

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**IE2 TEK FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI,  
PROTOTİP ÜRETİMİ VE OPTİMİZASYONU**

**Ufuk Muhammed DEVECİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Ocak, 2025

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ufuk Muhammed DEVECİ tarafından hazırlanan tez çalışması 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Dr. öğr. Üyesi Mehmet Murat TEZCAN, Üye  
Dumlupınar Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK sorumluluğunda tarafımda hazırlanan IE2 Tek Fazlı Asenkron Motor Tasarımı, Prototip Üretimi ve Optimizasyonu başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ufuk Muhammed DEVECİ

*Canım Eşim ve Değerli Aileme*

## TEŞEKKÜR

---

Çalışmalarım boyunca her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK'e; fikirleriyle tezin ilerleyişine ve tamamlanmasına katkıda bulunan hocalarım Doç. Dr. Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Murat TEZCAN'a; yine tez hazırlama sürecinde değerli bilgilerini ve deneyimlerini paylaşan GAMAK Motor ailesine teşekkürlerimi sunarım. Bugünlere gelmemde büyük emeği olan ve beni asla yalnız bırakmayan, desteklerini her zaman yanımda hissettiğim Annem Kadem ve Babam Cemal DEVECİ'ye; abim, aynı zamanda meslek büyüğüm Elektrik Müh. Şafak DEVECİ'ye ve çocukluk arkadaşım, kardeşim, dostum Hakim Ammar Yasin ÇOBAN'a sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunuyorum. Hayatıma girdiği günden beri eksik parçalarımı tamamlayan, beni her zaman destekleyen ve hayatın yükünü birlikte paylaştığımız eşim Elçin DEVECİ'ye ve buraya ismini sığdıramayacağım tüm dostlarıma sevgi ve saygılarımı sunuyorum.

Ufuk Muhammed DEVECİ

# İÇİNDEKİLER

---

|   |             |
|---|-------------|
| <b>SİMGE LİSTESİ</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>   | <b>xii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>  | <b>xvi</b>  |
| <b>ÖZET</b>   | <b>xvii</b> |
| <b>ABSTRACT</b>   | <b>xix</b>  |
| <b>1 GİRİŞ</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Literatür Taraması . . . . .  | 1           |
| 1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı . . . . .  | 8           |
| 1.3 Hipotez . . . . .   | 9           |
| <b>2 TEK FAZLI ASENKRON MOTOR</b>   | <b>10</b>   |
| 2.1 Giriş . . . . .   | 10          |
| 2.2 Çift Döner Alan Teorisi . . . . .   | 12          |
| 2.3 Çapraz Alan Teorisi . . . . .   | 14          |
| 2.4 Yardımcı Sargılı Motor . . . . .  | 15          |
| 2.5 Kondansatörlü – Yardımcı Sargılı Motor . . . . .                                | 17          |
| 2.5.1 Daimi Kondansatörlü Motor . . . . .   | 19          |
| 2.5.2 Çift Kondansatörlü Motor . . . . .  | 21          |
| 2.6 Gölge Kutuplu (Oyuk Kutuplu) Motor . . . . .                                    | 22          |
| <b>3 TEK FAZLI ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRESİ VE<br/>MATEMATİKSEL MODELLEMESİ</b> | <b>25</b>   |
| 3.1 Giriş . . . . .   | 25          |
| 3.2 Yardımcı Sargılı Motorun Eşdeğer Devresi . . . . .                              | 25          |
| 3.2.1 Eşdeğer Devrenin Analizi . . . . .  | 28          |
| 3.3 Daimi Kondansatörlü Motorun Eşdeğer Devresi . . . . .                           | 31          |
| 3.3.1 Eşdeğer Devrenin Analizi . . . . .  | 33          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.4      | Tek Fazlı Asenkron Motorun Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Uygulanan Testler . . . . . | 35        |
| <b>4</b> | <b>TEK FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI</b>  | <b>37</b> |
| 4.1      | Tek Fazlı Asenkron Motorun Tasarım Süreci . . . . .                                       | 37        |
| 4.1.1    | Sabit Karakteristik Değerlerin Belirlenmesi . . . . .                                     | 38        |
| 4.1.2    | Ana Boyutların Belirlenmesi . . . . .   | 39        |
| 4.1.3    | Hava Aralığı . . . . .  | 41        |
| 4.1.4    | Oluk Sayılarının Seçimi ve Boyutlandırması . . . . .                                      | 42        |
| 4.1.5    | Sarım Sayıları ve Tel Çaplarının Belirlenmesi . . . . .                                   | 49        |
| <b>5</b> | <b>SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ</b>  | <b>53</b> |
| 5.1      | SEY ve Maxwell Denklemleri . . . . .  | 55        |
| <b>6</b> | <b>REFERANS MOTORUN MODELLENMESİ, ANALİZ VE TEST SONUÇLARI</b>                            | <b>56</b> |
| 6.1      | Giriş . . . . .   | 56        |
| 6.2      | Motorun Modellenmesi . . . . .  | 56        |
| 6.3      | Referans Motorun Analiz ve Test Sonuçları . . . . .                                       | 58        |
| <b>7</b> | <b>IE2 VERİMLİLİKTE TEK FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI</b>                                 | <b>62</b> |
| 7.1      | Giriş . . . . .   | 62        |
| 7.2      | Tasarım Parametrelerinin Motor Performansına Etkileri . . . . .                           | 63        |
| 7.2.1    | Kondansatör Seçiminin Motor Performansına Etkileri . . . . .                              | 63        |
| 7.2.2    | Stator Sargısı Sarım Sayılarının Motor Performansına Etkileri . . . . .                   | 65        |
| 7.2.3    | Kısa Devre Halkalarının Motor Performansına Etkisi . . . . .                              | 68        |
| 7.3      | Optimizasyon İçin Sarım Sayılarının Belirlenmesi . . . . .                                | 70        |
| 7.4      | Belirlenen Tasarımın Elektromanyetik Analizi . . . . .                                    | 72        |
| <b>8</b> | <b>PROTOTİP ÜRETİMİ VE DENEYSEL DOĞRULAMA</b>   | <b>78</b> |
| <b>9</b> | <b>SONUÇ</b>  | <b>83</b> |
|          | <b>KAYNAKÇA</b>   | <b>85</b> |
|          | <b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>  | <b>88</b> |

## SİMGE LİSTESİ

---

|                    |  |
|--------------------|--|
| $\omega$           | Açısal hız   |
| A                  | Amper  |
| $I_a$              | Ana sargı akımı                                    |
| $J_a$              | Ana sargı akım yoğunluğu                           |
| $\varphi_a$        | Ana sargı akısı                                    |
| $E_a$              | Ana sargıda endüklenen gerilim                     |
| $E_1$              | Ana sargıda endüklenen karşıt EMK                  |
| $R_a$              | Ana sargı direnci                                  |
| $\theta_a$         | Ana sargı faz açısı                                |
| $E_{Ba}$           | Ana sargı geri manyetik alanda endüklenen gerilim  |
| $E_{Fa}$           | Ana sargı ileri manyetik alanda endüklenen gerilim |
| $N_a$              | Ana sargı oluk başına düşen sarım sayısı           |
| $X_a$              | Ana sargı reaktansı                                |
| $V_a$              | Ana sargı uçlarındaki gerilim                      |
| $K_{wa}$           | Ana sargıya ait sargı faktörü                      |
| $k_e$              | Aşırı kayıplar                                     |
| $I_{s0}$           | Boşta çalışma akımı                                |
| $V_{s0}$           | Boşta çalışma gerilimi                             |
| $P_{s0}$           | Boşta çalışma gücü                                 |
| $P_{\text{çıkış}}$ | Çıkış gücü   |
| $C_d$              | Daimi kondansatör                                  |
| $R_{Fe}$           | Demir (nüve) kayıplarını oluşturan direnç          |
| $n$                | Devir sayısı (Devir/dakika)                        |

|             |  |
|-------------|--|
| $K_{dolgu}$ | Dolgu faktörü                                |
| $P_{kayıp}$ | Dönel kayıplar toplamı                       |
| $\alpha$    | Dönüştürme oranı                             |
| $k_c$       | Eddy akım kayıpları                          |
| $C_{esson}$ | Faydalanma katsayısı                         |
| $f$         | Frekans                                      |
| $P_{rcl,B}$ | Geri manyetik alanda rotor iletken kaybı     |
| $Z_B$       | Geri manyetik alan devresinin empedansı      |
| $P_{AG,B}$  | Geri manyetik alanın hava aralığındaki gücü  |
| $P_{Giriş}$ | Giriş gücü                                   |
| $I, IL$     | Hat akımı                                    |
| $V$         | Hat (besleme) gerilimi                       |
| $B_\delta$  | Hava aralığı akı yoğunluğu                   |
| $P_{AG}$    | Hava aralığındaki net güç                    |
| $\delta$    | Hava aralığı uzunluğu                        |
| $k_h$       | Histerezis kayıpları                         |
| $P_{rcl,F}$ | İleri manyetik alanda rotor iletken kaybı    |
| $Z_F$       | İleri manyetik alan devresinin empedansı     |
| $P_{AG,F}$  | İleri manyetik alanın hava aralığındaki gücü |
| $M_k$       | Kalkış momenti                               |
| $s$         | Kayma miktarı (yüzde)                        |
| $I_{sk}$    | Kısa devre akımı                             |
| $V_{sk}$    | Kısa devre gerilimi                          |
| $P_{sk}$    | Kısa devre gücü                              |
| $P_{kond}$  | Kondansatör kayıpları                        |
| $X_c$       | Kondansatör reaktansı                        |
| $C$         | Kondansatörün kapasite değeri                |
| $V_c$       | Kondansatör üzerindeki gerilim               |
| $\tau$      | Kutup adımı                                  |

|                      |  |
|----------------------|--|
| $p$                  | Kutup çifti sayısı                               |
| $M_{end}$            | Makinenin hava aralığında endüklenen momenti     |
| $P_{sn}$             | Makinenin iç sanal gücü                          |
| $B_{max}$            | Maksimum akı yoğunluğu                           |
| $\varphi$            | Manyetik akı                                     |
| $K_{dis}$            | Manyetik akı düzeltme faktörü                    |
| $X_M$                | Mıktanıslanma reaktansı                          |
| $J_{1n}$             | Nominal değerdeki akım yoğunluğu                 |
| $M_n$                | Nominal Moment                                   |
| $k_{bar}$            | Oluk alan faktörü                                |
| $L$                  | Paket boyu                                       |
| $\omega_m, \omega_r$ | Rotor açısal hızı                                |
| $\varphi_r$          | Rotor akısı                                      |
| $I_r$                | Rotorda endüklenen akım                          |
| $e$                  | Rotorda endüklenen gerilim                       |
| $n_m, n_r$           | Rotor devir sayısı                               |
| $D_{or}$             | Rotor dış çapı                                   |
| $b_{rd}$             | Rotor dış genişliği                              |
| $B_{rd}$             | Rotor dışındaki manyetik akı yoğunluğu           |
| $B_r$                | Rotor manyetik akı yoğunluğu                     |
| $W_{or}$             | Rotor oluk ağız genişliği                        |
| $A_r$                | Rotor oluk alanı                                 |
| $N_r$                | Rotor oluk sayısı                                |
| $H_r2$               | Rotor oluk yüksekliği                            |
| $R_2$                | Rotorun statora indirgenmiş direnci              |
| $X_2$                | Rotorun statora indirgenmiş reaktansı            |
| $B_{SY}$             | Saat yönünde akan manyetik akı yoğunluğu         |
| $B_{SYT}$            | Saat yönünün tersine akan manyetik akı yoğunluğu |
| $\omega_{senkron}$   | Senkron açısal hız                               |

|                  |  |
|------------------|--|
| $n_{senkron}$    | Senkron devir sayısı                     |
| $R_{1a}$         | Stator ana sargı direnci                 |
| $Z_{1a}$         | Stator ana sargı empedansı               |
| $X_{1a}$         | Stator ana sargı reaktansı               |
| $P_{scu}$        | Stator bakır kaybı                       |
| $B_{sb}$         | Stator boyunduruk manyetik akı yoğunluğu |
| $h_{sb}$         | Stator boyunduruk uzunluğu               |
| $B_s$            | Statordaki sabit manyetik akı yoğunluğu  |
| $P_{conv}$       | Stator dan rotora intikal eden güç       |
| $D_o$            | Stator dış çapı                          |
| $b_{sd}$         | Stator dış genişliği                     |
| $B_{sd}$         | Stator dışındaki manyetik akı yoğunluğu  |
| $D_i$            | Stator iç çapı                           |
| $H_{s0}, H_{s1}$ | Stator oluğu dış dibi genişliği          |
| $\tau_r$         | Stator oluk adımı                        |
| $B_{s0}$         | Stator oluk ağız genişliği               |
| $A_s$            | Stator oluk alanı                        |
| $H_{s2}$         | Stator oluk genişliği                    |
| $B_{s1}, B_{s2}$ | Stator oluk genişlikleri                 |
| $N_s$            | Stator oluk sayısı                       |
| $R_1$            | Stator sargı direnci                     |
| $Z_1$            | Stator sargı empedansı                   |
| $X_1$            | Stator sargı reaktansı                   |
| $R_{1y}$         | Stator yardımcı sargı direnci            |
| $Z_{1y}$         | Stator yardımcı sargı empedansı          |
| $X_{1y}$         | Stator yardımcı sargı reaktansı          |
| $Z_T$            | Toplam empedans                          |
| $P_{rcl}$        | Toplam rotor kaybı                       |
| $\eta$           | Verim                                    |

|             |   |
|-------------|---|
| $I_y$       | Yardımcı sargı akımı                                    |
| $J_y$       | Yardımcı sargı akım yoğunluğu                           |
| $\varphi_y$ | Yardımcı sargı akısı                                    |
| $R_y$       | Yardımcı sargı direnci                                  |
| $\theta_y$  | Yardımcı sargı faz açısı                                |
| $E_{By}$    | Yardımcı sargı geri manyetik alanda endüklenen gerilim  |
| $E_{Fy}$    | Yardımcı sargı ileri manyetik alanda endüklenen gerilim |
| $N_y$       | Yardımcı sargı oluk başına düşen sarım sayısı           |
| $X_y$       | Yardımcı sargı reaktansı                                |
| $V_y$       | Yardımcı sargı uçlarındaki gerilim                      |
| $K_{wy}$    | Yardımcı sargıya ait sargı faktörü                      |
| $C_y$       | Yol verme (kalkış) kondansatörü                         |
| $M_{yük}$   | Yük momenti   |
| $t$         | Zaman sabiti  |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|     |                                      |
|-----|--------------------------------------|
| EMK | Elektromanyetik kuvvet               |
| IEC | Uluslararası Elektroteknik Komisyonu |
| KMO | Kalkış moment oranı                  |
| MCY | Montecarlo yöntemi                   |
| MMK | Manyetomotor kuvveti                 |
| MY  | Moment yöntemi                       |
| SEY | Sonlu elemanlar yöntemi              |
| SFY | Sonlu fark yöntemi                   |
| SY  | Saat yönü                            |
| SYT | Saat yönünün tersi                   |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Şekil 1.1</b>  | Galileo Ferrari'nin endüksiyon motor tasarımı [2] . . . . .   | 2  |
| <b>Şekil 1.2</b>  | Nikola Tesla'nın ilk endüksiyon motor tasarımı [3] . . . . .  | 3  |
| <b>Şekil 1.3</b>  | Otto'nun önerdiği Smith bağlantı şekli [10] . . . . .   | 5  |
| <b>Şekil 1.4</b>  | Hui Zhong ve arkadaşlarının önerdiği yeni tip stator sargısı [11] .   | 6  |
| <b>Şekil 1.5</b>  | Hui Zhong vd. ileri sürdüğü sargı yapısı [10] . . . . .   | 7  |
| <b>Şekil 1.6</b>  | Abdel-Khalik vd. (a) sargı bağlantısı ve (b) sarım şeması [12] . .  | 8  |
| <b>Şekil 2.1</b>  | Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması . . . . .   | 10 |
| <b>Şekil 2.2</b>  | Sincap kafes rotorlu tek fazlı asenkron motorun yapısı [17] . . . .   | 11 |
| <b>Şekil 2.3</b>  | İleri ve geri döner manyetik alanlar hesaba katılarak oluşturulan,<br>tek fazlı asenkron motorun hız moment karakteristiği [19] . . . .             | 13 |
| <b>Şekil 2.4</b>  | Rotorun döndürülmesinden dolayı rotorda endüklenen akım ( $I_r$ )<br>ve bu akımın oluşturduğu stator akısına dik olan rotor akısı ( $\varphi_r$ ) . | 15 |
| <b>Şekil 2.5</b>  | Yardımcı Sargılı Motor [17] . . . . .   | 16 |
| <b>Şekil 2.6</b>  | Yardımcı Sargılı Tek Fazlı asenkron motorda net hız-moment eğrisi   | 16 |
| <b>Şekil 2.7</b>  | Motor, senkron hızın yaklaşık yüzde 75 değerine ulaştığında<br>yardımcı sargıyı devreden çıkaran santrifüj anahtarı . . . . .                       | 17 |
| <b>Şekil 2.8</b>  | 24 stator oluklu, 4 kutuplu yardımcı sargılı motorlarda genellikle<br>kullanılan tek katman yastık sargı şema örneği . . . . .                      | 17 |
| <b>Şekil 2.9</b>  | Kondansatörlü – Yardımcı sargılı motor şeması . . . . .   | 18 |
| <b>Şekil 2.10</b> | Kondansatörlü – Yardımcı sargılı asenkron motorda ana sargı ve<br>yardımcı sargı akımı arasındaki faz farkı . . . . .                               | 18 |
| <b>Şekil 2.11</b> | Kondansatörlü yardımcı sargılı motorun hız – moment<br>karakteristiği [22] . . . . .  | 19 |
| <b>Şekil 2.12</b> | Daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun yapısı [21] . . . .  | 20 |
| <b>Şekil 2.13</b> | Daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun hız – moment<br>karakteristiği [17] . . . . .  | 20 |
| <b>Şekil 2.14</b> | Çift kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun yapısı [21] . . . . .   | 21 |
| <b>Şekil 2.15</b> | Çift kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun hız – moment<br>karakteristiği [22] . . . . .   | 21 |
| <b>Şekil 2.16</b> | Gölge kutuplu tek fazlı asenkron motorun yapısı [22] . . . . .  | 22 |
| <b>Şekil 2.17</b> | Gölge kutuplu tek fazlı asenkron motor için başka bir geometrik<br>yapı . . . . .   | 23 |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Şekil 2.18</b> | Gölge kutuplu motorda akıların etkileşimi [28] . . . . .  | 24 |
| <b>Şekil 2.19</b> | Gölge kutuplu tek fazlı asenkron motorun hız – moment karakteristiği [17] . . . . .   | 24 |
| <b>Şekil 3.1</b>  | Tek fazlı asenkron motorun durağan halde ( $n_r = 0$ ) eşdeğer devresi [17]. . . . .  | 26 |
| <b>Şekil 3.2</b>  | Tek fazlı asenkron motorun ileri ve geri alanlara bölünmüş eşdeğer devresi [17] . . . . .   | 26 |
| <b>Şekil 3.3</b>  | Yalnızca ana sargının devrede olduğu ve rotorun ileri alan yönünde döndüğü durumda tek fazlı asenkron motorun eşdeğer devresi . . . . . | 27 |
| <b>Şekil 3.4</b>  | Bir asenkron motorun güç akış diyagramı [17]. . . . .   | 29 |
| <b>Şekil 3.5</b>  | Daimi kondansatörlü asenkron motorun çift döner alan akıları [22]   | 31 |
| <b>Şekil 3.6</b>  | Daimi kondansatörlü motorun ana sargısı için oluşturulan eşdeğer devre . . . . .  | 32 |
| <b>Şekil 3.7</b>  | Daimi kondansatörlü motorun yardımcı sargısı için oluşturulan eşdeğer devre [22] . . . . .  | 33 |
| <b>Şekil 4.1</b>  | Bir asenkron motorun tasarım sürecinde izlenecek diyagram . . .   | 37 |
| <b>Şekil 4.2</b>  | Makinenin beygir gücüne göre faydalanma katsayısı, C [31] . . .   | 39 |
| <b>Şekil 4.3</b>  | IEC standartlarına göre motor gövde ölçülerine ait teknik resim [32] . . . . .  | 40 |
| <b>Şekil 4.4</b>  | Stator oluşuna ait farklı geometriler . . . . .   | 44 |
| <b>Şekil 4.5</b>  | Sargılı stator geometrisi . . . . .   | 45 |
| <b>Şekil 4.6</b>  | Açık ve kapalı rotor oluk geometrilerinden bazı örnekler . . . . .  | 47 |
| <b>Şekil 4.7</b>  | Kapalı rotor laminasyon geometrisine bir örnek ve rotor oluk ölçüleri . . . . .   | 47 |
| <b>Şekil 4.8</b>  | 36 stator oluklu 4 kutuplu çift katmanlı sargı şemasına ait (simetrik yarım) konfigürasyon . . . . .                                    | 49 |
| <b>Şekil 5.1</b>  | Bir asenkron motorun Maxwell 2D ile 2 boyutlu modellemesi . . .   | 54 |
| <b>Şekil 5.2</b>  | Bir asenkron motorun ağ modeli . . . . .  | 54 |
| <b>Şekil 6.1</b>  | Referans motora ait 2D model . . . . .  | 57 |
| <b>Şekil 6.2</b>  | Referans motora ait (a) ağ yapısı ve (b) ağ sayısının ayarlanması .   | 57 |
| <b>Şekil 6.3</b>  | Referans motora ait manyetik akı yoğunluğu . . . . .  | 58 |
| <b>Şekil 6.4</b>  | Referans motora ait manyetik akı çizgileri . . . . .  | 58 |
| <b>Şekil 6.5</b>  | Referans motorun SEY analizine ait Hız – Çıkış gücü eğrisi . . . .  | 59 |
| <b>Şekil 6.6</b>  | Referans motorun SEY analizine ait Hız – Moment karakteristiği .  | 59 |
| <b>Şekil 6.7</b>  | Referans motorun SEY analizine ait (a) Hız – Akım eğrisi ve (b) Hız – Kayıp güç eğrisi . . . . .  | 60 |
| <b>Şekil 7.1</b>  | Rmxprt parametrik analizden elde edilen sonuçlara göre farklı sarım sayıları ve kondansatör değerlerinin verime etkileri . . . . .      | 64 |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Şekil 7.2</b>  | Rmxprt parametrik analizden elde edilen sonuçlara göre farklı sarım sayıları ve kondansatör değerlerinin kalkış moment oranına etkileri . . . . . | 65 |
| <b>Şekil 7.3</b>  | Eş merkezli sargıya bir örnek . . . . .   | 66 |
| <b>Şekil 7.4</b>  | Ana ve yardımcı sargı sarım sayıları ile verim arasındaki ilişki . .  | 67 |
| <b>Şekil 7.5</b>  | Ana ve yardımcı sargı sarım sayıları ile KMO arasındaki ilişki . .  | 68 |
| <b>Şekil 7.6</b>  | Rotor yapısı ve kısa devre halkaları . . . . .  | 69 |
| <b>Şekil 7.7</b>  | Kısa devre halka genişliğine göre verim ve kalkış moment oranı .  | 69 |
| <b>Şekil 7.8</b>  | IE2 verimli motor tasarımına ait 2D yapısı . . . . .  | 72 |
| <b>Şekil 7.9</b>  | SEY analizi için SARGI 2 tasarımına ait ağ modeli . . . . .   | 73 |
| <b>Şekil 7.10</b> | Optimize edilmiş tasarıma ait manyetik akı yolları . . . . .  | 73 |
| <b>Şekil 7.11</b> | Optimize edilmiş tasarıma ait manyetik akı yoğunluğunun dağılımı  | 74 |
| <b>Şekil 7.12</b> | Optimize edilmiş tasarımda kullanılan manyetik malzemeye ait B-H eğrisi . . . . .   | 74 |
| <b>Şekil 7.13</b> | Farklı sargı opsiyonlarının karşılaştırmalı hız – moment eğrisi . .   | 75 |
| <b>Şekil 7.14</b> | Optimizasyonu yapılan tasarıma ait hız – moment eğrisi (SEY) . .  | 76 |
| <b>Şekil 7.15</b> | Optimizasyonu yapılan tasarıma ait hız – akım eğrisi (SEY) . . .  | 76 |
| <b>Şekil 7.16</b> | Optimizasyonu yapılan tasarıma ait hız – kayıp güç eğrisi (SEY) .   | 77 |
| <b>Şekil 8.1</b>  | Prototip motora ait (a) verniklenmiş sargılı stator ve (b) milli rotor  | 78 |
| <b>Şekil 8.2</b>  | Gamak Elektrik Motorları Ar-Ge laboratuvarı test sistemi, 80 tip 4 kutup 0,37 kW tek fazlı asenkron motor prototip testi . . . . .                | 79 |
| <b>Şekil 8.3</b>  | Prototip test ve analiz sonuçlarına ait, hıza göre akım ve moment değerleri . . . . .   | 80 |
| <b>Şekil 8.4</b>  | Prototip olarak üretilen motorun saha uygulamalarındaki testleri .  | 82 |

## TABLO LİSTESİ

---

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| <b>Tablo 4.1</b> | Stator iç çapının dış çapına oranının teorik değerleri . . . . .   | 40 |
| <b>Tablo 4.2</b> | IEC 60072-1 standartlarına göre gövde ölçüleri [32] . . . . .  | 41 |
| <b>Tablo 4.3</b> | Helis açılı rotora sahip bir motor için avantajlı oluk sayıları [30] .                                     | 43 |
| <b>Tablo 4.4</b> | Teorik manyetik akı yoğunlukları ( $f=50$ Hz) . . . . .  | 44 |
| <b>Tablo 6.1</b> | Referans motorun tasarımına ait bilgiler . . . . .   | 56 |
| <b>Tablo 6.2</b> | Referans motorun SEY analiz ve tip test sonuçlarının kıyaslanması  | 61 |
| <b>Tablo 7.1</b> | Farklı sargı opsiyonlarına ait tasarım değerleri . . . . .   | 70 |
| <b>Tablo 7.2</b> | Farklı sargı opsiyonlarının 2D analize göre çıkış karakteristikleri<br>( $20\mu F$ ) . . . . .             | 71 |
| <b>Tablo 8.1</b> | Optimizasyonu yapılan tasarıma ait SEY analiz sonuçları ve<br>prototip motora ait test sonuçları . . . . . | 81 |
| <b>Tablo 8.2</b> | IE1 ve IE2 motorlara ait tasarım parametreleri . . . . .   | 81 |
| <b>Tablo 8.3</b> | IE1 ve IE2 motorların deneysel sonuçları . . . . .   | 81 |

## **IE2 Tek Fazlı Asenkron Motor Tasarımı, Prototip Üretimi ve Optimizasyonu**

Ufuk Muhammed DEVECİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇIÇEK

Dünyada artan enerji tüketim talepleri ve depolama sorunları enerji üretim ve tüketiminde verimlilik esasını ön plana çıkarmaktadır. Dolayısıyla üretilen elektrik enerjisinin büyük bir bölümünü kullanan elektrik motorlarında verimliliği artırma çalışmaları önem arz etmektedir. Bu bağlamda Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından IEC 60034-30-1 standartları çerçevesinde hem çok fazlı hem de tek fazlı elektrik motorları için tipe ve güce göre verim sınıfları yayınlanmıştır. Tek fazlı elektrik motorları için ise verim sınıfı en az IE2 olarak tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında; öncelikle literatür taraması yapılmış ve tek fazlı asenkron motor çeşitleri incelendikten sonra endüstride kullanılan 80 tip, 0,37 kW, 4 kutuplu tek fazlı asenkron motorun IEC standartlarına göre IE1 verim sınıfından IE2 verim sınıfına yükseltilmesi amacıyla tasarım çalışması yapılmıştır. Bu çalışma yapılırken aynı zamanda seri üretim prosesine uygunluğuna ve maliyetin düşük olmasına da dikkat edilmiştir. Tezin hedefi yüksek performanslı fakat uygun maliyetli bir motor tasarımı yapmaktır. Bu çalışmada mevcut motorun (IE1) laminasyonu kullanılmış ve ana ve yardımcı sargılar ile kondansatörlerin motor performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Verimde artış sağlamak adına kayıpların azaltılması amaçlanmış ve bu sargıların optimizasyonu ile sağlanmıştır. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Ayrıca parametreleri optimum düzeyde belirlemek için parametrik analizler yapılmış ve verimlilik artırılmıştır. Değerlendirme ve karşılaştırmalar; verim, moment, sıcaklık artışı, güç faktörü gibi çıkış performansları özelinde yapılmıştır. Her bir farklı tasarım için Hız – Moment, Hız – Çıkış gücü, Hız – Kayıp güç gibi eğriler çizdirilerek

gerekli analitik hesaplamalar yapılmıştır. Parametrik analizlerin nihai sonuçları, üretilen prototip motorla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bununla birlikte ilgili motorun kullanım alanları göz önünde bulundurularak saha testleri yapılmış ve yük altında sorunsuz çalışarak endüstriyel kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Tez çalışmasına başlarken; son yıllarda ivme kazanan yeşil enerji, enerji verimliliği gibi konularda yapılan çalışmalara katkı sağlamak amaçlanmış ve seri üretimi yapılabilen elektrik motoru ile başarıya ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tek fazlı asenkron motor, IE2 verim sınıfı, Optimizasyon

## ABSTRACT

---

# **IE2 Efficiency Single Phase Induction Motor Design, Prototyping and Optimization**

Ufuk Muhammed DEVECİ

Department of Electrical Engineering  
Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Engin AYÇİÇEK

In the contemporary context, characterized by increasing energy consumption demands and persistent storage challenges on a global scale, the need to enhance efficiency in energy production and consumption has become paramount. Research efforts focusing on the improving efficiency in electric motors, which account for a significant portion of generated electrical energy, have gained significant importance. The International Electrotechnical Commission (IEC) has established efficiency classes based on frame and power for electric motors under the IEC 60034-30-1 standards. For single-phase electric motors, the efficiency class has been set at least IE2. A design study was then conducted to upgrade the 80 type, 0.37 kW, 4-pole single-phase asynchronous motor used in industry from the IE1 efficiency class to the IE2 efficiency class, in compliance with IEC standards. The study also considered the motor's suitability for mass production, cost-effectiveness, and high performance. The existing motor (IE1) was analyzed through a lamination process, and the impact of its main and auxiliary windings, as well as capacitors, on motor performance was assessed. The goal was to improve the motor's efficiency, which was achieved through the optimization of the windings. The finite element method (FEM) was utilised in the analyses. In addition, parametric analyses were performed to determine the parameters at the optimum level and efficiency was increased. The analytical calculations required for this were performed by plotting various curves, including Speed-Torque, Speed-Output Power, and Speed-Lost Power for each distinct design. The final results of the parametric analyses were verified by comparing them with the prototype motor

produced. The primary objective of the present study was to contribute to the growing body of research on green energy and energy efficiency, a field that has seen significant progress in recent years.

**Keywords:** Single phase asynchronous motor, IE2 efficiency class, optimization

# 1 GİRİŞ

---

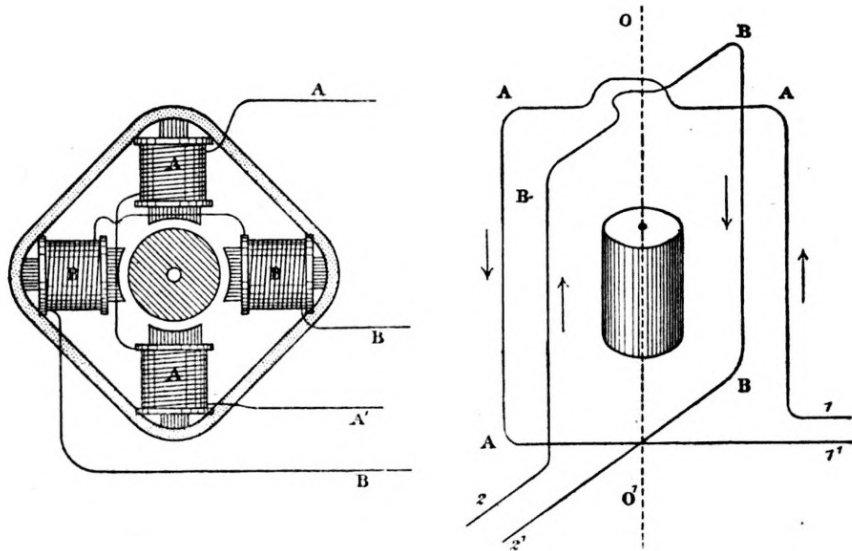
Elektrik enerjisi kullanımı uzun yıllar öncesine dayanır. Keşfinden bugüne kadar her geçen gün hayatımızda daha fazla yer kaplayan elektrik enerjisi, günlük yaşamımızın vazgeçilmez tüketim kalemlerindedir. Dünya genelinde tüketim artarak süregeldi. Bu talebi karşılayacak elektrik enerjisi üretimi için de çok sayıda kaynak ve teknoloji ihtiyacı doğmuştur. Tüketicinin bu denli artışı verimli elektrik enerjisi tüketimini de kıymetlendirmiştir. Günümüzde üretilen elektrik enerjisinin büyük kısmı elektrik motorları tarafından harcanmaktadır. Çünkü elektrik motorları çamaşır makinesi, buzdolabı gibi hane uygulamalarından; soğutma sistemleri, vinç uygulamaları, üretim tezgahları, elektrikli araçlar gibi sanayinin hemen her alanına kadar sıkça kullanılır. Bütün bu gelişmeler ışığında IEC, elektrik enerjisinin en çok kullanım alanlarından olan elektrik motorlarında verimlilik sınıfları yayınlamış ve regülasyon kararı almıştır. Üretim prosesindeki kolaylık, bakım ihtiyacının az olması gibi avantajları sayesinde asenkron motorlar gelişen teknolojiye rağmen geniş kullanım alanlarına sahiptir. Tek fazlı asenkron motorlar da; devridaim pompaları, soğutma fanları, kompresörler, vinç uygulamaları, çamaşır makineleri gibi hayatımızın birçok alanında karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla tek fazlı asenkron motorlar için de yayınlanan karara göre IE1 verim sınıfındaki motorların IE2 verim sınıfına yükseltilmesi gerekmektedir. Bunun için üretici firmalar bir yandan yüksek verimli tek fazlı asenkron motor tasarımları üzerine çalışırken bir yandan da düşük maliyetli üretim için çalışmaktadırlar.

## 1.1 Literatür Taraması

Elektrik motorları; tahrik gerektiren sistemlerde kullanılan ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Elektrik bilimi, malzeme bilimi ve teknoloji alanında yaşanan gelişmeler sayesinde bugün, çok geniş ürün yelpazesinde elektrik motorları üretilmektedir. Asenkron motorlar başka bir deyişle endüksiyon motorları da bu ürün yelpazesi içinde endüstriyel olarak en çok kullanılan elektrik motorudur. 1800'lü yıllarda birbirinden bağımsız çalışmalar

yapan birçok bilim adamı vardır. 1820’li yıllarda Orsted tarafından ortaya atılan elektromanyetizma teorisi, yine 1820’li yıllarda Andre-Marie Ampere tarafından keşfedilen Ampere Kanunu, 1831 yılında Michael Faraday tarafından keşfedilen Faraday Kanunu ile elektromekanik enerji dönüşümü ve elektrik makinelerinin temel ilkeleri oluşturulmuştur. Fakat bu yıllarda endüstride kullanılan bir asenkron motor üretimi henüz gerçekleştirilememiştir.

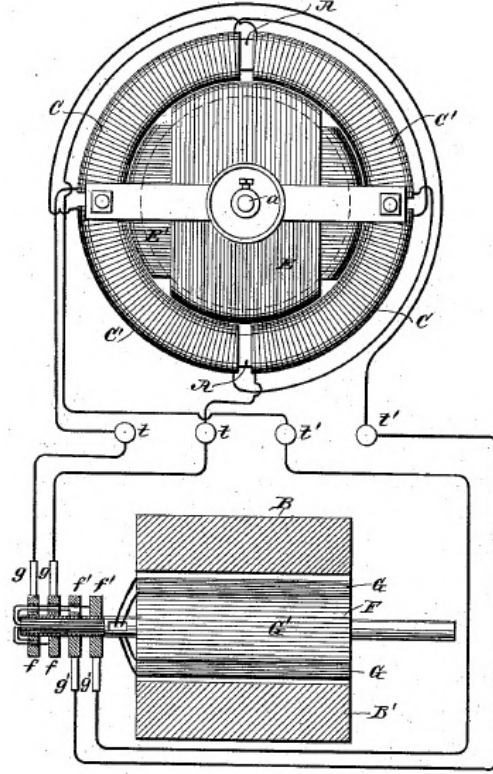
Birbirinden bağımsız çok sayıda çalışma yapıldığı için asenkron motorun ne zaman icat edildiğini tam olarak söylemek zordur. O dönemde Dobrovsky, Shallenberger, Bradley gibi bilim adamları yaptıkları çalışmalar ile endüksiyon motoru prensibine oldukça yakındır. Bununla birlikte günümüzde bilinen asenkron motor teorisinin ilk pratik deneyimleri arasında 1885 yılında Galileo Ferrari tarafından geliştirilen bir model vardır. Ferrari’nin geliştirdiği bu model Şekil 1.1’de görülmektedir. Ferrari çalışmasını ancak 1888’de prototiplemiştir. Ferrari bu prototipte Şekil 1’de görüldüğü gibi 2 adet bobin (A-A’ ve B-B’) kullanmıştır. Bu bobinleri birbirine dik olarak yerleştirmiş ve bobinlerin üzerinden 90°faz farkıyla aynı frekansta iki akım geçirmiştir. Bu sayede oluşan elektromanyetik kuvvetlerden faydalanmak için bobinlerin ortasında bakır silindir kullanmıştır. Bu bakır silindir elektromanyetik kuvvet sayesinde hareket ettirilmiştir [1]. İşte bu; günümüzde kullanılan asenkron motor teorisinin temeli ve ilk prototipidir.



Şekil 1.1 Galileo Ferrari’nin endüksiyon motor tasarımı [2]

1887 yılında Nikola Tesla yaptığı çalışma ile endüksiyon motorlarının prensibini göstermiştir. Şekil 1.2’de görülen çizim Tesla’nın patent aldığı tasarıma aittir [3]. 1888 yılının Mayıs ayında Elektromanyetik Motor tasarımı ile patent almıştır. O dönemde ABD’nin ünlü yatırımcılarından George Westinghouse, Tesla’nın bu

patentini şirketi adına satın almıştır [4]. Bu anlaşmadan sonra Nikola Tesla Westinghouse Elektrik şirketinde çalışmaya başlamıştır.



**Şekil 1.2** Nikola Tesla'nın ilk endüksiyon motor tasarımı [3]

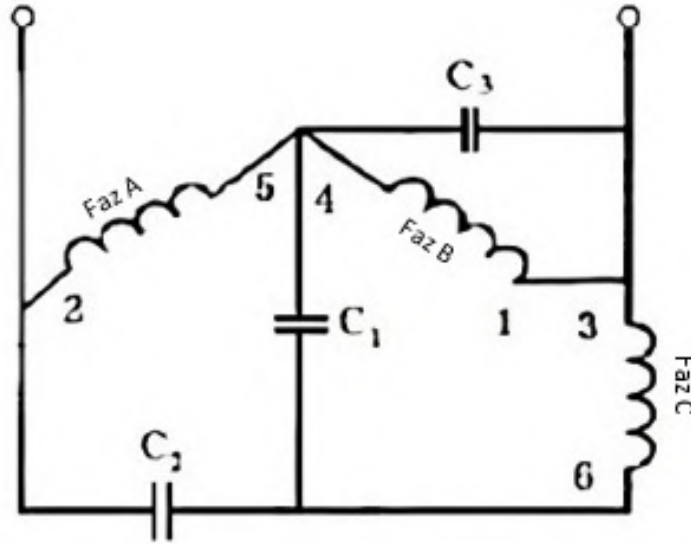
1890 yılından başlayarak, endüksiyon motorunu ticarileştirmek için çalışmalar yapılmıştır. O dönemde 125 ve 133 Hz'lik tek fazlı şebekeler mevcuttur. Bu sistem endüksiyon motoru için, özellikle çok fazlı endüksiyon motorları için uygun değildir. Dolayısıyla icat edilen ilk motor geliştirmeye muhtaç ve kullanımı pek mümkün olmayan motordur. Geliştirme çabaları sürerken Tesla'nın yardımcısı C.F. Scott dağıtılmış sargılı rotor yapısını keşfederken onun çalışmaları aslında endüksiyon motorunun daha düşük frekanslara ihtiyaç duyduğunu ortaya koyar niteliktedir. Dolayısıyla Westinghouse Elektrik şirketi, L.B. Stilwell'in de önerisi ile 60 Hz'lik sisteme geçme kararı almış ve 1891 yılında çalışmalar bu yönde yapılmıştır. Scott ve Tesla'nın geliştirdiği dağıtılmış sargılara sahip bu motor 1892 yılında test edilmiştir. Rotoru çok fazlı ve dağıtılmış sargılara sahiptir. Aslında bu, günümüzdeki rotoru sargılı (wound rotor) tip asenkron motora çok benzemektedir. Çok fazlı motorlar geliştirilirken aynı zamanda tek fazlı endüksiyon motorları için de çalışmalar yapılmıştır. 1888-1889 yıllarında tek fazlı şebekeler mevcutken, Tesla tarafından faz ayırma cihazları sayesinde çalıştırılan tek fazlı motorlar üretmek için çalışmalar yapılmıştır. Tesla'nın geliştirmiş olduğu bu tek fazlı endüksiyon motorunda iki farklı sargı bulunur ve motor belirli bir hıza ulaştıktan sonra bir faz açılarak, motor nominal hızda tek faz sargısı ile çalışmaya

devam eder. Bu motor günümüzdeki yardımcı sargılı (split-phase) tek fazlı asenkron motorun ilk örneğidir. 1890-94 yılları arasında madencilik çalışmaları için senkron motor üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu senkron motorlar kendiliğinden yol alma kabiliyetine sahip değildir. Bu dezavantajı aşmak için, senkron motorlara tek fazlı endüksiyon motorları ile yol verme yönemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntemde Tesla'nın 1888-89 yıllarında üzerine çalıştığı yardımcı fazlı motorlar kullanılmıştır. Westinghouse şirketi baş mühendislerinden B.G. Lamme bu tasarım üzerinde çalışırken rotorda sargı kullanmak yerine iletken halkalar ile birbirine lehimlenerek kısa devre edilen rotor barları kullanmıştır. Daha sonra; dönemin bir başka büyük şirketi General Elektrik tarafından itme endüksiyon motoru (Repulsion-inductin motor) adı verilen komütatörlü tek fazlı endüksiyon motoru geliştirilmiştir [5]. P. H. Trickey'in 1936'da yaptığı araştırmadan [6] anlıyoruz ki 1894 yılında tek fazlı asenkron motor için geliştirilen yeni yöntemde, sincap kafesli ve çıkık kutuplu bir motorun kutuplarına açılan oyuklara, kısa devre edilmiş sargı veya bobinler yerleştirilerek motorun bir harici kuvvet olmadan ve faz ayırma işlemine gerek kalmadan kendi kendine yol alması sağlanmıştır. Bu yöntem günümüzde hala kullanılan gölge kutuplu motorun ilk adımıdır. Günümüzde bir çok alanda karşımıza çıkan asenkron motorlar için kullanılan teknik, genellikle kondansatörlü tek fazlı asenkron motor tekniğidir. Kondansatörün asenkron motorda kullanılmasını net olarak tarihlemek çok zordur. Fakat 1935 yılında elektrolitik kapasitörler üzerine yazılan makalede, bu kondansatörlerin tek fazlı motorlarda kullanılmaya başlandığını görüyoruz [7]. Ayrıca Wayne Morrill 1929'da yayınladığı çalışmada [8] kondansatörlü motorların patentinin 30 yıl öncesinde Dr. Steinmetz ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya dayandığını ifade eder. Yani yaklaşık 1900'lü yılların başında kondansatörlü motorların geliştirildiğini söylemek mümkündür.

Sanayinin ve teknolojinin gelişim çağlarında, dönemin en büyük iki şirketi olan Westinghouse ve General Elektrik şirketleri arasında elektrik motoru ve alternatör üretimi alanında ciddi bir yarış söz konusudur. Sanayideki makineleşme arayışları içerisinde; üretim tezgahlarından değirmenlere, elektrik üretim santrallerine kadar bir çok alanda kullanımı merak konusu olmakla birlikte yayılan elektrik makineleri, bu iki şirket için ticari faaliyet alanı olmuştur. Dolayısıyla bu teknolojilerden senkron ve asenkron motor hem kullanıcılar hem de üreticiler için çağın teknoloji devrimlerinden birisidir. Fakat bütün bunlara rağmen tek fazlı endüksiyon motorları o dönemde üreticiler için daha geri planda kalmıştır. Tek fazlı motorların genellikle küçük güçlerde üretilmesi, verim ve yol alma momentlerinin düşük olması gibi bazı dezavantajları, ticari açıdan bu motorları gözden düşürse de devrin senkron motorlarına yol verme prosesinde kullanılması, küçük güç gerektiren bazı ev

işlerinde kullanılması gibi zaruri ihtiyaç alanlarının varlığı tek fazlı endüksiyon motorlarının devamlılığını sağlamıştır. Yüz yıldan fazla zamandır kullanılan tek fazlı asenkron motor ilk icat edildiği günden bugüne basit yapılarını korumaktadır. Yardımcı sargılı motor, kondansatörlü motor ve gölge kutuplu (oyuk kutuplu) motor olarak üretimleri devam edegelmiştir. Bu tasarımlar ihtiyaçları karşıladığı için uzun yıllar boyu yapısal değişikliğe gidilmemiştir. Fakat genişleyen uygulama sahası, kontrol yöntemleri ve kullanılan malzemelerdeki ilerlemeler her üründe olduğu gibi bu tez çalışmasına konu olan motorlarda da araştırma ve geliştirmelerin önünü açmıştır. Günümüzde elektrik makinelerinin etkin kullanımı için belirli karakteristik özellikler vardır. Bunlardan bazıları; yük altında yol alabilme, sıcaklık artışı, gürültü seviyesi ve en önemlisi verimdir. Son yıllarda önem kazanan verimli ve sürdürülebilir enerji kavramları söz konusu motorlarda verimlilik arayışı ile birlikte düşük maliyetli üretimi de gündeme getirmiştir. Bu bağlamda farklı malzeme kullanımı, farklı sargı tasarımları, yeni stator-rotor laminasyon tasarımları gibi yöntemler araştırılmıştır.

1992 yılında Otto J.M. Smith tarafından yeni bir bağlantı şekli önerilmiştir [9]. Bu bağlantı Şekil 1.3'te görülmektedir. Smith bu bağlantı şekli ile üç fazlı bir motorun nominal yük koşullarında tek fazlı kaynaktan beslenerek, tek fazlı bir asenkron motor gibi çalışmasını sağlamıştır.

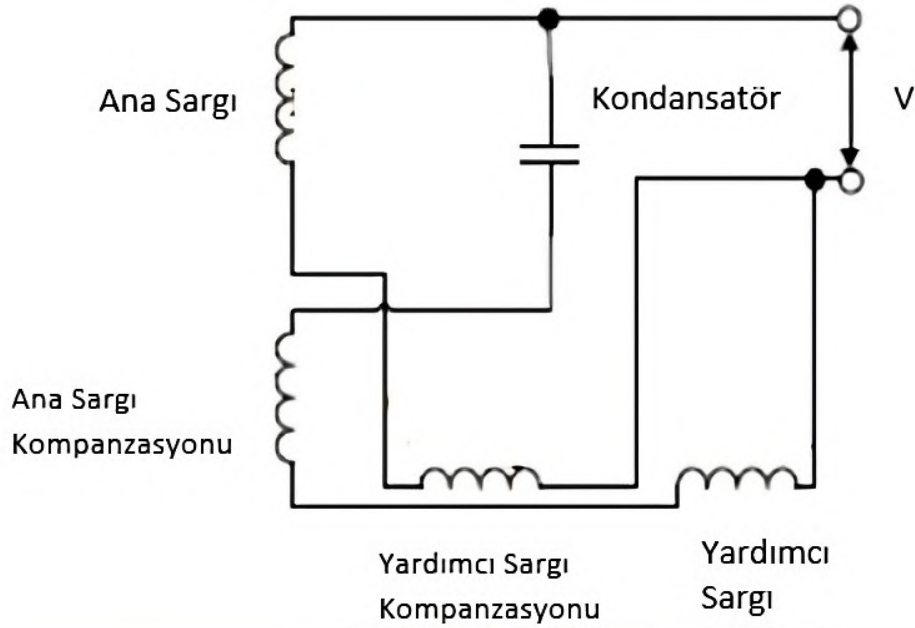


Şekil 1.3 Otto'nun önerdiği Smith bağlantı şekli [10]

Son yıllarda; enerji tüketiminde çevre temizliği, tüketim maliyetlerini azaltma ihtiyacı, güvenli ve sürdürülebilir endüstri gereksinimleri, enerji verimliliği konusunda yapılan çalışmalara hız kazandırmıştır. Bu çalışmalar içerisinde tek fazlı asenkron motorların yüksek verimde ve aynı zamanda mümkün olan en düşük

maliyette üretilmesi de yerini almıştır.

Hui Zhong ve arkadaşları 2008'de yaptıkları çalışma ile tek fazlı asenkron motorun verimini ve güç yoğunluğunu arttırmak için yeni bir sargı şekli önerdiler [11]. Bu tasarımın, verim ve çıkış momenti gibi bazı çıkış karakteristikleri üzerindeki etkisi sonlu elemanlar analizine göre incelenmiştir. Önerilen sargı Şekil 1.4'te görülmektedir.

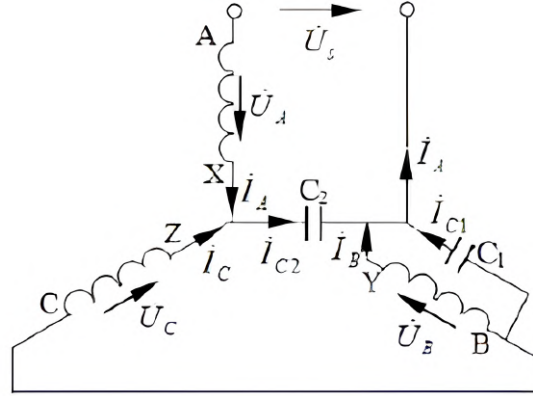


**Şekil 1.4** Hui Zhong ve arkadaşlarının önerdiği yeni tip stator sargısı [11]

Bu sargı yapısının amacı, tek fazlı asenkron motorda üretilen ve performansını düşüren negatif bölge manyetik alanı kompanse etmektir. Bu amaçla; ana sargıya seri yardımcı sargı kompanzasyonu, yardımcı sargıya seri ana sargı kompanzasyonu sarılır. Kompanzasyon sargıları negatif bölgede oluşan akımı ve dolayısıyla negatif bölge alanını ki şekil 2.3'te görülür, zayıflatır ve çıkış momenti ile verimi artırır. [11]

Yine Hui Zhong, Otto'nun çalışmasından etkilenerak yüksek verimli tek fazlı asenkron motor için araştırmalar yapmış, üç fazlı bir motorun bağlantı şeklini değiştirerek tek fazlı motor gibi çalıştırıp, eş değer tek fazlı ve üç fazlı motorla kıyaslamış, tezlerini deneysel olarak doğrulamıştır [10]. Zhong bu çalışmada; stator sargısında simetrik 3 faz sargı, rotorda ise sincap kafesli trifaze motor yapısı kullanmıştır. Fakat trifaze motor ile aralarında önemli bir fark vardır ki o da 3 sargının bağlantı şeklidir. Zhong ve arkadaşlarının önerdiği tasarımın bağlantısı Şekil 1.5'te görülmektedir. Bu motorun simetrik 3 sargısı olmasına rağmen bağlantı şekli sayesinde tek fazlı kaynaktan beslenir. Deneysel çalışmada standart trifaze

motorun bağlantı şekli revize edilmiş ve test sonucunda eşdeğer tek fazlı motora göre verimi yüzde 76'dan 80'e çıkmıştır [10].

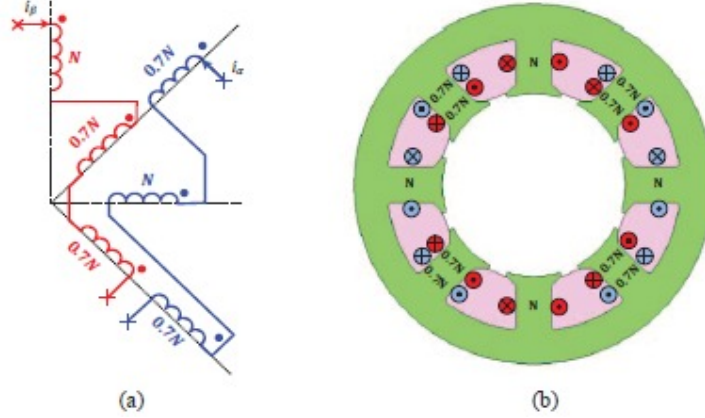


Şekil 1.5 Hui Zhong vd. ileri sürdüğü sargı yapısı [10]

Ayman Abdel-Khalik ve arkadaşları bir başka çalışmada segmentli (parçalı) stator yapısı ve yeni bir konsantre sargı kullanımı önermiştir. Önerilen tasarıma ait sargı; üçüncü ve beşinci harmonikleri yok etmek adına uzayda elektriki  $45^\circ$  kaydırılmış iki sargı temelinde dayanır. Söz konusu sargı düzeni Şekil 1.6'da görülmektedir. Segmentli stator yapısı günümüzde kullanılan bir üretim şekli olsa da tek fazlı asenkron motorlar özelinde pek tercih edilmez. Yazarlar bu çalışmada, önerilen yönteme ait avantajları ve dezavantajları ortaya koymuştur. Segmentli stator yapımı için tercih edilen yöntemlerden biri yumuşak manyetik kompozitler kullanılmasıdır ve bu manyetik malzemeler nüve kayıplarını azaltabilir. Bununla birlikte önerilen yöntemde sargı başı uzunluğunun geleneksel motorlara göre daha kısa olması, dolgu faktörünün daha yüksek olması ve dolayısıyla güç yoğunluğunun artması gibi avantajları da söz konusudur [12]. İlgili çalışmada çift kondansatörlü motor kullanılmıştır. Önerilen bu çalışmanın dezavantajı ise geleneksel sargıda oluşan MMK değerini yakalayabilmek için bu sargıda sarım (sipir) sayısını arttırmak gerekir ki bu da maliyeti olumsuz etkileyebilir. Yazarlar önerdikleri tekniğin yüksek frekanslı motor uygulamalarında umut vadedeceğini düşünüyor.

Mariana Iorgulescu tarafından stator sargılarında kullanılan malzeme üzerine bir araştırma yapılmıştır. Mariana'nın çalışmasında stator sargıları için bakır yerine alüminyum iletken denenmiştir [13]. Araştırmacının amacı performans değerlerini sabit tutarak düşük maliyetli motor üretimi için bir kapı aralamaktır. İlgili çalışmada motorun üretim maliyeti göz önüne alınmıştır. Burada verim ve nominal moment bakımından aynı özelliğe sahip fakat biri alüminyum biri bakır sargılı iki adet motor üretilmiş ve test sonuçları kıyaslanmıştır. Bu testlerde moment değerleri, sıcaklık artışları ve gürültü seviyeleri analiz edilmiştir. Sonuç olarak aynı mekanik

hız değerinde; akım ve kayıp güç gibi özellikler aynıken alüminyum sargılı motorun momentinin biraz daha yüksek, yine alüminyum kullanılan motorda gürültü seviyesinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Fakat alüminyum iletken bakır iletkenine göre nominal çalışma durumunda  $10^\circ$  daha fazla ısınmaktadır [13]. Bu sıcaklık artışı da kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunmuştur. Bu durumda alüminyum stator sargısı kullanılan motor hemen hemen aynı çıkış karakteristiğine sahip olmasına rağmen üretim maliyeti daha düşüktür.



**Şekil 1.6** Abdel-Khalik vd. (a) sargı bağlantısı ve (b) sarım şeması [12]

Dale Peters ve arkadaşları yaptıkları çalışma ile bir asenkron motorun sincap kafesli rotorunda alüminyum iletken yerine bakır iletken kullanımının avantaj ve dezavantajlarını incelemiş [14], Caiyong Ye ve arkadaşları ise bu çalışmanın benzerini tek fazlı asenkron motor için yapmıştır [15]. Caiyong Ye ve diğerlerinin çalışmasından görülüyor ki, bakır rotor kullanımının iletkenlikten dolayı yüksek verim, düşük sıcaklık, daha az titreşim ve daha az gürültü gibi bir çok avantajı mevcut. Dezavantajı ise bakır dökümün alüminyum döküme göre yüksek sıcaklık gereksinimi gibi nedenlerle daha zor bir proses olmasıdır [14]. Bu çalışmalarda bakır rotorlu motor üretiminin kolaylaştırılması ve olumlu sonuçları üzerine araştırmalar yapılmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez kapsamında tüketici tarafından kullanılan tek fazlı asenkron motor ele alınarak, IE1 verim sınıfından IE2 verim sınıfına yükseltilmesi ve yüksek yol alma momentinin korunması hedeflenmiştir. Tasarımlar; motorun seri üretimi ve ticari amaçla kullanımı göz önüne alınarak maliyeti arttırılmadan çalışılmıştır. Mevcut bulunan ve genellikle fan uygulamaları için kullanılan; 0,37 kW, 4 kutuplu bir motor baz alınmıştır. Yeni kalıp maliyetlerinden, mevcuttan daha ağır bir stator – rotor paketi üretiminden ve zaman kaybından kurtulmak için mevcut

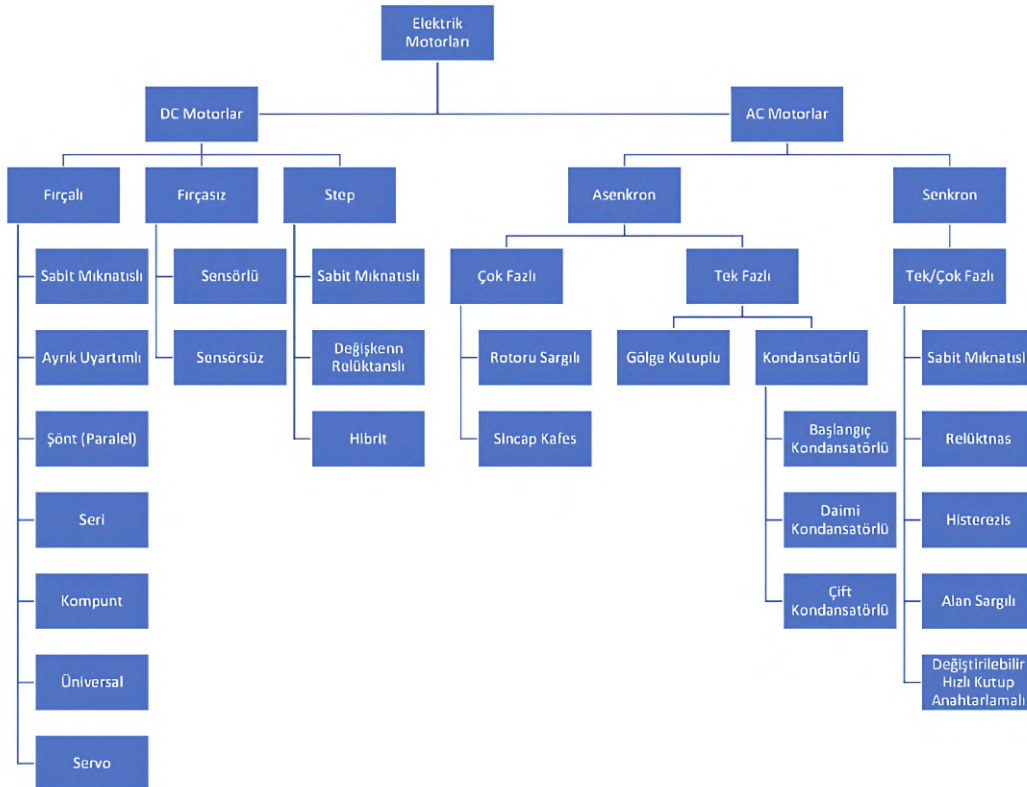
stator – rotor yapıları kullanılmıştır. Çalışmalar daimi kondansatörlü motor ile yapılmıştır. Performansı iyileştirirken maliyeti düşük tutabilmek için sargı ve kondansatör optimizasyonuna yönelik çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmaya en yakın sonuçları elde edebilmek için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile tasarım programı kullanılmıştır. İlk olarak analitik hesaplamalar ile sarım sayısı ve kondansatör değer aralığı belirlenmiştir. Bu aralıklarda Rmxprt ile analitik model oluşturularak parametrik atamalar yapılmış, her bir değer için analitik hesaplamalar program aracılığı ile hızlandırılmıştır. Bu aralıkta, istenen çıkış performansına en yakın değerler saptanmıştır. Daha sonra saptanan bu sarım ve kondansatör değerleri için SEY marifetiyle verim, nominal moment, kalkış momenti analizleri yapılmış ve mevcut IE1 motora göre bakır ağırlığı yüzdesel olarak kıyaslanmıştır. Optimum tasarım parametreleri seçilerek prototip üretimi yapılmıştır.

### **1.3 Hipotez**

Gelişen dünyanın teknolojisinde; enerji üretimi ve tüketimi noktasında enerji dönüşümlerinin dolayısıyla elektrik makinelerinin önemi her geçen gün artmaktadır. Aynı zamanda çevre koruma etkinlikleri ve ekonomik şartlar da enerjinin temiz üretimi ve verimli tüketimini mecburi hale getirmektedir. Bu sebepler elektrik motorlarında yüksek verim arayışı ile birlikte düşük maliyet ihtiyacını son yıllarda araştırma ve geliştirme çalışmalarının gözdesi haline getirmiştir. Bu kapsamda yapılan tez çalışmasında; hayatımızı hemen her alanda kolaylaştıran tek fazlı elektrik motorlarının yüksek performans ve düşük maliyet ile üretimi araştırılmıştır. Yapılan tasarım sonuçları deneysel olarak doğrulanmış, prototip test sonuçları ile SEY kullanılarak yapılan tasarım çıktılarının birbiri ile örtüştüğü görülmüştür.

## 2.1 Giriş

Elektrik makineleri; hayatımızı hemen her alanda kolaylaştıran, gelişen teknoloji ile birlikte kendi sürdürülebilirliğini devam ettiren, enerji üretimi ve tüketimi noktasında kritik kullanım alanları olan, enerji dönüşümü sağlayan makinelerdir. Bu makinelerden elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik motorlarının çalışma prensipleri baz alınarak oluşturulan sınıflandırma Şekil 2.1’de görülmektedir.

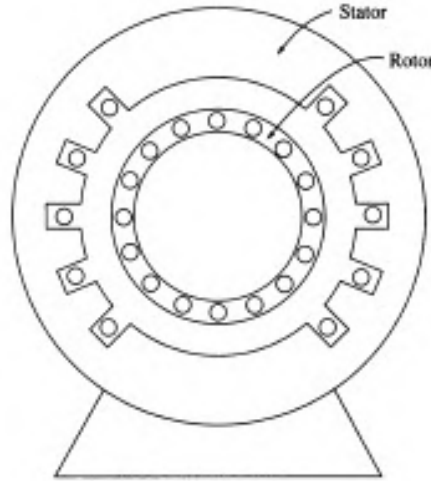


Şekil 2.1 Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması

Tek fazlı asenkron motorun icadı ve seri üretimi 1880’li yılların sonuna dayanır. O dönemde kullanılan sistem 125 ve 133 Hz frekansa ve tek faz

alternatif akıma dayanan güç sistemi [5]. Bu sistem hem üç fazlı hem de tek fazlı asenkron motorların çalışmasına uygun değildi. Üretimi yapılan ilk asenkron motorların bu denli yüksek frekanslarda çalışamayacağı ve daha düşük frekanslara ihtiyaç duyduğu anlaşıldığında 25 ve 60 Hz sistemlere geçiş yapılmıştı. Dolayısıyla asenkron motorlar 1890'lı yıllardan günümüze kadar ilerleme kaydederek süregelmiştir.

Tek fazlı asenkron motorlar; kompresörler, ısı sirkülasyon pompaları, elektrikli el aletleri, vantilatörler, çamaşır makineleri, dikiş makineleri gibi endüstriyel, tarımsal ve konut uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır [16]. Üretimi, özellikle son teknoloji imkânları ile gayet sade olsa da teorik açıdan incelenmeleri oldukça zordur. Bu nedenle istenilen performansta bir motoru seri üretime alabilmek için bir çok prototip yapmak gerekebilir. Bu motorlar yapısal olarak üç fazlı asenkron motorlara benzer. Aynı stator ve rotor laminasyonları kullanılabilir ve üç fazlı motorlarda olduğu gibi sincap kafesli rotora sahiptir. Üç fazlı motor ile arasındaki temel yapısal farklılık sargı düzenlerindedir. Üç fazlı asenkron motorda üç adet ve simetrik sargı şeması kullanılırken; tek fazlı asenkron motorda asimetrik bir sargı şeması kullanılır. Dolayısıyla üretim prosesleri her ne kadar üç fazlı motorlarla aynı olsa da karakteristik bakımdan farklılıklar vardır [4]. Şekil 2.2'de sincap kafes rotorlu tek fazlı asenkron motor yapısı görülmektedir.



**Şekil 2.2** Sincap kafes rotorlu tek fazlı asenkron motorun yapısı [17]

Bu motorların düşük kalkış momenti ve düşük verim gibi dezavantajları vardır. Özellikle ileride anlatılacak olan yardımcı sargılı motorlarda tek faz olması sebebiyle üç fazlı motorların aksine, dairesel dönen manyetik alanlar doğal yollardan oluşmaz [18]. Makinenin stator akısı hep aynı yönde olduğu için stator manyetik alanı da aynı yöndedir. Bu sebeple stator manyetik alanı ve rotor barları arasında değişken bir kuvvet oluşmaz. Endüksiyon motorlarının çalışma

prensibine göre rotor üzerinde zamanla değişen manyetik akı  $\frac{d\varphi}{dt}$  sayesinde bir gerilim endüklenir ve bu gerilim kısa devre edilen rotor iletkenleri üzerinden akım akmasını sağlar. Stator alanı zamana göre sinüzoidal değiştikçe rotor ve stator arasında da itme-çekme kuvveti meydana gelir ve milli rotor dönerek mile akuple edilen yüke mekanik güç aktarır. Ancak, yukarıda da bahsedildiği gibi tek fazlı asenkron motorun statorunda akı değişimi zamana göre sabit kaldığı için manyetik alan da sabit kalır ve rotor üzerinde gerilim endüklenemez ve buna bağlı olarak akım oluşmaz, dolayısıyla moment üretimi gerçekleşemez [17]. Motorun çalışma periyotları içerisindeki moment üretimini çift döner alan teorisi ve çapraz alan teorisi olmak üzere iki yaklaşım ile açıklamak mümkündür. Bu teoriler alt başlıkta incelenecektir. İşte bu durum esasında tek fazlı asenkron motorun en önemli dezavantajıdır ve sorunun çözümü için birden fazla yöntem uygulanır. Bu engellerin aşılması için şu üretim yöntemleri uygulanabilir;

- Yardımcı sargılı motor
- Kondansatör destekli yardımcı sargılı motor
- Daimi kondansatörlü motor
- Kalkış – Daimi kondansatörlü motor
- Gölge kutuplu (yarık kutuplu) motor

Yukarıda sıralanan yöntemler motorun yol alma (kalkış) performansını oldukça iyileştirmekle birlikte verim, ısınma, gürültü seviyesi gibi birçok çıkış karakteristiğini de etkiler. Bu sebeple tasarım ve üretim aşamalarında bu karakteristikler dikkate alınmalıdır.

## 2.2 Çift Döner Alan Teorisi

Statorda meydana gelen manyetik alanın akı yoğunluğunu eşitlik 2.1 ile ifade etmek mümkündür.

$$B_s(t) = B_{max} \cos \omega t \quad (2.1)$$

Bu teoride; sabit genlikte ve aynı zamanda titreşimli bir manyetik alan, eşit büyüklükte fakat zıt yönde olan 2 adet dönen manyetik alana (ileri ve geri manyetik alan) ayrılabilir ki bunu eşitlik 2.2 ve 2.3'te görebiliriz [17]. Saat yönünde (SY) dönen manyetik alan eşitlik 2.2'de ve saat yönünün tersine (SYT) dönen manyetik alan eşitlik 2.3'te verildiği gibidir.

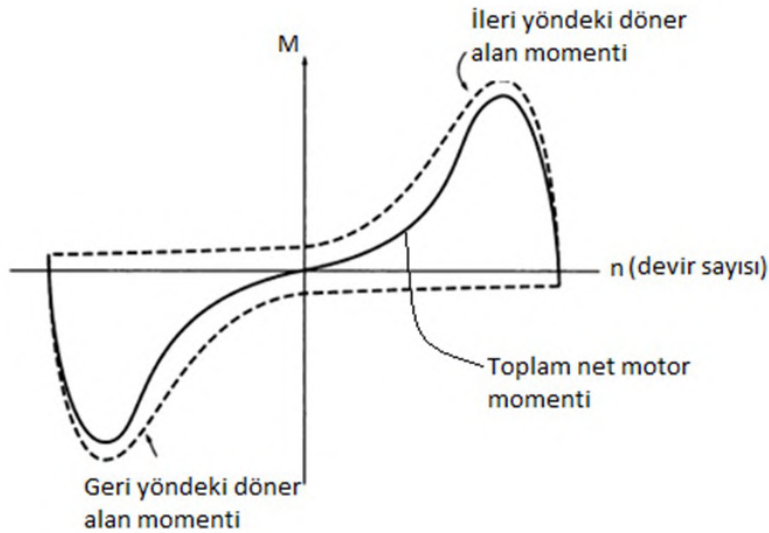
$$B_{SY}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max}\cos\omega t\right) - \left(\frac{1}{2}B_{max}\sin\omega t\right) \quad (2.2)$$

$$B_{SYT}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max}\cos\omega t\right) + \left(\frac{1}{2}B_{max}\sin\omega t\right) \quad (2.3)$$

Zıt yöndeki bu iki alanın her biri rotor iletkenleri üzerinde yine zıt yönde etki meydana getirecek şekilde momentler endükler [4]. Çalışma periyodunun her noktasında motorun net momentini bu ileri ve geri yöndeki iki momentin toplamı kadar olur. Yani motor manyetik alanı eşitlik 2.4'te verildiği gibi olur.

$$B_s(t) = B_{SY}(t) + B_{SYT}(t) \quad (2.4)$$

Dolayısıyla tek fazlı asenkron motorun moment-hız karakteristiği Şekil 2.3'teki gibi olur.



**Şekil 2.3** İleri ve geri döner manyetik alanlar hesaba katılarak oluşturulan, tek fazlı asenkron motorun hız moment karakteristiği [19]

Moment-hız eğrisi incelenecek olursa görülür ki 0 rpm değerinde yani motor duruyorken herhangi bir moment üretimi söz konusu değildir. Bu da demek oluyor

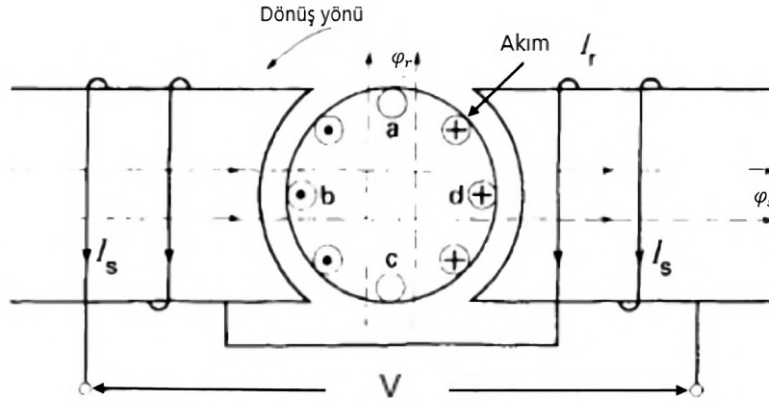
ki motor bu şekilde kendi kendine yol alamaz. Fakat rotora bir dış kuvvet vasıtasıyla bir yönde ilk hareket verilirse; bu dönüş yönü ile aynı istikamette dönen alan, tersi istikamette dönen alana baskın gelir ve motor ilk hareket yönünde çalışmaya devam eder [19]. Tek fazlı asenkron motorlarda; üç fazlı motorlara göre moment dalgalanması daha fazladır. Bunun sebebi; ileri ve geri manyetik alanlardan dolayı motorun şebekeden çektiği ani güç ve ani momentin zamana göre değişiklik göstermesidir [4]. Bu moment dalgalanmasından mekanik titreşimler ve üç fazlı motora göre gürültülü çalışmalar ortaya çıkar. Tek fazlı devrede ani (anlık) güç darbeler halinde geldiğinden, bu titreşimleri motorun tasarım sürecinde tamamen yok etmek oldukça zordur [17]. Bununla birlikte, asimetrik olan stator sargılarının bobin adımı ve sarım sayıları optimum tasarıma ne kadar yaklaştırılırsa, manyetik alan eğrileri de sinüs formuna o kadar yakın olacağı için söz konusu titreşimler, şebekeden kaynaklı olarak tamamen yok edilemese de gürültü seviyesi ve vibrasyon değerlerini düşürebilir.

### 2.3 Çapraz Alan Teorisi

Çapraz alan teorisi ya da başka bir ifadeyle hız gerilimi teorisi; rotorun dış kuvvet vasıtasıyla hareket ettiği durumda, rotor iletkenlerinde oluşabilecek gerilim ve akım yardımıyla, tek fazlı asenkron motorun çalışmasını açıklamaya odaklanır [17]. Motor, tek fazlı alternatif gerilim kaynağı ile beslendiğinde statorunda manyetik alan meydana gelir. Bu manyetik alan zaman içinde sinüzoidal olarak değişir ve bu değişen alan içinde sabit duran rotor iletkenleri üzerinde Faraday endüksiyon prensibi gereği gerilim endüklenir [4]. Rotorda endüklenen bu gerilim halkalarla kısa devre edilmiş iletkenler üzerinden akım akıtır. Akan akım Lenz kanunu gereği kendini oluşturan stator alanını yok etmek üzere ters yönde manyetik alan meydana getirir. Eşit büyüklükte fakat zıt yönde oluşan stator ve rotor manyetik alanlarından dolayı net moment üretimi 0 Nm olur. Çift döner alan teorisinde statordaki manyetik alan ileri ve geri olmak üzere ikiye ayrılmış ve rotor üzerinde de birbirini yok eden ters yönlü iki momente sebep olduğu açıklanmıştı. Çapraz alan teorisinde ise açıklanmak istenen durum aynı olsa da farklı bir bakış açısı kullanılmıştır. Bu teoride de, yukarıda anlatıldığı gibi net moment 0 olduğu için rotor durağan vaziyetini korur. Rotoru bir dış kuvvet yardımıyla bir yönde hareket ettirildiğini düşünelim. Rotor dönmeye başladığı anda stator akısını yani statorun manyetik alanını kestiği yerlerde rotor iletkenleri üzerinde bir hız gerilimi endüklenir [20]. Rotordaki bu hız gerilimi, rotorun iletkenleri üzerinden akım akıtır. Bu akım da rotor manyetik alanı ( $B_r$ ) oluşturur.

Rotordaki gerilim  $e = \vec{B}_s \cdot (\vec{l} \times \vec{v})$  eşitliğinden dolayı stator manyetik alanı ile aynı

fazdadır [4]. Bununla birlikte rotorun yüksek reaktansı nedeniyle akım gerilimden  $90^\circ$  lik faz farkı ile geriden gelir [17]. Rotor akımı ile oluşan rotor alanı ile rotor gerilimi ve dolayısıyla stator alanı arasında  $90^\circ$  faz farkı meydana gelir. Stator ve rotor manyetik alanları arasındaki bu fark, rotorun döndürüldüğü ilk hareket yönünde olmak üzere bir kuvvet meydana getirerek, artık dış kuvvet etkeni olmasa dahi motorun çalışmaya devam etmesini sağlar. Günümüzde tek fazlı asenkron motorların çalışması için dışarıdan bir kuvvet ihtiyacını ortadan kaldırmak zaruridir. Motorun kendi kendine yol alması istenir. İşte bunun için geliştirilen farklı yöntemler yukarıda sıralanmış ve alt başlıklar halinde incelenecektir. Her yöntemin mantığı, birbirine eşit fakat zıt yönde olan iki manyetik alandan birini diğerinden daha güçlü hale getirip motoru herhangi bir yönde çalıştırmaktır.

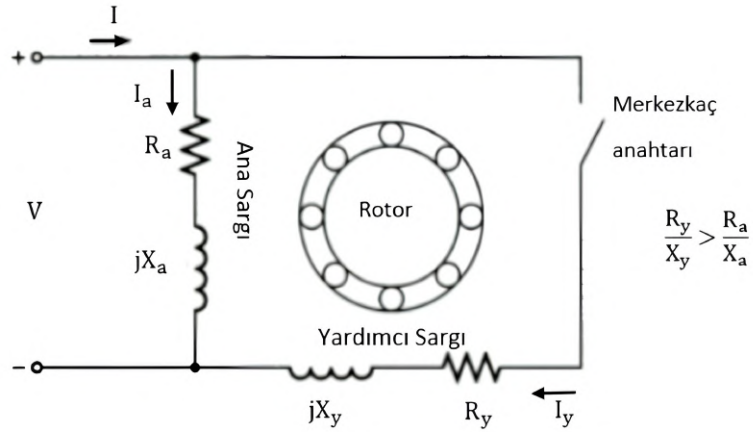


**Şekil 2.4** Rotorun döndürülmesinden dolayı rotorda endüklenen akım ( $I_r$ ) ve bu akımın oluşturduğu stator akısına dik olan rotor akısı ( $\varphi_r$ )  
[[20]]

## 2.4 Yardımcı Sargılı Motor

Yardımcı sargılı tek fazlı asenkron motorda; çalışma periyodunda daima devrede bulunan ana sargı ve motorun kendi kendine yol almasını destekleyen bir yardımcı sargı bulunur. Şekil 2.5'te görülmektedir.

Ana sargı bakır kaybını azaltmak için nispeten kalın telden yapılır. Ayrıca sarım (sipir) sayısı da yardımcı sargıya göre fazla yapılır. Sonuç olarak kilitli rotor koşulları altında; sarım fazla olduğu için endüktif reaktans yüksek, bakır iletken kalın olduğu direnci düşük olur. Dolayısıyla kilitli rotor akımı, uygulanan gerilimin gerisinde kalır. Yardımcı sargı ise tam tersi şekilde sarılır. Dolayısıyla direnci yüksek, endüktansı küçük olur. Kilitli rotor durumunda, omiklikten kaynaklı, akım gerilime yakın olur. En nihayetinde kilitli rotor anında ana sargı ve yardımcı sargı arasında faz farkı oluşur ve bu da kalkış momenti sağlar [20].



**Şekil 2.5** Yardımcı Sargılı Motor [17]

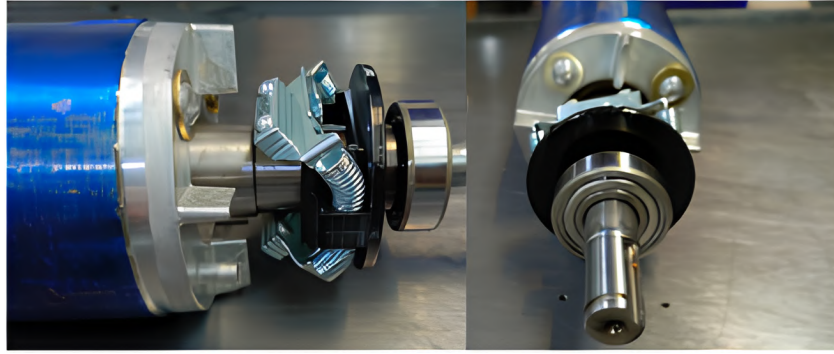
Ana sargının daima devrede olduğunu söylemiştik. Motor çalıştıktan sonra; yol almayı destekleyen yardımcı sargı, senkron hızın yaklaşık yüzde 75 değerinde, mil üzerine monte edilmiş bir santrifüj anahtar yardımıyla devreden çıkarılır [21]. Bu durumda yaklaşık hız-moment eğrisi Şekil 2.6’da görüldüğü gibidir.



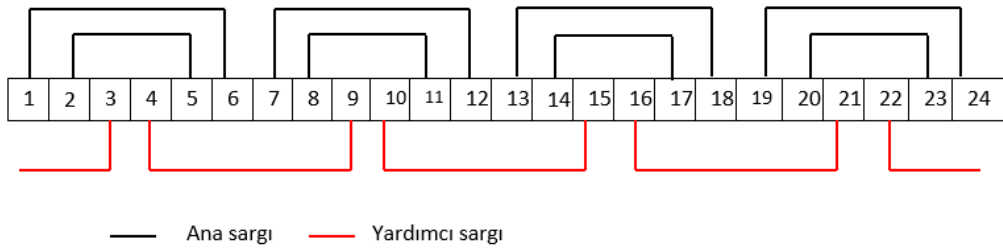
**Şekil 2.6** Yardımcı Sargılı Tek Fazlı asenkron motorda net hız-moment eğrisi

Burada dikkat çeken bir detay ise şudur; yardımcı sargı iletkeninin ince olması akım yoğunluğunun ve ısınmanın artmasına neden olabilir fakat bu sargının yalnızca başlatma periyodunda devrede olması sebebiyle izin verilebilir bir durumdur [22]. Ayrıca yardımcı sargının devreden çıkmasını sağlayan anahtarın görseli de Şekil 2.7’de verilmiştir.

Tek fazlı asenkron motorda genellikle tek katman ve yastık sargı (eşit adımlı olmayan sargı) kullanılır. Bu sargı yapılırken; teorideki stator oluk sayısının  $2/3$ ’üne ana sargı, kalan  $1/3$ ’üne yardımcı sargı bobinleri yerleştirilir [4]. Söz konusu bu sarım şeması 4 kutup 24 oluklu bir motor baz alınarak Şekil 2.8’de verilmiştir.



**Şekil 2.7** Motor, senkron hızın yaklaşık yüzde 75 değerine ulaştığında yardımcı sargıyı devreden çıkaran santrifüj anahtarı



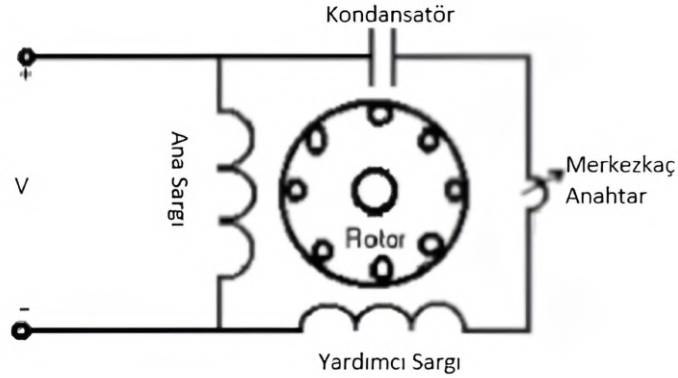
**Şekil 2.8** 24 stator oluklu, 4 kutuplu yardımcı sargılı motorlarda genellikle kullanılan tek katman yastık sargı şema örneği

Fakat, bu tez kapsamında kullanılan mevcut laminasyonda bu sargıdan dolayı kalkış momenti nispeten düşüktür. Sargı çift katmanlı yapıldığında kalkış oranı artacaktır ki tasarımın anlatıldığı bölümde bu konu açıklanacaktır. Özetle; yardımcı sargılı tek fazlı asenkron motorda ana sargı motorun çalışma şartlarını karşılayacak şekilde, yardımcı sargı ise yalnızca kalkış anında ana sargı ile birlikte çalışarak aşırı kalkış akımı olmadan ancak yeterli momenti üretmek üzere tasarlanır [22].

## 2.5 Kondansatörlü – Yardımcı Sargılı Motor

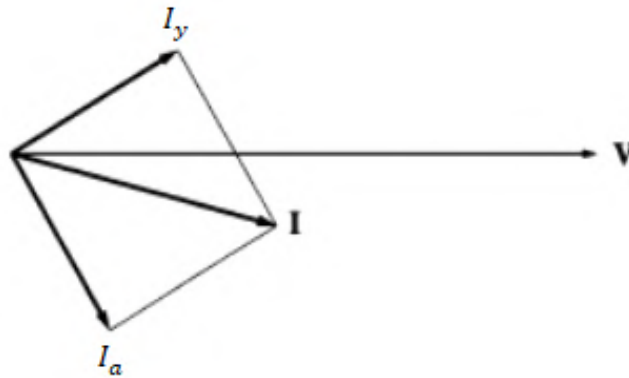
Kondansatörler, kapasite değerine ve devreye bağlantısına bağlı olarak motorun kalkış performansını, nominal yükte çalışma performansını veya her ikisini birden iyileştirmek için tek fazlı asenkron motorlarda kullanılabilir [21]. Tek fazlı motorların birçok uygulama alanı olduğundan bahsetmiştik. Bazı uygulamalar için yardımcı sargılı (ayrık fazlı) motorun ürettiği kalkış momenti, motorun miline akuple edilen yükü kaldırmak için yetersiz kalabilir. Örneğin; yük altında çalışması gereken kompresörler, pompalar, klimalar, yine yük altında kalkış yapması gereken bazı vinçler bu tür uygulamalardandır [17]. Böyle durumlarda, kalkış momentini arttırmak için yardımcı sargıya seri olacak şekilde bir kondansatör bağlanır. Kondansatör destekli olan bu motorlar da aslında yardımcı fazlı motordur [4]. İlgili

motorun şeması Şekil 2.9’da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.9 Kondansatörlü – Yardımcı sargılı motor şeması

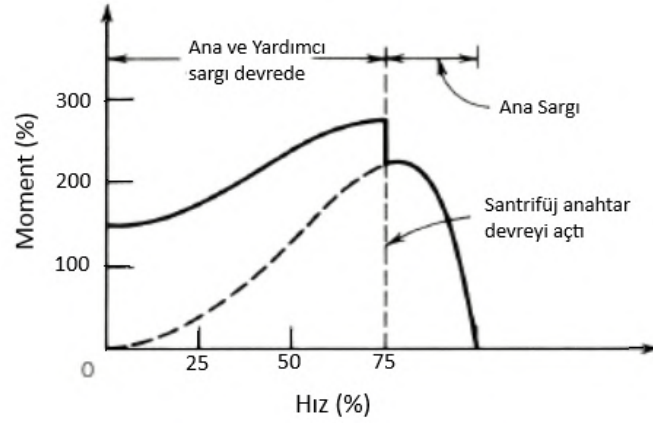
Bu kondansatörün vazifesi yardımcı sargı akımı ( $I_y$ ) ile ana sargı akımı ( $I_a$ ) arasında bir faz farkı meydana getirmektir. Kondansatör yardımcı sargıya seri bağlı olduğu için yardımcı sargı akımını kendi üstüne alırken, kapasitif özelliğinden dolayı endüktif yük olan ana sargı akımına göre yardımcı sargı akımını ileri taşımış olur ve bu şekilde aralarında faz farkını oluşturur. Kapasite değeri motor tasarımına uygun şekilde tercih edilerek aradaki faz farkını  $90^\circ$  yapmak mümkündür. Bununla birlikte kalkış akımı ve kalkış momenti için en uygun kapasite değerinin, ana ve yardımcı sargı akımları arasındaki faz farkını  $90^\circ$  den biraz daha küçük yapan değerler olduğunu söyleyebiliriz [4]. İki akım arasında oluşan faz farkı şekil 2.10’da görülmektedir.



Şekil 2.10 Kondansatörlü – Yardımcı sargılı asenkron motorda ana sargı ve yardımcı sargı akımı arasındaki faz farkı

Yardımcı sargılı motorda yol alma periyodundan sonra santrifüj anahtar yardımıyla yardımcı sargının devreden çıktığını belirtmiştik. Bu yöntemde de yardımcı sargıya seri bağlanan kondansatör, motorun yol alma süresi tamamlandıktan sonra santrifüj anahtar yardımıyla yardımcı sargı ile birlikte devreden çıkar ve motor ana sargıyla

nominal çalışmasına devam eder [23]. Bu tip motorlarda elektrolitik kondansatörler kullanılabilir [7]. Burada şunu da eklemek gerekir ki; kondansatör ve yardımcı sargıyı devreden ayırmak için mekanik yöntem olarak motor miline Şekil 2.7'deki gibi santrifüj anahtar bağlanırken, bazı durumlarda klemens kutusuna monte edilen elektronik röleler sayesinde de bu işlem gerçekleştirilebilir. 2.11'de bu motorun hız-moment karakteristiği görülmektedir.



**Şekil 2.11** Kondansatörlü yardımcı sargılı motorun hız – moment karakteristiği [22]

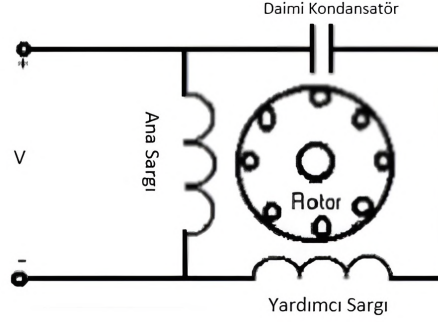
Burada kalkış momentinin ( $M_k$ ) nominal momente ( $M_n$ ) oranı ( $M_k/M_n$ ) 1'in üzerindedir. Bunun sebebi ise yüksek kapasiteli kondansatörlerin tercih edilmesidir.

Bu tip motorların maliyeti, kondansatör maliyetinden dolayı yardımcı sargılı motora göre fazla olsa da yukarıda örnekleri verilen bazı uygulamalar için zaruri yüksek kalkış moment oranı, bu motoru kullanmayı mecburi kılar.

### 2.5.1 Daimi Kondansatörlü Motor

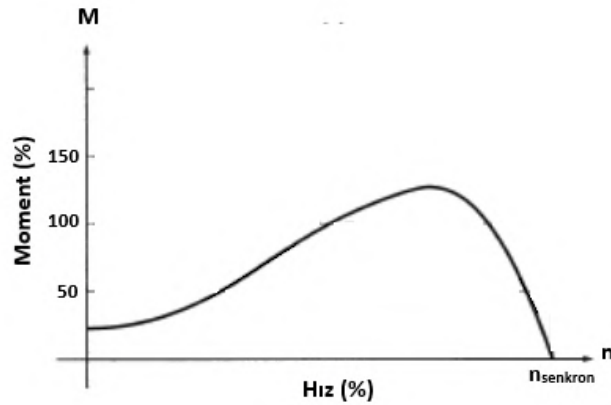
Daimi kondansatörlü motorlarda da yine ana ve yardımcı sargı akımları arasında faz farkı oluşturmak için kondansatör kullanılır. Fakat buradaki fark; kondansatörle birlikte yardımcı sargının da daima devrede kalması ve kapasite değerinin daha düşük seçilmesidir. Bu durum motor yapısını sade bir hale getirir, aynı zamanda üretim maliyetini de diğer yardımcı fazlı motorlara göre düşürür, çünkü santrifüj anahtarına gerek kalmaz [22]. Her ne kadar ucuz olsa da kapasitenin ve sargının daima çalışması kendi içinde maliyet farkı oluşturacaktır. Çünkü; yardımcı sargıyı yalnızca kalkış anında yani kısa süreli kullandığımız motorlarda iletkenleri ince telden yaparken, sürekli çalışma durumunda motorun fazla ısınmasının önüne geçmek için daha kalın iletkenler kullanılacaktır ki bu da maliyeti arttıran bir unsur olabilir [4]. İletkenlerin kalın yapılmasının sebebi ise akım yoğunluğunu

dolayısıyla da ısınmayı düşürmektir. Şekil 2.12’de daimi kondansatörlü motorun yapısı görülmektedir.



**Şekil 2.12** Daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun yapısı [21]

Motor tek fazlı alternatif kaynaktan beslenmesine rağmen, iki sargının ve kondansatörün de devrede olması hasebiyle 2 fazlı olarak çalışacak ve buna bağlı olarak güç faktörü ve moment dalgalanması bu yöntemle iyileştirilebilecektir [20]. Çift stator frekanslı moment titreşimleri de ortadan kaldırılır ve kondansatör, tek fazlı hattan gelen güç girişindeki titreşimleri yumuşatmak için enerji depolama görevi görür [21]. Böylece motor önceki bölümlerde anlatılan motorlara göre daha sessiz çalışacaktır. Kondansatör bölüm 2.2’de anlatılan yöntemle göre daha düşük kapasitelidir [22]. Şekil 2.13’de bu motorun hız – moment karakteristiği verilmiştir.



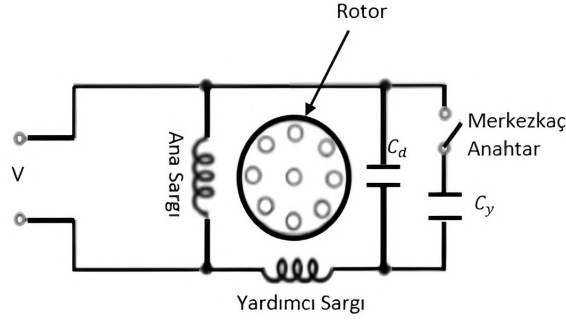
**Şekil 2.13** Daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun hız – moment karakteristiği [17]

Buradaki kapasite değeri hem kalkış hem de nominal çalışma durumunda motorun performansına etki edecek [21], bu sebeple nominal yük koşullarında ana ve yardımcı sargı akımlarını dengeleyecek şekilde seçilmeli [17]. Dolayısıyla Şekil 2.11 ve Şekil 2.13 birlikte değerlendirildiğinde görülür ki kalkış momenti daha düşük olacaktır [22, 24]. Bu motorlar basit yapıya sahip olmasına rağmen eliptik döner manyetik alandan dolayı matematiksel modellemesi daha zordur [25].

Daimi kondansatörlü motorlar özellikle fan, klima sistemleri, pompa gibi bazı uygulamalarda kullanılabilir.

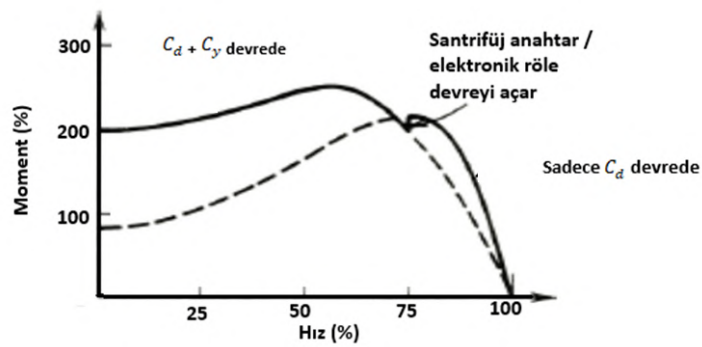
### 2.5.2 Çift Kondansatörlü Motor

Çift kondansatörlü motorlar, birbirine paralel ve ikisi birden yardımcı sargıya seri bağlı olan 2 adet kondansatörün kullanıldığı motorlardır [4, 23]. Bu tip bir motorun şeması şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14 Çift kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun yapısı [21]

Daimi kondansatör ( $C_d$ ) ve yardımcı sargı sürekli çalışmada devrede kalırken yol verme kondansatörü ( $C_y$ ) senkron hızın yüzde 75-80 hızına eriştiğinde santrifüj anahtar veya elektronik röle vasıtasıyla devreden çıkar. Bu tür bir tasarım ile motor yüksek kalkış momenti üretmekle birlikte nominal çalışma koşullarında optimum verim elde edecek şekilde tasarlanabilir [23]. Çift kondansatörlü motorun hız – moment karakteristiği şekil 2.15'te verilmiştir



Şekil 2.15 Çift kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun hız – moment karakteristiği [22]

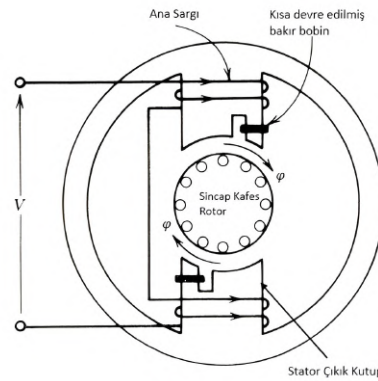
Daimi kondansatöre paralel bağlanan ve kapasite değeri çok daha büyük olan yol verme kondansatörü sayesinde, nominal momentin yaklaşık iki katı kalkış momenti elde edilebilir. Tasarım yapılırken dikkat edilmesi gereken husus kondansatörlerin maruz kalacağı gerilim ve kalkış anında özellikle yardımcı sargı üzerinden akacak

olan akım değeridir. Seçilen kondansatörün gerilime dayanabilmesi ve stator sargılarının da kalkış anında çekecekleri yüksek akıma dayanabilmeleri gerekir.

Tek fazlı asenkron motorlarda verim ve kalkış moment oranı kadar önemli olan diğer hususlar ise motorun ömrünü belirlemede kritik bir parametre olan ısınma ve gürültü ile titreşim seviyesi üzerindeki rolü nedeniyle moment dalgalanmasıdır. Kondansatör seçiminin her iki husus üzerinde etkisi vardır. Isınmayı yani sargılardaki sıcaklık artışını düşük tutmak için akım yoğunlukları 4 ile 7  $A/mm^2$  olacak şekilde tasarım yapılması gerekir. Daimi kondansatör; yardımcı sargıya seri olarak sürekli devrede kaldığı için yardımcı sargının çektiği akımın belirlenmesinde hesaba katılmalı ve yol verme kondansatörü de kalkış anında çekilen akımın belirlenmesinde hesaba katılmalıdır. Moment dalgalanması ise hem iki sargının hat ve sarım sayıları hem de kondansatör değerlerinden etkilenen bir karakteristiktir. Anlık moment, ortalama moment etrafında ne kadar çok dalgalanma yaparsa motorun gürültü seviyesi ve titreşimi o kadar fazla olur. Dolayısıyla, tek fazlı kaynaktan beslenen bir motor için moment dalgalanmasını tamamen yok etmek mümkün olmasa da en azından sargı ve kapasite optimizasyonu ile düşük seviyelerde tutulabilir.

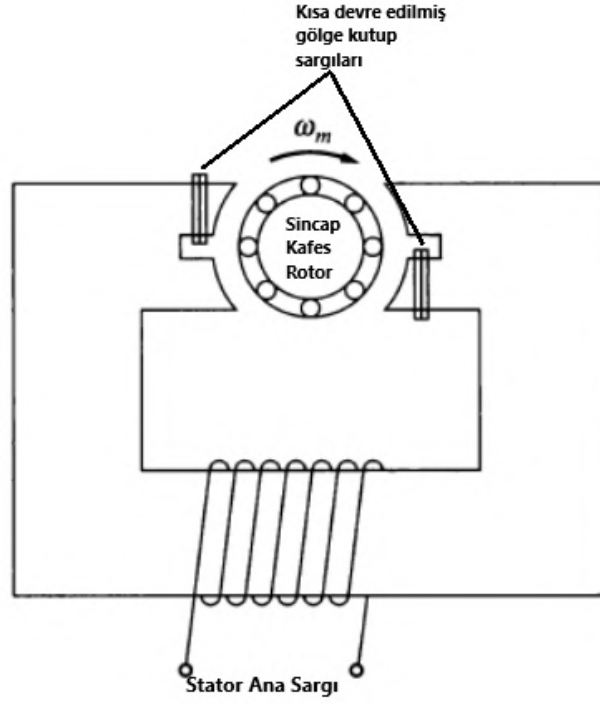
## 2.6 Gölge Kutuplu (Oyuk Kutuplu) Motor

Gölge kutuplu tek fazlı asenkron motorlarda birbirine oldukça benzemekle birlikte iki farklı geometrik yapı tercih edilebilir. Bu bölümde her iki geometriden de kısaca bahsedilecektir. Her iki geometrik yapıda da rotor sincap kafeslidir. Motorun statorunda çıkık kutuplar vardır ve ana sargı bu kutuplar üzerine sarılır. Karşılıklı kutuplarda çapraz olacak şekilde laminasyon boyunca açılmış birer oyuk bulunur [26]. Bu oyuklara kısa devre edilmiş bakır halka veya bobinler sarılır [21]. Motorun yapısı şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16 Gölge kutuplu tek fazlı asenkron motorun yapısı [22]

Çalışma prensibi aynı olmakla birlikte diğer geometri ise şekil 2.17’de görülmektedir.



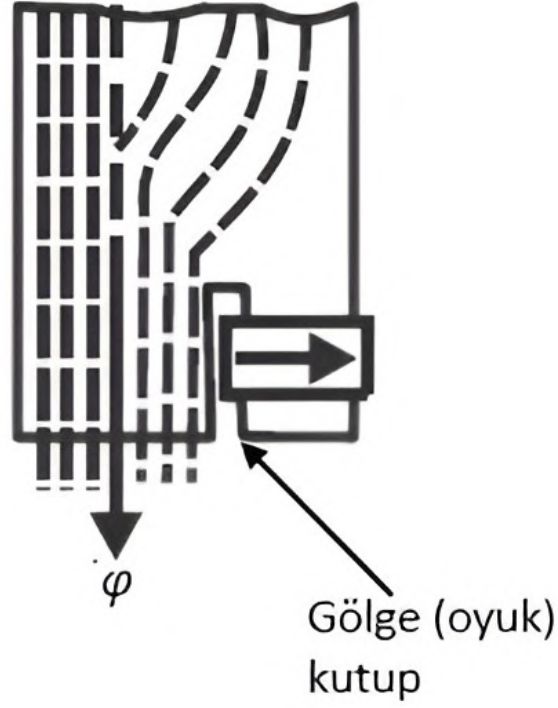
**Şekil 2.17** Gölge kutuplu tek fazlı asenkron motor için başka bir geometrik yapı

Manyetik alan teorilerinde bahsedildiği üzere gölge kutuplu motor da kendi kendine yol alamaz. Motorun kalkış için gerekli momenti üretebilmesi için yardımcı sargı gibi davranan kısa devre bobinleri kullanılır. Tek fazlı alternatif gerilim kaynağına doğrudan bağlı olan statora sarılmış ana sargı üzerinden akan akım sayesinde alternatif bir akı üretir. Bu akı kutupların oyuk kısmında bulunan bobinler üzerinde bir gerilm ve dolayısıyla akım endükler [17]. Kısa devre edilen bu küçük bobinlerde endüklenen akımın yönü, Lenz Kanunu gereğidir ki, kendini üreten alanı yok edecek şekilde zıt yönlüdür. Yani ana sargı tarafından üretilen manyetik alan ile kısa devreli gölgeleme bobinlerinin ürettiği manyetik alan birbirine ters yöndedir ve bu sebeple çıkık kutbun oyuk tarafındaki toplam akı ya da manyetik alan azalmış olur [26]. Kutbun diğer tarafındaki akı fazla olduğu için manyetik alanı daha kuvvetlidir ve rotorun, Şekil 2.16’da da görüldüğü gibi oyuk kısma doğru dönmesini sağlar. Bu etkileşim Şekil 2.18’de görülebilir.

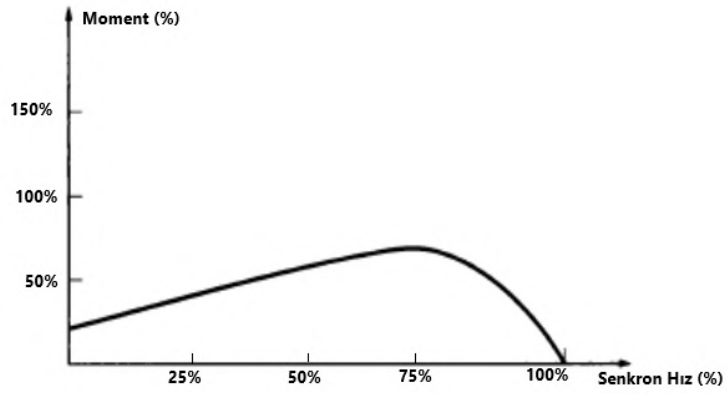
Bu motorların hız – moment karakteristiği ise Şekil 2.19’da görüldüğü gibidir.

Bu tip motorlar oyuk kutuplardaki gölgeleme bobinlerindeki sürekli güç kaybı nedeniyle düşük verime, düşük güç faktörüne ve Şekil 2.19’da görüldüğü gibi düşük kalkış moment oranına sahip olmasına rağmen; az bakım gereksinimleri, küçük ve basit yapıları, düşük maliyetleri nedeniyle ev aletleri, küçük vantilatör, elektrikli

saat, gramofon gibi düşük güç gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir [27, 28].



Şekil 2.18 Gölge kutuplu motorda akıların etkileşimi [28]



Şekil 2.19 Gölge kutuplu tek fazlı asenkron motorun hız – moment karakteristiği [17]

## TEK FAZLI ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRESİ VE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

---

### 3.1 Giriş

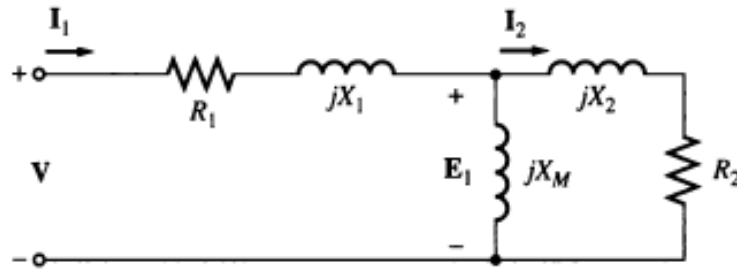
Tek fazlı asenkron motorun çalışma prensibini anlamak ve tasarım için analitik hesaplamalar yapabilmek adına ilk adım, motordaki elektromanyetik etkileşimlerin nasıl gerçekleştiğini anlamak ve gerekli parametreleri belirlemektir diyebiliriz. Motorun ana parçaları olan stator ve rotor arasındaki elektriksel ve manyetik etkileşimleri anlamak için geliştirilen çift döner alan teorisi ve çapraz alan teorisi Bölüm 2’de anlatılmıştı. Burada motorun hız – moment karakteristiğini çizerek çalışma periyodunu görebilmek ve ilgili parametreleri belirlemek için eşdeğer devresi oluşturulacaktır. Bahsi geçen her iki yaklaşım da eşdeğer devre oluşturmak için referans alınabilir. Bu çalışmada çift döner alan teorisi yardımıyla; bir yardımcı sargılı motorun, bir de daimi kondansatörlü motorun eşdeğer devreleri oluşturulacak ve bu devrelerin analizleri yapılacaktır. Ayrıca eşdeğer devre parametrelerinin hangi deneyler ile nasıl belirleneceği anlatılacaktır.

### 3.2 Yardımcı Sargılı Motorun Eşdeğer Devresi

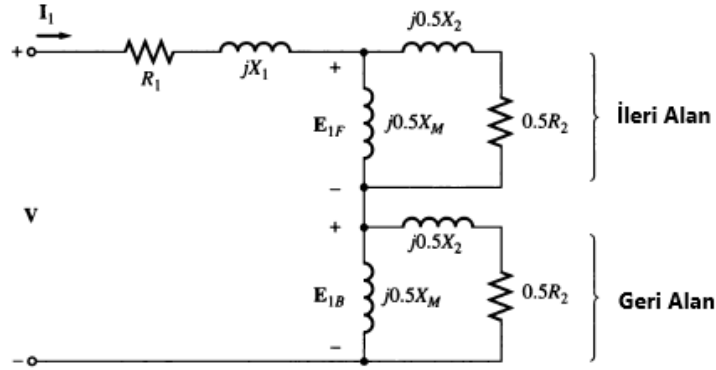
Eşdeğer devre oluşturmak için üç fazlı motorlarda olduğu gibi tek fazlı asenkron motorda da sekonder devrenin yani rotor devresinin kısa devre edildiğini ve makinenin bir trafo gibi çalıştığını varsayalım. Devreyi oluştururken statorda bir sargı bulunur ve durma ile çalışma koşulları altında değerlendirilir [28]. İlk olarak rotorun durduğu ve statorda yalnızca ana sargının enerjilendiği durumu göz önüne alalım. Bu devreyi Şekil 3.1’de görebiliriz.

Burada;  $R_1$  stator sargı direncini,  $X_1$  stator sargısının reaktansını ifade eder.  $X_M$  mıknatıslanma reaktansını ve  $R_2$  ile  $X_2$  rotorun statora indirgenmiş direnç ve reaktansını ifade eder. Bu devre modelinde nüve kayıpları ihmal edilmiş ve hesaplamalar yapılırken nüve kayıpları, sürtünme – vantilasyon ve ek kayıp gibi

mekanik kayıpların toplamına eklenmiştir [17].  $V$  stator sargılarına uygulanan tek fazlı alternatif gerilimi,  $E_1$  ise hava aralığındaki manyetik akının ana sargıda endüklediği karşıt elektromanyetik kuvveti (EMK) temsil eder [21]. Şekil 2.3'te görüleceği üzere motorda oluşan manyetik alanı, eşit fakat ters yönde iki alana ayırmıştık. Her bir alan rotorun üstünde bir EMK endükler [28]. Dolayısıyla bu alanların rotor üzerinde de zıt yönde ve eşit büyüklükte etkisi olduğu için durgun halde motorda üretilen net moment 0 Nm olur. Statora indirgenmiş rotor eşdeğer devresini de aynı şekilde ileri ve geri yöndeki eşit iki alana ayırabiliriz ve böylece her bir alandaki rotor direnç ve reaktansı gerçek değerinin yarısı kadar olur. Bu durumda ortaya çıkan eşdeğer devre Şekil 3.2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1 Tek fazlı asenkron motorun durağan halde ( $n_r = 0$ ) eşdeğer devresi [17].



Şekil 3.2 Tek fazlı asenkron motorun ileri ve geri alanlara bölünmüş eşdeğer devresi [17]

Şimdi, yardımcı sargı vasıtasıyla rotorun ileri manyetik alan yönünde dönmeye başladığını ve senkron hızın yüzde 75'inden sonra yardımcı sargının devreden çıktığını düşünelim [28]. Bir asenkron motorun rotor direnci; stator ve rotorun öz endüktansı ve karşıt endüktansından dolayı, kayma miktarına ( $s$ ) yani stator ve rotor manyetik alanları arasındaki bağıl hıza bağlıdır [17]. Asenkron motorda kayma aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir;

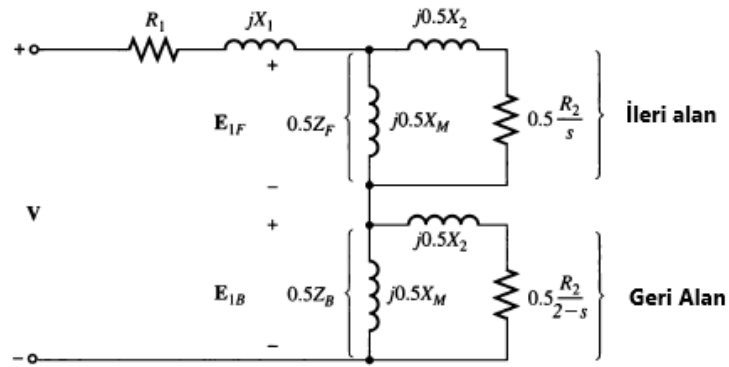
$$s = \frac{n_{senkron} - n_m}{n_{senkron}} = \frac{\omega_{senkron} - \omega_m}{\omega_{senkron}} \quad (3.1)$$

Burada;  $n_{senkron}$  stator manyetik alanının senkron hızını,  $n_m$  ise rotorun mekanik hızını ifade eder.  $\omega$  değerleri de bu mekanik hızlara karşılık gelen açısal hızları ifade eder.  $\rho$  kutup çifti sayısı ve  $f$  stator sargısına uygulanan gerilimin frekansı olmak üzere, aşağıdaki eşitliklerde senkron ve açısal hızlar verilmektedir;

$$n_{senkron} = \frac{60f}{\rho} \quad (3.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} (rad/sn) \quad (3.3)$$

İlgili devrede iki adet manyetik alan vardır. İleri manyetik alan için kayma miktarı ' $s$ 'dir ve dolayısıyla ileri manyetik alandaki rotor direnci  $0,5 R_2/s$ 'dir. İleri alan hızına  $n_{senkron}$  dersek, geri alan zıt yönde döndüğü için rotorun dönüş yönü ile hızına göre geri alan hızını  $2n_{senkron}$  alabiliriz. Dolayısıyla rotor hızı geri alan hızına göre  $2 - s$  olur. Bu nedenle geri manyetik alandaki rotor direnci  $0,5 R_2/(2 - s)$  olur. Bu iki direnç, yalnızca ana sargının devrede olduğu ve rotorun ileri alan yönünde döndüğü durumda rotorun statora indirgenmiş dirençleridir. İndirgenmiş dirençleri Şekil 3.2'de yerine koyarsak nihai eşdeğer devre Şekil 3.3'teki gibi olur.  $Z_F$  ileri manyetik alan devresinin empedansını ve  $Z_B$  geri manyetik alan devresinin empedansını temsil eder.



**Şekil 3.3** Yalnızca ana sargının devrede olduğu ve rotorun ileri alan yönünde döndüğü durumda tek fazlı asenkron motorun eşdeğer devresi

### 3.2.1 Eşdeğer Devrenin Analizi

Şekil 3.3'teki eşdeğer devre kullanılarak motora ait stator akımı, giriş gücü ve güç faktörü gibi parametrelerini hesaplayabiliriz. Bunun için öncelikle ileri ve geri manyetik alanların empedans değerlerini hesaplamalıyız.  $Z_T$  devrenin toplam empedansını ve  $Z_1$  ise stator sargı empedansını ifade etmek üzere aşağıdaki eşitlikleri yazabiliriz:

$$Z_T = Z_1 + Z_F + Z_B \quad (3.4)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (3.5)$$

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{(R_2/s + jX_2)(jX_M)}{(R_2/s + jX_2) + (jX_M)} \quad (3.6)$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{(R_2/(2-s) + jX_2)(jX_M)}{(R_2/(2-s) + jX_2) + (jX_M)} \quad (3.7)$$

Yukarıda verilen eşitliklere göre motorun stator sargılarındaki akım şu şekilde hesaplanabilir;

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + jX_1 + 0.5Z_F + 0.5Z_B} \quad (3.8)$$

İncelediğimiz eşdeğer devre motorun çalışma durumuna yani rotorun 's' kadar bir kayma ile döndüğü duruma ait bir devredir.  $s < 1$  olduğu için  $0,5 R_2/s$  direnci şekil 3.1 de görülen durgun haldeki  $R_2$  direncinden çok büyük ve  $0,5 R_2/(2-s)$  direnci durgun haldeki direncinden küçüktür. Bu nedenle hava aralığı manyetik akısı ileri yönde artarken geri yönde azalır ve bu durumda şekil 2.3'teki karakteristik ortaya çıkar [21]. Tek fazlı asenkron motorun hava aralığındaki ileri manyetik alan  $0,5 R_2/s$  direnci üzerinden tüketilirken, geri manyetik alan  $0,5 R_2/(2-s)$  direnci üzerinden tüketilir [17]. Dolayısıyla ileri manyetik alan için hava aralığı gücü şu şekilde hesaplanabilir;

$$P_{AG,F} = I_1^2(0.5R_F) \quad (3.9)$$

Geri manyetik alan için ise hava aralığı gücü şu şekilde hesaplanır;

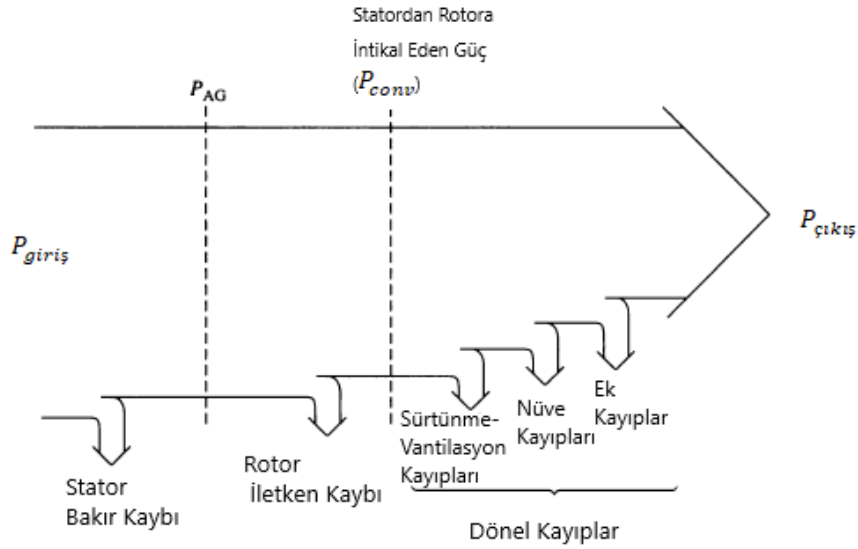
$$P_{AG,B} = I_1^2(0.5R_B) \quad (3.10)$$

Hava aralığındaki net güç ikisi arasındaki fark ile hesaplanır.

$$P_{AG} = P_{AG,F} - P_{AG,B} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $P_{AG}$ ,  $P_{AG,F}$ ,  $P_{AG,B}$  sırasıyla hava aralığındaki gücü, hava aralığının ileri ve geri yöndeki güçlerini ifade eder.

Şekil 3.4'te verilen güç akış diyagramı ile tek fazlı asenkron motorun içerisinde üretilen güç ve kayıp güçleri daha net bir şekilde görebiliriz.



Şekil 3.4 Bir asenkron motorun güç akış diyagramı [17].

Bu güç akışına göre motorda endüklenen momenti ( $M_{end}$ ) şu şekilde ifade edebiliriz;

$$M_{end} = \frac{P_{AG}}{\omega_{senkron}} \quad (3.12)$$

Hava aralığındaki alanın her iki bileşeni de rotor akımları meydana getirir ve toplam rotor iletken kayıpları her bir alandan kaynaklanan kayıpların toplamı kadardır. 3 fazlı bir motorda olduğu gibi tek fazlı asenkron motorda da rotor kayıpları, stator ve rotor arasındaki bağıl hız ile yani kayma ile hava aralığında ki gücün çarpımına eşittir. Dolayısı ile zıt yöndeki döner manyetik alanların rotorda neden olduğu

kayıp güçleri ve bu iki kaybın toplamıyla rotor iletkenlerindeki toplam kayıp gücü hesaplayabiliriz.

İleri manyetik alanın sebep olduğu kayıp güç;

$$P_{rcl,F} = s \times P_{AG,F} \quad (3.13)$$

Geri manyetik alanın sebep olduğu kayıp güç;

$$P_{rcl,B} = (2 - s) \times P_{AG,B} \quad (3.14)$$

Dolayısı ile rotordaki toplam kayıp güç;

$$P_{rcl} = P_{rcl,F} + P_{rcl,B} \quad (3.15)$$

Burada;  $P_{(rcl,F)}$ ,  $P_{(rcl,B)}$ ,  $P_{(rcl)}$  sırası ile ileri ve geri manyetik alanlardan dolayı meydana gelen rotor iletken kayıplarını ve toplam rotor kaybını ifade etmektedir.

Şekil 3.4'teki güç akışını takip edersek; rotor iletken kayıpların hesabından sonra, statordan rotora intikal eden gücü yani elektriksel formdan mekanik forma dönüştürülen gücü ( $P_{conv}$ ) şu şekilde hesaplayabiliriz;

$$P_{conv} = M_{end}\omega_m \quad (3.16)$$

$\omega_m$ , rotorun açısal hızını ifade etmektedir ve Eşitlik 3.1'e göre  $\omega_m = (1 - s)\omega_{senkron}$  olarak bulunabilir. Eşitlik 3.16'da yerine koyarsak, statordan rotora intikal eden güç;

$$P_{conv} = M_{end}(1 - s)\omega_{senkron} \quad (3.17)$$

Görüldüğü üzere motorun milinden alınan çıkış gücü, elektrikselden mekaniğe dönüştürülen güce eşit değildir. Hareketli sistemlerin doğasında var olan sürtünme ve vantilasyon kayıpları, histerezis ve eddy akım kayıplarından oluşan manyetik nüve malzemesinin kayıpları ve sistemdeki ek kayıplar motorun milinden alınan çıkış gücü ile statordan rotora intikal ederken elektriksel formdan mekanik forma dönüştürülen güç arasındaki farkı teşkil etmektedir. Dolayısıyla çıkış gücünü

elde etmek için,  $P_{\text{kayıp}}$  Şekil 3.4'te gösterilen dönel kayıpları temsil etmek üzere aşağıdaki eşitlik kullanılabilir;

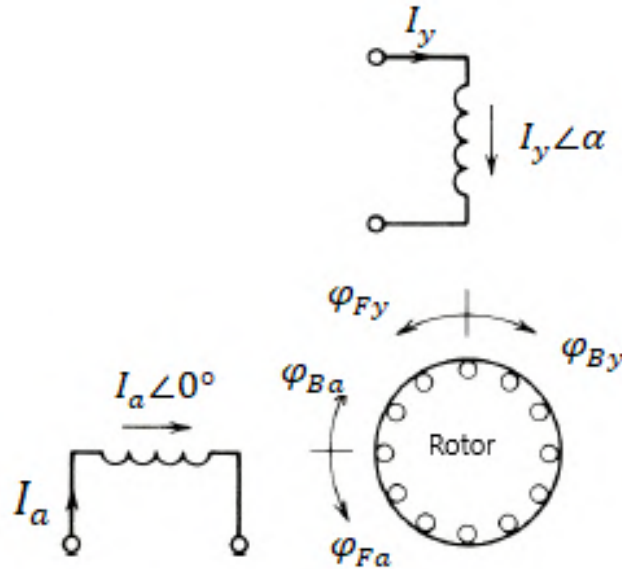
$$P_{\text{çıkış}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{kayıp}} \quad (3.18)$$

Buna bağlı olarak yük momenti ile endüklenen momentin de birbirine eşit olmadığını görebiliriz.  $M_{\text{yük}}$  ise yük momentini ifade etmek üzere, Eşitlik 3.18 kullanılabilir;

$$M_{\text{yük}} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{\omega_m} \quad (3.19)$$

### 3.3 Daimi Kondansatörlü Motorun Eşdeğer Devresi

Bölüm 2.4.1 ve 2.4.2'de daimi kondansatörlü ve çift kondansatörlü tek fazlı asenkron motorlar anlatılmıştı. Bu motorlarda; diğerlerinden farklı olarak yardımcı sargı ve bununla birlikte kondansatör daima devrede kalıyor, makine iki fazlı bir motormuş gibi çalışıyordu. Bu bölümde daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun eşdeğer devresinden bahsedeceğiz. Yine çift döner alan teorisi temel alınacaktır.

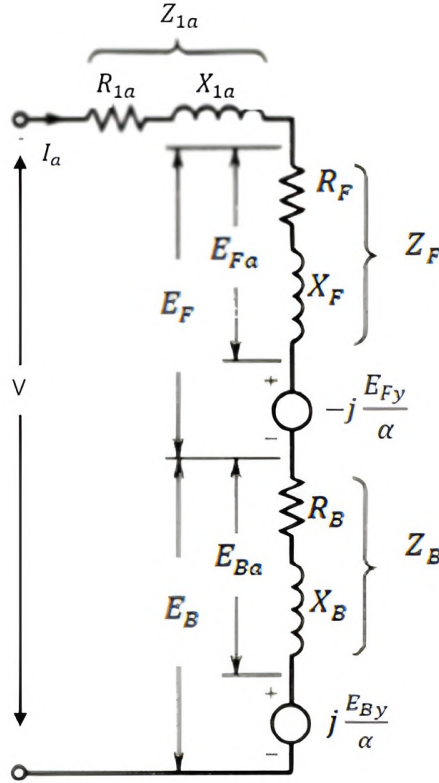


Şekil 3.5 Daimi kondansatörlü asenkron motorun çift döner alan akıları [22]

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere stator sargılarının tek fazlı bir alternatif gerilim

kaynağını bağılandığı zaman ana sargı üzerinden  $I_a$  akımı ve buna paralel olan yardımcı sargı üzerinden  $I_y$  akımı akar. Bu akımlar manyetik akılar meydana getirir. Şekilde görülen  $\varphi_{Fa}$ ,  $\varphi_{Ba}$  ana sargı akımının geri manyetik akıları ve  $\varphi_{Fy}$ ,  $\varphi_{By}$  yardımcı sargı akımının oluşturduğu ileri ve geri manyetik akıları temsil eder. Bu dört akı, iki sargıda da gerilim endüklenmesini sağlar.

Bu açıklamalardan yola çıkarak ana sargı için eşdeğer devre Şekil 3.6'daki gibi oluşturulabilir.



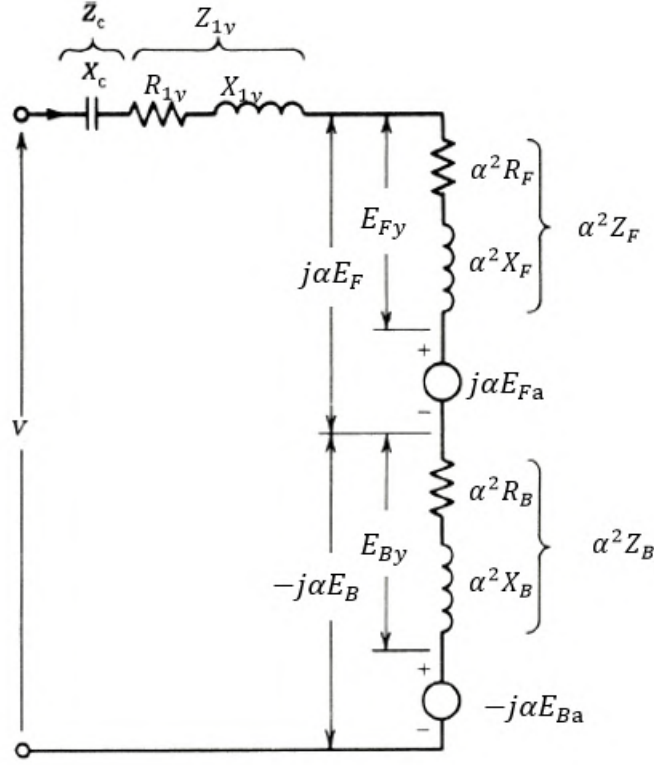
**Şekil 3.6** Daimi kondansatörlü motorun ana sargısı için oluşturulan eşdeğer devre

Burada;  $E_{Fa}$  ve  $E_{Ba}$  sırasıyla  $\varphi_{Fa}$  ile  $\varphi_{Ba}$  akılarının endüklediği gerilimlerdir.  $-j \frac{E_{Fy}}{\alpha}$  ve  $j \frac{E_{By}}{\alpha}$  gerilimleri ise yardımcı sargıda oluşan akıların ana sargı üzerinde endüklediği gerilimi ifade eder ki burada  $N_a$  ana sargı sarım (siper) sayısı  $N_y$  yardımcı sargı sarım sayısı olmak üzere  $\alpha = N_a/N_y$  dönüştürme oranıdır [22].

Doğru kapasite değeriyle seçilen bir kondansatör yardımcı sargı akımının ve dolayısıyla  $\varphi_{Fy}$  akısının  $90^\circ$  faz farkı ile geriden gelmesini sağlar.  $-j$  ifadesi faz farkından kaynaklanmaktadır ve akımın  $90^\circ$  geriden geldiğini temsil eder. İleri ve geri alanlar arasındaki zıt yönlerden kaynaklı geri alan akısının ana sargıda endüklediği gerilim ifadesinde  $+j$  kullanılır çünkü  $90^\circ$  ileridedir.

Yardımcı sargıya ait eşdeğer devre ise Şekil 3.7'de görülmektedir.

Bu devrede de yine karşıt endüktanstan kaynaklanan ve ana sargı akılarının yardımcı sargı üzerinde endüklediği gerilimleri görmek mümkündür. Yukarıda bahsedilen faz farkı ilişkisi burada da geçerlidir. Bu sefer ana sargının ileri yöndeki akısı  $90^\circ$  ilerde olduğu için  $j\alpha E_{Fa}$  ile gösterilir ve diğer yöndeki akının endüklediği gerilim ise  $-j\alpha E_{Ba}$  ile gösterilir. Bu devrede ayrıca kondansatör mevcuttur.



**Şekil 3.7** Daimi kondansatörlü motorun yardımcı sargısı için oluşturulan eşdeğer devre [22]

### 3.3.1 Eşdeğer Devrenin Analizi

Bu iki sargıya ait eşitlikleri şu şekilde yazabiliriz.

$$V_a = I_a(Z_{1a} + Z_F + Z_B) - j\frac{E_{Fy}}{\alpha} + j\frac{E_{By}}{\alpha} \quad (3.20)$$

$$V_y = I_y(Z_c + Z_{1y} + \alpha^2 Z_F + \alpha^2 Z_B) + j\alpha E_{Fa} - j\alpha E_{Ba} \quad (3.21)$$

$$V_a = V_y \quad (3.22)$$

$$I_g = I_a + I_y \quad (3.23)$$

$$Z_{1a} = R_{1a} + jX_{1a} \quad (3.24)$$

$$Z_{1y} = R_{1y} + jX_{1y} \quad (3.25)$$

$$Z_c = -jX_c \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} E_{Fy} &= I_y \alpha^2 Z_F \\ E_{Fa} &= I_a Z_F \\ E_{By} &= I_y \alpha^2 Z_B \\ E_{Ba} &= I_a Z_B \end{aligned} \quad (3.27)$$

Eşitlik 3.27'deki gerilim ifadelerini eşitlik 3.20 ve 3.21'de yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} V_a &= I_a(Z_{1a} + Z_F + Z_B) - j\alpha(Z_F - Z_B)I_y \\ V_y &= I_y(Z_c + Z_{1y} + \alpha^2 Z_F + \alpha^2 Z_B) + j\alpha(Z_F - Z_B)I_a \end{aligned} \quad (3.28)$$

eşitliklerini elde ederiz. Motorda endüklenen momenti ileri ve geri manyetik alanlar tarafından endüklenen momentlerin farkından bulabiliriz.

$$M_{end} = M_F - M_B = \frac{P_{AG,F} - P_{AG,B}}{\omega_{senkron}} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} I_a &= |I_a| \angle \theta_a \\ I_y &= |I_y| \angle \theta_y \\ P_{AG,F} &= (E_F I_a) + j\alpha(E_F I_y) \\ P_{AG,B} &= (E_B I_a) - j\alpha(E_B I_y) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Dolayısıyla;

$$P_{AG,F} - P_{AG,B} = (|I_a|^2 + |\alpha I_y|^2)(R_F - R_B) + 2\alpha |I_a| |I_y| (R_F + R_B) \sin(\theta_y - \theta_a) \quad (3.31)$$

### 3.4 Tek Fazlı Asenkron Motorun Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Uygulanan Testler

Üretimi yapılmış bir asenkron motora bir dizi deney uygulanarak karakteristiğine ait olan ve yukarıdaki bölümlerde bahsi geçen bazı önemli parametreleri belirlenebilir. Bu kısımda ilgili deneylere ait kısa bilgiler verilecektir. Eşdeğer devrelerde görülen  $R_1$  ,  $X_1$  ,  $R_2$  ,  $X_2$  ve nüve ya da başka bir deyişle demir kayıplarına ait direnci ifade eden  $R_{Fe}$  değerlerini deneyler ile tespit edebiliriz. Direnç ölçüm cihazları kullanılarak stator sargılarının direnci ve bu dirence ait sıcaklığı ölçülür. Daha sonra motorun çalışma sıcaklığındaki direnç değeri hesaplanabilir. Yapılacak deneyler şu şekildedir;

**1-Boşta Çalışma Deneyi :** Bu deneyde motor anma (nominal) geriliminde boşta yani mil ucuna bir yük bağlanmaksızın çalıştırılır. Bu esnada ölçüm cihazları ile boş akımı  $I_{s0}$ (A), gerilimi  $V_s$ (V) ve bu halde gücü  $P_{s0}$ (W) ölçülür. Bu deneyde yük bağlı olmadığı için rotorun senkron hızda döndüğünü kabul edebiliriz. Dolayısıyla motorun boş akımı  $I_{s0}$  küçük olacaktır. Boşta çalışmada kayıpların stator sargı direncinde ve nüvede harcandığını kabul edersek;

$$P_{s0} = \frac{V_{s0}^2}{R_{Fe}} + R_1 I_{s0}^2 \rightarrow R_{Fe}(P_{s0} - R_1 I_{s0}^2) = V_{s0}^2 \quad (3.32)$$

**2- Kilitli Rotor Deneyi :** Rotorun yani motor milinin durduğu anda, statora anma geriliminin yaklaşık yüzde 20'si kadar bir gerilim uygulanır. Yine ölçüm cihazları ile stator gerilimi  $V_{sk}$ (V), stator akımı  $I_{sk}$ (A) ve güç  $P_{sk}$ (W) değerleri ölçülür. Rotor hızı 0 olduğu için  $s=1$ 'dir. Eşdeğer direnç  $R_e$ ;

$$\Sigma R_e = \frac{P_{sk}}{I_{sk}^2} \quad (3.33)$$

Eşdeğer empedans;

$$\Sigma Z_e = \frac{V_{sk}}{I_{sk}} = \sqrt{(\Sigma R_e)^2 + (\Sigma X_e)^2} \quad (3.34)$$

Dolayısıyla eşdeğer reaktans;

$$\Sigma X_e = \sqrt{(Z_e)^2 - (R_e)^2} \quad (3.35)$$

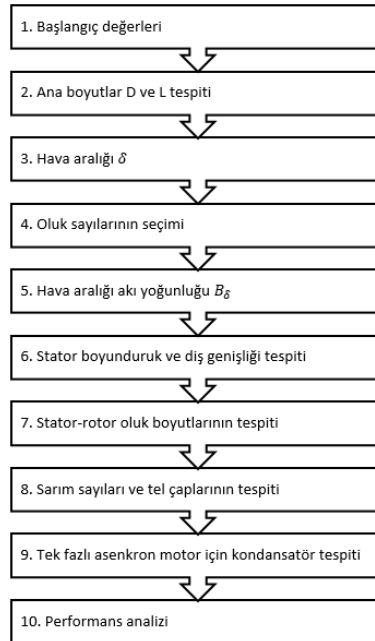
eşitlikleri ile bulunabilir.

## TEK FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI

Önceki bölümde tek fazlı asenkron motorun çalışma prensiplerine ve farklı motor üretim tekniklerine yer verildi. Bu bölümde ise tek fazlı asenkron motor tasarımında boyutlandırma hesaplarına değinilecektir.

### 4.1 Tek Fazlı Asenkron Motorun Tasarım Süreci

Tasarım süreci boyutlandırma ile yani değışken olmayan bazı karakteristik özellikler temelinde, uygun geometrik ölçüler ve üretim verileri elde etmekle başlar. Dolayısıyla öncelikle boyutlandırma ve sargı tasarımı ardından performans analizi yapılır. Performans analizinden istenilen sonuçlar elde edilene kadar süreç tekrarlanır [29]. Şekil 4.1’de bir elektrik makinesinin tasarım süreci ile ilgili genel akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.1 Bir asenkron motorun tasarım sürecinde izlenecek diyagram

#### 4.1.1 Sabit Karakteristik Değerlerin Belirlenmesi

Bir elektrik makinesinin tasarım ve boyutlandırmasına başlarken değişken olmayan bazı karakteristik değerleri belirlemek gerekir. Belirlenmesi gereken bazı önemli parametreler temel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Çıkış (anma) Gücü,
- Kutup Sayısı,
- Frekans,
- Anma Gerilimi,
- Faz Sayısı.

Tasarım sürecinde yukarıdaki sabit karakteristikler dışında bir de değişken parametreler ve varsayılan sabitler bulunur. Bunları da şu şekilde sıralayabiliriz;

- Stator dış çapı (IEC standartlarına uygun olarak tayin edilir),
- Paket boyu (stator efektif uzunluğu),
- Stator oluk boyutları,
- Hava aralığı uzunluğu,
- Rotor oluk boyutları,
- Akım yoğunlukları,
- Hava aralığı ve nüvedeki (çekirdek) akı yoğunlukları [30].

#### 4.1.2 Ana Boyutların Belirlenmesi

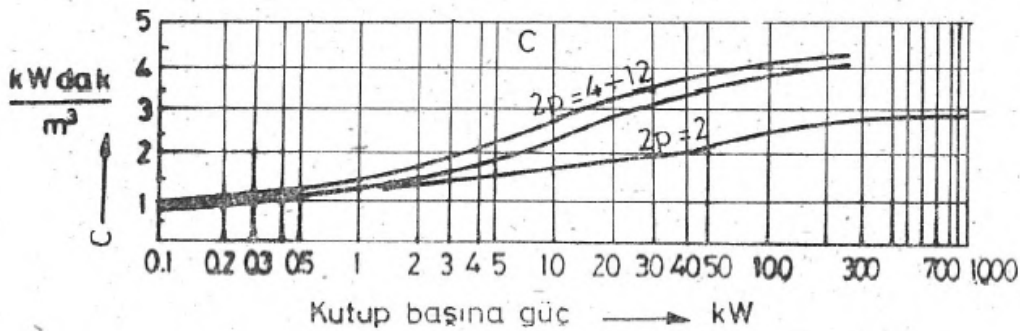
Bir önceki bölümde bahsedilen parametreler belirlendikten sonra, makineye ait ana boyutlar yani stator iç çapı  $D_i$  (başka bir deyişle hava aralığı çapı) ve paket boyu  $L$  (stator efektif uzunluğu) tespit edilir. Statorun dış çapı motor tipine (frame) ve IEC standartlarına göre zaten belirlidir. Bir asenkron makineden alınabilecek çıkış gücü, ilgili makine boyutlarına ( $D_i$  ve  $L$ ) doğrudan bağlıdır. Dolayısıyla hesaplamalar yapılırken; makinenin birim hacminden dakikada alınabilecek enerjiyi ifade eden ve faydalanma katsayısı olarak adlandırılan " $C_{esson}$ " katsayısı kullanılmaktadır [31]. Eşitlik 4.1 ve 4.2'de sırasıyla makinenin boyutları cinsinden sanal gücü ve faydalanma katsayısı verilmiştir.

$$P_{sn} = C_{esson} D_i^2 L n_{senkron} \quad (4.1)$$

$$C_{esson} = \frac{\pi^2}{\sqrt{260}} \xi_1 J_{1n} B_{\delta 10} 10^{-3} \quad (4.2)$$

$$P_{sn} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{\cos \varphi \times \eta} \quad (4.3)$$

Burada;  $J_{1n}$  nominal değerdeki akım yoğunluğu,  $\xi_1$  stator sargı faktörünün birinci harmoniği,  $B_{\delta 10}$  ise boşta çalışma gerilimindeki hava aralığının manyetik akı yoğunluğunun birinci harmoniğinin genliğidir.  $P_{sn}$  ise makineye ait iç görünür gücü temsil etmektedir.  $P_{\text{çıkış}}$  motorun milinden alınan çıkış gücünü,  $\cos \varphi$  güç faktörünü ve  $\eta$  verimi temsil etmektedir. Şekil 4.2'de faydalanma katsayısının motor gücüne göre fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 4.2 Makinenin beygir gücüne göre faydalanma katsayısı, C [31]

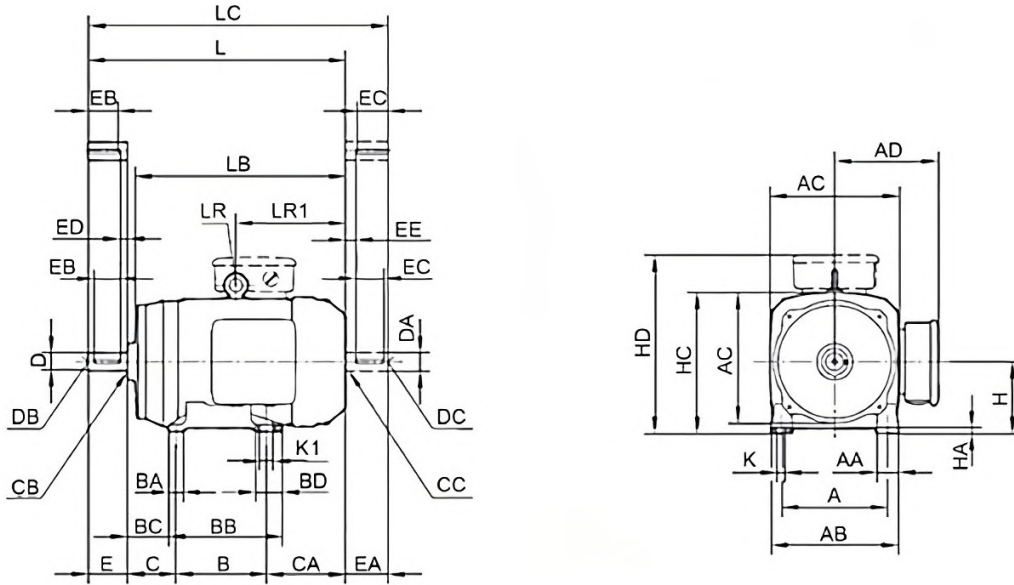
Makinenin ana boyutları belirlenirken şekil 4.2 ve tablo 4.1'de yer alan deneysel çalışmalardan elde edilen yaklaşık teorik eğriler kullanılır. Tasarımı yapılacak motora ait kutup başına düşen çıkış gücüne göre yaklaşık faydalanma katsayısı

belirlenir. Eşitlik 4.3'te bulunan güç faktörü ve verim değerleri kabul edilen performans değerlerine eşitir. Motorun çıkış gücü ve kutup sayısı yani senkron hızı da tasarımdan önce tespit edilmiş değerler olduğu için eşitlik 4.1 ve 4.3 yardımıyla  $D_i^2 L$  değeri hesaplanır. Bu iki bilinmeyenden stator iç çapını ( $D_i$ ) hesaplamak için  $D_i/D_o$  ampirik yaklaşımı ve standartlarda belirtilen  $D_o$  değerini kullanabiliriz. Stator iç çapının dış çapına oranına ait ampirik yaklaşımlar tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1** Stator iç çapının dış çapına oranının teorik değerleri

| Kutup Sayısı (2p) | $D_i/D_o$ |
|-------------------|-----------|
| 2                 | 0,49-0,51 |
| 4                 | 0,58-0,60 |
| 6                 | 0,62-0,64 |
| 8                 | 0,65-0,68 |

IEC 60072-1:2022 standartlarına uygun olarak motor gövdelerine göre stator dış çapları tablo 4.2'de ve ilgili ölçülere ait teknik resim Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu tablodan mil göbeğinin gövde ayağına olan mesafesini (H) ve stator dış çapını ( $A^d$ ) elde edebiliriz.



**Şekil 4.3** IEC standartlarına göre motor gövde ölçülerine ait teknik resim [32]

Tablo 4.1 ve 4.2'den faydalanarak  $D_i$  hesaplandıktan sonra eşitlik 4.1'e göre paket boyu L (stator uzunluğu) hesaplanabilir. Böylece makinenin ana boyutları olan, stator iç ve dış çap ile stator uzunluğu tespit edilmiş olur.

**Tablo 4.2** IEC 60072-1 standartlarına göre gövde ölçüleri [32]

| Gövde  | H             |                         | A <sup>a</sup> | B <sup>a</sup> | C <sup>a</sup> | K <sup>b</sup> |
|--------|---------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|        | Nominal<br>mm | Maksimum<br>Sapma<br>mm | mm             | mm             | mm             | Nominal<br>mm  |
| 56M    | 56            | -0,5                    | 90             | 71             | 36             | 5,8            |
| 63M    | 63            | -0,5                    | 100            | 80             | 40             | 7              |
| 71M    | 71            | -0,5                    | 112            | 90             | 45             | 7              |
| 80M    | 80            | -0,5                    | 125            | 100            | 50             | 10             |
| 90S    | 90            | -0,5                    | 140            | 100            | 56             | 10             |
| 90L    | 90            | -0,5                    | 140            | 125            | 56             | 10             |
| 100L   | 100           | -0,5                    | 160            | 140            | 63             | 12             |
| (112S) | 112           | -0,5                    | 190            | 114            | 70             | 12             |
| 112M   | 112           | -0,5                    | 190            | 140            | 70             | 12             |
| (112L) | 112           | -0,5                    | 190            | 159            | 70             | 12             |
| 132S   | 132           | -0,5                    | 216            | 140            | 89             | 12             |
| 132M   | 132           | -0,5                    | 216            | 178            | 89             | 12             |
| (132L) | 132           | -0,5                    | 216            | 203            | 89             | 12             |
| (160S) | 160           | -0,5                    | 254            | 178            | 108            | 14,5           |
| 160M   | 160           | -0,5                    | 254            | 210            | 108            | 14,5           |
| 160L   | 160           | -0,5                    | 254            | 254            | 108            | 14,5           |
| (180S) | 180           | -0,5                    | 279            | 203            | 121            | 14,5           |
| 180M   | 180           | -0,5                    | 279            | 241            | 121            | 14,5           |
| 180L   | 180           | -0,5                    | 279            | 279            | 121            | 14,5           |
| (200S) | 200           | -0,5                    | 318            | 228            | 133            | 18,5           |
| 200M   | 200           | -0,5                    | 318            | 267            | 133            | 18,5           |
| 200L   | 200           | -0,5                    | 318            | 305            | 133            | 18,5           |
| 225S   | 225           | -0,5                    | 356            | 286            | 149            | 18,5           |
| 225M   | 225           | -0,5                    | 356            | 311            | 149            | 18,5           |
| (225L) | 225           | -0,5                    | 356            | 356            | 149            | 18,5           |
| 250S   | 250           | -0,5                    | 406            | 311            | 168            | 24             |
| 250M   | 250           | -0,5                    | 406            | 349            | 168            | 24             |
| (250L) | 250           | -0,5                    | 406            | 406            | 168            | 24             |

### 4.1.3 Hava Aralığı

Hava aralığı uzunluğu makinenin performansı üzerinde önemli etkilere haizdir. Doğrudan şebekeden beslenen motorlarda hava aralığı, mıknatıslanma akımını azaltacak bununla birlikte yüksek verime katkı sağlayacak şekilde tercih edilir. Teorik olarak kısa hava aralığı uzunluğu düşük mıknatıslanma akımı oluştururken stator ve rotordaki girdap akımı kayıpları artabilir. Aynı zamanda stator akımı bağlantı harmonikleri nedeniyle rotordaki kayıplar da artar [30]. Verime ve momente etkileri ile birlikte üretim toleransları da göz önünde bulundurularak hava aralığı tayin edilir. Bu değer minimum 0,2 mm olarak seçilir. Küçük değerler seçilmesi hava aralığı endüksiyonu ve dolayısıyla manyetik çekmeyi de artırır.

Mıknatıslanma ve güç faktörü dikkate alınarak küçük seçilmesi uygun görülen hava aralığında, söz konusu sebeplerden dolayı büyük değerlere yönelim ortaya çıkabilir [31]. Hava aralığı uzunluğunun tespitinde Eşitlik 3.4 referans alınabilir.

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{0,2 + 0,01P^{0,4}}{1000}[m], p = 1 \\ \delta &= \frac{0,18 + 0,0006P^{0,4}}{1000}[m], p > 1\end{aligned}\quad (4.4)$$

Dolayısıyla rotor dış çapı ( $D_{or}$ ) Eşitlik 4.5'e göre hesaplanabilir.

$$D_{or} = D_i - 2\delta[m] \quad (4.5)$$

#### 4.1.4 Oluk Sayılarının Seçimi ve Boyutlandırması

Bir asenkron motor tasarımının önemli adımlarından biri de stator ve rotor oluk sayılarının tayin edilmesidir. Bu parametreler makinenin bir çok karakteristiği üzerinde mühim etkilere sahiptir. Bir asenkron motorda titreşimleri ve harmonikleri önlemek için özellikle rotor oluk sayısının seçimine özen gösterilmelidir. Asenkron harmonik momentleri azaltmak için rotorun oluk sayısını küçük seçebiliriz [30].  $N_s$  ve  $N_r$  sırasıyla stator ve rotor oluk sayılarını temsil etmek üzere;

$$N_r < 1,25N_s \quad (4.6)$$

bağıntısı referans alınabilir. Bununla birlikte motorun efektif bir performansla çalışması için tehlike oluşturabilecek oluk harmoniklerinden kaçınmak için aşağıdaki eşitlikler referans alınabilir;

$$\begin{aligned}N_r &\neq N_s \pm 2p \\ N_r &\neq 2N_s \pm 2p \\ N_r &\neq N_s \pm p \\ N_r &\neq \frac{N_s}{2} \pm p\end{aligned}\quad (4.7)$$

Aynı şekilde mekanik vibrasyonlar da bir elektrik motoru için kaçınılması gereken olumsuzluklardan biridir. Bunun için de g herhangi bir tam sayı olmak üzere

aşağıdaki şartlar göz önünde bulundurulmalı;

$$\begin{aligned}
 N_r &\neq 6pg \pm 1 \\
 N_r &\neq 6pg \pm 2p \pm 1 \\
 N_r &\neq 6pg \pm 4p \pm 1
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Eğer motorda helis açısı var ise, yani rotor statora göre eğimli bir açıyla yapıldıysa yukarıda sözü geçen harmonik ve vibrasyonlar helis yardımıyla azaltılmış olur. Dolayısıyla bu durumda oluk sayısı seçimi için eşitlik 4.9 göz önünde bulundurulabilir.

$$N_r = N_s + 4p \tag{4.9}$$

Ayrıca bu yüksek harmoniklerin ve gürültülerin bastırılmasında ve yok edilmesinde çift katman sargı kullanımını da oldukça etkilidir. Asenkron motorda stator oluk sayısı belirlenirken kutup ve faz başına tam oluk düşecek şekilde tasarım yapılması performans açısından uygun olacaktır. Bu oluk sayısı kesirli olursa makine gürültülü çalışabilir [31]. Tablo 4.3'te helis açılı rotora sahip bir motor için avantajlı oluk sayıları verilmiştir.

**Tablo 4.3** Helis açılı rotora sahip bir motor için avantajlı oluk sayıları [30]

| Kutup Sayısı (2s) | $N_s$ | $N_r$          |
|-------------------|-------|----------------|
| 2                 | 24    | 28,16,22       |
|                   | 36    | 24,28,48,16    |
|                   | 48    | 40,52          |
|                   | 60    | 48             |
| 4                 | 36    | 24,40,42,30,44 |
|                   | 48    | 60,84,56,44    |
|                   | 60    | 72,48,84,44    |
| 6                 | 36    | 42,48,54,30    |
|                   | 54    | 72,88,48       |
|                   | 72    | 96,90,84,54    |
| 8                 | 36    | 48             |
|                   | 48    | 72,60          |
|                   | 72    | 96,84          |

Oluk sayıları tespit edildikten sonra manyetik zorlanmalara yani, çekirdek malzemesinin manyetik özellikleri de göz önünde bulundurulmak kaydıyla, makinenin iyi bir performansla çalışabilmesi için motor geometrisinin belirli

bölümlerinde teorik olarak saptanan manyetik akı yoğunluklarına göre oluk boyutları da hesaplanabilir.

**Tablo 4.4** Teorik manyetik akı yoğunlukları (f=50 Hz)

| Makine Bölümleri              | B(T)     |
|-------------------------------|----------|
| Stator Boyunduruk( $B_{sb}$ ) | 1,2-1,7  |
| Stator Dış Başındaki En Büyük | 1,6-2,1  |
| Stator Dış Ortası( $B_{sd}$ ) | 1,4-1,7  |
| Rotor Boyunduruk( $B_{rb}$ )  | 1,2-1,6  |
| Rotor Dış Dibi En Büyük       | 1,7-2,2  |
| Rotor Dış Ortası( $B_{rd}$ )  | 1,5-1,8  |
| Hava Aralığı( $B_{\delta}$ )  | 0,6-0,75 |

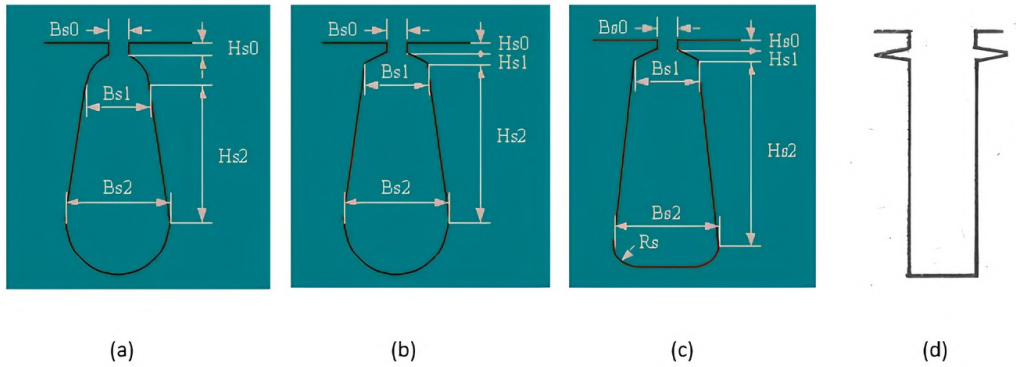
Bir asenkron makinenin boyutlandırması yapılırken f=50 Hz frekansta Tablo 4.4'teki manyetik akı yoğunlukları dikkate alınmalıdır [31]. Bu durumda tek fazlı asenkron motorun ana sargısı için kutup başına akı;

$$\varphi\alpha = \frac{2}{\pi} K_{dis} B_{\delta} \tau L \quad (4.10)$$

Burada;  $B_{\delta}$  hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu,  $K_{dis}$  manyetik akı düzeltme faktörünü (0,9 alınabilir) [29],  $\tau$  ise kutup adımını ifade etmekle birlikte,

$$\tau = \pi \frac{D_i}{2p} \quad (4.11)$$

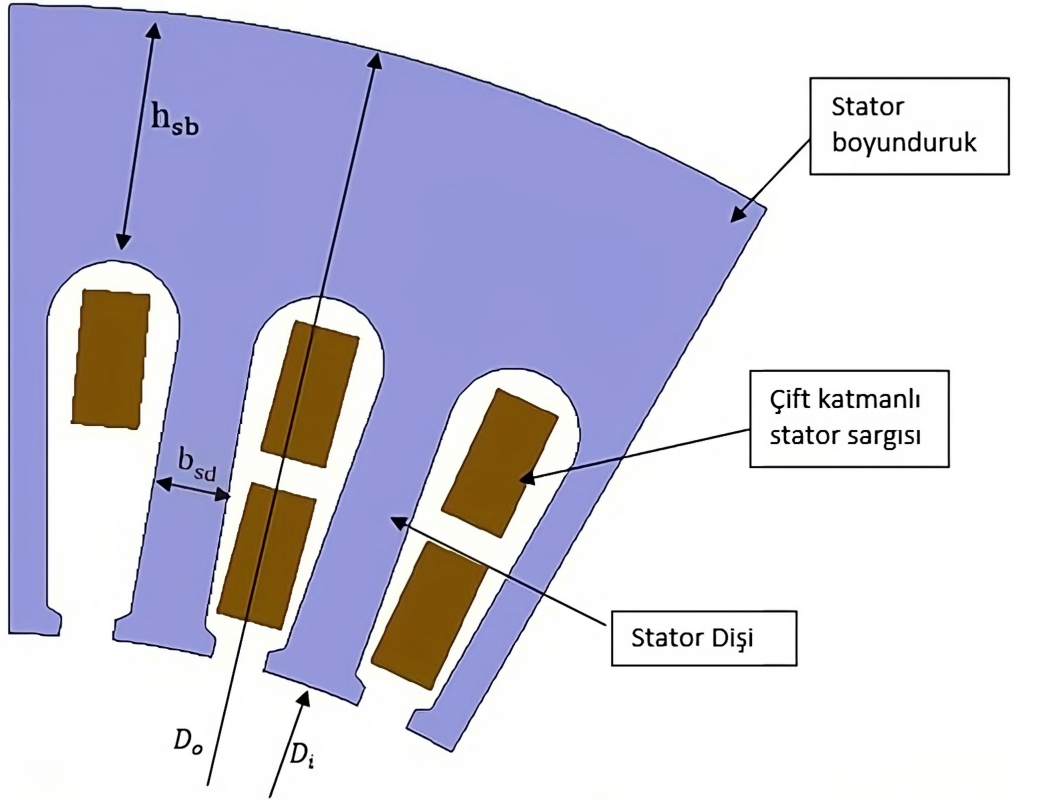
eşitliği ile bulunur.



**Şekil 4.4** Stator oluğuna ait farklı geometriler

Şekil 4.4'te ise stator oluklarına ait farklı geometriler ve Şekil 4.5'te sargılı stator yapısı verilmiştir. Küçük ve orta güçlü makinelerde genellikle (a), (b) ve (c)'de

olduğu gibi yarı açık ağızlı oluklar kullanılırken büyük güçlü bazı makinelerde (d)'de görüldüğü gibi ağzı tam açık şekilde stator oluğu kullanılır [31].



**Şekil 4.5** Sargılı stator geometrisi

Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu için Tablo 4.4 ve makineden istenen performans dikkate alınarak referans değer belirlendikten sonra (örneğin 1,5 T) stator boyunduruk yüksekliğini ifade eden  $h_{sb}$ ;

$$h_{sb} = \frac{\varphi_a}{2B_{sb}L} \quad (4.12)$$

eşitliği ile bulunabilir.

Şekil 4.5'te görülen stator diş genişliğini ifade eden  $b_{sd}$  uzunluğunu hesaplamak için, laminasyonun paralel dişler kullanılarak üretildiğini varsayarsak,  $N_s$  stator oluk sayısını ve  $B_{sd}$  dişteki referans manyetik akı yoğunluğunu ifade etmek üzere;

$$b_{sd} = \frac{\varphi_a 2p}{N_s B_{sd} L} \quad (4.13)$$

eşitliği kullanılabilir.

Şekil 4.4'te görülen  $H_{s0}$  ve  $H_{s1}$  için 0,5 – 3 mm aralığında değerler kullanılabilir. Diş uçlarındaki manyetik akı yoğunluğunu yani manyetik zorlanmayı da göz önünde bulundurarak ilgili değerleri mümkün mertebe küçük tutmak oluk alanını arttıracaktır. Yine Şekil 4.4'te görüldüğü gibi oluk ağzı genişliğini ifade eden  $B_{s0}$  değeri için stator sargısı üretim imkanları da dikkate alınarak hava aralığının 6 katı genişlik [29] veya stator dış genişliğinden fazla olmayacak şekilde 1,2 – 3 mm değerleri referans alınabilir. Teorik olarak  $B_{s0}$  genişliğinin azalması verimi olumlu yönde etkilerken dolayısıyla KMO'sunu olumsuz etkilemektedir. Fakat gerek el sarımı yönteminde gerekse şablon sarımı yönteminde bobinlerin oluklara yerleştirilmesi noktasında bu genişliğin önemini göz ardı etmemek gerekmektedir. Oluk genişlikleri  $B_{s1}$  ve  $B_{s2}$  için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir;

$$\begin{aligned} B_{s1} &= \frac{\pi(D_i + 2(H_{s0} + H_{s1}))}{N_s} - b_{sd} \\ B_{s2} &= \frac{\pi(D_o + 2h_{sb})}{N_s} - b_{sd} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Dolayısıyla  $H_{s2}$  oluk yüksekliği için;

$$H_{s2} = \left( \frac{D_o - D_i}{2} \right) - h_{sb} - \frac{B_{s2}}{2} - H_{s0} - H_{s1} \quad (4.15)$$

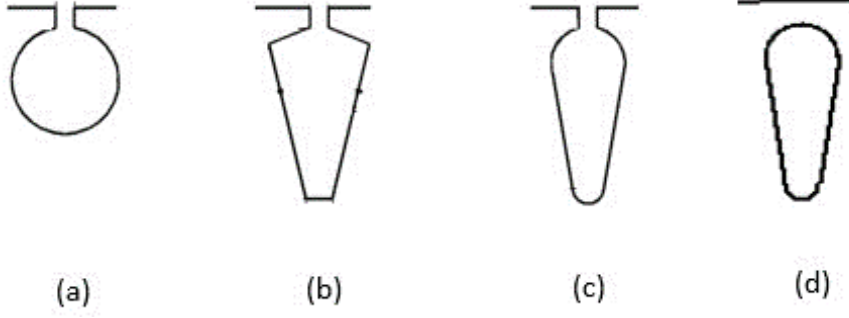
Bu durumda izolasyon malzemeleri dahil olmak üzere stator sargısı için kullanılabilir bir oluk alanı  $A_s$  (toplam oluk alanı için oluk sayısı ile bu değer çarpılır) ;

$$A_s = \frac{(B_{s0} + B_{s1})H_{s1}}{2} + \frac{(B_{s1} + B_{s2})H_{s2}}{2} + \frac{\pi(B_{s2})^2}{8} \quad (4.16)$$

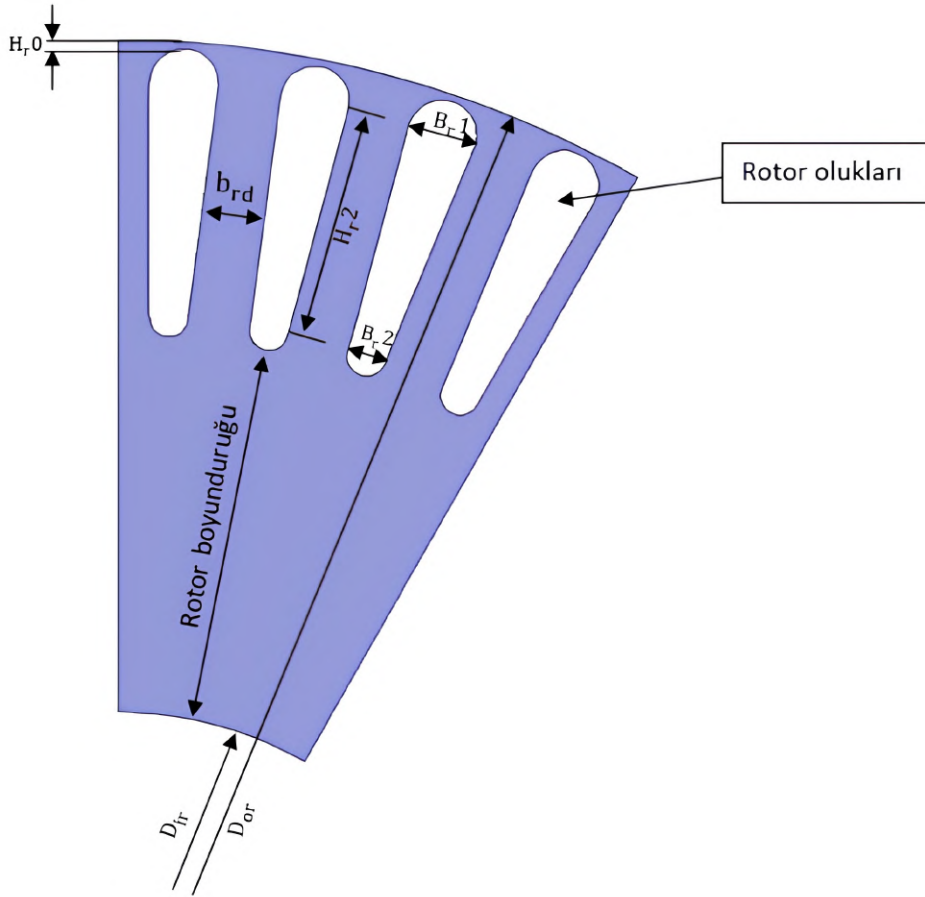
Böylelikle stator dış ve iç çapları, paket boyu, stator oluk sayısı ve bu değerlere bağlı olarak stator oluşuna ait parametrelerin boyutlandırması yapılmış oldu.

Sonraki aşamada ise Tablo 4.3 değerlendirilerek rotor oluk sayısı ve rotor şekilleri belirlenir ve ardından rotor oluk ölçüleri hesaplanır. Şekil 4.6'da açık (a,b,c) ve kapalı (d) rotor oluklarına ait geometriler mevcuttur. Ayrıca Şekil 4.7'de rotor laminasyon geometrisine bir örnek verilmiştir.

Şekil 4.7'de olduğu gibi rotor laminasyonunun paralel dişli üretildiğini varsayalım.



Şekil 4.6 Açık ve kapalı rotor oluk geometrilerinden bazı örnekler



Şekil 4.7 Kapalı rotor laminasyon geometrisine bir örnek ve rotor oluk ölçüleri

Diş genişliğini ifade eden  $b_{rd}$  değerini hesaplamak için manyetik zorlanmayı yani manyetik akı yoğunluğunu kullanmalıyız. Bunun için Tablo 4.4'teki teorik akı yoğunluklarını referans alabiliriz. Bu durumda rotor oluk adımı;

$$\tau_r = \frac{\pi D_{or}}{N_r} \quad (4.17)$$

rotor dış genişliği;

$$b_{rd} = \frac{\varphi_a 2p}{N_r B_{rd} L} \quad (4.18)$$

eşitlikleri ile bulunabilir.

Kapalı oluk tasarımı yapılacak olursa oluk ağzı açıklığını ifade eden  $W_{or} = 0$  mm olarak kabul edilir.  $H_{r0}$  ölçüsü teorik olarak saptanırken yine üretim şartları göz önünde bulundurulmalıdır. Kapalı oluk tasarımı yapılıyorsa, rotor oluklarına iletken (örneğin alüminyum) enjeksiyon prosesi göz önünde bulundurularak muhtemel çatlamları değerlendirerek yeterli kalınlıkta bir değer seçilmelidir. Bu durumda  $H_{r0}$  kalınlığını teorik olarak  $15 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-3}$  [m] aralığında kabul edebiliriz.

Ardından  $H_{r2}$  değeri rotor boyunduruk yüksekliği, istenen rotor oluk alanı ve mil çapı dikkate alınarak seçilmelidir. Bu değer belirlendikten sonra  $B_{r1}$  ve  $B_{r2}$  çapları için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir.

$$B_{r1} = \frac{\pi(D_{or} - 2(H_{r0} + B_{r1}/2))}{N_r} - b_{rd} \quad (4.19)$$
$$B_{r1} = \frac{\pi(D_{or} - 2H_{r0}) - b_{rd}N_r}{\pi + N_r}$$

$$B_{r2} = \frac{\pi(D_{or} - 2(H_{r0} + B_{r1}/2 + H_{r2}))}{N_r} - b_{rd} \quad (4.20)$$

Rotor oluk alanı  $A_r$  şu şekilde hesaplanır;

$$A_r = \frac{(B_{r1} + B_{r2})H_{r2}}{2} + \frac{\pi(B_{r1}/2)^2}{2} + \frac{\pi(B_{r2}/2)^2}{2} \quad (4.21)$$

Rotor oluk alanı ve stator oluk alanı arasındaki ilişkiyi veren eşitlik şu şekildedir;

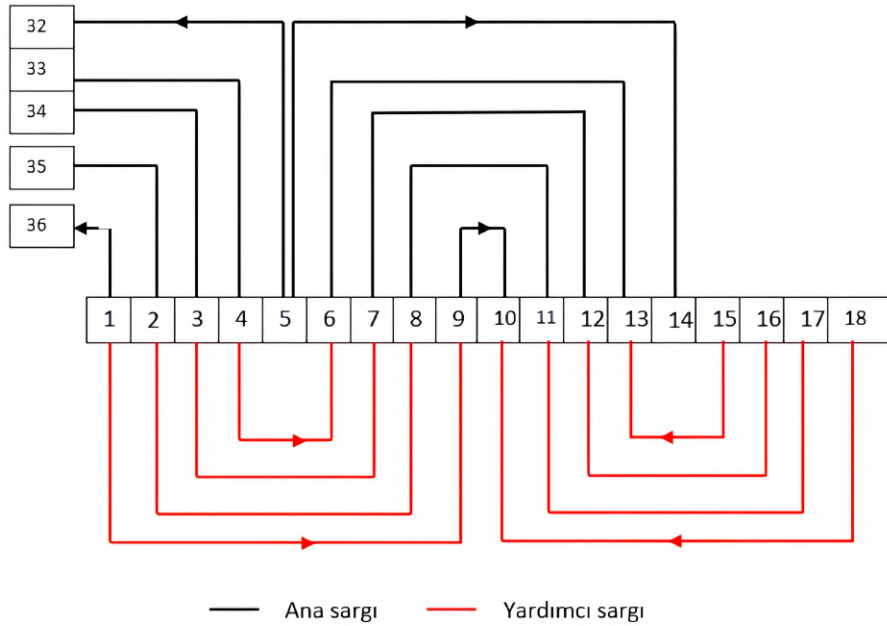
$$A_r = \frac{k_{bar} A_s N_s}{N_r} \quad (4.22)$$

burada  $k_{bar}$  oluk alan faktörünü ifade eder ve genellikle 0,35 – 0,60 arasında bir değer alır [29]. Bu faktörün yüksek seçilmesi demek rotor oluk alanının büyümesi demektir ki bu durumda rotor direnci düşecek ve nominal çalışmada rotor iletken kayıpları da azalacaktır, bunun yanı sıra ilgili faktörün belirlenen aralıkta küçük

seçilmesi de motorun kalkış momentini arttırmaya yönelik olumlu etki yapacaktır [33]. Dolayısıyla rotor parametrelerinin optimizasyonu önemlidir ki bu küçük boyutlu makinelerde daha çok hissedilir. Böylece rotor geometrisi de belirlenmiş olur.

#### 4.1.5 Sarım Sayıları ve Tel Çaplarının Belirlenmesi

Tek fazlı asenkron motorun statorunda tek fazlı sargı bulunurken, rotoru sincap kafeslidir. Bu motorların yol alma karakteristiğinden dolayı 1 faz sargısının (ana sargı) yanı sıra, motorun faydalı moment üreterek yol almasını sağlamak için yardımcı sargı bulunmaktadır. Genel olarak ana sargı stator oluklarının  $2/3$ 'üne sarılır [4] ve tek katmanlı, eşit adımlı olmayan bobinler (yastık sargı) ile sarılır. Şekil 2.8'de 24 stator oluklu 4 kutuplu, yardımcı sargılı bir motorun sarım şekline örnek verilmiştir. Şekil 4.8'de ise 36 stator oluklu, 4 kutuplu, daimi kondansatörlü bir motora ait çift katmanlı başka bir sarım şemasının (simetrik olması sebebiyle 18 oluk verilmiştir) örneği verilmiştir.



**Şekil 4.8** 36 stator oluklu 4 kutuplu çift katmanlı sargı şemasına ait (simetrik yarım) konfigürasyon

Burada kutup başına 9 adet oluk düşmekte (2 faz için asimetrik) ve 5 tanesine ana sargı, 4 tanesine ise yardımcı sargı sarılmaktadır.

$K_{wa}$ ,  $K_{wy}$  sırasıyla ana ve yardımcı sargılara ait sargı faktörleri olmak üzere;

$$K_{wa} = \frac{\sin(q_a \frac{\gamma_s}{2})}{q_a \sin(\frac{\gamma_s}{2})}$$

$$K_{wy} = \frac{\sin(q_y \frac{\gamma_s}{2})}{q_y \sin(\frac{\gamma_s}{2})}$$
(4.23)

$q_a$  ve  $q_y$  sırasıyla ana sargı ve yardımcı sargı için; kutup başına düşen oluk sayısını ifade eder. Örneğin Şekil 2.8'deki sarım şemasında  $q_a = 4$  ve  $q_y = 2$  iken Şekil 4.8'deki sarım şemasında  $q_a = 5$ ,  $q_y = 4$ 'tür.

$$\gamma_s = \frac{\pi}{\left(\frac{\text{oluk}}{\text{kutup}}\right)}$$
(4.24)

Eşitlik 4.24'e göre Şekil 4.8 sargı şeması için  $\gamma_s = \pi/9$  iken Şekil 2.8 sargı şeması için  $\gamma_s = \pi/6$  olarak hesaplanabilir. Ana sargıda endüklenen gerilim  $E_a$  ;

$$E_a = \pi\sqrt{2}\varphi_a N_a K_{wa} f$$
(4.25)

olmak üzere, tek fazlı asenkron motorlar için endüklenen gerilimi hat geriliminin (besleme gerilimi) 0,96 – 0,98 katı kadar kabul edebiliriz [29]. Dolayısıyla ana sargı için sarım sayısı;

$$N_a = \frac{E_a}{\pi\sqrt{2}K_{wa} f \varphi_a}$$
(4.26)

Eşitlik 4.10'daki akı ifadesini 4.26'da yerine koyarsak ve endüklenen gerilimi de hat gerilimi (V) cinsinden yazarsak;

$$N_a = \frac{2p(0,98)V}{\pi 2\sqrt{2}K_{dis} B_\delta L K_{wa} f}$$
(4.27)

eşitliğini elde edebiliriz.

Dolayısıyla oluk başına düşen sarım sayısı ( $n_{sa}$ ) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$n_{sa} = \frac{N_a}{q_a p}$$
(4.28)

Yardımcı sargıya ait sarım sayısının tespiti için dönüştürme oranı  $\alpha$ 'dan (1 – 2 arası seçilebilir) faydalanabiliriz.

$$N_y = \frac{K_{wa} N_a}{K_{wy}} \alpha \quad (4.29)$$

Eşitlik 4.28'de olduğu gibi yardımcı sargı için de oluk başına düşen sarım sayısı;

$$n_{sy} = \frac{N_y}{q_y p} \quad (4.30)$$

ile hesaplanabilir.

$K_{dolgu}$  stator oluk dolgu faktörünü,  $d_a$  ve  $d_y$  sırasıyla ana ve yardımcı sargı tel çapını ifade etmek üzere;

$$\begin{aligned} d_a &= \sqrt{\frac{4A_s K_{dolgu}}{\pi n_{sa}}} \\ d_y &= \sqrt{\frac{4A_s K_{dolgu}}{\pi n_{sy}}} \end{aligned} \quad (4.31)$$

eşitlikleri ile tel çaplarını tespit edebiliriz. Dönüştürme oranını aynı zamanda aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\alpha = \frac{V_y}{V_a} \quad (4.32)$$

Kondansatör gerilimi ( $V_c$ ) ise;

$$V_c = \sqrt{V^2 + V_y^2} \quad (4.33)$$

Bu durumda daimi kondansatör kapasite değeri;

$$C = \frac{I_y}{\omega_c V_c} \quad (4.34)$$

Burada;  $\omega_c = 2\pi f$  olarak hesaba katılır. Kalkış moment oranının düşük

gelmesi durumunda elde edilen kapasite değerinden büyük bir kondansatör seçimi yapılabilir.

# 5

## SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

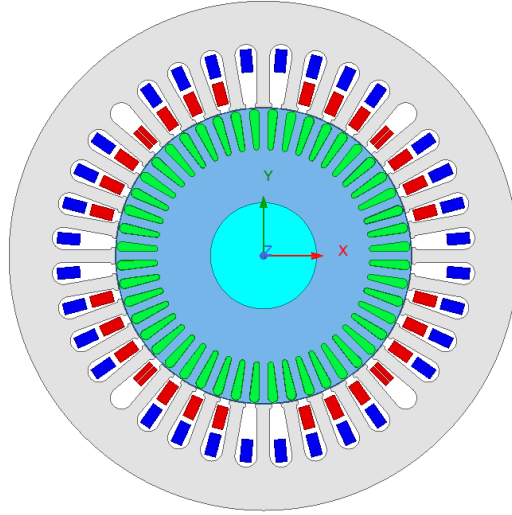
---

Gelişen teknoloji, herhangi bir mühendislik dalında yapılan tasarımların hem hızlanmasını hem de daha güvenilir olmasını sağladı. Dolayısıyla elektrik makinelerinin tasarımında da bilgisayar destekli tasarım ve analiz programlarının kullanımı arttı. Asenkron makinelerin; sabit durum ve dinamik modeli ve simülasyonu, tasarım çıktıları ile prototip test sonuçlarının örtüşmesi ve dolayısıyla zaman ve maliyet kaybından kaçınılması konusunda önem arz etmektedir. Bu elektromanyetik alan analizi için sayısal yöntemler oldukça uygundur. Bu konuda geliştirilen; moment yöntemi (MY), montecarlo yöntemi (MCY), sonlu fark yöntemi (SFY) ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) gibi birden fazla yaklaşım mevcuttur [34]. Bu tez çalışmasında ise tasarım süreci, Ansys/Maxwell (RMxpvt ve 2D) programı ile parametrik analizler ve ardından SEY kullanılarak ilerletilmiştir.

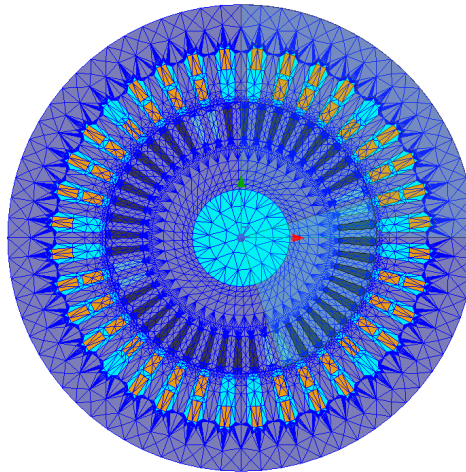
SEY; bilgisayar tabanlı sayısal bir teknik olup Maxwell eşitliklerinden yola çıkarak, kullanılan malzemeler, sınır ve kaynak koşulları çerçevesinde belirli bir model için elektromanyetik alan problemlerini yüksek doğruluk ve hassasiyetle çok kısa zamanda çözmeye yarar [35, 36]. Bir asenkron motorda aksel yön boyunca manyetik parametrelerin değişimi ihmal edilebilir seviyededir ve bu nedenle motorun simülasyonu için 2 boyutlu bir model oluşturulabilir [37]. Bu yöntem bir elektrik makinesinde; manyetik akı yoğunluğu, akı çizgileri (akı yolları), moment, endüktans gibi bir çok parametreyi hesaplayıp, optimize edebilir. Yine bu yöntem tasarımlara geometrik şekil, malzeme özellikleri, sınır koşulları gibi konularda önemli ölçüde esneklik sağlar [35]. Öncelikle RMxpvt tasarımında; söz konusu motor için faz ve kutup sayısı, stator ve rotor boyutları, kontrol yöntemi, stator sargısı, rotor iletkenleri, nüve malzemesi gibi belirli parametrelerin girişi yapılır ve talep edilen analiz ayar edilir. Analiz sonuçları uygun görüldüğü takdirde Maxwell 2D yardımıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi çok sayıda ağ ile 2 boyutlu model oluşturulur ve çözümlenir yapılır.

Geometrik şeklin üretim ile uygunluğundan emin olunduktan sonra manyetik malzeme seçimi yapılır. Bu manyetik malzemenin B – H eğrisi ve nüve kayıpları

kat sayıları programa tanımlanır. Aynı şekilde rotor baralarında kullanılan iletken malzeme iletkenlik değeri ile birlikte atanır. Burada rotor milinde kullanılan malzeme manyetik çekirdekte kullanılanlardan farklı ise mil için de kullanılan malzeme tanımlaması yapılmalıdır. Motorun nominal çalışmada transient rejime oturması için gerek ve yeter analiz süresi belirlendikten sonra nüve kayıplarının gerçekleşeceği bölgeler de programda 'Nüve Kayıp Ayarı (Set Core Loss)' sekmesinden tayin edilir. Rmxprt referans alınarak 2D model oluştururken sınır koşulları, stator sargıları vb program tarafından otomatik oluşturulacaktır. Aynı şekilde ağ modeli de program tarafından oluşturulacaktır fakat daha hassas ve doğruluk payı yüksek bir analiz isteniyorsa bu ağ modeli genişletilebilir. Bu tanımlama ve ayarlamalar yapıldıktan sonra analiz başlatılabilir.



**Şekil 5.1** Bir asenkron motorun Maxwell 2D ile 2 boyutlu modellemesi



**Şekil 5.2** Bir asenkron motorun ağ modeli

## 5.1 SEY ve Maxwell Denklemleri

SEY ile analizde Maxwell denklemlerinden yola çıkıldığını söylemiştik. Bu bölümde ilgili eşitliklerden bahsedeceğiz.

$$\nabla \times H = j + \partial d / \partial t \quad (5.1)$$

$$\nabla \times E = -(\partial b / \partial t) \quad (5.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (5.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5.4)$$

Burada E ile D sırasıyla elektrik alan şiddeti [V/m] ve elektrik akı yoğunluğunu (C/m), H ile B ise sırasıyla manyetik alan şiddetini (A/m) ve manyetik akı yoğunluğunu (T), j ile  $\rho$  ise sırasıyla akım yoğunluğunu ve elektriksel yük yoğunluğunu göstermektedir. Yukarıdaki eşitlikleri incelersek, elektriksel ve manyetik alanların zamanla değişmediği durumlarda eşitliklerin sağ tarafı 0 olacak ve aşağıdaki hali alacaktır;

$$\nabla \times E = 0 \quad (5.5)$$

$$\nabla \times H = j \quad (5.6)$$

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (5.7)$$

# 6

## REFERANS MOTORUN MODELLENMESİ, ANALİZ VE TEST SONUÇLARI

---

### 6.1 Giriş

Bu tez çalışmasında; IE1 verim sınıfında, 80 tip, 0,37 kW anma gücünde, 4 kutup tek fazlı asenkron motor referans olarak alınmıştır. Söz konusu motor ticari faaliyet kapsamında; daimi kondansatörlü, santrifüj anahtarlı çift kondansatörlü ve elektronik röleli çift kondansatörlü olarak seri üretimi yapılan ve fan, redüktör, sirkülasyon pompası gibi uygulamalarda tercih edilen endüstriyel bir motordur. Motorun ile ilgili bazı bilgiler Tablo 6.1’de verilmektedir.

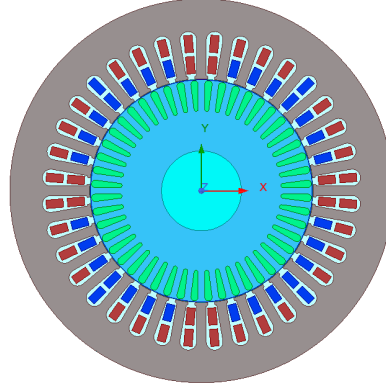
**Tablo 6.1** Referans motorun tasarımına ait bilgiler

| Parametre          | Değer                  |
|--------------------|------------------------|
| Çıkış Gücü (kW)    | 0,37                   |
| Gerilim (V)        | 220                    |
| Frekans (Hz)       | 50                     |
| Kutup Sayısı       | 4                      |
| Üretim Şekli       | Daimi<br>Kondansatörlü |
| $N_a/N_y$          | 67/70                  |
| $C_{daimi}(\mu F)$ | 15                     |

### 6.2 Motorun Modellenmesi

Motorun stator ve rotor yapılarına ait geometrik büyüklükler, üretimde kullanılan malzeme bilgisi, stator sargılarına ait bilgiler ve kullanılan kondansatör değeri programa işlenerek elektromanyetik analiz için 2D yapısı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan bu analizde, motorun gerek durağan halinde gerekse geçici rejime ait analizleri çok hızlı bir şekilde sonuçlandırılıp; verim, kalkış moment oranı, manyetik malzeme doyumu seviyesi ve etkileri gibi performans hesaplamaları ve yorumlamaları yapılabilir. Referans motorun tasarımına ait 2D

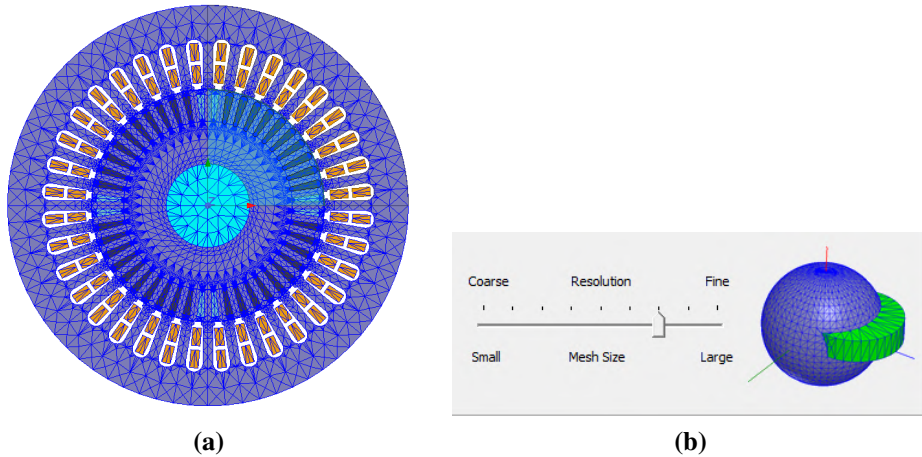
yapısı Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1 Referans motora ait 2D model

Maxwell 2D SEY ile analiz yapılırken stator ve rotor nüvelerinde kullanılan malzeme ataması yapılır. Bu malzeme ataması ile birlikte nüve kayıplarını (core loss) hesaplabilmek için malzeme tedarikçisinden elde edilen katsayılar programa tanımlanır. Toplam nüve kayıpları içerisinde; histerezis kayıplarını ( $k_h$ ), eddy akım kayıplarını ( $k_c$ ) ve aşırı kayıpları (excessive loss) ( $k_e$ ) içerir. Ve bu kayıplara ait katsayıları programa tanımlanır.

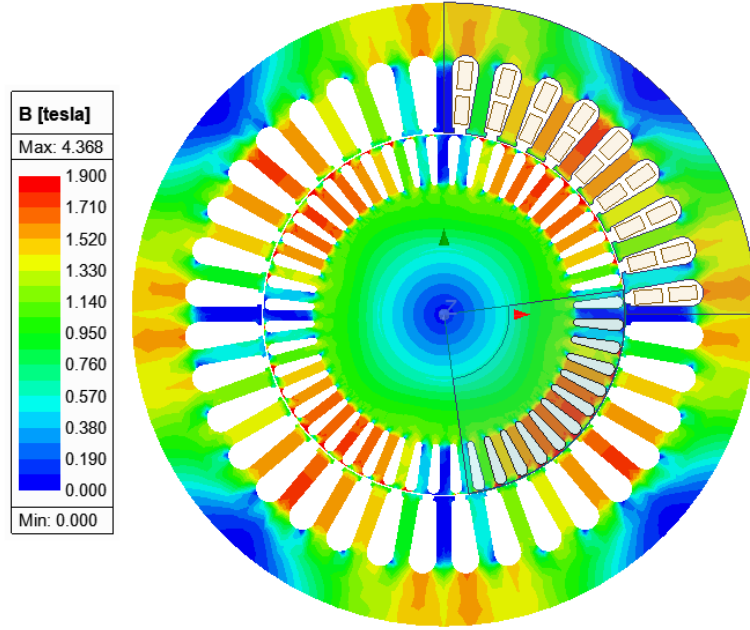
SEY ile analizde motorun her bir noktasında iterasyon yapabilmek için sınır koşulları ile birlikte ağ yapısı oluşturulması gerektiğinden bahsetmiştik. Konstrüksiyon üzerinde boşluk kalmaması için ağ yapısı oluşturulurken üçgen elemanlar kullanılır. Bu elemanların sayısının fazla olması hassasiyetin yüksek olmasını dolayısıyla daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar. Fakat analiz süresinin de uzamasına neden olur. Uygun ağ modellemesi bu iki kritere göre seçilmelidir. Referans motor modellenirken kullanılan ağ yapısı ve ayarı ise Şekil 6.2’de görülmektedir.



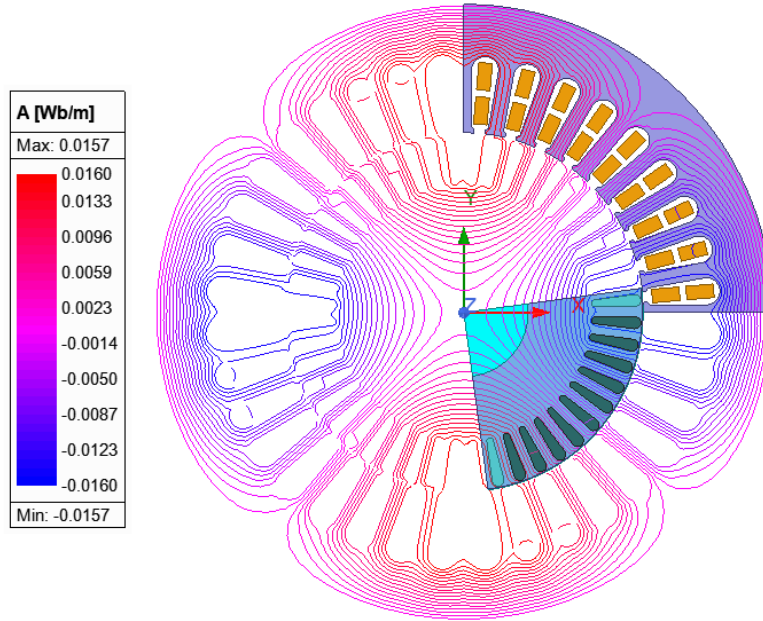
Şekil 6.2 Referans motora ait (a) ağ yapısı ve (b) ağ sayısının ayarlanması

### 6.3 Referans Motorun Analiz ve Test Sonuçları

Bu bölümde SEY analiz çıktıları verilmiştir. Motor performansını değerlendirirken; manyetik akı yoğunluğu, sargı akımları, akım yoğunlukları, akı çizgileri (akı yolları), güç kayıpları, moment gibi sonuçlar göz önüne alınarak yorum yapılır. Dolayısıyla bu en önemli parametrelere ait referans motor çıktıları aşağıda verilmiş olup test sonuçları ile kıyaslanmıştır.



Şekil 6.3 Referans motora ait manyetik akı yoğunluğu

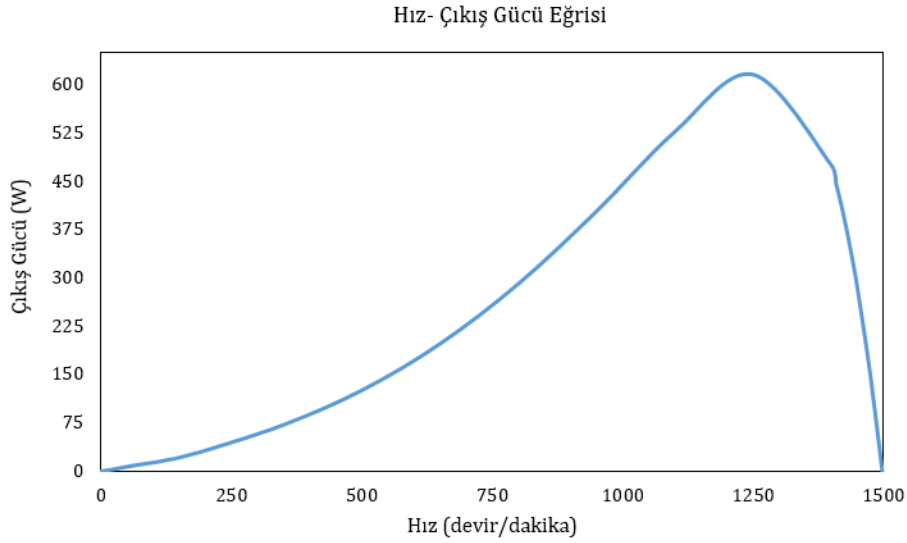


Şekil 6.4 Referans motora ait manyetik akı çizgileri

Şekil 6.3 ve 6.4'te IE1 verim sınıfındaki bu motorun manyetik akı yoğunluğunu ve

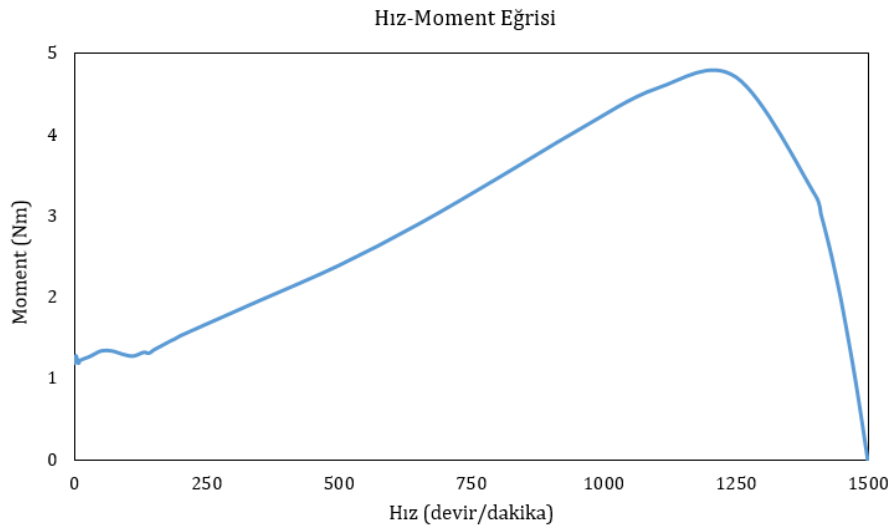
akı çizgilerini görebiliriz. Kullanılan manyetik malzemenin demanyetizasyon sınırı yaklaşık olarak 1,8 – 1,9 T arası diyebiliriz ki buna istinaden referans motorun özellikle rotor dişleri başta olmak üzere bazı kısmi noktalarda doyuma veya doyuma yakın bölgelerde çalıştığını söylemek mümkündür.

Şekil 6.5 geçici rejim analizinden elde edilmiş motora ait çıkış gücü eğrisini vermektedir. Bu eğriden motorun anma (nominal) hızını yani 370 W çıkış gücüne karşılık gelen hızı okuyabiliriz.



**Şekil 6.5** Referans motorun SEY analizine ait Hız – Çıkış gücü eğrisi

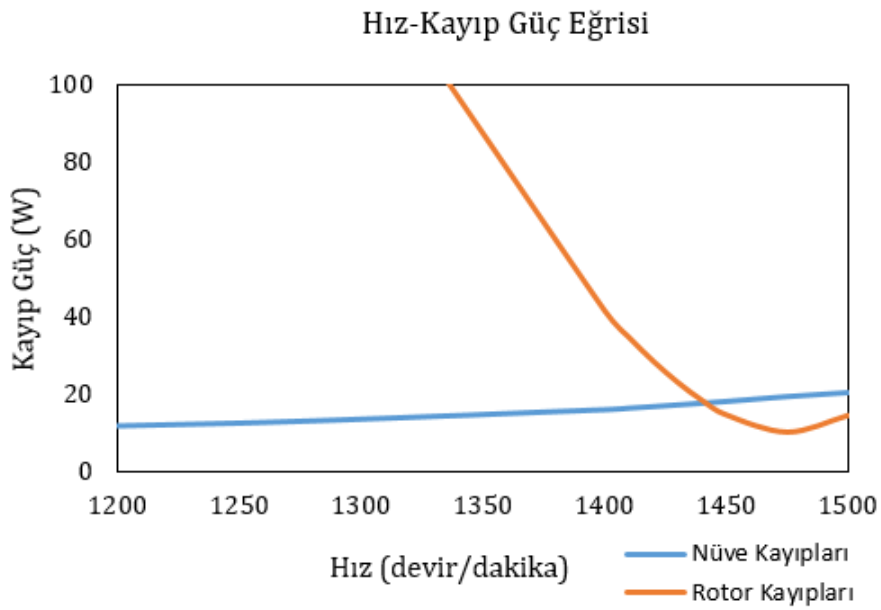
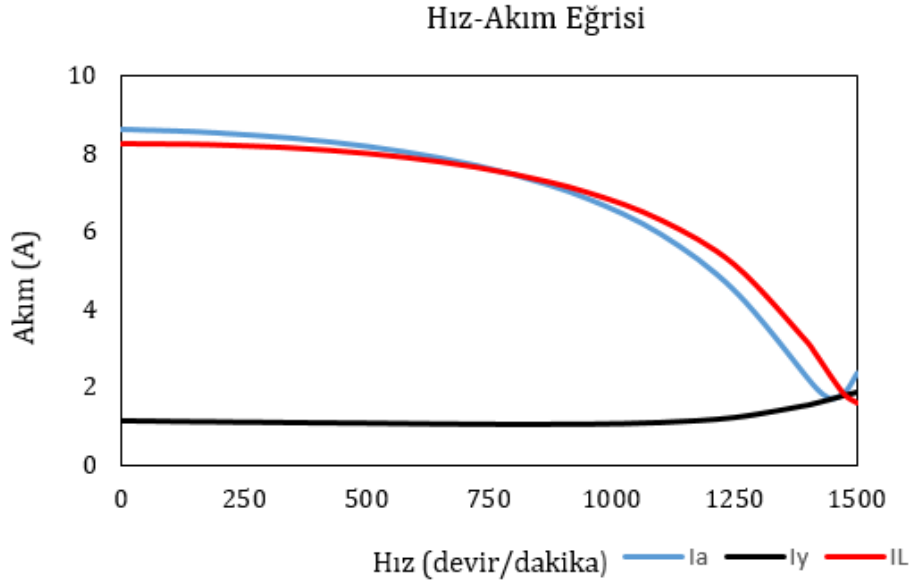
Aşağıda sıralanan diğer şekillerde ise; bu anma hızına karşılık gelen değerleri okuyarak, motorun nominal çalışma esnasındaki parametre değerlerini belirleyebiliriz.



**Şekil 6.6** Referans motorun SEY analizine ait Hız – Moment karakteristiği

Motorun hız (devir/dakika) değerleri belirli aralıklarla parametrik olarak atanmış ve her bir hız değerinde 0,8 sn'lik periyotlar ile SEY kullanılarak geçici rejim analizi yapılmış ve toplamda 40 farklı analizin bir araya getirilmesiyle Şekil 6.6 elde edilmiştir. Hıza bağlı olarak değişen bütün eğriler bu yöntem vasıtasıyla elde olunmuştur. Hız – Moment eğrisini inceleyerek motora ait kalkış (yol alma) moment oranı (KMO), semer momentini ve devrilme momentini öngörebiliriz.

Şekil 6.7'de akım ve kayıp güç eğrileri verilmiştir.



**Şekil 6.7** Referans motorun SEY analizine ait (a) Hız – Akım eğrisi ve (b) Hız – Kayıp güç eğrisi

Bu şekillerde motorun 0,37 kW çıkış gücünü verdiği anma hızında hem ana hem de yardımcı sargıya ait akım değerlerini ve güç kayıplarını görebiliriz. Bu değerler hem verim hesaplamasında hem de akım yoğunluğu hesaplamasında kullanılır. Tablo 6.2’de motorun analiz çıktıları ve tip test sonuçları kıyaslanmış, aradaki farklar IE2 motor tasarımı için de göz önüne alınmıştır.

**Tablo 6.2** Referans motorun SEY analiz ve tip test sonuçlarının kıyaslanması

| <b>Parametre</b>   | <b>SEY Analizi</b> | <b>Ölçülen Değer</b> |
|--------------------|--------------------|----------------------|
| Hız (devir/dakika) | 1428               | 1414                 |
| Moment (Nm)        | 2,48               | 2,5                  |
| Çıkış Gücü (kW)    | 0,37               | 0,37                 |
| Verim (yüzde)      | 65,5               | 64,2                 |
| KMO                | 0,48               | 0,54                 |
| Güç Faktörü        | 0,99               | 0,98                 |
| $I_L(A)$           | 2,6                | 2,658                |
| $I_a(A)$           | 1,82               | 1,976                |
| $I_y(A)$           | 1,63               | 1,708                |

## IE2 VERİMLİLİKTE TEK FAZLI ASENKRON MOTOR TASARIMI

---

### 7.1 Giriş

Dünya genelinde enerji kullanımını olan her alanda verimlilik çalışmaları ile çevresel koruma kapsamında üretim ve tüketim sahalarında temiz enerji yaklaşımları değer kazanmaya devam etmektedir. Elektrik enerjisi tüketiminin ciddi oranda yoğunlaştığı elektrik makineleri için de bu yönde adımlar atılmaktadır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC); 2014 yılında hem tek fazlı hem de üç fazlı alternatif akım motorları için 60034-30-1 çerçevesinde, farklı anma güçlerine göre yeni verim sınıfları yayınladı ve bunları düşük verimden yüksek verime doğru IE1-IE2-IE3-IE4 olarak sıraladı. Bu kapsamda temiz enerji tüketimi, arz – talep arasında denge ve en önemlisi düşük maliyetli tüketim sağlanması amaçlanmıştır. Dolayısıyla tek fazlı asenkron motorlar için istenen verim sınıfı minimum IE2 değerlerine revize edilmiştir. Türkiye’de ve dünyada elektrik motoru üreticileri her tip, güç ve faz sayısındaki motorlarının tasarım ve üretimlerini bu şartlara göre düzenlemek için Ar-Ge çalışmalarını yürütmektedir. Yapılarının sadeliği, üretim ve bakım maliyetlerinin azlığı gibi birçok avantajı sayesinde asenkron motorlar yüz yıldan fazla bir süredir endüstriyel uygulamalarda tercih edilmekte ve bu motorlar tek fazlı ya da çok fazlı şekilde üretilmekle birlikte, çok fazlı motorlar özel bir müşteri talebi olmadığı sürece 3 fazlı üretilmektedir. Tek fazlı motorlar yapısal olarak 3 fazlı motorlara göre daha sade ve üretimi kolay olsa da asimetrik yapıları nedeniyle çalışma koşulları daha karmaşıktır ve bu şartlar tasarım – prototip doğrulama sürecini nazik bir durum haline getirmektedir. Bütün bu mecburiyetlerin yanı sıra, mümkün mertebe düşük maliyetli üretim ve mevcut üretim tezgahlarının yeni seri motorlara uygunluğu da en az verimlilik kadar önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında endüstride kullanılan 80 tip, 0,37 kW, 4 kutuplu ve IE1 verim sınıfındaki daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor referans alınmış olup, ilgili motora ait modelleme Bölüm 6’da sunulmuştur. Bu bölümde ise referans motorun verim iyileştirme çalışması yapılırken maliyeti arttırmamaya özen

gösterilmiş ve motorun diğer karakteristik özellikleri için de optimum tasarım yoluna gidilmiştir. IEC standartlarına göre 0,37 kW değerinde 80 tip 4 kutup 50 Hz'lik bir motorun minimum – ortalama – maksimum verim değerleri yüzde 68,61 - 70,65 - 72,70 olmalıdır. Bunun için öncelikle tek fazlı asenkron motorun verimini ve bir diğer önemli özellik olan kalkış moment oranını etkileyen faktörler çeşitli makale ve çalışmalar ve analizle yardımıyla incelenmiştir. İlk olarak Rmxprt vasıtasıyla verimi ve KMO'yu etkileyen elemanlar parametrik analize tabi tutulmuş, ardından birden fazla seçilen farklı tasarımlar SEY ile analiz edilmiş ve sonuçlar değerlendirilerek optimum tasarım tespit edilmiş, son olarak prototip üretilerek laboratuvar testleri ve saha testleri yapılmıştır. Bu tasarım süreci de alt başlıklar halinde incelenmiştir.

## **7.2 Tasarım Parametrelerinin Motor Performansına Etkileri**

Bu bölümde optimizasyon çalışması için, bazı parametrelerdeki değişimlerin motor çıkış karakteristiğini ve performansını nasıl etkilediği incelenmiş ve bu parametrelerin saptanma süreci anlatılmıştır.

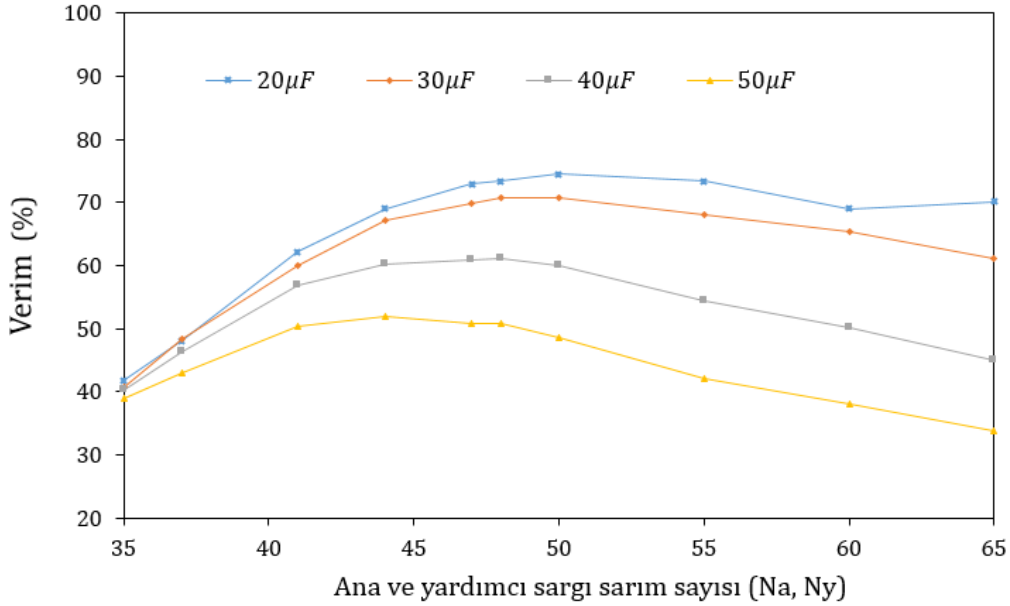
### **7.2.1 Kondansatör Seçiminin Motor Performansına Etkileri**

Bölüm 2.4 ve takibinde kondansatörlü motorların çalışma prensibi ve yapıları anlatılmıştı. Bu bölümde çalışılan yapı daimi kondansatörlü motor yapısıdır. Bu tip motorlarda birbirine paralel bağlanan ana ve yardımcı sargılar ve yardımcı sargıya seri bağlanan kondansatör vardır. Yardımcı sargı ve kondansatör devreden ayrılmadığı için diğer yapılardaki gibi santrifüj anahtara ya da elektronik röleye ihtiyaç yoktur. Kondansatörün daima devrede kalması motorun hem kalkış (yol alma) hem de nominal çalışma koşullarında performansını doğrudan etkilemesine neden olur. Bu konuyla ilgili olarak Vasilija Sarac ve Neven Trajchevski yaptıkları çalışmada kapasite değerlerinin tek fazlı asenkron motor performansına etkilerini araştırmıştır [25]. Bir motorda farklı kapasite değerlerinde kondansatörler kullanılarak elektromanyetik analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak; kapasite değeri arttırıldıkça anma momenti sabitken KMO'nun arttığını fakat anma yükünde verimin azaldığını kaydetmişler, güç faktörünün ise arttığını gözlemlemişlerdir.

Bu çalışmada da öncelikle kondansatör değerleri farklı sarım sayılarına göre parametrik olarak atanmış ve analiz sonuçları yorumlanmıştır. Yeni tasarlanan motorun verim değerinin referans motorun veriminden daha yüksek olması için stator bakır kayıplarının azaltılması amaçlanmış dolayısıyla direnç değerlerinin daha düşük olması için sarım sayılarının maksimum değerleri de referans motorun

sarım sayıları kadar ayarlanmıştır.

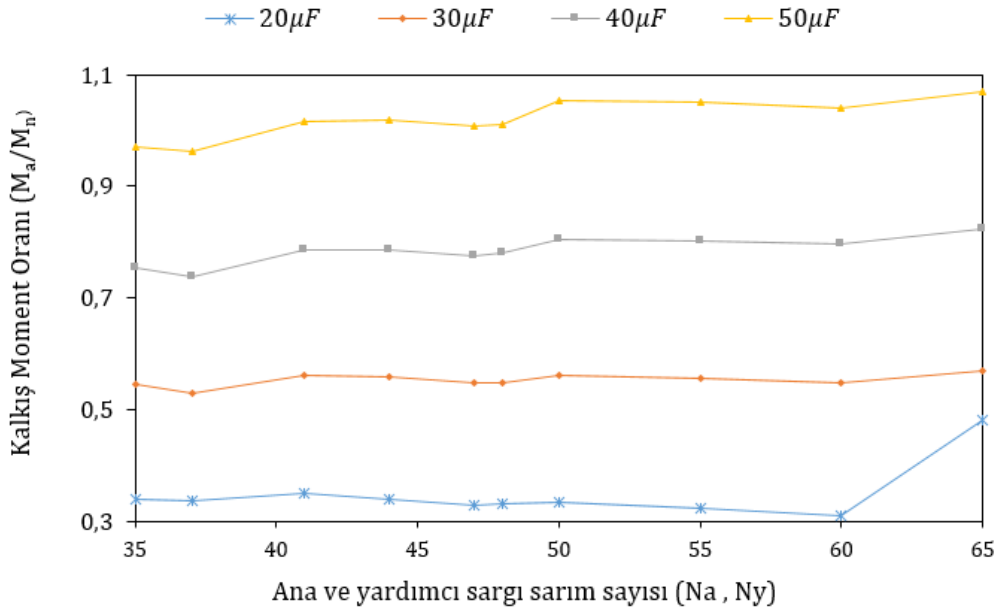
Şekil 7.1 incelenecek olursa ana ve yardımcı sargıların her ikisinde de aynı sarım sayısının kullanıldığı ve her sarım sayısı ( $N_a$ , ana sargı için oluk başına düşen sarım sayısı;  $N_y$ , yardımcı sargı için oluk başına düşen sarım sayısı) için farklı kapasiteye sahip kondansatörlerin analizlerinin yapıldığı görülebilir. Bu analiz sonuçlarına istinaden; sarım sayısı olarak 30-45 sipir arasında verimin düşük kaldığı, 45 – 55 sipir arasında verimin artışa geçtiği fakat 54 sipirden sonra tekrar azalmaya başladığı görülür. Bu sarım sayılarına karşılık kullanılan kondansatörler incelenirse, her şartta  $20 \mu F$  değerinde kondansatörün en yüksek verimi yakaladığı görülecektir. Bu durumda  $20 \mu F$  kondansatör baz alınarak sarım sayıları belirlenebilir. Fakat kondansatörün, tek fazlı asenkron motordaki bir diğer önemli etkisi ise kalkış momenti üzerindedir ki, daimi kondansatörlü motorda bu değer çok daha önemlidir. Dolayısıyla benzer bir analiz de kalkış moment oranları için tekrarlanmalı ve optimum kapasite değeri seçilmelidir. Şekil 7.2’de söz konusu analize ait grafiği görebiliriz.



**Şekil 7.1** Rmxprt parametrik analizden elde edilen sonuçlara göre farklı sarım sayıları ve kondansatör değerlerinin verime etkileri

Tek fazlı asenkron motorların en büyük dezavantajı kalkış moment değerlerinin düşük olmasıdır ki bu yüzden genellikle küçük güçlerde üretilir. Özellikle yardımcı sargılı ve daimi kondansatörlü tiplerde KMO çok daha düşük fakat bununla birlikte üretim maliyeti de daha azdır. Yüksek kalkış momenti gerektiren uygulamalar için ise Bölüm 2.4.2’de bahsedilen çift kondansatörlü motorlar tercih edilerek söz konusu dezavantaj ortadan kaldırılmaktadır. Dolayısıyla endüstride kullanılan daimi kondansatörlü motorların KMO’ları en az seviyede 0,45 – 0,60 arasında

olması tasarım yapılırken göz önünde bulundurulacak bir kriterdir. Yani optimum tasarım için verim değeri yüzde 68,61'in üzerinde olacak, KMO en az 0,45 olacak (bu değer saha testleri neticesinde belirlenmiştir) ve referans motora göre maliyet farkı minimum düzeyde tutulacak şekilde çalışılmalıdır. Şekil 7.2 incelenecek olursa KMO bağlamında en iyi sonucu doğal olarak  $40 \mu F$  ve  $50 \mu F$  kapasite değerleri vermektedir. Fakat bu kapasiteler Şekil 6.1'de incelenirse verim değeri yüzde 60'ın altında kalmaktadır. Geriye kalan iki kondansatör değeri içinden  $20 \mu F$  kapasiteye sahip kondansatör ile süreç ilerletilmiştir. Sonraki bölümlerde de açıklanacağı üzere kalkış momentini iyileştirmek için yalnızca kondansatör değil sarım sayıları da revize edilebilir. Bu çalışma verim iyileştirme ve maliyet odaklı bir çalışma olduğu için  $20 \mu F$  tercih edilmiştir.



**Şekil 7.2** Rmxprt parametrik analizden elde edilen sonuçlara göre farklı sarım sayıları ve kondansatör değerlerinin kalkış moment oranına etkileri

### 7.2.2 Stator Sargısı Sarım Sayılarının Motor Performansına Etkileri

Optimizasyon çalışmaları kapsamında; tasarlanacak yeni laminasyonların seri üretimde kullanılabilmesi için yeni kalıplara ihtiyaç olacağından ve maliyet farkı doğacağından laminasyon değişikliğine gidilmemiş, mevcutta bulunan stator ve rotor laminasyonları kullanılmış ve dolayısıyla sargı optimizasyonu üzerinde yoğunlaşarak çalışma sürdürülmüştür. Sarım şablon maliyetinden kaçınmak için referans motorun sarım şablonu aynı şekilde kullanılmış, sarım sayıları parametre atanarak analizler yapılmış, birden fazla ve optimum değere en yakın sarım sayıları belirlenmiş ve stator oluşu dolgu faktörü göz önünde bulundurularak bu sarımlar için tel çapları tayin edilmiştir. Bölüm 2'de anlatıldığı gibi tek fazlı asenkron

motorlarda ana ve yardımcı sargı olarak adlandırılan, birbirine paralel iki sargı bulunmaktadır. IEC regülasyonu yayınlanana kadar söz konusu motorlar IE1 verim seviyesinde ve tek katmanlı eş merkezli sargılar kullanılarak üretiliyordu, sinüzoidal sargı elde edebilmek için her bir oluktaki sarım sayıları farklı yapılırdı ki üç fazlı motor ile arasındaki önemli farklardan biri de bu özelliğidir [38]. Şekil 7.3'te bu çalışmada kullanılan sargıya bir örnek görülmektedir.

Fakat bu çalışmadaki referans motor ve yeni tasarlanan motorun rotor başta olmak üzere laminasyon özellikleri de göz önüne alındığında kalkış momentleri çok düşük geldiği için çift katmanlı sargı kullanılmıştır. Bir önceki bölümde kondansatörün hem verime hem de momente etkileri incelenmiş ve kıyaslamalar neticesinde verim değerleri ve maliyet göz önüne alınarak 20  $\mu F$  kapasiteye sahip kondansatör tercih edilmişti. Bu bölümde ise aynı karşılaştırmalar sarım sayıları için yapılacak ve elde edilen grafikler yorumlanacaktır. Bu doğrultuda Şekil 7.4'te sarım sayıları ve verim arasındaki ilişkiyi gösteren grafik bulunmaktadır.

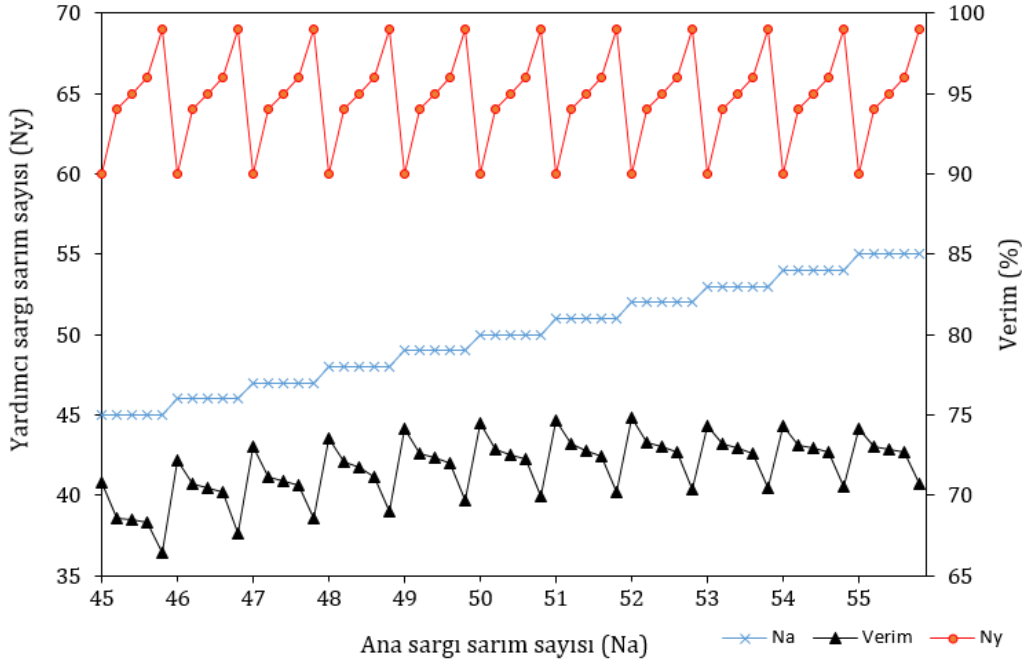


**Şekil 7.3** Eş merkezli sargıya bir örnek

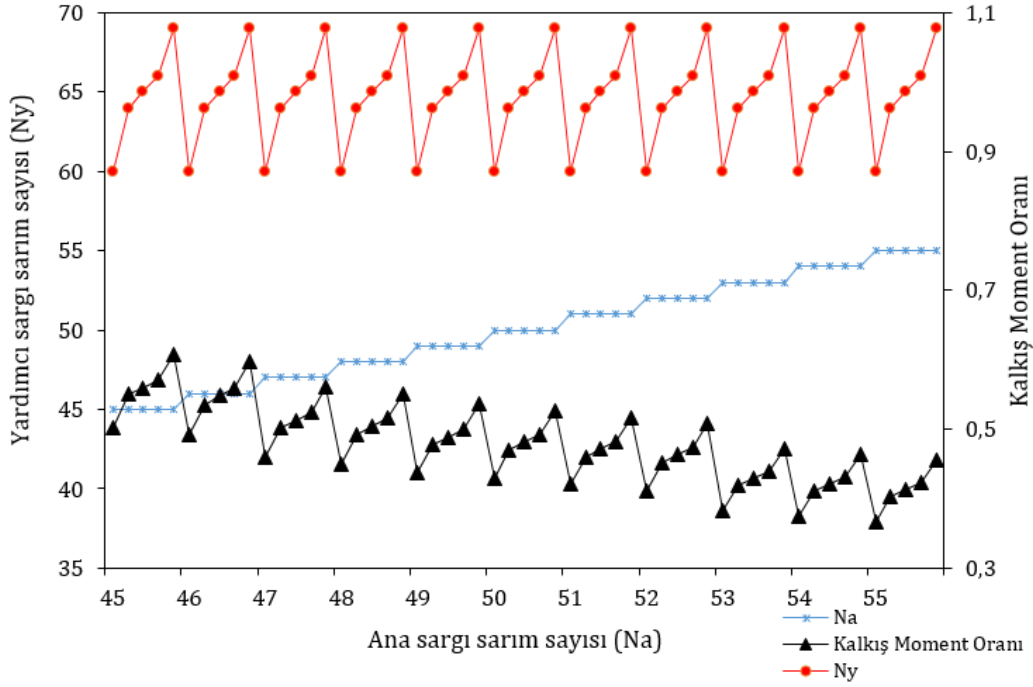
Ana ve yardımcı sargılara kendi içlerinde ayrı ayrı farklı sarım sayıları atanmış, ayrıca iki sargının sarım sayıları da birbirinden farklı yapılmıştır. Şekil 7.4 incelenecek olursa; ana sargının herhangi bir sabit sarım sayısında, örneğin 49 sipirde, yardımcı sargının sarım sayısı 60-69 sipir arasında artış göstermekte ve bu aralıkta verim değeri yüzde 74,11'den yüzde 69,67 değerine kadar kademeli şekilde düşüş sergilemektedir. Diğer taraftan yardımcı sargı sarım sayısını 60 sipirde sabit tutup ana sargı sarım sayısını 45 sipirden 55 sipire kadar arttırsak verim değerinin de yüzde 70,78'den yüzde 74 seviyelerine kadar yükseldiğini gözlemlemek mümkündür. Bu grafikten şu sonuca varabiliriz; belirli

bir kondansatör değerinde ve kullanılan sarım şemasında, ana sargı sarım sayısı verim ile doğru orantılı iken yardımcı sargı sarım sayısı ters orantılıdır. Optimum tasarım için elde edilen bu sonuç muhakkak göz önünde bulundurulmalı fakat KMO istenilen seviyede olmadığı sürece verim her ne kadar yüksek olsa da kullanıcı talebini karşılayamayacağı için seri üretimi mümkün olmayacaktır. Dolayısıyla aynı karşılaştırma grafiği KMO için çizdirilerek her iki karakteristiğin de optimum olduğu noktalar belirlenmelidir. Bu doğrultuda Şekil 7.5'te söz konusu grafik verilmiştir.

Her iki sargı için sipir sayıları değiştirilmeden benzer parametrik analizler kalkış moment oranı için yapılmıştır. Şekil 7.5 incelenecek olursa; ana sargının sarım sayısını örneğin 52 sipirde sabit tutarak yardımcı sargının sarım sayısını 60 sipirden 69 sipire kademeli olarak yükselttiğimizde KMO'nun arttığını, diğer taraftan yardımcı sargının sarım sayısını 60 sipirde sabit tutarak ana sargının sarım sayısını 45 sipirden 55 sipire kademeli olarak arttırdığımızda kalkış moment oranının 0,502 değerinden 0,366 değerine düştüğünü gözlemleyebiliriz. Bu grafikten şu sonuca varabiliriz; tek fazlı asenkron motorun belirli bir kondansatör değeri ve sarım şemasında ana sargı sarım sayısı kalkış moment oranı ile ters orantılı iken yardımcı sargı sarım sayısı doğru orantılıdır. Şekil 7.4 ve 7.5 birlikte göz önüne alınırsa; tek fazlı asenkron motorda verim ve KMO ters orantılıdır. Bu parametrik analizler yardımıyla sarım sayılarının motor performansına etkilerini görmüş olduk.



Şekil 7.4 Ana ve yardımcı sargı sarım sayıları ile verim arasındaki ilişki



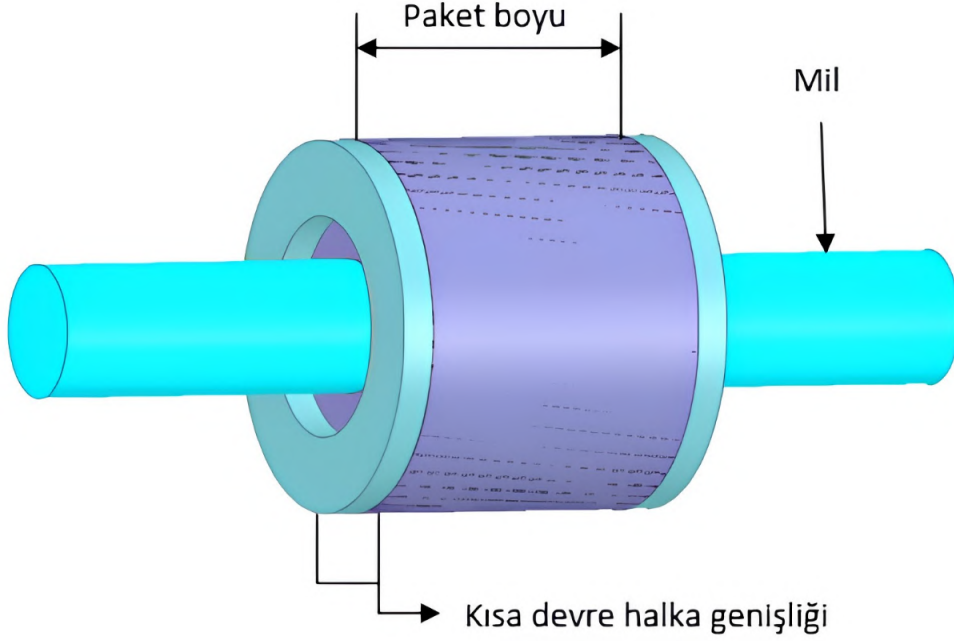
Şekil 7.5 Ana ve yardımcı sargı sarım sayıları ile KMO arasındaki ilişki

### 7.2.3 Kısa Devre Halkalarının Motor Performansına Etkisi

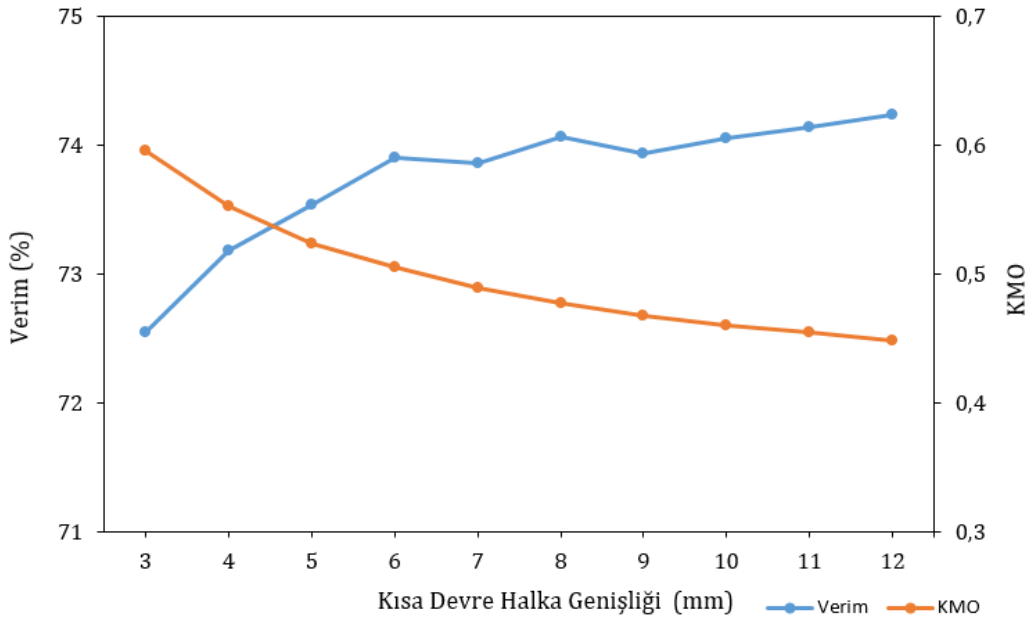
Sincap kafesli asenkron motorlar rotor yapılarında genellikle alüminyum kullanılan iletken baralara sahiptir. Bu baralar çalışma prensibi gereği yine aynı malzeme kullanılan halkalar ile kendi üzerinden kısa devre edilirler. Seri üretim bandına bu kısa devre halkaları için kalıplar üretilerek alüminyum enjeksiyon prosesi esnasında bu halkalarda basılmış olur. Rotor akımlarının izlediği yol üzerinde bir direnç oluşturan bu halkalar Şekil 7.6'da gösterilmektedir. Dolayısıyla bu halkaların genişliği de motorun bazı performansları etkilemektedir. Rmxprt üzerinden yapılan parametrik ve numerik analiz sonuçları da Şekil 7.7'deki gibi karşılaştırılmış ve kısa devre halkalarının etkisi gözlemlenmiştir. Referans motorun halka genişliği 6 mm'dir. Bu değeri; belirli bir sarım sayısında, 3 mm'den 12 mm'ye kadar değiştirerek halka genişliğinde değişiklik yapıp yapılmamasına karar vermek için incelemeler yapılmıştır.

Şekil 7.7 incelenecek olursa açıkça görülür ki kısa devre halka genişliği motorun en önemli iki çıkış karakteristiğini oldukça etkilemektedir. Genişlik değeri belirlenirken bu iki karakteristik ile birlikte, üzerinde oluşacak akım yoğunluğu da göz önüne alınmalıdır. Halkanın toplam alanı üzerindeki akım yoğunluğu fazla olursa sürekli çalışma durumunda halkaların erimesi gibi arızalar ile karşılaşmak mümkündür. Eğriden de görüleceği üzere verim değeri ilgili parametre ile doğru orantılı değişim gösterirken, KMO ters orantılı bir ilişki içindedir. Daha önceki karşılaştırma çalışmalarında olduğu gibi burada da verim ve KMO arasında kesin

bir ters orantı ortaya çıkmaktadır. Halkalarda erime riskine karşın genişliği 5 mm altına düşürmemek doğru olacaktır, 7 mm ve üzerine çıktığında ise KMO 0,45 değerinin üzerinde olsa da azalmaya başlamıştır. Ayrıca Rmxprt ve SEY analizi arasındaki hata payı, genişliğin değiştirilmesi durumunda üretim için kalıp ve zaman gereksinimi gibi nedenlerden dolayı kısa devre halka genişliği 6 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.6 Rotor yapısı ve kısa devre halkaları



Şekil 7.7 Kısa devre halka genişliğine göre verim ve kalkış moment oranı

### 7.3 Optimizasyon İçin Sarım Sayılarının Belirlenmesi

Bu bölümde, istenilen motor performansına yakın olan 3 farklı sarım sayısı belirlenmiş ve bu tasarımlar ayrı ayrı SEY ile analize tabi tutulmuştur. Sonuçlar farklı çıkış karakteristik özelliklerine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu 3 tasarım arasından prototip denemesi için en uygun görüleni bu karşılaştırmalara göre tercih edilmiştir. Tablo 7.1’de ilgili tasarımlara ait anma değerleri görülmektedir.

**Tablo 7.1** Farklı sargı opsiyonlarına ait tasarım değerleri

| Parametre                 | Anma Değerleri |         |         |
|---------------------------|----------------|---------|---------|
|                           | SARGI 1        | SARGI 2 | SARGI 3 |
| Gerilim (V)               | 220            | 220     | 220     |
| Frekans (Hz)              | 50             | 50      | 50      |
| Anma Gücü (W)             | 370            | 370     | 370     |
| $N_a/N_y$                 | 52/60          | 48/64   | 46/66   |
| $C_{daimi}(\mu F)$        | 20             | 20      | 20      |
| $R_a(\Omega, 20^\circ C)$ | 14.996         | 11.918  | 11.437  |
| $R_y(\Omega, 20^\circ C)$ | 8.665          | 10      | 10.341  |

Bu opsiyonlar için ilk olarak Rmxprt numerik analizleri yapılmış ardından 2D yapıları oluşturularak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Daha sonra aşağıdaki formüle uygun olarak verim değerleri, 0 devir/dakika anındaki moment değerlerinden ise KMO hesaplanmış ve karşılaştırmaya tabi tutulmuştur.

$$\eta = P_{\text{çıkış}} / (P_{\text{çıkış}} + P_k) \times 100 \quad (7.1)$$

Burada;  $\eta$ ,  $P_{\text{çıkış}}$ ,  $P_l$  sırasıyla olmak üzere verimi, çıkış (anma) gücünü ve toplam kayıp gücü temsil etmektedir. Bu bir elektrik motorunun genelleştirilmiş verim eşitliğidir. Toplam kayıp güç içerisinde; stator bakır kayıpları  $P_{scu}$ , kondansatör kayıpları  $P_{kond}$ , rotor iletken kayıpları  $P_{rcu}$ , nüve ya da manyetik malzeme kayıpları  $P_{nüve}$ , sürtünme – vantilasyon kayıpları ve ek kayıplar bulunmaktadır. Bu kayıp güçlerden sürtünme – vantilasyon kayıpları referans motorla aynı değerde kabul edilmiş, nüve ve rotor iletken kayıpları program tarafından geçici hal rejiminde her hız değeri için ayrı ayrı hesaplanmış, stator bakır kayıpları ile kondansatör kayıpları ( $R_{kond}$  kondansatörün iç direnci olmak üzere) ise aşağıdaki eşitlikler kullanılarak tespit edilmiştir;

$$P_{scu} = (I_a^2 \times R_a) + (I_y^2 \times R_y) \quad (7.2)$$

$$P_{kond} = I_y^2 \times R_{kond} \quad (7.3)$$

Yukarıda verilen eşitlikler ve Maxwell 2D analizden elde edilen değerler kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde ortaya çıkan sonuçlar Tablo 7.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 7.2** Farklı sargı opsiyonlarının 2D analize göre çıkış karakteristikleri ( $20\mu F$ )

| Parametre     | Anma Değerleri |         |         |
|---------------|----------------|---------|---------|
|               | SARGI 1        | SARGI 2 | SARGI 3 |
| Anma Gücü (W) | 371            | 372     | 371     |
| Verim (yüzde) | 74             | 71.89   | 69.45   |
| $J_a(A/mm^2)$ | 4.45           | 4.3     | 4.95    |
| $J_y(A/mm^2)$ | 4.8            | 5.78    | 6.15    |
| KMO           | 0.38           | 0.481   | 0.501   |

Burada;  $J_a$  ve  $J_y$  sırasıyla ana ve yardımcı sargıların akım yoğunluklarını temsil etmektedir. Asenkron motorların tamamında stator sargıları için akım yoğunluğu hesaplamalarda dikkate alınması gereken bir parametredir. Özellikle tek fazlı asenkron motorlarda akım yoğunlukları çok fazlı motorlara göre fazla gelebilir ki bunun sebeplerinden biri de dengesiz sistem ve düşük güç yoğunluğudur diyebiliriz. İlgili değer aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

$$J_a = \frac{I_a}{S_{anasargı}} \quad (7.4)$$

$$J_y = \frac{I_y}{S_{yrdsgı}} \quad (7.5)$$

Burada;  $S_{anasargı}$  ana sargının kesit alanını,  $S_{yrdsgı}$  ise yardımcı sargının kesit alanını ifade eder. Akım yoğunluğunun çok fazla olması sürekli çalışmada stator sargılarının fazla ısınmasına dolayısıyla uzun vadede iletkenlerin yanmasına ya da kısa devrelere neden olabilir, motorun ömrünün kısılmasına direkt olarak etki eder. Ayrıca bir noktadan sonra motordaki ısınmanın artması da direncin fazla yükselmesine ve stator bakır kayıplarındaki artıştan dolayı verimin azalmasına neden olabilir. Mümkün mertebe sargı ve kondansatör optimizasyonu ile verim ve moment iyileştirilmesi yapılan bu çalışmada sargı sıcaklık artışları ve buna bağlı olarak da ayrı ayrı ana ve yardımcı sargı akım yoğunlukları hassaten dikkate alınarak çalışma yapılmıştır.

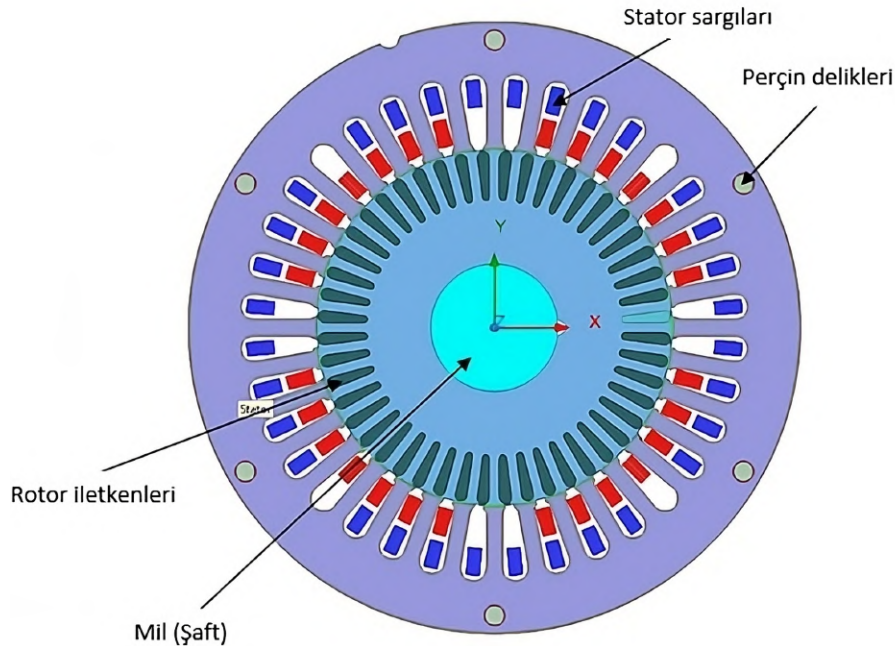
Tablo 7.2 incelenecek olursa; daha önce Rmxprt analiz sonuçlarından edindiğimiz

verim ve moment arasındaki ters orantılı ilişkiyi SEY ile de daha net görebiliyoruz. SARGI 1’de görüldüğü gibi verim açısından en iyi seçim gibi görünse de KMO 0,40’tan bile azdır. Öte yandan SARGI 3’te moment oranı daimi kondansatörlü bir motor için gayet iyi bir seviyede olsa dahi verim değeri diğer iki sargıdan daha düşük ve IE2 regülasyonunun minimum değerine daha yakındır. Bu gözlemlere göre SARGI 2 hem verim açısından regülasyon sınırının ortalarında hem de moment bakımından kabul edilebilir değerlerdedir. Dolayısıyla prototip üretimi için SARGI 2 tercih edilmiş ve elektromanyetik analiz sonuçları incelenmiştir.

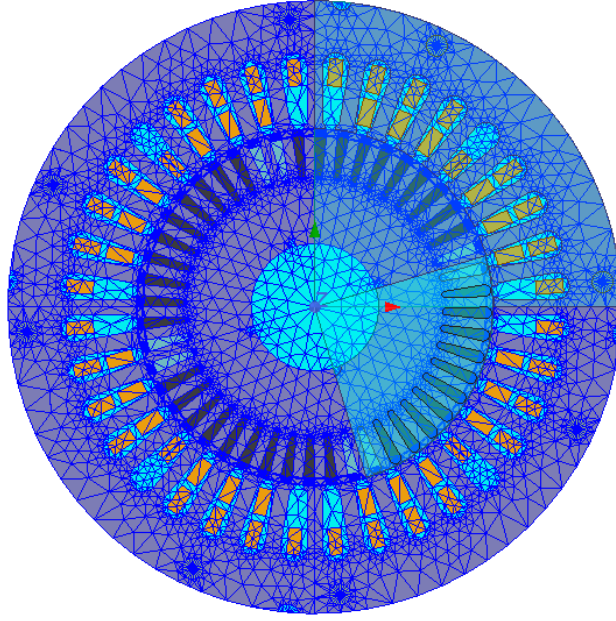
#### 7.4 Belirlenen Tasarımın Elektromanyetik Analizi

Bölüm 7.2.1’de kondansatör değerleri parametrik olarak atanmış ve sonuçların kıyaslanması neticesinde  $20 \mu F$  kapasiteli kondansatör kullanılmasına karar verilmiştir. Bölüm 7.2.2 ve 7.3’te elde edilen sonuçlara göre ise SARGI 2 olarak adlandırılan sarım bilgilerinin tercihi uygun görülmüştü.

Bu bölümde tercih edilen tasarım bilgileri kullanılarak Maxwell 2D yardımıyla SEY kullanılarak elektromanyetik analizler yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 7.8 ve 7.9’da IE2 verimli motor elde etmek için yapılan tasarımların elektromanyetik analizini yapabilmek için oluşturulan Maxwell 2D yapısı ve iterasyon işlemleri için üçgen ağ yapısı gösterilmektedir.

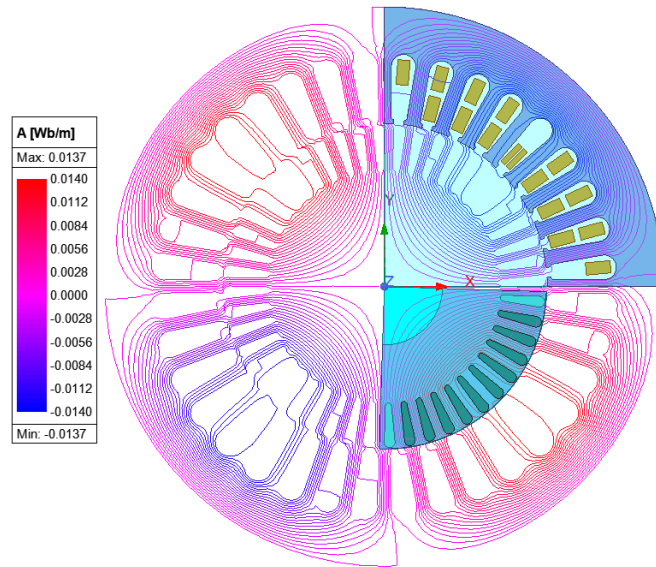


Şekil 7.8 IE2 verimli motor tasarımına ait 2D yapısı

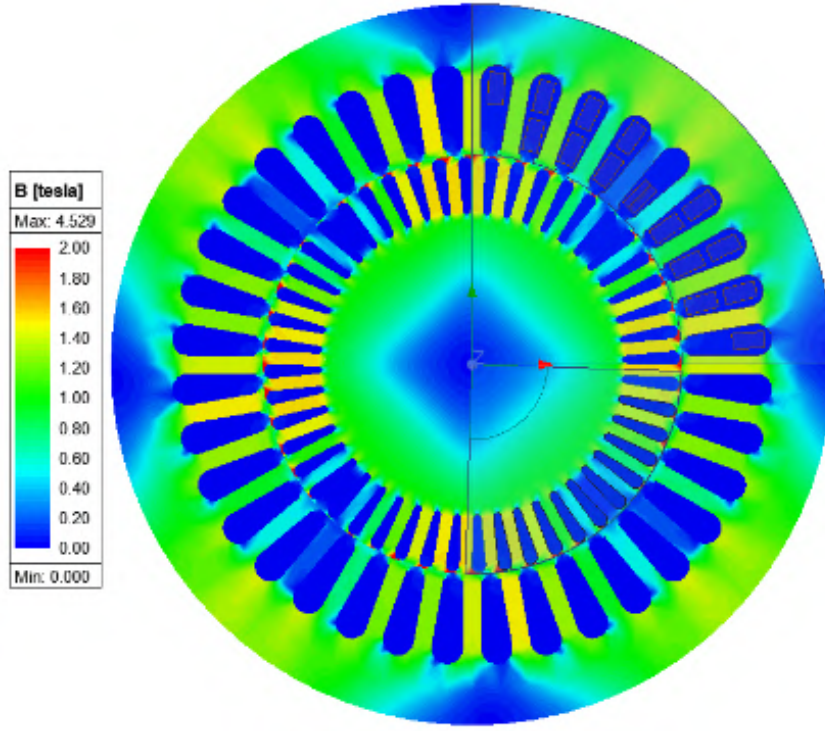


**Şekil 7.9** SEY analizi için SARGI 2 tasarımına ait ağ modeli

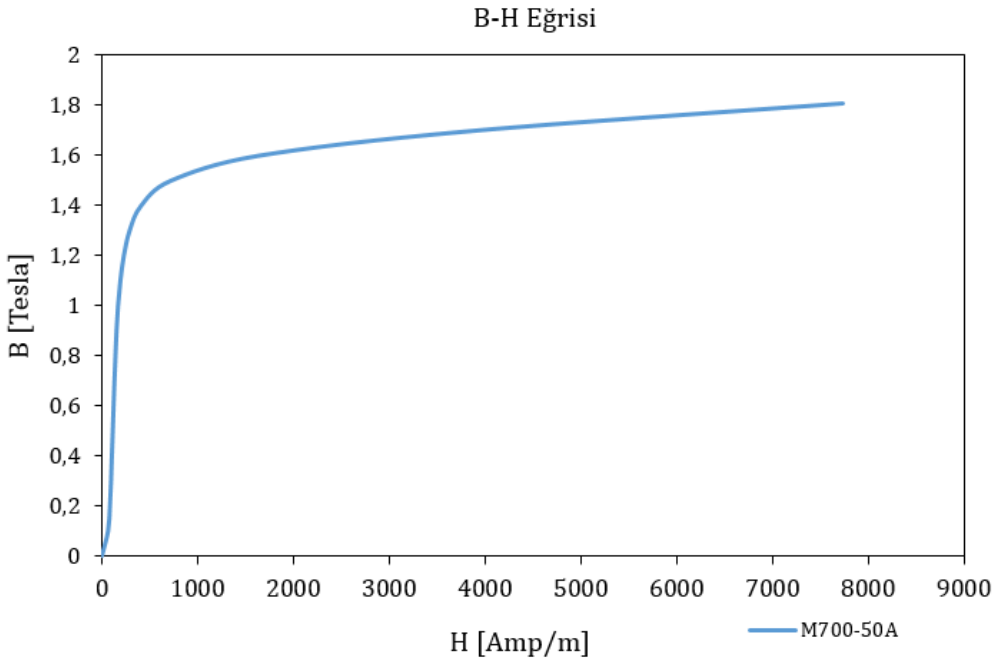
Bütün elektrik motorlarında olduğu gibi tek fazlı asenkron motorda da kullanılan manyetik malzemenin, sürekli çalışma durumunda doyuma gidip gitmemesi motor performansını doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur. Manyetik malzemenin özellikle stator nüvesi olmak üzere bunun yanı sıra rotor nüvesinde de doyuma gitmesi durumunda demanyetizasyon oluşacak ve motorun mevcut hacminden faydalanma imkanı azalacaktır. Bununla birlikte motordaki kaçak akılar da verimin düşmesine neden olacaktır. Bu yüzden hem akı yollarını hem de manyetik akı yoğunluğunun dağılımını görmek önemlidir. Bu doğrultuda aşağıdaki şekiller dikkate alınmalıdır.



**Şekil 7.10** Optimize edilmiş tasarıma ait manyetik akı yolları



Şekil 7.11 Optimize edilmiş tasarıma ait manyetik akı yoğunluğunun dağılımı

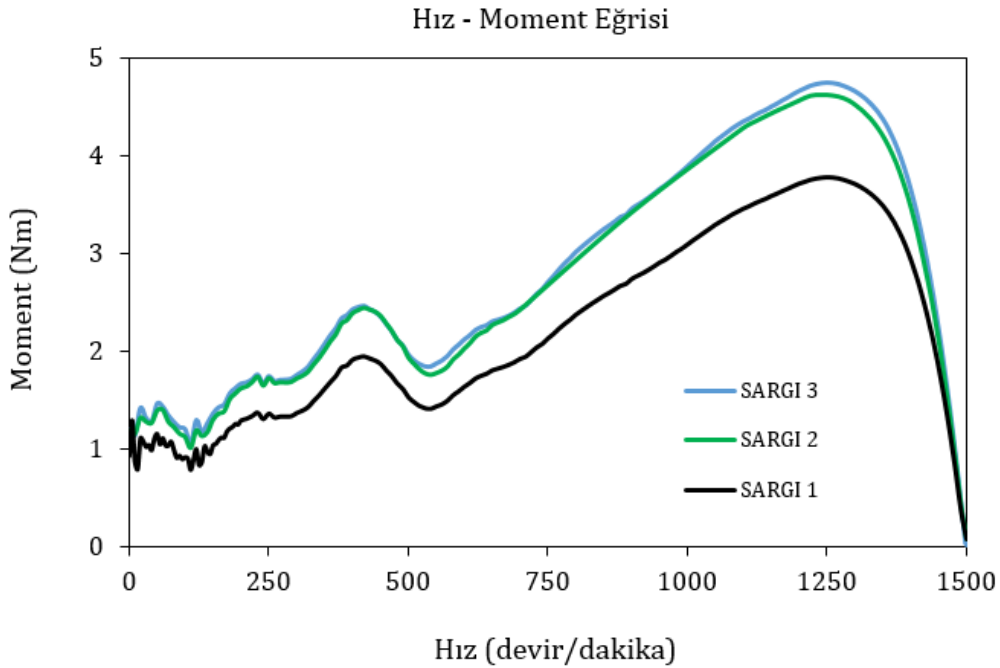


Şekil 7.12 Optimize edilmiş tasarımda kullanılan manyetik malzemeye ait B-H eğrisi

Burada manyetik malzemenin doyuma gidip gitmediğini anlamak için B-H eğrisine ihtiyacımız var. Bu çalışmada M700-50A sac malzemesi kullanılmış olup B-H eğrisi Şekil 7.12’de verilmiştir. Bu eğriye göre; ilgili malzeme 1,8 – 2 T arasında

doymaya girmeye başlamaktadır. Bu durumda Şekil 7.11’de kırmızı bölge ne kadar azsa motor doymadan o kadar uzakta çalışıyor demektir. Bunun yanı sıra 1,2 T altına düşmeye başladıkça da yine malzemeden faydalanma olasılığı azalmakta, malzeme demanyetize olmasa bile motor gereğinden az manyetik akı ile çıkış gücü elde etmeye çalıştığı için verim değeri bu durumda da düşük kalacaktır. Dolayısıyla malzemeden en iyi derecede yararlanmak için mevcut hacimde ortalama olarak B-H eğrisinin kırılma noktası ya da biraz altında yani 1,3 – 1,7 T bölgelerinde çalışma yapılması yararlı olacaktır.

SEY ile elektromanyetik analiz sayesinde motorun nüve ve rotor kayıplarını, sargı endüktanslarını, endüklenen gerilimi, akı ve akım yoğunluğunu ve elektromanyetik momenti görebiliriz. Bu doğrultuda optimizasyon yapılmış tasarıma ait bazı değerler aşağıdaki şekillerde görülmektedir. İlk olarak 3 farklı sargıya ait hız – moment eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiş ve aralarındaki fark gözlemlenmiştir.

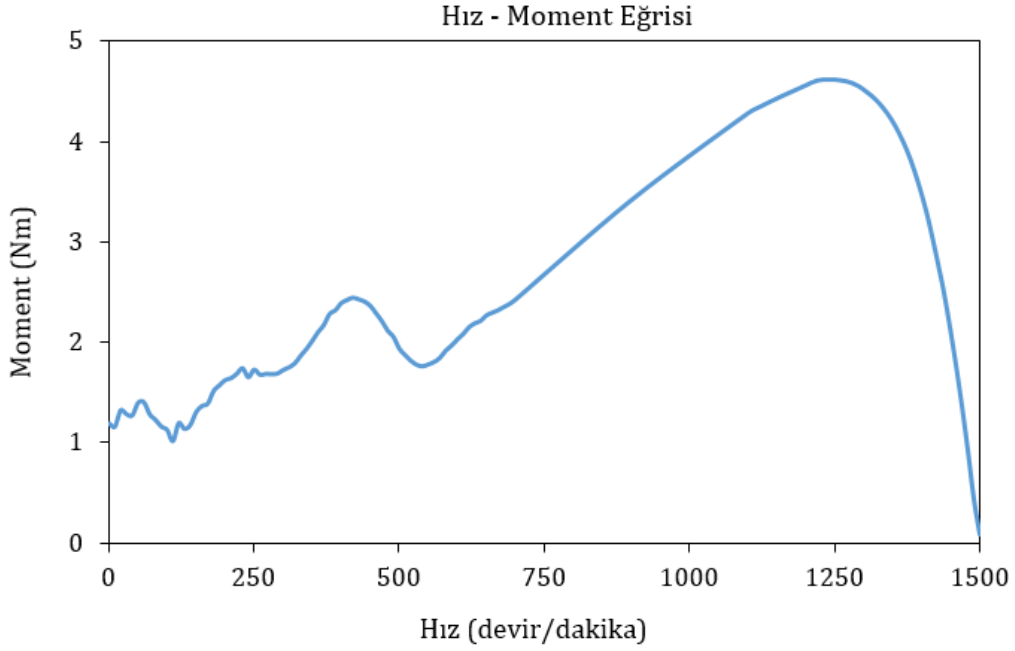


**Şekil 7.13** Farklı sargı opsiyonlarının karşılaştırmalı hız – moment eğrisi

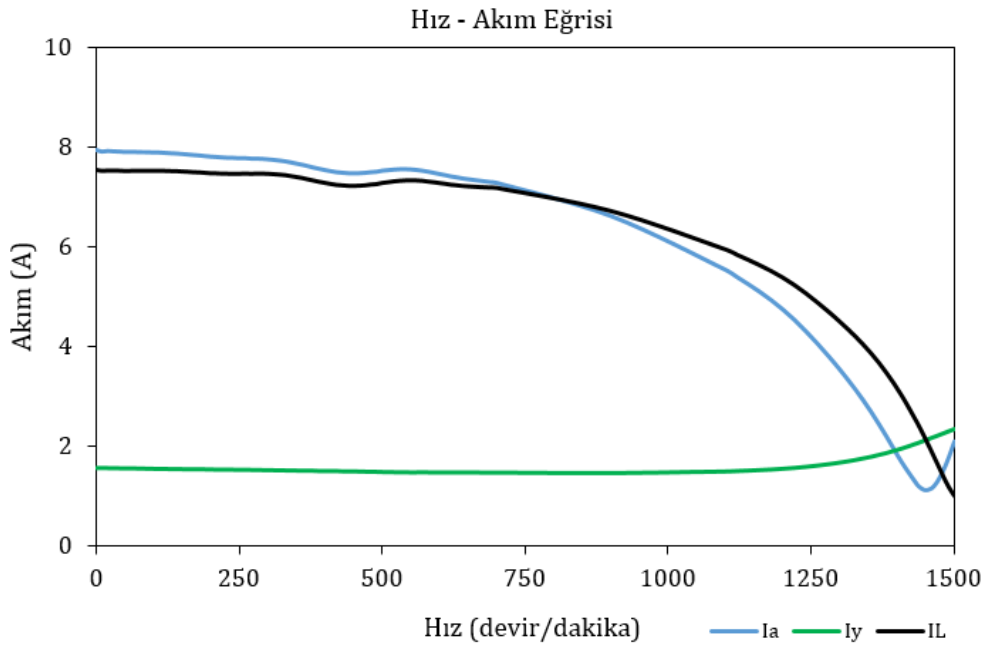
Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere sargının 1. opsiyonunda hem kalkış anındaki hem de sürekli çalışma durumundaki anma moment değerleri çok düşük gelmektedir. Diğer iki opsiyon birbirine yakın olmasına karşın bu noktada verim değerleri göz önüne alınarak 2. Opsiyona ait sarım bilgileri tercih edilmiştir.

Şekil 7.15 ve 7.16 incelendiğinde, anma hızında; ana sargı akımı ( $I_a$ ) 1,177 A yardımcı sargı akımı ( $I_y$ ) 2,03 A ve nüve kaybı ( $P_{nüve}$ ) 21 W, rotor iletken kaybı ( $P_{rcu}$ ) 22,9 W olarak tespit edilebilir. Şekil 7.14’ten ise 0 devir/dakika anında

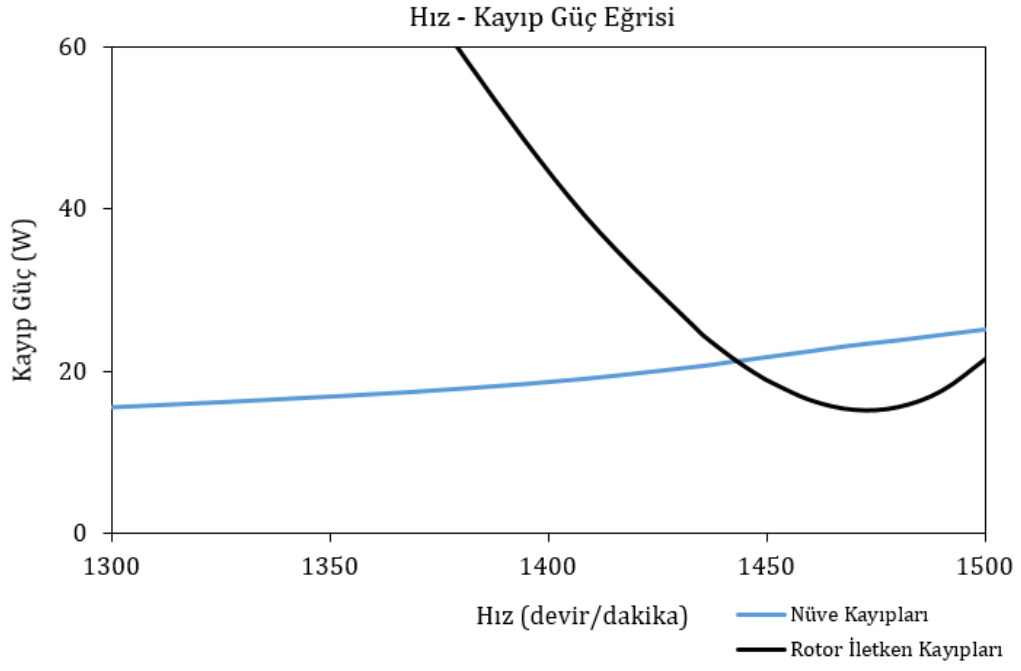
moment değeri 1,187 Nm olarak ölçülmüştür. Bu durumda; eşitlik (7.1), (7.2), (7.3) kullanılarak elde edilen verim değeri yüzde 71,89'dur. Kalkış moment oranı ise ( $M_k/M_n$ ) 0,481 olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları prototip üretimi için uygun görülmüş ve prototip motora ait tip test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7.14 Optimizasyonu yapılan tasarıma ait hız – moment eğrisi (SEY)



Şekil 7.15 Optimizasyonu yapılan tasarıma ait hız – akım eğrisi (SEY)

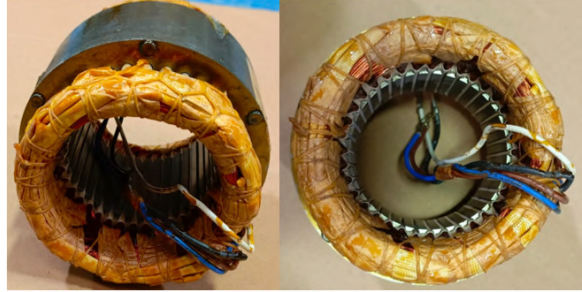


Şekil 7.16 Optimizasyonu yapılan tasarıma ait hız – kayıp güç eğrisi (SEY)

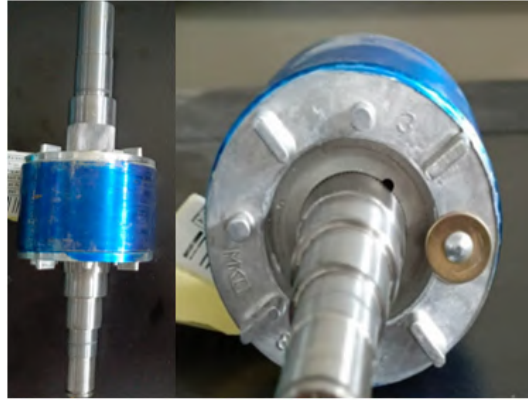
# 8

## PROTOTİP ÜRETİMİ VE DENEYSEL DOĞRULAMA

Bu bölümde SEY ile elektromanyetik analizi yapılan 80 tip, 0,37 kW, 4 kutuplu motor tasarımının prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve verim, moment, akım yoğunluğu, sıcaklık artışı, güç faktörü, KMO gibi tek fazlı asenkron motorun endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi için kritik öneme sahip bazı çıkış karakteristikleri bakımından incelenmiştir. Ayrıca motorun kullanılabilirliğini görmek için fan uygulamalarında saha testine tabi tutulmuş, seri üretim ve endüstriyel uygulama için olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 8.1’de prototip motora ait verniklenmiş sargılı stator ve milli rotora görselleri mevcuttur.



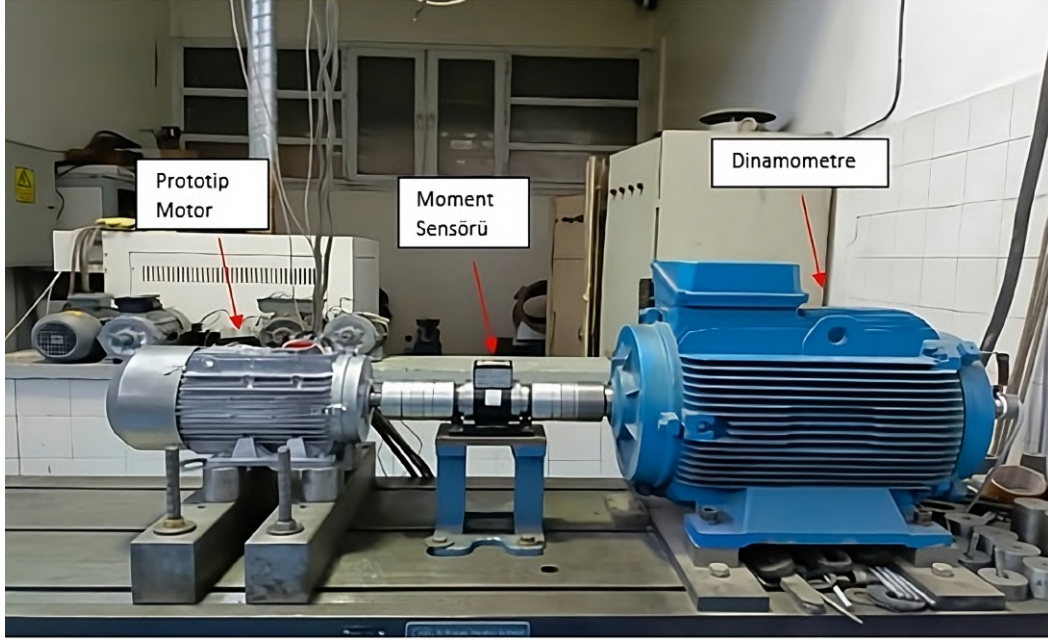
(a)



(b)

**Şekil 8.1** Prototip motora ait (a) verniklenmiş sargılı stator ve (b) milli rotor

220 V 50 Hz kaynaktan beslenerek tam yük altında (0,37 kW) ısıl rejime ulaşıncaya kadar test edilmiş, ardından kilitli rotor testi ile hız – moment eğrisi çizdirilerek kalkış ve semer moment değerleri ölçülmüştür. Test sistemine ait görsel Şekil 8.2’de verilmiştir.



**Şekil 8.2** Gamak Elektrik Motorları Ar-Ge laboratuvarı test sistemi, 80 tip 4 kutup 0,37 kW tek fazlı asenkron motor prototip testi

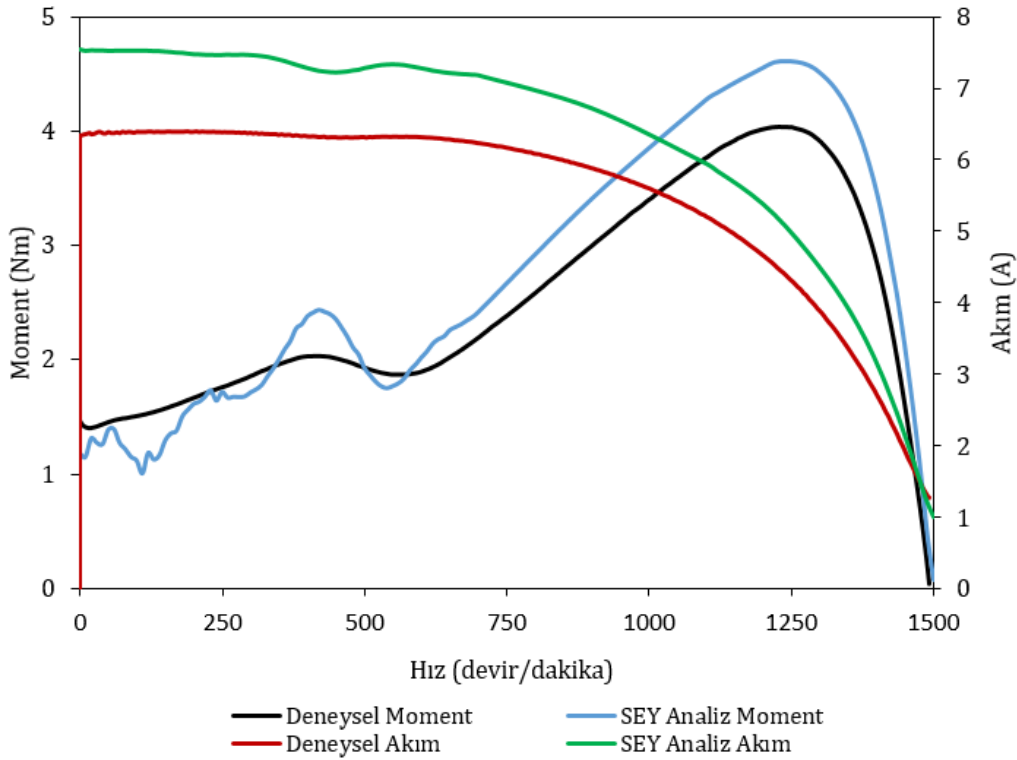
Analiz sonuçları ile prototip sonuçlarını daha iyi karşılaştırabilmek için kilitli rotor test sonuçlarını bir arada gösteren grafik Şekil 8.3’te verilmiştir.

Şekil 8.3 incelenecek olursa aşağıdaki çıkarımlar elde edilebilir;

- Prototip motora ait kalkış akımı analize göre daha düşük gelmektedir. Bu durumda yol alma anında şebekeden çekilen enerji beklenenden az olmakla birlikte sargıların ömrü üzerinde de olumlu bir etkiye sahip olacaktır,
- Prototip motora ait kalkış momenti analize göre daha yüksektir. Analiz ve test arasında hata payı olsa da mevcut durumda bu hata olumlu sonuçlar ortaya koymuştur. KMO beklenen değerden daha fazla gelecek ve motora bağlanan yükü daha sağlıklı çalıştırmasını sağlayacaktır,
- Prototip motora ait semer momenti analize göre daha yüksek gelmektedir. Bir asenkron motorda kalkış momenti kadar semer momenti de önemlidir. Semer momentinin düşük olması sonucunda motor ilk anda yol alsa da semer

noktasına ulaştığında mile akuple edilen yük momentini karşılayamayabilir ve neticede motor bayılabilir ya da durabilir. Burada semer noktasının beklenenden yüksek gelmesi bayılma gibi dezavantajları ortadan kaldırmak için önemli bir sonuçtur,

- Prototip motora ait devrilme momenti analize göre daha düşüktür. Bu durum olumsuz olarak motorun servis faktörünü ya da aşırı yük durumlarında yüklenebilirliğini beklenen değere göre azaltacaktır.



**Şekil 8.3** Prototip test ve analiz sonuçlarına ait, hıza göre akım ve moment değerleri

Analiz ve test sonucunda elde edilen veriler Tablo 8.1'de sıralı şekilde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Yapılan tasarım ile üretilen motorun performansı karşılaştırıldığında; tasarımın önceliği olan verim ve KMO değerleri standartlara uygun sonuçlanmıştır. Verimde yüzde 2,2 oranında bir hata olsa da IEC 60034-30-1 verim standartlarına uygundur. Bu noktada son olarak IE1 verime sahip referans motor ile IE2 olarak tasarlanan yeni motorun tasarım parametrelerini ve performanslarını karşılaştırmak için Tablo 8.2 ve 8.3 oluşturulmuştur.

**Tablo 8.1** Optimizasyonu yapılan tasarıma ait SEY analiz sonuçları ve prototip motora ait test sonuçları

| Parametre         | SEY Analizi | Ölçülen Değer |
|-------------------|-------------|---------------|
| Hız(devir/dakika) | 1439        | 1418          |
| Moment (Nm)       | 2.468       | 2.497         |
| Anma Gücü (W)     | 372         | 371           |
| Verim (yüzde)     | 71.89       | 70.29         |
| KMO               | 0.481       | 0.58          |
| Güç Faktörü       | 0.99        | 0.97          |
| IL(A)             | 2.378       | 2.474         |
| $I_a$ (A)         | 1.177       | 1.432         |
| $I_y$ (A)         | 2.06        | 2.065         |

**Tablo 8.2** IE1 ve IE2 motorlara ait tasarım parametreleri

| Parametre   | IE1 MOTOR      | IE2 MOTOR      |
|-------------|----------------|----------------|
| $N_a/N_y$   | 67/70          | 48/64          |
| $C_{daimi}$ | 15 $\mu$ F     | 20 $\mu$ F     |
| $R_a$       | 9.35 $\Omega$  | 12.60 $\Omega$ |
| $R_y$       | 21.20 $\Omega$ | 10.32 $\Omega$ |

**Tablo 8.3** IE1 ve IE2 motorların deneysel sonuçları

| Parametre         | IE1 MOTOR | IE2 MOTOR |
|-------------------|-----------|-----------|
| Hız(devir/dakika) | 1414      | 1418      |
| Moment (Nm)       | 2505      | 2.497     |
| Anma Gücü (W)     | 371       | 371       |
| Verim (yüzde)     | 64.2      | 70.29     |
| KMO               | 0.54      | 0.58      |
| Güç Faktörü       | 0.98      | 0.97      |
| IL(A)             | 2.658     | 2.474     |
| $I_a$ (A)         | 1.976     | 1.432     |
| $I_y$ (A)         | 1.708     | 2.065     |
| $\Delta T$ (K)    | 54        | 34        |

Referans motorun stator bakır kaybı 98,35 W iken önerilen tasarımın stator bakır kaybı 69,84 W değerlerindedir. Kondansatör iç direncinden kaynaklanan kondansatör kayıplarının eşit olduğunu söylemek mümkündür. Sargı ve kondansatör seçimi kayıp güçlerin azaltılmasını sağlarken, yardımcı sargı ve kondansatör kombinasyonu kalkış moment oranının artırılmasını sağlamıştır. Verim ve KMO karakteristiklerinin arasında ters orantılı bir ilişki olduğunu daha önceki bölümlerde görmüştük. Fakat bu çalışma; tek fazlı asenkron motorda stator ve rotor laminasyonlarının önemi kadar sargı ve kondansatör optimizasyonunun da önemine değinmiş ve maliyeti arttırmadan hem verimi hem de yol alma performansını iyileştirmeyi amaçlamış ve ilgili tasarımı deneysel

olarak doğrulamıştır. İlgili motor için laboratuvar testlerinin yanı sıra saha uygulamalarında testleri de yapılmıştır. Çalışılan motor fan, sirkülasyon pompası, küçük güç gerektiren bazı vinç uygulamaları, karma makineleri gibi endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Şekil 8.4'te motorun farklı kullanıcılarda yapılan testine ait görseller mevcuttur.



**Şekil 8.4** Prototip olarak üretilen motorun saha uygulamalarındaki testleri

Yapılan saha testlerinde seri üretime uygunluğu tespit edilmiştir.

# 9

## SONUÇ

---

Son yıllarda enerji verimliliği ve ham madde yönetimi daha önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda üreticiler düşük maliyetli fakat yüksek verimli ürünler üretmek için Ar-Ge çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Elektrik motorları, endüstrideki elektrik enerjisi tüketen ekipmanlardan en geniş yelpazeye sahip olanıdır. Toplam elektrik tüketiminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu sebepler göz önüne alındığında; hem kullanıcıların gereksinimini karşılayabilen, hem üretici için maliyeti az olan, hem de yine tüketicinin enerji ihtiyacını düşük maliyetle karşılayan verimli motorların tasarım ve üretimi önemli hale gelmiştir.

Bu çalışmada; IE1 verim sınıfında 80 tip, 0,37 kW, 4 kutup tek fazlı asenkron motor referans olarak alınmış, referans motorun laminasyonları aynıyle kullanılmış ve IEC regülasyonuna göre IE2 verim sınıfında bir motor tasarımı önerilmiştir.

Tablo 8.2 ve 8.3'teki bilgilere göre;

- Toplam dirençteki azalma ve dolayısıyla motor verimliliğindeki artış, önerilen tasarımı doğrulamıştır,
- Verim ve KMO ters orantılı olmasına rağmen, yapılan optimizasyon çalışması ile hem verim hem de KMO arttırılmış,
- Önerilen tasarımla, referans motora göre sargılardaki sıcaklık artışları azaltılmış ve böylelikle IE2 motorun ömrü uzatılmıştır.

Sonuç olarak; önerilen tasarım ile referans motora kıyasla daha verimli, yük altında daha sağlıklı çalışma koşullarına sahip ve kullanım ömrü daha fazla olan bir motor üretilmiştir. Bu sayede enerji tüketim maliyetini saatte yüzde 8,66 oranında azaltacaktır. Ayrıca bu tasarımda kalıp maliyetlerinden, daha fazla manyetik

malzeme hacminden ve fazla iletken malzeme kullanımından kaçınılmış ve referans motora kıyasla maliyet farkı doğmasının önüne geçilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan elektromanyetik analizler ve bu analizleri doğrulamak için üretilen prototip motor gösteriyor ki; sargı optimizasyonu ve kondansatörün iyi bir kombinasyonu ile daha daha verimli ve uygun maliyetli tek fazlı asenkron motorları üretmek mümkündür.

Çevre kirliliğinin ve tüketim maliyetlerinin her geçen gün arttığı fakat bununla birlikte hayatın her alanındaki üretimin genişlemesi, sanayinin makineleşmesi gibi nedenlerden dolayı enerji tüketiminin de aynı hızla ilerlediği günümüzde; verimli ve uygun maliyetli enerji tüketimi uluslararası düzeyde önemli bir konu olmaya devam etmektedir. Bu nedenle konu ilgili bilimsel araştırmaların temel amacı olacak ve elektrik motorlarında verimliliği artırma arayışı gelecekte hız kazanacaktır. Bu bağlamda; manyetik ve iletken malzeme teknolojisindeki gelişmeler verimlilik çalışmalarında geleceğe dönük kapı aralayabilir. Seri üretim teknolojilerinin ve maliyetlerin belirlediği sınırlar içinde tek fazlı asenkron motor için stator ve rotor yapısıyla ilgili yeni çalışmalar yapılabilir. Bunların yanı sıra sürtünme ve ısınma kayıpları da güç kaybına ve verimin azalmasına neden olur. Bundan yola çıkarak yeni soğutma teknolojileri üzerine de ilerleyen yıllarda çalışmalar yapılacaktır.

- [1] M. Mitolo M. Tartaglia, “Galileo Ferraris-A Life Dedicated to the Electric Sciences [History],” *IEEE Industry Applications Magazine*, c. 22, no. 5, ss. 8–11, 2016.
- [2] *Galileo Ferraris*. erişim adresi: [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Ferraris](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Ferraris) (erişim tarihi 24/03/2005).
- [3] *Elektro-Manyetik Motor*. erişim adresi: <https://patents.google.com/patent/US382279A/en> (erişim tarihi 01/05/1888).
- [4] M. K. Sarioglu, *Asenkron makinalar*. ITU, 1983.
- [5] B. G. Lamme, “The story of the induction motor,” *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, c. 40, no. 3, ss. 203–223, 1921.
- [6] P. Trickey, “An analysis of the shaded pole motor,” *Electrical Engineering*, c. 55, no. 9, ss. 1007–1014, 1936.
- [7] C. F. Lomont F. Dunleavy, “The AC electrolytic capacitor,” *Electrical Engineering*, c. 54, no. 10, ss. 1058–1063, 1935.
- [8] W. J. Morrill, “The revolving field theory of the capacitor motor,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, c. 48, no. 2, ss. 614–629, 1929.
- [9] O. J. Smith, “High-efficiency single-phase motor,” *IEEE transactions on energy conversion*, c. 7, no. 3, ss. 560–569, 1992.
- [10] H. Zhong, X. Wang Y. Pei, “Modeling and simulation of a novel high efficiency single-phase motor,” *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, IEEE, 2011, ss. 1256–1259.
- [11] H. Zhong, X. Wang, D. Wang D. Qiao, “Analysis and design of a new type high-efficiency single-phase induction motor based on negative sequence magnetic field compensation,” *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, IEEE, 2008, ss. 3962–3966.
- [12] A. S. Abdel-Khalik, M. S. Diab, S. Ahmed A. M. Massoud, “A new single tooth winding layout for a single-phase induction motor with segmented stator,” *IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2015, ss. 000 102–000 107.
- [13] M. Iorgulescu, “Study of single phase induction motor with aluminium versus copper stator winding,” *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, IEEE, 2016, ss. 1–5.
- [14] D. T. Peters, E. F. Brush J. L. Kirtley, “Die-cast copper rotors as strategy for improving induction motor efficiency,” *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, IEEE, 2007, ss. 322–327.

- [15] C. Ye, K. Du, K. Liu, Y. Zhao, J. Zhang L. Qin, "Optimum design of single phase induction motor with copper rotor based on improved polyhedron method," *2021 IEEE 4th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS)*, IEEE, 2021, ss. 1–6.
- [16] Y. L. Karnavas I. D. Chasiotis, "Design and manufacturing of a single-phase induction motor: a decision aid tool approach," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 27, no. 9, e2357, 2017.
- [17] J. S. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. New York :McGraw-Hill, 2005.
- [18] D. Y. Um G. S. Park, "Determination scheme of stator parameters for making rotating fields circular in a single-phase induction motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 56, no. 1, ss. 1–5, 2019.
- [19] V. Hrabovcova, L. Kalamen, P. Sekerak P. Rafajdus, "Determination of single phase induction motor parameters," *SPEEDAM 2010*, IEEE, 2010, ss. 287–292.
- [20] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*. Pearson Educacion, 2006.
- [21] A. Fitzgerald, "Kingsley y Umans," *Electric Machinery*, c. 5, 1983.
- [22] P. C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics, International Adaptation*. John Wiley Sons, 2021.
- [23] E. T. Ribisi P. Freere, "Reduced starting current for single phase capacitor induction motors while maintaining starting torque," *2019 IEEE AFRICON*, IEEE, 2019, ss. 1–9.
- [24] V. Sarac G. Stefanov, "Permanently split capacitor motor-study of the design parameters," *Journal of Electrical Engineering*, c. 68, no. 5, ss. 339–348, 2017.
- [25] V. Sarac N. Trajchevski, "Impact of capacitor on operating characteristics of single-phase motor," *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, IEEE, 2019, ss. 1–5.
- [26] A. Karmakar, N. R. Roy, R. Mukherjee, P. K. Saha G. K. Panda, "DQ axis modelling analysis of a shaded pole induction motor and study of the non-linear behaviour," *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, IEEE, 2013, ss. 596–600.
- [27] A. Dalcali M. Akbaba, "Comparison of 2D and 3D magnetic field analysis of single-phase shaded pole induction motors," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 19, no. 1, ss. 1–7, 2016.
- [28] S. Sahdev, *Electrical machines*. Cambridge University Press, 2017.
- [29] S. Nasar, *The induction machines design handbook*. CRC press, 2010.
- [30] J. Pyrhonen, *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley-VCH, 2013, c. 1.
- [31] T. Bodurouglu, *Elektrik makinalari dersleri: teori, hesap ve konstruksiyon*. Teknik Universite Matbaasi, 1984.

- [32] *Manyetik Motor*. erişim adresi: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/104321/8d1e44b286384bae9a9257f9d87f7f2b/IEC-60072-1-2022.pdf>.
- [33] I. D. Chasiotis Y. L. Karnavas, “On the design and manufacturing of small single phase induction motors toward super premium efficiency standards,” *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, c. 1, 2020, ss. 2321–2327.
- [34] E. Abunike, O. Okoro G. Umoh, “Steady and dynamic states analysis of induction motor: Fea approach,” *Nigerian Journal of Technology*, c. 36, no. 4, ss. 1202–1207, 2017.
- [35] Y. Bensalem M. N. Abdelkrim, “Modeling and simulation of induction motor based on finite element analysis,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, c. 7, no. 4, 2016.
- [36] A. Soman, N. Lokhande D. Bhardwaj, “Performance and analysis of 3 phase induction motor using ANSYS Maxwell,” *International journal of pure and applied mathematics*, c. 118, no. 16, ss. 269–281, 2018.
- [37] M. Feyzi H. Kalankesh, “Optimization of induction motor design by using the finite element method,” *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2001. Conference Proceedings (Cat. No. 01TH8555)*, IEEE, c. 2, 2001, ss. 845–850.
- [38] R. W. Fei J. D. Lloyd, “Design and test analysis of single-phase induction motors with 4-8 pole common winding,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 31, no. 6, ss. 1437–1440, 1995.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### **Makale**

1. Deveci, U. M. and Ayçiçek, E. (2025). Cost-effective IE2 high-efficiency single-phase induction motor design and prototyping. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 61, 101921.