

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİRKÜLASYON POMPASI UYGULAMALARINDA  
KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN  
VEKTÖR KONTROLÜ VE EEI OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mutullah EŞER**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Çoşku KASNAKOĞLU**

**MART - 2020**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....  
**Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171211063 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mutullah EŞER** 'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**SİRKÜLASYON POMPASI UYGULAMALARINDA KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN VEKTÖR KONTROLÜ VE EEI OPTİMİZASYONU**" başlıklı tezi **13,03,2020** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU**  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Ali BOZBEY (Başkan)**  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Prof. Dr. M.Timur AYDEMİR**  
Gazi Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Mutullah EŞER



## ÖZET

Yüksek Lisans

### SİRKÜLASYON POMPASI UYGULAMALARINDA KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN VEKTÖR KONTROLÜ VE EEI OPTİMİZASYONU

Mutullah EŞER

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Coşku Kasnakoğlu

Tarih: Mart 2020

Pompaların dünyadaki enerji tüketiminde %20'lik bir orana sahip olduğu dikkate alındığında eski teknolojiye sabit devirli pompaların sebep olduğu enerji sarfiyatının büyüklüğü gözler önüne serilmektedir. Avrupa birliğinin aldığı kadar gereği 2013 yılından itibaren sabit devirli sirkülasyon pompalarının %95'lik kısmının satışı yasaklanmıştır. Avrupa'da yeni nesil ıslak rotorlu pompa kullanılmasıyla yapılabilecek yıllık enerji tasarrufu yaklaşık 23 milyar kWh elektrik enerjisidir.

Avrupa birliği üyesi ülkelerde sirkülasyon pompalarının enerji verimlilik endeksinin 0.23'ün üzerinde olması durumunda satışı yapılamamaktadır. Alman hükümetinin uyguladığı BAFA isimli bir teşvik programıyla eski nesil sirkülasyon pompalarını yeni nesil yüksek verimli ve enerji verimlilik endeksi 0.2'den küçük olan sirkülasyon pompası ile değiştiren kişilerin yatırımlarının %30'u devlet tarafından karşılanmaktadır. Bu durumda pompa üreticileri piyasada tutunabilmek için pompalarında daha yüksek verimli elektrik motorları ve sürücü sistemleri kullanmaya yönelmişlerdir. Motorda yüksek verim elde etmek amacıyla eski nesil sirkülasyon pompalarında kullanılan asenkron motorlar, yüksek verimli sürekli mıknatıslı senkron motorlar ile değiştirilmiştir. Motordaki sürtünmeyi azaltmak ve soğutmayı

kolaylaştırmak için ise sirkülasyon pompası uygulamalarında motor tasarımında genellikle ıslak rotorlu sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı tercih edilir. Bu yapıda rotor ve stator birbirinden bir kılıf ile ayrılır ve rotor su içinde döner.

Tez kapsamında enerji verimlilik endeksi 0.2'den büyük olan sirkülasyon pompalarının mıknatıslı senkron motorları için geliştirilen kontrol algoritması ile enerji verimlilik endeksi azaltılmıştır. Bu kontrol algoritması belirlenen debi değerleri için oluşturulan hız referans tablosunun vektör kontrol yöntemine entegre edilmesiyle debi değerine göre motorun referans hızını değiştirir bu sayede pompanın daha verimli çalışması sağlanmaktadır.

Geliştirilen algoritmada EEI değerinin hesaplanması için deneysel ölçümler yerine yarı analitik metodoloji kullanılmıştır. Yarı analitik metodun kullanılmasındaki temel hedef EEI hesabı için gerekli olan deneysel uğraşı azaltmak ve farklı üreticilere ait pompaların EEI değerinin kolaylıkla sistematik olarak belirlenmesini sağlamaktır. Bu yöntemin temel amacı pompanın yük profilindeki her çalışma noktasındaki tükettiği elektriksel güç  $P_{L,i}$ 'yi yarı analitik bir yöntem kullanarak belirlemektir.

Tezin ikinci kısmında yeni nesil yüksek verimli sirkülasyon pompalarının yapıları ve kontrol tipleri incelenmiştir. Temel pompa bilgileri ve hidrolik tanımlar verilmiştir.

Üçüncü kısımda, yeni nesil yüksek verimli sirkülasyon pompalarında kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motorlar incelenmiştir. Öncelikle kullanılan mıknatıslı tiplerinin özellikleri incelendikten sonra mıknatıslı motorlar sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmanın ardından SMSM'un parametrelerinin ölçüm yöntemleri anlatılmış ve tez kapsamında kullanılan motorun parametreleri bu yöntemler ile ölçülmüştür. Bu bölümün sonunda ise SMSM'un detaylı matematiksel modelleri çıkarılmıştır ve bu modeller motorun kontrol algoritmasının anlaşılması için oldukça önemlidir.

SMSM'un detaylı matematiksel modeli çıkartıldıktan sonra dördüncü kısımda tez kapsamında geliştirilen algoritmanın test edildiği prototip motorda da kullanılan ve motor d-q matematiksel modelini referans alan vektör kontrol metodu incelenmiştir. Vektör kontrole ilişkin temel bilgiler, sensörlü vektör kontrol, tez çalışmasında da kullanılan açık çevrim akı tahmini ile sensörsüz vektör kontrol yöntemine ilişkin detaylar verildikten sonra tez kapsamında geliştirilen q eksen akımı ile debi tahmini ve basma yüksekliği tahmini gibi pompa parametrelerini tahmin eden algoritma anlatılmıştır. Bu tahmin algoritmaları sayesinde pompanın bağlı olduğu sisteme ilişkin



parametreler, debimetre ve fark basınç ölçer gibi pahalı ölçüm cihazları olmadan tahmin yöntemiyle elde edilmiş ve motorun sistem isterine uygun hızda dönmesi sağlanmıştır. Bu bölümün sonunda ise tez kapsamında kullanılan kontrol kartının donanım yapısı tanıtılmış ve ilgili kısımların devre şemaları verilmiştir.

Tezin beşinci kısmında, DIN EN 16297-1 standartına uygun olarak ıslak rotorlu sirkülasyon pompa enerji verimlilik endeksi hesabının nasıl yapılacağı detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra ise geliştirilen EEI optimizasyon yönteminin detayları ve uygulanışı adım adım açıklanmıştır. Yöntemin temeli olan referans hız tablosunun oluşturulması için geliştirilen yarı analitik yöntem Mathcad ortamında sayısal olarak çözümlenerek prototip pompa için referans hız tablosu oluşturulmuştur.

Tezin son kısmında ise beşinci kısımda Mathcad ortamında sayısal çözümlenme ile elde edilen referans hız tablosu vektör kontrol yöntemine entegre edilerek pompa üzerinde test edilmiştir. Tez kapsamında çalışılan ve geliştirilen kontrol yöntemleri dünyanın üç büyük pompa üreticisi bir Alman pompa firmasının EEI değeri 0.23 olan bir ıslak rotorlu sirkülasyon pompasına uygulanarak EEI değeri 0.20'ye düşürülmüştür.

Tezin tüm aşamalarında ölçüm ve testler yapabilmek için tasarlanıp üretimi yaptırılan hidrolik test ve elektriksel parametre ölçüm sisteminden faydalanılmıştır. Tezin başlangıç noktası olan ve Avrupa piyasasına satışa sunulamayan ürünler için kontrol algoritması geliştirme hedefine ulaşmıştır. Kullanılan standart kontrol algoritması yerine geliştirilen kontrol algoritmasının kullanılması sayesinde, pompaların EEI değeri düşürülmüş ve pompalar dünya pazarına satılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kalıcı mıknatıslı senkron motor, Sirkülasyon pompası, Vektör kontrol, EEI, Optimizasyon



## **ABSTRACT**

Master of Science

### **VECTOR CONTROL OF PMSM IN CIRCULATION PUMP APPLICATION AND EEI OPTIMIZATION**

Mutullah EŞER

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Coşku Kasnakoğlu

Date: March 2020

Considering that the pumps have a 20% share in the energy consumption in the world, the magnitude of the energy consumption caused by the old technology fixed cycle pumps is revealed. As take decision by the European Union, after 2013, 95% of circulation pumps of fixed cycle circulation pumps are prohibited. The annual energy savings that can be achieved by using a new generation wet rotor pump in Europe is approximately 23 billion kWh.

In the member states of the European Union, the circulation pumps can not be sold if the energy efficiency index is above 0.23. In this case, the pump manufacturers have tended to use higher efficiency electric motors and drive systems in their pumps in order to hold onto the market. Asynchronous motors used in old generation circulation pumps were replaced with high efficiency permanent magnet synchronous motors in order to obtain high efficiency in the motor. In order to reduce friction in the engine and to facilitate cooling, in circulation pump applications, the design of the motor is generally preferred in the design of wet rotor permanent magnet synchronous motor. In this structure, the rotor and stator are separated from each other by a case and the rotor rotates in water. Within the scope of the thesis, energy efficiency index has been

reduced with the control algorithm developed for circulation pumps with an energy efficiency index greater than 0.2. This control algorithm changes the reference speed of the motor according to the flow rate by integrating the speed reference table created for the determined flow values into the vector control method, thus ensuring more efficient operation of the pump.

In the second part of the thesis, the structures and control types of new generation high efficiency circulation pumps are examined. Basic pump information and hydraulic definitions are provided.

In the third part, permanent magnet synchronous motors used in new generation high efficiency circulation pumps are examined. After examining the properties of the magnet types used, permanent magnet motors are classified. After this classification, the measurement methods of the parameters of the PMSM are explained and the parameters of the motor used within the scope of the thesis were measured with these methods. Detailed mathematical models of PMSM are explained at the end of this section.

In the fourth part, vector control method is examined. Basic information about vector control, sensor vector control, open loop flux prediction for sensorless vector control method are given. The algorithm that estimates the pump parameters such as flow rate and head height with the q axis flow developed in the thesis is explained. At the end of this section, the hardware structure of the control card used is introduced and circuit diagrams of the relevant parts are given.

In the fifth part of the thesis, how to calculate the wet rotor circulation pump energy efficiency index according to DIN EN 16297-1 is explained in detail. Then, the details and implementation of the developed EEI optimization method are explained step by step. Proposed control method in this study was named as semi-analytical because at the beginning of the analysis experimental data were required. The basis of the control algorithm is based on the creation of a speed lookup table with different flow rate references for the PMSM to optimize the EEI value.

In the last part of the thesis, in the fifth chapter, the reference speed table obtained by numerical analysis in Mathcad environment was integrated into the vector control method and tested on the pump. By combining the developed control algorithm with FOC control, the efficiency of PMSM in pump application is increased. Moreover,

with the analysis program developed in mathcad environment, the number of experimental measurements required for EEI calculation in pump applications has been reduced. For the developed control algorithm, consistency of the analysis results were verified with experimental measurements.

The lookup table (flow-velocity) generated by Mathcad analysis was applied to the wet rotor circulation pumps software of a pump company producing all over the world. Thanks to the control algorithm developed instead of the standard control algorithm used, the EEI value of the pumps has been reduced and sold to the world market.

**Keywords:** Permanent magnet synchronous motor, Circulation pump, Vector control, EEI, Optimization



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Coşku Kasnakoğlu'na, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, tez çalışmam boyunca tüm üretim ve laboratuvar kullanımı imkanını sunan KSB Pompa Arge Müdürü Evren Coşkuner'e ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.







## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT .....	ix
TEŞEKKÜR .....	xiii
İÇİNDEKİLER .....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
KISALTMALAR .....	xxi
SEMBOLE LİSTESİ .....	xxiii
RESİM LİSTESİ .....	xxv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SİRKÜLASYON POMPASININ YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Islak Rotorlu Sirkülasyon Pompasının Yapısı .....	4
2.2 Pompa Karakteristik Eğrileri.....	6
2.3 Sirkülasyon Pompası Kontrol Tipleri.....	9
<b>3. SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLARIN YAPISI VE MATEMATİKSEL MODELİ .....</b>	<b>11</b>
3.1 Sürekli Mıknatıs Malzemeler .....	11
3.2 Mıknatıslı Motorların Sınıflandırılması .....	13
3.3 SMSM ve BLDC Motorların Karşılaştırılması .....	14
3.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun (SMSM) Yapısı .....	16
3.5 SMSM'un Sınıflandırılması .....	18
3.5.1 SMSM'lerin mıknatısın rotora yerleştiriliş tipine göre sınıflandırılması..	18
3.5.2 SMSM'un avantaj ve dezavantajları .....	22
3.6 SMSM'un Elektriksel Parametrelerinin Ölçümü .....	23
3.6.1 Zıt emk sabiti ölçümü .....	24
3.6.2 Stator faz direnci ölçümü .....	26
3.6.3 Kutup sayısı ölçümü.....	28
3.6.4 d ve q eksenli endüktansları ölçümü .....	29
3.7 Tez Çalışmasında Kullanılan SMSM'un Özellikleri .....	32
3.8 SMSM'un Matematiksel Modeli.....	33
3.8.1 SMSM'un üç faz matematiksel modeli.....	34
3.8.2 $\alpha$ - $\beta$ düzleminde SMSM'un matematiksel modeli.....	36
3.8.3 d-q düzleminde SMSM'un matematiksel modeli .....	41
<b>4. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN KONTROLÜ .....</b>	<b>45</b>
4.1 Vektör Kontrolün Temelleri .....	45
4.2 Rotor Pozisyon ve Hız Bilgisinin Elde Edilmesi .....	50
4.3 Sensörsüz Vektör Kontrol .....	51
4.3.1 Açık çevrim akı tahmini.....	52
4.4 Pompa Hacimsel Debi Tahmini .....	54
4.5 Motor Kontrol Devresi Donanımsal Yapısı .....	58

<b>5. SİRKÜLASYON POMPALARINDA ENERJİ VERİMLİLİK ENDEKSİ HESABI VE OPTİMİZASYONU .....</b>	<b>63</b>
5.1 Enerji Verimlilik Endeksi (EEI) Hesabı .....	63
5.2 Enerji Verimlilik Endeksi Optimizasyon Algoritmasının Prensipleri ve Deneysel Sonuçların Elde Edilmesi .....	69
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>81</b>
6.1 Deneylerin Uygulanması ve Verilerin Alınması .....	83
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>87</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>91</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Örnek ıslak rotorlu sirkülasyon pompası tasarımı .....	1
Şekil 2.1 : Isıtma sisteminde sirkülasyon pompası kullanım örneği .....	3
Şekil 2.2 : Sirkülasyon pompasının temel kısımları .....	5
Şekil 2.3 : Motor grubu bileşenleri .....	5
Şekil 2.4 : SMSM sürücü PCB .....	6
Şekil 2.5 : Sirkülasyon pompası güç akış diyagramı .....	7
Şekil 2.6 : Pompa ve sistem eğrisi .....	8
Şekil 2.7 : Sabit eğri modu örnek Q-H grafiği .....	9
Şekil 2.8 : Sabit basınç modu örnek Q-H grafiği .....	10
Şekil 2.9 : Oransal basınç modu örnek Q-H grafiği .....	10
Şekil 3.1 : Mıknatıslı motorların sınıflandırılması .....	13
Şekil 3.2 : Mıknatıslı alternatif akım makinalarının zıt emk dalga şekilleri .....	14
Şekil 3.3 : Sargı tipleri a) dağıtılmış tip sargı b) konsantre tip sargı .....	15
Şekil 3.4 : Mıknatıslandırma metodları .....	15
Şekil 3.5 : SMSM kesit görünümü .....	17
Şekil 3.6 : Sürekli mıknatıslı senkron motorun görünümü .....	17
Şekil 3.7 : Yüzey montajlı sürekli mıknatıslı senkron motor (SPMSM) .....	18
Şekil 3.8 : Gömülü tip sürekli mıknatıslı senkron motor (IPMSM) .....	19
Şekil 3.9 : SMSM farklı rotor yapıları .....	19
Şekil 3.10 : SMPMSM ve IPMSM arasındaki farkları gösteren kesit .....	20
Şekil 3.11 : SMSM manyetik çıkıntı karakteristikleri .....	21
Şekil 3.12 : Radyal akıllı motor .....	22
Şekil 3.13 : Eksenel akıllı motor .....	22
Şekil 3.14 : Zıt emk sabiti ölçümü için bağlantı şeması .....	25
Şekil 3.15 : Zıt emk ölçümü osiloskop görüntüsü .....	26
Şekil 3.16 : Stator faz direnci ölçümü bağlantı şeması .....	27
Şekil 3.17 : Endüktans ölçüm devresi .....	30
Şekil 3.18 : d eksenli endüktans ölçümü akış şeması .....	30
Şekil 3.19 : q eksenli endüktans ölçümü akış şeması .....	31
Şekil 3.20 : Tez'de kullanılan motorun hız-tork karakteristiği .....	33
Şekil 3.21 : Clarke Dönüşümü .....	37
Şekil 3.22 : abc ve $\alpha$ - $\beta$ koordinat sistemlerinde akım vektörü gösterimi .....	38
Şekil 3.23 : $\alpha$ - $\beta$ düzlemi ile d-q düzlemi arasındaki ilişki .....	42
Şekil 3.24 : SMSM d eksenli eşdeğer devresi .....	42
Şekil 3.25 : SMSM q eksenli eşdeğer devresi .....	42
Şekil 4.1 : Vektör kontrol dönüşümleri .....	46
Şekil 4.2 : Vektör kontrol blok diyagramı .....	46
Şekil 4.3 : Kontrol döngüsü blok diyagramı .....	48
Şekil 4.4 : Alan kontrol döngüsü .....	48
Şekil 4.5 : Tork ve hız kontrol döngüsü .....	49
Şekil 4.6 : PI kontrolör blok diyagramı .....	49

Şekil 4.7 : Sensörsüz vektör kontrol blok diyagramı .....	53
Şekil 4.8 : Açık çevrim akı tahmini blok diyagramı .....	54
Şekil 4.9 : 2000 rpm için eğri uydurma.....	57
Şekil 4.10 : 2400 rpm için eğri uydurma.....	58
Şekil 4.11 : Kontrolcü giriş katmanı devre şeması.....	59
Şekil 4.12 : Faz akımları ölçüm devresi .....	59
Şekil 4.13 : Faz akımı ölçümü koşullandırma devresi .....	60
Şekil 4.14 : DC bara gerilimi ölçüm devresi .....	60
Şekil 4.15 : Mosfet sürme devresi .....	61
Şekil 5.1: Maksimum hidrolik güç noktası .....	65
Şekil 5.2 : Referans kontrol eğrisi .....	66
Şekil 5.3 : Referans noktadaki ölçümler .....	68
Şekil 5.4 : Farklı hız değerleri için basma yüksekliğinin debiye göre değişimi .....	71
Şekil 5.5 : Farklı hız değerleri için giriş gücünün debiye göre değişimi .....	71
Şekil 5.6 : Deneysel verilerin Mathcad ortamında tanımlanması .....	72
Şekil 5.7 : Mathcad ortamında elektriksel güç için regrasyon yapılması.....	73
Şekil 5.8 : Regrasyon sonucu oluşturulan yüzey (Q,H,P_el ) .....	73
Şekil 5.9 : Mathcad ortamında EEI hesaplamasının yapılması .....	74
Şekil 5.10 : Mathcad ortamında deneysel verilerin nominal hıza indirgenmesi .....	74
Şekil 5.11: EEI eş yükselti eğrileri.....	75
Şekil 5.12 : Altıncı adım için interpolasyon işleminin Mathcad'de yapılması .....	76
Şekil 5.13 : Yarı analitik metod ile elde edilen pompa karakteristik eğrileri.....	76
Şekil 5.14 : BF katsayıları ile Mathcad ortamında hız optimizasyon arayüzü.....	77
Şekil 5.15 : Referans tablosuna göre debiye bağlı olarak hızın değişimi .....	77
Şekil 5.16 : Çarpık hız vektörü ile pompa hidrolik gücünün debi ile değişimi.....	78
Şekil 5.17 : Çarpık hız vektörü ile pompa basma yüksekliğini debi ile değişimi .....	78
Şekil 5.18 : Yarı analitik yöntem Mathcad EEI sonucu .....	79
Şekil 6.1 : Deney düzeneği üç boyutlu görünümü .....	81
Şekil 6.2: Debi tahmin algoritması test sonucu.....	85
Şekil 6.3: Basma yüksekliği tahmin algoritması test sonucu .....	85

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Motor grubu ana elemanları.....	5
Çizelge 3.1 : Tezde kullanılan motorun elektriksel parametreleri .....	32
Çizelge 4.1 : 2000 rpm Iq – Q ölçümleri .....	56
Çizelge 4.2 : 2400rpm Iq-Q ölçümleri .....	57
Çizelge 5.1 : Örnek hidrolik performans ölçüm sonucu .....	64
Çizelge 5.2 : Referans kontrol eğrisi Q-H noktaları .....	66
Çizelge 5.3 : Sirkülasyon pompası yük profili.....	67
Çizelge 5.4 : 2000 rpm için hidrolik performans test sonuçları .....	70
Çizelge 5.5 : 3000 rpm için hidrolik performans test sonuçları .....	70
Çizelge 6.1 : Test sistemi bileşenleri.....	82
Çizelge 6.2: En verimli noktanın karşılaştırılması.....	86
Çizelge 6.3: EEI değerlerinin karşılaştırılması .....	86



## KISALTMALAR

<b>SMSM</b>	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
<b>EEl</b>	: Enerji Verimlilik Endeksi (Energy Efficiency index)
<b>RPM</b>	: Dönme Hızı - devir/dakika (Revolutions per Minute)
<b>EMK</b>	: Elektromanyetik Kuvvet
<b>PCB</b>	: Baskı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
<b>ADC</b>	: Analog Dijital Dönüştürücü (Analog to Digital Converter)
<b>DC</b>	: Doğru Akım (Direct Current)
<b>AC</b>	: Alternatif Akım (Alternative Current)





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
R	Direnç
L	Endüktans
p	Kutup çifti sayısı
$\rho$	Türev operatörü
$k_e$	Zıt emk sabiti
Q	Hacimsel debi
H	Basma yüksekliği
P	Aktif elektriksel güç
$n_s$	Senkron hız
$P_{hid}$	Hidrolik güç
$P_{ele}$	Elektriksel güç
$\eta_p$	Pompa verimi
n	Devir sayısı
$v_a, v_b, v_c, v_\alpha, v_\beta, v_d, v_q$	Faz gerimleri
$i_a, i_b, i_c, i_\alpha, i_\beta, i_d, i_q$	Faz akımları

$t$	Zaman
$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, \Psi_\alpha, \Psi_\beta, \Psi_d, \Psi_q$	Faz akıları
$\theta_e$	Rotor elektriksel pozisyonu
$\omega_e$	Rotor elektriksel hızı
$T_L$	Yük torku
$T_e$	Elektriksel tork
$L_a, L_b, L_c, L_\alpha, L_\beta, L_d, L_q$	Faz endüktansları
$R_a, R_b, R_c, R_s$	Faz dirençleri
$J_m$	Mekanik atalet
$e_a, e_b, e_c, e_\alpha, e_\beta$	İndüklenmiş zıt emk gerilimleri

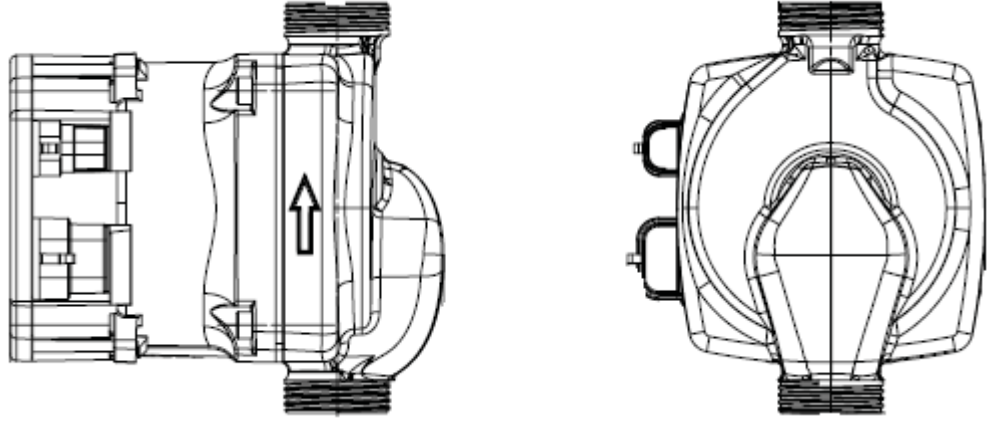
## RESİM LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Resim 3.1 : Zıt emk ölçüm bağlantısı .....	26
Resim 3.2 : Faz direnci ölçümü.....	27
Resim 3.3 : Kutup sayısı ölçümü .....	28
Resim 3.4 : Endüktans Ölçümü.....	31
Resim 5.1 : Hidrolik Performans Test Standı .....	70
Resim 6.1 : Hidrolik performans test sistemi.....	82
Resim 6.2 : Sistem parametreleri ölçüm sistemi.....	83



## 1. GİRİŞ

Sirkülasyon pompaları kombi, kazan, güneş enerjisi gibi kapalı sistemlerde suyun hareketini sağlayan cihazlardır. Kapalı ısıtma sistemlerinde su sistemin dışına çıkmaz ve ısı taşıma amacıyla kullanılır. Sirkülatörler hidrolik sistemdeki ısı kaynağı tarafından ısıtılan akışkanın sistemdeki diğer birimlere ulaştırmak için kullanılırlar. Taşınan ısının dağılımını kontrol etmek için sistemde bulunan vanalar kullanılır bunlar sistem direncini ve sirkülatörden talep edilen basınç farkını arttıran unsurlardır. Şekil 1.1’de değişken devirli sirkülasyon pompası için örnek bir tasarım gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : Örnek ıslak rotorlu sirkülasyon pompası tasarımı

Sisteme gerekli ısı miktarını sağlamak için sistemde akan akışkanın miktarı yani debisi hakkında bilgiye sahip olmak gerekir. Bu bilginin elde edilmesinde temel olarak iki yöntem kullanılır bunlardan birincisi ve en önemlisi pompanın çektiği elektriksel güç ile debiyi ilişkilendirmektir çünkü pompanın çektiği akım değeri sistemdeki akışkan debisiyle orantılıdır bu yöntem günümüzde mikroişlemciler kullanılarak debi tahmin algoritmalarıyla kolaylıkla uygulanabilmektedir. Diğer debi tahmin yöntemi ise pompanın hidrolik karakteristiği ve sistemden alınan basınç bilgisinin kullanılmasıyla yapılır. Bu yöntemde sistemde ölçülen basma yüksekliğine pompanın karakteristik eğrisinde karşılık gelen debi değeri o anki sistem debi bilgisi olarak kullanılır.

Tezin dördüncü bölümde sirkülasyon pompalarında debi tahmini hakkında detaylı bilgi ve deneysel veriler verilmiştir. Debi tahmini ile elde edilen debi bilgisi sistem

için en uygun basma yüksekliğini sağlayacak pompa kontrol algoritmalarında kullanılarak motorun sistem için en uygun hızda dönmesini sağlanmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen EEI optimizasyon yönteminde de yine bu debi bilgisinden faydalanılmıştır.

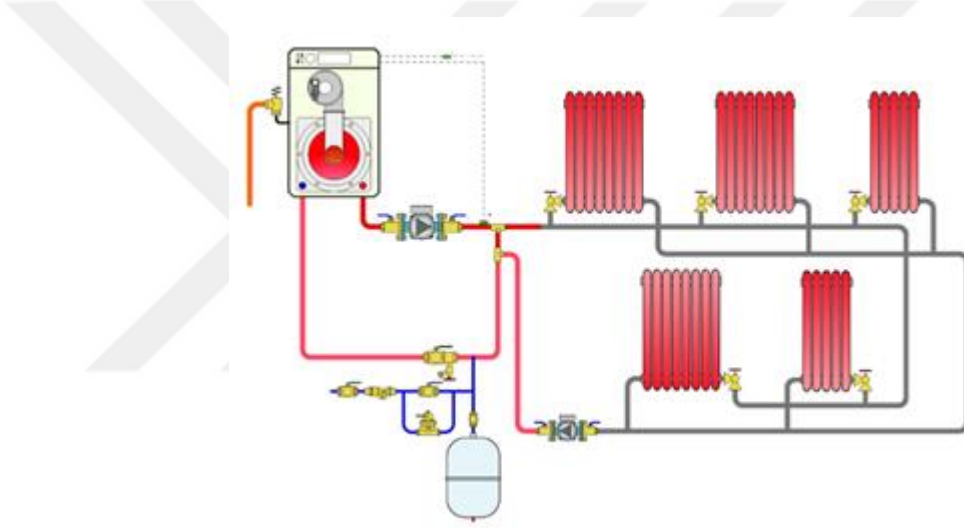
Pompaların dünyadaki enerji tüketiminde %20'lik bir orana sahip olduğu dikkate alındığında eski teknolojiye sahip sabit devirli pompaların sebep olduğu enerji sarfiyatının büyüklüğü gözler önüne serilmektedir. Avrupa Birliği'nin aldığı kadar gereği 2013 yılından sonra sabit devirli sirkülasyon pompalarının %95'lik kısmının satışı yasaklanmıştır. Avrupa'da ıslak rotorlu pompa kullanılmasıyla yapılabilecek yıllık enerji tasarrufu yaklaşık 23 milyar kWh elektrik enerjisidir.

Enerji verimlilik endeksi pompanın enerji verimliliğinin ve performansının birimsiz bir ölçüsüdür. EEI değeri düşük ürünler sayesinde yaşam standardı ve ürün kalitesini düşürmeden enerji tüketimi azaltılabilmektedir.

Sirkülatör pompalarında verimliliği arttırmak ve pompanın sistem için en uygun noktada çalışmasını sağlamak için çeşitli kontrol algoritmaları geliştirilmiştir ve günümüzde değişken devirli sirkülasyon pompalarında bu algoritmalar aktif olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında ise sürekli mıknatıslı bir motora sahip sirkülasyon pompasının kontrolü ve enerji verimlilik endeksini düşürmek için geliştirilen kontrol algoritmasının geliştirilmesi, simülasyonları, analizleri ve testleri ele alınmıştır.

## 2. SİRKÜLASYON POMPASININ YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Sirkülasyon pompalarında giriş ve çıkış genellikle aynı hat üzerindedir ve pompadan bağlı olduğu sistemin özdirencini yenecek basınç farkını sağlaması beklenilir. Değişken devirli sirkülasyon pompalarında motor hızı 700 rpm ile 5000 rpm arasında geniş bir aralıkta kontrol edilerek pompadan sistem ihtiyacına göre hidrolik güç alınabilir. Şekil 2.1’de bir ısıtma sisteminde sirkülasyon pompasının kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Isıtma sisteminde sirkülasyon pompası kullanım örneği

Sistem için uygun sirkülasyon pompasının seçimi için gerekli basınç (H) ve debi (Q) değerleri bilinmelidir. Bu değerlerin hesabı için aşağıdaki hesaplama yöntemi kullanılabilir.

Sirkülasyon pompası akışkanı sistem içerisinde gerekli debi değerinde taşıyabilmelidir ve bu debi değeri aşağıdaki Eşitlik (2.1) ile gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Q = \frac{Q_k}{(T_g - T_d) * 1000} \quad (2.1)$$

Burada;

$Q$  : Gereken pompa debisi ( $m^3/h$ )

$Q_k$  : Isıtma kazanı kapasitesi (kcal/saat)

$T_g$  : Suyun kazana giriş sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )

$T_d$  : Suyun kazana dönüş sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )

Pompa ısıtma sisteminde borular, vanalar, bağlantı elemanları ve radyatörler nedeniyle oluşan direnci yenerek akışkanı tüm sistemde dolaştırabilecek basınç farkını yaratabilmelidir. Gerekli olan basma yüksekliği (basınç farkı) Eşitlik (2.2) ile hesaplanır.

$$H > (R * L) + (Z) \quad (2.2)$$

Burada;

H : Pompanın basma yüksekliği (mSS)

R : Boru çapında metrede düşen basınç (mSS/ metre)

L : Tesisattaki toplam boru uzunluğu (metre)

Z : Vanalar, bağlantı elemanları ve diğer cihazların toplam direnci (mSS)

## 2.1 Islak Rotorlu Sirkülasyon Pompasının Yapısı

Pompalar emiş hatlarındaki akışkana kinetik ya da potansiyel enerji kazandırarak basma hattına yönlendiren cihazlardır. Kapalı sistemlerde kullanılan pompalar sıvının sistemde devir daim edebilmesi için gereken (sürtünme kayıpları ve herhangi bir yükseklik farkı) enerjiyi sıvıya kazandırır.

Sirkülasyon pompası temel olarak üç kısımdan oluşur :

- Sürekli mıknatıslı senkron motor
- Motor sürücü elektronik kart
- Pompa gövdesi ve çark

Şekil 2.2’de bir sirkülasyon pompasını oluşturan temel parçalar gösterilmiştir.

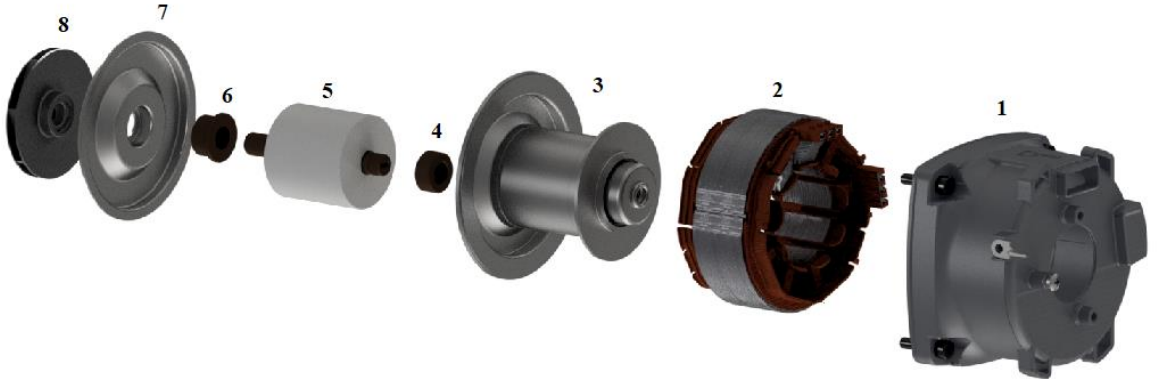
Islak rotorlu sirkülasyon pompalarında su rotor milinin ortasında bulunan küçük çaplı bir delik sayesinde rotor kılıfının içerisine dolar ve rotor suyun içerisinde döner. Bu sayede motorun sargı ve karbon yataklarının soğutma işlemi de sağlanmış olur.





Şekil 2.2 : Sirkülasyon pompasının temel kısımları

Sürekli mıknatıslı motor grubunun detay görünümü Şekil 2.3’de ve oluşturan parçalar Çizelge 2.1’de verilmiştir. Tez kapsamında kontrolü yapılan motora ilişkin detaylı teknik bilgiler üçüncü bölümde verilmiştir.



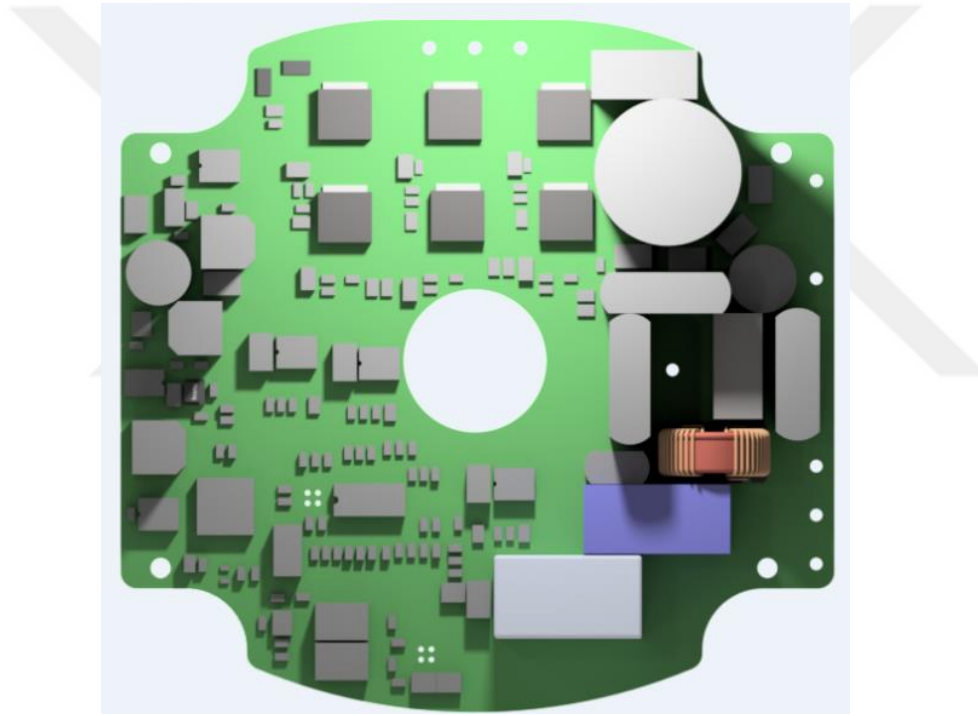
Şekil 2.3 : Motor grubu bileşenleri

Motor sürücü elektronik kartın üç boyutlu görünümü Şekil 2.4’de verilmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron motor sürücü elektronik kartın çalışma prensibi ve donanım detayları Bölüm 4’de açıklanmıştır.

Çizelge 2.1 : Motor grubu ana elemanları.

Numara	Parça Açıklaması
1	Motor Gövdesi
2	Stator
3	Stator Kılıfı
4	Radyal Yatak
5	Plastik Enjeksiyon Yapılmış Rotor
6	Radyal Yatak
7	Radyal Yatak Tutucu Kılıf
8	Pompa Çarkı

Motor sürücü elektronik kartın üç boyutlu görünümü Şekil 2.4’de verilmiştir. Sürücü kartın çalışma prensibi ve detayları Bölüm 4’de açıklanmıştır.



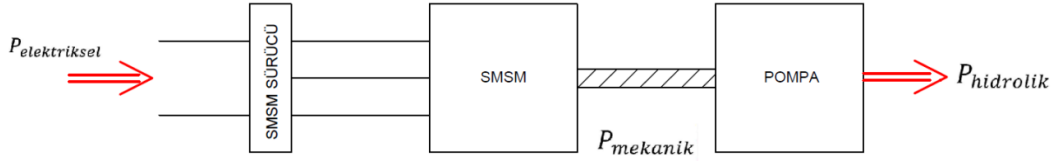
Şekil 2.4 : SMSM sürücü PCB

## 2.2 Pompa Karakteristik Eğrileri

Pompa karakterisitik eğrileri, pompanın hidrolik karakteristiği ve elektriksel güç tüketimi ile ilgili karakteristik bilgileri içeren grafiklerdir.

Pompadaki güç kayıplarının hesaba alınması için en uygulanabilir yöntemlerden birisi güç akış diyagramıdır. Bir sirkülasyon pompası için güç akış diyagramı Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Diyagramda elektriksel güç pompaya girer. Bu güçten motor sürücü elektronik karttaki elektriksel kayıplar, motordaki bakır kayıpları, motor

yataklarındaki sürtünme kayıpları ve pompa çarkındaki mekanik sürtünme kayıpları çıkartıldıktan sonra geriye kalan güç akışkana hidrolik güç olarak aktarılır.



Şekil 2.5 : Sirkülasyon pompası güç akış diyagramı

En genel biçimde pompa verimi  $\eta_p$  Eşitlik (2.3) ile ifade edilir.

$$\eta_p = \frac{P_{hid}}{P_{ele}} \times 100 \quad (2.3)$$

Burada;

$\eta_p$  : Pompa verimi [%]

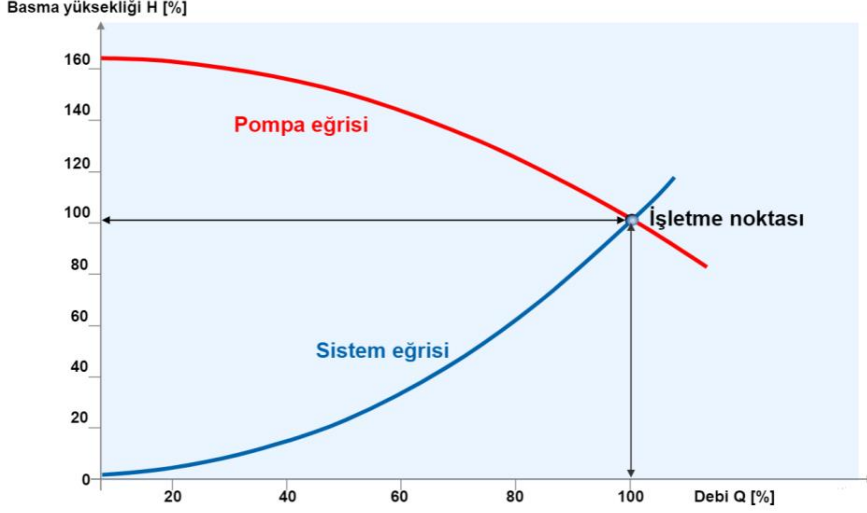
$P_{hid}$  : Akışkana verilen hidrolik güç

$P_{ele}$  : Şebekeden çekilen elektriksel güç

Sirkülasyon pompaları akışkanın sistemin dışına çıkmadığı kapalı sistemlerde çalışırlar. Bir kapalı sistemin farklı debi değerlerindeki basınç kayıplarını gösteren eğriye sistemin karakteristik eğrisi denir. Basınç kaybının debi değerinin karesiyle değişmesi nedeniyle eğri parabolik bir karakteristiğe sahiptir [1]. Bu karakteristik Eşitlik (2.4) ve Şekil 2.6'da verilmiştir.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^2 \quad (2.4)$$

Isıtma sistemlerinde ısı dağılımını düzenlemek için sistemdeki vanalar açılır veya kapatılır. Sistemde kullanılan sirkülatör bu direnci ve gerekli olan yükseklik farkını yenecek enerjiyi akışkana vermelidir. Sirkülatör seçiminde bu bilgiler kullanılarak pompa karakteristik eğrileri incelenir ve pompa eğrisi ile sistem eğrisinin kesiştiği uygun pompa seçilir. Bu kesişim noktasının yani işletme noktasının mümkün olduğunca pompanın en verimli çalışma noktasına yakın olması gerekmektedir [1]. Pompanın en verimli çalışma noktası ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 5'de verilmiştir.



Şekil 2.6 : Pompa ve sistem eğrisi

Sirkülasyon pompalarının karakteristiği temel olarak iki grafik ile gösterilir :

- Q – H grafiği ile pompanın basma yüksekliğinin debi ile değişimi gösterilir.
- Q – P grafiği ile de pompanın şebekeden çektiği aktif elektriksel gücün debi ile değişimi gösterilir.

Isıtma sistemlerinde kullanılan sirkülasyon pompalarının sürekli sabit hızda çalıştırılması gereksizdir. Bu durum enerji sarfiyatına yol açar ve sistemde ses oluşturur. Bu sebeplerden dolayı yeni nesil sirkülasyon pompaları değişken devirli yani sistemin debi ve basma yüksekliği ihtiyacına göre hızları ayarlanabilir olarak üretilmektedir. Yeni nesil sirkülasyon pompalarında kalıcı mıknatıslı senkron motor kullanılmaktadır ve bu motor vektör kontrol yöntemi ile kontrol edilmektedir.

Pompa karakteristiğini ifade eden temel denklemler Eşitlik (2.5–2.6–2.7)'de verilmiştir [2].

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.5)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (2.6)$$

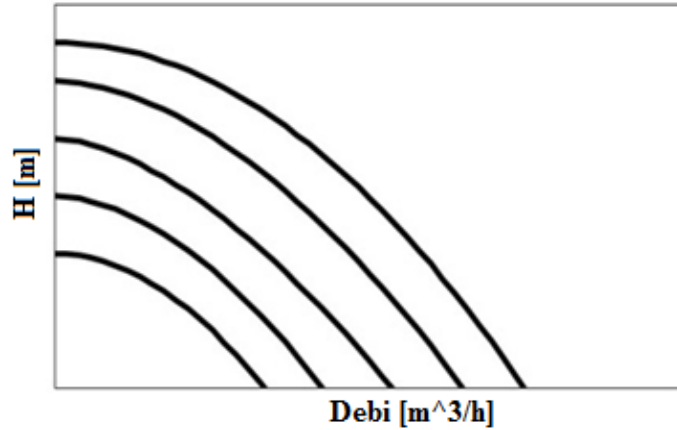
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (2.7)$$

Bir pompada debi değeri motor hızı ile doğru orantılı, basma yüksekliği hızın karesi ile orantılı, güç ise devir sayısının küpü ile orantılıdır. Yukarıdaki denklemlerden de görüldüğü üzere pompayı ihtiyaç duyulan hızın iki katında çalıştırılırsa şebekeden sekiz katı daha fazla güç çekiyor. Bu gereksiz enerji sarfıyatı ve bakım maliyetleri nedeniyle eski nesil sirkülasyon pompalarının yerini hızlı bir şekilde sabit miktatlı senkron motora sahip yeni nesil pompalar almaktadır.

### 2.3 Sirkülasyon Pompası Kontrol Tipleri

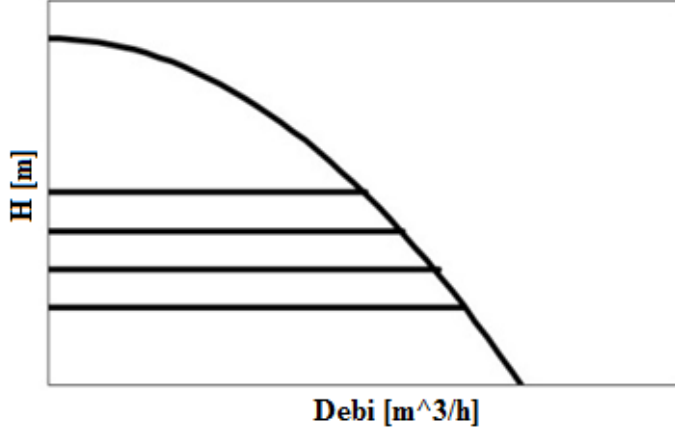
Sirkülasyon pompalarında temel olarak üç temel kontrol tipi vardır bunlar sabit eğri kontrolü, sabit basınç kontrolü, oransal basınç kontrolüdür.

Sabit eğri modunda pompa maksimum güç ve hız limitiyle kontrol edilir. Motor hızı mikroşlemci tarafından belirlenen hız limitinde kontrol edilir güç değeri eşik değerine ulaştığında ise motor hızı azaltılır. Sabit eğri moduna ilişkin Q – H karakteristiği Şekil 2.7’de verilmiştir.



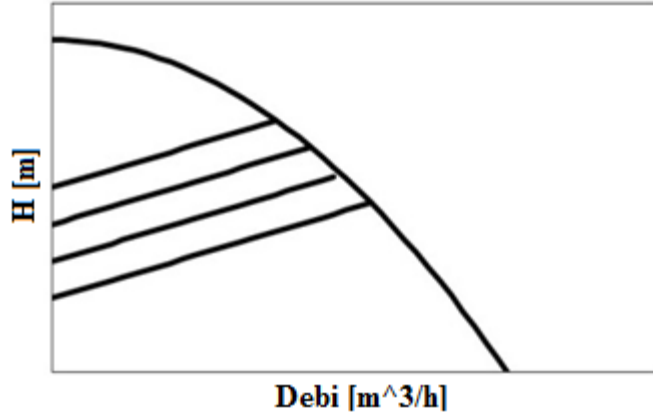
Şekil 2.7 : Sabit eğri modu örnek Q-H grafiği

İkinci sirkülasyon pompası kontrol modu sabit basınç modudur. Sabit basınç modunda pompa basma yüksekliği sabit tutulacak şekilde motor hızı değiştirilir. Şebekeden çekilen elektriksel güç limit değerine ulaşana kadar debi değeri artsada basınç değeri set edilen değerde sabit tutulur, güç limit değerine ulaştığında ise artık H değeri azalmaya başlar. H değerinin azalmaya başladığı nokta sabit basınç eğrisinin pompanın maksimum eğrisi ile kesiştiği noktadır. Sabit eğri moduna ilişkin Q – H karakteristiği Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Sabit basınç modu örnek Q-H grafiği

Üçüncü sirkülasyon pompası kontrol modu ise oransal basınç modudur. Oransal basınç modunda ise pompa basma yüksekliğinin debiye bağlı değişimi  $H=k+yQ$  şeklinde lineer bir denklemlerle tanımlanır. Sistem debisi arttıkça pompanın basma yüksekliği de tanımlı olan lineer denkleme bağlı olarak arttırılır. Oransal basınç moduna ilişkin Q-H karakteristiği Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Oransal basınç modu örnek Q-H grafiği

### 3. SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLARIN YAPISI VE MATEMATİKSEL MODELİ

#### 3.1 Sürekli Mıknatıs Malzemeler

Sürekli mıknatıslar kesintisiz manyetik alan üreten malzemelerdir ve bir kez manyetik özellik kazandırıldıktan sonra bu özelliklerini kaybetmezler. Bir kalıcı mıknatısdan beklenen temel özellikler şunlardır [3]:

- Enerji yoğunluğunun yüksek olması
- Kalıcı akı yoğunluğunun yüksek olması ( $BH_{max}$ )
- Doyma manyetizasyonunun yüksek olması ( $B_{sat}$ )

Elektrik makinalarında mıknatısların kullanılmaya başlanmasıyla makinada manyetik alan üretmek için kullanılan sargı yapısından birisi azaltılmıştır. Motorlarda kullanılan mıknatıslar ilk üretildiğinde genellikle manyetik özelliğe sahip değildirler veya çok zayıf manyetik özelliğe sahiptirler. Mıknatıs özelliği kazanmaları için mıknatıslandırılmalıdırlar. Üretildikleri fabrikalarda da mıknatıslandırılabilirler fakat birçok sebepten dolayı kullanılacakları fabrikalarda mıknatıslandırılmaları tercih edilir. Bunlardan bazıları şöyle sıralayabiliriz; insan vücudunun veya diğer cihazların yakınında bulunan mıknatıslar onlara zarar verebilir, mıknatısların taşınma sırasında ulaşım araçlarını özellikle uçakları etkileyebileceğinden dolayı mıknatıs özelliği kazandırılmış şekilde taşınmaları kanunlarca da yasaklanmıştır [4].

Sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılan mıknatısın özelliği motor performansını direkt olarak etkileyen bir parametredir bu nedenle tasarım aşamasında seçimi bilgi ve tecrübe gerektirmektedir.

Üretilen en eski mıknatıs malzemeleri çok kolay mıknatıslandırılabilirdiği için sertleştirilmiş çeliktir fakat bu tip mıknatıslar çok az enerji tutabiliyorlar ve kolayca demagnetize olabiliyorlardı. Günümüzde elektrik makinalarında aktif olarak kullanılan mıknatıslar ise şunlardır :

- Alnicolar : Al, Ni, Co, Fe;
- Seramikler (Feritler): Baryum Ferrit ve Stronsiyum;
- Nadir toprak mıknatısları: Samarium-Cobalt (SmCo), Neodyum-Demir-Boron (NdFeB).

SMSM'lerde en çok kullanılan iki mıknatıs tipi NdFeB ve ferrit mıknatıslardır. NdFeB mıknatıslar yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Neodyum mıknatıslar ferrit mıknatıslara göre çok daha güçlü manyetik alan üretirler fakat nadir toprak elementi mıknatıslarından olan bu mıknatısın maliyeti yüksektir [4].

Tez kapsamında çalışılan motor ferrit mıknatıslı yapıya sahiptir. Ferrit mıknatıslar demir oksit, baryum ve stronsiyum tozlarının ısı ve basınç altında seramik işlem tekniği kullanılmasıyla izotropik veya anizotropik yapıda olacak şekilde üretilmektedirler. İzotropik tip tüm yönlerde eşit manyetik alan gösterir, anizotropik tip ise baskı yönünde manyetik özellik kazanırlar . Çizelge 3.1'de NdFeB ve Ferrit mıknatısların temel karakteristik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1 : Mıknatısların karakteristiklerinin karşılaştırılması

Karakteristik	NdFeB	Ferrit
Remenans, $B_r [T]$	1.44	0.41
Coercivity, $H_c [kA/m]$	1115	240
Enerji yoğunluğu $BH_{max} [kJ/m^3]$	400	32
Özdirenç, $\Omega [(ohm.m) \times 10^{-6}]$	1.1 – 1.7	$10^9$
Bağıl geçirgenliği, $\mu$	1.04 – 1.1	1.1 – 1.3

Seramik mıknatıs olarak da isimlendirilen ferrit mıknatıslar sert ve kırılğan bir yapıya sahip olmalarına karşın korozyona karşı dirençleri yüksektir. Ferrit mıknatıslar düşük enerji yoğunluğuna sahiptir bu nedenle gerekli manyetik alanı oluşturmak için neodyum mıknatıslar ile karşılaştırıldığında daha büyük boyutlarda kullanılması gerekir fakat neodyum mıknatısla karşılaştırıldığında fiyatı oldukça düşük olması kullanım alanını arttırmaktadır [5]. Ferrit mıknatısların ucuz maliyetine ek olarak bir

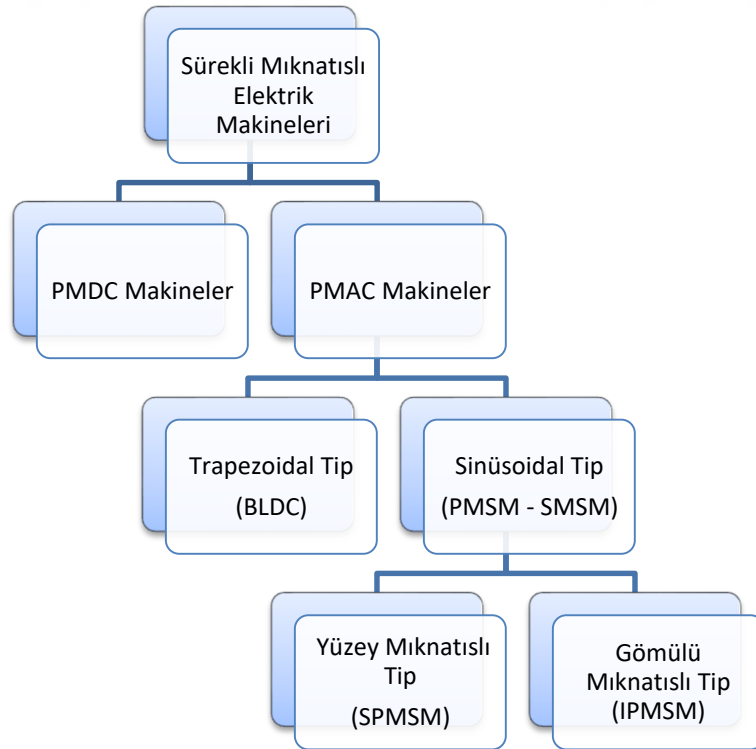


diğer avantajı ise yüksek elektriksel direncidir. Bu özelliği harmoniklerin etkisinden dolayı termal özellikleri düşen motorlarda kullanımını arttırmaktadır. Ferrit mıknatısların bir diğer avantajı ise diğer mıknatıs tipleri ile kıyaslandığında hafif olmalarıdır.

### 3.2 Mıknatıslı Motorların Sınıflandırılması

Mıknatıslar eski tarihlerden beri çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmalarına rağmen elektrik makinalarında 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır ve bu süreç ile birlikte nadir toprak mıknatıslarının kullanımında hızlı bir gelişim olmuştur. Bu gelişime ek olarak yarı iletken teknolojisi ve güç elektroniğindeki gelişmeler ile birlikte mıknatıslı motor ve kontrolü üzerine olan çalışmalar artmıştır. Düşük maliyetli mıknatıs tiplerinin geliştirilmesi ve mıknatıslı motorlarda kullanılmasıyla birlikte maliyeti de düşen mıknatıslı motorların popülerliği daha da artmıştır.

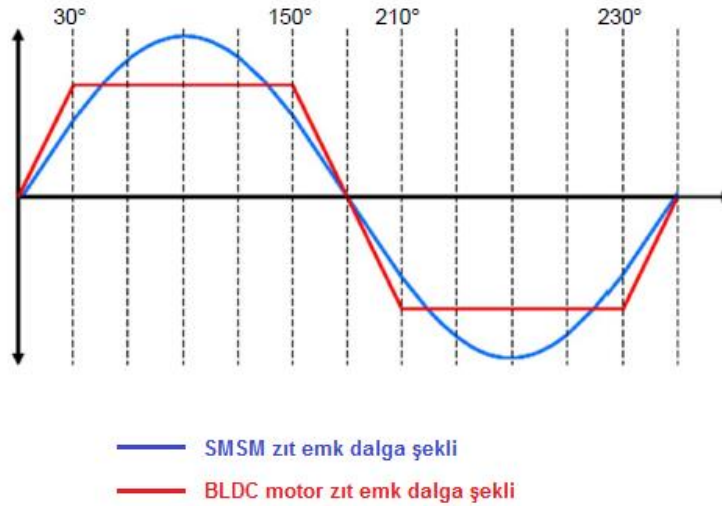
Mıknatıslı motorlar Şekil 3.1'deki gibi sınıflandırılabilir. İlk olarak stator alanının uyarım tipine göre DC uyarımlı kalıcı mıknatıslı motor (PMDC) ve AC uyarımlı kalıcı mıknatıslı motor (PMA) olmak üzere ikiye ayrılır. PMDC makinalar tez konusunun kapsamı dışında olduğu için detaylı bilgi verilmemiştir.



Şekil 3.1 : Mıknatıslı motorların sınıflandırılması

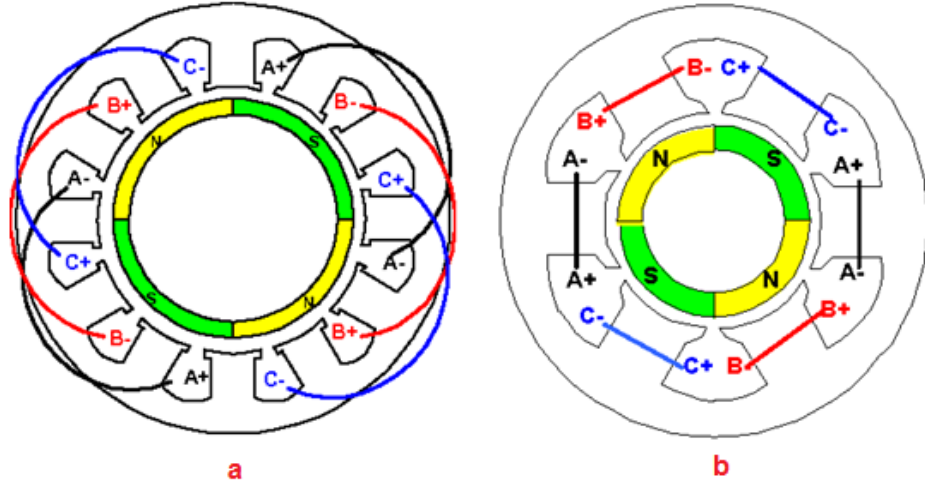
### 3.3 SMSM ve BLDC Motorların Karşılaştırılması

Sürekli mıknatıslı alternatif akım makinaları statorda endüklenen zıt emk gerilimin dalga şekline göre ikiye ayrılır bunlar sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) ve fırçasız dc motor (BLDC)'dur. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar ile fırçasız DC motorların yapısı oldukça benzerdir aralarındaki temel farklılık besleme gerilimi ve motorda endüklenen zıt emk gerilimin dalga şeklindedir. SMSM'larda sürekli mıknatısların stator sargılarında endüklediği zıt emk geriliminin şekli sinüzoidal, BLDC'lerde ise endüklenen gerilimin dalga şekli trapezoidaldir. SMSM ve BLDC motorlar için zıt emk dalga biçimleri Şekil 3.2'de verilmiştir.



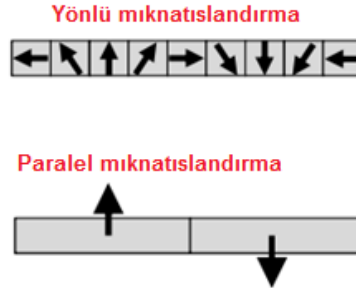
Şekil 3.2 : Mıknatıslı alternatif akım makinalarının zıt emk dalga şekilleri

Motorda tork, akım ve zıt emk'nın bir fonksiyonudur. Endüklenen zıt emk'nın dalga şekli ise temel olarak statorda kullanılan sargı tipiyle ilişkilidir. SMSM'lerde sinüzoidal zıt emk dalga şekli elde etmek için genellikle dağıtılmış sargı yapısı kullanılır ve sabit tork elde etmek için bu sargılar sinüzoidal akım ile enerjilendirilir. BLDC motorların statorlarında ise trapezoidal zıt emk dalga şekli elde etmek için genellikle konsantre sargı tipi kullanılır ve sabit tork elde etmek için bu sargılar kare dalga şeklindeki akım ile enerjilendirilir [6]. Dağıtılmış ve konsantre sargı yapıları Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Sargı tipleri a) dağıtılmış tip sargı b) konsantre tip sargı

SMSM'larda da konsantre tip sargı kullanılmaktadır. Bu durumda sinüzoidal zıt emk elde edebilmek ve statordaki harmonikleri azaltmak için mıknatıslar yönlü olarak mıknatıslandırılır. Yönlü manyetizasyon işlemi maliyeti artırır ve mıknatıs akısının azalmasına neden olur. Paralel ve yönlü mıknatıslandırılmış mıknatıs görselleri Şekil 3.4'de verilmiştir [5].



Şekil 3.4 : Mıknatıslandırma metodları

SMSM ve BLDC motorlar arasında yukarıda açıklanan elektriksel özellik farklılıkları Çizelge 3.2'de özet olarak verilmiştir.

Komutasyon motorun hareket edebilmesi için motor sargularından geçen akımın yönünün değiştirilmesi işlemidir. Mıknatıslı motorlarda komutasyon işlemi elektronik olarak invertör devreleriyle yapılır. SMSM'lar Alan etkili kontrol (FOC) kontrol teknikleri nedeniyle BLDC motorlara göre daha verimlidirler ve daha az tork dalgalanmasına sahiptirler. BLDC motorlar genellikle trapezoidal kontrol ile kontrol

edilmesine rağmen iki motor tipi de FOC ile kontrol edilebilmektedir. FOC kontrole ilişkin detaylar Bölüm 4’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Endüklenen gerilim şekline göre sürekli mıknatıslı motorların sınıflandırılması

	<b>Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor</b>	<b>Fırçasız DC Motor</b>
<b>Akı Değişimi</b>	Sinüzoidal	Trapezoidal
<b>Endüklenen Gerilim</b>	Sinüzoidal	Trapezoidal
<b>Besleme</b>	Sinüzoidal	Trapezoidal
<b>Güç</b>	Sabit	Sabit
<b>Moment</b>	Sabit	Sabit

Komutasyon motorun hareket edebilmesi için motor sargılarından geçen akımın yönünün değiştirilmesi işlemidir. Mıknatıslı motorlarda komutasyon işlemi elektronik olarak invertör devreleriyle yapılır. SMSM’lar Alan etkili kontrol (FOC) kontrol teknikleri nedeniyle BLDC motorlara göre daha verimlidirler ve daha az tork dalgalanmasına sahiptirler. BLDC motorlar genellikle trapezoidal kontrol ile kontrol edilmesine rağmen iki motor tipi de FOC ile kontrol edilebilmektedir. FOC kontrole ilişkin detaylar Bölüm 4’de verilmiştir.

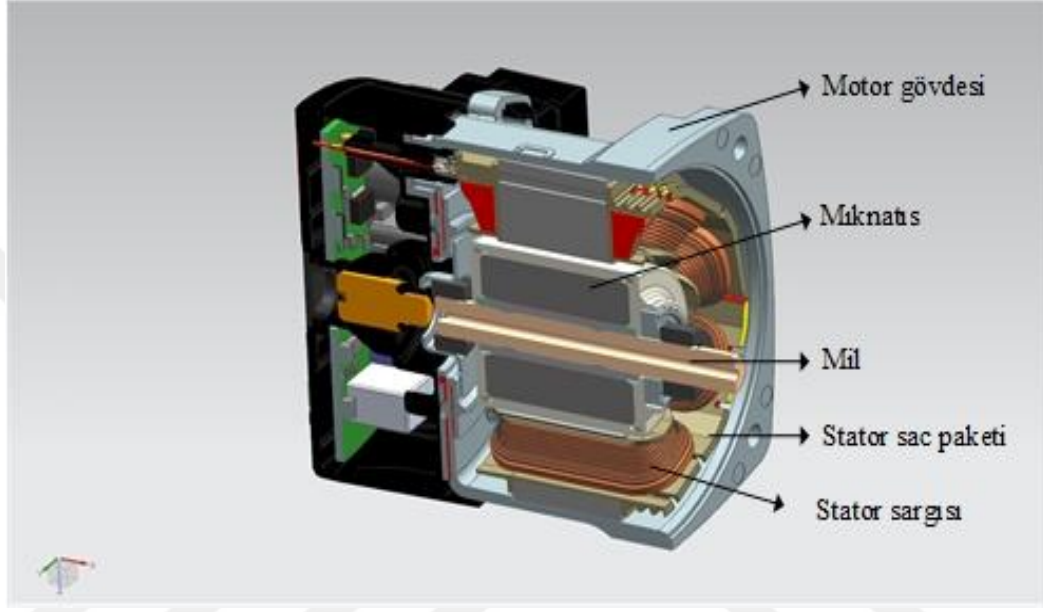
### **3.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun (SMSM) Yapısı**

Sürekli mıknatıslı motorlar diğer motor tiplerine göre üstün özellikleri nedeniyle savunma, otomotiv, robotik, beyaz eşya gibi endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

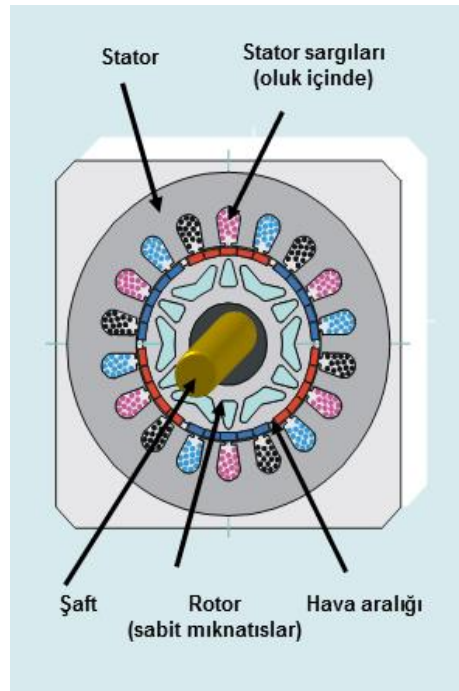
Senkron motorlar her zaman senkron hızda dönen elektrik makineleridir. Rotorlarında sürekli mıknatısların bulunduğu senkron motor yapısı sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) olarak adlandırılır. Bu tip motorların statorları alternatif akım ile beslenmektedir. Stator yapıları silisli saclardan oluşur ve sargılar oluklara yerleştirilir. Yüksek hızlı uygulamalarda oluksuz stator yapısında kullanılmaktadır. Rotor manyetik alanı ise doğru akım veya rotora monte edilen kalıcı mıknatıslar ile oluşturulur. Kalıcı

mıknatıslar hava aralığında yüksek manyetik akı yoğunluğu sağlar böylece motor yüksek tork çıkışı ve dinamik performansa sahip olur [8]. Tez kapsamında kontrolü yapılan SMSM'ye ait kesit görünümü Şekil 3.5'de verilmiştir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar girdap akımlarını sınırlandırmak için oluklu ya da oluksuz ince stator sacları, sabit mıknatıslı rotor, mil, gövde ve sensörden oluşur. Şekil 3.6'da sürekli mıknatıslı bir senkron motora ait detaylı görünüm verilmiştir.



Şekil 3.5 : SMSM kesit görünümü



Şekil 3.6 : Sürekli mıknatıslı senkron motorun görünümü

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarına stator yapıları asenkron motorların stator yapıları ile aynıdır ve statordaki oluk-kutup kombinasyonuna göre kullanılan temel sargı tipleri şunlardır [6] :

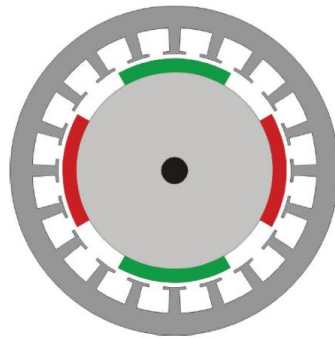
- Dağıtılmış sargı,
- Konsantre sargı,
- Gramme tip
- Sırt sırta bağlı sargı

SMSM'nin stator fazların uygun şekilde enerjilendirilmesiyle oluşturulan döner manyetik alan ile rotordaki mıknatısın oluşturduğu sabit alan motorun hareketi için gerekli momenti üretir. SMSM'lerin rotorunda akım olmadığı için bakır kaybı oluşmaz fakat mıknatısın ürettiği alan akısı sabit olduğu için motorun kontrolü klasik senkron motorlara göre daha zordur. Senkron motorların hızı yükten etkilenmez ve sabit kalır, rotor hızı manyetik alanın hızına eşittir [9]. Bilindiği üzere asenkron motorlarda verim kayma ile değişir ve kayma kavramı SMSM'lerde yoktur.

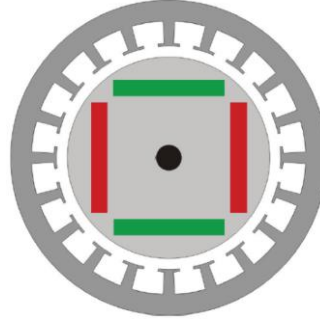
### 3.5 SMSM'un Sınıflandırılması

#### 3.5.1 SMSM'lerin mıknatısın rotora yerleştiriliş tipine göre sınıflandırılması

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar mıknatısın rotora yerleştiriliş tipine göre temel olarak iki sınıfa ayrılabilir. Bunlar yüzey mıknatıslı senkron motor ve gömülü mıknatıslı senkron motordur. Şekil 3.7' de yüzey mıknatıslı sürekli mıknatıslı senkron motor (SPMSM), Şekil 3.8'de ise gömülü mıknatıslı senkron motor (IPMSM) görünüşleri verilmiştir.

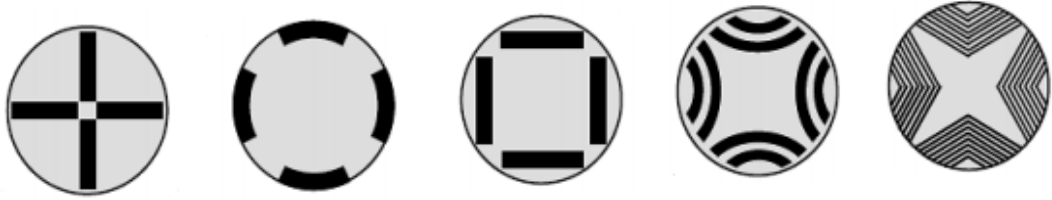


Şekil 3.7 : Yüzey montajlı sürekli mıknatıslı senkron motor (SPMSM)



Şekil 3.8 : Gömülü tip sürekli mıknatıslı senkron motor (IPMSM)

Şekil 3.9’da SMSM’lerde kullanılmakta olan farklı tip rotor yapıları gösterilmiştir. Tez kapsamında çalışılan motor spoke tip rotor yapısına sahiptir.



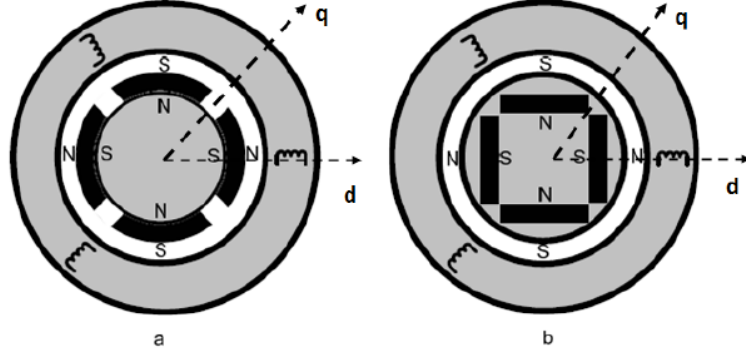
Şekil 3.9 : SMSM farklı rotor yapıları

Mıknatısın rotor üzerindeki konumu uygulama tipine göre seçilir. Genellikle hızlı dinamik cevap ve yüksek aşırı yük torku istenilen durumlarda yüzey montajlı sürekli mıknatıslı motor iyi bir tercihtir. Alan zayıflatma tekniğinin kullanıldığı uygulamalarda ise gömülü tip rotor kullanmanın avantajları vardır [10].

SPMSM’lerde rotor yapısı silindirik olup mile geçirilen rotor saclarının üzerine mıknatıslar yapıştırılır. IPMSM’lerde ise mıknatıslar rotor gövdesinin içine gömülmüştür.

Şekil 3.10’da gösterildiği üzere manyetik akı mıknatıslar tarafından d ekseni boyunca endüklenir, rotor q ekseni ise d eksenine göre doksan derece elektriksel açıyla konumlandırılmıştır.

IPMSM motorlarda mıknatıslar rotorun içine gömülmüştür. Mıknatıslar demirden daha düşük geçirgenliğe (bu yüksek relüktans demek) sahip olduğu için rotor pozisyonuna göre manyetik akı yolundaki hava boşluğu değişir. Bu değişim manyetik çıkıntı olarak adlandırılır ve buna bağlı olarak rotor pozisyonuna göre motor terminallerindeki endüktans değişim gösterir. Bu değişim Eşitlik (3.1) ile açıklanır.



Şekil 3.10 : SMPMSM ve IPMSM arasındaki farkları gösteren kesit

Rotor pozisyonuna göre motor terminalindeki endüktans değişimi:

$$L_{motor} = 1.5 \left[ \frac{(L_d + L_q)}{2} - \frac{(L_d - L_q)}{2} \right] \cos 2\theta \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de farkedilmesi gereken önemli bir husus endüktans değişiminin ölçümüyle rotor pozisyonunun belirlenebileceğidir. Bu karakteristik motora sensör bağlamadan açık çevrim vektör kontrol için rotor pozisyonun belirlenmesini sağlar.

Mıknatısların bağıl geçirgenliğinin bir'e yakın olması nedeniyle, bu aynı zamanda havanın da bağıl geçirgenliğidir, IPMSM'lerde d eksenine hava aralığı q eksenine göre fazladır. Bu nedenle IPMSM'lerde d eksenine relüktansı q eksenine relüktansından yüksektir [11]. Bunun anlamı q eksenine endüktansının d eksenine endüktansından büyük olmasıdır. ( $L_d < L_q$ ) IPMSM'lerde çıkıntı oranı Eşitlik (3.2)'deki gibi ifade edilir.

$$\varepsilon = \frac{L_q}{L_d} \quad (3.2)$$

SPMSM'lerde ise mıknatıslar yüzeye monte edildiği için relüktans her pozisyonda aynıdır. İndüktans değeri motor terminalerinden rotor pozisyonundan bağımsız olarak sabit bir değer olarak ölçülür. Havanın ve mıknatısın bağıl geçirgenliklerinin neredeyse eşit olması nedeniyle SPMSM'lerde d eksenine endüktansının q eksenine endüktansına eşit olduğu kabul edilir. SPMSM'lerde çıkıntı oranı çok düşüktür. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$\mu_{sm} \approx \mu_{hava} \rightarrow L_d \approx L_q$$

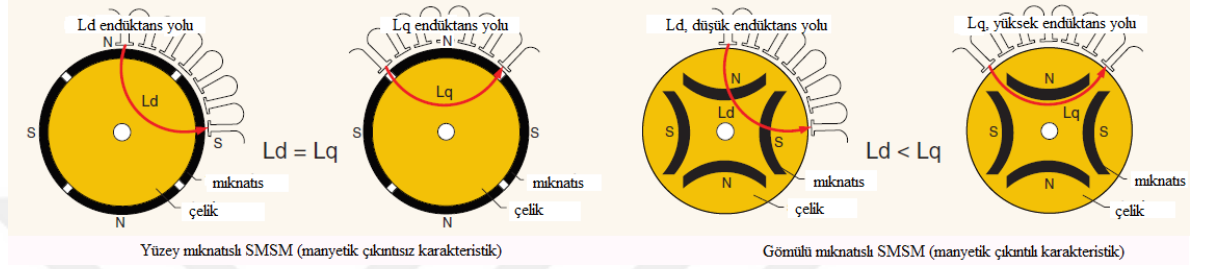


Burada ;

$\mu_{sm}$  : Sürekli mıknatısın bağıl geçirgenliği

$\mu_{hava}$  : Havanın bağıl geçirgenliği

Şekil 3.11’de yüzey mıknatıslı SMSM ve gömülü mıknatıslı SMSM için manyetik akı yolundaki efektif hava aralığı gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : SMSM manyetik çıkıntı karakteristikleri

Sürekli mıknatıslı motorların mil momenti iki bileşene sahiptir bunlar mıknatıs ve relüktans momentidir. SMSM’lar için tork denklemi Eşitlik 3.3’de verilmiştir

$$T = \frac{mp}{W} [E_q I_q + I_d I_q (X_d - X_q)] \quad (3.3)$$

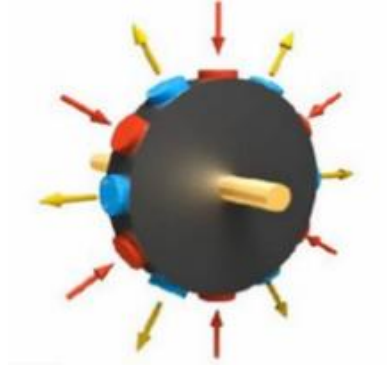
Hem SPMSM tipi hem de IPMSM tipi motorlar yüksek verime sahiptir fakat IPMSM motorlar manyetik çıkıntıdan kaynaklı relüktans ve mıknatıs torkuna sahiptir bu nedenle tork değerleri daha yüksektir. Yüzey mıknatıslı senkron motorlarda d ve q eksen endüktansları eşit kabul edilir bu nedenle bu tip motorlarda relüktans torku oluşmaz. Gömülü mıknatıslı senkron motorlarda ise eksen endüktansları arasındaki farktan dolayı mıknatıs torkuna ek olarak relüktans torkuda üretilir.

Gömülü mıknatıslı motorların en önemli avantajı aynı anda hem relüktans hem de mıknatıs momenti oluşturabilmesidir. Gömülü mıknatıslı motorlar yüksek hızlarda yüksek moment üretmek için kullanılır [12].

### 3.5.2 SMSM’lerin akı yönüne göre sınıflandırılması

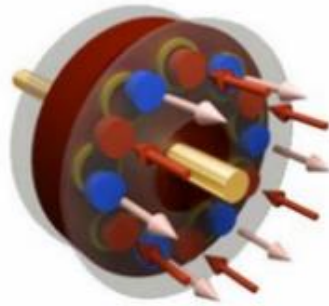
Sürekli mıknatıslı senkron motorlar akı yönüne göre iki sınıfa ayrılabilir bunlar radyal akılı ve aksenal akılı motorlardır. Radyal akılı motorlarda akı motor miline diktir. Genellikle mıknatıslı motorlar stator ve rotor arasında küçük hava aralığı olacak

şekilde radyal akılı olarak tasarlanırlar. Radyal akılı motorlar en çok kullanılan mıknatıslı motor tipidir. Radyal akılı motorda akı dağılımı Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Radyal akılı motor

Eksenel akılı motorlarda ise akı motor miline paraleldir. Bu tip motorlarda akı hava boşluğunda eksenel olarak hareket eder. Eksenel akılı motorlar düşük hızlarda yüksek momentler sağlayabilirler ve daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Statorlarının üretiminin zorluğu ve maliyeti bu tip motorların kullanım alanını kısıtlamaktadır. Eksenel akılı motorda akı dağılımı Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13 : Eksenel akılı motor

### 3.5.2 SMSM’un avantaj ve dezavantajları

SMSM’un başlıca avantajları şunlardır:

- Uzun ömür
- Yüksek güç faktörü
- Geniş hız aralığında çalışabilirler
- Rotorda kullanılan mıknatıslı yapı sayesinde moment/hacim oranı asenkron motora göre daha yüksektir

- Yapıları basittir
- Fırça ve kollektör içermezler, komütasyon elektronik sürücüler ile sağlanır bu nedenle fırça kayıpları yoktur
- Fırça yapısı olmadığı için ark oluşmaz bu nedenle daha güvenlidirler
- Verimleri yüksektir
- Rotor bakır kayıpları yoktur
- Küçük boyutlu olarak tasarlanabilirler
- Yüksek maksimum tork
- Rotoru mıknatıslı olduğu için motor daha kolay soğutulabilir

SMSM'un başlıca dezavantajları şunlardır:

- Komütasyon için rotor pozisyonunun algılanması gereklidir
- Motor çalışma için sensör veya sensörsüz kontrol teknikleri gereklidir
- Sürüş ve besleme için özel elektronik devre gereklidir
- Kalıcı mıknatıs kullanılması nedeniyle sıcaklık değişimi, mekanik etkiler ve ters manyetik alan gibi dış faktörlere karşı hassastırlar
- Motor düzgün soğutulmazsa mıknatısların manyetik alanlarındaki değişim nedeniyle çıkış torkunda azalmalar olabilir
- Sensörsüz kontrolde kullanılan vektör kontrol algoritması matematiksel ifadeler içerdiği için sensörsüz kontrol uygulamaları tecrübe ve bilgi birikimi gerektirir

### **3.6 SMSM'un Elektriksel Parametrelerinin Ölçümü**

Günümüzde sürekli mıknatıslı motor kontrolünde en sık kullanılan yöntem vektör kontrol veya alan etkili kontrol (FOC) olarak adlandırılan algoritmadır. Vektör kontrol için motora ait bazı elektriksel parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu elektriksel parametreler kontrol algoritmasında istenilen kapalı çevrim kontrol performansının elde edilebilmesi için akım PI kazançlarının ayarlanmasında ve zıt emk gözlemleyici sabitlerinin belirlenmesinde kullanılır [13]. Bu bölümde sürekli mıknatıslı senkron

motorun kontrolü için bilinmesi gereken elektriksel parametrelerin ölçüm yoluyla nasıl elde edileceği ele alınmıştır.

SMSM'nin vektör kontrolü için bilinmesi gereken motor parametreleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Vektör kontrol için gerekli elektriksel parametreler

Parametre	Birim	Açıklama
$k_e$	$V.s/rad$	Elektriksel sabit
$L_d$	H	Bir motor fazının d eksen endüktansı
$L_q$	H	Bir motor fazının q eksen endüktansı
$R_s$	$\Omega$	Motorun bir fazının direnci
pp	-	Kutup çifti sayısı

SMSM vektör kontrol akım PI kazançları Eşitlik (3.4–3.5) kullanılarak hesaplanabilir:

$$K_p = 2\xi\omega_o L - R \quad (3.4)$$

$$K_i = \omega_o^2 L \quad (3.5)$$

Burada ;

$\omega_o$  : Kapalı çevrim sistemin doğal frekansı

$\xi$  : Sönüm katsayısı

### 3.6.1 Zıt emk sabiti ölçümü

Elektromotor kuvveti nedeniyle oluşan motor gerilimi açısal hız ile doğrusal olarak artar ve eğimi zıt emk sabiti tarafından belirlenir. Zıt emk sabiti tork sabitine eşittir [ $Nm/A$ ]. Aynı motorda statorda kullanılan tel çapının veya tel malzemesinin değişmesi zıt emk sabiti'ni değiştirmezken sipir sayısının değişmesi zıt emk sabitini değiştirir çünkü zıt emk sabiti statorda indüklenen gerilimle ilgilidir, akım ile ilgili değildir.

$k_e$ 'nin yüksek veya düşük istenmesi uygulamaya göre değişir. Sensörsüz kontrolde pozisyon ve hız tahmininin kolay yapılması için yüksek zıt emk sabiti istenir fakat yüksek olması diğer alanlarda sınırlar yaratır. Düşük devirlerde  $k_e$ 'nin yüksek olması avantaj fakat yüksek devirlerde  $k_e$ 'nin yüksek olması verimi düşürür.

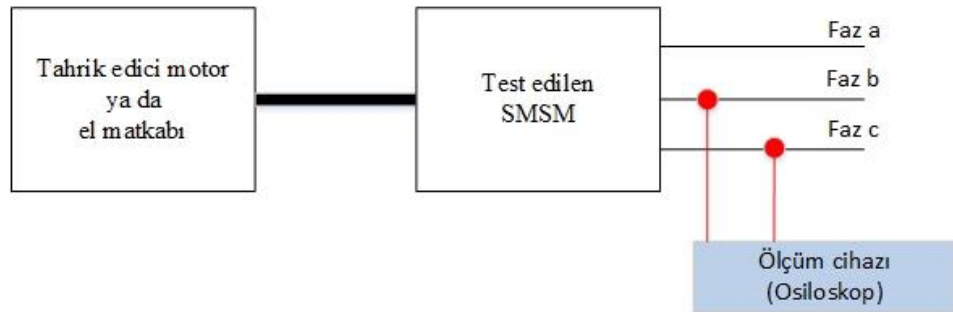
Genellikle motor veri sayfalarında listelenen ve giriş akımı ile üretilen tork arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan bir parametredir. Bu ilişki Eşitlik (3.6)'da verilmiştir.

$$\frac{V \cdot s}{rad} = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^2} = \frac{N \cdot m}{A} \quad (3.6)$$

Zıt emk sabiti motor yüksüzken sabir bir açısal hız ile tahrik edilmesi sonucu endüklenen gerilimin tepe değerinin ölçülmesiyle hesaplanabilir [13]. Motorun tahrik edilme hızı ile endüklenen gerilim arasındaki lineer ilişkiyi sağlayan sabit zıt emk sabitidir.

Zıt emk sabiti aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanır:

Motor harici bir motor ile sabit hızda tahrik edilir. Bunun için gerekli bağlantı Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

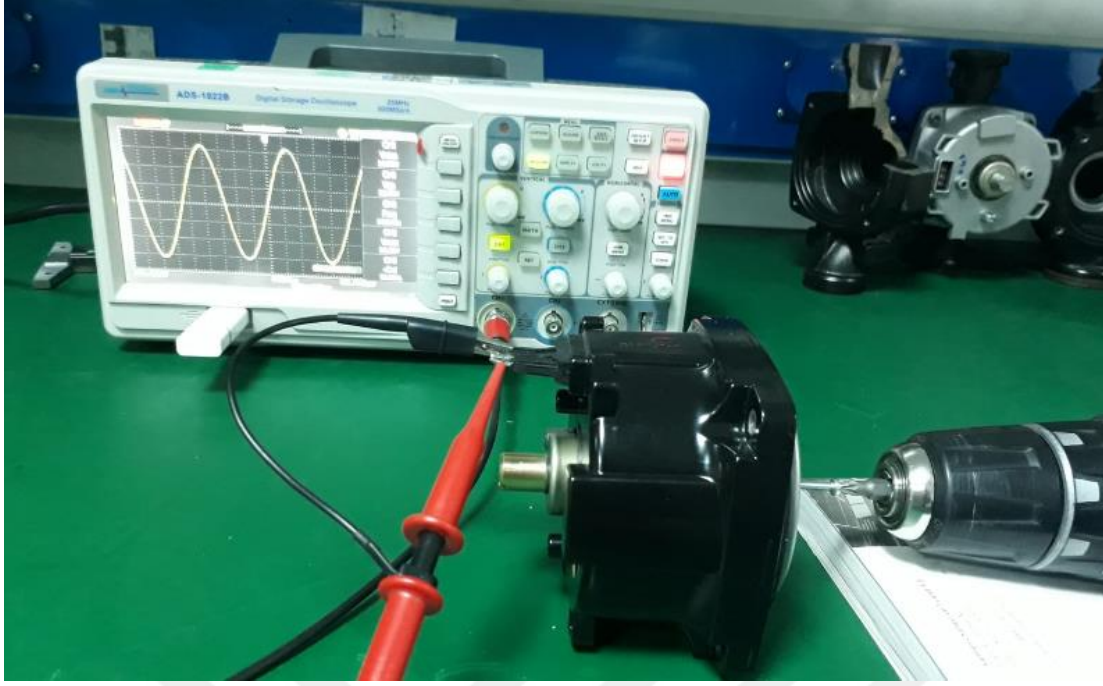


Şekil 3.14 : Zıt emk sabiti ölçümü için bağlantı şeması

İki faz arasında endüklenen gerilim osiloskop ile ölçülerek Eşitlik (3.7) ile zıt emk sabiti hesaplanır.

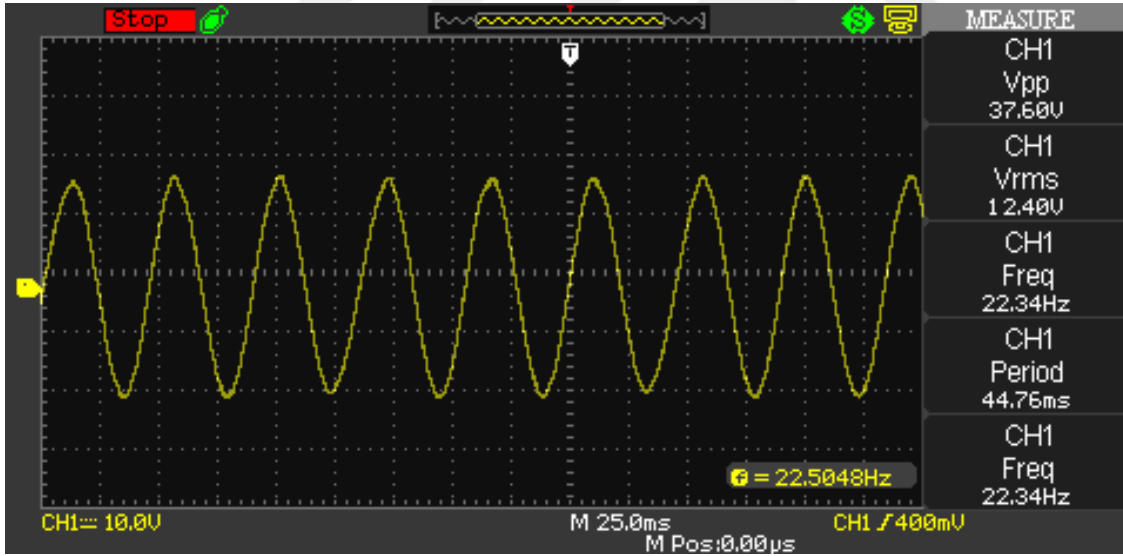
$$k_e = \frac{V_{pk}}{\omega_{el}} = \frac{V_{pk-pk}}{2\omega_{el}} \left[ \frac{V \cdot s}{rad} \right] \quad 3.7$$

Tez kapsamında çalışılan motorun zıt emk sabitinin ölçümüne ilişkin elektriksel bağlantı Resim 3.1'de verilmiştir.



Resim 3.1 : Zıt emk ölçüm bağlantısı

Elde edilen zıt emk dalga şekli Şekil 3.15’de verilmiştir.

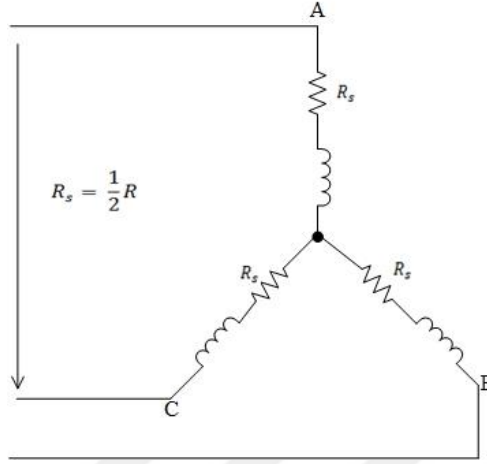


Şekil 3.15 : Zıt emk ölçümü osiloskop görüntüsü

### 3.6.2 Stator faz direnci ölçümü

Stator faz direnci motorun bir faz terminali ile sargınının yıldız noktası arasındaki direnci ifade eder. Stator faz direnci mikro-ohm metre, multimetre veya RLC metere ile ölçülebilir. Kullanılacak cihaz statorun faz direncinin büyüklüğüne göre seçilir, genel uygulamalarda eğer stator direnci  $15\Omega$ 'dan büyükse multimetre küçükse daha hassas ölçüm alabilmek için mikroohm metre veya RLC metre kullanılır [13].

Eğer motorun yıldız noktasına motor gövdesi nedeniyle erişilemiyorsa faz–faz arası direnç ölçülüp sonuç ikiye bölünerek faz – yıldız noktası direnci elde edilir. Stator faz direncinin ölçümü şematik olarak Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 : Stator faz direnci ölçümü bağlantı şeması

Resim 3.2’de test kapsamında kullanılan motorun multimetre ile faz direnci ölçümü gösterilmiştir.



Resim 3.2 : Faz direnci ölçümü

### 3.6.3 Kutup sayısı ölçümü

SMSM'un kutup çifti sayısının belirlenmesi için en yaygın kullanılan yöntemin adımları şu şekildedir :

Statorun A fazı gerilim kaynağının pozitif ucuna , B ve C fazı ise gerilim kaynağının negatif ucuna bağlanır. Statora gerilim verilmeden kaynağın akım sınırı motorun nominal akımının %10'u olacak şekilde ayarlanmalıdır.

Stator sargılarına gerilim verildiği anda rotor en yakın d eksenine hizalanacak şekilde hareket eder ve bu noktada stabil bir şekilde durur.

Stator enerjiliyken testi yapan kişi tarafından rotor yavaş adımlarla döndürülür ve rotorun stabil olarak hareketsiz durduğu noktalar sayılır.

Rotorun hizalanıp stabil olarak durabildiği nokta sayısı motorun kutup çifti (pp) sayısıdır [14].

Resim 3.3'de tez kapsamında kullanılan motorun kutup sayısı ölçümü gösterilmiştir.



Resim 3.3 : Kutup sayısı ölçümü

Kutup sayısının ölçümü sırasında DC güç kaynağının akım sınırı motorun nominal akımının en fazla %10'u olacak şekilde ayarlama adımı unutulmamalıdır.



### 3.6.4 d ve q eksenli endüktansları ölçümü

Gömülü tip rotora sahip sürekli mıknatıslı senkron motorlarda d eksenli relüktansı q eksenli relüktansından yüksektir. Bunun anlamı q eksenli endüktansının d eksenli endüktansından büyük olmasıdır.

Yüzey montajlı SMSM'lerde ise mıknatıslar yüzeye monte edildiği için relüktans her pozisyonda aynıdır. Bu tip motorlarda d eksenli endüktansının q eksenli endüktansına eşit olduğu kabul edilir.

Rotor  $\theta_{el} = 0$  veya  $\theta_{el} = \pi/2$  olacak şekilde hizalanıp kilitlendikten sonra stator sargılarına step gerilim uygulayıp bunun stator RL devresi üzerindeki akım tepkisi ölçülerek senkron endüktanslar hesaplanabilir. Rotorun elektriksel açısına bağlı olarak senkron endüktanslar Eşitlik (3.8-3.9) kullanılarak hesaplanır.

$$L_d = \left(\frac{2}{3}\right)L \quad (\theta_{el} = 0^\circ) \quad (3.8)$$

$$L_q = \left(\frac{2}{3}\right)L \quad (\theta_{el} = 90^\circ) \quad (3.9)$$

Burada;

L : Stator sargılarından ölçülen toplam endüktans

Rotor  $\theta_{el} = 0^\circ$  (a fazı ile hizalı) konumunda kilitli durumda iken, birinci dereceden RL devresinin akım tepkisi Eşitlik (3.10)'de verilmiştir [13].

$$i_d = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3.10)$$

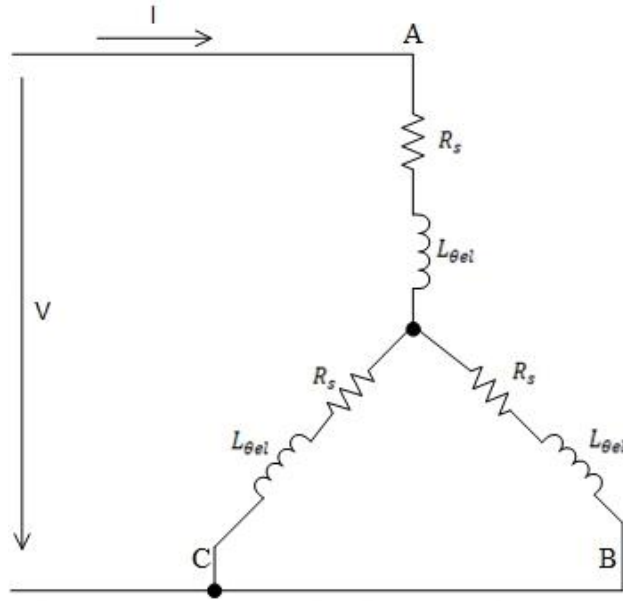
$\tau$  zaman sabiti olarak tanımlanır ve Eşitli (3.11)'deki gibi ifade edilir.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.11)$$

Zaman sabiti ölçüldükten sonra  $L_d$  Eşitlik (3.12)'deki gibi hesaplanır.

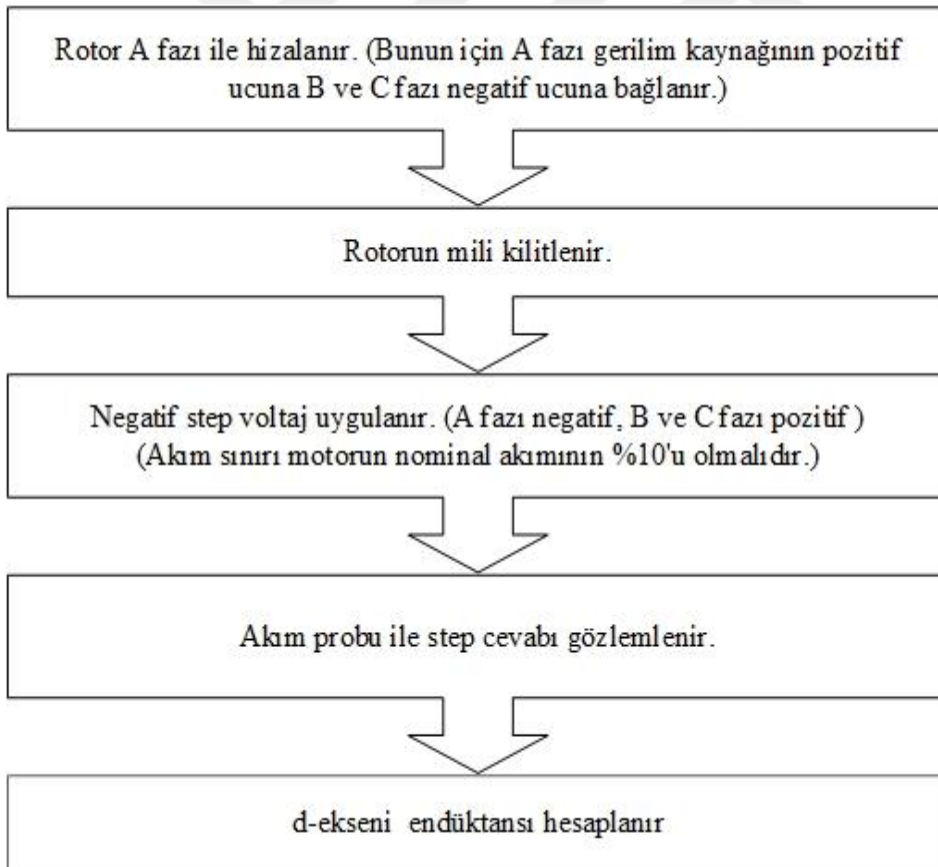
$$L_d = \frac{2}{3}\tau R \quad (3.12)$$

Senkron endüktansların ölçümü için devre şeması Şekil 3.17'de verilmiştir.



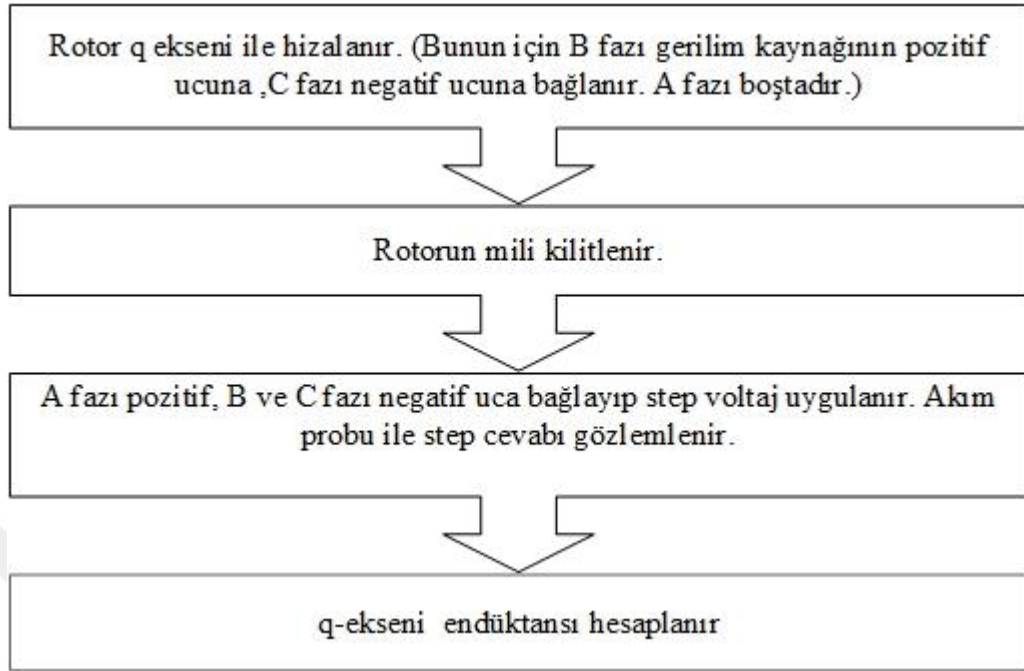
Şekil 3.17 : Endüktans ölçüm devresi

d eksenli endüktans ( $L_d$ ) ölçümü Şekil 3.18’de özetlenmiştir.



Şekil 3.18 : d eksenli endüktansı ölçümü akış şeması

q eksenli endüktans ( $L_q$ ) ölçümü Şekil 3.19'da özetlenmiştir.



Şekil 3.19 : q eksenli endüktansı ölçümü akış şeması

Resim 3.4'de tezde kullanılan SMSM'un endüktans ölçümü gösterilmiştir.



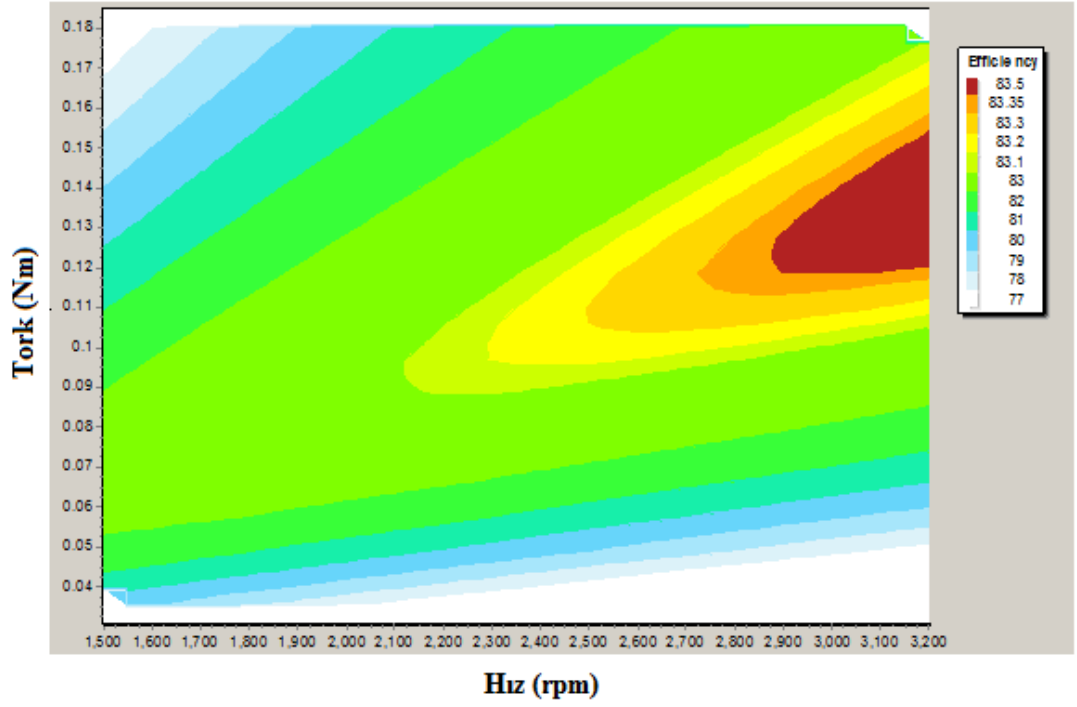
Resim 3.4 : Endüktans Ölçümü

### 3.7 Tez Çalışmasında Kullanılan SMSM'un Özellikleri

Tez kapsamında kontrolü üzerine çalışılan ıslak rotorlu sirkülasyon pompasında kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motorun bölüm 3.6'da anlatılan ölçüm metodları kullanılarak ölçüm sonucu elde edilen elektriksel parametreleri ve diğer motor parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Motorun Speed motor tasarım programında elde edilen tork-hız karakteristiği ise Şekil 3.20'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Tezde kullanılan motorun elektriksel parametreleri

Parametre	Değer
Faz direnci (20 °C)	52 $\Omega$
d-ekseni endüktansı	188 mH
q-ekseni endüktansı	182 mH
Kutup sayısı	6
Mıknatıs ile akı bağı	138.4 mVs
Zıt emk sabiti	0.134 Vs/rad
Rotor atalet momenti	0.71 kg.cm <sup>2</sup>
Anma akımı	160 mA
Anma hızı	3000 rpm
Anma torku	13 Ncm
Bakır kaybı	0.94 W
Yatak sürtünme kaybı	0.5 W
Kayma kuvveti sürtünme kaybı (ıslak rotor)	0.5 W
Stator kılıfı kaybı	3.9 W



Şekil 3.20 : Tez’de kullanılan motorun hız-tork karakteristiği

### 3.8 SMSM’un Matematiksel Modeli

Sürekli mıknatıslı senkron motorun vektör kontrol ile kontrol edilmesinde motorun matematiksel modelinin bilinmesi çok önemlidir. Matematiksel modeldeki tutarsızlık ve hatalar kontrolde başarısızlık ile sonuçlanabilir. Bu bölümde sürekli mıknatıslı motorun matematiksel modelleri ele alınmıştır.

Matematiksel modeller çıkartılırken aşağıdaki kabullenmeler yapılmıştır [15]:

- Doyma ve parametre değişiklikleri ihmal edilmiştir.
- Stator sargıları endüklenen sinüzoidal emk ile dengelidir.
- Edyy akımları ve histerisiz kayıpları ihmal edilmiştir.
- Rotor pozisyonuna karşı endüktans sinüzoidaldir.

SMSM’lerin matematiksel olarak modellenmesinde üç farklı model kullanılır ve bu modeller şunlardır:

- Üç faz değişken model, bu model rotor pozisyonuna göre değişen üç faz akım ve gerilimden meydana gelir. Değişkenler stator referans düzleminde tanımlanır.

- $\alpha - \beta$  eksen modeli
- $d - q$  eksen modeli

### 3.8.1 SMSM'un üç faz matematiksel modeli

Üç fazlı sürekli mıknatıslı senkron motor sürücüsünde elde edilen ve motorun stator sargılarına uygulanan üç fazlı gerilimleri Eşitlik (3.13-3.14-3.15)'deki gibi ifade edilir.

$$v_a = V_m \sin \omega_e t \quad (3.13)$$

$$v_b = V_m \sin(\omega_e t - 2\pi/3) \quad (3.14)$$

$$v_c = V_m \sin(\omega_e t + 2\pi/3) \quad (3.15)$$

Stator faz gerilimleri stator koordinatlarında matris formatında Eşitlik (3.16)'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Burada;

$v_a, v_b, v_c$  : Stator faz-nötr gerilimleri

$i_a, i_b, i_c$  : Stator akımları

$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  : Faz akıları

$\rho$  : Türev operatörü

Faz sargı akıları Eşitlik (3.17)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \Psi_m \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Burada;

$\Psi_m$  : Mıknatıs akısı

$M_{ab}, M_{ac}, M_{bc}$  : Faz sargıları arasındaki ortak endüktans

$L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$  : Faz sargılarının endüktansları

$\theta_e$  : Rotorun elektriksel açısı

Eşitlik (3.16) ve Eşitlik (3.17) birleştirilerek faz gerilimleri Eşitlik (3.18)'deki gibi ifade elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Burada;

$R_a, R_b, R_c$  : Faz sargılarının omik direnci

$e_a, e_b, e_c$  : Sabit mıknatıslı rotor tarafından stator sargılarında endüklenen zıt emk'dır ve Eşitlik (3.19)'deki gibi ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega_e \cdot \Psi_m \cdot \rho \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Motorun elektriksel çıkış gücü Eşitlik (3.20) ile gösterildiği şekildedir :

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (3.20)$$

Motorun elektromanyetik momenti Eşitlik (3.21) ile gösterildiği şekildedir :

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_e} \quad (3.21)$$

Eşitlik (3.20) ve Eşitlik (3.21) birleştirilirse motorun hava aralığında üretilen elektriksel tork ifadesi Eşitlik (3.22)'deki gibi ifade edilebilir:

$$T_e = \frac{e_a i_a}{\omega_e} + \frac{e_b i_b}{\omega_e} + \frac{e_c i_c}{\omega_e} \quad (3.22)$$

Burada;

$\omega_e$  : rotorun elektriksel açısal hızı

Motor hareket denklemi, hava aralığında üretilen elektromanyetik manyetik tork ile ilişkili olacak şekilde Eşitlik (3.23)'de verilmiştir.

$$T_e = T_y + J \frac{d\omega_e}{dt} + B_m \omega_e \quad (3.23)$$

Burada;

$T_y$  : Yük momentini

$B_m$  : Sistemin sürtünme katsayısı

$J$  : Atalet momentini

Newton kanunu kullanarak Eşitlik (3.23), Eşitlik (3.24)'deki gibi düzenlenir ve bu eşitlik motor hareket denkleminin olarak isimlendirilir :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_y \quad (3.24)$$

Elektriksel açısal hız ( $\omega_e$ ) ile elektriksel açı ( $\theta_e$ ) arasındaki ilişki Eşitlik (3.25) ile gösterildiği şekildedir :

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (3.25)$$

Rotorun mekanik ve elektriksel hızları arasındaki ilişki Eşitlik (3.26) ile gösterildiği şekildedir :

$$\omega_r = \frac{\omega_e}{\text{kutup çifti sayısı}} \quad (3.26)$$

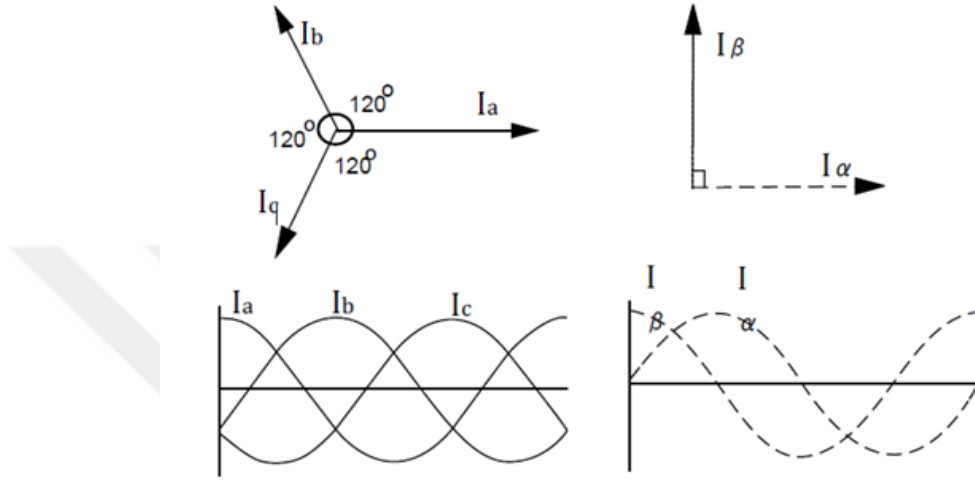
### 3.8.2 $\alpha$ - $\beta$ düzleminde SMSM'un matematiksel modeli

SMSM'un üç faz modeli akım ve gerilim denklemleri doğrusal olmayan ifadeler içermektedir ve bu durum kontrolü zorlaştırmaktadır. Üç faz modeli için kontrolcü ve tahminci yapıları oldukça karmaşıktır. Ayrıca stator senkron endüktansı  $\theta_r$ 'ye bağlı olduğunda gerilim ve moment eşitliklerinin matematiksel çözümü de zordur. Bu zorluklardan kurtulup doğrusal kontrol yapılarını kullanabilmek için bu denklemlerin bir takım dönüşümler kullanılarak doğrusallaştırılması gerekmektedir. Dönüşümlerin temel prensibi DC akım taşıyan dönen sargıların veya AC akım taşıyan sabit sargıların dönen bir alan sistemi üretebileceğidir [16].

Bu dönüşümlerden ilkinin temel prensibi üç fazlı yıldız bağlı motorlarda stator parametrelerinin birbirine bağlı olmasından dolayı bu üç fazlı sistem tarafından



üretilebilen alanın iki fazlı birbirine dik sargı yapısı tarafından da üretilebileceğidir. Bu prensibide dayanan dönüşüm Clarke dönüşümüdür. Clarke dönüşümü üç faz AC akım ve gerilim değerini a-b-c referans düzleminden iki faz AC akım ve gerilim düzlemi  $\alpha - \beta$  referans düzlemine dönüştürür. Clarke dönüşüm referans düzlemi ve dönüşüm sonucu elde edilen iki faz AC dalga Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 : Clarke Dönüşümü

Clarke dönüşümü dengeli üç faz büyüklükleri dengeli iki faz büyüklüğe çeviren matematiksel bir dönüşümdür. Clarke dönüşümüne ait matematiksel ifadeler Eşitlik (3.27) ile gösterildiği şekildedir :

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha} \\ f_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$\alpha - \beta$  referans düzlemindeki değerler kontrol mühendisleri için model türetme aşamasında çok bir anlam ifade etmez. Uygulanan PWM’e göre gerçek faz akımlarının değişiminin gözlemlenebilmesi için a-b-c düzlemine geri dönülmesi gerekir. Bu nedenle  $\alpha - \beta$  referans düzleminde yapılan tasarım ve hesaplamalardan sonra değerler ters Clarke dönüşümü kullanılarak üç faz sabit referans düzlemine geri dönüştürülür. Ters Clarke dönüşümü Eşitlik (3.28)’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Clarke matrislerinin oluşturulmasının matematiksel ispatı ve açıklamaları aşağıda verilmiştir. Bu açıklamalar sırasında akım ve gerilim değerleri sabit üç faz ekseninden (a-b-c) sabit iki faz eksene ( $\alpha - \beta$ ) taşınarak Clarke matrisleri doğrulanmıştır.

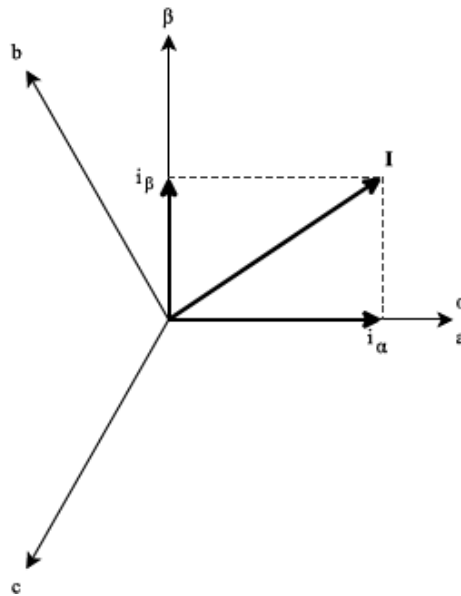
Şekil 3.22'de  $I_a, I_b, I_c$  üç faz akım vektörleri ve  $I_\alpha, I_\beta$  akım vektörleri, uzay vektör diyagramında gösterilmiştir. Bu diyagramdan da açıkça görüleceği üzere Clarke dönüşümü temel olarak üç faz akımının teker teker  $\alpha - \beta$  eksenlerine iz düşümünün alınmasıyla elde edilir.

Üç faz akımlarının  $\alpha - \beta$  koordinat sisteminde izdüşümünün alınması sonucu elde edilen akım denklemleri Eşitlik (3.29) ve Eşitlik (3.30)'de verilmiştir.

$$I_\alpha = I_a + I_b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)$$

$$I_\alpha = I_a - \frac{1}{2}I_b - \frac{1}{2}I_c$$

$$I_\alpha = k \left( I_a - \frac{1}{2}I_b - \frac{1}{2}I_c \right) \quad (3.29)$$



Şekil 3.22 : abc ve  $\alpha$ - $\beta$  koordinat sistemlerinde akım vektörü gösterimi

$$I_{\beta} = I_a \cdot \sin(0) + I_b \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)$$

$$I_{\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_b - \frac{\sqrt{3}}{2} I_c$$

$$I_{\beta} = k \left( \frac{\sqrt{3}}{2} I_b - \frac{\sqrt{3}}{2} I_c \right) \quad (3.30)$$

Eşitlik (3.29) ve Eşitlik (3.30)'da dönüşümlerden sonra eklenen “**k**” sabiti dengeleme sabiti olarak adlandırılır. Dengeleme sabitinin kullanılmasında ki temel prensip yapılan bu matematiksel dönüşüm sonrasında sistemin değişmediği ve üç fazlı sistemin elektriksel gücünün iki fazlı sistemin elektriksel gücüne eşit olması gereğidir. Bu durumun matematiksel ispatı aşağıda verilmiştir.

$$I_{\alpha} = \frac{N}{N_2} I_a - \frac{1}{2} (I_b + I_c)$$

Dengeli üç faz sistemlerde  $I_b + I_c = -I_a$ 'dır.

$$I_{\alpha} = \frac{N}{N_2} \left( \frac{3}{2} I_a \right)$$

$$|I_{\alpha}| = \frac{N}{N_2} * \frac{3}{2} I$$

Burada;

N : üç faz için faz sarımı

$N_2$  : iki faz için faz sarımı

Benzer işlemlerle  $V_{\alpha}$ 'da aşağıdaki gibi yazılır :

$$|V_{\alpha}| = k \cdot \frac{N}{N_2} * \frac{3}{2} V$$

Güç değişmezliği ilkesi kullanılarak,

Toplam üç faz gücü = Toplam iki faz gücü

$$3 * V * I = 2 * |V_{\alpha}| * |I_{\alpha}|$$

$$3 * V * I = 2 * \frac{N}{N_2} * \frac{3}{2} * I * k * \frac{N}{N_2} * \frac{3}{2} * V$$

$$k = \frac{2}{3} \left( \frac{N_2}{N} \right)^2$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2 N_2}{3 N} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$Z_{3\phi} = \frac{V_{3\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{V}{I}$$

$$Z_{2\phi} = \frac{V_{2\phi}}{I_{2\phi}} = \frac{k * \frac{N}{N_2} * \frac{3}{2} * V}{\frac{N}{N_2} * \frac{3}{2} * I} = k * Z_{3\phi}$$

Buradan da sonuç olarak :

$$N_2 = N \Rightarrow k = \frac{2}{3}$$

elde edilir.

Elde edilen k dengeleme sabitinin Clarke dönüşümünde yerine yazılmasıyla da Clarke dönüşümü Eşitlik (3.27)'de verilen nihai halini alır.

Clarke dönüşümüne ait bilgiler verildikten sonra SMSM'un  $\alpha - \beta$  eksenlerinde matematiksel denklemini oluşturmaya başlayabiliriz. Sürekli mıknatıslı senkron motorun  $\alpha - \beta$  düzleminde faz akımları Eşitlik (3.31-3.32) 'de verilmiştir:

$$\begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= \frac{1}{L_d} \omega_r \Psi_\beta + (v_\alpha - R_s i_\alpha) \left( \frac{1}{L_d} \cos^2 \theta + \frac{1}{L_q} \sin^2 \theta \right) \\ &+ 0.5(u_\beta - R_s i_\beta) \sin 2\theta \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L_q} \right) \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_\beta}{dt} &= \frac{1}{L_d} \omega_r \Psi_\alpha + (v_\beta - R_s i_\beta) \left( \frac{1}{L_d} \sin^2 \theta + \frac{1}{L_q} \cos^2 \theta \right) \\ &+ 0.5(u_\alpha - R_s i_\alpha) \sin 2\theta \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L_q} \right) \end{aligned} \quad (3.32)$$

$\alpha - \beta$  düzleminde gerilim denklemleri Eşitlik (3.33)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \rho \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Çıkıntı ve ortalama endüktans ifadeleri Eşitlik (3.34-3.35)'de verilmiştir.

$$L_\Delta = \frac{L_d - L_q}{2} \quad (3.34)$$

$$L_0 = \frac{L_d + L_q}{2} \quad (3.35)$$

Çıkıntı ve ortalama endüktans ifadelerinin eklenmesiyle elde edilen eksen akı denklemleri Eşitlik (3.36)'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 + L_\Delta \cos(2\theta_e) & L_\Delta \sin(2\theta_e) \\ L_\Delta \sin(2\theta_e) & L_0 - L_\Delta \cos(2\theta_e) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \Psi_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Verilen eşitlikler kullanılarak  $\alpha - \beta$  düzleminde gerilim denklemleri Eşitlik (3.37)'deki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} L_0 + L_\Delta \cos(2\theta_e) & L_\Delta \sin(2\theta_e) \\ L_\Delta \sin(2\theta_e) & L_0 - L_\Delta \cos(2\theta_e) \end{bmatrix} \cdot \rho \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ &+ \omega_e \left( 2L_\Delta \cdot \begin{bmatrix} -\sin(2\theta_e) & \cos(2\theta_e) \\ \cos(2\theta_e) & \sin(2\theta_e) \end{bmatrix} \right) + \Psi_m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.37)$$

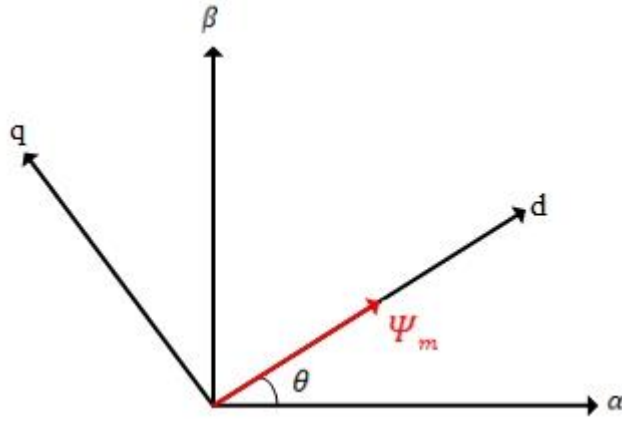
Hava aralığında oluşan elektromanyetik tork Eşitlik (3.38) ile gösterildiği şekildedir :

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot 2p \cdot (\Psi_\alpha \cdot i_\beta + \Psi_\beta \cdot i_\alpha) \quad (3.38)$$

### 3.8.3 d-q düzleminde SMSM'un matematiksel modeli

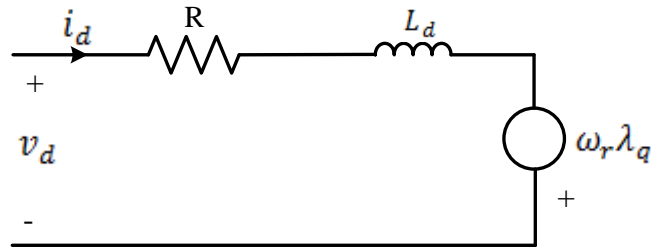
Clarke dönüşümünden sonra Park dönüşümü olarak isimlendirilen dönme matrisi uygulanarak stator parametreleri rotor düzleminde iki faz d-q modeline indirgenir. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q ekseninde elde edilen modeli SMSM'un dinamik modeli olarak da adlandırılır. Park dönüşümünün temel prensibi eğer koordinat sistemi akım ile aynı frekansta dönerse, sabit referans düzlemindeki AC akım bu döner koordinat düzleminde DC akım gibi davranış göstermesidir. Döner

referans düzlem d-q düzlemi olarak isimlendirilir. SMSM'un d-q modeli yabancı uyarımlı DC motorun modeline benzer ve bu modelin kullanılması sonucu motorun kontrolü kolaylaşır. Stator akı ve akım vektörlerinin pozisyon ve genlikleri tamamen iki DC değer tarafından kontrol edilir.  $\alpha - \beta$  düzlemi ve d-q düzlemi arasındaki ilişki Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere d eksenı mıknatıs akısı yönündedir ve tüm koordinat sistemi  $\theta$  rotor açısıyla dönmektedir.

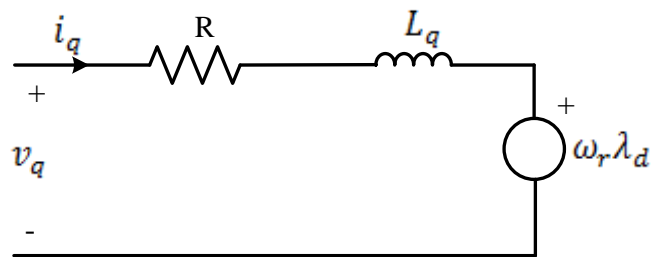


Şekil 3.23 :  $\alpha$ - $\beta$  düzlemi ile d-q düzlemi arasındaki ilişki

SMSM'un döner rotor referans düzlemindeki (d-q düzlemi) eşdeğer devreleri Şekil (3.24-3.25)'de verilmiştir.



Şekil 3.24 : SMSM d eksenı eşdeğer devresi



Şekil 3.25 : SMSM q eksenı eşdeğer devresi

Park dönüşüm matrisi Eşitlik (3.39) ile gösterildiği şekildedir :

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

SMSM'un d-q eşdeğer devreleri kullanılarak Eşitlik (3.40-3.41) ile verilen gerilim denklemleri elde edilir.

$$v_d = R_s \cdot i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \quad (3.40)$$

$$v_q = R_s \cdot i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \quad (3.41)$$

Burada ;

$R_s$  : Stator sargı direnci

$\Psi_d, \Psi_q$  : Faz akıları

$i_d, i_q$  : Faz akımları

$\omega_r$  : Rotor açısal hızı

d-q eksenli manyetik akıları matris formatında Eşitlik (3.42)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \Psi_m \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Manyetik akı ifadeleri gerilim denkleminde yerine yazılırsa faz gerilim denklemleri Eşitlik (3.43)'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \rho \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e \cdot \Psi_m \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Motorda üretilen elektromanyetik tork Eşitlik (3.44)'de verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{2} p [\Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3.44)$$

Burada;

p : motorun kutup çifti sayısı

Elektromanyetik tork eşitliği görüldüğü üzere iki terimden kısımdan oluşmaktadır. İlk terim motorun q eksenini akımının yarattığı temel torktur. İkinci tork ifadesi ise d-q eksenlerinin relüktans farkından dolayı ortaya çıkar ve relüktans torku olarak isimlendirilir [16].

Motorun d-q eksenindeki giriş gücü Eşitli (3.45)'de verilmiştir.

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (3.45)$$

Motorun d-q eksenini akımları diferansiyel biçimde sırasıyla Eşitlik (3.46) ve Eşitlik (3.47)'de verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{(v_d - R_s i_d + \omega_r L_q i_q)}{L_d} \quad (3.46)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{(v_q - R_s i_q + \omega_r L_d i_d - \omega_r \Psi_m)}{L_q} \quad (3.47)$$



## 4. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN KONTROLÜ

### 4.1 Vektör Kontrolün Temelleri

Vektör kontrol üç fazlı alternatif akım makinalarında motorun d-q eksen matematiksel modelini kullanarak yüksek verimde motor kontrolünün yapılmasını sağlayan kontrol yöntemidir. Yarı iletken ve mikrokontrolör teknolojisindeki gelişmeler vektör kontrolü SMSM kontrolünde popüler hale getirmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron motor sürücü, mikroşlemci tabanlı vektör kontrol ile altı yarı iletken anahtarlama elemanının uygun şekilde tetiklenmesi ile motorun fazlarını enerjilendiren elektronik karttır.

Vektör kontrol, SMSM'un tork ve akı kontrolünü harici uyartımlı DC motorda olduğu gibi birbirinden ayırır. Bu sayede verimli tork kontrolü sağlanarak yüksek kontrol dinamiğine ulaşılabilir. Vektör kontrolde d-q faz modeli oldukça popülerdir bunun en önemli sebebi akım ve gerilim gibi tüm ölçülebilir büyüklükler DC değerlerdir. Bu durumun avantajı ise basit kontrolcüler kullanılarak motor akımlarının referans değerlere getirilebilmesidir. Motorda tork ve akı oluşturmaktan sorumlu iki akım bileşeni vardır. Bu sayede akı ve tork birbirinden bağımsız kontrol edilebilir. Q eksenini akımı torku, d eksenini akımı kontrol eder. Yüksek tork elde etmek için SMSM'un stator akım vektörü akı vektörüne dik olmalıdır. Bu durum Eşitlik (4.1)'de verilen sürekli mıknatıslı motor tork denkleminde de görülmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot pp \cdot \bar{\psi}_s \times \bar{i}_s \quad (4.1)$$

Burada;

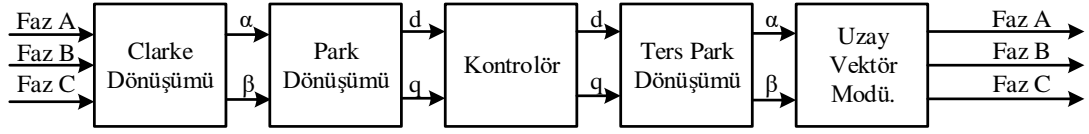
$pp$  : kutup çifti sayısı,

$\bar{i}_s$  : stator akım vektörü

$\bar{\psi}_s$  : stator akısı

3/2 sabiti ise dönüşüm sırasında güç değişmez temelinden gelen sabittir. Bu sabitin ispatı Bölüm 3.8.2 'de yapılmıştır.

Şekil 4.1’de vektör kontrol’de d-q modelini kullanmak için gerekli dönüşümler blok diyagramı olarak verilmiştir.

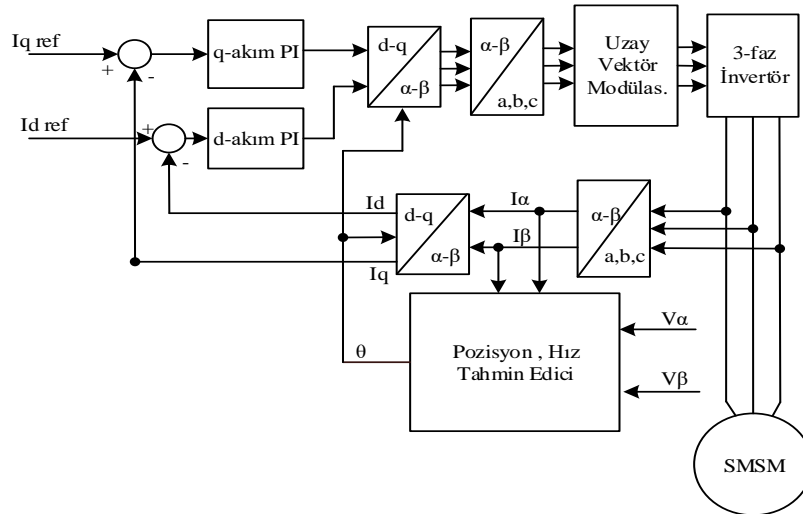


Şekil 4.1 : Vektör kontrol dönüşümleri

Vektör kontrol algoritmasının çalışabilmesi için uygulanması gereken temel adımlar aşağıdaki gibidir [17]:

- Motor faz akımları, DC bara gerilimi, rotor pozisyon ve hızı ölçülür.
- Ölçülen büyüklükler Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak d-q referans düzlemine indirilir.
- d-q referans düzleminde stator tork ve akı akım bileşenleri kontrol edilir.
- Kontrolörün çıkışı d-q referans düzleminde stator gerilimidir ve bu gerilim değeri ters Park dönüşümü kullanılarak  $\alpha$ - $\beta$  referans düzlemine dönüştürülür.
- Uzak vektör modülasyonu ile stator üç faz gerilimi üretilir.

Vektör kontrolün yukarıda tanımlanan temel adımlarının genel blok diyagramı olarak gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Vektör kontrol blok diyagramı

Vektör kontrolün yüksek verimli olmasının temel sebebi şu şekilde özetlenebilir. Motor dönerken rotor manyetik alanı ve stator manyetik alanı arasında bir açı vardır. Eğer bu iki alan arasındaki açı doksan derece değilse, zıt emk ve akım arasında bir faz farkı olacaktır. Bu faz farkı yüzünden motorda maksimum tork üretilmeyecektir. Eğer kontrol devresi komütasyon açısını doksan derece olarak ayarlayamazsa motorda maksimum tork üretilemez. Vektör kontrol algoritması ile rotor manyetik alanı algılanır ve rotor manyetik alanı ile doksan derece açı farkı olacak şekilde stator manyetik alan üretilir bu şekilde tork üretimi maksimize edilmiş olur [18].

Sensörsüz vektör kontrol, sensöre ihtiyaç duymadan rotor konumunun tahmin edilmesini sağlar. Sirkülasyon pompası uygulamalarında rotorun konumunun tam olarak bilinmesine ihtiyaç duyulmaz, bu nedenle bu tip uygulamalarda hız ve rotor konumu sensörsüz tahmin edilir.

Sirkülasyon pompası uygulamalarında SMSM'un kontrolünde vektör kontrolün kullanılmasının bir diğer avantajı ise pompanın debi ve basma yüksekliği gibi parametrelerinin sensör kullanılmadan vektör kontrol q eksenine akımı sayesinde tahmin edilebilmesidir. Pompanın bağlı bulunduğu sistemin ihtiyaçlarını karşılamak için kontrolünde bu tahmin değerleri kullanılarak SMSM'nin hız kontrolü yapılmakta ve pompanın sistemdeki verimi artırılmaktadır [18].

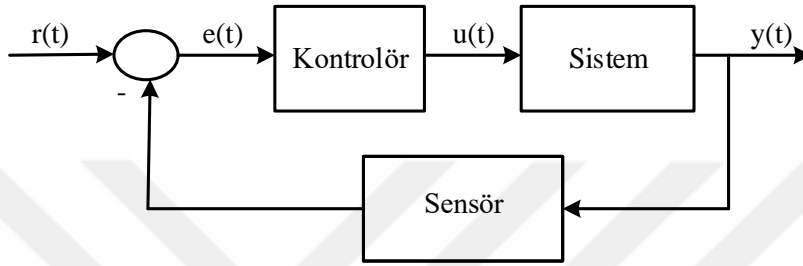
Vektör kontrolde akım (tork) kontrolü için rotor konumu bilinmeli ve faz akımları d-q referans düzlemine dönüştürülmelidir. SMSM sürücü devresinde bulunan akım ölçüm dirençleri ve yükselteç yapısı ile örneklenen üç faz akımı üç faz döner referans düzlemde elde edilir ve Eşitlik (4.2)'de verilen Clarke dönüşümü ile iki faz döner düzleme dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Clarke dönüşümü ile  $\alpha$ - $\beta$  düzlemine indirgenen akım değerleri Park dönüşümü kullanılarak d-q referans düzlemine dönüştürülür. Park dönüşümü Eşitlik (4.3)'de verilmiştir, eşitlikten de görüldüğü üzere Park dönüşümü için rotorun elektriksel konumu ( $\theta_r$ ) bilinmelidir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ -\sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Kapalı çevrim bir sistemde kontrolörün işlevi, referans giriş değeri ile sistem üzerinden ölçüm veya tahmin yoluyla elde edilen sistemin çıkış büyüklüğünün farkını alarak aradaki hata sinyaline göre kontrol sinyali üretmektir. Bir kontrol döngüsüne ilişkin temel blok diyagram Şekil 4.3’de verilmiştir.

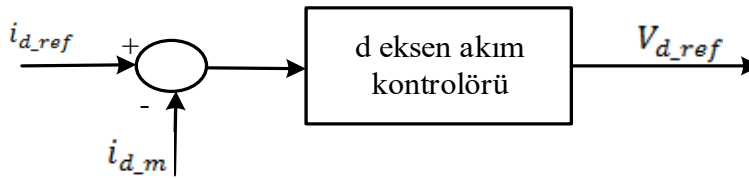


Şekil 4.3 : Kontrol döngüsü blok diyagramı

Vektör kontrol algoritmasında temel olarak üç kontrol döngüsü vardır ve bunlar :

- Alan kontrol döngüsü
- Hız kontrol döngüsü
- Tork kontrol döngüsü

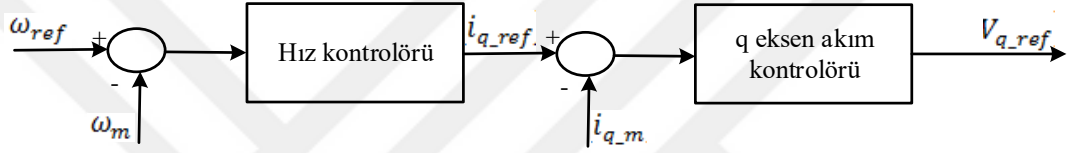
Kontrol döngülerinden ilki alan kontrol döngüsü olarak da isimlendirilen d eksen akımı kontrol döngüsüdür. Daha öncede belirtildiği gibi d eksen akım referansı rotor akı kontrolünden sorumludur ve alan kontrol döngüsü blok diyagramı Şekil 4.4’de verilmiştir. Alan kontrol döngüsü referans d eksen akımı ( $i_{d.ref}$ ) ile ölçülen d eksen akımı ( $i_{d.m}$ ) arasındaki hata sinyali ile orantılı şekilde d eksen referans gerilimini ( $V_{d.ref}$ ) oluşturur.



Şekil 4.4 : Alan kontrol döngüsü

İkinci kontrol döngüsü hız kontrol döngüsüdür. Bu kontrol döngüsü sensör kullanılarak ölçülen veya sensörsüz algoritmalar ile yapılan tahminler sonucu elde edilen gerçek hız değeri ile referans hız değeri arasındaki farka göre  $I_{q\_ref}$  akımı üretir.

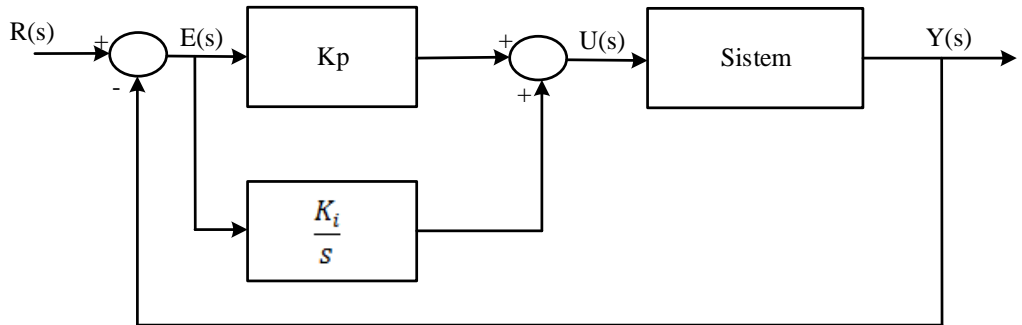
Üçüncü kontrol döngüsü tork kontrol döngüsüdür. q eksen akımı torku oluşturur ve q eksen akımının polaritesi değiştirilerek motorun dönüş yönü değiştirilebilir, Tork kontrol döngüsü q eksen referans akımı ( $i_{q\_ref}$ ) ile q eksen ölçülen akımı ( $i_{q\_m}$ ) arasındaki farka göre q eksen referans gerilimini ( $V_{q\_ref}$ ) oluşturur. Hız ve tork kontrol döngülerine ilişkin blok diagram Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5 : Tork ve hız kontrol döngüsü

Kontrol uygulamalarında sistemde belirlenen sistem parametrelerini yüksek verimle kontrol edebilecek en basit kontrol yapısı kullanılmaya çalışılır. Kontrol yapısı belirlendikten sonraki ikinci adım ise kontrol parametrelerinin belirlenmesidir. Tez kapsamında parametrelerin belirlenmesine ilişkin yöntemler ele alınmamıştır.

SMSM vektör kontrolünde akım ve hız kontrolcülerinde kullanılan iki temel kontrolcü tipi PI ve PID kontrolördür. Tez kapsamında kontrolör olarak PI tip kullanılmıştır. Katsayıların doğru seçimi ile PI kontrolör birinci ve ikinci derece sistemlerde yüksek doğrulukla ve gürbüz kontrol sağlayabilir. Şekil 4.6’de PI kontrolör blok diagramı verilmiştir.



Şekil 4.6 : PI kontrolör blok diyagramı

PI kontrolörün transfer fonksiyonu Eşitlik (4.4)'de verilmiştir.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.4)$$

Burada;

$K_p$  : Oransal kazanç sabiti

$K_i$  : İntegral kazanç sabiti

Oransal kazanç sabiti Eşitlik (4.5) ve integral kazanç Eşitlik (4.6)'de verildiği gibi kutup yerleşimi metoduyla belirlenir [17].

$$K_p = 2\xi\omega_0L - R \quad (4.5)$$

$$K_i = \omega_0^2L \quad (4.6)$$

Burada;

$\omega_0$  : Sistemin doğal frekansı [rad/saniye]

$\xi$  : Akım kontrol döngüsünün sönümlleme faktörü

SMSM kontrolünde PI kontrol tercih edilmesinin sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük maliyetli bir mikrokontrolör ile yapılabilir.
- Yüksek frekansda ki gürültüleri yok eder.
- Aşımı azaltır.
- Sönümü iyileştirir.

#### 4.2 Rotor Pozisyon ve Hız Bilgisinin Elde Edilmesi

Vektör kontrol algoritmasının çalışabilmesi için park dönüşümünün ihtiyaç duyduğu temel bilgilerden birisi rotorun elektriksel konumudur. Bu bilginin elde edilme şekli temel olarak sensörlü ve sensörsüz olmak üzere ikiye ayrılır.

Sensör kullanılarak rotor konumunun ve hızının tespitinde statora üzerinde hall effect veya enkoder gibi sensör bulunan harici bir donanımsal yapı entegre edilmelidir.

Rotor konumunun algılanmasında hall effect sensör kullanılan yapıda sensör rotor mıknatıslarının manyetik kutuplarını algılayabilecek mesafede statora entegre

edilmelidir. Uygulamalarda hall effect sensörler yaygın olarak  $120^\circ$  aralıklarla statora yerleştirilir. Hall effect sensörlerin statora yerleştirilmesinin seri üretimde zorluğa yol açması ve sensörlerin sıcaklık, titreşimden etkilenmesi gibi dezavantajları olmasına rağmen ucuz olmaları nedeniyle kullanımları yaygındır. Hall effect sensörlü yapıda rotor konumunun algılanmasındaki çözünürlük sensörlerin yerleşim açısına bağlı olarak değişir [10]. Sensörlü kontrolün en büyük avantajı rotorun kesin konumunu bilerek kapalı çevrim sistem ile yüksek çözünürlükte kontrol yapılabilmesidir.

Enkoder rotorun açısal konumunu veya hızını elektriksel dijital bir sinyale dönüştüren sensördür. Bu dijital sinyal rotorun konumu, hızı ve dönüş yönü gibi bilgileri içerir. Enkoder sabit ve döner olmak üzere iki parçadan oluşur. Döner kısım rotor üzerine monte edilir ve rotor ile birlikte dönerken sabit kısım stator üzerine sabitlenir, bu iki parçanın etkileşimi ile enkoder çıkış sinyali elde edilir. Bu etkileşim manyetik veya optik olarak olabilir. Konum belirleme tipine göre enkoderlar artımsal ve mutlak olmak üzere ikiye ayrılır. Artımsal tip enkoderlar enerjilendirildikleri andaki rotorun konumunu sıfır noktası kabul ederler ve bir konumdan diğerine hareketi sırasında puls sinyali verir bu sayede rotorun kesin konumu kesin başlangıç noktasına göre bağlı konumu bilgisi elde edilebilir. Mutlak enkoderlar ise rotorun kesin pozisyonunu bit dizisi şeklinde iletir ve rotorun tam konumu hakkında kesin bilgi verir. Enerjisinin kesilmesi durumunda son durumunu korur.

Sensörlü kontrol uygulamaları yüksek doğrulukta kontrol için endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesine rağmen maliyet ve motora entegre edilmesi ek mekanik işçilik gerektirdiği için sensöre ihtiyaç duymayan rotor konumu tahmin algoritmaları geliştirilmiştir.

### **4.3 Sensörsüz Vektör Kontrol**

Sürekli mıknatıslı senkron motorun vektör kontrol ile hız kontrolünün yapılabilmesi için temel girdiler olan motorun konum ve hız bilgileri sensör kullanılmadan tahmin algoritmaları aracılığıyla elde edildiği kontrol tipi sensörsüz vektör kontrol olarak isimlendirilir. Tahmin algoritmalarında zıt emk ve akı gibi tahmin edilen durum değişkenleri kullanıldığı gibi, ölçülen durum değişkenleri olan faz gerilimi ve faz akımında kullanıldığı tahmin algoritmaları vardır.

Sensörsüz vektör kontrolde kullanılan temel tahmin algoritmaları şunlardır [20-21]:

- Zıt emk tabanlı tahmin edici

- Faz akım ve gerilimi ölçülerek açık çevrim tahmin edici
- Stator üçüncü voltaj harmoniği tabanlı tahmin edici
- Gözlemleyici tabanlı tahmin edici
- $L_d - L_q$  farkı tabanlı tahmin edici

Sensörsüz vektör kontrol blok diyagramı Şekil 4.7' de verilmiştir.

Sirkülasyon pompası uygulamalarında daha çok faz akım ve gerilimi ölçülerek açık çevrim akı tahmin edilmesi yöntemiyle rotorun elektriksel konum ve hız bilgisi elde edilir. Tez kapsamında kontrolü yapılan SMSM'un kontrolünde de bu yöntem kullanılmıştır ve detayları Bölüm 4.31'de verilmiştir. Listelenen diğer tahmin yöntemlerinin detayları tez konusu kapsamına alınmamıştır.

#### 4.3.1 Açık çevrim akı tahmini

Açık çevrim akı tahmin edicilerinde akı tahmini için şönt dirençler ile ölçülen ve Clarke dönüşümü ile  $\alpha$ - $\beta$  referans düzlemine indirgenen değerler kullanılır [16]. SMSM'nin  $\alpha$ - $\beta$  referans düzlemindeki matematiksel modeli Eşitlik (4.7)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \rho \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Akı bağı rotorun konumu hakkında sin ve cos terimleri içeren ifadeler sayesinde bilgi verir. Endüklenen zıt emk gerilimini kullanılarak stator akı değerlerinin hesaplanmasına ilişkin matematiksel ifade Eşitlik (4.8-4.9)'de verilmiştir.

$$\lambda_\alpha = \lambda_{\alpha 0} + \int_0^t (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt \quad (4.8)$$

$$\lambda_\beta = \lambda_{\beta 0} + \int_0^t (u_\beta - R_s i_\beta) dt \quad (4.9)$$

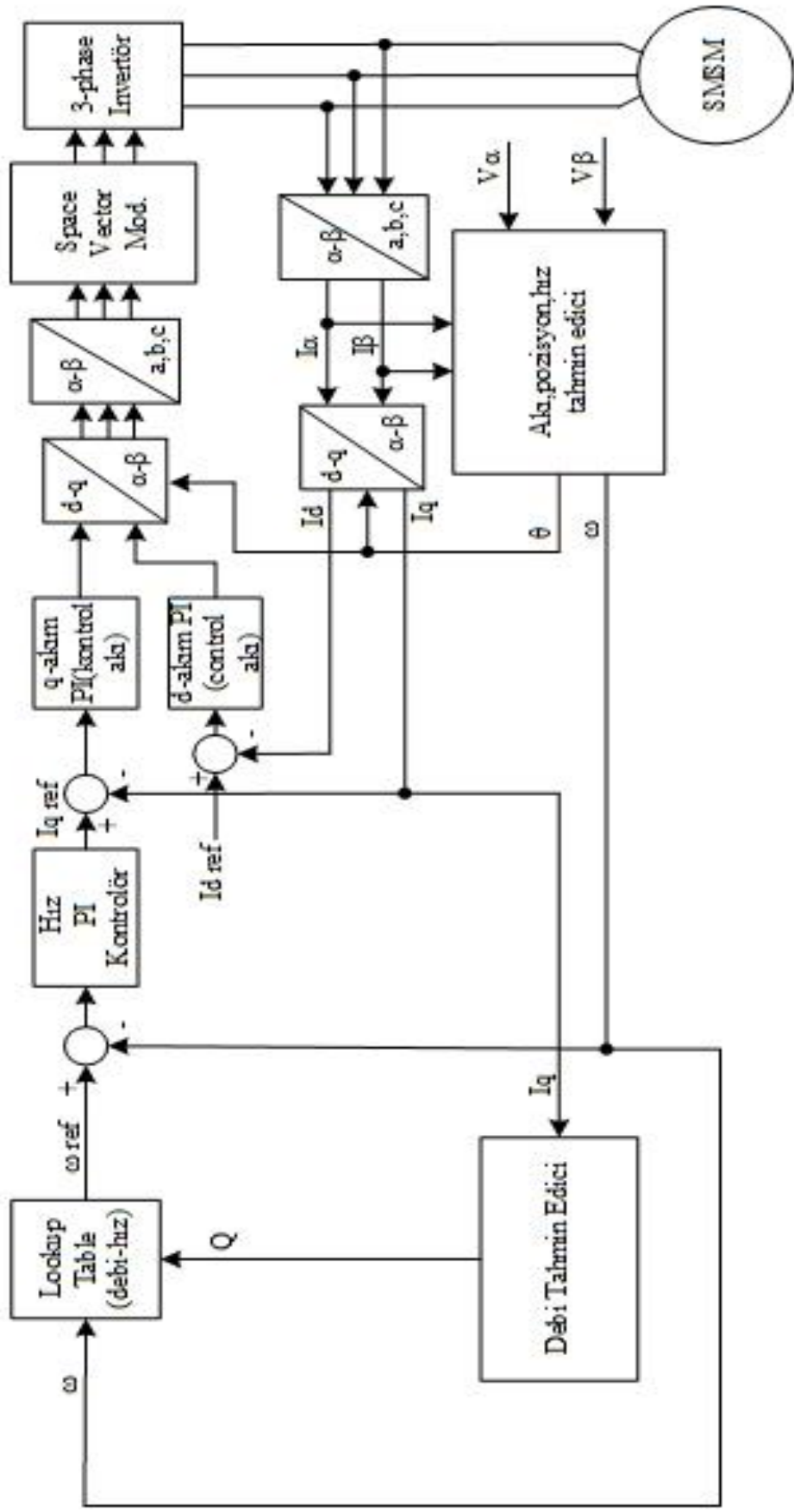
Burada;

$\lambda_{\alpha 0}, \lambda_{\beta 0}$  : İntegral başlangıç koşulları

$u_\alpha - R_s i_\alpha$  : Hesaplanan zıt emk değeri

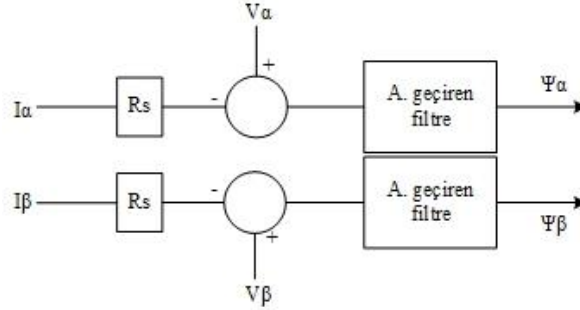
Bu integral alçak geçiren filtre yöntemiyle hesaplanır. Alçak geçiren filtre metodu saf integral hesabına göre daha az matematiksel işlem içerir. Bir başka avantajı ise bu yöntemin daha düşük hafızalı bir mikrodenetleyici ile uygulanabilmesidir.





Şekil 4.7 : Sensörsüz vektör kontrol blok diyagramı

Bu yöntemin temel prensibi, zaman sabitini yüksek seçerek filtrenin bir integratör olarak çalışmasını sağlamaktır [19]. Bu şekilde DC bileşen de yok edilir. Daha yüksek verimli bir integral hesabı için seri iki filtre kullanılmıştır. Açık çevrim akı tahmini blok diyagramı Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Açık çevrim akı tahmini blok diyagramı

Rotorun konumunu tahmin etmek için, açık çevrim akı tahmini işleminden elde edilen veriler kullanılır. Konum ve hız tahmini için kullanılan ifadeler Eşitlik (4.10- 4.11 )’de verilmiştir.

$$\frac{\Psi_\beta - LI_\beta}{\Psi_\alpha - LI_\alpha} = \frac{\Lambda_m \sin(\theta)}{\Lambda_m \cos(\theta)}$$

$$\frac{\Psi_\beta - LI_\beta}{\Psi_\alpha - LI_\alpha} = \tan(\theta)$$

$$\theta_e = \tan^{-1}((\Psi_\beta - LI_\beta)/(\Psi_\alpha - LI_\alpha)) \quad (4.10)$$

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (4.11)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak bulunan elektriksel pozisyon ve hız, Eşitlik (4.12- 4.13) kullanılarak mekanik hıza ve pozisyona dönüştürülür.

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{p} \quad (4.12)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{p} \quad (4.13)$$

#### 4.4 Pompa Hacimsel Debi Tahmini

Debi sistemden birim zamanda geçen akışkan miktarıdır ve birimi  $m^3/h$  ‘dir. Debi tahmininde motorun q eksenini kullanılır. Akım değerinin donanımsal olarak şönt dirençler ile ölçümüne ilişkin devre şeması Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Mikroişlemcinin analog dijital dönüştürücü birimi (ADC) ve şönt dirençli donanımsal

yapı yardımıyla ölçülen akım değeri Park – Clarke dönüşümleri ile d-q referans düzlemine indirgenir ve debi tahmininde kullanılır.

Pompa debi tahmini için geliştirilen algoritmada motorun minimum ve maksimum hızları arasında altı farklı hız değerinde alınan ölçümler ile debi ve akım arasında ikinci dereceden bir polinom ile ilişki kurulur. Bu polinom motorun q eksenini akımı ile pompa debisini matematiksel olarak ilişkilendirir. Oluşturulan polinom yapısı aşağıda gösterilmiştir. Ölçüm alınan altı farklı hız değerinin dışındaki ara hız değerlerinde ise mevcut denklemler ile hesaplanan debi değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak debi tahmini yapılır.

$$Q_{rpmx} = f(I_{qx}) = a_0x + a_{1x}I_{qx} + a_{2x}I_{qx}^2$$

Tez kapsamında kontrolü yapılan sirkülasyon pompasının debi tahmini için geliştirilen algoritmada kullanılmak üzere ölçüm alınan hız noktaları aşağıda sıralanmıştır. Örneğin  $f_{1600}(Q, I)$ , 1600rpm için motor q eksenini akımı ile pompa debisini ilişkilendiren polinomu temsil etmektedir.

$$n = 1600 \rightarrow f_{1600}(Q, I)$$

$$n = 2000 \rightarrow f_{2000}(Q, I)$$

$$n = 2400 \rightarrow f_{2400}(Q, I)$$

$$n = 2800 \rightarrow f_{2800}(Q, I)$$

$$n = 3000 \rightarrow f_{3000}(Q, I)$$

$$n = 3400 \rightarrow f_{3400}(Q, I)$$

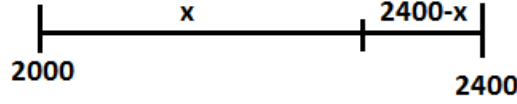
Algoritmada motor hızı denklem oluşturulan minimum hız değerinden küçükse minimum hız debi tahmin denklemi, hız değeri denklem oluşturulan maksimum hız değerinden büyükse maksimum hız debi tahmin denklemi kullanılır. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$n < 1600 \rightarrow f_{1600}(Q, I)$$

$$n > 3400 \rightarrow f_{3400}(Q, I)$$

Motor hızı polinom oluşturulan iki hız değerinin arasında ise interpolasyon yapılarak debi değeri tahmin edilir. Örneğin motor hızı 2300 rpm olsun, bu değer polinom oluşturduğumuz hız değerlerinden birine eşit değildir bu nedenle oluşturduğumuz tahmin denklemlerinden biri direkt kullanılmaz. 2300 rpm değeri polinom

oluşturduğumuz 2000 rpm ile 2400 rpm arasındadır. Algoritmada önce 2000 rpm sonra da 2400 rpm polinomları kullanılarak debi tahmin değeri hesaplanır daha sonra ise bu iki tahmin değerinin ağırlıklı ortalaması alınara 2300 rpm’de ki debi değeri elde edilir. Bu bahsedilen işlemler aşağıda matematiksel olarak gösterilmiştir:



$$Q_{2000} = f_{2000}(I)$$

$$Q_{2400} = f_{2400}(I)$$

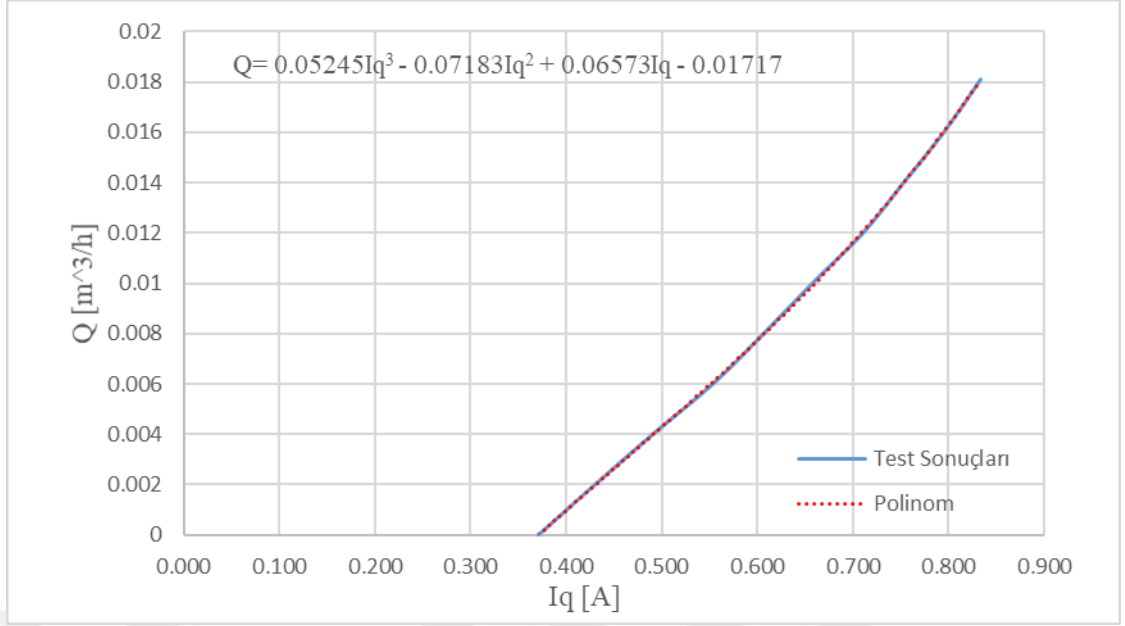
$$\frac{Q_{2000}(400 - x) + Q_{2400} x}{400} = Q_{2000+x}$$

Algoritmanın çalışma mantığının daha iyi anlaşılabilmesi için tez kapsamında 2000 rpm ve 2400 rpm hız değerleri için alınan akım ve debi referans ölçüm değerleri Çizelge (4.1) ve Çizelge (4.2)’de verilmiştir. Ölçüm sırasında motor q eksen akımı NXP FreeMaster debug aracı ile pompa debisi ise hidrolik test sistemi üzerindeki debimetreden alınmıştır. Motor sabit hızla döndürülüp test sistemi üzerindeki kısılma vanası kullanılarak farklı debi değerlerinde q eksen akım değerleri kaydedilmiştir.

Çizelge 4.1 : 2000 rpm Iq – Q ölçümleri

Iq [A]	Q [m <sup>3</sup> /h]
0.0829	0.00
0.0961	0.20
0.1096	0.40
0.1236	0.60
0.1355	0.80
0.1469	1.00
0.1587	1.20
0.1682	1.40
0.1862	1.81

Çizelge (4.1)’de verilen ölçümleri kullanarak 2000 rpm hız değeri için q eksen akımı ve pompa debisi arasındaki ilişkiyi veren ikinci derece polinomun oluşturulması Şekil (4.9)’de gösterilmiştir. Denklem oluşturulurken akım değeri fractional olarak ifade etmek için 0.22344 değerine, debi ise 100’e bölünerek kullanılmıştır.



Şekil 4.9 : 2000 rpm için eğri uydurma

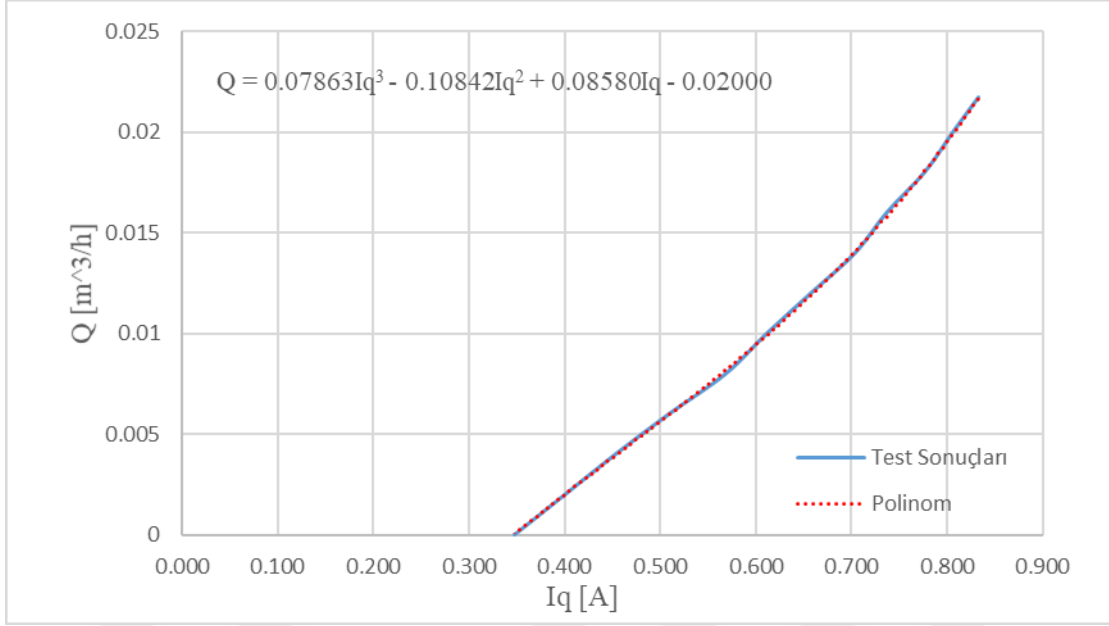
2000 rpm değeri için elde edilen debi tahmin polinomu Eşitlik (4.14)'de verilmiştir.

$$Q = 0.0524I_q^3 - 0.07183I_q^2 + 0.06573I_q - 0.01717 \quad (4.14)$$

Çizelge 4.2 : 2400rpm Iq-Q ölçümleri

Iq [A]	Q [m <sup>3</sup> /h]
0.1056	0.00
0.1187	0.20
0.1369	0.40
0.1531	0.60
0.1694	0.80
0.1840	1.00
0.1983	1.20
0.2106	1.40
0.2210	1.60
0.2324	1.80
0.2419	2.00
0.2495	2.17

Çizelge (4.2)'de verilen ölçümleri kullanarak 2400 rpm hız değeri için q eksen akımı ve pompa debisi arasındaki ilişkiyi veren ikinci derece polinomun oluşturulması Şekil (4.10)'de gösterilmiştir. Denklem oluşturulurken akım değeri fractional olarak ifade etmek için 0.22344 değerine, debi ise 100'e bölünerek kullanılmıştır.



Şekil 4.10 : 2400 rpm için eğri uydurma

2400 rpm değeri için elde edilen debi tahmin polinomu Eşitlik (4.15)'de verilmiştir.

$$Q = 0.07863I_q^3 - 0.10842I_q^2 + 0.08580I_q - 0.02000 \quad (4.15)$$

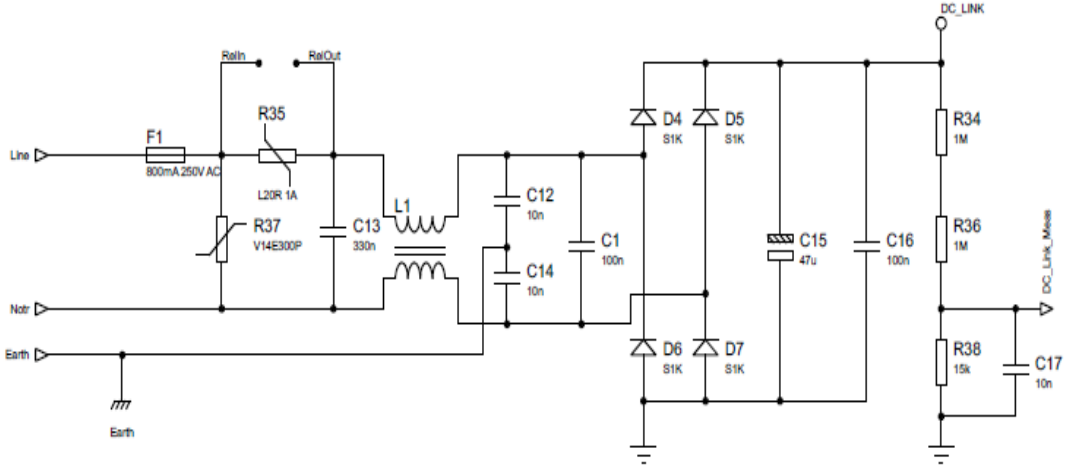
#### 4.5 Motor Kontrol Devresi Donanımsal Yapısı

Tez kapsamında vektör kontrol ile hız kontrolü yapılan SMSM'da kullanılan donanım yapısı altı kısımdan oluşur, bu kısımlar:

- Köprü Doğrultucu
- DC Bara Kapasitörü
- Mikrokontrolör
- Üç faz invertör yapısı (Altı mosfet)
- Ölçüm Devreleri (Faz akımları ve DC bara gerilimi)

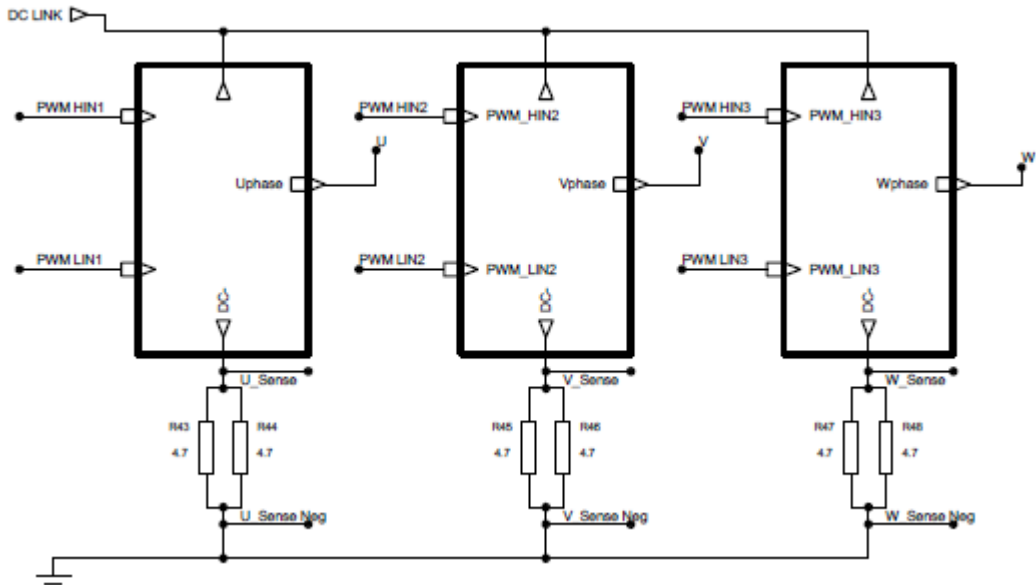
Sürekli mıknatıslı senkron motor kontrolcü PCB öncelikle şebekeden aldığı 230V şebeke gerimini birinci kısımdaki EMI filtresinden geçirdikten sonra köprü diyot yapısı ile doğrultur ve DC bara kapasitöründe depolar. EMI filtre devresinin kullanılmasındaki temel amaç cihazın sistemdeki diğer cihazlardan gelecek elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi ve aynı şekilde diğer cihazları da etkilememesidir. EMI filtresinden geçirilen AC gerilim köprü diyot ile doğrultulur. Diyot yapısının çıkışındaki DC bara kapasitörü bu doğrultma işlemi sonrasındaki

dalganmaları azaltır. Tez kapsamında kontrolü yapılan SMSM'un kontrolcüsünde ilk üç kısım için kullanılan devre yapısı Şekil 4.11'de verilmiştir.



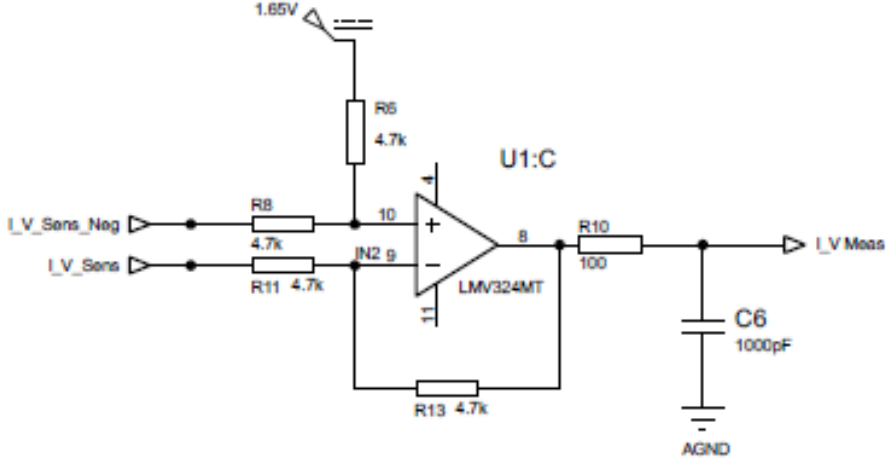
Şekil 4.11 : Kontrolcü giriş katmanı devre şeması

Kontrol devresinin dördüncü kısmı mikrokontrolördür ve bu kısım ölçüm devresinden gelen verilere göre PWM sinyali üreterek üç faz invertör yapısındaki mosfetleri tetikleyen kısımdır. Ölçüm devresi motorun faz akımlarını ve DC bara gerilimini şönt dirençler yardımıyla ölçerek opamp ile yükselttikten sonra mikrokontrolörün ADC birimine ileten devre yapısıdır. Tez kapsamında kontrolü yapılan SMSM'un DC bara akımı ve faz akımlarının ölçümünde kullanılan şönt dirençli devre yapısı Şekil 4.12'de verilmiştir.



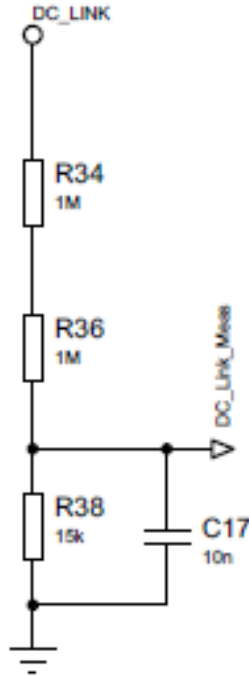
Şekil 4.12 : Faz akımları ölçüm devresi

Şönt dirençler üzerinde gerilime çevrilen akım değerlerinin mikroişlemcinin ADC'si ile okunabilmesi için AC dalganın negatif kısmı pozitif tarafa ötelenmelidir. Bunun için kullanılan opampli devre yapısı Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Faz akımı ölçümü koşullandırma devresi

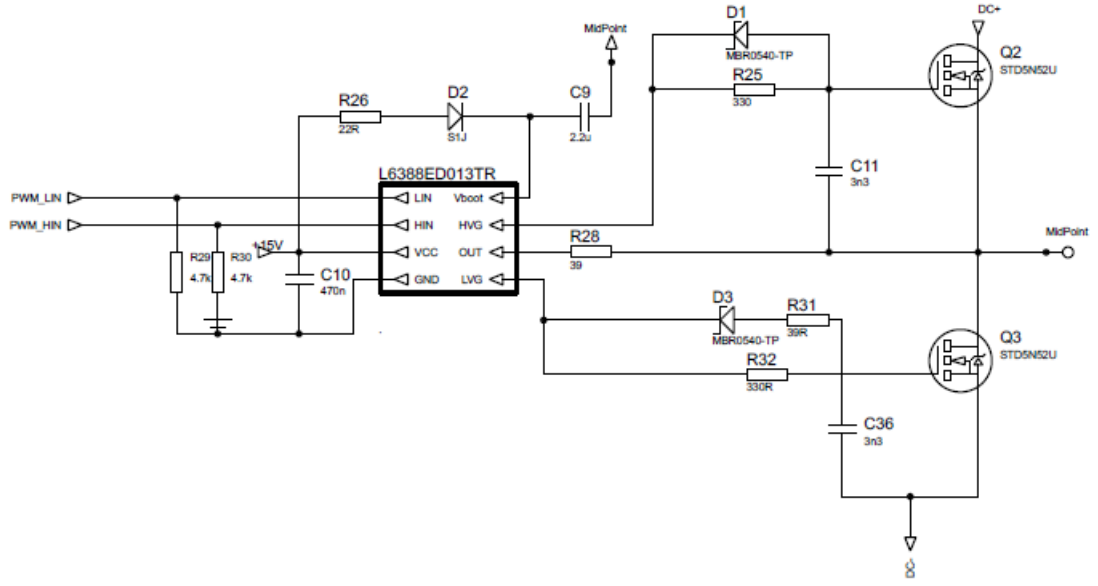
DC bara geriliminin ölçümü için kullanılan şönt dirençli devre yapısı Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.14 : DC bara gerilimi ölçüm devresi



Mosfet sürüş katı devre yapısı Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15 : Mosfet sürme devresi



## 5. SİRKÜLASYON POMPALARINDA ENERJİ VERİMLİLİK ENDEKSİ HESABI VE OPTİMİZASYONU

### 5.1 Enerji Verimlilik Endeksi (EEI) Hesabı

Bu bölümde ıslak rotorlu sirkülasyon pompaları için DIN EN 16297-1 standartına göre enerji verimlilik endeksinin hesabı açıklanmıştır.

Enerji verimlilik endeksi pompa gruplarının standartlara göre enerji verimliliği açısından değerlendirilmesinin bir sonucudur. EEI, belirli bir uygulama türünde kullanılan sabit veya değişken hızlı pompa grubunun performansının enerji verimliliğini temsil eden boyutsuz bir değer belirleneceği şekilde tanımlanır. EEI matematiksel olarak Eşitlik (5.1)'deki gibi tanımlanır [22].

$$EEI = \frac{P_{L,avg}}{P_{ref}} \quad (5.1)$$

Burada;

$P_{L,avg}$  : Pompanın ağırlıklı ortalama elektriksel giriş gücü

$P_{ref}$  : Referans sabit hız için referans elektriksel giriş gücü

Test metodu ile EEI değerinin hesaplanması için uygun test sistemi hazırlanmalıdır. Bu test sistemi pompanın elektriksel giriş gücü ve pompanın çıkış hidrolik gücünü karakterize eden debi (Q) ve basma yüksekliği (H) değerlerini hassas olarak ölçebilecek ölçüm cihazları ile donatılmış olmalıdır. Bu temel ölçümlerin yanında standartta belirtilen sistemin statik basıncını ölçmek gibi diğer isterleri karşılayacak ölçüm cihazları da test sisteminde mevcut olmalıdır. Test metodu ile EEI hesaplanması matematiksel olarak kolay bir işlemdir fakat farklı üreticiler tarafından farklı komponentler ile donatılmış farklı fiziksel boyutlardaki pompaların test sistemine bağlanması çeşitli mekanik zorluklar oluşturabilmektedir. Islak rotorlu sirkülasyon pompalarında enerji verimlilik endeksinin hesabı için adımlar aşağıda açıklanmıştır.

1.adım : Motor maksimum hız ve güç sınırında sürülür. Bu durumda pompaya hidrolik performans testi uygulanarak pompanın maksimum eğrisi deneysel olarak elde edilir.

Tez kapsamında çalışılan pompaya uygulanan bir hidrolik performans testinin raporu Çizelge 5.1’de verilmiştir. Analiz ve önceki test sonuçlarına göre pompanın en verimli çalışma noktasının  $Q = 2 \text{ m}^3/h$  civarında olduğu bilindiği için hidrolik performans testinde ölçümler bu nokta civarında alınmıştır eğer pompanın en verimi çalışma noktası hakkında hiçbir bilgi yoksa ölçüm pompanın tüm çalışma aralığında yapılmalıdır.

Çizelge 5.1 : Örnek hidrolik performans ölçüm sonucu

Q (m <sup>3</sup> /h)	H (mSu)	Pele (W)
1,7	5,91	60,22
1,8	5,71	60,41
1,91	5,51	61,83
2	5,29	61,87
2,06	5,19	62,14
2,1	5,09	62,77
2,15	4,92	61,46
2,19	4,81	61,97
2,3	4,52	61,19
2,35	4,39	61,67

2.adım : Alınan deneysel ölçüm noktaları kullanılarak debiye göre basma yüksekliğini verecek polinomun katsayıları belirlenir. Bu polinom  $H_{fit}$  olarak isimlendirilir ve matematiksel olarak Eşitlik (5.2)’deki gibi ifade edilir. Bu adım için Matlab veya Mathcad gibi bir paket programı kullanılabilir. Test yöntemiyle alınan ölçümler kullanılarak EEI hesabı yapmak için tez kapsamında Matlab kullanılmıştır.

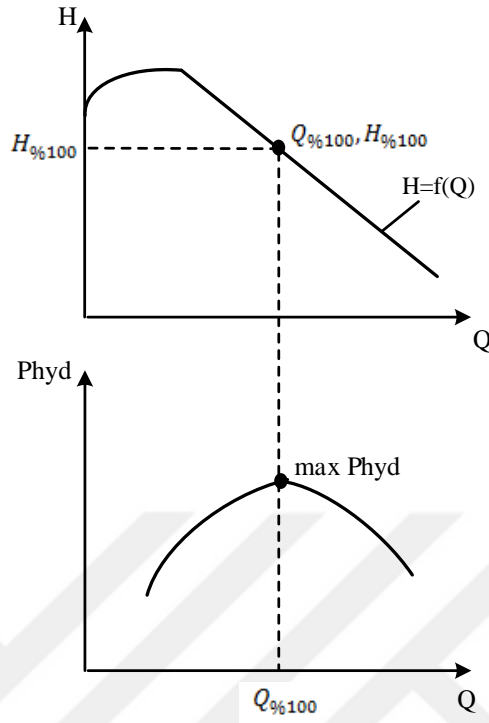
$$H_{fit} = A \times Q^3 + B \times Q^2 + C \times Q + D \quad (5.2)$$

3.adım: Birinci adımda ölçüm alınan debi aralığı için debi ve  $H_{fit}$  denklemi kullanılarak hesaplanan basma yüksekliği Eşitlik (5.3)’de yerine konularak tüm debi aralığı için pompanın hidrolik çıkış gücü hesaplanır.

$$P_{hid}(Q) = 2,72 \times Q \times H_{fit}(Q) \quad (5.3)$$

4.adım: Hidrolik çıkış gücünün maksimum olduğu nokta bulunur ( $Q_{\%100}, H_{\%100}$ ). Bu nokta noktası  $P_{hid,r}(Q)$  olarak sembolize edilir ve pompanın en verimli çalışma noktası olarak da isimlendirilir, matematiksel olarak Eşitlik (5.4) ile ifade edilir. Maksimum hidrolik güç noktası grafiksel olarak Şekil 5.1’de verilmiştir.

$$P_{hid,r}(Q) = \max(P_{hid}) \quad (5.4)$$



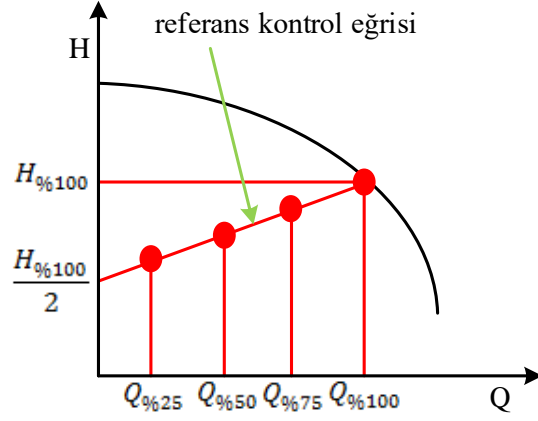
Şekil 5.1: Maksimum hidrolik güç noktası

5.adım : Referans giriş gücü Eşitlik (5.5) kullanılarak hesaplanır. Bu güç değeri pompanın hidrolik gücünün bir fonksiyonudur [22].

$$P_{ref} = 1,7 \times P_{hid,r} + 17 \times (1 - e^{-0,3 \times P_{hid,r}}) \quad (5.5)$$

$P_{ref}$  pompa grubunun teknik özelliklerinden bağımsız olacak şekilde tanımlanır ve maksimum ulaşılabilir enerji verimliliği üzerindeki fiziksel ve teknolojik farklılıkları telafi etmek için EEI'nin değerlerini normalleştirmeyi sağlar. Bu şekilde farklı boyut ve nominal verilere sahip, fakat aynı enerji verimliliği seviyesine sahip pompa grupları, aynı yük-zaman profili ve basınç kontrol eğrisi için karşılaştırılabilir sayısal EEI değerlerine sahip olacaktır.

6.Adım : Referans kontrol eğrisi oluşturulur. Referans kontrol eğrisi ( $Q_{\%100}, H_{\%100}$ ) ve ( $Q_{\%0}, H_{\%100}/2$ ) noktalarını birleştiren doğrusal egridir ve teorik olarak Şekil 5.2'de ki gibi tanımlanır.



Şekil 5.2 : Referans kontrol eğrisi

Referans kontrol eğrisini oluşturan dört noktaya ait debi ve basma yüksekliği değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Referans kontrol eğrisi Q-H noktaları

<b><i>Q (Q%100 'ün yüzdesi olarak)</i></b>	<b><i>H<sub>ref</sub> (H%100 'ün yüzdesi olarak)</i></b>
100	100
75	87.5
50	75
25	62.5

7.adım : Pompa modlarından referans kontrol eğrisine en yakın olan oransal basınç kontrol eğrisi seçilerek çalıştırılır. Referans kontrol eğrisini oluşturan dört çalışma noktasında debi, basma yüksekliği ve elektriksel giriş gücü değerleri kaydedilir. Bu adımda ki amaç belirlenen referans noktalarında pompanın karakteristiğinin elde edilmesidir. Bu değerler sekizinci adımda ortalama giriş elektriksel gücü hesabında kullanılır ve yine ölçüm alınan noktalar ile ilgili detaylar da sekizinci adımda açıklanmıştır.

8.adım : Standart yükleme zamanı profiline göre ortalama giriş elektriksel gücü ( $P_{L,avg}$ ) hesaplanır.

Ortalama giriş elektriksel gücü, pompanın yükleme profilindeki her görev noktasındaki zaman oranı ( $\Delta t_i/t_{top}$ ) ile ölçeklendirilmiş giriş elektriksel güçlerinin ( $P_{L,i}$ ) toplamıdır ve Eşitlik (5.6)'de ki gibi hesaplanır.  $P_{L,i}$  değerleri 7.adımda ölçülen elektriksel güçlerdir.

$$P_{L,avg} = \sum \frac{\Delta t_i}{t_{top}} P_{L,i} \quad (5.6)$$

$P_{1,i}$  değerlerini belirlemek için uygulanan en genel yöntem pompaya hidrolik performans testi uygulayarak bu değerleri elde etmektir. Uygulanabilecek bir diğer yöntem ise tez kapsamında geliştirilen EEI optimizasyon algoritmasında da kullanılan yarı analitik yöntemdir. Bu yöntemin detayları EEI optimizasyonu bölümünde verilmiştir.

Kapalı sistem çalışan bir sirkülasyon pompası için standart yük profili Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Sirkülasyon pompası yük profili

Debi Oranı ( $Q_i/Q_{\%100}$ )	Zaman Ağırlığı ( $\Delta t_i/t_{top}$ )
1	% 6
0.75	% 15
0.5	% 35
0.25	% 44

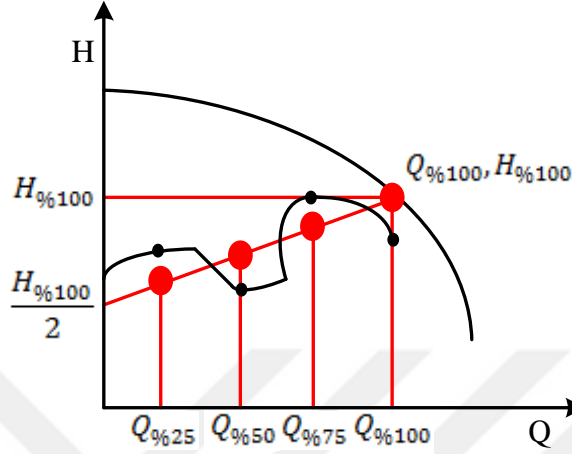
Ortalama giriş elektriksel gücü Eşitlik (5.7) ile hesaplanır.

$$P_{L,avg} = L_1 \times P_{L,\%100} + L_2 \times P_{L,\%75} + L_3 \times P_{L,\%50} + L_4 \times P_{L,\%25} \quad (5.7)$$

$$\text{Eğer } H_{meas} \leq H_{ref} \text{ ise } P_L = \frac{H_{ref}}{H_{meas}} \times P_{1,meas}$$

$$\text{veya } H_{meas} > H_{ref} \text{ ise } P_L = P_{1,meas}$$

Ölçülen basma yükseklikleri ve referans kontrol eğrisi basma yükseklikleri Şekil 5.3'de görselleştirilmiştir. Bu şekilde siyah noktalar ölçülen basma yüksekliklerini, kırmızı noktalar ise referans kontrol eğrisi basma yüksekliklerini göstermektedir.



Şekil 5.3 : Referans noktalarındaki ölçümler

9.adım : Hesaplanan  $P_{L,avg}$  ve  $P_{ref}$  değerleri kullanılarak pompa tipine göre Eşitlik (5.8) veya Eşitlik (5.9) ile enerji verimlilik endeksi hesaplanır.

Standalone sirkülasyon pompaları için EEI hesabı Eşitlik (5.8) kullanılarak yapılır.

$$EEI = \frac{P_{L,avg}}{P_{ref}} \times 0,49 \quad (5.8)$$

OEM sirkülasyon pompaları için EEI hesabı ise Eşitlik (5.9) kullanılarak yapılır [23].

$$EEI = \frac{P_{L,avg}}{P_{ref}} \times 0,49 \times \left( 1 - e^{\left( -3,8 \times \left( \frac{n_s}{30} \right)^{1,36} \right)} \right) \quad (5.9)$$

Burada;

$n_s$  : Eşitlik (5.10) ile tanımlanan hız değeri

$$n_s = \frac{n_{\%100}}{60} \frac{\sqrt{Q_{\%100}}}{H_{\%100}^{0.75}} \quad (5.10)$$

Burada;

$n_{\%100}$  : Maksimum hidrolik güç noktasındaki hız değeri (rpm)



## 5.2 Enerji Verimlilik Endeksi Optimizasyon Algoritmasının Prensipleri ve Deneysel Sonuçların Elde Edilmesi

Avrupa birliği üyesi ülkelerde sirkülasyon pompalarının enerji verimlilik endeksinin 0.20'nin üzerinde olması durumunda satışı yapılamamaktadır. Alman hükümetinin uyguladığı BAFA isimli bir teşvik programıyla eski nesil sirkülasyon pompalarını yeni nesil yüksek verimli ve enerji verimlilik endeksi 0.2'den küçük olan sirkülasyon pompası ile değiştiren kişilerin yatırımlarının %30'u devlet tarafından karşılanmaktadır.

Tez kapsamında enerji verimlilik endeksi 0.2'den büyük olan sirkülasyon pompalarının mıknatıslı senkron motorları için geliştirilen kontrol algoritması ile enerji verimlilik endeksi azaltılmıştır. Bu kontrol algoritması belirlenen debi değerleri için oluşturulan referans hız tablosu (lookup table) kullanarak debi değerine göre motorun referans hızını değiştirir bu sayede pompanın daha verimli çalışması sağlanmaktadır.

Geliştirilen algoritmada EEI değerinin hesaplanması için deneysel ölçümler yerine yarı analitik metodoloji kullanılmıştır. Yarı analitik metodun kullanılmasındaki temel hedef EEI hesabı için gerekli olan deneysel uğraşı azaltmak ve farklı üreticilere ait pompaların EEI değerinin kolaylıkla sistematik olarak belirlenmesini sağlamaktır. Bu yöntemin temel amacı pompanın yük profilindeki her çalışma noktasındaki tükettiği elektriksel güç  $P_{L,i}$ 'yi yarı analitik bir yöntem kullanarak belirlemektir.

EEI optimizasyonu için motor kontrolünde kullanılan vektör kontrol algoritmasında hız referans değerlerinin belirlenmesi için motor referans hız tablosunun oluşturulmasına amacıyla geliştirilen algoritmanın adımları ve elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda ki adımlarda açıklanmıştır.

1.adım : Hidrolik performans testi

Farklı referans hız değerleri için pompaya hidrolik performans testi uygulanarak debi, basma yüksekliği, elektriksel güç ve hız değerleri kaydedilir. Bu çalışma kapsamında motor 1700,2000,3000,3500 ve 4000 rpm hız değerlerinde kontrol edilerek pompaya hidrolik performans testi uygulanmış ve sonuçlar kaydedilmiştir.

2000 rpm ve 3000 rpm için elde edilen deneysel veriler sırasıyla Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'de verilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan test sistemi Resim 5.1'de gösterilmiştir.



Resim 5.1 : Hidrolik Performans Test Standı

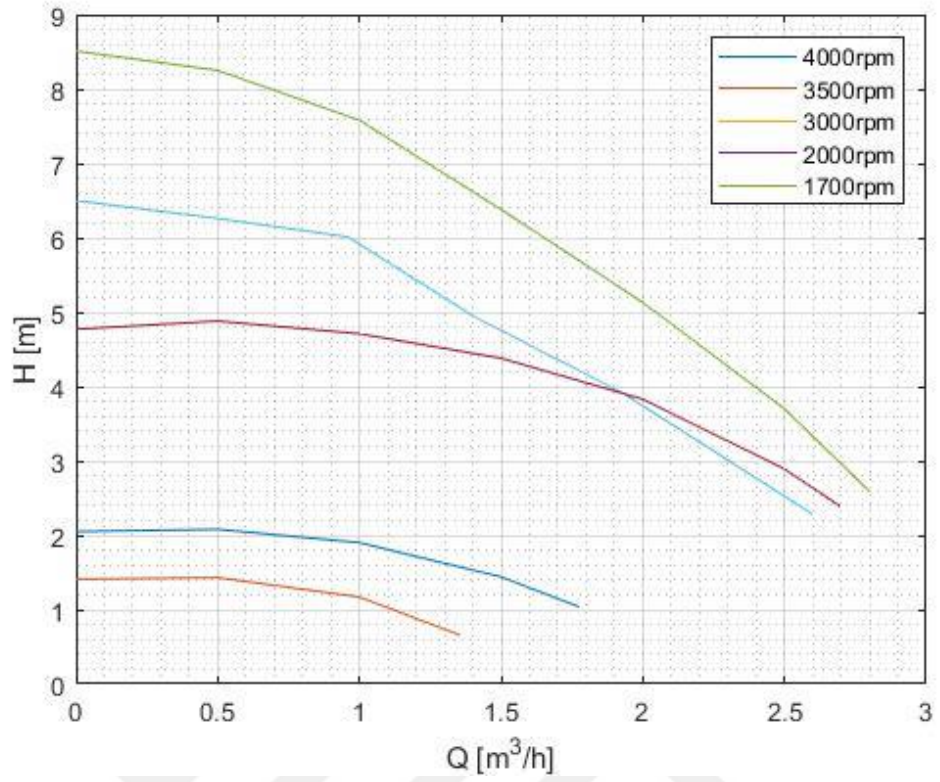
Çizelge 5.4 : 2000 rpm için hidrolik performans test sonuçları

<b>n = 2000 rpm</b>					
<b>Q [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>H [m]</b>	<b>Pelektriksel [W]</b>	<b>Verim (%)</b>	<b>I [A]</b>	<b>n [rpm]</b>
0,00	2,05	9,60	0,00	0,083	2000
0,50	2,08	12,77	22,15	0,109	2000
1,00	1,90	15,44	33,47	0,129	2000
1,50	1,44	18,88	31,12	0,149	2000
1,78	1,03	20,33	24,53	0,161	2000

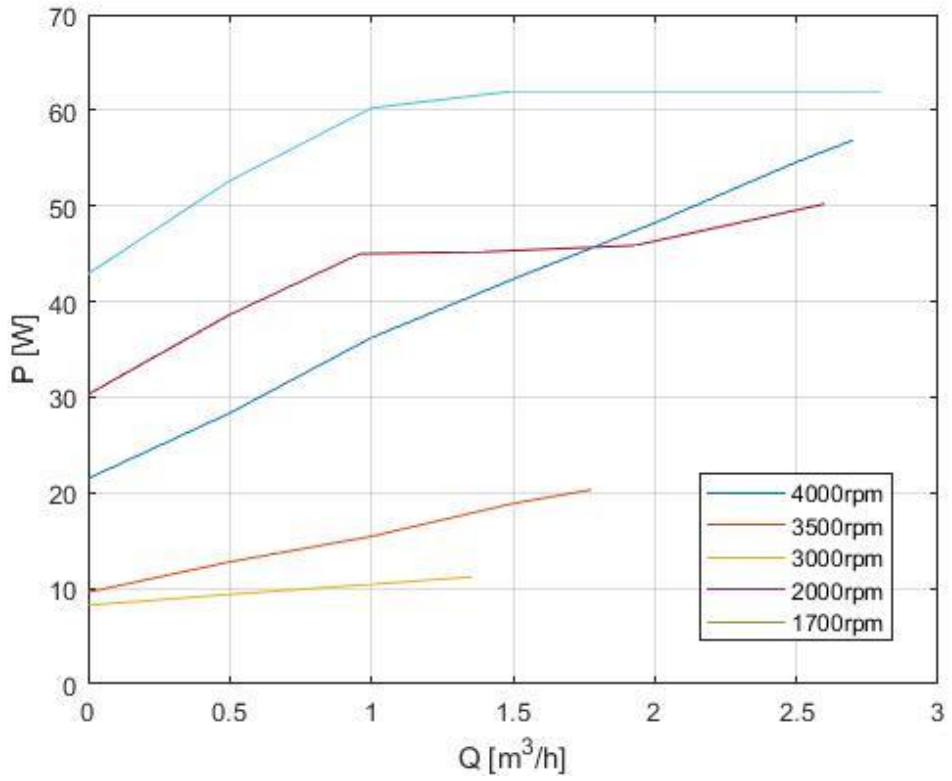
Çizelge 5.5 : 3000 rpm için hidrolik performans test sonuçları

<b>n = 3000 rpm</b>					
<b>Q [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>H [m]</b>	<b>Pelektriksel [W]</b>	<b>Verim (%)</b>	<b>I [A]</b>	<b>n [rpm]</b>
0,00	4,77	21,48	0,00	0,178	3000
0,50	4,84	28,33	23,24	0,237	3000
1,00	4,71	36,22	35,37	0,297	3000
1,50	4,38	42,34	42,21	0,356	3000
2,00	3,83	48,22	43,21	0,394	3000
2,50	2,89	54,59	36,00	0,449	3000
2,70	2,38	56,88	30,73	0,439	3000

1700, 2000, 3000, 3500 ve 4000 rpm hız değerlerinde pompanın test edilmesi sonucu elde edilen pompa karakteristik eğrileri Şekil (5.4-5.5)'de verilmiştir.



Şekil 5.4 : Farklı hız değerleri için basma yüksekliğinin debiye göre değişimi



Şekil 5.5 : Farklı hız değerleri için giriş gücünün debiye göre değişimi

Geliştirilen EEI optimizasyon algoritmasında Mathcad yazılımı kullanılmıştır. Algoritmanın ilk aşamasında deneysel olarak alınan verilerin yarı analitik olarak Mathcad ortamında işlenmesi ve hesaplamaların yapılması için deneysel veriler Şekil 5.6'da görüldüğü gibi programda tanımlanır.

Kalibrasyon  $C_{xx\%} := 0.49$  Yoğunluk  $\rho := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

**Pompanın tüm çalışma aralığı boyunca sistem verimliliği (farklı n ve Q'da ölçüm)**  
**Kaynak : CalioS\_30-80-180\_AE ( Mutullah Eser 17.04.2019)**

$$\text{QHP} := \begin{pmatrix} 0 & 0.5 & 1 & 1.5 & 2 & 2.5 & 2.8 & 0 & 0.5 & 0.96 & 1.4 & 1.93 & 2.6 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 & 2 & 2.5 & 2.7 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 & 1.78 & 0 & 0.5 & 1 & 1.36 \end{pmatrix}^T$$
Farklı hızlarda alınan ölçümler

$rr := \text{rows}(\text{QHP}) = 29$       Counter QHP matrisinin satır ve sütun sayısını veriyor  
 $cc := \text{cols}(\text{QHP}) = 3$

$Q := \text{submatrix}(\text{QHP}, 0, rr - 1, 0, 0)$        $\max(Q) = 2.8$   
 $H := \text{submatrix}(\text{QHP}, 0, rr - 1, 1, 1)$        $\max(H) = 8.51$   
 $P_{el} := \text{submatrix}(\text{QHP}, 0, rr - 1, 2, 2)$        $\max(P_{el}) = 61.89$       Altmatris oluşturuyor.QHP matrisinin 0'dan rr-1 satırına kadar ve 2'den 2.sütununa kadar

$P_{el} := P_{el} - 0$       Elektriksel güç şu kadar azalırssa EEI ne olur diye test etmek için bu kısım kullanılır.

Şekil 5.6 : Deneysel verilerin Mathcad ortamında tanımlanması

Pompa grubunun modeline yarı analitik denir, çünkü kullanılan matematiksel korelasyonlar performansı, temel fiziksel süreçleri ve etkileri yansıtan temel bir formda tanımlanmaktadır, ancak ayrı bileşenlerden sadece az miktarda iyi tanımlanmış deneysel veriye ihtiyaç duymaktadır.

2.adım : Şebekeden çekilen elektriksel güç değeri için regrasyon yapılması

Birinci adımda alınan ölçümler kullanılarak regrasyon ile debinin fonksiyonu olarak şebekeden çekilen elektriksel güç için üçüncü derceden polinom katsayıları belirlenir.  $(P_{el\text{fit}}(Q, H))$  Veri tablosuna en uygun fonksiyonu bulma işlemine regrasyon denir ve kısaca bir rastgele değişkenin davranışının model kullanılarak tahminlenmesi olarak tanımlanır. Regrasyonda değişkenlerden biri bağımlı diğerleri bağımsız değişkendir. Bu işlemin Mathcad ortamında yapılması Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

```

Regrasyon (Polinom 3. dereceden.: n := 3 )

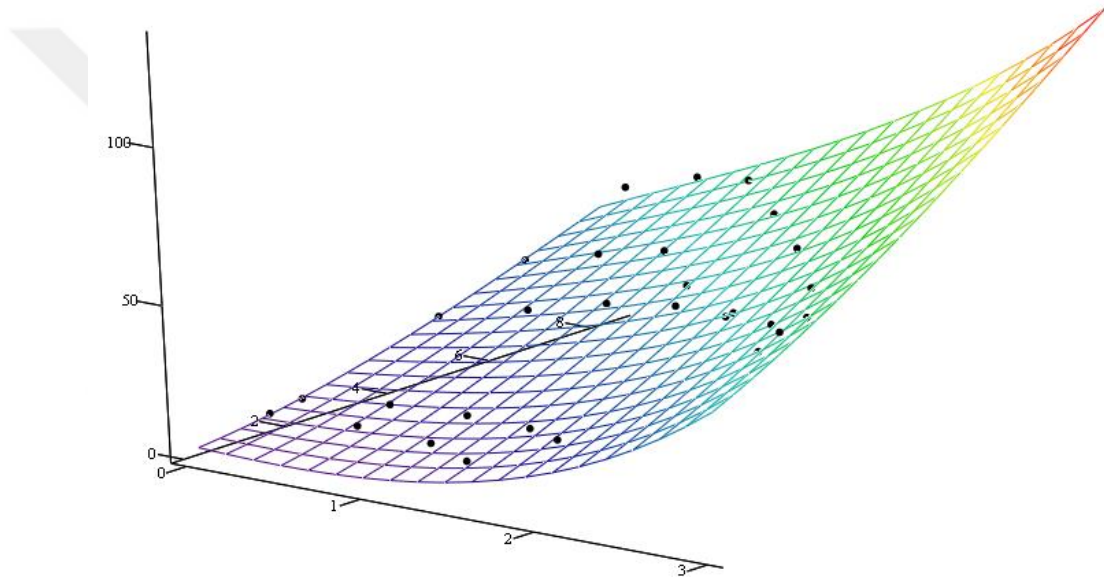
Grid M := augment(Q,H)   Regression   S := regress(M,P_el,n)   P_el_fit(Q,H) := interp[S,M,P_el,(Q)]
M => bağımsız değişken   Görselleştirme   F := CreateMesh(P_el_fit,0,3,0,8,20,20)

```

Şekil 5.7 : Mathcad ortamında elektriksel güç için regresyon yapılması

3.adım: İkinci adımda oluşturulan polinomun doğruluğunun kontrolü

Bu adımda ikinci adımda elde edilen  $P_{el\,fit}$  için yüzey grafiği çizilir ve üzerine birinci adımda tanımlanan deneysel veri noktaları da eklenerek görsel olarak regresyonun tüm noktaları kapsayıp kapsamadığı kontrol edilir.



Şekil 5.8 : Regrasyon sonucu oluşturulan yüzey (Q,H,P\_el )

Şekil 5.8’den de görüldüğü üzere regrasyon sonucu elektriksel güç için oluşturulan yüzey tüm deneysel sonuç noktalarını kapsamaktadır. Sonuç olarak  $P_{el\,fit}$  polinomu istenilen şekilde çalıştığı yorumu yapılabilir.

4. adım : Optimum EEI değeri için Q ve H aralığının belirlenmesi

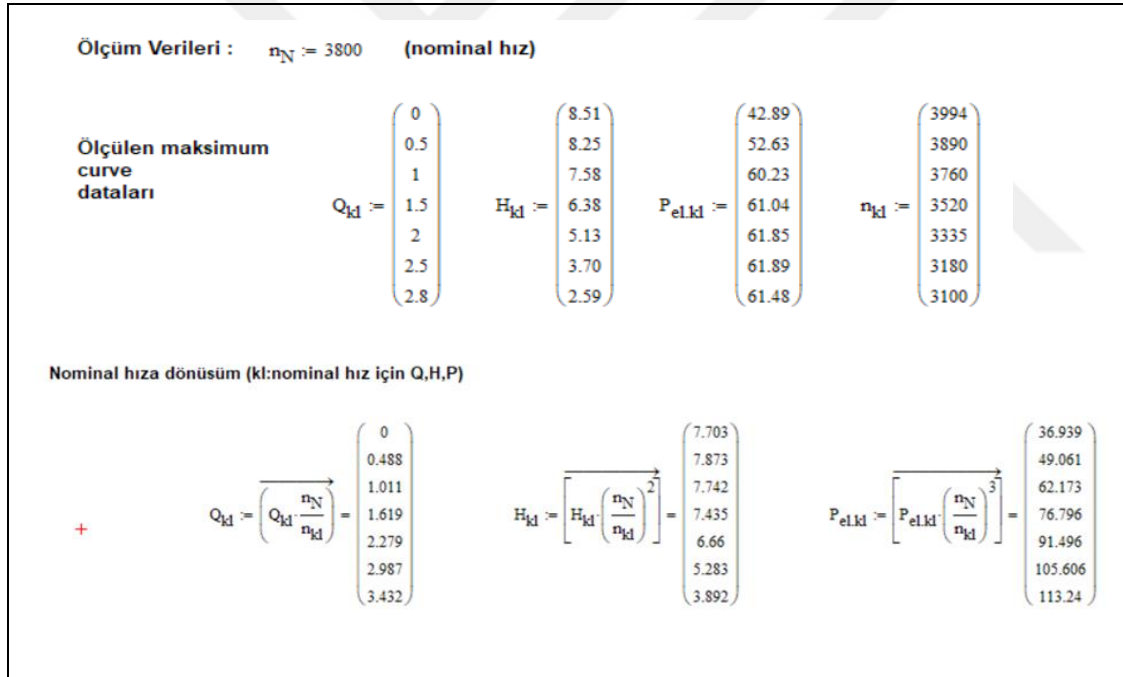
Birinci adımdaki tüm Q ve H ölçüm çiftleri için EEI değeri hesaplanır ve bu değerler eş yükselti eğrisi olarak çizilir. Oluşturulan grafik yardımıyla enerji verimlilik endeksi değerinin optimum olduğu aralık belirlenir. Mathcad ortamında tüm ölçüm çiftleri için EEI değerinin hesaplanması Şekil 5.9’da ve oluşturulan eş yükselti eğrisi ise Şekil 5.11’de verilmiştir.

$$EEI(Q_a, H_a) := \frac{0.06 \cdot P_{el,fit}(Q_a, H_a) + 0.15 \cdot P_{el,fit}\left(\frac{3}{4} \cdot Q_a, \frac{7}{8} \cdot H_a\right) + 0.35 \cdot P_{el,fit}\left(\frac{2}{4} \cdot Q_a, \frac{6}{8} \cdot H_a\right) + 0.44 \cdot P_{el,fit}\left(\frac{1}{4} \cdot Q_a, \frac{5}{8} \cdot H_a\right)}{1.7 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q_a \cdot \frac{m^3}{hr} \cdot H_a \cdot m}{W} + 17 \cdot \left(1 - e^{-0.3 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q_a \cdot \frac{m^3}{hr} \cdot H_a \cdot m}{W}}\right)} \cdot C_{xx9\%}$$

Şekil 5.9 : Mathcad ortamında EEI hesaplamasının yapılması

5.adım : Değerlerin nominal motor hızına indirgenmesi

Pompanın sabit eğri modunda çalıştırılması ile deneysel olarak elde edilen maksimum pompa eğrisi temel pompa denklemleri kullanılarak nominal hıza indirgenir ( $Q_{kl}, H_{kl}, P_{el,kl}$ ). Bunun yapılmasındaki amaç sabit eğri modunda elde edilen verilerde motor hızının sabit olmamasıdır bu nedenle tüm veriler nominal hıza indirgenir. Bu indirgeme işlemlerinin Mathcad ortamında uygulanması Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : Mathcad ortamında deneysel verilerin nominal hıza indirgenmesi

6.adım : Nominal hız için  $H_{fit}(Q)$  ve  $P_{fit}(Q)$  fonksiyonlarının oluşturulması

Nominal hız değerine indirgenen değerler için debinin fonksiyonu olarak basma yüksekliği ve elektriksel güç değerlerini yarı analitik olarak elde edeceğimiz polinomun katsayıları belirlenir. Bu adımdaki interpolasyon işlemi'nin Mathcad ortamında yapılmasına ilişkin görüntü Şekil 5.12'de verilmiştir.



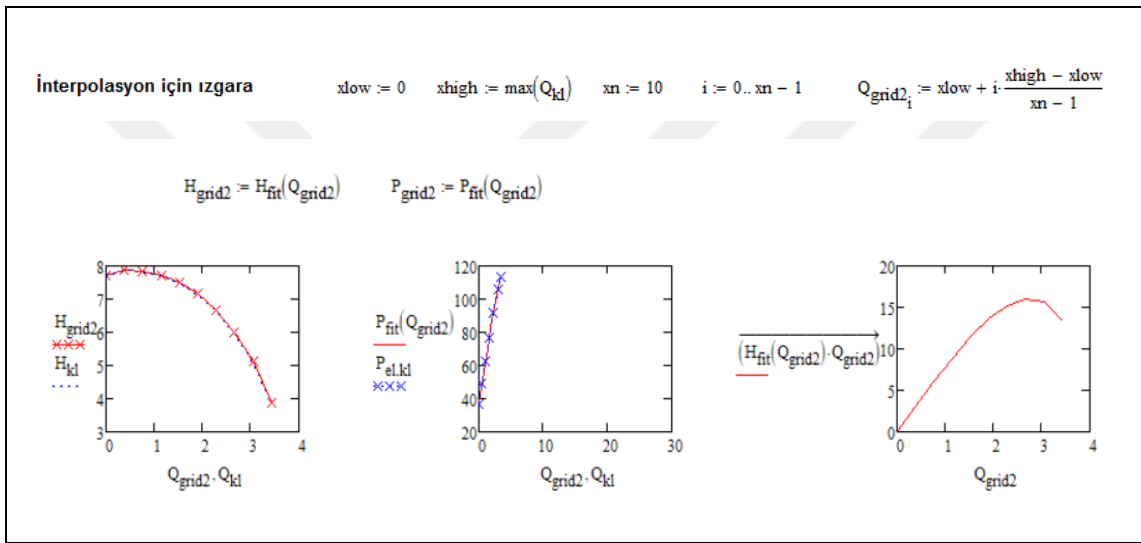


Hesaplanan spline katsayıları Eğri Uydurma	$S := \text{pspline}(Q_{kl}, H_{kl})$ $H_{fit}(Q) := \text{interp}(S, Q_{kl}, H_{kl}, Q)$	$R := \text{pspline}(Q_{kl}, P_{el,kl})$ $P_{fit}(Q) := \text{interp}(R, Q_{kl}, P_{el,kl}, Q)$
--	--	--

Şekil 5.12 : Altıncı adım için interpolasyon işleminin Mathcad'de yapılması

7.adım : Hız vektörü için referans noktaların belirlenmesi

Minimum ve maksimum debi aralığı on noktaya bölünür ve bu debi değerleri için bir önceki adımda oluşturulan polinomlar ile  $H_{fit}$  ve  $P_{fit}$  değerleri hesaplanır. Hesaplanan değerler kullanılarak yarı analitik olarak elde edilen pompa karakteristik eğrileri çizilir. Bu adım için Mathcad kodları ve elde edilen grafikler Şekil 5.13'de verilmiştir



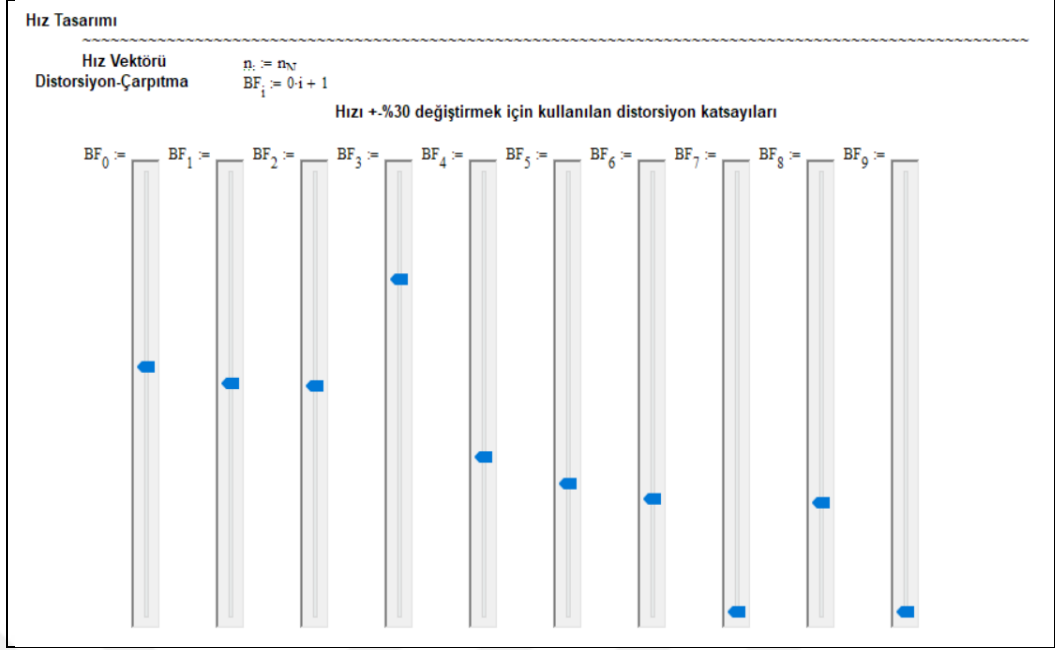
Şekil 5.13 : Yarı analitik metod ile elde edilen pompa karakteristik eğrileri

8.adım : Hız tasarımı

Belirlenen on referans debi değeri için (motor kontrol programında lookup table içinde referans hız değerleri verilecek olan noktalar) hız değerleri algoritma içinde BF olarak isimlendirilen katsayılar değiştirilerek modifiye edilir ve Mathcad tarafından yarı analitik olarak hesaplanan EEI değeri gözlemlenerek minimum EEI elde edilene kadar hız değerleri BF katsayıları aracılığıyla değiştirilir.

Hız değerlerinin optimize edilmesi için Mathcad ortamında hazırlanan arayüz Şekil 5.14'de gösterilmiştir.





Şekil 5.14 : BF katsayıları ile Mathcad ortamında hız optimizasyon arayüzü

BF katsayıları kullanılarak hesaplanan yeni referans hızlara ilişkin Mathcad fonksiyonu ve çıktıları aşağıda verilmiştir.

Çarpık Hız Vektörü

$$n_c := \left[ n \left( 1 - \frac{BF}{1000} \right) \right]$$

	0
0	$3.944 \cdot 10^3$
1	$3.853 \cdot 10^3$
2	$3.846 \cdot 10^3$
3	$3.675 \cdot 10^3$
4	$3.473 \cdot 10^3$
5	$3.329 \cdot 10^3$
6	$3.249 \cdot 10^3$
7	$3.207 \cdot 10^3$
8	$3.23 \cdot 10^3$
9	$2.66 \cdot 10^3$

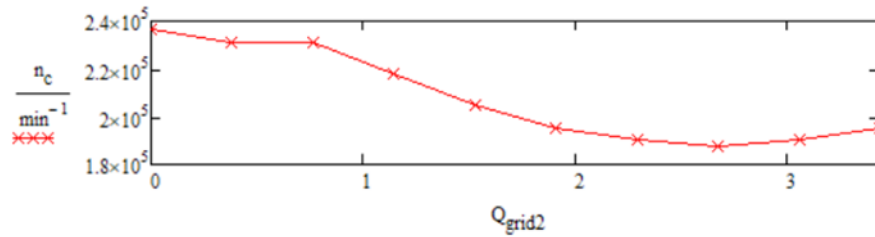
$$\left( \frac{n_c}{n_N} \right) =$$

	0
0	1.038
1	1.014
2	1.012
3	0.967
4	0.914
5	0.876
6	0.855
7	0.844
8	0.85
9	0.7

$$n =$$

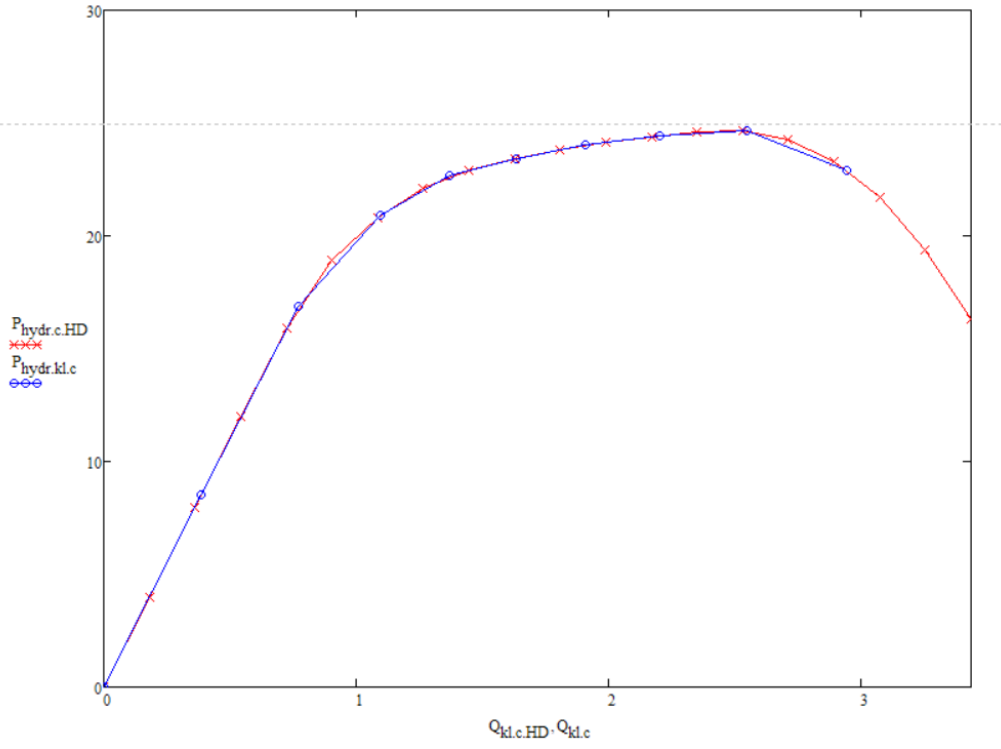
	0
0	$3.8 \cdot 10^3$
1	$3.8 \cdot 10^3$
2	$3.8 \cdot 10^3$
3	$3.8 \cdot 10^3$
4	$3.8 \cdot 10^3$
5	$3.8 \cdot 10^3$
6	$3.8 \cdot 10^3$
7	$3.8 \cdot 10^3$
8	$3.8 \cdot 10^3$
9	$3.8 \cdot 10^3$

Oluşturulan çarpık hız vektörü ile hızın debiye göre değişiminin Mathcad analizi sonucu beklenen değişimi Şekil 5.15’de gösterilmiştir.

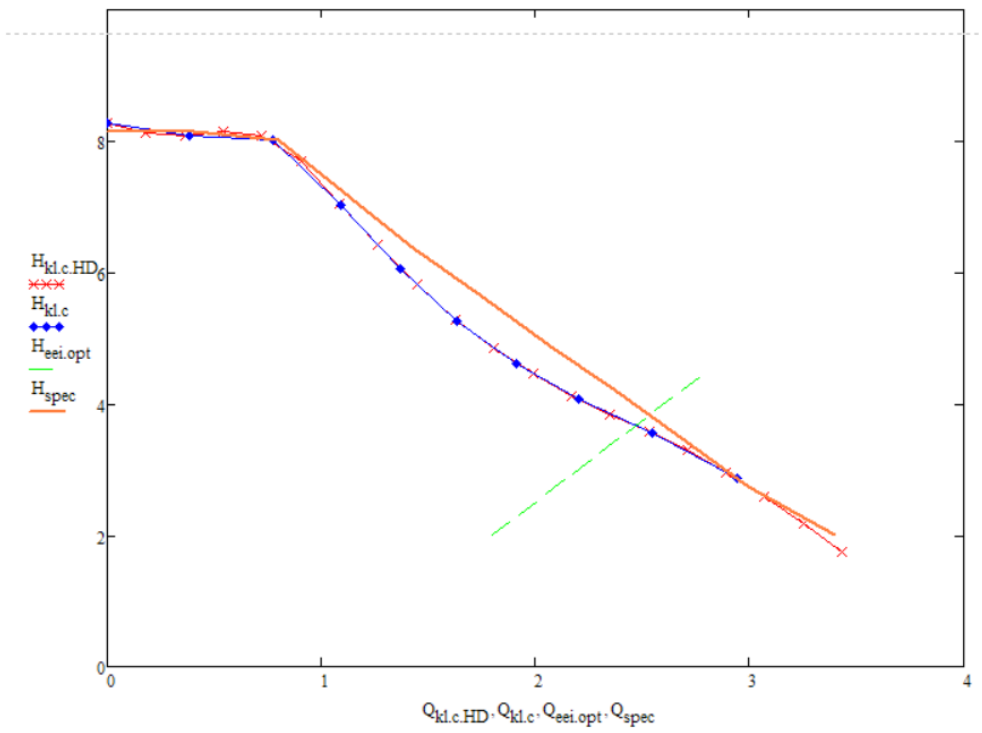


Şekil 5.15 : Referans tablosuna göre debiye bağlı olarak hızın değişimi

Tasarlanan hız vektörü ile motorun kontrol edilmesi sonucu Mathcad analizine göre beklenen pompa karakteristiği Şekil (5.16-5.17)'de verilmiştir.



Şekil 5.16 : Çarpık hız vektörü ile pompa hidrolik gücünün debi ile değişimi



Şekil 5.17 : Çarpık hız vektörü ile pompa basma yüksekliğinin debi ile değişimi

Tasarlanan hız vektörü için pompa karakteristiğinde maksimum hidrolik gücü sağlayan nokta yani pompanın en verimli olduğu nokta bulunur ve bu nokta için EEI hesabı yapılır. Hesaplanan EEI değeri hedeflenen değer altına düşene kadar BF katsayıları ile referans hızlar için optimum değer bulunmaya çalışılır.

Hedeflenen EEI değerine ulaşıldıktan sonra referans hız tablosu ve bu tablo ile hesaplanan EEI değeri ekrana yazdırılır. Mathcad hesaplamaları sonucu oluşturulan referans hız tablosunun kullanılması sonucu beklenen EEI değeri 0.201 olarak elde edilmiştir. Altıncı bölümde oluşturulan tablo motor kontrol algoritmasının içine entegre edilerek motor sürülmüştür ve yeniden EEI hesaplanarak Mathcad ve Matlab hesaplamaları doğrulanmıştır.

Mathcad hesaplamaları sonucu elde edilen çıktılar Şekil 5.18’de verilmiştir :

	Q <sub>kl,c</sub>	H <sub>kl,c</sub>	nc
	0	1	2
0	0	8.286	3.941·10 <sup>3</sup>
1	0.387	8.086	3.853·10 <sup>3</sup>
2	0.772	8.018	3.846·10 <sup>3</sup>
3	1.093	7.016	3.629·10 <sup>3</sup>
4	1.371	6.063	3.416·10 <sup>3</sup>
5	1.634	5.256	3.257·10 <sup>3</sup>
6	1.908	4.622	3.169·10 <sup>3</sup>
7	2.2	4.073	3.131·10 <sup>3</sup>
8	2.544	3.557	3.169·10 <sup>3</sup>
9	2.942	2.859	3.257·10 <sup>3</sup>

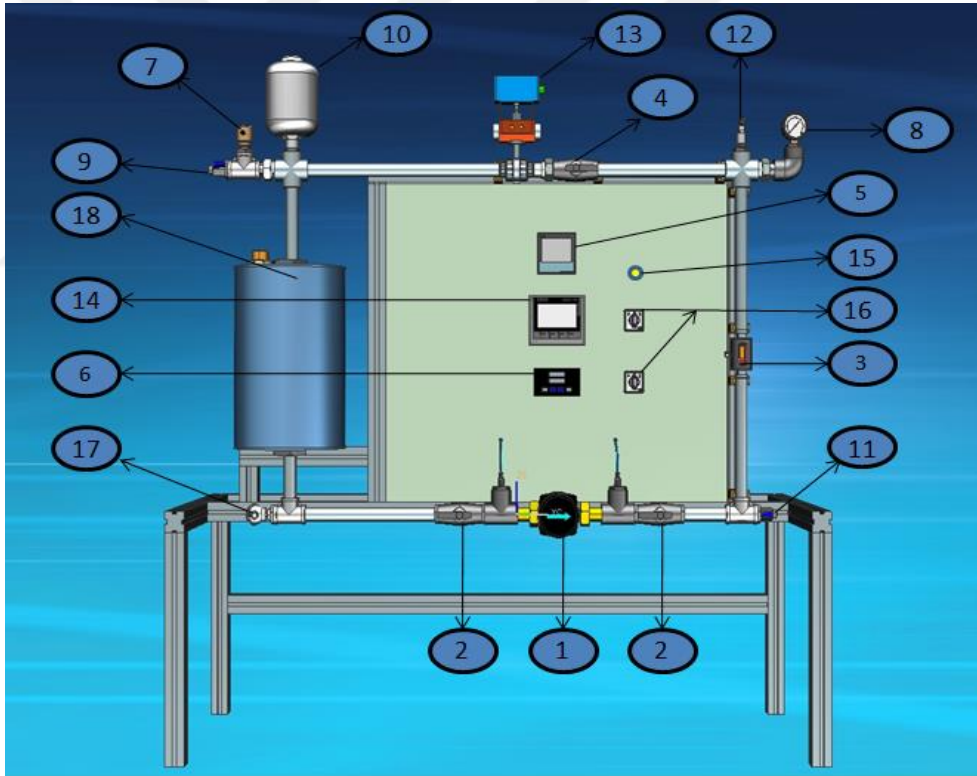
EEI=0.201

Şekil 5.18 : Yarı analitik yöntem Mathcad EEI sonucu



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma aşamasında KSB Pompa ve Armatür Sanayii isimli pompa üreticisi firmanın 62W güçlü Calio SI isimli ıslak rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorlu sirkülasyon pompası üzerinde çalışılmıştır. KSB Türkiye Arge Merkezinde hazırlanan test sistemi kullanılarak gerekli deneysel veriler alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile geliştirilen algoritmalar ve Bölüm 5’de ki Mathcad sayısal çözümlenmeleri doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında ölçüm almak için tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen hidrolik performans test sisteminin üç boyutlu görünümü Şekil 6.1’de verilmiştir.



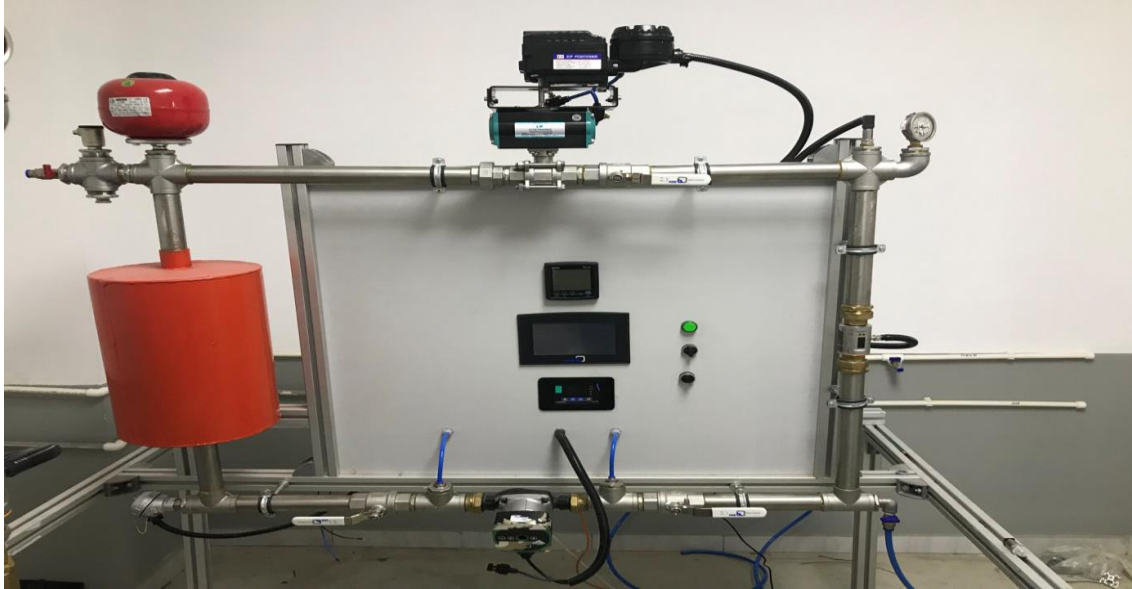
Şekil 6.1 : Deney düzeneği üç boyutlu görünümü

Hidrolik performans test sisteminin bileşenleri Çizelge 6.1’de listelenmiştir:

Çizelge 6.1 : Test sistemi bileşenleri

No	Tanım
1	Calio-SI sirkülasyon pompası (62W)
2	Küresel vana
3	Debimetre
4	Manual akış kontrol vanası
5	Güç analizörü (50-270 V , 0-5,5 A , $\pm\%0,5$ doğruluk, 45-65 Hz. Ölçüm aralığı)
6	Fark basınç ölçüm Cihazı ( 0-4 bar, $\pm\%0,8$ hassasiyet)
7	Otomatik purjör
8	Manometre
9	Sistem hava atma havası
10	Genleşme tankı
11	Sistem su yükleme vanası
12	Basınç transmitteri
13	Otomatik akış kontrol vanası
14	PLC V700
15	Sinyal lambası
16	Push buton
17	Pt100 (-30 +150 derece ölçüm aralığı 4-20 mA)
18	Su deposu

Üretimi gerçekleştirilen ve tez kapsamında ki çalışmalar için kullanılan test sistemi Resim 6.1'de gösterilmiştir.

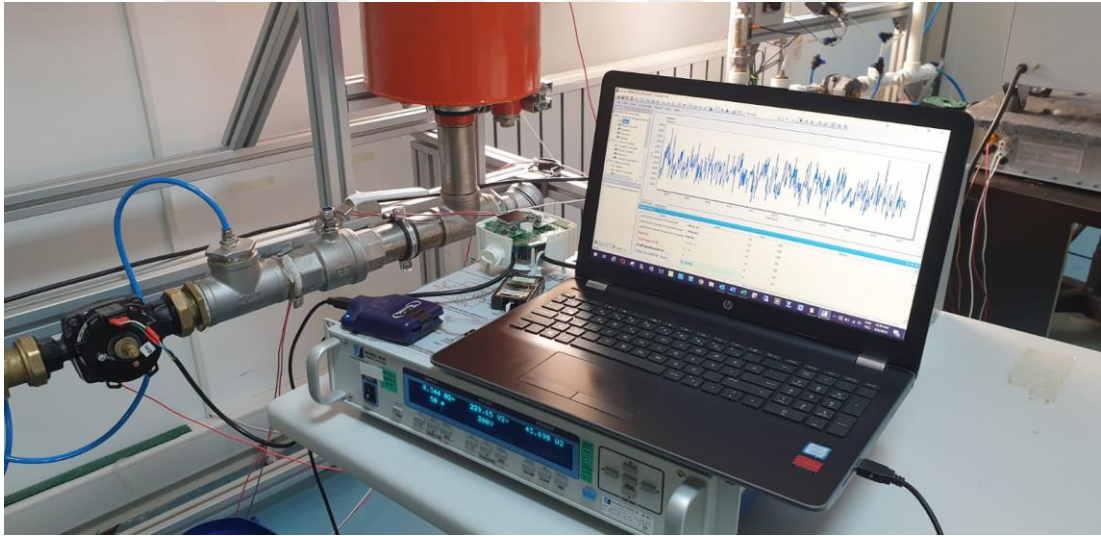


Resim 6.1 : Hidrolik performans test sistemi

## 6.1 Deneilerin Uygulanması ve Verilerin Alınması

Şekilde gösterilen hidrolik test sisteminin ölçüm almaya hazır hale getirilmesi için öncelikle 1 numaralı test edilecek pompa sisteme bağlanır. Sisteme akışkan yüklemeye başlanılır ve 8 numaralı vanadan sürekli bir akış gözlenene kadar bu vana açık tutulur sürekli akış görüldükten sonra bu vana kapatılır. Bu işlemin yapılmasında ki amaç sistemin içerisinde kalan hava kabarcıklarını atarak sistemi stabil hale getirmektedir. Hava atma işlemi tamamlandıktan sonra 8 numaralı manometrede sistem ön basıncı 2 bar olarak görüldüğünde sisteme akışkan yükleme işlemi durdurulur. Bu işlemler tamamlandıktan sonra hidrolik ölçüm sistemi teste hazır hale getirilmiş olur.

Test sistemin elektronik ölçüm kısmında sistemdeki debimetreden, fark basınç ölçerden ve fark basınç transmitterinden veri alabilmek için bir PLC kullanılmıştır. Hidrolik sistemden alınan tüm ölçümler PLC aracılığıyla kaydedilmiştir. Yine hidrolik sistemdeki akışın kontrolünü sağlayan oransal kontrollü vananın kontrolü de PLC aracılığıyla yapılmıştır. Sistem parametrelerinin ölçüm ve kaydedilmesi için kullanılan ölçüm sistemi Resim 6.2’de gösterilmiştir.



Resim 6.2 : Sistem parametreleri ölçüm sistemi

Mıknatıslı senkron motora ait verilerin gerçek zamanlı olarak alınabilmesi için ise Multilink emülatör ve Freemaster gerçek zamanlı hata ayıklama programı kullanılmıştır. Motor sürücü kartının işlemcisine swd konnektör ile bağlanılarak emülatör aracılığıyla motor kontrolüne ait hız, q eksen akımı, faz akımları, DC bara gerilimi, işlemci tarafından tahmin edilen hidrolik değerler gibi değerler freemaster ara yüzünde gözlemlenerek kaydedilmiştir. Motorun şebekeden çektiği elektriksel

gücün ölçümü için tek fazlı güç analizörü kullanılmıştır. Motor sürücü elektronik kart ve motor arasındaki bağlantı kablo ile sağlanmıştır. Motor sürücü elektronik kart ve bilgisayarın arasındaki izolasyonu sağlamak için 1/1 oranlı izolasyon trafosu kullanılmıştır. Osiloskop ile motor sürücü kartın pwm çıkışından alınan datalar gözlemlenip kaydedilerek sistem ve motor hakkında veriler kaydedilmiştir.

Test sırasında PLC aracılığıyla oransal kontrollü vana istenilen akışı sağlayacak konuma getirilir. PLC ve freemaster programı aracılığıyla alınan veriler kaydedilir. Alınan tüm veriler Mathcad ve Matlab ortamında geliştirilen programlar ile enerji verimlilik endeksi hesabı ve optimizasyonu yapılır.

## **5.2 Alınan Deneysel Veriler ile Simülasyonların Doğrulanması**

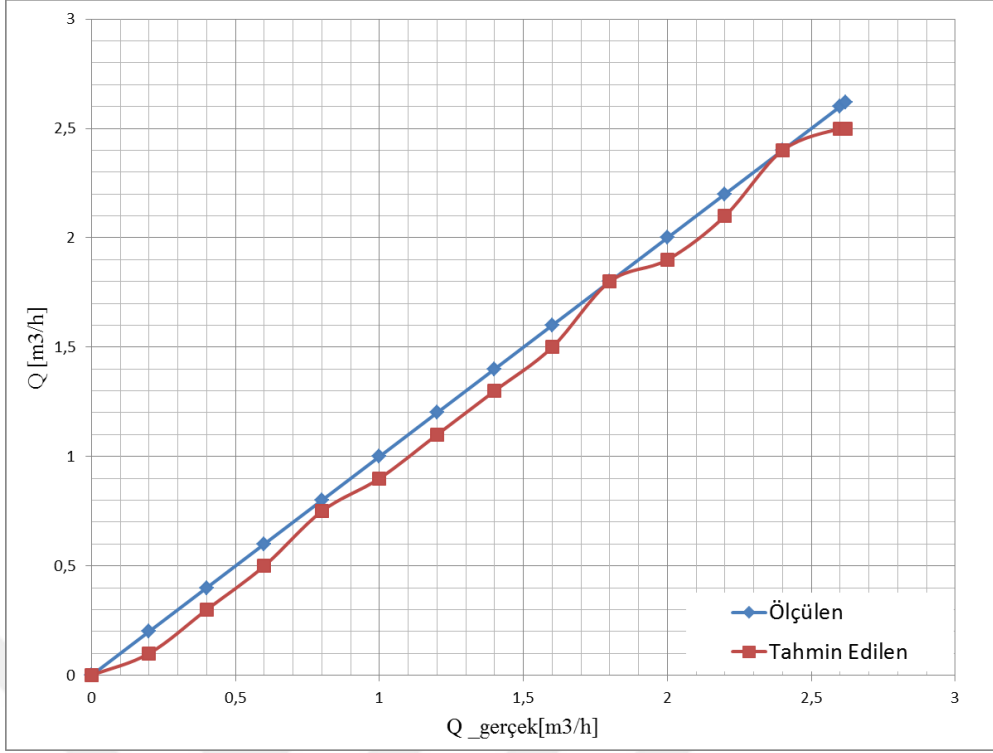
Test aşaması iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda geliştirilen debi ve basma yüksekliği tahmin algoritmaları test edilmiştir. İkinci kısımda ise EEI optimizasyonu için geliştirilen yarı analitik yöntem ile oluşturulan hız referans tablosu test edilmiş ve Mathcad'de yapılan sayısal çözümler doğrulanmıştır.

Birinci kısımda debi ve basma yüksekliği algoritmalarını test etmek için Bölüm 4.4'de detaylı olarak anlatılan ve oluşturulan polinomlar vektör kontrol yazılımına entegre edilerek test edilmiştir. Daha sonra ise pompa hidrolik performans testine alınara 14 farklı ölçüm noktasında ölçülen ve tahmin edilen debi ve basma yüksekliği değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerler grafiksel olarak Şekil (6.2-6.3) 'de verilmiştir.

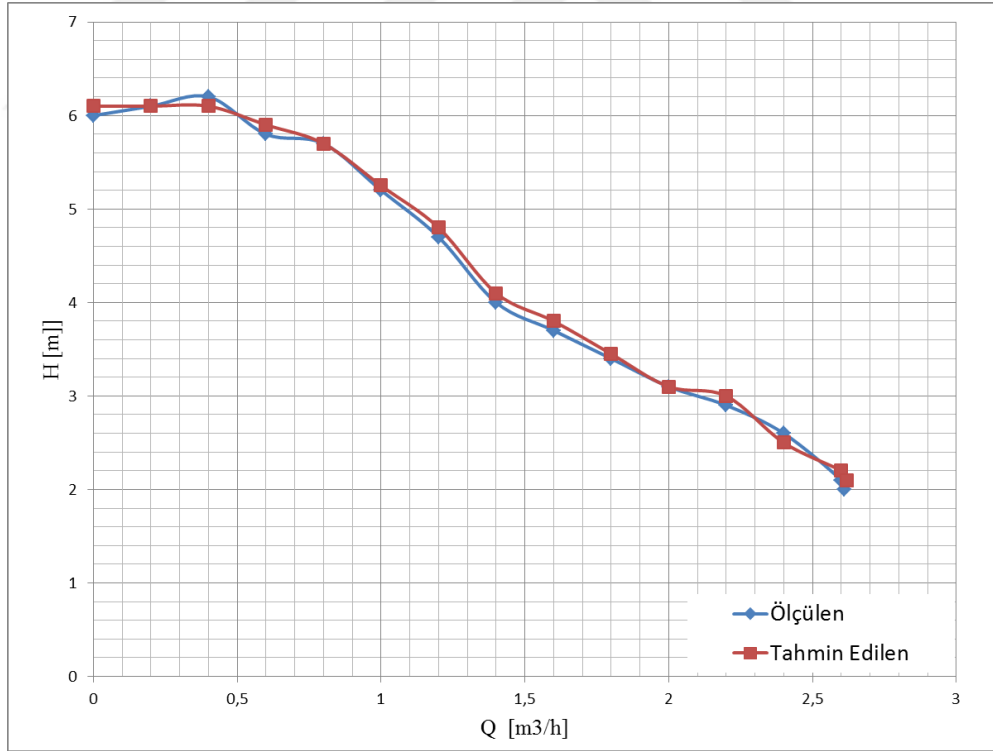
Debi ve basma yükü tahmin algoritmasının test sonuç grafiklerinden görüldüğü üzere tahmin edilen parametre ile test sistemi üzerindeki ölçülen arasındaki hata %5'i geçmemektedir ve bu pompa uygulaması için oldukça iyi bir sonuçtur.

Testin ikinci kısmında ise geliştirilen ve Mathcad ortamında sayısal çözümlenmesi yapılan algoritma motor üzerinde test edilmiştir. İlk olarak EEI optimizasyonu yapılmamış sadece güç ve hız limitine sahip standart yazılım ile sürülen motora sahip sirkülasyon pompasının enerji verimlilik endeksi hesaplanmıştır. Daha sonra ise EEI değerini azaltmak için tez kapsamında geliştirilen mikroişlemci tarafından tahmin edilen debi değerine göre referans hız değeri ile motoru kontrol eden yazılım ile sürülen aynı motora sahip sirkülasyon pompası için EEI değeri hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.





Şekil 6.2: Debi tahmin algoritması test sonucu



Şekil 6.3: Basma yüksekliği tahmin algoritması test sonucu

İlk olarak 62W güç ve 4000rpm hız limiti ile sürülen motora sahip pompa için test ve hesaplamalar yapılmıştır. Bu durumda motor sürücü elektronik kart motorun

şebekeden çektiği aktif güç değeri 62W değerine ulaşana kadar motoru 4000rpmde çevirmektedir. Güç değeri sınır değere ulaştığında motorun devir sayısını azaltılmaktadır. Bu durumda hesaplanan EEI değeri 0.213'dür.

İkinci olarak ise EEI değerini optimize etmek için geliştirilen algoritma kullanılarak oluşturulan referans hız tablosuyla debiye göre hız referansı veren program ile motor sürülerek test ve hesaplamalar tekrarlanmıştır. Geliştirilen yarı analitik yöntemin uygulanması sonucu elde edilen EEI değeri ise 0.195'dir.

Geliştirilen EEI optimizasyon algoritması ile pompanın en verimli çalışma noktası istenilen noktaya kaydırılarak pompanın verimi artırılmış ve enerji verimlilik endeksi düşürülmüştür. Pompanın iki durum için de en verimli çalışma noktaları Çizelge (6.2)'de verilmiştir.

Çizelge 6.2: En verimli noktanın karşılaştırılması

<b>Yazılım Tipi</b>	<b>Q %100 [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>H %100 [mSu]</b>
Standart Yazılım	2.07	5.14
EEI Optimizasyonlu Yazılım	2.32	4.04

Pompanın iki durum içinde hesaplanan EEI değerleri Çizelge (6.3)'de verilmiştir.

Çizelge 6.3: EEI değerlerinin karşılaştırılması

<b>Yazılım Tipi</b>	<b>EEI Değeri</b>
Standart Yazılım	0.213
EEI Optimizasyonlu Yazılım	0.195

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında enerji verimlilik endeksi 0.2'den büyük olan sirkülasyon pompalarının mıknatıslı senkron motorları için geliştirilen kontrol algoritması ile enerji verimlilik endeksi azaltılmıştır. Bu kontrol algoritması belirlenen debi değerleri için oluşturulan referans hız tablosunun vektör kontrol yöntemine entegre edilmesiyle debi değerine göre motorun referans hızını değiştirir bu sayede pompanın daha verimli çalışmasını sağlamaktadır.

Geliştirilen algoritmada EEI değerinin hesaplanması için deneysel ölçümler yerine yarı analitik metodoloji kullanılmıştır. Yarı analitik metodun kullanılmasındaki temel hedef EEI hesabı için gerekli olan deneysel uğraşı azaltmak ve farklı üreticilere ait pompaların EEI değerinin kolaylıkla sistematik olarak belirlenmesini sağlamaktır. Bu yöntemin temel amacı pompanın yük profilindeki her çalışma noktasındaki tükettiği elektriksel güç  $P_{L,i}$ 'yi yarı analitik bir yöntem kullanarak belirlemektir.

Sonuç olarak, deneysel verilerle geliştirilen kontrol algoritmasının sirkülasyon pompası uygulamasında pompa verimliliğini arttırdığı doğrulandı. Geliştirilen kontrol algoritması vektör kontrol ile birleştirilerek, pompa uygulamasında SMSM'nin verimliliği artırılmıştır. Ayrıca Mathcad ortamında geliştirilen analiz programı ile pompa uygulamalarında EEI hesaplaması için gerekli deneysel ölçüm sayısı azaltılmıştır. Geliştirilen kontrol algoritması için analiz sonuçlarının tutarlılığı deneysel ölçümlerle doğrulandı.

Mathcad analizi ile oluşturulan referans hız tablosu, tüm dünyada üretim yapan bir pompa şirketinin ıslak rotor sirkülasyon pompalarının yazılımına uygulanmıştır. Kullanılan standart kontrol algoritması yerine geliştirilen kontrol algoritmasının kullanılması sayesinde, pompa firmasının sirkülasyon pompalarının EEI değeri düşürülmüş ve pompalar dünya pazarına satılmıştır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H., (2002).** *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, 750.
- [2] **Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., Heald, C. C., (2008).** *Pump Handbook*. USA: Mc Graw Hill, 1.2-3.4.
- [3] **P. Sekerak, V. Hrabovcova, M. Onufer, (2012).** Synchronous motors with different PM materials, ELEKTRO 2012 Confer-ence, Zilina, Slovakia, p. 241-246.
- [4] **A.R. Tariq, C.E. Nino-Baron, E.G.. (2011).**Strangas, Consideration of magnet materials in the design of PMSMs for HEVs application, IEEE PES General Meeting.
- [5] **S. Chino, S. Ogasawara, T. Miura, A. Chiba, M. Takemoto, and N. Hoshi, (2011),** Fundamental characteristics of a ferrite permanent magnet axial gap motor with segmented rotor structure for the hybrid electric vehicle, in Proc. IEEE ECCE, p. 2805–2811.
- [6] **B. Mecrow, (2010).** Design of machines and drives-permanent magnet machine lecture note, Newcastle University.
- [7] **Gieras, J.F., (2010).** Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications, Florida.
- [8] **Renesas Electronics Corporation, (2017).** SH2/2A Sensorless Vector Control of Three-Phase Permaneng Magnet Synchronous Motors, Application Note REU05B0103-0100.
- [9] **Werninck, E.H., (1978).** Electric Motor Handbook, *London, McGraw-Hill*.
- [10] **Burak Gördük, (2019).** Design and Implementation of Sensorless Vector Controlled Drive for Pmsms, *M.Sc. Thesis*, 23-60.
- [11] **Tu, W., Xiao, G., Suo, C., and Yang, K., (2017).** A Design of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Based on V/F Control", *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1-5.
- [12] **T. Gundugdu and G. Komurgoz, (2010).** Design of Permanent Magnet Machines with Different Rotor Type, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 70, pp.511-514
- [13] **NXP Semiconductors (2013).** Sensorless PMSM Electrical Parameters Measurement, *Application Note AN4680*.
- [14] **Yanhui Xu, Ulrich Vollmer, Amir Ebrahimi, (2012).** Online Estimation of the Stator Resistances of a PMSM with Consideration of Magnetic Saturation, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2012)*, 25-27 October, Iasi, Romania, p. 360-365.
- [15] **NXP Semiconductors (2016).** Sensorless PMSM Field-Oriented Control, *Application Note DRM148*.

- [16] **Kim, H., Yi, S., Kim N.**, (2005). Using Low Resolution Position Sensors in Bumpless Position/Speed Estimation Methods for Low Cost PMSM Drives, IEEE 40th Industry Applications Conference.
- [17] **NXP Semiconductors** (2016). Sensorless PMSM Field-Oriented Control on Kinetis KV and KE, *Application Note AN523*.
- [18] **Ha, J. I., and Sul, S. K.**, (1999). Sensorless Field-Orientation Control of an Induction Machine by High-Frequency Signal Injection, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(1), 45-51.
- [19] **S. Karakas, M. Gokasan**, (2011). An Adaptive Approach for Online Fine Tuning of Current PI Controllers in Washing Machines, *IEEE-ICM Conf.*, Apr.
- [20] **Xu, P. L., and Zhu, Z. Q.**, (2016). Novel Carrier Signal Injection Method Using Zero-Sequence Voltage for Sensorless Control of PMSM Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(4), 2053-2061.
- [21] **H. Kim, S. Yi, N. Kim et.al.**, (2005). Using Low Resolution Position Sensors in Bumpless Position/Speed Estimation Methods for Low Cost PMSM Drives, *Proc. IEEE-IAS Conf.*, pp. 2518-2525, Oct.
- [22] *A framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products*, Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing.
- [23] *The European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products*, Commission regulation (EC) No 641/2009 implementing Directive 2005/32/EC .
- [24] **D.P. Marčetić, V. R. Jevremović**, (2007). Application of Shaft Sensorless Induction Motor Drive in a Washing-Machine, *Proc. 14th Int. Symp. Power Electron.*
- [25] **Singh, B., Singh, S.**, (2009). State of the Art on Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives, *Journal of Power Electronics*, Volume 9, Number 1.
- [26] **Lara, J., and Chandra, A.**, (2018) . Performance Investigation of Two Novel HSFSI Demodulation Algorithms for Encoderless FOC of PMSMs Intended for EV Propulsion, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(2), 1074-1083.
- [27] **Hussain, S., and Bazaz, M. A.**, (2015). Review of Vector Control Strategies for Three Phase Induction Motor Drive, *International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*, 96-101.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Mutullah EŞER  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 28.12.1993, Ankara  
**E-posta** : mutullaheser@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fak., Mekatronik Mühendisliği
- **Lisans** : 2016, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektrik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016-2019	KSB Pompa Armatür San. ve Tic. A.Ş.	Arge Mühendisi
2019-Devam	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.	Tasarım Mühendisi

### YABANCI DİL: İNGİLİZCE

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Eşer M., Kasnakoğlu C., Benli B., (2019).** Vector Control of PMSM in Circulation Pump Application and an Adaptive Approach for EEI Optimization , 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Kasım 28-30, Bursa, Türkiye.
- **Eşer M., Kasnakoğlu C., İtişken S., (2019).** Sirkülasyon Pompaları Uygulamalarında Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Vektör Kontrolü ve EEI Optimizasyonu için Kontrol Metodu Geliştirilmesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi, Kasım 14-16, İstanbul, Türkiye.

