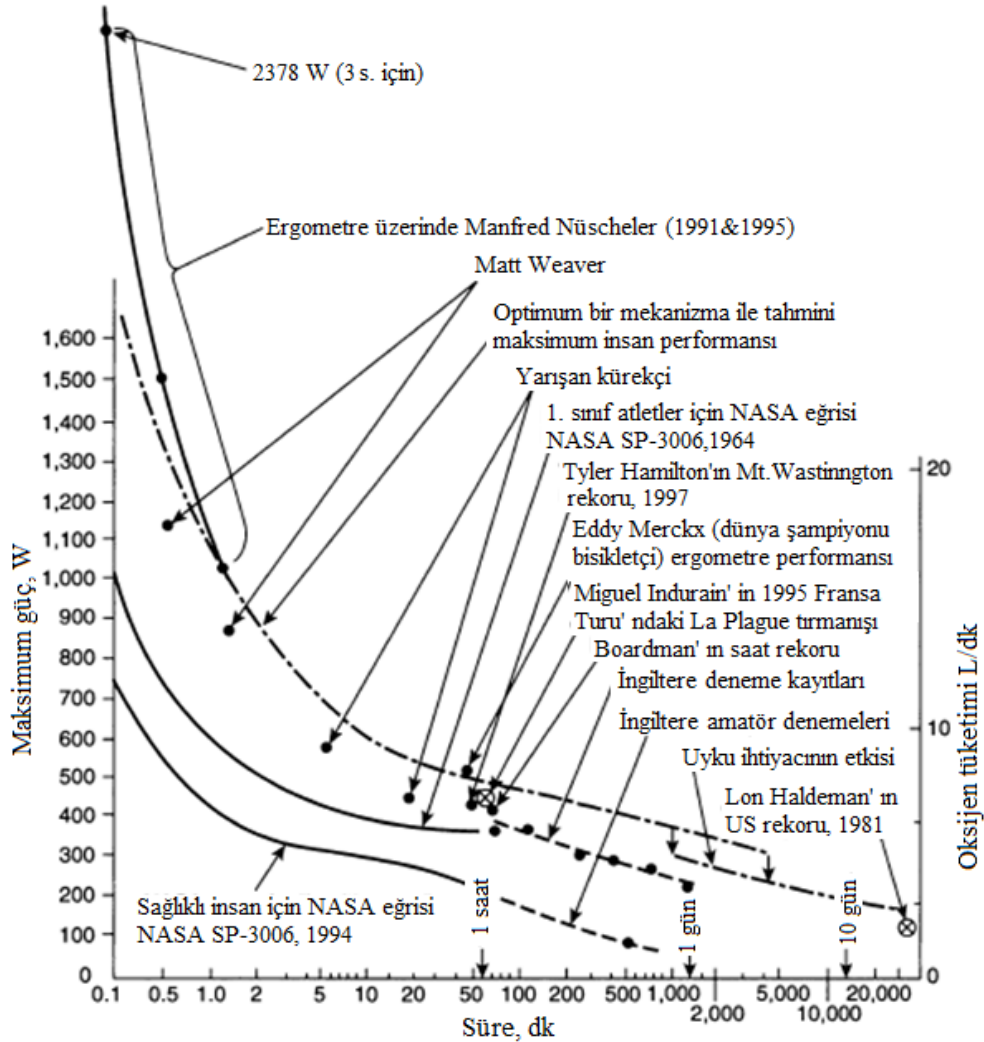
2918 Sayılı TCK Karayolları Trafik Kanunu' nun 3. maddesinde 12.07.2013 tarihinde yapılan değişikliğe göre motosiklet, bisiklet ve motorlu bisiklet tanımları yeniden yapılmıştır:

“Bisiklet: Üzerinde bulunan insanın adale gücü ile pedal veya el ile tekerleği döndürülmek suretiyle hareket eden motorsuz taşıtlardır. Azami sürekli anma gücü 250 W' ı geçmeyen, hızlandıkça gücü düşen ve hızı en fazla 25 km/h ulaştıktan sonra veya pedal çevrilmeye ara verildikten hemen sonra gücü tamamen kesilen elektrikli bisikletler de bu sınıfa girer [28].”

Standartlarda yer alan limitlerin belirlenmesindeki temel yaklaşım, elektrik gücü destekli bisikletlerin, bisiklet sınıfında yer alabilmesi içindir. Hız limiti belirlenirken, şehir içinde klasik bisikletler için yaygın olan hız seviyesi baz alınmıştır [26]. Motor güç limitinin belirlenmesinde ise, bisiklet sürüşü sırasında insan tarafından üretilen güç önem taşımıştır. Böylece elektrikli bisikletler lisans gerektirecek “motorlu taşıt” sınıfına dahil olmazlar. EN 15194 standardına uygun elektrikli bisikletlerin statüleri yasal olarak bisiklet ile aynıdır ve pedal destekli elektrikli bisiklet (pedelec) olarak

anılırlar. Böylece, pedal destekli elektrikli bisiklet kullanıcısı için ehliyet zorunluluğu, vergi yükümlülüğü ya da yaş sınırı bulunmamaktadır.

Bisiklet sürüşü esnasında insanın ürettiği gücü ölçmek amacıyla literatürde pek çok araştırma bulunmaktadır. “Nefes alma oranı ölçüm aleti” ile “Yapılan iş-Oksijen tüketimi” ilişkisi kurularak seyir sırasında yapılan işi belirlemek mümkündür. Bunun yanı sıra ergometre adı verilen ölçü aleti ile laboratuvar koşullarında yapılmış deneylerden elde edilen pek çok veri mevcuttur. İnsan-bisiklet performans araştırmaları genellikle farklı deney grupları ile gerçekleştirilir. Her bireyin kas kütlesi, vücut yapısı ve kondisyon durumu farklı olacağından dolayı bu çalışmalarda elde edilen çıktılar hakkında genelleme yapmak oldukça güçtür, her bir bireyin güç-zaman eğrisi kendine özgüdür [9].



Şekil 1.10 : Çeşitli kullanıcılar için pedal çevirirken harcanan enerji eğrisi [9].

Bisiklet sürüşü sırasında anlık olarak çok yüksek güç değerlerine ulaşılabilir de (güçlü bir erkek için 1500W ve üzeri), birkaç saniye içinde sürücü yorulmaya başlar. Genel olarak güçlü bir sürücü için birkaç dakika boyunca güç seviyesi 500W' tır. Yaklaşık bir saat boyunca bisiklet sürüş gücü 350 W seviyesinde seyrederek, 250 W güç seviyesinde ise tüm gün sürüş sağlayabilir. Sağlıklı insanların sonuçları değerlendirildiğinde ise, 2-12 dk. arasında tipik güç aralığı 200-400 W arasında ölçülmüştür. Bisiklet sürücüsünün kütlesine bağlı olarak belirlenen kısa süreli güç değerleri; formda olmayan insan için 2-4 W/kg, hobi olarak bisiklet kullanan insan için 6-10 W/kg ve şampiyon bisikletçiler için 10 W/kg olarak belirtilmiştir [9]. Bu durumda, kilo ortalamasının 70.8 kg olduğu Avrupa için bisiklet kullanıcısı güç tüketimi ortalaması yaklaşık olarak 212.4 W seviyesindedir. Türkiye' de insan ağırlığı ortalamasının 71.5 kg olduğu düşünüldüğünde, Türkiye için ortalama bir bisiklet kullanıcısının güç tüketiminin yaklaşık 214.5 W olacağı sonucuna ulaşılabilir.

İnsan-bisiklet performansı ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, EN 15194 Avrupa Standardında ve 2918 Sayılı TCK Karayolları Trafik Kanununda pedal destekli elektrikli bisikletler için belirlenen 250 W azami anma gücünün, bu araçların bisiklet sınıfında değerlendirilebilmesi adına uygun bir seviye olduğu görülmüştür.

1.4. Elektrikli Bisiklet ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Elektrikli bisikletler ve bu sistemlerde kullanılan bileşenler ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıntılı bir literatür araştırması yapılarak elektrikli bisikletler ile ilgili performans analizi, deney ve simülasyon gerçekleştirilmiş, elektrikli bisikletlerde kullanılmak üzere motor tasarlanmış olan çalışmalar incelenmiştir.

2007 yılında, A. Muatze ve Y. C. Tan' ın "Electric Bicycles – A Performance Evaluation" isimli çalışmalarında, elektrikli bisiklet pazar trendleri ve yasal sınırları ile ilgili ayrıntılı incelemeler, teknik ve bilimsel açıdan yapılmış değerlendirmeler yer almaktadır. Ticari olarak satılmakta olan ürünleri sistematik bir şekilde sınıflandırarak olumlu ve olumsuz yönlerini belirlenmiştir. Bu çalışmada, elektrikli bisikletlerin performansını etkileyen anahtar parametrelerin yanı sıra, güç talebi ile ilgili hesaplar da bulunmaktadır. Yapılan deneylerde ön tekerleğinde doğru akım motoru bulunan elektrikli bisiklet kullanılmıştır ancak, yüksek yokuş performansı için tekerleğin

arkada olması önerilmiş ve daha verimli olması sebebiyle fırçasız doğru akım motoru kullanımının daha avantajlı olacağı belirtilmiştir [29].

2013 yılında yayınlanmış, Jianing Lin, N. Schofield ve A. Emadi tarafından hazırlanmış olan “*External-Rotor 6–10 Switched Reluctance Motor for an Electric Bicycle*” isimli çalışmada, elektrikli bisiklet pazarının hızla büyüdüğü ve Çin ile rekabet etmekte zorlanan Avrupalı üreticilerin yüksek moment ve güç yoğunluğuna sahip, basit yapılı ve düşük maliyetli bir motor tipine gereksinim duyduklarının altı çizilmiştir. Elektrikli bisiklet sistemlerinde yaygın olarak fırçalı ve fırçasız doğru akım motorlarının kullanıldığı, fırçalı motorların düşük verimli olması ve fırçasız motorların yüksek mıknatıs maliyetlerinden ötürü bu gereksinimin anahtarlamalı relüktans motorları ile karşılanabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada, elektrikli bisikletler için 500 W gücünde, 6 stator-10 rotor oluşu bulunan, 3 fazlı dış rotorlu bir anahtarlamalı relüktans motoru tasarımı ve analizleri yapılmıştır [30].

2010 yılında yayınlanmış, Chlebosz, W., Ombach G., ve Junak, J. tarafından yapılan “*Comparison of Permanent Magnet Brushless Motor with Outer and Inner Rotor Used in E-Bike*” isimli çalışmada, elektrikli bisikletlerde kullanılan dış ve iç rotorlu sürekli mıknatıslı fırçasız senkron motorlar teorik ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Analizi yapılan elektrikli bisiklet motorunun anma çıkış gücü 250 W, motorun monte edildiği jant ise 26 inçtir. Çalışmada 18 oluk ve 20 kutuplu bir dış rotorlu sürekli mıknatıslı fırçasız senkron motor tasarımı yapılmıştır. İç rotorlu motor topolojisinin daha ucuz olan düz mıknatıs kullanımına olanak sağladığı ifade edilerek, ticari ürünler için iç rotorlu sürekli mıknatıslı fırçasız senkron motor kullanımı önerilmiştir [31].

E. A. Lomonova, A. J. A. Vandenput, J. Rubacek, B. d' Herripon, and G. Roovers tarafından hazırlanarak 2002 tarihinde yayınlanan “*Development of an Improved Electrically Assisted Bicycle*” isimli çalışma, elektrikli bisikletin mekanik, elektromekanik, elektromanyetik ve kontrol sistemleri ile ilgili kapsamlı incelemeler, tasarımlar, analiz sonuçları ve deneysel çalışmalar içermektedir. Yapılan çalışmada üretilen prototip bisikletin motor anma gücü 250 W, maksimum hızı 25 km/h, maksimum moment desteği ise %50 oranındadır. Batarya gerilimi 36 V olarak seçilmiştir. Bu kapsamda, radyal akılı sürekli mıknatıslı, eksenel akılı sürekli mıknatıslı ve oluksuz (yüzey sargılı) olmak üzere üç farklı tip motor topolojisi incelenmiş, tasarım ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirme

sonucunda, elektrik gücü destekli bisiklet prototipi için kare dalga akım ile sürülen radyal akılı sürekli mıknatıslı fırçasız motor seçilmiştir. Bu motor tipinin, diğerlerine kıyasla düşük maliyetli ve daha güvenilir bir sistem olduğu belirtilmiştir [32].

A. Adnan ve D. Ishak tarafından 2009 yılında yayınlanmış “Finite Element Modeling and Analysis of External Rotor Brushless DC Motor for Electric Bicycle” isimli çalışmada, elektrikli bisiklette kullanılmak üzere doğrudan sürürlü, yüksek moment ve düşük hızlı, üç fazlı fırçasız doğru akım motorunun modeli kurularak sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılmıştır. Tasarlanan motor dış rotorlu olup yüzeyine NdFeB mıknatıslar yapıştırılmıştır. Motor desteğinin aktarılmasında mekanik bir dönüştürücü kullanılmadığı için sistem hafif ve yüksek verimlidir. Motor parametreleri sonlu elemanlarla analiz yapan Opera 2d programı ile hesaplanmıştır. Sonlu eleman analizi gerçekleştirilen çeşitli kesirli oluk sargılı motor için motor elektromanyetik karakteristiği, moment dalgalılığı, endüklenen gerilim dalga şekli, endüktans değeri ve demirin doyma durumu incelenmiştir. Tasarımlar arasından 9 oluk/ 10 kutup sayılı motorun akı dağılımının düzgün olduğu ve trapezoidale en yakın olan endüklenen gerilim dalga şekline sahip olduğu belirtilmiştir. Dış etkisi momenti tepe değeri 12 oluk/ 10 kutup motor için 0.11 Nm, 9 oluk/ 8 kutup motor için 0.10 Nm ve 9 oluk/ 10 kutup motor için ise 0.08 Nm olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları değerlendirilerek kesirli oluk sargılı 9 oluk/ 10 kutup motorun prototip üretimi gerçekleştirilmiştir [33].

2011 yılında yayınlanan, B. Kerdsup ve N. H. Fuengwarodsakul tarafından hazırlanmış “Dynamic Model of Brushless DC Drive Using FE Method Based Characteristics” isimli çalışma, elektrikli bisiklette kullanılmak üzere bir dış rotorlu fırçasız doğru akım motorun tasarımının ve sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik simülasyonunun yapılması hedeflenmiştir. Model MATLAB/Simulink ve PLECS programları üzerinden kurulmuştur. Motor gücü 250 W, gerilimi 36 V’ tur. 18 oluk/ 20 kutuplu motorun faz direnci 0.16 Ω , endüktansı ise 0.5 mH’ dir. Analizler sonucunda, dış etkisi momentinin, maksimum momentin %1’ inden daha düşük olduğu belirlenmiştir. 28" janta monte edildiğinde bisikletin yüksüz hızı 28 km/h olarak ölçülmüştür. Simülasyon sonuçları yapılan deneyler ile doğrulanmıştır [34].

2011 tarihinde yayınlanan, R. Nejat Tuncay, Özgür Üstün, Murat Yılmaz, Can Gökce, Utku Karakaya tarafından gerçekleştirilmiş “*Design and Implementation of an Electric*

Drive System for In-Wheel Motor Electric Vehicle Applications” karma ve tümü elektrikli araçlar için tekerlek içi motor sürüş sisteminin tasarımı ve araç üzerine uygulanması ile ilgilidir. Bir karma elektrikli aracın SIMULINK modeli kurularak performansı belirlenmiş, sistem için iki adet 15 kW gücünde dış rotorlu fırçasız doğru akım motoru kullanımına karar verilmiştir. Elektromanyetik analizler sonucunda belirlenen motor tasarımı için jantın içine yerleşebileceği şekilde mekanik tasarım yapılmıştır. Prototip imalatı gerçekleşen motorların ilk testleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Aracın arka iki tekerleğine motorlar monte edilmiş ve yol testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, araç üzerindeki mekanik diferansiyel kaldırılarak elektronik diferansiyele dönüştürülmüştür [5].

2012 yılında yayınlanmış, Ifedi ve arkadaşlarının yapmış oldukları “A High Torque Density, Direct Drive In-Wheel Motor for Electric Vehicles” isimli çalışmada elektrikli araç uygulamalarında kullanılmak üzere tekerlek içi fırçasız doğru akım motorları için uygun oluk ve kutup kombinasyonları araştırılmıştır. Anma gücü 54 kW, anma momenti 475 Nm olması istenen tekerlek içi fırçasız doğru akım motoru tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yüksek moment gereksiniminden dolayı yüksek kutup sayılı motor kullanımı tercih edilmiştir. Dış etkisi momenti, moment dalgalılığı ve dengesiz manyetik kuvvetlerin kabul edilebilir tolerans aralığında tutulması hedeflenmiştir. Tasarım çıktılarının değerlendirilmesi sonucunda, tasarım hedeflerine yakınlığı dolayısıyla oluk sayısı 72 kutup sayısı 64 olan motor elektrikli araç uygulamaları için önerilmiştir [35].

J. Cros ve P. Viarouge’ un 2002 yılında yayınlanan “*Synthesis of High-Performance PM Motors with Concentrated Windings*” isimli çalışmalarında, konsantrik sargı kullanımına uygun üç fazlı motor yapılarından bahsedilmektedir. Sargı başlarındaki bakır hacmini azalttığından dolayı, elektrik makinalarında konsantrik sargı kullanımının bakır kayıplarını düşürmek ve verimi arttırmak gibi birçok avantaj sağladığının altı çizilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde olukları düzenli dağılmış olan yapılar sunulmuş, sargı yapıları ve performansları tartışılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, konsantrik sargılı düzensiz oluk dağılımlı motor yapılarını oluşturmak için bir yöntem sunulmuştur. Geleneksel ve yeni motor tipleri için manyetik alan analizleri yapılmıştır. Konsantrik sargılı motorların performanslarının saha yüksek

olduğu belirlenmiştir [36]. Bu çalışmada sargı yapısının belirlenmesi için sunulmuş yöntem ikinci bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Seray Şenol ve Özgür Üstün' ün 2011 yılında yayınlanmış "*Design, Analysis and Implementation of a Subfractional Slot Concentrated Winding BLDCM with Unequal Tooth Widths*" isimli çalışmalarında, elektrikli araç teknolojisindeki ihtiyaçlardan ötürü klasik yaklaşımdan farklı olarak, yüksek verimli, kolay üretilebilir, yüksek moment ve yüksek hız gereksinimini karşılayabilecek yani alan zayıflatmaya uygun motor yapılarına olan ilginin altı çizilmiştir. Bu doğrultuda, hafif elektrikli araçlarda kullanılmak üzere 1 kW gücünde diş genişliği eşit olmayan alt-kesirli oluk sargılı bir fırçasız doğru akım motorunun tasarım, analiz ve üretim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. 24/20 oluk/kutup oranına sahip motorun, alan zayıflatmaya uygun olması açısından endüktasının yüksek olması hedeflenmiştir. Bu nedenle sargı tipi olarak tek katlı konsantrik sargı seçilmiştir. Yapılan üç boyutlu manyetik alan analiz çalışmaları ile elde edilen çıktılar doğrultusunda üretilen motorun uygunluğu, yapılan laboratuvar testleri ile kanıtlanmıştır [37].

Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, L. J. Wu ve G. W. Jewell tarafından yapılmış ve 2009 yılında yayınlanmış olan "*Influence of Slot and Pole Number Combination on Radial Force and Vibration Modes in Fractional Slot PM Brushless Machines Having Single- and Double-Layer Windings*" isimli çalışmada, farklı oluk ve kutup sayılarına sahip kesirli oluk sargılı yüzey mıknatıslı fırçasız motorlar için radyal kuvvetler ve titreşimli çalışma durumları incelenmiştir. Motorların oluk ve kutup sayıları arasındaki ilişki $2p = N_s \pm 2$ ve $2p = N_s \pm 1$, $q = 0.5$ olarak seçilmiştir. Hem tek hem de çift katlı sargı tipi uygulanmıştır. En belirgin titreşimin, en düşük dereceli radyal kuvvet harmoniğinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Tüm kesirli oluk sargılı sürekli mıknatıslı motorlarda, belirgin radyal kuvvetlerin manyetik alandaki harmoniklerden ve endüvi reaksiyonundan kaynaklanan belirtilmiştir. Motor oluk/kutup oranının ve sargı tipinin bu kuvvetler üzerindeki etkisi yapılan analizler ile incelenmiştir [38].

2. ELEKTRİKLİ BİSİKLET MOTORU TASARIM ÇALIŞMALARI

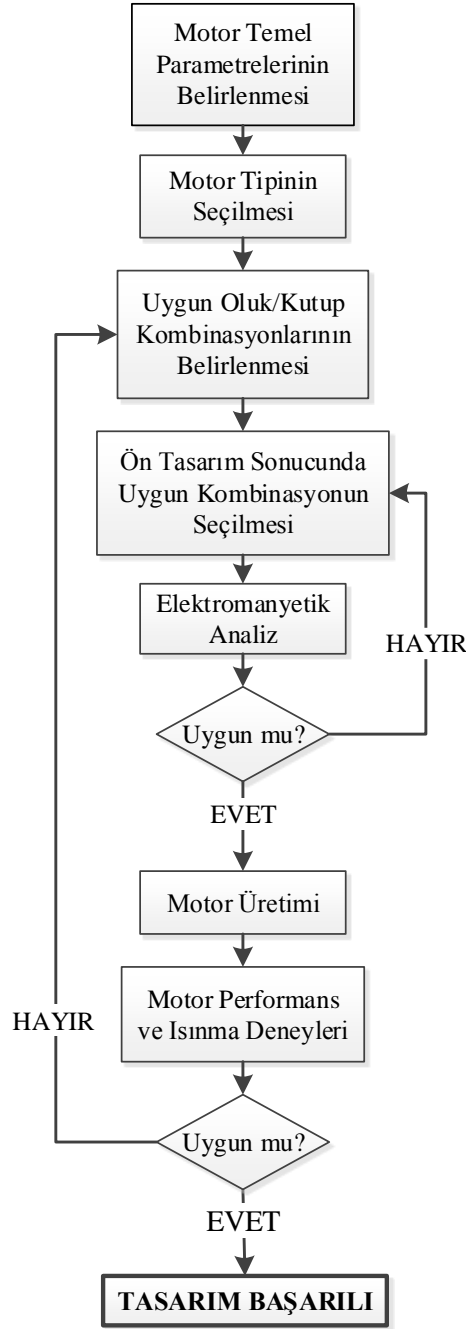
Bu çalışmada, elektrikli bisikletler için uygun bir elektrik motoru tasarımına ulaşılması hedeflenmiştir. Motor tasarımında genel yaklaşım, motorun kullanılacağı uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak motor tipi ve plaka değerleri başta olmak üzere motor temel parametrelerinin belirlenmesidir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilecek elektrikli bisiklet uygulamasının EN 15194 standardına uygun olması istendiğinden dolayı, tasarımı yapılacak motorun çıkış büyüklükleri bu standard uyarınca belirlenmiştir. Motorun anma çıkış gücü 250 W olacaktır. Piyasada yaygın olarak bulunan elektrikli bisiklet bataryalarının incelenmesi sonucunda motor gerilim seviyesinin 36 V olmasına karar verilmiştir. Sisteminin farklı seyir durumlarındaki moment ve hız ihtiyacını belirlemek amacıyla elektrikli bisiklet modeli kurulacaktır.

Elektrikli bisiklet ile ilgili yapılan literatür taramasında, yüksek performanslı elektrikli bisikletlerde tekerlek içi fırçasız doğru akım motoru kullanımının tercih edildiği görülmüştür. Bu doğrultuda, fırçasız doğru akım motorunun özellikleri ayrıntılı olarak incelenerek, tasarlanacak sistemin temel ihtiyaçlarına en uygun motor yapısı seçilecektir.

Motor gücü ve bisiklet üzerindeki fiziksel sınırlar incelenerek motor temel büyüklükleri belirlenecektir. Literatürde önerilen motor oluk/kutup kombinasyonlarından yola çıkılarak tasarım denemeleri yapılacaktır. Motor parametrelerinin ve kullanılacak malzemelerin seçilmesinin ardından, ANSYS firmasının RMXprt isimli analitik çözümleme yapan programı ile çeşitli motor geometrileri oluşturularak motor tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Tasarım çıktılarının moment, hız ve verim başta olmak üzere hedeflenen parametrelere yakınlığı incelenecektir. Tasarımların hedeflenen sonuçları vermemesi durumunda ise farklı boyut ya da oluk/kutup kombinasyonları için tasarımlar tekrarlanacaktır. Motor tasarımları, moment kalitesi, ağırlık, verim ve üretim kolaylığı açılarından değerlendirilerek en uygun motor oluk/kutup kombinasyonu seçilecektir.

Seçilen motor için farklı boyut ve oluk denemeleri yapılarak, bu modeller için elektromanyetik analiz gerçekleştirilecektir. RMxprt üzerinden oluşturulan modeller, sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Maxwell elektromanyetik analiz programına aktarılarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan analizlerin karşılaştırılması sonucunda en uygun tasarım belirlenerek üretimi gerçekleştirilecek ve yapılacak deneyler ile üretilen motorun tasarıma yakınlığı araştırılacaktır.

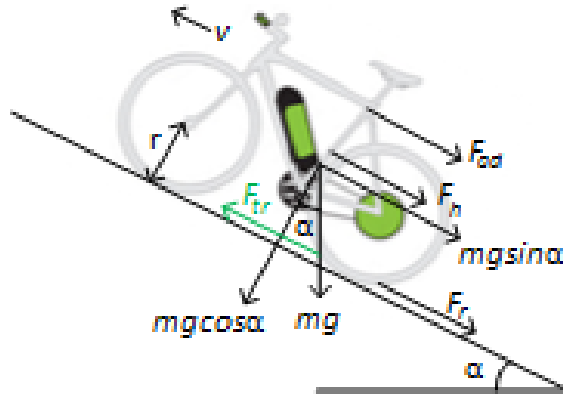


Şekil 2.1 : Motor tasarım çalışması akış şeması.

2.1. Elektrikli Bisiklet Modeli

Elektrikli bisikletin çeşitli hız, ivmelenme, yük ve yol durumlarındaki performansının belirlenmesi, tahrik sistemi tasarımı için oldukça önemlidir. Elektrikli bisiklet performansını belirlemek ve sistemin farklı seyir durumları altında ihtiyaç duyacağı moment ve hız değerlerini elde etmek amacıyla elektrikli bisiklet modeli kurulmuştur. Böylece, tasarlanacak motorun dinamik etkilere cevap verebilme potansiyeli araştırılmıştır.

Bisiklet ileri yönde hareket edebilmek için çekiş kuvvetine (F_{tr}) ihtiyaç duyar. Çekiş kuvveti, yuvarlanma direnci kuvveti (F_r), hava direnci kuvveti (F_{ad}), tırmanma kuvvetinin (F_h) üstesinden gelerek bisikletin hareket etmesini ve bisikletin ivmelenmesini (F_a) sağlar. Bu temel kuvvetlerin sistem üzerindeki etkilerine bağlı olarak dinamik bir model oluşturulmuştur [39].



Şekil 2.2 : Eğimli yolda elektrikli bisiklet üzerine etkiyen kuvvetler.

Bisiklet modelinin ilk adımı olarak çekiş kuvvetinin formülü (2.1)'deki formül ile tanımlanmıştır.

$$F_{tr} = F_r + F_{ad} + F_h + F_a \quad (2.1)$$

Sürtünme direnci, bisiklet tekerlek sürtünmesi tarafından oluşturulmaktadır. Yuvarlanma direnci kuvveti, bisikletin ağırlığı (m) ile tekerlek lastik tipi ve basıncına bağlı olan yuvarlanma direnci katsayısının (f_r) bir fonksiyonudur.

$$F_r = f_r mg \quad (2.2)$$

Hava içinde hareket eden bisiklet üzerindeki sürtünme aerodinamik direnç kuvvetini oluşturur. Bu kuvvet, ön yüzey alanı (A), hava sürtünme katsayısı (C_d), hava yoğunluğu (ρ) ve bisiklet hızının karesi (v) ile orantılıdır.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (2.3)$$

Tırmanma kuvveti, bisiklet ağırlığının eğim doğrultusundaki bileşenine eşittir. Bu bileşen, yokuş aşağı hareket durumunda negatif değer alır.

$$F_h = m g \sin \alpha \quad (2.4)$$

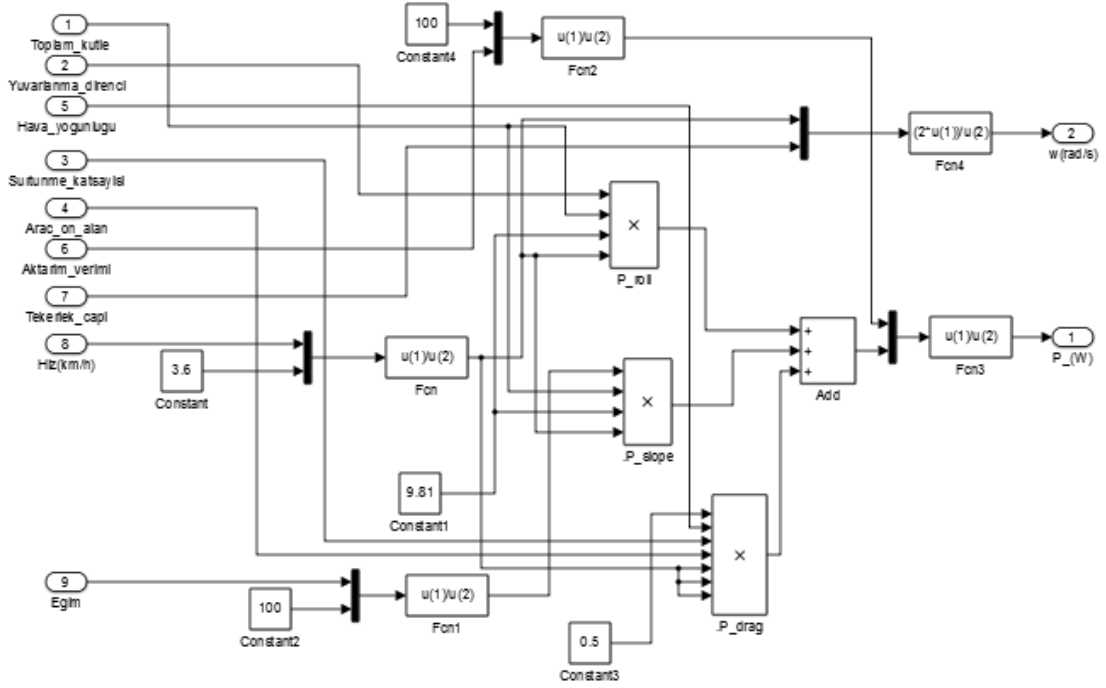
Hızın değişimi durumunda, araç ivmelenmek için ekstra kuvvete ihtiyaç duyar. Aracın yavaşlaması durumunda bu kuvvet negatif olacaktır.

$$F_a = m a \quad (2.5)$$

Çizelge 2.1.' de verilmiş olan parametrelere bağlı olarak elektrikli bisiklet modeli oluşturulmuştur. Modelde, aracın ivmelenmesi ihmal edilmiştir.

Çizelge 2.1 : Simülasyon parametreleri.

Parametreler	Değerler
Bisiklet kütlesi [kg]	20
Yük [kg]	70.8
Toplam kütle, m [kg]	90.8
Yuvarlanma direnci, f_r	0.007
Hava yoğunluğu, ρ [kg/m ³]	1.198
Hava sürtünme katsayısı, C_d	1
Araç ön alanı, A [m ²]	0.4
Tekerlek çapı [inç]	26
Tekerlek çapı [m]	0.66



Şekil 2.3 : Motor destek gücünün hesaplanması.

Kurulan elektrikli bisiklet modelinin doğruluğunu arttırmak adına, modele fırçasız doğru akım motoru kontrol bloğu eklenmiştir. Performans karakteristiklerinin benzemesi nedeniyle motor modelinde sabit uyarmalı bir fırçalı doğru akım makinası denklemleri kullanılmıştır.

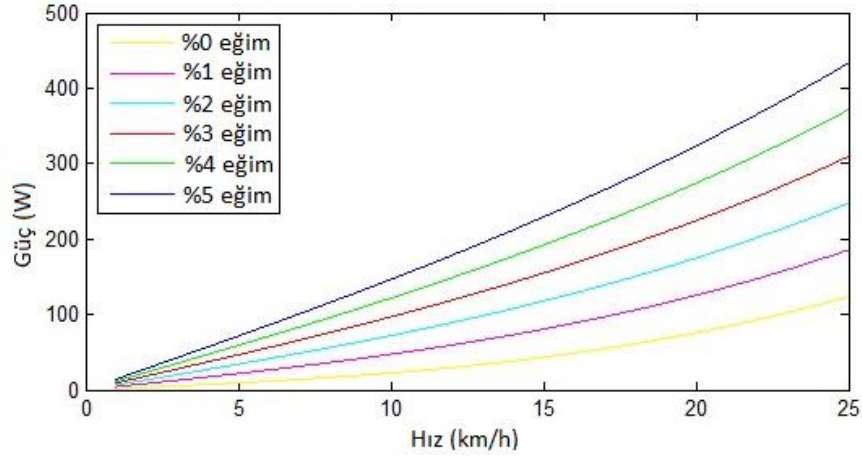
$$E = k_e \omega_m \quad (2.6)$$

$$T = k_t i \quad (2.7)$$

$$V_a = L \frac{di}{dt} + Ri + E \quad (2.8)$$

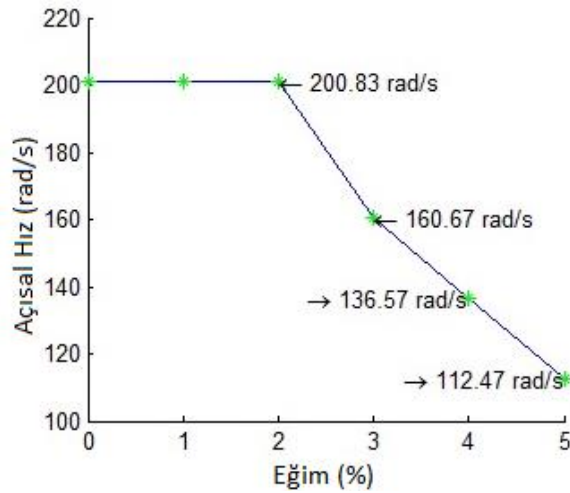
Eylemsizliği J_m , sürtünme katsayısı B ve yük momentini T_y olarak ifade edilmiş motor için basitleştirilmiş hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$T = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega + T_y \quad (2.9)$$



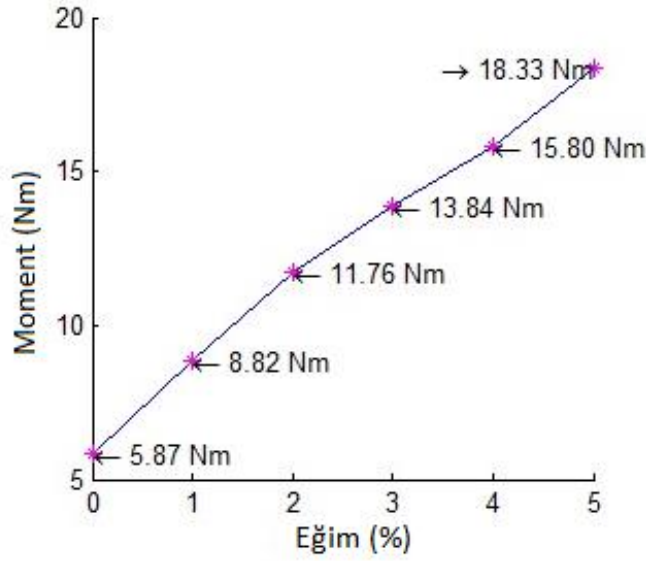
Şekil 2.6 : Değişen eğimler için motor gücü-hız eğrisi.

EN 15194 Avrupa standardına göre 250 W gücü ve 25 km/h hızı aşamayan elektrikli bisikletin belirlenen yol durumundaki seyri esnasında farklı eğimlerde ulaşabileceği maksimum hız değerleri Şekil 2.7’ de yer alan egride verilmiştir. %0-2 eğimleri arasında 250 W’ ı aşmadan daha yüksek hızlara ulaşabilse de hız limitinden dolayı %0-1 eğim için maksimum hız 26" jant için 25 km/h hıza tekabül eden 200.83 min^{-1} ’ dir. %2.044’ den daha yüksek eğimler için eğri kırılır ve bisikletin motor desteği ile ulaşabileceği maksimum hız değeri 200.83 min^{-1} ’ in altına düşer. Simülasyon sonucuna göre elektrikli bisikletin motor desteği ile %5 eğime kadar yüksek performanslı bir sürüş sağlanabilir. Daha yüksek eğimli yollarda ise ancak daha düşük hızlarla sürüş sağlayabilir. Simülasyon sonucunda %15 eğimli yolda 90.8 kg yüklü bisikletin maksimum hızı 6 km/h olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre, EN 15194 Avrupa standardına uygun bir elektrikli bisikletin yaklaşık %15 eğime kadar kaliteli sürüş sağlayabildiği anlaşılmıştır.



Şekil 2.7 : Maks. 250 W güç için farklı eğimlerdeki maksimum açısal hız eğrisi.

Şekil 2.8’ de farklı eğimler altında, 250 W sınırını aşmadan maksimum hız değerlerinde yol alabilmeyi sağlayan maksimum moment değerleri yer almaktadır.



Şekil 2.8 : Elektrikli bisiklet maksimum moment eğrisi.

Kurulan elektrikli bisiklet modelinde görüldüğü üzere eğim, yük ve yol durumuna bağlı olarak moment ihtiyacı artmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli bisiklet motorunun moment ihtiyacı karşılayabilecek yüksek moment/ağırlık oranına sahip, yokuşta düşük hız-yüksek moment çalışmaya uygun, farklı yük durumları için geniş hız aralığına sahip, yüksek verimli, hafif ve kolay imal edilebilir bir elektrik motoru tasarımı hedeflenmiştir. Çizelge 2.2’ de, yaygın olarak kullanılan jantların tekerlek çaplarına bağlı olarak 25 km/h bisiklet çizgisel hızına karşılık motorun nominal hız ve moment değerleri yer almaktadır. Yapılacak olan motor tasarımları için 26" jant değerleri ölçüt alınacaktır.

Çizelge 2.2 : Değişen jantlar için nominal hız-nominal moment tablosu.

Tekerlek Çapı [inç]	Hız [km/h]	Hız [min ⁻¹]	Moment [Nm]
20	25	261.1	9.1
24	25	217.6	11.0
26	25	200.8	11.9
27	25	193.4	12.3
28	25	186.5	12.8
29	25	180.1	13.3

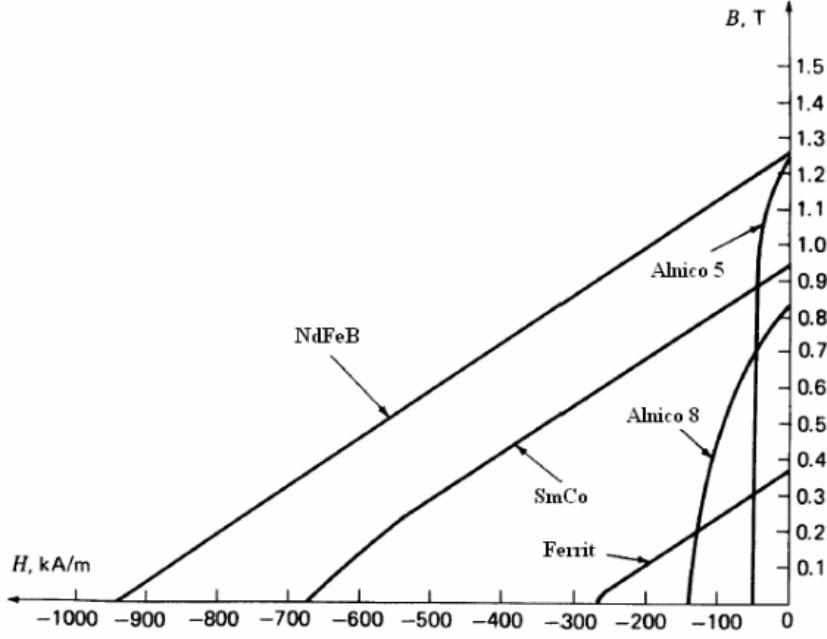
2.2. Elektrik Motor Tipinin Belirlenmesi

Yüksek performanslı elektrikli bisikletlerde yaygın olarak tekerlek içi fırçasız doğru akım motoru kullanılmaktadır. Bu nedenle, fırçasız doğru akım motorunun özellikleri ayrıntılı olarak incelenerek elektrikli bisikletin temel ihtiyaçlarına en uygun motor yapısı seçilecektir.

Fırçasız doğru akım motoru (FDAM), klasik motorlardan farklı olarak yapısında uyarma sargısı ya da fırça-kolektör sistemi bulunmayan, senkron motor sınıfında yer alan bir elektrik motorudur. Rotorunda, uzun ömürlü manyetik alan oluşturan sürekli mıknatıslar; statorunda ise, alan sargıları bulunmaktadır. Komutasyon işlemi bir güç elektroniği devresi üzerinden elektronik olarak gerçekleştirilir. Yapısal açıdan rotorunda sürekli mıknatıs bulunan senkron motora benzese de, performans açısından klasik doğru akım motoru özelliklerini taşır. Doğru akım motorunda olduğu gibi, endüklenen gerilimin dalga şekli trapezoidaldir ve ideal olarak dikdörtgen darbe akımları ile sürülür [7].

Günümüzde, malzeme ve üretim teknolojisindeki gelişmelerle birlikte sürekli mıknatısların enerji yoğunlukları artmakta ve elektrik motorlarında kullanımı yaygınlaşmaktadır. AlNiCo, ferrit, SmCo, NdFeB gibi çeşitli sürekli mıknatıs malzemeler elektrik motorlarında kullanılmak üzere yaygın olarak bulunmaktadır. AlNiCo mıknatıslar, yüksek akı yoğunluğu ve Curie sıcaklığı avantajları sağlasa da gideren alan (coercive) değerinin düşük olmasından dolayı mıknatıs yerleşiminde sınırlamalar getirir. Ferrit mıknatıslar seramik yapıları olduklarından dolayı yüksek sıcaklıklara dayanabilirler. Bunun yanı sıra, piyasada kolay bulunmaları, ucuz ve dayanıklı olma özelliklerinden dolayı çoğunlukla düşük maliyetli motor üretiminde tercih edilmektedirler. Öte yandan nadir toprak elementi olan AlNiCo ve NdFeB mıknatıslar pahalı malzemeler olmalarına karşın, yüksek akı yoğunluğu ve gideren alan kuvveti sağlayabildiklerinden dolayı yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilirler [40].

Fırçasız doğru akım motorunda demagnetizasyon, rotordaki sürekli mıknatısların sağladığı akının stator sargılarından akan akımın oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle azalması durumudur. Mıknatıs malzemelerin demagnetizasyon eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.9' da verilmiştir. Demagnetizasyon etkisini azaltmak için endüvi akımını maksimum değeri altında tutmak gerekmektedir [40].



Şekil 2.9 : Çeşitli sürekli mıknatıs malzemelerin demagnetizasyon eğrileri [40].

Fırçasız doğru akım motorlarında rotor ve stator ferromanyetik malzemelerden üretilir. Optimum kutup sayısı, motor geometrisi ve malzeme özelliklerinin kompleks bir fonksiyonudur [44].

Motorun elektriksel frekansı ve manyetik alanın mekanik dönme hızı yani senkron hız arasındaki bağıntı (2.10) incelendiğinde, kutup sayısı ile motorun dönüş hızının ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, yüksek hızlı motorlar genellikle 2 ila 4 kutuplu olarak imal edilirken, düşük hız ve yüksek moment gerektiren bir uygulamada kullanılacak motor için kutup sayısı yüksek seçilmelidir [44].

$$n_m = \frac{120 f_e}{2p} \quad (2.10)$$

Yüksek kutup sayılı motorların aktif ağırlıkları düşük olur. Aktif ağırlık, motorun moment üretimine katkıda bulunan bileşenlerinin yani sırt demiri, stator sacları, sargı ve sürekli mıknatısların oluşturduğu ağırlık olarak ifade edilebilir. Hava aralığı akı yoğunluğu eşit olan biri yüksek kutuplu, diğeri düşük kutuplu iki makine için, kutuplar arasındaki akı yoğunluğunun aynı olması durumunda, yüksek kutup sayılı motorun sırt demiri ve stator boyunduruğu daha ince olacaktır [42].

Stator çekirdeği, sirkülasyon akımını azaltmak amacıyla yaygın olarak 0.3-0.5 mm kalınlığındaki bir yüzeyi lamine edilmiş silikon çelik sacların preslenmesiyle imal edilir ve üzerine iletkenlerin yerleştirileceği oluklar açılır. Sargılar toplu ya da

dağıtılmış sargı olarak imal edilebilmektedir. Stator oluk sayısı rotor kutuplarına, faz sayısına ve sarım biçimine bağlı olarak belirlenir [7].

FDAM çeşitli faz sayısında üretilebilse de faz akımlarını kontrol eden güç elektroniği elemanı sayısını düşük tutmak adına iki ya da üç fazlı olarak tasarlanırlar. Her biri eşit uzunlukta olan faz sargıları çoğunlukla yıldız bağlanır [7].

Elektrik motorları yaygın olarak silindir şeklinde olmakla beraber, çok çeşitli yapılarda üretilebilirler. Motor tiplerinin, kullanıldıkları uygulamaya ve üretim tekniklerine bağlı olarak birbirlerine karşı çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Motorlar, rotor konumuna göre iç rotorlu ve dış rotorlu olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu tip motorlarda, manyetik alan hava aralığı üzerinden rotor ve stator arasında radyal olarak hareket eder. Disk tipi motorlar ise aksel akılı motorlardır, manyetik alan rotor ve stator arasında aksel doğrultuda dağılır. Yüksek performanslı doğrusal hareket gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan lineer fırçasız doğru akım motorları da bulunmaktadır [41].

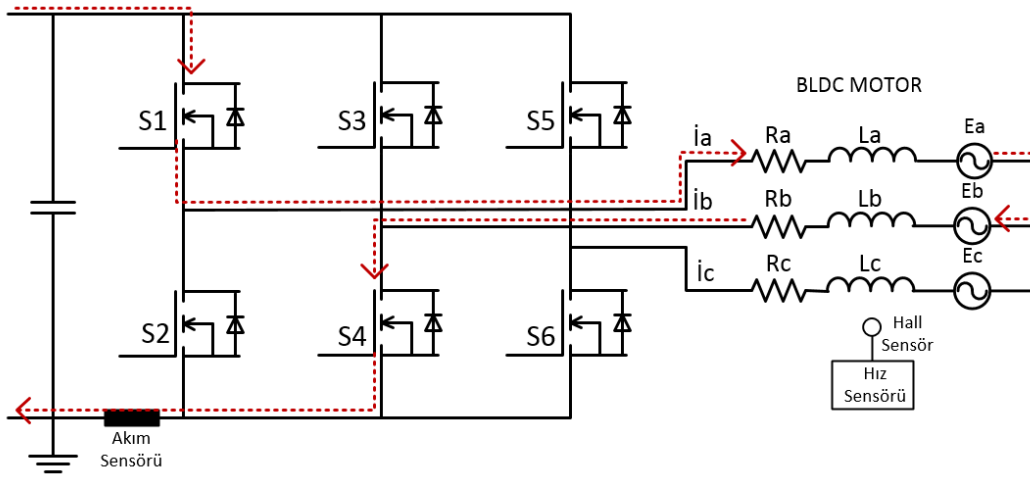
İç rotorlu motorlarda, sargıların dışta olmasından ve içte dönen bir parçanın bulunmasından ötürü ısı transferi kolay olsa da sargı imalatı zordur. İşletmede motorun hızlı ivmelenip yavaşlayabilmesi, aynı zamanda çok sık kalkış yapması gerekiyorsa rotor eylemsizliğinin düşük, moment/eylemsizlik oranının yüksek olması gerekir. Bu tip servo uygulamalarda eylemsizliğin yarıçapla orantılı olmasından dolayı rotor yarıçapını küçük tutmak adına iç rotorlu motorların kullanılması tercih edilir. Eylemsizliğin düşük olabilmesi için, mıknatıs boyutlarının küçültülmesi gereklidir. Bu tip uygulamalarda performans/maliyet oranına bağlı olarak yüksek enerji yoğunluklu mıknatıslar tercih edilmektedir.

Dış rotorlu motorda, stator olukları dışa dönük olduğu için sargıların sarılması kısmen daha kolaydır. Yüksek akı yoğunluğu gerektirmeyen uygulamalarda, yapısında düşük maliyetli ferrit mıknatıslar kullanılabilir. Dış rotorlu motorlar, iç rotorlu motorlara nazaran daha geniş hava aralığıyla tasarlanırlar.

Disk tipi motorların maliyetleri düşüktür. Ancak, bu tip motorlarda hava aralığı büyük olduğundan dolayı manyetik akıda çok fazla kayıplar görülebilir. Hızı 1000 min^{-1} ' den yüksek olan uygulamalarda stator ve rotor disk çeliğinde ısı problemleri ortaya çıkmaktadır [7].

Mıknatısların rotora yerleştirilmesi, yüzeye monteli ya da gömülü mıknatıslı olmak üzere farklı tasarımlarla gerçekleştirilebilir. Yüzey mıknatıslı yapı, mıknatısların yerlerinden kopup parçalanma riski bulunduğu için daha çok düşük hızlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek hızlı uygulamalarda ise bu dezavantajı ortadan kaldırmak için gömülü mıknatıslı rotor yapısı kullanılır.

Fırçasız doğru akım motorlarında sürekli ve düzgün bir moment üretimi için endüvi sargılarından akan akımın, kutup akısıyla aynı yönde olması gerekir. Rotor pozisyonuna bağlı olarak, endüklenen trapezoidal gerilimlerin düz olduğu bölgelerde ilgili faz kare dalga şeklindeki akım ile beslenmelidir [7].



Şekil 2.10 : FDAM motoru evirici yapısı.

Fırçasız motorlarda elektronik komutasyon bir evirici üzerinden gerçekleştirildiği için sistem doğru gerilim ile beslenmelidir. Evirici sistemi faz sayısı ve tasarıma bağlı olarak farklılıklar gösterse de üç fazlı bir fırçasız doğru akım motorunun değişen frekans ve değişken genlik ile beslenebilmesi için yaygın olarak üç-faz köprü tipi evirici kullanılır. Motor faz sargıları bağlantısının üçgen ya da yıldız olması kontrol devresi yapısını ve anahtarlama elemanlarının iletim sırasını değiştirmez.

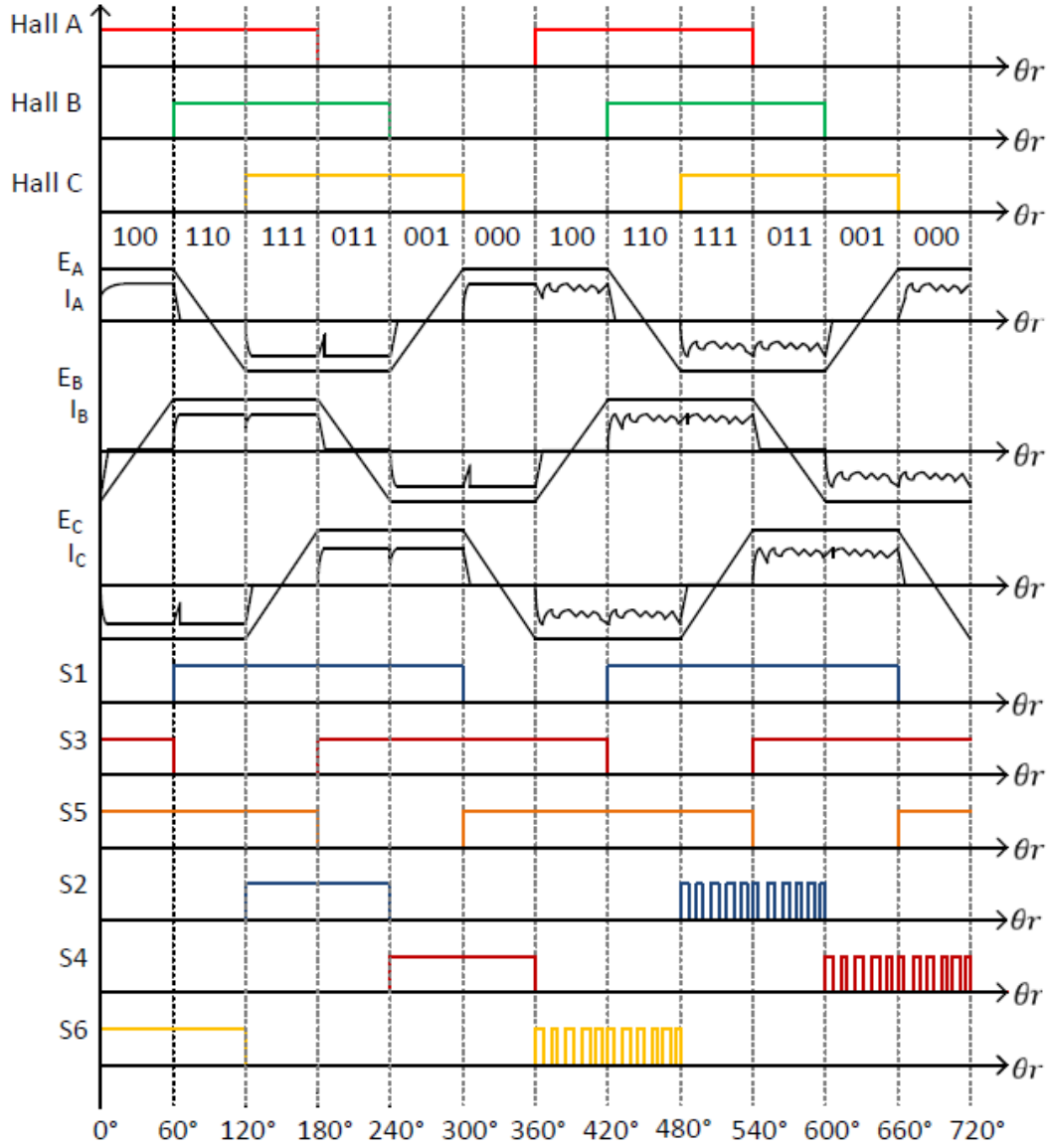
Konum algılama işlemi için kodlayıcı (encoder), çözücü (resolver) ve Hall sensörler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, komutasyon işleminin algılayıcısız olarak gerçekleştirilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Kodlayıcı ve çözücü, komutasyon bilgisine ek olarak konum ve hız bilgisi de gerektiren uygulamalarda tercih edilirler ve milin uzantısına monte edilerek kullanılırlar. Çözücü, yüksek sıcaklıklı ve yüksek hızlı uygulamalarda tercih edilse de maliyeti oldukça yüksektir. Algılayıcısız kontrol ile sensörlere olan ihtiyacın ortadan kaldırılması, tasarımda

karşılaşılan problemleri azaltmış ve maliyeti düşürmüş olsa da, bu kontrol sistemi oldukça karmaşıktır. Düşük hızların algılanmasındaki eksiklikler ve Hall sensörlerin maliyetlerinin her geçen gün düşmekte olması algılayıcısız kontrole olan ilgiyi azaltmaktadır. Mevcut sistemler arasında en basit ve en düşük maliyetli çözüm Hall sensördür.

Hall sensörler, üç fazlı fırçasız doğru akım motorlarında, statorun rotora bakan çerçevesine 60° ya da 120° elektriksel açı ile mıknatısları görece şekilde, mümkün olan en yakın pozisyona yerleştirilirler. Latch (kilitleme) prensibiyle çalışan bu sensörler, rotor döndükçe mıknatısların oluşturduğu N-S kutup manyetik alanlarının etkisi ile iletme ya da kesime geçer. S kutbu ile aynı doğrultuya geldiğinde iletme geçen sensör sayısal işaret çıkışı verir ve N kutup alanına maruz kalana kadar kesime gitmez. Bu sayede sensör, besleme gerilimi genliğinde kare dalga çıkış verir. Rotorun dönüşüne senkron olarak kontrol devresine gelen komutasyon bilgisiyle iletim ve kesime geçen anahtarlama elemanları faz sargılarını enerjilendirir [40].

Gerçek motorlarda, dış etkisi momenti, hava aralığı akı yoğunluğu dalga şeklindeki bozulmalar, hava aralığı manyetik direncinin d ve q eksenlerinde farklılık göstermesi, faz akımı komutasyonu gibi çeşitli sebeplerden kaynaklanan titreşim ve dalgalanmalardan dolayı toplam moment hiçbir zaman düz değildir. Bu titreşim ve dalgalanmaları ortadan kaldırılması ya da azaltılması için sürekli mıknatıslı motorun tasarımında kullanılan bazı yöntemler bulunmaktadır.

Moment dalgalılığı uygun motor tasarımı ve kontrolü ile azaltılabilir. Kutup ayağı ve oluk şekilleri, kutup/oluk sayısı, mıknatısların şekli ve yerleşimi motoru ideal karakteristiğe yaklaştıracak şekilde seçilerek moment titreşimi en aza indirgenebilir [41].



Şekil 2.11 : FDAM Hall gerilimleri, gerilim-akım ve anahtarlama dalga şekilleri.

2.2.1. Kesirli oluk sargılı fırçasız doğru akım motorları

Klasik yaklaşımla üretilmiş motorlarda sargılar dağıtılmış (atlamalı) olarak imal edilmektedir. Klasik fırçasız doğru akım motorlarında, oluk sayısı çok yüksek olacağından dolayı, kutup sayısının yüksek olması bakır hacmini ve işçiliğini, dolayısıyla maliyeti arttırıcı bir etmendir. Bu tip motorlarda, sargı başları uzun olduğu için moment yoğunluğu, kutup başına düşen amper sarım ve verim düşer. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı motorlarda endüktans ve senkron reaktans azalır [6].

Günümüzde, fırçasız doğru akım motorunun verimini arttırmak ve üretimini kolaylaştırmak amacıyla farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Dağıtılmış sargı yerine

konsantrik sargı kullanılan bu yeni tip motorlar “kesirli oluk sargılı FDAM” olarak bilinmektedir. Bu yöntem sayesinde, fırçasız doğru akım motoru verim, performans ve imalat kolaylığı açısından birçok üstünlük kazanmıştır. Konsantrik sargı kullanıldığından dolayı, endüktans değeri yüksektir, dolayısıyla motor kısa devre akımı sınırlandırılmış olur. Kesirli oluk sargılı motorların kullanımı ile düşük hız ve yüksek moment gerektiren uygulamalarda, yüksek kutup sayısının getirebileceği dezavantajlar ortadan kaldırılmış olur [7].

Klasik sargılı motorlarda, (p) kutup ve (m) faz başına düşen (N_s) oluk sayısı olarak tanımlanan “ N_{ssp} ” değeri bire eşittir. Konsantrik sargının kullanıldığı kesirli oluk sargılı motorlarda, bu oran birden küçük kesirli bir sayıdır [7].

$$N_{ssp} = \frac{N_s}{2pm} \quad (2.11)$$

Örneğin, kutup sayısı on olan bir klasik fırçasız doğru akım motoru için oluk sayısı otuzdur. Ancak, kutup ve faz başına düşen oluk sayısı 0.4 olan on kutuplu bir fırçasız doğru akım motorunun oluk sayısı on ikidir.

$$N_s = 2pm N_{ssp} \quad (2.12)$$

$$N_s = 10 \times 3 \times 1 = 30 \quad (2.13)$$

$$N_s = 10 \times 3 \times 0.4 = 12 \quad (2.14)$$

Kesirli oluk sargılı motorlar, aynı kutup sayısı için daha az oluk gerektirir. Bu sayede, motor imalatının daha kolay yapılmasını sağlar.

Konsantrik sargılı motorlarda moment üretme kapasitesi yüksek, moment dalgalılığı ise düşüktür. Konsantrik sargılı motorlarda aynı oluk sayılı klasik sargılı motorlara kıyasla sargı başı uzunlukları 1/3 oranında daha kısadır. Bu nedenle, bakır hacmi azaldığı için motor hafifler, iletken boyunun azalması ile iletken direnci azaldığından dolayı bakır kayıpları azalır ve verim artar. Bakır kayıplarının baskın olduğu düşük hız-yüksek momentli uygulamalarda, konsantrik sargılı sürekli mıknatıslı motorların kullanımı çözüm olarak görülmektedir. Bunun yanı sıra, pahalı bir malzeme olan bakırın motor içindeki hacminin azalması, maliyet açısından da büyük bir avantaj sağlayacaktır [47].

Sargıların taşması motorun üretimi sırasında yaşanan sorunlardan biridir. Taşma etkisini azaltmak için sargı başları preslenir ya da ezilir, ancak bu yöntemin sargılara zarar verme ihtimali bulunmaktadır. Konsantrik sargı kullanımı sargı taşmalarını azaltacağından dolayı sargı üretiminde ortaya çıkabilecek hatalar engellenmiş olur. Sargı taşmalarının azalması ile özellikle tekerlek içine yerleştirilen motorların aksel uzunluk kısıtına önemli bir fayda sağlanır. Öte yandan, konsantrik sargının üretimi de oldukça kolaydır. Basit yapılı ve ucuz sargı makineleri ile seri üretimi yapılabilir.

Kesirli oluk sargılı fırçasız doğru akım motorları çeşitli oluk/kutup kombinasyonunda tasarlanabilirler. Elektrik motorlarında oluk sayısı, faz sayısına bölünebilir bir sayı olmalıdır. Motor akı dağılımını ve moment yoğunluğunu maksimize etmek için oluk ve kutup sayıları mümkün olduğunca yakın tutulmaya çalışılır. Oluk ve kutup sayısının birbirine en yakın olduğu **(2.15)** düzeninde faz başına düşen oluk sayısı tektir. Bu durum, stator oluk ve sargıların asimetrik yerleşiminden dolayı belirgin dengesiz manyetik kuvvetler oluşturur, makinada gürültü ve vibrasyona neden olur. Oluk ve kutup sayısı arasında **(2.16)** ilişkisi olan motorlarda faz başına düşen oluk sayısı çifttir ve performans açısından daha uygun bir yapıdır. Faz başına düşen oluk sayısı tek olduğunda, aynı faza ait sargılar yalnızca seri bağlanabilirken, çift olduğunda ise aynı faza ait sargılar hem seri hem de paralel bağlanabilir [6].

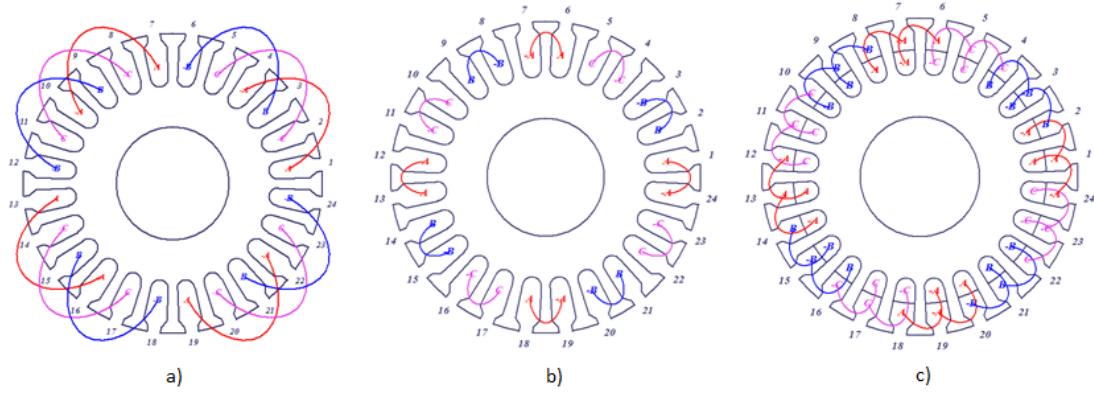
$$N_s = 2p \pm 1 \quad (2.15)$$

$$N_s = 2p \pm 2 \quad (2.16)$$

2.2.2. Sargı yapısı

Kesirli oluk sargılı fırçasız motorlar, her dişin sarıldığı çift kat sargılı (all teeth wound) ya da sarılan dişler arasında birer dişin boş bırakıldığı tek kat sargılı (alternate teeth wound) olarak imal edilebilirler [41].

Tek ve çift kat sargıların birbirine karşı belirli üstünlükleri ve eksiklikleri bulunmaktadır. Sargı tipi belirlenirken, tasarlanacak olan motorun gereksinimlerine bağlı olarak hangi sargı tipinin daha uygun olacağına karar verilir.



Şekil 2.12 : 24 oluklu motor için sargı şeması: a) $N_{ssp}=1$ olan dağıtılmış sargılı klasik FDAM b) $N_{ssp}=0.4$ olan kesirli oluk tek kat sargılı c) $N_{ssp}=0.4$ olan kesirli oluk çift kat sargılı motor konsantrik sargılı FDAM.

Tek kat sargı ile imal edilen motorların sargı faktörü temel bileşeni, çift katlı sargılı motorlara kıyasla daha yüksektir. Motor hata toleransının yüksek olması istendiği durumlarda, tek katlı sargı kullanımı tercih edilir. Bunun nedeni, tek katlı sargı ile imal edilen motorların öz-endüktansları yüksek olduğundan dolayı kısa devre akımının sınırlı olmasıdır. Tek kat sargılı motorlarda, sarılmış diler arasında boş dişler bulunduğundan dolayı sargılar termal ve manyetik olarak izoledir ve motorun karşılıklı-endüktası düşüktür. Sabit güç altında değişken hız gerektiren uygulamalarda öz-endüktansı yüksek olduğundan dolayı tek katlı sargılı motorlar tercih edilir [43]. Daha düzgün trapezoidal dalga şekli elde etmek, sargı faktörü temel bileşenin değerini arttırmak ve motoru alan zayıflatmaya daha uygun hale getirmek amacıyla bazı uygulamalarda diş genişliği eşit olmayan tek kat sargılı yapılar kullanılmaktadır [37].

Birçok avantajına karşın, tek katlı sargı ile imal edilen motorların oluk doluluk oranları, harmonik bileşenleri ve demir kayıpları çift katlı sargıya kıyasla daha yüksektir ve sargı başları daha uzundur. Motorlarda çift katlı sargı kullanımı kayıpları ve moment dalgalılığını azaltır [43].

2.2.3. Sargı yerleşiminin belirlenmesi

Sargı yerleşiminin belirlenmesi ile ilgili literatürde iki yöntem bulunmaktadır. Cros ve Viarouge' un (2002), "Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings" isimli çalışmasında yer alan metot, kutup ve faz başına düşen oluk sayısı N_{ssp} ' ye dayanmaktadır. Bu yöntemde, öncelikli olarak N_{ssp} oranı sadeleştirilerek ortak bölüneni kalmayan iki tam sayı elde edilir.

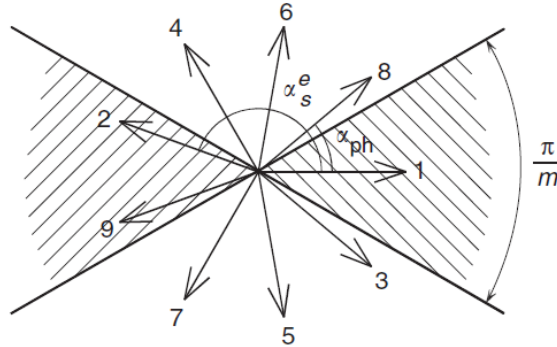
Yıldız N_s/t adet koldan meydana gelir ve her bir kol üzerinde t kadar fazör bulunur. Her faz, yıldız üzerinde N_s/mt adet kola sahiptir.

$$t = EBOB(N_s, p) \quad (2.19)$$

Birbirini takip eden oluklara ait fazörler arasında $2\pi/N_s$ kadar mekanik açı (α_s), $2\pi p/N_s$ kadar da elektriksel açı (α_s^e) bulunur. İki kol arasındaki açı ise (2.20) formülüyle tanımlanmıştır.

$$\alpha_{ph} = \frac{2\pi \times t}{N_s} \quad (2.20)$$

Öncelikli olarak kol sayısı belirlenir ve kollar arasında α_{ph} kadar açı olacak şekilde yıldız çizilir. Aralarındaki elektriksel açı dikkate alınarak fazörler yerleştirilir. Her faz eşit sayıda fazöre sahip olacağından dolayı, yıldız π/m derecelik dilimlerle bölünür ve fazlara ait fazörler belirlenir. Fazörlerin bulunduğu kol numaralarına bağlı olarak sargılar oluklara yerleştirilir [45].



Şekil 2.15 : Oluk yıldız yönteminde fazörlerin yerleşimi [45].

Çift katlıdan tek katlı sargıya dönüşüm, yıldız üzerindeki çift sayılı fazörlerin kaldırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu dönüşüm, sadece motor oluk sayısının çift sayı ve oluk adımı y_q ' nun tek sayı olduğu durumlarda uygulanabilir. Aksi takdirde, bazı olukların boş kalması ya da bazı oluklarda çift kat sargı kalması söz konusudur [45].

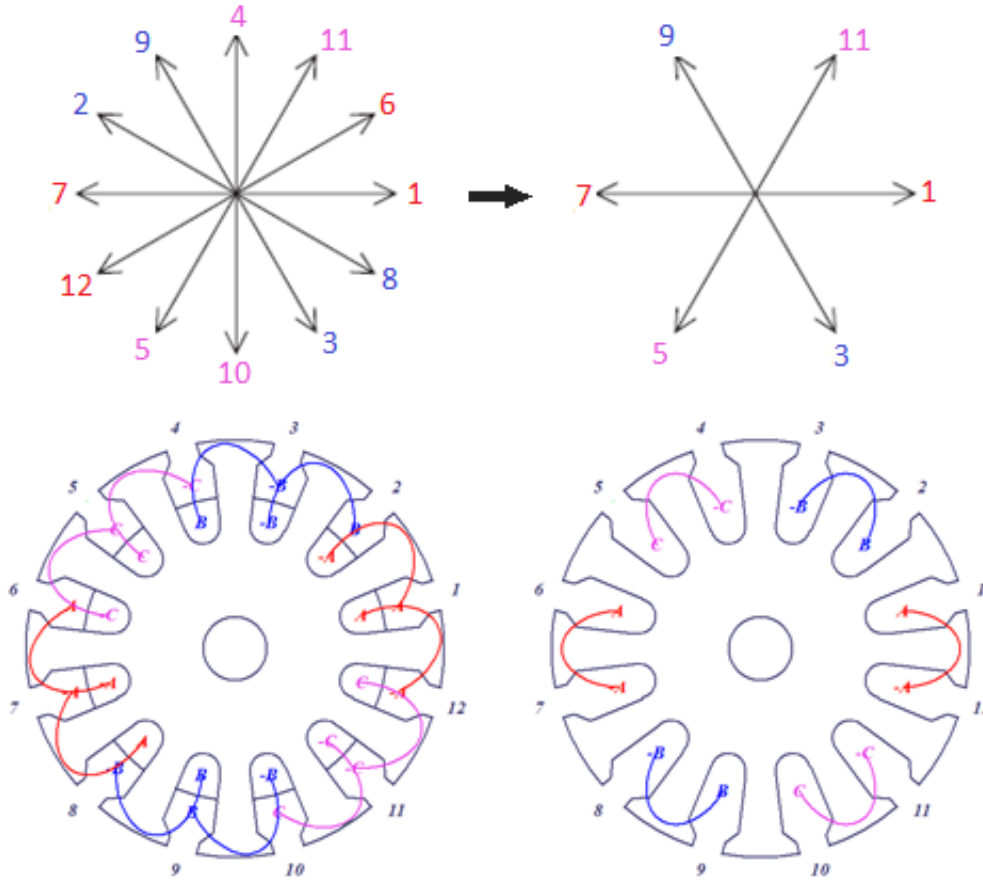
Örnek olarak 12/10 oluk/kutup sayılı motor için yıldız oluk yöntemi uygulanmıştır. Öncelikle çift katlı sargı yerleşimi bulunmuş, daha sonra tek katlıya dönüştürülmüştür.

$$t = EBOB(12,5) = 1 \quad (2.21)$$

$$\alpha_s = 2\pi/N_s = \pi/6 \quad (2.22)$$

$$\alpha_s^e = 2\pi p / N_s = 5\pi/6 \quad (2.23)$$

$$\alpha_{ph} = \frac{2\pi \times t}{N_s} = \alpha_s = \pi/6 \quad (2.24)$$



Şekil 2.16 : 12/10 oluk/kutup oranlı motor için oluk yıldızı yöntemi ile sargı yerleşiminin bulunması ve sargıların tek katlıya dönüşümü.

Sargı yerleşiminin bulunması için literatürde yer alan iki yöntem de incelenmiş ve örnek olarak 12/10 oluk/kutup oranlı motor için bu yöntemler uygulanmıştır. Her iki uygulama sonucunda da aynı sargı yerleşimine ulaşılmıştır. Cros' un sargı yerleşimi için önerdiği yöntem çift katlı sargılara oldukça kolay bir şekilde uygulansa da, bazı motor kombinasyonları için bu yöntemle tek katlı sargı yerleşiminin belirlenmesi güçtür. Bianchi' nin yöntemi ile tek katlı sargı yerleşimi kolaylıkla bulunabilmektedir. Tasarım aşamasında, motor sargı yerleşimleri belirlenirken bu iki yöntemden faydalanılacaktır.

2.3. Motor Seçim Kriterleri

Kesirli oluk sargılı FDAM yapısına uygun çok sayıda oluk/kutup kombinasyonu bulunmaktadır. Uygun motor tasarımına ulaşmak için çok sayıda tasarım denemesi yapılacak olsa da öncelikli olarak literatürde yüksek performanslı motorlar için yer alan tanımlar seçim kriteri olarak dikkate alınmıştır. Bu kriterlere bağlı olarak, ön tasarım için uygun olan motor oluk/kutup kombinasyonları belirlenmiştir.

Ön tasarımlar için uygun motor kombinasyonlarının belirlenmesindeki temel kriterler şunlardır:

- Dengesiz manyetik kuvvetler olmamalıdır.

Faz başına düşen oluk sayısının tek olması durumunda, stator oluk ve sargıların asimetrik yerleşiminden kaynaklanan belirgin dengesiz manyetik kuvvetler oluşturur. Bu nedenle, oluk sayısı belirlenirken çift sayılı olmasına dikkat edilmelidir.

- Seçilen motor tipinin sargı faktörü temel bileşeni yüksek olmalıdır.

Elektrik motorlarında elektromanyetik moment, sargı faktörünün temel bileşeni ile orantılıdır [41]. Sargı faktörü, faz sargılarındaki etkin olan sarımlar olarak tanımlanabilir. Sargı faktörü temel bileşeni düşük değerli olan motorlarda bu durum, amper sarımın ya da çekilen akımın artırılması ile kompanze edilir [48].

$$T = pk_{w1}N_{faz}\Phi_1i \quad (2.25)$$

Düşük sargı faktörlü bazı kesirli oluk sargılı fırçasız doğru akım motorlarının ısınma, ek kayıp ve vibrasyona neden olan harmonikler ürettikleri bilinmektedir [43]. Bu nedenle, tasarlanacak olan motor kombinasyonları belirlenirken sargı faktörü önemli bir seçim ölçütü olacaktır. Sargı faktörü temel bileşeni yüksek, harmonik sargı faktörü ise düşük olan kombinasyonlar seçilecektir.

Uygun N_{ssp} ve k_w değerlerine sahip motor kombinasyonları Çizelge 2.3' te özetlenmiştir. Çizelgede yer alan oluk/kutup kombinasyonları genişletilerek yeni motor ve oluk kombinasyonlarına ulaşılabilir. Çizelge incelendiğinde, N_{ssp} değeri 0.5 ve daha küçük olan motorların sargı faktörlerinin istenilen yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.3 : Oluk/kutup oranı-sargı faktörü tablosu.

N _{ssp} , k _w																				
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 .866		0.25 .866				0.125 .866		0.1 0.866				0.07 0.866		0.062 0.866				0.05 0.866	
9		0.5 .866	0.375 .945	0.3 .945	0.25 .866						0.125 0.866	0.115 0.945	0.107 0.945	0.1 0.866						0.07 0.866
12			0.5 .866	0.4 .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 .866		0.357 0.951	0.31 0.951		0.25 0.866										0.125 0.866	
18					0.5 .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							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	0.285 0.966

 Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar N_{ssp} ≤ 0.866

- Yüksek moment üretme kapasiteli motorların dış etkisi momenti ve moment dalgalılığı düşük olmalıdır.

Oluk/kutup sayısı belirlenmesinde dış etkisi momenti önemli bir faktördür. Motorun düzgün mekanik hareket üretebilmesi için parazitik moment bileşenlerinin minimum seviyede tutulması gereklidir. Motor üzerinde parazitik etki oluşturan relüktans momentinin birçok bileşeni bulunmakla beraber en belirgin etkiyi dış etkisi momenti oluşturmaktadır [7].

Dış etkisi momenti, rotordaki sürekli mıknatısların sağladığı uyarma akısı ile stator çekirdeği manyetik direnci arasındaki etkileşimden meydana gelir. Dış etkisi momenti üzerinde sargıların etkisi olmamakla birlikte, motor geometrisi ve rotordaki mıknatısların yerleştirilme açısına bağlı olarak değişmektedir. Servo motorlarda dış etkisi momenti, anma momentinin % 1-2' sinden düşük olmalıdır [34].

Dış etkisi momentini azaltmak için başvurulabilecek çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Kesirli oluk sargılı motor kullanmak, hava aralığını arttırmak, oluk/kutup oranını yüksek seçmek ve oluk açıklığını minimumda tutmak dış etkisi momentini azaltıcı etki oluşturur [7].

Dış etkisi momentinin frekansı, oluk sayısı ve kutup sayısının en küçük ortak katı (EKOK) ile orantılıdır [36]. Dış etkisi momentinin frekansının yüksek olması, genliğinin düşük olması anlamına gelir. Motorun dış etkisi momentinin düşük olması için, N değeri büyük olan oluk/kutup kombinasyonu belirlenmelidir.

$$N = EKOK(N_s, 2p) \quad (2.26)$$

Çizelge 2.4 : Oluk/kutup oranı-N değeri tablosu.

EKOK($N_s, 2p$)																				
$N_s \setminus 2p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	12		24				48		60				84		96				120	
9		18	72	90	36						72	234	252	90						126
12			24	60		84	48								96	204		228	120	
15				30		210	240		60											120
18					36	126	144		180	198	72									
21						42	336		420	462		546	588							
24							48		120	264		312	168		96					168
27								54	540	594	216	702	756	270	864	918	108			
30									60	330		390	420		480	510		570	120	
33										66		858	924		1056	1122		1254	1320	
36											72	468	252	180	288	612		684	360	252

■ Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar $N_{ssp} \leq 0.866$

- Motor simetrik olmalı ve net radyal kuvveti düşük olmalıdır.

Motordaki radyal kuvvetin temel kaynağı, stator çeliği ve rotor mıknatısı arasındaki etkileşimdir. t değeri motor oluk ve kutup sayılarının en büyük ortak böleni (EBOB) olarak tanımlanmıştır. Bu değer, motor simetrisinin ve radyal kuvvetlerin göstergesidir. t değeri bire eşit ya da tek sayı ise, motor net radyal kuvveti yüksek değerlidir, birden büyük ve çift sayı olma durumunda ise motor net radyal kuvveti düşük değerlidir. Seçilen motorun t değerinin çift sayı olması gerekir [44].

Çizelge 2.5 : Oluk/kutup oranı-t değeri tablosu.

t=EBOB($N_s, 2p$)																				
$N_s \setminus 2p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	2		2				2		2				2		2				2	
9		3	1	1	3						3	1	1	3						3
12			4	2		2	4								4	2		2	4	
15				5		1	1		5											5
18					6	2	2		2	2	6									
21						7	1		1	1		1	7							
24							8		4	2		2	4		4					6
27								9	1	1	3	1	1	3	1	1	9			
30									10	2		2	2		2	2		2	10	
33										11		1	1		1	1		1	1	
36											12	2	4	6	4	2		2	4	6

■ Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar $N_{ssp} \leq 0.866$

Tablolar incelendiğinde, 12/10, 12/14, 18/16, 18/20, 24/20, 24/22, 24/26, 30/28, 36/30, 36/34, 36/38 ve 36/42 motor oluk/kutup kombinasyonlarının tüm tasarım kriterlerini sağladıkları görülmüştür. Bu doğrultuda, motor için temel boyut ve büyüklükler belirlenerek bu kombinasyonlar için tasarımlar yapılacak, sonuçlar değerlendirilerek en uygun motor tasarımı belirlenecektir.

2.4. Motor Tasarımları

2.4.1. Motor boyutlarının belirlenmesi

Motor boyutlarının belirlenmesindeki klasik yaklaşım motor gücünü esas almaktır. Rotor boyutlarına bağlı moment ifadesi ve motor birim hacminin moment üretme kapasitesi olarak tanımlanan TRV, motor güç ve hacim ilişkisinin belirlenmesinde önemli rol oynarlar. Motorun moment ihtiyacı, rotor çapı (D_r), rotor aksenal uzunluğu (L_r) ve k sabiti ile ilişkilidir. Motor gücü ile boyutları arasındaki ilişkinin doğru orantılı olduğu görülmektedir [41].

$$T = KD_r^2 L_r \quad (2.27)$$

$$K_{TRV} = \frac{4K}{\pi} = \frac{T}{\pi D_r^2 L_r} = \frac{2N_m B_g N i}{\pi D_r} \quad (2.28)$$

Yüksek performanslı servo motorlar için K sabiti 11.8-39 kNm/m³, K_{TRV} ise 15-50 kNm/m³ arasındadır [7]. Motor tasarımı için kullanılan yazılım ne kadar güvenilir olursa olsun, motorun temel boyut kıstaslarına uygunluğu kontrol edilmelidir. Bu nedenle belirlenen motor boyutlarının bu sınırlara uygunluğu araştırılacaktır.

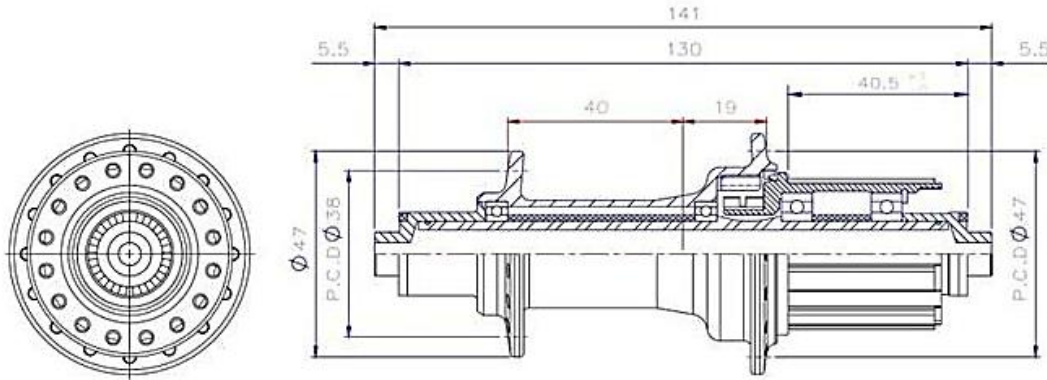
Motor boyutlarının belirlenmesindeki diğer bir önemli etken ise eylemsizliktir. Motor maksimum moment ve eylemsizlik oranının yüksek olması istenir ve bu oran rotor çapının karesiyle orantılıdır [41].

Motor çapı belirlendikten sonra motor gücünün artırılmasında en etkili faktörler mil hızı ya da kuvvet yoğunluğunu arttırmaktır. Mil hızının artırılması sonucunda yük ile motor arasına mekanik dönüştürücü eklenmesi gerekeceğinden dolayı, doğrudan sürüş sistemlerinde tercih edilen bir yöntem değildir. Motor kuvvet yoğunluğunu arttırmak ise elektriksel ya da manyetik çalışma noktalarını değiştirerek gerçekleştirilebilir. Elektriksel çalışma noktası akım ile ilişkilidir ancak akımın artırılması bakır

kayıplarını karesel olarak arttıracığı için akım belirli sınırlar dahilinde değiştirilebilir. Manyetik alan çalışma noktasını arttırmak ise daha yüksek performanslı mıknatıs kullanımını ya da akının hava aralığında yoğunlaşması için özel bir motor yapısı gerektirir. Akı yoğunluğu mıknatıs miktarı ile ilişkili olduğundan dolayı mıknatıs miktarı arttırılabilir ancak bu durumda motor hacmi ve kütlesi de artacaktır. Motor performansı ve maliyeti arasında çok bileşenli kompleks bir ilişki bulunmaktadır [7].

Tasarımı yapılacak olan motorun boyutları belirlenirken öncelikli olarak bisiklet üzerindeki fiziksel sınırlar incelenmiştir. Bu doğrultuda, motor boyutları üzerinde iki temel kısıt bulunduğu tespit edilmiştir. Motor arka tekerlek göbeğine yerleştirileceğinden dolayı motor eksenel uzunluğunu bisiklet çatal genişliğine bağlıdır. Diğer bir fiziksel sınırlama ise stator iç çapı üzerinde bulunmaktadır. Motor dış bağlantılarını minimum seviyede tutmak, iletim kayıplarını azaltmak ve bisiklet üzerindeki yer kısıtına çözüm getirmek amacıyla bu uygulamada motor sürücü devresinin motor göbeğine yerleştirilmesi istenmektedir. Bu nedenle stator iç çapının minimum değeri kullanılacak sürücünün çapına ve göbek et kalınlığına bağlıdır.

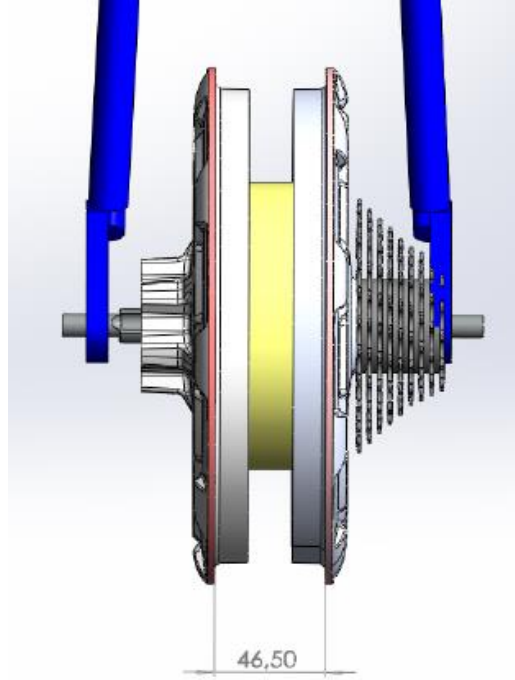
Motor arka tekerleğe yerleştirileceğinden ötürü öncelikli olarak bisiklet çatal genişliği incelenmiştir. Şekil 2.17’ de standart bir bisikletin arka tekerlek mili yer almaktadır. Çatal için standart uzunluk 130 mm olmakla birlikte, kaset ve disk fren için yer bırakılması gerekmektedir.



Şekil 2.17 : Bisiklet arka tekerlek mili [46].

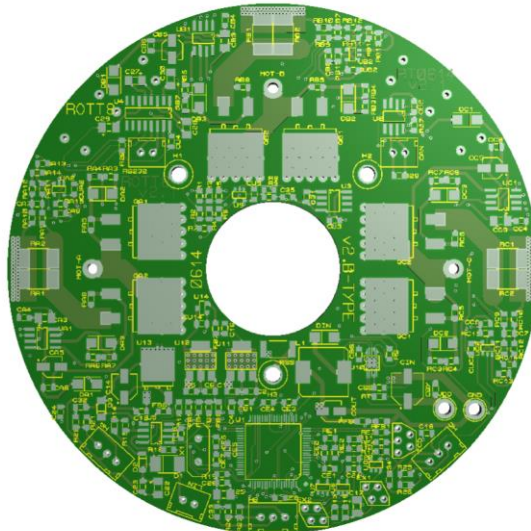
Arka tekerlek çatalında disk fren için yer bırakılarak, kaset ve motor kapaklarının yerleştirildiği çizim Şekil 2.18’ de yer almaktadır. Yaygın kullanımından ötürü dokuz dişli kaset tercih edilmiştir. Bisiklet arka tekerlek göbeğine yerleştirilecek motor için maksimum kalınlığın 46.5 mm olduğu görülmüştür. Ancak, sargı taşmaları ve

kasetindeki dişli sayısı dokuzdan fazla olan bisikletler göz önünde bulundurularak motor kalınlığı 20-30 mm arasında alınacaktır.



Şekil 2.18 : Bisiklet arka tekerlek göbeğine yerleştirilmiş motor.

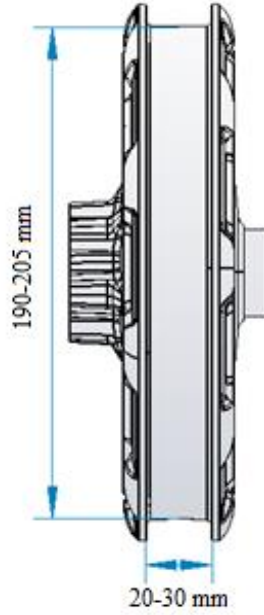
Şekil 2.19’ da yer alan motor sürücüsü elektronik kartı dış çapı 110 mm, iç çapı ise 28 mm’ dir. Motor göbeği için de toleranslı olarak 4 mm’ lik bir et kalınlığı bırakıldığında stator için minimum iç çap 118 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.19 : Elektrikli bisiklet motor sürücü kartı.

Mevcut elektrikli bisiklet motor boyutlarının incelenmesi sonucunda, 26" çapındaki standart bisiklet jantlarına yerleştirilecek fırçasız doğru akım motoru için tasarım

aralıkları iç çap 118 mm, motor kalınlığı 20-30 mm olarak belirlenmiştir. Motor dış çapının ise 190-205 mm arasında olacağı öngörülmüştür.



Şekil 2.20 : Motor tasarımında kullanılacak boyut aralıkları.

Motor hacim ve moment ilişkisinden yola çıkılarak belirlenen motor boyutların uygunluğu incelenmiştir. Boyut aralığına bağlı olarak, minimum ve maksimum K değeri hesaplanmıştır. Belirlenen boyutların literatürde yer alan koşullara uygun olduğu görülmüştür.

$$K_{maks} = \frac{0.012}{\frac{\pi}{4} \times 0.205^2 \times 0.03} = 12.11 \frac{kNm}{m^3} \quad (2.29)$$

$$K_{min} = \frac{0.012}{\frac{\pi}{4} \times 0.19^2 \times 0.02} = 21.16 \frac{kNm}{m^3} \quad (2.30)$$

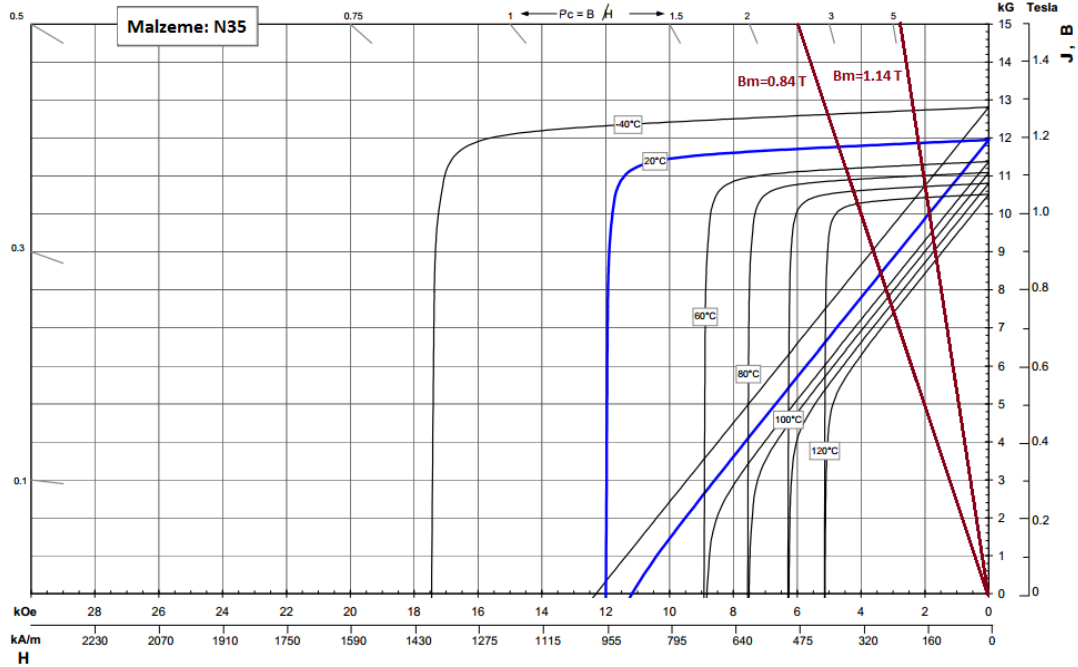
İkinci adım olarak mıknatıs kalınlığı ve hava aralığı belirlenmiştir. Manyetik devreye bağlı mıknatıs kalınlığı ve hava aralığı ilişkisi (2.31)' de ifade edilmiştir [7].

$$\frac{B}{H} = \frac{L_M}{g} \quad (2.31)$$

Yüzey mıknatıslı motorlarda tolerans oluşturulması ve demir kayıplarının düşük tutulması adına hava aralığının (g) 1 mm alınması doğrudur. Mıknatıs kalınlığını

düşük tutmak ve demagnetizasyona karşı önlem almak amacıyla motorda kaliteli N35 tipi NdFeB sürekli mıknatıslar kullanılacaktır.

Literatürde, mıknatısın açık devre çalışma durumundaki akı yoğunluğu (B_m) remenans akı yoğunluğunun (B_r) yaklaşık 0.7-0.95' i kadar olduğu belirtilmektedir [7]. Kullanılacak mıknatısın remenans akı yoğunluğu 1.2 T olduğundan dolayı, B_m değeri yaklaşık olarak 0.84-1.14 değerleri arasında olacaktır. Katalogda yer alan demagnetizasyon eğrisinden yola çıkılarak bu değerler için B/H oranı belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 90° çalışma sıcaklığı ve 1 mm hava aralığı için mıknatıs kalınlığı 2.5-5 mm arasında olmalıdır. Mıknatıs yayı ile kutup adımı arasındaki oran ise, 0.86 ile 0.89 arasında alınmıştır.



Şekil 2.21 : N35 mıknatıs demagnetizasyon eğrisi [47].

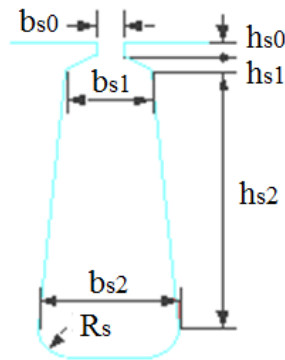
Motor temel boyutlarının belirlenmesinin ardından motor sargı yapısı incelenmiştir. Tel çapı (D_t) ve sarım sayısının motor performansı üzerinde önemli etkileri olmakla beraber, oluk kesit alanına bağlı olarak optimum değerlere ulaşılmaya çalışılır.

$$D_t = \sqrt{\frac{A_s F_s}{N}} \quad (2.32)$$

A_s , oluk kesit alanını ifade etmektedir. Stator oluk doluluk oranı (F_s) yapısal olarak maksimum %75 ile sınırlıdır. Motor kalınlığındaki mekanik sınırlardan ötürü

sargılarda meydana gelecek taşmanın önlenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Optimum sarım sayısı ve iletken kesiti kullanılarak oluk doluluk oranları %60' ın altında tutulmaya çalışılmıştır.

Fırçasız doğru akım motorlarında, oluk sayısına ve sargı yapısına bağlı olarak dairesel ve dikdörtgen yapılu oluk tiplerinin kullanımı mümkündür. Sargı imalatında, sargıların oluklara sığabilmesi için oluk doluluk oranlarına dikkat edilmiş, oluk yüksekliği, oluk dış kalınlığı, iletken kesitleri ve akım yoğunlukları buna bağlı olarak belirlenmiştir. Seri üretimde kolaylık sağlaması açısından eşit uzunluklu oluk dişleri ve açık oluk ağızı kullanılmıştır.



Şekil 2.22 : Motor oluk yapısı.

Motor anma hızının 200 min^{-1} olduğu göz önünde bulundurulduğunda, tüm düşük hızlı motorlarda olduğu gibi motorun bakır kayıpları baskın olacaktır. Bakır kayıplarını azaltmanın yolu, mümkün olan en kalın teli kullanmaktır. Tel çapı arttıkça, akım yoğunluğu (J) düşer ve direnç azalır.

$$R = \frac{\rho L_r N}{\frac{\pi}{4} D_t^2} \quad (2.33)$$

$$J = \frac{I}{\frac{\pi}{4} D_t^2} \quad (2.34)$$

Direnç ifadesinde (2.33) ρ bakırın öz direncini, L_r motorun aksel uzunluğunu, N ise iletken sarım sayısını ifade etmektedir.

Endüklenen gerilim ve endüktans üzerinde akım yoğunluğunun etkisi bulunmamakla birlikte, iletken sarım sayısına bağlı olarak değişirler. N_f bir faza ait sarım sayısı miktarı, f_s stator alanı frekansı, mıknatıslardan kaynaklanan ϕ temel hava aralığı

akısına bağı olarak kesirli kutup oluklu motor endüklenen gerilim ifadesi (2.35)' te verilmiştir.

$$E = 2\pi \frac{f_s N_f k_w \phi}{\sqrt{2}} \quad (2.35)$$

Endüktans üzerinde etkisi bulunan parametreler, öz-endüktans ifadesi (2.36) üzerinden incelenecektir. Endüktans, havanın geçirgenlik katsayısı (μ_o), motorun eksenel uzunluğu, stator oluk derinliği (h_{s2}) ve oluk genişliğine (b_s) bağlıdır. Endüktas üzerinde en çok etkili olan parametre ise sarım sayısıdır, endüktans sarım sayısının karesiyle orantılıdır.

$$L_s = \frac{\mu_o h_{s2} L_r (2N)^2}{3b_s} \quad (2.36)$$

Yüksek hızlarda E, V_a ' ye çok yakın değerlidir. Düşük hızlarda ise, E küçük olacağından dolayı akım hızla artar. Aynı ifade rotor konumuna bağı olarak yazıldığında, hızın akımın artış hızı üzerinde büyük etkisi olduğu görülmektedir. Yüksek hızlı motorlarda k_e ve L' yi azaltmak için sarım sayısı düşürülmelidir. Düşük hızlı motorlarda ise sarım sayısını arttırmak gerekir.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_a - E}{L} \quad (2.37)$$

$$\frac{di}{d\theta} = \frac{V_a - k_e \omega_m}{L \omega_m} \quad (2.38)$$

Hava soğutmalı motorlarda endüvi maksimum akım yoğunluğu 6 A/mm² değerini aşmamalıdır. Yapılan tasarımlarda akım yoğunluğu 4.5 ile 5.2 A/mm² aralığında tutulmuştur.

Manyetik akı yoğunluğu stator boyunduruğunda 1-1.3 T, rotor boyunduruğunda 1-1.55 T, dişlerin en dar kısmında 1.5-1.7 T ve diş ortasında 1.5-1.7 T aralığında olmalıdır [48]. Motor dişlerinin boyutları belirlenirken, akı yoğunluklarının bu değerler arasında kalmasına dikkat edilecektir.

Bu sınır değerlere bağı kalınarak çeşitli motor tasarımları yapılacaktır. Üretime uygunluk ve verimlilik kıstasları ön planda tutularak, belirlenen boyutlar dahilinde en uygun motor tasarımı belirlenecektir.

2.4.2. Malzeme seçimi

Demir kayıplarını düşük seviyede tutmak adına mümkün olan en kaliteli sac malzemesinin kullanımı tercih edilmiştir. Kaliteli sac malzeme, düşük manyetik alan şiddetinde büyük manyetik akı yoğunluğu oluşturabilen, demir kaybı küçük olan motor sacı demektir. Dolayısıyla yüksek kalitede sacların manyetik geçirgenlikleri de yüksektir. Tasarımlarda 0.5 mm kalınlığında M3629G tipi sac malzemesi kullanılmıştır. Rotor sırt demiri manyetik geçirgenliği yüksek, soğuk çekme düşük karbonlu çelikten yapılır. Çeliğin kalitesinin artması motorun ağırlığının azalmasını sağlayacaktır. Tasarımlarda, sırt demiri için steel 1010 malzeme seçilmiştir.

Stator sargılarında kullanılacak bakır teller, “emaye kaplı bakır tel” olarak bilinmektedir. Kaliteli sargı malzemesinin, yüksek iletkenliğe sahip bakır malzemedendir olması, dışındaki izolasyonun yüksek sıcaklığa ve mekanik zorlanmalara dayanması gerekir. Bu malzemenin TSE standartlarına uygun olarak imalatı ya da satışı çok sayıda yerli firma tarafından yapılmaktadır. Yüksek sıcaklığa ve mekanik zorlanmalara dayanıklı kaliteli sarım telleri piyasada kolaylıkla bulunabilmektedir.

2.4.3. Tasarım çıktıları

Ön tasarım çalışmalarında belirlenen motor temel özelliklerine bağlı kalınarak çeşitli geometrilerde ve farklı oluk/kutup oranında motor tasarımları RMxpert programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Mekanik sınırlar çerçevesinde tasarlanan motorların hafif, yüksek verimli ve üretime uygun olma özellikleri ön planda tutulmuştur. Ancak, yapılan tasarım denemelerinde verim hedeflenen yüksek seviyelere çıkarılamamıştır.

Elektrik motorlarında kaçınılmaz olan demir ve bakır kayıpları doğru geometrinin belirlenmesi ve uygun malzeme seçimi ile küçültülebilir ancak, motor gücünün azalması ile motor kayıpları aynı oranda azalmaz, bu durum ölçekleme faktörü (scaling factor) olarak adlandırılır [41]. Bu nedenle küçük güçlü motorlarda mevcut kayıpların etkisiyle verimin istenilen çok yüksek değerlere ulaşmasının güç olduğu açıktır. Tasarımı yapılan motorun, düşük güçlü olması ve yüksek moment gereksinimi sebebiyle baskın olan bakır kayıpları motorun çok yüksek verimlere ulaşamayacağını göstermektedir.

Çeşitli denemeler sonucunda optimum bir motor yapısı için belirlenen oluk/kutup kombinasyonlarında tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımlarla amaçlanan, motor

performansı üzerinde oluk/kutup oranının etkisini görmek ve en uygun olan kombinasyonu belirleyebilmektir. Sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek adına tüm motorlar için hava aralığı ve mıknatıs oranları, akı yoğunlukları, oluk doluluk oranları sabit tutulmuştur. 250 W gücünde olan motor tasarımlarının, anma hızı 200.8 min^{-1} ve anma momenti 11.9 Nm seviyesinde tutulmuştur. Bütün motorlar, Bölüm 2.4.1.' de belirlenen temel parametreleri sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Çizelge 2.6 : Tek kat sargılı motor tasarım sonuçları.

Oluk / Kutup (Tek kat sargılı)	12/10	12/14	18/16	18/20	24/20	24/22	24/26	24/28	36/30	36/34	36/38	36/42
Sargı Faktörü	0.966	0.966	0.945	0.945	0.965	0.957	0.958	0.966	0.965	0.956	0.956	0.966
Sarım Sayısı	88	78	65	63	47	47	47	45	33	33	32	31
Endüvi Faz Direnci [Ω]	0.28	0.28	0.3	0.29	0.26	0.27	0.25	0.24	0.24	0.24	0.23	0.24
Endüktans [mH]	5.40	4.60	2.36	2.20	1.90	1.90	1.96	1.95	1.23	1.20	1.13	1.06
ke [Vs/rad]	1.16	1.01	1.25	1.2	1.26	1.24	1.25	1.17	1.32	1.3	1.28	1.25
kt [Nm/A]	1.37	1.3	1.38	1.37	1.39	1.38	1.44	1.38	1.28	1.43	1.4	1.4
Diş Etkisi Momenti [Nm]	0.06	0.03	0.01	0.004	0.01	0.001	0.002	0.033	0.06	0.001	0.0009	0.03
Diş Etkisi Momenti [%]	0.50	0.25	0.08	0.03	0.09	0.01	0.02	0.28	0.51	0.01	0.01	0.26
Verim [%]	79.6	75.4	80.1	80.1	82.3	81.6	82.2	81.5	83.2	82.6	82.6	82.6
Toplam Net Ağırlık [kg]	4.7	3.83	3.95	3.53	3.64	3.4	3.26	2.86	3.04	2.8	2.58	2.44

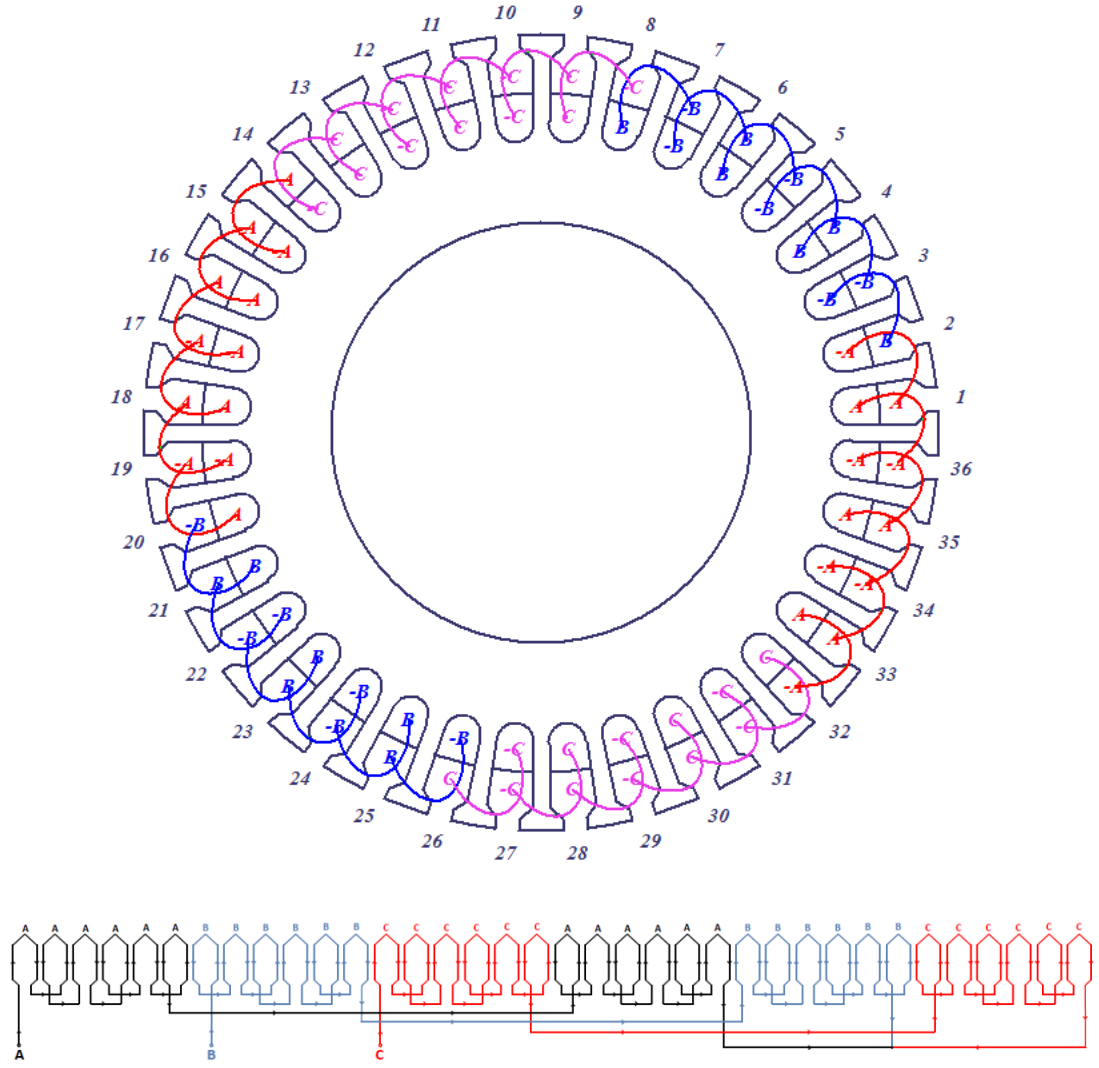
Çizelge 2.7 : Çift kat sargılı motor tasarım sonuçları.

Oluk / Kutup (Çift Kat Sargılı)	12/10	12/14	18/16	18/20	24/20	24/22	24/26	24/28	36/30	36/34	36/38	36/42
Sargı Faktörü	0.933	0.933	0.945	0.945	0.933	0.949	0.949	0.933	0.933	0.952	0.952	0.933
Sarım Sayısı	97	90	68	66	52	50	50	50	36	35	34	34
Endüvi Faz Direnci [Ω]	0.34	0.36	0.32	0.3	0.29	0.28	0.29	0.3	0.26	0.26	0.25	0.26
Endüktans [mH]	3.60	2.90	2.02	1.80	1.40	1.26	1.26	1.24	0.98	0.90	0.86	0.80
ke [Vs/rad]	1.22	1.12	1.3	1.25	1.34	1.31	1.32	1.25	1.38	1.37	1.35	1.33
kt [Nm/A]	1.34	1.28	1.4	1.38	1.43	1.39	1.42	1.37	1.46	1.45	1.43	1.43
Diş Etkisi Momenti [Nm]	0.06	0.03	0.01	0.004	0.01	0.001	0.002	0.033	0.06	0.001	0.0009	0.03
Diş Etkisi Momenti [%]	0.50	0.26	0.08	0.03	0.08	0.01	0.02	0.28	0.49	0.01	0.01	0.25
Verim [%]	78.1	75.1	80.1	80.6	82	82.2	81.3	80.4	82.9	82.9	82.9	82.7
Toplam Net Ağırlık [kg]	4.68	3.86	3.99	3.53	3.7	3.46	3.22	2.86	3.09	2.85	2.62	2.49

Tasarımlarda akı yoğunlukları sabit tutulduğundan dolayı, kutup sayısı arttıkça sırt demiri, stator dişleri ve stator boyunduruğu incelmıştır. Yüksek kutup sayılı motorlarda, aynı momenti sağlamak için oluklarda daha az sargı bulunmaktadır. Kutup sayısındaki artışa bağlı olarak, bakır ve demir ağırlıkları azalmış, böylece kutup sayısının ağırlıkla ters orantılı olduğu görülmüştür. Sarım sayısındaki düşüğe bağlı olarak kutup sayısı arttıkça direnç ve endüktans değerleri de azalmıştır. Dirençteki azalmanın etkisiyle motorda daha baskın olan bakır kayıpları azalmış ve motor verimi artmıştır.

Tüm motorlarda, tek kat sargılı motorlardaki sargı faktörünün çift katlılara kıyasla daha yüksek oluşu bu nedenle de çift kat sargılı motorların aynı momenti daha fazla sarım ile sağlayabildiği görülmüştür. Çift ve tek katlı olarak sarılmış motorlar arasındaki sarım sayısı farkının kutup sayısı arttıkça azaldığı belirlenmiştir.

Tasarım çıktılarının değerlendirilmesi sonucunda, 36/34 ve 36/38 motorun hedeflenen düşük diş etkisi momenti, hafiflik ve yüksek verimli olma özelliklerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Performanslarının çok yakın olmasından dolayı prototip üretimi gerçekleştirilecek olan motor tipine daha kolay üretilebilir ve düşük maliyetli olma özelliklerine bakılarak karar verilecektir. Aynı performansı daha az sayıda mıknatısla gerçekleştirmesi dolayısıyla 36/34 motor tercih seçilmiştir. Tek katlı sargının avantajlarına karşın, çift katlı sargının daha yüksek verimli olması ve üretim esnasında sargılarda daha az taşma olacağından dolayı 36/34 motorun çift katlı sargı ile imal edilmesine karar verilmiştir.



Şekil 2.23 : 36/34 motor sargı şeması.

Uygun motor oluk/kutup kombinasyonu ve sargı yapısına karar verilmesinin ardından, 36/34 motorun farklı diş yapılarında, değişen radyal ve eksenel uzunluklarda tasarımları yapılacaktır. Böylece hem bu parametrelerin motor performansı üzerindeki etkisi incelenecek ve mevcut motor yapısının uygunluğu araştırılacaktır. Tasarımlar öncelikli olarak RMxprt programı üzerinden analitik olarak çözümlenmiştir. Tasarımların olgunlaşmasının ardından, modeller Maxwell programına aktarılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri yapılmıştır. Tasarımlar analitik analiz sonuçları, dalga şekillerinin düzgünlüğü ve manyetik alan analiz çıktılarına bağlı olarak karşılaştırılacaktır.

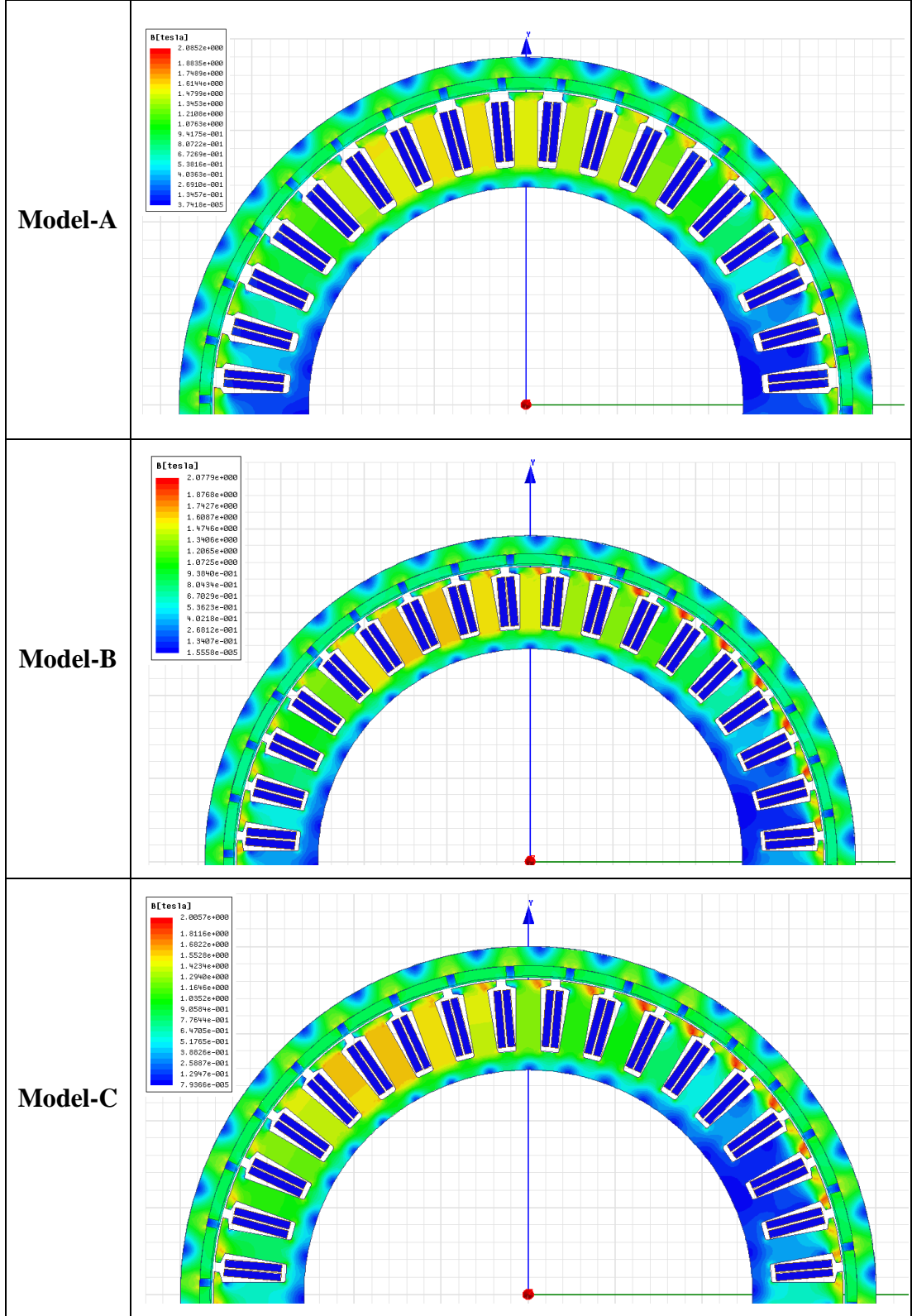
- Radyal uzunlukların motor performansı üzerindeki etkisi

Belirlenen 36/34 motor tipi için farklı iç çaplardan yola çıkılarak değişen radyal uzunluklu motor tasarımları çalışılmıştır. Tüm tasarımlarda stator dişleri, boyunduruğu ve sırt demiri akı yoğunlukları ile oluk doluluk oranları yakın değerlerde tutulmuştur. Aynı çıkış moment ve hız değerlerini sağlayabilen bu motorların dış etkisi momenti, ağırlık ve motor sabitleri özellikleri karşılaştırılmıştır. Rotor çapının artmasıyla birlikte, motor ağırlığı da doğal olarak artmıştır.

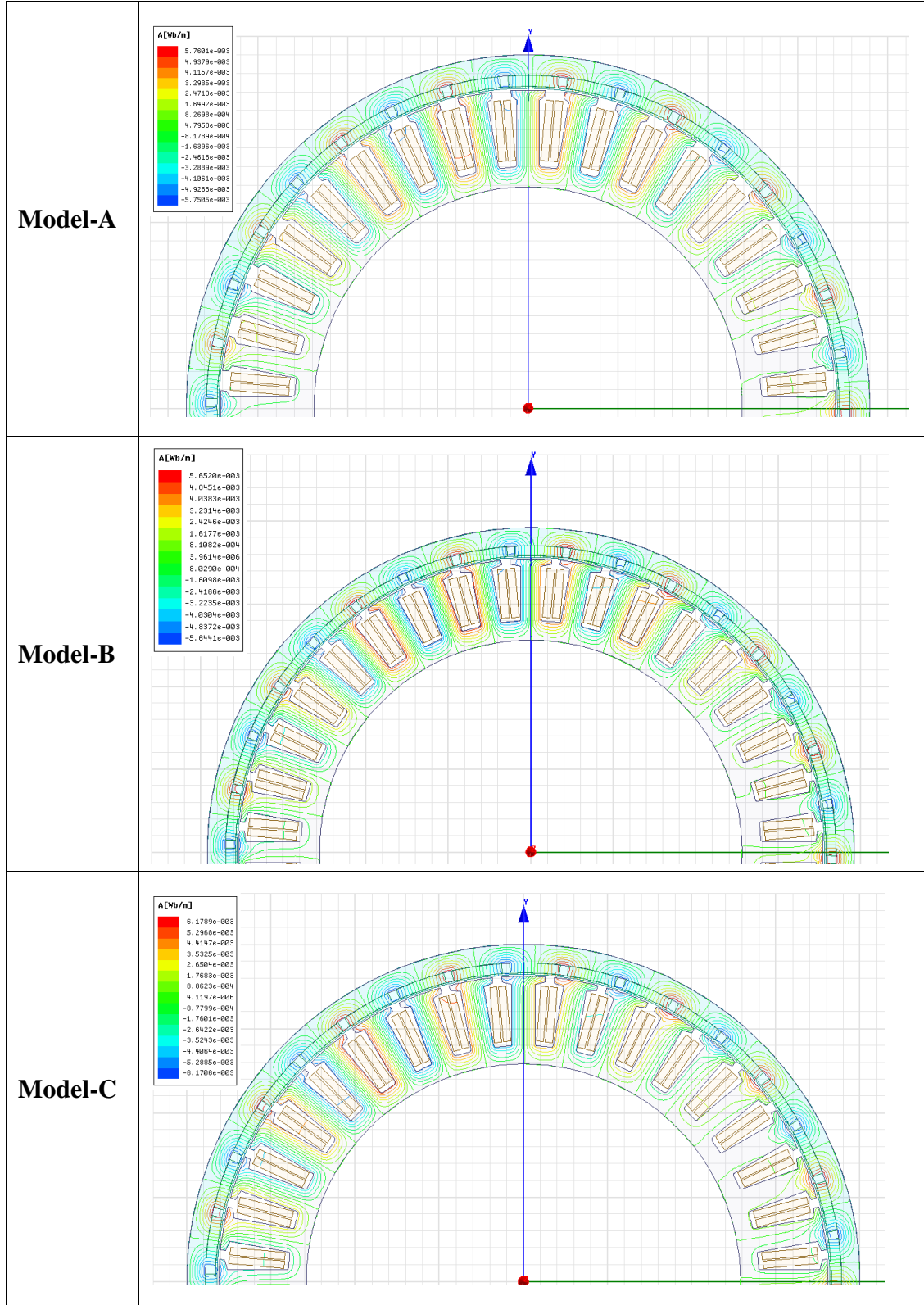
Çizelge 2.8 : Değişen radyal uzunluklar için tasarım çıktılarının karşılaştırılması.

No	D_r [mm]	K [kNm/m ³]	Sarım Sayısı	k_e [Vs/rad]	k_t [Nm/A]	Dış Etkisi Momenti [Nm]	Dış Etkisi Momenti [%]	Verim [%]	Ağırlık [kg]
A	190	16.4	35	1.37	1.45	0.0013	0.01	82.9	2.76
B	196	15.6	34	1.33	1.41	0.0012	0.01	82.3	2.88
C	200	15.5	32	1.40	1.47	0.0014	0.011	83.3	2.99

Tasarımların manyetik özellikleri incelendiğinde, Model-A' nın akı yoğunluğu ve akı çizgilerinin dağılımlarının daha düzgün olduğu ve dişlerde daha az doymanın bulunduğu anlaşılmıştır.

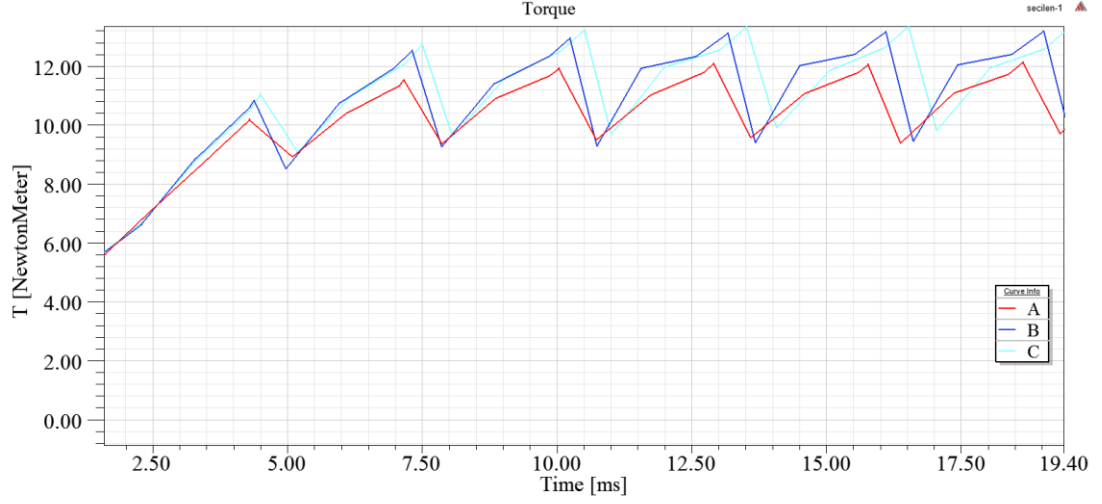


Şekil 2.24 : Değişen radyal uzunluklar için manyetik akı yoğunlukları dağılımı.

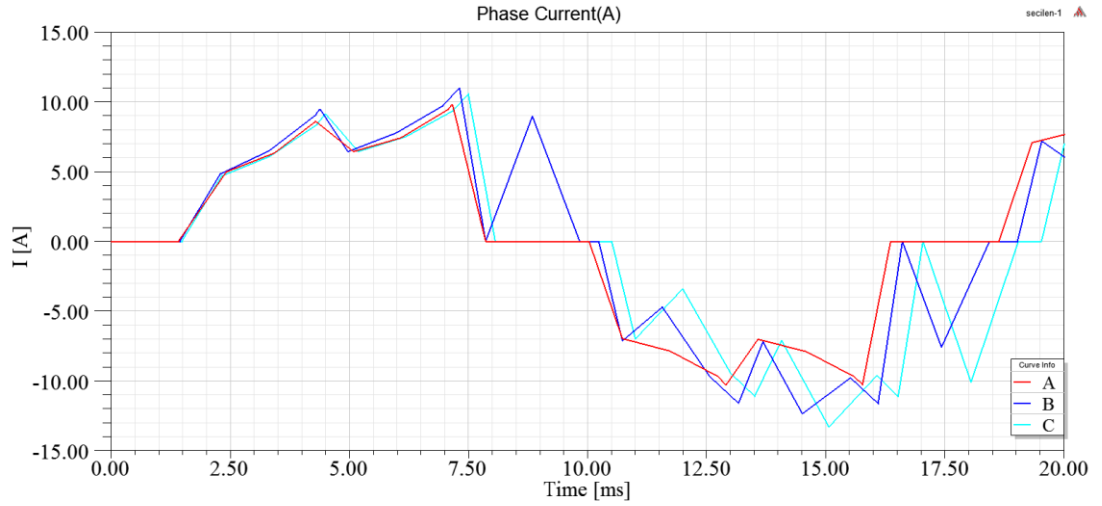


Şekil 2.25 : Değişen radyal uzunluklar için motor akı çizgilerinin dağılımı.

Moment ve akım dalga şekilleri incelendiğinde, daha az dalgalılık bulunması sebebiyle Model-A tasarımın daha düzgün sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.26 : Değişen radyal uzunluklar için moment dalga şekilleri.



Şekil 2.27 : Değişen radyal uzunluklar için akım dalga şekilleri.

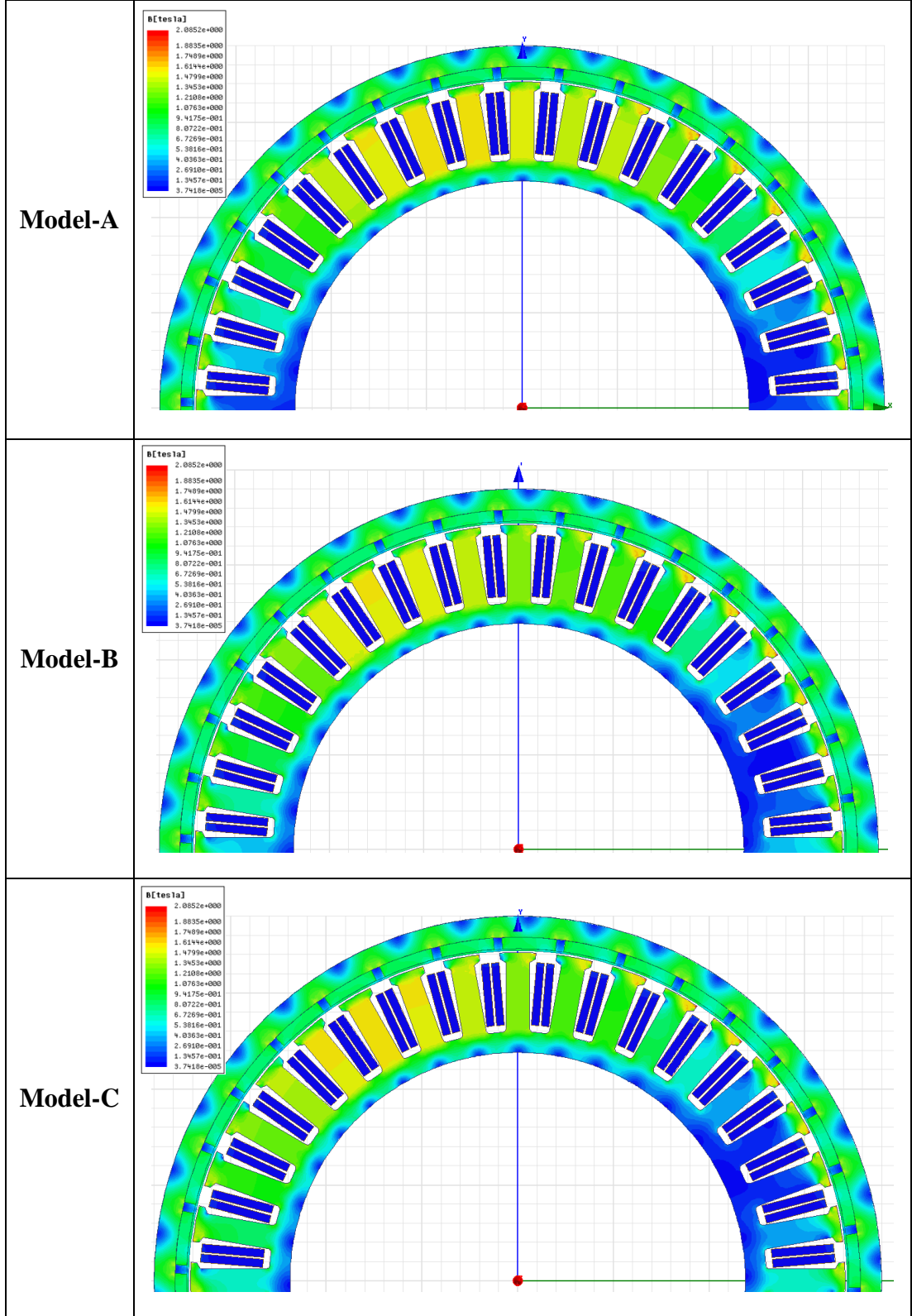
- Eksenel uzunluğun (L_r) etkisi

Birinci aşamada belirlenen motorun L_r dışındaki tüm boyutları sabit tutularak, motor performansı üzerinde eksenel uzunluğunun etkisini araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan çeşitli tasarımlar arasından üç farklı tasarım çalışmasının çıktıları paylaşılmıştır. Motor eksenel uzunluğu düşürüldüğünde, iletken uzunluğu azaldığından dolayı direnç, k_e , k_t , moment ve ortalama akım değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Bu olumsuz etki sarım sayısının artırılmasıyla giderilmiştir. Motor eksenel uzunluğunun düşürülmesinin, motor üzerinde hafifleme ve dış etkisi momentinin azalması gibi olumlu etkileri de olmuştur. Motor eksenel uzunluğu arttırıldığında ise bu etkilerin tam tersi görülmüş, iletken sarım sayısı düşürülmüştür. Her üç motorun da manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgilerinin dağılımında büyük farklılıklar görülmemiştir.

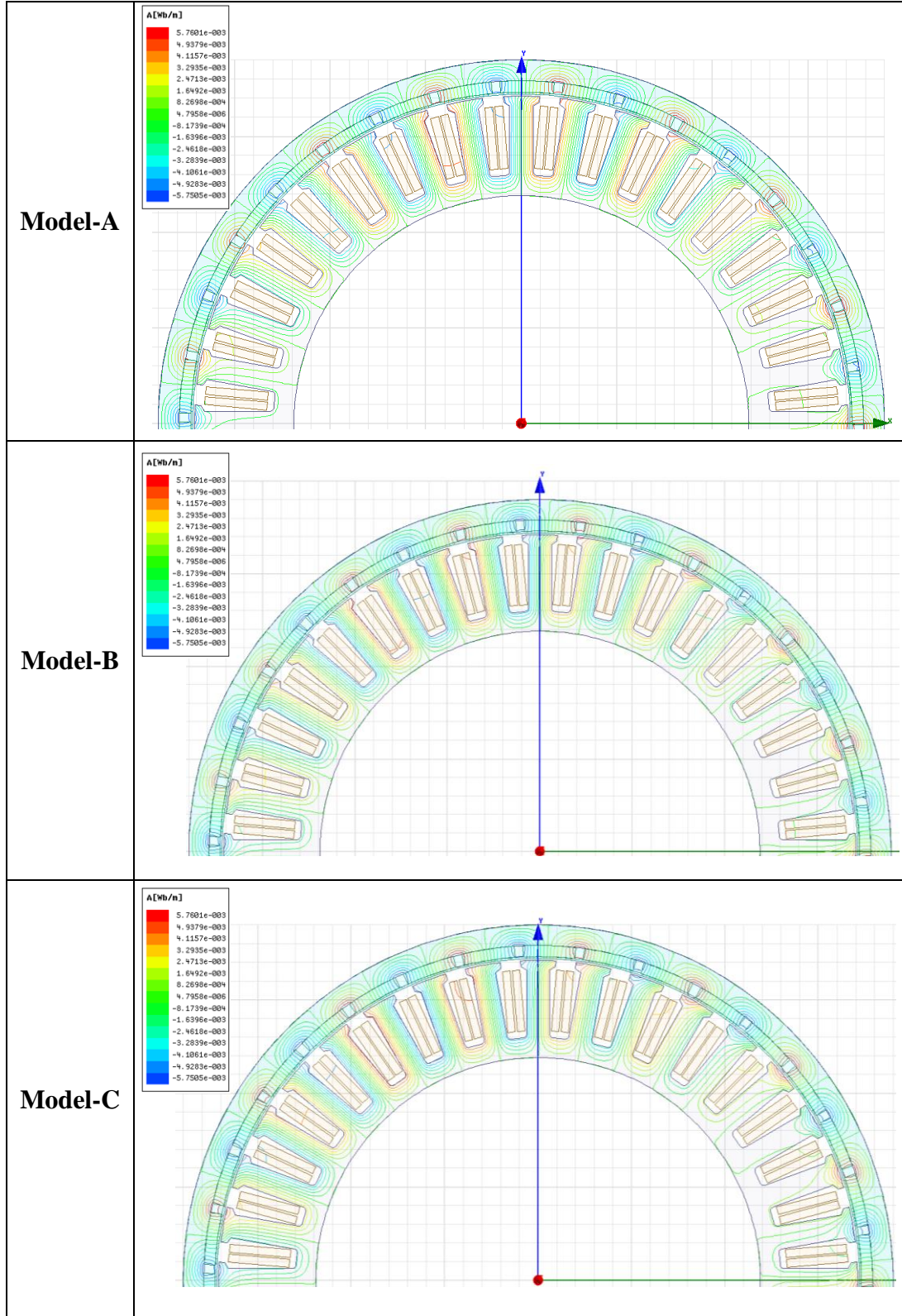
Motorun sarım sayısı ile endüktansı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu Çizelge 2.9' dan anlaşılmaktadır. Endüktansın akım artış hızı üzerindeki etkisi Şekil 2.31' de açıkça görülmektedir. Model-C' nin endüktansının düşük olması sebebiyle akım dalga şekli daha geç yükselmiştir.

Çizelge 2.9 : Değişen eksenel uzunluklar için tasarım çıktılarının karşılaştırılması.

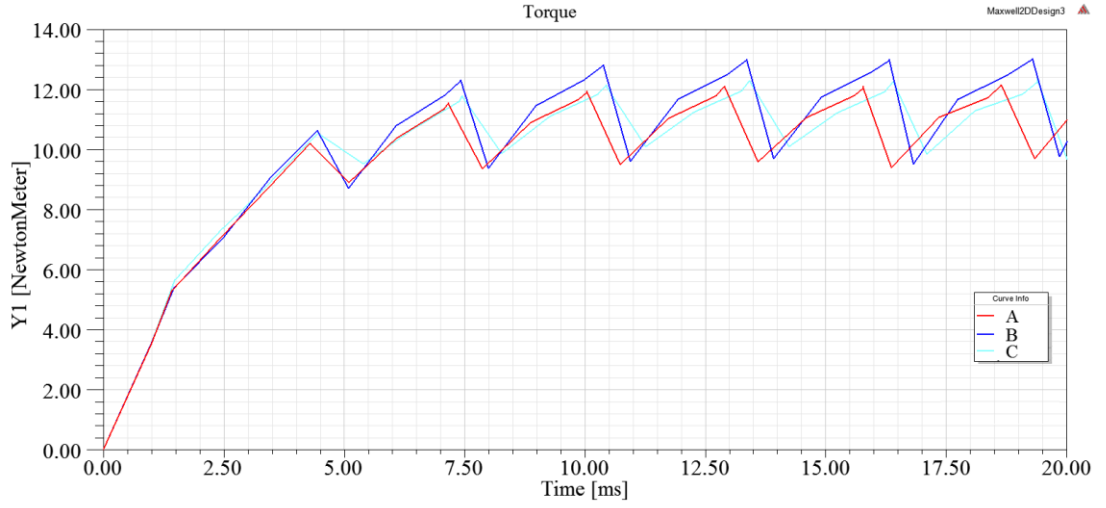
No	L_r [mm]	K [kNm/ m ³]	B_d [T]	N	R [Ω]	L [mH]	k_e [Vs/ rad]	k_t [Nm/ A]	Dış Etkisi Momenti [Nm]	Dış Etkisi Momenti [%]	Verim [%]	Ağırlık [kg]
A	25	16.4	1.760	35	0.26	0.92	1.37	1.45	0.0013	0.01	82.9	2.76
B	20	20.5	1.767	42	0.27	1.05	1.32	1.43	0.0011	0.009	82.1	2.43
C	30	13.7	1.755	30	0.25	0.79	1.40	1.46	0.0016	0.013	83.2	3.26



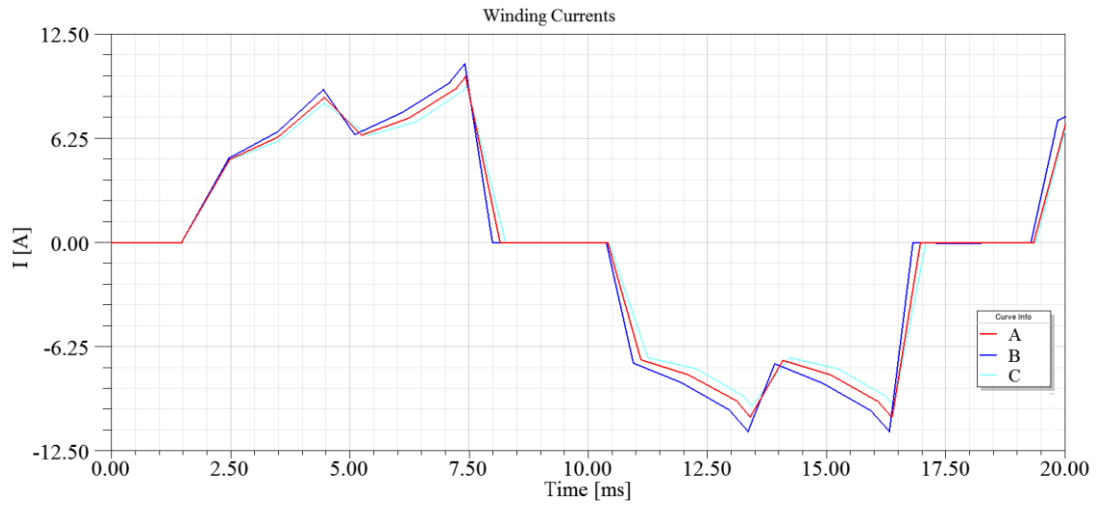
Şekil 2.28 : Değişen aksel uzunluklar için manyetik akı yoğunlukları dağılımı.



Şekil 2.29 : Değişen aksel uzunluklar için motor akı çizgileri dağılımı.



Şekil 2.30 : Değişen aksel uzunluklar için moment dalga şekilleri.



Şekil 2.31 : Değişen aksel uzunluklar için akım dalga şekilleri.

- Oluk ağız genişliğinin etkisi

Diğer boyutlar sabit tutularak motor oluk ağız genişliği (b_{so}) değiştirilmiş ve bu parametrenin motor üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Model B ve C için b_{so} değeri düşürülmüştür. Hedeflenen moment seviyesine ulaşmak için sarım sayıları yeniden düzenlenmiştir. Tasarımlar sonucunda elde edilen çıktılar aşağıdaki çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 2.10 : Değişen oluk ağız genişliği için tasarım çıktılarının karşılaştırılması.

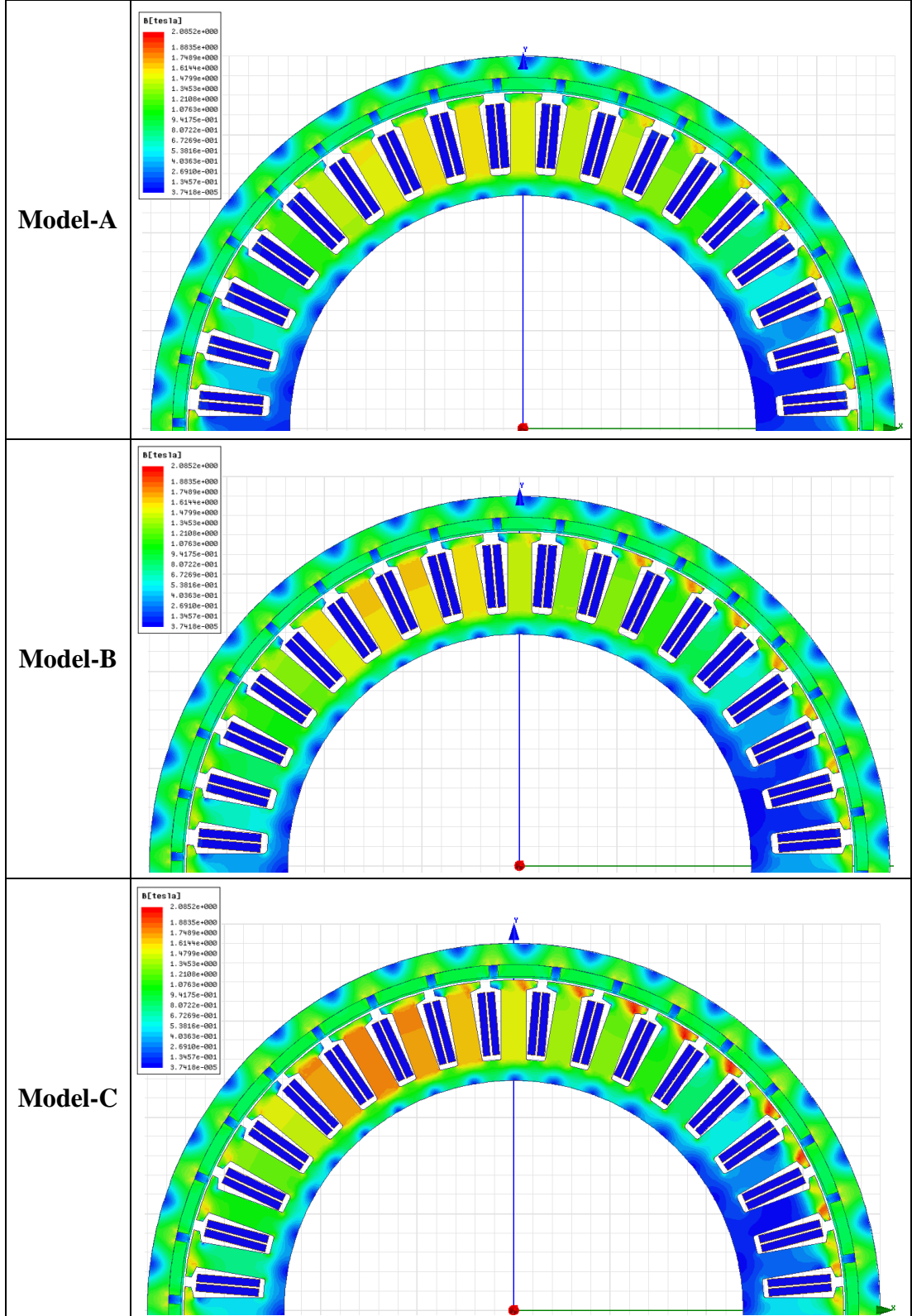
No	b_{so} [mm]	Sarım Sayısı	$B_{diş}$ [T]	L [mH]	k_e [Vs/rad]	k_t [Nm/A]	Diş Etkisi Momenti [Nm]	Diş Etkisi Momenti [%]	Verim [%]	Ağırlık [kg]
A	5.42	36	1.761	0.92	1.37	1.45	1.29	0.01	82.9	2.76
B	4	35	1.798	0.97	1.34	1.43	4.95	0.04	83	2.76
C	2.67	33	1.775	1.04	1.36	1.45	1.5	0.01	83.2	2.87

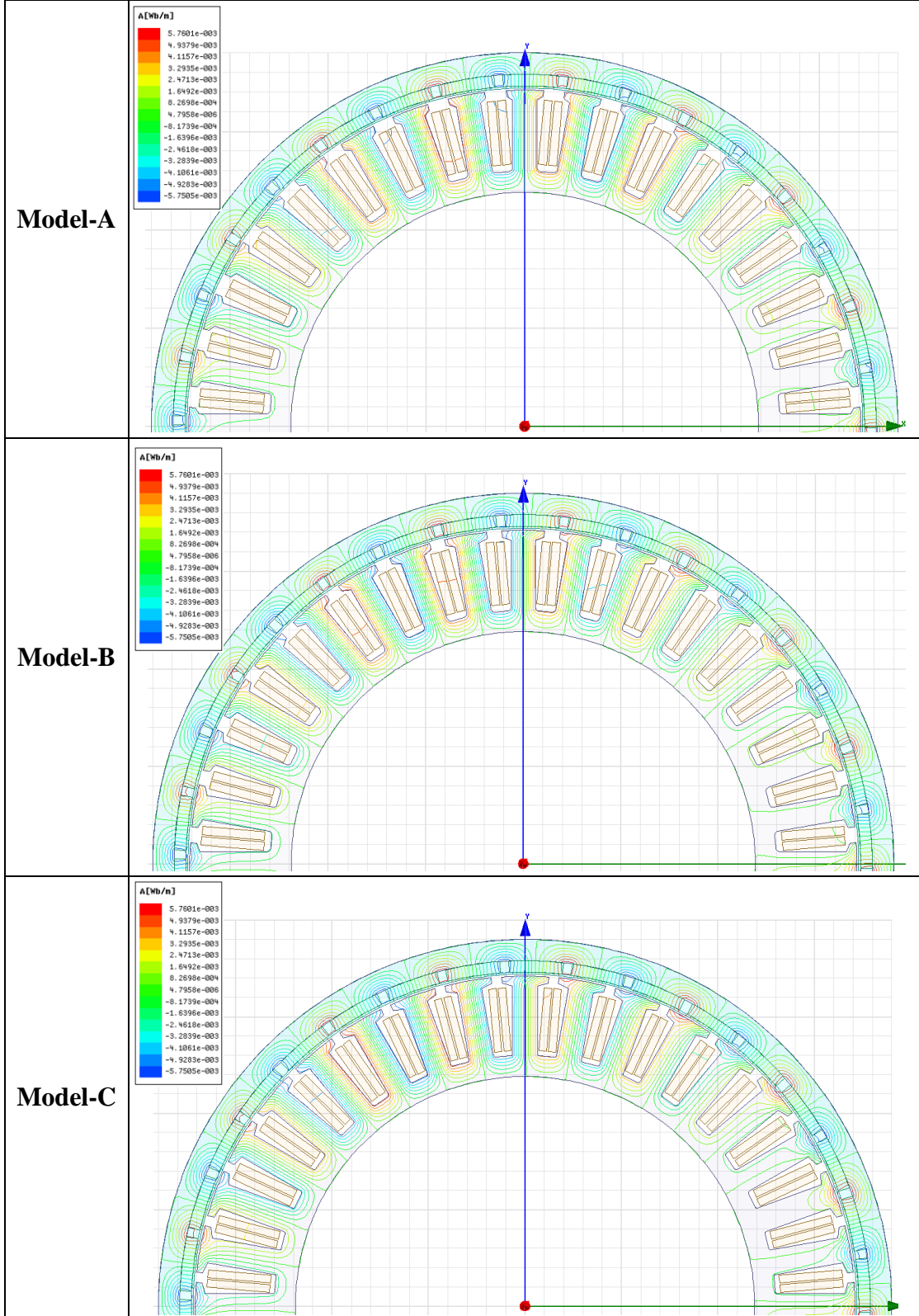
Tasarım aşamasında, diş etkisi momentinin en düşük seviyede olduğu oluk ağız açıklığı araştırılmıştır. Model-A ve Model-B' nin oluk ağız açıklık değerlerine bu şekilde ulaşılmıştır. Karşılaştırmak üzere ara bir değerde de tasarım gerçekleştirilmiştir.

Çizelgede yer alan analitik analiz çıktıları incelendiğinde, Model-C' nin daha az sarımla aynı momenti sağlayabildiği ve veriminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Diş etkisi momentinin yüzde cinsinden ifadesi Model-A ve Model-C için aynıdır.

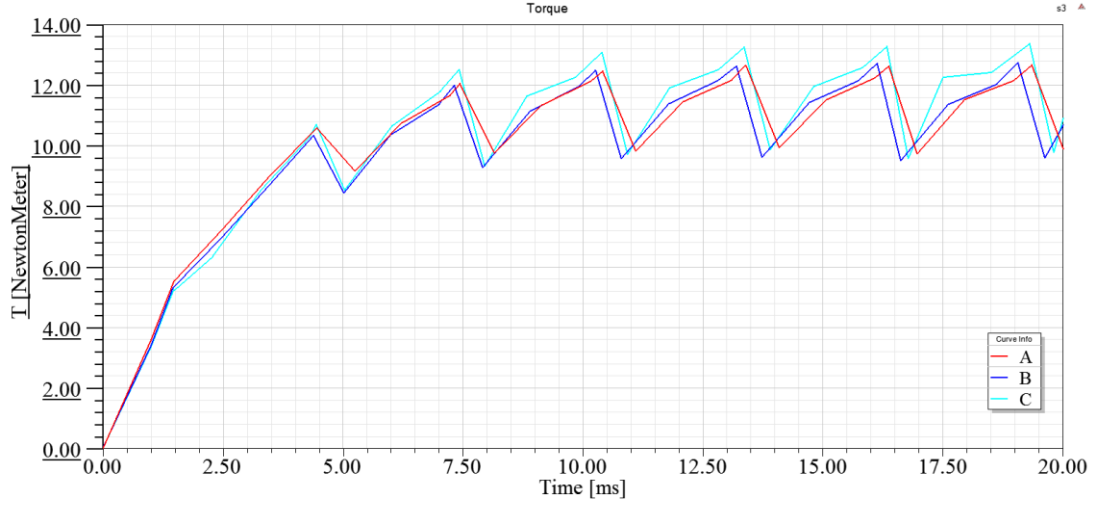
Analitik analiz çıktılarının incelenmesinin ardından, sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek motorların manyetik özellikleri ve moment-akım dalga şekilleri incelenmiştir. En dar oluk ağız genişliğine sahip olan Model-C' nin dişlerindeki doyma miktarının diğer motorlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.

Moment dalga şekilleri incelendiğinde, analitik çözümde diş etkisi momentinin düşük çıkmasına karşın moment dalgalılığı en yüksek olan motor Model-C' dir. Yine, Model-B ve Model-C' nin akım dalga şekillerindeki dalgalılığın Model-A' ya kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

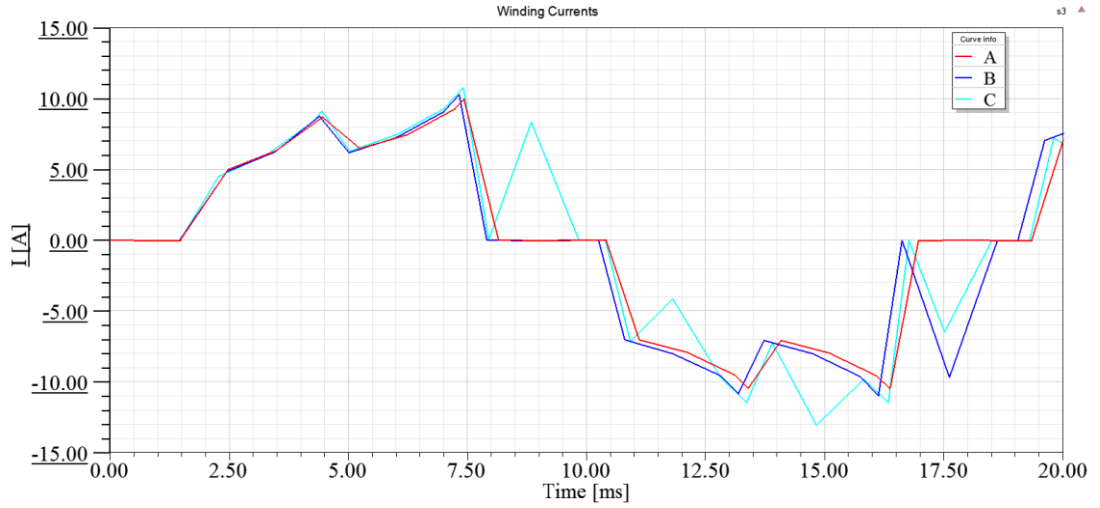




Şekil 2.33 : Değişen oluk ağız genişliği için motor akı çizgileri dağılımı.



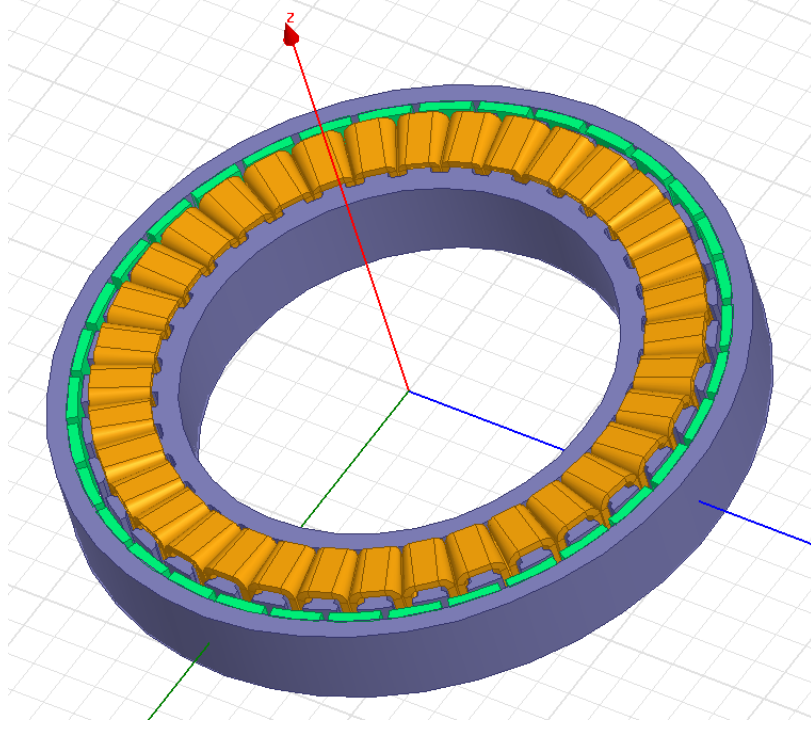
Şekil 2.34 : Değişen oluk ağız uzunlukları için moment dalga şekilleri.



Şekil 2.35 : Değişen oluk ağız uzunlukları için akım dalga şekilleri.

36/34 tek kat sargılı motor için farklı boyutlarda yapılan tasarımların karşılaştırılması ve sonuçların değerlendirilmesiyle üretim için en uygun motor tipinin Model-A olduğuna karar verilmiştir.

Model-A tasarımının özellikleri ve analizler sonucunda elde edilen dalga şekilleri paylaşılmıştır. Motor 3D manyetik alan analiz çıktıları ve özgeçirimi literatüre ve hedeflenen motor parametrelerine uygundur. Bu doğrultuda, bu tasarım için üretim aşamasına geçilecektir.

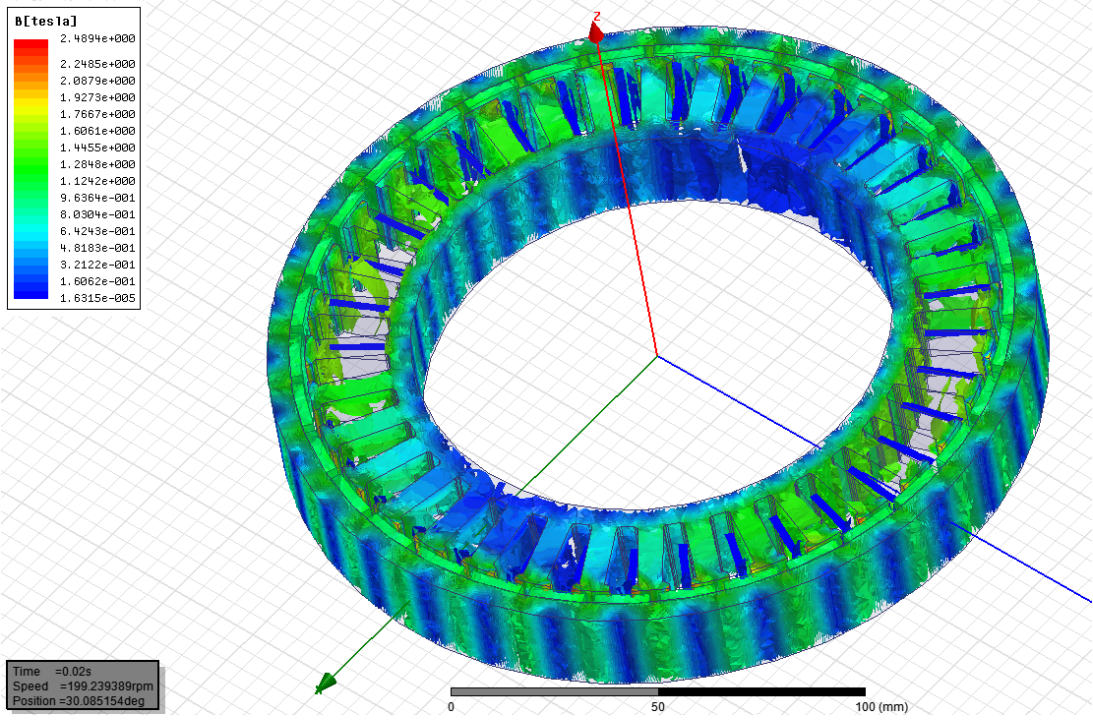


Şekil 2.36 : Seçilen motor üç boyutlu görüntüsü.

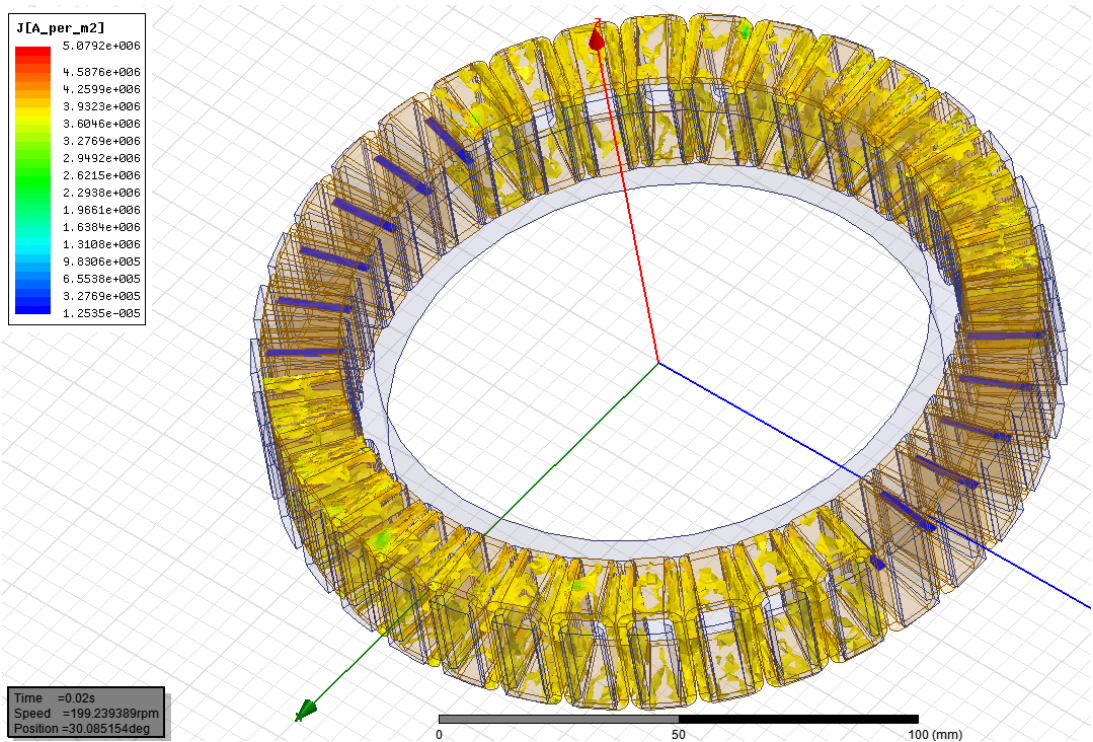
Çizelge 2.11 : Seçilen motorun özellikleri.

Motor Parametreleri	Değer
Anma gücü [W]	250
Anma gerilimi [V]	36
Oluk/kutup sayısı	36/34
Oluk doluluk oranı [%]	53
Ağırlık [kg]	2.76
Direnç [Ω]	0.26
Endüktans [mH]	0.92
$B_{diş}$ [T]	1.762
$B_{stator,b}$ [T]	0.95
B_{rotor} [T]	0.96
k_e [Vs/rad]	1.37
k_t [Nm/A]	1.45
Diş etkisi momenti [mNm]	1.29
Ortalama giriş akımı [A]	8.4
Akım yoğunluğu [A/mm^2]	4.9
Verim [%]	82.9
Anma hızı [min^{-1}]	199.2
Boşta hız [min^{-1}]	255.4
Anma momenti [Nm]	11.98
Maksimum moment [Nm]	92.7

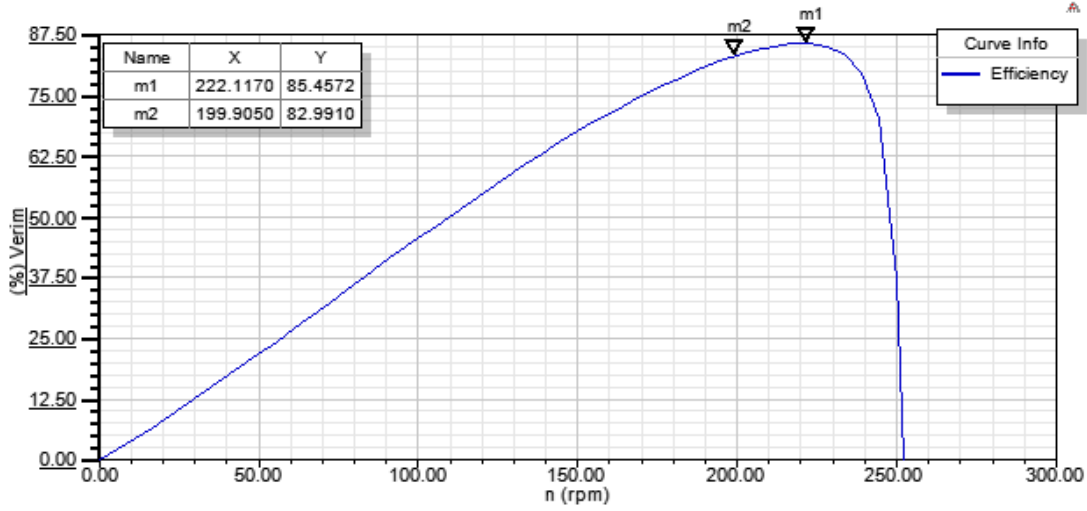
Analizler sırasında motor maksimum momenti 92.7 Nm olarak hesaplanmış olsa da kullanılan devrenin akım limitinin 30 A olmasından dolayı motorun anlık olarak ulaşabileceği maksimum moment değeri yaklaşık 40 Nm' dir.



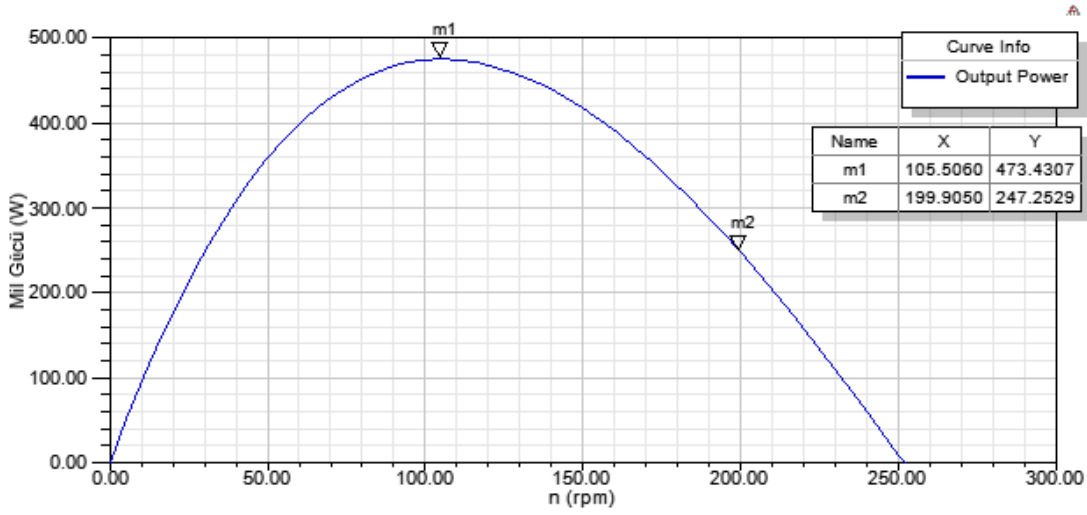
Şekil 2.37 : Manyetik alan yoğunluğunun dağılımı.



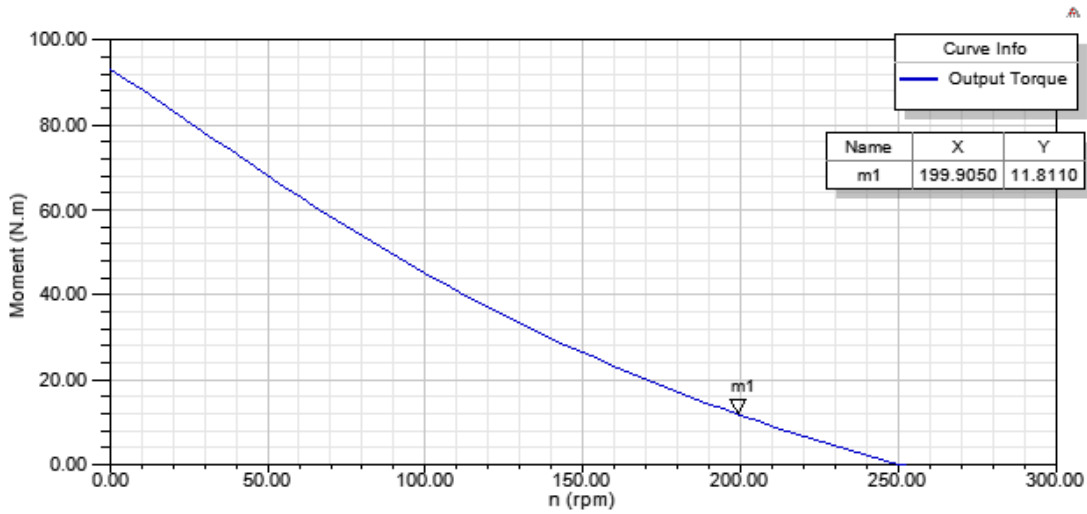
Şekil 2.38 : Akım yoğunluğu analizi.



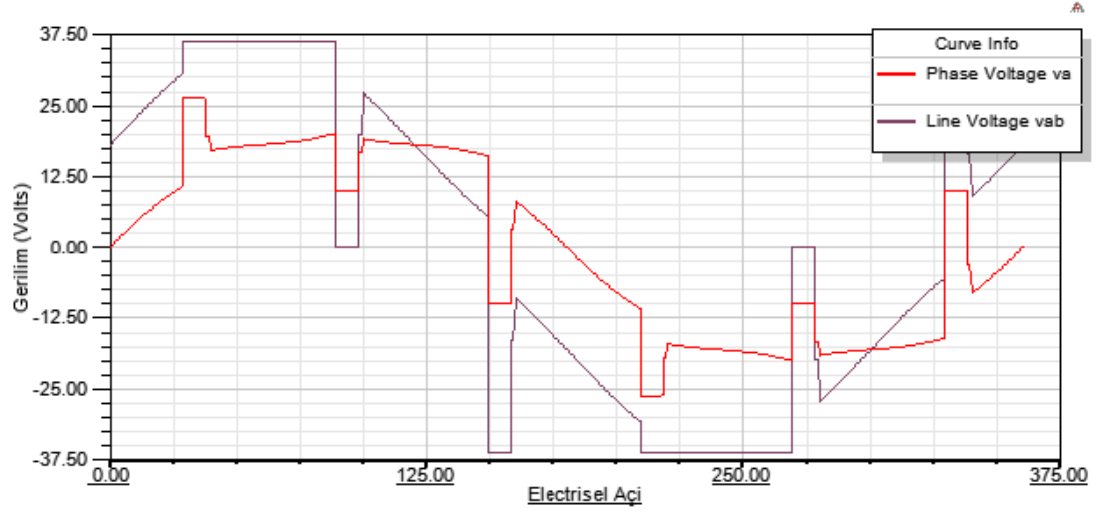
Şekil 2.39 : Verim-hız eğrisi.



Şekil 2.40 : Mil gücü-hız eğrisi.



Şekil 2.41 : Moment-hız eğrisi.

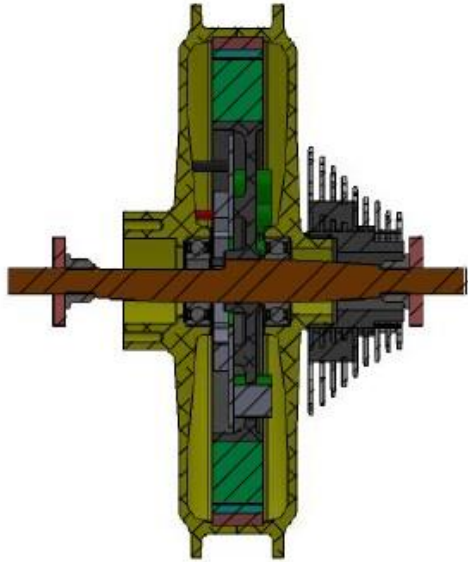


Şekil 2.42 : Endüklenen gerilimin dalga şekli.

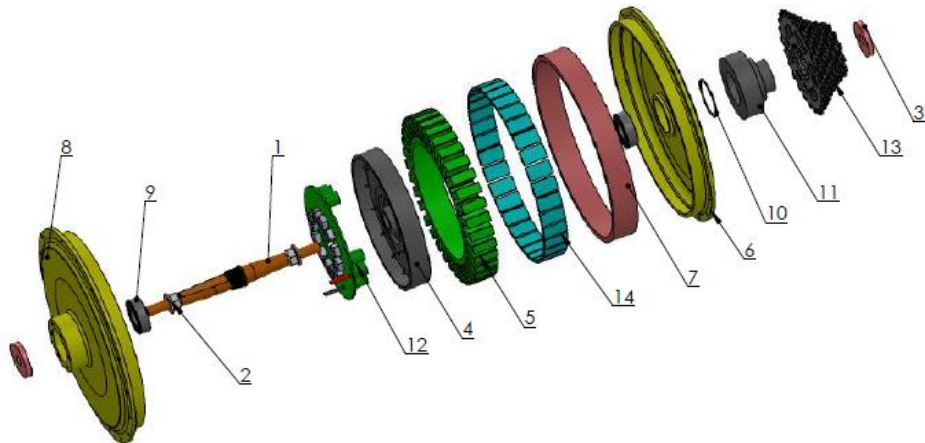
3. ELEKTRİKLİ BİSİKLET MOTORU UYGULAMA AŞAMASI

3.1. Motor Üretimi

Üretilmek üzere seçilen motor modelinin mekanik tasarımlarının yapılmasıyla motor üretim aşamasına geçilmiştir. Mekanik bileşenlerin hafif, kolay üretilebilir ve dayanıklı olma özellikleri ön planda tutulmuştur. Elektronik sürücü kartı tasarım hedeflerinde belirtildiği gibi motorun göbeğine yerleştirilmiştir.

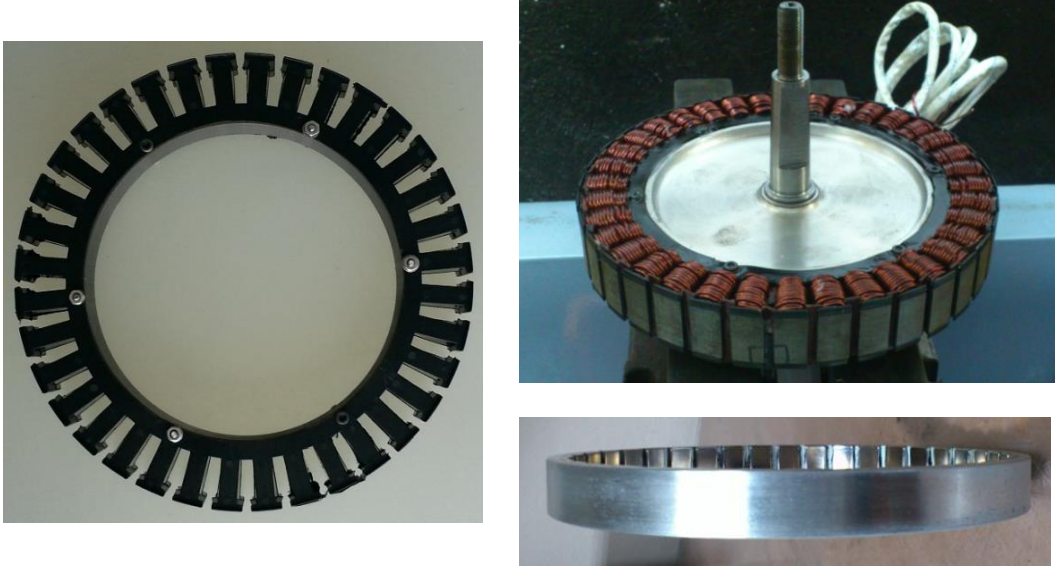


Parça No	Açıklama
1	Mil
2	Şapkalı somun
3	Arka çatallar
4	Göbek
5	Motor sacı
6	Dişli taraf kapağı
7	Sırt demiri
8	Kablo çıkış tarafı kapak
9	Rulman
10	Dişli kapak arası pulu
11	Standart vites gövdesi
12	Elektronik sürücü kartı
13	Standart 9 dişli
14	Motor mıknatısları



Şekil 3.1 : Motor kesiti ve bileşenlerin ayrıntılı görüntüsü.

Stator, 0.5 mm kalınlığındaki silisli sac plakalara lazer kesim yöntemi ile dilimlenerek pimler yardımı ile paketlenmiştir. Sargı izolasyonu için plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen 0.5 mm et kalınlığı bulunan plastik kılıf kullanılmıştır.



Şekil 3.2 : Motor imalat aşamaları.

Hall sensörler boş olan dişlere açılacak oluklara yerleştirilebileceği gibi, elektronik kart tasarımının uygunluğuna bağlı olarak farklı yöntemlerle de yerleştirilebilir. Elektriksel 120° aralıklarla yerleştirilecek olan Hall sensörleri konumları, (3.1) formülündeki elektriksel ve mekanik açı ilişkisinden yola çıkılarak belirlenmiştir.

$$\theta_e = N_p \theta_m \quad (3.1)$$

$$360^\circ = 17 \theta_m \quad (3.2)$$

Bir elektriksel periyot için mekanik olarak $\theta_m = 21.17^\circ$ yer değiştirme gerçekleşir. Sensörler mekanik olarak 7.06° aralıkla yerleştirilmiştir.

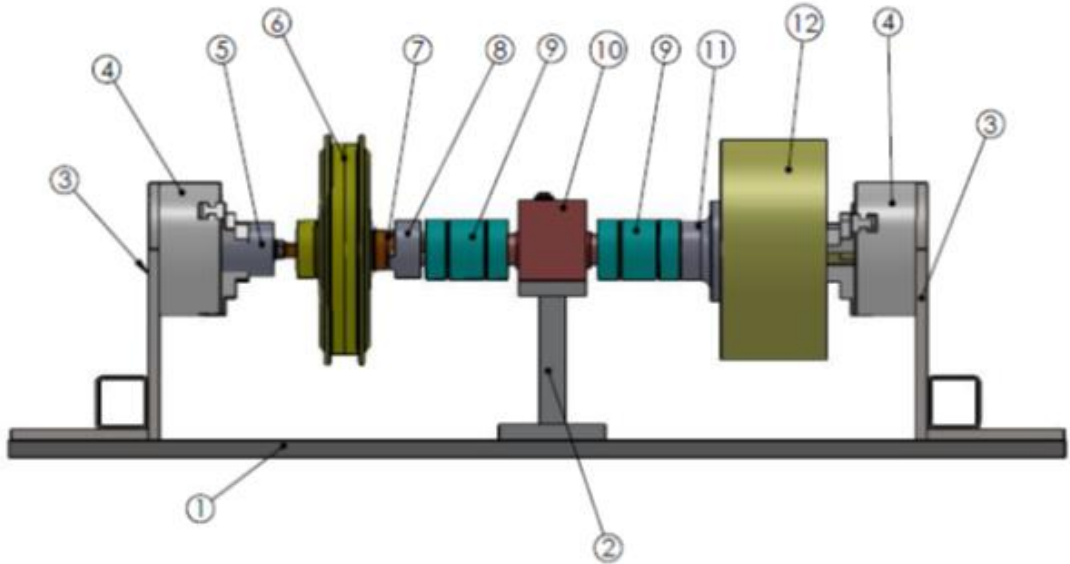
Rotor, steel 1010 malzemeye en yakın kalitede olan St37 çelik çubuk malzemenin toplam kalınlık ve dış çap ölçülerinin torna tezgahında işlenmesi ile üretilmiştir. Mıknatısların hatasız ve kolay bir şekilde yapıştırılması için plastik aparat kullanılmıştır. Sargı malzemesi olarak H sınıfı emaye bobin teli seçilmiştir.



Şekil 3.3 : Motor imalatının tamamlanması.

3.2. Deneyler

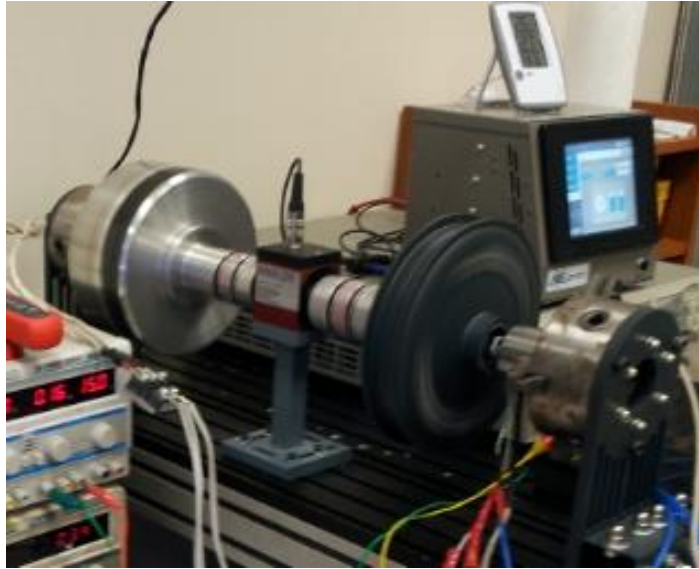
Elektrikli bisiklet için üretilmiş fırçasız doğru akım motorunun deneyleri, EN 60034 Standardına uygun olan kalibre bir fırçasız doğru akım motoru sürücüsü ve özel bir yükleme düzeneği ile milinden moment ve hız ölçülerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4 : Test düzeneği 3D tasarımı.

Çizelge 3.1 : Test düzeneği parça listesi.

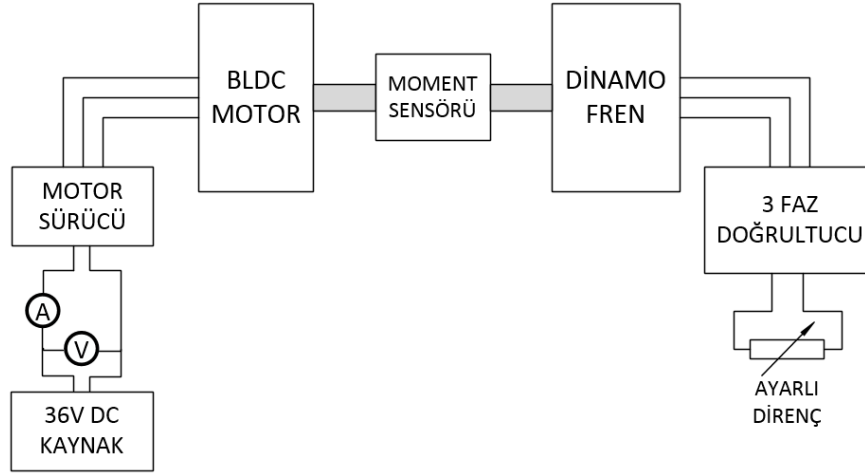
Parça No	Açıklama
1	Alt tabla
2	Moment sensörü bağlantı parçası
3	Motor bağlantı ayakları
4	Motor bağlantı aynası
5	Motor bağlantı ara parçası
6	FDAM
7	Somun
8	Kaplin bağlantı parçası
9	Kaplin
10	Moment sensörü
11	Kaplin bağlantı parçası
12	Karşı yük motoru 500W (FDAM)



Şekil 3.5 : Motorun deney düzeneğine yüklenmesi.

3.2.1. Performans deneyi

Üretilen motorun performans deneylerinin yapılması amacıyla Şekil 3.6' da şematığı bulunan deney düzeneği hazırlanmıştır. Motor, 500W gücündeki generatör ile yüklenmiş ve generatör çıkışına üç fazlı doğrultucu üzerinden ayarlı direnç bağlanmıştır. Direnç değiştirilerek farklı yük durumları için dinamo fren momenti oluşturulmuş. Böylece, değişen yük altında motorun performansı ölçülmüş ve motorun temel özgegrileri çıkarılmıştır. Bu deney ile amaçlanan, üretilen motorun farklı çalışma koşullarındaki davranışının ve öngörülen tasarım değerlerine yakınlığının belirlenmesidir.



Şekil 3.6 : Motor performans deneyi bağlantı şeması.

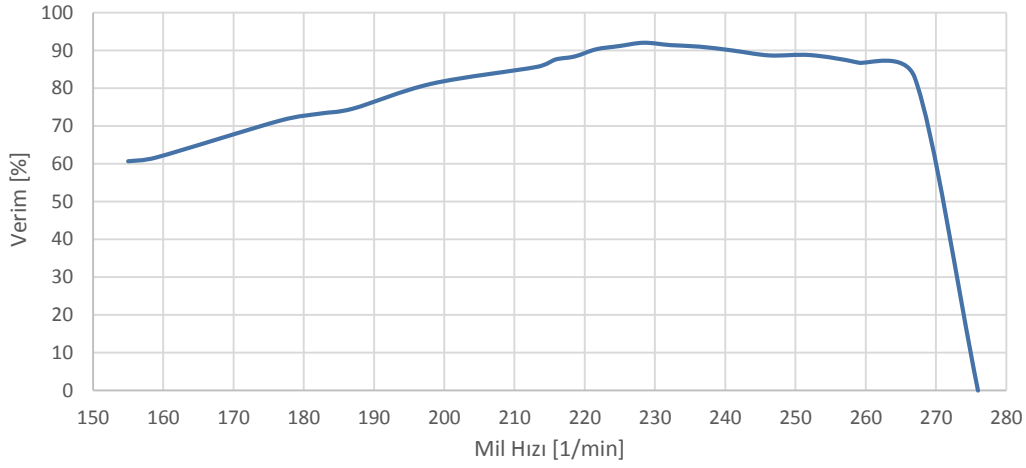
Motor ve generatör milleri arasındaki bağlantıya yerleştirilen moment sensörü üzerinden alınan anlık moment değerleri ve takometre aracılığı ile ölçülen motor hızı değerleri kaydedilerek, farklı yükler altındaki motor mil gücü hesaplanmıştır. Moment ve hız bilgisinin kaydedilmesine senkron olarak motor giriş akım ve gerilim değerleri de kaydedilmiştir. Bu işlemlerin ivedilikle yapılmasına, böylece alınan sonuçların güvenilirliğinin artırılmasına dikkat edilmiştir.

Çizelge 3.2 : Performans deneyi ölçüm tablosu.

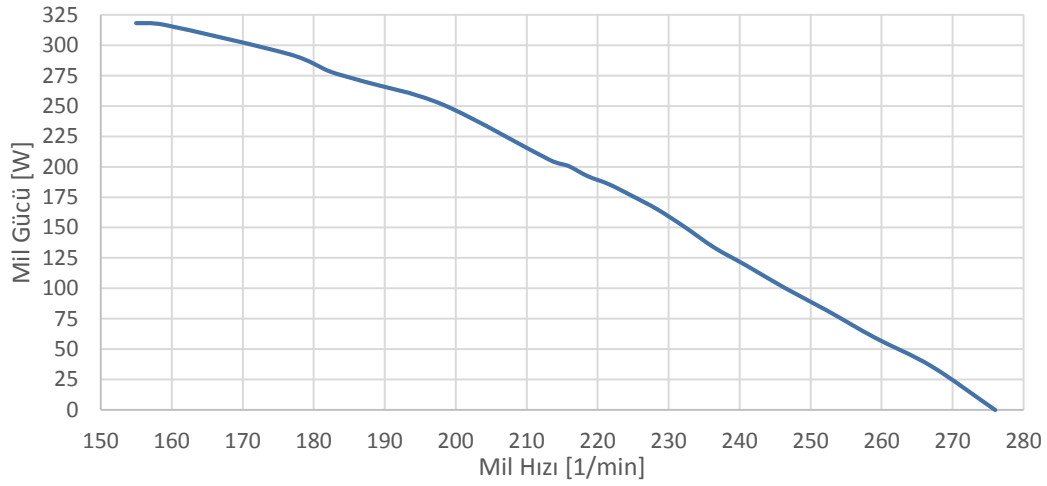
Deney Sonucu	Akım [A]	Gerilim [V]	Hız [min^{-1}]	Moment [Nm]	Giriş Gücü [W]	Mil Gücü [W]	Verim [%]
1	0.4	36	276	0	14.4	0.00	0.00
2	1.21	36	267	1.29	43.56	36.07	82.80
3	1.91	36	259	2.2	68.76	59.67	86.78
4	2.57	36	252.2	3.11	92.52	82.13	88.77
5	3.15	36	246.3	3.9	113.4	100.59	88.70
6	3.66	36	241	4.7	131.76	118.61	90.02
7	4.08	36	236.4	5.4	146.88	133.68	91.01
8	4.58	36	232.2	6.2	164.88	150.75	91.43
9	4.98	36	228.4	6.9	179.28	165.03	92.05
10	5.36	36	224.9	7.47	192.96	175.92	91.17
11	5.71	36	221.6	8	205.56	185.64	90.31
12	6.04	36	218.6	8.4	217.44	192.28	88.43
13	6.37	36	215.8	8.89	229.32	200.89	87.60
14	6.66	36	213.3	9.2	239.76	205.49	85.71
15	8.59	36	198.2	12.1	309.24	251.13	81.21
16	10.06	36	187	13.8	362.16	270.23	74.62
20	10.56	36	182.2	14.6	380.16	278.56	73.27
21	11.36	36	176.7	15.8	408.96	292.35	71.49
22	14.26	36	159	19.02	513.36	316.68	61.69
23	14.56	36	155	19.6	524.16	318.13	60.69

Deney sırasında alınan ölçümler ve bunlara bağlı olarak yapılan hesapların sonuçları incelendiğinde, motor mil gücünün tasarım değerine en yakın olduğu 15. ölçümdeki değerlerin tasarım nominal değerlerine belirli bir toleransla benzer olduğu görülmüştür.

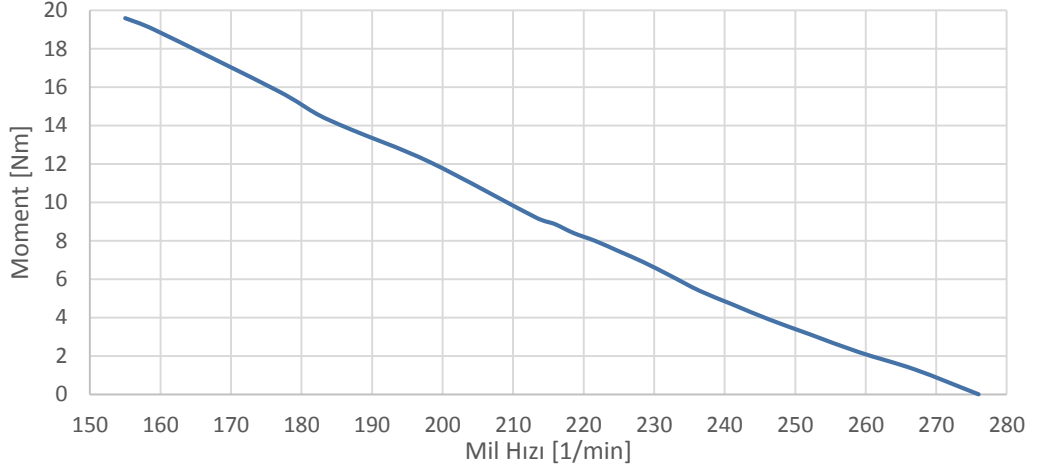
Ölçüm sonuçlarına bağlı olarak motorun özgeçirileri çıkarılmış, bu eğrilerin hem motor tasarımında elde edilen sonuçlara hem de literatüre uygun olduğu belirlenmiştir.



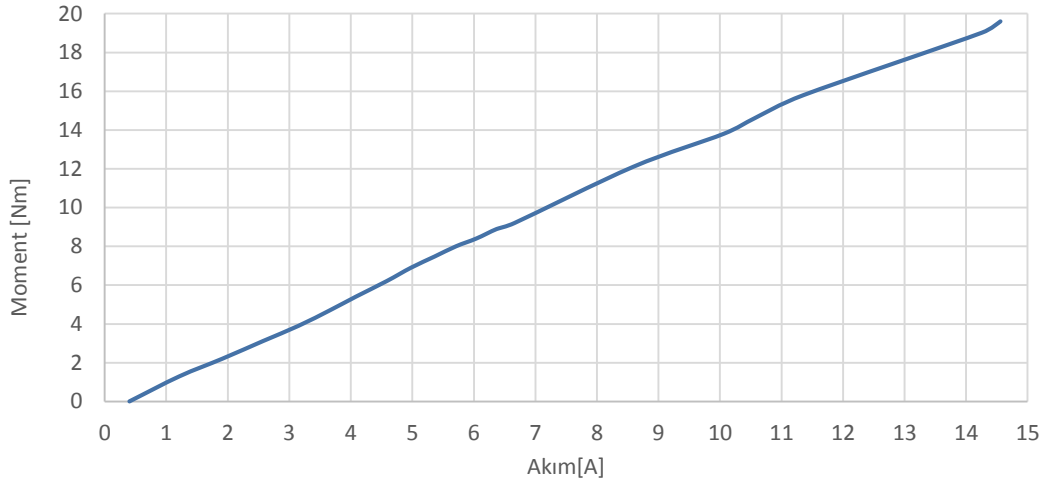
Şekil 3.7 : 36/34 motor verim-hız grafiği.



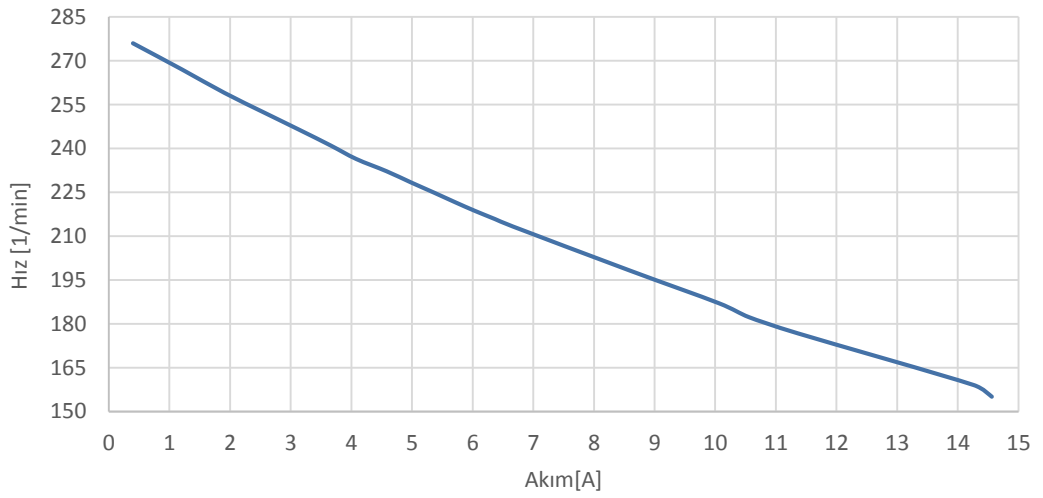
Şekil 3.8 : 36/34 motor mil gücü-hız grafiği.



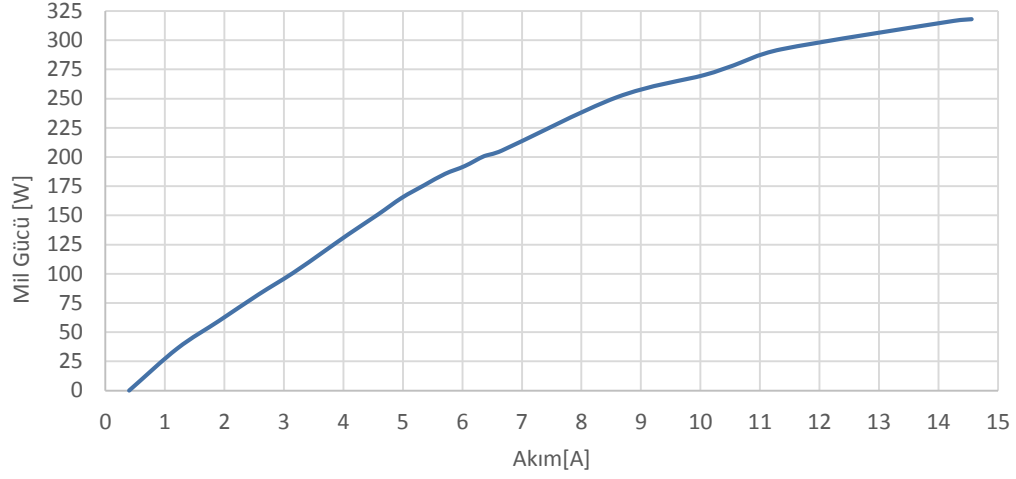
Şekil 3.9 : 36/34 motor moment-hız grafiği.



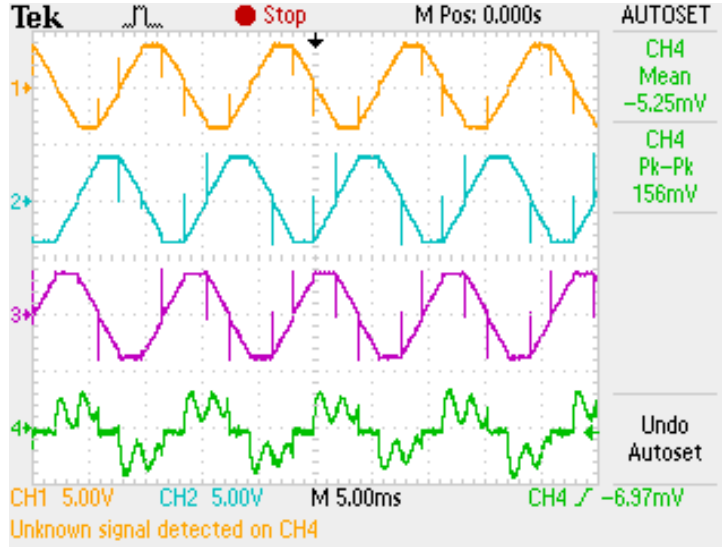
Şekil 3.10 : 36/34 motor moment-akım grafiği.



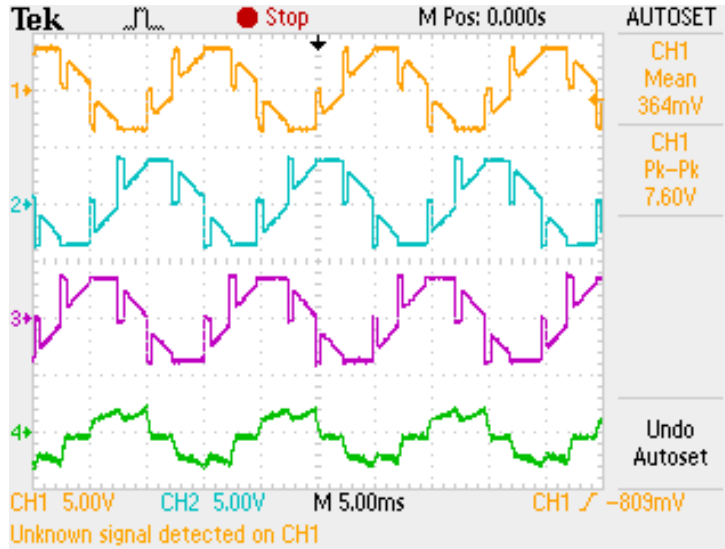
Şekil 3.11 : 36/34 motor hız-akım grafiği.



Şekil 3.12 : 36/34 motor mil gücü-akım grafiği.



Şekil 3.13 : 36/34 motor boşa üç faz gerilim-akım dalga şekli.



Şekil 3.14 : 36/34 motor yükte üç faz gerilim-akım dalga şekli.

3.2.2. Isınma deneyi

Anma gücü bir elektrik motorunun normal koşullar altında sürekli olarak verebileceği en büyük mil gücü olarak tanımlanır. Motor anma gücü değerinde sürekli olarak çalışabilir, daha yüksek bir mil gücü ile yüklenmesi durumunda da kısa süreli olarak çalışabilir. Aşırı yüklenme durumlarında belirli tolerans süreleri vardır. Motor, aşırı yük altında uzun süre çalışırsa ısınır ve bir süre sonra arızalanır. EN 60034-1 standardında, motorların çeşitli yüklenme süreleri için performans ölçütleri belirlenmiştir. Aşırı yüklenme sonucu oluşan ısınma dolayısıyla meydana gelen arıza, önce sargı yalıtkanlarının zarar görmesi ve sonra motorun sargılarının yanmasına ya da sürekli mıknatısların özelliklerini yitirmesine neden olabilir. Motor sargılarında kullanılan yalıtkanların özellikleri yalıtım sınıflarıyla belirlenir ve her sınıfın dayanabileceği sıcaklık değerleri vardır [49].

Çizelge 3.3 : Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları [49].

Yalıtım Sınıfı	İzin Verilen Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	En Yüksek Çevre Sıcaklığı (°C)	Güvenlik Payı (K)	İzin Verilen En Yüksek Isınım (K)
A	105	40	5	60
E	120	40	5	75
B	130	40	10	80
F	155	40	15	100
H	180	40	15	125

Motor sıcaklığının standart ile belirtilen tolerans sıcaklık değerlerini aşması durumunda yalıtkan malzeme zarar görebilir ve motor sargıları arasında kısa devre oluşabilir. Bu durum aşırı akım çekilerek motorun yanmasına ve motorun iş göremez hale gelmesine neden olur. Genel yaklaşımla her anma rejim sıcaklığı üzerindeki her 10 °C sıcaklık artışının yalıtkan ömrünü yarıya düşürdüğü kabul edilir. Ancak, maksimum izin verilen sıcaklık değerinden sonra yalıtkanlar kalıcı olarak zarar görür [49].

Motorlar anma gücünde çalışırken belirli bir rejim sıcaklığına erişir ve yük aynı kalırsa bu sıcaklık değerini muhafaza ederler. Motorların anma gücünde eriştikleri sıcaklık değerine anma rejim sıcaklığı adı verilir. Bu değer motor tasarımında ve boyutlandırılmasında çok önemlidir. Motor belirli bir yük ile yüklendiğinde, motorun sürekli rejim sıcaklığı, bu sıcaklık aralığından daha yükseğe çıkıyorsa motorun aşırı yüklendiği anlaşılır. Eğer motor rejim sıcaklığı bu değer aralığının altında kalıyorsa

motorun az yüklendiği anlaşılır. Başka deyişle motorun anma gücü bu güç değerinden yüksektir ve motoru daha fazla yüklemek olanaklıdır.

Sürekli mıknatıslı fırçasız motorlarda sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenen kısımlar, sargılar ve mıknatıslardır. Sargıların dayanım sıcaklıkları yukarıdaki tabloda verilmiştir. Sargıların maruz kalacağı ısınım değerleri belirtilen değerleri geçmemelidir. Bununla birlikte mıknatıslar, özellikle nadir toprak elementi NdFeB mıknatıslar değerlerini sıcaklık artışıyla yitirmeye başlarlar. Sıcaklığın artması ile birlikte sargı direncinin artması ve mıknatıs enerji yoğunluğunun düşmesi, motorun çalışma noktasının büyük ölçüde yer değiştirmesine neden olur. Bu nedenle motor sıcaklığının mıknatıslara etkisi de dikkate alınmalıdır. NdFeB mıknatıs kullanılan motorlarda mıknatıs güvenliği ve performans azalmasını dikkate alarak bir sıcaklık emniyet payı bırakılmalıdır. Doğal soğutmalı, NdFeB mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında rejim sıcaklığının 90-100 °C arasında alınması uygun bir seçimdir.

Her enerji dönüşümünde elektrik makinasının ısınmasına yol açan kayıp güç oluşumu kaçınılmazdır. Kayıp güç ısı ile çevreye iletilen ısı arasında denge kuruluncaya kadar makinanın sıcaklığı yükselir. Normal işletme şartlarında makinanın ısınmasına daha çok bakır kayıpları neden olduğundan dolayı, makina içinde en çok ısınan kısım sargılardır. Isı alışverişi esnasında kayıp güç ısısının bir bölümü makinede birikir ve makinenin iç sıcaklığını artırır. Bu nedenle, motorun gövde sıcaklığına bakarak sargı sıcaklığı için bir şey söylenemez. Dışı soğuk bir motorun kayıpları ve sargı sıcaklığı, dışı sıcak bir motorunkinden daha yüksek olabilir. Motor sıcaklığının ölçümünde termometre yöntemi kullanılacağı gibi, motor sargılarına ulaşmak zor olacağından dolayı yaygın olarak direnç artışı yöntemi kullanılmaktadır.

EN 60034 standardına uygun olarak gerçekleştirilen ısınma deneyinde direnç artış yöntemi kullanılmıştır. Direnç artış yöntemi, bakır olan sargı malzemesinin sıcaklık artışına bağlı olarak direncinin artması durumuna dayanır. EN 60034 standardına göre deney, motorun belirli bir mil gücü ile yüklenmesi ve belirli aralıklarda sargı direncinin ölçülmesi ile gerçekleştirilir. Başlangıçta motor iç sıcaklığının ortam sıcaklığı olarak kabul edilmesi ile deneye başlanır. Sargının direnç artış karakteristiği dikkate alınarak, ilk ve son direnç oranlarından sargıların ulaştığı ortalama sıcaklık değeri hesapla belirlenir [49].

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.3)$$

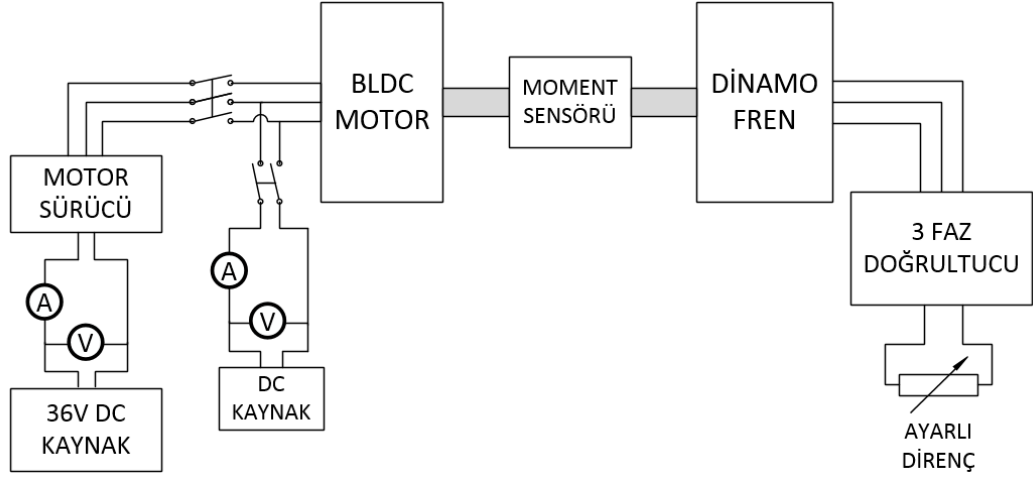
θ_1 : Soğuk durumdaki sargı sıcaklığı (°C)

θ_2 : Isınma deneyi sonundaki sargı sıcaklığı (°C)

R_1 : θ_1 sıcaklığındaki sargı direnci (Ω)

R_2 : Isınma deneyi sonucundaki sargı direnci (Ω)

k : 0 °C deki malzemenin sıcaklık katsayısı, aksi belirtilmedikçe, bakır için $k = 235$, alüminyum için $k = 225$



Şekil 3.15 : Motor yükleme deneyi bağlantı şeması.

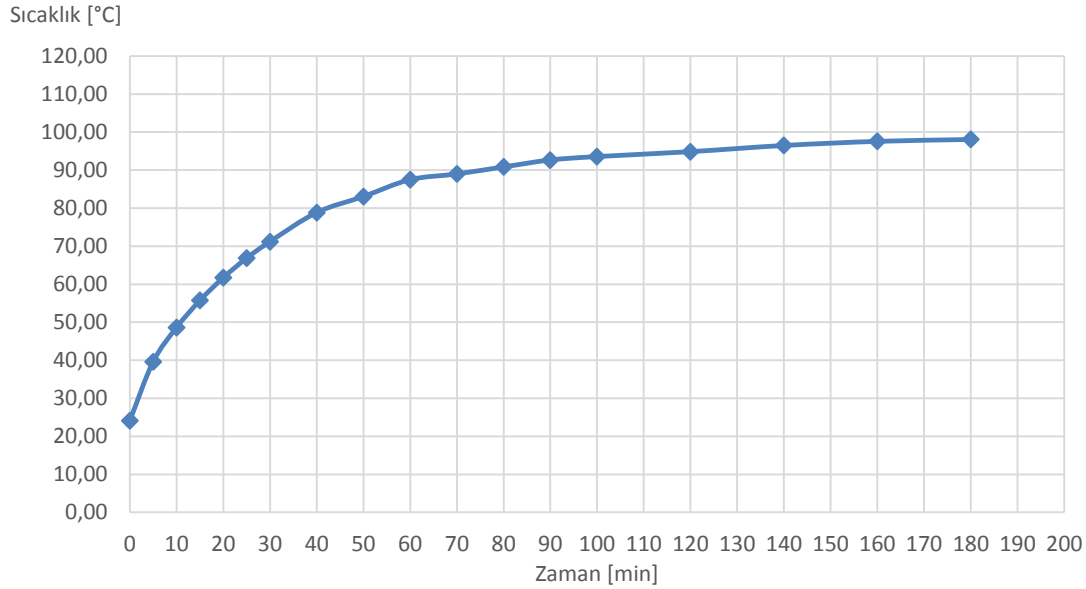
Motor ısınma deneyi, motorun tasarlandığı anma gücü olan 250 W mil gücü sabit tutularak ortalama 27.5 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Motoru yüklemek için kullanılan 500W gücündeki fırçasız doğru akım motoru generatör olarak çalıştırılmış, uçlarına ayarlı direnç bağlanmıştır. Motor mil devir hızı ve mil momenti, moment ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Sistem kararlı, yüksek güçlü ayarlı bir doğru gerilim kaynağı ile enerjilendirilmiştir.

Isınma deneyinin başlangıcında, 26.4 °C ortam koşulunda motor sargı direnci 0,58 Ω olarak ölçülmüştür. 250 W mil gücü sabit tutularak çalıştırılan motorun direnç ölçümleri ilk yarım saat boyunca 5' er dakika aralıklarla, ikinci yarım saatlik periyotta ise 10'ar dakika aralıklarla yapılmıştır. Son dört ölçüm 20'şer dakika aralıkla kaydedilmiştir. Bir saatte sıcaklık artışı 2 K değerini geçmeyecek şekilde ısıl denge durumu dikkate alınarak, deney üç saat boyunca yapılmıştır. Deney sonucunda motor

sıcaklığı yaklaşık 98 °C' ye ulaşmıştır. Deney sırasında alınan ölçümlere bağlı olarak motor ısınma eğrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 3.4 : Isınma deneyi ölçüm tablosu.

t [min]	Moment [Nm]	B. Akım [A]	Hız [min ⁻¹]	DC Akü [V]	DC Akü [A]	Ortam Sıcaklığı [°C]	İç Direnç [Ω]	Motor Sıcaklığı [°C]	Mil Gücü [W]	Giriş Gücü [W]	Verim [%]
0	0.00	0.40	276.0	2.261	3.898	24.4	0.580	26.4	0.00	14.40	0.000
5	12.20	8.70	201.0	2.470	4.018	26.6	0.615	39.62	256.79	313.20	0.820
10	12.18	8.73	200.5	2.660	4.190	26.6	0.635	48.60	255.73	314.28	0.814
15	12.10	8.69	200.7	2.730	4.195	26.1	0.651	55.72	254.30	312.84	0.813
20	12.15	8.75	199.8	2.690	4.050	25.8	0.664	61.71	254.21	315.00	0.807
25	12.15	8.70	200.1	2.671	3.953	25.8	0.676	66.85	254.59	313.20	0.813
30	12.25	8.70	200.0	2.760	4.052	25.8	0.681	71.20	256.56	313.20	0.819
40	12.20	8.80	200.4	2.526	3.618	26.0	0.698	78.86	256.02	316.80	0.808
50	12.22	8.78	200.6	2.717	3.840	26.3	0.708	83.07	256.70	316.08	0.812
60	12.20	8.70	201.1	2.713	3.777	26.4	0.718	87.50	256.91	313.20	0.820
70	12.28	8.76	200.8	2.768	3.840	26.7	0.721	89.00	258.21	315.36	0.819
80	12.15	8.70	200.4	2.778	3.832	27.0	0.725	90.85	254.97	313.20	0.814
90	12.20	8.68	200.0	2.821	3.863	27.6	0.729	92.67	255.51	312.48	0.818
100	12.23	8.75	200.5	2.710	3.710	28.0	0.731	93.57	256.78	315.00	0.815
120	12.20	8.70	201.2	2.672	3.641	28.6	0.734	94.86	257.04	313.20	0.821
140	12.26	8.74	201.0	2.725	3.695	29.0	0.737	96.48	258.05	314.64	0.820
160	12.25	8.69	200.3	2.728	3.687	29.3	0.740	97.57	256.94	312.84	0.821
180	12.20	8.72	200.8	2.779	3.750	29.5	0.741	98.06	256.53	313.92	0.817



Şekil 3.16 : Motor ısınma eğrisi.

3.3. Motorun Bisiklete Entegrasyonu

Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen motorun laboratuvar deneyleriyle uygunluğunun kontrolü sonrasında, motorun bisiklete entegrasyon aşamasına geçilmiştir. Öncelikle, tasarım hedefine uygun olarak motor 26" janta monte edilmiştir. Bu işlem için jant telleri kısaltılmış ve bir bisikletçi tarafından özel olarak takılmıştır. Bisiklet arka tekerleği, motor monte edilmiş tekerlek ile değiştirilerek gerekli elektriksel ve mekanik bağlantıları yapılmıştır. Böylece, bisikletin elektrikli bisiklete dönüşümü tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen sürüş denemelerinde, elektrikli bisikletin hedeflenen performansı sağladığı ve sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüştür.



Şekil 3.17 : Motorun bisiklete monte edilmesi.

4. SONUÇ

Fırçasız doğru akım motorunun tasarımında izlenen temel yaklaşım öncelikli olarak motor temel parametrelerinin belirlenmesi olmuştur. Motor gücü EN 15194 Avrupa standardına uygun olarak 250 W, anma hızı ise 25 km/h olarak seçilmiştir. Motorun değişen seyir durumlarındaki performansı, kurulan elektrikli bisiklet modeli ile belirlenmiştir. Değişen eğime ve yüke bağlı olarak moment ihtiyacı artan bu motorun düşük hız ve yüksek moment çalışmaya uygun olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu nedenle, tasarlanacak motor yüksek kutup sayılı olmalıdır. Dağıtılmış sargı ile imal edilen klasik fırçasız doğru akım motorlarında, oluk sayısı çok yüksek olacağından dolayı, kutup sayısının yüksek olması bakır hacmini ve işçiliğini, dolayısıyla maliyeti arttırıcı bir etmendir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, literatürde fırçasız doğru akım motorunun verimini arttırmak ve üretimini kolaylaştırmak amacıyla yeni bir yaklaşım olarak bulunan “kesirli oluk sargılı FDAM” kullanılmasına karar verilmiştir.

Kesirli oluk sargılı FDAM yapısına uygun çok sayıda oluk/kutup kombinasyonu bulunmaktadır. Yüksek performanslı motor kombinasyonlarının belirlenmesinde öncelikli olarak literatüre başvurulmuştur. Motorda dengesiz manyetik kuvvetler olmaması için oluk sayısı çift sayı olmalıdır. Seçilen motorların dış etkisi momenti ve moment dalgalılığının düşük olmasına, motorun simetrik olmasına, stator çeliği ve rotor mıknatısı arasındaki etkileşimden doğan net radyal kuvvetinin düşük olmasına dikkat edilmelidir. Düşük sargı faktörlü bazı kesirli oluk sargılı fırçasız doğru akım motorlarında ısınma, ek kayıp ve vibrasyona neden olan harmonikler bulunduğu için yüksek performanslı motorların sargı faktörü temel bileşeni yüksek değerli olmalıdır. Bu kriterlerden yola çıkılarak tasarımları yapılmak üzere uygun motor kombinasyonları belirlenmiştir.

Tasarımı yapılacak olan motorun boyutları, bisiklet üzerindeki fiziksel sınırlara bağlı olarak belirlenmiştir. Motor, bisikletin arka tekerlek göbeğine yerleştirileceğinden dolayı, motor aksel uzunluğu bisiklet çatal genişliğine bağlıdır. Diğer bir fiziksel sınırlama ise stator iç çapı üzerinde bulunmaktadır. Motor dış bağlantılarını minimum seviyede tutmak, iletim kayıplarını azaltmak ve bisiklet üzerindeki yer kısıtına çözüm getirmek amacıyla bu uygulamada motor sürücü devresi motor göbeğine

yerleştirilecektir. Bu nedenle stator iç çapı, kullanılacak sürücünün çapına ve göbek et kalınlığına bağılı olarak sınırlanmıştır.

Belirlenen boyutların, literatürde yer alan motor güç ve hacim ilişkisine uygunluğu tespit edilmiştir. Motor tasarımı için kullanılan yazılım ne kadar güvenilir olursa olsun, motorun temel boyut kıstaslarına uygunluğunun kontrol edilmesi gereklidir. Motor temel parametrelerinin ve malzemelerinin belirlenmesinin ardından literatüre göre uygun motor kombinasyonları için motor tasarım çalışmaları ve analitik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar, motor performansı üzerinde oluk/kutup oranının etkisini araştırmak amacıyla yapılmıştır.

Tasarımlarda akı yoğunlukları sabit tutulduğundan dolayı, kutup sayısı arttıkça sırt demiri, stator dişleri ve stator boyunduruğu incelmıştır. Yüksek kutup sayılı motorlarda, aynı momenti sağlamak için oluklarda daha az sargı kullanılmıştır. Kutup sayısındaki artışa bağılı olarak, bakır ve demir ağırlıkları azalmış, böylece kutup sayısının ağırlıkla ters orantılı olduğu görülmüştür. Sarım sayısındaki azalmaya bağılı olarak kutup sayısı arttıkça direnç ve endüktans değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Dirençteki azalmanın etkisiyle motorda daha baskın olan bakır kayıpları azalmış ve motor verimi artmıştır. Hafiflik, üretime uygunluk, verimlilik ve diş etkisi momentinin düşük olması kıstasları ön planda tutularak 36/34 oluk kutup oranlı çift kat sargılı motor tipi optimizasyon çalışmaları yapılmak üzere seçilmiştir.

36/34 motorun değişen uzunluklar ve oluk ağız yapıları için analitik ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece hem motor yapısının uygunluğunun artırılması hem de değişen parametrelerin motor üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan tasarımlarda, rotor çapının artmasıyla motor ağırlığının da arttığı görülmüştür. Motor aksenal uzunluğu düşürüldüğünde ise, iletken uzunluğu azaldığından dolayı direnç, k_e , k_t , moment ve ortalama akım değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Bu olumsuz etki sarım sayısının artırılmasıyla giderilmiştir. Motor aksenal uzunluğunun azaltılmasının, motor üzerinde hafifleme ve diş etkisi momentinin azalması gibi olumlu etkileri olduğu anlaşılmıştır. Dalga şekilleri karşılaştırıldığında, düşük endüktanslı motorlarda akım dalga şeklinin daha geç yükseldiği görülmüştür.

Diğer boyutlar sabit tutularak motor oluk ağız genişliği değiştirilmiş, bu parametrenin motor üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tasarım aşamasında, diş etkisi momentinin en düşük seviyede olduğu oluk ağız açıklığı araştırılmıştır. Oluk ağız genişliğinin dar ve

geniş olduğu iki noktada dış etkisi momentinin istenilen düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Analitik analiz çıktılarının incelenmesinin ardından, sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek motorların manyetik özellikleri ve moment-akım dalga şekilleri incelenmiştir. En dar oluk ağız genişliğine sahip olan motorun dışlarındaki doyma miktarının diğer motorlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Moment dalga şekilleri incelendiğinde ise, geniş oluk ağızlı yapıdaki dalgalılığın diğer motorlara kıyasla daha düşük seviyede olduğu belirlenmiştir.

36/34 tek kat sargılı motor için farklı boyutlarda yapılan tasarımların karşılaştırılması ve sonuçların değerlendirilmesiyle üretim için en uygun motor tasarımı seçilmiştir. Motorun 3D manyetik alan analiz çıktılarının ve özeğrilerinin literatüre ve hedeflenen motor parametrelerine uygun olduğunun belirlenmesinin ardından motor üretim aşamasına geçilmiştir. Motor mekanik bileşenlerin hafif, kolay üretilebilir ve dayanıklı olma özellikleri ön planda tutulmuştur.

Üretilen motorun laboratuvar deneylerinin yapılması amacıyla özel bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Yapılan deneyler ile üretilen motorun farklı çalışma koşullarındaki davranışının ve öngörülen tasarım değerlerine yakınlığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Motor performans deneyi ile motorun özeğrileri çıkarılmış, ısınma deneyi yapılarak da motorun ısınma eğrisi oluşturulmuştur. Alınan ölçümlerin ve çıkarılan eğrilerin tasarım çıktılarına belirli bir toleransla benzer ve literatüre uygun olduğu belirlenmiştir.

Üretilen motorun uygunluğunun kontrolü sonrasında, motor 26" janta monte edilmiş ve klasik bir bisikletin arka tekerleğine takılmıştır. Gerekli mekanik ve elektriksel bağlantıların yapılmasıyla elektrikli bisiklet dönüşümü tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen sürüş denemelerinde, elektrikli bisikletin hedeflenen performansı sağladığı ve sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Lenihan, J.** (2008). *Bilim İş Başında*, Tübitak Yayınları, Ankara.
- [2] **Buddy, A., Et al.** (2012). GoPedelec 2012:Go Pedelec Project consortium, ExtraEnergy e. V., Germany.
- [3] **Benjamin, E., ve Jamerson, F.** (2003). Electric Bikes Worldwide Reports, Alındığı tarih: 16.09.2013, adres: <http://www.ebwr.com/>
- [4] **Starschich, E., ve Muetze, A.** (2007). Comparison of the performances of different geared brushless-dc motor drives for electric bicycles, *IEEE International Conference on Electric Machines & Drives, I*, 140 – 147.
- [5] **Tuncay, R. N., Ustun, O., Yilmaz, M., Gokce, C., ve Karakaya, U.** (2011). Design and implementation of an electric drive system for in-wheel motor electric vehicle applications, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, 1-6, 6-9 Eylül.
- [6] **Wang, J., Atallah, K., Zhu, Z. Q., ve Home, D.** (2008). Modular three-phase permanent-magnet brushless machines for in-wheel applications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *57*, 5, Eylül 2008.
- [7] **Hendershot J. R., ve Miller, T. J. E.** (1994). *Design of Brushless Permanent Magnet Motors*, Magna Physics Publishing and Oxford University Press, USA.
- [8] **Bicycle.** (t.y.). *Wikipedia*, Alındığı tarih: 06.01.2014, adres: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle>.
- [9] **Wilson, D. G., Papadopoulos, J., ve Whitt, F. R.** (2004). *Bicycling Science*, Cambridge, MIT Press.
- [10] **Pierre Lallement.** (t.y.). *Wikipedia*, Alındığı tarih: 06.01.2014, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre_Lallement
- [11] **The Foundation Years.** (t.y.). *Ariel Motorcycle Club of North America*, Alındığı tarih: 06.01.2014, adres: http://www.arielnorthamerica.org/mot_hist1.htm
- [12] **Dunlop, J. B.** (1890). Bicycle, *United States Patent*, No: 441649 A, tarih: 06.09.1890.
- [13] **Motorized Bicycle.** (t.y.). *Wikipedia*, Alındığı tarih: 16.09.2013, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Motorized_bicycle
- [14] **Adams, W.** (1884). Electric motor, *United States Patent*, No: 300827, tarih: 24.06.1884.
- [15] **Parcelle, A. E.** (1890). Electromotor traction wheel, *United States Patent*, No: 433180, tarih: 29.07.1890.
- [16] **Parkhurst, E. B.** (1890). Dynamo-electric machine or electric motor, *United States Patent*, No: 422148; tarih:25.12.1890.

- [17] **Bolton, O. Jr.** (1895). Electric biycyle, *United States Patent*, No: 552271, tarih: 31.12.1895.
- [18] **Libbey, H. W.** (1897). Electric bicycle, *United States Patent*, No: 596272, tarih: 28.12.1897.
- [19] **Steffens, M. J.** (1898). Bicycle, *United States Patent*, No: 613732, tarih: 08.11.1898.
- [20] **Schnepf, J.** (1899). Automobile, *United States Patent*, No: 627066, tarih: 13.06.1899.
- [21] **Dubé, J. Y.** (2005). Method and apparatus for proportionally assisted propulsion, *United States Patent*, No: 6866111, tarih: 15.03.2005.
- [22] **URL-1** <<http://senseable.mit.edu/copenhagenwheel/>>, alındığı tarih: 09.04.2014.
- [23] **URL-2** <<http://ebike.bosch.com/tr/>>, alındığı tarih: 09.04.2014.
- [24] **URL-3** <<http://www.ebike.heinzmann.com/en/>>, alındığı tarih: 09.04.2014.
- [25] **URL-4** <<http://ridebionx.com/products/ebike/ebike-systems/sport/>>, alındığı tarih: 09.04.2014.
- [26] **Morchin, W. C., ve Oman, H.** (2006). *Electric Bicycles-A Guide to Design and Use*, Mass: IEEE Press Series on Electronics Technology.
- [27] **EN-15194** (2009) Cycles - Electrically power assisted cycles - EPAC Bicycles, *European Committee For Standardization*, Brussels.
- [28] **6495/13 Md. (2013)**. 2918 Sayılı TCK Karayolları Trafik Kanunu, Resmi Gazete, 28726, 2 Ağustos.
- [29] **Mueteze, A., ve Tan, Y. C.** (2007). Electric Bicycles – A Performance Evaluation, *Industry Applications Magazine, IEEE*, **13**, 4, 12-21, Temmuz-Ağustos.
- [30] **Lin, J., Schofield, N., ve Emadi, A.** (2013). External-rotor 6–10 switched reluctance motor for an electric bicycle, *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, Vienna, 2839 – 2844, 10-13 Kasım.
- [31] **Chlebosz, W., Ombach G., ve Junak, J.,** (2010). Comparison of Permanent Magnet Brushless Motor with Outer and Inner Rotor Used in E-Bike, *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 1 – 5, 6-8 Eylül.
- [32] **Lomonova, E. A., Vandenput, A. J. A., Rubacek, J., Herripon, B., ve Roovers, G.** (2002). Development of an Improved Electrically Assisted Bicycle, *Proceedings of 2002 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 384-389, Kasım.
- [33] **Adnan, A., ve Ishak, D.** (2009). Finite Element Modeling and Analysis of External Rotor Brushless DC Motor for Electric Bicycle, *Research and Development (SCORED), 2009 IEEE Student Conference on*, 376 – 379, 16-18 Kasım.
- [34] **Kerdsup, B., ve Fuengwarodsakul, N. H.** (2011). Dynamic Model of Brushless DC Drive Using FE Method Based Characteristics, *Power Electronics*

and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on, 66 - 71,5-8 Aralık.

- [35] **Ifedi, C. J., Mecrow, B. C., Widmer, J. D., Atkinson, G. J., Brockway, S. T. M., ve Kostic-Perovic, D.** (2012). A High Torque Density, Direct Drive In-Wheel Motor for Electric Vehicles, *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, 6th IET International Conference on, 1- 6, 27-29 Mart.
- [36] **Cros, J., ve Viarouge, P.** (2002). Synthesis of High-performance PM motors with Concentrated Windings, *IEEE Power Eng. Rev.*, **22**, 4, 74, Nisan.
- [37] **Senol S., and Ustun, O.** (2011). Design, Analysis and implementation of a subfractional slot concentrated winding BLDCM with unequal tooth widths, *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, 1807-1812, 7-10 Kasım.
- [38] **Zhu, Z. Q., Xia, Z. P., Wu, L. J., and Jewell, G. W.** (2009). Influence of slot and pole number combination on radial force and vibration modes in fractional slot pm brushless machines having single- and double-layer windings, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, 3443–3450, 20-24 Eylül.
- [39] **Larminie, J., ve Lowry, J.** (Authors) (2003). *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons Ltd.
- [40] **Kenjo, T., ve Nagamori, S.** (1985). *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*, Clarendon Press, Oxford.
- [41] **Hanselman, D. C.** (2003). *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, 2nd ed.:The Writers' Collective, Magna Physics Publishing, USA.
- [42] **Meier, F.** (2008). *Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications*, (doktora tezi), Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [43] **Salminen, P.** (2004). *Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications*, (doktora tezi), Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta.
- [44] **El-Refaie, A. M.** (2005). *High speed operaiton of permanent magnet machines*, (doktora tezi), University of Wisconsin, Madsion.
- [45] **Bianchi, N., ve Pré, M. D.** (2006). Use of the star of slots in designing fractional-slot single layer synchronous motors, *in IEE Proc. on Electric Power Applications*, **153**, 3, 459-466.
- [46] **URL-5** <<http://www.popscreen.com/p/MTA4OTg4MzE5/Circus-MonkeyRoad-Rear-Hub-24-Hole-224g-Shimano-Orange-eBay>>, alındığı tarih: 22.02.2014.
- [47] **N35 Datasheet.** (t.y.) *Arnold Magnetic Technologies*, Alındığı tarih: 22.02.2014, adres: http://www.arnoldmagnetics.com/Neodymium_Literature.aspx
- [48] **Boduroğlu, T.** (1986). *Elektrik Makinaları Dersleri (Teori, Hesap ve Konstrüksiyon) Cilt III*, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- [49] **Deney föyü.** (2011). İTÜ Elektrik Makinaları Laboratuvarı-1 Deneyleri, *İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi*, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gamze TANÇ
Doğum Tarihi ve Yeri: 1989, İstanbul
E-posta : gamzetanc@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Arslan Makina-İstanbul (Ekim 2012)

Elektrik Mühendisi

KOSGEB Ar-Ge İnovasyon Programı kapsamında başarı ile tamamlanmış “Elektrikli Bisiklet ve Elektrikli Bisiklet Kiti Geliştirme” isimli projede motor tasarımı konusunda Ar-Ge çalışmaları yürütülmüştür. Motor tasarımı ve seri üretime hazırlık çalışmaları sürdürülmektedir.