

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEVİRDAİM SİSTEMLERİ İÇİN
KÜÇÜK GÜÇLÜ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU
TASARIMI, ÜRETİMİ VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Celal ZEREN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEVİRDAİM SİSTEMLERİ İÇİN
KÜÇÜK GÜÇLÜ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU
TASARIMI, ÜRETİMİ VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Celal ZEREN
(504101007)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101007 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Celal ZEREN** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DEVİRİDAİM SİSTEMLERİ İÇİN KÜÇÜK GÜÇLÜ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI, ÜRETİMİ VE KONTROLÜ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

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

Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU
Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2015**

Eşime ve oğluma,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması devridaim sistemlerinde kullanılan pompanın elektrik motoru yüksek verim değerinde tasarlanmış, tasarlanan motorun üretimi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın özellikle fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve üretimi ile ilgilenenlere yardımcı olacağını umarım.

Çalışmanın her anında bana desteğini esirgemeyen ve bu çalışmada bakış açımı değiştirerek projeye geniş açıdan bakmamı sağlayan ve çalışmanın tamamlanmasında en fazla katkısı olan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca fırçasız doğru akım motoru tasarımı için yazılım desteğini sağlayan ve her türlü sorumu içtenlikle yanıtlayan, motor tasarımı, üretimde ve kontrolünde her türlü desteğini esirgemeyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Metin Aydın'a teşekkür ederim.

Yüksek lisansın gerek ders döneminde gerek tez döneminde bana destek olan Alarko-Carrier firmasındaki yöneticilerime ve iş arkadaşlarıma, motor üretimi ve testleri için her türlü desteği sağlayan sevgili arkadaşım Oğuzhan Ocak'a, Akım Metal firmasına, yardımları için Arçelik firmasına, yoğunluğuna rağmen desteğini esirgemeyen arkadaşım Mehmet Onur Gülbahçe'ye ve sonsuz desteği ve yardımı için sevgili dostum ve meslektaşım Alper İlerler'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni sürekli destekleyen annem Sebahat Zeren'e babam Hasan Zeren'e, her zaman beni kendi oğulları gibi gören Mehmet Taşçı ve Emine Taşçı'ya sabrı, yardımı ve cesaretlendirdiği için sevgili eşim Nalan Taşçı Zeren'e ve biricik oğlum Uras Zeren'e sonsuz teşekkür ederim.

Nisan 2015

Celal Zeren
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
2. DEVİRDAİM SİSTEMLERİ VE BİLEŞENLERİ	3
2.1 Pompalar.....	3
2.1.1 Pompaların sınıflandırılması	4
2.1.2 Enerji verim endeksi (EEI)	5
2.1.3 Yasal zorunluluklar	8
2.2 Elektrik Makinaları	8
2.2.1 Asenkron makinalar	10
2.2.2 Fırçasız doğru akım motoru	11
2.2.3 Fırçasız doğru akım motoru tasarımı	12
2.2.4 Fırçasız doğru akım motoru kullanım alanları	13
2.2.5 Fırçasız doğru akım motor kontrolü.....	14
3. TASARLANAN SİSTEM.....	15
3.1 Pompanın Analizi	15
3.1.1 Pompanın değişik devirlerdeki CFD analiz sonuçları.....	15
3.1.2 Pompanın enerji verimlilik endeksi (EEI) değerinin hesaplanması.....	19
3.2 Elektrik Motor Tasarım Girdileri	20
3.2.1 Motor sürücü bilgileri	20
3.2.2 SPEED yazılımı	21
3.2.3 Motor sac ve mıknatıs malzeme bilgileri.....	23
3.2.4 FDAM tasarım çalışmaları.....	24
3.2.5 FDAM tasarımında SPEED değişken parametrelerin ayarlanması	25
3.3 FDAM Motorlarının SPEED Programı Yardımıyla Tasarımları	27
3.3.1 4 kutuplu 12 oluklu tasarım	27
3.3.2 6 kutuplu 18 oluklu tasarım	31
3.3.3 6 kutuplu 9 oluklu tasarım	35
3.3.4 İmal edilecek olan motorun tasarım iyileştirilmesi.....	39
3.4 Tasarlanan Motorun İmalatı	44
3.4.1 Motor üretiminde uygulanan yöntemler	44
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
4.1 Vuruntu Momenti	49
4.1.1 Tasarım yapılan motorda vuruntu momentini düşürme çalışmaları	50
4.2 Zıt-EMK	50

4.3 Üretim Yapılan Firma Tarafından Yapılan Deneysel Çalışmalar	51
4.3.1 Vuruntu momentinin deney sonucundaki değeri	51
4.3.2 Zıt-EMK ölçümleri.....	51
4.4 İTÜ Elektrik Makinaları Laboratuvarı'nda Yapılan Deneysel Çalışmalar	52
4.4.1 Motor deney düzeneğinin oluşturması	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

A	: Amper
AA/AC	: Alternatif Akım
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Bilgisayarlı Akışkanlar Dinamiği)
DA/DC	: Doğru Akım
EAM	: Eksenel Akıllı Motorlar
EEI	: Enerji Verim Endeksi
EMK	: Elektro Motor Kuvvet
eRPM	: Elektriksel Devir
Europump	: Avrupa Pompacılar Birliği
FDAM	: Fırçasız Doğru Akım Motoru
FEA/SEA	: Finite Element Analysis/ Sonlu Elemanlar Analizi
Flux-FEA	: Flux Sonlu Elemanlar Analizi Yazılımı
H	: Basma Yüksekliği
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
k	: Kilo
MMK	: Magneto Motor Kuvvet
Motor-CAD	: Motor Isıl Analiz Yazılımı
PC-FEA	: SPEED Sonlu Elemanlar Analiz Modülü
Ph	: Hidrolik Güç
Pi	: Pompa Giriş Gücü
Ps	: Motor Gücü
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
Q	: Debi
RAM	: Radyal Akıllı Motorlar
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SM	: Sürekli Mıknatıslı
SMFDAM	: Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina
SPEED	: Scottish Power Electronics and Electric Drives
Th	: Hidrolik Moment
Tm	: Motor Momenti
V	: Gerilim
ΔP	: Basınç Farkı
ηh	: Hidrolik Verim
ηm	: Motor Verimi
ηp	: Pompa Verimi
ηv	: Hacimsel Verim

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : P_L hesabı için çalışma debilerinin ömür yüzdesi	7
Çizelge 2.2 : 2005'te yayınlanan EEI sınıflandırma.....	8
Çizelge 2.3 : Fırçalı ve fırçasız DA motoru karşılaştırması	14
Çizelge 3.1 : 3800 devir CFD sonuçları	16
Çizelge 3.2 : 3200 devir CFD sonuçları	16
Çizelge 3.2 : 2600 devir CFD sonuçları	16
Çizelge 3.4 : 2000 devir CFD sonuçları	16
Çizelge 3.5 : 1700 devir CFD sonuçları	17
Çizelge 3.6 : 1400 devir CFD sonuçları	17
Çizelge 3.7 : 800 devir CFD sonuçları	17
Çizelge 3.8 : Değişik devirlerde CFD sonucu pompa karakteristiği	18
Çizelge 3.9 : EEI verim indeksi için belirlenen devirler	19
Çizelge 3.10 : Tasarlanan motor için EEI hesabı	19
Çizelge 3.11 : Mevcut motor için EEI hesabı.....	20
Çizelge 3.12 : Tasarlanan motor ve sistemin özellikleri (g:yerçekimi ivmesi=9,81 m/sn ²).....	25
Çizelge 3.13 :Tasarlanan motorların karşılaştırılması	38
Çizelge 3.14 : İyileştirilmiş hal ve ilk tasarım karşılaştırması	44
Çizelge 4.1 : Vuruntu momenti ölçümleri	51
Çizelge 4.2 : 500 devir/dak Zıt-EMK ölçümleri.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Pompa sınıflandırması.....	4
Şekil 2.2 : Sentrifüj pompa yapısı.....	4
Şekil 2.3 : Statik deşarj yüksekliğinin, statik emiş ve toplam yüksekliğinin temsili...	5
Şekil 2.4 : Q ve H referans kontrol eğrisi.	6
Şekil 2.5 : Elektrik motorlarının sınıflandırılması.	9
Şekil 2.6 : Radyal akıli motor yapısı.	10
Şekil 2.7 : Eksenel akıli motor yapıları.	10
Şekil 2.8 : Mıknatıslı motor yapıları.....	11
Şekil 3.1 : Kelly KSL96150 sürücü devre şeması.	21
Şekil 3.2 : SPEED programı arayüzü.	22
Şekil 3.3 : Sac malzeme M270-35A B-H eğrisi.	24
Şekil 3.4 : Mıknatıs malzeme karakteristik özellikleri.	24
Şekil 3.5 : Hava aralığı değişiminin incelenmesi.	26
Şekil 3.6 : Mıknatıs kalınlığı değişiminin incelenmesi.	26
Şekil 3.7 : Sarım sayısının değişiminin incelenmesi.	26
Şekil 3.8 : Akım değişiminin incelenmesi.	26
Şekil 3.9 : 4 kutuplu 12 oluklu motor geometrisi.	27
Şekil 3.10 : 4 kutuplu 12 oluklu sargı yapısı.	27
Şekil 3.11 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun moment, güç ve hız arasındaki bağıntı. ...	28
Şekil 3.12 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun moment, verim ve hız arasındaki bağıntı.	28
Şekil 3.13 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun rotor konumuna göre akım, EMF ve moment değişimleri.	29
Şekil 3.14 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun SPEED-SEA modülü ile hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı.	29
Şekil 3.15 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun vuru momentinin oluk adımına göre değişimi (farklı hesaplama yöntemleriyle).....	30
Şekil 3.16 : SEA ağ yapısı.	30
Şekil 3.17 : Akı dağılımı.....	30
Şekil 3.18 : 6 kutuplu 18 oluklu motor geometrisi.	31
Şekil 3.19 : 6 kutuplu 18 oluklu motor sargı şeması.	31
Şekil 3.20 : 6 kutuplu 18 oluklu motor moment, güç, hız arasındaki bağıntı.....	32
Şekil 3.21 : 6 kutuplu 18 oluklu motor moment, verim, hız arasındaki bağıntı.	32
Şekil 3.22 : 6 kutuplu 18 oluklu motor rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri.	33
Şekil 3.23 : 6 kutuplu 18 oluklu motor hava aralığı akı yoğunluğunun dağılımı.	33
Şekil 3.24 : 6 kutuplu 18 oluklu motor oluk adımındaki vuru moment.	33
Şekil 3.25 : 6 kutuplu 18 oluklu motor SEA ağ yapısı.	34
Şekil 3.26 : 6 kutuplu 18 oluklu motor akı dağılımı.....	34
Şekil 3.27 : 6 kutuplu 9 oluklu motor geometrisi.	35
Şekil 3.28 : 6 kutuplu 9 oluklu motor sargı yapısı.....	35
Şekil 3.29 : 6 kutuplu 9 oluklu motor moment, güç, hız bağıntısı.	36

Şekil 3.30 : 6 kutuplu 9 oluklu motor moment, verim, hız bağıntısı.	36
Şekil 3.31 : 6 kutuplu 9 oluklu motor rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri.	36
Şekil 3.32 : 6 kutuplu 9 oluklu motor hava aralığı akı yoğunluğunun dağılımı.	37
Şekil 3.33 : 6 kutuplu 9 oluklu motor vuruğu momenti.	37
Şekil 3.34 : 6 kutuplu 9 oluklu motor SEA ağ yapısı.	37
Şekil 3.35 : 6 kutuplu 9 oluklu motor akı dağılımı.	38
Şekil 3.36 : İyileştirilmiş motor geometrisi.	39
Şekil 3.37 : İyileştirilmiş motor sargı yapısı.	40
Şekil 3.38 : İyileştirilmiş motor rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri.	40
Şekil 3.39 : İyileştirilmiş motor moment hız eğrisi.	41
Şekil 3.40 : İyileştirilmiş motor güç hız eğrisi.	41
Şekil 3.41 : İyileştirilmiş motor veim hız eğrisi.	42
Şekil 3.42 : İyileştirilmiş motor bir oluk adımıdaki vuruğu momenti.	42
Şekil 3.43 : İyileştirilmiş motor SEA ağ yapısı.	43
Şekil 3.44 : İyileştirilmiş motor hava aralığı akı dağılımı.	43
Şekil 3.45 : Stator ve rotor laminasyon sacı fiber lazer kesim sonrası (1).	45
Şekil 3.46 : Stator ve rotor laminasyon sacı fiber lazer kesim sonrası (2).	45
Şekil 3.47 : Oluşturulmuş stator paketi.	45
Şekil 3.48 : Oluşturulmuş rotor paketi ve mil.	46
Şekil 3.49 : Rotor paketine mıknatısların yapıştırılması.	46
Şekil 3.50 : Stator sargı yapısı.	47
Şekil 3.51 : Motor kapakları.	47
Şekil 3.52 : Tamamlanmış motor (1).	48
Şekil 3.53 : Tamamlanmış motor (2).	48
Şekil 4.1 : Ototrafo.	53
Şekil 4.2 : Doğrultucu devre.	53
Şekil 4.3 : Motorun sisteme monte edilmesi.	53
Şekil 4.4 : Sürücünün motora monte edilmesi.	54

DEVİRDAİM SİSTEMLERİ İÇİN KÜÇÜK GÜÇLÜ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI İMALATI VE KONTROLÜ

ÖZET

Son yıllarda gerek Avrupa Birliği'nde, gerekse ülkemizde enerji verimliliği son derece önem kazanmıştır. Enerji verimliliğinin önem kazanmasıyla enerji tüketen tüm ev aletleri veya endüstriyel ürünlerde araştırma, geliştirme ve tasarım çalışmaları artmıştır. Enerji verimli ürünler gerek Avrupa'da, gerekse ülkemizde desteklenmekte ve yasal zorunluluklarla son kullanıcıların bu ürünlere yönlendirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede pazarda belli bir yer edinmek isteyen firmalar ürünlerini geliştirme veya iyileştirme, dolayısıyla teknolojilerini ilerletme fırsatı bulmuşlardır.

Devirdaim sistemlerinde ülkemizde ve Avrupa'da kabul edilen enerji verim endeksi hesaplaması detaylı şekilde incelenmiştir. Enerji verim endeksi hesaplamasının yapılabilmesi için dört farklı basma yüksekliği ve debi değerinin belirlenmesi gerektiği ortaya konulmuştur. Bu dört farklı çalışma noktasındaki pompanın referans güç değerinin hesaplanması açıklanmıştır. Aynı zamanda yasal zorunlulukların tarihçesi ortaya konulmuş ve gelecekte doğacak olan zorunluluklar açıklanmıştır.

Bu çalışma kapsamında enerji verimliliğinin önemi devridaim sistemleri üzerinde incelenmiştir. Devridaim sistemlerinde bulunan pompa sistemi ile ilgili literatür çalışması yapılmış ve pompalar hakkında detaylı bilgiler edinilmiştir. Devridaim sistemleri için basma yüksekliği ve debi gibi terimler açıklanmıştır. Buna ilaveten elektrik motorları genel olarak incelenmiştir. Devridaim sistemlerinde kullanılan elektrik motorlarının daha verimli hale getirmek için fırçasız doğru akım motoru kullanımı incelenmiş ve bu tipte bir motorun tasarlanmasına karar verilmiştir. FDAM motorlarının yapıları detaylı şekilde incelenmiştir. FDAM motorlarının avantajları ve dezavantajları karşılaştırılarak ortaya konulmuştur. Daha önce belirlenen pompa karakteristiğine uygun olacak şekilde motor plaka değerleri belirlenmiş ve buna yönelik olarak FDAM tasarımı yapılmıştır.

Sistemin tasarımı için pompa CFD yazılımı ile analiz edilmiş ve pompanın farklı devirlerde pompa verimi, basma yüksekliği, debi vb. parametreleri ortaya konulmuştur. Bu parametrelerden en yüksek basma yüksekliği ve debi değeri ve enerji verim endeksinin hesaplanması için diğer çalışma noktalarının değerleri belirlenmiştir. Dolayısıyla sistemin en verimli çalışma noktaları pompa için ortaya konulmuştur. Mevcut sistem EEI değeri ile tasarlanan sistemin EEI değeri karşılaştırılmış ve sistemin iyileştirilmesi ortaya konulmuştur.

FDAM motor tasarımı son derece güvenilir SPEED programı ile yapılmıştır. SPEED Türkiye yetkili firmasından yazılımın bir aylık deneme sürümü temin edilmiştir. Programa girdi oluşturan sac malzeme ve mıknatıs özellikleri programda tanımlanmıştır ve farklı malzemelerle oluşan değişiklikler değerlendirilmiştir. Malzeme seçimlerinde motorun sınır değerlerine ve piyasada ulaşılabilirlik özelliklerine önem gösterilmiştir.

Tasarım aşamasında, pompadan CFD analizi ile elde edilen ve EEI değerini etkileyen dört farklı çalışma noktası için motorun olması gereken mil gücüne göre, devir sayısı ve moment değeri dikkate alınmış ve FDAM parametreleri ortaya konulmuştur. Tasarım programında daha sonra değişik parametreler ele alınarak ve değişkenlik uygulanarak performans etkileri çok hızlı bir şekilde analiz edilmiştir ve tasarım programının el verdiği şekilde sonlu elemanlar analizi de gerçekleştirilerek akı yoğunlukları, vuruğu momenti gibi özellikle mıknatıslı motorlarda çok önemli olan özellikler önceden tahmin edilmiş olup iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Farklı oluk ve kutup sayılarında üç farklı tasarım yapılmıştır. Bu tasarımlar karşılaştırma yapılarak en uygun tasarım üretmek üzere seçilmiştir.

FDAM tasarımında üç farklı kutup-oluk sayılarına göre tasarımlar gerçekleştirilmiş ve detaylı kıyaslama yapılarak 4 kutuplu 12 oluklu motorun üretiminin yapılmasına karar verilmiştir. Vuruğu momentinin diğer tasarımlara göre daha az olması ve veriminin de bir miktar fazla olması nedenleriyle 4 kutuplu 12 oluklu tasarım seçilmiştir.

Üretici firma araştırılmış ve belirlenen üreticiye tasarım bilgileri iletilmiştir. Motor üreticisi firma, gövde maliyetinin daha uygun olması açısından motor dış çapı ile ilgili bir geri dönüş yapıp tasarımda değişiklik yapılmasını talep etmiştir. Bu talep sonucunda tasarlanmış olan FDAM tasarımının stator dış çapı değiştirilmiş ve motor tekrar pompaya uygun hale getirilmiştir. Bu geri dönüş ile stator çapı düşürülmüş, paket boyu arttırılmış ve tasarım iyileştirilmesi yapılarak vuruğu momenti düşürülmüştür.

Tasarlanan FDAM, modern üretim teknikleri kullanılarak üretimi sağlanmıştır. Manyetik geçirgenliği yüksek olan çelik malzeme yüksek hızda, özellikle motor prototip üretimi yapan firmalarda bulunan lazer kesim makinasıyla kesilmiş, bu sayede malzemeye ısı işleminden dolayı zarar gelmesi engellenmiştir. Bunun yanında nadir toprak elementi olan mıknatıs malzemesi istediğimiz ebatlarda ve kalitede yurt dışında mıknatıslandırdıktan sonra motor üretimini gerçekleştiren firmaya gönderilmiştir. Mıknatıslar özel bir yapıştırıcı malzeme ile rotor yüzeyine yapıştırılmıştır. Stator ve rotor paketi de lazer kaynak yöntemiyle bir araya getirilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda tasarımcıların üreticilerle birlikte çalışıp sınır değerleri belirlemesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Tasarlanan motoru kontrol edebilmek amacı ile sürücü tipleri araştırılmıştır. Genel olarak kullanılan asenkron motorların aksine, fırçasız doğru akım motorlarının su içinde çalıştırılması Hall etkisi algılayıcısının yerleşiminin zorluğu, motoru ıslak ortamdan yalıtmanın asenkron motorlara nazaran çok daha zor olması, buna yönelik uygulanabilecek çözümlerin maliyetlerinin çok yüksek olması sebeplerinden dolayı algılayıcısız kontrol yöntemi tercih edilmiş ve buna yönelik olarak bir sürücü temin edilmiştir.

Belirlenen sürücü tipinin çıkış değerlerine ve benzetim ortamında elde edilen pompanın hız ve moment değerlerine göre bilgisayar ortamında SPEED yazılımı kullanılarak fırçasız doğru akım motoru tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç kısmında belirtilen verim endeksi standart değerlere sahip bir asenkron motor ve tasarlanan sistem için ayrı ayrı hesaplanmış ve tasarlanan yeni sistemin verim indeksinin iyileştirildiği ortaya konulmuştur.

Üretilen motorun üretiminden sonra performansını değerlendirmek için deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve gerçek performans ile tasarım çıktıları arasındaki farklar

ölçülmüştür. Uygulamalı çalışmalar motor üreticisinin tesislerinde ve İTÜ Elektrik Makinaları Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Üretici firma laboratuvarında vuruğu momenti, zıt emk büyüklükleri ölçülmüştür. Tasarım programında sonlu elemanlar analizi yapılan vuruğu momenti ile ölçülen arasında fark olduğu görülmüştür. Ancak Zıt-EMK büyüklükleri tasarım programında benzer olduğu tespit edilmiştir.

İTÜ Elektrik Makinaları Laboratuvarı'nda deney düzeneği oluşturulmuştur. Bunun için üretilen motor, yükleme yapılabilmesi için laboratuvarında bulunan bir motora akupile edilmiş ve tedarik edilen sürücü ile bağlantısı yapılmıştır. Motor sürücüsünün besleme gerilimi için DA kaynağı ototrafo üzerinden bir doğrultucu devre tarafından sağlanmıştır. Sistemin fonksiyonel çalışmaları adım adım kontrol edilmiştir. İlk önce DA kaynağından gerekli gerilim ölçülmüş ve ayarlanmış. Motor sürücü parametreleri, sürücü ile yazılımı arasındaki iletişim sağlanıp kaydedilmiş ve son olarak sisteme enerji boşta çalışmak üzere verilmiştir. Sistemin boşta çalıştığı gözlemlenmiştir.

Çalışmalar için İTÜ Bilimsel Araştırma Projeler Biriminden proje desteği kullanılmıştır. Bu destek ile motor üretimi gerçekleştirilmiş ve sürücü tedarik edilmiştir.

Bu çalışma ile Avrupa Birliğinin ve Türkiye'nin yasal zorunluluklarla belirlediği enerji verim endeksine uygun, yüksek verimli devridaim sistemi, mıknatıslı motor kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. Karakteristiği bilgisayar ortamında elde edilen pompaya uygun bir fırçasız doğru akım motoru kullanılarak sistem tasarlanmıştır. Böylelikle enerji verimliliği açısından ülke ekonomisine ve enerji kaynaklarının verimli kullanılmasına katkıda bulunabilecek bir sistem gerçekleştirilmiştir.

DESIGNING MANUFACTURING AND CONTROLLING BRUSHLESS DC MOTOR FOR CIRCULATION SYSTEMS WHICH HAS LOW POWER

SUMMARY

In the recent years energy efficiency topic has gained importance both in European Union and Turkey. This trend led home appliances and industrial product producers to various research, design and development activities in this field. Energy efficient products are supported by the governments and by legal obligations consumers are being canalized to those energy efficient products. Thanks to this, the companies that tries to establish a market presence should develop their products and improve their technology in terms of energy efficiency.

Energy efficiency index, which has been accepted by European Union and Turkey, was studied detailly on circulation systems. Four operation levels of a pump which has different head and flowth are determined in order to calculate energy efficiency index on circulation pumps. The calculation of referance power for the four levels of a pump is explained in the standards. In the mean time, legal obligations are given and new legal obligation which will be announced for upcoming years is explained.

In this study,the importance of energy efficiency index was examined, literature search was done about pumps which are a part of those circulation systems and detaied information was given, the meanings of head and flow in circulation systems was explained and a combined drive system design for a circulation pump driven by a burshless DC motor is performed.

Literature review also done for electrical motors in detail and brushless DC type electrical motor was decided to be designed in order to make the circulation system more efficient. The structure, operartional principles and control strategies of the BLDC electrical motors were examined detailly. The advantages and disadvantages of BLDC type electrical motors was given in comparative results. At the same time, the pump was analyzed by a computer software and calculated performance rates were given for different rpm values. Energy Efficiency Curve is obtained by combining the mechanical numerical simulation results and a BLDC motor was designed according to the pump characteristics which was analysed by a obtained calculation results.

The pump was analysed with CFD software to construct the whole circulation system, then the parameters like pump efficiency, head, flow etc. was determined for different angular velocities. These parameters refer to the maximum head and maximum flow of the pump. After deciding the maximum head and flow, the needed points were obtained for EEI calculation. Therefore, the most efficienct points of pump was derived. Energy efficiency index calculation for circulation systems which is accepted by standards in European Union and Turkey was evaluated and efficiency index according to existing system was calculated. This calculation was also done for the designed system and difference between the two was emphasized.

Brushless DC motor design was performed by using a highly reliable design software. The software was supplied from the distributor company. Motor design

software was used to design the targetted motor in accordance with the desired moment and rpm values. Special drives for brushless DC motors were checked and sensorless drive was selected since the system is to be operated as wet-rotor and sensors can cause problems during wet applications. Selected drive parameters, magnetical properties of the materials were also recorded as inputs for the complete design. Raw material is selected according to threshold limits of the motor and availability in the market. Also different available materials were analyzed and final design is obtained in comparison.

At the beginning of the BLDC design, attention was paid to pump's CFD analysis and decided operation points regarding to EEI calculation. Later on, required shaft power, rpm and torque was used for the new designed BLDC motor. Different parameters were studied and difference was applied on the software to rapidly analyze performance influence. Finite element analysis completed in the software in order to foresee the highly importance properties like flux density, cogging torque, etc. The design is improved according to the calculations. Three designs were performed with different slot and pole numbers and were compared to obtain the most convenient design. After comparison, the design having 12 slots and 4 poles was chosen depending on its low cogging torque value and high efficiency.

After optimisation, the design is produced by a domestic company with the obtained BLDC motor parameters. Depending on the feedback of the company, several design parameters like outer diameter of the stator was changed in order to match with the production limits of the company to reduce production time and cost of the motor. Renewed BLDC motor was produced with an decreased slot diameter and cogging torque, an increased lamination stack.

Designed brushless DC motor was produced by using modern production techniques. A high speed laser cutting machine which is mainly available in motor prototyping companies is used to cut the high magnetic permeability steel in order to reduce the unwanted effects of heat on steel while cutting. Magnets were made of rare earth elements was dimensioned and magnetized abroad and was sent to the producer company. Magnets were stuck on the rotor by applying a special glue. Stator and rotor stacks were produced by laser welding.

Different types of BLDC drivers was analyzed to control the designed motor. Using Hall-effect sensors is difficult to use on BLDC motors, since circulation pump motors have a wet rotor structure that means the rotor of electrical motor operates in the water completely causing problems in insulation. Since applying Hall-effect sensors is too difficult and too expensive, sensorless control was chosen to be the most convenient method for driving electrical motors in the circulation system. In this study, a sensorless driver was chosen and supplied from the driver company.

Finally, the system designed for the pump parameters was analyzed with CFD software, required driver and the motor was designed in SPEED software. All the parameters of driver, pump and motor were influenced the whole system design.

In order to see the benefits of the usage of a BLDC motor, EEI value was re-calculated for a needed induction motor and newly designed BLDC motor. It was seen that newly designed system has a highly greater EEI in comparison with that of an induction motor.

After producing the prototype motor, practical tests were performed in production facilities and ITU Electrical Machinery Laboratory to verify the results. Differences

between the actual performance and software outputs for cogging torque and back-emf values was measured. It is realized that the actual cogging torque is greater than the calculated one. Back-emf values for the phase windings are seemed to be as expected.

The test bench was constructed in ITU Electrical Machinery Laboratory. For this construction the BLDC motor was coupled with a Eddy current brake as a load and connected with the driver. The rectifier over a variable transformer generated DC supply. Driver circuit is connected to the DC supply and a computer. The motor parameters were set on the driver software and stored into the driver. Motor is operated at no load without a problem.

This project is supported by ITU Scientific Research Projects department. With this project both in European Union and Turkey circulation system ensure that compliance with legal requirements of EEI. A high efficient circulation system driven by permanent magnet electrical motor was designed. Outputs of the computational fluid dynamics analysis of a chosen pump was used to design a BLDC motor. After designing the BLDC motor, prototype was produced and tested. A new circulation system having a great contribution in efficiency for Turkey is designed.

1. GİRİŞ

Son yıllarda gerek Avrupa birliğinde gerek ülkemizde enerji verimliliği son derece önem kazanmıştır. Enerji verimliliğinin önem kazanmasıyla enerji verimli ürünler desteklenmekte ve yasal zorunluluklarla son kullanıcıların bu ürünlere yönlendirilmesi sağlanmaktadır.

Projemizde enerji verimliliğinin önemi devridaim sistemleri üzerinde incelenmiştir. Devridaim sistemlerinde bulunan pompa, elektrik motoru ve sürücü detaylı incelenmiş ve enerjiyi tüketen elektrik motoru üzerinde durulmuştur. Devridaim sistemlerinde genellikle sanayimizde de büyük çoğunlukta bulunan asenkron elektrik motorları kullanılmaktadır. Bu sistemlerin güç aralığı ise kullanıcı ihtiyacına göre değişiklik gösterse dahi 50-60 watt (kombi sistemlerindeki kullanılan motorlar) güçten 2-2.5 kW güçlere (yüksek katlı binalarda kullanılan) kadar çıkabilmektedir.

Bu projede yüksek katlı binalar için kullanılan devridaim sistemindeki pompa seçilmiş ve CFD (Computational Fluid Dynamics) yazılımı ile analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda pompayı tahrik eden asenkron motorun sahip olduğu güce göre veriminin %60 civarlarında olduğu ve ihtiyaç duyulan devrin değişmesiyle bu değerlerin daha da düşük seviyelere geldiği bilinmektedir. Asenkron motor yerine FDAM tasarımı yapılmış ve bu tasarımdaki verim değerinin yüksek değerlere çıkması dolayısıyla sistemin veriminin de artırılması hedeflenmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışma ile devridaim sistemlerinde kullanılan asenkron elektrik motorunun yerine, FDAM kullanılmasıyla toplam sistem veriminde iyileşme sağlanması hedeflenmiştir. Kullanılacak olan FDAM, SPEED (Scottish Power Electronics and Electric Drives) motor tasarım yazılımı ile tasarlanması, SPEED SEA modülüyle sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilmesi, tasarlanan motorun üretiminin gerçekleştirilmesi, sürücü devresi ile sürülmesi ve tasarım parametreleri ile gerçek durumun karşılaştırılmasının yapılması amaçlanmıştır.

Devridaim sistemi iyileştirilmesiyle bu tip sistemler için enerji tüketim miktarının yüksek verimli bir elektrik motoru kullanımıyla asgari seviyelere indirilmesi ve çevreye duyarlı bir sistem oluşturulması amaçlanmıştır.

2. DEVRİDAİM SİSTEMLERİ VE BİLEŞENLERİ

Devridaim sistemleri kapalı bir çevrimde sıvıyı, gazı veya atıkları devridaim eden özel sistemlerdir. Bu sistem ile devridaim yapılmasını istenen sıvı gaz veya atık düşük potansiyel enerjiden yüksek bir potansiyel enerjiye taşınmış olur [1].

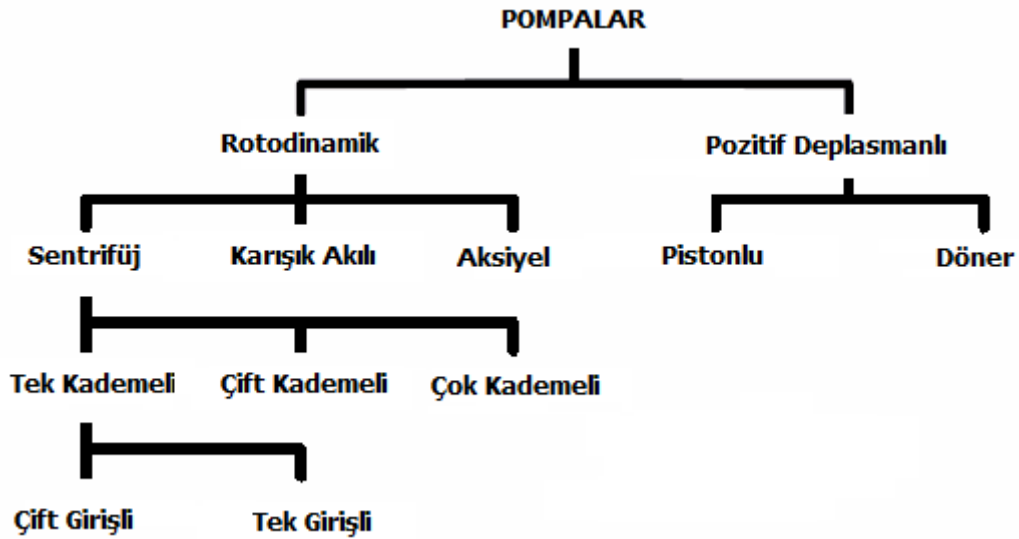
Devridaim sistemleri pompa, elektrik motoru ve mevcut ise elektrik motor sürücü elemanlarından oluşur.

2.1 Pompalar

Pompalar genel olarak iki ana kısımda toplanmıştır. Bunlar pozitif kaydırımlı pompalar ve dinamik (sentrifüj-merkezden uzaklaşan) pompalardır. Pozitif kaydırımlı pompalar sıvının akması için akışkan bölmesinin boyutunu (veya taşınmasını) mekanik araçlar kullanarak değiştirirler. Diğer taraftan, dinamik (sentrifüj) pompalar sıvının içinde gömülmüş çarklarla sıvıya moment uygularlar. Bu moment pompa çıkışındaki basınçta veya akışta bir artışa neden olur. Pozitif kaydırımlı pompalar sabit moment karakteristiğine sahiptir oysa sentrifüj pompaları değişken moment karakteristiği gösterirler. Sentrifüj pompası çarkın dış kasnağındaki sıvıyı ivmelendirerek sürücü enerjisini hareket enerjisine dönüştürüler. Çarkın kesitinde veya kanatçığındaki hız sıvıya verilen enerjiye tekabül eder. Çark ne kadar hızlı dönerse veya ne kadar büyük olursa, kanat ucundaki hız daha yüksek olur ve daha fazla enerji sıvıya kazandırılır [2].

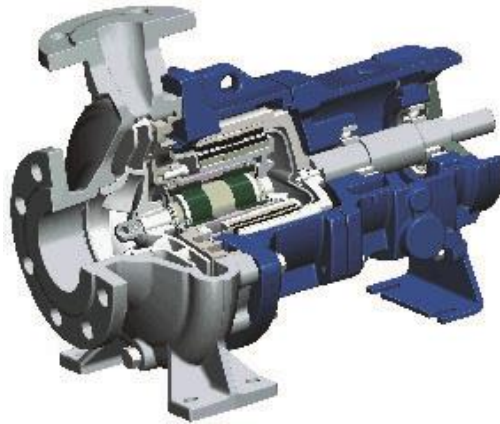
2.1.1 Pompaların sınıflandırılması

Pompaların sınıflandırılması Şekil 2.1’de görülmektedir.



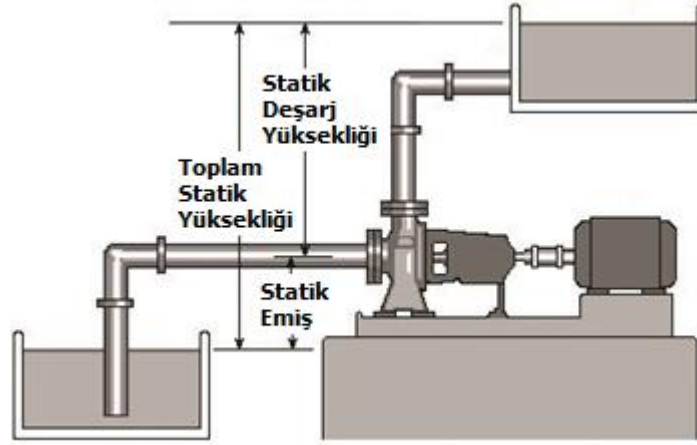
Şekil 2.1 : Pompa sınıflandırması.

Sentrifüj pompa yapısı Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2 : Sentrifüj pompa yapısı.

Akıştaki oluşan direnç çarktan gelen sıvıdaki hareket enerjisini kontrol eder. İlk direnç pompanın, sıvıyı yakalayan ve aşağı doğru yavaşlatan spiral gövdesi tarafından oluşur. Sıvı pompanın spiral gövdesinden aşağı doğru yavaşlarken, bazı hareket enerjisi basınca dönüşür. Bu, tahliye hattında bağlı manometrede okunan pompanın akışına karşı gösterilen dirençtir. Pompa basınç yaratmaz o sadece akışı yaratır. Basınç ise akışa karşı gösterilen dirençtir. Statik deşarj yüksekliğinin, statik emiş ve toplam yüksekliğinin temsili Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3 : Statik deşarj yüksekliğinin, statik emiş ve toplam yüksekliğinin temsili.

Newton'un yerçekimi yasasına karşı gösterdiği dirence basma yüksekliği denir. Basma yüksekliği terimi, pompanın yarattığı hareket enerjisinin ölçümü demektir. Bir borunun su jetini havaya doğru fırlatması gibi düşünebiliriz. Basma yüksekliği bu suyun ulaştığı değerdir. Bu pompanın suya verdiği hareket enerjisinin sonucu olarak ürettiği su sütununun yüksekliğinin ölçümüdür. Sentrifüj pompalarında enerji ölçümünde basınç yerine basma yüksekliğinin kullanılmasının ana nedeni, basıncın sıvının özgül ağırlık değerine göre değişkenlik göstermesidir, fakat basma yüksekliği değeri değişmez. Basma yüksekliği sıvının pompadan kazandığı hız ile alakalıdır. Sıvı akış sisteminde bulunan her türlü enerji formu sıvının yüksekliği ile ifade edilebilir. Bu yüksekliklerin toplamı, toplam sistem yüksekliğini veya pompanın yapmak zorunda olduğu işi belirler. Basma yüksekliğinin farklı tipleri, sürtünme, hız ve basınç toplam yükseklik içinde tanımlanır. Sistemin akışı yapabilmesi için üstesinden gelmesi gereken yüksekliğe sürtünme yüksekliği denir. Bu da borunun boyutu, tipi (boru tesisatının sayısı ve tipine), akış oranı ve sıvının yapısına bağlıdır [2].

2.1.2 Enerji verim endeksi (EEI)

Basma yüksekliği (H) ve debinin (Q) birden fazla ayar gerektirdiği devridaim sistemlerinde, sistemin azami ayar noktası ölçülür. H devridaim pompası tarafından oluşturulan yüksekliktir (metre). Q devridaim boyunca suyun akış oranının hacmidir (m^3/s).

H ve Q'nün en yüksek noktası bulunur ve bunlara $Q_{100\%}$ ve $H_{100\%}$ denir. Bu noktalardaki hidrolik güç P_{hyd} hesaplanır.

$$P_{hyd} = \frac{Q_{100\%} \times H_{100\%} \times \rho \times g}{3,6 \times 1000} \quad (3.1)$$

P_{hyd} = Hidrolik Güç (W)

ρ = Öziletkenlik (kg/m^3)

g = Yerçekimi (m/s^2)

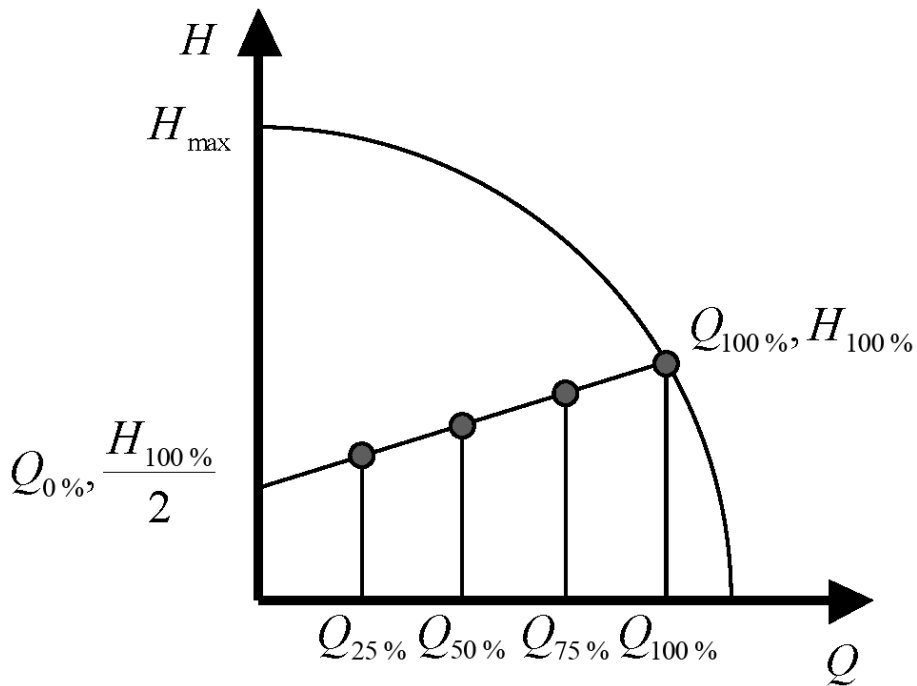
Referans güç hesaplanır;

$$P_{ref} = 1,7 \times P_{hyd} + 17 \times (1 - e^{-0,3 \times P_{hyd}}) \quad (3.2)$$

P_{ref} = Referans güç (W)

Referans güç, eğer hidrolik güç $1\text{W} \leq P_{hyd} \leq 2500\text{W}$ aralığında ise hesaplanır. Bu güç devridaim sistem verimi ve boyutu arasındaki bağımlılığı hesaba katarak elde edilen hidrolik güç ile devridaim sisteminin tükettiği güç arasındaki ilişkidir.

Referans kontrol eğrisi $Q_{100\%}$, $H_{100\%}$ ve $Q_{0\%}$, $\frac{H_{100\%}}{2}$ arasındaki düz çizgiyle tanımlanır. Debi ve basma yüksekliği referans kontrol eğrisi Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.4 : Q ve H referans kontrol eğrisi.

Devridaim sisteminde $Q \times H$ = en yüksek noktaya ulaşan eğriyi sağlayan ayar seçilir. P_1 ve H akıştan hesaplanır. P_1 uygulamanın belirlenen noktasında tüketilen elektriksel güçtür (W). $Q_{100\%}$, $0,75xQ_{100\%}$, $0,50xQ_{100\%}$, $0,25xQ_{100\%}$ ölçüm yapılacak debi noktalarıdır.

$$H_{ölç} \leq H_{ref}, P_L = \frac{H_{ref}}{H_{ölç}} x P_{ölç} \quad (3.3)$$

$H_{ölç}$ = Belirlenen noktalardaki ölçülen basma yüksekliği

H_{ref} = Referans alınan basma yüksekliği

P_L = Ölçüm sonucunda hesaplanan elektriksel güç

P_1 elektriksel gücü (3.3) bağıntısıyla diğer debilere uygulanır ve Çizelge 2.1’de ömür yüzdeleri dikkate alınarak belirlenen noktalar için P_L güçleri hesaplanmış olur.

Çizelge 2.1 : P_L hesabı için çalışma debilerinin ömür yüzdesi.

Debi (%)	Ömür Oranı (%)
100	6
75	15
50	35
25	44

Çizelge (3.1) ile hesaplanan P_L değerlerinden $P_{L,avg}$ hesaplanır.

$$P_{L,avg} = 0,06xP_{L,100\%} + 0,15xP_{L,75\%} + 0,35xP_{L,50\%} + 0,44xP_{L,25\%} \quad (3.4)$$

(3.4) Bağıntısı sonucunda EEI aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$EEI = (P_{L,avg} / P_{ref}) x C_{20\%} \quad (3.5)$$

$C_{20\%}$ = Hesaplama katsayısı = 0,49 [3].

2.1.3 Yasal zorunluluklar

Avrupa Pompacılar Birliği (Europump) 2005 yılında devridaim sistemleri için EEI ve bu EEI'ya karşılık gelen enerji sınıflandırmasını 2005/32/EC Eko-tasarım direktifi ile Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi yayınladı [4].

Bu direktife göre devridaim pazarında bulunan en iyi performansa sahip ürün veya teknoloji referans kabul edildiği, eko-tasarıma uymayan ürünlere CE belgelendirmesi yapılmadığı, AB ülkelerinde eko-tasarıma uymayan ürünlerin ticaretinin yasaklandığı ve ürünlerin üzerinde enerji sınıfını gösteren etiketlerin zorunlu olduğu bilinmektedir.

Çizelge 2.2 : 2005'te yayınlanan EEI sınıflandırma.

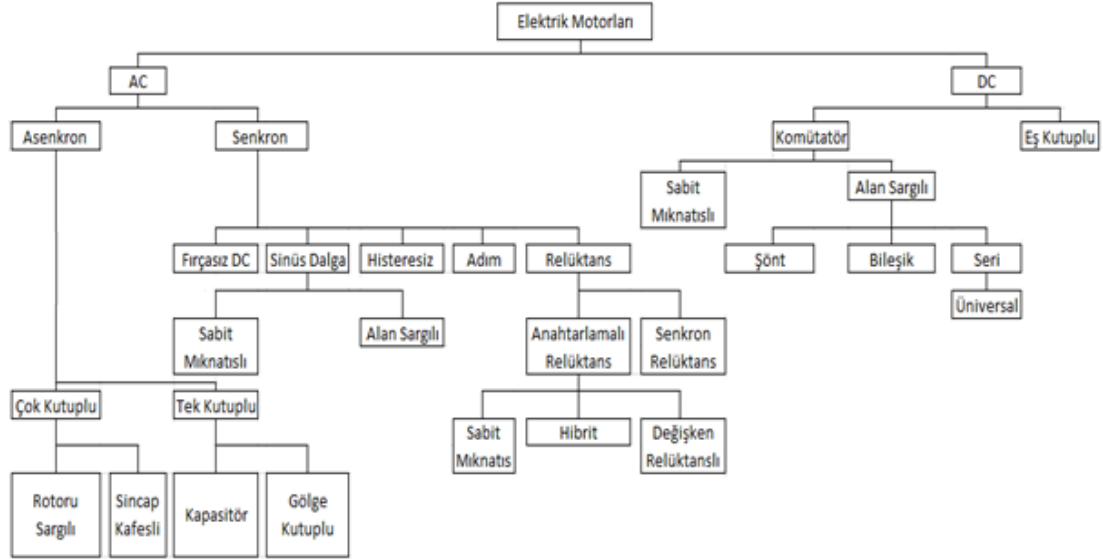
Sınıf	Enerji Verim Endeksi (EEI)
A	$EEI < 0.40$
B	$0.40 \leq EEI < 0.60$
C	$0.60 \leq EEI < 0.80$
D	$0.80 \leq EEI < 1.00$
E	$1.00 \leq EEI < 1.20$
F	$1.20 \leq EEI < 1.40$
G	$EEI \leq 1.40$

Yapılan çalışmalar sonucunda Avrupa pompacılar birliği geçiş süresini üç kısıma ayırmıştır. Birinci kısımda, Ocak 2013 tarihinden itibaren devridaim sistemlerin üretilmesi ve satılması için azami EEI değeri 0,27 olarak belirlemiştir. Bu değerden daha yüksek EEI değeri yani daha verimsiz bir sistemin satışı yapılamamaktadır. İkinci kısımda ise Ağustos 2015'ten itibaren geçerli olacak EEI değeri 0,23'e indirilmesidir ve devridaim sistemlerinin kullanıldığı alanlar da güneş istasyonlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Üçüncü kısımda düşünülen ise 2020 yılında EEI değeri zorunlu hale gelmesi ısıtma, hava koşullandırma sistemlerini de kapsayacak olmasıdır [5].

2.2 Elektrik Makinaları

Elektrik motorları elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. Eğer mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviriyorsa

generator, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviriyorsa motor adını alırlar. Tüm elektrik makinaları enerjiyi bir formdan başka bir forma manyetik alanın etkisiyle çevirirler. Şekil 2.5'te elektrik motorları sınıflandırması görülmektedir [6].



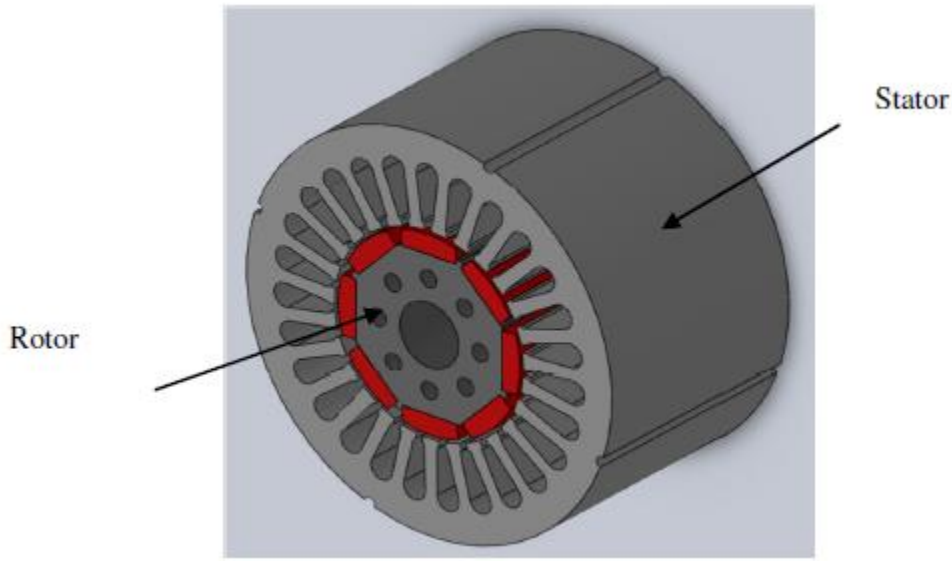
Şekil 2.5 : Elektrik motorlarının sınıflandırılması.

DA elektrik motorları geniş alanda moment ve hız ihtiyacını karşılamaktadır ancak günümüzde yüksek bakım maliyetlerinden dolayı tercih edilmemektedir. AA makinalar veya fırçasız DA makinalar bu bakım maliyetlerine gerek duymamaktadırlar. Bu özellikleri güç oranının artmasına ve verimlerinin artmasına neden olur [7].

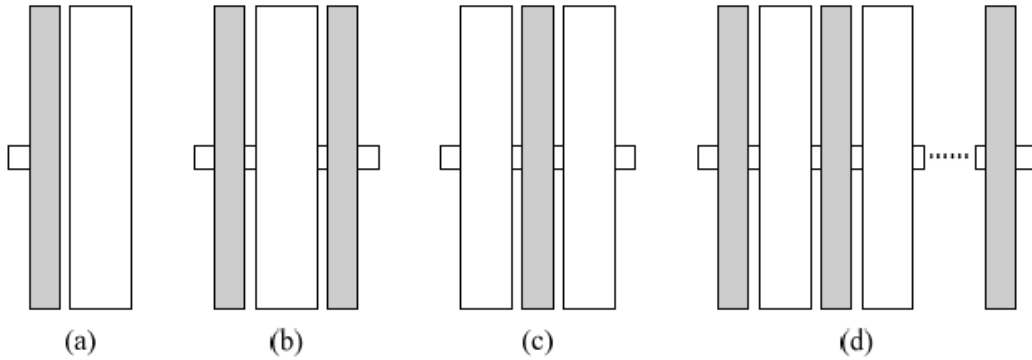
En eski elektrik makinası (alan sargılı DA makina) hız kontrol uygulamalarında uzun süre kullanılmıştır. Bu makinelerin en büyük avantajı bilinen en eski ve olgun elektrik makinası olması ve hız kontrolünün kolayca yapılabilmesidir. Son yıllarda birçok farklı uygulamalarda AA sürücüler DA sürücülerin yerini almaya başlamıştır. Motor ve sürücü maliyeti düşük olduğu için günümüzde hala özellikle de düşük güçlü uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır [8].

Elektrik motorları yapılarına göre sınıflandırıldığında ise radyal (Şekil 2.6) ve eksenel akılı motorlar (Şekil 2.7) olarak iki ana gruba ayrılırlar. Radyal akılı motorlarda temel akı mil yönüne dik, eksenel akılı motorlarda ise temel akı mile paraleldir. Eksenel akılı motorlar, radyal akılı motorların kullanılamayacağı özel durumlarda veya uygulamalarda, alternatif motor olarak kullanılır. Radyal akılı motorlar çok sayıda rotor ve stator iç içe yerleştirilerek oluşturulur. En dışta

uygulamaya bağı olarak rotor veya stator olabilir. Benzer şekilde eksenel akılı motorlarda stator ve rotor disklerin ardarda yerleştirilmesi ile elde edilir. Radyal ve eksenel akılı motorlar rotor yapılarına bağı olarak isimlendirilirler. Örneğin, radyal akılı motorların rotor yapısında yüzeysel mıknatıslar var ise, radyal akılı yüzeyden mıknatıslı motorlar; disk motorların rotor yapısında gömülü mıknatıslar var ise, eksenel akılı dahili mıknatıslı SM motor; eksenel akılı motorlarda rotor yapısı sincap kafesli sargılı bir yapı ise, eksenel akılı sincap kafesli asenkron motor şeklinde adlandırılırlar [9].



Şekil 2.6 : Radyal akılı motor yapısı.



Şekil 2.7 : Eksenel akılı motor yapıları.

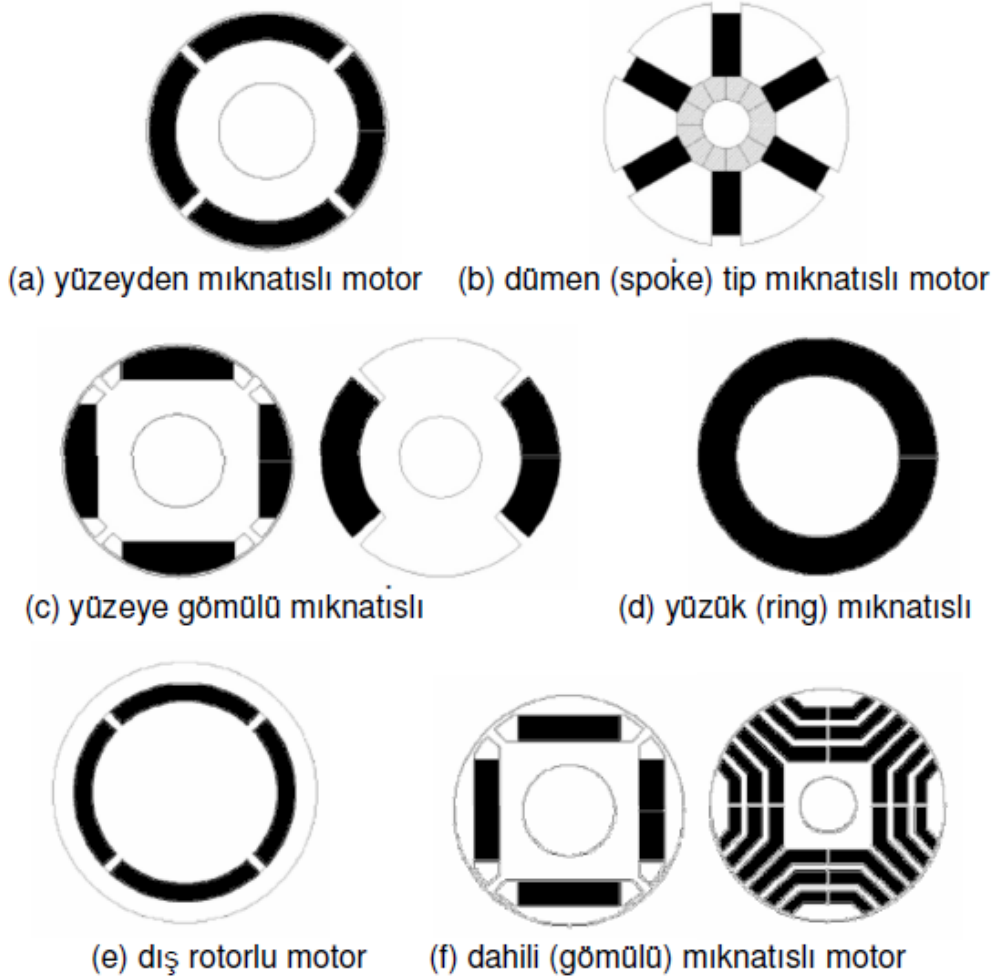
2.2.1 Asenkron makinalar

Asenkron makinalar güvenilirliği ve basit yapısı nedeniyle endüstride önemli yer eden makinalardır [10].

Endüstride asenkron motorlar, aynı güç seviyelerindeki senkron ve DC makinalara göre daha ucuz olmaları ve az bakım gerektirmeleri nedeniyle kullanılırlar [11].

2.2.2 Fırçasız doğru akım motoru

Elektrik makinalarında sürekli mıknatısların kullanılması elektromanyetik uyarımın oluşması açısından çok elverişlidir. Mıknatıslı motor yapıları Şekil 2.8’de görülmektedir. Bu tür elektrik motorların bir sürü avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar; uyarım kayıplarının olmaması, basit yapıda olmaları, yüksek verimde olmaları, hızlı dinamik performansta olmaları ve birim hacimde yüksek moment veya güç üretebilmeleridir [12].



Şekil 2.8 : Mıknatıslı motor yapıları.

FDAM’lar indüksiyon motorları ile benzer stator yapılarına sahiptirler. FDAM rotorlarında ise mıknatıslardan oluşan kutup çiftleri bulunur. İndüksiyon motordan

farklı yanları ise rotor ile statorun aynı frekansta olması yani kayma olmamasıdır [13].

Fırçasız tip SM makinalar, stator sargılarının beslenme şekline göre iki grupta incelenir. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, sabit moment üretimi için sinüsoidal formda stator akımına gereksinim duyar ve sinüsoidal zıt emk'ya sahiptir. SM doğru akım makinaları ise sabit moment üretimi için dikdörtgen biçiminde stator akımlarına gereksinim duyar ve trapezoidal formda zıt emk'ya sahiptir [14].

2.2.3 Fırçasız doğru akım motoru tasarımı

Faraday'ın yasasına göre bir bobinde endüklenen gerilim;

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = \omega_m \frac{d\psi_1}{d\theta} \quad (2.1)$$

e = Bir bobinde endüklenen gerilim

ψ_1 = Halkalanan akı

θ = Rotor konumu

ω_m = Açısal hız

EMK hava aralığı akım dağılımından da hesaplanabilir.

$$\phi_g = \int_0^{\frac{\pi}{p}} B(\theta) \times r \times d\theta \times L_{stk} = B_g \times \frac{\pi D L_{stk}}{2p} \quad (2.2)$$

ϕ_g = Hava aralığı akısı

B_g = Bir kutup boyunca ortalama akı yoğunluğu

r = Stator yarıçapı

D = Stator çapı

L_{stk} = Paket boyu

p = Çift kutup sayısı

Bir bobinde akı yoğunluğunun tepe değeri;

$$\psi_{1\max} = T_c \times \phi_g \quad (2.3)$$

T_c = Sarım sayısı

Eğer ψ_1 ile θ arasında lineer bir değişim var ise;

$$\psi_1(\theta) = \frac{p\theta}{\pi/2} \psi_{1\max} \quad (2.4)$$

(2.1) ve (2.4) bağıntılarından;

$$e_1 = \omega_m x \frac{2p}{\pi} x T_c \phi_g \quad (2.5)$$

T_c yerine faz başına seri sarım sayısı olan T_{ph} yazılabilir, bu durumda faz başına EMK'nın tepe değeri aşağıdaki gibi olur;

$$e_{1(pk)} = \omega_m x \frac{2p}{\pi} x T_{ph} \phi_g \quad (2.6)$$

Genel ifadeyle motorun moment üretimi faz başına endüklenen geilim ile akımın çarpımının açısal hıza bölünmesiyle bulunur;

$$T_e \omega_m = e_1 \times i_1 + e_2 \times i_2 + \dots + e_m \times i_m \quad (2.7)$$

(2.7) bağıntısından ortalama elektromanyetik moment (T_{avg}) aşağıdaki gibidir [15];

$$T_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_e(\theta) d\theta \quad (2.8)$$

2.2.4 Fırçasız doğru akım motoru kullanım alanları

Gerek yapısında, gerekse kontrol organlarında kullanılan malzeme ve yan ürünlerin artan teknolojik olanaklara bağlı olarak gelişimiyle birlikte, fırçasız tip DA motorları, özellikle klasik sargılı doğru akım motorlarına ciddi rakip oluşturmaktadır. Bu nedenle fırçasız tip doğru akım makinaları; Isıtma ve havalandırma sistemlerinde, sağlık endüstrisinde, soğutucularda, uzay endüstrisinde, robot endüstrisinde, fırçalı tip makinaların kullanımının sakınca doğurabileceği, yanıcı ve parlayıcı çalışma

ortamlarında, sabit disk sürücü ve CD/DVD-ROM ve yazıcı gibi bilgisayar donanımlarında, endüstride yürüyen bantlarda, pompa ve fan motoru uygulamalarında, özellikle yüksek hız ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren birçok uygulamada giderek artan biçimde kullanılmaktadır. Fırçalı ve fırçasız DA makinalarının karşılaştırması Çizelge 2.3’de görülmektedir [16].

Çizelge 2.3 : Fırçalı ve fırçasız DA motoru karşılaştırması.

Parametreler	Fırçalı DA Makinası	Fırçasız DA Makinası
Komütasyon	Mekanik	Elektronik
Boyut	Büyük	Küçük
Güç Yoğunluğu (W/kg)	Düşük	Yüksek
Azami Hız (rad/sn)	Düşük	Yüksek
Hız kontrolü	Basit	Karmaşık
Atalet	Yüksek	Düşük
Bakım	Gerekli	Gereksiz
Soğutma	Zayıf	İyi

2.2.5 Fırçasız doğru akım motor kontrolü

Mıknatıslı motorların endüstri uygulamalarda sıkça yer almasıyla, bu motorların sürülmesi de önem kazanmıştır. Üç yarım köprülü evirici devre yapısı 6 adım teknolojisi ile veya sinüs dalga teknolojisiyle motor sürümünü sağlar. Bu iki yöntem elektronik komutasyonla sağlanır. Genellikle bu sürücüler konum belirlemek için bir veya iki algılayıcıya ihtiyaç duyarlar. Bu algılayıcıları monte etmek ve uygulamak pahalı bir yöntemdir. Ayrıca rotoru bir sıvının içinde olan veya kapalı olan bir sistemde algılayıcı kullanılması mümkün değildir. Bu yüzden algılayıcısız kontrol yöntemi çoğu uygulama için en uygun yöntemdir [17].

3. TASARLANAN SİSTEM

3.1 Pompanın Analizi

Pompalar üzerinde yüksek verimin talep edilmesi üretici firmaların yeni tasarım ve üretim teknikleri üzerine gelişmeler yapmasını sağlamıştır. Bu sebepten CFD programı pompaların üretiminden önce doğrulama yapmak için kullanılır. Ancak CFD analizinde tasarım iyileştirilmesi için parametrelerde dikkatli davranılması gerekmektedir [18].

Devridaim sisteminin pompası CFD yazılımı ile analiz edilmiş ve değişik devirlerde pompa verimleri, basma yükseklikleri, debi vb. sistemin parametreleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre pompanın %100, %75, %50 ve %25 değerleri tespit edilmiştir. Tespit edilen bu değerlere göre elektrik motorun tasarımı gerçekleştirilmiştir ve çıkan sonuca göre de EEI hesaplanmıştır.

3.1.1 Pompanın değişik devirlerdeki CFD analiz sonuçları

Pompanın çeşitli devir sayıları için farklı debilerde basma yükseklikleri ve buna ilişkin hidrolik güç (Ph), pompa giriş gücü (Pi), hidrolik moment, motor gücü (Ps), hidrolik verim, hacimsel verim ve pompa verimi değerleri hesaplanmıştır. Hesap edilen değerlerden pompanın farklı devirlerde debi (Q) – basma yüksekliği (H) ilişkisi elde edilmiştir. Buna göre motor tasarımı için gerekli veri girdisi sağlanmıştır. Analiz 3800, 3200, 2600, 2000, 1700, 1400 ve 800 min⁻¹ için gerçekleştirilmiştir. Belirtilen açısal hız değerlerine ilişkin sonuçlar ayrı ayrı çizelge halinde sırası ile Çizelge 3.1, Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4, Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : 3800 devir CFD sonuçları.

Q (m³/h)	Th (Nm)	ΔP (Pa)	H (m)	Ph (W)	Pi (W)	Ps (W)	ηh (%)	ηv² (%)	ηp (%)
1	0,52	98k	10,4	27,5	205,7	228,6	12,03	15,64	13,36
9	1,63	98k	10,4	247,1	648,6	720,7	34,29	63,27	38,10
18	2,36	94k	9,9	470,7	938,6	1042,9	45,13	79,99	50,15
27	3,05	88k	9,3	666,1	1214,0	1348,9	49,38	89,45	54,87
36	3,64	71k	7,5	713,7	1446,5	1607,2	44,41	97,39	49,34
45	3,60	9k	0,9	113,9	1432,5	1591,7	7,16	98,79	7,95

Çizelge 3.2 : 3200 devir CFD sonuçları.

Q (m³/h)	Th (Nm)	ΔP (Pa)	H (m)	Ph (W)	Pi (W)	Ps (W)	ηh (%)	ηv² (%)	ηp (%)
1	0,47	98k	10,4	27,5	159,1	176,8	15,5	15,64	17,28
9	1,30	98k	10,4	247,4	436,0	484,5	51,0	63,27	56,75
18	2,23	97k	10,3	488,5	747,4	830,5	58,8	79,99	65,36
27	2,77	75k	7,9	565,0	929,2	1032,5	54,7	89,45	60,81
36	2,74	26k	2,7	260,7	919,3	1021,5	25,5	97,39	28,36

Çizelge 3.3 : 2600 devir CFD sonuçları.

Q (m³/h)	Th (Nm)	ΔP (Pa)	H (m)	Ph (W)	Pi (W)	Ps (W)	ηh (%)	ηv² (%)	ηp (%)
1	0,42	74k	7,9	20,7	113,5	126,1	16,47	15,64	18,30
9	1,15	76k	8,0	190,8	314,2	349,1	54,64	63,27	60,71
18	1,71	60k	7,1	337,0	464,6	516,2	65,28	79,99	72,53
21	1,91	60k	6,6	364,4	520,0	577,8	63,07	79,99	70,08
27	1,86	27k	2,8	202,9	507,3	563,6	36,01	89,45	40,01
30	1,86	10k	1,1	90,9	506,5	562,8	16,15	89,45	17,95

Çizelge 3.4 : 2000 devir CFD sonuçları.

Q (m³/h)	Th (Nm)	ΔP (Pa)	H (m)	Ph (W)	Pi (W)	Ps (W)	ηh (%)	ηv² (%)	ηp (%)
1	0,26	44k	7,0	18,4	54,0	60,0	30,66	15,64	34,07
9	0,81	43k	6,8	162,1	169,9	188,8	85,84	63,27	95,38
12	1,25	41k	6,4	203,5	261,8	290,8	69,97	63,27	77,74
14	1,35	41k	6,0	220,8	282,7	314,1	70,31	63,27	78,12
18	1,30	26k	4,0	189,3	272,2	302,5	62,58	79,99	69,54
21	1,13	18k	2,8	154,6	236,7	263,0	58,79	79,99	65,32
24	1,09	60k	1,3	83,3	227,3	252,6	32,98	79,99	36,64

Çizelge 3.5 : 1700 devir CFD sonuçları.

Q (m³/h)	Th (Nm)	ΔP (Pa)	H (m)	Ph (W)	Pi (W)	Ps (W)	η_h (%)	η_v² (%)	η_p (%)
1	0,20	33k	5,4	14,2	34,7	38,5	36,81	15,64	40,90
5	0,90	32k	5,3	69,6	160,2	178,0	39,14	50,00	43,49
7	0,80	29k	5,2	95,7	142,4	158,2	60,49	63,27	67,21
9	0,86	20k	4,6	108,8	153,1	170,1	64,00	63,27	71,11
12	0,64	13k	3,0	94,6	113,9	126,5	74,78	63,27	83,09

Çizelge 3.6 : 1400 devir CFD sonuçları.

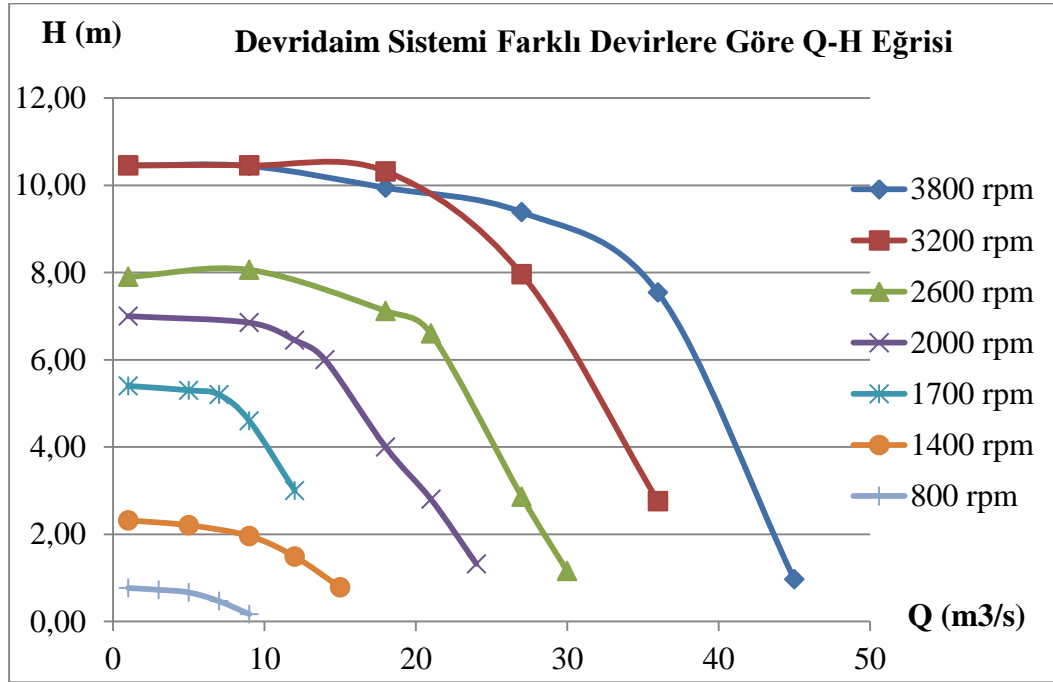
Q (m³/h)	Th (Nm)	ΔP (Pa)	H (m)	Ph (W)	Pi (W)	Ps (W)	η_h (%)	η_v² (%)	η_p (%)
1	0,13	21k	2,3	6,0	19,6	21,8	27,93	15,64	31,03
5	0,34	20k	2,2	28,9	49,7	55,3	52,41	50,00	58,23
9	0,48	18k	1,9	46,3	70,2	78,1	59,33	63,27	65,92
12	0,53	14k	1,4	46,8	77,6	86,3	54,29	63,27	60,32
15	0,53	7k	0,7	30,7	77,9	86,6	35,52	63,27	39,46

Çizelge 3.7 : 800 devir CFD sonuçları.

Q (m³/h)	Th (Nm)	ΔP (Pa)	H (m)	Ph (W)	Pi (W)	Ps (W)	η_h (%)	(η_v)² (%)	η_p (%)
1	0,06	7k	0,77	2,0	4,6	5,1	38,88	15,64	43,19
3	0,11	6k	0,72	5,7	9,6	10,6	53,46	50,00	59,40
5	0,15	6k	0,66	8,7	12,8	14,3	61,04	50,00	67,82
7	0,17	4k	0,46	8,5	14,5	16,1	52,69	63,27	58,55
9	0,17	1,5k	0,17	3,9	14,2	15,8	24,72	63,27	27,47

CFD analiz sonuçlarına göre oluşturulan farklı devirlerdeki basma yüksekliği ve debi değerleri Çizelge 3.8’de görüldüğü gibidir.

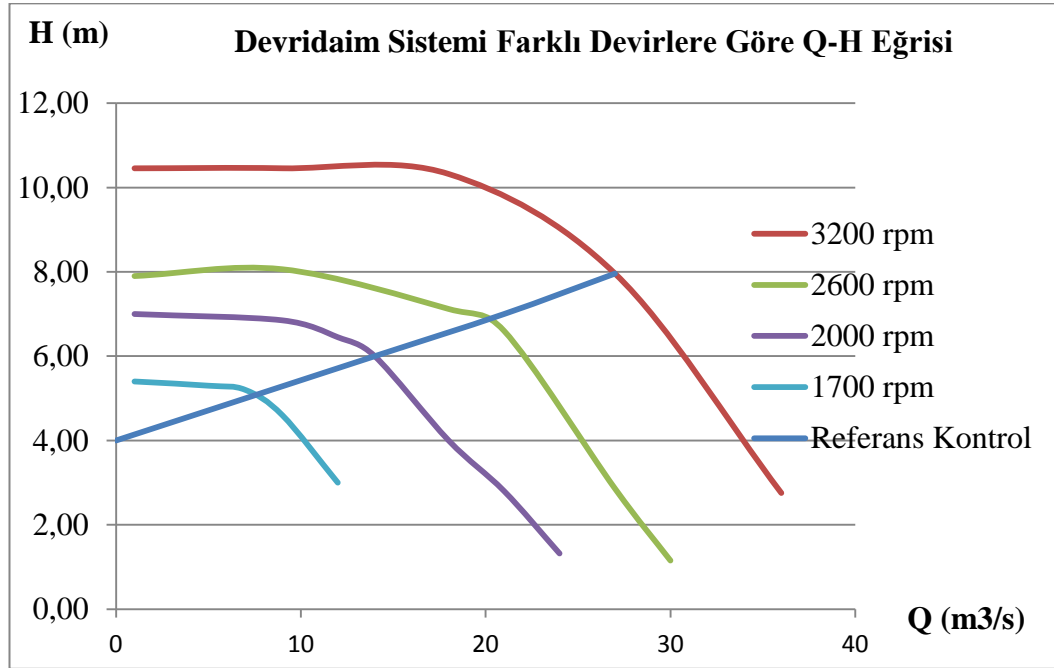
Çizelge 3.8 : Değişik devirlerde CFD sonucu pompa karakteristiği.



İki kutuplu asenkron motor etiket devir değeri 2900 civarındır. Yapılan bu CFD analizinde çeşitli noktalar pompa için seçilmiş ve analiz edilmiştir. Pompanın asenkron motor tarafından tahrik edildiğinde 3000 devir mertebelerinde olduğundan bu değerden bir miktar yüksek değer olan 3800 devirde analiz ile başlanılmış ve 600 devir düşürülerek tek tek CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere ek olarak 2000 devir ile 1400 devir arasında 1700 devir de analiz edilmiştir. Sistem veriminin en yüksek olabilmesi için sistemi oluşturan her bir birimin verimleri de en yüksek olmalıdır. Dolayısıyla EEI indeksine göre verimli bir sistem için pompa verimi, motor verimi ve sürücü verimi en yüksek seçilmelidir. Pompadaki hidrolik güç EEI hesaplanırken dikkate alınmalıdır. 3800 devir için hidrolik gücün en yüksek olduğu noktalarda $Q_{100\%}$ ve $H_{100\%}$ noktalarını tarif eder. 3800 devir analizinde bu nokta için pompa verimi %50 mertebelerindedir. 3200 devir ile kıyaslandığında ise %10 daha az pompa verimi söz konusudur. Bu sebepten 3200 devir bu pompanın çıkabileceği en yüksek devir olarak seçilmiş ve EEI hesaplamaları, $Q_{100\%}$, $0,75 \times Q_{100\%}$, $0,5 \times Q_{100\%}$, $0,25 \times Q_{100\%}$, bu devir değeri üzerinden tespit edilmiştir.

Pompa için 3200 en yüksek devir kabul edilip EEI hesaplama için eğrilerin belirlenmesi Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 : EEI verim indeksi için belirlenen devirler.



3.1.2 Pompanın enerji verimlilik indeksi (EEI) değerinin hesaplanması

EEI hesaplama formülüne göre motor verimi %90 kabul edilerek hesaplanan EEI değeri Çizelge 3.10’da belirtildiği gibi 0,20’dir. Bu değer EEI enerji sınıfına göre çok yüksek bir değeri temsil etmektedir ve Ağustos 2015’te yürürlüğe girecek asgari EEI değeri 0,23 zorunluluğuna uyum sağlamaktadır.

Çizelge 3.10 : Tasarlanan motor için EEI hesabı.

	Q	H	Ph	η_p	Pi	η_m	Ps
100%	28	7,94	604,71	65	930,32	92	1011,22
75%	21	6,6	376,99	60	628,32	90	698,13
50%	14	6	228,48	55	415,42	88	472,07
25%	7	5,2	99,01	55	180,01	86	209,32

$$P_{L,avg} = 425,98 \quad EEI = 0,20$$

$$P_{ref} = 1045,01$$

Mevcut motorun EEI değeri de Çizelge 3.11’de belirtildiği gibi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda görüldüğü gibi yeni tasarım ile devridaim sisteminin EEI değeri 0,38 değerinden 0,20 değerlerine düşeceği ve böylelikle sistemin enerji verimliliğinin artacağı öngörülmüştür.

Çizelge 3.11 : Mevcut motor için EEI hesabı.

	Q	H	Ph	η_p	Pi	η_m	Ps
100%	28	8	609,28	65	937,35	65	1442,08
75%	21	8,1	462,67	60	771,12	60	1285,20
50%	14	7,9	300,83	55	546,97	55	994,49
25%	7	7	133,28	55	242,33	55	440,60

$$P_{L,avg} = 821,24 \quad EEI = 0,38$$

$$P_{ref} = 1052,78$$

3.2 Elektrik Motor Tasarım Girdileri

Pompanın debi ve basma yüksekliği verileri değerlendirilerek elektrik motoru için mil gücü, moment değeri ve devir sayısı belirlendi. SPEED yazılımı için girdi oluşturacak veriler CFD analizi sonucunda çıkan motor etiket verileridir.

3.2.1 Motor sürücü bilgileri

Pompa karakteristik bilgileri belirlendikten sonra motor tasarımı için gereken bir diğer nokta ise motor sürücü bilgileridir. Motor tasarımını bu bilgiler doğrudan etkilemektedir. Kullanılan sürücü Kelly Controls firmasının ait KSL 96150’dir. Motor sürücü devre şeması Şekil 3.1’de görülmektedir. Bu sürücünün özellikleri aşağıdaki gibidir;

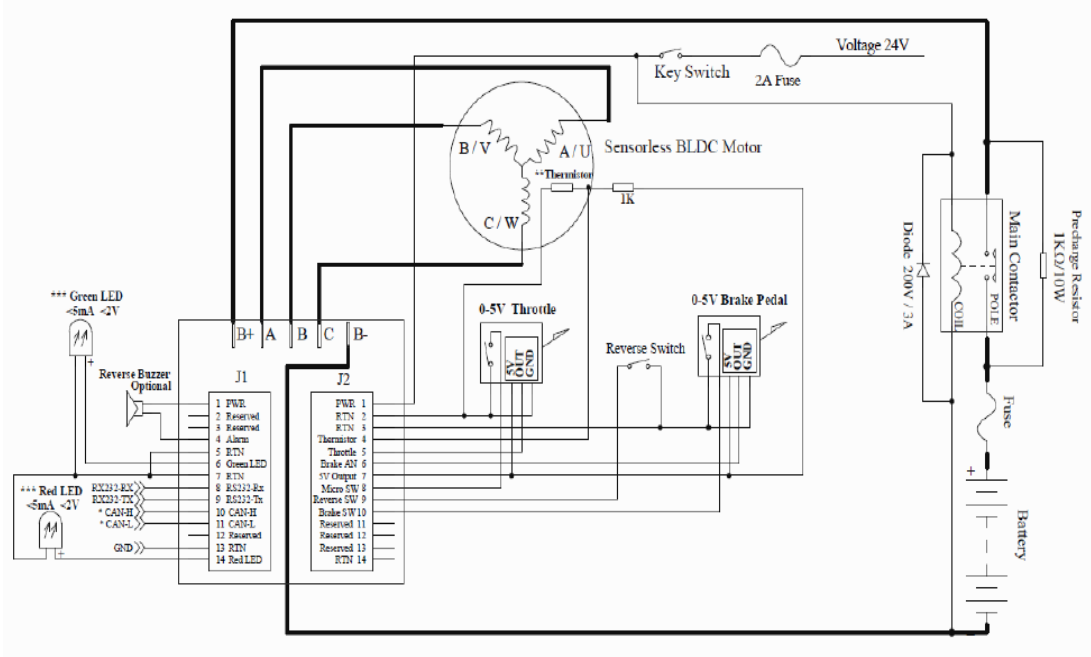
Fırçasız senkron motorlar için kullanılan algılayıcısız motor sürücüleri fan, su pompası, hava koşullandırma kompresörleri, buzdolabı kompresörleri gibi uygulamalar için uygundur.

Sürücü verimini 99% değerlerine çıkarmak için yüksek güçlü Mosfetler içerir ve PWM kullanılır.

17000 min⁻¹’e kadar motor sürülebilir.

18 V ile 120 V arası gerilim ayarlanır.

1 dakikada 150 A, sürekli durumda ise 60A değerlerine kadar sürücü akıma karşı dirençlidir.



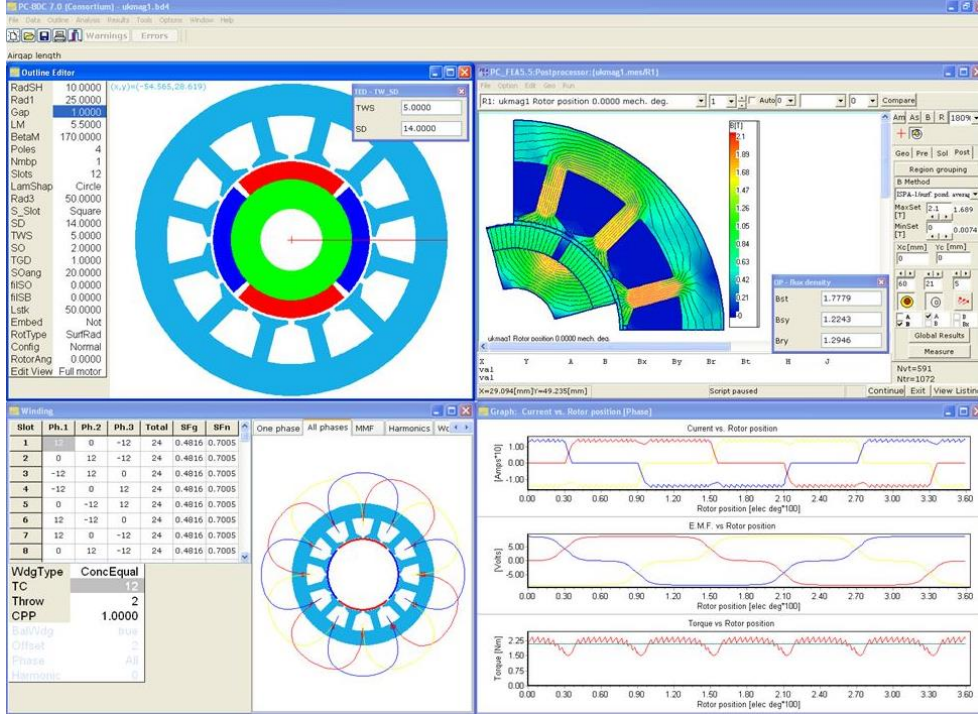
Şekil 3.1 : Kelly KSL96150 sürücü devre şeması.

3.2.2 SPEED yazılımı

SPEED yazılımı elektrik motor ve generatörlerin tasarımı ve analizinde kullanılan, dünyada önde gelen bir yazılımdır. SPEED yazılımı sadece motor analizi yapmakla kalmaz, motor sürücü ve kontrolünü de içeren bir analiz programıdır. Yazılım Glasgow Üniversitesi SPEED Laboratuvarı'nda geliştirilmiş, günümüzde 1500'den fazla kullanıcıya sahip, motor tasarım ve üreticilerinin sıklıkla kullandığı bir program halini almıştır.

SPEED; mevcut elektrik motorlarının yeniden boyutlandırılmasında veya yeni motorlar için ön tasarımlarının yapılmasında kullanılan, manyetik eşdeğer devre tabanlı, basit, hızlı ve verimli bir yazılımdır. SPEED elektrik motor ve sürücülerinin hemen hemen tüm sınıflarını tanımlamak için ideal bir yazılımdır. Yazılım, gömülü PC-FEA seçeneği ile hızlı manyetik FEA yapma ve karmaşık elektrik motor problemlerini doğru modelleme imkanı da tanımaktadır.

SPEED programının arayüzü Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : SPEED programı arayüzü.

SPEED yazılımı endüstride birçok sektörde sıkça kullanılmaktadır. Elektrikli ve hibrit taşıtlar, iş makinaları, tarım makinaları gibi düşük ve yüksek güçlü taşıt uygulamalarında kullanılan elektrik motor tasarımı problemlerinde birçok firma tarafından kullanılmaktadır. Manyetik malzemelerin daha verimli kullanılması, maliyet azaltma çalışmaları, mıknatıs kullanımının azaltılması ya da kaldırılması gibi kritik konuların incelenmesinde SPEED yazılımı tercih edilmektedir. Yazılımın Motor-CAD ve Flux FEA yazılımları ile olan bağlantısı sayesinde mühendisler kusursuz bir tasarım kapasitesi sunmaktadır. Bu sayede, elektrikli araçlarda hız, moment, verim ve güç gibi bilgiler kolay bir şekilde elde edilebilmektedir.

Havacılık sektöründe ihtiyaç duyulan yüksek güç yoğunluğu, yüksek hızlar ve düşük hata toleransı gibi gerekçeler nedeniyle SPEED elektrik motorları, eyleyiciler ve pompa uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir yazılımdır. Fırçasız sürekli mıknatıslı motorlar ve anahtarlamalı relüktans motorları bu alanda sıklıkla kullanılan motor yapılarıdır. SPEED bu tür motorların geometrik boyutlarının oluşturulmasında, elektromanyetik ve ısıl performanslarının elde edilmesinde de sıkça tercih edilen bir yazılımdır.

SPEED yüksek verimli sürücülerin fırçasız AA ve DA motorlar ile birlikte tasarım modüllerini de içermektedir. Bu modüller, sadece yüksek güçlü endüstriyel sürücüler

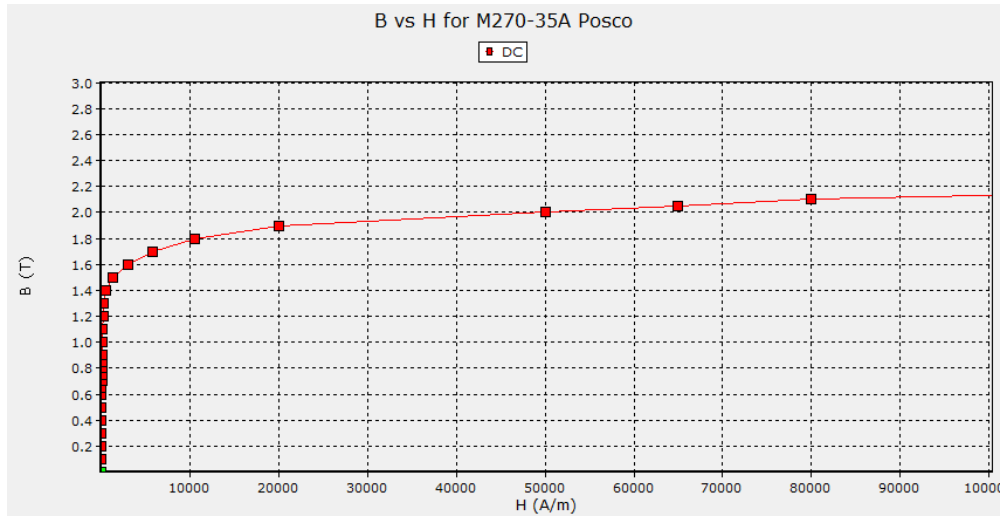
için değil aynı zamanda hassas servomotor sistemleri için de yazılımın kullanımını mümkün kılar.

Bu yazılım ile fırçasız sürekli mıknatıslı motorlar, senkron ve asenkron motorlar, fırçalı ve fırçasız DA motorlar ve anahtarlama relüktans motorlarını oldukça doğru bir şekilde tasarlayıp, başarımlarını kontrol etmek mümkündür [19].

3.2.3 Motor sac ve mıknatıs malzeme bilgileri

Fırçasız doğru akım motorların rotorunda mıknatıslar bulunur. Bu sebepten bu motorlara sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları da denir. Kayıpları en aza indirmek için gerek stator ve rotor sac malzemesi gerek de mıknatıs malzemesinin seçimi önem arz etmektedir. Devridaim sisteminde kullanılan elektrik motorları genelde ıslak rotorlu motorlar olarak bilinirler. Yani hava aralığında devridaimi yapılan su bulunur, bu da suyun özelliğine göre rotora etki edebilmektedir. Örneğin suyun sıcaklığının yüksek olması mıknatısın performansını etkileyebilir aynı şekilde suyun killi olması rotorda korozyona neden olacak ve motoru zorlayacaktır. Bu nedenlerden dolayı rotor mıknatısları kaplanmalı ve sıcaklık koruma değeri yüksek seçilmelidir. Bu motorda N33UH mıknatıs malzemesi ve M270-35A rotor ve stator malzemesi seçilmiştir.

Motor milinde klasik düşük karbonlu çelik kullanılacak. Stator ve rotor sac malzemesinde ise kalitesi ortalamanın üstünde olan ve piyasada rahatlıkla bulunabilen M270-35A malzemesi seçilmiştir. Mıknatıs malzemesi ise N33UH seçilmiştir. Bu malzemeler Motor tasarım programı SPEED’te tanımlanır. Şekil 3.3’te sac malzemesinin SPEED programına tanımlanmış B-H eğrisi görülmektedir. Şekil 3.4’te ise mıknatıs malzemesinin karakteristik özelliğinin SPEED programına tanımlanması görülmektedir.



Şekil 3.3 : Sac malzeme M270-35A B-H eğrisi.

Magnet Editor

Title: N33UH China Arnold Test

Remanent flux density, Br	1.1630	T
Intrinsic coercivity, Hcj	1.8770E+06	A/m
Relative recoil permeability, MuRec	1.0500	
Temperature coefficient for remanent flux density, CBr	-0.1000	%/°C
Temperature coefficient for intrinsic coercivity, CHcj	-0.6000	%/°C
Density, DMag	7500.0000	kg/m³

Save Cancel Help

Şekil 3.4 : Mıknatıs malzeme karakteristik özellikleri.

3.2.4 FDAM tasarım çalışmaları

Pompa CFD analizleri sonucunda EEI hesabıyla beraber %90 verimli bir motor tasarlandığında EEI değerlerinin iyileşimi bu pompa için gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucu özet Çizelge 3.12’de oluşturulmuştur.

Çizelge 3.12 : Tasarlanan motor ve sistemin özellikleri

(g:yerçekimi ivmesi=9,81 m/sn²).

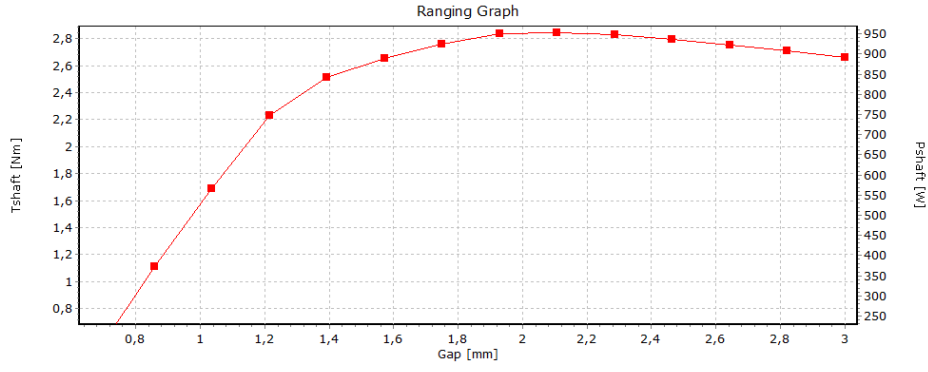
Q (m³/s)	H (m)	Devir (rpm)	Ph (W)	ηp (%)	Pi (W)	ηm (%)	Ps (W)	Tm (Nm)
28	7,9	3200	584,6	60,8	961,5	92	1045,1	2,87
21	6,6	2600	364,4	65,0	560,7	90	623,0	2,06
14	6	2000	220,8	70,0	315,5	88	358,5	1,51
7	5,2	1700	95,7	65,0	147,2	86	171,2	0,83

Yapılan bu çalışmanın özetinde pompayı en yüksek 3200 devirde çalıştıracak ve diğer değişken devirlerde de en yüksek verimi sağlayabilecek motor tasarımı yapılmıştır. Yukarıdaki tabloda motor verimi bu devirler için %90 civarı kabul edilmiştir. Tasarım sonucunda çıkacak farklılıklar bu tablo üzerinden değiştirilerek yeni EEI hesaplaması yapılacak, üretim sonrası motor verileri tasarım verileri ile bir daha karşılaştırılıp, öngörülen ile fiili durum arasındaki fark ortaya konulacaktır.

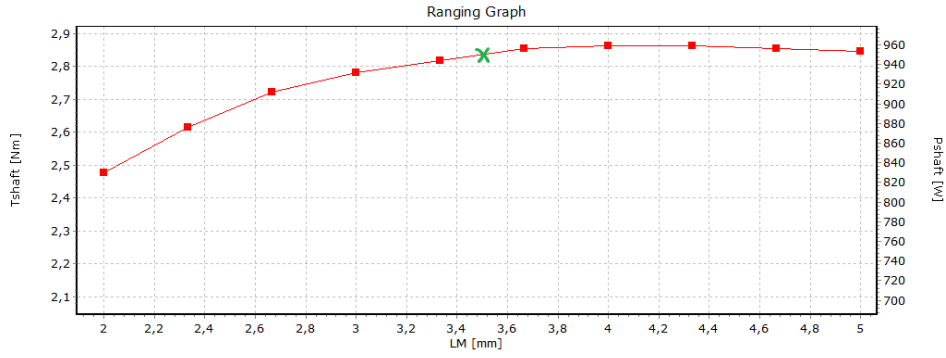
Devridaim sistemi için FDAM tasarım çalışmasında seçilen pompanın elektrik motor tasarımı için parametreleri belirlendi. Elektrik motor tasarımında hedef olarak 3200 min⁻¹ da en az %92 verimli ve 2,9 Nm moment üretebilen dolayısıyla da motorun elektriksel gücü en yüksek 1045,4 watt belirlenmiştir, bu değer motorun test edilmesinden sonraki verim değerine göre değişkenlik gösterebilir. En yüksek değer için belirlenen parametrelerde motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

3.2.5 FDAM tasarımında SPEED değişken parametrelerin ayarlanması

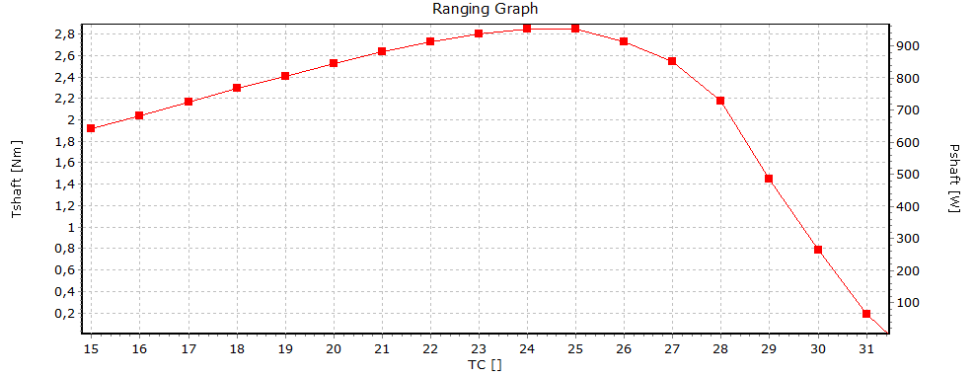
SPEED motor tasarım programında paket boyu, sarım sayısı, hava aralığı değerleri belli değerler arasında sınırlandırılarak, ara değerler üzerinde SPEED ranging özelliği ile inceleme yapılmış ve bu parametrelerin en uygun şekli sağlanmıştır. Motor milinin momentine ve gücüne, hava aralığının etkisi Şekil 3.5'te görülmektedir, mıknatıs kalınlığının değişiminin etkisi Şekil 3.6'da görülmektedir, sarım sayısının değişiminin etkisi Şekil 3.7'de görülmektedir ve akım değişiminin etkisi ise Şekil 3.8'de görülmektedir.



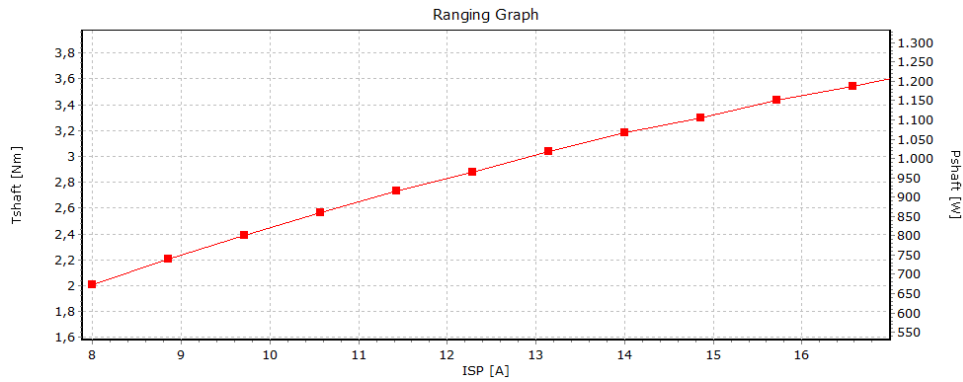
Şekil 3.5 : Hava aralığı değişiminin incelenmesi.



Şekil 3.6 : Mıknatıs kalınlığı değişiminin incelenmesi.



Şekil 3.7 : Sarım sayısının değişiminin incelenmesi.



Şekil 3.8 : Akım değişiminin incelenmesi.

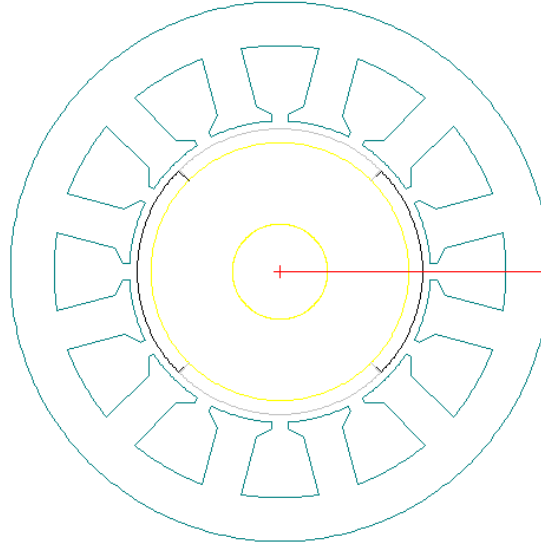
Parametreler motor tasarımının optimizasyonu için incelenmiş ve tasarım için en uygun değerler belirlenmiştir.

3.3 FDAM Motorlarının SPEED Programı Yardımıyla Tasarımları

Değişik üç tip FDAM, SPEED programında tasarlanıp karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucu en uygun tasarımın imalatına karar verilmiştir.

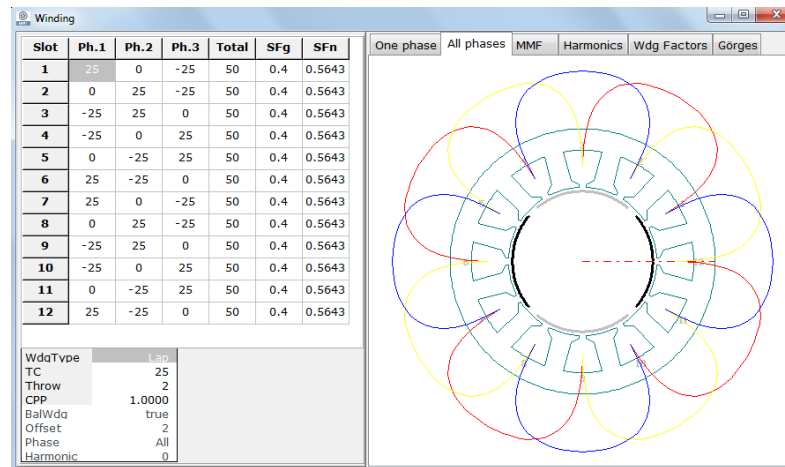
3.3.1 4 kutuplu 12 oluklu tasarım

Şekil 3.9’da 4 kutuplu 12 oluklu motorun geometrisi görülmektedir.



Şekil 3.9 : 4 kutuplu 12 oluklu motor geometrisi.

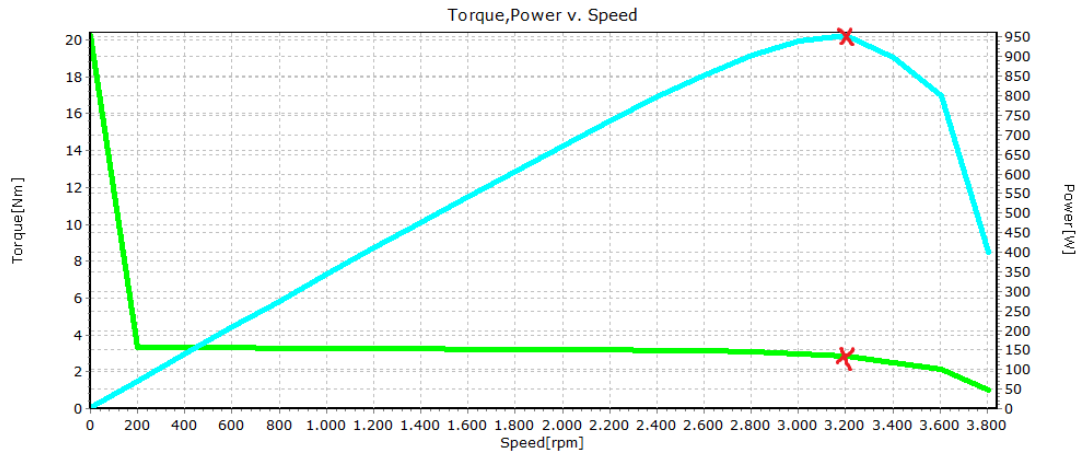
Şekil 3.10’da 4 kutuplu 12 oluklu motorun sargı yapısı görülmektedir.



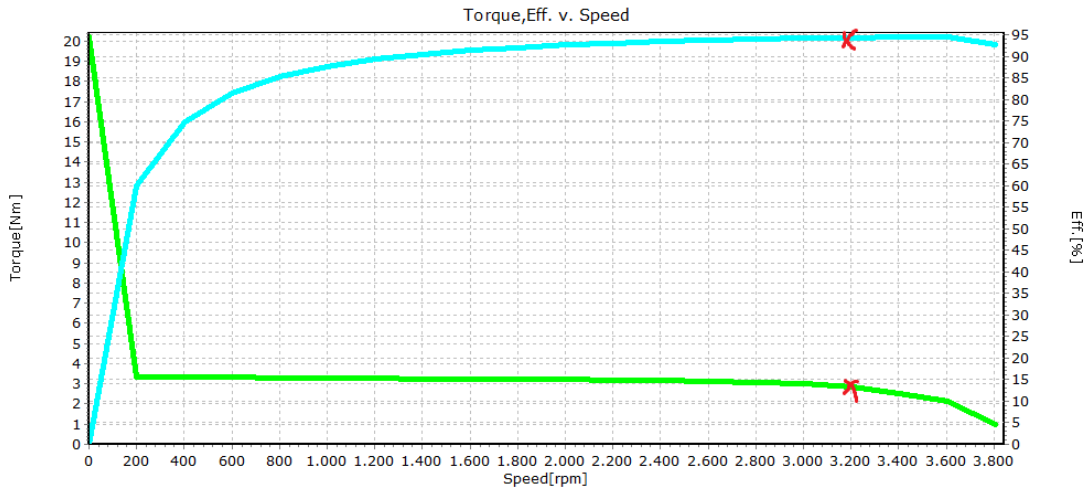
Şekil 3.10 : 4 kutuplu 12 oluklu sargı yapısı.

Oluk doluluk oranı tasarımda %40 oranında tutulmuştur. Motor verim arttırmada önemli parametrelerden bir tanesi oluk doluluk oranıdır. Günümüzde oluk doluluk oranını attırmak için farklı geometriler ve farklı sargı yapıları kullanılmakta, özel yalıtımlarla çok yüksek yüzdelere çıkılabilmektedir. Ancak üretimsel zorluklarından dolayı bu çalışmada yüksek doluluk oranı üzerinde durulmamıştır.

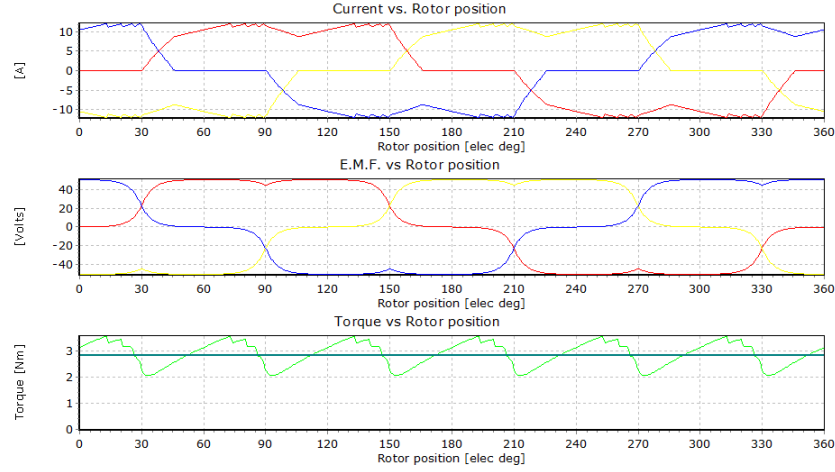
Şekil 3.11’de 4 kutuplu 12 oluklu motorun moment, güç ve hız arasındaki ilişki, Şekil 3.12’de ise bu motorun moment verim ve hız arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 3.13’de ise motorun rotor konumuna göre akım EMF ve moment değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun moment, güç ve hız arasındaki bağıntı.



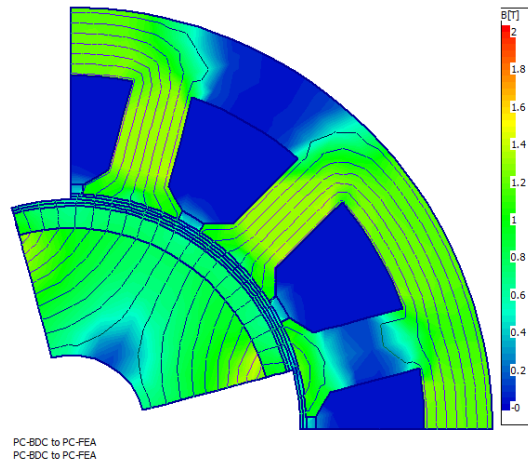
Şekil 3.12 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun moment, verim ve hız arasındaki bağıntı.



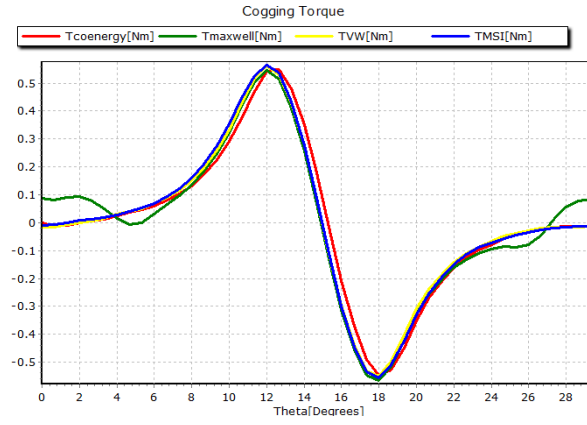
Şekil 3.13 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun rotor konumuna göre akım, EMF ve moment değişimleri.

Tasarlanan motorun moment hız karakteristiğine bakıldığında 0 ile 200 min^{-1} arasında, yani kalkış anında SPEED programının hatalı hesaplama yaptığı görülmektedir. Gerçek durumda bu türlü yüksek moment değerleri görülmez. Motor 1000 min^{-1} dan itibaren %85 verimlerin üzerine çıkmaktadır, 3200 min^{-1} ise verim değeri yaklaşık %92 mertebelerindedir. Motor 3200 min^{-1} de istenilen moment değerine, dolayısıyla bu devirdeki su gücüne karşı gerekli olan güce ulaşmıştır. Motor optimizasyonu, azami devir için düşünülmüştür. 3200 min^{-1} 'in üzerindeki değerlerde verim ve moment değeri düşmektedir.

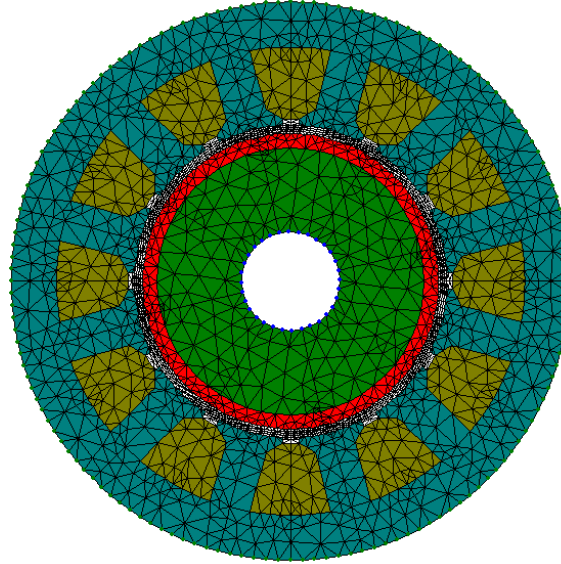
SEA yönteminin uygulanması ile Şekil 3.14'te hava aralığı akı dağılımı, Şekil 3.15'te vuruntu momenti değişimi, Şekil 3.16'da ağ yapısı ve Şekil 3.17'de akı dağılımı görülmektedir.



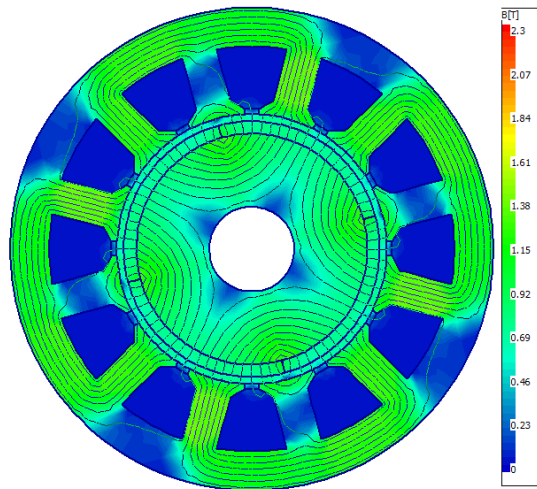
Şekil 3.14 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun SPEED-SEA modülü ile hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 3.15 : 4 kutuplu 12 oluklu motorun vuruntu momentinin oluk adımına göre değişimi (farklı hesaplama yöntemleriyle).



Şekil 3.16 : SEA ağ yapısı.

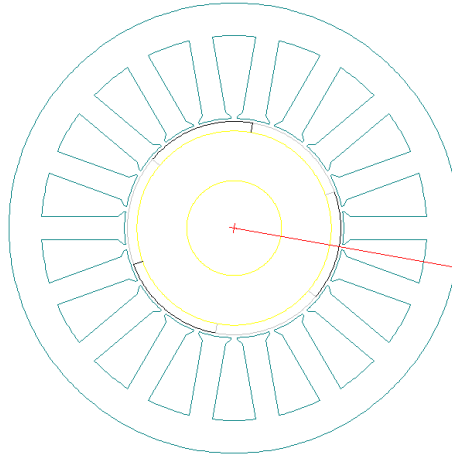


Şekil 3.17 : Akı dağılımı.

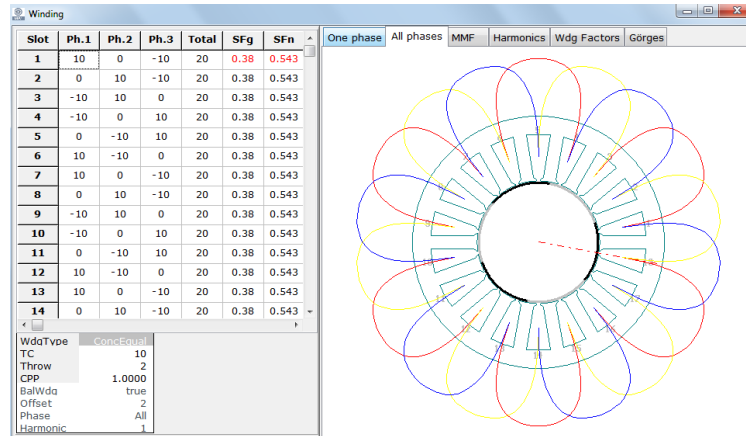
Bu tasarımda motor vuruğu momentinin tepe değeri 0,55 Nm'dir. Bu değeri nominal momentin yaklaşık %20'sine takaböl eder, çok iyi bir değeri olmamasına rağmen vuruğu momenti kabul edilebilir sınırlar dahilindedir. Stator ve rotor akı yoğunluklarını incelediğimizde kullanılan malzemenin doyum noktasına ulaşmadığı rahatlıkla söylenilebilir. Bu da sac malzeme üzerindeki akı yoğunluğundan oluşacak kayıpları en aza indirmişti. Eğer sac malzeme doyuma ulaşırsa malzemenin yüksek akı yoğunluğundaki davranışı değışiklik gösterir bu da hesaplanamayan, öngörölemeyen ilave kayıpları oluşturur.

3.3.2 6 kutuplu 18 oluklu tasarım

6 kutuplu 18 oluklu motor geometrisi ve sargı yapısı şekil 3.18 ve şekil 3.19'da görölmektedir. Oluk doluluk oranı bu tasarımda %38 olarak belirlenmiştir ve bu değeri motor üreticileri için uygulanabilir bir değerdir. Bu tasarımda bir oluktaki toplam sarım sayısı 20'dir.

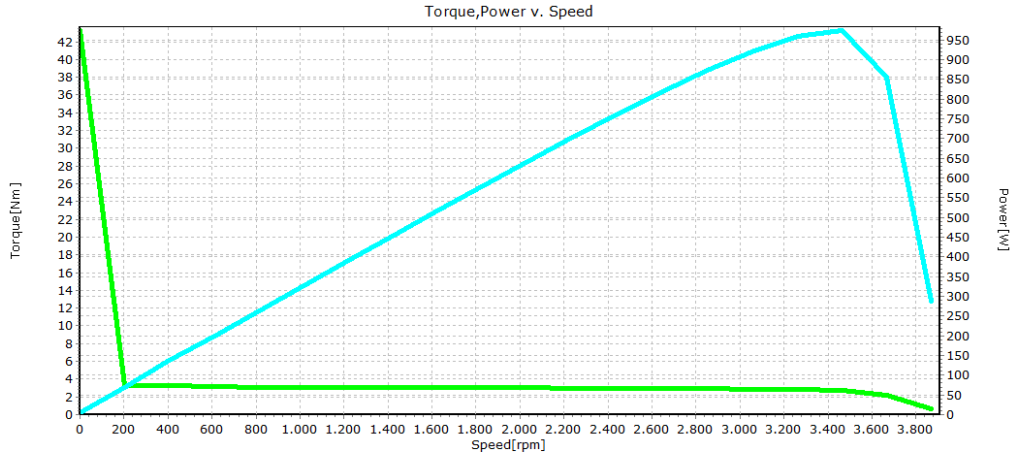


Şekil 3.18 : 6 kutuplu 18 oluklu motor geometrisi.

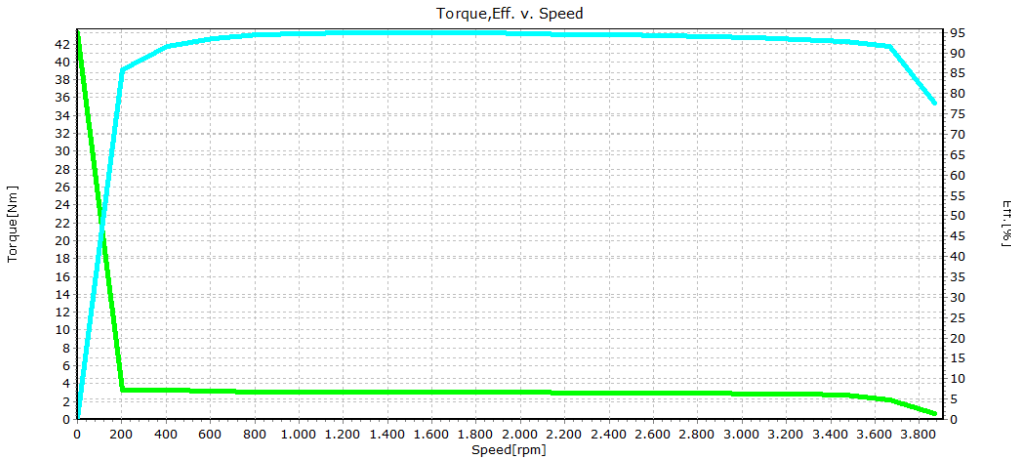


Şekil 3.19 : 6 kutuplu 18 oluklu motor sargı şeması.

Şekil 3.20’de motorun moment, gücü ve hızı arasındaki bağıntı, Şekil 3.21’de ise motorun moment, verimi ve hızı arasındaki bağıntı görülmektedir.



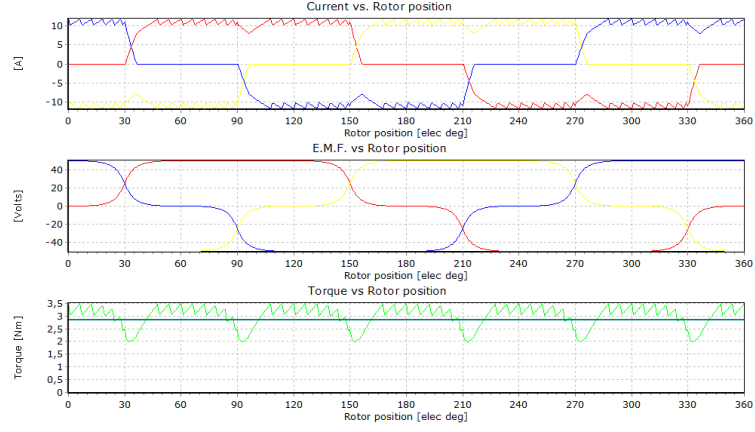
Şekil 3.20 : 6 kutuplu 18 oluklu motor moment, güç, hız arasındaki bağıntı.



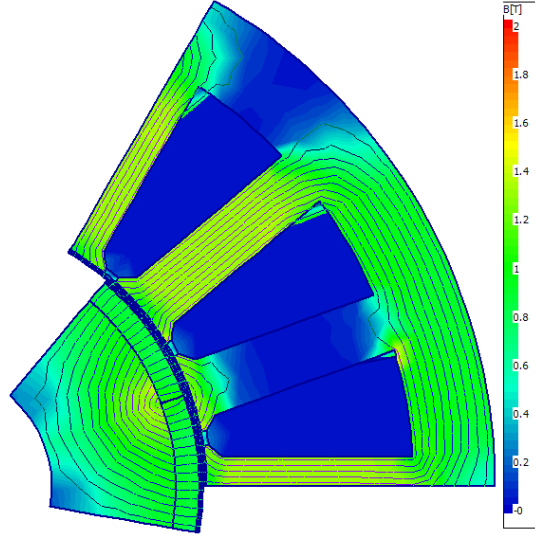
Şekil 3.21 : 6 kutuplu 18 oluklu motor moment, verim, hız arasındaki bağıntı.

Bu tasarım çıktılarında da görüldüğü gibi motor hızı 3400 min^{-1} civarlarında olduğunda güç en yüksek değerine ulaşmaktadır ve moment değeri bu devire kadar sabit olup bu devirden yüksek değerlerde düşmektedir. Aynı şekilde moment gibi verimde de benzer değişim söz konusudur.

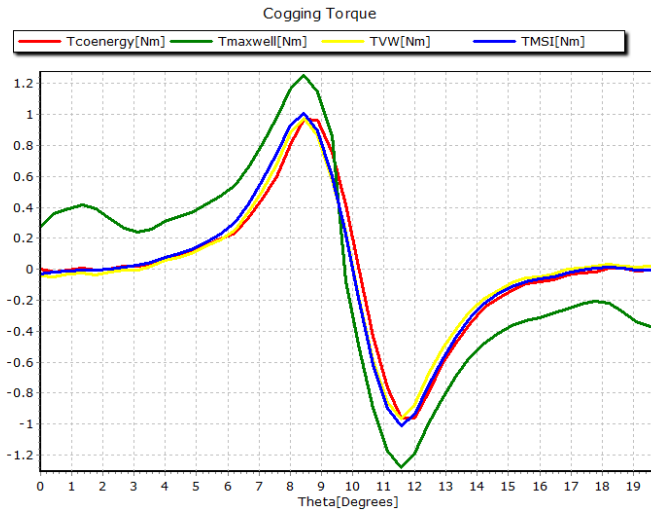
Şekil 3.22’de rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri görülmektedir. SEA yönteminin uygulanması ile Şekil 3.23’de ise hava aralığının akı yoğunluğunun dağılımı, Şekil 3.24’te vuruntu momentinin değişimi, Şekil 3.25’te ağ yapısı ve Şekil 3.26’da motor akı dağılımı görülmektedir.



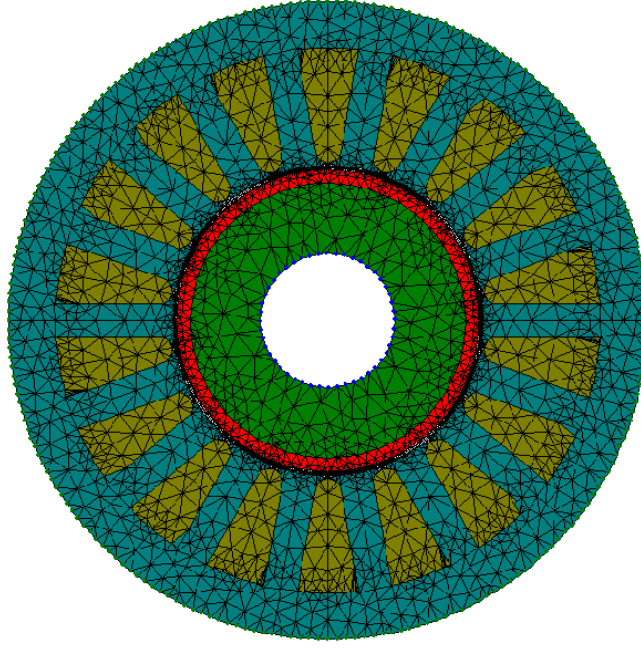
Şekil 3.22 : 6 kutuplu 18 oluklu motor rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri.



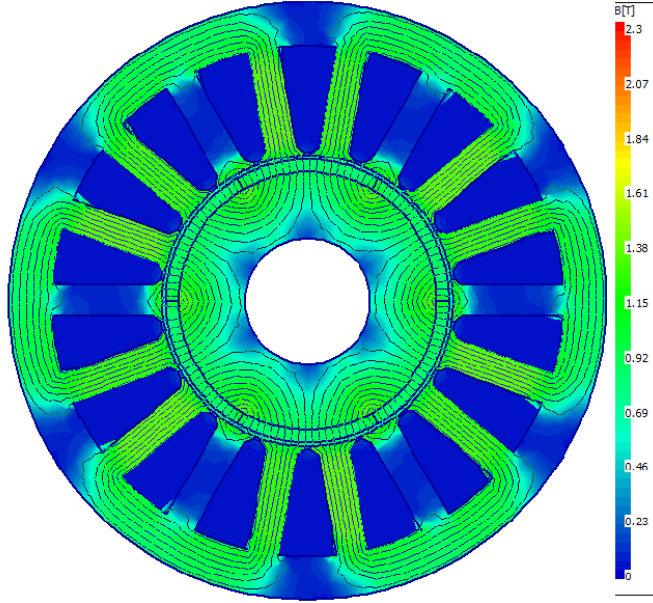
Şekil 3.23 : 6 kutuplu 18 oluklu motor hava aralığı akı yoğunluğunun dağılımı.



Şekil 3.24 : 6 kutuplu 18 oluklu motor oluk adımındaki vuruntu momenti.



Şekil 3.25 : 6 kutuplu 18 oluklu motor SEA ağ yapısı.



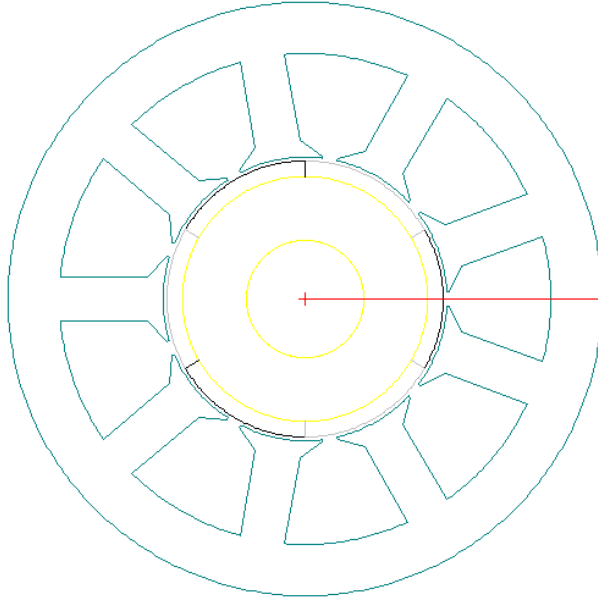
Şekil 3.26 : 6 kutuplu 18 oluklu motor akı dağılımı.

Bu tasarımda akı yoğunlukları normal değerlerde olduğu gözlenmiştir, ancak vurutu momenti incelendiğinde motor nominal momentin %40'ı değerlerinde olduğu görülmektedir. Bu değer ile motor bir miktar gürültülü çalışacağı öngörülebilir. Aynı zamanda moment dalgalanmasının yüksek olması beklenir.

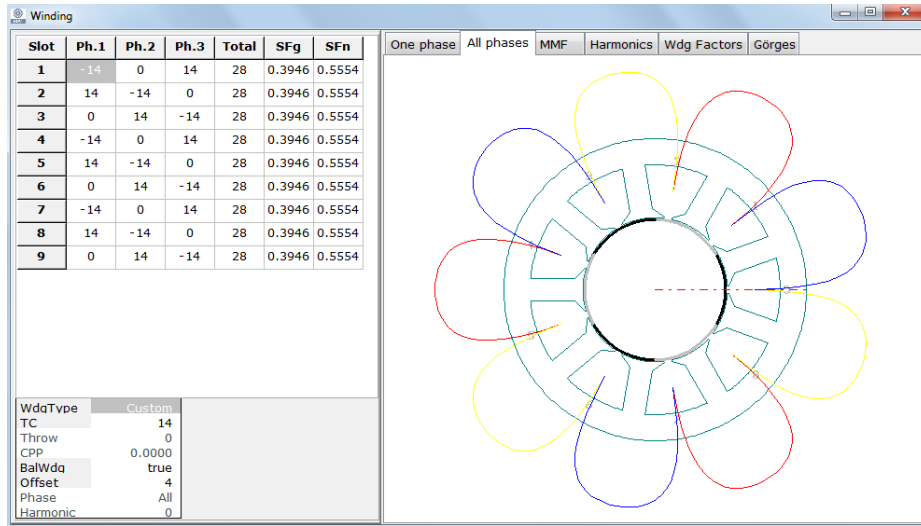
SEA analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi motor laminasyonları doyuma yakın bir değerde olmasına rağmen doyuma ulaşmamıştır. Bu sebepten de akı dağılımı açısından motorun rahat olduğu söylenebilir.

3.3.3 6 kutuplu 9 oluklu tasarım

6 kutuplu 9 oluklu motor tasarımının geometrisi Şekil 3.27’de, motor sargı yapısı ise Şekil 3.28’de görülmektedir. Bu tasarımda oluk doluluk oranı yaklaşık %40 değerindedir. Bir oluktaki toplam sarım sayısı ise 28’dir.

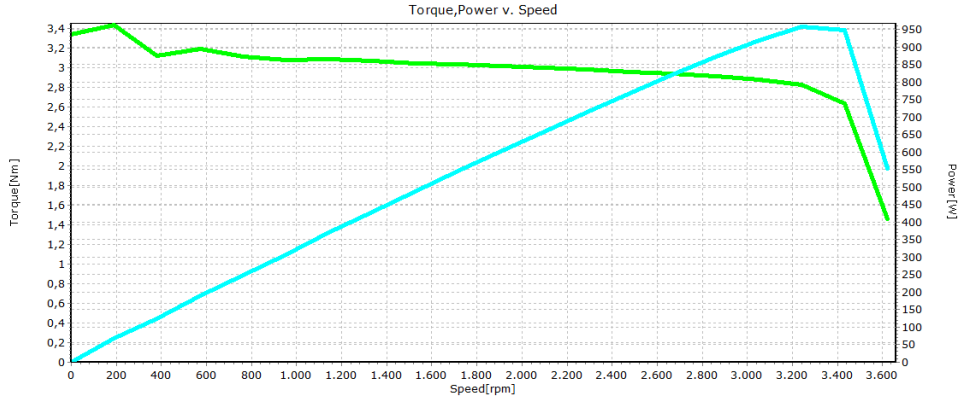


Şekil 3.27 : 6 kutuplu 9 oluklu motor geometrisi.

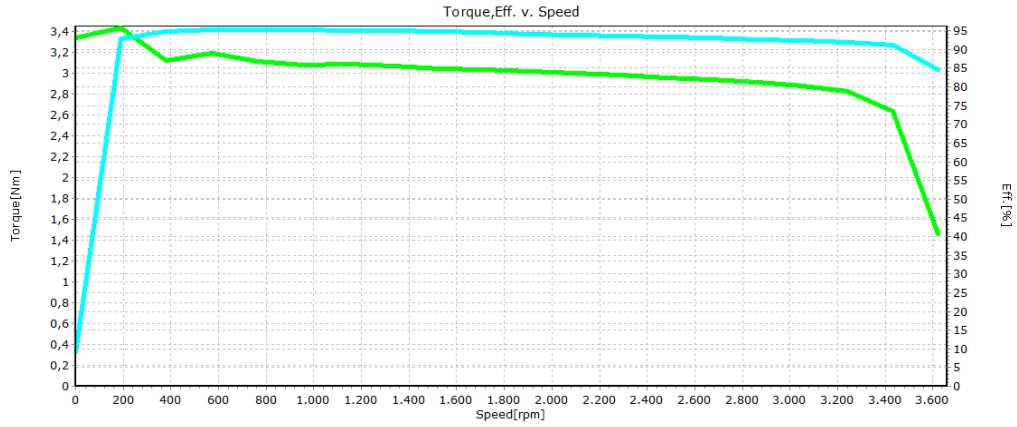


Şekil 3.28 : 6 kutuplu 9 oluklu motor sargı yapısı.

6 kutuplu 9 oluklu motorun moment, verim ve hız ile moment, güç ve hız bağıntıları Şekil 3.29 ve 3.30’den görülmektedir.

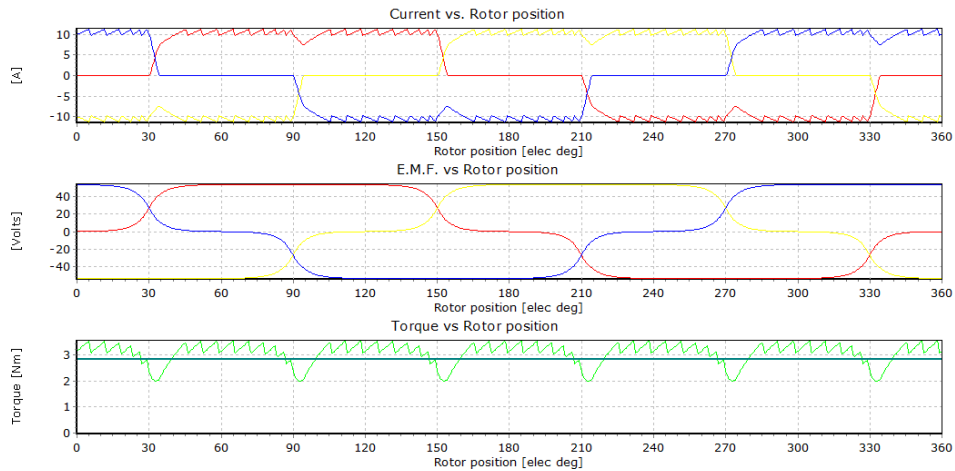


Şekil 3.29 : 6 kutuplu 9 oluklu motor moment, güç, hız bağıntısı.

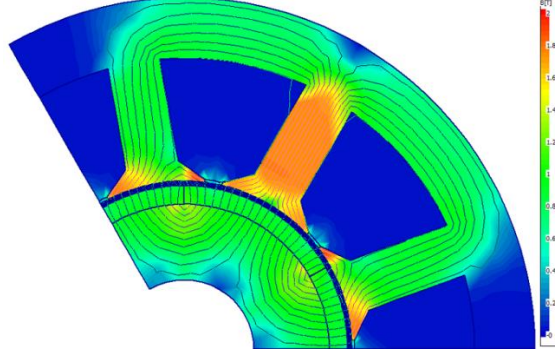


Şekil 3.30 : 6 kutuplu 9 oluklu motor moment, verim, hız bağıntısı.

Bu tasarım çıktılarında da motor verim, güç ve hız diğer tasarımlarla benzer özellikte olduğu görülmektedir. Şekil 3.31’de rotor konumuna göre akım gerilim ve moment değişimleri görülmektedir. Şekil 3.32’de motorun SEA yöntemiyle oluşturulan hava aralığı akı yoğunluğunun dağılımı görülmektedir.

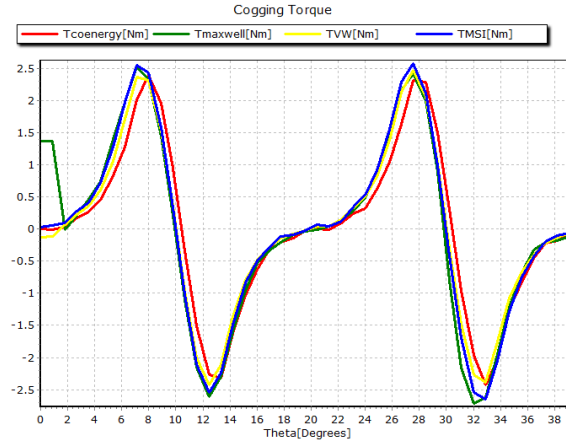


Şekil 3.31 : 6 kutuplu 9 oluklu motor rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri.

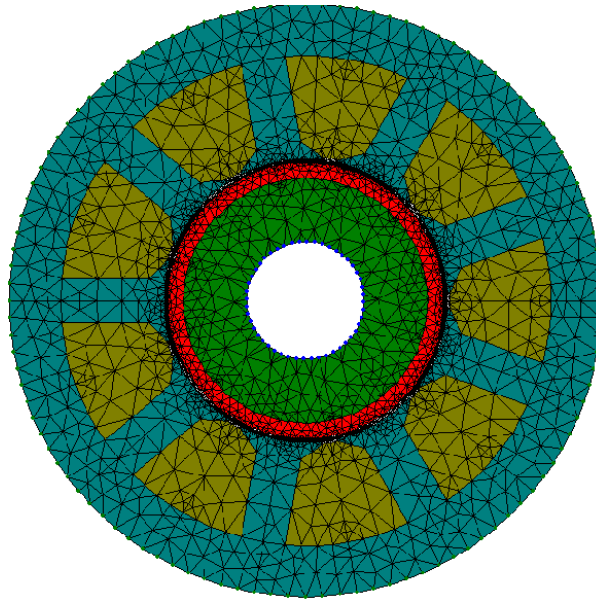


Şekil 3.32 : 6 kutuplu 9 oluklu motor hava aralığı akı yoğunluğunun dağılımı.

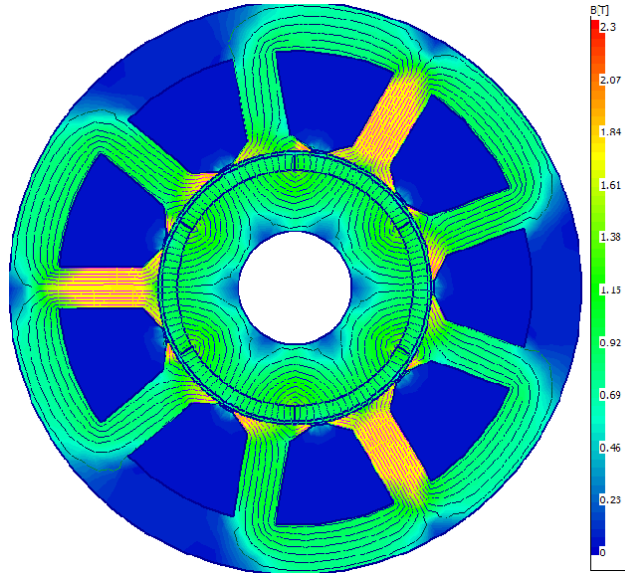
Şekil 3.33’de SEA yöntemiyle oluşturulan vuruntu momentinin değişimi görülmektedir. Şekil 3.34’te SEA ağ yapısı, Şekil 3.35’te ise motor akı dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.33 : 6 kutuplu 9 oluklu motor vuruntu momentini.



Şekil 3.34 : 6 kutuplu 9 oluklu motor SEA ağ yapısı.



Şekil 3.35 : 6 kutuplu 9 oluklu motor akı dağılımı.

Elektrik motor tasarımında kullanılan SPEED yazılımı ile fırçasız doğru akım motoru tasarımları gerçekleştirilmiştir. Gerekli devir ve momenti sağlayan farklı oluk ve kutup sayıları üzerine tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 6 kutuplu 9 oluklu, 6 kutuplu 18 oluklu ve 4 kutuplu 12 oluklu tasarımlar gerçekleştirilmiş ve tasarımların karşılaştırılması Çizelge 3.13’de gösterilmiştir.

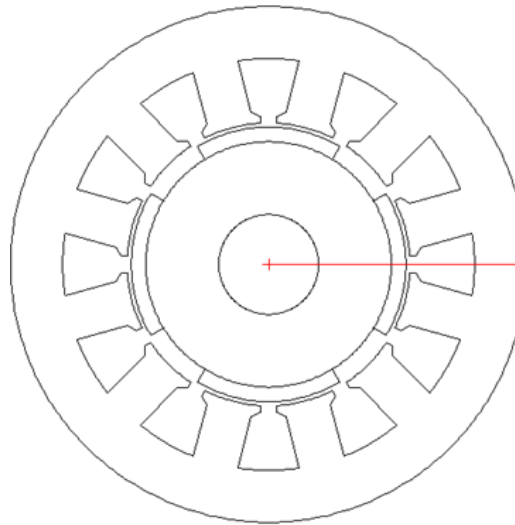
Çizelge 3.13 : Tasarlanan motorların karşılaştırması.

	4-12	6-18	6-9
Kutup Sayısı	4	6	6
Oluk sayısı	12	18	9
Rotor yarıçapı (mm)	36	36	40
Mil yarıçapı (mm)	12	16	17
Hava Aralığı(mm)	2	1	1,1
Mıknatıs Kalınlığı (mm)	3,5	3,2	4,5
Mıknatıs açısı	180	180	180
Stator dış yarıçapı (mm)	68	76	86
Oluk derinliği (mm)	19	28	30
Diş kalınlığı (mm)	10	8	10
Oluk açıklığı	4	2	4
Paket Boyu (mm)	30	43	30
Sarım sayısı	25	10	25
Atlatılan oluk sayısı	2	2	2
Verim (%)	94	93	92
Vuruntu momenti (Nm)	0,55	1,2	2,5

Bu karşılaştırma sonucunda mevcut tasarımların hepsi istenilen devir sayılarında istenilen momentleri ürettiği görülmüştür. Bunun yanında tasarımlar arasında ufak farklılıkları gözlemlemek gerekmektedir bunlar üretilme kolaylığı, temin edilebilme kolaylığı, vuruğu momenti sonucu gürültü yapabilmek olasılığı vb. Bu özellikler gözden geçirilerek en uygun tasarımın 4 oluklu 12 kutuplu tasarım olduğuna karar verilmiş ve motor üretim aşamalarına geçilmiştir. Motor imalatında üretici firma ile motor gövde çapının ve rotor çapının bir miktar düşürölmesi ile daha kısa zamanda motor gövdesi yapılabileceğine karar verilmiş ve bu motor tasarımı revize edilmiştir. Revize edilen motorda mıknatıs açılarını düşürölerek vuruğu momenti minimize edilmiştir (0,55 Nm tepe değeri olan vuruğu momenti 0,12 değerine gerilemiştir.). Motor tasarım programı tarafından SEA gerçekleştirilerek akı yoğunlukları tespit edilmiş özellikle stator dişlerindeki akı yoğunlukları rahatlatılmıştır. Motor demir kayıpları açısından en az hale getirilip en yüksek verim değerine ulaşılmıştır.

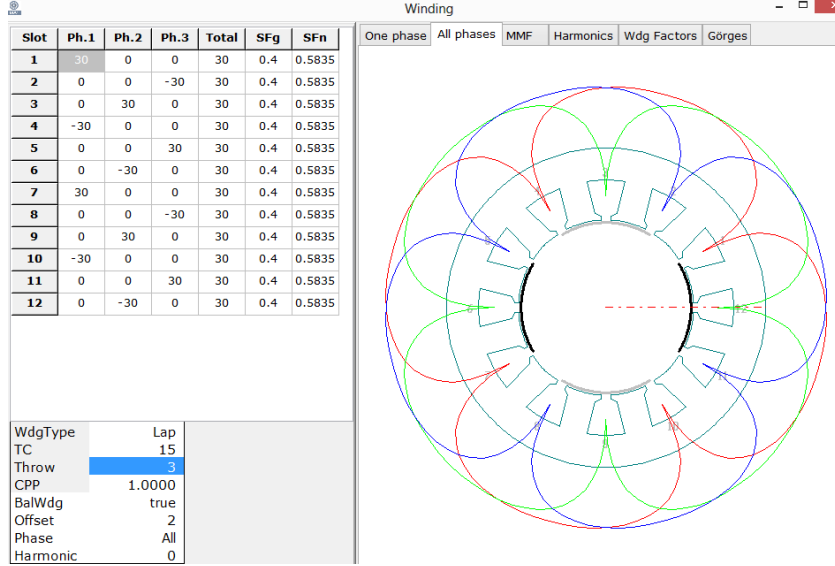
3.3.4 İmal edilecek olan motorun tasarım iyileştirilmesi

4 kutuplu 12 oluklu motor üretici firmadan gelen geribildirim ile stator çapı 136 mm'den 124 mm'ye inmesi istenmiş bu sayede üretilecek motorun gövde yapısıyla mevcut üretim planında bulunan motor gövdeleriyle aynı olmasından daha uygun fiyata ve daha hızlı bir şekilde üretilebileceği belirtilmiştir. Buna istinaden motor stator yarıçapı 124 mm'ye düşürölmiş ve paket boyu mıknatıs açısı gibi parametreler istenilen devir ve moment değerine göre optimize edilmiştir. Şekil 3.36'da iyileştirilmiş motor geometrisi görölmektedir.

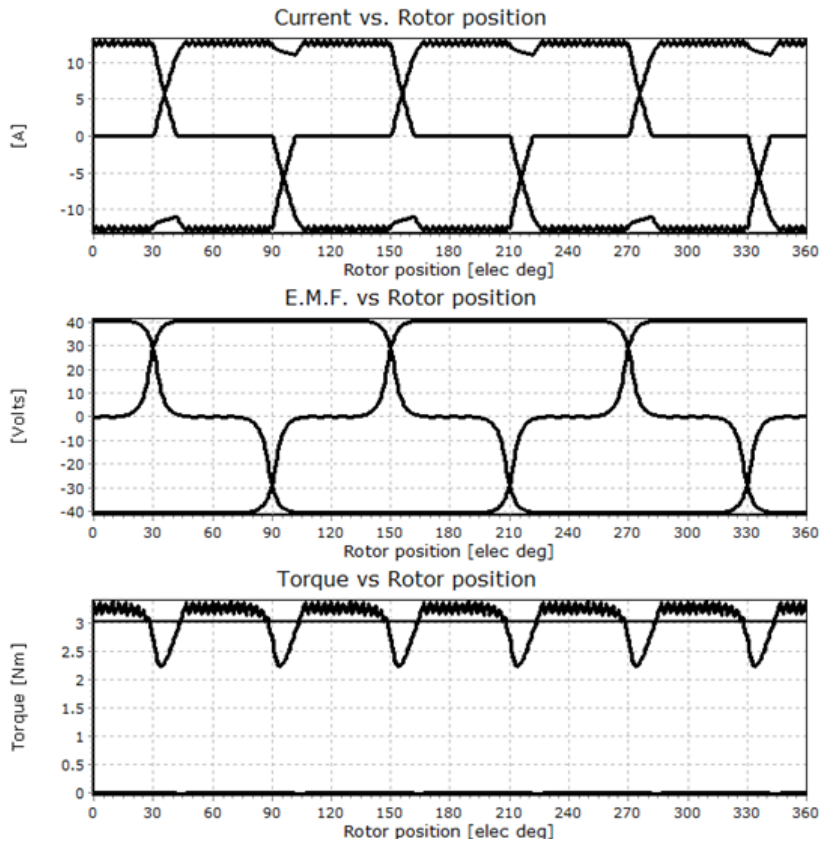


Şekil 3.36 : İyileştirilmiş motor geometrisi.

İyileştirilmiş motorun sargı yapısı Şekil 3.37’de görülmektedir. Bu tasarımda vuruntu momentini azaltmak için mıknatıs açı değeri düşürülmüştür. Oluk doluluk oranı ise %40 mertebelerindedir. Rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri Şekil 3.38’de görülmektedir.

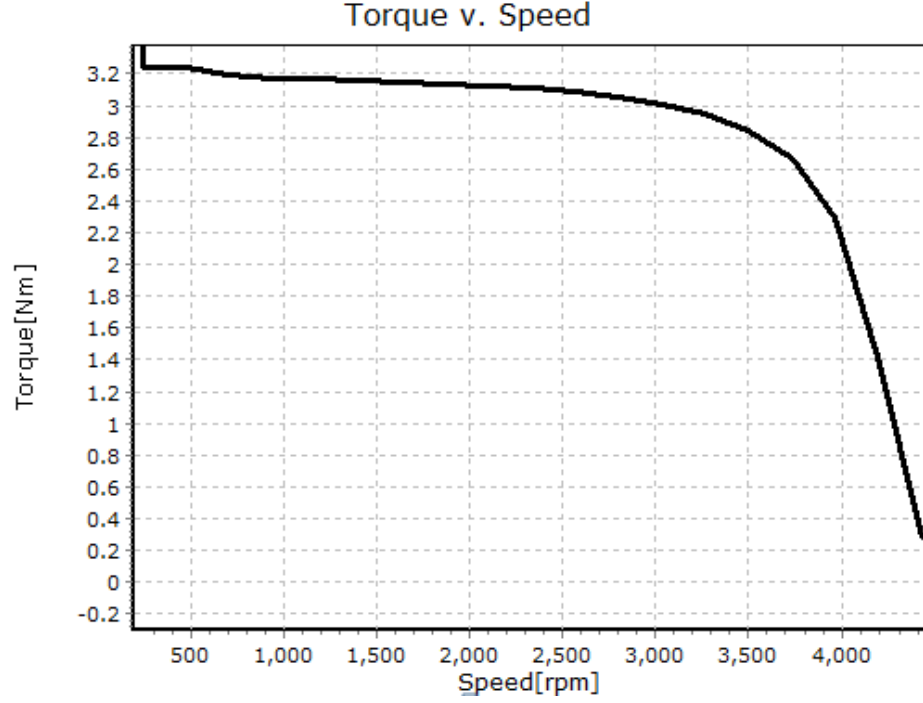


Şekil 3.37 : İyileştirilmiş motor sargı yapısı.

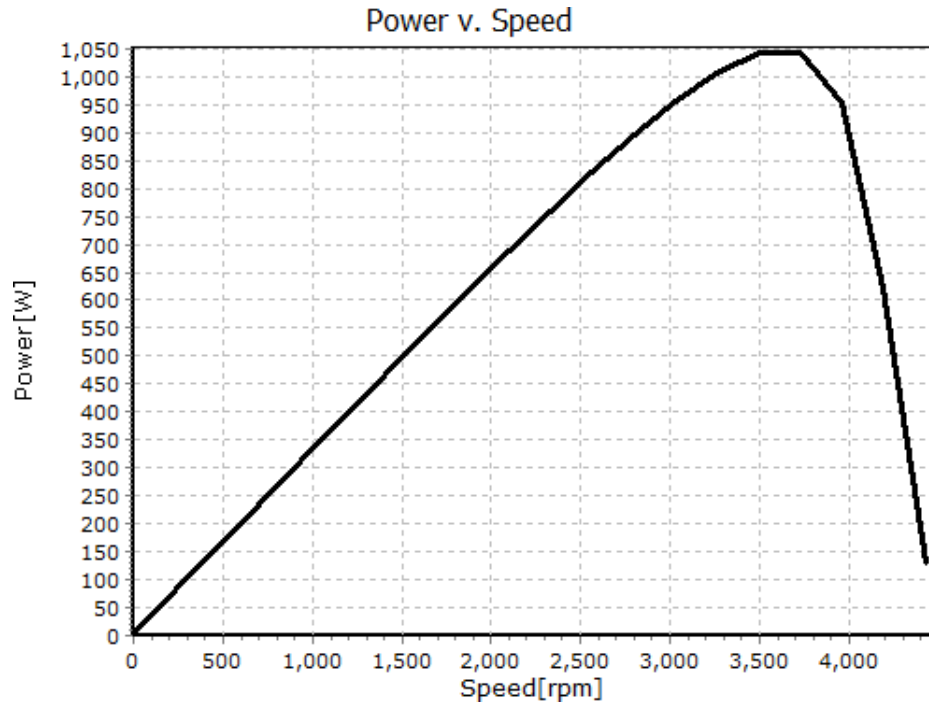


Şekil 3.38 : İyileştirilmiş motor rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment değişimleri.

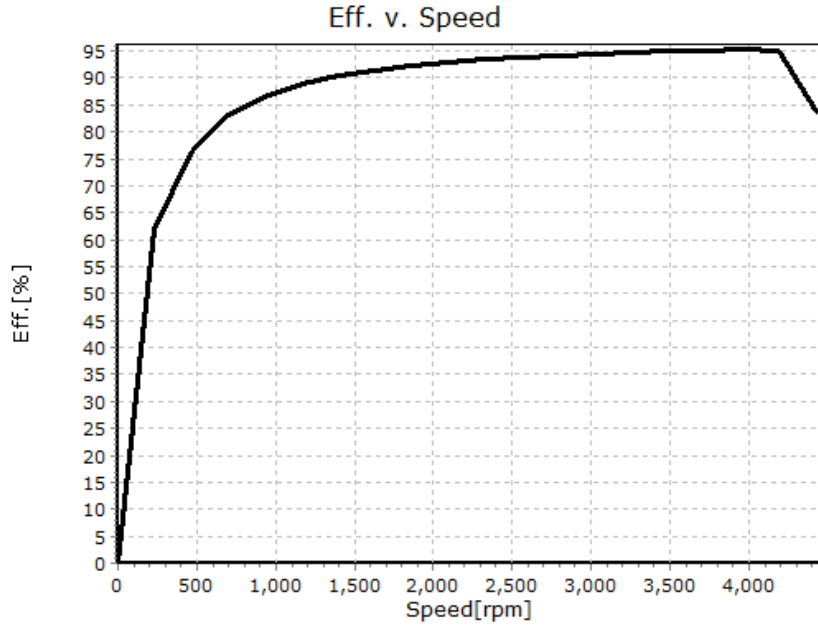
İyileştirilmiş tasarım ile motor moment, hız güç ve verim değerleri Şekil 3.39, Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de görülmektedir. Motor 3500 devir değerlerinde en yüksek noktalarına ulaşır ve bu değerden sonra düşüşler başlar.



Şekil 3.39 : İyileştirilmiş motor moment hız eğrisi.

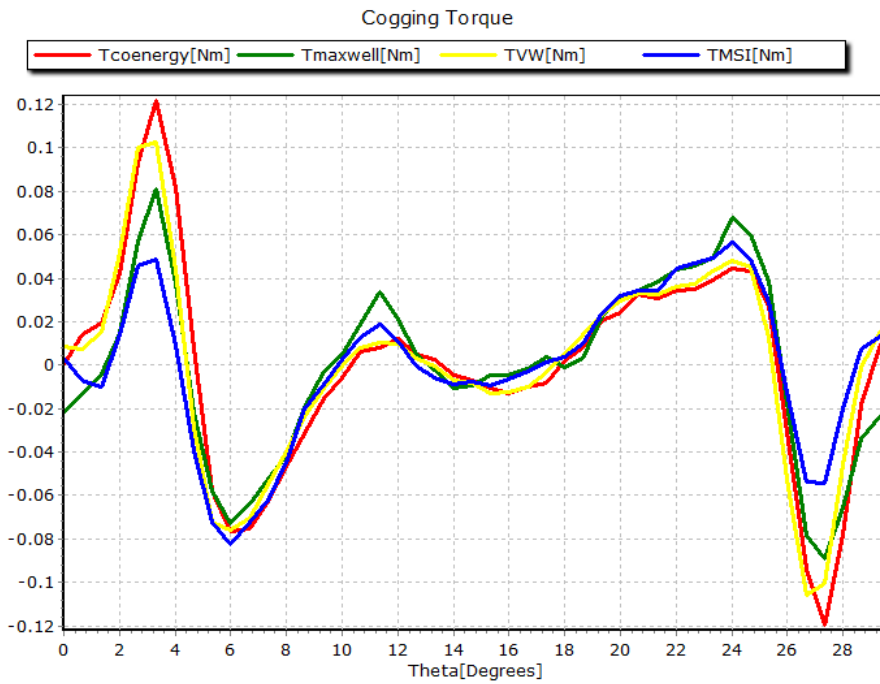


Şekil 3.40 : İyileştirilmiş motor güç hız eğrisi.



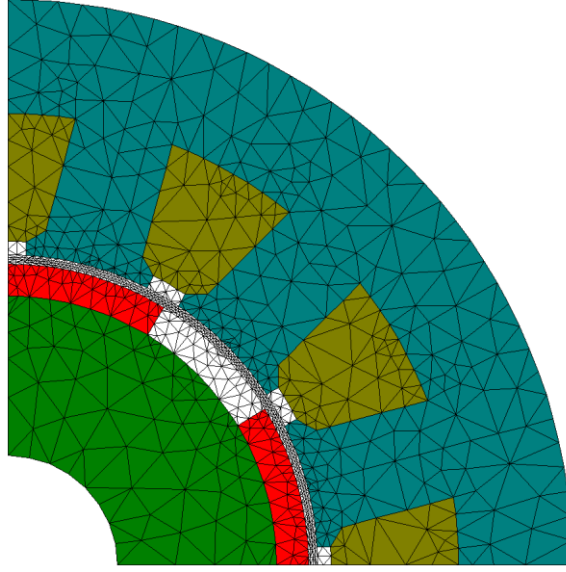
Şekil 3.41 : İyileştirilmiş motor veim hız eğrisi.

Vuruntu momentini azaltmak için ilk önce kaykı etkisiyle analiz yapılmıştır. Ancak SPEED-SEA programı kaykı etkisinin ağ yapısını oluşturamadığı tespit edilmiştir. Bu sebepten vuruntu momentini azaltmak için diğer yöntemlere geçilmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi de mıknatıs açısını değiştirmektir. Mıknatıs açısının değişimiyle vuruntu momentinin çok düşük değerlere indiği Şekil 3.42’de görüldüğü gibi gözlemlenmiştir.

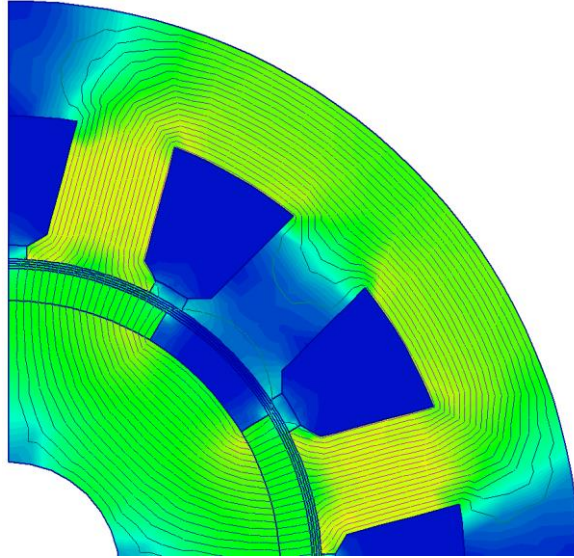


Şekil 3.42 : İyileştirilmiş motor bir oluk adımındaki vuruntu momenti.

İyileştirilmiş motor SEA ağ yapısı Şekil 3.43’de, hava aralığı akı dağılımı ise Şekil 3.44’de görülmektedir.



Şekil 3.43 : İyileştirilmiş motor SEA ağ yapısı.



Şekil 3.44 : İyileştirilmiş motor hava aralığı akı dağılımı.

İyileştirilmiş tasarımda da akı dağılımları istenilen seviyede ve laminasyon sacı doyum noktasına ulaşmamıştır. Bu da motorun ürettiği akının rahatlıkla akmasını sağlar.

İyileştirilmiş tasarım ile ilk tasarım çıktıları karşılaştırılmış ve Çizelge 3.14’te ortaya konulmuştur. İyileştirilmiş motor tasarımı ile yeni motorun daha önceki tasarlanan motorlarla benzer moment, hız, güç ve verim özelliğinde olduğu söylenebilir. Ancak

iyileştirilmiş tasarımın vuruğu momentinde ciddi şekilde düşüş oluşturduğu görülmüştür.

Çizelge 3.14 : İyileştirilmiş hal ve ilk tasarım karşılaştırması.

	İlk tasarım	İyileştirilmiş hal
Kutup Sayısı	4	4
Oluk sayısı	12	12
Rotor yarıçapı (mm)	36	33
Mil yarıçapı (mm)	12	12
Hava Aralığı(mm)	2	1
Mıknatıs Kalınlığı (mm)	3,5	3,5
Mıknatıs açısı	180	125
Stator dış yarıçapı (mm)	68	62
Oluk derinliği (mm)	19	15,5
Diş kalınlığı (mm)	10	11
Oluk açıklığı	4	4
Paket Boyu (mm)	30	44
Sarım sayısı	25	15
Atlatılan oluk sayısı	2	3
Verim (%)	94	94
Vuruğu momenti (Nm)	0,55	0,12

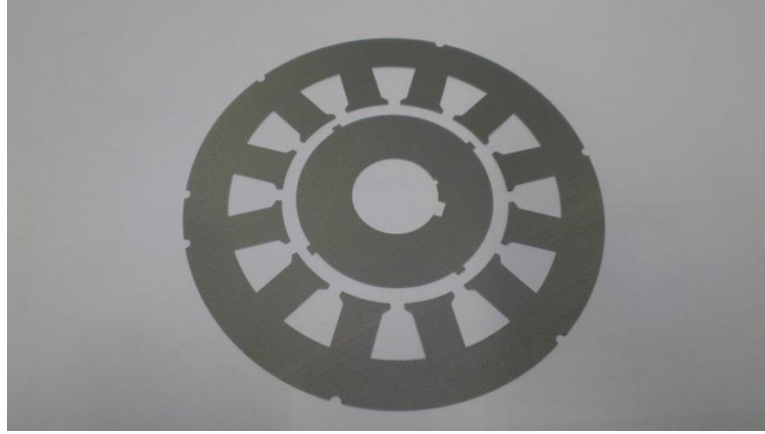
3.4 Tasarlanan Motorun İmalatı

Devridaim sistemleri için tasarlanan FDAM Akım Metal firmasında imal edilmiştir.

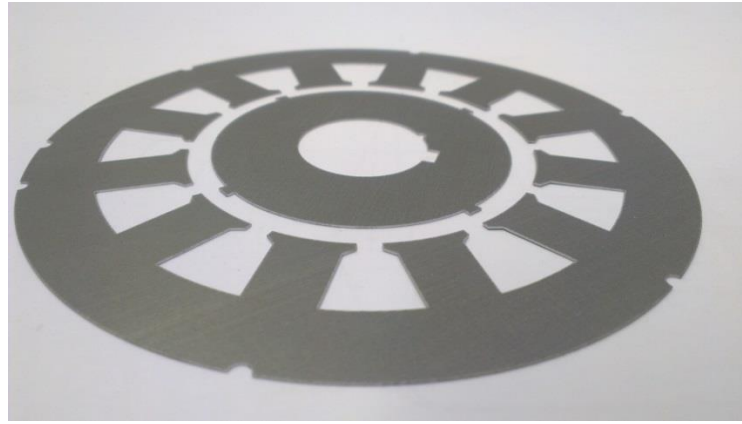
3.4.1 Motor üretiminde uygulanan yöntemler

Üretim çalışmalarında rotor ve stator sac malzemeleri motor prototip üretimlerinde kullanılan yüksek hızlı fiber lazer kesim cihazı ile Şekil 3.45 ve Şekil 3.46’da görüldüğü gibi kesilmiştir. Bu kesim yöntemi ile yüksek hızlarda kesim yapabildiği için malzemenin manyetik özelliğini olumsuz etkileyecek sıcaklık ve sac malzemede yanıklar oluşmamaktadır.

Stator ve rotor laminasyon sacları oluşturulan fiktür ile biraraya getirilerek lazer kaynak yapılarak stator ve rotor paketleri Şekil 3.47 görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Yapılan lazer kaynağı yine aynı şekilde yüksek hızlarda uygulanmıştır. Bu sayede manyetik özellikteki laminasyon malzemelerinde sıcaklık nedeniyle oluşabilecek olumsuz etki engellenmiştir.



Şekil 3.45 : Stator ve rotor laminasyon sacı fiber lazer kesim sonrası (1).



Şekil 3.46 : Stator ve rotor laminasyon sacı fiber lazer kesim sonrası (2).



Şekil 3.47 : Oluşturulmuş stator paketi.

Rotor paketi kama yardımıyla Şekil 3.48’de görüldüğü gibi mile işlenmiştir. Mıknatıslar, bu tip mıknatıslı motorlarda kullanılan ve yüksek hızlarda kalitesi test

edilmiş özel yapıştırıcı ile Şekil 3.49’da görüldüğü gibi rotora yapıştırılmıştır. Bu yapıştırıcı malzeme rotor ile mıknatıs arasında bir mesafe bırakmazlar yani bir hava aralığı oluşturmazlar ve genellikle çift malzemeli yapıştırıcılardır. Yapıştırıcının bir malzemesi rotora diğer malzemesi de mıknatısa sürülür ve bir süre sonra yapıştırma işlemi gerçekleştirilir. Yapıştırma işleminde önemli olan kutupları sırasıyla yapıştırmak ve yüksek çekim kuvvetine sahip mıknatısları rotorda yuva oluşturduktan sonra yapıştırma işlemini gerçekleştirmektir. Aksi takdirde yüksek çekim kuvveti olan mıknatıs istenilen yere yapışmayabilir bir miktar sapma oluşabilir bu da istenmeyen bir durum oluşturabilir.

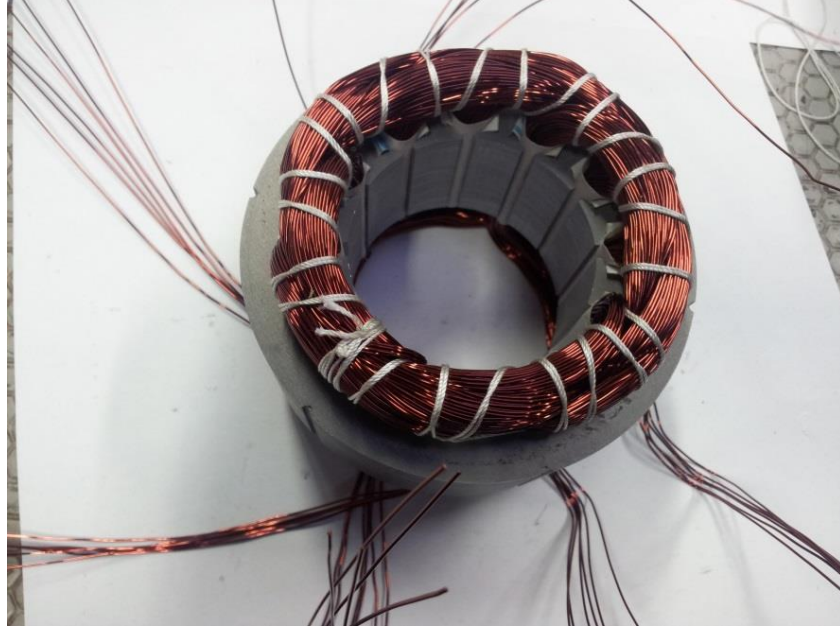


Şekil 3.48 : Oluşturulmuş rotor paketi ve mil.



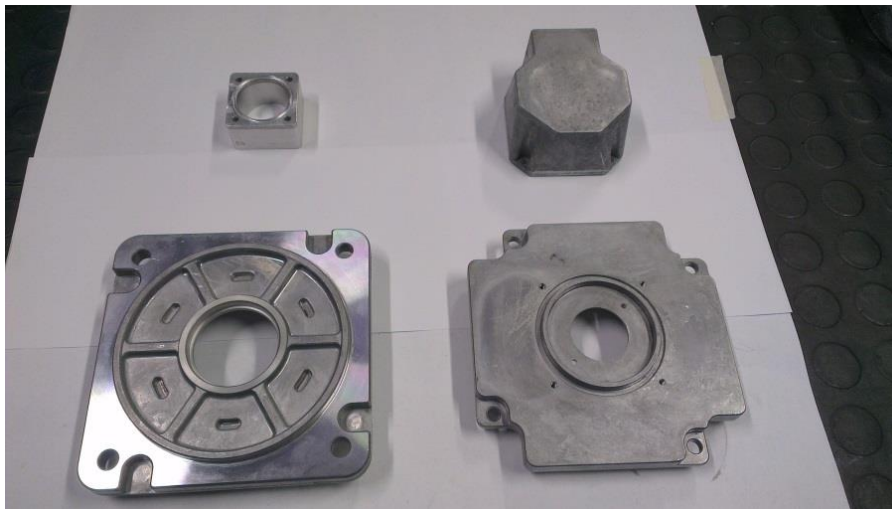
Şekil 3.49 : Rotor paketine mıknatısların yapıştırılması.

Stator 1,7 mm çaplı tel ile oluklara 15 sarım sarılacak şekilde tasarlanmıştır ancak bu kadar kalın bir teli stator oluklarına sarmak zor bir işlemdir. Bu işlemi kolaylaştırmanın yolu da paralel sargı oluşturup tel kesitini düşürmek ancak paralellikten dolayı toplam tel kesitinin aynı kalmasını sağlamaktır. Şekil 3.50’de stator sargı yapısı görülmektedir. Stator sargı telinin koruma sınıfı H’tır. H koruma sınıfı ile teller 180 °C’ye kadar dayanır.

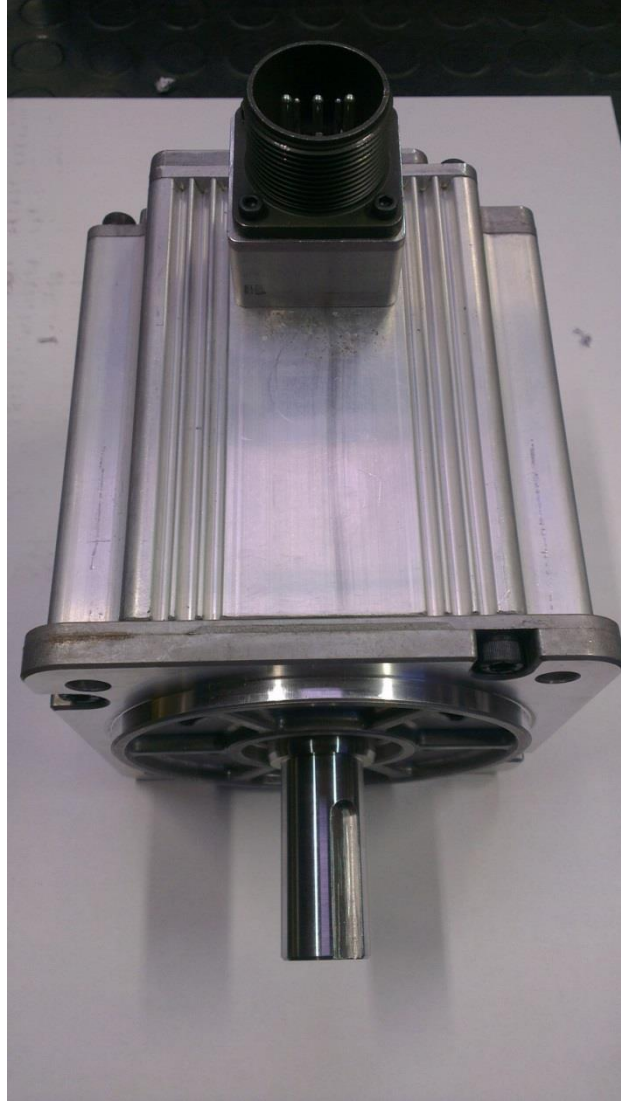


Şekil 3.50 : Stator sargı yapısı.

Şekil 3.51’de görülen motor kapakları Şekil 3.52 ve Şekil 3.53’de görüldüğü gibi monte edilmiş ve tasarlanan motor üretimi bitirilip tamamlanmıştır. Böylelikle motor test edilmeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.51 : Motor kapakları.



Şekil 3.52 : Tamamlanmış motor (1).



Şekil 3.53 : Tamamlanmış motor (2).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Üretimi gerçekleştirilen motor tasarım sonuçlarıyla gerçek değerlerinin karşılaştırılması diğer deyişle tasarım doğrulaması yapılabilmesi için test edilmektedir. Bu testler vuruuntu momenti ölçümü, zıt-EMK ölçümü ve yükleme testlerini oluşturmaktadır.

4.1 Vuruuntu Momenti

FDAM'ların yapısında mıknatıs bulunduğu için vuruuntu momenti, en büyük problemidir [20]. Mıknatıslar ile stator laminasyonu arasındaki ilişki vuruuntu momentini oluşturur. Vuruuntu momenti de gürültü ve titreşime neden olabilir [21]. Vuruuntu momentinin matematiksel analizi denklem 4.1'den hesaplanır [22];

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (4.1)$$

T_{cog} =vuruuntu momenti

ϕ = hava aralığından geçen akı

R = akının geçtiği toplam relüktans

θ =Açı

Vuruuntu momentini azaltmak için manyetik akıyı (ϕ) veya $\frac{dR}{d\theta}$ 'yi azaltmak gerekmektedir. Ancak manyetik akıyı azaltmak motor performansını olumsuz etkileyeceğinden dolayı $\frac{dR}{d\theta}$ 'yi azaltmak vuruuntu momentini düşürmede en uygun yöntemdir [10].

Mıknatıslı motorlardaki moment kalitesinin incelenmesi çoğu araştırmacının ilgi alanı olmuştur. Moment kalitesinin iki ana bileşeni vardır, bunlar moment salınımı ve vuruuntu momentidir. Vuruuntu momentini azaltmak için bazı bilinen teknikler,

oluklara kayk\u0131 uygulanması, mıknatısa kayk\u0131 uygulanması veya mıknatıs \u015feklinin de\u011fi\u015ftirilmesi, mıknatıs veya rotorun iletilemesidir [23].

4.1.1 Tasarım yapılan motorda vurunu momentini d\u00fc\u015f\u00fcrme \u00e7alı\u015fmaları

Tasarlanan motorda vurunu momentini d\u00fc\u015f\u00fcrmek i\u00e7in rotora 30° kayk\u0131 uygulanmış ve SPEED SEA mod\u00fcl\u00fcyle analizi yapılmıştır ancak bu analizde vurunu momentinin de\u011fi\u015fmedi\u011fi g\u00f6zlemlenmiştir. De\u011fi\u015fmeme nedeninin SPEED SEA mod\u00fcl\u00fcnde uygulanan kayk\u0131yı a\u011f yapısında olu\u015fturamaması oldu\u011fu d\u00fc\u015f\u00fcn\u00fclmektedir. Bu nedenle kayk\u0131 uygulayarak vurunu momentinin d\u00fc\u015f\u00fcr\u00fclmesi bu \u00e7alı\u015fmada uygun bir y\u00f6ntem olarak g\u00f6r\u00fclmemiştir. Bunun haricinde iyile\u015ftirilen motorda mıknatıs a\u00e7ısı k\u00fc\u00e7\u00fclt\u00fclerek SPEED-SEA mod\u00fcl\u00fcyle vurunu momenti incelenmiş ve mıknatıs a\u00e7ısı 180°'den 125°'ye d\u00fc\u015f\u00fcr\u00fcld\u00fc\u011f\u00fcnde vurunu momentinde ciddi bir d\u00fc\u015fme oldu\u011fu g\u00f6zlemlenmiştir. \u015ekil 3.15'de ilk tasarlanan 4 kutuplu 12 oluklu motorun vurunu momentinin de\u011fi\u015fimi g\u00f6r\u00fclmektedir. İlk tasarım \u00e7alı\u015ftırındaki vurunu momentinin tepe de\u011feri 0,55 Nm de\u011ferindedir. İyile\u015ftirilmiş motorun vurunu momenti de\u011fi\u015fimi de \u015ekil 3.42'de g\u00f6r\u00fclmektedir. Burda ise mıknatıs a\u00e7ısı 125°'deki vurunu momentinin tepe de\u011feri 0,12 Nm'lere d\u00fc\u015ft\u00fc\u011fu g\u00f6r\u00fclmektedir. Yakla\u015fık olarak %80 vurunu momentinin iyile\u015fmesi s\u00f6z konusudur.

4.2 Zıt-EMK

Fazların Zıt-EMK'larını \u00f6l\u00e7mek rotor pozisyonunu belirlemede kullanılan bir y\u00f6ntemdir. Bu y\u00f6ntem hem ucuzdur hem de karma\u015fık devre yapısı gerektirmez [24]. Zıt-EMK sıfır ge\u00e7i\u015f noktalarının belirlenmesiyle rotor pozisyonu belirlenir ve kom\u00fctasyon bu pozisyona g\u00f6re ayarlanır [25]. Bu y\u00f6ntemde kom\u00fctasyon i\u00e7in motor sargılarında 2 sargı grubuna enerji verildi\u011finde di\u011fer sargı grubu sadece zıt-EMK \u00fcretir, bu zıt-EMK'nın sıfır ge\u00e7i\u015f noktasının tespit edilmesi ile do\u011fru anahtarlanma ge\u00e7ekle\u015fi\u015f olur [26].

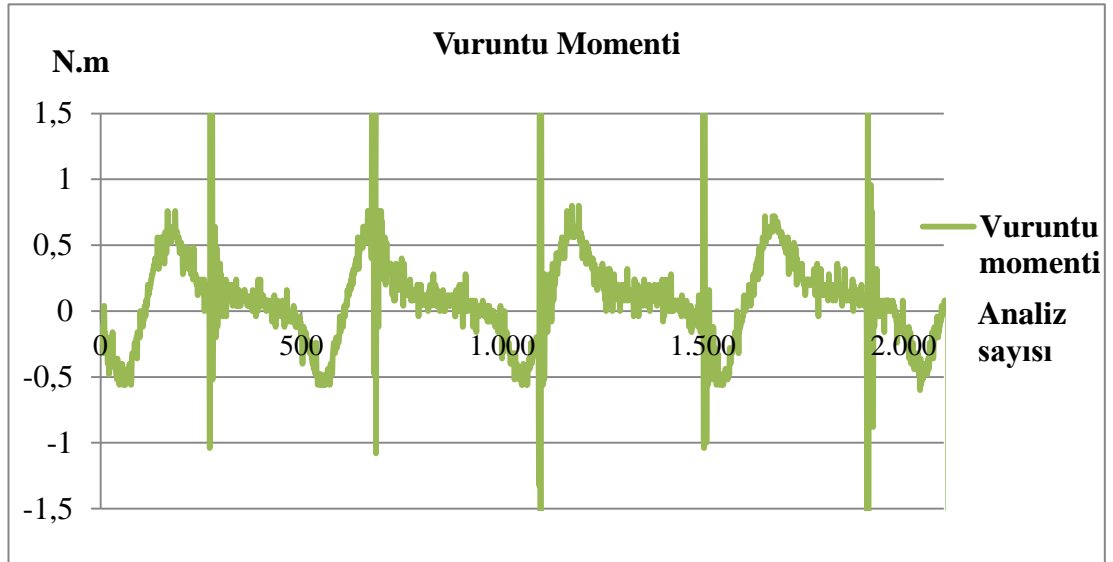
4.3 Üretim Yapılan Firma Tarafından Yapılan Deneysel Çalışmalar

4.3.1 Vuruntu momentinin deney sonucundaki değeri

Vuruntu momentinin motor üretimi sonucunda deneyi gerçekleştirilmiş. Motor düşük min^{-1} 'de döndürülmüş ve moment değişimi ölçülerek vuruntu momenti hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi vuruntu momentinin tepe değeri 0,6 Nm ölçülmüştür, bu değer iyileştirilmiş tasarımda SPEED-SEA ile analiz edilen değerden (0,12Nm) çok yüksek bir değerdir. Bu çizelgede, vuruntu momentinin ölçümünde ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültüler de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Vuruntu momenti ölçümleri



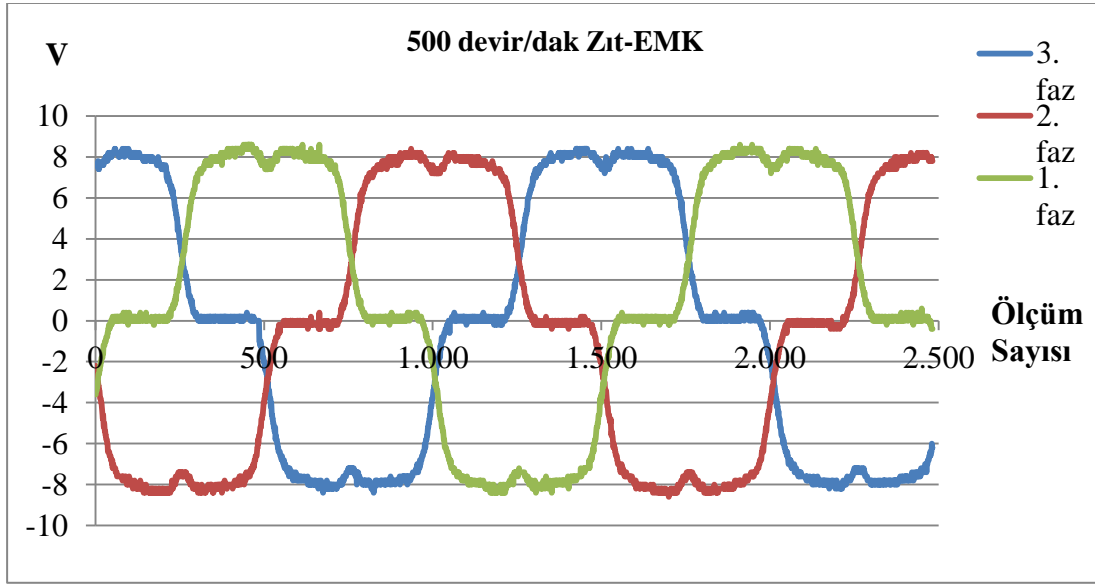
4.3.2 Zıt-EMK ölçümleri

Üretilen motor 500 min^{-1} 'de döndürülerek zıt-EMK ölçümleri yapılmıştır.

Zıt-EMK ölçümü ile motor kontrolünün doğru yapılması için önemli olmasının yanında sargı yapısının doğru oluşturulduğu da ortaya çıkarmaktadır [27].

Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere üretilen motorun Zıt-EMK ölçümleri düzgün dağılım göstermektedir. Bu da sargı yapısının düzgün olduğunu ve aynı zamanda motor kontrolü için elverişli Zıt-EMK olduğunu gösterir. Şekil 3.38'deki endüklenen gerilimin dalga şekli ile zıt-EMK dalga şekilleri trapezoidal şekilde birbirleri ile uyum göstermektedir.

Çizelge 4.2 : 500 devir/dak Zıt-EMK ölçümleri.



4.4 İTÜ Elektrik Makinaları Laboratuvarı'nda Yapılan Deneysel Çalışmalar

Tasarlanan motor ile üretilen motorun performans çıktıları arasındaki ilişki yapılan çalışmanın doğruluk yüzdesini belirleyecektir. Motor performansını ölçmek için İTÜ Elektrik Makinaları Laboratuvarı'nda deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu düzenek ile motor milindeki momentmetre yardımıyla moment ve devir sayısı ölçülerek motorun milindeki güç hesaplanacaktır. Devridaim sistemlerinde inceleme sonucunda belirlenen devir sayılarında istenilen moment değerine motor yüklenerek, o noktalardaki motor parametreleri ölçülecektir.

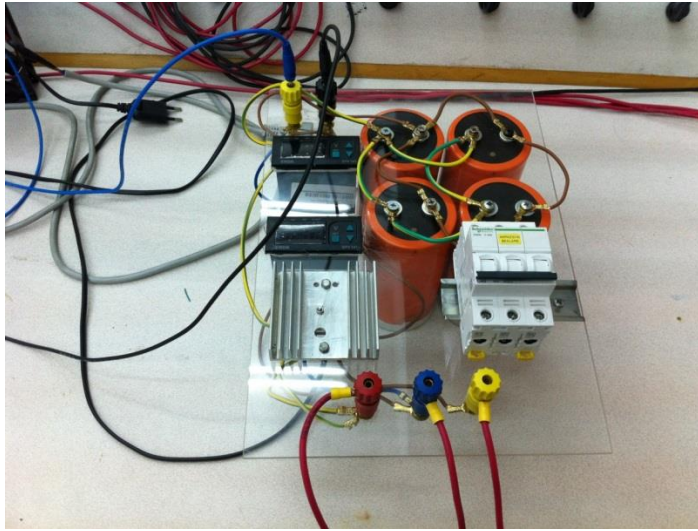
4.4.1 Motor deney düzeneğinin oluşturulması

Alınan Kelly KSL 96150 model motor sürücüsü beslemesi için 24 V- 96 V arası DA gerekmektedir. Bu sistem için laboratuvarında bulunan Şekil 4.1'de görülen ototrafo ve Şekil 4.2'de görülen doğrultucu devre tarafından beslenerek sürücü girişine istenilen gerilim sağlanmıştır.

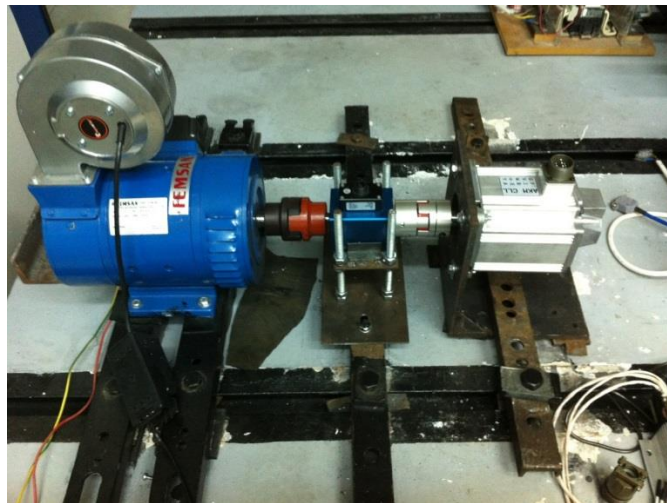
Şekil 4.3'de görüldüğü gibi motor test düzeneğine monte edilmiştir. Sürücü için de gerekli devre bağlantıları oluşturulup motor teste hazır hale getirilmiştir.



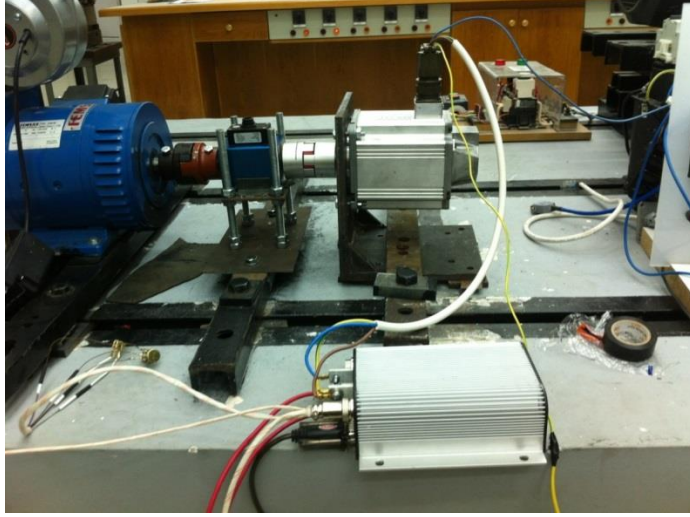
Şekil 4.1 : Ototrafo.



Şekil 4.2 : Doğrultucu devre.



Şekil 4.3 : Motorun sisteme monte edilmesi.



Şekil 4.4 : Sürücünün motora monte edilmesi.

Başarım analizinin yapılması için tüm sistem hazır hale getirilmiştir. Sürücünün parametreleri, bilgisayar yazılımı yardımıyla ayarlanmış ve motor çalıştırılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada devridaim sistemlerinde ülkemizde ve Avrupa’da kabul edilen enerji verim endeksi hesaplaması detaylı şekilde incelenmiştir. Aynı zamanda yasal zorunlukların tarihçesi ortaya konulmuş ve gelecekte doğacak yasal zorunluklar açıklanmıştır aynı zamanda enerji verimliliğinin önemi devridaim sistemleri üzerinde incelenmiştir. Devridaim sistemlerinde bulunan pompa sistemi ile ilgili literatür çalışması yapılmış ve pompalar hakkında detaylı bilgiler edinilmiştir. Bilgisayarlı analiz programında pompalar incelenmiş ve farklı dönüş hızlarındaki başarımları ortaya konulup pompa motoru giriş verileri elde edilmiştir. Devridaim sisteminin enerji verim endeksi 0,38’den 0,20’ye getirilmiştir. Hesaplamalar sonucunda pompa plaka değeri $28 \text{ m}^3/\text{s}$ debi ve 8 m basma yüksekliği olarak belirlenmiştir. Bu çalışma koşulu için motorun ihtiyacı olan 3200 min^{-1} ve 2,9 Nm işletme değerleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan pompa giriş verileri dikkate alınarak motor tasarımı yapılmıştır. Tasarım için SPEED yazılımı kullanılmıştır. Tasarıma başlamadan önce sürücü devre değerleri 96 V, 150 A olarak alınmış ve hesaplar bu değerlere göre yapılmıştır.

Özellikle küçük güçlü elektrik motorlarındaki gelişmeler ile devridaim sistemleri için uygun elektrik motorunun FDAM motoru olacağı belirlenmiş ve tasarım yazılımı kullanılarak sürücü bilgileri ve motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarım sonrasında program içerisinde sonlu elemanlar analizi ile manyetik analiz gerçekleştirilmiş, verim, hız ve moment büyüklüklerinin birbirleriyle ilişkisi, vuruş momenti, zıt-EMK ve rotor konumuna göre akım, gerilim ve moment ilişkisi elde edilmiştir.

FDAM motor tasarımı son derece güvenilir tasarım programı ile tasarlama çalışması yapılmıştır. Bu tasarım çalışmasında öncelikle motorda kullanılan malzemelerin manyetik özellikleri programa giriş yapılmıştır. Malzeme seçimleri motorun sınır değerlerine ve piyasada ulaşılabirlik özelliklerine göre seçilmiştir. Tasarım programında daha sonra değişik parametreler ele alınarak ve değişkenlik uygulanarak performans etkileri çok hızlı bir şekilde analiz edilmiştir ve tasarım programının el

verdiği şekilde sonlu elemanlar analizi de gerçekleştirilerek akı yoğunlukları, vuru mu momenti gibi özellikle mıknatıslı motorlarda çok önemli olan özellikler önceden tahmin edilmiş olup iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Farklı oluk ve kutup sayılarında üç farklı tasarım yapılmıştır. Bu tasarımlar karşılaştırma yapılarak en uygun tasarım üretmek üzere seçilmiştir. Bu seçim sonucunda üretici firma araştırılması yapılmış bulunan firmanın sınır değerleri ile ilgili geri bildirim yapmasıyla motor stator dış çapı gibi sınır değerleri düşürülerek tasarım iyileştirme çalışması yapılmıştır.

Motor tasarlanırken motor imalatı için sınır değerlerin gözden geçirilmesi gerektiği bu yüzden imalatı yapacak firma ya da ekip ile ortak hareket etmenin önemi ortaya çıkmıştır. Tasarım sonucunda çok iyi sonuçlar olsa dahi imali yapılamayacak bir tasarımın sonucu önemli değildir.

Tasarlanan FDAM, modern teknikler kullanılarak imalatı yapılmıştır. Manyetik geçirgenliği yüksek olan çelik malzeme yüksek hızda, özellikle motor prototip imalatı yapan firmalarda bulunan lazer kesim makinasıyla kesilmiş bu sayede malzemeye ısı işlemden dolayı zarar gelmesi engellenmiştir. Bunun yanında nadir toprak elementi olan mıknatıs malzemesi istediğimiz ebatlarda ve kalitede yurt dışında mıknatıslandırdıktan sonra motor imalatını gerçekleştiren firmaya gönderilmiştir. Mıknatıslar özel bir yapıştırıcı malzeme ile rotor yüzeyine yapıştırılmıştır. Stator ve rotor paketi de lazer kaynak yöntemiyle bir araya getirilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda tasarımcıların imalatçılarla birlikte çalışıp sınır değerleri belirlemesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Tasarlanan motoru kontrol edebilmek amacı ile sürücü tipleri araştırılmıştır. Genel olarak kullanılan asenkron motorların aksine, fırçasız doğru akım motorlarının su içinde çalıştırılması Hall etkisi algılayıcısının yerleşiminin zorluğu, motoru ıslak ortamdan yalıtmanın asenkron motorlara nazaran çok daha zor olması, buna yönelik uygulanabilecek çözümlerin maliyetlerinin çok yüksek olması sebeplerinden dolayı algılayıcısız kontrol yöntemi tercih edilmiş ve buna yönelik olarak bir sürücü temin edilmiştir.

Belirlenen sürücü tipinin çıkış değerlerine ve benzetim ortamında elde edilen pompanın hız ve moment değerlerine göre bilgisayar ortamında ticari bir yazılım kullanılarak fırçasız doğru akım motoru tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç kısmında belirtilen verim endeksi standart değerlere sahip bir asenkron motor ve tasarlanan sistem için ayrı ayrı hesaplanmış ve tasarlanan yeni sistemin verim endeksinin iyileştirildiği ortaya konulmuştur.

Üretilen motorun üretiminden sonra başarımını değerlendirmek için deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve gerçek performans ile tasarım çıktıları arasındaki fark ölçülmüştür. Uygulamalı çalışmalar motor üreticisinin tesislerinde ve İTÜ Elektrik Makinaları Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. İmalatçı firma laboratuvarında vuruuntu momenti, zıt-EMK büyüklükleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım programında sonlu elemanlar analizi yapılan vuruuntu momenti ile ölçülen arasında fark olduğu görülmüştür.

Vuruuntu momentini azaltmak için mıknatıs açısı değiştirilmiş tasarımda %80 iyileştirme sağlanmasına rağmen ölçüm sonucunda bir iyileştirme oluşmadığı görülmüştür.

Motor tasarımında vuruuntu momentini azaltmak için yapılan çalışmalarda SPEED-SEA analizinin kaykının vuruuntu momentine etkisini inceleyemediği tespit edilmiştir.

Motor zıt-EMK'ların ölçülmesiyle motor kontrolünün bu yöntemle yapılacağı ve aynı zamanda sargı yapısındaki üretim problemlerinin olmadığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile enerji verim endeksine uygun, yüksek verimli devridaim sistemi, verimi daha da yükseltmek amacı ile mıknatıslı motor kullanılarak yeniden tasarlanmıştır. Karakteristiği bilgisayar ortamında elde edilen pompaya uygun bir fırçasız doğru akım motoru kullanılarak sistem tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Devridaim sistemleri için bir pompa ele alınmış pompanın debi ve basma yüksekliği karakteristiği CFD programı yardımıyla çeşitli devirlerde analiz edilmiştir. Bu analiz sonucu ile Avrupa'da ve ülkemizde son derece önem kazanan enerji verimliliği ile ilgili yasalar değerlendirilmiş, EEI hesaplama yöntemi detaylı incelenmiş ve bu pompaya özel bir elektrik motoru tasarlanıp, üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma ile ülke ekonomisine ve enerji kaynaklarının verimli kullanılmasına katkıda bulunabilecek bir sistem gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **European Commission** (2009) ‘Regulation 641/2009’
- [2] **Url-1** <<http://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/characteristics-centrifugal-pumps-0912>>, alındığı tarih: 20.11.2014.
- [3] **Europump Lot 11** (2011). Europump Lot 11 Circulators General Explanations.
- [4] **Eko Tasarım Direktifi** (2005). Ekotasarım direktifi 2005/32/EC.
- [5] **Url-2** <<http://www.wilo.co.uk>>, alındığı tarih: 29.07.2012.
- [6] **Chapman, S. J.** (1999). Electric Machinery Fundamentals.
- [7] **Dixon, J. W., Rodriguez, M. ve Huerta, R.** (2002). Simplified Sensorless Control for BLDC Motor, Using DSP Technology.
- [8] **Mevey, J. R.** (2009). Sensorless Field Oriented Control of Brushless Permanent Magnet Motor Synchronous Motors. Department of Electrical and Computer Engineering College of Engineering Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- [9] **Gottipati, P.** (2007). Comparative Study on Double-Rotor PM Brushless Motors With Cylindrical and Disc Type Slot-less Stator. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment on the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering in The Department of Electrical&Computer Engineering.
- [10] **Su, H. ve Chang, K.T.** (2007). Induction Machine Condition Monitoring Using Neural Network Modeling, Member IEEE
- [11] **Kocabaş, D.A., Salman, E., ve Atalay, A.K.** (2011). Analysis Using D-Q Transformation of a Drive System Including Load and Two Identical Induction Motors. Electrical Engineering Department, Istanbul Teknik Üniversitesi.
- [12] **Singh, B. ve Singh S.** (2008). State of the Art on Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives. Electrical Engineering Department, Indian Institute of Technology, Delhi, New Delhi, India.
- [13] **Larsson, P. ve Rasmussen, N.** (2013). Design, Control and Evaluation of a prototype Three Phase Inverter in a BLDC Drive System for an Ultra-Light Electric Vehicle. Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, Gothenburg Sweden.
- [14] **Ahmed, S.** (2011). Investigation into the Improvement of a Single Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor. Department of Engineering University of Leicester.

- [15] **Hendershot, J. R. ve Miller, T.J.E.** (1994). Design of Brushless Permanent Magnet Motors
- [16] **Tomic, M. .** (2004). Sensorless control of Brushless DC Electromotor. University of Belgrade Department of Electrical Engineering.
- [17] **ST Microelectronics.** (2007). Sensorless BLDC Motor Control and BEMF Sampling Methods with ST7MC. ST AN 1946 Application Note
- [18] **Özgen, O.** (2006). Design Improvements on Mixed Flow Pumps by Means of Computational Fluid Dynamics. Middle East Technical University.
- [19] **Url-3** <<http://www.mdsmotor.com/speed.html>>, alındığı tarih: 23.08.2012.
- [20] **Yang, Y., Wangi X., Zhang, R. , Ding, T. Ve Tang, R.** (2006). The Optimization of Pole Arc Coefficient to Reduce Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China
- [21] **Liu, T., Huang, S. ve Gao, J.** (2010). A Method for Reducing Cogging Torque by Magnet Shifting in Permanent Magnet Machines. College of Electrical & Information Engineering Hunan University Changsha, China
- [22] **Jie, W. ve Yun-Yan, W.** (2007). A New Technique for Reducing Cogging Torque in EPS Permanent Magnet Brushless DC Motor. School of Electrical & Electronic Engineering Hubei University of Technology
- [23] **Yolaçan, E., Ozyurt, E. ve Aydın, M.** (2010). Magnet Shape Optimization of A Slotted Surface- Mounted Axial Gap PM Motor For Reducing Cogging Torque. Dept. of Mechatronics Engineering Kocaeli University
- [24] **Tawadros, M.** (2012). Sensorless Control of Brushless DC Motors. School of Computing, Engineering and Mathematiccs University of Western Sydney. Sydney, Australia
- [25] **Philip, P. ve Meenakshy, K.** (2012) Modelling of Brushless DC Motor Drive Using Sensored and Sensorless Control (Back-EMF Zero Crossing Detection). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.
- [26] **Niemczyk, P. ve Porchez, T.** (2007). Hybrid adaptive observer for controlling a Brushless DC Motor AALBORG UNIVERSITY · AAU Department of Electronic Systems
- [27] **SPEED Manuel.** (2011).

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Celal Zeren

Doğum Yeri ve Tarihi: Muratlı / 06.11.1983

Adres: Zafer Mah. Cumhuriyet Cad. No:5-7 Armadacity 2.
Etap C-4 Blok D:42 Çorlu / TEKİRDAĞ

E-Posta: celal.zeren@gmail.com

Lisans: 2007, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-
Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü